
Rapport SGC 039

**PULSERANDE FÖRBRÄNNING
FÖR TORKÄNDAMÅL**

Sten Hermodsson
Lunds Tekniska Högskola

September 1993



Rapport SGC 039

PULSERANDE FÖRBRÄNNING FÖR TORKÄNDAMÅL

**Sten Hermodsson
Lunds Tekniska Högskola**

September 1993

SGC:s FÖRORD

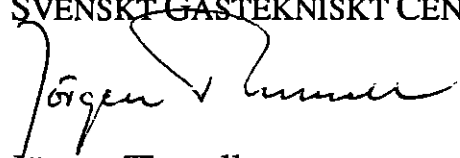
FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns i slutet på denna rapport.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydgas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Malmö Energi AB, Lunds Energi AB och Helsingborg Energi AB.

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Jörgen Thunell

Examensarbete om

Pulserande förbränning för torkändamål

Pulstorkningens fördelar, apparatur och
potentialen på den svenska marknaden.

av

Sten Hermodsson
Lunds Tekniska Högskola
September 1993

Handledare
Stig Stenström, Kemisk Apparatteknik, LTH
Per-Arne Persson, Svenskt Gastekniskt Center AB

Sammanfattning

Vid pulserande förbränning sker antändning och förbränning av bränslet periodiskt. Det resulterar i att producerade avgaser lämnar förbränningsrummet i pulser. Fenomenet medför en effektivare förbränning, vilket reducerar utsläpp av t ex sot och kväveoxider. Dessutom erhålls en väsentligt bättre värmeöverföring mellan de varma förbränningsgaserna och dess kontaktytor. Denna egenskap har blivit alltmer intressant under de senaste årtiondena och har utnyttjats till att bl a bygga effektivare värmepannor. Framgångsrik utveckling de senaste åren har även lett till att användning av pulserande förbränning för torkändamål blivit aktuellt. Torkprocesser är mycket energikrävande och dess effektivitet är till stor del beroende av en effektiv värmeöverföring. Om torkprocessen utförs i pulserande förbränningsgaser förbättras därför torkhastigheten och torkanläggningarna kan byggas kompaktare. Dessutom minskar energianvändningen.

Orsaken till den förbättrade värmeöverföringen och den ökade torkhastigheten är omdiskuterad. Forskning som syftar till att i detalj förstå vilka faktorer som påverkas av det pulserande flödet, och utifrån det ställa upp matematiska samband för pulsernas påverkan, är något som allttjämt pågår. En stor förklaring till den förbättrade värmeöverföringen ligger i att pulserna förstärker turbulensen i förbränningsgaserna. En ökad turbulens ger som bekant en bättre värmeöverföring.

På marknaden finns idag ett torksystem som utvecklats kring pulserande förbränning. Pulstorken, som tillverkas av det amerikanska företaget Bepex, är avsedd för pumpbara lösningar och konkurrerar framförallt med spraytorkar. Torkmetoden är speciellt fördelaktig vid torkning av värmekänsliga material, men även för andra material kan metoden vara gynnsam. Både investeringskostnaden och driftskostnaden är generellt lägre än för motsvarande spraytorkar. Det finns även möjlighet att använda pulsbrännare i rotertorkar. För bl a detta ändamål har företaget Sonotech i Atlanta, USA, utvecklat en pulsbrännare. Brännaren är speciell på så sätt att den kan anpassas till olika sorters torkkammare. Den kan också arbeta tillsammans med en redan befintlig brännare för att enkelt förbättra gamla torkanläggningar.

Trots de fördelar som finns vid användning av pulsbrännare för torkning finns även en del problem. För att kunna utnyttja den effektiva värmeöverföringen måste torkmaterialet vara i direkt kontakt med förbränningsgaserna. Risker finns då att materialet tar upp eventuella föroreningar, vilket begränsar möjligheten till torkning av vissa produkter, t ex livsmedel. Dessutom kan inte alla material dra lika stor nytta av den förbättrade värmeöverföringen från de pulserande avgaserna. De mest gynnsamma materialen är sannolikt de som har en hög halt ytfukt, eftersom förångningen av inre fukt knappast påverkas av pulserna i någon nämnvärd omfattning.

En bedömning av vilka områden inom den svenska industrin som kan dra nytta av pulsbrännare för torkning visar på en relativt begränsad marknad. Framförallt beror detta på att det är förbjudet att torka livsmedel i direkt kontakt med rökgaser. Trots det är torkning med pulserande förbränningsgaser intressant och ett område som sannolikt kommer att utvecklas.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
2. Funktion, uppbyggnad och egenskaper hos pulsbrännaren	2
2.1 Funktion	2
2.2 Uppbyggnad	3
2.3 Frekvens och amplitud hos uppkomna pulser	4
2.4 Fördelar med pulsbrännare	5
2.5 Nackdelar med pulsbrännare	5
3. Kort historik om pulserande förbränning	6
4. Grundläggande torkteori	7
4.1 Torkförloppet	7
4.2 Konstanta hastighetsperioden	8
4.2 Avtagande hastighetsperioden	8
5. Pulsernas påverkan på torkförloppet	10
5.1 Påverkan på torkhastigheten	10
5.2 Möjlighet till högre ingångstemperatur och bättre produktkvalitet	12
6. Matematiska modeller för pulsernas påverkan på värmeöverföringen	13
6.1 Anpassning av befintliga modeller till ökad medelhastighet	13
6.1.1 Modell för värmeöverföringen i tub vid pulserande förhållanden	13
6.1.2 Tänkbar modell för värmeöverföringen vid torkning	14
6.2 Modell för förångningen från en yta utifrån teori i mikroskala	15
6.3 Modell för förångningen av vattendroppar utifrån teori i mikroskala	16
6.3.1 Konstruktion av modellen	16
6.3.2 Beräkningar och slutsatser utifrån modellen	19
7. Sonotech's pulsbrännare Cello®	22
7.1 Inledning	22
7.2 Användningsområden	22
7.3 Utvecklingsarbetet	23
7.3.1 Pulsbrännaren	23
7.3.2 Möjligheten att använda pulsbrännaren i processer	24
7.3.3 Förångning av vattendroppar	25
7.3.4 Torkning av kaolin	26
7.3.5 Kalcinering av kalksten	27
7.4 Nuvarande anläggning och status	28
8. Bepex's pulstork Unison™	29
8.1 Inledning	29
8.2 Användningsområde	
8.3 Utvecklingsarbetet	29
8.3.1 Pulsbrännaren	29
8.3.2 Utveckling av torkkammare och inledande produkttester	30

8.4 Kommersiella anläggningen	31
8.4.1 Tekniska prestande	31
8.4.2 Funktion	32
8.4.3 Testade produkter och dess kvalitet	34
9. Pulser skapade med ljud	36
10. Val av torkmetod	37
10.1 Vad påverkar valet	37
10.2 Föreningar i rökgaserna	38
10.2.1 Föreningshalter i rökgaserna och pulsernas inverkan på dessa	38
10.2.2 Risker med direkt kontakt mellan produkt och rökgaser.	39
11. Torkanvändningen inom svensk industri	40
11.1 Energianvändningen för torkning	40
11.2 Torkanvändningen inom olika branschområden	40
11.2.1 Inledning	40
11.2.2 Baskemiska sektorn	41
11.2.3 Sockerindustrin	41
11.2.4 Livsmedelsindustrin	41
11.2.5 Massa- och pappersindustrin	42
11.2.6 Jordbruksindustrin	42
11.2.7 Annan industri	42
12. Intressanta marknadsområden för pulstorkar inom svensk industri	44
12.1 Generella hinder och möjligheter	44
12.2 Schema över intressanta områden	45
12.3 Potentialen inom olika branschområden	45
12.3.1 Inledning	45
12.3.2 Baskemiska sektorn	45
12.3.3 Sockerindustrin	46
12.3.4 Livsmedelsindustrin	46
12.3.5 Massa- och pappersindustrin	46
12.3.6 Jordbruksindustrin	47
12.3.7 Annan industri	47
12.4 Kostnadsberäkning på specifikt fall	48
13. Marknadsföringsfrågor	49
13.1 Industriell marknadsföring	49
13.2 Möjligheten att introducera en pulstork på marknaden	49
14. Slutsatser	51
15. Referenslista	52
Appendix	
A. Exempel på ekvationer för bestämning av värmeöverföringstalet	

1. Inledning

Genom att använda pulserande förbränningsgaser som värmande medie vid torkning kan en effektivare torkprocess erhållas. Orsaken är en förbättrad värmeöverföring mellan den varma gasen och torkgodset. Den effektiva processen resulterar i en högre torkhastighet, vilket möjliggör kortare uppehållstid för torkgodset i de heta gaserna. Pulsernas effektiva omblandning bidrar till en jämnare temperaturfördelning i torkluften och därmed också i torkgodset, vilket är gynnsamt för värme-känsliga material. Temperaturen på ingående gaser kan också hållas högre, vilket minskar den luftmängd som behövs för torkning. Slutresultatet blir att torkanläggningarna kan byggas kompaktare och billigare. Dessutom kan driftskostnaden sänkas.

Denna rapport redovisar ett examensarbete som syftar till att belysa vilka möjligheter och svårigheter som finns med att använda pulserande förbränning för torkändamål. Rapporten kan i stort sett delas upp i fyra delar. Den första delen syftar till att ge en grundläggande förståelse för fenomenet pulserande förbränning och en bakgrund till vilka faktorer som inverkar under ett torkförlopp. Därefter följer en diskussion kring hur torkförloppet påverkas av ett pulserande flöde och vilka fördelar som därmed kan uppnås. I samband med detta redovisas också olika matematiska modeller som beskriver hur torkförloppet styrs. En tredje del redovisar utvecklingen av två amerikanska anläggningar som använder pulserande förbränning, och resultat från de försök som gjorts liksom anläggningarnas prestanda och status idag. I rapportens sista delar bedöms slutligen vilken marknads-potential som finns för dessa anläggningar på den svenska marknaden. Utgångspunkten har då varit dagens torkanvändning och de torkanläggningar som används idag.

I rapporten kommer ofta begreppet "pulstorkar" att användas. Med det avses helt enkelt de tillämpningar där avgaserna från en pulserande förbränningsprocess fungerar som värmande medium för torkning. En pulsbrännare som ansluts till ett torkrum kommer därför också mestadels gå under benämningen pulstork.

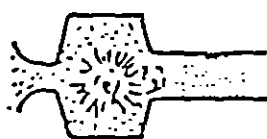
2. Pulsbrännarens funktion och uppbyggnad, samt dess egenskaper.

2.1 Funktion

I en konventionell brännare tillförs bränslet kontinuerligt och förbränningen sker med en någorlunda konstant hastighet, vilket ger en jämn produktion av förbränningsgaser. I en pulsbrännare däremot, sker förbränningen i perioder vilket följaktligen gör att förbränningsgaserna produceras periodvis; i pulser.

En pulsbrännarens funktion liknar mycket förbränningen i en "vanlig" förbränningsmotor (t ex. bilmotor). Förbränningen sker i snabba cykler vilket ger upphov till ett cykliskt, pulserande utflöde av förbränningsgaser. Skillnaden är dock den att i en vanlig förbränningsmotor är pulseringen påtvingad. I en pulsbrännare sker den automatiskt. I förbränningsmotorn utnyttjas dessutom energin i den cykliska processen till att driva en kolv, medan den för pulsbrännare utnyttjas till att ge avgaserna ett pulserande beteende. Bilden nedan visar schematiskt hur pulseringen uppstår (fig. 1).

1. Bränsleblandning (bränsle och luft) antänds och förbräns.
2. Förbränningsgaserna expanderar.
3. Ett undertryck skapas i förbränningskammaren, orsakat av expansionen, vilket medför att nytt bränsle och ny luft sugas in i förbränningskammaren. Dessutom dras en del av förbränningsgaserna tillbaka.
4. Trycket höjs i förbränningskammaren och en ny antändning sker, vilket leder till ny expansion osv...



1. Bränsleblandningen antänds och förbräns



2. Förbränningsgaserna expanderar.



3. Ny bränsleblandning och en del av förbränningsgaserna sugas tillbaka.



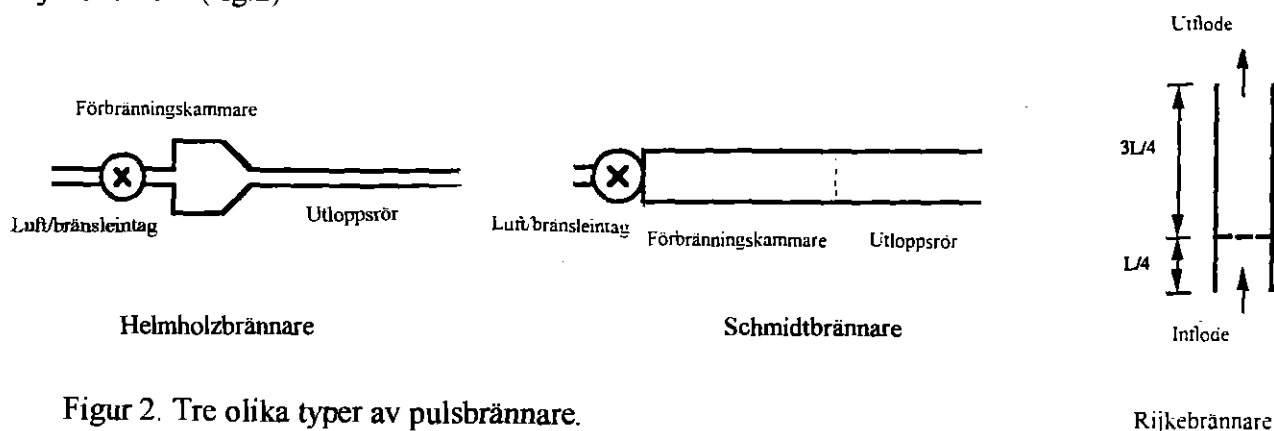
4. Trycket höjs av de tillbakaströmmande gaserna. Därefter sker en ny antändning

Figur 1. Pulserande förbränningsförlopp.

Antändningen i initieringsstegen sker med hjälp av en tändningsanordning. Antändningen i de därefter följande cyklerna sker spontant. Orsaken till den spontana antändningen finner man i litteraturen olika förklaringar till. Tänkbara förlopp är att antändningen av bränslet orsakas av kontakt med heta ytor i förbränningsrummet, kontakt med heta gaser eller kontakt med partiklar som fortfarande är reaktiva. Höghastighetsfotografering har visat att det alltid pågår en reaktion i förbränningsrummet och att det troligtvis är detta som antänder den nya bränsleblandningen. [1,4,7]

2.2 Uppbyggnad

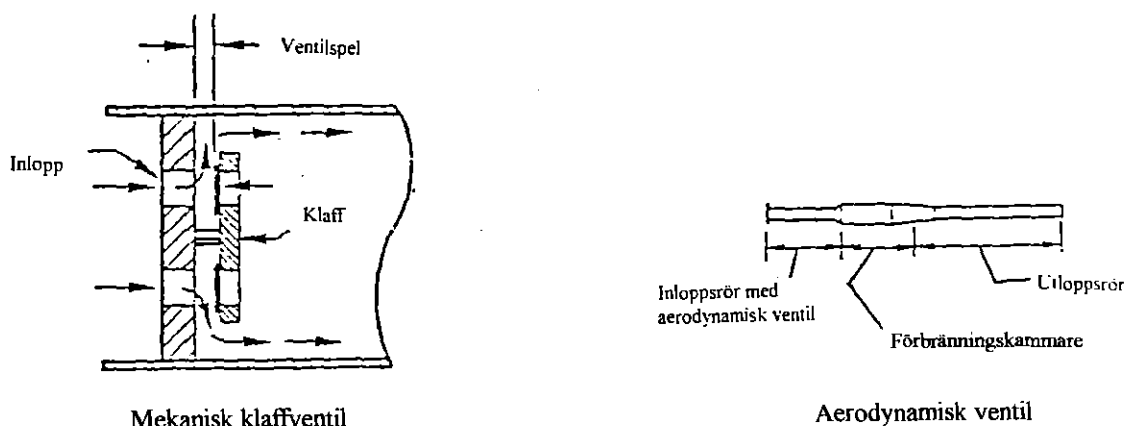
Vanligtvis delas pulsbrännare in i tre kategorier, nämligen Helmholtzbrännare, Schmidtbrännare och Rijkebrännare (fig.2).



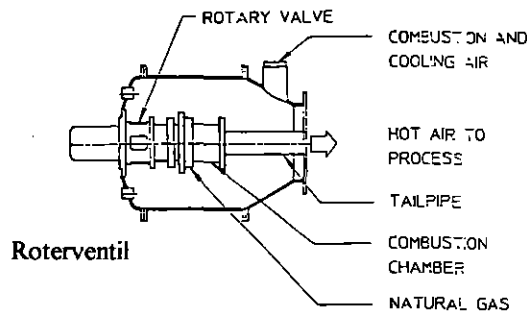
Figur 2. Tre olika typer av pulsbrännare.

Uppbyggnaden av Helmholtz- och Schmidtbrännare är likartad. Båda består av luft/bränsleintag, brännkammare och utloppsrör. Skillnaden är den att Schmidtbrännaren inte har någon avgränsad brännkammare, utan denna utgörs av främre delen av utloppsröret. Den puls som uppstår i en Schmidtbrännare har alltid en våglängd som är en fjärdedel av utloppsrörets längd, varför den ibland också benämns som "kvartsvågstuben". Luft/bränsleintaget i de båda brännartyperna kan vara uppbyggt antingen som en klaffventil, en aerodynamisk ventil eller som den nyutvecklade roterventilen [20] (fig.3). Skillnaden i funktion emellan är att klaff- och roterventilen stänger då högt tryck uppnås i brännkammaren, vilket tvingar alla förbränningsgaser att strömma framåt i utloppsröret. I klaffventilen sker stängningen pga övertrycket i brännkammaren, men i roterventilen styrs detta av att ventilens drivmotor följer frekvensen hos förbränningsprocessen. Med den aerodynamiska ventilen kommer en del förbränningsgaser att pressas bakåt, vilket sällan kan accepteras [7]. Fördelen med den aerodynamiska ventilen är dock att inga rörliga, lätt förslitliga delar ingår.

Rijkebrännaren är, till skillnad från de båda föregående, öppen i båda ändar. I främre delen av inloppsröret är fäst en metallplatta vid vilken bränslet tillförs. Metallplattan skall vara placerad på ett avstånd av $L/4$ från botten av den vertikalt placerade tuben. Uppvärmningen av inströmmande gaser resulterar i ett uppåtgående flöde som blir pulserande [9]. Mest använd i dagsläget är Helmholtzbrännare som kommit till användning för uppvärmningsändamål, t ex i hetvattenpannor.



Figur 3. Ventiler för luft/bränsleintag



Forts. figur 3. Ventil för luft/bränsleintag.

I detta sammanhang bör nämnas att en mer användbar indelning av pulsbrännare är i lågtryck- och högtrycksbrännare. Definitionen görs utifrån förbränningsgasernas tryck i förbränningskammaren. Lågtrycksbrännare är designade för att avge maximal energi genom värmeöverföring från brännkammarens och utloppsrörets mantelytor och används därför till värmepannor. Avgaserna från denna typ av brännare kommer att ha ett lågt energiinnehåll. Avsikten med högtrycksbrännare är den motsatta. I detta fall vill man minimera energiförlusterna från brännkammare och utloppsrör för att istället uppnå en hög hastighet och en kraftig pulsering i utloppsgaserna. Denna typ av brännare kommer till användning för bl a torkning.

2.3 Frekvens och amplitud hos uppkomna pulser.

Den pulserande förbränningsprocessen ger upphov till att förbränningsgaserna lämnar förbränningskammaren i cykliska pulser med en viss frekvens och en viss amplitud. Frekvensen hos pulserna bestäms av förbränningskammarens dimensioner, utloppsrörets längd och tvärsnittsarea, samt tillförd effekt [1,2,3]. Någon klart definierad funktion för detta samband har ännu inte bestämts. En bra vägledning ger dock Helmholtz ekvation för brännare som är uppbyggda enligt Helmholtz-brännaren (gäller för konstanta effekter).

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}} \quad (1)$$

f = frekvensen (s^{-1})

c = ljudhastigheten (som är en funktion av temperaturen) (m/s)

A = tvärsnittsarean på utloppsröret (m^2)

V = brännkamarvolymen (m^3)

L = resonansrörets längd (m)

Även om ovanstående ekvation ger en viss vägledning om frekvensens beroende räcker inte detta som grund för dimensionering av anläggningar. Vid körning får man helt enkelt prova sig fram, med hjälp av erfarenhet, för att nå önskad frekvens. Frekvensen påverkas också av effekten; en ökad effekt ger en ökad frekvens. Frekvensen kan normalt variera mellan tjugo till flera hundra Hz [3]. För att få en effektiv värmeöverföring eftersträvar man att köra förbränningen i närheten av egenfrekvensen, för det system till vilket en effektiv värmeöverföring önskas. Orsaken är att en mindre mängd energi då åtgår för att hålla igång pulseringen. Systemet utgörs vid t ex värmepannor av brännkammare och utloppsrör, och vid torkning av torkvolymen.

Amplituden, som uttrycker pulsens tryck, är en funktion av effekten. Ökad effekt ger en ökad amplitud och normalt sett resulterar en ökad amplitud i en effektivare värmeöverföring. Det krävs dock att hastighetsamplituden är högre än flödets medelhastighet, så att flödet växlar riktning i enlighet med amplitudsvängningarna [16]. Amplituder som ger ljudnivåer på drygt 150 dBA används vid torkning.

2.4 Fördelar med pulsbrännare.

De fördelar som finns vid användning av pulserande förbränning är framförallt följande:

- *Bättre värmeöverföring:*

Pulserna medför en förbättrad värmeöverföring till de ytor som är i kontakt med de heta avgaserna. Energianvändningen blir lägre och t ex värmeväxlare kan byggas kompaktare. Uppgifterna på hur stora ökningarna i värmeöverföringstalet kan bli varierar. Noggranna undersökningar av värmeöverföringen i en pulsbrännarens utloppsrör har gett en ökning på 2,5 ggr, jämfört stationärt flöde [16]. För torkning resulterar den effektivare värmeöverföringen i en högre torkhastighet, vilket möjliggör kompakta anläggningar. Hur stor ökningen i torkhastighet kan bli är osäkert.

- *Lägre utsläpp av föroreningar.*

Jämfört med konventionell förbränning blir utsläppen av kväveoxider (NO_x), koloxid och sot lägre. NO_x -halter på 20-70 ppm anges för pulserande förbränning [12], vilket kan jämföras med ca 90 ppm för konventionell förbränning. NO_x -bildningen påverkas av förbränningstemperaturen, luft/bränsleförhållandet samt brinntiden. Vid pulserande förbränning erhålls en lägre förbränningstemperatur, en kortare brinntid, samt ett lägre luft/bränsleförhållande. Alla tre faktorerna resulterar i en lägre halt bildad NO_x . Den lägre förbränningstemperaturen är en följd av den effektiva värmeavgivningen. För de andra två parametrarna torde en bättre omblandning vara orsaken. Även den lägre CO-halten torde indirekt vara en följd av den bättre omblandningen, eftersom en fullständig förbränning därmed lättare uppnås. Av samma anledning undviks också sotbildning [6,4].

- *Effektivare förbränning:* Omblandningen i brännkammaren minskar luftbehovet för fullständig förbränning. På så sätt minskar värmeförlusterna och energianvändningen. Värmeintensiteten i förbränningszonen för pulsbrännare är generellt mer än 10 kJ/m³ medan konventionella brännare kan avge 0,2-2 kJ/m³ [20].

- *Effektiv massöverföring.*

Pulserna medför en bättre massöverföring vid t ex torkning, vilket förbättrar torkhastigheten. Orsaken torde även i detta fall vara bättre omblandning [4]. Omblandningen har ytterligare betydelse vid torkning då det medför att inga temperatur eller koncentrationsskillnader föreligger i torkvolymen. Detta kan i vissa fall resultera i en bättre kvalitet hos torkad produkt.

2.5 Nackdelar med pulsbrännare.

De två nackdelar som oftast nämns och är av betydelse är följande:

- *Svårdimensionerat.*

Det finns ingen fullständig matematisk modell som kan användas vid dimensioneringsarbete. Det är således svårt och kostsamt att utifrån en fungerande pilotanläggning bygga kommersiella anläggningar med olika storlek och krav. Idag görs detta genom att man provar sig fram utifrån den erfarenhet som finns.

- *Hög ljudnivå.*

Tryckpulserna ger upphov till höga ljudnivåer i brännkammaren. Dessa kan dock till en viss del undvikas genom olika ljuddämpande åtgärder.

3. Kort historik om pulserande förbränning.

Den första upptäckten av pulserande förbränning gjordes sannolikt 1777 av Higgins då han placerade en brännarens flamma i en tub med öppna ändar. Ljudpulser uppstod och flamman "sjöng". Den ton som alstrades visade sig bero på egenfrekvensen hos den omgivande tuben. Utseendet hos brännare och flamma var av betydelse för att ljud överhuvudtaget skulle uppstå [12]. Det tog fram till början av 1900-talet tills man såg de fördelar fenomenet förde med sig. Konstruktion av olika typer av pulsbrännare gjordes och 1906 togs det första patentet. Den första praktiska tillämpningen gjordes dock inte förrän under andra världskriget då man använde pulsbrännare för framdrivning på de berömda V-1 bombarna, också kallade "buzz-bombs" med anledning av sitt visslande läte. Intresset för pulsbrännare avtog sedan på grund av konkurrerande teknologier, som till exempel jetmotorer, visade sig mer fördelaktiga.

På senare år har intresset vaknat till liv då det visat sig att pulserande förbränning kan ha flera användningsområden än de som tidigare varit aktuella. Egenskaper som effektiv värmeöverföring och effektivare förbränning har blivit allt viktigare, alltsedan energikrisens dagar. I dagsläget marknadsförs uppvärmningsaggregat baserade på pulserande förbränning farmgångsrikt. Möjligheten att finna nya användningsområden, som till exempel ångproduktion, ståltillverkning, cementtillverkning och framförallt torkning bedöms som mycket goda [4].

Pulstorkar har funnits som teknik sedan 1950-talet då en pulserande jetmotor användes till att torka fiskmjöl. Pulserna visade sig ha en effektiv atomiserande förmåga på materialet, men pulverstorleken liksom produktkvaliteten var ojämn. Dessutom gjorde troligtvis den höga ljudnivån att metoden inte bedömdes som intressant. Flera försök har sedan gjorts under 1980-talet för att bygga en väl fungerande pulstork. I alla försöken användes pulsbrännare med en aerodynamisk ventil, vilket fungerade dåligt. På senare år har dock utvecklingen kring pulsbrännare lett fram till bland annat en ny typ av roterventil, som resulterat i bättre fungerande system [20].

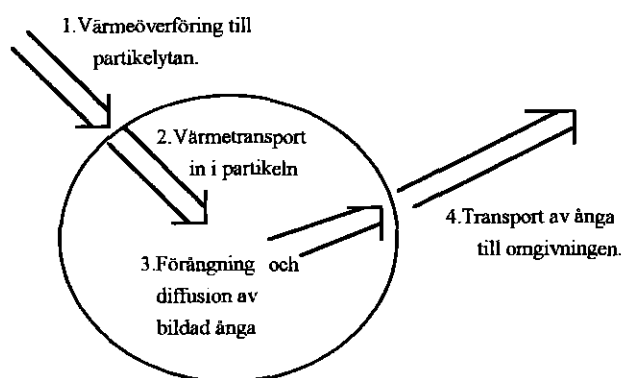
4. Grundläggande torkteori

4.1 Torkförloppet

Den redogörelse för grundläggande torkteori, som följer nedan, avser torkning av ett fast, poröst material i gasström och bör således innefatta de torkprocesser som utförs med pulserande förbränning.

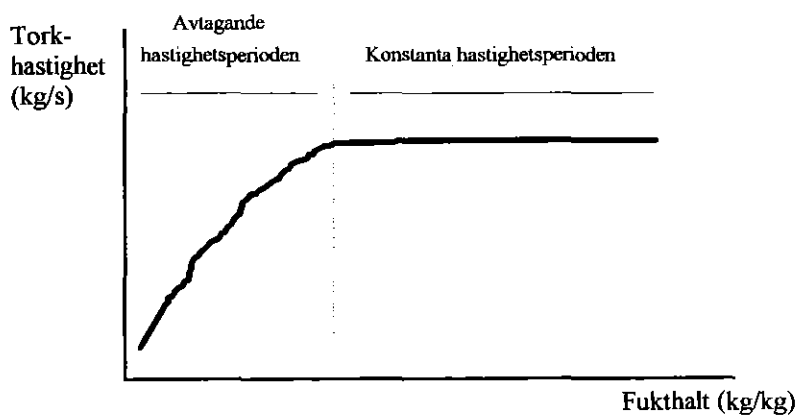
Vid torkning kan torkförloppet delas in i flera steg, vilka illustreras i figur 4 och innefattar följande:

1. Värmeöverföring till partikelytan genom ledning, strålning eller konvektion.
2. Transport av värme in i partikeln.
3. Förångning och diffusion av bildad ånga.
4. Transport av ånga från ytan till omgivningen genom konvektiv massöverföring.



Figur 4. Torkförloppets olika steg i en porös partikel

I inledningsskedet av ett torkförlopp är partikelytan ofta helt fuktig och i detta skede kommer endast steg 1 och 4 att vara aktuellt. Torkhastigheten i denna period (ofta benämnd som "constant rate period", även i svensk litteratur) kommer att vara konstant och partikelns temperatur lika med luftens våta temperatur. Då ytan börjar bli torr kommer även steg 2 och 3 att bli aktuella, och torkhastigheten avtar succesivt ("falling rate period") (fig.5). Torkförloppet i de två perioderna styrs alltså av olika mekanismer. Dessa mekanismer styrs i sin tur av olika variabler som kommer att påverkas olika mycket i ett pulserande flöde.



Figur 5. Torkhastigheten som funktion av fukthalt.

4.2 Konstanta hastighetsperioden.

Under den konstanta hastighetsperioden har godset helt fuktig yta och torkningen antas ske genom diffusion av vattenånga genom en luftfilm, från ytan och in i luftströmmen [11].

Sambandet för diffusion av ånga från en vätskeyta till gasfas kan användas. Ekvationen blir då:

$$W = K_{\Delta p} A (P_s - P_w) \quad (2)$$

W = torkhastighet (mol/s)

$K_{\Delta p}$ = massöverföringstal (mol/m²sPa)

A = partikelns yta (m²)

P_s = ångtrycket för vatten på partikelns yta (Pa)

P_w = partiella ångtrycket av vatten i luftströmmen (Pa)

Vattenångtrycket på partikelns yta beror av partikelns temperatur. Så länge torkgodsets yta är fuktig är dess maximala temperatur konstant (adiabatiska mättnadstemperaturen), vilket innebär att all värme som överförs genom gränsskiktet mellan luft och torkgod används för förångning [13]. Värmeöverföringskoefficienten blir alltså en begränsande faktor. Ekvationen kan också skrivas:

$$W = h / \Delta H_{\text{vap}} A (T - T_v) \quad (3)$$

h = värmeöverföringskoefficienten (J/m²sK)

ΔH_{vap} = förångningsvärmets (J/mol)

T = gasströmmens temperatur (K)

T_v = godsets temperatur (våttemperaturen) (K)

Värmeöverföringskoefficienten beror, i detta fall, av hastigheten hos gasströmmen upphöjt till 0.8, varför ekvationen riktigare skrivs:

$$W = h' A (T - T_v) u^{0.8} \quad (4)$$

Drivande kraft för värmeöverföringen är temperaturskillnaden mellan partikelns yta och luftströmmen. Eftersom torkgodsets temperatur är konstant (enligt resonemanget ovan) kan temperaturdifferensen bara varieras med luftströmmens temperatur. Torkhastigheten beror också på torkytans geometri, men i "normala" fall kan man bortse från detta.

4.3 Avtagande hastighetsperioden.

Torkgodset har i denna period helt eller delvis torr yta. Torkhastigheten kommer antingen att styras av den mekanism genom vilken fukt transporteras inifrån materialet och ut till ytan, eller den hastighet som värme tillförs förångningszonen på ytan. Den faktor som är den begränsande av dessa två kommer att styra torkhastigheten. Två teorier finns föreslagna för den massöverföringsmekanism med vilken fukt transporteras, nämligen diffusionsteorin och kapillärteorin [11]. För hygroskopiska material är diffusionsteorin den lämpligaste och för icke-hygroskopiska material kapillärteorin. För många material gäller en kombination av de två teorierna.

Oberoende av vilken teori som antas är massöverföringen i partiklarna oberoende av förhållandena utanför materialet. En ökad strömningshastighet förbättrar visserligen värmeöverföringen till partikeln, men det gynnar bara torkhastigheten om värmeöverföringen är den begränsande faktorn. Vanligtvis är massöverföringen begränsande i den avtagande hastighetsperioden och strömningshastigheten kommer därför inte att påverka. Torkhastigheten kan då bara förbättras genom att temperaturen på torkgodset höjs så att ett högre ångtryck erhålls inuti godset.

Hur stor andel av torkförloppet som består av den konstanta resp den avtagande hastighetsperioden beror på vilken typ av material som ska torkas. Det är därför svårt att generellt avgöra hur stor inverkan en ökning av torkgasens strömningshastighet har på totala torkhastigheten. I försök med fluidiserad bädd upptäcktes att för material som kiselgel och järnmalm, som avger sin fukt relativt lätt, var torkhastigheten direkt proportionell mot gashastigheten. För material som "binder" sin fukt hårt, t ex vete, var torkhastigheten däremot oberoende av gashastigheten [13].

Det bör i sammanhanget nämnas att en förbättrad torkhastighet innebär att produktens uppehållstid i torken kan kortas. Det medför i sin tur att torkanläggningen kan byggas kompaktare och att kapaciteten kan förbättras i befintliga anläggningar. Energiförbehovet för torkning kommer oavsett torkhastighet vara detsamma eftersom samma mängd vätska ska förångas.

5. Pulsernas påverkan på torkförloppet.

5.1 Påverkan på torkhastigheten

I föregående avsnitt konstaterades att torkhastigheten är beroende av

- * värmeöverföringen från gasströmmen till torkgodsets yta och
- * massöverföringen i partiklarna.

Värmeöverföringen vid ytan styrs av de varma gasernas strömningshastighet, medan massöverföringen i partikeln är oberoende av förhållandena utanför partiklarna. För att pulserna, som uppkommer vid den pulserande förbränningen, ska kunna ha någon inverkan på torkhastigheten måste de alltså påverka värmeöverföringen vid partikelns yta. Det bör därför vara rimligt att anta att det framförallt är under den konstanta hastighetsperioden som pulserna har någon inverkan.

Någon fullständig, accepterad teori för hur ett pulserande flöde påverkar värmeöverföringsprocesser finns inte. Flera olika försök i syfte att förstå värmeöverföringen i utloppsröret från en pulsbrännare har gjorts, men slutsatserna och teorierna är olika. Delar av teorierna bör vara tillämpbara på torkning och det är av intresse att redogöra för dessa och den kritik som de fått.

- Tidigare övergång till turbulent flöde:

Det har konstaterats att övergången från laminärt flöde till turbulent flöde sker vid ett lägre värde på Reynolds tal för ett pulserande flöde. Kritikerna anser att förklaringen inte är fullständig eftersom värmeöverföringen vid kraftiga pulser är avsevärt högre än de värden som uppmätts vid turbulent, icke-pulserande, flöde [16].

- Nedbrytning av gränsskiktet:

Det antas ofta att det pulserande flödet "bryter ner" gränsskiktet vid ytan och att motståndet mot värmeöverföringen därmed minskar. Mätningar av gränsskiktet har dock visat att dess tjocklek inte påverkades [16].

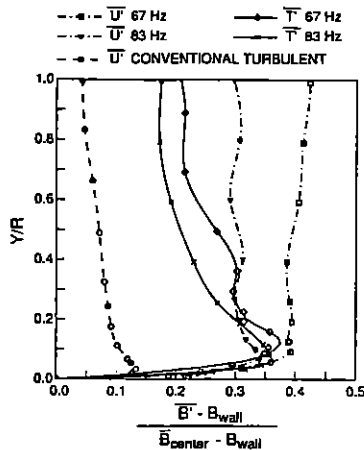
- Ökad medelhastighet:

I en s k kvasi-stationär modell, som utvecklats för värmeöverföringen i utloppsröret från en pulsbrännare, är utgångspunkten att pulserna ger en ökad medelhastighet. Den ökade medelhastigheten, som följer en ökning av amplituden, är orsak till den förbättrade värmeöverföringen [12] (se vidare avsnitt 6.1). Den kvasi-stationära modellen kritiserar med att den förutsätter att tiden som krävs för jämvikt att ställa in sig måste vara kortare än svängningarnas periodtid, vilket inte är fallet. Dessutom antar modellen att både Nusselttalet och Reynolds tal som utvecklats utifrån "normalt" flöde även gäller för pulserande flöde, vilket inte anses vara riktigt. I modellen tas heller ingen hänsyn till det frekvensberoende som, enligt kritikerna, finns [16].

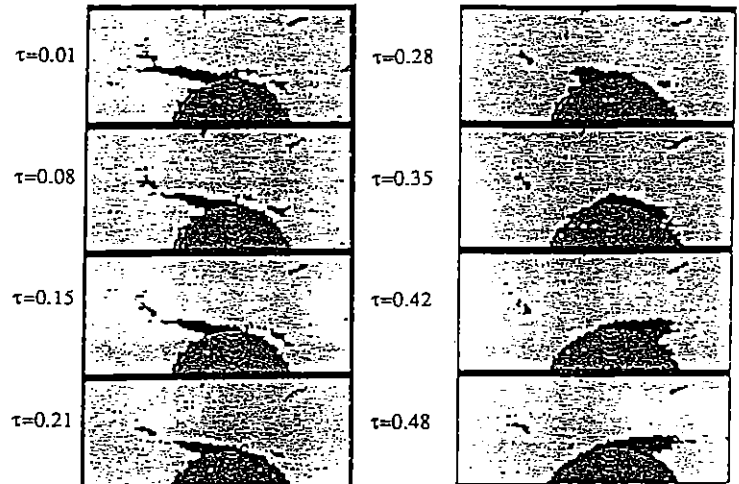
- Ökad turbulent intensitet:

I ett oscillerande flöde där flödeshastigheten ofta växlar riktning bör graden av skjuvning mellan olika skikt vara mycket högre än vid motsvarande stabilt flöde. Eftersom skjuvning i skikten kan orsaka turbulens anses det rimligt att anta att turbulensen är kraftigare vid pulserande flöde. Figur 4 nedan visar intensiteten för de slumpmässiga hastighets- och temperaturändringar som finns längs radien i ett rör. Ur figuren kan utläsas att turbulensen ökar vid pulserande flöde, jämfört stabila förhållanden. Den ökade turbulensen ger en effektivare mass- och värmeöverföring vid partikelytan. Turbulensen är enligt figuren också svagt frekvensberoende, men undersökningar

över ett bredare frekvensområde har visat på att något sådant beroende inte finns. Detta kan också utläsas ur figur 6 som visar att hastigheten nära väggen inte påverkas av frekvensen [16]. Att ytskiktet verkligen påverkas av pulserande flöde kan konstateras utifrån undersökningar med höghastighetsfotografering. Fotografierna av droppar i pulserande flöde visar att det på ytan bildas en "svans" som svänger i enlighet med pulserna (fig. 7) [20]



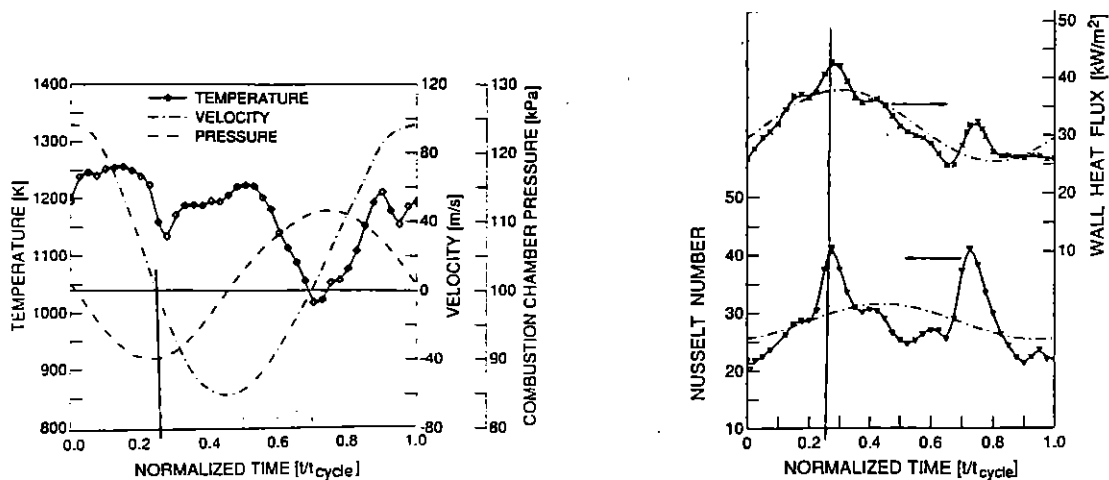
Figur 6. Slumpmässiga hastighets- och temperaturvariationer. Uttrycker graden av turbulens. (B representerar hastigheten eller temperaturen).



Figur 7. Höghastighetsfotografering av en droppes yta i pulserande flöde. (τ = periodtiden).

- Ökad konvektion:

Då det oscillerande flödet byter riktning är hastigheten nära noll och någon impuls transporteras inte till gränssytan. Konvektiv transport av värme kommer däremot att ske mot väggytan (vätskeytan) eftersom temperaturen är högre i omgivningen än vid väggen. Denna konvektiva transport är extra stark vid den tidpunkt då flödet ändrar riktning. Detta illustreras i figur 8 som visar på en ökad värmeöverföring då hastigheten är noll. Bidraget från konvektionen ökar med frekvensen vilket kan förklara det frekvensberoende som vissa forskare anser finns [16].



Figur 8. Värmeöverföringen som funktion av tiden. Topparna nås då hastighetsamplituden är noll, dvs då flödet byter riktning.

- Ökad diffusion

Det finns också teorier om att perioden med konstant torkhastighet förlängs i närvaro av pulserande flöde. Orsaken skulle vara att diffusionen i partikeln förbättras och att ytan därigenom blir fuktig en längre tid [15].

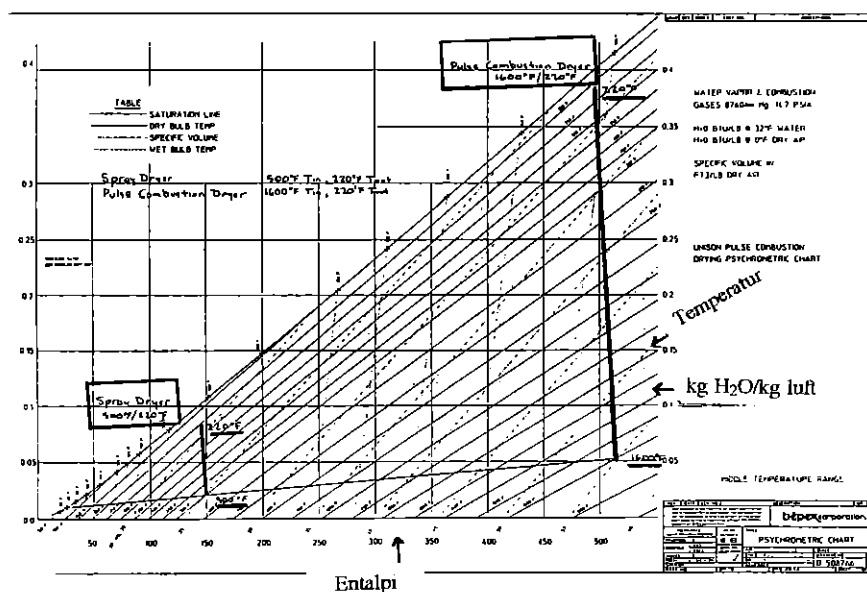
Sammanfattningsvis kan konstateras att det finns många olika teorier kring pulsernas inverkan på värmeöverföringen. Egentligen motsäger teorierna inte varandra utan det är möjligt att alla de faktorer som nämnts är av betydelse. Det är emellertid svårt att veta vilka faktorer som inverkar mest. I kapitel 6 ges förslag till hur en matematisk modell över torkhastigheten i pulserande flöde kan byggas upp.

5.2 Möjlighet till högre ingångstemperatur och jämnare produktkvalitet.

Pulsernas effektiva omblandning bidrar till en jämn temperaturfördelning över torkgodsets ytor. Därigenom är det möjligt att hålla en hög ingångstemperatur på inloppsgaserna utan risk för att bränna produkten. Materialtemperaturen kommer inte att överstiga luftens våttemperatur vid det aktuella trycket, så länge ytan på partikeln är fuktig.

Genom att inloppsgaserna kan hålla en högre temperatur blir drivande kraften för värmeöverföring större. Det i sin tur gör att luftbehovet för att förånga viss mängd vatten bli lägre (fig.9). Torkanläggningarna (fläktar, filter, torkkammare m m) kan då byggas kompaktare och investeringskostnaden blir lägre. Dessutom sänks driftkostnaden eftersom fläktarna inte behöver transportera lika stor volym.

Den effektiva omblandningen och jämna temperaturfördelningen gör också att produktkvaliteten förbättras. Risken för att produkten blir antingen övertorkad eller ofullständigt torkad minskar, och kvaliteten kan bli jämnare. Framförallt gynnar detta faktum värmekänsliga produkter som måste behandlas varsamt.



Figur 9. Tillståndsdigram luft/vatten. Jämförelse mellan konventionell spraytork och Bepex pulstork. (X-axeln anger entalpi och y-axeln fukthalt hos torkluften. Luftens temperatur visas av de heldragna lutande linjerna.)

6. Matematiska modeller för pulsernas påverkan på värmeöverföringen.

6.1 Anpassning av befintliga modeller till ökad medelhastighet.

6.1.1 Modell över värmeöverföringen i tub vid pulserande förhållanden.

En kvasi-stationär teoretisk modell som förklarar hur strömningshastigheten påverkar värmeöverföringen vid pulserande strömning i en tub har utvecklats [12]. I modellen har man utgått från en existerande ekvation för värmeöverföring och anpassat de i ekvationen ingående variablerna till förhållandena vid pulsering. Vid pulserande strömning erhålls en högre medelhastighet jämfört motsvarande konstanta hastighet vid jämn strömning. Ökningen i medelhastighet följer en ökning av amplituden. Medelhastigheten sätts in i den existerande ekvationen för värmeöverföring som gäller vid "normala" förhållanden varefter denna integreras över tiden (se nedan). Modellen visar på en bra anpassning till experimentella data för värmeöverföringen i en tub (fig.10).

För turbulent flöde i tuber är värmeöverföringsekv.:

$$Nu = c Pr^{0.4} Re^{0.8} \quad (5)$$

$$Nu = hd/k$$

$$Pr = C_p \mu / k$$

$$Re = ud/\nu$$

$$c = \text{konstant}$$

$$h = \text{värmeöverföringskoefficient (W/(m}^2\text{K))}$$

$$u = \text{flödes hastighet (m/s)}$$

$$C_p = \text{specifik värmekapacitet vid konstant tryck (J/kgK)}$$

$$d = \text{inre tubdiameter (m)}$$

$$k = \text{gasens värmekonduktivitet (W/(mK))}$$

$$\mu = \text{dynamisk viskositet för förbränningsgasen (Pa·s)}$$

$$\nu = \text{kinematisk viskositet för förbränningsgasen (m}^2\text{/s)}$$

Den ögonblickliga flödes hastigheten u' kan relateras till medelhast u_m genom ekvationen:

$$u' = u_m (1 + A \cos \omega t) \quad (6)$$

$$A = A_v \omega / u_m \text{ (dimensionslös hastighetsamplitud)}$$

$$\omega = \text{vågens vinkelfrekvens (rad/s)}$$

$$A_v = \text{hastighetsamplituden (m/s)}$$

Den ögonblickliga värmeöverf.koefficienten (h') erhålls ur de båda ekvationerna till

$$h' = \left(\frac{c k}{d}\right) Pr^{0.4} \left(\frac{d}{\nu}\right)^{0.8} (u_m |1 + A \cos \omega t|)^{0.8} \quad (7)$$

Genomsnittliga värmeöverföringskoefficienten (över tiden) för en cykel är

$$h_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} h' d(\omega t) \quad (8)$$

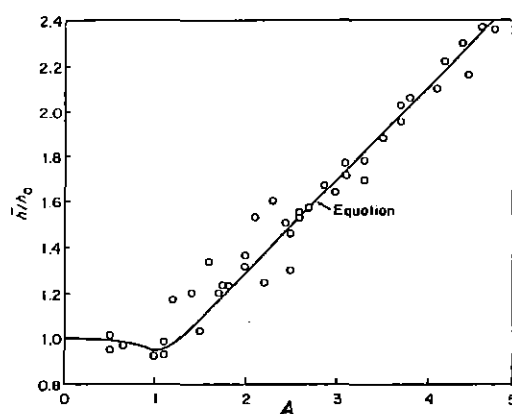
vilket ger

$$h_m = \frac{c k}{2\pi D} Pr^{0.4} Re^{0.8} \int_0^{2\pi} (|1 + A \cos \omega t|)^{0.8} d(\omega t) \quad (9)$$

där Re baserar sig på u_m . Värmeöverföringskoefficienten för opulserat flöde (h_0) erhålles genom att byta ut u_m mot u . Förhållandet h_m/h_0 representerar då effekten på värmeöverföringen som pulseringen orsakar, vilket blir:

$$\frac{h_m}{h_0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (|1 + A \cos \omega t|)^{0.8} d(\omega t) \quad (10)$$

Värden för h_m/h_0 avsatta i diagram (fig 10) visar på en ökning med mer än 100% vid höga amplituder.



Figur 10. Ekvation 10 avsatt som funktion av amplituden. Överensstämmelsen med experimentella data är god.

6.1.2 Tänkbar modell för värmeöverföringen vid torkning.

Utan att ha några bevis för påståendet bör motsvarande ansats, som i föregående avsnitt, även kunna vara tillämplig på torkningsfenomenet. Belägg för påståendet ger en rapport där mass- och värmeöverföringskoefficienten bestämts för kroppar placerade i ljudfält (där pulserna skapas med ljud). Bestämningen har inte gjorts avseende torkning, men metoden anses tillämplig även där [15].

Tillämpningen på torkning blir dock svårare eftersom hänsyn bör tas till vilken typ av torkning som avses. Den matematiska modellen blir olika för t ex torkning av plan yta, torkning i spraytork eller fluid-bädd torkning. Dessutom beror värmeöverföringen troligen också på en rad olika parametrar som varierar mellan olika försök och torkmaterial, vilket gör problemet mycket komplext. I litteraturen finns således flera olika ekvationer som anger värmeöverföringen som funktion av gashastigheten. (Exempel på dessa finns i appendix A). Vid kännedom om vilken matematisk modell som gäller i det specifika fallet bör det dock vara möjligt att "översätta" ekvationen till pulserande förhållanden.

En aspekt som är speciell vid pulsering är svårigheten att bestämma gashastigheten i torken, eftersom gashastigheten är relaterad till partiklarna. Små partiklar kan förflytta sig i enlighet med pulserna och relativa hastigheten blir då lägre än om partiklarna inte svängde med. Partiklarnas möjlighet att "svänga med" är också beroende av frekvensen.

6.2 Modell för förångning från en yta, utifrån teori i mikroskala.

Gas Research Institute (GRI) i USA har utvecklat en teoretisk modell för massöverföringen i turbulent pulserande flöde [23]. Utgångspunkten har varit att först försöka förstå oscillerande turbulent flöde i s k mikroskala och utifrån det utveckla en teoretisk modell för vad som styr massöverföringen i ett pulserande flöde. De modeller som utvecklats bygger på tidigare modeller för turbulent flöde.

Utan att närmare gå in på den bakomliggande teorin för hur modellerna tagits fram anses följande ekvationer generellt beskriva värme- resp massöverföringen från en yta vid pulserande flöde.

$$Nu \propto Re^{3/4} \left(1 + \frac{u_o}{u}\right)^{3/4} \left(1 + \frac{\omega l}{u(1 + u/u_o)}\right)^{3/4} \quad (11)$$

$$Sh(1+B)^{3/4} \propto Re \left(1 + \frac{u_o}{u}\right)^{3/4} \left(1 + \frac{\omega l}{u}\right)^{3/4} \quad (12)$$

Nu = Nusselttalet (hd/k)

h = värmeöverföringskoefficienten ($W/(m^2K)$)

d = hydrauliska diametern (m)

k = värmekonduktiviteten (W/mK)

Re = Reynolds tal ($u_o d/\nu$)

u_o = gasernas hastighetsamplitud (m/s)

ν = kinematiska viskositeten (m^2/s)

ω = pulsbrännarens frekvens (s^{-1})

l = integral längdskala (m)

Sh = Sherwood talet ($h_m d/\rho D = \dot{m} d/\rho BD$)

h_m = massöverföringstalet (m/s)

ρ = gasens densitet (kg/m^3)

D = diffusionskoefficient (kg/m^2)

$\dot{m}$ = massflödet (kg/s)

B = överföringstal $[(Y_s - Y_\infty)/(1 - Y_s)]$

Y_∞ = massbråk av förångade komponenten i omgivningen

Y_s = massbråk av förångade komponenten på ytan

Massöverföringsekvationen korrelerades experimentellt för att bestämma proportionalitetskonstanter. I experimentet placerades en stationär fast porös kropp i utloppet från en pulsbrännare. Vatten tillfördes kroppens yta inifrån så att den hela tiden hölls fuktig. Förångningshastigheten bestämdes som ett medelvärde utifrån den mängd vatten som tillfördes under en viss tid. Försöket kan relateras till torkning av en stor inert kropp som inte påverkas av pulsernas svängningar. Preliminära resultat avsattes i diagram (fig. 11) och korrelerades till följande ekvation:

$$Sh(1+B_H)^{3/4} = C_1 Re_o^{3/4} \left(1 + C_2 \frac{\omega l}{U_o}\right)^{3/4} \left(1 + C_3 \frac{u}{U_o}\right)^{3/4} \quad (13)$$

u = slumpmässiga hastighetsvariationer (turbulenta) (m/s)

$Re_o = U_o d/\nu$

U_o = hastighetsamplitud hos gaserna (m/s)

B_H = värmeöverföringstal (se nedan)

$C_1 = 0.012 \pm 0.005$

$C_2 = 58000 \pm 140000$

C_3 antogs än så länge lika med ett.

T_e = temperatur i droppens omgivning (K)

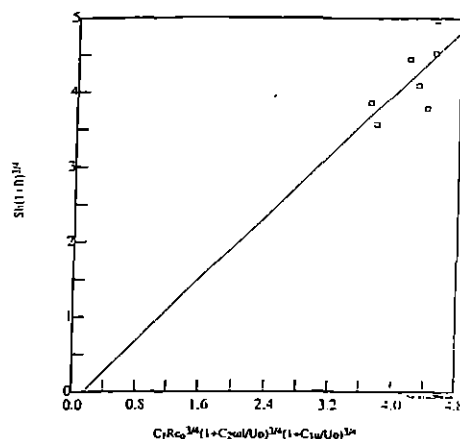
T_s = droppens yttemperatur (K)

L_s = latent förångningsvärme (J/kg)

P_{osc} = pulserande tryckets amplitud (Pa)

c = ljudhastigheten (m/s)

$$B_H = \frac{C_p(T_e - T_s)}{L_s} \quad U_o = \frac{P_{osc}}{\rho c} \quad u = 0.10 U_o$$



Figur 11. Höger- resp. vänsterled i ekvation 13 avsatt mot varandra. Stor avvikelse från experimentella data antas bero på osäkert försöksområde.

Experimentella datas avvikelse från ekvationens linje antas bl a bero på svårigheter att ställa in rätt flöde. Den stora osäkerheten i C_2 antas bero på att det undersökta försöksområdet var för smalt. Fortsatta försök avser att förbättra säkerheten samt att bestämma konstanten C_3 . Det bör noteras att Re_0 inte riktigt består av samma termer som det vanliga Reynoldstalet. Massöverföringen är alltså enligt denna modell positivt beroende av amplituden och frekvensen på gaserna.

6.3 Modell för förångning av vattendroppar utifrån teori i mikroskala.

6.3.1 Konstruktion av modellen

I den rapport från GRI som refererades i föregående avsnitt utvecklas också en matematisk modell som beskriver förångning av vattendroppar [23]. Modellen kan framförallt relateras till spraytorkning. Att beskriva massöverföringsprocessen vid förångning av droppar är mycket komplicerat. Inte nog med att det pulserande flödet i sig är svårt att beskriva, dessutom behövs information kring dropparnas rörelse, dropparnas utseende, eventuell avflashning av vätska från dropparna, kollisioner mellan droppar eller med väggar, variationer i gränsskiktets egenskaper m m. Genom att använda sig av en skvasi-stationär analys anses det vara möjligt att angripa problemet och ställa upp en modell för förångningshastigheten. Modellen har i den refererade rapporten ännu inte verifierats experimentellt. Troligtvis bör den dock ge en bra beskrivning av verkligheten och det är därför intressant att redogöra för modellens uppbyggnad och de resultat som den ger.

För att göra det möjligt att ställa upp en modell över förångningshastigheten krävs vissa antaganden. Bl a att ingen påverkan finns mellan olika droppar eller att dropparna kolliderar med väggar. Dessutom bortses från droppars sönderdelning, vilket begränsar studien till droppar med en diameter mindre än $100 \mu\text{m}$. För att den kvasi-stationära metoden ska kunna användas krävs också att flödet kan antas stationärt under korta tidsperioder och att förhållandena kan liknas de som råder vid laminärt flöde. Detta krav är svårt att uppfylla eftersom svängningarna mellan gas och ytskikt kan komma i ofas i ett pulserande flöde. Tidigare försök har dock visat att metoden trots det bör ge en god uppskattning på förångningshastigheten. Ytterligare antagande är att dropparna hela tiden håller en temperatur lika med vättemperaturen.

För mass- och värmeöverföringen vid förångning av droppar användes följande ekvationer (Renssizbulut, 1989):

$$Sh(1 + B_M)^{0.7} = 2 + 0.87Re^{1/2} Sc^{1/3}, \quad 25 < Re < 2000 \quad (15)$$

$$Nu(1 + B_H)^{0.7} = 2 + 0.57Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad 25 < Re < 2000 \quad (16)$$

Sc = Schmidt talet (ν/D)

B_M och B_H är mass- resp. värmeöverföringspotentialen enligt:

$$B_M = \frac{Y_s - Y_e}{1 - Y_s}$$

$$B_H = \frac{c_p(T_e - T_s)}{L_s - (q_r''/\dot{m}'')_s}$$

Y_s = massbråk av de förångade komponenterna på ytan

Y_e = massbråk av de förångade komponenterna i omgivningen

$\dot{m}''$ = massflöde vid ytan (kg/s)

q_r'' = värmefflöde från strålning som avges från omgivningen till droppens yta (W/m²).

Värmefflödet utgöres av strålning från pulsbrännarens utloppsrör enligt:

$$q_r'' = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_s^4)$$

ε = emissivitet för droppen

σ = Stefan-Boltzmann konstanten (W/K⁴)

T_w = utloppsrörets väggtemperatur (K)

Generellt sett innefattar förångning av vattendroppar samband mellan massa, energi och impuls. De samband som råder på droppens yta vid förångning är

$$v_s = \dot{m}_s''/\rho_e \quad (17)$$

$$q_s'' = \dot{m}_s'' L_s \quad (18)$$

$$F(P_s, T_s, Y_{si}) \quad (19)$$

v_s = hastigheten i normalriktningen mot ytan (m/s)

q_s'' = värmefflöde vid ytan (W/m²)

P_s = totaltrycket vid ytan (Pa)

Y_{si} = massbräcket av alla komponenter vid ytan

För att kunna bestämma koncentrationen vid ytan användes följande ekvation (Clausius-Clayperons ekvation enl. Harpole):

$$P_{vap} = \left(\frac{T_s}{373.15}\right)^{13.8} + 2.5e^{-4}(T_s - 373.15) \quad (20)$$

Förångningshastigheten bestäms enligt

$$\dot{m}_s = h_m B_M \quad (21)$$

och förändringen i droppstorlek kan beräknas genom att integrera följande ekvation

$$\frac{dd}{dt} = \frac{2\dot{m}_s \rho_e}{\rho_l} \quad (22)$$

ρ_e = gasens densitet (kg/m³)

ρ_l = vätskedensiteten (kg/m³)

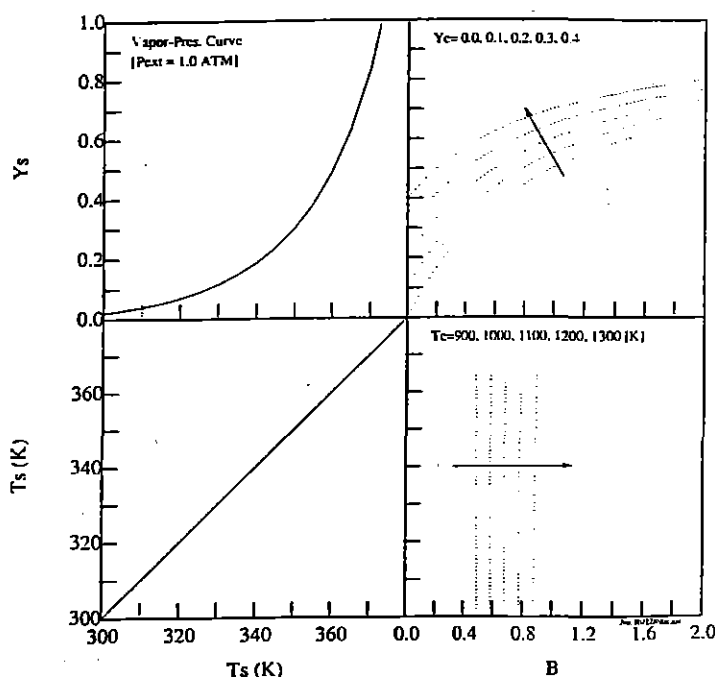
Om gasströmmens potential för mass- och värmeöverföring är känd kan de respektive överföringskoefficienterna bestämmas. Mass/värmesambanden ovan ger då de respektive potentialerna vid vätskeytan samt förångningshastigheten. En förutsättning för sambanden är att jämvikt antas råda mellan vätska och gas samt att både vätska och gas är ideala.

6.3.2 Beräkningar och slutsatser utifrån modellen.

Utifrån modellen kan bedömas hur olika faktorer påverkar förångningen och vilka faktorer som kan försummas då modellen byggs upp. En viktig slutsats är bl a att värmeöverföringen är den styrande faktorn för torkhastigheten. De slutsatser som dragits är följande [23].

Slutsats om att värmeöverföringen är styrande faktorn

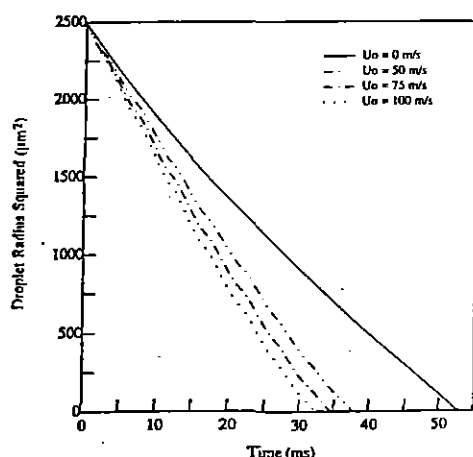
När inte någon relativ hastighet råder mellan gasströmmen och vätskeskiktet hos droppen är bara ett samband mellan massa och energi av betydelse, dvs massbråket för förångad komponent styrs bara av temperaturen. Kopplingen kan illustreras enligt figur 12 nedan. Figuren visar hur förhållandena hos omgivningen påverkar de som råder på ytan. Diagrammet används enligt följande: Ett värde på droppens yttemperatur (T_s) antas. En linje dras från den valda temperaturen till aktuellt värde på T_e i rutan för B. Från aktuellt värde på B i denna ruta dras en linje upp till aktuellt värde på Y_e . Därifrån dras en linje åt vänster till kurvan för Y_s och därefter slutligen till kurvan för T_s . Iterering görs tills start- och slutvärde på T_s överensstämmer. Itereringen motsvarar den som görs då modellen för förångning av droppar (ekv. 17-19) används. Vad som bör noteras i diagrammet är hur stor betydelse T_e har för valet av överföringspotentialen B. Påverkan från Y_e är inte alls lika stort. Ur detta dras slutsatsen att värmeöverföringen är den styrande faktorn. Slutsatsen gäller då temperaturen i gasströmmen är mycket högre än kokpunkten hos vätskan, vilket är fallet då pulsbrännare används.



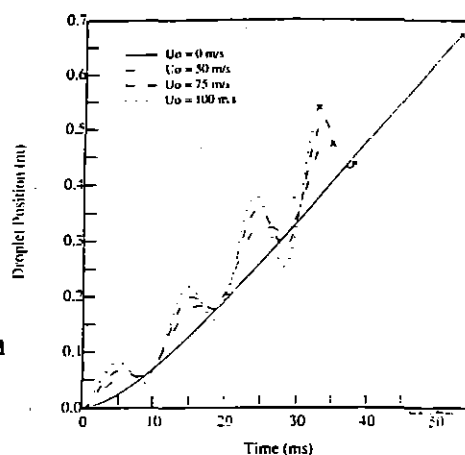
Figur. 12. Förångning från vattenyta. Om gastemperaturen T_e är mycket högre än vätskans kokpunkt så är värmeöverföringen den styrande faktorn. (T_s =droppens yttemperatur, Y_e och Y_s massbråk av förångad komponent i omgivande gas resp. vid ytan, B =överföringspotential).

Amplitudens inverkan på förångningen

Modellen för förångning användes för att räkna ut hur förångningsprocessen påverkades av pulserande flöde. Dropparnas storlek, såväl som den sträcka de vandrade innan de var helt förångade, beräknades som en funktion av tiden för varierande hastighetsamplitud (fig. 13-14). Som väntat ökade förångningshastigheten med pulsernas amplitud. Dropparnas relativa hastighet mot gasflödet beräknades också för olika amplitud. Relativa hastigheten är intressant eftersom den anses ha stor betydelse för förångningshastigheten. En hög relativ hastighet ger upphov till en hög förångningshastighet. Det faktum att relativa hastigheten förblir hög även vid lägre amplituder anses vara orsaken till att förångningshastigheten förbättras även vid låga amplituder.



Figur 13. Droppens storlek som funktion av hastighetsamplituden.

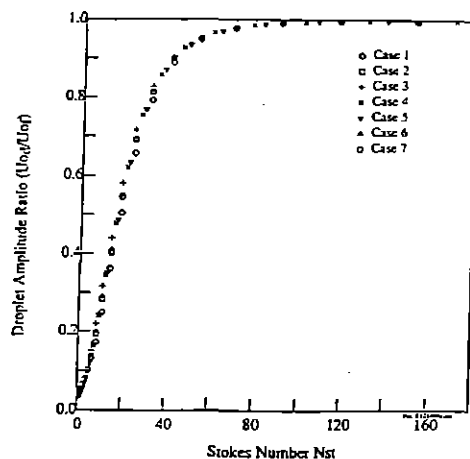


Figur 14. Droppens vandringssträcka som funktion av hastighetsamplituden.

Påverkan av gastemperatur och frekvens

Tiden för förångning som funktion av gastemperatur och frekvens beräknades också. Temperaturens inverkan visade sig inte oväntat vara hög, medan beroendet av frekvensen var i stort sett obefintligt. Ett litet beroende av frekvensen fanns då droppen var mycket liten. Orsaken till detta ligger i relativa hastigheten och indirekt i det s k Stokes tal (se nedan*). Relativa hastigheten minskar med ökat Stokes tal, vilket visas i figur 15. För höga frekvenser är övergången från låga Stokes tal till höga långsammare än vid låga frekvenser. Relativa hastigheten kommer alltså inverka under en längre tid vid höga frekvenser.

* $St = (\nu/\omega d^2)^{1/2}$. Stokes talet ökar med minskad droppstorlek



Figur 15. Relativa hastigheten som funktion av Stokes tal.

Temperaturhöjning i droppens yta p g a konvektion

En partikels acceleration styrs bl a av olika motståndskrafter och ojämna förhållanden i gränsskikt. I den utvecklade kvasi-stationära modellen för förångningshastigheten antogs dock att inga ojämna, slumpmässiga rörelser förekom hos dropparna. Givetvis förekommer detta men effekterna visade sig, utifrån beräkningar, vara generellt försumbara. Vid pulserande flöde kan också temperaturen på droppens yta påverkas p g a konvektion. Orsaken till temperaturens påverkan är att ändringar i relativa hastigheten har olika påverkan på mass- och värmeöverföringen. Beräkningar visar dock på att betydelsen för förångningshastigheten är obetydlig.

Inverkan från strålningsvärme

Under körning av en pulsbrännare kommer väggarna på utloppsröret att värmas upp. Hur mycket beror givetvis på materialet samt om röret är kylt. Strålningen från det varma röret kommer att träffa dropparna och påverka förångningen. För antagandet att utloppsröret utgörs av ett adiabatiskt material (väggtemperatur lika med gasens temperatur) bedöms strålningen tillföra droppen nära 25% av totala energitillförseln. För ett kylt utloppsrör är siffran bara ca 3%. Resultatet visar dock på att hänsyn bör tas till strålningen.

7. Sonotech's pulsbrännare Cello®.

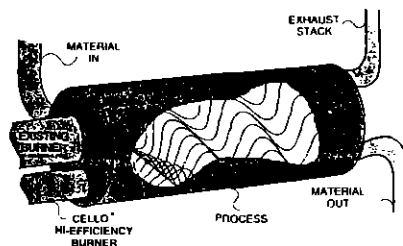
7.1 Inledning

Det amerikanska företaget Sonotech startades som ett litet utvecklingsbolag i Atlanta av ledande experter på pulserande förbränning. President för företaget är Dr Ben T Zinn som arbetar vid Georgia Institute of Technology i Atlanta med rymdflygning. Pulserande förbränning är ett problem vid raketuppskjutningar och något man arbetar på att undvika. I samband med det såg man också de positiva aspekter som finns med pulserande förbränning i vissa tillämpningar. Utvecklingen av en pulsbrännare för dessa ändamål påbörjades i mitten på åttiotalet och idag finns en anläggning som är kommersiell. Anläggningen har registrerats vid namn Cello®.

Den information som inhämtats om Sonotechs pulsbrännare utgörs av rapporter från utvecklingsarbetet (ref. 7), samt en broschyr om den kommersiella versionen Cello. Den personliga kontakt som tagits med företaget har tyvärr inte gett någon information om den tekniska utformningen av Cello, med hänvisning till äganderättsaspekter. Utifrån utvecklingsrapporterna tycks det som om funktionen och arbetssättet hos Cello är likartat den slutliga prototyp som utvecklades. Företaget har dock via personliga kontakter uppgett att den kommersiella Cello skiljer sig från prototypen och att Cello är en totalt ny anläggning. Eftersom anläggningen är avsedd att användas på samma sätt, och den grundläggande idén även är densamma, är det dock intressant att redogöra för utvecklingens bakgrund. Dessutom är vissa försöksresultat av allmänt intresse då de ger information om en pulsbrännares funktion i olika torktillämpningar.

7.2 Användningsområden

Anläggningen Cello är helt enkelt en pulsbrännare som är avsedd att anslutas till olika sorters processrum, t ex torkkammare (fig. 16). Det speciella med pulsbrännaren är att frekvensen på pulserna kan varieras och således anpassas till egenfrekvensen hos torkkammaren. Det är fördelaktigt eftersom energibehovet för att hålla systemet i svängning är lägst vid dess egenfrekvens (se även avsnitt 2.3). Tillverkaren Sonotech anger en rad olika användningsområden för pulsbrännaren. Generellt sett anses den kunna användas i alla processer som gynnas av en effektiv mass- och värmeöverföring. Exempel som nämns är värmeväxlare, kokare, kalcineringsugnar, förbränningsugnar och torkanläggningar. Vad gäller torkning nämns bl a spray-, flash- och rotertorkar. Brännaren kan relativt lätt anslutas till redan befintliga processrum och kan även arbeta tillsammans med en redan befintlig brännare. Genom att stående svängningar skapas i processrummet bedömer företaget att värme- och massöverföringen kan förbättras. Totala energianvändningen för processen kan därmed minska och kapaciteten ökas.



Figur 16. Pulsbrännaren Cello är avsedd att anslutas till olika processrum, t.ex rotertorkar. Brännaren kan arbeta antingen i tandem med befintlig brännare eller ensam.

På den svenska marknaden bör användningsområdet för torkning framförallt vara i samband med rotertorkar. Vid flash- och spraytorkning är Bepex anläggning Unison sannolikt bättre lämpad. En bedömning av potentialen på den svenska marknaden ges vidare i kapitel 12.

7.3 Utvecklingsarbetet.

7.3.1 Pulsbrännaren

Effektiviteten hos energiintensiva processer påverkas mycket av storleken på mass- och värmeöverföringstalen. Med vetskap om att överföringsprocesserna kan förbättras i pulserande medie såg man på Sonotech möjligheten att utnyttja pulsbrännare vid bl a torkning och på så sätt nå effektivare torkprocesser. Pulsbrännaren skulle kunna anslutas till torkrummet och arbeta antingen ensam eller komplettera redan befintlig brännare.

För att göra verklighet av dessa idéer behövde man utveckla en pulsbrännare som dels kunde skapa pulser i processutrymmet och dels kunde förse processen med önskad mängd energi för att ge en tillfredsställande torkning. Som tidigare nämnts bör en pulsbrännare arbeta vid egenfrekvensen för att systemet ska komma i resonans. Egenfrekvensen är dock svår att i förhand bestämma och den kan också variera under arbetets gång, bl a som en funktion av temperaturen. Den pulsbrännare man önskade skulle därför kunna regleras inom ett brett frekvensområde för att möjliggöra en anpassning av brännarefrekvensen till systemets egenfrekvens. Dessutom skulle pulsbrännaren kunna avge en maximal effekt som motsvarade den som behövs i industriella fullskaleprocesser, samt ha ett variabelt effektområde för att kunna anpassas efter specifika krav.

De mål som sattes upp inför utvecklingsarbetet av pulsbrännaren var följande:

- Pulsbrännaren ska kunna ge en maximal effekt av 2,2 MW.
- Effekten ska vara variabel (i förhållandet 5:1).
- Frekvensen ska kunna varieras inom ett tillräckligt brett område, t ex 30-50 Hz.
- Luft/bränsleförhållande ska kunna varieras (upp till 100% luftöverskott).
- Det ska vara möjligt att uppnå amplitudsvängningar inom alla variabla områden.

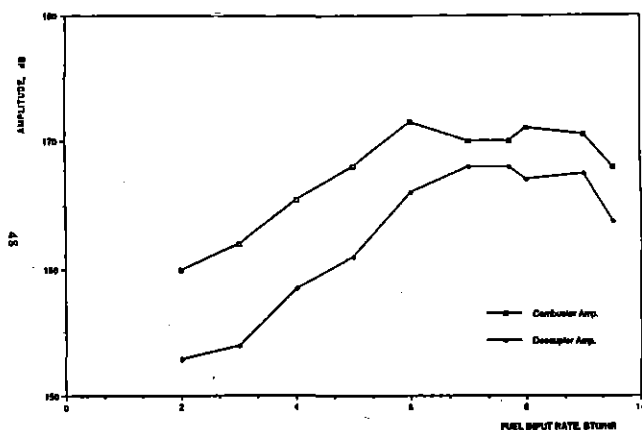
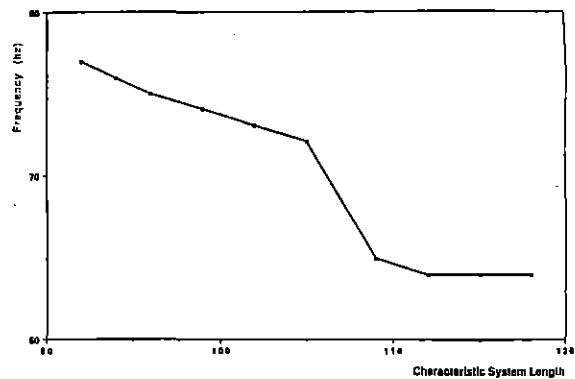
Utvecklingen påbörjades i mitten på åttiotalet under amerikanska gasforskningsinstitutets (GRI) ledning. Via flera utvecklingssteg kom man fram till en prototyp som uppfyllde de krav man ställde. Prototypen användes i fortsatta försök som syftade till att undersöka möjligheten att använda brännaren i olika processer.

Den slutliga prototypen gav följande resultat:

- Effektområde: 0,6 - 2,8 MW.
- Frekvensområde: 50 - 120 Hz. Frekvensen regleras med brännarens längd (fig. 17).
- Amplituden ökade med bränsletillförseln mellan 0,6-1,8 MW för att sedan ligga konstant upp till 2,6 MW. Sista biten sjönk amplituden, troligtvis till följd av otillräcklig lufttillförsel (fig. 18).
- Designen är relativt enkel och bränsletillförsel, luft/bränsleförhållande, samt frekvens kan regleras under körning.

Prototypen hade en aerodynamisk ventil, men det är okänt om detta också gäller för Cello.

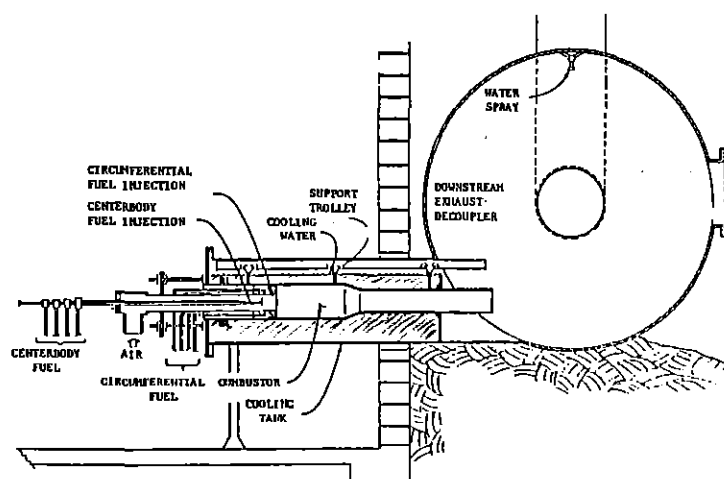
Figur 17. Frekvensen på förbränningsgaserna från pulsbrännaren som funktion av brännarlängden.



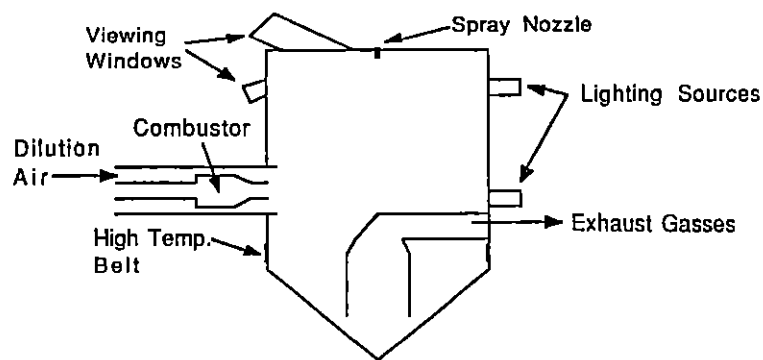
Figur 18. Pulsernas amplitud som funktion av bränsletillförsel.

7.3.2 Möjligheten att använda pulsbrännaren i processer.

Den utvecklade prototypen användes först till att undersöka om det överhuvudtaget var möjligt att skapa stående svängningar i processrum, och hur dessa i sådant fall uppförde sig. Som processrum användes dels en s k avkopplingskammare som använts vid utveckling av brännaren, eftersom denna hade lämpliga dimensioner, och dels en anläggning som senare användes vid förångning av vattendroppar (fig. 19,20).



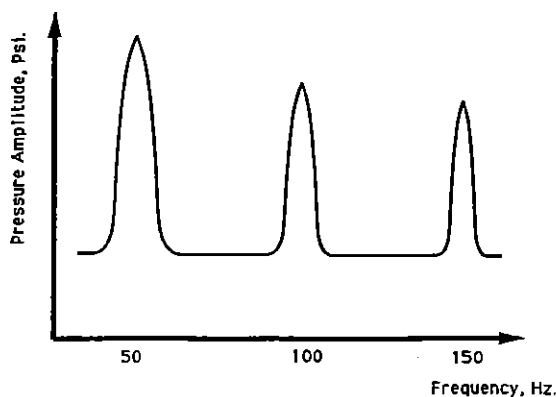
Figur 19. Pulsbrännare ansluten till avkopplingskammare.



Figur 20. Processrum för att simulera spraytorksutrymme.

Resultaten av försöken visade följande:

- En pulsbrännare med variabel frekvens kan användas för att skapa resonanssvängningar med hög amplitud i ett processrum.
- Amplituden hos svängningarna ökar med ökad bränsletillförsel.
- Då resonans uppstår "låser sig" frekvensen vid denna frekvens (egenfrekvensen) och en stor justering krävs för att resonansen ska upphöra (fig. 17). Fenomenet gör det lättare att behålla resonansfrekvensen då denna hittats.
- Resonanssvängning kan uppnås med en pulsbrännare som bara tillför en del av den totalt tillförda energin. Pulsbrännaren kan således användas i kombination med redan befintlig brännare. Amplituden blir dock större om pulsbrännaren tillför all energin.
- Den högsta amplituden erhålls då pulsbrännarens frekvens stämmer överens med någon av processrummets egenfrekvenser. Amplitudens storlek vid de olika egenfrekvenserna är vid konstant bränsletillförsel beroende av frekvensen (fig 21).
- Amplituden tycks vara oberoende av pulsbrännarens placering i processrummet.



Figur 21. Högsta amplituden nås vid systemets egenfrekvens.

7.3.3 Förångning av vattendroppar

För att undersöka vilken påverkan pulser kan ha på torkprocesser undersöktes dels förångning av vattendroppar i en spraytork och dels torkning av kaolin i en spraytork. I båda fallen mättes torkhastigheten (förångningshastigheten) i närvaro respektive frånvaro av pulserande flöde. Förångningen av vattendroppar gav visserligen bara information om vilken inverkan pulserna har under ett torkförlopps konstanta hastighetsperiod, dvs då godset är helt fuktigt på ytan. Trots det önskade man utföra försöket eftersom det var praktiskt enkelt och även kunde ge en viss förståelse för pulsernas inverkan vid spraytorkning. Genom att jämföra resultatet med torkningen av kaolin ansåg man sig också kunna få en uppfattning om hur pulserna verkade under de två olika torkstegen, dvs under den konstanta resp avtagande hastighetsperioden.

För förångning av vattendroppar användes först avkopplingskammaren som processrum (fig. 19). Vattentillförseln gjordes genom ett varierande antal spraymunstycken i kammaren. Resultaten på förångningshastigheten varierade mellan två olika mätmetoder. I den första mätmetoden togs ett representativt prov från avgaserna, vars flöde och fukthalt bestämdes. Förångningshastigheten beräknades genom att bestämma tiden för att förånga en bestämd mängd vatten vid konstant bränsletillförsel. Med denna metod uppmättes ingen förändring i torkhastigheten i närvaro av pulser. När hastigheten istället bestämdes genom att hålla tillflödet av vatten konstant och variera bränsletillförseln tills hela vattendropparna förångades, erhöles en förbättring av förångningshastigheten i närvaro av pulser med mellan 5 och 12%. Att allt vatten förångades bestämdes genom att inget vatten rann ut ur en utloppsventil i botten på kammaren. Orsaken till skillnaden i resultat mellan mätmetoderna kan bero på att de spraymunstycken som användes i det senare fallet gav mindre vattendroppar, samt att munstyckena placerades olika i kammaren för de två fallen. Det bästa resultatet gav det försök där munstyckena placerats så att vattnet sprayades uppåt, med avsikten att dropparna skulle sväva länge i kammaren.

Motsvarande försök gjordes också i en simulerad torkanläggning (fig. 20). Orsaken var att man önskade bekräfta erhållna resultat i en anläggning som bättre simulerade verkliga spraytorkanläggningar och även undersöka effektiviteten då pulsbrännaren bara fungerade som ett komplement till existerande brännare. Resultaten bekräftade de som erhållits tidigare och visade på en förbättring av förångningshastigheten på mellan 5 och 17% (tabell 1).

Dilution Air Flow Rate (SCFH)	Maximum Water Flow Rate (lbs/hr)	Pulsations (yes/no)	Percent Evap. Rate Increase by Pulsations
6000	290.4	yes	10.7
6000	262.4	no	
11,000	294.1	yes	14.5
11,000	257.6	no	
13,000	318.5	yes	17.2
13,000	271.1	no	
18,000	304.5	yes	4.8
18,000	290.4	no	

Tabell 1. Resultat från förångning av vattendroppar i pulserande flöde.

7.3.4 Torkning av kaolin

Torkningen av kaolin gjordes i samma anläggning som de inledande förångningsförsöken (fig. 19). Pulsernas inverkan på torkhastigheten bestämdes utifrån godsets fukthalt som beräknades ur dess vikt före och efter torkning. Erhållna resultat visade dock inte på någon förbättrad torkhastighet i närvaro av pulser. Orsaken till detta antogs vara följande:

- Amplituden på pulserna var för låg och nådde inte upp till den nivå som krävs för att pulserna ska ha någon inverkan (denna nivå bedöms ligga på ca 130-135 dB).
- Kaolindropparnas storlek var för liten, vilket kan ha resulterat i att de svängde med i det pulserande flödet så att någon relativ hastighetsökning inte erhöles. Pulserna hade alltså ingen inverkan.
- De pulserande flödesförhållandena i kammaren orsakade att kaolin fastnade på väggarna, vilket medförde att försöksbetingelserna blev olika för fallet med respektive utan pulser.
- Vid pulserande förhållanden var värmeöverföringen från brännaren mycket högre jämfört med "normala" förhållanden. Värmeförlusten till omgivningen var således högre och mindre energi tillfördes torkprocessen.

Ytterligare försök med kaolin gjordes för att försöka undvika ovanstående problem. De gav dock inga positiva resultat.

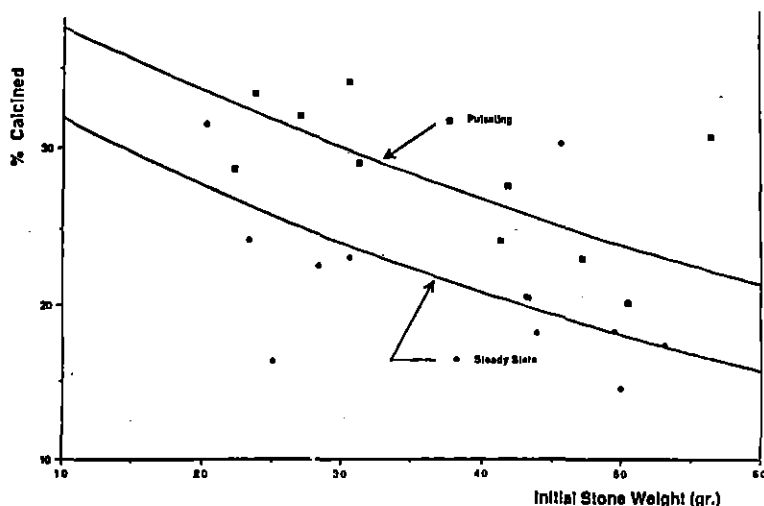
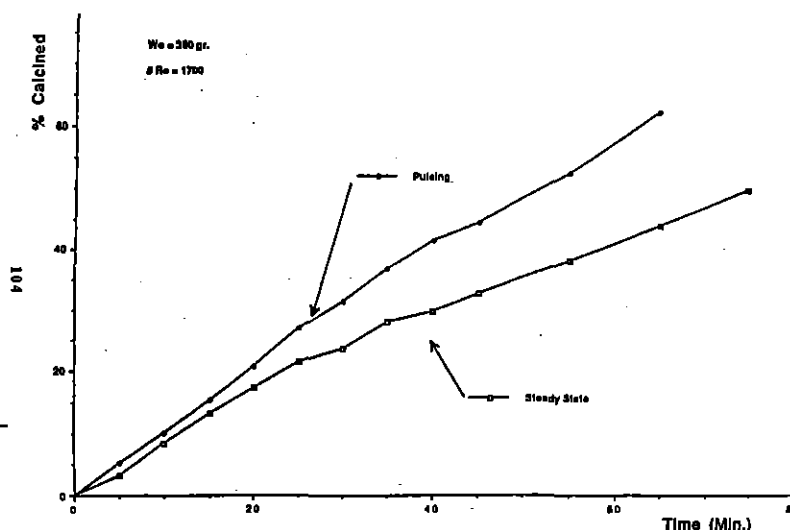
7.3.5 Kalcinering av kalksten.

Försök i liten skala hade visat på 30% förbättring av hastigheten för kalcinering av kalksten (CaCO_3). (fig.22). Resultaten hade också visat att hastighetsökningen var större vid kalcinering av stora stenar (fig.23). Dessa positiva resultat ledde till att tester i verklig skala gjordes på kalcineringsprocessen hos en cementtillverkare.

För dessa fullskaletester utvecklades först en pulsbrännare som i stort sett hade samma design som den senast utvecklade, men som bättre uppfyllde krav på bl a högre kapacitet och tåligare material. Testerna som sedan gjordes under det att kalcineringsanläggningen var i arbete gav tvetydiga och i viss mån osäkra resultat. Orsaken var svårigheter att köra under konstanta förhållanden under en längre tid, som följde av ofta återkommande driftstopp i anläggningen. Temperaturen i anläggningen under pulserande resp icke-pulserande förhållanden uppmättes för att få en bild av hur kalcineringen påverkades. Resultaten visade på en temperaturhöjning på ca 4%. Den uppnådda kalcineringen under en viss tid bestämdes också genom att med jämna mellanrum analysera kalcineringsgraden i godset. Detta visade också på en produktionsförbättring på ca 4%. Dessutom uppnåddes en bränslebesparing på ca 5%

Upprepande undersökningar gjordes, men trots det var det svårt att få entydiga resultat på vilken påverkan pulserna har på kalcineringsprocessen. De gav dock antydningar om att en förbättrad kalcineringsprocess kan erhållas i närvaro av pulsbrännare.

Figur 22. Förbättring av kalcinerings-hastigheten i närvaro av pulser.



Figur 23. Hastighetsökningen var störst med stora stenar.

7.4 Nuvarande anläggning och status.

Som tidigare nämnts har inte Sonotech velat lämna ut uppgifter på den kommersiella anläggningen Cello. De anser dock att försök som utförts med förångning av vattendroppar klart visar på att en pulsbrännare avsevärt kan förbättra både förångningshastigheten och energieffektiviteten.

I företagets broschyr över Cello anges följande generella resultat från försök med Cello [14]:

- * Bränslebesparingar på 5-17% vid förångning av vatten och kalcinering av kalksten.
- * Förbättring av produktiviteten med 20% vid uppvärmning av metaller, 5-17% vid förångning av vatten och 24-54% vid kalcinering av kalksten.
- * Reducerade sotutsläpp med 50-75% från en EPA förbränningsugn.

För övrigt anges de generella fördelar med pulsbrännare som anges i kapitel 1.4 och 5.

Företaget anger att de i dagsläget arbetar med följande projekt:

- * Utvärdering av tester där Cello anslutits till en roterugn i en asfaltsanläggning.
- * Utveckling av en Cello-brännare som ska användas för förvärmning inom stålindustrin.
- * Planering av tester som ska klarlägga fördelarna med att använda pulsbrännare i kalcineringsanläggningar inom cementindustrin.

Från Sonotechs sida konstateras att möjligheterna med pulsbrännaren Cello är många och fördelaktiga, men att ytterligare tester krävs för att klarlägga förstå hur den bäst kan användas [29].

8. Bepex's pulstork Unison™

8.1 Inledning

Bepex är ett stort amerikanskt företag i Minnesota som tillverkar processutrustning. Företaget ingår i den japanska koncernen Hosokawa Micron Group och har i Europa ett dotterbolag i Holland.

Utvecklingen av Bepex pulstork påbörjades egentligen av American Gas Association (AGA) i mitten av åttiotalet. AGA utvecklade först pulsbrännaren och tog senare kontakt med företaget Bepex för utveckling av en kommersiell pulstork. Under första kvartalet 1991 introducerade Bepex pulstorken Unison™.

Informationen om Unison har utgjorts av utvecklingsrapporter (ref. 17, 18) och företagsbroschyrer (ref. 19, 20). Någon material om senaste utvecklingsarbetet inom företaget har dock inte funnits att tillgå. Den personliga kontakt som tagits med Bepex har utvecklats positivt och företaget har på ett positivt sätt bidragit med information.

8.2 Användningsområden

Bepex's pulstork Unison är avsedd för torkning av pumpbara lösningar eller slurries och konkurrerar därför med spray- och flashtorkar. Unisons konkurrensfördel är att pulsbrännaren inte bara tillför den energi som krävs för torkning, utan att pulserna även atomiserar lösningarna på ett effektivt sätt. Det behövs alltså inget spridarmunstycke för atomiseringen. Dessutom skapas ett pulserande flöde i torkkrummet, vilket förbättrar torkhastigheten genom att mass- och värmeöverföringen blir effektivare. Torken är speciellt lämpad för värmekänsliga material eftersom uppehållstiden i torken kan hållas väldigt kort.

Unison kan torka många olika material tack vare det enkla inmatningssystemet och kan enkelt handha material som verkar skavande på spridarmunstycket i spraytorkar. Anläggningen bedöms som enkel att hantera och har låga reparationskostnader. Nackdelarna är den relativt höga ljudnivå pulserna skapar. Dessutom krävs att anläggningen måste tåla den påfrestning pulserna ger på materialet.

Aktuella användningsområden i Sverige är de områden där spray- och flashtorkar används, och i vilka inga hinder föreligger för direkt kontakt mellan rökgaser och torkprodukt.

8.3 Utvecklingsarbetet

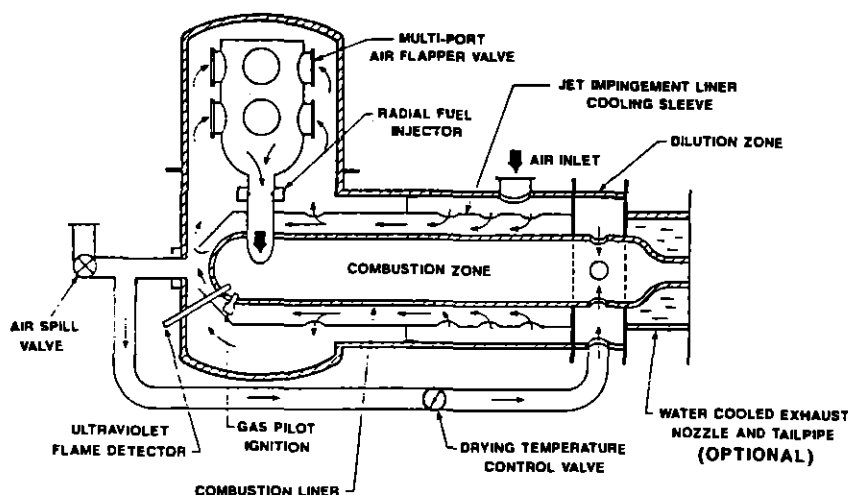
8.3.1 Pulsbrännaren

Utvecklingen började hos amerikanska gasforskningsinstitutet (GRI) som avsåg att bygga en pulsbrännare med klaffventil. Brännaren skulle jämföras med en redan existerande pulsbrännare som hade aerodynamisk ventil, eftersom dessa inte fungerat tillfredsställande i samband med torkning. Förutom att brännarna med aerodynamisk ventil hade höga ljudnivåer och kort mekanisk livslängd, kunde de inte atomisera produkterna tillräckligt. Dessutom var det svårt att kontrollera dessa brännares säkerhet och explosioner kunde förekomma. Den brännare med klaffventil, som byggdes av American Gas Association Laboratories (AGA), uppfyllde de krav GRI ställde och projektet utvecklades vidare. AGA tog kontakt med Bepex Corporation som hade stor erfarenhet av tillverkning och försäljning av torkanläggningar. Företaget var intresserat av att samarbeta i ett

utvecklingsprojekt eftersom de därmed såg möjligheten att tränga in på den del av marknaden som använde spray- och flashtorkar. Inom det området var man hittills orepresenterad. Kontakten med Bepex togs sommaren -87.

Den erfarenhet kring torkning som fanns hos Bepex gjorde att nya idéer dök upp som tvingade fram en ändring i brännarens utformning. Den brännare som AGA hade utvecklat arbetade vid ett lågt tryck (ca 1,3 bar). Bepex ansåg det dock nödvändigt med ett högre arbetstryck (1,9 bar) eftersom energin i pulserna skulle ha både en atomiserande och värmande förmåga på produkten. AGA gjorde dock sedermera atomiseringsförsök som visade att 1,3 bar var tillräckligt, vilket parterna enades om.

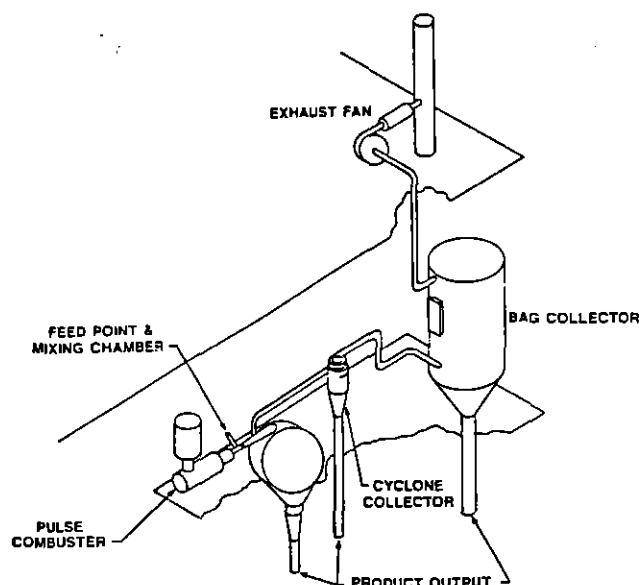
Bepex önskade också att en temperatur- och tryckreglerande funktion skulle finnas i pulsbrännaren. AGA försökte uppfylla dessa krav, men materialproblem uppstod då det eldfasta materialet i brännaren flagnade sönder. Brännaren tillverkades därför senare helt i metall. Problem fanns också i slitage av klaffventilen vid det höga arbetstrycket, vilket dock delvis avhjälpes genom att en s k multiklaffventil installerades. Brännaren levererades till Bepex i början av -89 (fig.24) och användes i atomiserings- och torkförsök. De brännarproblem som rapporterades var framförallt att tändningssystemet var otillförlitligt och att klaffventilen hade kort livslängd. Under fortsatt arbete har Bepex sedan bl a utvecklat den patenterade roterventilen som har en hög säkerhet och en lång livslängd.



Figur 24. Först levererade brännare. Multiklaffventilens livslängd var för kort.

8.3.2 Utveckling av torkkammare och inledande produkttester.

Pulsbrännaren med klaffventil användes vid design av torkrummet. Lämpligaste sätt att tillföra den blöta produkten liksom brännarens placering utprovades för att bl a uppfylla krav på en effektiv atomisering. Till skillnad från spraytorkar utsätts den blöta produkten i Unison för höga temperaturer. Det är möjligt tack vare både den effektiva atomiseringen och omblandningen, som gör att uppehållstiden i de varma gaserna kan hållas kort. Den höga temperaturen kräver en bra metod att avlägsna den torkade produkten från rökgaserna. Avskiljningen görs med cykloner och påsfilter, enligt de behov som finns (fig.25). Anläggningen i figur 25 kom att fungera som pilot-anläggning för inledande produkttester.



Figur 25. Torksystem som användes i inledande produkttester.
Problem med beläggningar på väggarna i torkkammaren.

Inledande tester med kaolin, där inmatningen gjordes tangentiellt, visade på problem med beläggning på väggarna i torkkammaren. Kammaren lades därför horisontellt och inmatningen gjordes från den platta ändan. Torkning av icke temperaturkänsliga material, som inte kräver långa uppehållstider, fungerade tillfredsställande. Vissa problem uppstod dock med värmekänsligt material som fortfarande fastnade på väggarna och överhettades. Flera olika produkter testades under det att torkkammaren utvecklades. Sammanfattningsvis visade dessa resultat på en effektiv atomisering, men ingen förhöjd torkhastighet. Energieffektiviteten i torkningen var dock hög och uppnådde som mest 92%.

Önskemålet om en hög temperatur i torkkammaren medförde indirekt vissa problem med anläggningen. För att uppnå de höga temperaturerna krävdes ett lågt luftöverskott, vilket kunde utgöra en explosionsrisk. En annan nackdel var att de låga halter av NO_x och CO som bör vara möjligt med pulsbrännare inte uppnåddes.

8.4 Kommersiella anläggningen

8.4.1 Tekniska prestanda

Den kommersiella anläggningen Unison™ som blev resultatet av fortsatt utveckling har testats för en rad olika produkter. Under våren -93 startades den första kommersiella anläggningen med 100% kapacitet samtidigt som en andra installation påbörjades. En tredje installation för forskningsändamål, och en fjärde som ska kunna hyras, är planerade till sommaren. Dessutom har ytterligare en anläggning sålts som är planerad till hösten -93. Företaget uppger att intresset för Unison är starkt.

Investeringskostnaden för Unison anges generellt vara ca 80% av kostnaden för motsvarande spraytork. Driftkostnaden är ca 10-30% lägre [28].

Följande ungefärliga tekniska data anges för Unison [19,20,28]:

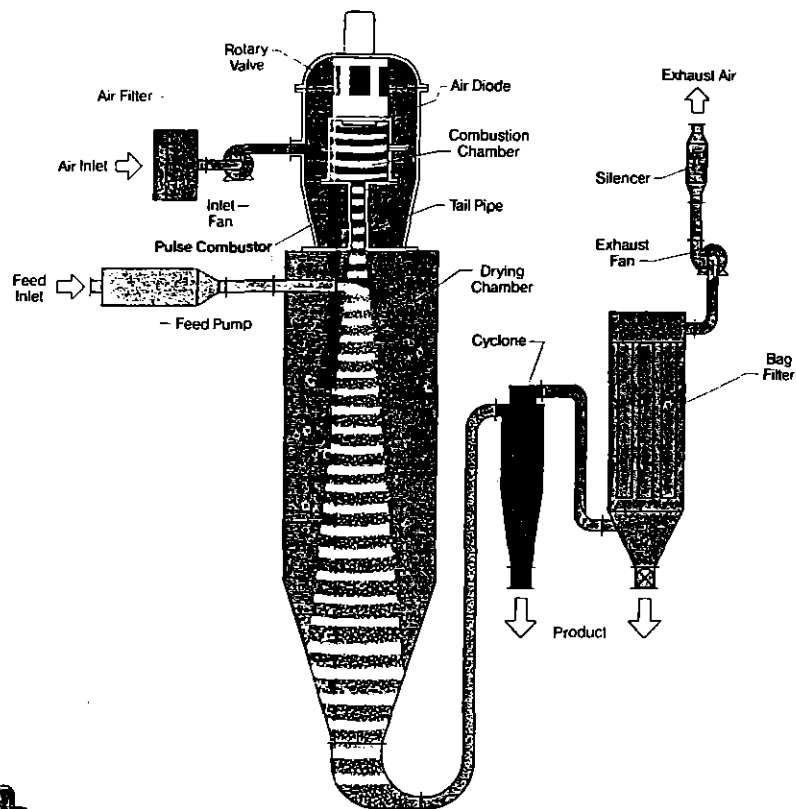
Förbränningsfrekvens	60-200 Hz
Amplitud	180 dBA
Temperatur på inloppsgaser	540-1100°C
Temperatur på utloppsgaser	80-120°C
Temperatur på torkad produkt	50-60°C
Uppehållstid	5 ms (heta zonen)
Lufttillflöde	600 kg/tim
Extern ljudnivå	< 90 dBA vid 2 m (uppfyller OHSA-krav)
Maximal torrhalt i tillflöde	90%
Torkkapacitet	100-300 kg H ₂ O/tim (beror av produkt)
Energianvändning	780-900 kWh/ton H ₂ O
CO och NO _x -halt	< 60 ppm
Halt av oförbrända kolväten	0 ppm
Maximal temperatur på metallytor	530 °C
Brännarens konstruktionsmaterial	Inconel 600 (temperaturtålig legering)
Torkkammarens konstruktionsmaterial	Efter specifika krav
Brännarsystemets säkerhet	Uppfyller krav enl. IRI (flamma kontrolleras med UV-scanner)
Arbetsstryck	0.2-0.3 bar ö
Partikelstorlek	Svårreglerat (lösningar ca 20-30 µm, för slurry beroende av material)
Investeringskostnad	Generellt 80% av motsvarande spraytork
Driftskostnad	Generellt ca 10-30% lägre än motsvarande spraytork

8.4.2 Funktion

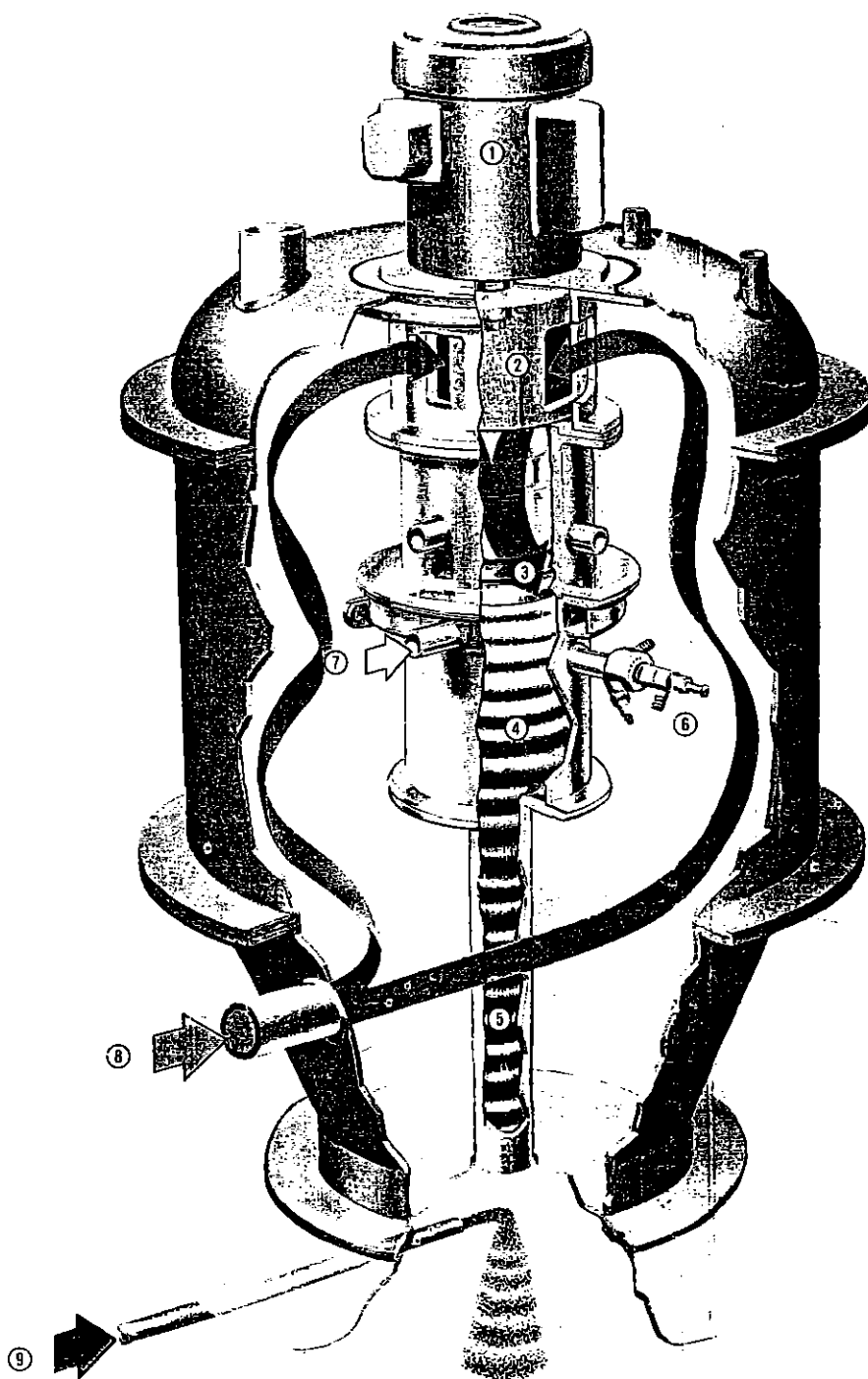
Torkanläggningens funktion illustreras tydligt i figur 26 och 27 på nästa sida. Tillförseln av förbränningsluft sker genom en roterventil som drivs av en elektrisk motor. Ingående luft passerar de uppvärmda metallytorna i brännaren och förvärms därigenom på samma gång som metallytorna kyla. Vid inloppet till förbränningskammaren sitter en luftsluss som förhindrar att avgaser tränger tillbaka från kammaren vid tryckökning. Luftslussen har också som uppgift att förhindra att temperaturen i roterventilen överstiger 150°C, vilket garanterar en lång livslängd. Även roterventilen sluter i takt med förbränningsfrekvensen och är en extra garanti för att förbränningsgaser inte strömmar ut bakvägen. Felmarginalen hos roterventilen jämfört med brännarfrekvensen kan vara $\pm 15\%$ utan att förbränningsprocessen störs. Vid inloppet till förbränningskammaren möts ingående luft och naturgas varvid gasen antänds. I initieringsstegen antänds gasen av en separat flamma medan antändningen i de följande stegen sker spontant. Brännaren är uppbyggd som en Helmholtz-brännare (se s.3), vilket gör att förbränningen blir pulserande. Frekvensen hos brännaren kan inte regleras under körning som med Cello, utan är beroende av brännarens fasta storlek.

Det fuktiga materialet pumpas in i toppen av torkkammaren och möter där avgaserna från förbränningen. De pulserande avgaserna atomiserar då materialet till fina droppar. Pulserna fortplantas sedan genom torken och bidrar till en god mass- och värmeöverföring mellan varma gasen och materialet. Eftersom torkhastigheten därav blir högre är det möjligt med en kort uppehållstid i de heta gaserna, vilket framförallt är av betydelse för värmekänsliga produkter. Det är också möjligt att hålla en högre ingångstemperatur på de heta gaserna och därigenom öka den drivande kraften för värmeöverföring. Temperaturen och fukthalten på torkade produkten regleras genom tillflödes hastigheten av fuktigt material under det att inloppstemperaturen på förbränningsgaserna är konstant. Tillfödes hastigheten av material regleras automatiskt utifrån dess torrhalt.

Den torkade produkten avskiljs efter behov med en cyklon och ett påsfilter innan avgaserna släpps ut i atmosfären.



Figur 27. Unisons system för pulstorkning.



Figur 26. Pulsbrännarsystem i Unison.

1. Roterventilens drivmotor.
2. Roterventil.
3. Luftsluss.
4. Förbränningskammare.
5. Utloppsrör.
6. Tändare.
7. Naturgas.
8. Förbränningsluft.
9. Fuktigt gods.

8.4.3 Testade produkter och dess kvalitet.

Under utveckling av Unison har många olika produkter testats. Resultaten har generellt sett varit positiva och den torkade produkten har hållit samma eller bättre kvalitet än motsvarande spraytorkade produkter. De produkter som testats är följande:

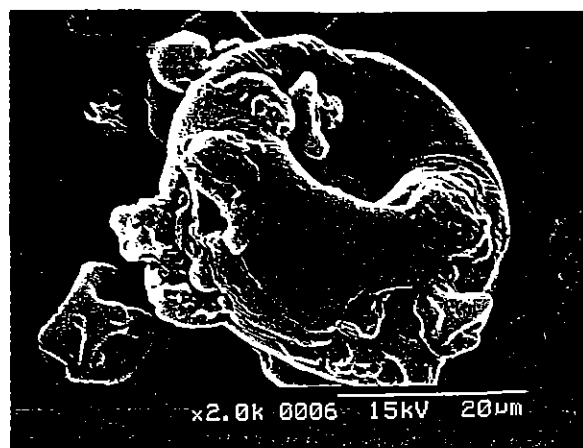
Tabell 2. Testade produkter i Bepex's pulstork Unison.

<i>Mat och läkemedel</i>	<i>Organiska ämnen</i>	<i>Polymerer</i>	<i>Specialkemikalier</i>
Antibiotika för djur*	Majskoncentrat	Akryl latex*	Alumina
Vitaminer	Aminosyra*	Vattenlösliga polymerer	Saltlake
Citronskal*	Födostillskott till boskap*	PVC	Metalliska sulfater*
Majssirap*	Fermentationsprodukter	PVP	Metalliska acetater
Majsstärkelse	Ogräsbekämpningsmedel*		Syntetiska pigment
Natrium kaseinat	Bekämpningsmedel*		Aluminiumtrihydrat*
Kryddor*	Torula jäst*		Metalliska hydroxider
Vegetabiliskt protein*	Använd bryggerijäst		Dispersanter
Fibrer*			Antiperspiranter
Hela ägg*			Metalliska pigment
Äggvita och äggula			TiO ₂
Färgämnen till mat*			Kalcinerad lera
Karamell*			Na/Al-silikater
Potatis			Amorfa silikater
Vitlök			Bränsleskyddsmedel*
Lök			Organisk lera*
Ostvassle			
Kaffe			

* Material för vilka Unison kan konkurrera med spraytorkar utifrån kvalitet och kostnad.

Värmekänsliga produkter har i många fall visat sig vara fördelaktigare att torka i Unison än i spraytorkar, eftersom produkten behandlas försiktigare. Även produkter som är känsliga mot skjuvkrafter är lämpade att torka i Unison. Orsaken är att inget spraymunstycke, som ger upphov till skjuvkrafterna, behövs eftersom pulsernas atomiserande förmåga har visat sig vara tillräcklig. Det har varit möjligt att atomisera ett brett spektra av pumpbara material utan behov av något atomiseringsmunstycke. Lösningar upp till 300 cP och slurries till 1200 cP har atomiserats. Även atomisering av fruktkött med fiberlängder på 5 mm har varit möjligt [28].

Vanligtvis är partikelstorleken på den torkade produkten mer finfördelad än om den torkats i en spraytork. Det område som anges är 20-30 μm [28]. Partiklarna har på samma sätt som vid spraytorkning ofta en sfärisk form. Med tanke på att torktemperaturen är mycket hög då Unison används finns risken att partiklarna blir fulla av håligheter. Förekomsten av detta är dock mindre än väntat och det antas tyda på att produkten behandlas försiktigt. Även det faktum att partikelväggarna på den svalnade produkten är gropiga för vissa material ses som ett bevis på att torkningen är försiktig (fig.28). Bakgrunden till denna slutsats är att partikelväggen måste vara smidig för att kunna forma sig efter ett minskat tryck inuti partikeln då produkten kallnar. En oförsiktig torkning skulle ha gett en hård och oformlig yta .



Figur 28. Unison behandlar produkterna varsamt. Fotografiet visar den smidiga ytan på ägg som torkats i Unison.

9. Pulser skapade med ljud.

Kockums Sonic i Malmö tillverkar anläggningar som utnyttjar ljud av olika frekvenser för att skapa pulser. Pulsgivarna kan vara antingen vanliga tyfoner som ger ett hörbart ljud eller anläggningar som ger ett infraljud. Tyfonerna arbetar med en frekvens på ca 250 Hz och en amplitud på 140 dBA, medan infraljudsgivaren har en frekvens på 16,5-18 Hz och amplituden ca 132 dBA.

Trycknivån som uppmätts i utloppet från infragivaren är maximalt 1,5 m vp, dvs 15 Pa. Dagens användningsområde för anläggningarna är för sotning eller rengöring av belagda ytor [24,48]. Utan att närmare ha undersökt möjligheten att använda ljudgivarna till att effektivisera torkprocesser, på motsvarande sätt som med pulsbrännare, bör detta inte vara helt otänkbart. Denna typ av anläggningar har givetvis den nackdel att de förbrukar energi som inte kommer processen tillgodo. För pulsbrännare krävs ingen extra energitillförsel för att skapa pulserna, eftersom dessa uppstår automatiskt vid förbränning. Dessutom krävs inte några extra investeringar för att installera en pulsgivare, eftersom behovet av en brännare ändå finns. Det är dock möjligt att en pulsgivare av Kockums modell skulle kunna ha en marknad för torkning av material som inte tål direkt kontakt med rökgaser. Framförallt kan man tänka sig livsmedelsindustrin.

10. Val av torkmetod.

10.1 Vad påverkar valet.

Det finns många olika orsaker till att en produkt behöver torkas. Det kan t ex vara köparen av produkten som ställer krav på en torkad produkt för att den ska vara användbar, eller att torkningen är nödvändig för att ge produkten en längre livslängd. Torkningen görs i många fall också för att produkten ska bli lättare att transportera och förvara.

Vid val av vilken torkanläggning som är den mest lämpade föreligger många olika aspekter och krav till vilka hänsyn måste tas. Det kan vara de krav som finns på produkten eller krav på processutformningen. Av stor vikt är givetvis också kostnaden för anläggningen. Exempel på de faktorer som spelar in är följande:

Produktkrav

- Rätt fukthalt.
- Rätt partikelstorlek.
- Renhetskrav (för ögat).
- Renhetskrav (kontaminering).

Kostnad

- Investeringskostnad
- Driftkostnad

Processkrav

- Säkerhetskrav
- Temperaturkontroll.
- Bullerbegränsningar.
- Torkhastighet.

Övrigt

- Tillgång på bränsle.
- Kunskap hos personal.
- Benägenhet att satsa på ny teknik.
- Marknadsföringsfrågor.

Vid torkning måste flera olika betingelser hållas under uppsikt och regleras för att torkningen ska bli lyckad. Betingelser som är viktiga att ha under uppsikt är bl a fukthalten i godset och temperaturen på torkmediet. Betingelserna styrs av flera olika variabler där flödeshastigheter och omblandning mellan torkgods och torkmedie är två av de viktigare.

Vid dålig reglering av fukthalt eller temperatur kan produkten bli oanvändbar. Produkten kan vid för hög fukthalt bli klabbig och klumpig, samtidigt som en för låg fukthalt kan göra produkten dammig eller uttorkad (bränd). Temperaturen är på motsvarande sätt viktig för att få en väl avvägd torkning. Temperaturen och fukthalten kan regleras med flödeshastigheten på materialet genom torken, i kombination med torkmediets flödeshastighet och temperatur. Omblandningen mellan produkt och torkmedie är också viktigt för att undvika en ojämn torkning. Risken finns annars att en viss del av godset blir överhettat medan andra delar är otillräckligt torra. Vid höga inmatningshastigheter (till t ex spraytorkar) där torktiden är kort måste inställningar eller fel som uppstår regleras mycket kvickt för att inte produktspillet ska bli stort.

Intresset av att använda pulserande förbränning för torkändamål påverkas givetvis av de faktorer som nämnts ovan. Vad som generellt sett kan göra pulstorkar intressanta är följande:

- * Den höga torkhastigheten som gör att torkanläggningarna kan byggas kompaktare och att investeringskostnaden kan hållas nere.
- * Pulsernas effektiva omblandning som medför att luftmängden till torken kan bli mindre och att driftskostnaden därmed kan bli lägre än jämförbara anläggningar.

- * Den effektiva omblandningen som också avhjälper problem med ojämn torkning och är en stor fördel vid torkning av värmekänsligt gods.
- * Pulsbrännare är bränsleeffektiva och orsakar mindre utsläpp av föroreningar.
- * Användningen av pulstorkar förutsätter direkt kontakt mellan förbränningsgaser och torkgods (se vidare kap.10.2)
- * Vid användning av pulstork för ändamål liknande spray- och flashtorkning kan det finnas svårigheter att uppfylla krav på pulverstorlek eller pulverkornens utseende.
- * Den pulserande förbränningen ger upphov till en hög ljudnivå, vilket gör att anläggningen måste isoleras.
- * Pulserande förbränning och framförallt pulstorkar är ett relativt okänt begrepp. Dessutom befinner sig tekniken än så länge i utvecklingsstadiet.

Vilka möjliga användningsområden som finns för pulstorkar på den svenska marknaden behandlas utförligt i kapitel 12. Torkanläggningarna från Bepex och Sonotech (kapitel 7 och 8) skiljer sig i utförande och inriktar sig delvis mot olika användningsområden.

10.2 Föroreningar i rökgaserna.

10.2.1 Föroreningshalter i rökgaserna och pulsernas inverkan på dessa.

Vid torkning med pulserande förbränning kommer rökgaserna i direkt kontakt med torkgodset. Någon annan möjlighet finns inte om effekten av den förbättrade värme- och massöverföringen skall tas till vara effektivt. De torkanläggningar som byggts med pulserande förbränning avser att eldas med naturgas, eftersom föroreningshalterna då blir lägre. Trots det föreligger problem med direkt kontakt, framförallt vid torkning av livsmedel.

De föroreningar som kan bildas vid förbränning av traditionella bränslen är svaveldioxid, kväveoxider, polycykliskt organiskt material (PAH) och sot [5]. Dessutom förekommer i vissa bränslen halter av tungmetaller. Då naturgas inte innehåller vare sig svaveldioxid eller tungmetaller kan vid naturgasförbränning bortses från dessa (tabell 2). Dessutom kan bortses från bildandet av sot. Bildandet av PAH är diskuterat och flera undersökningar har gjorts därom, vilket berörs i nästa avsnitt.

Tabell 2. Naturgasens innehåll (danska källan i Nordsjön) [5].

<i>Komponent</i>	<i>Volym%</i>
Metan	91,3
Etan	5,0
Propan	2,0
Butan	0,3
Kväve	0,4
Koldioxid	1,0

Vid all förbränning bildas kväveoxider från den kvävgas och syrgas som finns i förbränningsluften. Hur mycket som bildas är huvudsakligen beroende av temperaturen; ju högre temperatur desto mer

kväveoxider. Kväveoxidbildningen kan också minskas genom att minska uppehållstiden för reaktanterna vid den höga förbränningstemperaturen. Organiska kväveföreningar eller fri kvävgas i bränslet kan också bidra till kväveoxidbildningen.

Många studier har gjorts som visar att förbränningshastigheten ökar i närvaro av pulser. Förbränningen av pulveriserat kol tog t ex 0.08 sekunder i närvaro av pulser, jämfört ca 1 sekund i "vanliga" brännare [12]. För att nå en hög brännhastighet ska relativa hastigheten på partikeln vara hög, vilket uppnås med högamplitud-oscillering. Upphållstiden vid den höga temperaturen blir då lägre och bildningen av kväveoxider minskas.

10.2.2 Risker med direkt kontakt mellan produkt och rökgaser.

Innehållet i förbränningsgaserna är av stor betydelse vid direkttorkning av livsmedel. Förbränningsgaserna kommer vid direkttorkning i kontakt med torkgodset och risken finns att föroreningar tas upp av torkgodset eller deponeras på dess yta. De ämnen som anses farliga i detta samband är polycykliska aromatiska kolväten (PAH) och kvävedioxid som kan bilda nitrosaminer med torkgodset. Både PAH och nitrosaminer klassas som cancerogena.

PAH bildas vid ofullständig förbränning av de kolväteföreningar som bränslet innehåller. Risken är störst framförallt vid förbränning av olja och kol eftersom dessa innehåller aromatiska kolväten. Vid användning av naturgas för direkttorkning har däremot endast en försumbar ökning av PAH påvisats. Teoretiska beräkningar, grundade på koncentrationen av PAH i förbränningsgaserna från naturgas, visar också att halterna är så pass låga att ingen nämnvärd ökning av PAH är att vänta [6].

Nitrosaminer bildas genom en reaktion mellan aminer eller aminosyror och kväveoxider. Risken för nitrosaminer föreligger alltså vid torkning av produkter som innehåller aminer eller aminosyror (och således proteiner). En rad undersökningar har gjorts för att bestämma halterna av nitrosaminer i direkttorkade livsmedel. Resultaten från undersökningarna skiljer sig naturligtvis åt beroende på vilken typ av livsmedel som undersökts. Känsligast är fisk som påvisar en stor ökning jämfört med indirekt torkning. Även för malt och mjölkpulver anses direkttorkning olämpligt då höga halter nitrosaminer har hittats i öl och mjölkpulver som direkttorkats [5]. I detta sammanhang bör nämnas att i andra undersökningar av direkttorkat mjölkpulver har ingen ökning kunnat påvisas. Man har idag alltså inga enhetliga bevis på när eller hur nitrosaminer bildas. Med denna osäkerhet som grund har myndigheterna i Sverige och en rad andra länder förordat att direkttorkning inte bör användas för torkning av livsmedel då det kan antas vara olämpligt med hänsyn till människors eller djurs hälsa [8].

11. Torkanvändning inom svensk industri.

11.1 Energianvändningen för torkning

En översikt över vilka slags torkanläggningar som används inom den svenska industrin kan ge en bild av inom vilka områden pulstorkar vore lämpade. Någon fullständig och aktuell översikt finns tyvärr inte att tillgå, och att arbeta fram en sådan vore alltför tidsödande för att ligga inom ramen för detta examensarbete. En översikt från 1975, som till viss del kompletterats med hjälp av uppgifter från företag och företagsregister, ger dock en tillräckligt bra bild för att vara av intresse.

I det följande presenteras torkanvändningen inom olika branscher och de krav på torkprocessen som ställs inom vissa områden. De förhållanden som råder i vissa företag inom branchen presenteras också för att exemplifiera användningen. Energianvändningen för torkning inom respektive bransch år 1975 anges i tabell 3 nedan. Även om siffrorna är inaktuella ger de en god uppfattning om storleksordning och inbördes förhållande mellan branscherna. Aktuella siffror på totala energianvändningen inom några av branscherna visar också att några större förändringar inte skett sedan 1975 [22].

Tabell 3. Industrins energianvändning för torkning, GWh (1975) [21].

Baskemiska sektorn:		Jordbruk:	
Oorganisk kemi, gödsel etc.	450	På gården:	Foderspannmål 130
Organisk kemi, konstfiber, plaster	240		Brödspannmål 200
Cement och kalk	kalcinering ¹⁾	Centralt:	Foderspannmål 170
			Brödspannmål 100
			Vallfoder 210
Sockerindustrin:		Övrigt:	
Torkning av pressad betmassa	220	Tvättmedelsindustrin	70
Tillverkning av vallför (sommarmån.)	32 ²⁾	Färgpigmenttillverkning	2,5 ³⁾
Konditionering av sockret	18	Gipsplatttillverkning:	100 ⁴⁾
		Trävaruindustrin:	1800
Livsmedelsindustrin:		Fiberskiveindustrin:	170
Mejeri	284	Textilindustrin:	100
Spannmål och foder	25	Läderindustri:	15
Stärkelseprodukter	15	Tegelindustri:	400
Äggpulver	30	Bränsletorkning	Torv+träflis ⁵⁾
Tobak	23	Mineraler	Avvattnings ⁶⁾
Massa och Pappersindustri:			
Pappersmassa	5600		
Avsalumassa	4800		

1) Ingen torkning, men däremot kalcinering som använder motsvarande teknik

2) Görs inte i dagsläget

3) Denna notering avser tillverkning av Falu Rödfärg som idag är nerlagt

4) Siffran avser torkning av gjutna gipsplattor, men kalcinering utförs innan gjutn

5) Ingår inte i 1975 års undersökning, men torkning av bl a torv och träflis görs i dagsläget

6) Avvattnings av mineraler görs idag med pressning. Ternisk avvattnings användes förr, men anses inte intressant idag [42]

11.2 Torkanvändningen inom olika branschområden.

11.2.1 Inledning

I följande avsnitt redovisas vilka torkanläggningar som används inom industrins olika branscher, och vilka krav som i vissa fall ställs på torkmetoden. Några områden kommenteras utförligare än andra. Orsaken till det är helt enkelt att dessa områden till en början bedömts ha större möjlighet att använda pulstorkar, och därför undersökts noggrannare.

11.2.2 Baskemiska sektorn.

Den baskemiska sektorn innefattar tillverkning av oorganiska kemikalier, gödsel, organiska kemikalier, plaster etc. Dessutom ingår cement och kalkindustrin. Framförallt används roter- och fluidbedtorkar, men även spray- och flashtorkar. Inom cement- och kalkindustrin utförs egentligen ingen torkning i vanlig bemärkelse. Anläggningar av motsvarande slag används dock i kalcineringsprocesserna, där koldioxid drivs av från kalciumkarbonat.

Torkningen görs i många fall genom direkt kontakt med rökgaser från naturgas eller olja. I vissa fall finns dock krav som omöjliggör direkt kontakt. Det kan t ex vara risk för explosion, som vid torkning av gödselmedlet kalkammoniumsalpeter eller spraytorkning av lösningsmedelsbaserade polymerer, och i dessa fall används ånga som uppvärmningsmedie [38,46]. Orsaken till att ånga används är att detta möjliggör noggrann temperaturkontroll. Inte heller inom läkemedelsbranschen är direkt kontakt mellan rökgaser och produkt tillåtet. Orsaken är i detta fall de mycket höga renhetskraven [33].

För vissa produkter finns krav på partikelstorlek. Det kan gälla både för spraytorkning och för produkter som rotertorkas, t ex för spraytorkade polymerer eller granulerat gödsel.

Kalcineringsprocesser inom cement- och kalkindustrin utförs i roter- eller schaktugnar med direktvärmning av rökgaser från förbränning av olja eller naturgas [35,43]

11.2.3 Sockerindustrin.

Inom sockerindustrin torkas framförallt pressad betmassa som används till foder. Torkningen utförs i rotertorkar med rökgaser blandade med primärluft. Bränslet är vanligen naturgas.

Torkanläggningar används också för att torka det utvunna sockret, men för detta används indirekt uppvärmd luft eftersom direkt kontakt med rökgaserna inte är önskvärt.

Rotertorkarna har en längd av 18 m och en diameter på 3 m [31]. Inuti torkarna finns en slags "bafflar" som roterar runt betmassan till en viss höjd innan den faller ner till botten. När betmassan faller drivs den framåt av de varma rökgaserna. Den största delen av torkningen utförs i det skede då materialet faller och befinner sig fritt i de varma rökgaserna. Rörelseriktningen mellan betmassan och de varma rökgaserna är då vinkelrät, vilket gör att omblandningen och graden av turbulens antas vara relativt god.

11.2.4 Livsmedelsindustrin.

Livsmedelssektorn delas lämpligen upp i olika grenar. En lämplig fördelning i detta fall är en delning i dels den industri som tillverkar olika slags pulver, t ex mjölkpulver, fruktpulver, äggpulver etc och dels produktionen av spannmål.

Den förstnämnda industrin använder nästan enbart spraytorkar. Torkningen görs uteslutande indirekt pga oro för kontaminering och nitrosaminbildning vid direkt kontakt med rökgaser. Att torka livsmedel i direkt kontakt med rökgaser är generellt sett också förbjudet enligt lag i Sverige [8]. Även om risken i många fall är obefintlig, och tillstånd skulle kunna fås efter särskild prövning, finns en inneboende negativ attityd mot direkt torkning av livsmedel. I grunden bottnar detta i att företagen vill ha "ryggen fri" och inte vill riskera att deras produkter utgör orsak till rädsla och oro hos konsumenterna [37,40,42].

Torkning av spannmål inom livsmedelsindustrin görs precis som inom jordbrukssektorn (kap.11.2.6) i olika slags siloliknande schakttorkar.

11.2.5 Massa och pappersindustrin.

Inom denna bransch används torkning för flera olika ändamål och olika sorters torkanläggningar används. Vid torkning av pappersmassa i papperstillverkningen används i huvudsak cylindertorkar, medan torkning av avsalumassa görs i fling- eller fläktorkar. Flingtorken är en pneumatisk strömtork och systemet är i sitt utseende mycket likt pulstorken Unisons. Avsalumassan framställs av mekanisk massa (CTMP-massa) och har vid inmatning till torken en torrhalt av ca 45%. Torkningen görs i direkt kontakt med rökgaser från förbränning av olja eller naturgas, alternativt med ånga. Fukten hos den blöta produkten är huvudsakligen bundet som inre fukt, vilket kräver en uppehållstid på ca 10 sekunder. Den långa uppehållstiden nås genom att ha en tillräckligt lång transportsträcka från inmatning till utmatningspunkt i torken. Torkad produkt har en torrhalt på ca 10% och består av fibrer ihopklumpade till mindre bollar [31].

Före förbränning av returpappersslam avlägsnas största delen av vattnet i pressar [41]. Enda anledningen att utföra någon ytterligare torkning är då slammet måste lagras före förbränning. Då krävs fullständig torkning för att inte slammet ska ruttna. Någon sådan här lagring görs dock veterligen inte idag.

Inom massaindustrin kalcineras kalciumkarbonat i den sk mesaombränningen. Till detta används rotertorkar. Flashtorkar har provats i andra länder för kalcineringen, men problem uppstår pga att den producerade kalciumkarbonaten blir väldigt reaktiv jämfört den som produceras i rotertorkar. Detta skapar problem med hög värmeutveckling vid användandet [47].

Lermaterialet kaolin som används för ytbestrykning vid bl a journalpapperstillverkning torkas enligt uppgift inte i Sverige [25].

11.2.6 Jordbruksindustrin.

Denna sektor innefattar den torkning av spannmål som görs av spannmålsproducenterna. Torkningen utförs dels på lantgårdar och dels centralt i större anläggningar. Torkning av foder- och brödspannmål görs i siloliknande schaktorkar och torkning av vallfoder görs i rotertorkar. Spannmålstorkarna använder både varm- eller kallluft. På lantgårdar används även hötorkar som torkar med kallluft [51].

11.2.7 Annan industri

Tvättmedelsindustrin:

Tvättmedelsindustrin använder spraytorkar som direktvärms med en blandning av rökgaser, friskluft och eventuellt recirkulerad luft. Krav finns på att rökgaserna inte innehåller sot som kan smutsa ner produkten. Tvättmedelstillverkningen är dock nerlagd i Sverige sedan något år tillbaka [49,50].

Trävaru-, fiberskive-, textil-, läder- och tegelindustri:

Torkningen av dessa produkter utförs i olika typer av kammare där materialet värms av ånga, varm luft eller rökgaser. Torkningen utförs i samtliga fall relativt långsamt, eftersom största andelen av fukten är bundet i materialet. Dessutom måste temperaturen vara relativt låg för att materialet inte ska få brännskador.

Gipstillverkning:

Den enda egentliga torkning som utförs är torkningen av de gjutna gipsplattorna. Denna torkning utförs i sk etagetorkar och på samma sätt som i föregående grupp är det en långsam torkprocess som styrs av materialets inre motstånd. I tillverkningsprocessen ingår dock även en typ av kalcinering där kristallvatten i naturgips avlägsnas. Då gipsplattorna gjuts tillförs vattnet åter. Det

finns flera olika sätt att utföra kalcineringen. Gyproc använder en typ av gryta som direkt-uppvärms med rökgaser, från förbränning av olja eller naturgas, samtidigt som naturgipsen mals [45]. Danogips använder däremot en s k Raymondkalcinator i vilken malningen görs med hammare fästa i ett centrumstag som slår sönder naturgipsen [44]. Värmningen sker i detta fall direkt med rökgaser från förbränning av gasol. Den kalcinerade produkten bör i båda fallen uppfylla vissa krav på partikelstorlek. Ett för fint pulver medför att vätningen, då gipsen ska gjutas, blir svår och kräver för mycket vatten. Vid kalcineringen är det också viktigt att torkningen inte drivs för långt så att gipsen bli "dödbänd". Naturgips innehåller två kristallvatten och efter torkning bör ett halvt finnas kvar. I dagsläget blir det alltmer vanligt med s k avsvavlningsgips som framställs vid rening av rökgaser från svaveldioxid. Denna gips kräver ingen malning, men annars är förfarandet detsamma.

Torv och träbränslen

Torv torkas idag i trycksatta ångtorkar. Den första avvattningen av torven görs genom soltorkning varefter ångtorkning tar vid [36]. Träbränslen torkas i strömtorkar eller rotertorkar. Strömtorken motsvarar den som används för torkning av mekanisk massa inom massaindustrin. Skillnaden är den att träflisen inte rivs sönder i samma grad för träbränslen [31]. Torkningen görs genom direkt kontakt med rökgaser, vanligen från förbränning av träbränslet.

12. Intressanta marknadsområden för pulstorkar.

12.1 Generella hinder och möjligheter.

Användandet av pulstorkar kan bli intressant inom många olika torkprocesser. De pulstorkar som finns idag ställer dock vissa krav på både torkprocessen och den produkt som ska torkas. Utifrån dessa krav kan flera marknadsområden uteslutas och de intressanta delarna ringas in. Lämpliga användningsområden för pulstorkarna anges i schemat i kap. 12.2 genom att utgå från totala torkanvändningen i svensk industri, och succesivt "bena" fram de områden som kan vara intressanta utifrån begränsande krav. Avsikten är att i stora drag visa vilka problem och möjligheter som finns inom olika branscher. Bedömningen har gjorts utifrån Bepex's och Sonotech's pulstorkar. Eftersom pulstorkarna fortfarande befinner sig i utvecklingsstadiet är det givetvis omöjligt att exakt ange i vilka processer de kan, eller inte kan, användas. Framförallt är det svårt att uppskatta möjligheterna med Sonotech's anläggning, eftersom väldigt få tester har gjorts. Bepex har kommit mycket längre och har även viss erfarenhet från anläggningar i drift.

I kapitel 12.3 ges en utförligare bakgrund till de slutsatser som dragits.

De begränsande faktorer som legat till grund i schemat i kap. 12.2 har varit följande:

** Processkrav*

- Bepex's pulstork Unison är avsedd att användas där både torkning och atomisering av produkten önskas. De områden som är intressanta är således de där spray- eller flashtorkar används idag. Det torkade slutmaterialet är pulverformigt.
- Sonotech's pulstork Cello är tänkt att ha en bredare användning, och bedöms kunna ersätta flera av de konventionella brännare som idag används. En förutsättning torde dock vara att torkningen utförs i någon form av torkkammare, i vilken egensvängningar kan skapas av pulserna. Intressanta områden bör alltså vara där t ex rotertorkar används idag. (Cello kan också lämpa sig för flash- och spraytorkar, men eftersom Unison ligger längre fram i utvecklingen av motsvarande system har inte Cello angivits för dessa tillämpningar.)
- Vid användning av Sonotech's anläggning bör brännarmunstycket stå i nära kontakt med torkkammaren. Om de varma rökgaserna måste förmedlas till kammaren via någon form av rörledningar kan det finnas problem för pulserna att skapa resonanssvängningar.

** Materialkrav:*

- Egenskaperna hos materialet bör vara sådana att torkhastigheten förbättras i närvaro av pulser. Torkhastigheten ska inte styras av det inre motstånd med vilket fukt binds till godset, utan den konstanta hastighetsperioden ska vara den dominerande under torkförloppet.
- Materialet ska kunna direkttorkas med rökgaser. Materialet ska t ex inte vara känsligt för att kontamineras genom kontakt med rökgaserna från förbränning. I vissa fall finns också explosionsrisker som förhindrar direkt kontakt. Förbränningen antas ske med naturgas.
- Mycket specifika krav på kornstorlek, som idag uppfylls vid spraytorkning, kan vara svårt för Bepex's tork att uppfylla.

Dessutom kommer, som nämnts i kapitel 10, andra faktorer att spela in för att företagen ska intressera sig för den nya teknik som Unison eller Cello innebär. Dessa faktorerers betydelse är individuella från fall till fall och ingår därför inte i schemat. Några av dessa faktorer är följande:

** Ekonomiska faktorer*

- Vid nyinvesteringar krävs ofta återbetalningstider på ca 3 år. Den energibesparing, eller kvalitetshöjning, som uppnås måste alltså vara tillräckligt stor för att klara detta krav. Vid ersättningsinvesteringar blir förutsättningarna annorlunda, eftersom det intressanta då är investerings- resp driftskostnadens nivå i jämförelse med andra alternativ.

** Övriga faktorer*

- För att satsa på ny teknik krävs en viss chanstagning och "innovationslust". Det är ofta, på kort sikt, enklare att hålla sig till beprövad teknik.
- I samband med introduktion av ny teknik krävs utbildning av personal, vilket kan vara både kostsamt och problematiskt.
- Förtroende för tillverkaren av den nya tekniken samt benägenheten att satsa på nya relationer (enl. diskussion i kapitel 13).

12.2 Schema över intressanta områden (utvikbar sida)

12.3 Intressanta marknadsområden för pulstorkar inom svensk industri.

12.3.1 Inledning

I detta avsnitt kommenteras vilka möjligheter och svårigheter som följer med att använda pulstorkar inom olika branschområden (enl. branschindelningen i kap. 11). Kommentarererna bygger på den information som inhämtats från företag eller branschinstitut, samt tillgängliga uppgifter om pulstorkarna Cello och Unison. Eftersom någon fullständig, detaljerad information inte finns om torkanvändningen i Sverige är det givetvis svårt att ge någon heltäckande bild över pulstorkarnas marknadspotential. Det finns därför en risk för att problem och möjligheter för vissa företag generaliseras till hela branschen. Eftersom utgångspunkt är dagens befintliga teknik finns också en risk att begränsande problem lyfts fram mer än eventuella möjligheter.

12.3.2 Baskemiska sektorn

Inom den oorganiska industrin finns i flera fall inga direkta hinder för att använda pulstorkar. Bepex's pulstork Unison skulle sannolikt lämpa sig bra i flera av de fall där spray- eller flashtorkar idag används. Tack vare den korta uppehållstiden och den effektiva omblandningen är torkning av värmekänsliga produkter speciellt fördelaktigt. En anläggning med Unison har den fördelen, jämfört med spraytorkar, att en dysa inte behövs för atomisering av den blöta produkten. Det är alltså möjligt att undvika underhållskostnader för dysan. Dessutom är både investeringskostnaden och bränslekostnaden lägre för Unison. Som tidigare nämnts bedöms investeringskostnaden generellt kunna bli 20% lägre och driftskostnaden 10-30% lägre än motsvarande spraytork. Orsaken till det är både den effektivare förbränningen och den förbättrade torkprocessen. Förutsättningen för att Unison ska bli intressant är dock att det inte finns några mycket noggranna krav på en specifik pulverstorlek. Vid användning av Unison är det nämligen svårt att styra storleken på samma sätt som kan göras med hjälp av dysan i en spraytork.

I vissa fall kan det finnas säkerhetsrisker som förhindrar torkning med varma rökgaser i direkt kontakt, t ex vid torkning av gödselmedlet kalkammoniumsältpeter. Dessutom kan produktkrav förhindra användandet, t ex inom läkemedelssektorn där direkt torkning inte kan användas.

I den svenska industrin är det veterligen bara Kemira som torkar oorganiska kemiska produkter i spray- och flashtorkar. För övrigt importeras sådana produkter. Möjligheterna och fördelarna med att använda Unison för Kemiras torkprocesser behandlas utförligare i kap. 12.4.

12.2 Schema över intressanta områden

Följande schema visar inom vilka områden det kan vara fördelaktigt att använda pulstorkar. Utifrån dagens torkning "benas" de intressanta områdena fram utifrån ett fåtal viktiga faktorer. Avsikten är att i stora drag ge en bild av vilken potential som finns för att använda pulstorkarna Unison och Cello inom de olika branscherna (enl. indelningen i kap. 11). Informationen om dagens torkanvändning är inte tillräcklig för att bilden ska bli helhetstäckande. Det bör poängteras att det finns en risk att problem och möjligheter för vissa industrier generaliseras till hela branschen. Dessutom bör komma ihåg att utgångspunkten är dagens torkanläggningar och att någon hänsyn knappast tas till att nya metoder kan utvecklas, som bättre kan dra nytta av pulstorkningens fördelar. Utförligare kommentarer till respektive branschområde ges i kapitel 12.3

	Torkmetoder som kan gynnas/ersättas av pulstorkning	Begränsning i att direkt kontakt mellan rökgaser och produkt inte är möjligt/tillåtet	Begränsning i produktkrav eller egenskaper hos materialet	Cello® eller Unison™ som potentiell pulstork	Områden där pulstorkar kan användas. Personlig bedömning av potentialen (svag/medel/stark)
Baskemiska sektorn					
Oorganisk industri (Baskemikalier, gödsel etc.)	⇒ Roter-, flash- och spraytorkar.	⇒ Om risk för brand eller explosion föreligger (t ex vissa gödselmedel).	⇒ - Krav på partikelstorlek. - Hög inre fukthalt (hos bl a gödselmedel)	⇒ - Cello (roterertorkar) - Unison (spray- och flashtorkar)	⇒ - Baskemikalier som idag torkas i spraytorkar (och ev. roterertorkar). Stark potential. - Ev. viss gödselmedelstillverkning. Svag potential.
Organisk kemi (plaster etc)	⇒ Roter-, flash- och spraytorkar.	⇒ - Om risk för brand eller explosion föreligger (t ex vid förångning av lösningsmedel inom polymerindustrin.) - Ej lämpligt inom läkemedelindustrin.	⇒ Ev. krav på partikelstorlek (t. ex inom polymerindustrin).	⇒ - Cello (roterertorkar) - Unison (spray- och flashtorkar)	⇒ Torkning av emulsionspolymerer. Medelpotential.
Cement och kalk	⇒ Kalcinerings (roterertorkar)	⇒ Inga begränsningar	⇒ Inga begränsningar	⇒ Cello	⇒ Kalcineringsprocesser som utförs i roterugnar. Medelpotential
Sockerindustri					
Torkning av betmassa	⇒ Rotertorkar	⇒ Inga begränsningar	⇒ Hög inre fukthalt.	⇒ Cello	⇒ Svag potential
Torkning av socker	⇒ Fläktork	⇒ Ej önskvärt			
Livsmedelsindustri					
Mejeri	⇒ Spraytorkar	⇒ Ej tillåtet			
Stärkelseprodukter	⇒ Spraytorkar	⇒ Ej tillåtet			
Äggpulver	⇒ Spraytorkar	⇒ Ej tillåtet			
Tobak	⇒ Trumtorkar	⇒ Trol. ej önskvärt			
Massa och papper					
Avsalumassa	⇒ Flingtorkar	⇒ Inga begränsningar	⇒ Inga begränsningar	⇒ Unison	⇒ Svag potential
Papper					
Slamtorkning samt kalcineringsprocesser	⇒ - Idag torkas inte slam, men möjligheten finns. - Rotertorkar för kalcinerings	⇒ Inga begränsningar	⇒ - Slam: Inga begränsningar - Kalcinerings: Partiklarna får ej vara för små.	⇒ - Unison (ev. för slam) - Cello (kalcinerings).	⇒ Svag potential (pga dyrt bränsle)
Jordbruk					
Foderspannmål	⇒ Schakttorkar (eventuellt)	⇒ Om det ej godkänns av myndigheter.	⇒ Hög inre fukthalt.	⇒ Cello	⇒ Svag potential
Brödspannmål	⇒ Schakttorkar (eventuellt)	⇒ Om det ej godkänns av myndigheter.	⇒ Hög inre fukthalt.	⇒ Cello	⇒ Svag potential
Vallfoder	⇒ Schakttorkar (eventuellt)	⇒ Om det ej godkänns av myndigheter.	⇒ Hög inre fukthalt.	⇒ Cello	⇒ Svag potential
Övrigt					
Gipsplattstillverkning	⇒ Torkanl. för kalcinerings.	⇒ Inga begränsningar	⇒ Partiklarna får ej vara för små.	⇒ Cello	⇒ Svag potential
Trävaruindustri					
Fiberskivtillverkning					
Textilindustri					
Läderindustri					
Tegelindustri					
Bränsletorkning	⇒ Trycksatta trumtorkar vid torkning av torv.	⇒ Om brandrisk	⇒ Troligen hög inre fukthalt.	⇒ Unison, Cello	⇒ Svag potential

Det finns inom flera områden i den oorganiska kemiska industrin goda möjligheter att utnyttja Sonotechs pulsbrännare Cello. På flera håll torkas produkter i rotertorkar där det värmande mediet utgörs av rökgaser från förbränning av olja eller naturgas, t ex vid torkning av gödselmedlen NPK och PK. I dessa fall bör det vara möjligt att antingen komplettera existerande brännare med Cello eller enbart använda sig av Cello. Det är svårt att uttala sig om vilka förbättringar i torkeffekt som skulle uppnås, eftersom anläggningen inte är tillräckligt testad i liknande tillämpningar. Ofta är det dock så att de material som torkas i rotertorkar ofta karakteriseras av att de har en hög andel inre fukt och således en lång avtagande hastighetsperiod. Teoretiskt sett bör därför pulserna inte ha någon nämnvärd effekt på torkhastigheten.

Inom plastindustrin skulle Unison kunna användas för torkning av vattenbaserade emulsionspolymerer. En stor fördel i detta fall är den effektiva omblandningen och korta uppehållstiden eftersom polymererna är mycket värmekänsliga. Tester har gjorts med Unison i USA för torkning av PVC och vattenlösliga polymerer. Resultaten visade dock inte på att metoden var konkurrenskraftig. Orsaken är dock okänd.

Att använda pulstorkar inom läkemedelsindustrin bör anses som uteslutet med tanke på de mycket stränga renhetskrav som förhindrar direkt kontakt med rökgaser.

12.3.3 Sockerindustrin

Sonotechs pulsbrännare Cello skulle troligtvis mycket väl kunna användas till de rotertorkar i vilka man idag torkar betmassa. Vattnet binds dock till största delen som inre fukt (ca 90%) och det är därför mycket tveksamt om pulserna skulle kunna ge någon ökad torkhastighet. Dessutom gör man idag den bedömningen att graden av turbulens är relativt god och i sådant fall är det givetvis svårt att förbättra denna nämnvärt. Dessutom skulle den kapacitetsökning, som en eventuell ökad torkhastighet skulle resultera i, inte kunna utnyttjas enligt Sockerbolagets bedömningar. Orsaken till det är att trumman pluggas igen av betmassa, om gashastigheten skulle ökas för att transportera igenom materialet fortare. Detta problem skulle i sådant fall behöva lösas på något sätt. De fördelar som finns i att förbränningen är effektivare och att NO_x-halten skulle kunna sänkas något är inte heller tillräckliga motiv för att göra pulsbrännaren intressant.

Direkt kontakt vid torkning av strösocker har diskuterats inom Sockerbolaget, men har bedömts olämpligt. Orsaken till det ligger i att socker är ett livsmedel med höga renhetskrav samt att företaget vill ha "ryggen fri", enligt det resonemang som diskuterades i samband med livsmedel (kap.11.2.4).

12.3.4 Livsmedelsindustrin

Utifrån de tester som gjorts i USA verkar det som om Bepex pulstork bäst kommer till sin rätt för torkning av livsmedel. Orsaken till det är givetvis att livsmedelsindustrin använder sig mycket av spraytorkar, men även att de försök som har gjorts i USA visar positiva resultat från torkning av livsmedel. Fördelen ligger inte bara i att torkhastigheten blir högre, utan även i att kvaliteten hos den torkade produkten blir bättre. Orsaken är den korta uppehållstiden, vilket bl a gör att smakämnen inte förstörs i samma grad som vid användandet av spraytorkar. Tyvärr är direkt torkning av livsmedel, vilket tidigare nämnts, generellt sett inte tillåtet i Sverige och detta förhindrar torkning med pulsbrännare. Även för foder undviks i många fall direkttorkning, t ex för mjölkpulver och proteinpulver.

12.3.5 Massa- och pappersindustrin

Inom massa- och pappersindustrin är det eventuellt för torkning av sk avsalumassa som pulstorkar skulle kunna användas. Med tanke på att den inre fukthalten är så pass hög i massan är det visserligen tveksamt om torkhastigheten kan förbättras med pulser. En annan aspekt som

emellertid skulle kunna göra pulsbrännare intressanta är att det vore fördelaktigt om den torkade produkten, som idag ligger ihopklumpad till bollar, kunde separeras till enskilda fibrer. Denna separering skulle kanske kunna göras med hjälp av pulser. De krafter som råder mellan fibrerna är av mekanisk natur och utgörs av "krokar" eller "hakar" som binder ihop fibrerna. Fibrerna kan avskiljas mekaniskt, men frågan är om det räcker med de krafter som pulserna kan ge. Problemet är att pulserna troligtvis bara kommer att ge krafter i en längdsriktning (två dimensioner) och att det kan krävas krafter i flera riktningar för att kunna "haka" upp krokarna. Veterligen har inga försök gjorts för att använda pulser för detta ändamål och det är svårt att säkert veta om det skulle fungera.

I mesaombränningens kalcinering av kalciumkarbonat är det möjligt att en pulsbrännare som Cello skulle kunna vara fördelaktig. Idag används dock barkpulver som bränsle och kostnaden för att övergå till naturgas lär sannolikt bli mycket högre än de besparingar som pulsbrännaren kan ge.

12.3.6 Jordbruksindustrin

Sonotechs pulstork bör i princip kunna användas för både spannmåls- och hötorkning. Inga försök av detta har dock gjorts och det är svårt att uttala sig om vilken förbättring detta skulle kunna ge. På samma sätt som för torkning av betmassa är det så att den blöta produkten har största delen av vattnet bundet som inre fukt, och att torkhastigheten därför troligtvis inte påverkas mycket av pulserna. Det är dock troligt att pulserna skulle ge en bättre omblandning och därigenom jämnare temperaturfördelning i torkgodset. Produktens kvalitet skulle då förbättras eftersom risken för övertorkade spannmål, med denaturerade proteiner som följd, minskar.

I många av dagens anläggningar transporteras de varma rökgaserna från brännaren till torkutrymmet via böjda kanaler och det är därför tveksamt om det överhuvudtaget är tekniskt möjligt att skapa stående pulser i dessa anläggningar. Risken finns att pulserna "dör ut" eller att andra problem, som t ex kraftig uppvärmning av ytorna i kanalerna, gör att pulsbrännarna inte kan användas i dessa anläggningar.

12.3.7 Annan industri

Pulstorken Unison borde lämpa sig väl för tillverkning av tvättmedel i pulverform. Tvättmedel tillverkas dock inte i Sverige i dagsläget.

Inom området trävaror, textil, tegel m m är det svårt att se att pulsbrännare har något att tillföra. Torkningen utförs vid alltför låg temperatur och materialen har en mycket stor del vatten bundet som inre fukt. Det är alltså svårt att skynda på torkhastigheten. Motsvarande gäller för torkning av gipsplattor. Inom gips- och cementtillverkning utförs dock en kalcineringsprocess i vilken pulsbrännare borde kunna ge fördelar. Framförallt gäller detta troligtvis brännaren Cello som borde kunna appliceras till kalcineringsutrymmet. Unison anses från Bepex sida inte vara användbar i sammanhanget pga att de temperaturer som krävs är för höga. Uppehållstiden hos Unison är troligtvis också för kort. Sonotech har gjort försök med att använda Cello vid kalcinering av kalksten för tillverkning av cement. Resultaten visar (enl.kap 7.4.4) på en bränslebesparing mellan 5-17% och produktivitetsökning på 24-54%. Ytterligare försök är planerade.

Att torka träbränslen eller torv med pulser ger troligtvis ingen större förbättring av torkhastigheten. Materialet har en för hög andel inre bunden fukt för att påverkas. Den förbättrade omblandningen vid torkning i rotertorkar skulle kunna ge förbättringar, men det är svårt att förutse. Vid torkning av träbränslen finns heller ingen önskan att frilägga fibrerna i träbränslet, som inom massaindustrin, som kan göra användandet intressant.

12.3 Kostnadsberäkning på specifikt fall

Kemiföretaget Kemira i Helsingborg tillverkar bl a natriumfosfat. För torkningen används en spraytork med en spridarskiva som atomiserar tillförd lösning. Spraytorken som tillverkats av danska APV har en höjd på ca 8 m och en diameter på ca 3 m. Som värmande medie används rökgaser från förbränning av naturgas [32].

Bepex har utifrån angivna designdata gjort kostnadsberäkningar på vad pulstorksanläggningen Unison skulle kosta för att klara motsvarande uppgift (se nedan). Spraytorkens existerande brännarsystem är i dagsläget mer nedgången än torkkammaren. En bedömning har därför också gjorts om huruvida det är möjligt att behålla torkkammaren i ett framtida pulstorkssystem. Resultatet har inte i detalj jämförts med kostnaderna för en spraytork, men visar ändå följande:

- * Investeringskostnaden konkurrerar mycket väl med en motsvarande spraytorksanläggning.
- * Driftskostnaden ligger i samma storleksordning som dagens spraytorksanläggning.
- * Det bör vara möjligt att med gott resultat installera pulsbrännarenheterna till redan existerande torkkammare.

Budgeterade kostnaden beräknades till:

Anläggningskostnad	870 000 USD $\pm$ 15% (Ca 6,4 milj SEK)
Installationskostnad	Ca 1,9 milj. SEK (30% av anl.kostn.)

I kostnaden ingår hela det torksystem som visas i figur 27 på sidan 33. Skillnaden är att anläggningen består av två pulsbrännare och två inmatningssystem, för övrigt är systemet detsamma. Konstruktionsmaterialet är rostfritt stål (2304). Vid eventuellt intresse från Kemiras sida kommer produkten att provköras i Bepex pilotanläggning i Minneapolis.

Tabell 3. Designdata för spraytorkning av natriumfosfat [32]

Produktens kemiska formel	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 : \text{NaH}_2\text{PO}_4$ (2:1)
Lösningsmedel	Vatten
Tillflödes hastighet	8165 kg/h (55% TS, 91°C, 15 cP)
Torkhastighet	4083 kg H_2O /h
Produktionshastighet	4082 kg/h (90% TS)
Torkgasers in/utloppstemperatur	1038°C/163°C
Produkttemperatur	91°C
Energitillförsel, dim.värde (naturgas)	4,6 MW
Medelvärde	3,7 MW
Inloppsfläkt	37,3/44,7 kW
Utloppsfläkt	35,8/44,7 kW
Arbetskraftsbehov	15 min/h

13. Marknadsföringsfrågor

13.1 Industriell marknadsföring

För att kort belysa vilka svårigheter som finns med att introducera ny teknik och nya produkter diskuteras i detta avsnitt vissa marknadsföringsaspekter. Den industriella marknadsföringen skiljer sig från den konsumentinriktade på många olika sätt. Den grundläggande orsaken är att de produkter eller tjänster som säljs oftast är mycket mer omfattande i industrin och att kunderna är mindre benägna att ta risker eller göra chanstagningar. Det säljande företaget måste kunna övertyga kunden om att han kan lita på säljarens produkt. Den process som föregår ett avtal är av dessa orsaker ofta mycket omfattande.

Att etablera en nytt företag på den industriella marknaden kräver stora investeringar, inte bara i teknik utan även i att bygga upp kontakter med potentiella köpare. Av stor vikt på marknaden är det nätverk av relationer som fungerar som bindningar mellan köpare och säljare. Bindningarna kan vara av olika slag, som t ex att företagets tillverkning är anpassad till varandra ur teknisk och kunskapsmässig synvinkel så att företagets tillsammans uppnår en effektiv tillverkning. Bindningarna kan också vara mer socialt inriktade och grundar sig ofta i att företagen genom långt samarbete lärt känna varandra personligt och fått förtroende för varandra. Parterna tenderar att se varandra allt mer som samarbetspartners istället för bara köpare och säljare. Hur starka bindningarna är beror mycket på hur mogen branschen är, och ofta hur många aktörer som finns på marknaden. Inom torkindustrin finns ett fåtal stora tillverkare som under lång tid har befest sina positioner på marknaden. Kunskapsnivån inom företagen är hög och man fungerar i sina kundrelationer som experter vilka kunderna har stort förtroende för. På den svenska marknaden är det företagen Fläkt och Ahlström som är de stora leverantörerna av torkanläggningar inom pappersindustrin. Inom spray- och flashtorkning är det framförallt Niro och APV.

För att ett nytt företag eller en ny teknik ska kunna etablera sig på marknaden krävs att företagets produkt är tillräckligt attraktiv för att köparen ska våga bryta de bindningar som byggts upp och satsa på en ny samarbetspartner. Företagets produkt utgörs inte bara av den fysiska produkten utan även av bakomliggande faktorer som företagets servicenivå, dess goda renommé på marknaden m m. Det räcker således oftast inte att kunna visa på att företagets fysiska produkt är *mer* lönsam än konkurrentens, den måste vara *tillräckligt mer* lönsam för att det ska bedömas intressant att satsa på en ny leverantör och ny teknik. För att kunna introducera en pulstork på marknaden räcker det alltså troligtvis inte att pulsbrännaren bara är något mer bränsleeffektiv, och att utsläppen av föroreningar blir lägre än för existerande konventionella brännare. Det krävs ytterligare fördelar. Det som framförallt kan göra pulstorkarna intressanta inom specifika områden är att anläggningarna kan byggas kompaktare och billigare, eller att produktkvaliteten kan förbättras. Inom torkbranschen är det sannolikt mycket svårt att slå sig in som ny leverantör med tanke på de befintliga företagens starka position.

13.2 Möjligheten att introducera en pulstork på marknaden

Bepex pulstork Unison har den fördelen jämfört spraytorkar att den inte har behov av någon spraydysa vilket ger besparingar i underhåll. Anläggningarna kan också byggas kompaktare än konventionella spraytorkar. Dessutom har det visat sig att produktkvaliteten i vissa fall kan förbättras tack vare att produkten behandlas försiktigare under torkning. Dessa fördelar är sammantaget tillräckligt intressanta inom vissa områden. Dessutom bör man veta att Bepex är ett stort företag som har skapat sig en stark position inom torkbranschen, och vars namn troligtvis

inger förtroende (framförallt i USA). Det kan också vara så att företaget sedan tidigare har ett samarbete med de kunder hos vilka man idag utprovar och testar Unison. Etableringshinderna för den nya torken blir därigenom lägre.

Sonotech har ett annat läge med sin pulsbrännare Cello. Företaget är under senare år uppbyggt från forskning på universitet kring pulsbrännare. Relationerna med företag som använder brännarutrustning inom processindustrin är troligtvis inte speciellt starka. För att kunna etablera den nya pulsbrännaren krävs därför inte bara att produkten är intressant. Sonotech måste sannolikt också etablera sig som företag. Inom torkning är det också svårare att se flera fördelar än brännareffektiviteten som kan göra brännaren intressant. Orsaken är att de material som torkas i de anläggningar, för vilka brännaren är avsedd (rotertorkar), ofta har en hög andel inre fukt. Torkhastigheten kommer då troligtvis inte att förbättras nämnvärt. Brännaren har dock den fördelen att den är relativt lätt att installera, vilket gör att befintliga anläggningar kan användas. Brännaren utgör också bara en liten del i en större anläggning och investeringskostnaden blir inte alltför avskräckande. Företaget kan i en framtid komma att fungera som leverantör till tillverkare av större processsystem.

Av resonemanget ovan förstår man att det krävs mer än att bara ha tillgång till en bra produkt. Företaget måste på olika sätt också kunna ge tillräcklig uppbackning för att produkten ska kunna säljas. För att kunna introducera en pulsbrännare som Cello på den svenska marknaden krävs troligtvis att man kan upprätta ett samarbete med en tillverkare av processanläggningar som kan dra nytta av pulsbrännarens egenskaper. Att själv arbeta direkt mot marknaden är troligtvis alltför svårt. Bepex är delvis i samma situation med sin pulstork Unison. Företaget är inte etablerat på den svenska marknaden och ett samarbete med en redan etablerad tillverkare skulle underlätta en introduktion. Företaget har i USA en anläggning avsedd för testkörning av olika material och detta är givetvis ett bra sätt att nå kunder och skapa förtroende för produkten. En motsvarande anläggning i Sverige skulle givetvis vara ett bra sätt att marknadsföra sig.

14. Slutsatser

Genom att använda pulserande förbränning i torkprocesser kan värmeöverföringen mellan torkgods och torkmedie förbättras. Orsaken till den förbättrade värmeöverföringen är omdiskuterad, men en viktig förklaring är troligen att det pulserande flödet ger en ökad grad av turbulens kring partiklarna. För att den ökade värmeöverföringen ska resultera i ökad torkhastighet krävs att torkgodset har en hög halt yttre fukt. Det pulserande flödet inverkar på förångningen av den yttre fukten, men troligtvis inte nämnvärt på den fukt som är bunden inuti partiklarna.

Kravet på hög yttre fukthalt för att pulstorkning ska vara fördelaktigt begränsar till stor del den potentiella marknaden. Material som torkas i kammartorkar och rotertorkar har oftast en hög inre fukthalt och kräver långsam torkning. Det är därför svårt att se att pulserande förbränning har något att tillföra denna typ av torkning. Potentialen är generellt bättre för de material som torkas i spray- och flashtorkar. Det är också för detta ändamål som pulstorken Unison har utvecklats. Unison har också den stora fördelen att produkten atomiseras effektivt av de skapade pulserna, vilket innebär att något spraymunstycke inte behövs. Pulserna bidrar också till en jämn temperaturfördelningen i torkluft och torkgods. Temperaturen på ingående torkluft kan därför hållas hög utan risk för att bränna produkten, vilket möjliggör en kort uppehållstid och en effektiv torkprocess. Den effektiva torkprocess som är möjlig i Unison gör att torkanläggningen kan byggas kompaktare, jämfört konventionella spraytorkar, vilket sänker både investerings- och driftskostnaden.

Trots de fördelar som finns med pulstorkning är marknaden sannolikt relativt begränsad. Orsaken är att den möjliga effektiviseringen ifråga om kapacitet och energianvändning i många fall inte är tillräcklig för att den nya tekniken ska kunna konkurrera med redan beprövad teknik. Inom vissa områden är det dock möjligt att också uppnå en bättre produktkvalitet med pulstorkning, vilket tillsammans med den effektivare torkprocessen gör tekniken konkurrenskraftig. För att en satsning på pulstorkning ska bli lyckosam bör man koncentrera sig till dessa områden.

15. Referenslista.

1. Lindholm, Annika. "Pulserande förbränning. Undersökning av gastillförselns betydelse för en given pulsbrännare", Inst. för Värme och Kraftteknik, LTH 1990.
2. Nilsson, Ulf. "Pulserande förbränning. Byggnad av experimentbrännare med undersökning av resonansrörlängdens inflytande", Inst. för Värme och Kraftteknik, LTH 1990.
3. "Pulsating Combustion", Internationellt gassymposium, LTH 1990.
4. Zinn, Ben T. "Pulse Combustion", The World & I, January 1991, s.304.
5. "Direkt torkning med naturgas av foder och livsmedel", Symposiedokumentation rapport 1986:2, LTH.
6. Larsson B.K., Regnér S., Baeling P. "Polycyclic Aromatic Hydrocarbon and Volatile N-Nitrosamine Content of Wheat Grain before and after Direct Gas-fired Drying", J. Sci Food Agric 1991, 56, 373-384.
7. Rabhan A.B., Dubrov E., Alvey D.A., Daniel B.R, Zinn B.T. "Industrial Pulse Combustor Development and Its Application in Spray Dryers and Cement Calciners", Final Report, Gas Research Institute, July 1991.
8. Livsmedelslagen 5§, Livsmedelsförordningen 15§ och Lag om foder 23/5 -85.
9. Zinn Ben T. "Pulsating Combustion", Advanced Combustion Methods, 1986 Academic Press Inc.
10. Coulson J.M., Richardson J.F. "Chemical Engineering", vol. 1.
11. Coulson J.M., Richardson J.F. "Chemical Engineering", vol. 2.
12. Azoury P.H. "Engineering Applications of Unsteady Fluid Flow", Wiley 1992.
13. Davidson J.F, Clift R., Harrison D. "Fluidization", Second Edition, Academic Press, 1985.
14. "Cello® Hi-Efficiency Burners", Broschyr, Sonotech Inc., 1992.
15. Maxe-Ahlbom Ann "Influence of Infrasound on Heat and Mass Transfer", Dep. of Chemical Engineering, KTH, April 1990.
16. Dec. J.E, Keller J.O, Arpaci V.S "Heat transfer enhancement in the oscillating turbulent flow of a pulse combustor tail pipe", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol 35, No 9, pp 2311-2325, 1992.
17. Paul Flanagan, "Development of a Pulse Combustion Industrial Dryer", Phase I Final Report, GRI, July 1987.
18. Paul Flanagan, "Development of a Pulse Combustion Industrial Dryer", Phase II Final Report, GRI, April 1991.
19. "The latest wave in drying systems", Broschyr, Bepex Corp. 1991.

20. R. W. Ozer, "Pulse Combustion Drying (a short course)", Bepex Corp.
21. Roland Schylit, "Översiktlig kartläggning av torkning inom svensk industri och jordbruk avseende metoder, apparatur och värmeenergiförbrukning", Kemisk Apparatteknik LTH, Oktober 1991.
22. "Energi och ekonomisk utveckling, Bilaga 12 till LU 1987", Allmänna Förlaget.
23. V.S Arpaci, R. Gemmen, A. Selamet, "Mass transfer in oscillating flows - Efficient drying via pulse combustors", University of Michigan for GRI, April 1990.
24. "Insonex®, Infrasound Cleaning System", Broschyr, Kockum Sonics.
25. "Produkter i Sverige", Kompass 1993, 26, Sverige.
26. Vaněček V., Markvart M., Drbohlav R. "Fluidized Bed Drying", Leonard Hill, London, 1966.
27. Formelsamling, Strömningsteknik/Värmeteknik, Kemisk Apparatteknik, LTH.

Följande referenser utgörs av samtal eller kontakt via fax.

28. Richard W. Ozer, Produktspecialist för Unison, Bepex Corporation.
29. Dr. Ben T. Zinn, President Sonotech.
30. Klas Gudmundsson, SSA i Svedala.
31. Ola Larsson, ABB Fläkt i Växjö.
32. Severin Ekman m.fl, Kemira Kemi AB i Helsingborg.
33. Zachari Salla, Astra i Södertälje.
34. Ulf Kalla, Cementa på Gotland.
35. Lars Nyberg, Ellco Foods i Kävlinge
36. Urban Henriksson, Vattenfall i Älvkarleby.
37. Jan Johansson, Arla i Kågeröd.
38. Supra i Landskrona.
39. Lyckeby Stärkelseförädling i Lyckeby.
40. Marianne Toméus, Mineralteknisk forskning (MINFO) i Stockholm.
41. Arnold Elmqvist, Stora News AB i Hyltebybruk.
42. Gunnar Jägerhorn, Källbergs i Töreboda.

43. Ove Svensson, Nordkalk i Malmö.
44. Dick Nilsson, Danogips i Åhus.
45. Lars Riis, Gyproc i Varberg.
46. Bengt Holm, Norsk Hydro i Stenungsund.
47. Bertil Johansson, Mönsterås Bruk.
48. Marek Werthajm, Kockum Sonics AB i Malmö.
49. Unilever Sverige AB i Stockholm
50. Leverndus AB i Nyköping.
51. Rolf Selander, SCB i Örebro

Appendix A.

Exempel på ekvationer för bestämning av värmeöverföringstalet.

Den värmeöverföring, som finns mellan partikel och strömmande torkgas, beror av flera olika variabler. Dessa variabler varierar mellan olika typer av torkning och är också beroende av torkmaterial. Någon generell modell för hur värmeöverföringen styrs finns alltså inte. Modellen måste alltid anpassas efter det specifika fallet. För att belysa detta ges nedan några exempel på ekvationer som beskriver värmeöverföringskoefficienten. De gäller inte alla vid torkning, men det ger en bra bild av hur beroendet av bl a hastigheten varierar. Värmeöverföringskoefficienten uttrycks vanligen med det s k Nusselttalet, Nu.

- Påtvingad strömning längs en yta för Re-tal över $5 \cdot 10^5$ [27]:

$$Nu = 0.0288 Re^{0.8}$$

Eftersom Re-talet är en funktion av strömningshastigheten är värmeöverföringen i detta fall alltså beroende av hastigheten upphöjt i 0.8.

- Konvektiv värmeöverföring till sfärer [10]:

$$Nu = 2 + \beta Re^n Pr^m$$

β , n och m beror av torkförlopp resp omströmmande medie. För Re-tal mellan 20-2000 är n och m 0.5 resp 0.33.

- Experiment med kolpartiklar i storleken 0,3 - 0,8 mm och Re-tal mellan 6 och 50 [26]:

$$Nu = 0.0028 Re^{1.7} (d/D_A)^{-0.2}$$

- Experiment med kiselgel [26]:

$$Nu = 0.0135 Re^{1.30}$$

- Experiment med bl a säd och kol [26]:

$$Nu = 0,024 Re^{0,84}$$

$Nu = hd/k$

$Re = du/v$

$Pr = C_p \mu / k$

k = gasens värmekonduktivitet

h = värmeöverföringskoefficient

μ = dynamisk viskositet för förbränningsgasen

v = kinematisk viskositet för förbränningsgasen

d = partikeldiameter

u = relativa hastigheten mellan partikel och strömmande medie

C_p = specifik värmekapacitet vid konstant tryck

D_A = diameter på fluid-bed anläggningen

93-09-27

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
001	Systemoptimering vad avser ledningstryck	Apr 91	Stefan Grudén TUMAB	100
002	Mikrokraftvärmeverk för växthus. Utvärdering	Apr 91	Roy Ericsson Kjessler & Mannerstråle AB	100
003	Katalog över gastekniska FUD-projekt i Sverige. Utgåva 3	Apr 91	Svenskt Gastekniskt Center AB	100
004	Krav på material vid kringfyllnad av PE-gasledningar	Apr 91	Jan Molin VBB VIAK	50
005	Teknikstatus och marknadsläge för gasbaserad minikraftvärme	Apr 91	Per-Arne Persson SGC	150
006	Keramisk fiberbrännare - Utvärdering av en demo-anläggning	Jan 93	R Brodin, P Carlsson Sydkraft Konsult AB	100
007	Gas-IR teknik inom industrin. Användnings- områden, översiktlig marknadsanalys	Aug 91	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	100
008	Catalogue of gas technology RD&D projects in Sweden (På engelska)	Jul 91	Swedish Gas Technology Center	100
009	Läcksökning av gasledningar. Metoder och instrument	Dec 91	Charlotte Rehn Sydkraft Konsult AB	100
010	Konvertering av aluminiumsmältugnar. Förstudie	Sep 91	Ola Hall, Charlotte Rehn Sydkraft Konsult AB	100
011	Integrerad naturgasanvändning i tvätterier. Konvertering av torktumlare	Sep 91	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	100
012	Odöranter och gasolkondensats påverkan på gasrörssystem av polyeten	Okt 91	Stefan Grudén, F. Varmedal TUMAB	100
013	Spektralfördelning och verkningsgrad för gaseldade IR-strålare	Okt 91	Michael Johansson Drifttekniska Instit. vid LTH	150
014	Modern gasteknik i galvaniseringsindustri	Nov 91	John Danelius Vattenfall Energisystem AB	100
015	Naturgasdrivna truckar	Dec 91	Asa Marbe Sydkraft Konsult AB	100
016	Mätning av energiförbrukning och emissioner före o efter övergång till naturgas	Mar 92	Kjell Wanselius KW Energiprodukter AB	50

93-09-27

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
017	Analys och förslag till handlingsprogram för området industriell vätskevärmning	Dec 91	Rolf Christensen ÅF-Energikonsult Syd AB	100
018	Skärning med acetylen och naturgas. En jämförelse.	Apr 92	Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	100
019	Läggning av gasledning med plöjteknik vid Glostorp, Malmö. Uppföljningsprojekt	Maj 92	Fallsvik J, Haglund H m fl SGI och Malmö Energi AB	100
020	Emissionsdestruktion. Analys och förslag till handlingsprogram	Jun 92	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
021	Ny läggningsteknik för PE-ledningar. Förstudie	Jun 92	Ove Ribberström Ove Ribberström Projektering AB	150
022	Katalog över gastekniska FUD-projekt i Sverige. Utgåva 4	Aug 92	Svenskt Gastekniskt Center AB	150
023	Läggning av gasledning med plöjteknik vid Lillhagen, Göteborg. Uppföljningsproj.	Aug 92	Nils Granstrand m fl Göteborg Energi AB	150
024	Stumsvetsning och elektromuffsvetsning av PE-ledningar. Kostnadsaspekter.	Aug 92	Stefan Grudén TUMAB	150
025	Papperstorkning med gas-IR. Sammanfattning av ett antal FUD-projekt	Sep 92	Per-Arne Persson Svenskt Gastekniskt Center	100
026	Koldioxidgödsling i växthus med hjälp av naturgas. Handbok och tillämpn.exempel	Aug 92	Stig Arne Molén m fl	150
027	Decentraliserad användning av gas för vätskevärmning. Två praktikfall	Okt 92	Rolf Christensen ÅF-Energikonsult	150
028	Stora gasledningar av PE. Teknisk och ekonomisk studie.	Okt 92	Lars-Erik Andersson, Åke Carlsson, Sydkraft Konsult AB	150
029	Catalogue of Gas Techn Research and Development Projects in Sweden (På engelska)	Sep 92	Swedish Gas Technology Center	150
030	Pulsationspanna. Utvärdering av en demo-anläggning	Nov 92	Per Carlsson, Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	150
031	Detektion av dräneringsrör. Testmätning med magnetisk gradiometri	Nov 92	Carl-Axel Triumf Triumf Geophysics AB	100
032	Systemverkn.grad efter konvertering av vattenburen elvärme t gasvärme i småhus	Jan 93	Jonas Forsman Vattenfall Energisystem AB	150

93-09-27

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
033	Energiuppföljning av gaseldad panncentral i kvarteret Malörten, Trelleborg	Jan 93	Theodor Blom Sydkraft AB	150
034	Utvärdering av propanexponerade PEM-rör	Maj 93	Hans Leijström Studsvik AB	150
035	Hemmatankning av naturgasdriven personbil. Demonstrationsprojekt	Jun 93	Tove Ekeborg Vattenfall Energisystem	150
036	Gaseldade genomströmningsberedare för tappvarmvatten i småhus. Litteraturstudie	Jun 93	Jonas Forsman Vattenfall Energisystem	150
037	Verifiering av dimensioneringsmetoder för distributionsledningar. Litt studie.	Jun 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
038	NOx-reduktion genom reburning med naturgas. Full- skaleförsök vid SYSAV i Malmö	Aug 93	Jan Bergström Miljökonsulterna	150
039	Pulserande förbränning för torkändamål	Sep 93	Sten Hermodsson Lunds Tekniska Högskola	150



Svenskt Gastekniskt Center AB

Box 50525, 202 50 MALMÖ
Telefon: 040-700 40
Telefax: 040-30 50 82