

Termoakustični sušilnik

Janez Križan¹, Mirko Kozoderc², Ivo Bajsić³ in Janez Možina³

¹AMI d.o.o., Ptuj, Slovenija

²Silkem d.o.o., Kidričevo

³Fakulteta za strojništvo, UNIVERZA V LJUBLJANI

janez.krizan@gmail.com, mirko.kozoderc@silkem.si,

janez.mozina@fs.uni-lj.si, ivo.bajsic@fs.uni-lj.si

Thermoacoustic drying system.

The principles of a pulse drying combustor are known for about 100 years, but due to lack of understanding of some basic complex phenomena that are involved, it is very rarely applied. Several examples of successful application in the world have challenged us to develop new equipment for the system's use. We directed the development in two directions. The first explores the field of a flame pyrolysis in a pulse reactor for the production of nano materials. The second, which is described in this article, is dealing with the development of a nano material drying technology. Since drying is a very intense energy process, any potential improvement is welcome. Therefore an experiment on the industrial scale was made possible in connection with drying technologies in Silkem d.o.o..

Kratek pregled prispevka

Osnove termoakustičnega zgorevanja so znane že več kot 100 let, vendar se ta tehnologija zaradi razmeroma kompleksne povezave posameznih faz procesa doslej niso uveljavile v večjem obsegu. Nekateri uspešno realizirani primeri uporabe v svetovnem merilu so tudi nam postavili izziv za razvoj tovrstne procesne opreme. Raziskave in razvoj smo usmerili v dve področji. Najprej smo raziskovali možnosti izvajanja plamenske pirolize v termoakustičnem reaktorju za proizvodnjo nano materialov. Drugo, ki je opisano v prispevku pa je razvoj tehnologije sušenja nano materialov. Sušenje snovi zahteva veliko energije, zato je potencialno zelo dobrodošla vsaka izboljšava. Na tej osnovi je bil omogočen razvoj pilotnega termoakustičnega sušilnika v industrijskem merilu v sklopu sušilniških tehnologij firme Silkem d.o.o..

1 Uvod

Resonančno termično vzbujanje zvoka je preučeval že Lord Rayleigh, vendar v naslednjih desetletjih ni prišlo do širše uporabe tega zanimivega pojava. Izstopata le dva znana primera: Teslina plinska turbina in pogonski motor rakete V1 med drugo svetovno vojno. Za razliko od klasičnih gorilnikov, v katerih gorivo zgoreva neprekinjeno, poteka zgorevanje v termoakustičnem gorilniku v obliki zaporednih eksplozij s frekvenco stoječega zvočnega vala, ki se ob ustrezno izbrani geometriji zgorevalnega prostora in procesne komore sam od sebe vzpostavi v celotni napravi. Naprave za sušenje, ki delujejo na tej osnovi, so se začele razvijati v osemdesetih letih prejšnjega stoletja in so pokazale precejšnje prednosti pred konvencionalnimi sušilniki. Zato je tudi Evropska zveza za kemijsko inženirstvo (EFCE) v letu 2007 uvrstila termoakustično sušenje v ožji izbor procesno intenzivnih tehnologij [1].

2 Značilnosti termoakustičnih gorilnikov

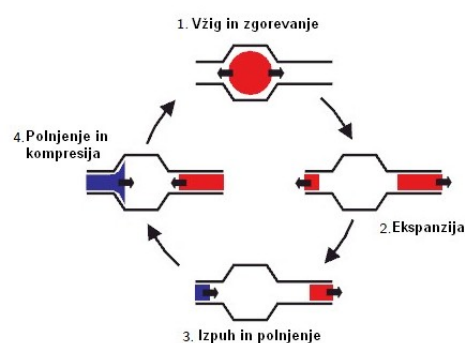
Termoakustični gorilnik deluje kot akustični resonator, v katerem intenziteta zvočnega vala lahko doseže zelo visoke vrednosti. Poleg gostote, hitrosti in tlaka v resonančnem stanju močno oscilira tudi temperatura in s tem povzroča periodično vžiganje plinske mešanice. Zaradi oscilacijske narave dobimo mnogo aktivnejšo izmenjavo toplote in snovi sestavin v mešanici, s tem pa se pospeši proces izločanja prisotnih hlapljivih faz v obliki kapljic.

Ločimo več tipov resonančnega sistema. Najenostavnejši tip resonatorja je polodprta cev z dolžino L , v kateri ima zvok v osnovni resonanci valovno dolžino $L/4$. Maksimum tlaka in temperature se pri tem resonatorju vzpostavi na zaprtem koncu cevi, kjer prihaja tudi do vžiga goriva. Na odprtem koncu cevi sta vrednosti tlaka in temperature enaki okoliškimi.

Drugi tip resonatorja, je na obeh straneh odprta cev, pri kateri na eni strani vstopajo vroči plini in na drugi strani izstopajo. V tem primeru

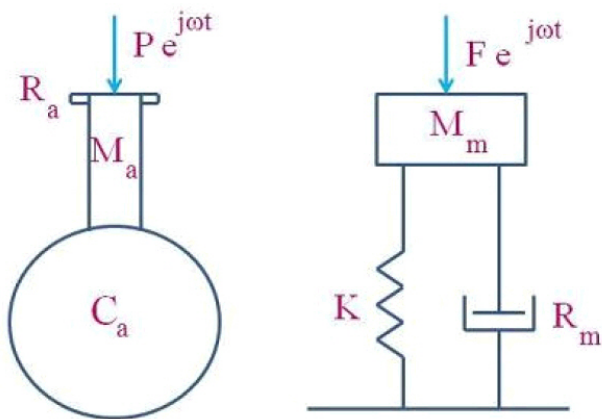
se amplitude tlaka in temperature stoječega valovanja in s tem tudi mesto vžiga vzpostavijo med sredino in vstopnim delom. Tam je zaradi višje povprečne temperature višja tudi hitrost, s tem pa se zmanjša valovna dolžina zvoka, ki ima v celotnem resonatorju enako frekvenco.

Naslednji je Helmholtzov resonator, ki ga tvorita zgorevalna komora in kratka cev kot izhod iz nje. Na sliki 1 je prikazan idealiziran potek procesa zgorevanja v tovrstnem termoakustičnem gorilniku [2].



Slika 1: Idealizirana shema zgorevalnega cikla [2]

V prvi fazi pride do vžiga eksplozivne mešanice v komori, pri tem pa eksplozija potisne dimne pline v cev proti desni in v aerodinamični ventil proti levi. V drugi fazi je večina goriva porabljena in plini nadaljujejo svojo pot zaradi vztrajnosti, pri čemer nastaja močan podtlak v zgorevalni komori. V tretji fazi vstopita v komoro svež zrak in gorivo. Plini, ki z obeh strani tečejo proti sredini komore, spet močno povečajo tlak in temperaturo in s tem v četrti fazi povzročijo ponovni vžig mešanice. Nihanje v Helmholtzovem resonatorju lahko ponazorimo z mehansko analogijo kot je prikazano na sliki 2. Volumen plina v posodi V_a predstavlja vzmet, nihajočo maso pa masa plina v resonančni cevi M_a . Dušenje R_a je posledica izgub na izpuhu vpliva viskoznosti pri nihanju plina. P je tlak na vstopu v resonančno cev, M_a pa je akustična masa resonatorja. ω predstavlja kotno frekvenco nihanja. V mehanskem sistemu predstavlja M_m maso, ki niha, R_m dušenje zaradi trenja, K je vzmetna konstanta, sila F pa vzbuja nihanje.



Slika 2: Mehanska analogija Helmholtzovega resonatorja

Medtem ko ima opisani mehanski nihajni sistem le eno resonančno frekvenco, jih ima Helmholtzov resonator več, njihove vrednosti pa so mnogokratniki osnovne resonančne frekvence,

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

kjer je c hitrost zvoka, A presek odprtine v cevi, V volumen v komori in L dolžina resonančne cevi. V tem primeru lahko trdimo, da je frekvenca odvisna od geometrije resonatorja in od hitrosti zvoka. Hitrost zvoka pa je odvisna od sestava plinske mešanice in temperature. Z višanjem temperature se povečuje hitrost zvoka in s tem tudi vrednosti lastnih frekvenc resonatorja.

2.1 Ventilski in brezventilski sistemi

Z ozirom na način, kako je izveden dovod zgorevalnega zraka in goriva, ločimo ventilske in brezventilske sisteme. Naše začetne raziskave smo začeli z brezventilskim sistemom na sliki 3, kjer je sesalna cev oblikovana tako, da ima resonančno frekvenco ki je lihi mnogokratnik osnovne frekvence.



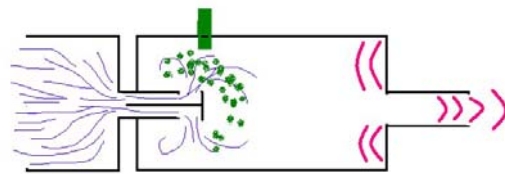
Slika 3: Brezventilski sistem

Pri tem dobimo še vedno določen pretok plinov iz komore preko sesalne odprtine v okolico.



Slika 4: Labirintni aerodinamični ventil

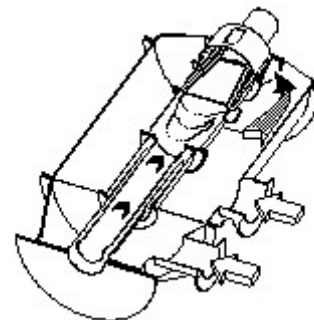
Pri uporabi aerodinamičnih ventilov, na sliki 4, ki so v obliki labirinta, le ti močno zmanjšujejo pretok v smeri iz komore, medtem ko je upor toka v smeri proti komori bistveno manjši. Ta tip ventila je dokaj vzdržljiv, ker nima gibajočih se delov in se zato pogosto uporablja.



Slika 5: Ventilaska izvedba

Boljši učinek zapiranja izpušnih plinov dosežemo z mehanskimi ventili na sliki 5, ki so lahko v obliki zaklopke, reed ventilov ali rotacijskih ventilov. Zaklopke in reed ventili so termično in mehansko zelo obremenjeni, zato je njihova doba trajanja omejena.

Rotacijski ventili dobro zapirajo pot plinom in niso mehansko problematični, vendar je njihovo odpiranje in zapiranje treba sinhronizirati na lastno frekvenco resonatorja, ker samo tedaj sistem deluje optimalno.



Slika 6: Izvedba z rotacijskim ventilom (Wave Dry)

Pri razvoju in testiranju našega eksperimentalnega termoakustičnega gorilnika, smo preizkusili več vrst ventilskih sistemov, v pilotni industrijski napravi pa smo uporabili rotacijski ventil.

2.2 Sušenje v resonančno nihajočem toku

Študije nekaterih tujih avtorjev so pokazale, da zvočno valovanje z dovolj veliko jakostjo pripomore k hitrejšemu uparjanju kapljic [3]. Poskusi z vbrizgavanjem vode v zgorevalno komoro so pokazali, da se je količina uparjene vode na časovno enoto ob prisotnosti zvočnega valovanja z glasnostjo 168 dB povečala do 30% glede na vrednosti dosežene brez zvoka. Do podobnih vrednosti je možno priti tudi s simulacijo, pri čemer je možno spreminjati različne pogoje razpršilnega sušenja v resonančno nihajočem sistemu [4]. Rezultate simulacije termoakustičnega sušenja je možno povzeti v naslednjih ugotovitvah:

- dosežene so velike hitrosti in kratki časi sušenja,
- pogoji sušenja kapljic se periodično spreminjajo,
- amplituda in frekvenca nihanja vplivata na sušenje kapljic zaradi spreminjanja poti delcev v komori,
- pri prekoračenju mejne jakosti zvočnega valovanja se hitrost sušenja kapljic ne povečuje več.

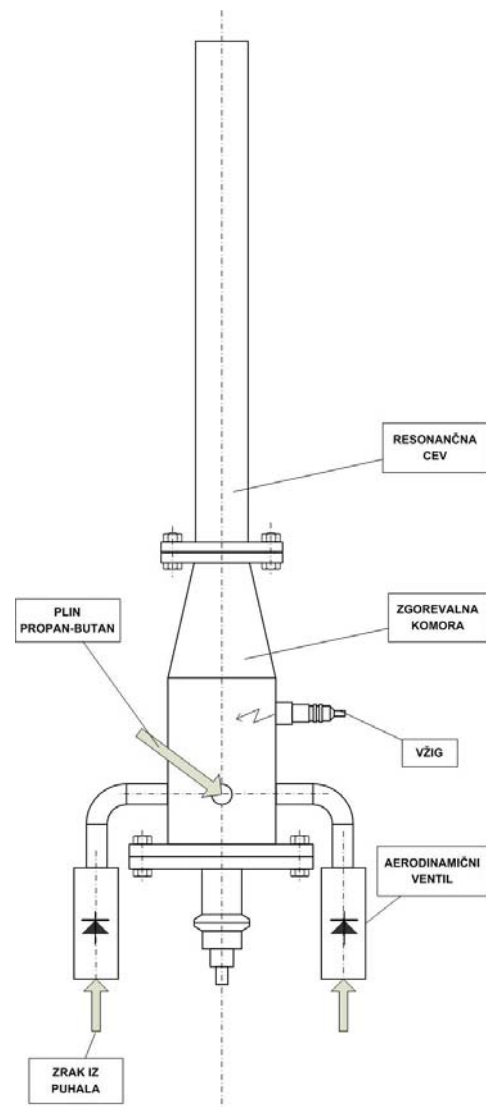
Navedene ugotovitve in potrebe po sušenju velikih količin različnih materialov vsekakor utemeljujejo nadaljnji razvoj pilotne termoakustične sušilne naprave v podjetju Silkem d.o.o..

3 Razvoj pilotnega termo akustičnega sušilnika

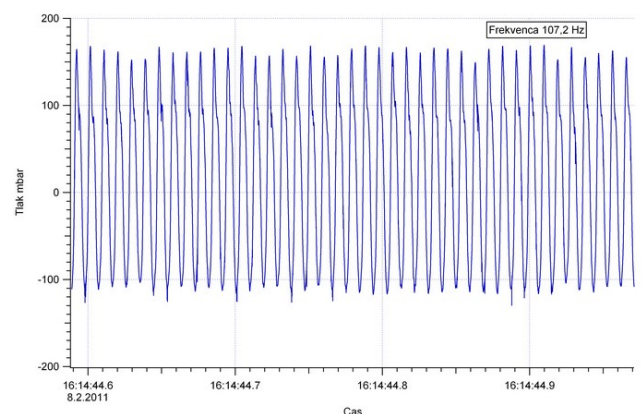
3.1 Razvoj gorilnika

Prve preizkuse termo akustičnega zgorevanja smo izvedli na brezventilskem sistemu. Preučili smo fizikalne osnove in osnovne robne pogoje, ki so potrebni za delovanje termoakustičnega

gorilnika. Brezventilsko izvedbo smo nadgradili z labirintnimi ventili in opremili s pihalom za zgorevalni zrak.

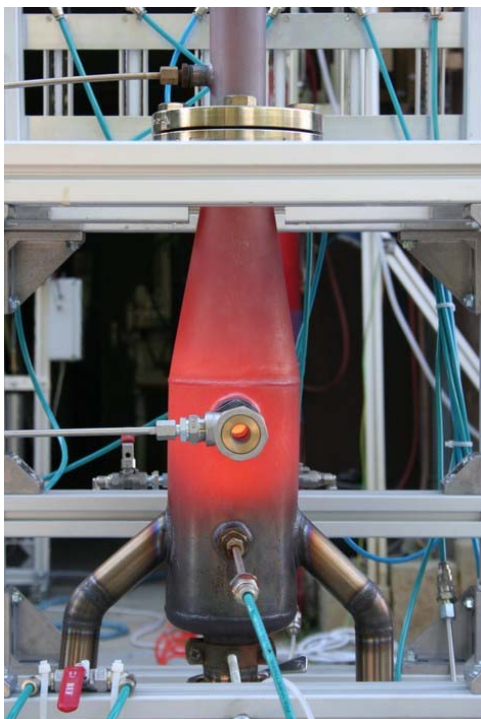


Slika 7: Preizkusni resonator 50 kW brez hlajenja



Slika 8: Stabilno delovanje resonatorja

Na sliki 9 je fotografija reaktorja v brezventilski izvedbi med obratovanjem. V primeru laboratorijskega gorilnika komora in resonančna cev nista hlajeni in zato dosegamo na površini temperature do 900 °C.



Slika 9: Preizkusni resonator 50 kW v brezventilski izvedbi

3.2 Plinska oprema

Določanje parametrov plinske opreme je bilo izvedeno s preizkusi na gorilniku z uporabo mešanice propan-butan. Preizkusi so začeli na gorilniku z močjo 50 kW in nadaljevali na ciljnem gorilniku, ki ima cca 200 kW toplotne moči. S testiranjem gorilnika in tehtanjem porabljenega plina smo določili okvirno porabo, na podlagi katere je bila določena plinska oprema in puhalo za gorilniški zrak. V primeru industrijske opreme mora biti zagotovljeno varno obratovanje plinskega gorilnika. Plinska oprema zajema kontrolo delovanja in varovanje pilotnega gorilnika, ki zaradi male porabe uporablja plin iz jeklenke (propan-butan). Pilotni gorilnik je namenjen začetnemu vžigu plinske zmesi namesto električne svečke, zaradi varnosti pa deluje ves čas obratovanja. Glavni plamen pa je priključen preko drugega plinskega varovalnega sistema na zemeljski

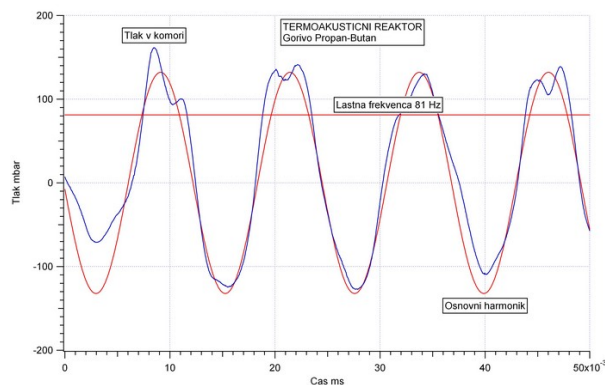
plin. Vsak plamen je kontroliran s fotocelico v UV področju. Razmerje plin zrak je vodeno s fiksno povezavo ventila za plin in lopute za gorilniški zrak, kot vodilna veličina pa je pretok plina. Območje regulacije je od 14 Nm³/h do 20 Nm³/h. Krmiljenje plinske varovalne opreme je vključeno v procesni sistem sušilnika.

3.3 Regulacijska oprema

Procesno vodenje tehnološke celote sušilnika je sestavni del procesnega sistema Silkema. Temelji na sistemu FOXBORO I/A, ki pokriva vse ostale tehnološke obrate v tovarni. Periferna oprema so vhodno izhodne kartice ET200 sistema na Profibus vodilu, centralna procesna enota pa je Foxboro FCP270 procesor s Profibus vmesnikom, na katerega so priključene tudi druge tehnološke enote kot so stolpni razpršilni sušilnik, sušilnik zeolita, kalcinator zeolita in rotacijski sušilnik odpadnega blata. Vsi pogoni so frekvenčno regulirani, da omogočajo enostavno iskanje optimalnih pogojev.

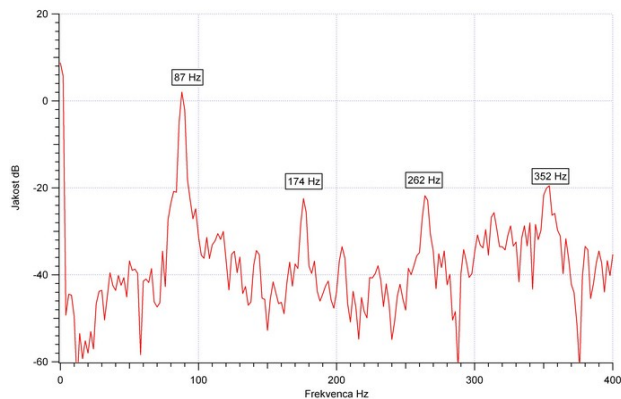
3.4 Akustične meritve

Za določanje lastne frekvence resonatorja smo uporabili piezoelektrični tlačni pretvornik KELLER PR5 z območjem -200 do +200 mbar, ki ima frekvenčno območje 5 kHz in je priključen na resonator. Uporabljena je bila merilna oprema Labview z DAQ 6211 enoto za zajem podatkov. V programskem okolju Labview je bil izdelan grafični vmesnik za zajem merilnih signalov in harmonično analizo zvoka,



Slika 10: Časovni potek tlaka v komori laboratorijskega gorilnika

s katero smo določili osnovno frekvenco resonatorja in odvisnost osnovne frekvence od temperature. Na sliki 10 je viden sinusni potek tlaka. Amplituda in frekvenca ter harmonična analiza na sliki 11 dajo temeljne podatke o delovanju resonatorja, ki smo jih koristili pri razvoju gorilnika. Na podlagi teh meritev je bilo mogoče izdelati model frekvenčne odvisnosti in s tem sinhronizacijo rotacijskega ventila.



Slika 11: Frekvenčni spekter tlaka-laboratorijski gorilnik

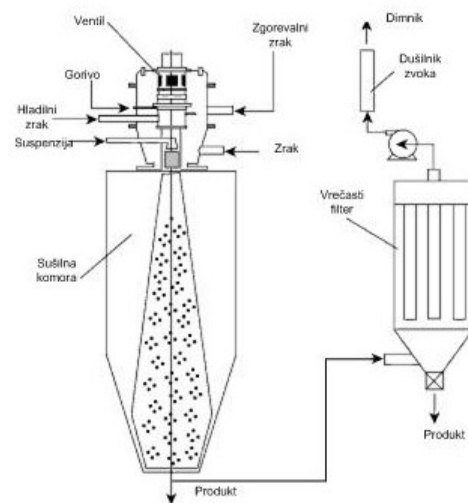
4 Industrijska aplikacija

4.1 Pilotni termoakustični sušilnik

Na podlagi rezultatov na laboratorijskem termoakustičnem reaktorju smo izdelali pilotno napravo za sušenje mineralnih suspenzij v Silkem d.o.o. Glavne karakteristike sistema prikazanega na sliki 13 so:

- poraba zemeljskega plina od 14 do 20 Nm³/h
- razprševanje suspenzije v izstopu resonančne cevi z dvokomponentno šobo,
- uporaba rotacijskega ventila za dovod zgorevalnega zraka, ki ga dovaja puhalo z največjim pretokom 8 m³/min,
- dovod suspenzije s cevno črpalko ali monočrpalko s pretokom do 200 l/h,
- sušilna posoda premera 2 m in višine 2 m s konusom,
- vrečasti filter in odvodni ventilator,

- dovod hladilnega zraka z ventilatorjem.



Slika 12: Tehnološka shema pilotne naprave



Slika 13: Industrijski termoakustični sušilnik

Trenutno doseženi rezultati dajejo podobne rezultate sušenja kot klasični sušilniki. Maksimalna kapaciteta poskusnega sušilnika zagotavlja do 200 l/h izločene vode. Tehnološka shema 12 prikazuje uporabljeno konfiguracijo,

največji. Prav tako predvidevamo nadaljevanje razvoja termoakustičnega gorilnika v funkciji modificirane plamenske pirolize za proizvodnjo praškastih oksidnih submikronskih in nano materialov. Eksperimentalni rezultati doseženi na laboratorijski ravni potrjujejo, da smo na pravi poti nadaljnega razvoja in optimiranja procesa termoakustičnega sušenja.

6 Literatura

- [1] T. Kudra, "Pulse-Combustion Drying: Status and Potentials," *Drying Technology*, vol. 26, Nov. 2008, pp. 1409-1420.
- [2] P.A.V. Heerbeek, "Mathematical Modeling of a Pulse Combustor of the Helmholtz-type," *Technology*, 2008.
- [3] R. Balachandran, S.R. Chakravarthy, and R.I. Sujith, "Characterization of an Acoustically Self-Excited Combustor for Spray Evaporation," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 24, Nov. 2008, pp. 1382-1389.
- [4] Z. Wu and a S. Mujumdar, "A Parametric Study of Spray Drying of a Solution in a Pulsating High-Temperature Turbulent Flow," *Drying Technology*, vol. 24, Jul. 2006, pp. 751-761.
- [5] T.K.C. and A.S. Mujumdar, "Advanced Drying Technologies - 2nd edition," *Marcel Dekker February 2009*, 2009, pp. 2009-2009.
- [6] P. Taylor, M. Street, and L. Wt, "Combustion Drying : Aerodynamics , Heat Transfer , and Drying Kinetics," *Drying Technology*, 2003.