



Politechnika Śląska w Gliwicach
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Potencjał termoakustycznych urządzeń chłodniczych

mgr inż. Krzysztof Grzywnowicz
dr hab. inż. Leszek Remiorz, prof. PŚ

Priorytetowy Obszar Badawczy nr 6 (POB6)
Konferencja dla podobszaru 5: Innowacyjne technologie i zrównoważony rozwój
10.02.2021r

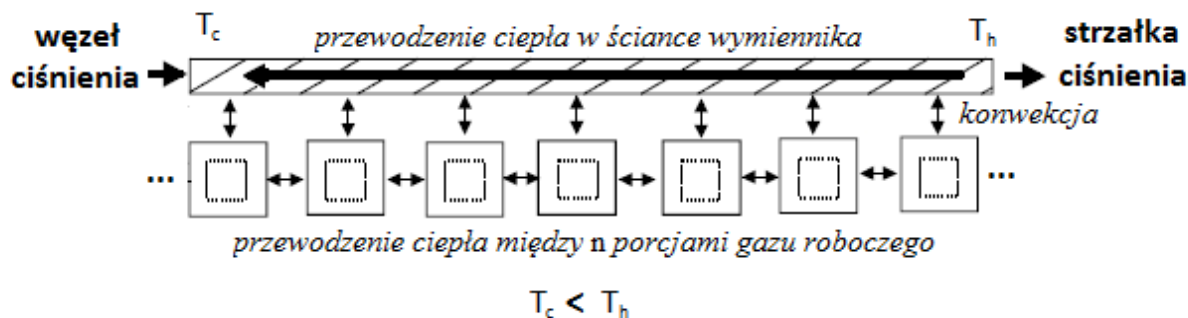


Politechnika
Śląska

www.kmiue.polsl.pl

Wstęp

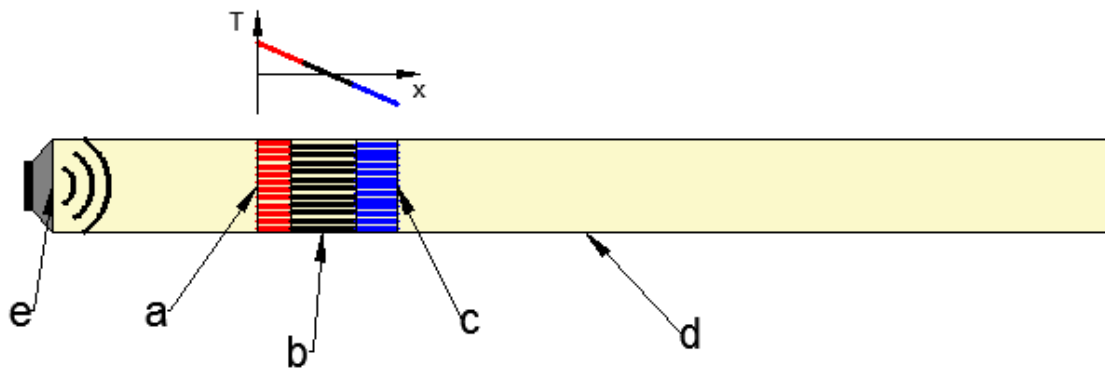
Zjawisko chłodzenia termoakustycznego polega na wymuszeniu przepływu ciepła od źródła o temperaturze wyższej do źródła o temperaturze niższej wskutek oddziaływania fali akustycznej [1,2]. Fenomen ten jest skutkiem interakcji cieplnej między gazem a ciałem stałym, wymuszonej propagującą falą dźwiękową (rys. 1).



Rys. 1 Schemat interakcji cieplnej między gazem roboczym a ścianką regeneracyjnego wymiennika ciepła w warunkach zjawiska termoakustycznego. Zaznaczono przewodzenie ciepła między sprężanymi i rozprężanymi porcjami gazu, wnikanie ciepła do ścianki ciała stałego oraz przewodzenie w obrębie ścianki. (na podstawie [1]).

Wstęp – cd.

Elementarna chłodziarka termoakustyczna (rys. 2) charakteryzuje się nieskomplikowaną konstrukcją. W chłodziarce możliwe jest wykorzystanie płynów obojętnych chemicznie i nietoksycznych dla ludzi (hel, azot) jako podstawowych czynników roboczych [3,4,5].



Rys. 2 Schemat elementarnej termoakustycznej pompy ciepła (a - gorący wymiennik ciepła, b - regeneracyjny wymiennik ciepła (regenerator), c - zimny wymiennik ciepła, d - kanał akustyczny (rezonator), e - wzбудnik akustyczny). Zaznaczono gradient temperatury wzdłuż zestawu wymienników ciepła.

Obszar chłodnictwa termoakustycznego – zastosowania

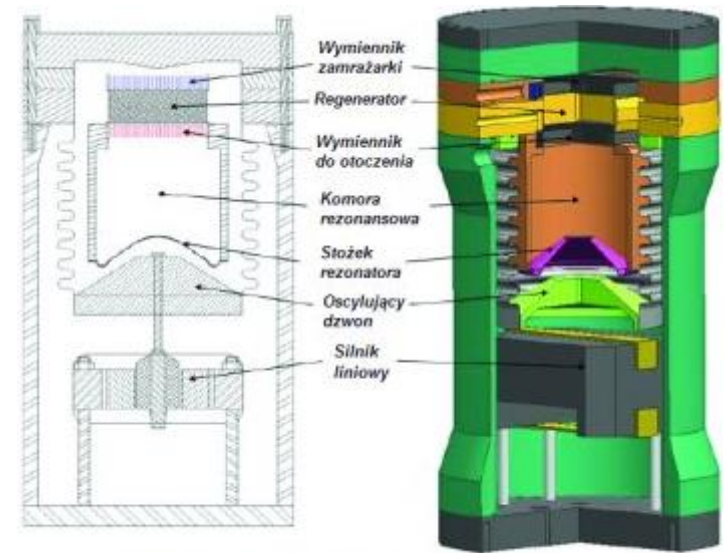
- pierwsze szeroko zakrojone badania aplikacyjne chłodziarek termoakustycznych w latach **1991-2001** w **Los Alamos National Laboratory (LANL)**
- efekt: opracowanie kriogenicznej instalacji skraplania gazu ziemnego (produkcji LNG) o wydajności 2250 dm³/dobę i współczynniku COP na poziomie 0,65
- prototyp wykonany we współpracy z jednostką komercyjną – niewdrożona ze względu na koszt produkcji (konieczność zapewnienia wysokiej jakości spawów)



Urządzenie termoakustyczne do skraplania gazu ziemnego
Niebieski element to palnik gazowy, poniżej termoakustyczny generator,
element najniższy to skraplarka.

Obszar chłodnictwa termoakustycznego – zastosowania

- pierwsze wdrożenie komercyjne – termoakustyczna chłodziarka spożywcza (do lodów) - **rok 2004**
- moc chłodnicza **120 W**, temperatura zimnego wymiennika ciepła na poziomie **-24°C**
- prototyp opracowany na Penn State University



Schemat konstrukcji chłodziarki do lodów

Badania europejskie – projekt THATEA

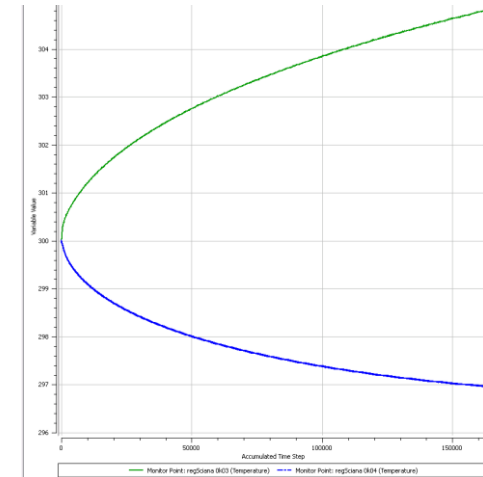
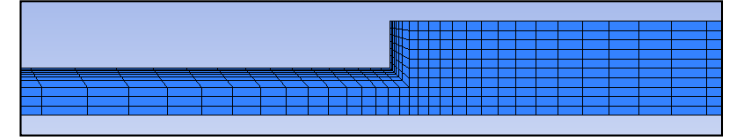
- międzyinstytucjonalny, koordynowany przez ECN
- realizowany w latach 2009-2012
- obszar chłodnictwa jako **jeden z badanych obszarów**
- optymalizacja konstrukcji urządzenia kriogenicznego (zasilanego TAE) pracującego w stałej temperaturze zimnego wymiennika ciepła - 40°C i w zakresie mocy 50-250 W
- maksymalny uzyskany współczynnik $\text{COP}_R = 33\%$ dla mocy 200 W



*Fotografie układu TAE-TAR
skonstruowanego w ramach
projektu THATEA*

Pierwsze badania w Politechnice Śląskiej

- Zaawansowane technologie pozyskiwania energii. Zadanie nr 1: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin. Punkt V-1.3. Badania analityczne i eksperymentalne technologii separacji gazów z wykorzystaniem fali termoakustycznej - **zadanie w ramach projektu strategicznego realizowane w latach 2010 – 2015**
- projekt Model numeryczny silnika i chłodziarki termoakustycznej finansowany przez MNiSW, realizowany w latach **2010-2012**



Uzasadnienie podjęcia tematyki badań

Urządzenia termoakustyczne mogą znaleźć wiele zastosowań w chłodzeniu układów elektronicznych lub mobilnych systemach chłodniczych, a także w przemyśle spożywczym i chemicznym. Ponadto, wykazują one aplikacyjność jako urządzenia towarzyszące w zeroemisyjnych układach energetycznych.

Jednakże, zaprojektowanie urządzeń o parametrach, umożliwiających konkurowanie z chłodziarkami sprężarkowymi, wymaga pozyskania szczegółowej wiedzy i opracowania nowych modeli. Obecnie projektowane chłodziarki termoakustyczne cechuje relatywnie niska sprawność i wysoki koszt produkcji, co stanowi podstawowy czynnik ograniczający możliwości aplikacyjne.



Podstawowe narzędzia badawcze

Analizy urządzeń termoakustycznych, w tym chłodziarek, dokonuje się na drodze:

- badań obliczeniowych

- model liniowy i narzędzia pochodne

- + *proces obliczeniowy szybki i łatwy do sprzężenia z algorytmem optymalizacyjnym*

- *1-D reprezentacja fali akustycznej, dokładność zachowana wyłącznie dla dużych rozmiarów porów w wymiennikach, uproszczenie analizy rozkładu prędkości i ciśnienia gazu w obszarze regeneratora*

- modele trójwymiarowe z wykorzystaniem CFD

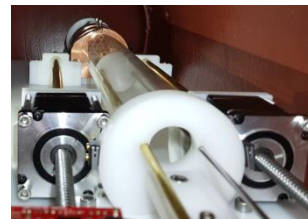
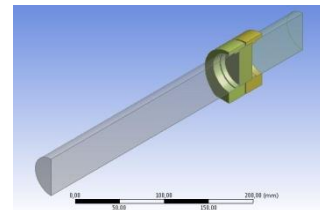
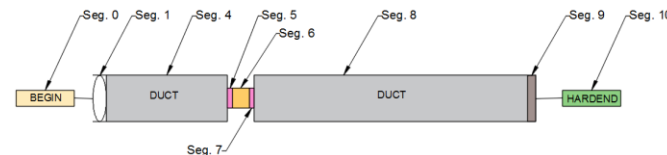
- + *możliwość dokładnego odwzorowania zjawisk przepływowych, 2-D reprezentacja fali akustycznej*

- *długi czas obliczeń (duże rozmiary siatek + krok czasowy rzędu 1e-5 sekundy), wybór sposobu analizy wymiany ciepła*

- eksperymentów

- + *pewność uzyskanych wyników, możliwość walidacji modeli obliczeniowych*

- *konieczność zachowania niskiej niepewności pomiarowej (wysoka jakość czujników + niskie błędy przetwarzania w kartach pomiarowych)*



Zakres prowadzonych badań

W zakresie badań, realizowanych w obszarze chłodnictwa termoakustycznego, w **dotychczasowych** pracach uwzględniono:

- obliczeniową i eksperymentalną analizę wpływu cech konstrukcyjnych i parametrów środowiskowych na parametry operacyjne kompaktowego urządzenia chłodniczego,



Rys.3
Fotografia
stanowiska
ekspery-
mentalnego

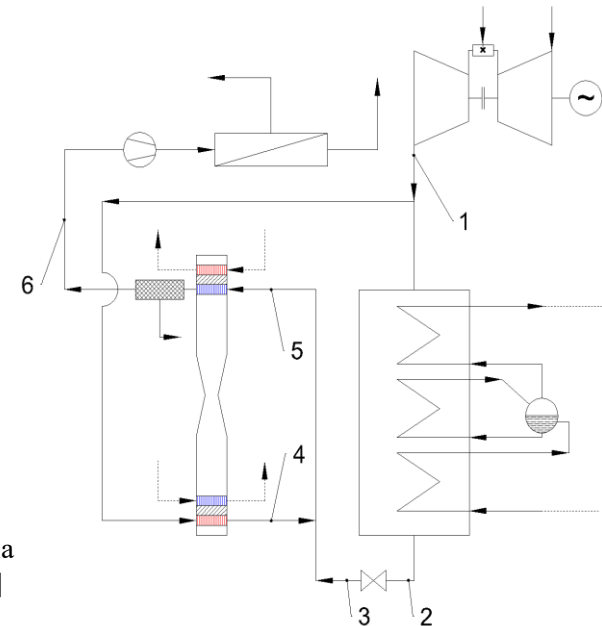
Tabela 1. Wybrane wyniki analiz obliczeniowych

Ciśnienie gazu roboczego, bar	Gaz roboczy	Różnica temperatur, K
1,5	dwutlenek węgla	61,1
1,5	powietrze	75,7
2,9	dwutlenek węgla	44,9
2,9	powietrze	39,5
4,2	dwutlenek węgla	37,5
4,2	powietrze	35,1

Zakres prowadzonych badań

W zakresie badań, realizowanych w obszarze chłodnictwa termoakustycznego, w **dotychczasowych** pracach uwzględniono:

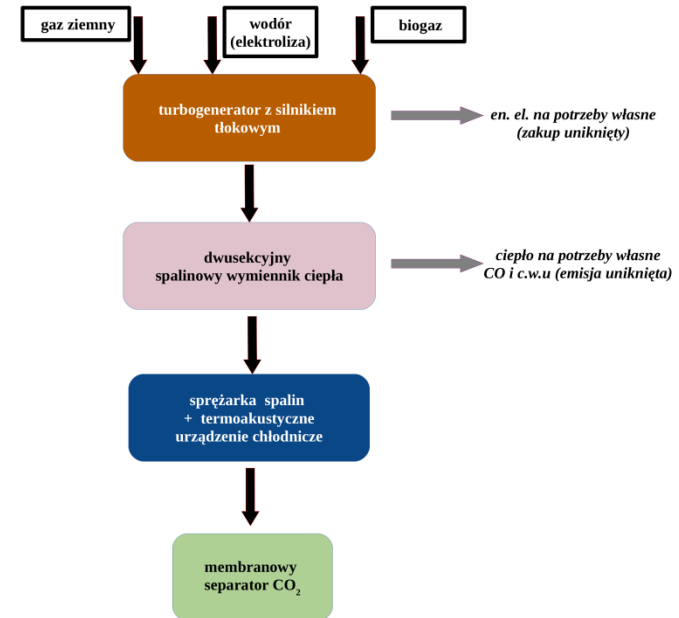
- obliczeniowe oszacowanie możliwości wykorzystania zjawiska termoakustycznego w układach regulacji i pomiaru parametrów pracy urządzeń energetycznych, w tym wymienników ciepła,



Rys. 4 Schemat koncepcji wykorzystania chłodzenia termoakustycznego w układzie gazowo-parowym [7]

Zakres prowadzonych badań – cd.

- porównanie parametrów operacyjnych urządzeń chłodniczych, funkcjonujących w warunkach fali stojącej i biegnącej, w oparciu o model uproszczony
- analizę możliwości zastosowania termoakustycznych urządzeń chłodniczych jako urządzeń wspomagających regulację i poprawę parametrów membranowych układów separacji gazów
 - w układach wykorzystujących kotły węglowe
 - w układach wykorzystujących turbiny gazowe
 - w hybrydowych układach kogeneracyjnych zasilanych paliwami gazowymi



Rys. 5 Schemat koncepcji wykorzystania chłodzenia termoakustycznego w hybrydowym układzie kogeneracyjnym.

Znaczenie dla Priorytetowego Obszaru Badawczego

Dotychczas przeprowadzone badania **wykazały możliwość uzyskania widocznych efektów energetycznych dla małych urządzeń termoakustycznych** przy wykorzystaniu niedrogich materiałów konstrukcyjnych, co – przy dalszej optymalizacji – sugeruje możliwość opracowania urządzeń chłodniczych, wykorzystujących czynniki neutralne dla środowiska i konkurujących ekonomicznie z układami sprężarkowymi.

Ponadto, analizy wykazały **pozytywny wpływ sprężenia chłodziarki termoakustycznej z membranowym separatorem CO₂** na parametry procesu separacji w przypadku oczyszczania spalin silnie zawilżonych – co może przełożyć się na zwiększenie sprawności dekarbonizacji spalin energetycznych.

Dalsze badania, dotyczące parametrów i aplikacyjności zjawiska chłodzenia termoakustycznego, wpisują się zarówno w zadania ochrony środowiska, jak i nowoczesnej energetyki – odpowiadającej na aktualne potrzeby konsumentów.



Zakres planowanych badań

Na podstawie zebranych wyników, w obszarze badań zjawiska chłodzenia termoakustycznego, wyznaczono następującą tematykę **przyszłych** badań:

- porównanie wyników symulacji obliczeniowych, uzyskanych przy użyciu różnych narzędzi numerycznych, z parametrami rzeczywistego urządzenia chłodniczego wyznaczonymi na drodze eksperymentalnej,
- wstępną ocenę zasadności wykorzystania zjawiska chłodzenia termoakustycznego w systemach chłodzenia urządzeń elektronicznych (zwłaszcza układów scalonych),
- zaprojektowanie wysokosprawnego, zmikronizowanego termoakustycznego urządzenia pracującego w trybie chłodziarki lub pompy ciepła.



Dziękuję za uwagę



Literatura

- [1] Tijani M.E.H.: Loudspeaker-driven thermo-acoustic refrigeration, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven 2001
- [2] Springer Handbook of Acoustics, ed. Rossing T.D., Springer Science+Business Media LLC New York, New York 2007
- [3] Poesse M.E., Smith R.W.M., Garret S.L., van Gerwen R., Gosselin P.: Thermoacoustic refrigeration for ice cream sales, The Penn State University Applied Research Laboratory, Penn State University, 2004
- [4] Hamood A., Jaworski A.J., Mao X., Simpson K.: Design and construction of a two-stage thermoacoustic electricity generator with push-pull linear alternator, Energy 144(2018), s. 61-72
- [5] Bassem M.M., Ueda Y., Akisawa A.: Thermoacoustic Stirling Heat Pump Working as a Heater, Applied Physics Express 4(2011), art. 107301
- [6] Remiorz L.: Badania numeryczne i eksperymentalne akustycznej separacji CO₂, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015
- [7] Wiciak G., Grzywnowicz K., Remiorz L.: Metoda wspomagania oczyszczania gazów spalinowych energetycznych z wykorzystaniem zjawiska chłodzenia termoakustycznego – wybrane zagadnienia, Międzynarodowa XIII Konferencja Kotłowa 2018 „Aktualne Problemy Budowy i Eksploatacji Kotłów”, Szczyrk, 23-26.10.2018r
- [8] Swift G., Wollan J.: Thermoacoustics for Liquefaction of Natural Gas, GasTIPS 4 (2002), s. 21-26

