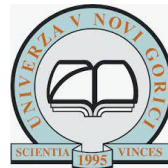




Alternativne tehnologije hlajenja na osnovi kaloričnih učinkov v trdninah: kako zadostiti globalnim potrebam po okolju prijaznemu hlajenju?

Doc. dr. Jaka Tušek
Fakulteta za strojništvo
Univerza v Ljubljani

15. 12. 2022, Vipava, Slovenija





Osnove hlajenja: naravno vs. aktivno hlajenje

Zgodovina hlajenja: od ledene dobe do danes

Hlajenje danes in jutri

Problematika hladilnih sredstev

Alternativne tehnologije hlajenja

Osnove kaloričnega učinka

Delovanje kaloričnih naprav

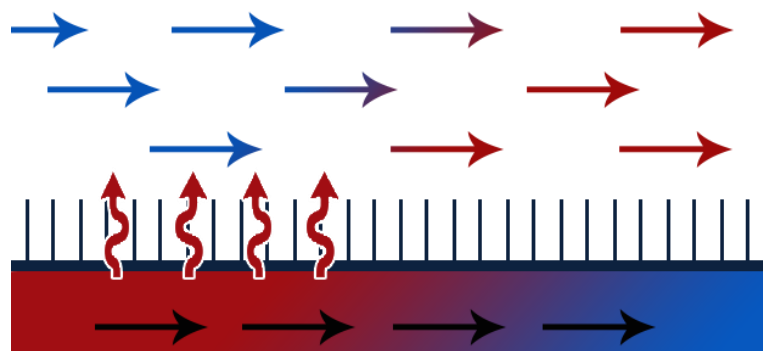
Magnetno (magnetokalorično) hlajenje

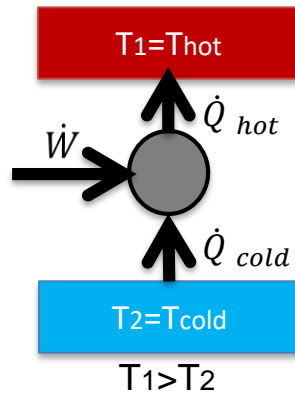
Elektrokalorično hlajenje

Elastokalorično hlajenje

Prihodnost kaloričnega hlajenja

ERC SUPERCOOL projekt

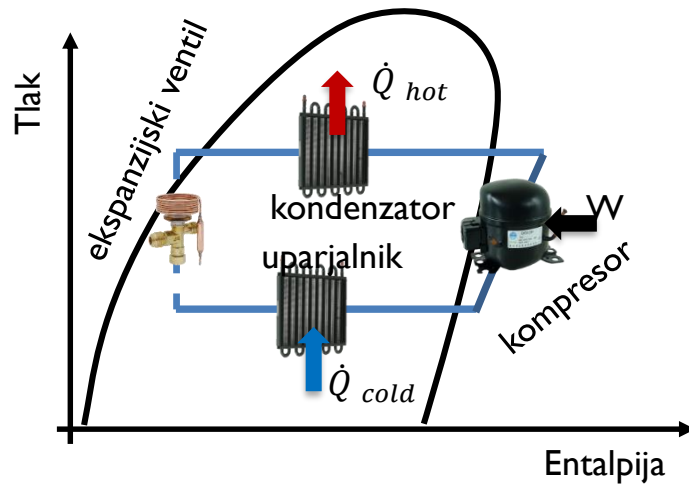




$$COP = \frac{\dot{Q}_{cold}}{\dot{W}} \quad - \text{ hladilno število}$$

$$\eta = \frac{COP}{COP_c} \quad - \text{ ekssergijska učinkovitost}$$

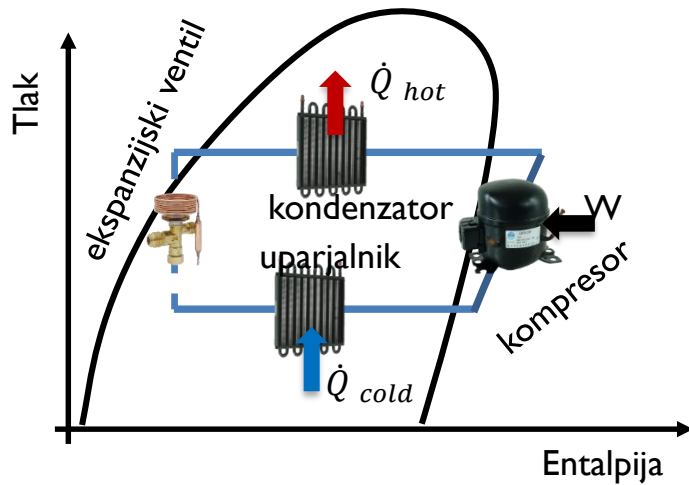
$$COP_c = \frac{T_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}} \quad - \text{ Carnot COP}$$



$$COP = \frac{\dot{Q}_{cold}}{\dot{W}} \quad - \text{ hladilno število}$$

$$\eta = \frac{COP}{COP_c} \quad - \text{ eksergijska učinkovitost}$$

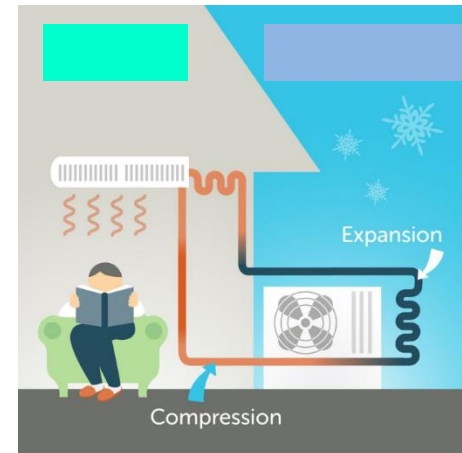
$$COP_c = \frac{T_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}} \quad - \text{ Carnot COP}$$



$$COP = \frac{\dot{Q}_{cold}}{\dot{W}} \quad \text{- hladilno število}$$

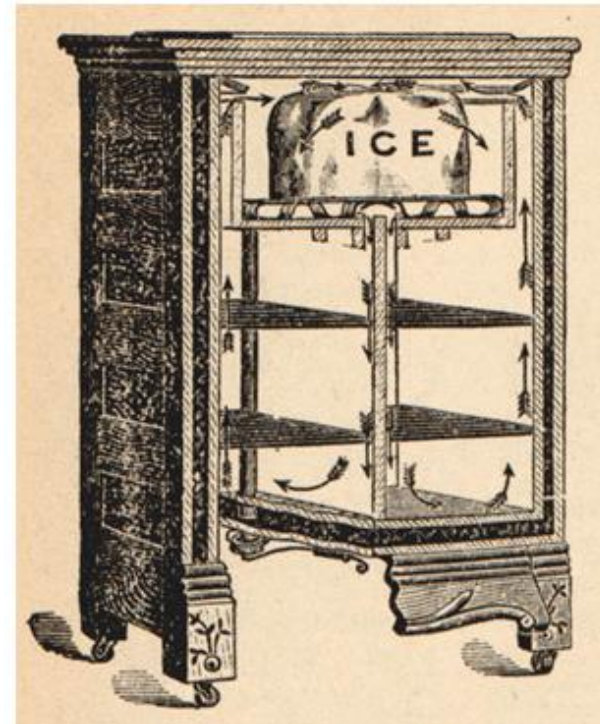
$$\eta = \frac{COP}{COP_c} \quad \text{- eksergijska učinkovitost}$$

$$COP_c = \frac{T_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}} \quad \text{- Carnot COP}$$



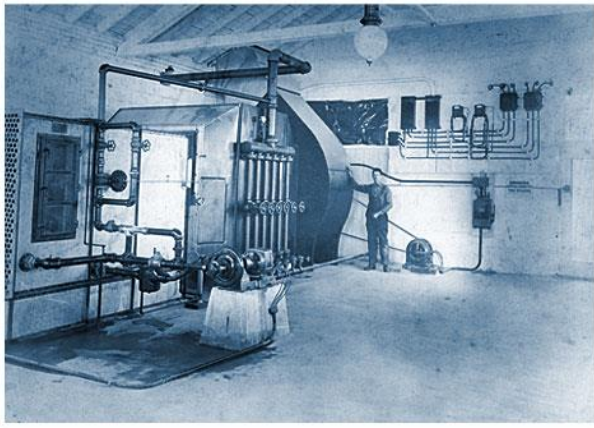


„Ledena doba“ (1000 pnš – 19 stoletje)





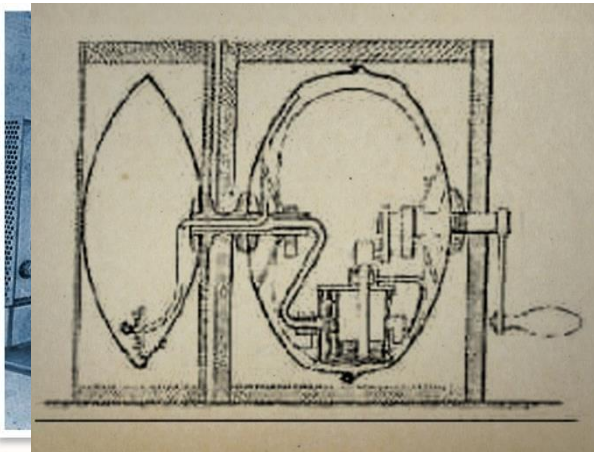
Razvoj parno-kompresijske tehnologije hlajenja



- 1725 Spoznanje, da ima uparjanje hladilni učinek (W. Cullen, VB)
- 1805 Prva idejna zasnova parno-kompresijskega hladilnega sistema (O. Evans, ZDA)
- 1834 Izdelan prvi parno-kompresijski hladilni sistem (J. Perkins, ZDA)
- 1870 Prvi komercialni hladilni sistem (pivovarna v New Yorku, ZDA)
- 1902 Zasnova prve klimatske naprave (W.H. Carrier, ZDA)
- 1922 Prva komercialna klimatska naprava (Carrier Air Conditioning Company of America) – Mestno gledališče Los Angeles
- 1927 Prvi komercialni gospodinjski hladilnik (General Electric)
- 1930 Začetek uporabe freona v hladilnih sistemih



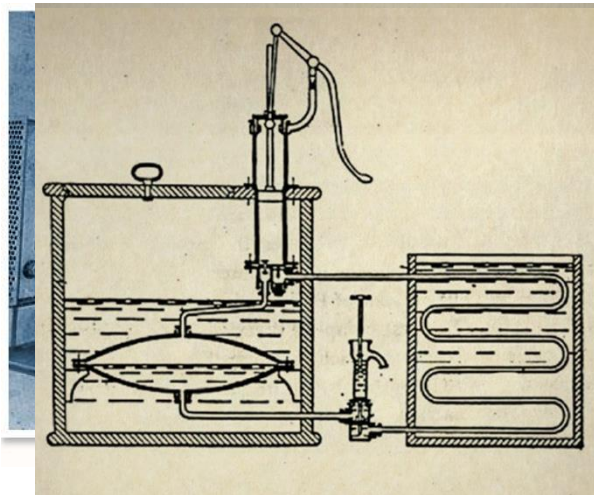
Razvoj parno-kompresijske tehnologije hlajenja



- 1725 Spoznanje, da ima uparjanje hladilni učinek (W. Cullen, VB)
- 1805 Prva idejna zasnova parno-kompresijskega hladilnega sistema (O. Evans, ZDA)
- 1834 Izdelan prvi parno-kompresijski hladilni sistem (J. Perkins, ZDA)
- 1870 Prvi komercialni hladilni sistem (pivovarna v New Yorku, ZDA)
- 1902 Zasnova prve klimatske naprave (W.H. Carrier, ZDA)
- 1922 Prva komercialna klimatska naprava (Carrier Air Conditioning Company of America) – Mestno gledališče Los Angeles
- 1927 Prvi komercialni gospodinjski hladilnik (General Electric)
- 1930 Začetek uporabe freona v hladilnih sistemih



Razvoj parno-kompresijske tehnologije hlajenja



- 1725 Spoznanje, da ima uparjanje hladilni učinek (W. Cullen, VB)
- 1805 Prva idejna zasnova parno-kompresijskega hladilnega sistema (O. Evans, ZDA)
- 1834 Izdelan prvi parno-kompresijski hladilni sistem (J. Perkins, ZDA)
- 1870 Prvi komercialni hladilni sistem (pivovarna v New Yorku, ZDA)
- 1902 Zasnova prve klimatske naprave (W.H. Carrier, ZDA)
- 1922 Prva komercialna klimatska naprava (Carrier Air Conditioning Company of America) – Mestno gledališče Los Angeles
- 1927 Prvi komercialni gospodinjski hladilnik (General Electric)
- 1930 Začetek uporabe freona v hladilnih sistemih



Razvoj parno-kompresijske tehnologije hlajenja



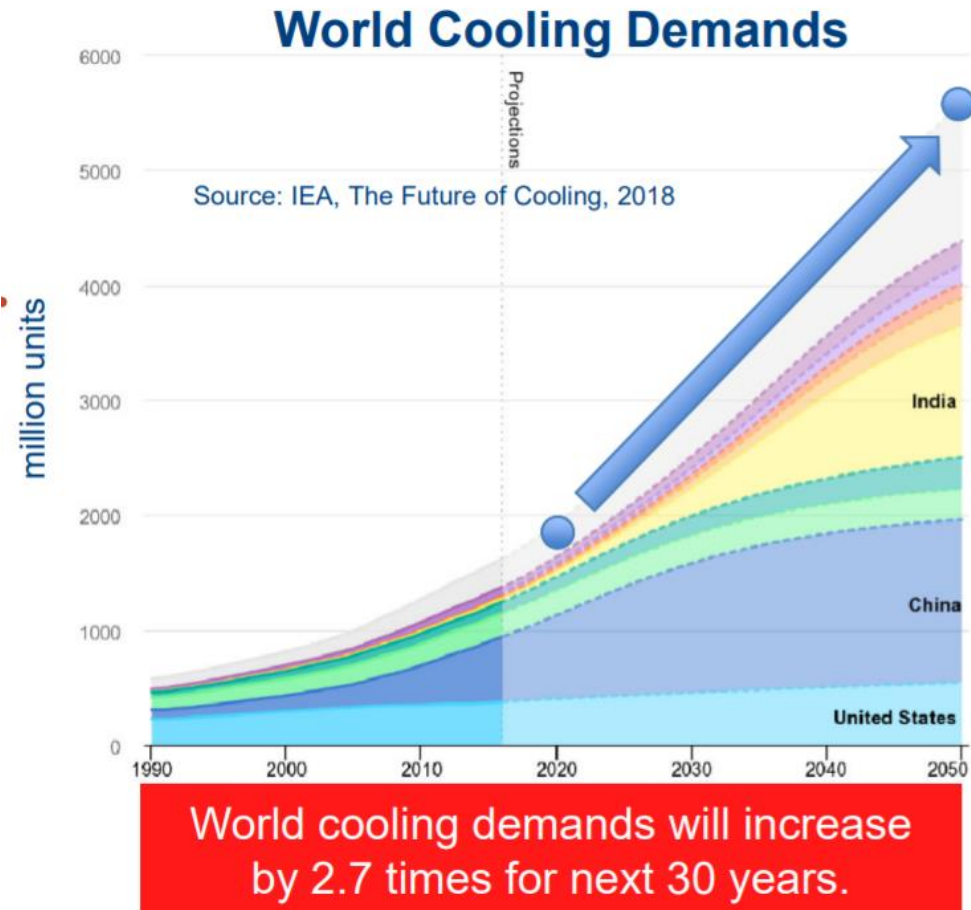
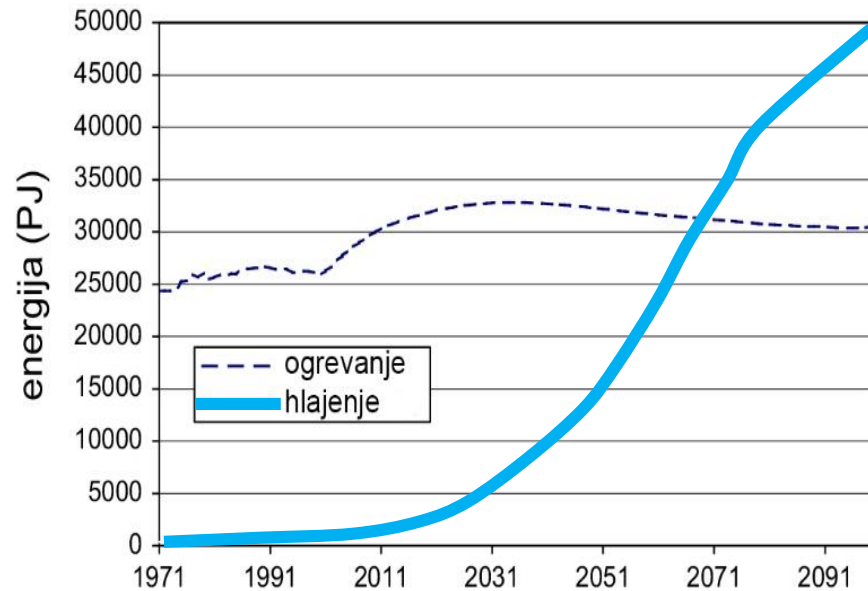
- 1725 Spoznanje, da ima uparjanje hladilni učinek (W. Cullen, VB)
- 1805 Prva idejna zasnova parno-kompresijskega hladilnega sistema (O. Evans, ZDA)
- 1834 Izdelan prvi parno-kompresijski hladilni sistem (J. Perkins, ZDA)
- 1870 Prvi komercialni hladilni sistem (pivovarna v New Yorku, ZDA)
- 1902 Zasnova prve klimatske naprave (W.H. Carrier, ZDA)
- 1922 Prva komercialna klimatska naprava (Carrier Air Conditioning Company of America) – Mestno gledališče Los Angeles
- 1927 Prvi komercialni gospodinjski hladilnik (General Electric)
- 1930 Začetek uporabe freona v hladilnih sistemih





Hlajenje danes in jutri







	leta	hladiva	problemi	zakaj
1. generacija	1830-1930	Naravna hladiva: Eter, amonijak, propan, butan	Eksplozivna, vnetljiva, strupena	Karkoli deluje

Thomas Midgley, Jr.

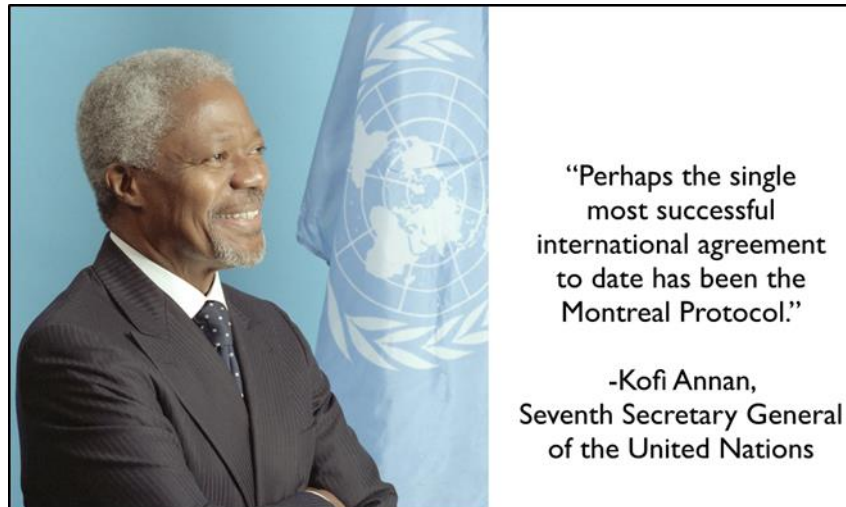


Diklordiflorometan
Freon 12
CFC-12
ne-strupeno in ne-vnetljivo

“the refrigeration industry needs
a new refrigerant if they expect
to get anywhere”

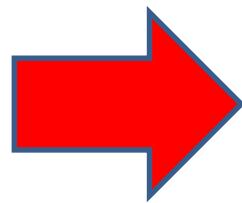


	leta	hladiva	problemi	zakaj
1. generacija	1830-1930	Naravna hladiva: Eter, amonijak, propan, butan	Eksplozivna, vnetljiva, strupena	Karkoli deluje
2. generacija	1930-1990 (Montreal)	klorofluorokarbon CFC (freoni – R12, R22) hidroklorofluorokarboni HCFC (R132)	Povzroča ozonsko luknjo (ODP>0) Učinek tople grede (GWP>10-10000)	Varnost, Vzdržljivost, Učinkovitost





	leta	hladiva	problemi	zakaj
1. generacija	1830-1930	Naravna hladiva: Eter, amonijak, CO ₂ , propan, butan	Eksplozivna, vnetljiva, strupena	Karkoli deluje
2. generacija	1930-1990 (Montreal)	klorofluorokarbon CFC (freoni – R12, R22) hidroklorofluorokarboni HCFC (R132)	Povzroča ozonsko luknjo (ODP>0) Učinek tople grede (GWP>10-10000)	Varnost, Vzdržljivost, učinkovitost
3. generacija	1990-2016 (Kigali)	hidroflorokarboni HFC (R134, R410A)	Učinek tople grede (GWP>10-10000)	ODP=0



1 kg v ozračje



R-404A (HFC)
GWP=3922

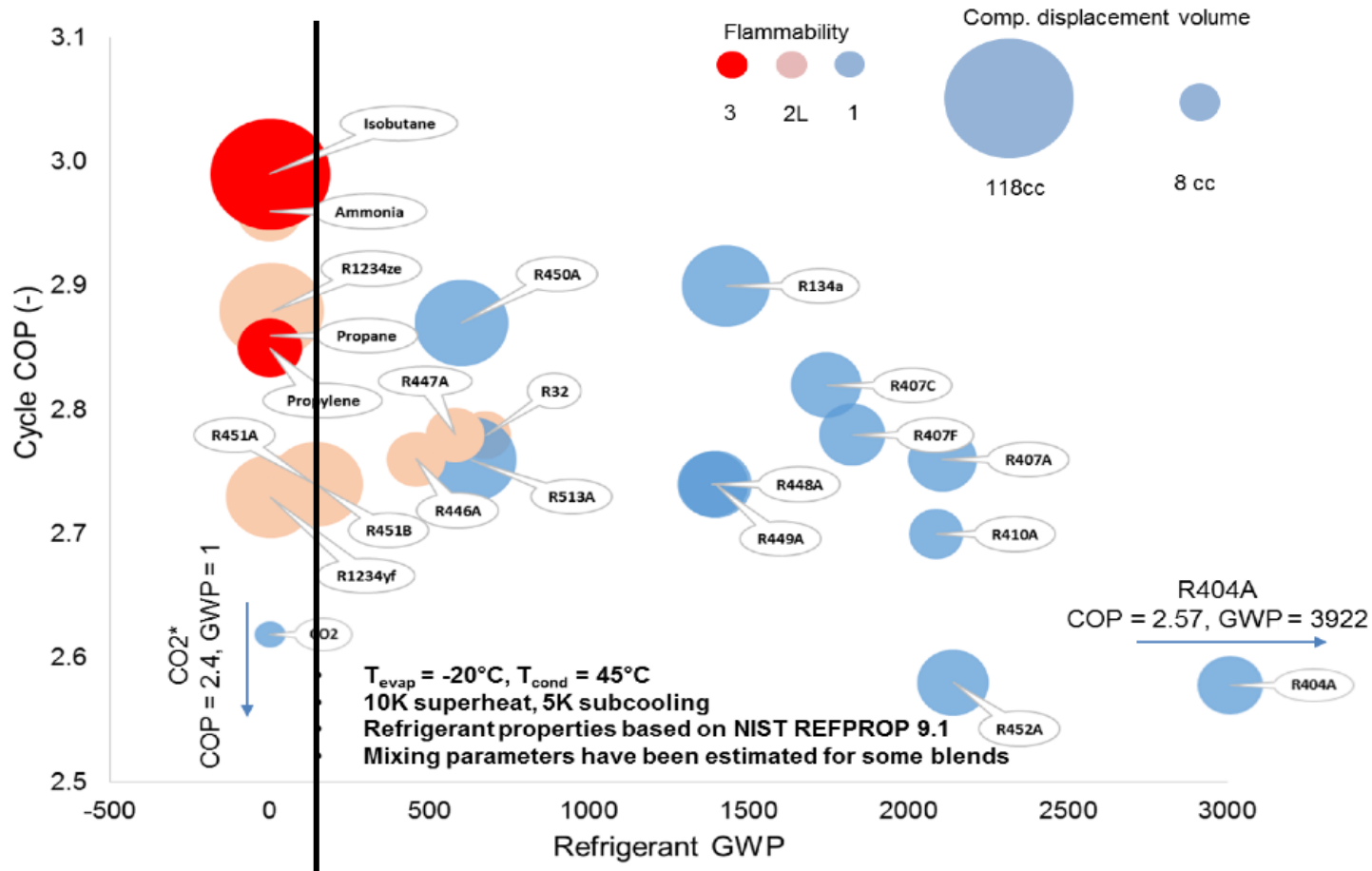
~28000 km z avtom srednjega razreda
(~140 gCO₂/km)



	leta	hladiva	problemi	zakaj
1. generacija	1830-1930	Naravna hladiva: Eter, amonijak, CO ₂ , propan, butan	Eksplozivna, vnetljiva, strupena	Karkoli deluje
2. generacija	1930-1990 (Montreal)	klorofluorokarbon CFC (freoni – R12, R22) hidroklorofluorokarboni HCFC (R132)	Povzroča ozonsko luknjo (ODP>0) Učinek tople grede (GWP>10-10000)	Varnost, Vzdržljivost, učinkovitost
3. generacija	1990-2016 (Kigali)	hidroflorokarboni HFC (R134, R404A, R410A)	Učinek tople grede (GWP>10-10000)	ODP=0
4. generacija	2016-	Naravna hladiva	Eksplozivna, vnetljiva, strupena, slabše učinkovita	GWP<10



Refrigerant Properties for Refrigeration



Kigali sporazum



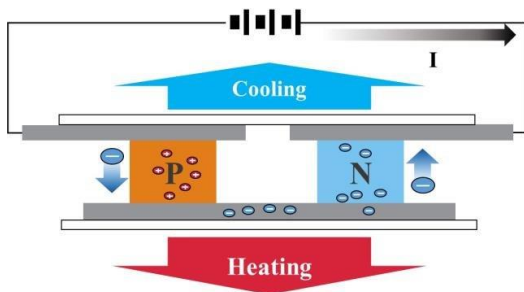
Refrigerant Properties for Refrigeration



Kigali sporazum



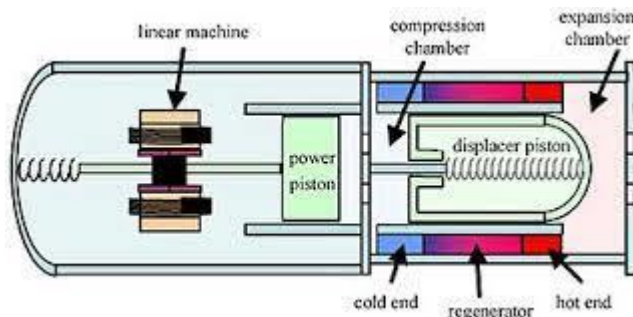
Termoelektrično hlajenje



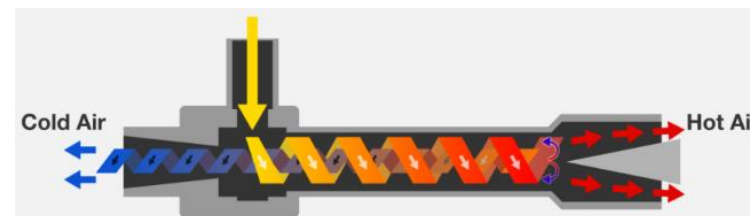
Sorbcijsko hlajenje



Stirlingovo hlajenje



Vortex-ova cev

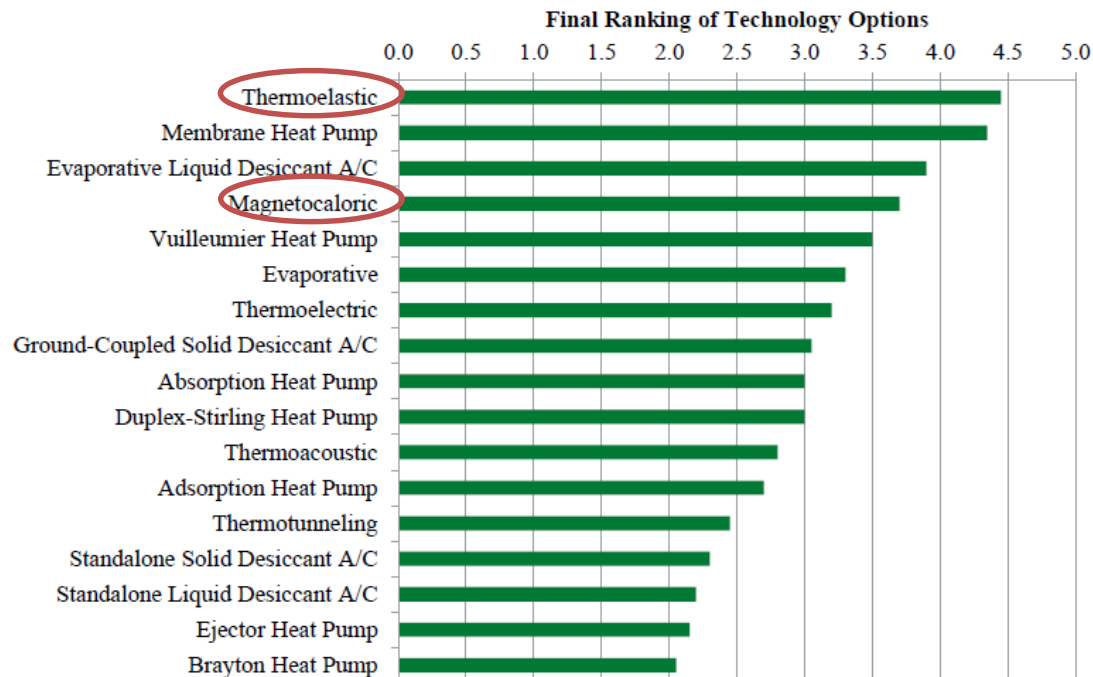


! Kalorično hlajenje z uporabo feroičnih materialov !



U.S. DEPARTMENT OF **ENERGY** | Energy Efficiency & Renewable Energy | Building Technologies Office

Energy Savings Potential and RD&D Opportunities for Non-Vapor-Compression HVAC Technologies



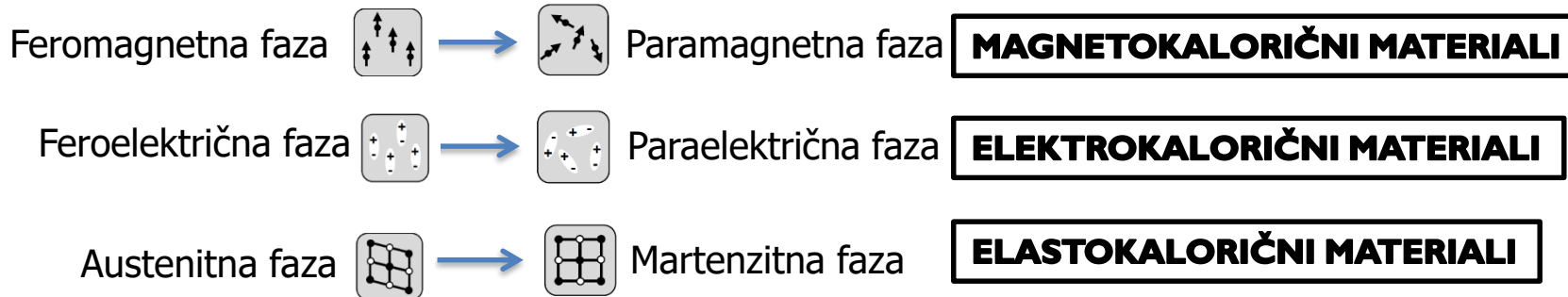
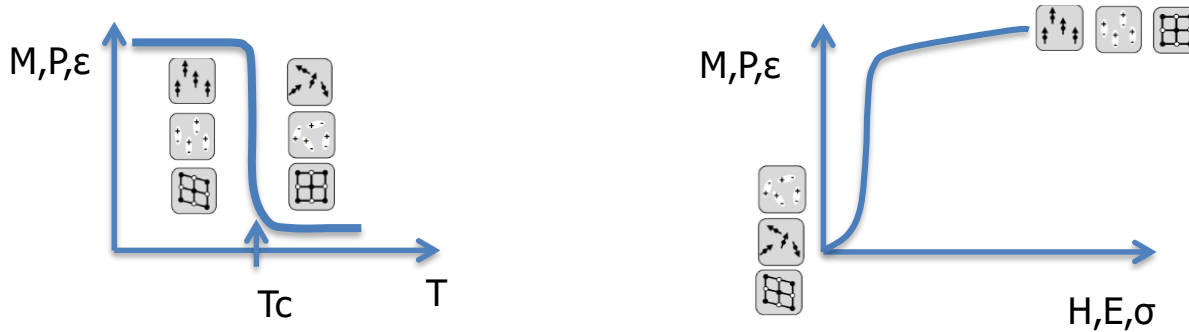


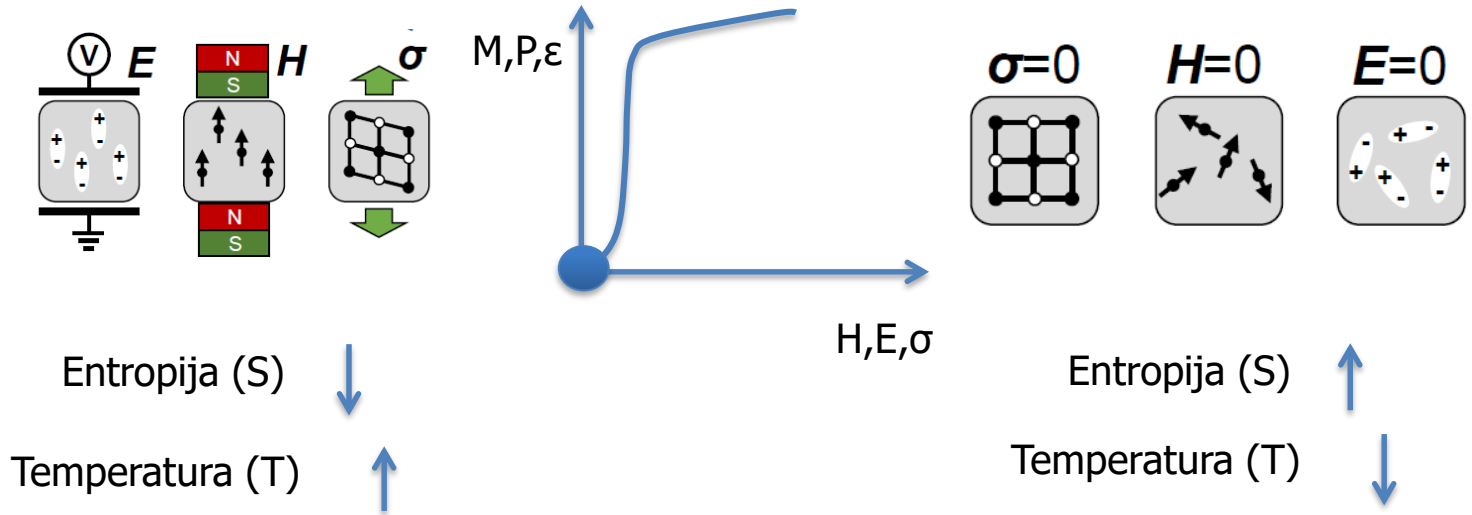
Kaj so feroični materiali?

Splošno ime za materiale, ki izkazujejo feromagnetne, feroelektrične in feroelastične učinke

Feroične lastnosti:

- Spontana magnetizacija (M)/ polarizacija (P)/ deformacija (ϵ) pri T_c
- Relativno majhna spremembe H, E ali σ povzročijo velike, nelinearne spremembe M, P ali ϵ





Izotermna sprememba entropije:

$$\Delta S_{iso} = \int_0^Y \left(\frac{\partial x}{\partial T} \right)_Y dY$$

Adiabatna sprememba temperature:

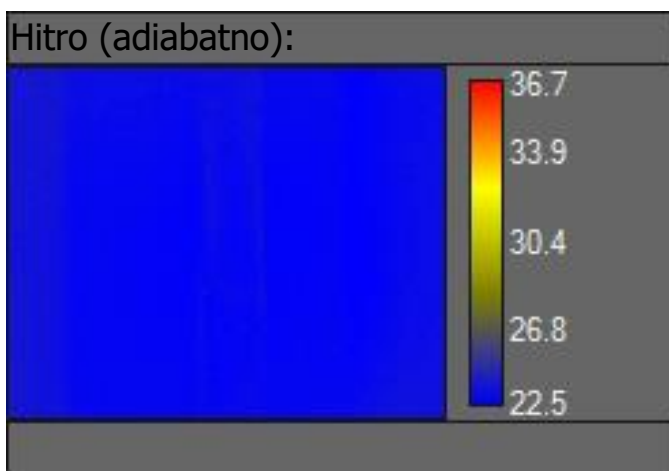
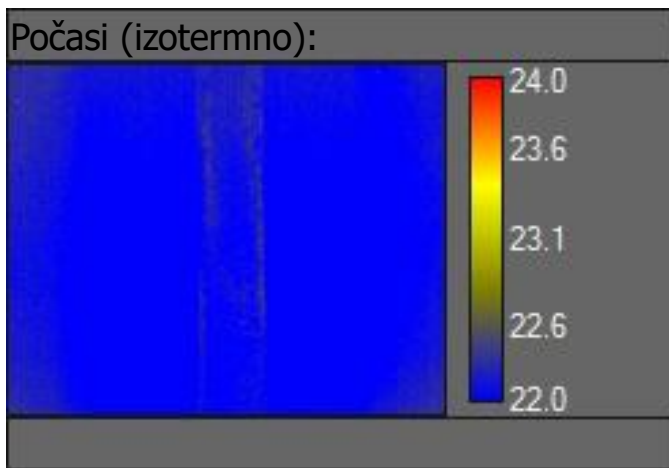
$$\Delta T_{ad} = \int_0^Y \frac{T}{c} \left(\frac{\partial x}{\partial T} \right)_Y dY$$

Pri tem je Y zunanje aplicirano polje ($Y=H/E/\sigma$), x pa notranja spremenljivka, ki se spremeni kot posledica zunanjega polja ($x=M/P/\epsilon$).

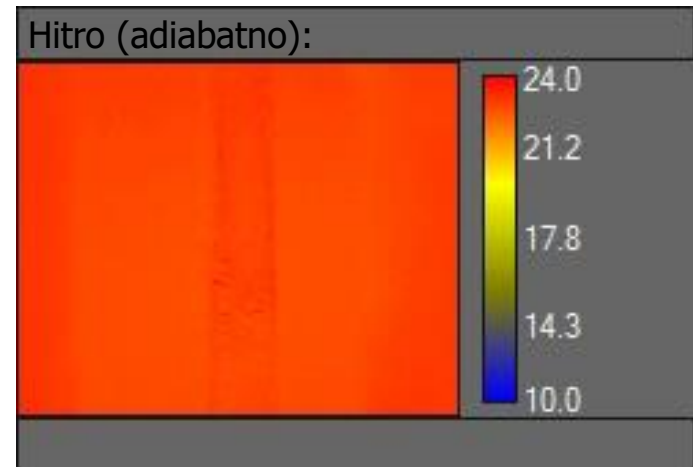
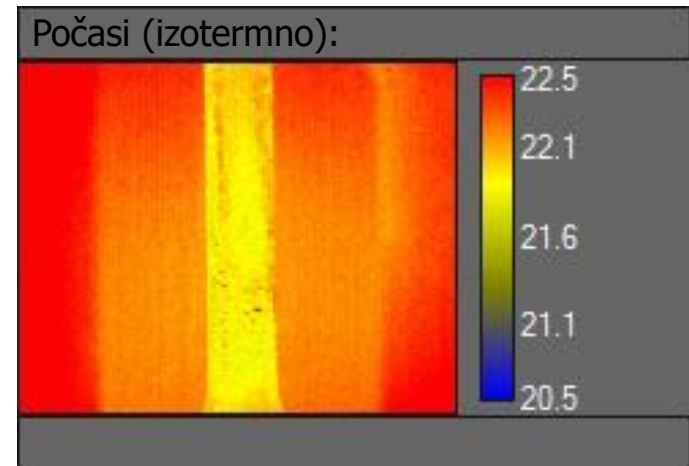


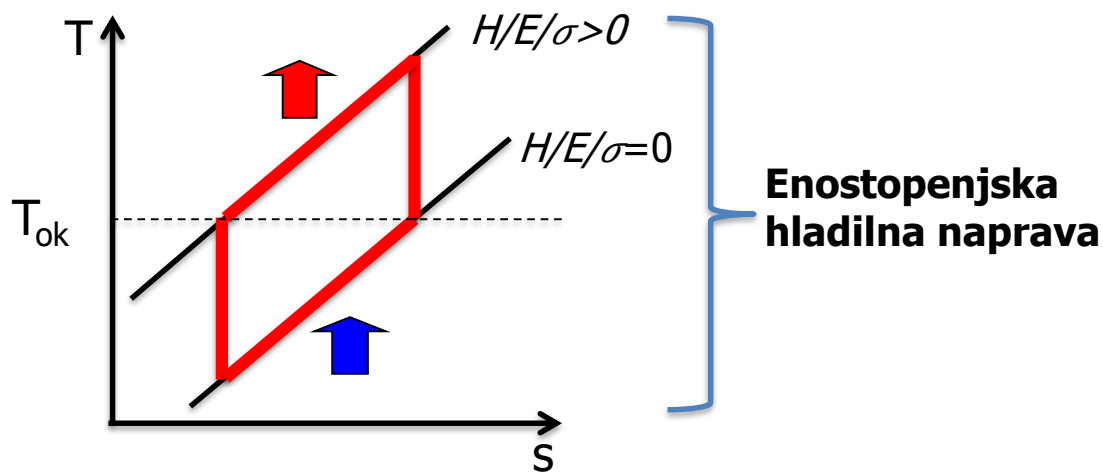
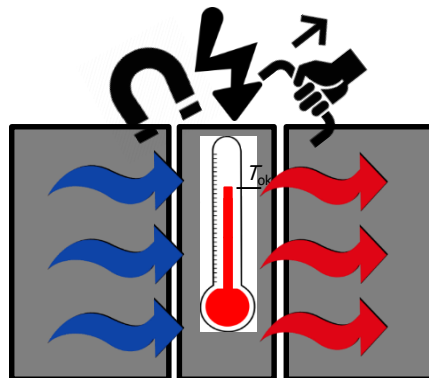
Austenitna faza  →  Martenzitna faza

Obremenjevanje



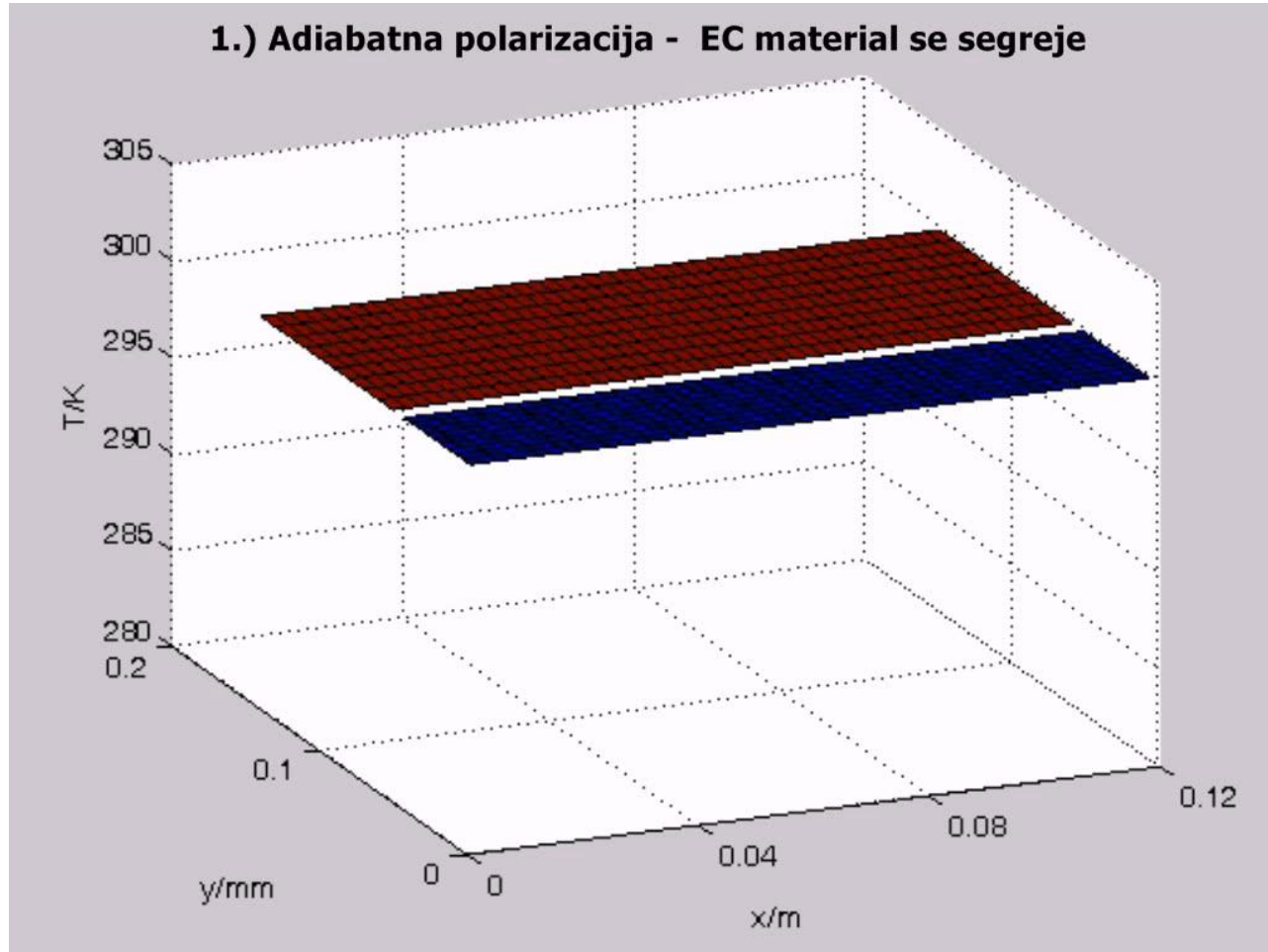
Razbremenjevanje







Numerična simulacija delovanja (elektro)kaloričnega regeneratorja:





Magnetokalorični učinek sta leta 1917 v niklju odkrila Wiess in Piccard.

Prvi magnetni hladilnik je leta 1976 razvila NASA.

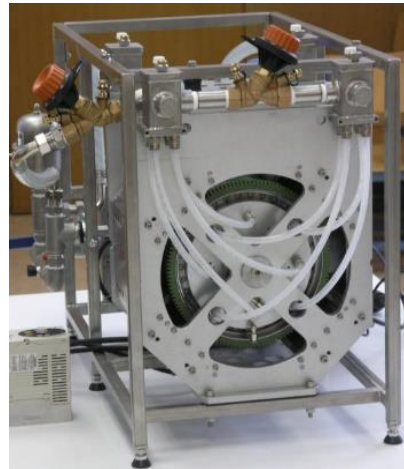
Do danes je bilo na svetu razvitih več kot 80 prototipov magnetnih hladilnikov.

Tipični magnetokalorični materiali: Gd, Gd-Si-Ge, La-Fe-Si

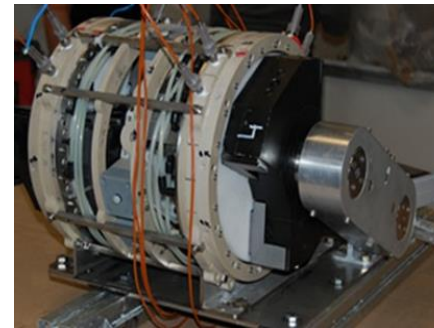
1997



2007



2013

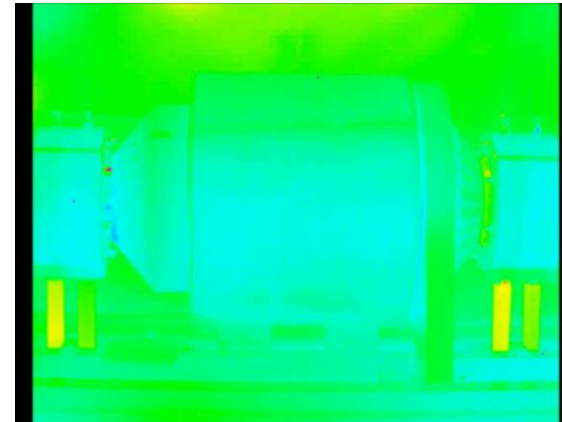
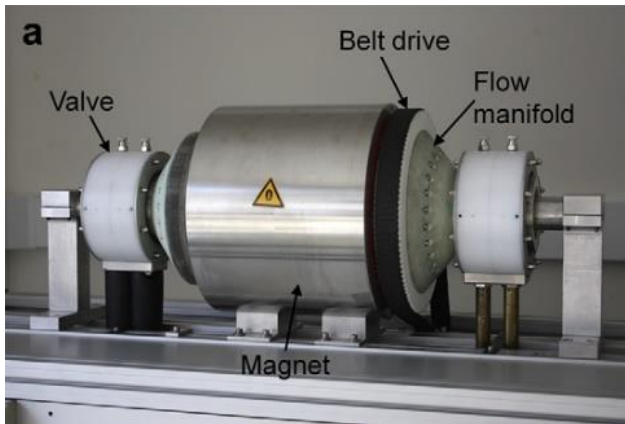
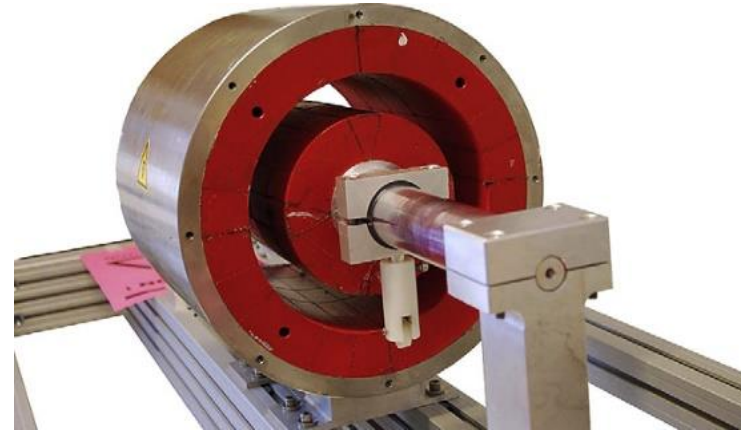
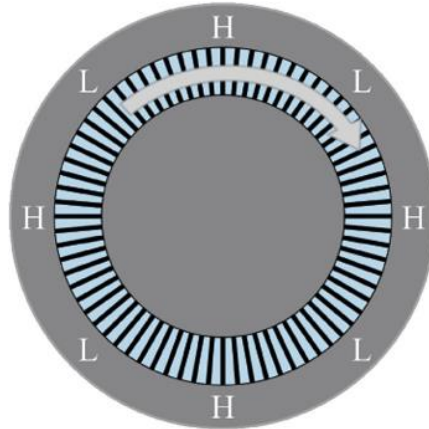


2015





Primer delovanja magnetnega hladilnika razvitega na Danski tehnični univerzi (DTU):



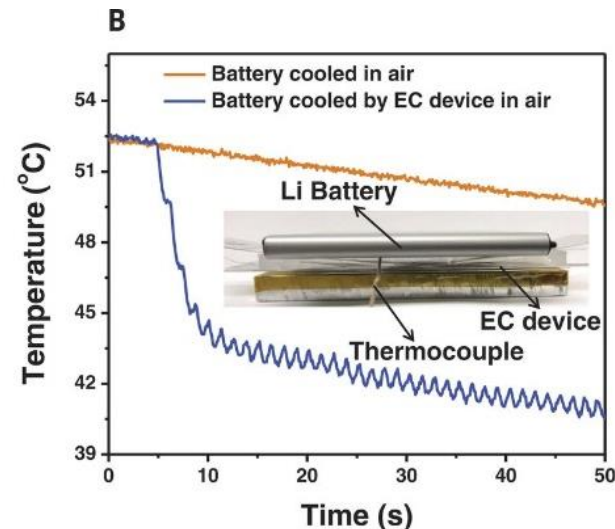
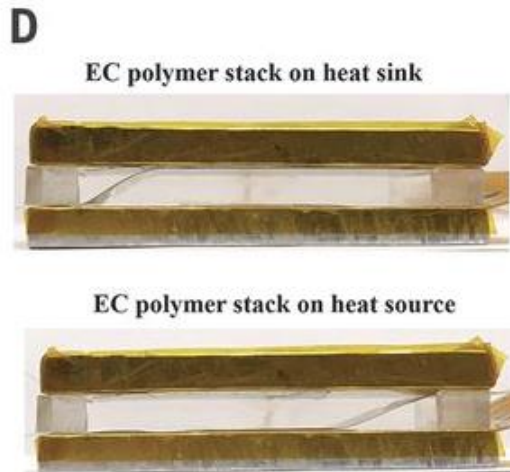
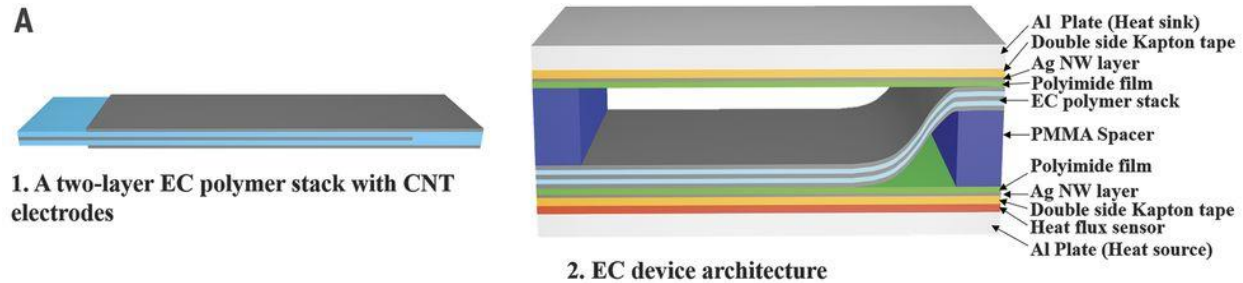
$\Delta T_{\max} = 25 \text{ K}$
 $Q = 100 \text{ W}$ at 20 K of temp. span



Elektrokalični učinek sta leta 1930 v Rochellovi soli odkrila Kobenko in Kurchatov. Do danes je bilo na svetu razvitih okoli 15 prototipov elektrokaličnih hladilnikov.

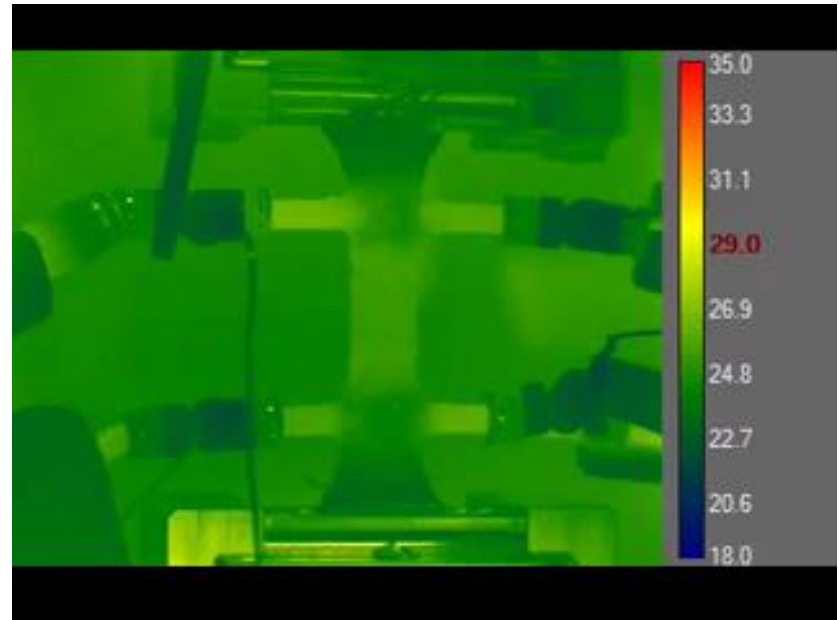
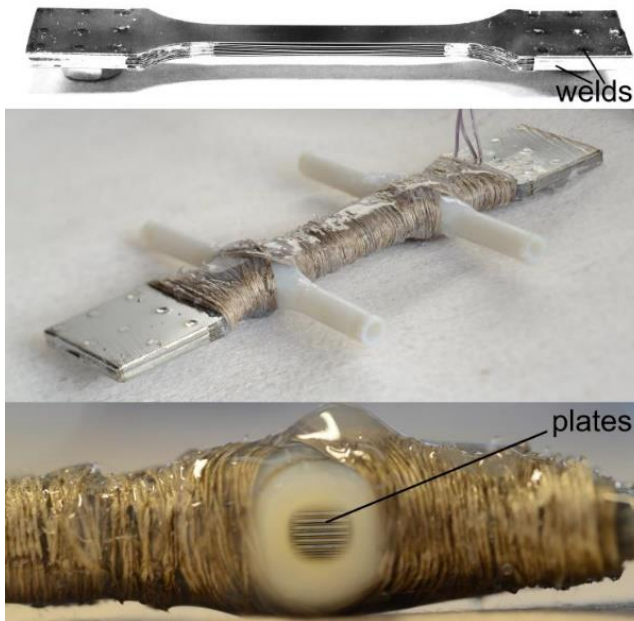
Tipični elektrokalični materiali: $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ (keramika); P(VDF-TrFE) (polimer)

Primer delovanja enostopenjske elektrokalične naprave na osnovi elektrostatične aktuacije razvite na Univerzi v Kaliforniji:





Elastokalorični učinek je v začetku 19. stoletja v naravni gumi odkril John Gough. Do danes je bilo na svetu razvitih okoli 15 prototipov elastokaloričnih hladilnikov. Tipični elastokalorični materiali: Ni-Ti, Cu-Zn-Al (kovine); naravna guma (polimer)
Elastokalorična naprava na osnovi elastokaloričnega regenerotorja razvita na Danski tehnični univerzi:



$$\Delta T_{\max} = 20 \text{ K}$$

$$Q_{\max} = 800 \text{ W/kg at 15 K of temperature span}$$

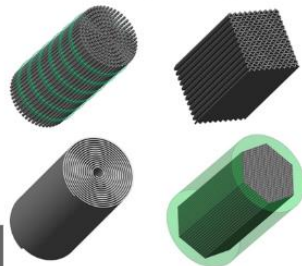


1. Okolju prijazna trdninska hladilna sredstva
2. Potencialna eksergijska učinkovitost preko 50 %
3. Tiho delovanje, brez vibracij



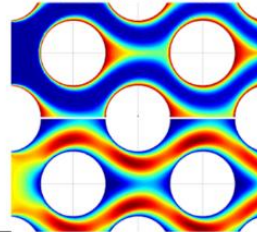
1 ELASTOCALORIC REGENERATOR

FORMING OF SUPERELASTIC STRUCTURES



WP1

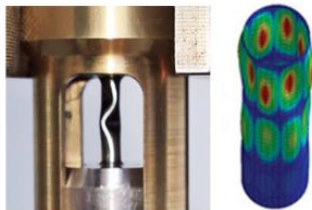
THERMO-HYDRAULIC PROPERTIES



WP2

A. Šarlah, J. Tušek et al, Journal of Mechanical Engineering, 2012

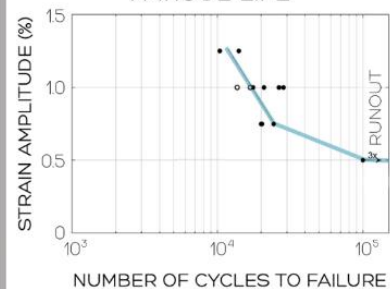
MECHANICAL MODELLING AND STABILITY



WP3

L. Porenta, J. Tušek et al, In progres, 2018

FATIGUE LIFE



WP4

J. Tušek et al, Acta Materialia, 2018

2 DRIVER WITH FORCE RECOVERY

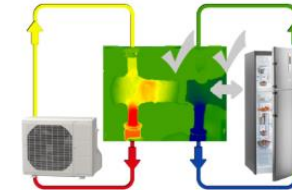
DRIVER MECHANISM



WP5

3 SYNTHESIS

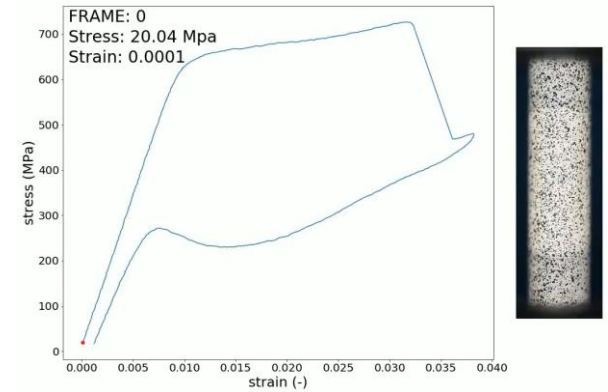
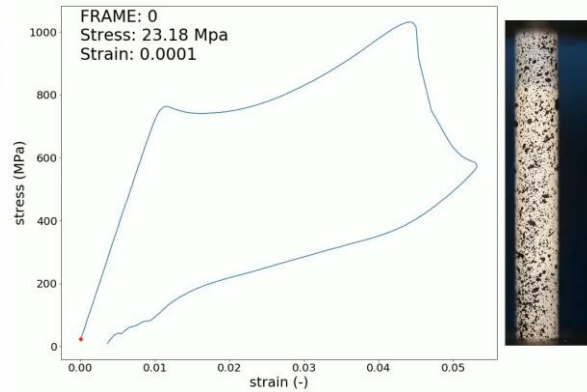
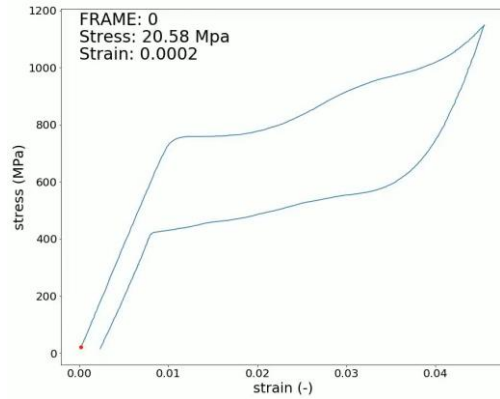
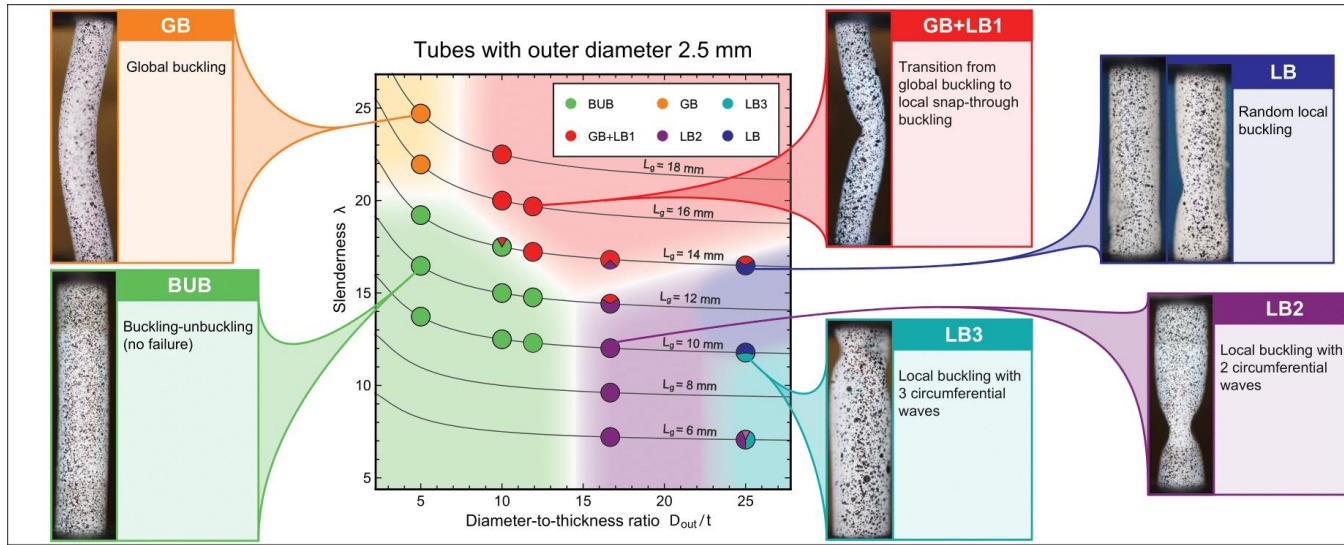
ELASTOCALORIC PROTOTYPE DEVICE



WP6

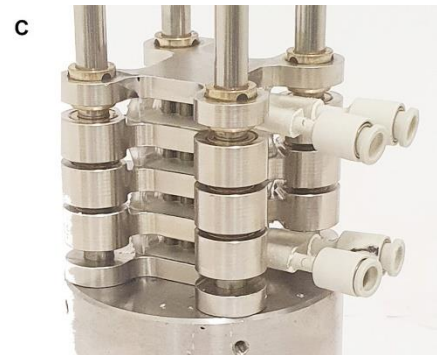
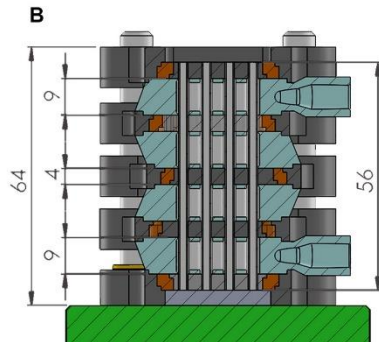
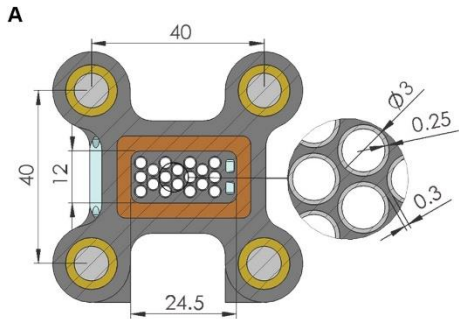
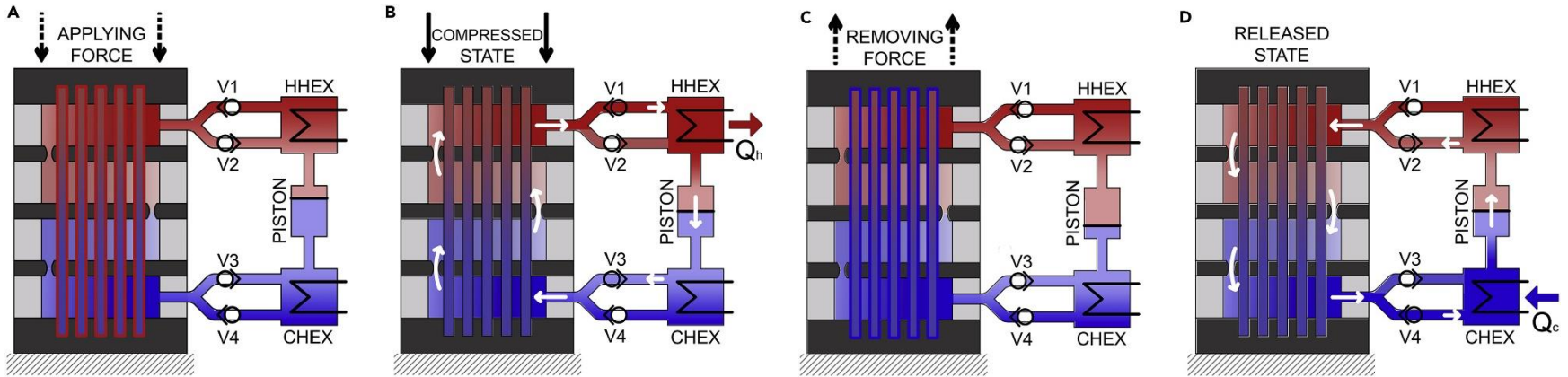


Uklonska stabilnost elastokaloričnih cevk:



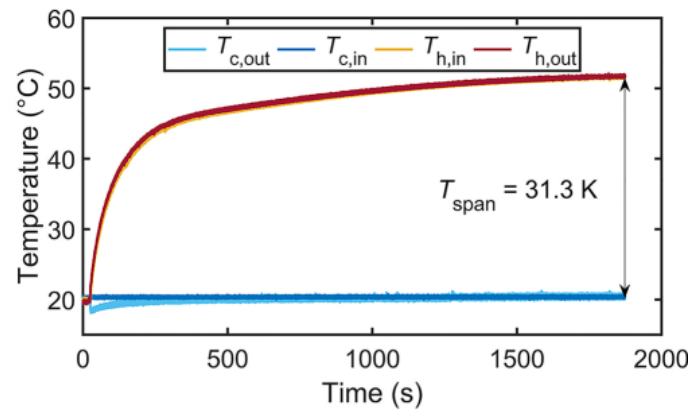


Tlačno obremenjeni cevni elastokalorični regenererator:



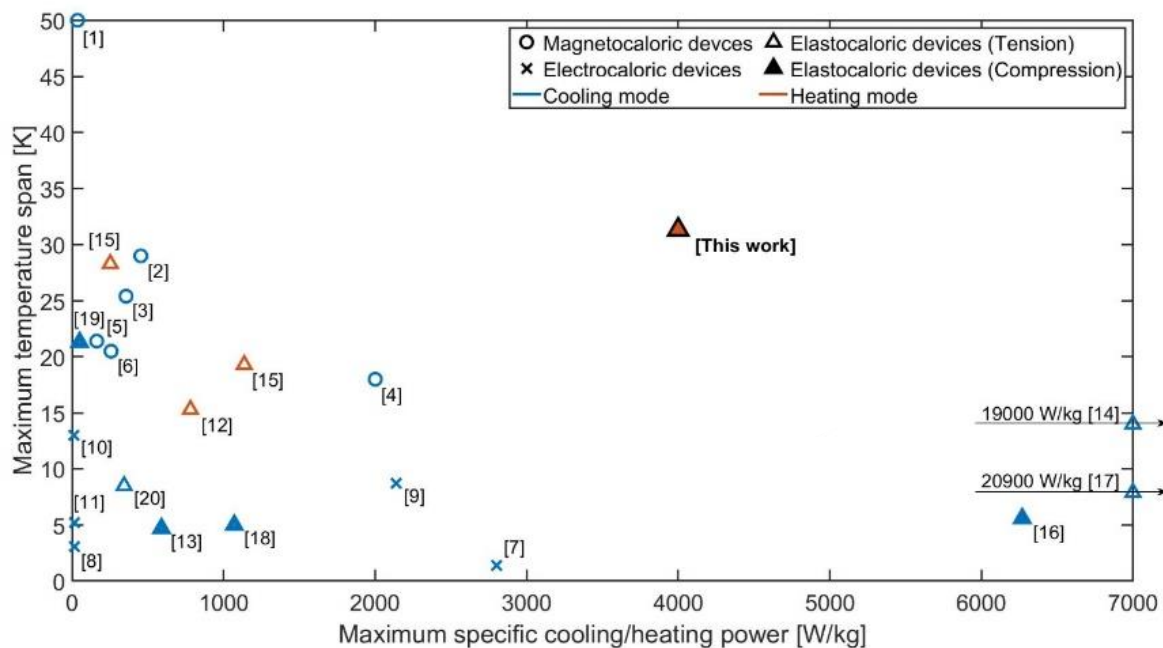


Delovanje tlačno obremenjenega cevnega elastokaloričnega regeneratorja:





Primerjava tlačno obremenjenega cevnega elastokaloričnega regeneratorsa z ostalimi kaloričnimi napravami:

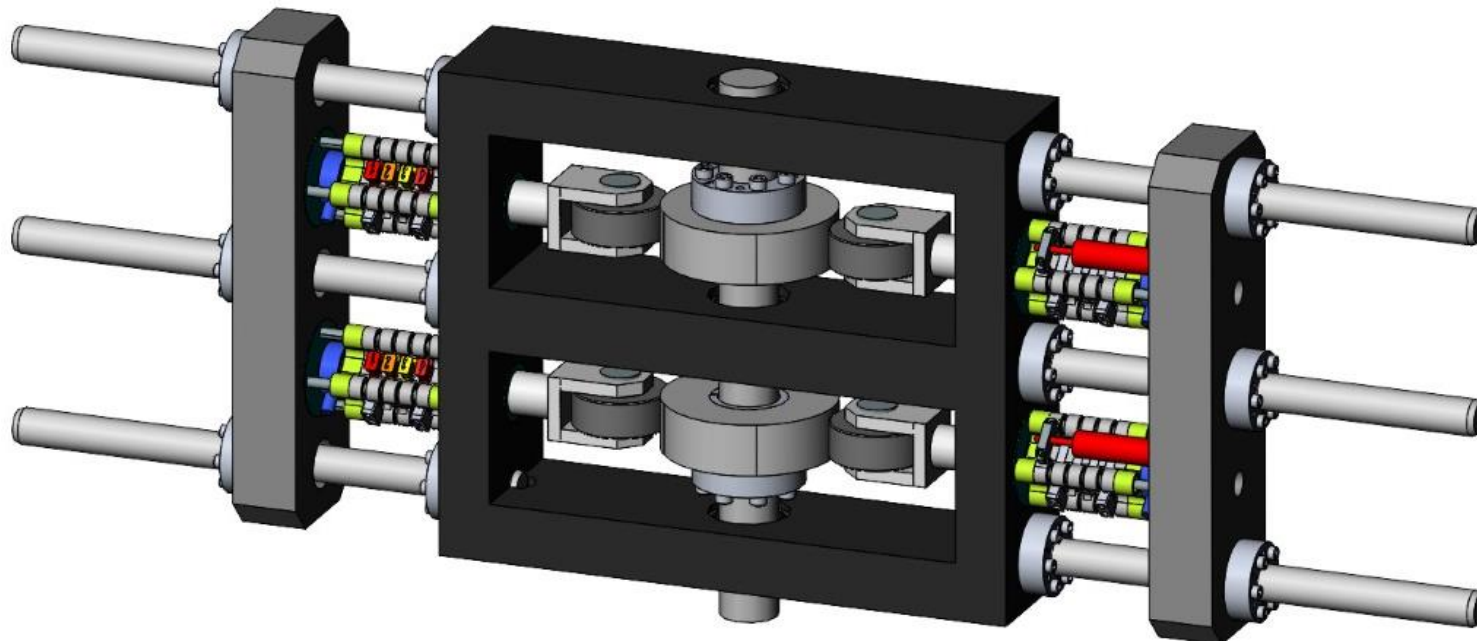


- [1] A. Rowe et al., Int. J. Refrig 29, 2006
- [2] A. Tura et al., Int. J. Refrig. 34, 2011
- [3] K. Engelbrecht et al., Int. J. Refrig. 35, 2012
- [4] S. Jacobs et al., Int. J. Refrig. 37, 2014
- [5] S. Lionte et al., Int. J. Refrig. 122, 2021
- [6] M. Masche et al., Appl. Therm. Eng. 204, 2022
- [7] R. Ma et al., Science 357, 2017
- [8] U. Plaznik et al., Int. J. Refrig. 98, 2019
- [9] Y. Meng et al., Nat. Energy 5, 2020
- [10] A. Torrelo et al., Science 370, 2020
- [11] Y. Wand et al., Science 370, 2020
- [12] J. Tušek et al., Nat. Energy 1, 2016
- [13] S. Qian et al., Int. Refrig. and Air Cond. Conf., 2016
- [14] F. Bruederlin et al., Energy Technol. 6, 2018
- [15] R. Snodgrass et al., Sci. Rep. 9, 2019
- [16] N. Bachmann et al., Commun. Phys. 4, 2021
- [17] F. Greibich et al., Nat. Energy 6, 2021
- [18] L. Ianniciello et al., Appl. Therm. Eng. 202, 2021
- [19] D. Catalini, PhD Diss. University of Maryland, 2021
- [20] Y. Chen et al., The Innovation 3, 2022

Ž. Ahčin *et al.*, Joule 6 (2022)



Predindustrijski prototip elastokalorične naprave:





Hvala za pozornost!

Sodelavci na projektu:

Žiga Ahčin

Jan Cerar

Dr. Luka Porenta

Dr. Parham Kabirifar

Dr. Stefano Dall'Olio

Dr. Andrej Žerovnik

