

# Tehnologije i principi solarnog adsorpcionog hlađenja

**K**orišćenje energija iz obnovljivih izvora sve više zaokupira pažnju istraživača. Potreba za redukcijom potrošnje električne energije u oblasti klimatizacije i čuvanja hrane upućuje na sisteme u kojima se, za postizanje rashladnog efekta, koriste solarna energija ili otpadna toplota. Pored apsorpcionih i ejektorskih uređaja, značajno mesto u ovoj oblasti sve više zauzimaju i adsorpcioni rashladni sistemi. I pored toga što solarno adsorpciono hlađenje predstavlja jednu od najnovijih tehnologija solarnog hlađenja, ona u sadašnje vreme uveliko prevazilazi faze pilot ili demonstracionih instalacija. Proširenje tržišta, klimatske promene i povećana ekološka svest, pokazuju značajan potencijal za razvoj upravo ovakvih sistema.

## 1 Uvod

Za razliku od apsorpcionih sistema, koji su bili potpuno razvijeni još sredinom prethodnog veka, razvoj adsorpcionih sistema započinje tek dvadesetih godina prošlog veka [1]. Međutim, razvojem novih rashladnih fluida, kao i usavršavanjem kompresorskih rashladnih sistema, došlo je do stagnacije interesovanja za adsorpcione sisteme. Tek se sedamdesetih godina prošlog veka, ponovo javlja interes za adsorpcione sisteme, naročito za one koje su pogonjeni energijom sunca (npr. za održavanje vakcina u zemljama trećeg sveta, zbog nepostojanja sistema razvođenja električne energije).

Prvi industrijski adsorpcioni rashladni sistemi pogonjeni solarnom energijom napravljeni su u Japanu 1986. godine (Nishiyodo Kuchou Manufacturing Company), i od tada se ovi sistemi sve šire



Slika 1: Adsorpcioni uređaj za hlađenja a) Nishiyodo Kuchou Manufacturing Company; b) Inversor

primenjuju u Japanu, Evropi i SAD (Slika 1.a) [1].

Početkom ovog veka, savremeniji, konceptualno usavršen i gabaritno smanjen uređaj (SorTech AG) sa kapacitetima 5÷15 kW, iznela je na tržište firma Inversor (DE) (Slika 1.b) [2].

## 2 Fenomen adsorpcije

Adsorpcija predstavlja difuzionu operaciju koja se odvija kada se adsorbat, vezuje na površini adsorbenta (čvrsta supstance). Na osnovu privlačnih sila između molekula adsorbenta i adsorbata, proces adsorpcije se može podeliti na fizičku adsorpciju (fizičnu) i hemijsku adsorpciju (hemisorpciju). Sistemi adsorpcionog hlađenja se uglavnom baziraju na fizičkoj adsorpciji i slabim Van-der-Valsovim silama [1]. Količina adsorbata tokom fizičke adsorpcije zavisi od prirode adsorbenta, a veoma retko od prirode adsorbata. Postoje različiti parovi adsorbent-adsorbat ali će se u nastavku razmatrati slučaj kada je adsorbent silikagel, a adsorbat voda, odnosno vodena para.

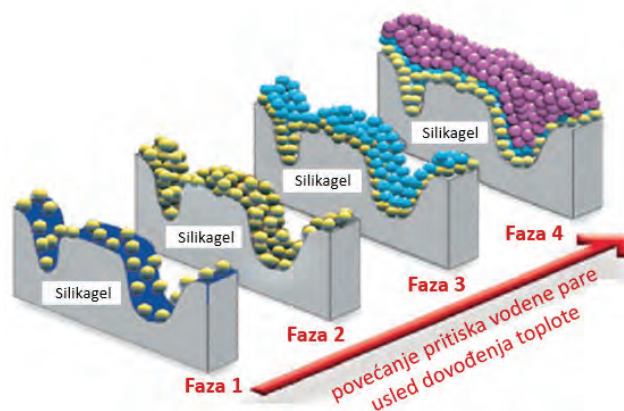
Kao primer, na slici 2 su prikazane faze tokom adsorpcije molekula vodene pare na površini silikagela [3]:

Faza 1: Na razvijenoj površi silikagela počinju da se adsorbiraju molekuli vodene pare najpre pod niskim pritiskom, usled dovođenja toplote;

Faza 2: Kako pritisak vodene pare raste, dolazi najpre do jednoslojne pokrivenosti krupnijih adsorbovanih molekula vodena para na površini silikagela;

Faza 3: Dalji porast pritiska vodene pare dovodi do popunjavanja manjih pora u silikagelu, što prouzrokuje početak višeslojnog pokrivanja silikagela vodenom parom;

Faza 4: Dalji porast pritiska vodene pare prouzrokuje potpuno pokrivanje silikagela vodenom parom, i sve pore će biti popunjene.



Slika 2: Prikaz faza tokom adsorpcije molekula vodene pare na površini silikagela

### 3 Principi adsorpcionog hlađenja

Adsorpciono hlađenje predstavlja tehnologiju hlađenja pogonjenu toplotom. Čitav proces adsorpcionog hlađenja zahteva samo toplotu, koja se može obezbediti sagorevanjem gasa, nafte ili toplotom nižeg kvaliteta (na nižoj temperaturi) uključujući otpadnu toplotu, kao i solarnu energiju. Ovim se praktično eliminiše potreba za električnom energijom za izvođenje mahaničkog procesa kompresije kod najčešće korišćenih rashladnih sistema. U sistemima koji će biti razmatrani, toplota se dovodi radnom paru adsorbent-adsorbat, pri čemu se adsorbat u daljem toku (u obliku pare) desorbuje i kao rashladni fluid ulazi u proces hlađenja.

Na osnovu principa rada, adsorpcioni ciklusi hlađenja klasifikuju se u diskontinualne i kontinuirane cikluse. Ograničenje diskontinualnih adsorpcionih ciklusa predstavlja diskontinuitet njihovog rada – danju i noću. Ovi ciklusi se karakterišu upotrebom jednog adsorbenta/desorbera. Za razliku od diskontinualnog adsorpcionog ciklusa, kontinualni (naizmenični) ciklusi adsorpcije i desorpcije se postižu upotrebom većeg broja adsorbenta. Glavni nedostatak ovih ciklusa predstavlja skromna vrednost COP faktora (može biti i manji od 0,1) [4]. Da bi se ova prepreka u razvoju adsorpcionih ciklusa prevazišla, razvijene su različite napredne tehnologije, kako bi se COP ovakvih sistema povećao.

### 4 Termodinamički aspekti adsorpcije

Adsorpciona ravnoteža je dinamička i može se matematički izraziti opštom funkcijom zavisnosti koncentracije adsorbata od pritiska i temperature  $C=f(T,p)$  [5]. Pri konstantnom pritisku ( $p$ ), koncentracija adsorbata opada kako temperatura ( $T$ ) raste, a pri konstantnoj koncentraciji adsorbata, pritisak adsorbata raste sa porastom temperature. Teorijski termodinamički ciklus jednostavnog diskontinualnog solarog adsorpcionog rashladnog sistema predstavljen je pomoću Klauzijus-Klapejronovog ( $\ln p$  –  $-1/T$ ) dijagrama, (Slika 4).

Ovaj dijagram omogućava praćenje celokupnog procesa preko dva ciklusa (“levog”, koji se odnosi na adsorbat – u smeru suprotnom od kretanja kazaljke na časovniku – i “desnog”, koji se odnosi na adsorbent, u suprotnom smeru).

Konstrukcija izostera (linija konstantne koncentracije) u  $\ln p$  –  $-1/T$  dijagramu sledi iz modifikovane Klauzijus-Klapejronove jednačine (1) [6]

$$\frac{\Delta H}{R_g T^2} = - \left( \frac{\partial \ln p}{\partial T} \right)_C \quad (1)$$

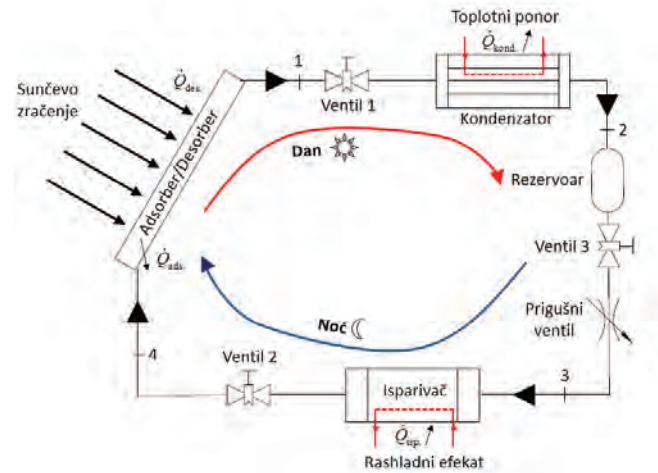
Ova jednačina se takođe koristi prilikom određivanja toplote adsorpcije ( $\Delta H$ ) pri izosterskom procesu.

### 5 Diskontinualno adsorpciono solarno hlađenje

Najjednostavniji diskontinualni sistem adsorpcionog hlađenja predstavlja sistem sa prekidima, jer se efekat hlađenja ostvaruje samo noću. Ovo je zbog toga što postoji samo jedan sorpcioni element koji sa solarnim termičkim kolektorom čini jedinstven sistem. Najčešće ovakvi sistemi koriste par aktivni uglj-metanol, što će biti usvojeno

pri razmatranju u daljem tekstu. Sorpcioni element, u okviru kolektora danju prikuplja sunčevu energiju i deluje kao desorber, da bi se noću (kao adsorber) hladio i adsorbovao metanol.

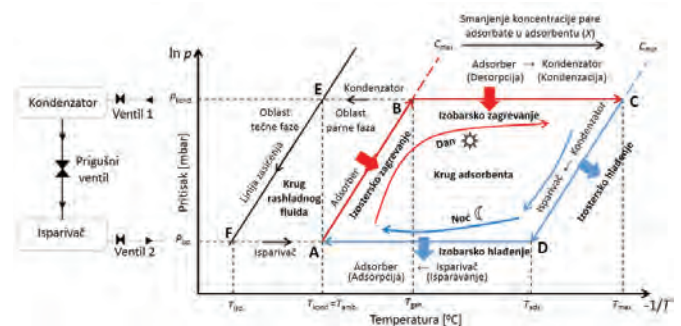
Glavne komponente ovakvog adsorpcionog sistema hlađenja su: solarni termički kolektor, sorpcioni element, kondenzator, rezervoar za skladištenje rashladnog fluida, ventili i isparivač (Slika 3) [7].



Slika 3: Šematski prikaz sistema adsorpcionog solarog hlađenja

Šematski dijagram procesa adsorpcionog hlađenja je prikazan Klapejronovim dijagramom na slici 4.

Za početak adsorpcionog ciklusa usvojiće se stanje A, koje odgovara ranim jutarnjim satima. U ovom stanju aktivni uglj sadrži maksimalnu količinu adsorbovanog metanola. Pritisak unutar kolektora je u tom trenutku jednak pritisku u isparivaču p<sub>isp</sub>, a temperatura sloja je jednaka temperaturi okoline (T<sub>amb</sub>). Pomoću ventila 1 i 2, kolektor je potpuno izolovan od kondenzatora i isparivača. Proces A–B predstavlja izohorsko zagrevanje kolektora sunčevom energijom, pri čemu se pritisak postepeno povećava od pritiska isparavanja do pritiska kondenzacije. Ova faza zagrevanja se odvija pri konstantnoj koncentraciji metanola u aktivnom uglju (izosterski proces) sve do stanja B, tj. do postizanja pritiska u kondenzatoru p<sub>kond</sub>.



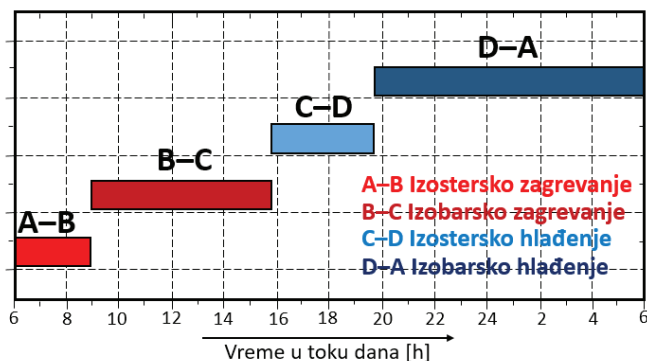
Slika 4: Klauzijus-Klapejronov dijagram osnovnog adsorpcionog termodinamičkog ciklusa

U stanju B se ventil 1 otvara, dok ventil 2 ostaje zatvoren. Metanol, koji u suštini predstavlja rashladni fluid počinje da se desorbuje pri konstantnom pritisku. U stanju B se čitav proces grana na dva

ciklusa, pri čemu se levi ciklus odnosi samo na metanol. Tokom izobarskog procesa B–C, nastavlja se zagrevanje kolektora, pri čemu se koncentracija metanola u aktivnom uglju smanjuje. Istovremeno, takođe pri izobarskom procesu ( $p_{\text{kond.}} = \text{const}$ ) B–E, desorbovani metanol postepeno ulazi u kondenzator gde se pomoću rashladne vode potpuno kondenzuje, a zatim skladišti u rezervoar za skladištenje metanola (stanje E). Temperatura kolektora je dostigla maksimalnu vrednost temperature  $T_{\text{max}}$ , pri čemu je koncentracija metanola u aktivnom uglju minimalna (stanje C). U tom trenutku se ventil 1 (između kolektora i kondenzatora) zatvara, čime se omogućava da se kolektor hladi.

Ovim je završena faza zagrevanja kolektora i nastupa noćni režim (faza hlađenja). U procesu C–D, temperatura kolektora se snižava, usled prekida dovođenja toplote (izohorski proces hlađenja pri minimaloj konstantnoj koncentraciji metanola). Proces se dešava sve dok se pritisak u kolektoru ne smanji na pritisak u isparivaču nisp., odnosno do stanja kada je distignuta početna temperatura adsorpcije  $T_{\text{ads}}$  (stanje D). Istovremeno je hlađenje metanola u rezervoaru (levi ciklus) prikazan procesom E–F. Proces D–A predstavlja poslednju fazu desnog ciklusa (proces adsorpcije), koji započinje u ranim večernjim satima. Tokom ovog procesa se nastavlja hlađenja kolektora. Sa stanovišta rashladnog fluida (levi ciklus), proces F–A, s obzirom na to da je ventil 3 sada otvoren, metanol iz rezervoara za skladištenje, kroz prigušni ventil, ulazi u isparivač. Time se postiže osnovna namena čitavog postojenja koja se ogleda u ostvarivanju efekta hlađenja tj. snižavanja temperature vode i proizvodnje leda! Ventil 2 koji povezuje isparivač i kolektor se otvara, što omogućava da ispareni metanol ulazi u kolektor i da se postepeno tokom noći i sve do jutra adsorbuje unutar aktivnog uglja. Proces hlađenja (D–A) se obavlja od temperature  $T_{\text{ads}}$  do  $T_{\text{amb}}$ , pri izobarskom procesu nisp, i biće zaustavljen kada je aktivni ugalj potpuno zasićen parom metanola, do stanja A. Može da se primeti da se efekat hlađenja u ovom diskontinualnom procesu odvija samo noću [8], [5].

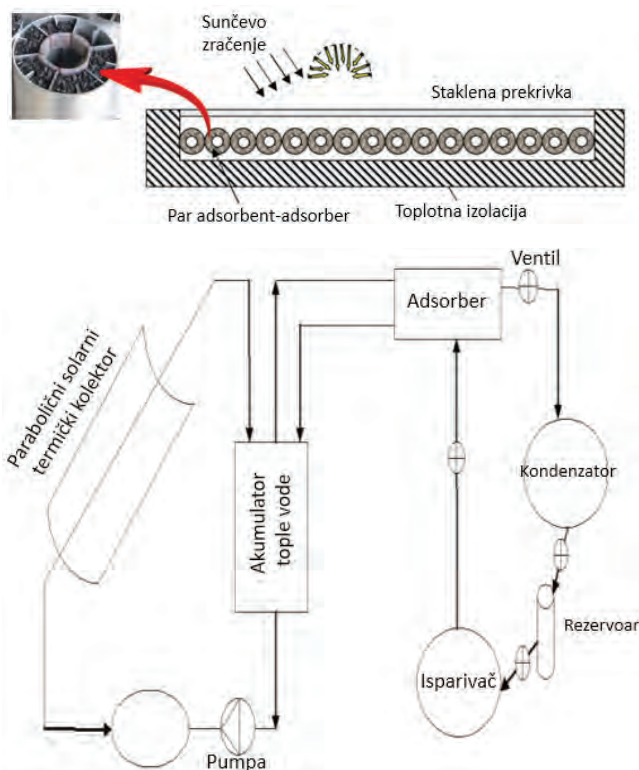
Na slici 5 su prikazani očekivani vremenski intervali svake faze sa vremenom početka i završetka sveke od njih [9]. Ovi vremenski intervali zavise u opštem slučaju od dovedene količine toplote radnom paru adsorbent-adsorbat u kolektoru.



Slika 5: Vremenski interval faza tokom adsorpcionog procesa hlađenja

Tipične vrednosti COP kod sistema adsorpcionog hlađenja sa jednim adsorberom/desorberom se kreće u opsegu od 0,1÷0,12 [10]. Kao primer, na eksperimentalnoj instalaciji iz rada [4], dobijena je maksi-

malna vrednost COP od 0,122 pri proizvodnji leda od 6,5 kg za 24 h. Korišćena vrsta solarnih kolektora predstavlja važan aspekt prilikom projektovanja adsorpcionih sistema, jer proces adsorpcionog hlađenja zavisi od nivoa temperature koji može da se postigne (Slika 6).



Slika 6: Šematski prikaz polukontinualnog ciklusa sa: a. pločastim termičkim kolektorom u kome je integrisana sorpciona komora [11]; b. paraboličnim kolektorom [12]

## 6 Kontinualni ciklus adsorpcionog sistema hlađenja

Napred prikazan sistem diskontinualnog adsorpcionog solarnog hlađenja, omogućava razumevanje principa rada uređaja za stvaranje rashladnog efekta pri čemu se koristi princip adsorpcije. Da bi se ostvario efekat kontinualnog hlađenja solarnom energijom, potrebno je da postoje najmanje dve sorpcione komore 1 i 2, koje u naizmeničnom radu osiguravaju da se procesi desorpcije i adsorpcije odigravaju istovremeno. Najčešći primenjeni par kod ovakvih sistema jeste radni par silikagel-voda. Svaka sorpciona komora prolazi kroz četiri režima rada, kao i kod diskontinualnih sistema, koji se ciklično ponavljaju, a prema redosledu koji su prikazani u tabeli 1. Položaj ventila V1–V4 (otvoreno-zatvoreno) definiše režim rada u svakoj komori.

Ovaj sistem zahteva programiranje rada otvaranja i zatvaranja ventila. Izvor toplote je sunčeva energija, a toplotni ponor rashladna kula, da bi se obezbedio stalni dotok vode za hlađenje.

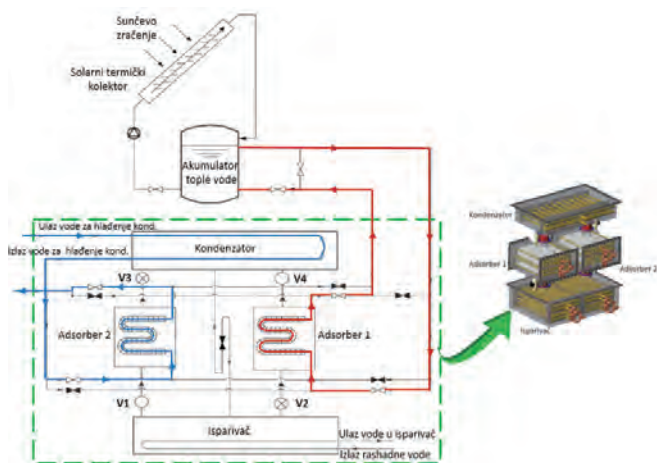
Na slici 7 je prikazana šema kontinualnog adsorpcionog solarnog hlađenja [13]. U fazi 1–2, ventili su potpuno zatvoreni. Zagrevanje

desorbera u komori 1 se vrši toplom vodom koja je dobijena indirektno sunčevom energijom iz solarnog termičkog kolektora. Pomoću akumulatora toplote se obezbeđuje kontinualnost procesa zagrevanja. Istovremeno se voda za hlađenje kondenzatora koristi za hlađenje adsorbera 2. Da bi se obezbedio stalni dotok rashladne vode, koristi se rashladna kula. Desorber 1 se zagreva kako bi se vodena para desorbovala iz silikagela. Tokom faze 2–4, desorbovana vodena para kao rashladni fluid teče u kondenzator kroz ventil V4, gde se kondenzuje, i preko prigušnog ventila ulazi u isparivač. Pošto se adsorber 2 ohladio vodom, povezuje se sa isparivačem pomoću ventila V1, kako bi se rashladni fluid iz isparivača (nakon ostvarivanja efekta hlađenja) u njemu adsorbovao.

**Tabela 1.** Prikaz režima rada kontinualnog adsorpcionog sistema hlađenja sa položajima ventila

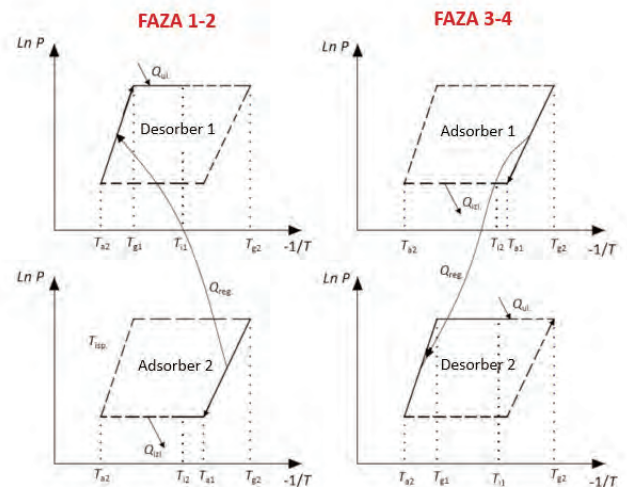
Režim rada	Sorpciona komora 1	Sorpciona komora 2	Položaj ventila			
	Kao desorber	Kao adsorber	V1	V2	V3	V4
Faza 1–2	Zagrevanje	Hlađenje	x	x	x	x
Faza 2–3	Zagrevanje/ Desorpcija	Hlađenje/ Adsorpcija	o	x	x	o
Prebacivanje režima rada sorpcione komore 1 i 2 sledećeg dana						
Režim rada	Kao adsorber	Kao desorber	V1	V2	V3	V4
Faza 3–4	Hlađenje	Zagrevanje	x	x	x	x
Faza 4–1	Hlađenje/ Adsorpcija	Zagrevanje/ Desorpcija	x	o	o	x

Sledećeg dana, sa pojavom sunčevog zračenja, dolazi do prebacivanja režima rada i ponavlja se isti postupak, pri čemu su svi ventili potpuno zatvoreni. Tokom prebacivanja režima rada, sva četiri ventila su potpuno zatvorena. Desorber 2 se sada zagreva, adsorber 1 hladi, a nakon toga se ventili V2 i V3 otvaraju, kako bi se ostvarili procesi adsorpcije i desorpcije. Na ovaj način se u isparivaču obezbeđuje kontinualni proces hlađenja, usled činjenice da je isparivač uvek povezan sa jednim od ove dve sorpcione komore. Jednostavnim rečima, za trajanje ukupnog ciklusa hlađenja potrebna su dva dana – jedna sorpciona komora desorbuje rashladni fluid prvog dana, a adsorbuje drugog dana [14].



**Slika 7:** Šematski prikaz kontinualnog adsorpcionog sistema hlađenja pogonjen sunčevom energijom

Postoje brojni načini za poboljšanje efikasnosti rada prikazanog kontinualnog rashladnog sistema. U kontinualnom ciklusu sa regeneracijom toplote unutar sistema, eksperimentima je pokazano da se COP sistema može povećati do 25%, u odnosu na osnovni ciklus [15]. U ciklusu sa regeneracijom, toplota adsorpcije kao i deo osetne toplote se prenosi sa adsorbera koji se hladi na desorber koji se zagreva, odnosno toplota oslobođena iz adsorbera 2 se koristi za zagrevanje desorbera 1, u fazi 1-2 (Slika 8). Ovo se dešava kada su procesi desorpcije i adsorpcije blizu završetka, odnosno kada je poluciklus završen. Regeneracija toplote je efikasna ako je temperatura fluida na izlazu iz desorbera dovoljno visoka [16].



**Slika 8:** Prikaz ciklusa adsorpcionog sistema hlađenja sa dve sorpcione komore i regeneracijom toplote

Još jedan od načina za povećanje vrednosti COP ovakvih sistema se može postići postupkom regeneracije mase. Na taj način se COP može povećati za više od 10%, u poređenju sa ciklusom regeneracije toplote [17], [18]. Ovaj proces započinje pre procesa regeneracije toplote, dok se jedna sorpciona komora nalazi na kraju režima desorpcije (na višem pritisku i temperaturi), a druga na kraju režima adsorpcije (na nižem pritisku i temperaturi). Vrš se međusobno povezivanje desorbera višeg pritiska sa adsorberom nižeg pritiska (pomoću ventila), pa desorber nastavlja da desorbuje, a adsorber da adsorbuje rashladni fluid. Proces se završava kada se ova dva pritiska izjednače. U većini slučajeva regeneracija mase i regeneracija toplote istovremeno se koriste u kombinovanom ciklusu.

Pored ovih tehnologija, za poboljšanje efikasnosti sistema se mogu koristiti i višestepeni i kaskadni sistemi.

## 7 Komercijalne adsorpcione rashladne mašine pogonjene solarnom energijom

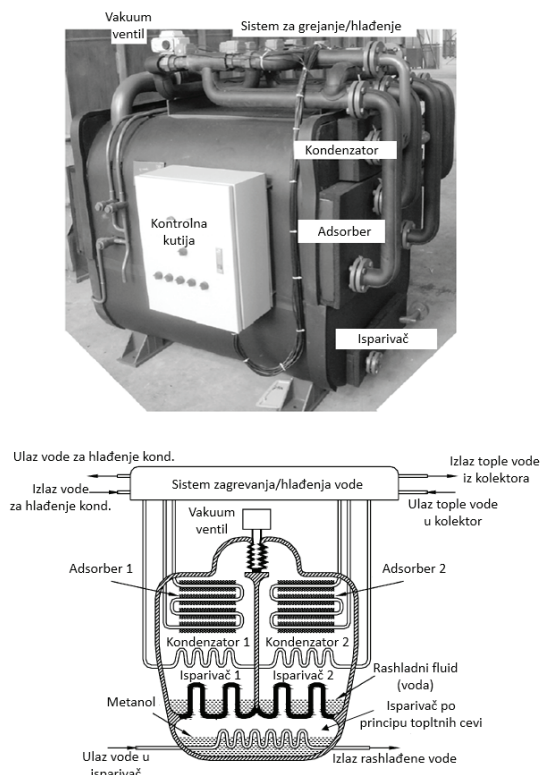
Proizvodnja prvih adsorpcionih sistema hlađenja je počela 1960. godine. Nakon toga, 1980. godine se na tržištu pojavio prvi komercijalno dostupan solarni adsorpcioni sistem hlađenja za proizvodnju leda, proizveden od francuske kompanije BLM (Slika 9) [6].

Najranije komercijalno usvojeni solarni adsorpcioni rashladni sistemi pogodni za korišćenje u klimatizacionim sistemima su bili na

bazi silikagela i vode. Slika 10 prikazuje savremeni adsorpcioni čiler i njegovu strukturu [19], [20]. Ovaj adsorpcioni čiler može raditi u temperaturskom opsegu između 55°C i 95°C, koristeći ekološki prihvatljiv radni par silikagel/vodu, sa dve sorpcione komore, dva kondenzatora i dva isparivača. Kada je temperatura tople vode iz kolektora 65°C, temperatura rashladene vode na izlazu iz isparivača 17,6 °C i temperatura vode za hlađenje kondenzatora 30,5°C – pokazano je da se postiže nominalni rashladni kapacitet od 6 kW, uz odgovarajuću vrednost COP od 0,37 [20].



Slika 9: Solarni adsorpcioni uređaj za proizvodnju leda



Slika 10: Adsorpcioni rashladni uređaj sa tri vakuumske komore i parom silikagel-voda a. fotografija [20] ; b. šematski prikaz [19]

Na slici 10.b) se vidi da se ovaj sistem sastoji iz tri vakuimirana dela, i to: u prvoj i drugoj se nalazi po jedan sorpcioni element, kondenzator i isparivač, a u trećoj je smešten isparivač koji radi po principu gravitacione toplotne cevi. Ovaj rashladni sistem je razvijen da bi se pojednostavila konstrukcija i smanjio broj vakuumskih ventila koji su se ranije koristili. U prva dva vakuimirana dela koristi se voda kao rashladno sredstvo, dok se u trećem delu metanol koristi kao rashlad-

ni fluid. Isparivač u donjem delu radi po principu toplotne cevi, gde se unutar toplotne cevi na hladnom (gornjem) kraju vrši kondenzacija metanola, čime se obezbeđuje kontinualni efekat hlađenja. Na donjem delu ovog isparivača (topliji kraj) se vrši isparavanje metanola. Prebacivanje režima rada desorpcija/adsorpcija se vrši promenom smera protoka kolektorske tople vode i vode za hlađenje kondenzatora, kroz sistem za hlađenje-zagrevanje vode. Ovaj sistem takođe ima ulogu u ostvarivanju procesa regeneracije toplote. Između dva sorpciona dela se nalazi vakuurni ventil koji pomaže u ostvarivanju procesa regeneracije mase, kako bi se poboljšale performanse sistema. Čitavim procesom, u potpunosti upravljaju električni ventili koji se nalaze u sistemu za grejanje/hlađenje vode, istim principom koji je napred opisan kod kontinualnog sistema. Svim ventilima upravlja programirani logički kontroler (PLC) u kontrolnoj kutiji.

## 8 Zaključak

Namera ovog preglednog rada jeste da se na razumljiv način prikažu osnovni principi funkcionisanja i karakteristike solarnog adsorpcionog hlađenja. Primetno je da se problematika adsorpcionog solarnog hlađenja uglavnom razmatra u naučnim časopisima, i da (za razliku od apsorpcionog solarnog hlađenja) nije prisutna u udžbeničkoj literaturi.

Ovaj način hlađenja, istorijski posmatrano jeste najmlađi ali neke njegove karakteristike, prema literaturnim podacima ukazuju na znatnu perspektivnu budućnost. Zbog toga se navode glavne prednosti i nedostaci ovakvih sistema.

Glavne prednosti ovih sistema su: upotreba energije iz obnovljivih izvora i mogućnost korišćenja ekološki prihvatljivih radnih parova adsorbent/adsorbat. Pored toga što mogu raditi u širokom opsegu temperatura izvora toplote, predstavljaju sisteme bez pokretnih delova, bez opasnosti od pojave kristalizacije i korozije, sa niskim troškovima održavanja. Troškovi serijske proizvodnje su znatno manji zbog male količine pojedinačnih delova u sistemu, a električna energija usled nedostatka pumpe je potrebna samo za pogon preklopnih ventila i upravljačku jedinicu

Glavni nedostaci su: niži COP u poređenju sa sistemima apsorpcionog solarnog hlađenja. Komercijalno dostupne mašine na tržištu su skupe – usled malog broja proizvođača ovih uređaja, potrebni su visoki zahtevi da bi se vakuimirane sorpcione komore učinile nepropusnim; hidraulički krugovi izvan sistema (krug vode za hlađenje, tople vode iz kolektora i rashladene vode) se moraju pažljivo projektovati usled cikličnih varijacija temperature koje se dešavaju u kontinualnim adsorpcionim sistemima hlađenja.

U principu ovakvi uređaji su skuplji od kompresorskih (koji sve manje zadovoljavaju u ekološkom smislu). U početku su adsorpcioni sistemi bili glomazni i teški, ali se u novijim konstrukcijama primjećuje smanjenje gabarita i težine. Dodatno, s obzirom na ekološke trendove i povećanje broja potencijalnih korisnika, ovi sistemi bi mogli biti konkurentniji, ako bi usmerenje bilo ka serijskoj proizvodnji, čime bi ovakvi uređaji postali jeftiniji i pristupačniji.

## References

[1] J. White, *Literature review on adsorption cooling systems*, Latin American and Caribbean Journal of Engineering Education,

- 1(2013), pp.1-27 .
- [2] **I. Daßler and W. Mittelbach**, *Solar cooling with adsorption chillers*, Energy Procedia, vol. 30 (2012), pp. 921–929.
- [3] **J. White**, *CFD Simulation of Silica Gel and Water Adsorbent Beds Used in Adsorption Cooling System*, Ph. D. thesis, University of Birmingham, 2012.
- [4] **N. A. A. Qasem**, *Thermodynamic analysis and modeling study of an intermittent solar adsorption refrigeration system*, Ph. D. thesis, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 2013.
- [5] **N. Fadel Farman Alhialy, D. Fadel Farman, A. Nabil Hasan Hadi, A. Basma AAbdulmajid**, *Performance of the Solar Adsorption Refrigeration System under Various Conditions and Parameters for Iraq Climate*, Chemical, Environmental and Petroleum Engineering, 1(2017), pp. 428-488.
- [6] **P. Goyal, P. Baredar, A. Mittal, A. R. Siddiqui**, *Adsorption refrigeration technology – An overview of theory and its solar energy applications*, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 53 (2016), pp. 1389–1410.
- [7] **D. S. Ting, J. Aman, P. Henshaw**, *Solar sorption cooling for residential air-conditioning applications Solar sorption cooling for residential air-conditioning applications*, Int. J. Renewable Energy Technology, vol 9 (2018), 1/2, pp. 136-157.
- [8] **A. Allouhi, T. Kousksou, A. Jamil, T. El Rha, Y. Mourad, Y. Zeraouli**, *Optimal working pairs for solar adsorption cooling applications*, Energy, vol. 79 (2015), pp. 235–247.
- [9] **M. A. H. Ammar, B. Benhaoua, F. Bouras**, *Thermodynamic analysis and performance of an adsorption refrigeration system driven by solar collector*, Appl. Therm. Eng., vol. 112 (2017),5, pp. 1289-1296.
- [10] **A. Sur and R. K. Das**, *Review on Solar Adsorption Refrigeration Cycle*, Int. J. Mech. Eng. Technol., vol. 6340 (2010), pp. 190–226.
- [11] **H. Z. Hassan, A. Mohamad, R. Bennacer**, *Simulation of an adsorption solar cooling system*, Energy, vol. 36 (2011),1, pp. 530–537.
- [12] **S. Singh, S. Dhingra**, *Thermal performance of a vapour adsorption refrigeration system : an overview*, 240th ECS Meeting, Orlando, FL, 2021.
- [13] **A. Behbahani-nia**, *Study of the performance of a solar adsorption cooling system*, Energy Equipment and Systems, vol. 1 (2013), pp. 75–90.
- [14] **B. Elsheniti**, *Sustainable Air Conditioning Systems*, Adsorption Refrigeration Technologies, Edition 1 Chapter 4, IntechOpen, 2018.
- [15] **D. E. Demirocak**, *Thermodynamic and economic analysis of a solar thermal powered adsorption cooling system*, M. Sc. thesis, The Graduate School of Natural and Applied Science of Middle East Technical University, 2008.
- [16] **R. Z. Wang, Q. W. Pan, Z. Y. Xu**, *Solar-powered adsorption cooling systems*, 2016.
- [17] **R. Z. Wang**, *Adsorption refrigeration research in Shanghai*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 5 (2001), pp. 1–37.
- [18] **D. C. Wang, Y. H. Li, D. Li, Y. Z. Xia, and J. P. Zhang**, *A review on adsorption refrigeration technology and adsorption dete-*

*rioration in physical adsorption systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14 (2010), pp. 344–353.

[19] **D. C. Wang, Z. Z. Xia, J. Y. Wu, R. Z. Wang, H. Zhai, W. D. Dou**, *Study of a novel silica gel – water adsorption chiller . Part I . Design and performance prediction*, International Journal of Refrigeration, vol. 28 (2005), pp. 1073–1083.

[20] **D. C. Wang, J. Y. Wu, Z. Z. Xia, H. Zhai, R. Z. Wang, W. D. Dou**, *Study of a novel silica gel – water adsorption chiller. Part II. Experimental study*, International Journal of Refrigeration, vol. 28 (2005), pp. 1084–1091.

## Authors

**Branislav PETROVIĆ**  
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu  
Kraljice Marije 16, Beograd  
bpetrovic@mas.bg.ac.rs

**Milan GOJAK**  
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu  
Kraljice Marije 16, Beograd

**Đorđe KOZIĆ**  
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu  
Kraljice Marije 16, Beograd

