

Bibliid: 0350-2953 (2011)37, 4: 427-437
UDK: 621.63:657.3:532.57

Originalni naučni rad
Original scientific paper

**HLADENJE VODOM („HYDROCOOLING“) U KOMBINACIJI SA
APSORPCIONOM RASHLADNOM MAŠINOM ZA PRETHLAĐIVANJE VOĆA I
POVRĆA
WATER COOLING ("HYDROCOOLING") IN COMBINATION WITH
ABSORPTION COOLING MACHINE FOR PRECOOLING OF FRUITS AND
VEGETABLES**

Franc Kosi, Branislav Živković, Milena Stojković¹
¹Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16
fkosi@mas.bg.ac.rs

SAŽETAK

U radu je data termodinamička analiza ciklusa apsorpcionog rashladnog uređaja sa smesom litijumbromid-voda kao radnim fluidom namenjenom za prethlađivanje svežeg voća hladnom raspršenom vodom. Dati su osnovni tehnološki podaci vezani za proces rashlađivanja hladnom vodom, kao i šema i opis sistema sa procedurom proračuna apsorpcionog rashladnog uređaja sa priloženom tabelom sa izračunatim veličinama stanja. Date su karakteristike uporednog levokretnog ciklusa sa kompenzacionim procesom zasnovanim na dovođenju rada. Zaključeno je da apsorpcioni uređaj, pod određenim uslovima, može da bude uporediv sa kompresorskom ako se preduzmu sve mere za poboljšanje levokretnog ciklusa apsorpcione mašine.

Ključne reči: hlađenje voća hladnom raspršenom vodom, apsorpcioni rashladni uređaj, termodinamička analiza, kompresorski rashladni uređaj

1. UVOD

Energetska kriza i problem globalnog zagrevanja obnovili su poslednjih decenija interes za rashladnim mašinama pogonjenim toplotom (sorpcionim i ejektorskim). Tome su znatno doprineli unapređeni postupci eksploatacije izvora prirodnog gasa, širenje primene obnovljivih izvora energije, kao i ubrzani razvoj novih tehnologija energetskih pretvaranja, uključujući i energetske efikasne komponente sistema za kombinovanu „proizvodnju“ mehaničkog rada, toplote i „hladnoće“.

Apsorpcioni rashladni uređaji (ARU) zadobijaju posebnu pažnju, pošto mogu biti ekonomski atraktivni za redukciju troškova energije i poboljšanje efikasnosti energetskih pretvaranja. Njihovi rashladni učinci mogu da budu od najmanjih (npr. za kućne hladnjake), pa do velikih rashladnih postrojenja industrijskog tipa; osim toga za pogon ARU mogu da se koriste niskopotencijalni i obnovljivi toplotni izvori („otpadna“ toplota gasnih ili parnih turbina, sunčeva, geotermalna i energija biomase), koji osim sniženih pogonskih troškova, ostvaruju značajan doprinos smanjenju globalnog zagrevanja.

Radne materije apsorpcionih mašina su najčešće *binarne mešavine*. U industriji se uglavnom koriste apsorpcione mašine sa binarnom smesom voda-amonijak (voda kao apsorber), a u klimatizaciji litijumbromid-voda apsorpcione mašine (voda kao rashladni

fluid). Primena smese litijumbromid-voda ograničena je na temperature isparavanja iznad 0°C. I pored tehničkih problema vezanih za održavanje dubokog vakuuma u instalaciji, posebno u isparivaču i apsorberu, njihov razvoj teče ubrzanom tempom i danas se na tržištu mogu naći u velikom asortimanu rashladnih učinaka, prilagođenih posebno za hladnjake vode ("čilere") u mnogobrojnim primenama u procesnim industrijama.

U ovom radu razmatra se primena ARU za pripremu vode za rashlađivanje svežeg voća tehnikom „hydrocooling“, široko rasprostranjenom za prethlađivanje voća pre pakovanja i unošenja u skladišne rashladne komore.

Prethlađivanje voća i povrća vodom („Hydrocooling“)

Pri rashlađivanju (prethlađivanju) voća i povrća vodom („hydrocooling“) proizvodi se prskaju hladnom vodom, ili se potapaju u kadu sa hladnom vodom koja struji. Proces prethlađivanja vodom je efikasan i ekonomičan; međutim, može da ima fiziološki i patološki uticaj na određene proizvode, pa je njegova upotreba ograničena. Pored toga, potrebno je preduzeti odgovarajuće higijensko-sanitarne mere kako voda za hlađenje ne bi dovela do bakterijske kontaminacije proizvoda. Biljni proizvodi koji se često hlade vodom su: boranija, šargarepa, kukuruz šećerac, grašak, višnje, trešnje i breskve. Hlađenje vodom nije pogodno za citrusno voće zbog njihove duge sezone na tržištu, dobrog održavanja posle berbe, kao i osetljivosti na oštećenja kore, propadanja i gubitka kvaliteta posle hlađenja vodom (ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2006).

Prethlađivanje vodom je brz proces, jer hladna voda koja struji oko proizvoda prouzrokuje da temperatura površine proizvoda bude vrlo bliska temperaturi vode, s obzirom da je otpor prenosu toplote sa površine proizvoda zanemarljiv. Brzina unutrašnjeg hlađenja proizvoda je ograničena brzinom provođenja toplote iz unutrašnjosti ka površini i zavisi od mase proizvoda u odnosu na površinu, kao i od termičkih svojstava.

Hlađenje vodom takođe ima prednost što ne uzrokuje gubitke vlažnosti proizvoda. Zapravo, može se dogoditi da vrati vlagu proizvodu koji je malo kalirao (rehidratacija). Sa stanovišta potrošača kvalitet proizvoda koji su hlađeni vodom je veoma dobar, a sa stanovišta proizvođača masa proizvoda se ne smanjuje. Nasuprot tome, druge metode za rashlađivanje, kao što su vakuumsko hlađenje ili hlađenje vazduhom, mogu da dovedu do značajnih gubitaka vlažnosti proizvoda i kaliranja, čime se smanjuju kvalitet proizvoda i njegova masa (Markoski, 2006).

Prozvodi se mogu hladiti vodom slobodni ili upakovani (pri čemu se mora obezbediti adekvatan protok vode unutar pakovanja). Pakovanja od plastike ili drveta su pogodna za upotrebu prilikom hlađenja vodom.

Načini hlađenja vodom

Uređaji za hlađenje vodom se generalno mogu podeliti prema principu rada na uređaje sa rasprskavanjem vode i uređaje sa potapanjem.

Kod uređaja sa hlađenjem rasprskavanjem vode proizvodi prolaze ispod „kiše“ hladne vode, koja se obično postiže prolaskom hladne vode kroz perforiranu posudu. Uređaji za hlađenje rasprskavanjem vode mogu imati pokretne trake (transportere) za kontinuirani protok proizvoda, ili mogu da se koriste u šaržnom režimu. Protok vode obično se kreće od

25 do 50 m³/h po kvadratnom metru hlađene površine (ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2006).

Uređaji za hlađenje vodom koji rade po principu potapanja sastoje se iz velikih plitkih posuda u kojima se hladna voda intenzivno meša. Upakovani proizvodi postavljaju se na pokretnu traku na jednom kraju posude, idu potopljeni duž posude, a sa nje se skidaju na suprotnom kraju. Za hlađenje potapanjem preporučuje se brzina od 4,5 do 6 m/min (ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2006).

Kako bi se proizvela hladna voda, u manjim sistemima može se koristiti drobljeni led, tako što se veliki blokovi leda, dopremljeni iz postrojenja za pravljenje leda, drobe i led se dodaje u rezervoar uređaja za hlađenje vodom. Početna cena ovakvog uređaja koji koristi led za hlađenje je mnogo manja nego onog kod kog se koristi uređaj za hlađenje sa utroškom rada. Ovakav uređaj je ekonomski isplativ jedino ako je pouzdan izvor leda dostupan po prihvatljivoj ceni.

Postoje sistemi za hlađenje vodom u kojima se mešavina rashlađene vode i hladnog vazduha vodi preko proizvoda. Ovakvom sistemu potrebno je manje vode za hlađenje u odnosu na konvencionalno hlađenje vodom, a takođe smanjuju se i troškovi održavanja da bi se voda za hlađenje održala bakteriološki ispravnom. Kod ovakvih sistema su moguće brzine hlađenja jednake onim u konvencionalnim uređajima za hlađenje vodom, a u nekim slučajevima čak i veće.

Neki sistemi za hlađenje potapanjem, koji koriste vodeni rastvor za hlađenje, imaju sledeće prednosti: kraće vreme trajanja procesa, ušteda energije, kao i bolji kvalitet namirnica u poređenju sa prethlađivanjem u struji hladnog vazduha. Glavni nedostatak je apsorpcija rastvora za hlađenje u vodenom rastvoru u hrani. Hlađenje potapanjem u vodeni rastvor za hlađenje može se primeniti na širok spektar hrane, uključujući i svinjsko meso, ribu, živinsko meso, papriku, pasulj, paradajz, grašak, kao i jagodičasto voće.

Kao alternativa proizvodnji hladne vode mehaničkim hlađenjem ili ledom, može se koristiti i bunarska voda, pod uslovom da je temperatura vode najmanje 5 K niža od temperature proizvoda koji se hladi. Međutim, bunarska voda ne sme da sadrži hemikalije i biološke zagađivače koji bi mogli učiniti proizvod nepodobnim za ljudsku ishranu (ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2006).

Efikasnost hlađenja vodom

Efikasnost hlađenja vodom se smanjuje dobicima toplote iz okolnog vazduha. Drugi toplotni izvori koji smanjuju efikasnost obuhvataju: Sunčevo zračenje, zračenje toplih površina, kao i prenos toplote iz okoline. Zaštitom od ovih izvora toplote povećava se efikasnost. Energija za hlađenje takođe može biti smanjena ako sistem za hlađenje radi manjim kapacitetom od nominalnog, radi povremeno, ili ako se koristi više vode nego što je neophodno (ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2006).

Dobar pregled mogućih alternativa za smanjenje potrošnje energije predstavlja korišćenje obnovljivih izvora energije iz poljoprivredne proizvodnje za hlađenje niskotemperaturnom toplotom (Brkić i Janić, 2005), (Brkić i dr, 2006), (Tešić i dr, 2006).

Da bi se povećala efikasnost hlađenja vodom, prilikom projektovanja i rada ovih sistema treba uzeti u obzir sledeće: termički izolovati sve hlađene površine, a sistem za hlađenje

zaštititi od vetra i direktnog Sunčevog zračenja, koristiti plastične trakaste zavese na ulazu i izlazu iz transportnih traka kako bi se smanjio dobitak toplote infiltracijom, razmisliti o korišćenju akumulatora toplote u kome se skladište hladna voda ili led tokom perioda male potražnje energije, preporučuje se korišćenje odgovarajućeg rezervoara za vodu (zato što se energija gubi kada se voda za hlađenje ispušta iz sistema posle završetka rada, ova otpadna energija se može svesti na minimum ukoliko se ne koristi predimenzionisan rezervoar za vodu, s druge strane, možda će biti teško da se održi odgovarajuća temperatura i protok vode za hlađenje u slučaju rezervoara za vodu manjih dimenzija).

Obrada vode za hlađenje

Vlažna površina proizvoda predstavlja odličnu podlogu za razvoj mikroorganizama. Osim toga, zbog intenzivne cirkulacije vode, mikroorganizmi koji izazivaju truljenje proizvoda mogu se akumulirati u vodi za hlađenje i mogu se lako preneti na druge proizvode koji se hlade vodom. Da bi smanjila mogućnost kontaminacije, voda za hlađenje se mora tretirati blagim dezinfekcionim sredstvima.

Najčešće se voda za hlađenje tretira hlorom kako bi se smanjio nivo mikroorganizama koji izazivaju truljenje. Hlor (gasoviti, ili u obliku hipohlorne kiseline iz natrijum-hipohlorita) dodaje se vodi za hlađenje, obično od 50 do 100 ppm (ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2006). Međutim, hlorisanjem se obezbeđuje samo površinska zaštita proizvoda, tj. ono nije efikasno u neutralisanju procesa ispod površine proizvoda.

Sadržaj hlora u vodi za hlađenje mora se redovno proveravati kako bi se osiguralo održavanje odgovarajuće koncentracije. Hlor je lako isparljiv i isparava u vazduh brzinom koja se povećava sa povišenjem temperature. Štaviše, ako se koristi led za hlađenje, njegovim topljenjem u vodi za hlađenje slabi koncentracija hlora u rastvoru.

Efikasnost hlora u vodi za hlađenje u velikoj meri zavisi od pH vrednosti vode za hlađenje. Za maksimalnu efikasnost pH vrednost bi trebalo da se održava na 7,0.

Da bi se smanjila količina nečistoća u vodi za hlađenje, neophodno je pranje proizvoda pre hlađenja vodom. Ipak, vodu za hlađenje treba menjati svakodnevno, ili češće ukoliko je potrebno. Posebno treba voditi računa kada se vrši ispuštanje vode za hlađenje, jer često sadrži visoke koncentracije nečistoća, pesticida i drugih suspendovanih materija. Pored dnevne zamene vode za hlađenje, posude za rasprskavanje vode bi trebalo da budu čišćene svakodnevno, ili češće ukoliko je potrebno.

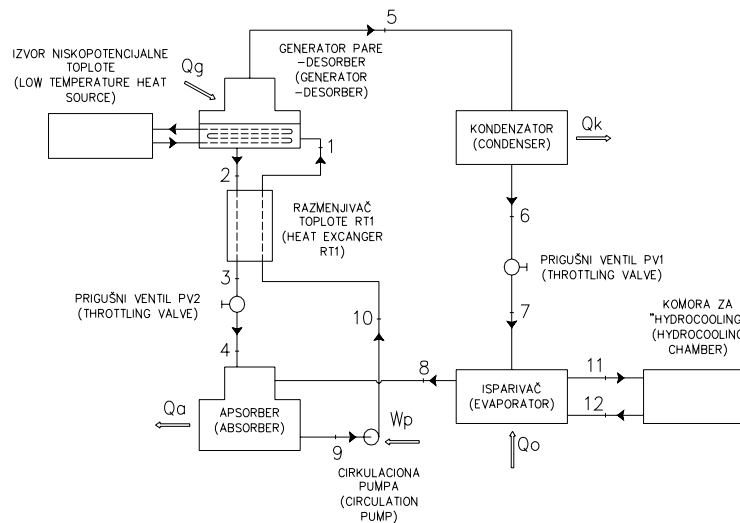
2. MATERIJAL I METOD

Na slici 1 prikazan je sistem za prethlađivanje vodom, koji se sastoji od tri podsistema: izvora niskopotencijalne (niskotemperaturske) toplote, apsorpcionog rashladnog uređaja (koji će ovde biti predmet posebne pažnje) i komore (tunela) za rashlađivanje voća tehnikom „hydrocooling“. U isparivaču rashladne instalacije hladi se voda, koja u funkciji sekundarnog rashladnog fluida odvodi toplotno opterećenje komore (Niebergall, 1959), (Ryan, 2002), (Kosi i dr, 2011).

Iz generatora pare (desorbera) (slika 1) izlazi praktično čista vodena para (rashladni fluid) stanja 5 i vodi se u kondenzator gde se kondenzuje do stanja 6 (vazduhom ili rashladnom vodom koja se priprema u rashladnoj kuli), pri čemu se odvodi toplota Q_k .

Nakon kondenzacije, tečnost stanja 6 se prigušuje u ventilu PV1 do stanja 7 i struji u isparivač gde prima toplotu Q_o (toplotno opterećenje) isparavajući praktički do stanja suve pare. Toplotno opterećenje potiče najvećim delom usled rashlađivanja vode koja se kao hladniji fluid koristi u tunelu za „hydrocooling“. Nakon isparivača, para stanja 8 odvodi se u apsorber.

„Jaki“ rastvor stanja 2 (koji se sastoji od litijumbromida i vode) vodi se preko razmenjivača toplote RT1 u prigušni ventil PV2 i odatle u apsorber. Razmenjivač toplote ima ulogu predgrejača tečnog rastvora pre uvođenja u generator pare, sa ciljem značajnog snižavanja potrebne toplote za zagrevanje smese u generatoru, kao i sniženja toplote koja se odvodi u apsorberu (toplota Q_a). Termodinamčki posmatrano, u apsorberu se vrši „apsorpcija“, odnosno neadijabatsko izobarsko mešanje hladne pare iz isparivača stanja 8 i „toplog“ tečnog rastvora stanja 4. U rashladnoj tehnici se ovaj proces mešanja naziva „apsorpcija“ i načelno se razlikuje od „operacije apsorpcije“ koje se često koristi u tehnološkim procesima razdvajanja smesa. Odvođenje toplote Q_a tokom procesa apsorpcije je potrebno da bi se smanjio protok jakog tečnog rastvora iz generatora, što doprinosi povećanju energetske efikasnosti čitavog procesa hlađenja.



Sl. 1. Šematski prikaz apsorpcionog rashladnog uređaja
Fig. 1. Schematic of vapour absorption refrigeration system

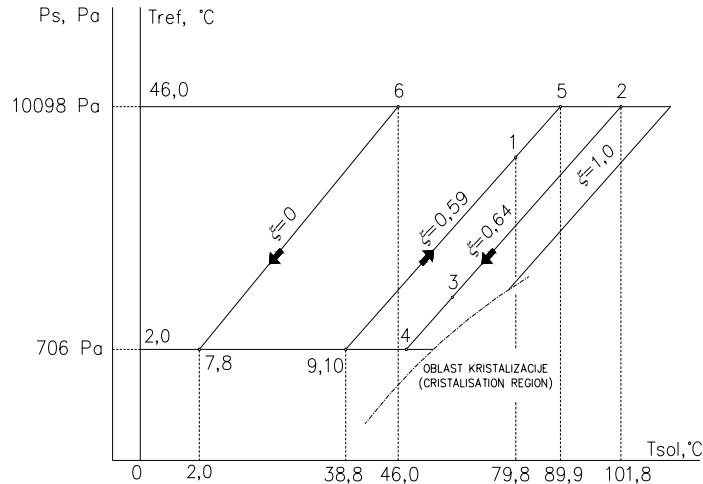
Dovođenje toplote za zagrevanje rastvora u generatoru pare odvija se u razmenjivaču toplote uronjenom u tečnost; u razmenjivaču se kao topliji fluid koristi niskopotencijalna „otpadna toplota“ (voda ili gas) odgovarajuće temperature.

Cirkulaciona pumpa usisava iz apsorbera ključali osiromašeni rastvor stanja 9 i sa stanjem 10 potiskuje ga u generator pare. Pošto je specifična zapremina tečnog rastvora

stanja 9 mala, utrošak mehaničkog rada W_p za pogon cirkulacione pumpe je veoma mali, i često se zanemaruje u odnosu na eksergiju pogonske toplote Q_g .

Iz prethodnog opisa se vidi da je osnovna činjenica koja omogućava ostvarivanje apsorpcionog ciklusa to što topliji siromašni rastvor može apsorbovati hladniju paru, da bi je (apsorbovanu) preveo sa pritiska isparavanja na pritisak kondenzacije uz utrošak zanemarljivog rada cirkulacione pumpe (Bošnjaković, 1986). Pri tome, apsorber predaje okolini termodinamički bezvrednu toplotu, ali se umesto ušteđenog rada sabijanja pare, kao kompenzacija mora potrošiti pogonska toplota Q_g koja se dovodi generatoru pare (Markoski, 2006).

Opisani sistem je tehnički izvodljiv, energetski efikasan, lak i jednostavan za primenu i održavanje; u ovom radu poslužiće kao „referentni“ sistem za proračun merodavnih pogonskih parametara ARU.



Sl. 2. Ciklus ARU sa smesom litijumbromid-voda u Dühring-ovom dijagramu

Fig. 2. Cycle of lithiumbromide-water VARS in a Dühring diagram

- T_{sol} , °C - temperatura rastvora (solution temperature)
- T_{ref} , °C - temperatura rashladnog fluida (refrigerant temperature)
- P_s , Pa - ravnotežni pritisak vode (saturation pressure)
- ξ , / - maseni udeo litijumbromida u smesi (mass fraction)

U poređenju sa kompresorskim rashladnim mašinama (i toplotnim pumpama), glavni nedostatak apsorpcionih rashladnih uređaja je njihov niži eksergetski stepen korisnosti (Markoski, 2006), (ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2009), (Kosi i dr, 2011). Kod apsorpcione mašine zajednički (jednaki) pritisci u generatoru i kondenzatoru, kao i u isparivaču i apsorberu imaju za rezultat veće gubitke u poređenju sa levokretnim ciklusima sa utroškom rada (sa kompresorom) kada se vrste radne materije i pritisci u sistemu biraju nezavisno (Markoski, 2006). Osim toga, gubici u apsorberu usled mešanja struja različitih temperatura i koncentracija, kao i gubici pri razmeni toplote u generatoru koji su naročito

veliki u slučaju kada je temperatura izvora pogonske toplote visoka, dodatno snižavaju energetska efikasnost čitavog procesa (Markoski, 2006).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom radu će uslovi rada ARU i uporedne kompresorske rashladne mašine biti definisani na način koji sledi u nastavku.

U „našim uslovima“, može se računati sa temperaturom atmosferskog vazduha od +35°C, pa će za uobičajene konstrukcije vazduhom hlađenih kondenzatora biti usvojena temperatura kondenzacije od 46°C. Za temperaturski režim +5/+10°C rashladne vode za potrebe tunela za „hydrocooling“, kao i za isparivač rashladne instalacije izrađen u formi pločastog razmenjivača toplote, kao relevantna usvojena je temperatura isparavanja od 2°C.

Ako se rashladni sistem koristi za prethlađivanje voća tehnikom „hydrocooling“ (npr. kao referentna vrsta usvaja se trešnja, koja se nakon prijema rashlađuje od 35°C do 12°C), za tehnološku liniju kapaciteta 1000 kg/h, potreban rashladni učinak tunela iznosi 52,5 kW.

Iako su klasični termodinamički grafički postupci proračuna nezamenljiv alat pri analizi termotehničkih sistema, za inženjerski proračun i simulaciju rada apsorpcionih rashladnih sistema neophodan je jednostavan i efikasan matematički aparat za određivanje termofizičkih parametara radnog fluida. Zahvaljujući značajnim istraživačkim naporima, u poslednje vreme razvijene su nove metode i unapređeni modeli proračuna bazirani na obimnim eksperimentalnim podacima. U ovom radu merodavni termofizički parametri radnih fluida sistema određivani su prema (ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2009), (ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2006), a svi proračuni izvršeni su korišćenjem programskog paketa MathCAD.

Svi proračuni sprovedeni su pretpostavljajući sledeće uslove:

- ustaljeno stanje sistema,
- termodinamička ravnoteža u svim stanjima radnih fluida,
- maseni udeo pare koja napušta generator pare (stanje 5, na Sl. 1): 0,00 (čista voda),
- promena temperature sekundarnog rashladnog fluida (vode) u isparivaču: od 5 do 10°C,
- temperatura vlažne pare posle prigušivanja u PVI (stanje 7, na ulazu isparivač R): +2°C.
- termička efikasnost razmenjivača toplote RT1: 0,65

Proračun rashladne instalacije (ARU) sproveden je matematičkim modelom baziranom na zakonima održanja supstance i energije. Svaka komponenta sistema ponaosob razmatrana je kao kontrolna zapremina i za svaku od njih su formirane jednačine materijalnog i energetskog bilansa bazirane na jednačini kontinuiteta i Prvom zakonu termodinamike, uzimajući u obzir masene protoke radnih fluida i razmenu toplote i rada.

Rezultati proračuna dati su u tabeli 1. Na osnovu velikog broju razmatranih varijanti, predloženo rešenje pretenduje da bude „optimalno“ za zadate uslove rada, iako naravno, ne treba smetnuti sa uma da su uvek moguća dodatna poboljšanja procesa.

Grafički opis procesa dat je dijagramskim prikazom u Dühring-ovom dijagramu (temperatura rashladnog fluida – temperatura rastvora) na slici 2 (ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2009), (Ryan, 2002). Prikaz takođe ilustruje i najefikasniji način za energetska poboljšanje procesa, predgrevanje tečnog rastvora iz apsorbera korišćenjem

entalpije tečnosti iz generatora koja struji ka apsorberu (u razmenjivaču toplote RT1). Maseni sastavi radnog fluida (smese litijumbromid-voda), dati u tabeli 1 i na dijagramu na slici 2, rezultat su višestrukog ponavljanja proračuna u procesu zadovoljavanja osnovnih jednačina bilansa supstancije i energije, a u nastojanju utvrđivanja određenog optimalnog scenarija rada uređaja.

Sa podacima navedenim u tabeli 1 za dati ARU, zanemarujući utrošak rada za pogon cirkulacione pumpe, dobijaju se sledeće vrednosti toplotnih protoka u stacionarnom stanju rada:

- rashladni učinak isparivača (hladjaka vode): 52,5 kW
- toplotna snaga generatora pare: 72,8 kW
- toplotna snaga (rashladni učinak) kondenzatora: 55,9 kW
- toplotna snaga apsorbera: 69,2 kW
- rashladni količnik: 0,717

Tab. 1. Veličine stanja radnih fluida u karakterističnim tačkama

Tab. 1. Property Data at Various State Points

Stanje State Point	Radni fluid Working Fluid	Temperatura Temperature °C	Maseni udeo Mass Fraction kg/kg	Pritisak Pressure kPa	Specifična entalpija Specific Enthalpy kJ/kg	Maseni protok Mass Flow kg/s	Stepen suvoće Quality kg/kg
/	/	°C	kg/kg	kPa	kJ/kg	kg/s	kg/kg
1	LiBr-voda LiBr-Water	79,8	0,59	10,098	188,40	0,291	/
2	LiBr-voda LiBr-Water	101,8	0,64	10,098	251,71	0,268	/
3	LiBr-voda LiBr-Water	53,9	0,64	10,098	164,68	0,268	/
4	LiBr-voda LiBr-Water	48,8	0,64	0,706	164,68	0,268	/
5	LiBr-voda LiBr-Water	89,9	0,00	10,098	2668,16	0,023	/
6	LiBr-voda LiBr-Water	46,0	0,00	10,098	192,56	0,023	0,00
7	LiBr-voda LiBr-Water	2	0,00	0,706	192,56	0,023	0,074
8	LiBr-voda LiBr-Water	2	0,00	0,706	2504,72	0,023	1,00
9	LiBr-voda LiBr-Water	38,8	0,59	0,706	108,18	0,291	/
10	LiBr-voda LiBr-Water	38,8	0,59	10,098	108,18	0,291	/
11	Voda Water	5	/	1,45	20,43	2,477	/
12	Voda Water	10	/	1,1	41,10	2,477	/

Za iste uslove rada u levokretnom ciklusu kompresorske rashladne mašine sa klipnim kompresorom (jednog renomirnog proizvođača), vazduhom hlađenim kondenzatorom i freonom R-134a kao rashladnim fluidom, dobijaju se sledeći rezultati:

temperatura isparavanja:	+2°C
temperatura kondenzacije:	+46°C
pregrevanje na usisu:	10°C
prehlađivanje kondenzata: 0°C	3°C
rashladni učinak:	52,5 kW
efektivna snaga EM (sa stepenom dobrote kompresije 0,7):	15,7 kW
potrebna zapremina kompresora:	101,8 m ³ /h
koeficijent hlađenja:	3,33

Dobro je poznato da se efikasnost rada apsorpcione i kompresorske rashladne mašine ne može porediti na osnovu vrednosti rashladnog količnika i koeficijenta hlađenja (ovi kriterijumi pokazuju samo odnos ostvarenog rashladnog učinka i utrošene pogonske energije, i kao takvi ne mogu biti merilo kvaliteta energetskih pretvaranja). Dobru sliku o efikasnosti rada rashladnih (i svih drugih toplotnih) mašina može da pruži relativno jednostavna termodinamička analiza bazirana na Drugom zakonu termodinamike, odnosno upoređenju eksergetskih stepena korisnosti jedne iste mašine pri različitim uslovima rada.

Eksergetski stepen korisnosti se definiše kao odnos očuvane (minimalno potrebne) i stvarno utrošene eksergije u nekom procesu. Može se pokazati da se eksergetski stepen korisnosti apsorpcione rashladne mašine izražava jednačinom

$$\eta_{ex} = \frac{Q_o}{Q_g \cdot \eta_c \cdot \varepsilon_c} \quad (1)$$

gde su:

- η_{ex} , / - eksergetski stepen korisnosti
- Q_o , kW - rashladni učinak
- Q_g , kW - toplotna snaga generatora pare
- η_c , / - termodinamički stepen korisnosti desnokretnog ciklusa *Carnot*, između temperatura izvora pogonske toplote i okoline
- ε_c , / - koeficijent hlađenja levokretnog ciklusa *Carnot*, između datih temperatura isparavanja i kondenzacije

Ako se pretpostavi, u prvom slučaju, da je na raspolaganju izvor pogonske toplote na temperaturi od 120°C, da je temperatura okoline 35°C, dobijaju se za ARU, pri definisanim temperaturama isparavanja i kondenzacije (2°C i 46°C), sledeći rezultati:

Φ_o , kW	-	52,5
Φ_g , kW	-	72,8
η_c , /	-	0,216
ε_c , /	-	6,25
η_{ex} , /	-	0,534

Sasvim drugačiji rezultat dobija se u slučaju da se za pogon apsorpcije mašine koristi izvor pogonske toplote na višim temperaturama, npr. 400°C. Pri ostalim identičnim uslovima, eksergetski stepen korisnosti apsorpcije mašine iznosi svega 0,213, što je više nego dvostruko manje. Rezultat bi mogao da bude nešto bolji ako bi se primenila apsorpciona mašina dvostrukog efekta (moguće zbog više temperature pogonske toplote).

4. ZAKLJUČAK

I pored nižih eksergetskih stepena korisnosti u odnosu na kompresorske mašine, apsorpcioni rashladni uređaji mogu da budu dobro rešenje, posebno za potrebe rashlađivanja poljoprivrednih proizvoda, kada je potrebna temperatura rashladne vode relativno visoka (npr. za „hydrocooling“ temperaturski režim je +5/+10°C).

Odgovarajućim izborom pogonskih parametara rada apsorpcionih uređaja (temperatura kondenzacije i sastav radnog fluida) može se proces hlađenja optimizovati tako da se ostvare dovoljno visoki stepeni korisnosti (rashladni količnik iznad 0,7), što čini enegretsku efikasnost apsorpcionih mašina uporedivu sa efikasnošću kompresorskih.

Poznato je da je poljoprivreda potrošač i istovremeno proizvođač energije (Brkić i Janić, 2005), pa je integrisanje apsorpcione mašine sa niskotemperaturnim obnovljivim izvorima energije veoma obećavajuća strategija. Tako npr. ako se apsorpciona rashladna mašina uključi u opšte energetske tokove datog objekta (prema šemi procesa datoj na slici 1), mogu doći do izražaja sve njene prednosti, na prvom mestu mogućnost korišćenja „otpadne niskotemperaturne toplote“ iz poljoprivredne proizvodnje (ovu toplotu inače nije lako iskoristiti).

Ne treba izgubiti iz vida da su apsorpcioni rashladni uređaji mirni i bešumni, pouzdani i jednostavni za rukovanje, kao i jeftini za održavanje, što može da bude odlučujuće za njihov izbor u uslovima poljoprivredne proizvodnje. Osim toga, minimalna potrošnja električne energije (pumpa je jedini element sa pokretnim delovima) favorizuje primenu apsorpcionih mašina u ruralnim sredinama gde je često snabdevanje električnom energijom otežano ili ograničeno.

5. LITERATURA

- [1] Niebergall W. 1959. Sorptions-Kältemaschinen, Handbuch der Kältetechnik, 7 Band. Herausgegeben von R. Plank, Springer-Verlag, Berlin, Deutschland.
- [2] Bošnjaković F. 1986. Nauka o toplini - III dio. Zagreb, Hrvatska.
- [3] Markoski M. 2006. Rashladni uređaji, Beograd: Mašinski fakultet.
- [4] ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2006. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning, Engineers, inc., Tullie Circle, n.e., Atlanta, GA 30329.
- [5] ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2009. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning, Engineers, inc., Tullie Circle, n.e., Atlanta, GA 30329.
- [6] Ryan W. 2002. New Developments In Gas Cooling. ASHRAE Journal: 23-26.
- [7] Brkić M, Janić T. 2005. Poljoprivreda kao potrošač i proizvođač energije. *Savremena poljoprivredna tehnika* 31 (4): 155-161.
- [8] Brkić M, Somer D, Đukić Đ. 2006. Energetska efikasnost sušenja zrna kukuruza na različitim konstrukcijama sušara. *Savremena poljoprivredna tehnika* 32 (3-4): 184-194.
- [9] Tešić M, Igić S, Adamović D. 2006. Proizvodnja energije - novi zadatak i izvor prihoda za poljoprivredu. *Savremena poljoprivredna tehnika* 32 (1-2): 1-9.

Kosi F, i dr. (2011). Hlađenje vodom („hydrocooling“) u kombinaciji sa apsorpcionom rashladnom mašinom za prethlađivanje voća i povrća. *Savremena poljoprivredna tehnika* 37(4): 427-437.

[10] Kosi F, Burazer Jela, Milovančević U, Stojković Milena. 2011. Šta se može očekivati od apsorpcione rashladne mašine. KGH 3: 47-51.

WATER COOLING ("HYDROCOOLING") IN COMBINATION WITH ABSORPTION COOLING MACHINE FOR PRECOOLING OF FRUITS AND VEGETABLES

Franc Kosi, Branislav Živković, Milena Stojković

SUMMARY

A thermodynamic analysis of lithiumbromide-water absorption refrigeration cycle intend for pre-cooling of fruits with chilled sprayed water (“hydrocooling”) is given in this paper. The basic technology data regarding hydrocooling are presented. The scheme of absorption refrigeration system, including its description, calculation procedure and the table containing calculated values are given. The characteristics of the standard reversed cycle with compensation process based on mechanical work are reported. It was concluded that absorption refrigeration system, under certain conditions, may be comparable to compression machine, if all measures for improvement of the absorption refrigeration cycle were undertaken.

Key words: cooling with chilled sprayed water, absorption refrigeration machine, thermodynamic analysis, compression refrigeration machine

Rad predstavlja deo istraživanja na projektu pod nazivom "Istraživanje i razvoj opreme i sistema za industrijsku proizvodnju, skladištenje i preradu povrća i voća", broj TR 35043, koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj.

Primljeno: 09. 09. 2011.

Prihvaćeno: 28. 11. 2011.