

TERMODINAMIČKA ANALIZA I POBOLJŠANJA RADA ARM TIPA VODA-AMONIJAK

THERMODYNAMIC ANALYSIS AND IMPROVEMENTS OF ARS CYCLE TYPE WATER-AMMONIA

UROŠ MILOVANČEVIĆ,

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu,

SRĐAN OTOVIĆ,

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu,

U radu je data analiza rada najjednostavnije apsorpcione rashladne mašine kontinualnog dejstva, tipa voda-amonijak. Takođe, objašnjen je i rad apsorpcione rashladne mašine sa deflegmatorom, rektifikacionom kolonom i razmenjivačima toplote. Navedene su tehno-ekonomske prednosti i nedostaci apsorpcionih mašina. Izvršena je analiza rada apsorpcione rashladne mašine sa deflegmatorom i apsorpcione mašine sa deflegmatorom i rekuperatorom toplote slabog rastvora. Dati su uporedni rezultati dobijeni proračunom i prikaz procesa u Merkelovom dijagramu ($h - \zeta$ dijagram). Za odvođenje toplote apsorpcije i kondenzacije koristi se rashladna voda temperature 30/35⁰C.

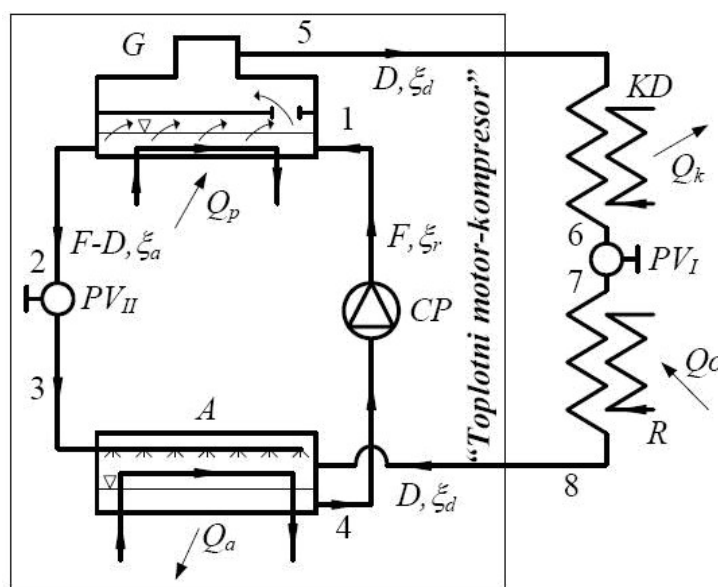
Ključne reči: apsorpcione rashladne mašine (ARM), rekuperator toplote slabog rastvora, deflegmacija, Merkelov dijagram ($h - \zeta$ dijagram)

Uvod

Apsorpcione rashladne mašine (ARM), odnosno toplotne pumpe, za svoj pogon koriste eksergiju toplote; zbog toga njihov ciklus u suštini predstavlja svojevrsan objedinjeni levokretni i desnokretni ciklus. Radne materije apsorpcionih mašina su najčešće binarne mešavine. Lakše isparljiva komponenta 1 mešavine je rashladni fluid, a teže isparljiva je apsorvent. U industriji se uglavnom koriste voda/amonijak apsorpcione mašine (voda kao apsorvent), a u klimatizaciji litijumbromid/voda apsorpcione mašine (voda kao rashladni fluid). Poželjno je da razlika temperatura isparavanja komponentata (apsorbenta i rashladnog fluida) na pritisku kondenzacije bude što veća (npr. blizu 200°C). To osigurava bolje razdvajanje dvofazne smese tokom procesa njenog ključanja u generatoru pare. Kod smeše amonijak/voda, ta razlika je manja, tipično iznosi oko 133°C.

Princip rada

Princip rada apsorpcionih mašina prikazan je na najjednostavnijoj jednostepenoj kontinualnoj ARM, sa mešavinom amonijaka i vode kao radnom materijom. Osnovni elementi ARM su generator (G), apsorber (A), kondenzator (KD), isparivač (R), cirkulaciona pumpa rastvora (CP) i prigušni ventili PVI i PVII. Generatoru se na $p=p_k$ i $t_p = t_g$ dovodi pogonska toplota Q_g koja se troši za isparavanje bogatog (jakog) rastvora u njemu. Para stanja 5 (slika 1.), sa sastavom ξ_d (praktično čisti amonijak, sa malim sadržajem vode) ide u kondenzator KD gde se kondenzuje na $p=p_k$ i $t_p = t_g$ predajući okolini toplotu kondenzacije Q_k ; nakon toga kondenzat stanja 6 se prigušuje u prigušnom ventilu PVI do pritiska isparavanja p_o i kao vlažna para stanja 7 sa temperaturom t_7 ulazi u isparivač R gde isparava uzimajući od hlađenog objekta toplotu hlađenja Q_o , kao rashladni učinak. Prema tome, pojave u kondenzatoru i isparivaču ARM se podudaraju sa onima u kompresorskim rashladnim mašinama, s tim da su temperature kondenzacije i isparavanja čistog amonijaka (u KRM) pri stalnim pritiscima konstantne, a kod smese voda/amonijak (ARM) manje ili više promenljive.



Slika 1. Principijelna šema jednostavne apsorpcione rashladne mašine kontinualnog dejstva

Hladna para iz isparivača se (stanje 8) odvodi se u apsorber *A* gde se izobarski meša sa slabim rastvorom stanja 3 (apsorbuje se u slabom rastvoru 3) uz odvođenje toplote apsorpcije Q_a . Iz generatora izlazi ključali osiromašeni (slabi) rastvor stanja 2 (slika 1.) sa maksimalnom temperaturom $t_{2max}=t_g$ i ravnotežnim sastavom $\xi_a(t_g, p_k)$, prigušuje se u prigušnom ventilu *PVII* od pritiska p_k u generatoru do pritiska p_o u apsorberu i kao vlažna para stanja 3 ulazi u apsorber gde se obogaćuje apsorbujući paru stanja 8 iz isparivača. Cirkulaciona pumpa *CP* usisava iz apsorbera ključali obogaćeni rastvor stanja 4 i sa stanjem 1 ga potiskuje u generator pare. Specifična zapremina rastvora je mala u odnosu na specifičnu zapreminu pare, utrošak mehaničkog rada P za pogon cirkulacione pumpe je veoma mali i često se zanemaruje u odnosu na eksergiju pogonske toplote E_{xQp} . Ostvarivanje apsorpcionog ciklusa omogućava to što topliji siromašni rastvor može da apsorbuje hladniju paru. Pri tome apsorber predaje okolini termodinamički bezvrednu toplotu, ali se umesto uštedenog rada sabijanja pare, kao kompenzacija mora potrošiti pogonska toplota Q_g koja se dovodi G.

Upoređujući strukture apsorpcione rashladne mašine sa slike 1. i najprostije jednostepene parne kompresorske rashladne mašine, lako se može uočiti da je skup elemenata

(generator pare, apsorber, cirkulaciona pumpa i ventil za prigušivanje rastvora) po funkciji ekvivalentan kompresoru sa pogonskim motorom kod parne kompresorske mašine.

Tehno-ekonomske prednosti i nedostaci apsorpcionih mašina

Pri oceni rada *ARM* pored termodinamičkih postoje i drugi kriterijumi koji mogu bitno uticati na izbor vrste rashladne mašine:

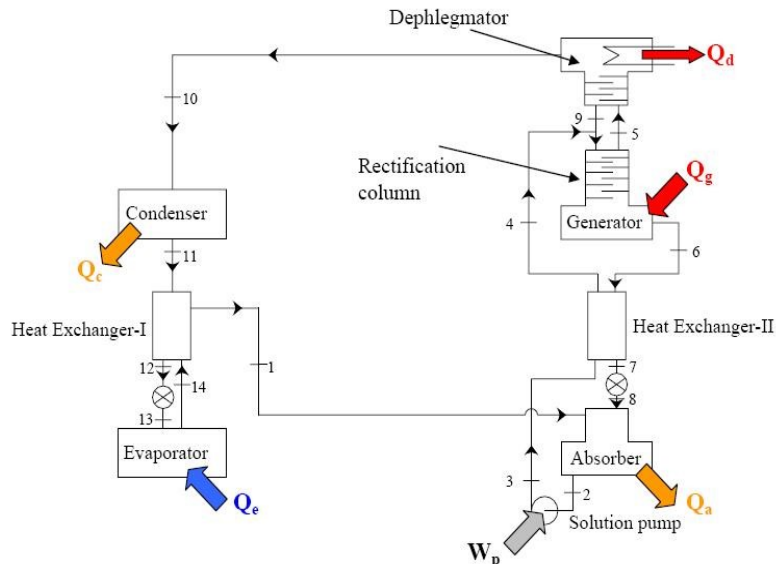
- Pumpa je jedini element sa pokretnim delovima, pa *ARM* radi dosta mirno i bešumno,
- usled odsustva ulja, koeficijenti prelaza toplote na strani rashladnog fluida su veći, pa su razmenjivači toplote efikasniji,
- sa *ARM* se mogu u jednom stupnju savladati velike razlike između temperature kondenzacije i isparavanja,
- u nedostatke *ARM* se navodi i veća potrošnja rashladne vode, ali kada se uzme u obzir i potrošnja rashladne vode za kondenzator toplotnog motora vidi se da potrošnja rashladne vode *ARM* nije bitno veća od odgovarajuće zajedničke potrošnje kompresorske mašine i njenog toplotnog motora.
- glavni nedostatak *ARM*, njen niži eksergetski stepen korisnosti, može imati drukčiju konotaciju, kada se ima u vidu da je cena pogonske eksergije iz niskopotencijalne toplote često znatno niža u odnosu na cenu električne energije koja se najčešće koristi za pogon kompresorskih mašina,
- kada se raspoloživo sa pogodnim i jeftinim gorivom (zemni gas), pogon *ARM* može biti isplativ i sa visokopotencijalnom toplotom (generator sa ugrađenim gorionikom).

Poboljšanja rada *ARM*

Najprostije šeme na kojima je prikazano funkcionisanje apsorpcionih mašina, odlikuju se suviše niskim eksergetskim stepenima korisnosti, pa se stoga preduzima niz mera za njihovo poboljšavanje. Prisustvo velike količine vode u rashladnom ciklusu negativno utiče na performanse sistema. Razdvajanje generisane pare amonijaka od tečnosti bogate vodom vrši se pomoću rektifikacione kolone i deflegmatora. Funkcija rektifikacione kolone i deflegmatora je smanjenje koncentracije vodene pare na izlazu iz generatora. Bez njih, para na izlazu iz generatora bi imala 5-10% vode, dok se njihovom primenom koncentracija vode smanjuje i ispod 1%. Rektifikaciona kolona je konstruisana tako da se fluidi što duže zadrže u njoj. Dodatni suprotnosmerni razmenjivač toplote se koristi kako bi se poboljšao rashladni efekat i osigurao ulaz tečnosti u prigušni ventil.

Na slici 2. para niske temperature i pritiska stanja 14 napušta isparivač, razmenjuje toplotu sa kondenzovanom tečnošću u prehladivaču i ulazi u apsorber sa stanjem 1. Para amonijaka se apsorbuje u slabom rastvoru koji dolazi iz PV (stanje 8). Toplota apsorpcije Q_a se odvodi u spoljni toplotni ponor (predaje se vodi za hlađenje koja se toplotno regeneriše pomoću rashladne kule). Jak rastvor, obogaćen amonijakom, napušta apsorber sa stanjem 2 i pomoću pumpe dovodi rastvor do pritiska u generatoru (stanje 3). Rastvor visokog pritiska se zatim pregreva u razmenjivaču toplote II do stanja 4, nakog čega ulazi u generator i razmenjuje toplotu i masu sa vrelom parom koja napušta generator i ulazi u rektifikacionu kolonu. U G se rastvoru dovodi toplota Q_g , usled čega dolazi do isparavanja amonijaka i vode; kao što je već spomenuto, ova vrela para (5-10% vode) razmenjuje toplotu sa bogatim kondenzatom koji se sliva sa vrha. Tokom ovog procesa, temperatura pare i sadržaj vode se snižavaju. Ova para, stanja 5, zatim ulazi u deflegmator gde veći deo vodene pare iz mešavine biva odstranjen hlađenjem i kondenzacijom. Pošto je ovaj proces egzoterman, toplota Q_d se

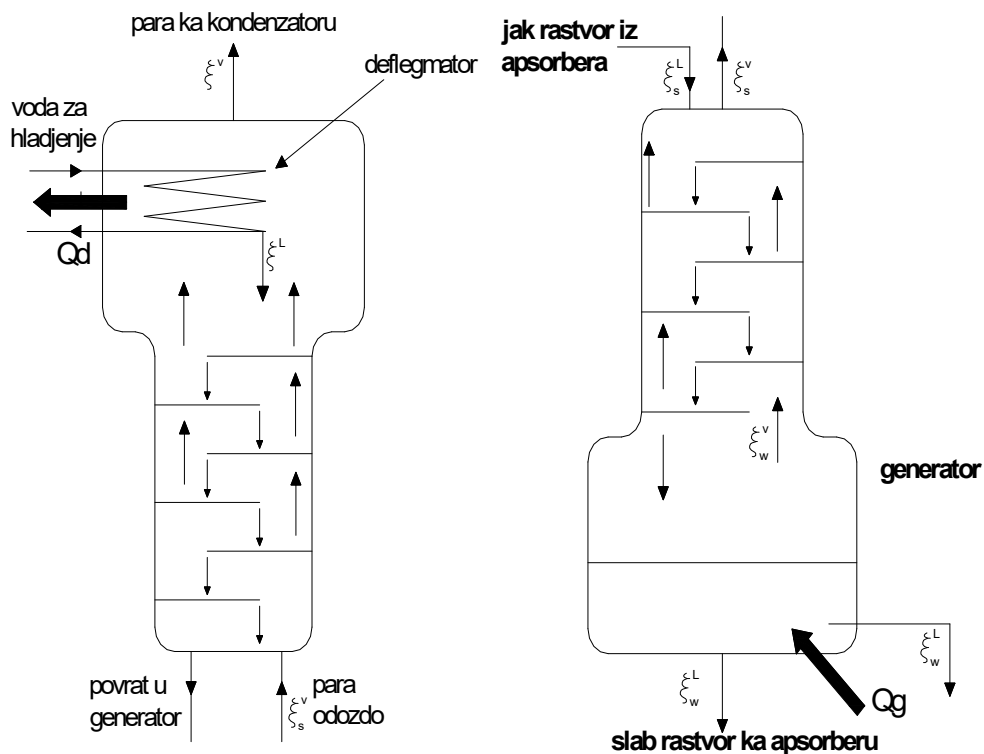
odbacuje u okolinu. Dobijena para stanja 10 (skoro čist amonijak-vise od 99%) zatim ulazi u kondenzator gde se kondenzuje i pri tome se odvodi količina toplote Q_c . Kondenzovana tečnost stanja 11 se prehladjuje do stanja 12, pri čemu se toplota predaje pari niske temperature i pritiska koja dolazi iz isparivača. Nakon toga se prehladjena tečnost visokog pritiska stanja 12 prigušuje u PV2 do stanja 13, a potom isparava u ispaivaču do stanja 14.



Slika 2. Šema ARM sa rektifikacionim sistemom i dodatnim razmenjivačima toplote

Kondenzovana voda u deflegmatoru stanja 9 utiče u rektifikacionu kolonu zajedno sa jakim rastvorom i razmenjuje toplotu i masu sa parom koja se kreće ka deflegmatoru. Jedna od osnovnih mera za poboljšavanje rada toplotnog motor-kompresora je ugradnja rekuperativnog razmenjivača toplote između vreloug osiromašenoug rastvoug 6 koji iz generatora pare ide u apsorber i hladnog obogaćenoug rastvoug 3 koji struji u suprotnom smeru. Pomoću ovog razmenjivača toplote postiže se ušteda u potrošnji pogonske toplote, a za isti iznos smanjuje se i količina toplote koju treba odvesti u apsorberu, tako da se može za odgovarajuću veličinu smanjiti protok rashladne vode kroz apsorber. Slab rastvor visokoug pritiska stanja 7 se prigušuje u prigušnom ventilu PV do stanja 8 i zatim ulazi u apsorber. Jak rastvor iz apsorbera ulazi u rektifikacionu kolonu, para bogata amonijakom izlazi na vrhu deflegmatora, dok slab rastvor izlazi na dnu generatora.

Na slici 3. je prikazana šema generatora sa rektifikacionom kolonom i procesima koji se odvijaju na zadatim temperaturama. U koloni se para iz generatora koncentracije ξ_w^v kreće naviše, obogaćuje se amonijakom do koncentracije ξ_s^v , pri tome razmenjujući toplotu i masu sa jakim rastvorom koncentracije ξ_s^l koji dolazi iz apsorbera. Tokom procesa, rastvor slabi pošto amonijak isparava dok se voda kondenzuje. Para napušta kolonu sa koncentracijom ξ_s^v i nalazi se u ravnoteži sa jakim rastvorom (ξ_s^l). Takođe, može se uočiti da tokom procesa usled razmene toplote između pare i tečnosti dolazi do pregrevanja (zagrevanja) rastvoug koji ulazi u generator. Na ovaj način se smanjuje potrebna količina toplote koja se dovodi generatoru. U deflegmatoru se para dodatno obogaćuje. Na vrhu deflegmatora nalazi se razmenjivač kojim se od pare odvodi toplota, tako da se deo pare kondenzuje. Ovaj kondenzat je hladniji u odnosu na paru i sa njom razmenjuje toplotu. Tokom tog procesa vodena para prelazi u tečno stanje, dok amonijak iz tečnosti isparava. Kao rezultat, para koja napušta rektifikacionu kolonu je skoro čist amonijak.

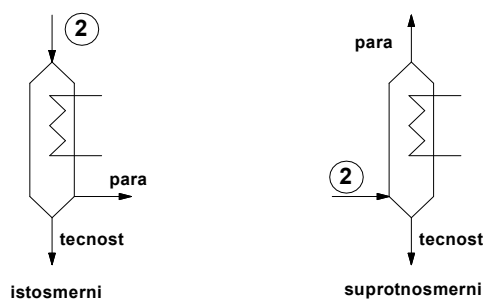


Slika 3. Deflegmator i rektifikaciona kolona

Proračun ARM

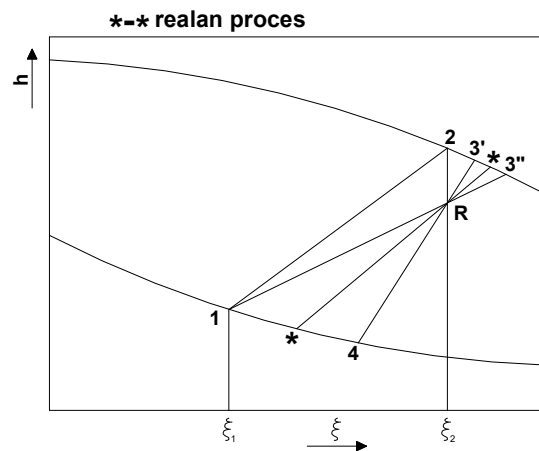
Vrednosti koje su uzete za merodavne radne pritiske na kojima se razmatra rad ARM u ovom projektu su $p_0 = 4bar$ i $p = 14bar$. Radni fluid je dvokomponentna mešavina amonijak-voda sastava $\xi_r = 0.4$. Potreban rashladni učinak iznosi $Q_0 = 20.79kW$. Kao rashladno sredstvo, za hlađenje kondenzatora i apsorbера, koristi se voda (35/30°C) koja se hladi u rashladnoj kuli. U rashladnoj kuli usvojena je temperatura po vlažnom termometru $t = 24$ °C, zbog uslova sredine.

Para stanja 2 ulazi u deflegmator D, gde se delimično kondenzuje. Zbog toga se ponekad deflegmacija i naziva parcijalnom kondenzacijom. U deflegmatoru se dobija mešavina tečne i parne faze stanja R. U opštem slučaju te dve faze nisu na istoj temperaturi, što zavisi od konstrukcije deflegmatora. Postoje istosmerni i suprotnosmerni deflegmatori (slika 4.). Ako je deflegmator istosmerni i para i kondenzat struje naniže tako da se njihove temperature izjednačavaju, tj. oni dolaze u stanje ravnoteže. Drugi slučaj je kad je deflegmator suprotnosmerni. Onda će tečna faza (refluks-stanje 4 sa slike 4.) da se poklopi sa stanjem 1.



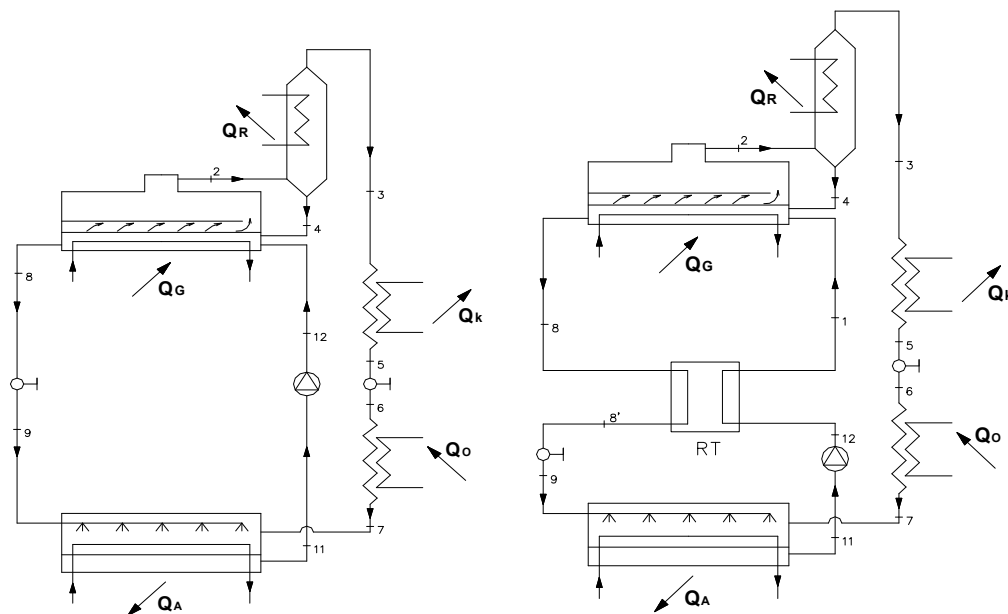
slika 4. Istosmerni i suprotnosmerni deflegmator

Tada para i tečnost nisu u ravnoteži, ali će za istu toplotu deflegmacije Q_r (duž 2-R sa slike 5.), tačka 3 da bude mnogo više pomerena u desnu stranu (poklapa se sa tačkom 3'' na slici 5.), tj parna faza će da bude znatno bogatija amonijakom.



Slika 5. Prikaz procesa u $h - \xi$ dijagramu

Zbog toga se uvek teži da razmenjivač bude suprotnosmerni. Tačku R možemo podesiti tako da stanje 3 ima željenu koncentraciju. S obzirom na to, izlazno stanje pare 3 iz deflegmatora pretpostavljeno je sa masenim udelom $\xi_r = 0,99$.



Slika 6: a) sa deflegmatorom, b) sa deflegmatorom i razmenjvačem toplote RT

Za slučaj sa slike 6.a) dobijeni su sledeći rezultati: $COP = \frac{Q_o}{Q_g} = \frac{20,79}{86,51} = 0,24$.

Za slučaj sa slike 6.b) dobijeni su sledeći rezultati: $COP = \frac{Q_o}{Q_g} = \frac{20,79}{41,404} = 0,502$.

Zaključak

Značajno povećanje COP - Jedna od osnovnih mera za poboljšavanje rada toplotnog motor-kompresora je ugradnja rekuperativnog razmenjivača toplote između vrelog osiromašenog rastvora, koji iz generatora pare ide u apsorber i hladnog obogaćenog rastvora, koji struji u suprotnom smeru. Pomoću ovog razmenjivača toplote postiže se ušteda u potrošnji pogonske toplote, a za isti iznos smanjuje se i količina toplote koju treba odvesti u apsorberu, tako da se može za odgovarajuću veličinu smanjiti protok rashladne vode kroz apsorber. Takođe se koristi i rekuperativni razmenjivač toplote između kondenzata koji ide ka isparivaču i hladne pare koja iz isparivača ide u apsorber. Ovaj prehladivač kondenzata ima sličnu ulogu kao i analogni prehladivač kod parnih kompresorskih mašina.

Razlika temperatura ključanja vode i amonijaka na istom pritisku nisu prevelike, tipično iznose oko 133°C. Pri ključanju i isparavanju polazne smese sastava ξ_r u generatoru *ARM* koja bi radila prema najprostijoj šemi (bez ikakvih dodatnih uređaja), maseni udeo amonijaka u pari bi mogao dostići 5-10% što veoma nepovoljno utiče na termodinamičke i eksploatacione performanse mašine. Koncentracija rashladnog fluida u pari koja izlazi iz generatora se može povećati postavljanjem rektifikacione kolone sa deflegmatorom, što znatno doprinosi povećanju efikasnosti mašine. Ova mera se primenjuje kod vodoamonijačnih mašina radi povećanja koncentracija amonijaka u pari koja ulazi u kondenzator, dok je kod litijum bromidskih mašina izlišna, jer zbog drastične razlike u isparljivosti, u pari nema praktično ni traga od apsorbera.

U načelu se može reći da je apsorpciona mašina utoliko prostija što je razlika u isparljivosti rashladnog fluida i apsorbera veća.

Literatura

- [1] Bošnjaković F.: Nauka o toplini - III dio, Zagreb, 1986.
- [2] Markoski M.: Rashladni uređaji, Mašinski fakultet, Beograd, 2006.
- [3] Vapour Absorption Refrigeration Systems Based On Ammonia-Water Pair Lesson 17
- [4] ASHRAE Handbook, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning, Engineers, inc., Tullie Circle, n.e., Atlanta, GA 30329.
- [5] Otović S.: Termodinamička analiza rada ARM tipa voda-amonijak za primenu kod sistema panelnog hlađenja, Diplomski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2010.
- [6] Milovančević U.: Termodinamičko poboljšanje rada ARM tipa voda-amonijak u primeni za visokotemperaturno hlađenje stambenog objekta površine 400m², Diplomski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2010.