

PARAMETARSKA ANALIZA RADA TOPLOTNE PUMPE ZA PRIPREMU VAZDUHA ZA PROVETRAVANJE SKLADIŠTA ŠEĆERA

PARAMETRIC ANALYSIS OF HEAT PUMP OPERATION FOR SUGAR STORAGE VENTILATION

Uroš Milovančević¹, Franc Kosi¹, Milena Stojković¹, Snežana Stevanović²

¹ *Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Beograd, Kraljice Marije 16*

² *Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet,
Beograd-Zemun, Nemanjina 6*

E-mail: umilovancevic@mas.bg.ac.rs

Rezime: U radu je sprovedena analiza uticaja relevantnih pogonskih parametara na rad rashladne mašine u okviru sistema za pripremu vazduha za ventilaciju industrijskih skladišta konzumnog šećera. Za usvojeni tehnički sistem za ventilaciju, na osnovu metode „sprezanja karakteristika“ komponenata rashladne mašine, analizan je uticaj temperatura isparavanja i kondenzacije, kao i temperature i relativne vlažnosti vazduha za provetranje. Utvrđen je kvantitativan uticaj pojedinih relevantnih parametara na potrošnju energije za pogon uređaja.

Ključne reči: provetranje, industrijsko skladište šećera, sprezanja karakteristika, komponente rashladne mašine

Abstract: This paper presents influence of relevant operating parameters to performances of refrigeration devices as part of the technical systems intended for ventilating of industrial storage of refined sugar. For the designed technical ventilation system, using the method of "coupling of performances characteristics of refrigeration plant components", the effect of evaporation and condensation temperature, as well as temperature and relative humidity of the treated air are analyzed. It was also found quantifiable impact of some relevant parameters on energy consumption.

Key words: ventilating, industrial storage of refined sugar, coupling of performances characteristics, refrigeration plant components

1. UVOD

Režimi rada komponenata levokretne toplotne mašine (rashladnog uređaja ili toplotne pumpe) su međusobno zavisni pri njihovom zajedničkom radu u okviru date instalacije, pri čemu, u ustaljenom režimu rada, moraju biti usaglašeni bilansi materije i energije. Predviđanje parametara ravnotežnog stanja mašine pri datim uslovima „spoljašnjih“ faktora (toplotno opterećenje i uslovi okoline) je ključno za tehničko-tehnološki i ekonomski rezultat rada termotehničkog sistema u koji su rashladni procesi uključeni kao osnovne ili pomoćne operacije.

1.1. Provetravanje uskladištenog kristalnog šećera

Tehnološki postupak proizvodnje šećera iz šećerne repe je kontinuirani postupak koji se obuhvata veliki broj procesnih operacija međusobno uslovljenih i povezanih u složenu tehnološku celinu. Pojednostavljeno posmatrano, osnovni tehnološki postupak proizvodnje šećera se može podeliti u sedam faza:

1. Dovoz i merenje šećerne repe, uzimanje uzorka;
2. „Mokri“ ili „suvi“ istovar šećerne repe, pranje repe, rezanje repe na rezance;
3. Ekstrakcija repnih rezanaca, izdvajanje soka i izluženih rezanaca;
4. Čišćenje soka;
5. Koncentrisanje i uparavanje soka;
6. Kristalizacija saharoze;
7. Dorada kristalnog šećera.

Pored osnovnog tehnološkog procesa proizvodnje šećera, tehnologija uključuje i pomoćne procese i operacije u pogonima za proizvodnju energije, pomoćnih materijala i nusproizvoda.

Nakon završenog tehnološkog postupka proizvodnje, šećer se doprema u prihvatne stanice – „silose“ u kojima se skladišti i provetrava određeni period vremena pre konačne distribucije u prodajne centre. Kristalni šećer je izrazito higroskopni materijal, pa je za njegovo pouzdano čuvanje u silosu neophodan efikasan sistem za „provetravanje“.

Prihvatna stanica za skladištenje šećera, po pravilu, obuhvata metalni silos zapremine 40000 tona, mašinsku salu u kojoj je smešten uređaj za pripremu vazduha za provetravanje silosa, trakaste transportere i elevatore za transport šećera, kao i efikasnu filtersku jedinicu za otprašivanje vazduha nakon prolaska kroz sloj šećera.

Pre početka punjenja silosa (obično tri dana pre usipanja prvih količina šećera), u prazan silos se uduvava zagrejani vazduh (temperatura vazduha oko 30°C) sa ciljem da unutrašnje površine zidova dostignu temperaturu od 25°C. Pri tome, poželjno je da relativna vlažnost vazduha tokom ovog „temperiranja“ silosa ne pređe 45%.

Provetravanje šećera je neophodno tokom čitave kampanje prerade šećerne repe, ali i u periodu grejne sezone (kada zbog niskih spoljašnjih temperatura može nastati kondenzacija vlage u zonama silosa koje su u dodiru sa hladnim zidovima). Temperatura vazduha koji se uduvava mora da se održava u granicama od (20-25)°C, pri relativnoj vlažnosti vazduha od oko (35-45)%. Pri tome, protok vazduha kroz šećer podešava se u zavisnosti od stepena napunjenosti silosa: pri potpunom napunjenom silosu, regulacione klapne na ventilatorima moraju biti potpuno otvorene.

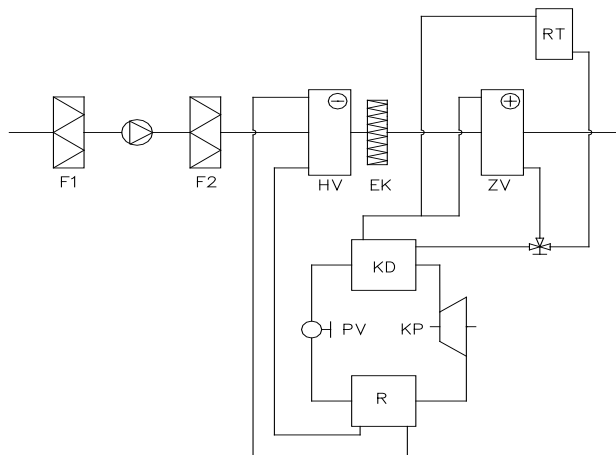
Dobro projektovani i izgrađeni silos podrazumeva da, tokom čitavog perioda skladištenja (koji traje nekoliko meseci, čak i do naredne kampanje), treba da ispunjava sledeće uslove:

- Temperatura šećera iznosi (20-25)°C;
- Vлага koju oslobađaju šećerni kristali se kontinualno odvodi, ali da se pritom izbegne isušivanje šećera preko određene granice;
- Raspodela vazduha u slojevima šećera mora biti približno uniformna (da bi se izbeglo stvaranje hladnih i vlažnih zona u silosu);
- Periodično rastresanje šećera, da bi se sprečilo stvaranje međukristalnih struktura;
- Minimalan rizik od eksplozije (pošto prah šećera sa vazduhom može formirati eksplozivnu smesu);
- Relativno niski troškovi nabavke uređaja za provetravanje, kao i niski troškovi eksploatacije.

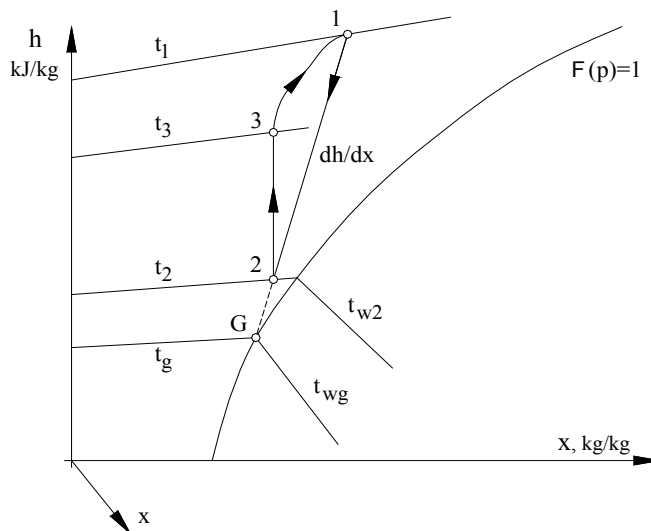
Tehnički sistemi kojima se omogućava provetranje skladišta šećera, mogu da budu raznovrsni, ali se kao prihvatljivo racionalno rešenje preporučuje sistem prikazan šematski na slici 1. Promena stanja vlažnog vazduha tokom procesa pripreme i ventilacije šećera data je na slici 2.

Slika 1. Šematski prikaz sistema za ventilaciju skladišta šećera

F1, F2 – filteri, HV – hladnjak vazduha, EK – eliminator kapi, ZV – zagrejač vazduha, RT – dodatni razmenjivač toplote



Slika 2. Promena stanja vlažnog vazduha u Mollier-ovom $h-x$ dijagramu



Stanje ventilacionog vazduha koji je prostrujao kroz šećer na izlazu iz silosa je, prema podacima [2, 3], definisano temperaturom 35°C sa relativnom vlažnošću od 33% (stanje 1 na Molijerovom dijagramu). Vazduh stanja 1, prvo prolazi kroz dva stupnja filtracije (vrećasti filter F1 i sandučasti fini filter F2 na slici 1), a zatim kroz rekuperativni razmenjivač toplote - zagrejač ZV (slika 1), koji su deo indirektnog rashladnog sistema sa 20-procentnim vodenim rastvorom etilenglikola kao sekundarnim fluidom. U pravcu strujanja vazduh prvo nailazi na hladnjak, gde se hladi do temperature 10°C i suši do apsolutne vlažnosti od (6-7) g/kg. Nakon eliminатора kapi EK, vazduh struji preko zagrejača iz kog izlazi sa temperaturom 20-25°C i relativnom vlažnošću od (35-45)% (stanje 3 na $h-x$ dijagramu, slika 2). Promena stanja 3-1 odvija se prilikom

prostrujavanja vazduha kroz sloj šećera. Pošto toplota kondenzacije levokretne mašine značajno prevazilazi toplotu potrebnu za zagrevanje vazduha, neophodna je ugradnja dodatnog razmenjivača toplote RT pomoću koga se u okolinu odvodi „višak raspoložive toplote“.

Napominje se da su gore-navedeni podaci „projektni uslovi“ sa kojima se uobičajeno pristupa planiranju i projektovanju odgovarajućih termotehničkih instalacija za provetravanje skladišta šećera. Uz to, za uobičajene letnje klimatske uslove koji važe za region Vojvodine (gde su locirani najveći proizvodni kapaciteti industrije šećera u Srbiji), projektne vrednosti temperature i relativne vlažnosti spoljašnjeg vazduha, iznose 35°C i 0,40 respektivno.

2. ODREĐIVANJE RAVNOTEŽNOG RADNOG REŽIMA RASHLADNE MAŠINE

U rashladnoj tehnici se za proračun ravnotežnog režima („radne tačke“) instalacije, koristi „metod sprežanja karakteristika“ komponenata rashladne mašine [4]. U ustaljenom režimu rada, kada moraju biti usaglašeni bilansi materije i energije, karakteristika svake od komponenata mašine izražava kao rashladni učinak koji ta komponenta omogućava da se ostvari u isparivaču pri datim temperaturama isparavanja i kondenzacije. Polazeći od toga da komercijalno raspoloživi prigušni organi sa automatskom regulacijom omogućavaju prilagođavanje protočne karakteristike potrebama isparivača u relevantnom opsegu radnih uslova (temperatura isparavanja i kondenzacije), potrebno je poznavanje tri karakteristike: kompresora $\Phi_{oKP}(t_o, t)$, kondenzatora $\Phi_{oKD}(t_o, t)$ i isparivača, koja određuje neposredan rashladni učinak Φ_{oR} ostvaren na isparivaču u zavisnosti od temperature isparavanja t_o .

Proračun karakteristika svake od tri komponente podrazumeva prethodno dimenzionisanje polazeći od njihovih zadatih učinaka, uslova sprege sa izvorom, odnosno ponorom toplote (protoci i temperature fluida koji protiču kroz isparivač i kondenzator) i od željenog režima rada mašine. Potreban rashladni učinak instalacije određen je toplotnom snagom potrebnom za rashlađivanje vazduha od stanja 1 do 2 (slika 2) za usvojene projektne uslove, koji su definisani na sledeći način: 1. temperatura vazduha na ulazu u razmenjivač je 35°C, 2. relativna vlažnost iznosi 35%, 3. srednja temperatura spoljašnje površine hladnjaka je 7°C. Na osnovu posebno razvijenog računarskog programa, dobijeni su sledeći podaci:

- pravac promene stanja vazduha: 7201 kJ/kg,
- ukupna toplotna snaga: 40,9 kW,
- senzibilna toplotna snaga: 26,58 kW,
- količina izdvojenog kondenzata: 20,46 kg/h.

Potrebna površina hladnjaka vazduha od 136,1 m² određena je na osnovu sledećih parametara:

- sekundarni rashladni fluid: vodeni rastvor etilen-glikola, masenog udela 20%, temperatura rastvora 2/6°C,
- hlađeni fluid: vazduh, temperatura 35°C na ulazu i 10°C na izlazu,
- materijal: bakarne cevi 22x1 mm, lamele aluminijumske, razmak lamela 7 mm,
- raspored cevi: šahovski,
- srednji koeficijent prolaza toplote sveden na spoljašnju površinu: 15,48 W/m²K,
- brzina vazduha u najužem preseku: 3,63 m/s.

Napominje se da su brzina vazduha u najužem preseku, kao i niska vrednost koeficijenta prolaza toplote uslovljeni malim zapreminskim protokom vazduha i velikom razlikom temperatura vazduha na ulazu i izlazu iz razmenjivača toplote.

Temperatura isparavanja primarnog rashladnog fluida R-134a u projektnim uslovima je -5°C. Za potrebni rashladni učinak od 40,9 kW, za usvojenu konstrukciju (pločasti razmenjivač toplote) i

za usvojenu temperatursku promenu $2/6^{\circ}\text{C}$ sekundarnog rashladnog fluida određene su geometrijske karakteristike isparivača (detalji ovog proračuna se ne navode, jer nisu relevantni za ovaj rad).

Na osnovu navedenih podataka, izračunate su merodavne vrednosti, a na dijagramu na slici 3 prikazane su karakteristike hladnjaka vazduha, kao funkcija rashladnog učinka od temperature isparavanja. Napominje se da usvajanjem uslova adijabatičnosti sprege „isparivač-hladnjak vazduha“, iste krive predstavljaju i karakteristiku isparivača.

Određivanje karakteristike kompresora može da se, načelno, sprovede na dva načina. Prvi je primena dobro poznate relacije

$$\Phi_{oKP}(t_o, t) = \lambda(t_o, t) \cdot V_s \cdot q_v(t_o, t)$$

gde su $\lambda(t_o, t)$ koeficijent isporuke kompresora, V_s zapremina kompresora i $q_v(t_o, t)$ specifična zapreminska rashladna sposobnost. Drugi način, kome je u ovom radu data prednost, je primena odgovarajućeg softverskog paketa proizvođača kompresora. Za usvojeni tip kompresora (klipni, jednostepeni), uz pretpostavku da u instalaciju treba ugraditi tri kompresora (dva „radna“ i jedan „rezervni“), korišćenjem softvera jednog od poznatih evropskih proizvođača kompresora, dobijeni su sledeći podaci:

- tip kompresora: klipni, poluhermetički,
- rashladni fluid: R-134a,
- radni uslovi: $-5/47^{\circ}\text{C}$, 3°C prehlađivanje na kondenzatoru i 7°C pregrevanje na usisu (termostatski prigušni ventil),
- zapremina kompresora (na 50 Hz, 1450 RPM): $56,25 \text{ m}^3/\text{h}$,
- rashladni učinak: 20,8 kW,
- efektivna snaga: 7,37 kW,
- potreban učinak kondenzatora: 37,9 kW,
- maseni protok rashladnog fluida: 534 kg/h.

Varirajući temperaturu isparavanja u rasponu od -7°C do -3°C i temperaturu kondenzacije u opsegu od $+42^{\circ}\text{C}$ do 52°C , određen je rashladni učinak izabranog kompresora i grafički prikazana i karakteristika kompresorsko-kondenzatorskog agregata u funkciji temperature kondenzacije i isparavanja na dijagramu na slici 3, zajedno sa karakteristikama hladnjaka vazduha.

Izbor projektne temperature kondenzacije (47°C) je sproveden imajući u vidu postavljeni zadatak; pošto je nakon hlađenja i sušenja, vazduh potrebno zagrejati do stanja 3 (slika 2), odnosno do temperature od $20-25^{\circ}\text{C}$, racionalno je usvojiti da temperatura sekundarnog rashladnog fluida na „toploj strani“ bude $30/35^{\circ}\text{C}$. Usvajajući pločasti razmenjivač toplote za kondenzator koji je hlađen vodenim rastvorom etilen-glikola, temperatura kondenzacije u projektnom režimu iznosi 47°C .

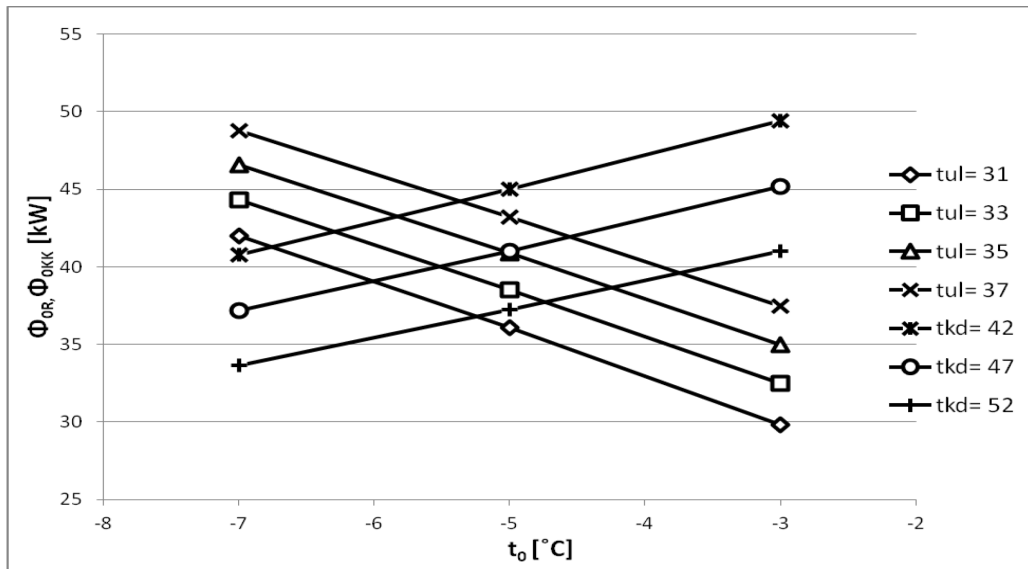
Pošto je za razmatrani proces neophodno održavati stalnu temperaturu kondenzacije (zbog potrebe zagrevanja vazduha na zadatu temperaturu), u tehničkoj realizaciji opisanog sistema potrebno je posebnu pažnju posvetiti izboru komponenata kontrolno-regulacionog sistema temperature kondenzacije. Iako to nije predmet ovog rada, napominje se, da imajući u vidu postojeće metode i odgovarajuću opremu, kontrola temperature kondenzacije ne predstavlja značajan tehnički problem.

3. PARAMETARSKA ANALIZA PROCESA

Opisani sistem, koji sačinjavaju karakteristike isparivača, kompresora i kondenzatora, prikazan na slici 3, može se analizirati i numerički na računaru. Međutim, grafičko sprezanje tih

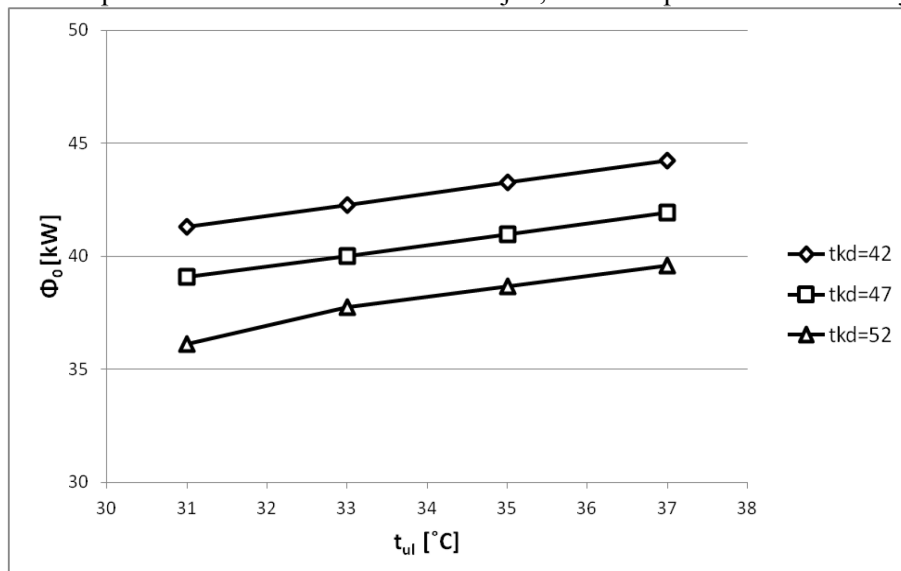
karakteristika omogućava bolje i preglednije sagledavanje uticaja pojedinih parametara i olakšava analizu uticaja relevantnih parametara na rad rashladne mašine.

Slika 3. Karakteristike kompresorsko-kondenzatorskog agregata i hladnjaka vazduha;
 t_0 °C – temperatura isparavanja; t_{kd} °C – temperatura kondenzacije, Φ_{OR} , Φ_{OKK} – karakteristike isparivača i kompresorsko-kondenzatorskog agregata



Ravnotežna radna tačka rashladne mašine se određuje za zadatu temperaturu hlađenog fluida na ulazu u isparivač (temperatura na kojoj karakteristika isparivača „seče“ t_0 osu sa slike 3). Variranjem temperature hlađenog fluida na ulazu u hladnjak mogu se dobiti parovi vrednosti „rashladni učinak-temperatura vazduha na ulazu u hladnjak“ $\Phi_o - t_{v,ul}$, koji definišu krivu koja se često naziva karakteristika $\Phi_o(t_{v,ul})$ rashladne mašine [4].

Slika 4. Karakteristika rashladne mašine
 t_{ul} – temperatura vazduha na ulazu u hladnjak, t_{kd} – temperatura kondenzacije



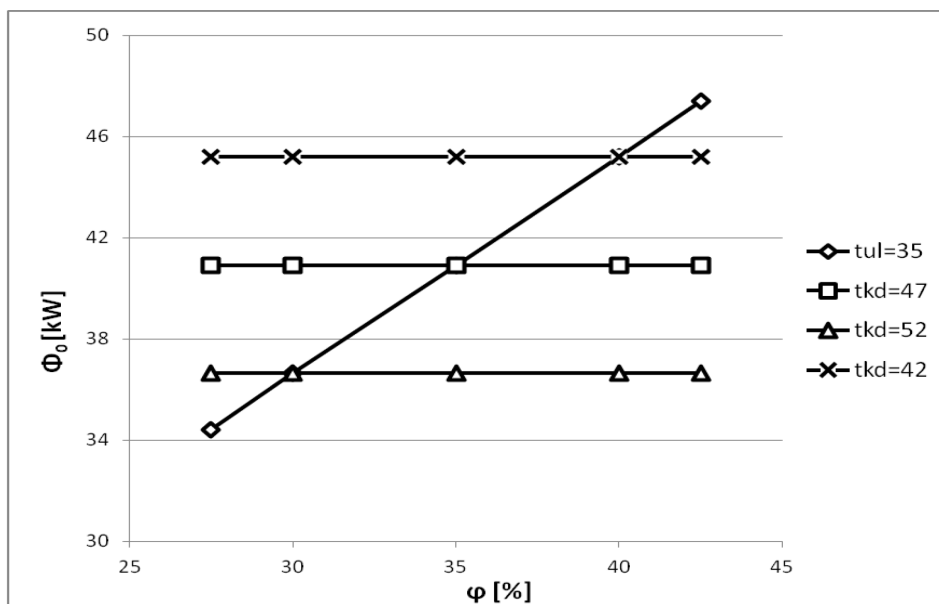
Usvajajući da se temperatura vazduha na ulazu u hladnjak (na izlazu iz silosa za šećer) kreće u rasponu od 33°C do 37°C, na dijagramu na slici 4, prikazan je potreban rashladni učinak mašine kao funkcija ulazne temperature vazduha.

Na osnovu dijagrama je jasno da, rashladna mašina dimenzionisana prema „projektним uslovima“, neće moći da obezbedi zahtevani režim pripreme vazduha za ventilaciju kada je temperatura vazduha na izlazu iz silosa viša od „projektne“. To u prvi plan stavlja pitanje izbora uslova pri kojima će projektant dimenzionisati komponente mašine. Dijagram na slici 4 omogućava određivanje najviše prihvatljive temperature vazduha na ulazu u uređaj za pripremu vazduha (pošto se obično instalacija dimenzioniše sa izvesnim stepenom sigurnosti).

Na sličan način, mogu se odrediti granične vrednosti relativne vlažnosti vazduha na izlazu iz silosa pri kojima će rad mašine još uvek biti prihvatljiv. Ako se odrede potrebni rashladni učinci za vrednosti relativne vlažnosti u očekivanoj oblasti, kao i raspoloživi rashladni učinak usvojene mašine, može da se nacrtati dijagram prikazan na slici 5. Primera radi, na dijagramu su prikazani potrebni rashladni učinak u zavisnosti od relativne vlažnosti ulaznog vazduha pri njegovom rashlađivanju od 35 do 10°C, kao i raspoloživi rashladni učinci rashladne mašine za temperature kondenzacije od 42°C, 47°C i 52°C. Vidi se da su potrebni rashladni učinak, a time i potrošnja energije za pogon rashladnog uređaja strogo zavisni od relativne vlažnosti ulaznog vazduha. To znači da eventualni povećani sadržaj vlage u sirovom šećeru koji se skladišti, ima veliki uticaj na parametre rada sistema za provetravanje i može često biti uzrok izostanka željenog režima rada.

Slika 5. Uticaj relativne vlažnosti ulaznog vazduha na potreban rashladni učinak sistema za provetravanje skladišta šećera

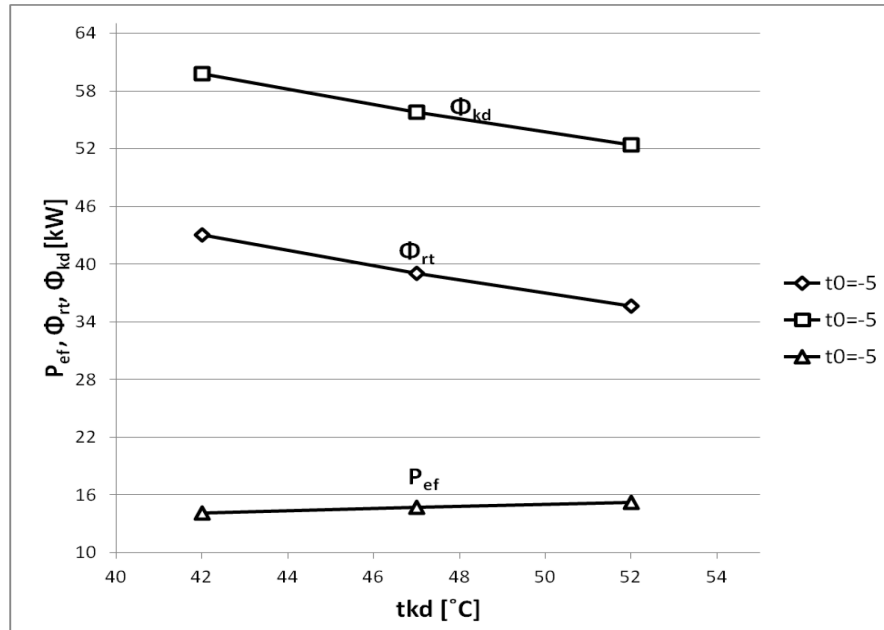
ϕ , t_{ul} – relativna vlažnost i temperatura vazduha na ulazu u hladnjak, t_{kd} – temperatura kondenzacije



Kvantitativni uticaj temperature kondenzacije na pogonske parametre rada uređaja može se pregledno prikazati na način dat na slici 6. Za izabrane temperature kondenzacije i usvojenu vrednost temperature isparavanja od -5°C, prikazane su potrebne toplotne snage zagrejača vazduha i eksternog hladnjaka grejnog fluida. Osim uvećane potrošnje energije, povišenje temperature kondenzacije može prouzrokovati određene probleme vezane za automatsku

regulaciju rada uređaja, posebno u pogledu održavanja kontrolisanih parametara vazduha koji se uvodi u slojeve šećera.

Slika 6. Uticaj temperature kondenzacije na performanse sistema za provtravanje skladišta šećera
 P_{ef} – efektivna snaga kompresora, Φ_{rt} , Φ_{kd} – toplotna snaga pomoćnog razmenjivača toplote i kondenzatora



4. ZAKLJUČAK

Sprezanje karakteristika rashladne mašine je od izvanrednog značaja za razumevanje svih pojava u radu, pošto iz toga proizilazi prepoznavanje najznačajnijih parametara rada koje treba kontrolisati i meriti. To je posebno od značaja za rashladne sisteme koji su tokom čitave godine (periodično ili stohastički) izloženi promenama merodavnih uslova rada. U tim okolnostima, analiza rada mašine i objekta omogućava sagledavanje stepena uticaja bilo kog parametra na njihove ravnotežne režime rada, a na osnovu toga i najrentabilnijeg načina za ostvarivanje željenog radnog režima objekta.

Prikazana procedura ima daleko veći značaj ako se primeni na velike rashladne sisteme industrijskog tipa, kada mala promena nekog od parametara rada može imati ozbiljan uticaj na rad sistema, posebno u pogledu potrošnje pogonske energije; ovo se posebno napominje, jer su rashladni sistemi u suštini veliki protrošači najkvalitetnije forme energije.

Literatura:

- [1] Silin, P. M.: Technology of beet-sugar production and refining, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, and Old-bourne Press, London" 1964 .
- [2] Sugar Storage in Silos: A Slow Conditioning Approach, Vadim Kochergin Amalgamated Research, Inc., Twin Falls, Idaho
- [3] Mikus, O., L Budicek, Sugar Storage in Silos, Sugar Technology Reviews. 13 (1986), pp. 53-129
- [4] Markoski M.: Rashladni uređaji, Mašinski fakultet, Beograd, 2006.