

**OPTIMIZACIJA RASHLADNOG POSTROJENJA PRIMENOM REGULACIJE
POTISNOG PRITISKA RASHLADNOG KOMPRESORA****OPTIMIZATION OF COOLING PLANT BY APPLYING HEAD PRESSURE CONTROL
ON COOLING COMPRESSOR**Damir Kovčić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – MAŠINSTVO**

Kratka sadržaj – Rashladna postrojenja su veliki potrošači električne energije i njihova optimizacija je ključna u pogledu smanjenja potrošnje električne energije. Ovaj rad se bazira na primeru optimizacije postrojenja u okviru pivare. Na osnovu izračunatih rashladnih potreba i stvarne potrošnje energije u jednoj kalendarskoj godini izračunata je potencijalna ušteda ukoliko se postrojenje vodi pomoću vlažnog termometra umesto dosadašnjim ručno podešenim zadatim potisnim pritiskom. Ovim načinom upravljanja radom postrojenja moguće je ostvariti uštede od približno 7 %.

Ključne reči: rashladna postrojenja, regulacija potisnog pritiska; potrošnja energije

Abstract – Cooling plants are huge consumers of electrical energy and their optimization is critical in terms of energy usage. This paper is focusing on one example of cooling plant optimization. Based on calculated cooling requirements and actual energy consumption for one calendar year, optimization of cooling plant by using wet bulb temperature as set point for head pressure was researched and compared. Calculation displays that it is possible to achieve electricity consumption reduction by applying this method and that savings are around 7 %.

Key words: Cooling plants, head pressure regulation, energy usage

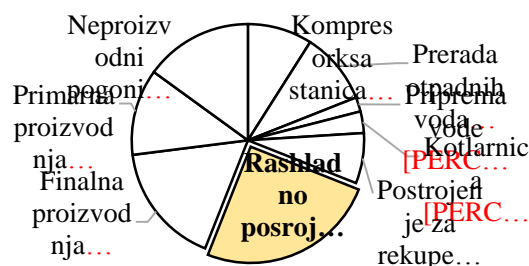
1. UVOD

Rashladna odeljenja su glavni potrošači električne energije u pivari. Njihova optimizacija u pogledu smanjenja vršne potrošnje ili promene načina rada postrojenja (kao npr. snižavanje potisnog pritiska kompresora promenom temperature kondenzacije) može da ima veliki uticaj na ukupnu potrošnju električne energije pivare.

U poslednjih nekoliko godina mnoge pivare su optimizovale svoja postrojenja u smislu ugranje frekventnih regulatora, podizanjem temperatura isparavanja rashladnih fluida itd. Sva ova unapređenja kao rezultat daju smanjenje potrošnje električne energija ali za ove vrste optimizacije neophodan je zajednički rad tehnologa i ostalih inženjera kako ne bi došlo do narušavanja kvaliteta proizvoda.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio prof. dr Miroslav Kljajić.



Slika 1. Raspodela potrošnje energije

2. PROCES PROIZVODNJE PIVA

Proizvodnja piva je šaržni proces, u toku jednog proizvodnog dana u jednom sistemu za kuvanje moguće je proizvesti šest do osam šarži u zavisnosti od recepture. Osnovna sirovina za proizvodnju piva je ječmeni slad, koji se dobija sladovanjem ječma u sladarama. Slad se doprema u pivare gde se priprema za mlevenje i ukomljavaње, osim slada u zavisnosti od podnevlja moguće je dodati određene surogate u kominu kao što su nesladovani ječam, kukuruz, riža, itd.

Tokom ukomljavaња se šećeri u ranije pomenutim sirovinama razlažu na prostije šećere, ovaj proces je neophodan kako bi fermentacija bila dobra. Sledeći korak u proizvodnji piva je bistrenje komine i nakon toga bistra sladovina je spremna za kuvanje. Tokom procesa kuvanja u sladovinu se dodaje hmelj koji pivu obezbeđuje gorčinu. Nakon kuvanja na temperaturi od 100°C sladovinu je u kratkom vremenskom intervalu potrebno ohladiti na temperaturu od +20°C kako bi je doveli na temperaturu u kojoj se obavlja dodavanje kvasca.

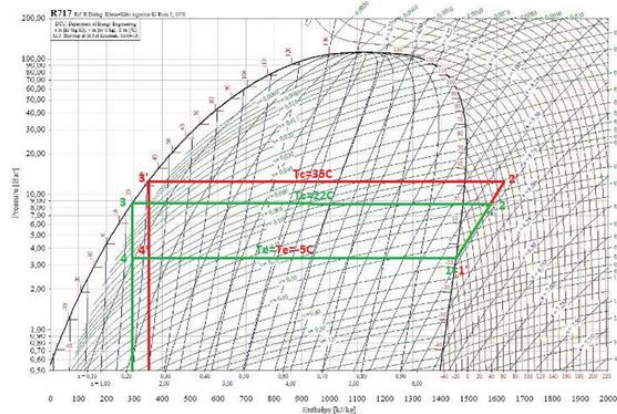
Nakon hlađenja sladovina se cevovodima transportuje prema fermentorima. Na putu do fermentora sladovina se aeriše i dodaje joj se kvasac. Fermentori su sudovi u kojima se obavlja proces fermentacije, tokom fermentacije kvasac konzumira šećer i pretvara ga u alkohol i CO₂, a kao nusproizvod nastaje toplota. Toplota podiže temperaturu i pritisak u fermentoru što u nekim slučajevima može ubrzati proces fermentacije. S obzirom da je proces fermentacije potrebno zadržati u okviru recepture koja podrazumeva određene temperature i pritiske neophodno je zadate parametre održavati pomoću rasteretnih ventila i sistema za hlađenje. Ugljen dioksid koji nastaje kao produkt fermentacije se cevovodima transportuje do postrojenja za rekuperaciju ugljen dioksida gde se prečišćava, stečnjava i u tečnom obliku skladišti na temperaturi -23°C. Za potrebe proizvodnje CO₂ se isparava i u gasnom stanju se transportuje do potrošača.

Tokom procesa fermentacije, koji traje četiri do osam dana, ćelije kvasca se talože u konusu fermentora i ispuštaju kako ne bi uticale na ukus piva. Nakon završetka primarne fermentacije mlado pivo se hladi na temperaturu koja je u rasponu od -1.5°C do 0°C kako bi se ubrzalo taloženje preostalog kvasca i bistrenje. Ovaj proces se naziva odležavanje piva. Pre punjenja u ambalažu u procesu proizvodnje piva potrebno je filtrirati pivo do receptom definisane mutnoće nakon čega se pivo pasteurizuje na temperaturi od približno $+74^{\circ}\text{C}$ nakon čega se ponovo hladi i pakuje u ambalažu.

Iz kratkog opisa procesa proizvodnje piva jasno je da hlađenje igra veoma važnu ulogu u kvalitetu i ukusu gotovog proizvoda. U potrošnji električne energije rashladna odeljenja utiču sa 20-25% ukupne potrošnje energije cele pivare. S obzirom na uticaj u ukupnoj potrošnji neophodno je baviti se optimizacijom potrošnje energije ovih postrojenja kako bi se snizili troškovi proizvodnje i uticaj pivara na životnu sredinu.

3. REGULACIJA POTISNOG PRITISKA

U polju optimizacije rada kompresora, regulacija potisnog pritiska je veoma interesantna oblast za razmatranje. Ideja je zasnovana na smanjenju potrošnje električne energije rashladnog kompresora koja je ostvarena na uštrb veće potrošnje električne energije na evaporativnim kondenzatorima. Zbog razlike u nominalnim snagama elektromotora kompresora i kondenzatora moguće je ostvariti uštede u potrošnji električne energije.

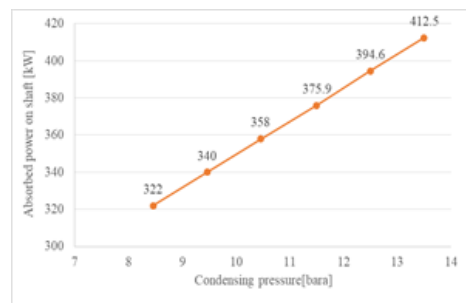


Slika 2. Dijagram pritisak-entalpija

Na slici 2 izvršeno je poređenje dva amonijska ciklusa koji započinju na istom usisnom pritisku ($T_e = T_{e'} = -5^{\circ}\text{C}$, $p = 3.5$ bara), ali imaju različite pritiske kondenzacije ($T_c = 22^{\circ}\text{C}$, $T_c' = 35^{\circ}\text{C}$, $p = 13.52$ bara). Dve vrednosti pritiska kondenzacije predstavljaju najbolji i najgori scenario za posmatrani rashladni kompresor (minimalni i maksimalni dozvoljen pritisak kondenzacije).

U slučaju nižeg pritiska kondenzacije, razmenjena količina toplote u isparivaču iznosi $Q_e = 1152.7$ kJ/kg dok u drugom slučaju razmenjena količina toplote iznosi $Q_{e'} = 1090.3$ kJ/kg. Takođe, važno je napomenuti da kompresor apsorbuje veću količinu energije kada radi na većim pritiscima. Iz podataka dobijenih od strane proizvođača opreme na nižoj vrednosti pritiska kompresor apsorbuje 340kW snage, dok na pritisku od 13.52 bara absorbovana snaga iznosi 412.5kW. Drugi parametar koji se ne sme zanemariti jeste pad volumetrijskom protoka

kroz kompresor sa porastom pritiska. Za ove dve granične vrednosti pad protoka iznosi 1.4%. Na slici 3 grafički su prikazane vrednosti apsorbovane snage kompresora.



Slika 3 promena apsorbovane snage u zavisnosti od potisnog pritiska kompresora

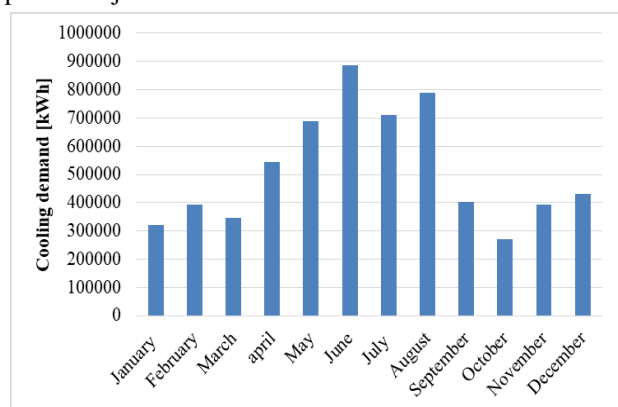
4. PRORAČUN RASHLADNIH POTREBA PIVARE

Kako bi se odredile mesečne potrebe za rashladnom energijom proračunate su dnevne potrebe za rashladnom energijom u zavisnosti od nivoa proizvodnje. Tabela 1 daje pregled rashladnih potreba u zavisnosti od obima proizvodnje.

Tabela 1. Dnevne potrebe za rashladnom energijom u zavisnosti od proizvodnje

| | # | 7 | 6 | 5 | 4 |
|---------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| Broj radni u toku dana | # | 7 | 6 | 5 | 4 |
| Zapremina uvarka | hl | 500 | | | |
| Zapremina akvanog piva | hl | 3500 | 3000 | 2500 | 2000 |
| Hladnjak za vodu | kWh | 4171 | 3575 | 2979 | 2383 |
| Fermentacija i odležavanje | kWh | 14589 | 12505 | 10421 | 8337 |
| Postrojenje za rekuperaciju CO2 | kWh | 5760 | 4937 | 4114 | 3291 |
| Stanica za uzagajanje kvasca | kWh | 3600 | 3086 | 2572 | 2058 |
| Klimatizacija objekta | kWh | 10800 | 10800 | 10800 | 10800 |
| Potrošnja u letnjem režimu | kWh | 38920 | 34903 | 30886 | 26869 |
| Potrošnja u zimskom režimu | kWh | 28120 | 24103 | 20086 | 16069 |

Broj radnih dana i nivo proizvodnje uzeti su iz istorijskih podataka kako bi se odredila dnevna i mesečna potreba za rashladnom energijom. Slika 4 predstavlja rashladne potrebe u jednoj proizvodnoj godini u zavisnosti od nivoa proizvodnje.

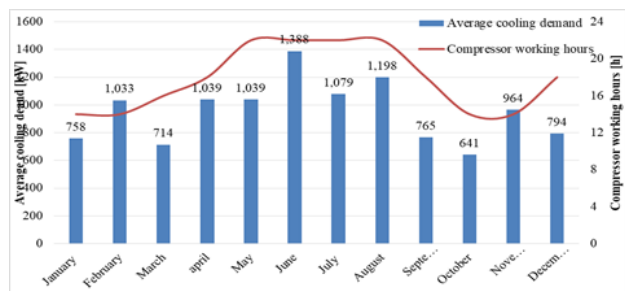


Slika 4. Mesečne rashladne potrebe

Sa prethodno prikazane slike jasno je da je u pitanju pivara koja ima visoku sezonalnost i da rashladne potrebe pivare diktira nivo proizvodnje kao i godišnje doba (leto) koje zahteva rad klimatizacije objekta.

Prosečna potreba za rashladnom energijom izračunata je kao odnos potrebne rashladne snage i realnog broja radnih sati rashladnih kompresora za određeni mesec. Na slici 5

je grafički prikazan broj radnih sati kompresora i prosečni potrebni rashladni kapacitet postrojenja.



Slika 5. Prosečan potrebni rashladni kapacitet i radni sati kompresora

Radni režim kompresora određen je na osnovu rashladnih potreba, usisnog i potisnog pritiska. Usisni pritisak je izračunat iz jednačine za prenos toplote. S obzirom da su koeficijent prelaza toplote i površina izmenjivača poznate veličine moguće je izračunati srednju logaritamsku temperaturu kao razliku prethodno dve pomenute veličine i potrebne rashladne energije.

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta t_{log}$$

S obzirom da je temperatura amonijaka jednaka unutar isparivača moguće je izračunati temperaturu isparavanja iz sledeće jednačine za srednju logaritamsku temperaturu:

$$\Delta t_{log} = \frac{(t_{i(NH3)} - t_{iz(PG)}) - (t_{i(NH3)} + t_{ul(PG)})}{\ln \left(\frac{t_{i(NH3)} - t_{iz(PG)}}{t_{i(NH3)} - t_{ul(PG)}} \right)}$$

Vrednosti usisnog pritiska koje se mogu pojaviti u predmetnom rashladnom sistemu date su u tabeli 2.

Tabela 2. Temperature isparavanja amonijaka

| Δt_{log} | $t_{out(NH3)}$ | $t_{in(PG)}$ | $t_{out(PG)}$ |
|------------------|----------------|--------------|---------------|
| -3.41 | -5.50 | 1 | -4 |
| -2.79 | -5.00 | 1 | -4 |
| -2.09 | -4.50 | 1 | -4 |
| -1.53 | -4.20 | 1 | -4 |
| -1.41 | -4.15 | 1 | -4 |
| -1.27 | -4.10 | 1 | -4 |
| -1.08 | -4.05 | 1 | -4 |

4.1. Proračun sa fiksnim potisnim pritiskom

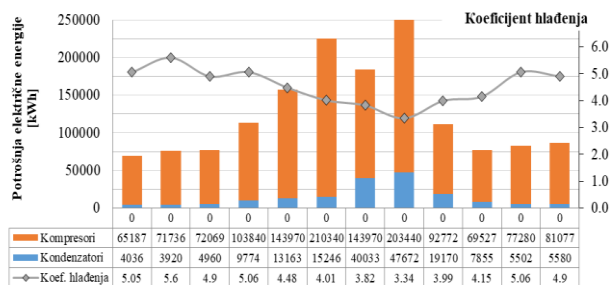
U situaciji kada rukovalac potrojenjem podešava parametre kondenzacije, postoje predefinisane vrednosti za određene mesece. Pregled parametara potrojenja je dat u tabeli 3.

Tabela 3. Parametri postrojenja sa fiksnim potisnim pritiskom

| | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|----------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Parametar potisnog pritiska | 9 | 9 | 9 | 10 | 12 | 12 | 12 | 12 | 11 | 11 | 10 | 9 |
| Temperatura kondenzacije | C | 25 | 25 | 25 | 28.1 | 33.7 | 33.7 | 33.7 | 31 | 31 | 28.1 | 25 |
| Srednja logaritamska temperatura | | -1.43 | -1.95 | -1.35 | -1.96 | -1.96 | -2.62 | -2.04 | -2.26 | -1.45 | -1.21 | -1.82 |
| Temperatura isparavanja | C | -4.2 | -4.5 | -4.2 | -4.5 | -4.5 | -5 | -4.5 | -5 | -4.2 | -4.1 | -4.5 |

Pomoću softvera koji je obezbedila kompanija MYCOM dobijeni su podaci o apsorbovanoj snazi i rashladnom kapacitetu svakog kompresora u zavisnosti od usisnog i potisnog pritiska. Vodeći kompresor je odabran tako da

obezbeduje maksimalnu efikasnost u zavisnosti od rashladnih potreba pivare. Na slici 6 prikazana je potrošnja električne energije rashladnog postrojenja po mesecima u zavisnosti od obima proizvodnje predstavljenim na slici 4.



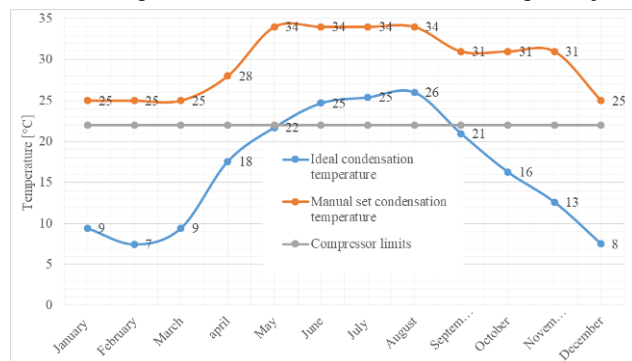
Slika 6. Potrošnja sa fiksnim parametrom potisnog pritiska

4.2. Proračun sa promenljivim potisnim pritiskom

Regulacija potisnog pritiska se vrši u zavisnosti od atmosferskih uslova. Idealna temperatura kondenzacije se računa pomoću softvera, a u idealnim uslovima temperatura kondenzacije se nalazi 8°C iznad izmerene temperature vlažnog termometra. Za postrojenje koje je predmet rada postoje određena ograničenja u pogledu minimalnog potisnog pritiska kako bi se ostvarilo efikasno razdvajanje ulja za podmazivanje kompresora i rashladnog fluida. U slučaju kompresora MYCOM VLD250-N i VLD200-N, koji su instalirani na postrojenju, minimalni dozvoljeni potisni pritisak je 8.1bar[g] što odgovara temperaturi kondenzacije od 22°C.

Osnovna ideja je da se smanji potrošnja električne energije na elektromotoru kompresora, na račun povećanja potrošnje električne energije kondenzatora. Ukupni bilans je smanjenje ukupne potrošnje rashladnog postrojenja što povećava COP postrojenja.

Slika 7 predstavlja razlik između predefinisanih parametara kondenzacije i proračunatih parametara na osnovu prosečne vrednosti tačke rose po mesecima. Temperatura od 22°C predstavlja graničnu vrednost i sve temperature kondenzacije koje se nalaze ispod nisu u opticaju kako bi se zaštitila oprema od eventualne štete tokom eksploatacije.



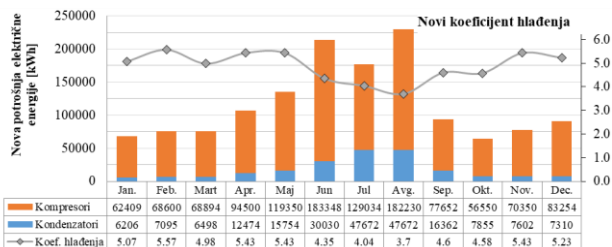
Slika 7. Razlika između kalkuliranih i predefinisanih vrednosti

Vodeći kompresor je izabran po istim kriterijumima kao i u slučaju fiksnog parametra kondenzacija, razlika u apsorbovanoj snazi je rezultat manjeg rada kompresora usled nižeg potisnog pritiska.

Kapacitet evaporativnih kondenzatora je podesen tako da zadovoljava dvostruke kapacitete rashladnih kompresora u zimskom periodu, dok je u letnjem periodu kapacitet

utrostručen kako bi se osigurali da se parametri zadrže u zadatim granicama. Regulacija kondenzatora je kaskadna i to takva da se prvo svi kondenzatori pokreću redno na nižim brzinama ventilatora u kombinaciji sa vodenom pumpom, a nakon toga u slučaju potrebe pale se druge brzine na ventilatorima.

Kada se Slika 6, uporedi sa Slikom 8 se vidi da je potrošnja električne energije na kondenzatorima porasla, dok se potrošnja energije na kompresorima smanjila. Takođe može se uočiti da je COP potrojenja porastao kako na mesečnom tako i na godišnjem nivou.



Slika 8. Potrošnja energije sa promenljivim potisnim pritiskom

5. ZAKLJUČAK

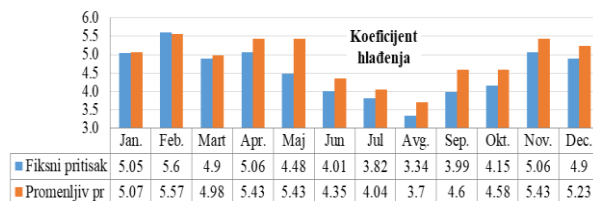
Tema ovog rada je rashladno postrojenje na kom je predstavljena kalkulacija koja prikazuje potencijal za uštedu energije. Cilj kalkulacije je bio poređenje fiksnog parametra potisnog pritiska sa parametrom potisnog pritiska koji je vođen vlažnim termometrom.

Rashladni kapaciteti su proračunati na osnovu istorijskih podataka za jednu proizvodnu godinu, za potrebe proračuna korišćeni su i podaci o rashladnim kompresorima i evaporativnim kondenzatorima. Na osnovu ulaznih podataka izračunat je COP za opciju vođenja postrojenja pomoću fiksnog parametra potisnog pritiska.

Za isto potrojenje kreiran je model u kome se parameter potisnog pritiska menjao u zavisnosti od temperature vlažnog termometra. Za potrebe proračuna korišćene su prosečne vrednosti atmosferskih uslova po mesecima.

Proračunom je prikazano da je moguće ostvariti uštede u potrošnji električne energije primenom regulacije potisnog pritiska na osnovu atmosferskih uslova i da uštede iznose približno 7 % što u za pivaru koja je uzeta za primer iznosi uštedu od 100.000 kWh na godišnjem nivou. Da bi se ovakva regulacija ostvarila neophodne su određene investicije kako bi se povećao rashladni kapacitet kondenzatora. U slučaju pivare koja je razmatrana dodatni rashladni kapaciteti postoje.

Najveći potencijal za uštede jeste u periodu proleće-jesen gde su primećene najveće oscilacije u dnevnim temperaturama, kao i razlike dnevnih temperatura u odnosu na noćne. Slika 9 prikazuje COP rashladnog postrojenja u zavisnosti od zadatah parametara na postrojenju.



Slika 9. COP rashladnog postrojenja

6. LITERATURA

- [1] I. Vanjur, V. Sovilj, Mogućnosti smanjenja potrošnje električne energije amonijačnih rashladnih instalacija u velikim pivarama, Međunarodni kongres i izložba o KGH
- [2] K. A. Manske, D. T. Reindl, S. A. Klein, "Evaporative Condenser Control in Industrial Refrigeration Systems", International Journal of Refrigeration, Vol. 24, No. 7, pp 676-691, 2001
- [3] R. J. Love, D. J. Cleland, I. Merts, B Eaton, "What is the optimum compressor discharge pressure set point for condensers", IRHACE technical conference, 2005
- [4] T. W. Davies, "A universal floating head system", international Congress of Refrigeration, ICR0079, Washington D.C, 2003
- [5] D. Demma, "Understanding the fundamentals of head pressure control", 2004
- [6] MYCOM SCREW COMPRESSOR design software

Kratka biografija:



Damir Kovčić rođen je u Novom Sadu 1990. god, gde je završio osnovnu i srednju školu. Diplomirao je 2013.god na Fakultetu tehničkih nauka, studijski program Mašinstvo, smer Energetika i procesna tehnika. Zaposlen je u kompaniji "Heineken".