

Jednostavan pristup procjeni djelovanja sustava hlađenja u industriji prerade prirodnog plina

A. Bahadori

IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Sustavi hlađenja su uobičajeni u industriji prerade prirodnog plina i procesima povezanim s rafiniranjem nafte i petrokemijskom i kemijskom industrijom. Neki od primjena hlađenja uključuju proizvodnju kapljevina prirodnog plina (NGL), ukapljenog prirodnog plina (LNG), kontrolu rosišta ugljikovodika, kondenzaciju refluksa za lake frakcionatore ugljikovodika i postrojenja za obradu ukapljenog prirodnog plina (LNG). U ovom je radu formuliran, za korištenje jednostavan program, postizanja pravilnog određivanja glavnih konstrukcijskih parametara trostupanjskih sustava koji kao rashladno sredstvo koriste propan. Predloženi program je prikladan za temperature isparavanja od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ i temperature kondenzacije rashladnog sredstva između $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rezultati pokazuju da se rezultati prediktivnog programa vrlo dobro podudaraju s podacima izvještaja pri čemu se srednje apsolutno odstupanje kreće oko 1,4%. Program razvijen u ovoj studiji može biti od velike praktične vrijednosti za inženjere i znanstvenike jer im omogućuje brzu provjeru propanskih sustava hlađenja kod različitih uvjeta. Osobito će inženjeri prerade prirodnog plina i inženjeri kemije utvrditi da je predloženi sustav lak za korištenje s jasnim proračunima koji ne uključuju složene izraze.

Ključne riječi: propan, hlađenje, opterećenje kondenzatora, prirodni plin, snaga kompresora

1. Uvod

Sustavi hlađenja se često koriste u industriji prerade prirodnog plina i procesima povezanim s rafiniranjem nafte, petrokemijskom i kemijskom industrijom. Propanski sustavi hlađenja često su nužni u industriji prerade prirodnog plina kako bi omogućili potrebno hlađenje za kondenzaciju teških komponenti mokrog plina.⁸ U tom procesu se struja prirodnog plina hladi vanjskim propanskim sustavom hlađenja i nakon toga se u separatoru niske temperature, odvajaju i stabiliziraju u koloni kondenzirane tekuće faze.¹² Na sl. 1. prikazan je shematski dijagram toka trostupanjskog propanskog sustava hlađenja. Propan ima multi potencijal razaranja ozona i zanemarivu mogućnost globalnog zagrijavanja.⁴ Propan ima izvrsna termodinamička svojstva vrlo slična svojstvima amonijaka. Molarna masa 44 je idealna za turbokompresore a to je samo jedna trećina onog što imaju njegovi halokarbonski suparnici.¹⁴ Propan je jeftin i svagdje dostupan.⁴ Najveća prednost propana u usporedbi s amonijakom je njegova netoksičnost.⁴ Međutim njegova zapaljivost je ozbiljan problem pa je od najveće važnosti pouzdana konstrukcija i način rada. Ovaj se nedostatak može izbjeći njegovim korištenjem kao rashladnog sredstva u LT ciklusu.⁴ Važno je primijetiti da se u usporedbi s amonijakom, propan može koristiti za hlađenje na vrlo niske temperature. (između $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), zbog njegove niže normalne temperature vrenja (NBP -normal boiling point).⁴

Došlo je do velikog povećanja instalacija sustava baziranih na CO_2 i objavljeni su brojni izvještaji su označili njihova povoljna termodinamička svojstva i pogodno djelovanje na okoliš.¹¹ Propan ne djeluje

korozivno na materijale kao što su aluminij, bronca, bakar, nehrđajući čelik, srebro itd. Prema tome on je potpuno usklađen s postojećim komponentama kao što su izmjenjivači topline, ekspanzijski ventili, kompresori, maziva i bakreni pribor za cijevi, koji se trenutačno koriste u sustavima za hlađenje.⁸

Sustavi za hlađenje koriste jednu, dvije, tri ili četiri faze kompresije uspješno se koriste za različite svrhe. Broj nivoa hlađenja uglavnom ovisi o broju potrebnih faza kompresije, toplinskom opterećenju između faza, ekonomici i vrsti kompresije.⁸ Dodatno tome brige za okoliš povećale su zanimanje za korištenje prirodnih rashladnih sredstava, kao što su ugljikovodici (npr. izobutan i smjese) kao alternative sintetskim fluorokarbonskim rashladnim sredstvima u mnogobrojnim primjenama.^{10,17,15,13,16} Općenito, ova studija iznosi značajne prednosti kao i ekonomske koristi primjene ugljikovodika u usporedbi s fluorokarbonom. Obzirom na izneseno, potrebno je razviti sigurnu i jednostavnu metodu, lakšu od postojećih pristupa, manje kompliciranu s manje izračunavanja, za predviđanje snage kompresora i opterećenja kondenzatora po rashladnom opterećenju (kapacitetu rashladnog uređaja) u trostupanjskom sustavu hlađenja propanom. Članak na sistematski način objašnjava formulaciju takvog prediktivnog programa uz prikaz jednostavnog primjera koji pokazuje jednostavnost modela i korisnost takvih programa.

2. Metodika razvoja prediktivnog programa

Budući da mnoga postrojenja za preradu plina trebaju mehaničko hlađenje i zbog složenosti poopćavanja

Tablica 1. Usuglašeni koeficijenti za jednadžbe 8 do 11

Koeficijent	Vrijednost snage kompresora u kW po rashladnom opterećenju u MW	Vrijednost opterećenja kondenzatora u kW po MW rashladnog sredstva
A_1	$-9,939\ 664\ 301 \times 10^6$	$-2,549\ 657\ 006\ 0 \times 10^6$
B_1	$1,295\ 718\ 054 \times 10^4$	$2,718\ 696\ 533\ 7 \times 10^4$
C_1	$-5,086\ 891\ 269 \times 10^1$	$-9,452\ 002\ 919 \times 10^1$
D_1	$6,320\ 882\ 307 \times 10^{-2}$	$1,080\ 9134\ 274 \times 10^{-1}$
A_2	$8,959\ 771\ 407\ 9 \times 10^3$	$3,968\ 894\ 433\ 8 \times 10^4$
B_2	$-1,256\ 891\ 481\ 7 \times 10^2$	$-4,124\ 032\ 533\ 9 \times 10^2$
C_2	$5,118\ 715\ 087\ 9 \times 10^{-1}$	$1,406\ 753\ 656$
D_2	$-6,495\ 788\ 495 \times 10^{-4}$	$-1,583\ 143\ 379\ 5 \times 10^{-3}$
A_3	$-2,456\ 126\ 126\ 2 \times 10^1$	$-1,880\ 150\ 920\ 07 \times 10^2$
B_3	$3,894\ 571\ 235\ 4 \times 10^{-1}$	$1,926\ 689\ 16$
C_3	$-1,672\ 973\ 379 \times 10^{-3}$	$-6,502\ 325\ 916\ 8 \times 10^{-6}$
D_3	$2,186\ 667\ 067 \times 10^{-6}$	$7,251\ 734\ 483\ 4 \times 10^{-3}$
A_4	$1,741\ 918\ 922\ 6 \times 10^{-2}$	$2,789\ 872\ 277\ 94 \times 10^{-1}$
B_4	$-3,657\ 081\ 906 \times 10^{-4}$	$-2,835\ 917\ 751\ 2 \times 10^{-3}$
C_4	$1,7239\ 116\ 599 \times 10^{-6}$	$9,510\ 529\ 773\ 3 \times 10^{-6}$
D_4	$-2,3607\ 788\ 587 \times 10^{-9}$	$-1,054\ 980\ 444\ 2 \times 10^{-8}$

sustava hlađenja, trebalo bi razviti prediktivni alat za modularni pristup projektiranju sustava hlađenja. U cilju primjene predloženog alata na većinu komercijalno dostupnih kompresora, pretpostavljena je politropska učinkovitost od 0,77.⁸ Politropska učinkovitost pretvorena je u izentropsku učinkovitost što uključuje djelovanja stupanja kompresije i omjera specifične topline kod konstantnog tlaka naprama specifičnoj toplini kod konstantnog volumena ($k = C_p/C_v$), za određeno rashladno sredstvo.⁸ Za dobro usklađen i učinkovit rad kompresora namješten je isti stupanj kompresije između faza.⁸ Nivo hlađenja definiran je kao temperatura kondenzacije pare na izlazu iz isparivača. Tlakovi na usisnom kompresoru i usisnim mlaznicama sa strane podešeni su na 10 kPa (1,45 psi), što omogućuje pad tlaka. Ovaj program ujedno uključuje pad tlaka od 70 kPa (10,15 psi) kroz propanski rashladni kondenzator. Predloženi program je superioran zbog jasne numeričke osnovice na temelju Vandermondeove matrice u čemu se odgovarajući koeficijenti mogu ponovo brzo podesiti za različite slučajeve.

2.1. Vandermondeova matrica

Vandermondova matrica je matrica s članovima geometrijske progresije u svakom retku, tj. $m \times n$ matrica.⁹

$$V = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1 & \alpha_1^2 & \dots & \alpha_1^{n-1} \\ 1 & \alpha_2 & \alpha_2^2 & \dots & \alpha_2^{n-1} \\ 1 & \alpha_3 & \alpha_3^2 & \dots & \alpha_3^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \alpha_m & \alpha_m^2 & \dots & \alpha_m^{n-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ili

$$V_{i,j} = \alpha_i^{j-1} \quad (2)$$

za sve indekse i i j . Determinanta kvadratne Vandermondeove matrice (gdje je $m = n$) može se iskazati kao.⁹

$$\det(V) = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (\alpha_j - \alpha_i) \quad (3)$$

Vandermondeove matrica procjenjuje polinom na skupu točaka, točno ona transformira polinom $a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{n-1}x^{n-1}$ na vrijednosti koje polinom ima na točkama od α_i . Vandermondeova determinanta koja je za različite točke α_i uvijek različita od nule, pokazuje da se za različite točke, mapiranje iz koeficijenata za vrijednosti na tim točkama podudara jedan na jedan i tako problem interpolacije ima jedinstveno rješenje a rezultat se naziva "teorem sa samo jednim rješenjem".⁷

Oni se koriste u interpolaciji polinoma, jer rješavanje sustava linearnih jednadžbi $Vu = y$ za u s V i $m \times n$ Vandermonde matrij j ekvivalent za pronalaženje koeficijenata u_j polinoma.⁷

$$\psi(x) = \sum_{j=0}^{n-1} u_j x^j \quad (4)$$

stupnja $\leq n-1$ koji ima svojstvo:

$$\psi(\alpha_i) = y_i \quad \text{za } i = 1, \dots, m \quad (5)$$

Vandermondeove matrica se lako može inventirati pomoću Lagrangeovog baznog polinoma. Svaki stupac je koeficijent Lagrangeovog baznog polinoma, s padajućim članovima u rastućem redu. Rezultat rješenje interpolacijskog problema zove se Lagrangeov polinom.⁷

2.2. Metodologija razvoja prediktivnog programa

Podaci koji su potrebni za razvoj prediktivnog programa uključuju snagu kompresora i opterećenje kondenzatora po rashladnom opterećenju (kapacitetu rashladnog uređaja) u trostupanjnskom sustavu hlađenja propanom, temperaturu isparivača i temperaturu kondenzacije sredstva za hlađenje. U ovom radu su snaga kompresora, opterećenje kondenzatora po rashladnom opterećenju u trostupanjnskom sustavu hlađenja propanom, predvođeni brzo pomoću predloženog jednostavnog programa. Za razvoj tog jednostavnog programa primjenjena je slijedeća metodologija.²

Prvo, snagu kompresora i opterećenje kondenzatora po rashladnom opterećenju u trostupanjnskom sustavu hlađenja propanom su korelirani kao funkcija temperature isparivača (K) za različite temperature kondenzacije (K). Zatim, izračunati koeficijenti za te polinome su korelirani kao funkcija temperature kondenzacije sredstva za hlađenje. Izvedeni polinomi korišteni su za izračun novih koeficijenata za jednadžbe (6) i (7) za predviđanje snage kompresora i opterećenje kondenzatora po rashladnom opterećenju (kapacitetu rashladnog uređaja) u trostupanjnskom sustavu hlađenja propanom Tablica 1 prikazuje podešene koeficijente za jednadžbe (8) do (11) za postotak smanjenja tlaka u kompresoru koji je pretvoren u paru u konstrukciji bojlera sa sustavom smanjenja tlaka, što se slaže s pouzdanim podacima.⁸

Ukratko, za usuglašavanje koeficijenta korelacije, ponovljeni su slijedeći koraci³:

1. Koreliraj snagu kompresora i opterećenja kondenzatora po rashladnom opterećenju (kapacitetu rashladnog uređaja) u trostupanjnskom sustavu hlađenja propanom, kao funkciju temperature isparivača (K) za različite temperature kondenzacije (K).
2. Ponovi korak 1 za druge temperature kondenzacije.
3. Koreliraj odgovarajuće koeficijente polinoma, koji su dobiveni u prijašnjim koracima, u odnosu na temperaturu kondenzacije rashladnog sredstva (T_{cd}), $a = f(T_{cd})$, $b = f(T_{cd})$, $c = f(T_{cd})$, $d = f(T_{cd})$ [vidi jednadžbe (8) - (11)].
4. Jednadžbe (6) i (7) predstavljaju predložene jednadžbe, u kojima su korištena četiri koeficijenta za korelaciju snage kompresora i opterećenja kondenzatora po rashladnom opterećenju u trostupanjnskom sustavu hlađenja propanom, kao funkciju temperature isparivača (K) i temperature kondenzacije (K) sredstva za hlađenje

gdje su odgovarajući koeficijenti dani u (tablici 1).

$$P_c = a + b\tau + c\tau^2 + d\tau^3 \quad (6)$$

$$Q = a + b\tau + c\tau^2 + d\tau^3 \quad (7)$$

gdje su:

$$a = A_1 + B_1 T_{cd} + C_1 T_{cd}^2 + D_1 T_{cd}^3 \quad (8)$$

$$b = A_2 + B_2 T_{cd} + C_2 T_{cd}^2 + D_2 T_{cd}^3 \quad (9)$$

$$c = A_3 + B_3 T_{cd} + C_3 T_{cd}^2 + D_3 T_{cd}^3 \quad (10)$$

$$d = A_4 + B_4 T_{cd} + C_4 T_{cd}^2 + D_4 T_{cd}^3 \quad (11)$$

Optimalno podešeni koeficijenti (A , B , C i D) pomažu u određivanju podataka, snage kompresora i opterećenja kondenzatora po rashladnom opterećenju u trostupanjnskom sustavu hlađenja propanom, kao funkcije temperature isparivača (K) i temperature kondenzacije (K) sredstva za hlađenje, danih u literaturi.⁸

3. Rezultati

Na slici 2. prikazan je razvijeni računalni program ovog rada. Slika 3. prikazuje izvođenje prediktivnog programa za određivanje snage kompresora i opterećenja kondenzatora po rashladnom opterećenju u trofaznom sustavu hlađenja propanom kao funkcije temperature isparivača i temperature kondenzacije sredstva za hlađenje. Tablica 2 pokazuje da se predloženi prediktivni program vrlo dobro podudara s objavljenim podacima⁸, gdje je prosječno apsolutno odstupanje 1,3%. Danas ne postoji prediktivni program, jednostavan za korištenje, za sigurnu procjenu snage kompresora i funkcije kondenzatora u trofaznom sustavu hlađenja propanom. S obzirom na to naši naponi su bili usmjereni na formuliranje metode, jednostavne za korištenje, koja može pomoći inženjerima i istraživačima. Očekuje se da će naša nastojanja u tim istraživanjima utrti put postizanju sigurne predikcije snage kompresora i opterećenja kondenzatora po rashladnom opterećenju u trofaznom sustavu hlađenja propanom kod različitim uvjeta, što će onda moći koristiti inženjeri i znanstvenici za periodično praćenje osnovnih parametara. Predloženi prediktivni program, predložen u ovom radu, je jednostavna i izvanredna formula nepostojeća u literaturi. Tipičan primjer dan je u nastavku, kako bi se prikazala jednostavnost, povezana s korištenjem predloženog prediktivnog alata, za brzu procjenu snage kompresora i opterećenja kondenzatora po rashladnom opterećenju za funkciju hlađenja u trofaznom sustavu hlađenja propanom (Sl. 1).

3.1 Primjer

Procjena zahtjeva snage i funkcije kondenzatora u trofaznom sustavu hlađenja propanom koja će osigurati $26,4 \times 10^6$ kJh⁻¹ (7,325 MW) za proces hlađenja kod temperature rashladne tekućine -29 °C i temperaturu kondenzatora od 38 °C.

3.2. Proračun i analiza

Jedinična kočna snaga u kW, dobivena iz jednadžbi [(6) i (8) - (11)]:

$$a = 1,690\,943\,464 \times 10^4 \text{ (iz jednadžbe 8)}$$

$$b = -1,596\,817\,619 \times 10^2 \text{ (iz jednadžbe 9)}$$

$$c = 5,212\,083\,406 \times 10^{-1} \text{ (iz jednadžbe 10)}$$

$$d = -5,871\,494\,52 \times 10^{-4} \text{ (iz jednadžbe 11)}$$

$$BP = 4,468\,230\,25 \times 10^2 \text{ (iz jednadžbe 6)}$$

Tablica 2. Točnost predloženog prediktivnog programa za izračunavanje snage kompresora u kW po rashladnom opterećenju u MW za trostupanjski sustav				
Temperatura kondenzacije rashladnog sredstva, K	Temperatura isparavanja, K	Podaci iz izvještaja za snagu kompresora u kW po rashladnom opterećenju u MW za trostupanjski sustav hlađenja propanom ^a	Izračunate vrijednosti snage kompresora u kW po rashladnom opterećenju u MW za trostupanjski sustav hlađenja propanom	Prosječno apsolutno odstupanje u postotcima
288,15	233,15	400	400,04	0,10
288,15	273,15	90	89,20	0,88
288,15	283,15	30	31,31	4,36
293,15	238,15	380	379,61	0,10
293,15	263,15	177	176,89	0,06
293,15	288,15	30	31,31	4,37
298,15	243,15	368	364,12	1,05
298,15	263,15	208	205,99	0,96
298,15	288,15	59	59,70	1,19
303,15	248,15	355	351,98	0,85
303,15	268,15	205	202,14	1,39
303,15	288,15	85	85,95	1,12
308,15	243,15	440	434,98	1,14
308,15	263,15	268	264,36	1,35
308,15	298,15	52	55,52	6,76
313,15	233,15	585	586,58	0,27
313,15	263,15	300	294,64	1,79
313,15	303,15	52	53,57	3,02
318,15	233,15	628	628,24	0,04
318,15	253,15	412	411,31	0,16
318,15	303,15	78	78,52	0,66
323,15	243,15	550	552,11	0,38
323,15	263,15	360	359,96	0,11
323,15	283,15	218	216,73	0,58
328,15	313,15	72	75,91	5,43
328,15	318,15	50	50,31	0,62
328,15	323,15	25	24,75	1,00
333,15	313,15	100	100,89	0,89
333,15	318,15	75	74,34	0,88
333,15	323,15	50	47,92	4,16
Prosječno apsolutno odstupanje u postotcima (AADP)				1,38%

Kočna snaga je 447 kW po MW rashladnog opterećenja (kapacitetu rashladnog uređaja) kod temperature isparivača od - 29 °C i temperature kondenzatora od 38 °C.

Faktor opterećenja kondenzatora za ovaj slučaj iz jednadžbi (7 - 11):

$$a = 1,479\ 411\ 438\ 8 \times 10^4 \text{ (iz jednadžbe 8)}$$

$$b = -1,266\ 830\ 674\ 1 \times 10^2 \text{ (iz jednadžbe 9)}$$

$$c = 4,0559\ 141\ 317 \times 10^{-1} \text{ (iz jednadžbe 10)}$$

$$d = -4,530\ 344\ 358 \times 10^{-4} \text{ (iz jednadžbe 11)}$$

$$Q = 1,448\ 154\ 078 \times 10^3 \text{ (iz jednadžbe 7)}$$

Iz toga slijedi da je faktor opterećenja kondenzatora 1 448 kW po MW rashladnog opterećenja za iste temperature isparivača i kondenzatora. Otuda su ukupna snaga i opterećenje kondenzatora:

$$BP = (447) (7,325) = 3\ 274\ \text{kW}$$

$$Q_{cd} = (7,325) (1448) = 10\ 606\ \text{kW}$$

4. Zaključak

U predstavljenom radu formuliran je program, jednostavan za korištenje, lakši od postojećih koncepata,

manje kompliciran s manje proračuna s jednostavnijim i vremenski kraćim izračunavanjima. Program omogućuje određivanje odgovarajuće snage kompresora i opterećenja kondenzatora po rashladnom opterećenju u trofaznom sustavu hlađenja propanom kao funkcije temperature isparivača i temperature kondenzacije sredstva za hlađenje, što su važni parametri koji se moraju uzeti prilikom konstrukcije svakog rashladnog sustava. Za razliku od složenih matematičkih pristupa za procjenu odgovarajuće snage kompresora i opterećenja kondenzatora po rashladnom opterećenju u trofaznom sustavu hlađenja propanom, kao funkcije temperature isparivača i temperature kondenzacije sredstva za hlađenje, predloženi prediktivni program je jednostavan za korištenje i biti će od velike pomoći procesnim inženjerima posebno onima koji se bave obradom plina. Dodatno tome, nivo matematičkih formulacija, povezan s procjenom snage kompresora i opterećenja kondenzatora po rashladnom opterećenju, lako je obradiv od strane procesnih inženjere bez detaljnijeg poznavanja matematike. Prikazani primjer, koji bi trebao biti od koristiti procesnim inženjerima, jasno pokazuje korisnost predloženog programa. Nadalje, procjene su vrlo sigurne što je potvrđeno usporedbom s podacima iz literature (sa srednjim apsolutnim odstupanjem koje se kreće oko 1,38%) i trebale bi u kraće vrijeme pomoći pri konstrukciji i operativnim modifikacijama. Predložena metoda je superiorna zbog svoje sigurnosti i jasne matematičke pozadine pri čemu se odgovarajući koeficijenti mogu brzo ponovo podesiti za različite slučajeve.

Popis oznaka:

A	Usuglašeni koeficijent
B	Usuglašeni koeficijent
B_p	Efektivna snaga motora kompresora, kW
C	Usuglašeni koeficijent
D	Usuglašeni koeficijent
i	Indeks matrice
j	Indeks matrice
m	Broj stupca matrice
n	Broj retka matrice
P	Snaga kompresora po rashladnom opterećenju, kW(MW) ⁻¹
Q	Opterećenje kondenzatora po rashladnom opterećenju, kW(MW) ⁻¹
T_{cd}	Temperatura kondenzacije rashladnog sredstva, K
u	Koeficijent polinoma
V	Vandermondova matrica
x	polinomska nezavisna varijabla

Grčka slova:

α	Element matrice
ψ	Polinom
τ	Temperatura isparivača, K



Autor:

Alireza Bahadori, Environmental Innovations Research Centre, School of Environmental Science & Management, Southern Cross University, PO Box 157, Lismore, New South Wales, 2480, Australia
 e-mail: bahadori.alireza@gmail.com; al.bahadori@gmail.com
 Tel: +61 422 789 572

UDK : 662.767 : 622.276/.279 : 547.2 : 621.56

662.767 prirodni plin
 622.276/.279 proizvodnja plina
 547.2 propan
 621.56 hlađenje u industriji