

Analiza subrăcirii fluidelor frigorifice în instalațiile frigorifice pentru climatizare cu vaporizare directă

Analysis subcooling refrigeration fluids in refrigeration for direct evaporative air conditioners

drd. ing. Cătălin Georgian NEGRUȚIU, cnegrutiu77@gmail.com, Romania
Prof. Dr. Ing. Dragoș HERA, hera.dragos@yahoo.com, Romania

Abstract:

There are a many possibilities to subcool the refrigerants. In this article are analysed these alternatives with advantages and corresponding disadvantages. For different refrigerants used for HVAC applications it will be presented the subcooling effect on the performance of the refrigeration system (COP, Q_o).

Key words: refrigeration system; sub-cooling; refrigerant; heat exchanger

1. GENERALITĂȚI

Într-o instalație frigorifică procesul de subrăcire are loc la ieșirea din condensator, înainte ca agentul frigorific să ajungă în ventilul de laminare. Este important ca la intrarea în ventilul de laminare agentul frigorific să fie total în stare lichidă, rezultând astfel o bună funcționare a ventilului.

Analizând procesul de subrăcire se disting mai multe moduri de a realiza acest proces:

- **subrăcire cu un agent extern** (aer sau apă):
 - prin mărirea dimensiunilor constructive ale condensatorului cu suprafața echivalentă a subrăcitorului;
 - prin prevederea unui schimbător de căldură suplimentar cu rol de subrăcitor.
- **subrăcire internă:**
 - utilizând un schimbător de căldură regenerativ de tip subrăcitor de lichid/supraîncălzitor de vapori. Subrăcirea lichidului se realizează pe seama supraîncălzirii vaporilor rezultați din vaporizator;
 - prin vaporizarea internă a unei părți a agentului frigorific lichid rezultat din condensator.

Pentru evidențierea avantajului subrăcirii, lucrarea analizează aceste variante comparativ cu instalația frigorifică fără subrăcire. Analiza este realizată pentru instalațiile frigorifice utilizate la climatizarea aerului. În situația subrăcirii cu agent extern acesta este aerul.

Analiza este realizată pentru mai mulți agenți de lucru (R410A, R134a, R407C, R22, R32) în condițiile:

- temperatură de vaporizare: 6°C;
- temperatura vaporilor la ieșirea din vaporizator: 13°C;
- temperatură de condensare: 45°C;

Rezultatele calculelor [3] sunt comparate cu date obținute pe o instalație experimentală cu puterea frigorifică 11,2 kW (din acest motiv și calculele se fac pentru această putere frigorifică).

Pentru analizarea funcționării instalației frigorifice se va folosi reprezentarea schematică din figura 1.

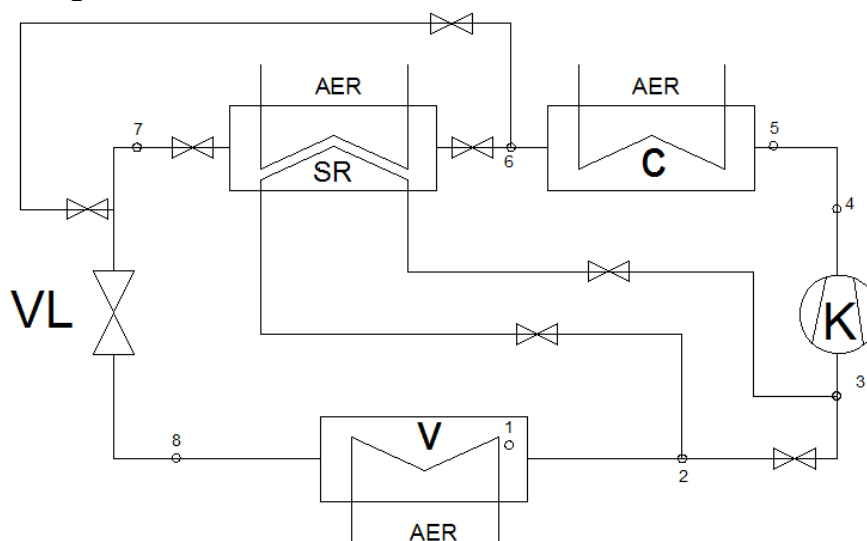


Figura 1. Funcționarea instalației frigorifice în funcție de procesul de subrăcire

- a) Procesul 124568 – funcționare fără subrăcire
- b) Procesul – 1245678 – instalație cu subrăcire externă cu aer
- c) Procesul – 12345678 – instalație cu subrăcire internă cu schimbător de căldură regenerativ

2. INSTALAȚIA FRIGORIFICĂ FĂRĂ SUBRĂCIRE

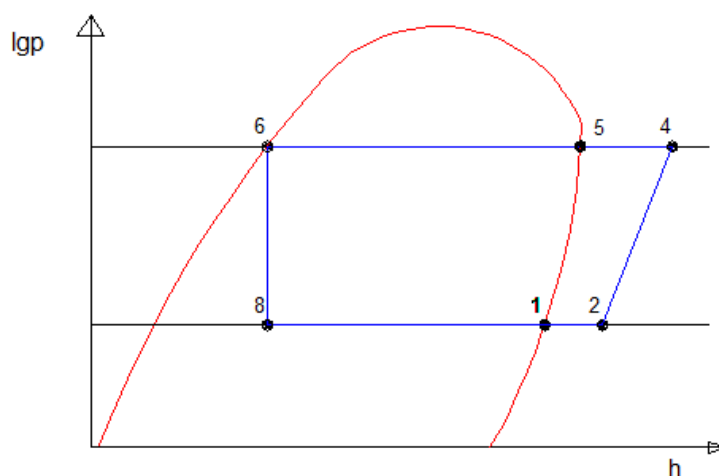


Figura 2. Ciclul termodinamic teoretic pentru o instalație frigorifică fără subrăcire

Procesul 124568 este prezentat teoretic în digarama lgph pentru a avea o imagine detaliată a proceselor termodinamice. Analiza funcționării instalației s-a făcut pentru mai mulți agenți frigorifici pentru a observa impactul schimbării agentului frigorific asupra eficienței instalației. În figura 3 se evidențiază performanțele fluidului frigorific utilizat (COP).

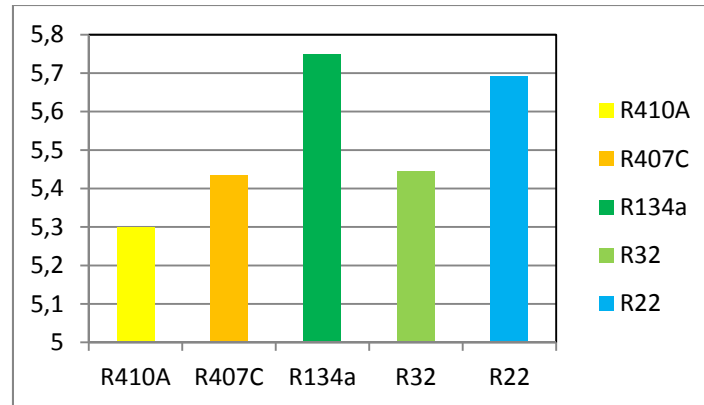


Figura 3. Variația COP, pentru o instalație frigorifică fără proces de subrăcire, în funcție de tipul agentului frigorific

Astfel R134a și R22 sunt cei mai performanți agenți, iar R410A este cel mai inefficient.

3. INSTALAȚIA FRIGORIFICĂ CU SUBRĂCIRE

Este cunoscut efectul benefic al subrăcirii lichidului asupra performanțelor instalațiilor frigorifice, prin reducerea entalpiei masice a lichidului înaintea ventilului de laminare (deci a vaporizatorului), încât efectul frigorific masic (q_0) crește. Acest lucru este cu atât mai important la fluidele frigorifice cu q_0 scăzut (freonii).

3. 1. Evacuarea căldurii prin subrăcirea lichidului către un fluid exterior de răcire (aer)

Considerând situația unui sistem de climatizare, de mici dimensiuni, în această analiză, fluidul exterior de răcire va fi considerat aerul. Astfel, dezavantajul introdus de temperatura ridicată a fluidului exterior, conduce la un efect de subrăcire a lichidului redus (3..5°C).

Analizând figura 1b. suntem în situația ciclului termodinamic 1245678, prezentat și în figura 4.

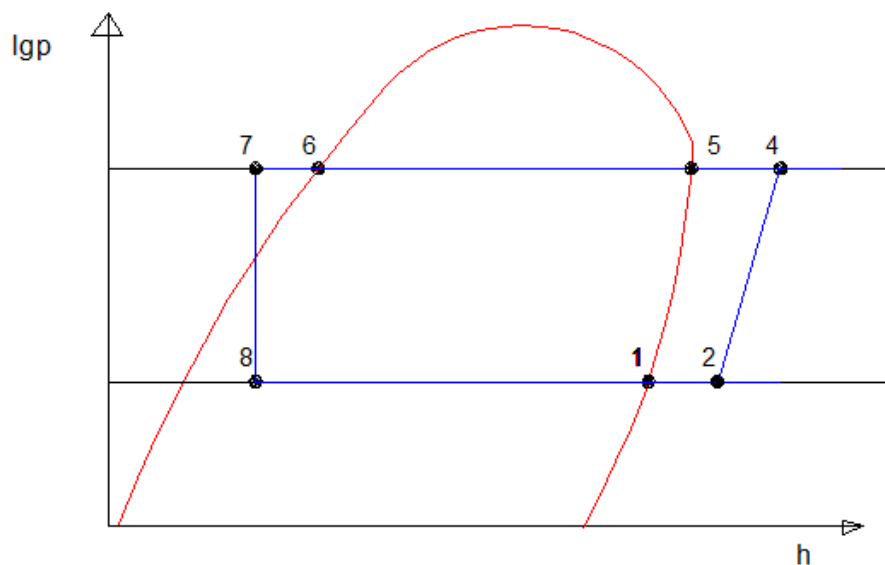


Figura 4. Ciclul termodinamic teoretic pentru o instalație frigorifică cu subrăcire, cu aer

Analiza a urmărit obținerea valorii coeficientului de performanță în funcție de agentul frigorific utilizat.

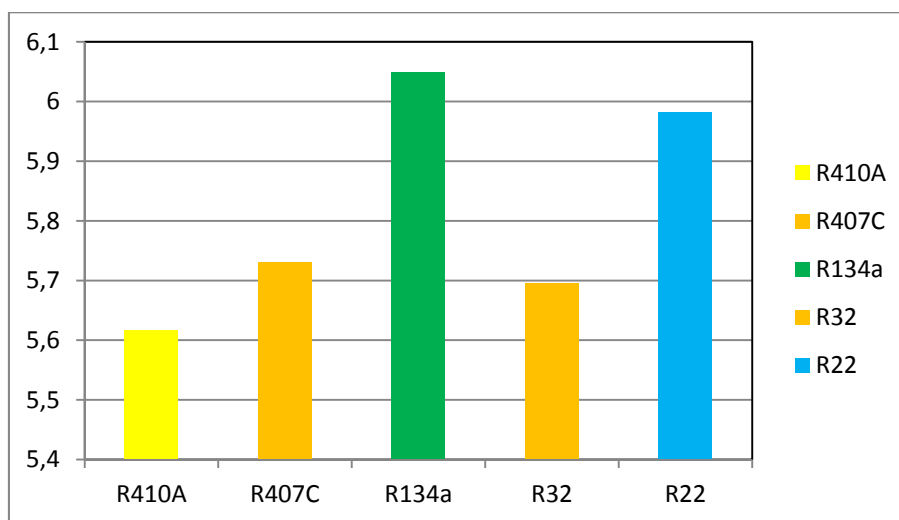


Figura 5. Variația COP în funcție de agentul frigorific pentru un efect de subrăcire de 5°C

Din figura 5. se observă și în acest caz valorile ridicate ale COP pentru agentul R134a și R22. O comparație cu instalația frigorifică fără subrăcire este prezentată în figura 6.

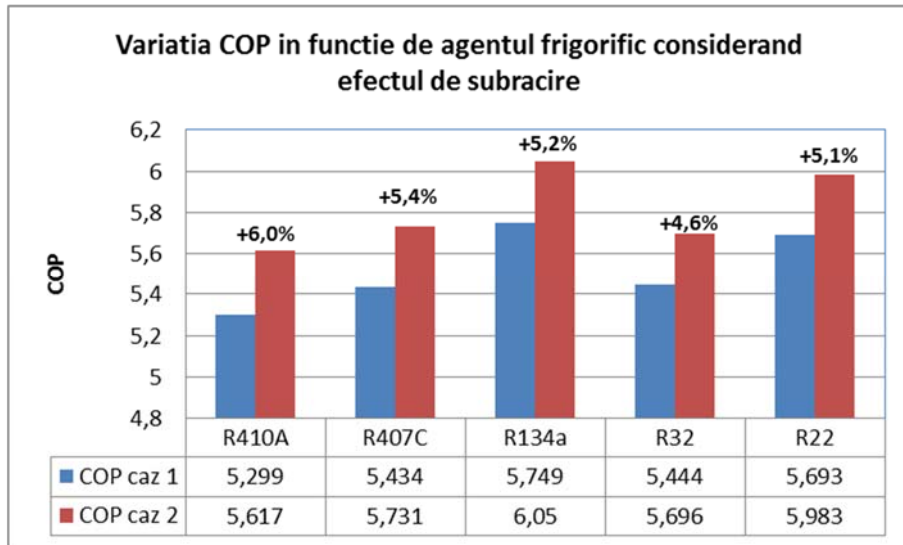


Figura 6. Analiza comparativă a COP pentru cele două situații studiate anterior (caz 1 – fara subrăcire; caz 2- considerând un efect de subrăcire de 5°C)

Analizând graficele din figura 5 și 6 se observă o creștere substanțială a COP, cu valori de peste 5% în cazul subrăcirii.

3. 2. Evacuarea căldurii prin subrăcirea lichidului către un fluid interior de răcire

3. 2. 1. Fluidul de răcire, vapori de freon rezultați din vaporizator

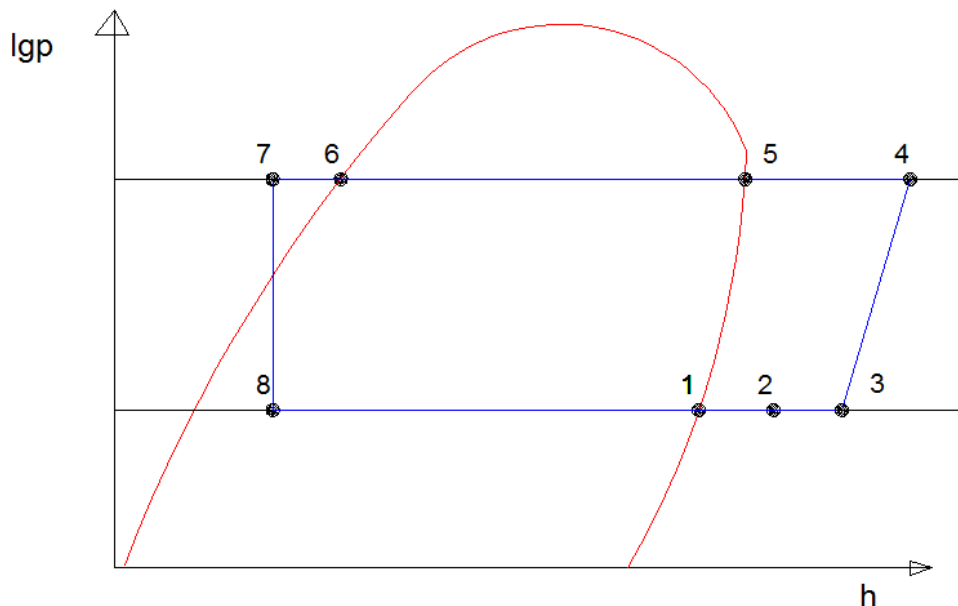


Figura 7. Ciclul termodinamic teoretic pentru o instalație frigorifică cu subrăcire, cu schimbător de căldură regenerativ (SRL/SIV)

În cazul freonilor, vaporii rezultați din vaporizator sunt deja supraîncălziți cu 5-10°C, prin preluarea căldurii de subrăcire a lichidului se va realiza încă o

supraîncălzire a vaporilor (proces 2-3). Chiar la o supraîncălzire a vaporilor de 10-15°C, diferența de temperatură între lichidul subrăcit și vaporii este mai mare decât față de aer (cazul anterior), efectul de subrăcire fiind mai important (5...9°C). Apare deci avantajul evident al creșterii mai mari a efectului frigorific masic (q_0).

Concomitent însă, prin creșterea temperaturii vaporilor aspirați de compresor, crește și volumul masic al acestora, ambele elemente conducând la creșterea lucrului mecanic consumat de compresor (l_k), încât COP va ține seama de ambele efecte.

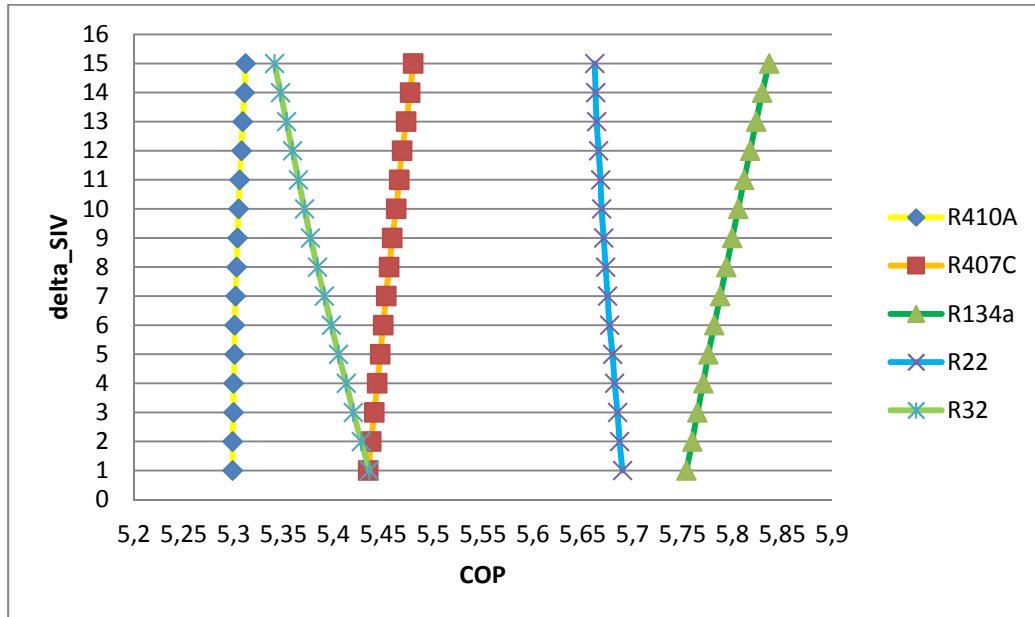


Figura 8. Variația COP la instalațiile frigorifice cu diferite fluide frigorifice în funcție de supraîncălzirea vaporilor ($\Delta\theta_{SIV}$)

Rezultă variația coeficientului de performanță în funcție de creșterea temperaturii de supraîncălzire a vaporilor (corelată cu subrăcirea lichidului). Astfel, pentru R410A și R407C se observă faptul că COP rămâne constant în jurul valorii de 5,3 respectiv 5,45. Pentru R134a COP crește o dată cu creșterea temperaturii de supraîncălzire a vaporilor, față de situația agenților R22 și R32 pentru care observăm o scădere a COP.

3. 2. 2. Subrăcirea se face pe seama vaporizării interne a unei părți din debitul de lichid rezultat din condensator

La instalațiile frigorifice cu mai multe vaporizatoare, din care unele pot fi plasate la distanță, subrăcirea lichidului este necesar să fie mai profundă, pentru a evita vaporizarea lichidului (în conducta de alimentare a VL) asociată cu scăderea de presiune a acestuia, prin parcurgerea traseului necesar înainte de intrarea în ventilul de laminare.

În acest caz, se utilizează ca fluid de răcire o parte y (kg) a debitului de lichid Q_m rezultat din condensator, adus la o temperatură scăzută prin laminare (figura 9).

Analiza subrăcirii fluidelor frigorifice în instalațiile frigorifice pentru climatizare cu vaporizare directă

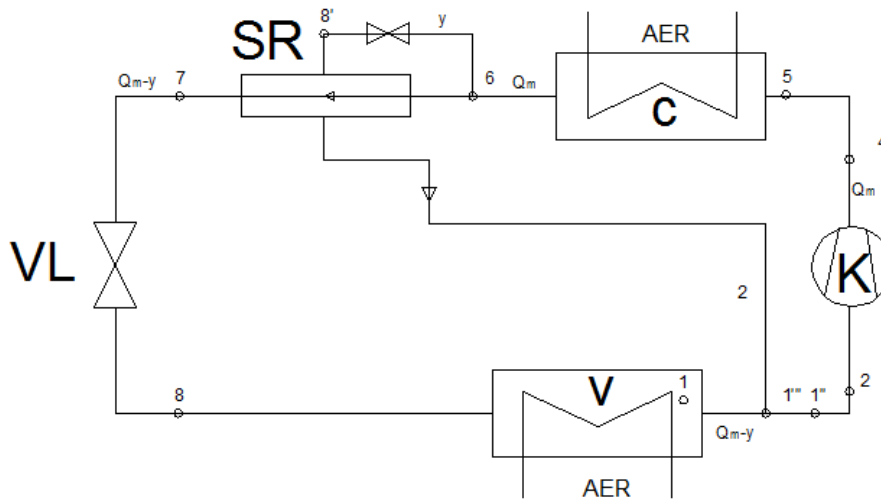


Figura 9. Instalația frigorifică cu subrăcire internă prin vaporizarea unei părți a lichidului condensat

Prin diferența de temperatură mai mare între fluide (cel care se subrăcește și cel care vaporizează) subrăcirea celor $(Q_m - y)$ kg este mai profundă, aducând avantajele menționate (crește q_0 , nu vaporizează agentul frigorific lichid înainte de ventilul de laminare).

Suplimentar mai apare un avantaj dat de temperatura mai redusă a vaporilor aspirați în compresor (obținută prin amestecul celor y (kg) vapori din subrăcitorul de lichid și $(Q_m - y)$ vapori supraîncălziți din vaporizator).

Apare însă și dezavantajul introdus de scăderea debitului de lichid care alimentează vaporizatorul $(Q_m - y)$ care implică scăderea puterii frigorifice.

Influența acestor efecte combinate (avantaje/dezavantaje) asupra performanțelor instalației frigorifice (COP) a constituit obiectul unei analize atât teoretice cât și experimentale.

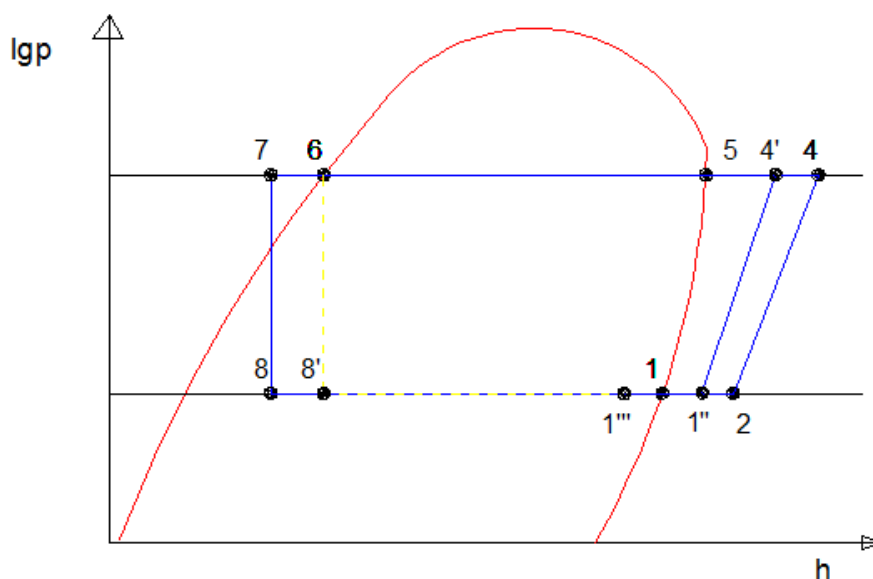


Figura 10. Ciclul termodinamic teoretic al instalației frigorifice (figura 9)

Procesele din instalație sunt:

- vaporizarea din V, pentru (1-y) kg de la 8 la 2;
- vaporizarea internă din subrăcitor pentru y (kg) de la 8' la 1'''';
- amestecarea 2-1'''' (se reface debitul de 1 kg) și obținerea punctului de stare 1'';
- comprimarea celor 1 kg procesul 1''-4';
- condensarea 4'- 6;
- laminarea pentru y (kg) de la 6 la 8';
- subrăcirea pentru (1-y) kg de la 6 la 7;
- laminarea pentru (1-y) kg de la 7 la 8.

Relațiile de calcul sunt următoarele:

- *Puterea frigorifică masică:*

$$q_{0m'} = (1 - y) \cdot (h_2 - h_8) \text{ (kJ/kg)} \quad (1)$$

- *Puterea frigorifică:*

$$\Phi_{0'} = q_{0'} \cdot Q_m \text{ (kW)} \quad (2)$$

- *Puterea termică masică cedată în condensator (inclusiv pentru desupraîncălzirea vaporilor):*

$$q_{C'} = h_{4'} - h_6 \text{ (kJ/kg)} \quad (3)$$

- *Puterea termică totală a condensatorului:*

$$\Phi_{C'} = Q_m \cdot q_{C'} \text{ (kW)} \quad (4)$$

- *Puterea termică masică cedată în subrăcitor:*

$$q_{SR'} = (1 - y) \cdot (h_6 - h_7) \text{ (kJ/kg)} \quad (5)$$

- *Puterea frigorifică masică a cantității y (kg) de agent frigorific ce vaporizează pentru realizarea subrăcirii:*

$$q_{0 \text{ in } SR'} = y \cdot (h_{1''''} - h_{8'}) \text{ (kJ/kg)} \quad (6)$$

- *Lucrul mecanic masic consumat de compresor:*

$$l_{K'} = h_{4'} - h_{1''} \text{ (kJ/kg)} \quad (7)$$

- *Puterea electrică totală consumată de compresor:*

$$P_{K'} = Q_m \cdot l_{K'} \text{ (kW)} \quad (8)$$

- *Coeeficientul de performanță*

$$COP'_{IF} = \frac{\Phi_{0'}}{P_{K'}} \quad (9)$$

Analiza teoretică a fost realizată atât pentru fluidul de lucru din instalația frigorifică experimentală (R410A) cât și pentru alte fluide utilizate în prezent (R134a, R407C, R32). Pentru performanțele superioare cunoscute, a fost analizat și R22, deși acesta nu mai este utilizat el fiind înlocuit de celelalte fluide menționate.

Analiza teoretică a constatat în obținerea valorilor COP pentru fluidele frigorifice menționate mai sus prin variația cantității de agent frigorific ce duce la obținerea efectului de subrăcire. În consecință, au fost obținute date cu privire la variația COP în funcție de efectul de subrăcire și în funcție de titlul vaporilor pentru punctul 1''''.

Având în vedere utilizarea pe scara largă a agentului frigorific R410A în instalațiile de climatizare comercializate, pentru acest fluid frigorific analiza a fost aprofundată și pentru alte valori ale titlului vaporilor pentru punctul 1''''.

Tinând cont de tendințele pieței de climatizare, în care utilizarea agenților cu GWP cât mai redus, o analiză similară a fost efectuată și pentru fluidul frigorific R32.

În cele ce urmează vor fi analizate datele obținute pentru a observa tendința COP în cazul fiecărui agent frigorific cât și o comparație între valorile obținute pentru fluidele utilizate.

Pentru a regăsi un optim pentru valoarea titlului vaporilor pentru punctul 1'''' pentru R410A, s-a considerat funcționarea instalației pentru $x=0,7$; $x=0,75$; $x=0,8$; $x=0,85$; $x=0,9$; $x=0,95$; $x=1$. În graficul din figura 11. se poate observa comparativ variația COP în funcție de fracția din debitul de agent frigorific utilizată pentru asigurarea subrăcirii și în funcție de titlul vaporilor pentru punctul 1''''.

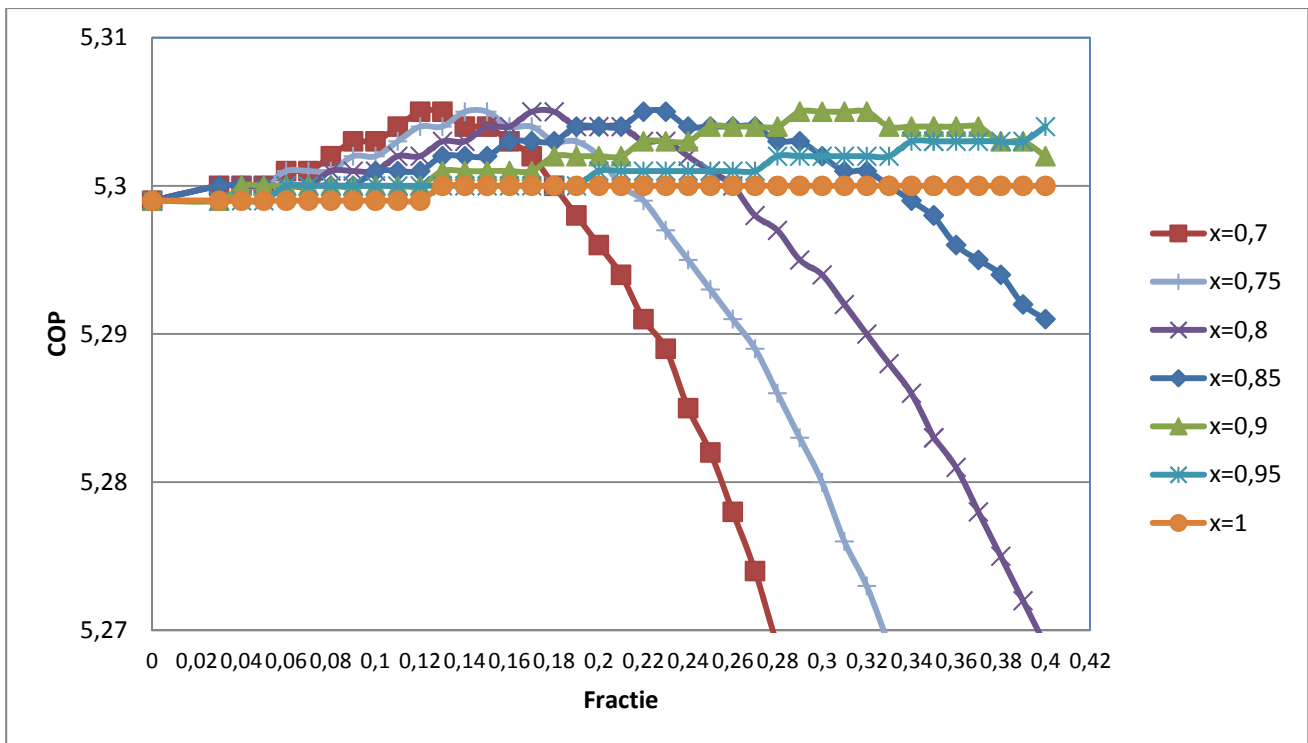
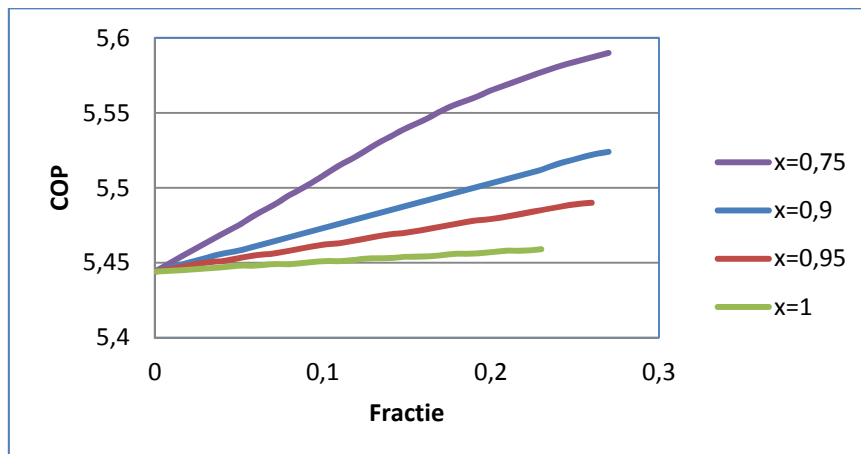


Figura 11. – Variația COP pentru agentul frigorific R410A în funcție de titlul vaporilor pentru punctul 1''''

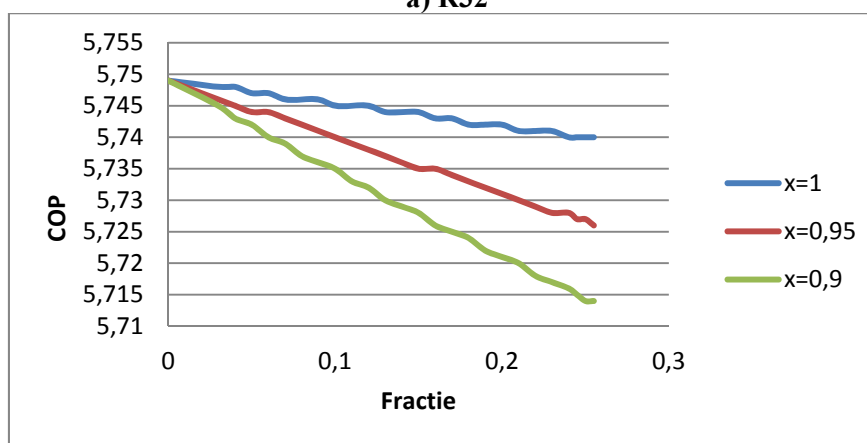
În figura 11 se observa tendința de scădere a COP după un maxim în zona 16-20% fracție a agentului frigorific pentru subrăcire, pentru valori ale titlului vaporilor de $x=0,7-0,85$. Pentru valori ale titlului vaporilor de $x=0,9$ și $x=0,95$ se observa un COP aproape constant de peste 5,3. Pentru $x=1$, COP este constant în jurul valorii de 5,3.

Analizând variația capacității frigorifice (Q_{0prim}) în funcție de cantitatea de agent frigorific utilizată pentru subrăcire și în funcție de titlul vaporilor considerat în calcul pentru punctul 1'''' rezulta că pentru $x=0,7$ avem o scădere de 22%, pentru $x=0,9$ această scădere ajunge la o diferență de 8,2%, în cazul $x=1$ scăderea este de doar 2%.

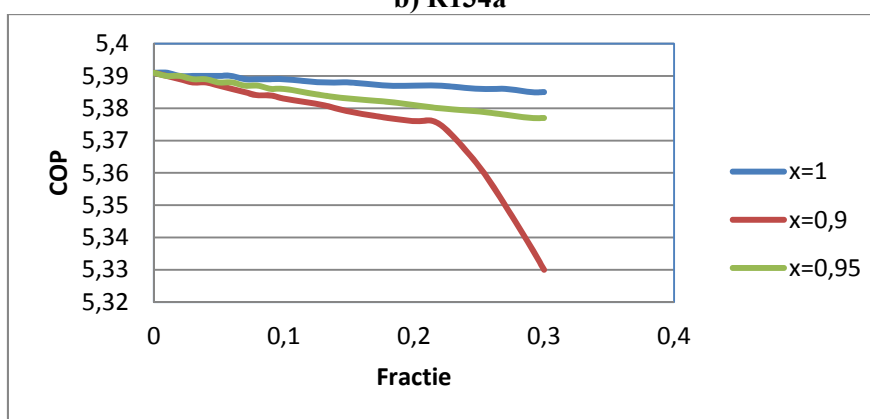
În figura 12 sunt prezentate valorile COP pentru diferite fluide frigorigene în funcție de fracția de lichid vaporizată în subrăcitor și în funcție de titlul vaporilor rezultați 1''''.



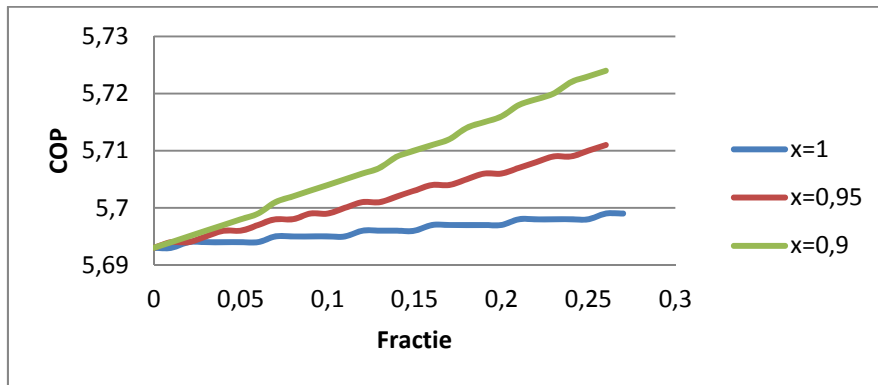
a) R32



b) R134a



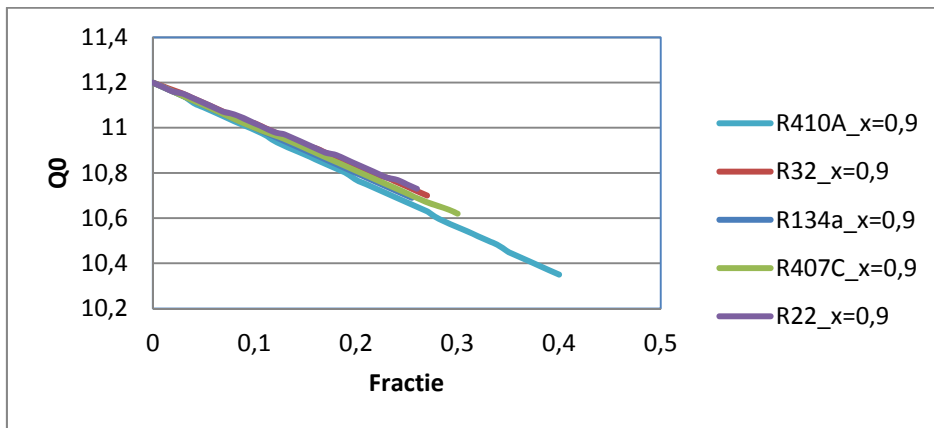
c) R407C



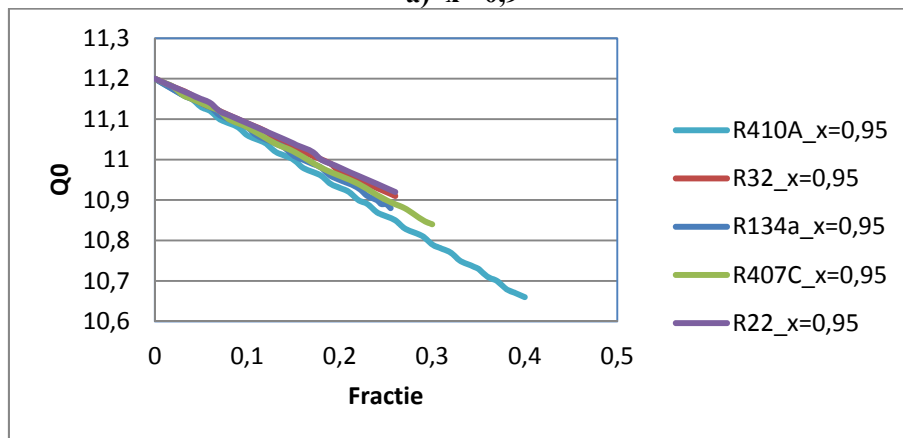
d) R22

Figura 12. – Variația COP pentru agentul frigorific R22 în funcție de titlul vaporilor pentru punctul 1'''

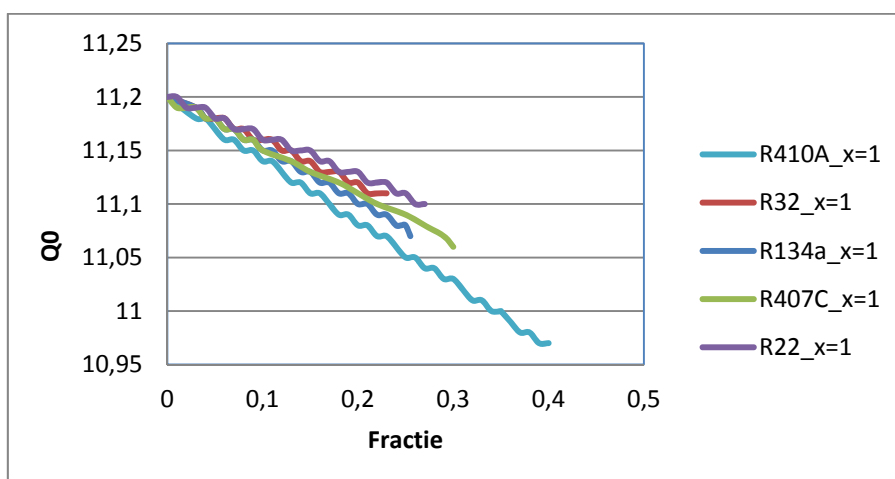
În figura 13 a, b, c se prezintă scăderea Q_0 funcție de fracția de lichid vaporizată în subrăcitor și titlul vaporilor rezultați.



a) x= 0,9



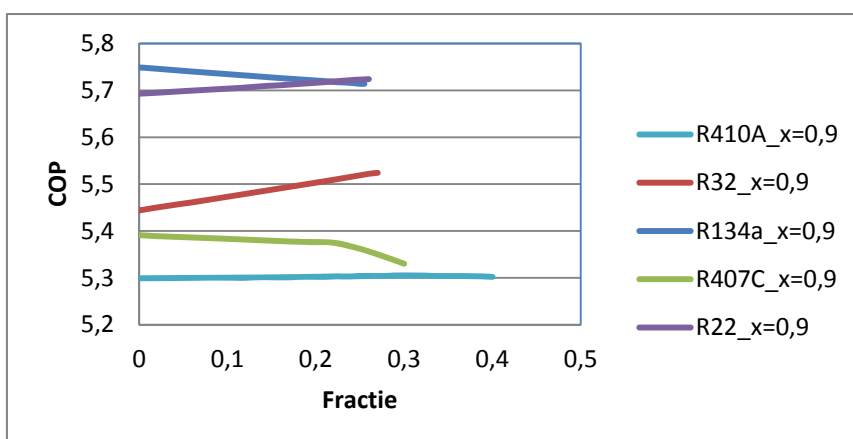
b) x= 0,95



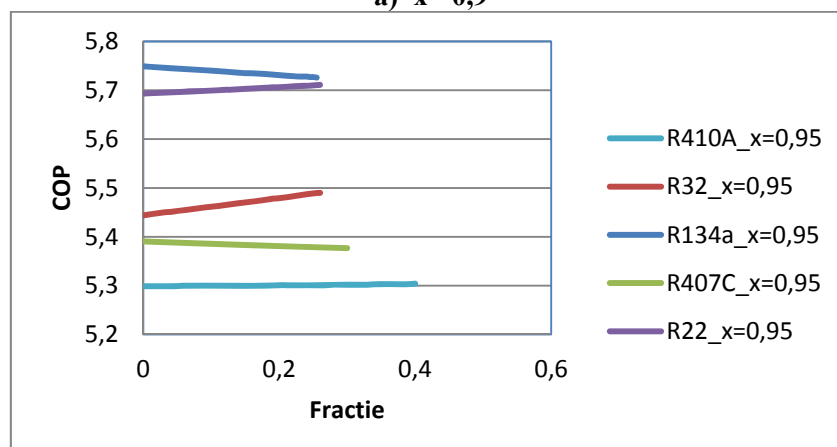
c) $x = 1$

Figura 13. Variația Q_0 în funcție de titlul vaporilor pentru punctul 1''''

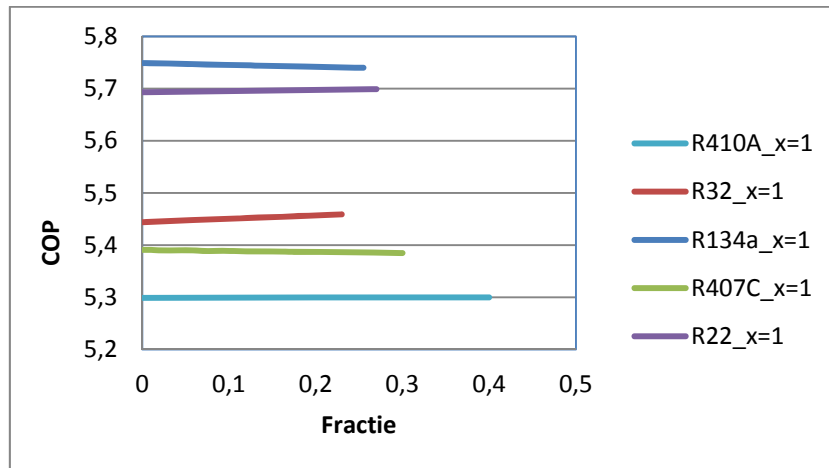
Pentru o imagine de comparativă în figura 14 a, b, c este prezentată variația COP pentru agenții frigorifici studiați.



a) $x = 0,9$



b) $x = 0,95$



c) $x = 1$

Figura 14. Variația COP în funcție de titlul vaporilor pentru punctul 1'''

Se observă că valorile COP pentru R410A se mențin constante în fiecare dintre cele trei cazuri în jurul valorii de 5.3. Pentru R134a și R407C se observă o scădere a COP odată cu creșterea efectului de subrăcire. Sunt de remarcat agenții frigorifici R22 și în special R32 în cazul cărora apar valori ridicate ale COP (de peste 5,6) și o creștere a acestuia odată cu creșterea efectului de subrăcire. Totodată, putem observa o creștere mai mare a COP pentru titlul vaporilor de $x=0,95$.

Utilizarea acestei metode de subrăcire ne ajută să obținem o subrăcire cât mai adâncă (de peste 10-12K în funcție de fluidul frigorific) rezultând temperaturi scăzute la ieșirea din subrăcitor (punctul 7 din figura 10), ceea ce favorizează utilizarea acestei soluții pentru sisteme de climatizare cu vaporizatoare la distanță, evitând începerea vaporizării agentului frigorific pe conducte.

4. CONCLUZII

Analizând procesele de subrăcire prezentate se desprinde concluzia unei eficiențe ridicate în cazul utilizării unei subrăcirii realizată cu un schimbător de căldură agent frigorific/aer. Dar, din punct de vedere constructiv și ținând cont de temperaturile mediului ambiant această soluția este limitată la o subrăcire redusă de maxim 5K și datorită dimensiunilor constructive necesare suprafeței de schimb de căldură.

Referindu-ne la un schimbător de căldură regenerativ de tip subrăcitor de lichid/supraîncălzitor de vapori rezultă o eficientizare a sistemului printr-o subrăcire mai profundă (minim 10K). Astfel apare o creștere a puterii frigorifice masice ce duce la coeficienți de performanță mai mari.

În situația unei instalații frigorifice cu mai multe vaporizatoare aflate la distanță este necesară o subrăcire mai profundă pentru a evita vaporizarea agentului frigorific în interiorul conductelor, datorită scăderii presiunii, înainte de elementul de destindere. Astfel, prin laminarea unei cantități de lichid la ieșirea din condensator se realizează, prin intermediul unui schimbător de căldură, subrăcirea cantității rămase în circuit pe baza vaporizării fracției laminate. Se obțin temperaturi mai reduse după subrăcitor în

funcție de fracția de agent frigorific utilizată. Având în vedere faptul ca în vaporizator va ajunge o cantitate mai mică de agent frigorific, puterea frigorifică va scădea, dar lucrul mecanic consumat de compresor va fi mai mic comparativ cu situația utilizării unui schimbător de căldură regenerativ de tip subrăcitor de lichid/supraîncălzitor de vapori. Astfel, valorile coeficienților de performanță vor fi similare pentru cele două situații cu avantajul soluției prezentate în capitolul 3.2.2. ce duce la o subrăcire mai profundă în funcție de fracția de agent frigorific utilizată.

5. BIBLIOGRAFIE

1. Hera, D.: Instalații Frigorifice – vol. I – Agenți Frigorifici – Editura Matrix Rom, București 2004;
2. Drughean, L.; Hera, D.; Pîrvan, A.: Sisteme Frigorifice Nepoluante – Editura Matrix Rom, București 2004;
3. Hera, D.; Girip, A.: Instalații Frigorifice – vol. II – Scheme și Cicluri Frigorifice – Editura Matrix Rom, București 2007;
4. Hera, D.: Instalații Frigorifice – vol. III – Echipamente Frigorifice – Editura Matrix Rom, București 2009;
5. Chiriac, Fl.; Țârlea, M.G.; Gavriiliuc, R.; Ilie, A.; Dumitrescu, R.: Mașini și Instalații Frigorifice, Editura Agir, București 2006;
6. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen Editor – VDI Heat Atlas – Berlin, 2010