Analiza exergo-energetică a instalațiilor frigorifice în soluție BrLi-apă utilizate la producerea centralizată a apei reci

Exergy and energetic analysis of Lithium Bromide-water solution absorption system for district cooling

Dragoş Hera¹, Alina Girip²

¹ Universitatea Tehnică de Construcții București, Romania Bd. Pache Protopopescu, nr. 66, sector 2 *E-mail: heradragos@yahoo.com*,

² Universitatea Tehnică de Construcții București, Romania
Bd. Pache Protopopescu, nr. 66, sector 2 *E-mail:agirip4@yahoo.com*

Rezumat: În acest studiu se realizează o analiza exergo-energetică pe baza căreia se dorește optimizarea echipamentelor din instalația cu absorbție în soluție LiBr-apă. Un model matematic bazat pe metoda exergetică este folosit pentru a evalua generarea de entropie a fiecărui echipament și a întregului sistem, a ireversibilităților totale și a randamentului exergetic în trei moduri de alimentare cu apă de răcire: C1 - circuit apă de răcire Condensator - Absorbitor; C2 - circuit apă de răcire Absorbitor - Condensator; C3 - circuit apă de răcire simultan Condensator și Absorbitor. Varianta cu circuitul C1 determină generarea totală de entropie cea mai scazută comparativ cu celelate circuite. Lucrarea prezintă scăderea ireversibilităților totale și a randamanetului exergetic odată cu creșterea temperaturii de alimentare a fierbătorului. Efectul variației temperaturii apei răcite la vaporizator asupra ireversibilităților și randamentului exergetic este important, valorile ridicate ale randamentului obținându-se la temperaturi scăzute ale apei răcite.

Cuvinte cheie: exergie, ireversibilități, randament exergetic

Abstract: In the present study was made an exergy - energetic analysis of a lithium bromide-water absorption system for optimization of the components from the system. A mathematical model based on the exergy method is used to evaluate entropy generation of each component and the total entropy generation of the system, irreversibility în the system and exergetic efficiency în three different cooling water flow types: C1 -serial flow (to condenser first), C2 - serial flow 2 (to absorber first) and C3 – parallel flow. The circuit C1 has lowers the total entropy generation of the system than other circuits. The paper illustrates the decreasing of the total irreversibility and exergetic performance with increasing generator temperature. The effect of the temperature of cold water entering în evaporator on the total irreversibility and exergetic performance is important, higher values of efficiency was obtain at lower cold water temperature.

Keywords: exergy, irreversibility, exergetic efficiency

1. Introducere

În această lucrare se realizează o analiză a performanțelor termo-energetice ale unei instalații cu absorbție în soluție $BrLi-H_2O$ într-o treaptă, utilizând principiul al II-lea al termodinamicii.

Metoda exergetică cunoscută ca "analiza principiului doi" calculează pierderile exergetice datorate ireversibilităților interne și externe ale ciclului termodinamic.

Interesul pentru studiul exergetic aplicat și instalațiilor cu absorbție a crescut odată cu introducerea noilor agenți frigorifici cu impact scăzut asupra mediului înconjurător în urma protocoalelor de la Montreal și Kyoto și a utilizării instalațiilor pentru realizarea răcirii centralizate cu agent încălzitor de temperatură scăzută [1]. Au fost realizate și studii privind analiza economică.

Principiul al II-lea este cel mai des utilizat și cel mai la îndemână instrument atunci când se urmărește comportamentul termodinamic al unui sistem. Acesta ne oferă informații despre conservarea energiei, dar nu ne explică cum, când și cât din performanța sistemului este diminuată. Principiul al II-lea poate fi considerat modalitatea prin care urmărim proiectarea, optimizarea și evaluarea performanțelor unui sistem energetic. Prin intermediul său urmărim să identificăm componentele sistemului cu o generare mare de entropie și minimizarea optimă a entropiei totale a sistemului pentru creșterea performanței sistemului.

Unii cercetători urmăresc principiul minimazării generării de entropie pentru a analiza diferite sisteme în vederea creșterii performanțelor energetice ale acestuia, iar alții folosesc studiul exergetic bazat pe principiul al II al termodinamicii.



Fig. 1. Interdependența energie, mediul înconjurător, exergie și dezvoltare durabilă.

Conform lui Bejan [2] putem crea o interdependență între energie, mediul înconjurător, exergie și dezvoltarea durabilă (figura 1). Energie de acționare utilizată este mai puțin nobilă în instalația cu absorbție și se poate produce cu randamante mai mari, iar uneori poate fi deșeu. Impactul asupra mediului este mai redus decât la instalațiile cu comprimare mecanică prin utilizare unui fluid frigorific complet nepoluant (apa), încadrându-se în recomandările referitoare la dezvoltarea durabilă.

2. Descriere instalație și modelul matematic.

Schema instalației frigorifice cu absorbție într-o treaptă în soluție $BrLi-H_2O$ model YAZAKI este prezentată în figura 2 [3]. Sistemul este compus din: fierbător, vaporizator, condensator, absorbitor, pompă soluție diluată și economizor soluție.

Ecuațiile conform principiului al II-lea al termodinamicii sunt prezentate în continuare. Cu ajutorul acestora se va evalua rata entropiei generate totale a sistemului și a fiecărui component din instalație [4].



Fig. 2. Schema instalației frigorifice cu absorbție într-o treaptă în soluție LiBr-H₂O model YAZAKI. V₁ – vana protecție la îngheț a agentului frigorific, V₂ – vana by-pass soluție concentrată, V₃ – vana recirculare agent frigorific.

- vaporizator:

$$\overset{\bullet}{S}_{C} = Q_{m0} \cdot (s_{1"} - s_{9}) + Q_{mw} \cdot (s_{w2} - s_{w1})$$
(2)

19

- absorbitor:

$$S_A = Q_{m0} \cdot [(f+r) \cdot s_5 - s_{10} - (f-1+r) \cdot h_3] + Q_{mw} \cdot (s_{w4} - s_{w3})$$
(3)

- fierbător:

$$S_F = Q_{m0} \cdot [s_{1"} + (f - 1) \cdot s_2 - (f - s) \cdot h_7] + Q_{mAI} \cdot (s_{AI2} - s_{AI1})$$
(4)

- economizor soluție LiBr-H₂O:

•
$$S_{EC} = Q_{m0} \cdot (f-1) \cdot (s_3 - s_2) + Q_{m0} \cdot f \cdot (s_7 - s_6)$$
 (5)
- pompă soluția LiBr-H₂O :

$$\overset{\bullet}{S}_{PS} = Q_{m0} \cdot f \cdot (s_6 - s_5) \tag{6}$$

unde S – generarea de entropie (kW/K), Q_{m0} – debitul masic de agent frigorific (kg/s), Q_{ms} – debitul masic de agent racit (kg/s), Q_{mw} – debitul masic de apă de răcire (kg/s), Q_{mAI} – debitul masic de agent încălzitor (kg/s), f – factor de circulație, f_V, r – factor de recirculare a soluției diluate în vaporizator, respectiv în absorbitor, s – entropia specifică (kJ/kg*K),

Entropia totală a sistemului, S_T se obține din însumarea fiecărei valori specifice a fiecărui component din sistem:

$$S_T = \sum_{j=1}^N S_j = S_0 + S_C + S_A + S_F + S_{EC} + S_{PS}$$
 (kW/K) (7)

În cazul soluției BrLi-H₂O, pentru temperaturi t = 0...190°C și concentrații $\xi = 40...75\%$, determinarea entropiei masice s-a făcut utilizând relațiile propuse de Feuerecker [5]:

$$s = A_1 + A_2 \cdot T + A_3 \cdot T^2 + A_4 \cdot X + A_5 \cdot X \cdot T + A_6 \cdot X \cdot T^2 + A_7 \cdot X^2 + A_8 \cdot X^2 \cdot T + A_9 \cdot X^3 + A_{10} \cdot X_4$$
(8)

unde coeficienții din relație au valorile:

A1=-1.01961E3, A2=1.101529E1, A3=-1.04215E-2, A4=1.036935E2, A5=-5.87032E-2, A6=8.63107E-5, A7=-3.266802, A8=-3.16683E-4, A9=4.10099E-2, A10=-1.790548E-4, T – temperatura (K)

Când se neglijează energia cinetică și potențială, exergia specifică, **e**, poate fi evaluată astfel:

Analiza exergo-energetică a instalațiilor frigorifice în soluție BrLi-apă utilizate la producerea 21 centralizată a apei reci

$$e = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \qquad (kJ/kg) \tag{9}$$

unde h – entalpia specifică (kJ/kg), $T_{ambiant}$ – temperatura mediului ambiant (K), indicele 0 pentru starea aerului exterior.

Rata ireversibilității a procesului, I, se calculează cu relația de mai jos:

$$I = T_0 \cdot \dot{S}_{gen} \tag{10}$$

Randamentul exergetic, η_{ex} , cu care se poate determina performanța sistemului, se determină cu relația [6]:

$$\eta_{ex} = \frac{-Q_0 \cdot (1 - \frac{T_{ambiant}}{T_0})}{Q_F \cdot (1 - \frac{T_{ambiant}}{T_F}) + P_{PS}}$$
(11)

unde T_0 – temperatura de vaporizare (K), T_F - temperatura la fierbător (K), Q_0 – puterea frigorifică (kW), Q_F – puterea termică de fierbere (kW), P_{PS} - puterea electrică consumată de pompa de soluție (kW).

O analiza corectă și completă a tuturor pierderilor energetice ce intervin în funcționarea reală a instalației frigorifice cât și evidențierea ponderilor acestora în scopul reducerii lor, se poate face urmârind atât ireversibilitățile interne din procesul de laminare, cât și cele externe din schimbătoarele de căldură (fierbător, absorbitor, vaporizator, condensator) [7].

Modelul matematic a fost scris cu ajutorul programului EES (Engineering Equation Solver) [8]. Pentru simulare și scrierea ecuațiilor sistemului s-au luat în considerație următoarele ipoteze simplificatoare:

- sistemul este considerat în regim staționar de funcționare;

- căderile de presiune în conducte sunt neglijabile;

- în condensator și vaporizator vaporii de apă sunt la starea de saturație.

Utilizând modelul s-au putut determina proprietățile termodinamice (temperatură, presiune, entalpie, concentrație, volum masic și entropie masică) pentru fiecare stare din ciclu termodinamic. Proprietățile apei la saturație sunt obținute din corelațiile oferite de ASHRAE [9]. În cazul respectării condiției ca intervalul de degazare să fie mai mare de 5% [10], se calculează:

- factorul de circulație și de recirculare a soluției,

- bilanțurile termice masice,

- fluxurile termice pentru fiecare echipament,

- debitele masice de soluție diluată și concentrată, soluție recirculată (absorbitor și vaporizator) și agent frigorific,

- coeficientul de performanță, COP, randamentul exergetic.

3. Interpretarea rezultatelor.

Calculele s-au realizat pentru condițiile de lucru:

- puterea frigorifică 17.6 kW;
- temperatură apă răcită 12/7°C;
- temperatură apă de răcire tur 27°C;
- temperatura agent încălzitor la fierbător 88/83°C;
- randament pompă de soluție de 0.9;
- eficiență economizor soluție 0.75.

S-au studiat 3 variante de circuite de alimentare cu apă de răcire a instalației cu absorbție:

- C1 - circuit apă de răcire Condensator - Absorbitor;

- C2 - circuit apă de răcire Absorbitor-Condensator;

- C3 – circuit apă de răcire în paralel Condensator, Absorbitor.

S-a considerat o încălzire a apei de răcire de 3°C la condensator și la absorbitor de 4°C. Temperatura mediului ambiant este luată în calcul la 30°C.

În tabel 1 sunt centralizate datele obținute în urma calcului făcut cu ajutorul programului, iar figura 3 se prezintă comparativ entropia generată pentru fiecare component din instalație în cele 3 variante de circuite de alimentare cu apă de răcire.

Tabel 1

Generare de	C1 - alimentare	C2 - alimentare prin	C3 - simultan
entropie	prin Condensator	Absorbitor	C+ABS
	(W/K)	(W/K)	(W/K)
S_F	8.699	11.25	8.699
S_ABS	3.174	5.591	3.915
S_C	0.729	1.232	0.729
S_V	1.422	1.422	1.422
S_EC solutie	0.0455	0.0455	0.0455
S_PS	0.000064	0.000064	0.000064
S_total	14.07	19.54	14.81

Generarea de entropie pentru situațiile analizate

Analizând datele din tabelul 1 se observă avantajul circuitului C1 prin obținerea celei mai scăzute generări de entropie pentru sistem. Alimentarea simultană (paralel) a celor două schimbătoare răcite cu apă (absorbitor și condensator) determină o creștere de 5% a generării totale de entropie. În cazul circuitului C3 se observă o creștere importantă a valorii totale a entropiei cu 39%.

Pentru cazul alimentării circuit C1 în figura 4 se prezintă ponderea fiecărui echipament din instalație în generarea totală de entropie.

Generarea de entropie maximă are loc în fierbător, peste 55% din valoarea totală, următorul echipament fiind absorbitorul cu un procentaj de peste 20%. Valori neglijabile se observă în pompa de soluție și economizul de soluție.

În tabelul 2 se prezintă ireversibilitățile calculate pentru fiecare echipament din instalație.

Analiza exergo-energetică a instalațiilor frigorifice în soluție BrLi-apă utilizate la producerea centralizată a apei reci



Fig. 3. Generarea de entropie pentru fiecare echipament din instalație pentru cele 3 cazuri de alimentare cu apa de răcire.



Fig. 4. Ponderea în generarea totală de entropie pentru fiecare echipament din instalație (cazul C1)

Evoluția ireversibilităților odată cu variația temperaturii de alimentare a fierbătorului pentru diferite temperaturi ale apei răcite (15/10°C, 12/7°C și 10/5°C) este prezentată în figura 5, valorile minime se înregistrează la temperaturi ridicate ale apei răcite la vaporizator. Odată cu scăderea acestei temperaturi sistemul va funcționa cu ireversibilități mult mai mari, crescând cu cca 17% la o scădere de 3°C a temperaturii apei răcite și cu cca 26% la o scădere de 5°C.

Dragoș Hera, Alina Girip



Fig. 5. Evoluția ireversibilității totale a sistemului în raport cu temperatura de alimentare fierbător



Fig. 6. Evoluția randamentului exergetic în raport cu temperatura alimentare fierbător

Variația randamentului exergetic în raport cu temperatura agentului încălzitor la fierbător se poate analiza în figura 6. Valorile acestui randament sunt cuprinse între $\eta_{ex} = 0.28$ și 0.47, valorile maxime obținându-se în cazul apei reci de temperatură 10/5°C, fenomen întâlnit și la alți cercetători [11]. Dacă se dorește o creștere a apei reci la vaporizator cu 2°C are loc o scădere a randamentului exergetic cu cca 5%, iar la o creștere de 5°C scăderea este de 15%.

Concluzii

Prezentul studiu urmărește aplicarea principiului al II-lea al termodinamicii pentru o instalație frigorifică cu absorbție într-o treaptă în soluție LiBr- H_2O .

Modelul matematic realizat urmărește determinarea generării de entropie a fiecărui echipament din instalație, dar și a sistemului în 3 variante de alimentare cu apă de răcire a absorbitorului și condensatorului. Acest model ne va ajuta să înțelegem mai bine comportamentul termodinamic al instalației și să determinăm modalitățile de optimizare a schimbătoarelor de căldura în vederea minimizării valorii entropiei sistemului.

Cele mai importante echipamente din instalație cu efect important în generarea de entropie sunt: fierbătorul, absorbitorul și vaporizatorul. Valoarea totală a acestora reprezintă peste 94% din valoarea totală a sistemului.

Ireversibilitățile totale ale instalației cresc cu scăderea temperaturii agentului încălzitor și a apei răcite.

Astfel pentru optimizarea sistemului și a minimizării ireversibilităților se vor urmării echipamentele cu ponderea cea mai mare (fierbătorul și absorbitorul).

Referințe

[1]. *Muhsin Kilic, Omer Kaynakli,* " Second law-based thermodynamic analysis of waterlithium bromide absorption refrigeration system", Int. J. Refrig. 2007, 32, 1505-1512.

[2]. Bejan A., "Advanced Engeneering Thermodynamics, John Wiley, New York, 1998.

[3]. ***YAZAKI - Specifications WFC SC5 Version 1

[4]. *Omer Kaynakli, Recep Y.*, ,, Thermodynamic analysis of absorption system based on entropy generation", Int. J. Refrig., 2007, 4, vol. 92, 472-479.

[5]. *Y. Kaita*, " Thermodynamics properties of lithium bromide – water solutin at high temperature", Int. J. Refrig. 2001, 24, 374-390.

[6]. *Asdrubali. F, Grignaffini S.*, "Experimental evaluation of the performance of a H₂O-LiBr absorption refrigerator under different service conditions", Int. J. Refrig.2005, 28, 489-497.

[7]. *Hera*, *Dr.*, *Girip*, *A*, "Instalații frigorifice. Vol. 2. Scheme și cicluri frigorifice", Ed. Matrix Rom, Buc., ISBN 978-973-755-198-6, 2007 (407 p).

[8]. ***EES – soft programs

[9]. ASHRAE handbook, Fundamentals, 2009.

[10]. *Hera, Dr., Girip, A.,* "Răcirea centralizată a locuințelor urbane", (A 42-a Conferință națională de instalații "Instalații pentru mileniul trei", Sinaia, 17-20 octombrie 2007) publ. vol conf. p. 223-230.

[11]. *Shun-Fu Lee, S. A. Sherif* – "Thermodynamics analysis of a lithium bromide/water absorption system for cooling and heating applications", Int. J. Refrig, 2001, 25, 1019-1031.