

## Energijska učinkovitost naprav za hlajenje bivalnih prostorov

### The Energy Efficiency of Chillers Used for Cooling Living Space

Andrej Kitanovski · Alojz Poredoš · Matija Tuma

*Za hlajenje objektov se uporabljajo različni hladilni sistemi. Najbolj pogosta je uporaba električno gnanih kompresorskih hladilnikov, v zadnjem času pa pridobiva vse večjo veljavo tudi uporaba absorpcijskih hladilnikov. Ti hladilniki omogočajo uporabo različnih vrst energij. V prispevku so predstavljene različne vrste hladilnih naprav. Kot alternativna rešitev hlajenja v objektih in izboljšanja izkoristka kogeneracijskih sistemov v poletnem obdobju so obravnavani absorpcijski hladilniki v sistemih daljinskega hlajenja. Prikazan je postopek določitve eksergetske učinkovitosti posamezne vrste hladilnikov. Analizirana je možnost hlajenja objektov Fakultete za strojništvo v Ljubljani z uporabo absorpcijskih in električno gnanih kompresorskih hladilnikov.*

© 2000 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: prostori bivalni, hlajenje prostorov, učinkovitost energijska, naprave hladilne)**

*Cooling in buildings can be performed with different cooling systems. Electrically driven compressor chillers are the most commonly used devices, but in the last decade the use of absorption chillers has increased rapidly. These types of chillers can use different kinds of energy sources for their operation. In this paper, different kinds of chillers are presented. As an alternative solution for meeting the cooling demands of the buildings and improving the cogeneration efficiency, absorption chillers are introduced. A method for exergetic efficiency determination for different kinds of chillers is described. The possibilities of introducing absorption or electrically driven compressor chillers at the Faculty of Mechanical Engineering in Ljubljana are analysed.*

© 2000 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: living rooms, cooling, energy efficiency, chillers)**

#### 0 UVOD

S povečanjem zahtev po prostorskem udobju močno naraščajo tudi potrebe po hlajenju objektov. Problem hlajenja se pogostokrat rešuje delno, z namestitvijo okenskih hladilnih naprav. Te naprave so večinoma zračno hlajene, predimenzionirane za prostore, ki jih hladijo, poleg tega pa uporabljajo okolju škodljiva hladiva. Temu primerna je večja in nenadzorovana raba električne energije, še posebej ob največjih hladilnih obremenitvah objektov. Po drugi strani se v poletnem obdobju v kogeneracijskih sistemih soočajo s problemom majhnega odjema toplotne energije, saj se ta večinoma uporablja le za ogrevanje sanitarne vode in za razne tehnološke procese. Posledica tega je tudi zmanjšanje izkoristka kogeneracijskega sistema. Kot alternativna rešitev obeh problemov se ponuja možnost uporabe toplotne energije za pogon absorpcijskih hladilnikov v sistemu

#### 0 INTRODUCTION

The desire for improved living comfort has resulted in a need for better systems of cooling. This cooling problem is frequently solved by partial solutions, with the use of small cooling devices in windows. These chillers are usually air cooled, and overdimensioned for the rooms they are designed to cool. They also tend to use environmentally non-friendly refrigerants. The result is a high and unchecked consumption of electrical energy, especially during peak periods. During the summer, cogeneration systems are meeting their requirements with a low heat consumption. The heat from the cogeneration plant is mainly used for preparing sanitary water or water for some industrial processes. The consequence of a lower heat consumption is a decreased cogeneration efficiency. A solution to both these problems is the possibility of introducing a trigeneration system,

daljinskega hlajenja kot delu trigeneracijskega sistema. Uporaba s paro in vročo vodo gnanih absorpcijskih hladilnikov je upravičena samo v primeru, ko imamo na voljo toploto iz kogeneracije ali odpadno toploto iz raznih tehnoloških procesov.

## 1 EKSERGIJA IN HLAJENJE

Hladilne naprave delujejo na temelju levega krožnega procesa. Ločimo parne in sorpcijske hladilne procese. Eksrgerijski izkoristek nepovračljivega parnega procesa je definiran z razmerjem med eksrgerijskim tokom hladu in eksrgerijskim tokom vložene energije [1]:

$$\zeta_R = \frac{|\dot{E}_R|}{|P|} = \frac{|\dot{E}_R|}{|\dot{E}_R + \dot{E}_{VZG}|} \quad (1).$$

Parni hladilni proces se odvija v kompresorskih hladilnih napravah, ki so gnane z električno energijo, ta pa pomeni čisto eksrgerijo. Izračun eksrgerijskega izkoristka sorpcijskega hladilnega procesa je podoben kakor pri parnem. Razlika je le v tem, da pri sorpcijskem hladilnem procesu dovajamo v proces toploto in je tako dovedeni eksrgerijski tok del te toplote.

Za ocenitev hladilnih procesov se uporablja tudi hladilno število, ki pomeni razmerje med hladilno močjo ter celotno dovedeno močjo v hladilno napravo. V primeru kompresorskih hladilnikov je dovedena moč enaka kar električni moči kompresorja ([1] in [2]):

$$\varepsilon_{RK} = \frac{\dot{Q}_R}{|P|} \quad (2).$$

Pri sorpcijskih hladilnih napravah je hladilno število enako razmerju med pridobljeno hladilno močjo in vloženo toplotno močjo. Vrednosti hladilnih števil se zato pri parnih in sorpcijskih hladilnih procesih razlikujejo, saj dovajamo v primeru sorpcijskih hladilnih procesov eksrgerijsko revno toploto, prav eksrgerija pa je tista, ki rabi za odvod toplote iz hlajenega sistema.

$$\varepsilon_{RA} = \frac{\dot{Q}_R}{\dot{Q}_{gr}} \quad (3).$$

Pri kompresorskih hladilnih napravah je dovedeni eksrgerijski tok enak kar električni priključni moči kompresorja. Pri sorpcijskih hladilnih napravah je razlika med vstopno in izstopno eksrgerijo entalpije ([1] in [2]):

$$e_2 - e_1 = h_2 - h_1 - T_{ok}(s_2 - s_1) \quad (4),$$

$$\dot{E}_{dov} = \dot{m}(e_2 - e_1) \quad (5).$$

using the absorption chillers in a district cooling system. The use of hot-water and steam-driven absorption chillers is justified only in the case when the heat from the cogeneration plant or from some industrial process is obtained as waste heat.

## 1 EXERGY AND COOLING

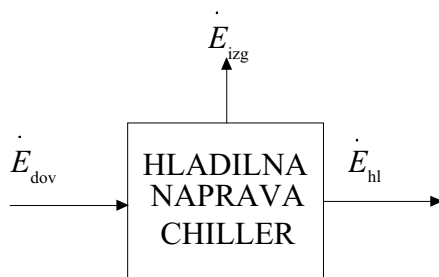
The operation of cooling devices is based on the reversed cyclic process. There are two kinds of commonly used cooling process: the steam process and the sorption process. The exergy efficiency of an irreversible steam-cooling process is defined as the ratio of the cooling exergy flow to the exergy flow supplied to the process [1]:

The steam-cooling process takes place in the compressor chillers, normally driven by electrical energy, which represents pure exergy. The calculation of the sorption-cooling process exergy efficiency is similar to the calculation for the steam-cooling process. The difference is that heat is supplied in the sorption process, and therefore the supplied exergy flow is only a part of that heat.

For the cooling-process estimation the chillers' coefficient of performance (COP) is also used. The COP is defined as the ratio of the cooling capacity obtained to the power supplied to the cooling device. In the case of compressor chillers, the power supplied equals the electrical power ([1] and [2]):

For sorption chillers, the COP is defined as the ratio of the cooling power to the heat supplied to the chiller. Consequently, the COP values for the steam-cooling process differ from those of the sorption process. In the sorption-cooling process, exergy weak heat is supplied to the process and only exergy is needed for the heat extraction from a cooling system.

In compressor chillers, the input exergy flow equals the compressor's electrical power, while for sorption chillers it equals the difference between the input and output exergy enthalpy ([1] and [2]):



Sl.1. Vstopajoči in izstopajoči eksergijski tokovi v hladilni napravi  
Fig.1. Input and output exergy flows in a cooling device

Pretok  $\dot{m}$  posameznega energenta (plin, para, vroča voda) lahko določimo z znanim hladilnim številom in hladilno močjo hladilnika:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_R}{(h_2 - h_1) \varepsilon_{RA}} = \frac{\dot{Q}_{gr}}{(h_2 - h_1)} \quad (6)$$

Eksergijski tok hladilne moči je analogno kakor pri dovedenem eksergijskem toku tako za kompresorske kakor za sorpcijske hladilne naprave:

$$\dot{E}_{hl} = \dot{m}_{hl} (e_{2hl} - e_{1hl}) \quad (7)$$

Eksergijski izkoristek lahko definiramo kot razmerje:

$$\zeta_R = \frac{\dot{E}_{hl}}{\dot{E}_{dov}} \quad (8)$$

The mass flow  $\dot{m}$  of each energy carrier (gas, steam, hot water) can be determined by the COP and the cooling capacity of the chiller:

The exergy flow of the cooling capacity is defined in the same way as the input exergy flow for the compressor and sorption chillers:

Exergy efficiency may be determined as the ratio:

## 2 EKSERGIJSKI IZKORISTKI RAZLIČNIH HLADILNIKOV

Analiziramo eksergijski izkoristek vodno hlajenih kompresorskih in absorpcijskih hladilnikov.

V analizi smo upoštevali, da se za hlajenje parnih absorpcijskih hladilnikov izkoristi entalpija pare do temperature okolice, saj v parovodnem omrežju običajno ni povratnega voda za odvod kondenzata. Pri plinsko gnanih absorpcijskih hladilnikih smo predpostavili, da je eksergija plina enaka spodnji kurilnosti.

Iz preglednice 1 je razvidno, da se hladilna števila različnih hladilnikov pri enakih obratovalnih parametrih med seboj precej razlikujejo. Hladilno število hladilnika ne daje prave slike o porabi primarne energije. To da eksergijski izkoristek.

Na sliki 2 vidimo, da so električno gnani kompresorski hladilniki eksergijsko najučinkovitejše hladilne naprave. Z vročo vodo gnani absorpcijski hladilniki dosegajo za okrog 15% manjšo eksergijsko učinkovitost. S paro gnani absorpcijski hladilniki dosegajo za okrog 25 do 30 odstotkov manjšo eksergijsko učinkovitost v primerjavi s kompresorskimi hladilniki. Eksergijsko najslabše hladilne naprave so s plinom gnani absorpcijski hladilniki.

## 2 EXERGY EFFICIENCIES OF CHILLERS

In this analysis, the exergy efficiencies for the water-cooled compressor and the absorption chillers are discussed.

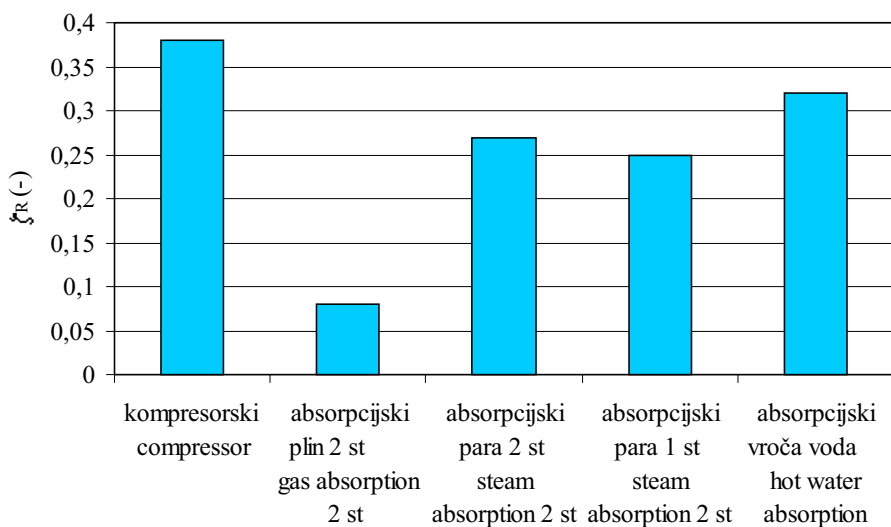
The analysis took into account that the enthalpy of the steam for the steam-driven absorption chillers is exploited to the ambient temperature, because steam pipelines do not usually have return pipelines for the condensed steam. For the gas-driven absorption chillers it was supposed, that the exergy of the gas equals the net calorific value.

Table 1 shows the large differences between the COPs for different chillers. The COP of a chiller does not show the real primary energy consumption. This can be obtained from the exergy efficiency.

Figure 2 shows that the electrically driven compressor chillers are the most exergetically efficient chillers. Hot-water-driven absorption chillers have an approximately 15% lower exergy efficiency. Steam-driven absorption chillers have an approximately 25 to 30 percent lower exergy efficiency when compared to the compressor chillers. Gas driven absorption chillers have the lowest exergy efficiency.

Preglednica 1. Parametri obratovanja hladilnika, ( $\dot{Q}_R = 1\text{MW}$ ) [3]  
 Table 1. Operational parameters of the chiller ( $\dot{Q}_R = 1\text{MW}$ ) [3]

Tip hladilnika Type of the chiller	Hlajena voda Chilled water °C	Hladilna voda Cooling water °C	Pogonska energija Power	$\epsilon_R$
Električni kompresorski Electric compressor	7/13	25/30	Elektrika Electricity	5,4
Absorpcijski plinski (2 st) Gas absorption (2 st)	7/13	25/30	Hi=36 MJ/m <sup>3</sup>	1,06
Absorpcijski parni (1 st) Steam absorption (1 st)	7/13	25/30	1 bar, nasičena 1 bar, saturated	0,73
Absorpcijski parni (2 st) Steam absorption (2 st)	7/13	25/30	7,5 bar, nasičena 7.5 bar, saturated	1,2
Absorpcijski vročevodni Hot water absorption	7/13	25/30	90 / 75°C	0,73



Sl.2. Eksergijski izkoristki hladilnikov

Fig. 2. Exergy efficiency of the chillers

### 3 MOŽNOSTI UVEDBE OSREDNJEGA HLAJENJA NA FAKULTETI ZA STROJNIŠTVO V LJUBLJANI

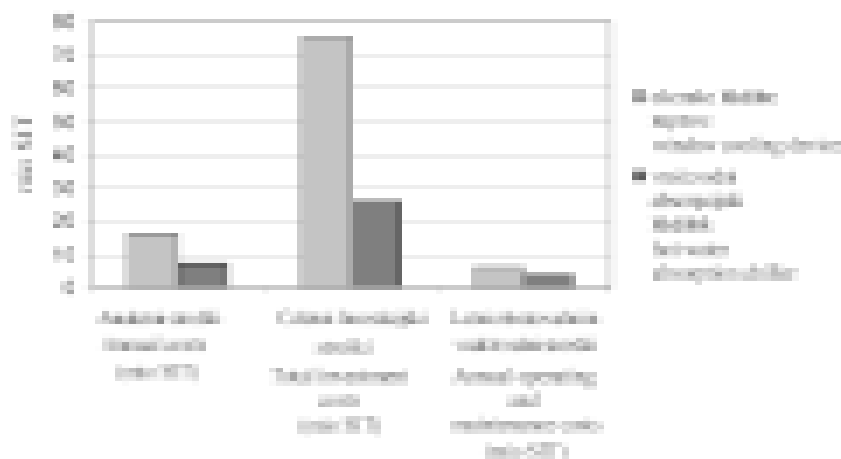
Kot primer bomo analizirali možnosti osrednjega hlajenja na Fakulteti za strojništvo (FS) v Ljubljani. Sedanje stanje je takšno, da hlajenje poteka v nekaterih prostorih s pomočjo okenskih ali kompaktnih hladilnih naprav.

Okvirne hladilne obremenitve vseh objektov FS v Ljubljani pomenijo 900 kW [4]. Ker je FS oskrbovana, poleg električne energije, s plinom iz plinovodnega omrežja ter vročo vodo iz vročevodnega omrežja, se za hlajenje ponuja možnost postavitve s plinom ali vročo vodo gnanih absorpcijskih hladilnikov. Z gospodarnega vidika pomenijo s plinom in vročo vodo gnani absorpcijski hladilniki v primerjavi s kompresorskimi večje investicijske stroške. Da bi bili absorpcijski hladilniki konkurenčni kompresorskim, bi morali biti temu ustrezno razmerje med cenama električne in toplotne energije. V našem primeru smo se usmerili na uporabo vročevodnih absorpcijskih hladilnikov (s pripadajočimi hladilnimi stolpi in črpalkami).

### 3 THE POSSIBILITIES OF INTRODUCING A CENTRAL COOLING SYSTEM TO THE FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING IN LJUBLJANA

As an example, the possibility of a central cooling system at the Faculty of Mechanical Engineering (FS) in Ljubljana has been considered. The present situation involves cooling some offices with either window or compact cooling devices.

The cooling needs of the FS in Ljubljana are estimated to be approximately 900 kW [4]. Because the FS is supplied with both electricity and natural gas from conventional networks as well as with hot water from a district heating network, there is a possibility of introducing a local district cooling system with gas- or hot-water-driven absorption chillers. From the economic point of view absorption chillers represent a higher investment cost, when compared to compressor chillers. For absorption chillers to be competitive the appropriate price ratio for heat and electrical energy should be selected. In our case the use of hot-water-driven absorption chillers (including the cool-



Sl. 3. Primerjava stroškov okenskih in absorpcijskih hladilnih naprav

Fig. 3. A comparison of the costs between window chillers and absorption chillers

V analizi smo izračunali anuitetne stroške posamezne vrste hladilnih naprav ob povprečni ceni električne energije (17 SIT / kWh)[7] na FS v poletnem obdobju in pri predpostavljenih 600 urah obratovanja letno (opazovano obdobje 20 let). Utežena medbančna obrestna mera je bila v analizi enaka 5%, temeljna obrestna mera (TOM) pa 9%. Na podlagi enakih anuitetnih stroškov kompresorskih in absorpcijskih hladilnikov je bila določena konkurenčna cena vroče vode [3], in sicer okrog 2,6 SIT / kWh. Cena vroče vode je zaradi različnih kriterijev pri izračunu anuitet (možnost popusta pri investiciji s strani proizvajalca, drugačna TOM, možnosti subvencij itn.) spremenljiva. Dejansko bi bila ta cena med 2 in 3 SIT/kWh. Če bi za pokrivanje hladilnih obremenitev FS uporabljali samo okenske hladilne naprave, bi to pomenilo precej večje investicijske in obratovalne stroške v primerjavi z osrednjo pripravo hladu. Slika 3 prikazuje primerjavo anuitetnih stroškov za primer osrednje priprave (absorpcijski hladilnik, hladilni stolp, črplaka) hladu in primer lokalnega hlajenja z okenskimi hladilnimi napravami, skupne hladilne moči 900 kW. V analizi je bila upoštevana cena vroče vode 2,6 SIT / kWh.

Uporaba osrednjega hladilnika bi pomenila precej nižje investicijske stroške na enoto hladu. Ti se namreč z manjšanjem naprave močno povečujejo. Pri okenskih hladilnih napravah s hladilno močjo okrog 3 kW bi v primerjavi z osrednjim absorpcijskim hladilnikom dosegali kar trikrat večje investicijske stroške na enoto hladu. Prav tako so obratovalni stroški zaradi nizkega hladilnega števila ( $\epsilon_r < 3$ ) pri okenskih hladilnih napravah skoraj dvakrat večji. Temu primerno so veliki tudi anuitetni stroški.

#### 4 SKLEP

Delne rešitve hlajenja v objektih je mogoče rešiti na ustrezen način le z uvedbo lokalnega sistema daljinskega hlajenja. V primeru FS v Ljubljani se število okenskih hladilnih naprav in s tem tudi poraba električne energije stalno povečuje, zato bi bilo nujno razmisliti o postavitvi osrednjega hladilnega sistema. Predlagamo

ing towers and pumps) was analysed. In the analysis, the costs of each cooling system for an average summer season's electrical energy price (17 SIT / kWh) at the FS and an assumed annual 600 operating hours were calculated. Interest rates of 5% per annum and an inflation rate of 9% (TOM) were considered in the analysis. A competitive price for the hot water was determined, based on equal costs for the compressor and absorption chillers. The price was approximately 2.6 SIT / kWh. The hot-water price is variable because of different criteria in the calculation of costs (the possibility of discount investment costs for the cooling system, different TOM, the possibility of a subsidy etc.). The real competitive price of the hot water is therefore between 2 and 3 SIT/kWh. If window cooling devices, rather than central chillers were used for cooling the FS, this would represent much higher investment and operating costs. Figure 3 presents a comparison of the costs for the case of local cooling and for the case of central cooling (absorption chiller, cooling tower, pump) at the FS, (the cooling capacity was 900 kW). In the analysis a hot-water price of 2.6 SIT / kWh was considered.

By using a central chiller, much lower investment costs per unit of cooling capacity could be obtained. These increase when the cooling capacity of the chiller is lower. For the window cooling devices with a cooling capacity of 3 kW, the specific investment costs are 3 times higher, when compared to the central absorption chiller. Because of the low COP ( $COP < 3$ ), the operational costs are almost 100% higher for the window chillers.

#### 4 CONCLUSION

The problem of cooling a building can best be solved only by the introduction of a local district cooling network. In the case of the FS in Ljubljana, the number of the window chillers and therefore the electrical energy consumption is rapidly increasing. Consequently, it is necessary to consider

uporabo z vročo vodo gnanih absorpcijskih hladilnikov. Ker bi to pomenilo referenčni objekt kot primer lokalnega sistema daljinskega hlajenja, bi bilo mogoče uveljaviti določene popuste oz. subvencije ter tako doseči gospodarno in energijsko upravičeno postavitev z vročo vodo gnane absorpcijske hladilnika.

the introduction of a central cooling system. This could represent a reference building and an example of local district cooling system. If some discounts and subsidies could be introduced, a hot-water-driven absorption chiller, as an energetically and economically justified cooling system, could be introduced.

#### 5 SIMBOLI 5 SYMBOLS

eksrgijski tok	$\dot{E}$	W	exergy flow
specična eksrgija	$e$	kJ / kg	specific exergy
entalpija	$h$	kJ / kg	enthalpy
masni tok	$m$	kg / s	mass flow
moč	$P$	W	power
toplotni tok	$Q$	W	heat flow
specifična entropija	$s$	kJ / kg	specific entropy
temperatura	$T$	K	temperature
hladilno število hladilnika	$\varepsilon$		coefficient of performance (COP) of the chiller
eksrgijski izkoristek	$\zeta$		exergy efficiency

#### INDEKSI

absorpcijski  
dovod  
grelna  
hlajenje  
izgube  
kompresorski  
okolica  
hladilna

#### INDEX

A  
dov  
gr  
hl  
IZG  
K  
ok  
R

absorption  
supply  
heating  
cooling  
losses  
compressor  
ambient  
cooling

#### 6 LITERATURA 6 REFERENCES

- [1] Baehr, H.D. (1978) *Termodinamik. Springer Verlag.*
- [2] Poredoš, A. (1994) Eksrgijska analiza parnih in sorpcijskih hladilnih procesov. *Strojniški vestnik*, letn.40, št. 7-8, 263-272.
- [3] Kitanovski, A., Remec, J., A. Poredoš (1999) Ekonomsko tehnično primerjalni izračun kompresorskih in absorpcijskih hladilnikov. Računalniški program, *Projekt za Energetiko Ljubljana.*
- [4] Kitanovski, A., Remec, J., A. Poredoš (1998) Možnosti nadgradnje daljinskega ogrevanja in plinovodnega sistema z daljinskim hlajenjem. *Projekt za Energetiko Ljubljana.*

Naslov avtorjev: mag. Andrej Kitanovski  
prof.dr. Alojz Poredoš  
prof.dr. Matija Tuma  
Fakulteta za strojništvo  
Univerze v Ljubljani  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana

Authors' Address: Mag. Andrej Kitanovski  
Prof. Dr. Alojz Poredoš  
Prof. Dr. Matija Tuma  
Faculty of Mechanical Eng.  
University of Ljubljana  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana, Slovenia

Prejeto: 21.7.2000  
Received:

Sprejeto: 20.12.2000  
Accepted: