

## Tehnično ekonomska analiza izrabe odpadne toplote pri hlajenju strojev

### Engineering Economic Analysis of Waste Heat at Machine Cooling

Sašo Kronovšek - Alojz Poredoš

*V industriji in obrti se pogosto srečujemo z obdelovalnimi postopki, pri katerih termični procesi potekajo na temperaturi, drugačni od okolice. V večini teh primerov je treba na eni strani dovajati, na drugi pa odvajati potrebno toploto. Do sedaj je bila večina takšnih primerov rešena s preprostim pretočnim hlajenjem s komunalno vodo. Tak način odvoda je ekološko in tudi ekonomsko sporen. Za uporabo sodobnejših načinov hlajenja predvsem takšnih z možnostjo izrabe odvečne toplote je treba temeljito raziskati mogoče izvedbe, tako s tehnološkega kakor tudi z ekonomskega vidika. V članku so opisani različni hladilni sistemi, poudarjena pa je tehnično ekonomska analiza konkretne izvedbe hlajenja z izrabo odvečne toplote pri stroju za brizganje plastike.*

© 1999 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: hlajenje strojev, toplota odpadna, brizganje polimerov, analize ekonomske)**

*In industry and trade we usually encounter forming procedures where thermal processes take place at the temperature different from the surrounding one. In most of these cases there are necessities to supply heat on one hand and to take it away on the other hand. Until now most of such cases were solved with a simple circulating cooling using communal water. This kind of cooling is ecologically and economically questionable. To involve modern types of cooling, especially such with possibility of reusing surplus heat, there is necessary to test possible constructions from the technological as from the economic point of view. Different cooling systems are presented in the paper and there is a special stress on the engineering - economic analysis of the existing cooling of the plastic mold filling machine.*

© 1999 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: cooling-machines, waste heats, injection moulding, economic analysis)**

#### 0 UVOD

Glede na energijske tokove delimo industrijske procese v dve glavni skupini:

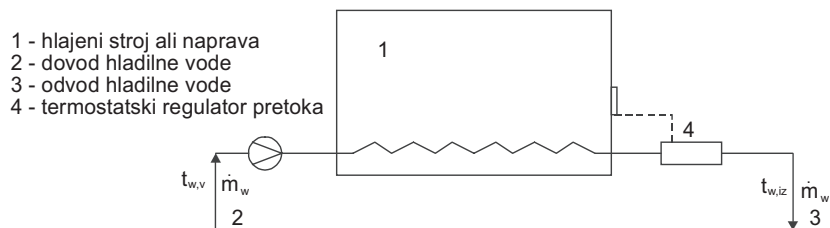
- procesi, pri katerih se odvečna toplota pojavlja zaradi toplotne obdelave,
- procesi, pri katerih se sprošča toplota zaradi mehanskega obdelovalnega procesa.

V prvo skupino spadajo predvsem postopki predelave plastičnih mas, varilni postopki, toplotne obdelave v procesni tehniki, kemično čiščenje itn. Druga skupina je nekoliko manjša, obsega pa postopke mehanske obdelave, predvsem v kovinski industriji. Najznačilnejši so brušenje in odrezovalni postopki.

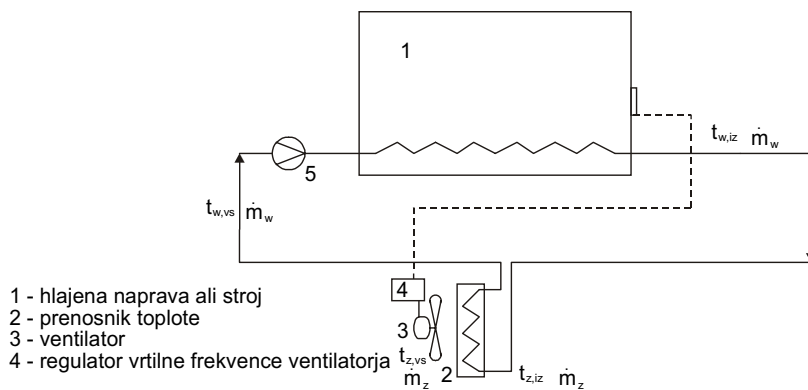
Za nemoten potek omenjenih procesov je potreben ustrezen toplotni ponor, kamor odvajamo odvečno toplotno energijo. Pravilno delovanje stroja je odvisno od odvajanja presežne toplote, pri nekaterih procesih je natančen odvod toplote na strogo definiranih temperaturnih nivojih zelo pomemben, pri drugih pa so te zahteve ohlapnejše. Potreba po odvzemu odvečne toplote se v praksi

pojavlja predvsem pri procesih prve skupine. V tovrstnih sistemih se pojavljajo večji presežki toplote, nekoliko višja pa je praviloma tudi temperaturna raven odvečne toplote. V zadnjem času se v širšem obsegu pojavljajo tudi potrebe po odvodu toplote, nastale pri delovanju informacijskih sistemov (telefonija, računalniki, naprave za nemoteno oskrbo z električno energijo). Temeljno vprašanje, ki se pri gradnji tovrstnih hladilnih sistemov pojavlja, je, ali je tehnično izvedljiva in ekonomsko upravičena izraba odvečne toplote, ali pa jo odvajamo v okolico.

Pri študiju literature je bilo ugotovljeno, da ne obstaja splošen model reševanja tovrstne problematike. Posamezne rešitve (ki se uporabljajo tudi v drugih podobnih primerih) so sicer zelo dobro obdelane, navadno pa ne obstaja splošen postopek, ki bi upošteval tako tehnične zahteve in možnosti kakor tudi ekonomski vidik problematike. V našem primeru smo si zastavili tehnično ustrezno izvedbo odvajanja odvečne toplote s poudarkom na varčevanju vode. Pri tem smo upoštevali načelo sodobnega gospodarjenja: uporaba odvečne toplote v čim večji mogoči meri, vendar ne za vsako ceno.



Sl. 1. Odprti hladilni sistem s pretočnim hlajenjem



Sl. 2 Zaprti hladilni sistem z zračnim lamelnim prenosnikom toplote

## 1 HLADILNI SISTEMI

### 1.1 Odprti hladilni sistemi

Osnovni sistem odvoda toplote je t.i. pretočno hlajenje, je preprost način hlajenja, pri katerem se hladna vodovodna voda ali voda iz katerega drugega vira preprosto pretaka skozi stroj in pri tem odvzema odvečno toploto. Sistem je lahko bolj ali manj dopolnjen z različnimi regulacijskimi napravami. V primeru, da zajemamo vodo oziroma hladilno sredstvo iz nekega vira in jo ogreto vračamo nekemu ponoru, govorimo o t.i. odprtem hladilnem sistemu.

### 1.2 Zaprti hladilni sistemi

Značilnost zaprtih hladilnih sistemov je kroženje hladilnega sredstva (največkrat voda) med virom in ponorom toplote. Zaprti hladilni sistemi so praviloma ekološko zelo primerni, saj ne poteka nobena snovska izmenjava med hladilnim sistemom in okolico.

Kakor je razvidno s slike 3, kjer so prikazane različne izvedbe zaprtih hladilnih sistemov, lahko pri hlajenju koristno izrabljamo odvečno toploto, ali pa ne. V levi veji diagrama sta tipična primera zaprtih hladilnih sistemov brez izrabe odvečne toplote. V desnem delu pa imamo opravka s sistemi, pri katerih skušamo toploto koristno uporabiti. Zračni prenosnik toplote lahko uporabimo v obeh primerih. Pri izrabi odvečne toplote imamo dve možnosti. Če je toplota na

zadostni temperaturni ravni, da jo lahko uporabnik neposredno uporabi, potem jo lahko uporabimo v takšnem stanju, v kakršnem je. V nasprotnem primeru je treba zagotoviti njeno uporabno vrednost z dvigom na višjo temperaturno raven.

### 2 ODVOD ODVEČNE TOPLOTE PRI HLAJENJU STROJAZA BRIZGANJE PLASTIKE

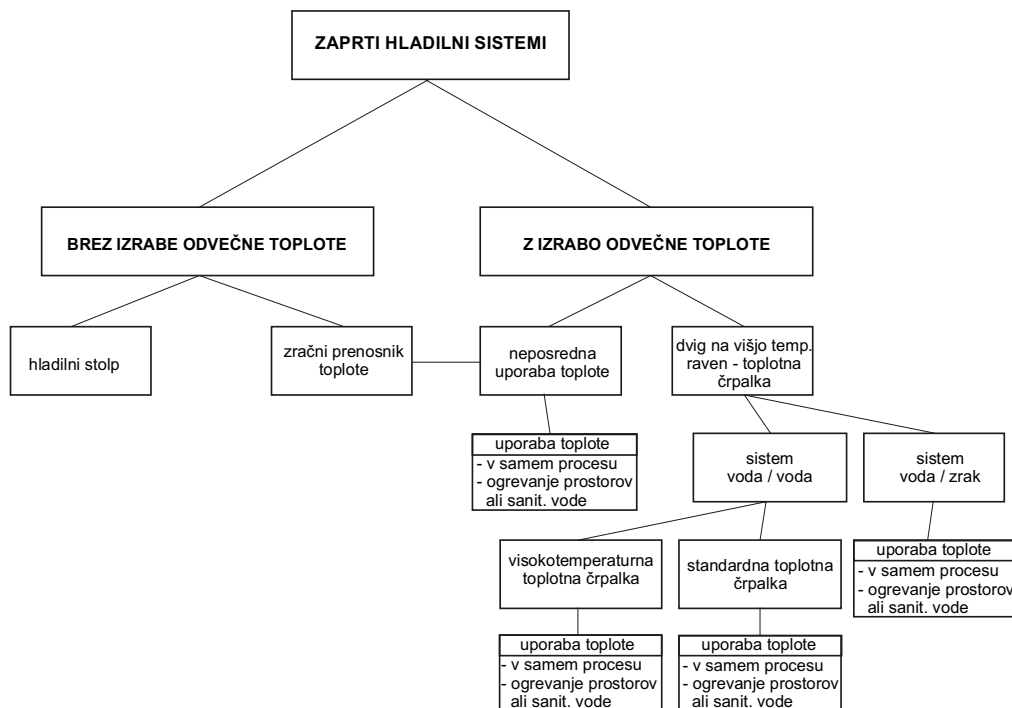
Raziskati želimo gospodarno učinkovitost in izvesti primerjavo tehnično izvedljivih sistemov za odvod in uporabo procesne toplote. Obravnava temelji na konkretnem primeru stroja za brizganje plastike.

Proučevali bomo tri tehnično izvedljive sisteme.

- Kompresorsko toplotno črpalko
- Odprti sistem pretočnega hlajenja s komunalno vodo in plinskim dogrevanjem na temperaturo odvoda
- Odprti sistem pretočnega hlajenja s komunalno vodo in električnim uporabnim dogrevanjem na temperaturo odvoda.

Za primerjavo posameznih sistemov odvoda in koristne izrabe toplote, moramo postaviti določene zahteve, ki naj jih izpolnjuje vsak obravnavan sistem.

- V vseh točkah simuliranja zajemamo toploto sredstvu, ki hladi stroj pri 17°C.
- V različnih točkah simuliranja odvajamo ponoru toploto pri različnih temperaturah od 40 °C do 90 °C, med različnimi točkami simuliranja je 10 K razlike.



Sl. 3. Izvedbe zaprtih hladilnih sistemov

- Kot reprezentativen toplotni tok pri porabniku velja tisti, ki ga doseže sistem s toplotno črpalko. To pomeni, da bosta preostala dva sistema (pretočno hlajenje z ogrevanjem s plinom in pretočno hlajenje z električnim ogrevanjem) zasnovana tako, da bosta na strani odvoda toplote porabniku v vsaki točki dosegala enako toplotno moč.

Pri tem nas zanimata gospodarnost delovanja posameznega sistema in primerjava med njimi. Ekonomsko analizo bomo izvedli po postopku delnih letnih stroškov [1].

### 2.1 Izhodiščni podatki:

Toplotni tok, ki ga moramo odvesti: 50 kW.  
 Temperaturni režim sredstva, ki hladi stroj: 12/17°C  
 Letno število ur obratovanja: 4505 h.

### 2.2 Zaprti hladilni sistem – toplotna črpalka (sistem A)

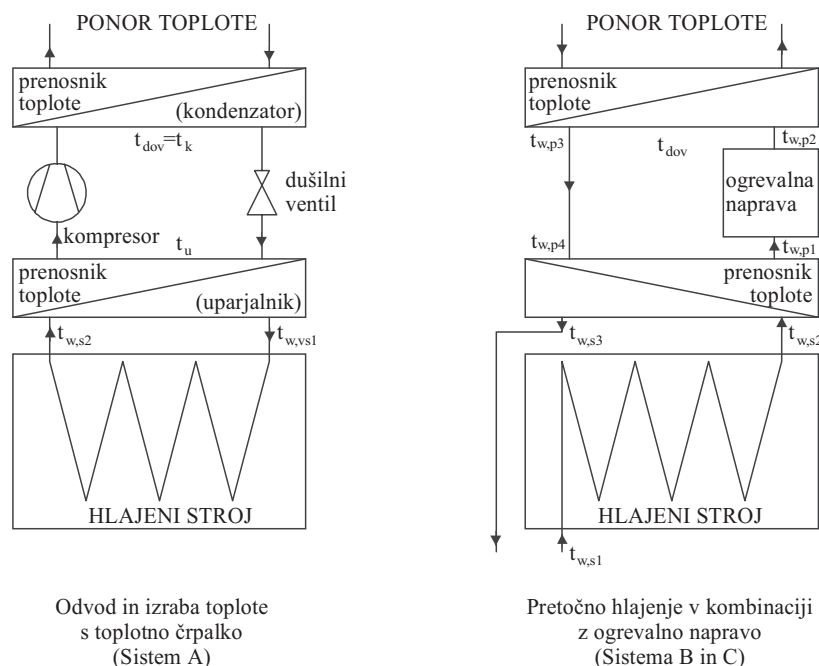
Sistem, ki je prikazan na sliki 4 (A), je sistem kompresorske toplotne črpalke, sestavljene iz dveh

Preglednica 1. Parametri hladilnih sistemov z izrabo odvečne toplote [2]

Sistem	A	B	C
Tip	kompresorska toplotna črpalka, hladivo R134a	pretočno hlajenje v povezavi s plinsko ogrevalno napravo	pretočno hlajenje v povezavi s plinsko ogrevalno napravo
Vir energije	elektrika	zemeljski plin	elektrika
Vir toplote	pretočna voda iz hlajenega stroja 12/17°C	pretočna voda iz hlajenega stroja 12/17°C	pretočna voda iz hlajenega stroja 12/17°C
Ponor toplote	pretočna voda ponora	pretočna voda ponora	pretočna voda ponora
Investicijski stroški	1.108.824,00 SIT	590.000,00 SIT	250.000,00 SIT

Preglednica 2. Cene energij in komunalne vode [3] in [4]

Vrsta	Cena	Opomba
Električna energija	16,35 SIT/kWh	obratovanje 17 ur dnevno, 9 v času prve tarife in 8 v času druge tarifne postavke
Zemeljski plin	53,73 SIT/Sm <sup>3</sup>	
Komunalna voda	285 SIT/m <sup>3</sup>	vključno s kanalščino in priklopom na čistilno napravo



Sl. 4. Hladilni sistemi z izrabo odvečne toplote

Preglednica 3. Kondenzacijska, električna moč, grelno in hladilno število toplotne črpalke

$t_k (^{\circ}C)$	40	50	60	70	80	90
$\dot{Q}_k (kW)$	62,45	66,72	71,05	75,17	82,61	92,75
$\dot{Q}_{el} (kW)$	12,45	16,72	21,05	25,17	32,61	42,75
$\varepsilon_{gr} (-)$	5,0	4,0	3,4	3,0	2,5	2,2
$\varepsilon_{hl} (-)$	4,0	3,0	2,4	2,0	1,5	1,2

ploščnih prenosnikov toplote (uparjalnik in kondenzator), hermetičnega batnega kompresorja, dušilnega organa, regulacijskih elementov in drugih sestavnih delov. Kot vir rabi omenjena odvečna toplota stroja za brizganje plastike, kondenzacijsko toploto pa prek kondenzatorja odvajamo ponoru, pri različnih temperaturah odvisno od simulirne točke. Delovanje toplotne črpalke smo simulirali z uporabo programskega paketa za preračun hladilnega sistema. Dosežena grelna, hladilna moč, grelna in hladilna števila so prikazana v preglednici 3.

### 2.3 Pretočno hlajenje s plinskim ali električnim dogrevanjem (sistema B in C)

Na sliki 4 je prikazan odprt sistem pretočnega hlajenja z dodatnim dogrevanjem z zemeljskim plinom (sistem B) ali električno energijo (sistem C). Hladilni medij (komunalna voda), ki se pretaka skozi stroj, se pri tem ogreje na  $t_{w,s2}$  (17°C). Pri prehodu skozi ploščni prenosnik toplote odda del toplote sredstvu v primarnem tokokrogu in se ohlajen na  $t_{w,s3}$  zavrže. V primarnem obtoku se

sredstvo najprej prenosniku toplote iz  $t_{w,p4}$  (10°C) ogreje na  $t_{w,p1}$  (14°C), nato pa še v ogrevalni napravi na temperaturo odvoda toplote (odvisno od točke simuliranja). V drugem prenosniku toplote odda toplotni tok, enak toplotnemu toku, ki ga dosega toplotna črpalka. Sistema B in C se razlikujeta le v vrsti ogrevalne naprave. Če hočemo pri sistemih B in C doseči enak izstopen toplotni tok kakor pri toplotni črpalci, moramo ustrezno izbirati masni tok prenosnega medija. Ker smo omejeni s temperaturnimi razlikami, potrebnimi za prenos toplote v prenosniku toplote, lahko torej izrabimo le del toplote iz pretočnega hlajenja. V preglednici 4 so za posamezno točko navedeni obratovalni parametri, s katerimi dosežeta sistema pretočnega hlajenja enak izstopen toplotni tok kakor sistem s toplotno črpalko.  $\dot{Q}_{hl}^*$  je toplotni tok, ki ga odvezamemu mediju, ki hladi obdelovalni stroj.  $\dot{Q}_{gr}^*$  pomeni toploto, ki jo mora zagotoviti ogrevalna naprava, da lahko uporabniku zagotovimo enak toplotni tok na enakem temperaturnem nivoju kakor toplotna črpalka.  $m_{ON}$  je masni tok medija, ki se pretaka skozi ogrevalno napravo (primarni obtok).

Preglednica 4. Parametri pri delovanju ogrevalne naprave v sistemu za izrabo odpadne toplote

$t_{odv}$ (°C)	40	50	60	70	80	90
$\dot{m}_{ON}$ (kg/s)	0,495	0,397	0,338	0,298	0,281	0,275
$\dot{Q}_{hl}^*$ (kW)	8,13	6,67	5,68	5,01	4,72	4,62
$\dot{Q}_{gr}^*$ (kW)	54,08	60,05	65,36	70,16	77,89	88,13

### 2.3 Postopek delnih letnih stroškov [1]

3 SKLEP

Postopek delnih letnih stroškov je primeren tudi za uporabo v sistemih varčevanja z energijo in jo uporabljajo mnogi avtorji. S faktorjem CR lahko določimo letni znesek R, potreben za odplačilo sedanje vsote P pri  $i\%$  obrestih v  $n$ -letih.

$$CR = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (1)$$

Če je sedanja vrednost denarja P in želimo izračunati letni obrok R v nekem časovnem obdobju, da dobimo povrnjeno vrednost P, lahko uporabimo naslednjo enačbo:

$$R = P \cdot CR \quad (2)$$

Delne letne stroške izračunamo po enačbi:

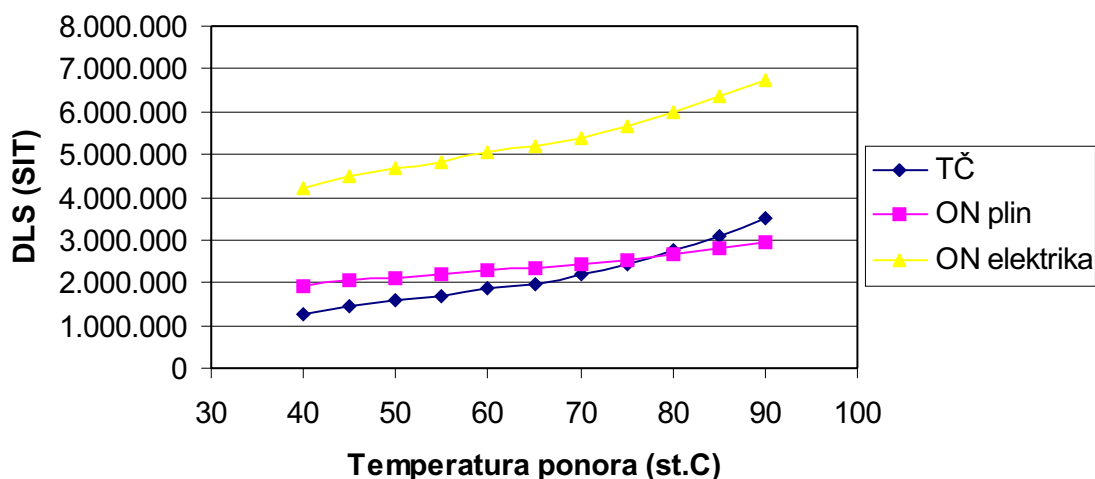
$$DLS = INV \cdot CR + LOS \quad (3)$$

Pri tem določimo investicijske stroške na podlagi vrednosti naprave, letne obratovalne stroške pa na temelju porabe energetskih virov, komunalne vode in drugih obratovalnih stroškov. Pri investicijskih vrednostih smo upoštevali trenutne cene omenjenih naprav na trgu. Prav tako so pri obratovalnih stroških upoštewane trenutne cene energije. Rezultati simuliranja so prikazani na sliki 5.

Kakor je razvidno s slike 5, je pri sistemu pretočnega hlajenja z električnim ogrevanjem letni strošek ne glede na temperaturo odvoda toplote bistveno, torej več ko dvakrat višji od preostalih dveh. To gre seveda na račun drage električne energije. Pri preostalih dveh sistemih pa so razmere med seboj podobne. Sistem s toplotno črpalko je pri nižjih vrednostih odvoda toplote ekonomsko učinkovitejši, njegova prednost pa se nekje do temperature 80 °C zmanjšuje, nad to vrednostjo je ekonomičnejša uporaba pretočnega hlajenja s plinskim dogrevanjem. To razmerje je odvisno predvsem od grelnega števila toplotne črpalke, ki se s temperaturo kondenzacije bistveno zmanjšuje. Poudariti je treba, da omenjena analiza velja le za opisani sistem, omenjene razmere delovanja in uporabljene cene energijskih virov in komunalne vode. Verjetno pa bi bila slika ob manjših spremembah (toplotna črpalka z drugim hladivom) podobna, morda bi se le prevojna točka pojavila pri kakšni drugi temperaturi ponora.

V prispevku smo prikazali primer, ki kaže, da je za pravilno odločitev izbire sistema hlajenja strojev potrebna tehnična in ekonomska presoja rešitev.

Ne glede na ekonomsko upravičenost je v prid toplotni črpalci predvsem ekološka primernost, saj ne porablja dragocene pitne vode in ne onesnažuje okolja z nenadzorovanimi emisijami.



Sl. 5. Delni letni stroški hladilnih sistemov z izrabo odvečne toplote

## 4. OZNAČBE

<i>CR</i>	-	faktor postopka delnih letnih stroškov
<i>DLS</i>	SIT	delni letni stroški
<i>INV</i>	SIT	investicijski stroški
<i>i</i>	%	obrestna mera
<i>LOS</i>	SIT	letni obratovalni stroški
<i>m</i>	kg/s	masni tok
<i>n</i>	leto	število let
<i>Q</i>	kW	moč, toplotni tok
<i>t</i>	°C	temperatura
<i>T</i>	K	absolutna temperatura
<i>ε</i>	-	grelno, hladilno število

## Okrajšave in indeksi

c	Carnotov
dov	dovedeni
el	električni
gr	gretje
hl	hlajenje
k	kondenzacija
ON	ogrevalna naprava
p	primarni
pon	ponor toplote
s	sekundarni
TČ	toplotna črpalka
u	uparjanje
v,w	voda
vir	vir toplote

## 5 LITERATURA

- [1] Goldstic, R.J. (1983) Waste Heat Recovery Handbook. *The Fairmont Press Inc.*, Atlanta.  
 [2] Empor d.o.o. (1999) Cenik komponent hladilne tehnike 1999. Ljubljana.  
 [3] Elektro Slovenija d.o.o. (1998) Cenik električne energije. Ljubljana.  
 [4] Javno komunalno podjetje Žalec (1999) Cenik komunalnih storitev. Žalec.

Naslov avtorjev: Sašo Kronovšek  
 prof.dr. Alojz Poredoš  
 Fakulteta za strojništvo  
 Univerze v Ljubljani  
 Aškerčeva 6  
 1000 Ljubljana

Prejeto: 19.7.1999

Sprejeto: 15.9.1999