

R. Budin, A. Mihelić-Bogdanić, E. Vujašinić\*

## SAČUVANJE ENERGIJE I OKOLIŠA PRIMJENOM KOGENERACIJE

UDK 620.9:504.06  
PRIMLJENO: 10.1.2007.  
PRIHVACENO: 2.5.2007.

*SAŽETAK: Porast energetske učinkovitosti u industrijskoj proizvodnji uz istodobno smanjenje opterećenja okoliša može se postići primjenom kogeneracije kao i sekundarnih izvora, tj. povrata procesnog kondenzata. Predlaže se zamjena uobičajene odvojene opskrbe električnom energijom iz mreže i proizvodnjom topline u kotlovskom postrojenju kogeneracijom, odnosno kombiniranom proizvodnjom toplinske i električne energije (CHP). Analizirane opcije usmjerene na smanjenje potrošnje primarnog izvora ukazuju na značajne uštede. Usporedba odvojene proizvodnje toplinske i električne energije i konvencionalne proizvodnje električne energije rezultira poboljšanjem od oko 34%. Povrat procesnog kondenzata u konvencionalnom procesu daje uštedu od oko 7%, dok se u kogeneracijskom postiže oko 16%. Istovremeno sniženjem potrošnje goriva, za istu isporučenu energiju, uz porast ekonomičnosti ostvaruje se i smanjenje toplinskog i kemijskog opterećenja okoliša.*

**ključne riječi:** polimerizacija, potrošnja energije, kogeneracija, povrat topline, ušteda

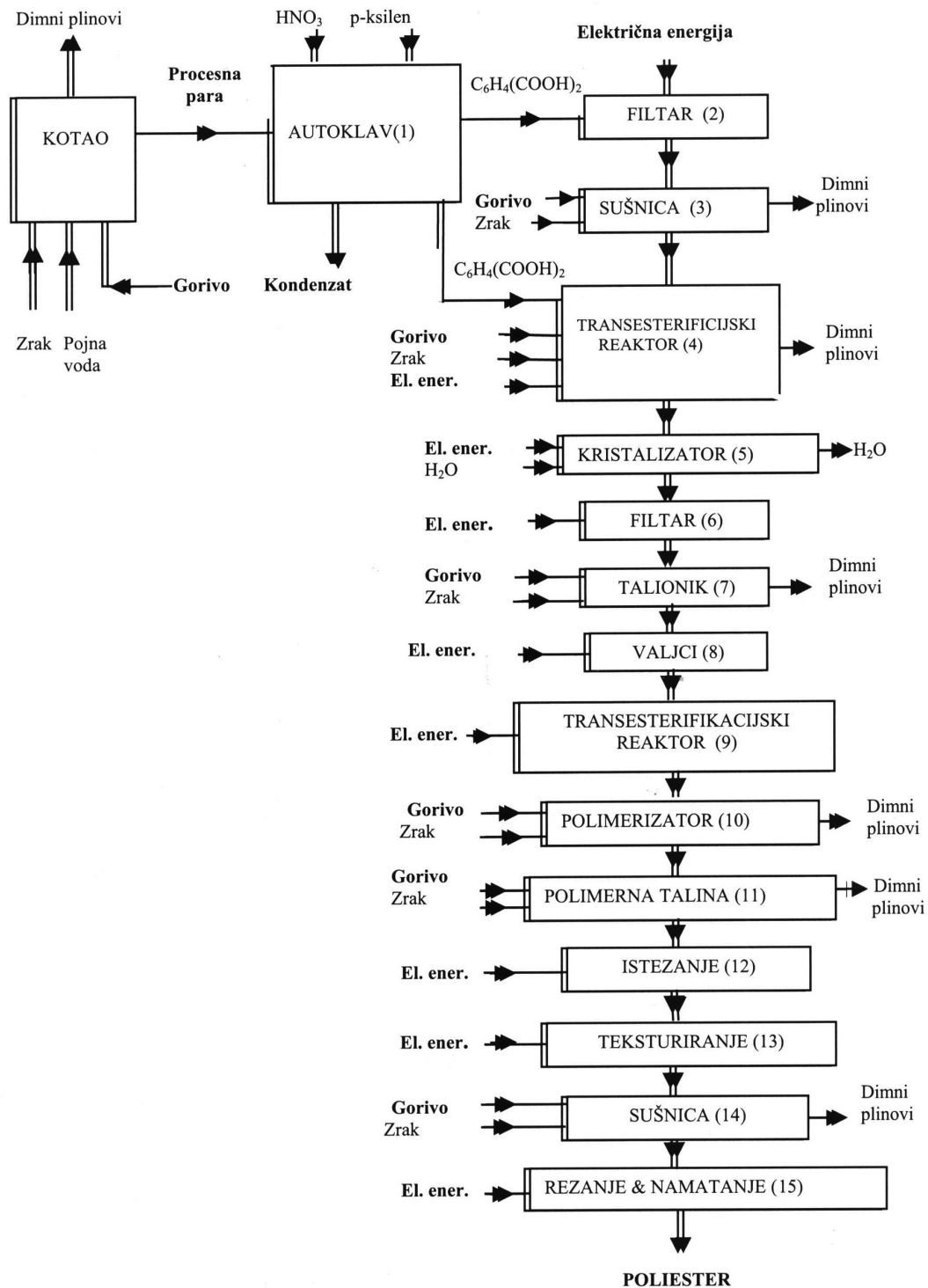
### ANALIZA PROIZVODNOG PROCESA

U današnje vrijeme 70-75% poliestera proizvodi se procesom kontinuirane polimerizacije pri čemu se upotrebljava tereftalna kiselina dobivena katalitičkom (Co) oksidacijom ( $\text{HNO}_3$ ) p-ksilena (Rodriguez, 1982., Olmsted&Williams, 1994., Stevens, 1999.). Polimeri među kojima se široko primjenjuje linearni poliestar (polietilen tereftalat, PET) je najsvestraniji sintetski polimer čija se komercijalna primjena propisuje odličnim svojstvima toplinskom stabilnošću i otpornošću na gužvanje (Stevens, 1999., Böhm, Komber, Jafari, 2003., Edlund&Albertsson, 2003.).

Proizvodnja poliestera ubraja se u energetske intenzivne industrijske procese s potrošnjom električne i toplinske energije kao i primarnog izvora, tj. goriva (slika 1). Električna energija, uobičajeno dobavljena iz mreže, upotrebljava se za filtre (2, 6), reaktor za esterifikaciju (4), kristalizator (5), valjanje (8), transesterifikacijski reaktor (9), istežanje (12), teksturiranje (13) te rezanje i namatanje (15). Toplinska energija upotrebljava se za proces u autoklavnom reaktoru (1). Primarni izvor, tj. plinovito gorivo upotrebljava se neposredno u procesu sušenja (3, 14), esterifikacije (4), taljenja (7), polimerizacije (10) i taljenja polimera (11).

U analiziranom proizvodnom procesu potrošnja električne energije je 45,5% tj. 2,7 MW<sub>e</sub> ( $9,7 \cdot 10^6$  kJ/h), a toplinske energije 54,5% tj. 3,23 MW<sub>t</sub> ( $11,6 \cdot 10^6$  kJ/h). Za neposrednu primjenu upotrebljava se  $30,23 \cdot 10^6$  kJ/h odnosno 8,4 MW plinovitog goriva (Brown, Hamel, Hedman, 1997.).

\* Dr. sc. Rajka Budin, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Savska c. 16, 10000 Zagreb, dr. sc. Alka Mihelić-Bogdanić, Tekstilno-tehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Savska c. 16, 10000 Zagreb, dr. sc. Edita Vujašinić, Tekstilno-tehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Prilaz baruna Filipovića 30, 10000 Zagreb.



Slika 1. Tok procesa proizvodnje poliestera

Figure 1. Polyester production process

S obzirom na energetski intenzitet proizvodnog procesa, učinkovitost je moguće povisiti promjenom istodobne proizvodnje električne i toplinske energije (kogeneracija, CHP), kao i povratom otpadne topline kondenzata.

## ODVOJENA OPSKRBA TOPLINSKE I ELEKTRIČNE ENERGIJE

U provedbi ovakvog procesa električna energija se kupuje iz mreže, dok se toplinska energija dobiva iz plinom loženog kotla i prenosi u proces kao pregrijana para. Potrebna toplina nije uskladištena u konačnom proizvodu, što znači, a u skladu s prvim glavnim zakonom termodinamike, da mora biti odbačena kao toplina (*Budin&Mihelić-Bogdanić, 1997.*). Proizvodnja toplinske energije u konvencionalnom procesu provodi se u plinom loženom kotlu sa stupnjem djelovanja  $\eta_K=80\%$ , a toplina se pronosi u autoklavni reaktor. Niža toplinska vrijednost plinovitog goriva, uz poznavanje sastava izraženog u volumnim postocima,  $8,05\%CH_4$ ;  $0,36\%C_2H_6$ ;  $0,12\%C_3H_8$ ;  $0,05\%C_4H_{10}$ ;  $0,01\%C_5H_{12}$ ;  $0,85\%CO_2$ ;  $0,56\%N_2$  računa se primjenom izraza (*Budin&Mihelić-Bogdanić, 2002.*):

$$H_n=358CH_4+636C_2H_6+913C_3H_8+1158C_4H_{10}+1465C_5H_{12}=35507 \text{ kJ/m}^3. \quad [1]$$

Kotao proizvodi pregrijana paru 5 bar,  $248^{\circ}C$ , koja prolazi kroz autoklavni reaktor, a vraća se kao procesni kondenzat od  $150^{\circ}C$ . Uzimajući u obzir potrošnju toplinske energije  $3,23, MW_t$  ( $11,6 * 10^6 \text{ kJ/h}$ ) masa pare uz entalpije (*Budin&Mihelić-Bogdanić, 2002.*) računa se iz:

$$D_p * (h_{248} - h_{150}) = Q_t \quad [2]$$

$$D_p = Q_t / \Delta h = 11,6 * 10^6 / (2950 - 640) = 5,02 * 10^3 \text{ kg/h.}$$

Potrošnja prirodnog plina (kW,  $m^3/h$ ):

$$V_{ge}(kW) = N_e / \eta_e = 3,23 * 10^3 / 0,80 = 4,04 * 10^3, \quad [3]$$

$$V_{gt}(m^3/h) = V_{ge}(kW) * 3600 / H_n = 4,04 * 10^3 * 3600 / 35507 = 409,6. \quad [4]$$

Ovakav proces zadovoljava potrebe toplinske energije, dok se električna energija proizvodi u elektrani sa stupnjem iskorištenja  $\eta_e = 33\%$ . Potrošnja goriva računana prema [3], [4] je:

$$V_{ge}(kW) = N_e / \eta_e = 2,7 * 10^3 / 0,33 = 8,2 * 10^3,$$

$$V_{ge}(m^3/h) = V_{ge}(kW) * 3600 / H_n = 8,2 * 10^3 * 3600 / 35507 = 831,4.$$

Ukupna potrošnja goriva u procesu odvojene opskrbe toplinske i električne energije je:

$$\Sigma V_g(kW) = V_{gt}(kW) + V_{ge}(kW) = (4,04 + 8,2) * 10^3 = 12,42 * 10^3 \quad [5]$$

$$\Sigma V_g(m^3/h) = V_{gt}(m^3/h) + V_{ge}(m^3/h) = 409,6 + 831,4 = 1,241 * 10^3. \quad [6]$$

Uzimajući u obzir potrebe električne i toplinske energije te njima odgovarajuću potrošnju prirodnog plina, ovakav konvencionalni sustav ima stupanj iskorištenja:

$$\eta_{kon} = (N_e + N_t) / \Sigma V_g(kW) = (2,7 + 3,23) * 10^3 / 12,42 * 10^3 = 0,477 \approx 48\%. \quad [7]$$

## MOGUĆNOSTI SAČUVANJA ENERGIJE

U energetski intenzivnoj proizvodnji poliestera postoji međutim značajni potencijal za sačuvanje energije (*Budin&Mihelić-Bogdanić, 2006., Worrell, De Beer, Faaij, Blok, 1994.*). Učinkovitost uporabe primarnih izvora može se značajno poboljšati primjenom kogeneracije, tj. kombinirane proizvodnje toplinske i električne energije (CHP), odnosno sekundarnih izvora, tj. otpadnih toplina (*Budin&Mihelić-Bogdanić, 1997., Mihelić-Bogdanić&Budin, 2002.*). Rezultati predočenog proračuna ukazuju na mogućnost optimizacije primjenom kogeneracije kao i povrata procesnog kondenzata.

### Kombinirana proizvodnja toplinske i električne energije

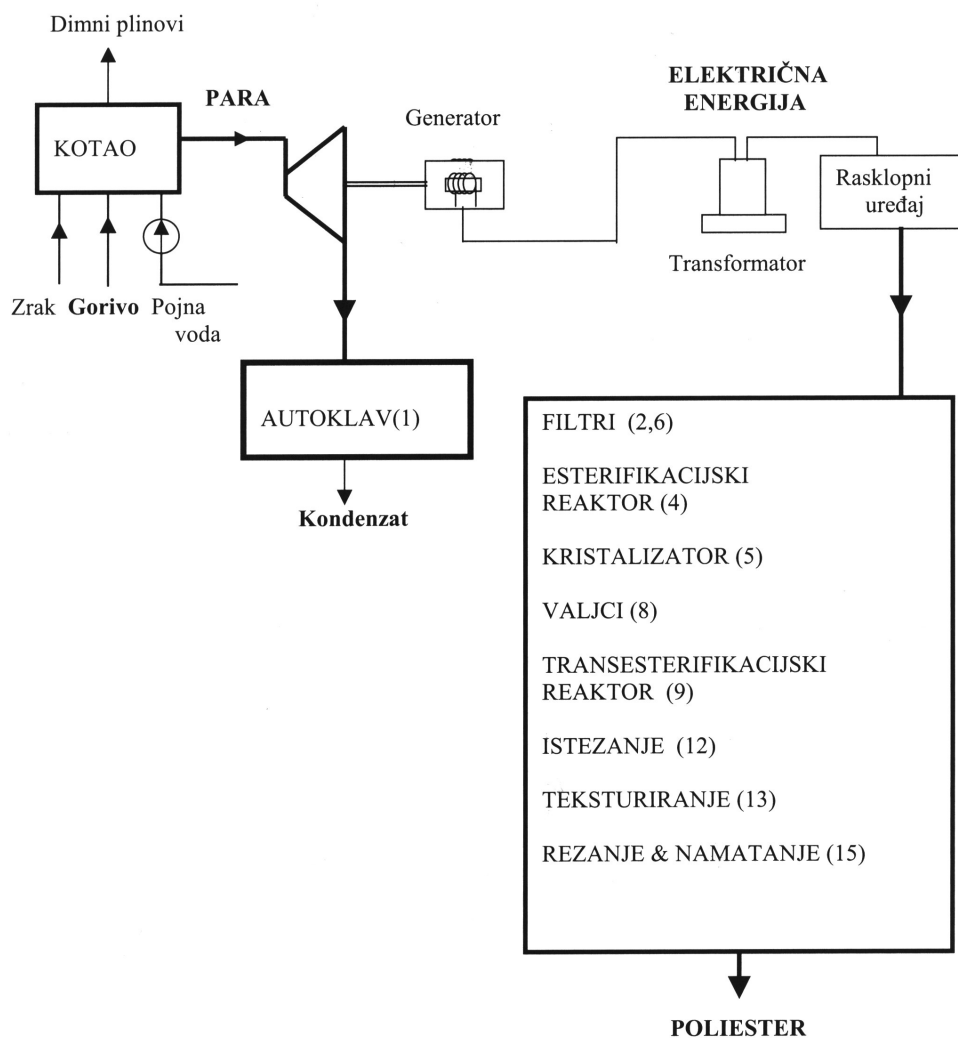
Kombinirana proizvodnja toplinske i električne energije (CHP), tj. kogeneracije je condicio sine qua non porasta učinkovitosti termoenergetskih postrojenja sa što manjim utjecajem na okoliš. U usporedbi s konvencionalnim načinom proizvodnje energije, kogeneracija uz energetske i ekološke prednosti ima i uočljive ekonomske prednosti (*Lemar, 2002., Hinrichs, 2004., Budin & Mihelić-Bogdanić, 2006.*).

Zbog toga je kombinirana proizvodnja toplinske i električne energije pogodna za primjenu u energetski intenzivnim proizvodnim procesima (Bonilla, Akisawa, & Kashhiwagi, 2003., Korhinen, 2002.). U skladu s time ovdje je analizirana mogućnost primjene parno turbinskog agregata, gdje para proizvedena u kotlu ulazi u protutlačnu turbinu povezanu s električnim generatorom (slika 2). Pregrijana para mase  $D_p = 5,02 \cdot 10^3 \text{ kg/h}$  temperature  $570^\circ\text{C}$  i tlaka 40 bar proizvodi se u kotlu. Nakon ekspanzije u

protutlačnoj turbini do tlaka od 5 bar,  $248^\circ\text{C}$  para se dovodi u autoklavni reaktor iz kojeg se vraća kao procesni kondenzat. U predloženoj opciji zadovoljena je ukupna potrošnja toplinske energije  $Q_t = 3,23 \text{ MW}_t$  ( $11,6 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}$ ). Dobivena električna snaga:

$$N_{e\text{CHP}} = D_p \cdot (h_{570} - h_{248}) / 3600 = 5,02 \cdot 10^3 (3600 - 2950) / 3600 = 0,91 \cdot 10^3 \text{ kW tj.} \quad [8]$$

$$Q_{e\text{CHP}} = 3,3 \cdot 10^6 \text{ kJ/h.}$$



Slika 2. Kombinirana proizvodnja toplinske i električne energije

Figure 2. Combined heat and power production

U analiziranom procesu postiže se ušteda električne energije kupljene iz mreže:

$$U_{\text{CHP}} = N_{\text{eCHP}}/N_{\text{e}} = 910/2700 = 0,337 \approx 34 \% \quad [9]$$

Potrošnja goriva za proizvodnju električne energije u kogeneracijskom sustavu:

$$V_{\text{gCHPe}} \text{ (kW)} = N_{\text{eCHP}}/\eta_{\text{k}} = 910/0,80 = 1138 \text{ odnosno} \quad [10]$$

$$V_{\text{gCHPe}} \text{ (m}^3\text{/h)} = V_{\text{gCHPe}} \text{ (kW)} * 3600/H_n = 1138 * 3600/35507 = 115,4. \quad [11]$$

Kogeneracijski proces zadovoljava potrebe toplinske energije, pri čemu je potrošnja prirodnog plina  $V_{\text{gt}} = 4040 \text{ kW}$  tj.  $409,6 \text{ m}^3\text{/h}$  iz [3]. Ukupna potrošnja goriva u CHP sustavu je:

$$\Sigma V_{\text{gCHP}} \text{ (kW)} = V_{\text{gCHPe}} \text{ (kW)} + V_{\text{gt}} \text{ (kW)} = 1138 + 4040 = 5178. \quad [12]$$

$$\Sigma V_{\text{gCHP}} \text{ (m}^3\text{/h)} = V_{\text{gCHPe}} \text{ (m}^3\text{/h)} + V_{\text{gt}} \text{ (m}^3\text{/h)} = 115,4 + 409,6 = 525. \quad [13]$$

Slijedi stupanj iskorištenja CHP procesa:

$$\eta_{\text{CHP}} = (N_{\text{eCHP}} + N_{\text{t}}) / \Sigma V_{\text{gCHP}} = (910 + 3230) / 5178 = 0,80 \text{ tj. } 80\%. \quad [14]$$

Prednost CHP sustava u odnosu na konvencionalni vidljiva je iz porasta apsolutne učinkovitosti:  $\eta_{\text{CHP}} - \eta_{\text{kon}} = 80 - 48 = 32\%$ .

### Povrat topline procesnog kondenzata

Primjena topline procesnog kondenzata je značajna mogućnost sačuvanja energije, pri čemu se snižava potrošnja goriva i do 30% (Budín, Mihelić-Bogdanić, Filipan, 1994., Mihelić-Bogdanić, Budín, Filipan, 1999.). Osim energetskog značaja, povrat kondenzata u kotlovsko postrojenje ima također ekološke i ekonomske prednosti u smislu smanjenja zagađenosti vode, kao i količine kemikalija za obradu i pripremu kotlovske vode (Mihelić-Bogdanić, Budín, & Sutlović, 2005.). U daljnjoj analizi provedena je usporedba procesa bez

povrata kondenzata s povratom u konvencionalnom kao i u kogeneracijskom procesu (slika 3).

Uz povrat kondenzata od  $Y=90\%$  s temperaturom  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  u standardnom procesu toplina izbačena u okoliš je:

$$Q_k = D_k * h_{150} = 5,02 * 10^3 * 640 = 3,2 * 10^6 \text{ kJ/h}, \quad [15]$$

pri čemu je  $D_k = D_p$ .

Temperatura mješavine kondenzata i dodatne vode temperature  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  nakon adijabatskog miješanja je:

$$t_m = t_{150} * Y + t_{20} * (1-Y) = 150 * 0,9 + 20 * (1-0,9) = 137^\circ\text{C}. \quad [16]$$

Povrat topline kondenzata:

$$Q_{\text{pk}} = D_k * Y * h_{150} = 5,02 * 10^3 * 0,9 * 640 = 2,89 * 10^6 \text{ kJ/h} \quad [17]$$

što odgovara potrošnji goriva:

$$V_{\text{gpk}} = Q_{\text{pk}} / H_n = 2,89 * 10^6 / 35597 = 81,4 \text{ m}^3\text{/h}, \quad [18]$$

pa je ušteda goriva iz [18 i 6]:

$$U_{\text{gpk}} = V_{\text{gpk}} / \Sigma V_{\text{g}} = 81,4 / 1241 = 0,0656 \approx 6,6\%. \quad [19]$$

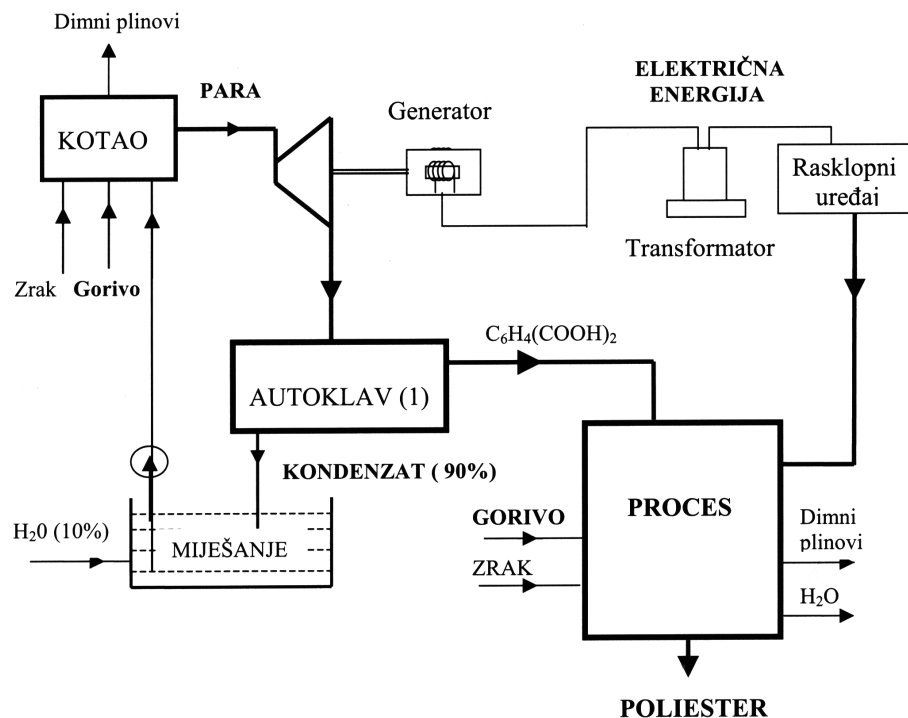
Usporedbeno u kogeneracijskom procesu s povratom kondenzata postiže se ušteda iz [18 i 13]:

$$U_{\text{pkCHP}} = V_{\text{gpk}} / \Sigma V_{\text{gCHP}} = 81,4 / 525 = 0,155 \approx 15,5\%. \quad [20]$$

Daljnje uštede vidljive su iz komparacije kogeneracijskog procesa s povratom i bez povrata kondenzata primjenom ranije dobivenih rezultata [13,18 i 6]:

$$U_1 = (\Sigma V_{\text{gCHP}} - V_{\text{gpk}}) / \Sigma V_{\text{gCHP}} = 525 - 81,4 / 525 = 0,845 \approx 84,5\% \text{ te} \quad [21]$$

$$U_2 = (\Sigma V_{\text{gCHP}} - V_{\text{gpk}}) / \Sigma V_{\text{g}} = (525 - 81,4) / 1241 = 0,358 \approx 36\%. \quad [22]$$



Slika 3. Kogeneracija i povrat topline kondenzata

Figure 3. Cogeneration and condensate heat recovery

## ZAKLJUČAK

Detaljna analiza energetske intenzivnog procesa proizvodnje poliestera ukazuje na metode koje se mogu primijeniti u cilju optimizacije, tj. poboljšanja gospodarenja energijom. Predložena mogućnost obuhvaća uvođenje kogeneracije koja pokazuje visoki stupanj iskorištenja u procesima s utroškom ukupne toplinske energije u sustavu. Kogeneracijom se zamjenjuje konvencionalni proces s odvojenom proizvodnjom toplinske i električne energije. Daljnje povišenje energetske učinkovitosti uključuje i povrat topline procesnog kondenzata. Dobiveni rezultati uspoređeni su s konvencionalnim procesom bez povrata kondenzata u kojem se električna energija dobavlja iz mreže. Kogeneracijom se rješava zahtjev usmjeren na povišenje učinkovitosti, a time i sigurnosti energetske postrojenja uz što nižu cijenu. Prednost CHP sustava je smanjivanje utjecaja na okoliš u svim aspektima, posebice u smanjenju emisije  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$ . Ovakva

racionalizacija u gospodarenju energijom kao i poboljšanje zaštite okoliša pridonosi porastu kvalitete i sigurnosti opskrbe. Nadalje, povrat procesnog kondenzata u kotlovsko postrojenje vidljivo smanjuje toplinsko i kemijsko zagađenje voda, a također štedi energiju i kemikalije za pripremu vode. Predočene pozicije potvrđuju rezultati dobiveni usporedbom optimiziranog i standardnog procesa. Temeljeno na proračunima, kogeneracija koja zadovoljava procesne potrebe toplinske energije, postiže se sniženje električne energije dobavljene iz mreže za 34%. Usporedba CHP sustava, koji daje stupanj iskorištenja od 80%, s konvencionalnim ukazuje na apsolutni porast učinkovitosti od 32%. Povrat topline procesnog kondenzata u konvencionalnoj proizvodnji toplinske i električne energije snižava potrošnju primarnog izvora od 6,6%, dok se uz primjenu CHP šteti 15,5%. Rezultati provedenih proračuna potvrđuju da se kogeneracijom postiže bolja učinkovitost energetske postrojenja uz nižu cijenu energije i manji utjecaj na okoliš.

## LITERATURA

Böhm, F., Komber, H. & Jafari, S.H.: Synthesis and characterization of a novel unsaturated polyester based on poly(trimethylene terephthalate), *Polymer*, 47, 2003., 4, pp. 1892-1898,

Bonilla, D., Akisawa, A. & Kashhiwagi, T.: Modelling the adoption of industrial cogeneration in Japan, using manufacturing plant survey data, *Energy policy*, 31, 2003., pp. 895-910.

Brown, H.L, Hamel, B.B. & Hedman, B. A.: *Energy analysis of 108 industrial processes*, Prentice Hall, London, 1997.

Budin, R., Mihelić-Bogdanić, A. Filipan, V.: Solar energy in industrial condensate heat recovery process, *Renewable energy*, 5, 1994., Part III, pp. 1897-1899.

Budin, R. & Mihelić-Bogdanić, A.: Heat recovery in polyester production, *Applied thermal engineering*, 17, 1997., 7, pp. 661-665.

Budin, R. & Mihelić-Bogdanić, A.: *Osnove tehničke termodinamike*, Školska knjiga, Zagreb, 2002.

Budin, R. & Mihelić-Bogdanić, A.: Advanced polymerization process with cogeneration and heat recovery, *Applied thermal engineering*, 26, 2006., 16, pp. 1998-2004.

Budin, R. & Mihelić-Bogdanić, A.: *Energy effective polyester production*, DAAAM International Scientific Book 2006, Chapter 08, pp. 075-080., 2006.

Edlind, U. & Albertsson, A.C.: Polyesters based on diacid monomers, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 44, 2003., 6, pp. 586-609.

Hinrichs, D.: *Cogeneration, Encyclopedia of energy*, Vol.1., Elsevier, Boston, pp. 581-592., 2004.

Korhinen, J. A.: Material and Energy Flow Model for Co-production of Heat and power, *Journal of Cleaner Production*, 10, 2002., 6, pp. 537-554.

Lemar, Jr., P.L.: The potential impact of policies to promote combined heat and power in US industry, *Energy Policy*, 29, 2002., pp. 1243-1254.

Mihelić-Bogdanić, A., Budin, R. Filipan, V.: Heat recovery and solar energy in polyester production, *Renewable energy*, 16, 1999., pp. 2154-2157.

Mihelić-Bogdanić, A. & Budin, R.: Heat recovery in thermoplastic production, *Energy Conservation and Management*, 43, 2002., pp.1079-1089.

Mihelić-Bogdanić, A., Budin, R. & Sutlović, I.: *Fuel and electricity economy reusing process condensate*, DAAAM International Scientific Book 2005, Chapter 33, pp. 415-420., 2005.

Olmsted, J., Williams, G.M.: *Chemistry, the molecular science*, Mosby, St. Luis, 1994.

Rodriguez, F.: *Principles of Polymer Systems*, McGraw-Hill, New York, 1982.

Stevens, M. P.: *Polymer Chemistry*, Oxford University Press, New York, 1999.

Worrell, J.G., De Beer, A.P., Faaij, A.P.C., Blok, K.: Potential energy savings in the production route for plastics, *Energy Conservation and Management*, 35, 1994., 12. pp. 1073-1085.

**ENERGY SAVINGS AND ENVIRONMENTAL PROTECTION APPLYING COGENERATION**

*SUMMARY: Increased industrial energy efficiency and also lower environmental pollution could be achieved through the application of cogeneration as well as secondary sources i.e. reusing process condensate. Proposed here is replacement of the conventional system of separate electrical energy and thermal energy from a boiler plant with cogeneration, i.e. with combined heat and power production (CHP). Analysed options aimed at reducing the consumption of the primary source indicate significant savings. Comparison between cogeneration and conventional energy production results in savings of about 34%. Condensate heat recovery in the conventional process is about 7%, while in CHP process it reaches about 16%. In addition, fuel savings for the same amount of produced energy translate to greater economy and environmental benefits.*

**Key words:** *polymerisation, energy consumption, cogeneration, heat recovery, savings*

*Original scientific paper*

*Received: 2007-01-10*

*Accepted: 2007-05-02*