

ANALIZA STOPNJE DISLOCIRANOSTI ENERGETSKIH SISTEMOV PRI OSKRBI URBANEGA NASELJA

Andrej PIRC, Mihael SEKAVČNIK

POVZETEK

V tem prispevku je narejena analiza stopnje dislociranosti energetskih sistemov pri oskrbi realnega urbanega naselja s toplotno in električno energijo glede na energijski izkoristek, investicijske in obratovalne stroške. V začetku je predstavljen energetski sistem bioplinarne in načrtovanje vročevodnega ter plinovodnega omrežja iz kogeneracijskega postrojenja. Nato so narejeni trije primeri oskrbe: v prvem, bioplinarna proizvaja električno energijo in distribuira toploto po vročevodu; v drugem primeru bioplinarna distribuira bioplin do manjši kogeneracijskih postrojev znotraj naselja, in v zadnjem primeru, bioplinarna proizvaja bioplin za potrebe prigradenega postroja in za kurjenje v individualnih kotlih. Na podlagi investicijskih in obratovalnih stroškov je na koncu narejen tudi izračun lastnih cen toplotne in električne energije.

ABSTRACT

In this paper analysis of energy supply systems decentralization was made. Energy supply of real urban area with heat and electricity depends on energy efficiency, investment and operational costs. At the beginning biogas plant, hot water and gas network planning are presented. Analysis consist of three examples: firstly, biogas plant generates electricity and distributes heat by hot water network; secondly, biogas plant distributes biogas to smaller cogeneration units inside of urban area; finally, produced biogas is burned in internal combustion engine and distributed to individual users boilers. On the basis of investment and operating costs, the calculation of cost prices of heat and electricity was made at the end

1. UVOD

Na svetu se zaradi vse večjih potreb po energiji, hitro zmanjšujejo zaloge fosilnih goriv; obenem pa se opaža tudi pojav zmanjševanja energetske neodvisnosti posameznih držav. Prihaja tudi do taktiziranja pri izrabi primarnih virov energije, kar vodi v prenekatero politične nemire. Zaradi tega je vse več tudi teženj po izrabi alternativnih virov energije, vendar tu ne bo šlo brez prehodnega obdobja izrabljanja tako obstoječih neobnovljivih kot obnovljivih virov energije s kogeneracijskimi postrojenji. V ta namen je potrebno optimalno načrtovati bodoča postrojenja glede na: lokacijo in razpoložljivost (časovno in energijsko) vira energije, lokacijo odjemalcev – porabnikov ter dinamiko porabe in dosedanje obratovalne izkušnje z

naprednimi tehnologijami v energetiki. Takšno načrtovanje bo vodilo do decentraliziranih energetskih sistemov, vključenih v t.i. aktivno omrežje z radialno obratovalno konfiguracijo. Aktivno omrežje bo povezovalo obstoječe termoenergetske sisteme in pa posamezne samozadostne energetske otoke. Posamezen energetski otok bo poleg slednjega, povezan tudi z dovodom primarnih virov energije in pa s posameznimi porabniki električne energije in toplote. Slednja energetska zasnova preskrbe urbanih naselij izboljša varnost preskrbe z energijo, omogoča izrabo odpadne toplote iz energetskih sistemov in nekaterih industrijskih procesov ter zmanjša rabo primarnih virov energije.

V tem prispevku bomo analizirali različne možnosti energetske oskrbe izbranega realnega naselja z upoštevanjem sodobnih tehnologij pretvarjanja primarnih virov energije v končno obliko energije, varno in učinkovito preskrbo z energijo v urbanem naselju, ter distribucijo toplote in sekundarnih virov energije do porabnikov. Predmet analize bodo trije različni načini preskrbe z energijo realnega urbanega naselja, katerega urbanistični načrt predvideva izgradnjo vročevoda oz. plinovoda. V prvem primeru bo centralna bioplinarna s plinskim motorjem proizvajala električno energijo in distribuirala toploto po vročevodnem omrežju. V drugem primeru bomo isto urbano naselje energijsko oskrbovali na sledeč način: centralna bioplinarna bo s plinovodnim omrežjem oskrbovala več manjših postrojev z očiščenim bioplinom; slednji pa bodo oskrbovali s toploto dele naselja.

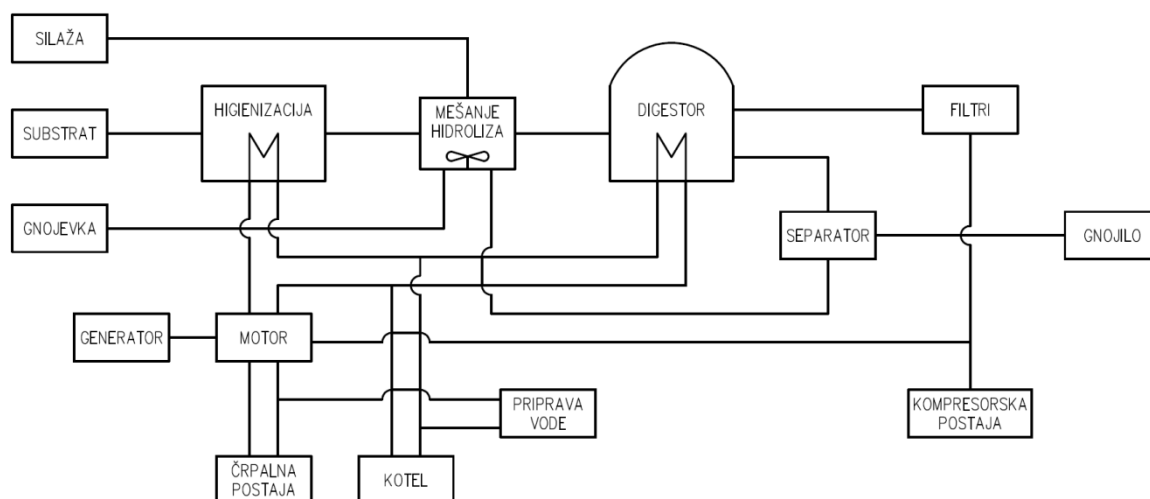


Slika 1: Slika mesta Kostanjevica na Krki

V zadnjem, tretjem primeru, pa bomo električno energijo proizvajali v sklopu energetskega sistema – bioplinarne; urbano okolico pa bomo ogrevali s posameznimi plinskimi trošili. Posamezen način preskrbe z energijo bo ovrednoten glede na energetske učinkovitost, investicijske in obratovalne stroške; pri čemer bomo podrobno načrtovali posamezne energetske postroje in vročevodno distribucijsko omrežje ter plinovod, ocenili obsegajoča dela in izračunali lastno ceno proizvedene električne in toplotne energije.

2. ENERGETSKI SISTEM BIOPLINARNE

Odpadne vode, ki vsebujejo organske nečistoče, so primerne za anaerobno vrenje; zlasti primerne so industrijske neočiščene vode iz mesne, mlečne, celulozne, usnjarske, sladkorne industrije, ter vode iz kmetijskih farm in pivovarn. Odpadna voda se ustrezno predpripravi, nakar steče anaerobni postopek pretvorbe odpadne vode v digestorju brez prisotnosti zraka pod posebnimi kemijsko – fizikalnimi pogoji, pri katerih metanogene bakterije razgrajujejo organske snovi in generirajo zmes bioplina ($55 - 75 \% \text{CH}_4$, $25 - 45 \% \text{CO}_2$ ter $5 \% \text{H}_2\text{O}$ in H_2S). Postopek nastajanja bioplina je odvisen od kemijske sestave organskih snovi, temperaturnega režima, časovnega poteka in vrste digestorja. Največkrat uporabljen je mezofilni proces, ki poteka pri temperaturi $25 - 45^\circ\text{C}$ približno 20 dni v digestorju. V sodobnih se nahaja granulat iz inertnega materiala ($1 - 3 \text{ mm}$), ki s pasivnim kroženjem izboljša proces mešanja. Substrat se premika vertikalno in cirkulira; intenzivnejši kontakt metanogenih bakterij ima za posledico hitrejši in učinkovitejši potek anaerobnega procesa.



Slika 2: Shema bioplinarne

Za potrebe vzdrževanja konstantne temperature med procesom, se prostor digestorja dogreva s specialnimi prenosniki toplote (dober koeficient prenosa toplote in odpornost na korozijo). Nevarnost za potek fermentacije predstavljajo inhibicijske snovi (antibiotiki, organske kisline, dezinfekcijska sredstva in razne toksične snovi), ki s svojo prisotnostjo onemogočajo razvoj metanogenih bakterij.



Slika 3: Digestor

Bioplin se sprošča pri temperaturi anaerobnega procesa in pri tlaku 3,5 – 4 kPa v obliki mehurčkov s površine substrata; pri čemer s seboj nosi prašne delce, vlago in korozivne plinske komponente. Stopnja očiščevanja zavisi od nadaljnje uporabe. Za ločevanje lebdečih delcev se uporablja suhi grob in fini filter s polnili iz kovinskih odstružkov ali iz keramičnih vlaken. Ker lahko pride v filterih do kondenzacije, morajo imeti filtri predviden izpust. V primeru, da se bioplin uporablja kot gorivo za pogon motorjev z notranjim zgorevanjem, je potrebno odstraniti tudi fino vlago. Delež vodikovega disulfida H_2S zavisi od deleža žvepla v odpadni vodi. Vodikov disulfid v prisotnosti vlage tvori žvepleno kislino H_2SO_4 , ki deluje korozivno in skrajšuje življenjsko dobo nadaljnjih porabnikov. Kot najprimernejša metoda čiščenja se je izkazala suha absorpcija z regenerativnima kolonama na bazi železovih spojin. Ogljikov dioksid CO_2 je inerten plin in ne vpliva na zgorevanje; ga pa odstranjujemo iz bioplina zato, da slednjemu zvišujemo metansko število in posledično kurilno vrednost. Eden izmed načinov odstranjevanja je mokri postopek, ki deluje na principu absorpcije v vodi.

Danes so na trgu motorji z notranjim zgorevanjem, ki so prirejeni za zgorevanje bioplina. Ponavadi so to srednjetekeči dizelski motorji z nizkim kompresijskim razmerjem, opremljeni z vžigalnimi svečkami. Odlikuje jih visok izkoristek ($>0,4$), dolga življenjska doba (>60000 h) in učinkovita sočasna proizvodnja električne in toplotne energije.



Slika 4: Motor z notranjim zgorevanjem

Transformacijo mehanične energije pogonskega stroja v električno energijo opravlja generator; motorju z notranjim zgorevanjem ponavadi prigradimo sinhronski dizelski generator z naslednjimi osnovnimi karakteristikami: konstrukcijsko cilindričen turbogenerator, z nazivnimi vrtljaji 1500 vrt/min, število polovih parov 2, ubežni faktor 1,1 in $\cos \varphi$ 0,9.

3. NAČRTOVANJE VROČEVODNEGA OMREŽJA

Vročevodno omrežje se dimenzionira na podlagi toplotnega in hidravličnega izračuna ter izkustvenih podatkov v obliki tabel in grafov. Najpomembnejše karakteristike so: prenesen toplotni pretok, premer vročevoda, hitrost medija in tlačne izgube na posameznih odsekih. Toplotne izgube para cevi lahko izrazimo kot

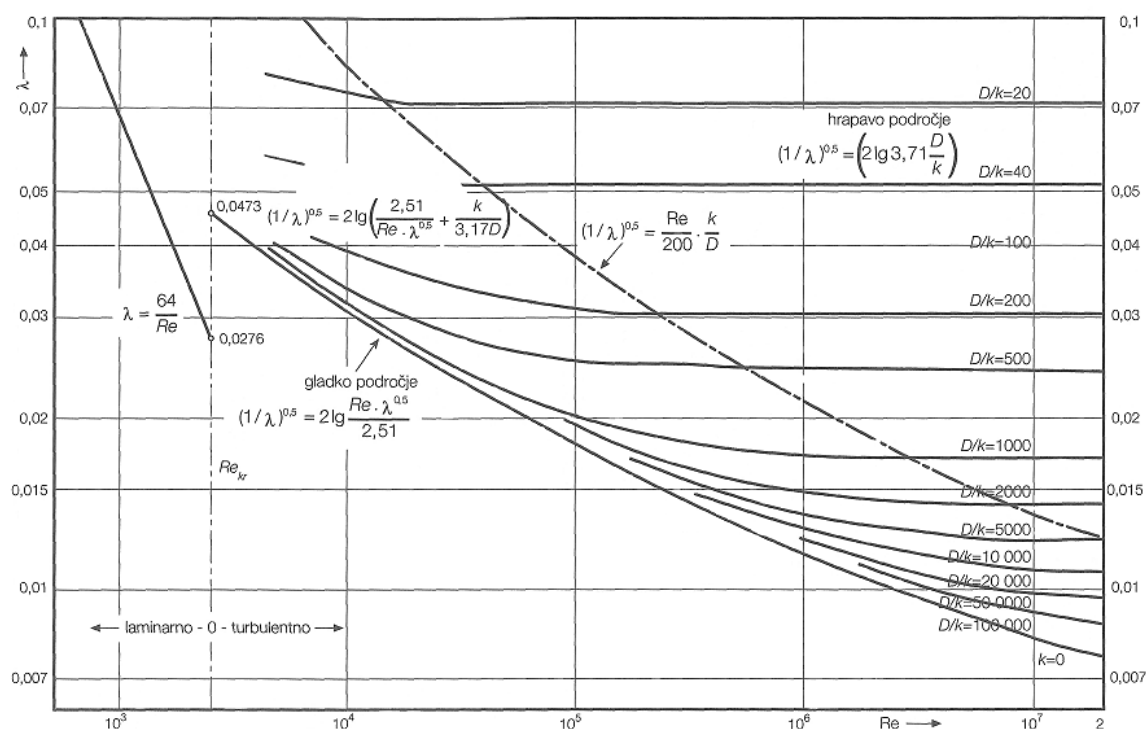
$$\dot{Q}_{\text{izg}} = U \cdot ((t_d - t_p) - 2 \cdot t_a)$$

Pri načrtovanju vročevoda je potrebno upoštevati, posamezne priključne moči porabnikov, faktor istočasnosti, izgube v omrežju in sistemske rezerve v primeru širjenja vročevodnega omrežja

$$P = \sum (q \cdot s) + \dot{Q}_{\text{izg}} + P_{\text{rez}} = Q_v \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Padec tlaka v cevi lahko izračunamo po naslednji enačbi

$$\Delta p = f \cdot \left(\frac{w^2}{2 \cdot g \cdot R} \right) \cdot L$$



Slika 5: Diagram faktorja trenja v odvisnosti od Reynoldsovega števila

Povezava med faktorjema f in λ je enaka

$$\lambda = 4 \cdot f$$

Faktor trenja f je determiniran za vmesno področje s Colebrook-White-ovo enačbo

$$\sqrt{\frac{2}{f}} = -6,4 - 2,45 \cdot \ln \left(\frac{k}{R} + \frac{4,7}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Sledi še potrebna moč črpalke

$$P_{\xi} = \frac{\rho \cdot \dot{V} \cdot g \cdot \Delta H}{\eta}$$

4. NAČRTOVANJE PLINOVODNEGA OMREŽJA

Plinovodno omrežje se dimenzionira na podlagi hidravličnega izračuna in izkustvenih podatkov v obliki tabel in grafov. Najpomembnejše karakteristike so: pretok, premer

plinovoda, začetni in končni tlak, ter tlačne izgube na posameznih odsekih. Vrsta toka, laminarno ali turbulentno, je odvisna od hitrosti toka, premera cevi in viskoznosti fluida in je popisana z Reynoldsovim številom

$$Re = \frac{Q_n \cdot \rho_n}{10^6 \cdot D \cdot \mu_n}$$

Faktor trenja λ (po Darcy-u) oziroma njegove recipročne vrednosti $((1/\lambda)^{0,5})$ se računajo po izkustvenih formulah; ena izmed njih je tudi Spitzglass-ova

$$\left(\frac{1}{\lambda}\right)^{0,5} = \left[\frac{88,5}{1 + \frac{3,6}{D} + 0,3 \cdot D} \right]^{0,5}$$

Realni plin se pri pretoku skozi plinovod ne obnaša povsem tako kot idealni plin. Odstopanje od enačbe idealnega plina zavisi od lastnosti plina, pogonskega tlaka in temperature v plinovodu. Odstopanje popišemo s korekcijskim faktorjem

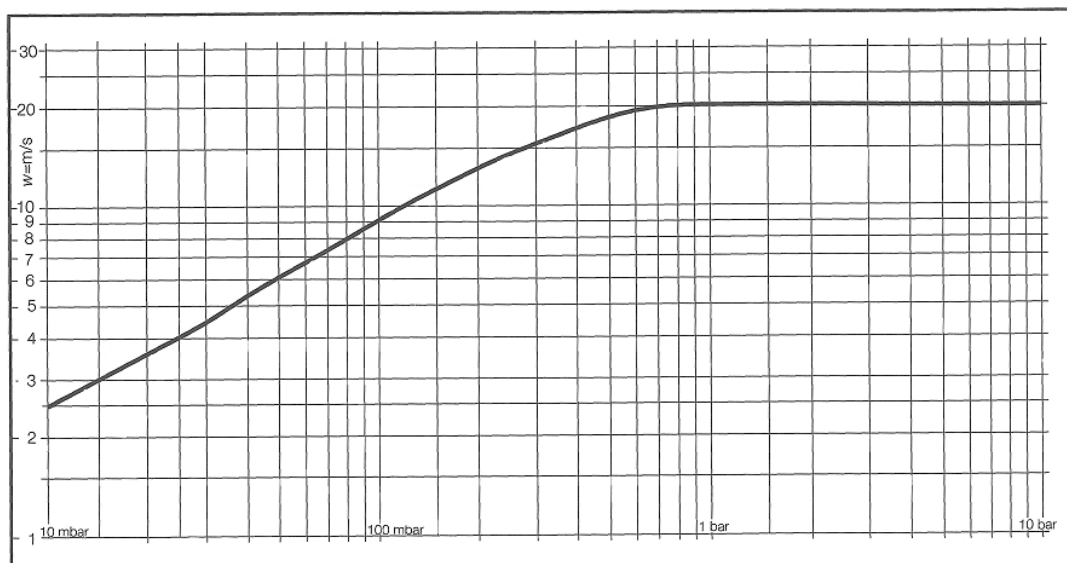
$$p \cdot V = Z \cdot R \cdot T$$

pri čemer je Z faktor kompresibilnosti (po Berthelot-u)

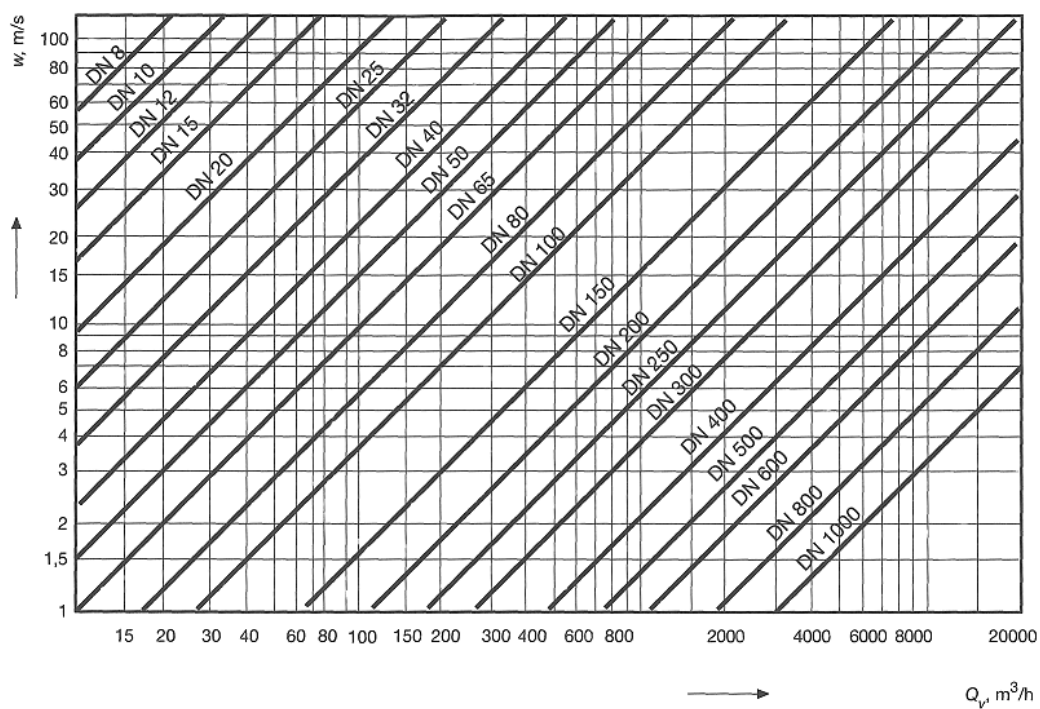
$$Z = 1 + \frac{9}{128} \cdot \frac{p_r}{T_r} \cdot \left(1 - \frac{6}{T_r^2}\right)$$

S kombinacijo zgornjih enačb in z vstavljanjem konstant dobimo

$$p_1^2 - p_2^2 = 1,71 \cdot 10^6 \cdot Z \cdot \lambda \cdot d \cdot Q_n^2 \cdot \frac{L}{D^5}$$



Slika 6: Diagram hitrosti v odvisnosti od tlaka v plinovodu



Slika 7: Diagram hitrosti v odvisnosti od volumnskega pretoka v plinovodu

Skupni padec tlaka je sestavljen iz padca tlaka na ravnem delu in iz lokalnih odporov

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{L}{D} + \sum \xi \right)$$

ali tudi

$$\Delta p = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2} \cdot (L + L_{ekv})$$

Dejanska moč kompresorja je tako enaka

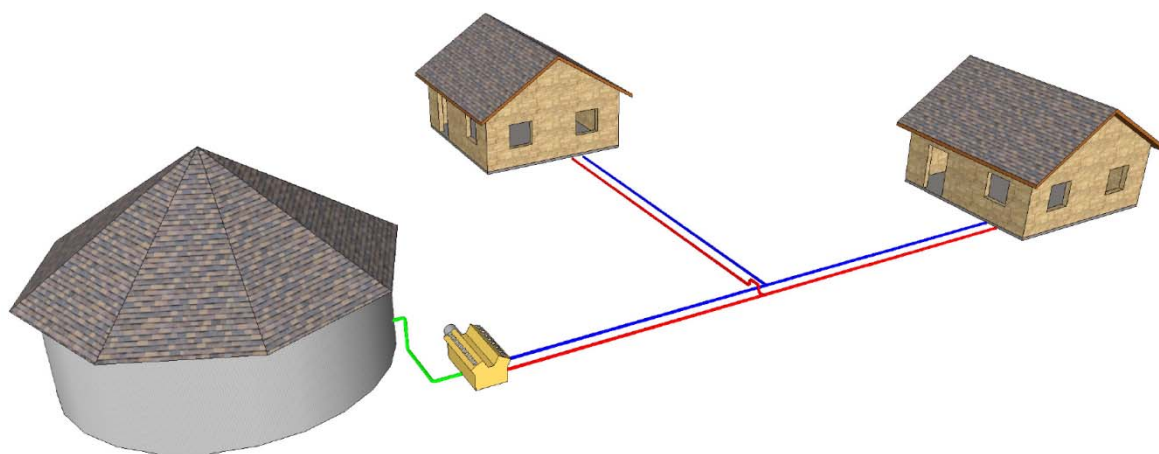
$$P_{komp} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta p}{\eta \cdot \rho}$$

5. MODELI ENERGETSKIH SISTEMOV ZA PRESKRBO NASELJA

5.1 Centralna bioplinarna z distribucijo toplote

Na otoku je 69 objektov s skupno ogrevno površino 20.900 m² s povprečno ocenjeno porabo toplote 60 W/m². V vseh treh primerih je velikost bioplinarne in s tem količina proizvedenega bioplina enaka (400 m³/h očiščenega plina z vsebnostjo metana 0,95).

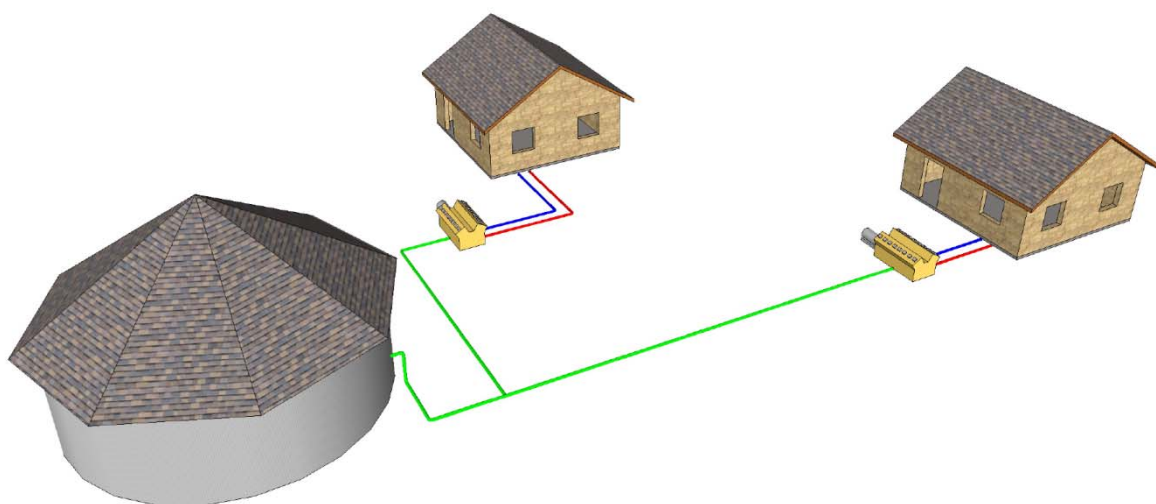
V prvem primeru analize energetske preskrbe urbanega naselja bomo obravnavali postavitev centralne bioplinarne, katere proizveden bioplin zgorevamo v motorju z notranjim zgorevanjem in proizvajamo električno (1,5 MW_e) in toplotno energijo. Električno energijo prodajamo v omrežje, toploto proizvedeno v kogeneraciji pa distribuiramo po vročevodnem omrežju do posameznih porabnikov.



Slika 8: Centralna bioplinarna z distribucijo toplote

5.2 Centralna bioplinarna z manjšimi decentraliziranimi postroji

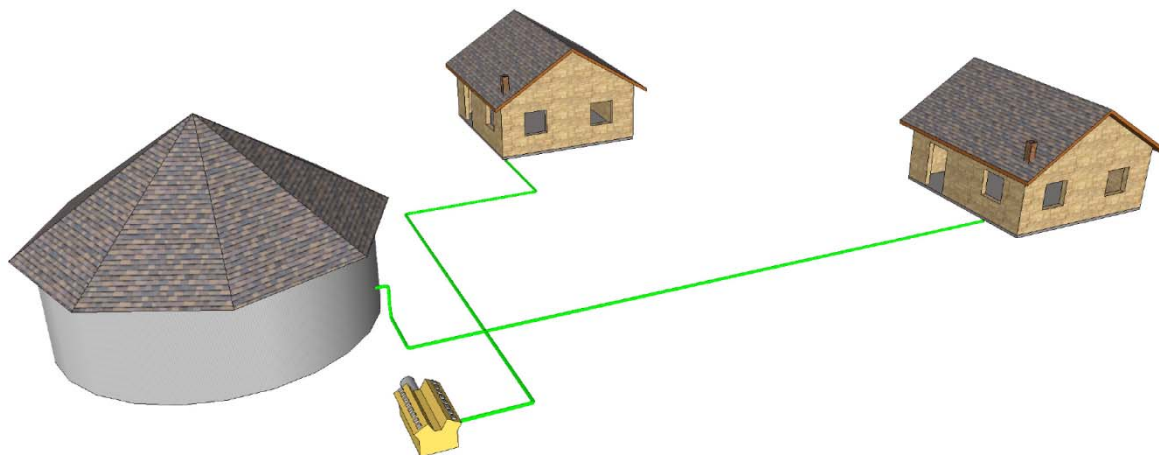
V drugem primeru analize energetske preskrbe urbanega naselja bomo obravnavali postavitev centralne bioplinarne, katere proizveden bioplin zgorevamo v več manjših postrojih znotraj naselja, s čimer lokalno proizvajamo električno ($1 \times 0,3 + 3 \times 0,35 \text{ MW}_e$) in toplotno energijo. Proizvodnja električne energije je znaša $1,35 \text{ MW}_e$; kar je nekoliko manj kot v prvem primeru ($1,5 \text{ MW}_e$), zaradi prigradnje 400 kW plinskega kotla v bioplinarni za tehnološke potrebe. Električno energijo prodajamo v omrežje, toploto proizvedeno v kogeneraciji pa distribuiramo po vročevodnem omrežju do posameznih porabnikov.



Slika 9: Centralna bioplinarna z manjšimi decentraliziranimi postroji

5.3 Centralna bioplinarna z distribucijo bioplina

V tretjem, zadnjem primeru analize energetske preskrbe urbanega naselja bomo obravnavali postavitev centralne bioplinarne, katere proizveden bioplin zgorevamo v plinskem motorju za proizvodnjo električne energije ($1,0 \text{ MW}_e$) in individualno v plinskih kotlih porabnikov.



Slika 10: Centralna bioplinarna z distribucijo bioplina

6. IZRAČUN LASTNIH CEN PROIZVEDENE ELEKTRIČNE IN TOPLOTNE ENERGIJE

Lastna cena energije posameznega postrojenja je odvisna od stalnih in gibljivih stroškov in količine proizvedene električne in toplotne energije. Pod stalne stroške spadajo investicijski stroški; pod gibljive pa stroški goriva (silaža) in stroški obratovanja. Stroški se delijo na produkt električne in toplotne energije glede na termični izkoristek kogeneracije in toplarniško število; pri čemer strošku toplotne energije pripišemo še investicijske in obratovalne stroške vročevoda oz. plinovoda.

Toplarniško število je definirano kot

$$\chi = \frac{\dot{Q}_T}{P_E}$$

Termični izkoristek kogeneracijskega sistema je

$$\eta_c = \frac{P_E}{\dot{Q}_{dov}}$$

Sledi razmerje stroškov električne in toplotne energije

$$\frac{c_E}{c_T} = \frac{1}{\eta_c} - \chi$$

	Enota	Model 1	Model 2	Model 3
Cena bioplinarne	€	7.700.000	7.937.000	7.650.000
Dolžina vročevoda	m	1.780	1520	/
Cena vročevoda	€	316.800	214.900	/
Dolžina plinovoda	m	/	800	1780
Cena plinovoda	€	/	51.200	123.300
Celotna investicija	€	8.016.800	8.203.100	7.773.000
Toplotne potrebe naselja	MWh/a	2.915	2.915	2.915
Izgube v vročevodu	MWh/a	260	231	/
Celotne toplotne potrebe	MWh/a	3.175	3.146	2.915
Potrebe naselja po plinu	m ³ /a	/	/	308.465
Obratovalni čas	h/a	8.700	8.700	8.700
Proizvedena el. energija	MWh/a	13.050	11.745	8.700
Toplarniško število	/	0,243	0,267	0,335
Termični izkoristek	/	0,397	0,357	0,265
Razmerje stroškov (c_E/c_Q)	/	2,276	2,532	3,445
Amortizacijska doba	leto	15	15	15
Obrestna mera	/	0,07	0,07	0,07
Anuitetni faktor	/	0,11	0,11	0,11
Obratovalni stroški	€/a	1.514.000	1.620.000	1.490.000
Cena el. energije	€/kW	0,163	0,192	0,244
Cena topl. energije	€/kW	0,082	0,083	(0,075)
Cena plina	€/m ³	/	/	0,71

7. ZAKLJUČKI

V prispevku smo obravnavali zagotavljanje potreb naselja po električni in toplotni energiji. Obravnavali smo energetske sistem bioplinarne, načrtovali smo vročevodno in plinovodno omrežje, analizirali tri primere preskrbe z energijo in izračunali lastno ceno proizvedene električne in toplotne energije.

Najvažnejše rezultate lahko povzamemo v naslednjih točkah:

- Kot vir energije bi postavili centralno bioplinarno zunaj otoka, ki bi izkoriščala gnojevko iz farm severno od mesta. Stavbe na otoku z ulicami in trgi sestavljajo staro mestno jedro, ki je tudi kulturna dediščina. Daljinsko ogrevanje bi bilo zanimivo tudi iz slednjega stališča, saj bi s tem unificirali sistem ogrevanja; prav tako bi bila bolj urejena tudi sama okolica, saj bi odpadla skladišča goriv (nadzemni plinohrami, cisterne za kurilno olje in drvarnice); zlasti če bi te površine nadomestili z zelenjem. Ker sta sredinski cesti in trgi s spomeniki po otoku že obnovljeni (asfaltirano in tlakovano), bi bilo potrebno koridor vročevoda oziroma alternativno tudi plinovoda iskati na ozelenelih površinah s podcestnimi preboji. S takšnim načinom izgradnje omrežja dosežemo nižje investicijske stroške.
- Najnižjo ceno električne in toplotne energije dosegamo v primeru postavitve centralne bioplinarne z enim plinskim motorjem, katerega odpadno toploto distribuiramo po vročevodnem omrežju. V slednjem primeru proizvedemo največ električne energije, saj ves bioplin najprej porabimo za zgorevanje v plinskem motorju, in ga ne uporabljamo direktno za proizvodnjo toplote. Posledica tega je tudi najnižja cena toplotne energije, kljub največjim izgubam v vročevodnem omrežju.
- Drugo najnižjo ceno dosegamo v primeru postavitve centralne bioplinarne s štirimi manjšimi postroji. Pri distribuiranju vroče vode imamo sicer manj izgub zaradi krajših razdalj in manjših presekov cevi; imamo pa znatno višje investicijske stroške na račun izgradnje plinovoda in postavitve več manjših postrojev. Prav tako so zaradi več manjših postrojev višji obratovalni stroški. Ima pa ta sistem prednost pred drugimi, saj z razpršenostjo zagotavlja največjo varnost pri preskrbi z energijo. V primeru okvare enega izmed postrojev, lahko preostali trije delno prevzamejo breme pri zagotavljanju toplotnih potreb naselja, kar pri enem, centralnem motorju to ni mogoče.
- Najvišjo ceno električne energije dosegamo v tretjem primeru s postavitvijo centralne bioplinarne in manjšega centralnega motorja in z distribucijo plina. Cena je najvišja, ker ločeno proizvajamo električno in toplotno energijo navkljub najnižjim investicijskim in obratovalnim stroškom. Je pa v tem primeru najnižja cena toplotne energije oz. cena bioplina, zaradi najnižjih investicijskih stroškov bioplinarne in nizke cene izgradnje plinovoda.

8. LITERATURA

- [1] Tuma, M.; Sekavčnik, M.: Energetski sistemi, Ljubljana, 2004.
- [2] Tuma, M.; Sekavčnik, M.: Energetski stroji in naprave, Ljubljana, 2002.
- [3] Kitanovski, A.; Poredoš, A.: Daljinsko hlajenje, SDDE, Ljubljana, 2001.
- [4] Poredoš, A.; Poredoš, A.; Škerget, L.: Nekatere možnosti za zmanjšanje toplotnih izgub v daljinskih energetskih sistemih, SDDE, Ljubljana, 2001.
- [5] Kraut, B.: Krautov strojniški priročnik, Ljubljana, 2003.
- [6] Brenčič, J.; Lazarini, F.: Splošna in anorganska kemija, Ljubljana, 1996.
- [7] Laboratorij za termoeenergetiko: Poročila o preizkusih.
- [8] Atkins, P. W.; Frazer, M. J.; Clugston, M. J.; Jones, R. A. Y.: Kemija zakonitosti in uporaba, Ljubljana, 1997.
- [9] Strelec, V.: Plinarski priručnik, Zagreb, 2001.
- [10] Logstor Ror, katalog predizoliranih vročevodnih cevi.
- [11] Urbanistični načrt Kostanjevica na Krki, 2009.

NASLOVA AVTORJEV

Andrej Pirc, univ. dipl. inž. – Savaprojekt, d.d., Krško
izr. prof. dr. Mihael Sekavčnik, univ. dipl. inž. – Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
SI-1000 Ljubljana

e-pošta: mihael.sekavcnik@fs.uni-lj.si