

# Tehničko rješenje mogućnosti korištenja toplinske snage dimnih plinova na Kompresorskoj stanici Stružec

M. Živković, D. Živković i H. Živković

IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Često se kao gorivo u plinskim motorima za pogon kompresora koristi prirodni plin. Sagorijevanjem plina u motorima razvija se dimni plin s vrlo visokim temperaturama. Ta temperatura ovisi o snazi motora i sastavu plina, a kreće se od 400 °C do 650 °C.

Toplinska snaga sadržana u dimnom plinu na Kompresorskoj stanici (KS) Stružec je relativno velika. Ta toplina je dovoljna za sve potrebe grijanja na Otpremnoj stanici (OS) Stružec i Mjernoj stanici (MS) 1 i KS Stružec. Toplinska snaga iz dimnog plina na KS Žutica ili KS Lipovljani još je viša.

U nastavku ovog članka su izrađeni proračuni toplinske snage dimnog plina na KS Stružec. Također, proračunat je obujamski protok plina čija energetska vrijednost je ekvivalent toplinskoj snazi dimnog plina.

*Ključne riječi:* entalpija mješavina, specifična toplina, izmjenjivači topline, cirkulacija - protok vode

## 1. UVOD

U gospodarskoj grani istraživanja i proizvodnje nafte i plina koriste se velike količine različitih vrsta energije. Tijekom proizvodnje i pripreme nafte, plina i vode za transport, koristi se električna energija za elektromotorni pogon dubinskih, procesnih, uronjenih, doziranih, utisnih, vatrogasnih i otpremnih sisaljki te kompresorskih jedinica.

Plin se koristi kao gorivo u kotlovnica, za toplovodne sustave te kao gorivo za pogon plinskih motora kompresora. Ta je tzv. interna potrošnja plina na našim naftnim i plinskim poljima mnogo godina prije iznosila oko 25% od ukupne količine proizvedenog plina u Hrvatskoj.

Nesumnjivo je da se tijekom proizvodnje nafte i plina koristi velika količina svih vrsta energije i upravo je zato potrebno stalno pronalaziti nova tehnička i tehnološka rješenja koja će omogućavati njihovu proizvodnju sa što manje "dovedene" energije.

## 2. DIMNI PLIN

Prošlih zima bili smo svjedocima plinske krize, koja je vladala većim dijelom Europe. Sasvim je jasno da u budućnosti treba racionalno koristiti sve dostupne izvore energije. Stoga je potrebno iznalaziti tehnička

rješenja koja pojeftinjuju proizvodnju nafte i plina. Prije svega su nužno potrebna tehnička rješenja koja omogućuju manju potrošnju toplinske i električne snage.

Prvi korak takovog pristupa može biti korištenje toplinske snage koju sadrže dimni plinovi. Uglavnom, kompresori se pogone plinskim motorima, gdje se sagorijevanjem plina oslobađa dimni plin. Temperatura dimnih plinova se kreće u granicama od 400 °C do 650 °C, pa i više. Visoke su temperature sasvim jasan pokazatelj da dimni plin sadrži vrlo visoku toplinsku snagu.

### 2.1. Osnovni podatci KS Stružec

Na KS Stružec kontinuirano su u radu tri kompresora. Pogonjeni su plinskim motorima snage 400 kW. U svakom motoru sagorijeva 2 333 m<sup>3</sup>/dan plina uz broj okretaja 1 800 min<sup>-1</sup>.

Kapacitet kompresora je od 20 000 do 80 000 m<sup>3</sup>/dan, tlak na usisu 1 do 2 bara, tlak nakon komprimiranja plina iznosi 51 bar, za plinski lift tlak plina je 31 bar.

Temperatura komprimiranog plina se kreće između 27 °C i 35 °C, a temperatura dimnih plinova je 555,1 °C.

Udaljenost KS Stružec do MS-1 je 100 m, a ista je udaljenost od KS Stružec do OS Stružec.

Tablica 1. Proizvodni pokazatelji naftnog polja Stružec

	Nafta	Slana voda	Smjesa nafte i slane vode	Udio slane vode	Plin
	(m <sup>3</sup> /dan)	(m <sup>3</sup> /dan)	(m <sup>3</sup> /dan)	(%)	(m <sup>3</sup> /dan)
MS-1	125	260	385	67,53	42 000
MS-3	130	640	770	83,12	49 000
MS-4	70	290	360	80,56	38 000
Ukupno	325	1 190	1 515	78,55	129 000

Na naftnom polju Stružec sada su u proizvodnji 63 bušotine. U Tablici 1. su prikazani proizvodni pokazatelji naftnog polja Stružec.

Na Slici 1. prikazana je tehnološka shema KS Stružec.

## 2.2. Izgaranje goriva

Svu potrebnu toplinu u domaćinstvu, rudarstvu, prometu, elektrogospodarstvu i industriji dobivamo iz goriva i nuklearnih postrojenja. Tehnički najvažniji izvori topline su čvrsta, tekuća i plinovita goriva u kojima je toplina akumulirana u formi kemijske energije.

Izgaranje goriva je proces pri kojem se odvija oksidacija gorivih komponenti goriva. Tako se energija kemijske veze transformira u toplinsku energiju s ili bez plamena. U gorivu vezana kemijska energija reakcijom oksidacije prelazi u toplinsku energiju. Ova energija se nadalje može transformirati u druge vidove energije, kao što su mehanička i električna.

U procesu izgaranja reaktanti su gorivo i kisik, koji se koristi iz zraka. Produkti izgaranja su dimni plinovi i ostatci. Gorivi sastojci su: ugljik, vodik i sumpor (organski, sulfidni i piritni). Nakon sagorijevanja njegovi ostatci su dušik, kisik, pepeo i vlaga.

U zraku je sadržano: 20,947% kisika ( $O_2$ ), 78,084% dušika ( $N_2$ ), 0,934% argona (Ar) i 0,033% ugljičnog dioksida ( $CO_2$ ).

U tragovima se nalaze još: neon (Ne), helij (He), kripton (Kr), sumporni dioksid ( $SO_2$ ), metan ( $CH_4$ ), vodik ( $H_2$ ), dušični oksid ( $N_2O$ ), ksenon (Xe), ozon ( $O_3$ ), dušični dioksid ( $NO_2$ ), jod ( $I_2$ ), amonijak ( $NH_3$ ), ugljični monoksid (CO). Maseni udjel kisika u zraku je 0,232, a dušika 0,768.

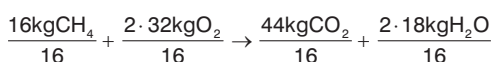
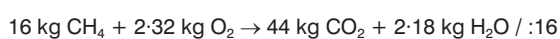
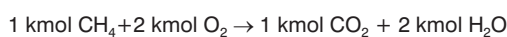
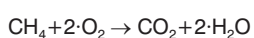
Izgaranje goriva može biti potpuno i nepotpuno. Potpuno izgaranje nastaje potpunom oksidacijom gorivih komponenti iz goriva ugljik, vodik i sumpor u  $CO_2$ ,  $H_2O$  i  $SO_2$ . Kod nepotpunog izgaranja produkti izgaranja još sadrže gorive komponente ugljika, ugljični monoksid i metan te druge ugljikovodike. U takvom slučaju, primjerice u dimnom plinu, sadržan ugljik monoksid (CO) može oksidirati u ugljik dioksid ( $CO_2$ ). Ovaj oblik izgaranja nastaje zbog nedovoljne količine kisika ili kada količina kisika nije dovoljna u svim dijelovima reaktivnog prostora.

Kada je izgaranje nepotpuno, u neizgorenom gorivu i neizgorenim sastojcima, dimnim plinovima, ostaje kemijska energija što predstavlja energijske gubitke.

Za potpuno izgaranje 1 kg metana, prema Zakonu održanja mase, potrebno je 4 kg kisika.

Vrijednosti molekularnih masa:

- metan ( $CH_4$ )  $M = 16 \text{ kg/kmol}$
- kisik ( $O_2$ )  $M = 32 \text{ kg/kmol}$
- voda ( $H_2O$ )  $M = 18 \text{ kg/kmol}$
- ugljik dioksid ( $CO_2$ )  $M = 44 \text{ kg/kmol}$



Plinsko gorivo može biti u obliku jedne komponente ili smjese više komponenti ugljikovodika. Proces izgaranja plinovitih goriva je egzotermni proces oksidacije gorivih komponenti.

Minimalna količina kisika (kmol  $O_2$ /kmol goriva) za zadani sastav plina:

$$O_{\min} = 0,5 \cdot (CO + H_2) + 2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + \sum \left( n + \frac{m}{n} \right) \cdot C_nH_m - O_2 \quad (1)$$

[kmol/kmol]

Minimalna potrebna količina zraka za izgaranje izražena u kmol zraka po 1 kmol goriva:

$$V_{Z \min} = \frac{O_{\min}}{0,21} \text{ [kmol/kmol]} \quad (2)$$

U procesima izgaranja uglavnom je potrebna veća količina zraka od minimalne, pa stvarna količina zraka iznosi:

$$V_{Z \text{stv}} = \lambda \cdot V_{Z \min} \text{ [kmol/kmol]} \quad (3)$$

Kada je  $\lambda < 1$ , izgaranje je nepotpuno, a kada je  $\lambda > 1$ , višak zraka iznosi  $(\lambda - 1) \cdot V_{Z \min}$ .

Faktor viška zraka za sagorijevanje plina iznosi  $\lambda = 1,05 - 1,25$ .

Dimni plinovi kod potpunog izgaranja plinovitih goriva se sastoje od istih komponenti kao i dimni plinovi kod potpunog izgaranja krutih i tekućih goriva.

Prirodni plin koji se koristi kao gorivo, često se sastoji od gorivih i negorivih komponenata. Gorive komponente su: metan ( $CH_4$ ), etan ( $C_2H_6$ ), propan ( $C_3H_8$ ), butan ( $C_4H_{10}$ ), itd., a negorive komponente uglavnom su: dušik ( $N_2$ ) i ugljik dioksid ( $CO_2$ ).

Tijekom izgaranja gorivi dijelovi goriva spajaju se s kisikom iz zraka. Nepotpuno izgaranje može se odvijati i dovođenjem pretička zraka, ako nije osigurana dovoljno visoka temperatura potrebna za izgaranje te dovoljna turbulencija.

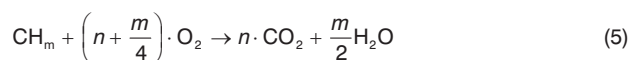
Kisik mora prodrijeti do svih gorivih čestica u dovoljnoj količini da potpuno izgore. U praksi to nije lako postići i osigurati kod svih uvjeta izgaranja goriva.

Potpuno izgaranje gorivih tvari se postiže dovođenjem kisika u višku.

Jednadžba izgaranja za metan ( $CH_4$ ):



Iz jednadžbe (4) se može izvesti jednadžba izgaranja i za sve ostale ugljikovodike:



U Tablici 2. prikazani su jednadžbe izgaranja nekih ugljikovodika, teorijske količine zraka potrebnog za izgaranje 1  $m^3$  plina te količine dimnog plina kojeg stvara sagorjeli 1  $m^3$  plina.

Nakon prerade naftnog plina na Etanskom postrojenju u Ivanić Gradu, plin se (pretežno metan) doprema na KS

Tablica 2. Jednadžbe izgaranja plina i produkti izgaranja

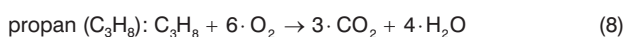
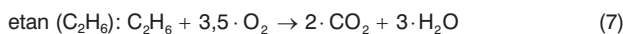
Jednadžbe gorenja	Teorijska potreba zraka (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )			Obujam proizvedenog dimnog plina (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )			
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O+N <sub>2</sub>
CH <sub>4</sub> +2 O <sub>2</sub> →CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	2	7,52	9,52	1	2	7,52	10,52
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +3,5 O <sub>2</sub> →2 CO <sub>2</sub> +3 H <sub>2</sub> O	3,5	13,16	16,66	2	3	13,16	18,16
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> +5 O <sub>2</sub> →3 CO <sub>2</sub> +4 H <sub>2</sub> O	5	18,80	23,80	3	4	18,80	25,80
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> +6,5 O <sub>2</sub> →4 CO <sub>2</sub> +6 H <sub>2</sub> O	6,5	24,44	30,94	4	5	24,44	33,44
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> +8 O <sub>2</sub> →5 CO <sub>2</sub> +6 H <sub>2</sub> O	8	30,08	38,08	5	6	30,08	41,08

Tablica 3. Sastav plina

Sastav plina	Plin kao gorivo	Plin za otpremu na etansko postrojenje
	(vol. udio)	(vol. udio)
N <sub>2</sub>	1,14	0,01
CO <sub>2</sub>	0,00	1,38
C <sub>1</sub>	97,31	82,63
C <sub>2</sub>	1,54	6,73
C <sub>3</sub>	0,01	5,01
i-C <sub>4</sub>	-	1,00
n-C <sub>4</sub>	-	2,08
i-C <sub>5</sub>	-	0,46
n-C <sub>5</sub>	-	0,43
C <sub>6+</sub>	-	0,27
Molarna masa (kg/kmol)	16,399	20,764
Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	0,695	0,881 4
Relativna gustoća (zrak=1)	0,567	0,683 2
Gornja ogrjevna vrijednost (MJ/m <sup>3</sup> )	37 779	46 025
Donja ogrjevna vrijednost (MJ/m <sup>3</sup> )	34 047	41 724
Faktor kompresibiliteta	0,998	0,993 8

Stručec, gdje se koristi kao gorivo za pogon plinskih motora, kao i za ostale potrebe.

Teorijski obujam kisika (VO<sub>2</sub>), koji je potreban za sagorijevanje prirodnog plina u plinskim motorima na KS Stručec proračunava se prema sljedećim jednadžbama:



Teorijska potrebna količina plina:

$$V_{\text{O}_2} = \frac{2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 - \text{O}_2}{100} \quad (9)$$

$$V_{\text{O}_2} = 2\,006 \text{ m}^3 \text{ kisika/m}^3 \text{ plina}$$

gdje su:

VO<sub>2</sub> teorijska potrebna količina kisika m<sup>3</sup> kisika/m<sup>3</sup> plina

O<sub>2</sub> kisik sadržan u prirodnom plinu %

Teorijska potrebna količina zraka za spaljivanje 1 m<sup>3</sup> plina:

$$V_{\text{tz}} = 4,76 \text{ O}_2 \quad (10)$$

$$V_{\text{tz}} = 9,552 \text{ 3 m}^3 \text{ zraka/m}^3 \text{ plina}$$

gdje je:

V<sub>tz</sub> teorijska potreba zraka za sagorijevanje 1 m<sup>3</sup> plina m<sup>3</sup> zraka/m<sup>3</sup> plina

Praktični potreban obujam zraka za sagorijevanje 1m<sup>3</sup> plina:

$$V_{\text{pz}} = \lambda \cdot 4,76 \cdot V_{\text{O}_2}$$

$$V_{\text{pz}} = 11,935 \text{ 7 m}^3 \text{ zraka/m}^3 \text{ plina}$$

gdje je:

λ faktor prečišćavanja zraka 1,1 do 1,25

Količina mokrog dimnog plina koja se stvara kod sagorijevanja 1 m<sup>3</sup> plina:

$$V_{\text{dpl}} = \frac{N_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + 3 \cdot \text{CH}_4 + 5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 7 \cdot \text{C}_3\text{H}_8}{100} + (V_{\text{pz}} - V_{\text{O}_2}) \quad (11)$$

$$V_{\text{dpl}} = 12,938 \text{ m}^3/\text{m}^3 \approx 13 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

gdje su:

V<sub>dpl</sub> količina vlažnog dimnog plina m<sup>3</sup> dimnog plina/m<sup>3</sup> plina

N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> sastavni dio prirodnog plina

Sastav mokrog dimnog plina može se odrediti sljedećim jednadžbama:

• udjel ugljik dioksida (CO<sub>2</sub>') u dimnom plinu

$$\text{CO}_2' = \frac{\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8}{V_{\text{dpl}}} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

$$\text{CO}_2' = 1,004 \text{ 2} \Rightarrow 7,70\%$$

• udjel vode (H<sub>2</sub>O') u dimnom plinu

$$\text{H}_2\text{O}' = \frac{\text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4 + 3 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 4 \cdot \text{C}_3\text{H}_8}{V_{\text{dpl}}} \cdot 100 [\%] \quad (13)$$

$$\text{H}_2\text{O}' = 1,992 \text{ 8} \rightarrow 16,00\%$$

• udjel dušika (N<sub>2</sub>') u dimnom plinu

$$\text{N}_2' = \frac{N_2 + 4,76 \cdot \lambda \cdot V_{\text{O}_2}}{V_{\text{dpl}}} \cdot 100 [\%] \quad (14)$$

$$\text{N}_2' = 91,900 \text{ 8} \rightarrow 72,50\%$$

• udjel kisika (O<sub>2</sub>') u dimnom plinu

$$\text{O}_2' = \frac{V_{\text{O}_2} \cdot (\lambda - 1)}{V_{\text{dpl}}} \cdot 100 [\%] \quad (15)$$

$$O_2' = 3,8577 \Rightarrow 3,80\%$$

Prirodna molekularna masa dimnog plina:

$$m = r_1 \cdot m_1 + r_2 \cdot m_2 + r_3 \cdot m_3 + r_4 \cdot m_4 \quad (16)$$

$$m = 27,784$$

gdje su:

$$m \quad \text{molekularna masa smjese dimnog plina } (m_1=28; m_2=44; m_3=18; m_4=32)$$

$r_1$  do  $r_4$  udjeli komponenti dimnog plina %

1 kmol dimnog plina sadrži toplinsku snagu  $Q_t$ .

### 3. SPECIFIČNA TOPLINA PLINOVA

Zagrijava li se 1 kg nekog plina, u prvom slučaju kod konstantnog obujma ( $V = \text{konst.}$ ) i drugom slučaju kod konstantne temperature ( $T = \text{konst.}$ ), tada je:

$$q = c \cdot \Delta T \quad (17)$$

Prema Prvom glavnom stavku termodinamike:

$$dg = du + A \cdot p \cdot dv = c \cdot dt \quad (18)$$

Kod grijanja pri  $V = \text{konst.}$ ,  $dv = 0$ , pa je:

$$c_v = \left( \frac{\partial q}{\partial T} \right)_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (19)$$

Kod grijanja pri  $p = \text{konst.}$ :

$$c_p = \left( \frac{\partial q}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p + A \cdot p \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (20)$$

onda je:

$$c_p = c_v + A \cdot R \quad (21)$$

odnosno:

$$c_p - c_v = A \cdot R \quad (22)$$

gdje su:

$A$  toplinski ekvivalent mehaničkog rada kJ/kgfm

$c_p$  specifična toplina pri konstantnom tlaku kJ/kg K

$c_v$  specifična toplina pri konstantnom obujmu kJ/kg K

#### 3.1. Unutarnja energija idealnih plinova

$$du = cu \cdot dT = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right) \cdot dT; \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right) = c_u \quad (23)$$

$$u = c_v \cdot dT + u_0$$

Ako je  $c_v = \text{konst.}$ , onda je:

$$u = c_v \cdot (T - T_0) + u_0 \text{ [kJ/kg]} \quad (24)$$

$$U = G \cdot u \text{ [kJ]} \quad (25)$$

Integracijska konstanta  $u_0$  je unutarnja energija idealnog plina kod  $T_0$  i ostaje neodređena. Obično se računa s diferencijama unutarnjih energija. Stoga se integracijska konstanta  $u_0$  uzima kao vrijednost  $u_0 = 0$ . Iako je ustvari, uo tek kod  $T_0 = 0 \text{ K} = -273,16 \text{ °C}$  iščezava i tek tada postaje jednak nuli.

#### 3.2. Srednja specifična toplina plina

Tablica 4. Sastav dimnog plina

Sastav dimnog plina	Volumni udjel [%]
Voda, vodena para (H <sub>2</sub> O)	16,00
Ugljični dioksid (CO <sub>2</sub> )	7,70
Dušik (N <sub>2</sub> )	72,50
Kisik (O <sub>2</sub> )	3,80
Σ	100,00

Kod računanja s višim temperaturnim razlikama, svakako treba uzeti u obzir ovisnost specifične topline o temperaturi.

Izračunavanje specifičnih toplina pomoću unutarnje energije u za praktičnu primjenu je donekle složen proračun. Računa se pomoću srednje specifične topline  $T_0$  i  $T$  [°C].

$$q = \int_{T_0}^T c \cdot dt = [c]_{T_0}^T \cdot (T - T_0) \text{ [°C]} \quad (26)$$

$$q = \frac{1}{T - T_0} \int_{T_0}^T c \cdot dt \text{ [kJ/kg K]} \quad (27)$$

Za 1 mol plina:

$$m \cdot u_2 - m \cdot u_1 = [c_v]_{T_0}^T \cdot (T - T_0) \quad (28)$$

Za 1 kg plina:

$$u_2 - u_1 = \frac{[c_v]_{T_0}^T}{m} \cdot (T - T_0) \quad (29)$$

Specifična toplina mješavine plinova:

$$c_p = \sum (g_i \cdot c_{pi}); c_v = \sum (g_i \cdot c_{vi}) \quad (30)$$

ili

$$c_p = \sum (r_i \cdot c_{pi}); c_v = \sum (r_i \cdot c_{vi}) \quad (31)$$

Ukoliko se  $T$  znatno razlikuje od  $0^\circ$ ,  $c_p$  se izračunava srednja specifična toplina prema jednadžbi:

$$[c_p]_{T_1}^{T_2} = \frac{[c_p]_{T_0}^{T_2} \cdot T_2 - [c_p]_{T_0}^{T_1} \cdot T_1}{T_2 - T_1} \text{ [kJ/kg °C]} \quad (32)$$

### 4. ENTALPIJA

Entalpija je ukupni sadržaj energije nekog plina koja se sastoji od unutarnje energije ( $u$ ) i potencijalne energije ili termodinamičkog potencijala ( $p \cdot v$ ).

Veličinu ( $p \cdot v$ ) bilo je potrebno dovesti plinu. Količina topline dovedene 1 kg plina pri stalnom tlaku za njegovo grijanje s temperature  $T_1$  na  $T_2$  (K):

$$q = u_2 - u_1 + p \cdot (v_2 - v_1) \quad (33)$$

Sređivanjem jednadžbe (33) proizlazi:

$$q = (u_2 + p \cdot v_2) - (u_1 + p \cdot v_1) \quad (34)$$

Izrazi u zagradama su ukupni sadržaj energije plina kod nekog stanja. Ta se veličina naziva entalpija i označava se:

$$i = u + p \cdot v \quad (35)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (35) u jednadžbu (34) dobije se:

$$q = i_2 - i_1 \quad (36)$$

Količina topline dovedenog 1 kg plina pri stalnom tlaku za njegovo zagrijavanje s temperaturom  $T_1$  na  $T_2$ .

Kako je:

$$q = i_2 - i_1$$

znači da je:

$$i_2 - i_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (37)$$

Ako se odabere da je početno stanje 273,16 K (0 °C) kod kojeg je entalpija  $i = 0$ , tada je:

$$i - i_0 = c_p \cdot (T - T_0) \quad (38)$$

$$i - 0 = c_p \cdot T \text{ [J/kg]} \quad (39)$$

Entalpija kao sadržaj topline može biti izražena i na druge jedinične količine plina:

$$i = c_p \cdot T \text{ [J/kmol]} \quad (40)$$

$$i = c_p \cdot T \text{ [J/m}^3\text{]} \quad (41)$$

$$Q_t = i_2 - i_1 \text{ [kJ/mol]} \quad (42)$$

gdje su:

$$i_3 = c_{p3} \Big|_0^{T_3} \cdot T_3 \quad (43)$$

$$i_2 = c_{p2} \Big|_0^{T_2} \cdot T_2$$

$i_3$  entalpija dimnog plina kod  $t_3 = 555,1$  °C (828,26 K)

$i_2$  entalpija dimnog plina kod  $t_2 = 204$  °C (477,16 K)

Srednja specifična toplota smjese dimnog plina uz poznati obujam sastava će biti:

$$i_3 = c_{p3} \Big|_0^{T_3} \cdot T_3 = r_1 \cdot c_{p3N_2} + r_2 \cdot c_{p3CO_2} + r_3 \cdot c_{p3H_2O} + r_4 \cdot c_{p3O_2} \quad (44)$$

$$i_3 = 555,1 \cdot 32,2646 = 17910,08 \text{ kJ/kmol}$$

gdje su:

$t_3$  temperatura dimnog plina 555,1 °C

$r_1$  udjel  $N_2$  u smjesi dimnog plina %

$r_2$  udjel  $CO_2$  u smjesi dimnog plina %

$r_3$  udjel  $H_2O$  u smjesi dimnog plina %

$r_4$  udjel  $O_2$  u smjesi dimnog plina %

$c_{p3N_2}$  specifična toplota  $N_2$  kod  $t_3 = 555,1$  °C (828,26 K) 30,21 kJ/kmol

$c_{p3CO_2}$  specific heat of  $CO_2$  at  $t_3 = 555,1$  °C (828,26 K) 45,223 kJ/kmol

$c_{p3H_2O}$  specifična toplota  $H_2O$  kod  $t_3 = 555,1$  °C (828,26 K) 35,504 kJ/kmol

$c_{p3O_2}$  specifična toplota  $O_2$  kod  $t_3 = 555,1$  °C (828,26 K) 31,56 kJ/kmol

$$i_2 = c_{p2} \Big|_0^{T_2} \cdot T_2 = r_1 \cdot c_{p2N_2} + r_2 \cdot c_{p2CO_2} + r_3 \cdot c_{p2H_2O} + r_4 \cdot c_{p2O_2}$$

$$i_2 = 204 \cdot 31,0747 = 6339,24 \text{ kJ/kmol}$$

gdje su:

$t_2$  temperatura dimnog plina 204 °C

$c_{p2N_2}$  specifična toplota  $N_2$  kod  $t_2 = 204$  °C (477,16 K) 30,21 kJ/kmol

$c_{p2CO_2}$  specifična toplota  $CO_2$  kod  $t_2 = 204$  °C (477,16 K) 45,223 kJ/kmol

$c_{p2H_2O}$  specifična toplota  $H_2O$  kod  $t_2 = 204$  °C (477,16 K) 35,504 kJ/kmol

$c_{p2O_2}$  specifična toplota  $O_2$  kod  $t_2 = 204$  °C (477,16 K) 31,56 kJ/kmol

Srednja specifična toplota dimnog plina kod 90 °C (363,17 K):

$$i_1 = c_{p1} \Big|_0^{T_1} \cdot T_1 = r_1 \cdot c_{p1N_2} + r_2 \cdot c_{p1CO_2} + r_3 \cdot c_{p1H_2O} + r_4 \cdot c_{p1O_2}$$

$$i_1 = 2750,46 \text{ kJ/kmol}$$

gdje su:

$t_1$  temperatura dimnog plina 90 °C

$c_{p1N_2}$  specifična toplota  $N_2$  kod  $t_1 = 90$  °C (363,16 K) 29,141 kJ/kmol

$c_{p1CO_2}$  specifična toplota  $CO_2$  kod  $t_1 = 90$  °C (363,16 K) 37,887 kJ/kmol

$c_{p1H_2O}$  specifična toplota  $H_2O$  kod  $t_1 = 90$  °C (363,16 K) 33,717 kJ/kmol

$c_{p1O_2}$  specifična toplota  $O_2$  kod  $t_1 = 90$  °C (363,16 K) 29,512 kJ/kmol

Toplinskom snagom dimnog plina se može zagrijati trietilenglikol (TEG) zasićen s vlagom na 204 °C. Ta toplota se može koristiti za zagrijavanje tople vode (90 °C - 70 °C). Preostala toplota dimnog plina (temperatura između 90 °C i 35 °C) može se koristiti za podno zagrijavanje raznih prostorija, kao i grijanje plina i zraka prije dovođenja u plinske motore, gdje se spaljuje.

Razlika entalpija dimnog plina u rasponu temperatura 555,1 °C do 204 °C

$$\Delta i_{3-2} = i_3 - i_2 \quad (45)$$

$$\Delta i_{3-2} = 11570,84 \text{ kJ/kmol}$$

Razlika entalpija dimnog plina u rasponu temperatura 204 °C do 90 °C

$$\Delta i_{2-1} = i_2 - i_1 \quad (46)$$

$$\Delta i_{2-1} = 3588,78 \text{ kJ/kmol}$$

Ukupna količina dimnog plina proizvedenog tijekom 1 sata:

$$q_{dpl} = q_{dpl/m^3} \cdot q_{pl} \cdot n \quad (47)$$

$$q_{dpl} = 3795,09 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$q_{dpl} = 1,0542 \text{ m}^3/\text{s}$$

gdje su:

$q_{dpl}$  količina dimnog plina proizvedenog tijekom 1 sata  $\text{m}^3/\text{h}$

$q_{dpl/m^3}$  količina dimnog plina dobivena sagorijevanjem 1  $\text{m}^3$  plina  $13 \text{ m}^3/\text{h}$

$q_{pl}$  obujamski protok spaljenog plina u plinskom motoru  $97,31 \text{ m}^3/\text{h}$



n broj kompresorskih jedinica 3

Broj molova dimnog plina kod  $t_3 = 555,1$  °C:

$$M_{dpl3} = \frac{p_{atm} \cdot q_{dpl}}{8\,314 \cdot T_3} \quad (48)$$

$$M_{dpl3} = 0,015\,5 \text{ kmol/s}$$

gdje su:

$M_{dpl3}$  broj molova dimnog plina kod 555,1 °C kmol/s

$p_{atm}$  atmosferski tlak 101 325 Pa

Toplinska snaga dimnog plina kod 555,1 °C:

$$Q_3 = M_{dpl3} \cdot i_3 \quad (49)$$

$$Q_3 = 977\,796 \text{ kJ/h}$$

Broj molova dimnog plina kod  $t_2 = 204$  °C:

$$M_{dpl2} = \frac{p_{atm} \cdot q_{dpl}}{8\,314 \cdot T_2}$$

$$M_{dpl2} = 0,026\,9 \text{ kmol/s}$$

gdje je:

$M_{dpl2}$  broj molova dimnog plina kod 204 °C kmol/s

Toplinska snaga dimnog plina kod 204 °C:

$$Q_2 = M_{dpl2} \cdot i_2$$

$$Q_2 = 613\,908 \text{ kJ/h}$$

Toplinska snaga koju sadrži dimni plin u rasponu temperatura od 555,1° do 204°C:

$$Q_{3-2} = Q_3 - Q_2$$

$$Q_{3-2} = 363\,888 \text{ kJ/h}$$

Broj molova dimnog plina kod  $T_1 = 90$  °C:

$$M_{dpl1} = \frac{p_{atm} \cdot q_{dpl}}{8\,314 \cdot T_1}$$

$$M_{dpl1} = 0,035\,4 \text{ kmol/s}$$

gdje je:

$M_{dpl1}$  broj molova dimnog plina kod 90 °C kmol/s

Toplinska snaga dimnog plina kod 90 °C:

$$Q_1 = M_{dpl1} \cdot i_1$$

$$Q_1 = 350\,532 \text{ kJ/h}$$

Toplinska snaga koju sadrži dimni plin u rasponu temperatura od 204 °C do 90 °C:

$$Q_{2-1} = Q_2 - Q_1$$

$$Q_{2-1} = 263\,376 \text{ kJ/h}$$

U Tablici 5. prikazana je ogrjevna vrijednost plina koji se koristi kao gorivo za pogon plinskih motora na KS Stružec.

Proračun obujma plina čija je ogrjevna moć ekvivalent toplini koju sadrži dimni plin u rasponu temperatura od 555,1 °C do 35 °C.

$$Q_3 = 977\,796 \text{ kJ/h}$$

$$Q_0 = 230\,000 \text{ kJ/h (očitano s dijagrama na Slici 2.)}$$

$$\Delta Q = Q_3 - Q_0$$

$$\Delta Q = 747\,796 \text{ kJ/h}$$

Količina plina (energetska vrijednost) koja odgovara ekvivalentu topline dimnog plina:

$$q_p = \frac{\Delta Q}{H_i \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} \quad (50)$$

$$q_p = 27,95 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$q_p = 244\,842 \text{ m}^3/\text{god.}$$

gdje su:

$q_p$  obujamski protok plina koji se koristi kao gorivo  $\text{m}^3/\text{h}$

$H_i$  donja ogrjevna moć plina 33 025,3 kJ/m<sup>3</sup>

$h_1$  koeficijent učinka instalacija 0,9

$h_2$  koeficijent učinka toplovodnog kotla 0,9

Korištenjem toplinske snage dimnog plina s KS Stružec moguće je uštedjeti 244 842 m<sup>3</sup>/god. plina.

U INA-Naftaplina postoji šest kompresorskih stanica, koja imaju pogone s plinskim motorima. Izuzevši KS Stružec, rade i sljedeće kompresorske stanice, gdje se koriste plinski motori:

- KS CPS Molve III  
FAIRBANKS-MORSE / WORTHINGTON DRESSER x 2 (2 500 kW) - koristi se oko 15 000 m<sup>3</sup>/dan plina;
- KS Etan  
DRESSER-RAND KVR 616 x 2 (3 600 kW; u pogonu samo jedna i to smanjenim kapacitetom) - koristi se oko 12 000 m<sup>3</sup>/dan plina
- KS Lipovljani  
WAUKESHA L7042GSI / I-R 4RDS3 x 4 (750 kW) -

Tablica 5. Ogrjevna vrijednost plina koji se koristi kao gorivo za pogon plinskih motora na KS Stružec

Sastav plina	Vol. udio	$H_{ig}$	$\rho$	$H_{ig}$	$H_i$
	%	Ogrjevna moć udjela plina kJ/kg	Gustoća udjela plina kg/m <sup>3</sup>	Ogrjevna moć plina kJ/m <sup>3</sup>	Ogrjevna moć plina kJ/m <sup>3</sup>
CH <sub>4</sub>	0,973 1	49 949	0,716 8	33 929	33 016,3
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,015 4	47 436	1,356	64 322	990,6
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,000 1	46 348	2,019	93 577	9,4
Σ					33 025,3

**Procjena ulaganja financijskih sredstava:**

1. Izrada Idejnog projekta, Rudarskog projekta i Glavnog projekta	40 000 kn
2. Pripremni radovi, geodetske podloge, ishođenje Građevinske dozvole i uporabne dozvole	10 000 kn
3. Građevinski dio, temelji za nosače izmjenjivača topline i toplovoda, zemljani radovi i opločenje	40 000 kn
4. Strojarski dio, izmjenjivači topline, spojni cjevovodi, čelični nosači, termička izolacija, antikorozivna zaštita	550 000 kn
5. Elektrodio, cirkulacijske centrifugalne sisaljke, razvodni kablovi, razvodni ormari	60 000 kn
6. Elektronički dio, oprema za kontrolu, signalizaciju i upravljanje	55 000 kn
7. Održavanje i naknada za korištenje električne snage	200 000 kn
<b>Sveukupno</b>	<b>955 000 kn</b>

koristi se oko 4 000 m<sup>3</sup>/dan plina te WAUKESHA L7042G / I-R 4RDS3 x 1 (540 kW) - koristi se oko 3 000 m<sup>3</sup>/dan plina

- KS Šandrovac  
WAUKESHA L7042GSI / I-R 4RDS3 x 2 (750 kW) - koristi se oko 4 000 m<sup>3</sup>/dan plina te WAUKESHA L7042G / I-R 4RDS3 x 3 (540 kW) - koristi se oko 3 000 m<sup>3</sup>/dan plina
- KS Žutica  
WAUKESHA L7042G / I-R 4RDS2 x 1 (540 kW) - koristi se oko 3 000 m<sup>3</sup>/dan plina te WAUKESHA F2895GSI / I-R 2RDS2 x 1 (400 kW) - koristi se oko 2 300 m<sup>3</sup>/dan plina
- KS Stružec  
WAUKESHA H24GL / ARIEL JGJ4 x 5 (400 kW; u radu 3 do 4) koristi se oko 2 300 m<sup>3</sup>/dan

U slučaju kada se toplinska snaga dimnog plina na KS Stružec koristi između maksimalne temperature 555,1 °C i minimalne temperature 35 °C, tada je moguća ušteda od 27,95 m<sup>3</sup>/h plina ili 244 842 m<sup>3</sup>/god. plina.

Na Slici 2. grafički je prikazan dijagram međuovisnosti toplinske snage i temperature dimnog plina na KS Stružec, a na Slici 3. shematski prikaz spajanja izmjenjivača topline za korištenje topline dimnog plina.

## 5. TEHNIČKO-FINANCIJSKA PROCJENA ULAGANJA U IZGRADNJU SUSTAVA ZA KORIŠTENJE TOPLINE DIMNOG PLINA NA KS STRUŽEC

Sustav za korištenje topline dimnog plina na KS Stružec se sastoji od:

- tri izmjenjivača topline za grijanje: trietilenglikola (od  $t_{p1}=27\text{ °C} - 38\text{ °C}$  do  $t_{p2}=177\text{ °C} - 204\text{ °C}$ ); tople vode za dehidraciju nafte na MS-1 i grijanje usisnog kolektora na OS Stružec ( $t_{TV1}=70\text{ °C} - 90\text{ °C}$ ) te mlačne vode za podno grijanje prostorija za boravak operatera ( $t_{MV1}=20\text{ °C} - 35\text{ °C}$ );
- termički izoliranih cjevovoda za spajanje izmjenjivača topline na postojeće instalacije;
- cirkulacijske centrifugalne sisaljke za trietilenglikol, toplu vodu i mlačnu vodu;
- čelične konstrukcije, nosača za izmjenjivače topline;
- elektroinstalacija, kablova i raznih sklopova;

- elektroničke oprema za kontrolu, signalizaciju i upravljanje sustavom.

Za povrat uloženog novca u izgradnju sustava za korištenje topline dimnog plina na KS Stružec potrebno je malo više od jedne godine.

Sljedećih godina dobit bi bila cijena uštedenog plina umanjena za cijenu utrošene električne energije, što iznosi oko 78 000 kn.

Treba napomenuti da nije proračunata rentabilnost sustava, što će se učiniti uz prihvaćanje ovog prijedloga.

Zbog smanjivanja emitiranja štetnih plinova, potrebno je koristiti poticaje države ili Europske unije, kada Republika Hrvatska postane njenom članicom.

Napomena: U proračun ulaganja uračunati su troškovi isporuke opreme, rada i transporta.

## 6. ZAKLJUČAK

Naftno polje Stružec već je u završnom tijeku proizvodnje. Ipak, u slučaju korištenja topline iz dimnog plina na KS Stružec, ušteda plina tijekom jedne godine bila bi značajna. Sasvim je sigurno da je ta količina topline dovoljna za sve potrebe na MS-1, OS Stružec i KS Stružec. To bi rješenje svakako produžilo vijek trajanja polja.

Uz neke zamjene opreme i procesnih jedinica, ta toplina bila bi više nego dovoljna za potrebe grijanja na MS-1, KS i OS Stružec.

Stoga je nužno izraditi tehničko-financijsku analizu za korištenje topline iz dimnih plinova za sve kompresorske stanice na teritoriju RH, što bi donijelo znatnu uštedu energije i povećalo rentabilnost proizvodnje.

Isto tako, potrebno je napraviti pomak k smanjenju troškova proizvodnje. S tim u svezi, procesna jedinica CROKO u Šandrovcu radi već više od 12 godina. U tom su razdoblju uštede korištenja toplinske i električne snage relativno visoke. Iako je dokazana učinkovitost ove procesne jedinice, ona nije primijenjena niti na jednom drugom polju.

Na temelju rezultata dobivenih proračunima, može se zaključiti da se na KS Stružec ispuštanjem dimnih plinova u atmosferu gubi značajna toplinska snaga, koja je ilustrirana prethodnim proračunima.

Prema tome, dimni plin na KS Stružec sadrži toplinsku snagu 977 796 kJ/dan. Ta toplina je dovoljna za grijanje zagrijača trietilenglikola (TEG) u sustavu dehidracije plina. TEG se grije na temperaturu od 204 °C u dva zagrijača instalirane toplinske snage 2 x 257 481 kJ.

Na KS Stružec se koristi još i toplinska snaga za grijanje tople vode (kod toplinskog pada 90 – 70 °C) za grijanje u zimskom razdoblju:

- ulja u centralnom spremniku,
- kolektora i ogranaka za razvod ulja za podmazivanje,
- prostorije za boravak operatera.

Grijanjem ulja tijekom zimskog razdoblja sprječava se povećanje njegovog viskoziteta. Preostala toplina dimnog plina je dovoljna za zagrijavanje navedenih sklopova na KS Stružec.

U slučaju iskorištenja topline dimnog plina na KS Stružec, ostvarila bi se ušteda od 27,95 m<sup>3</sup>/h plina ili 244 842 m<sup>3</sup>/god.

Također, moguće je koristiti toplinsku snagu dimnih plinova i ispod temperature od 90 °C. Donja granica se može kretati i do 35 °C. Ta niža toplinska snaga se može koristiti za podno grijanje. U slučaju kada se toplina dimnih plinova koristi ispod 100 °C, tada treba predvidjeti odjeljivanje kondenzirane vode sadržane u dimnom plinu.

Ako bi se koristila cjelokupna toplinska snaga dimnih plinova na preostalim pet kompresorskih stanica, procjenjuje se da bi ukupne uštede iznosile oko 3,25·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/god. plina.



Autori:

**Mihovil Živković**, DSc, u mirovini; 091/4650684

**Domagoj Živković**, dipl. ing.; INA-Industrija nafte, SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina; 01/4592222; domagoj.zivkovic@ina.hr

**Hrvoje Živković**, dipl. ing.; INA-Industrija nafte, SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina; 01/4592222;; hrvoje.zivkovic@ina.hr

UDK : 621.4 : 662.767 : 536.6/.7 : 536.2 : 532.57 (497.5)

621.4	plinski motori
662.767	prirodni plin, gorivo
536.6/.7	mjerjenje količine topline, entalpija mješavina
536.2	provođenje topline, izmjenjivači topline
532.57	mjerjenje protoka
(497.5)	R Hrvatska