

Analiza toplotne moći i Vobeovog indeksa prirodnog gasa različitog porekla

Lana Mitrović



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Analiza toplotne moći i Vobeovog indeksa prirodnog gasa različitog porekla | Lana Mitrović || 2024 ||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008865>

Univerzitet u Beogradu
Rudarsko-geološki fakultet



Završni rad

Osnovne akademske studije

**Analiza toplotne moći i Vobeovog indeksa
prirodnog gasa različitog porekla**

Kandidat

Mitrović Lana,

R1/20

Mentor

prof. dr Dejan Ivezić, redovni profesor

Beograd, septembar, 2024.

Komisija:

1. Ime i prezime i nastavno zvanje, mentor

prof. dr Dejan Ivezić, redovni profesor

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

2. Ime i prezime i nastavno zvanje, član

prof. dr Marija Živković, redovni profesor

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

3. Ime i prezime i nastavno zvanje, član

doc. dr Aleksandar Madžarević, docent

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Datum odbrane: _____

Rezime

U radu su prikazane najznačajnije osobine prirodnog gasa, uključujući hemijski sastav, jednačine sagorevanja i termodinamičke karakteristike koje predstavljaju osnovu za dalje razumevanje rada. Prikazane su količine prirodnog gasa na evropskom tržištu prema zemlji porekla, kao i njihove zasebne hemijske i termodinamičke karakteristike. Kvalitet prirodnog gasa u Republici Srbiji je posebno poglavlje u radu u okviru kog je detaljnije opisano snabdevanje Republike Srbije prirodnom gasom, kao i zahtevani kvalitet. Na kraju, obuhvatajući sve prethodno navedeno, prikazan je postupak rešavanja Studije slučaja koja ima za cilj da pokaže kako prirodni gasovi iz različitih država mogu biti prilagođeni standardima kvaliteta potrebnim za korišćenje u Republici Srbiji. Ovo se odnosi na postupke namešavanja tako da se dobiju gasovi sa potrebnim vrednostima Vobeovog indeksa.

Ključne reči: *prirodni gas, toplotna moć, Vobeov broj, zahtevani kvalitet prirodnog gasa, namešavanje*

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. HEMIJSKI SASTAV I SAGOREVANJE PRIRODNOG GASA | 2 |
| 2.1. Sagorevanje prirodnog gasa | 4 |
| 3. TERMODINAMIČKE KARAKTERISTIKE PRIRODNOG GASA..... | 5 |
| 3.1. Toplotna moć prirodnog gasa..... | 6 |
| 3.1.1. Određivanje toplotne moći | 7 |
| 3.2. Specifična toplota prirodnog gasa | 11 |
| 3.3. Vobeov broj (indeks)..... | 15 |
| 3.3.1. Određivanje Vobeovog broja | 19 |
| 3.4. Džul-Tomsonov efekat..... | 21 |
| 3.5. PVT ponašanje prirodnog gasa | 25 |
| 3.5.1. Jednačine stanja za idealne gasove..... | 25 |
| 3.5.2. Jednačine stanja realnih gasova..... | 27 |
| 4. PRIRODNI GAS NA EVROPSKOM TRŽIŠTU | 32 |
| 4.1. Količine prirodnog gasa na tržištu Evrope prema poreklu..... | 33 |
| 4.2. Hemijske karakteristike prirodnog gasa različitog porekla | 37 |
| 5. KVALITET PRIRODNOG GASA U REPUBLICI SRBIJI..... | 39 |
| 5.1. Snabdevanje Republike Srbije prirodnim gasom | 41 |
| 5.2. Kapaciteti za proizvodnju, transport, distribuciju i skladištenje | 46 |
| 5.2.1. Proizvodnja..... | 46 |
| 5.2.2. Transport | 46 |
| 5.2.3. Distribucija | 49 |
| 5.2.4. Skladištenje | 52 |
| 5.3. Izvori snabdevanja prirodnim gasom i ostvarena potrošnja | 54 |
| 5.4. Zahtevani kvalitet prirodnog gasa u Republici Srbiji..... | 58 |
| 5.5. Uslovi za pouzdan i siguran rad sistema | 60 |
| 6. STUDIJA SLUČAJA : Mogućnost korišćenja prirodnog gasa različitog porekla u Republici Srbiji..... | 63 |
| 6.1. Namešavanje azerbejdžanskog i ruskog prirodnog gasa | 66 |
| 6.2. Namešavanje američkog LNG-a i ruskog prirodnog gasa | 70 |

| | |
|--|----|
| 6.3. Namešavanje prirodnog gasa i ugljen-dioksida..... | 73 |
| 6.3.1. Namešavanje azerbejdžanskog gasa i ugljen-dioksida..... | 74 |
| 6.3.2. Namešavanje američkog LNG-a i ugljen-dioksida | 77 |
| 7. ZAKLJUČAK | 80 |
| Literatura | 81 |

1. UVOD

Cilj izrade ovog rada jeste definisanje načina prilagođavanja i namešavanja prirodnih gasova različitog porekla kako bi se zadovoljili zahtevani uslovi propisani Pravilima za rad transportnog sistema. Kako bi se razumeo proces i stiglo do rešenja, na samom početku rada prikazana je definicija prirodnog gasa, njegov uobičajeni hemijski sastav i proces sagorevanja komponenti koje ga sačinjavaju.

U okviru poglavlja Termodinamičke karakteristike prirodnog gasa, opisane su toplotna moć prirodnog gasa, kao i načini i metode njenog određivanja, potom specifična toplota prirodnog gasa, kao i Vobeov indeks koji predstavlja centar analize ovog rada i osnovu Studije slučaja. Takođe, predstavljen je i Džul-Tomsonov efekat i PVT osobine prirodnog gasa zarad boljeg razumevanja ponašanja idealnih i realnih gasova.

Nakon toga su prikazane količine prirodnog gasa na tržištu Evrope u zavisnosti od države porekla, kao i po kojim osobinama se ti gasovi međusobno razlikuju i kako su se tokom godina menjali udeli pojedinih zemalja u snabdevanju Evrope prirodnim gasom.

Kao uvod u Studiju slučaja definisano je poglavlje Kvalitet prirodnog gasa u Republici Srbiji u okviru kog je najpre opisano snabdevanje Republike Srbije prirodnim gasom, njeni kapaciteti za proizvodnju, transport, distribuciju i skladištenje, izvori snabdevanja i ostvarena potrošnja, kao i zahtevani kvalitet prirodnog gasa koji mora biti ispoštovan prilikom korišćenja prirodnog gasa iz različitih zemalja u gasovodima Republike Srbije.

Rešavanjem Studije slučaja, čiji je naslov Mogućnost korišćenja prirodnog gasa različitog porekla u Republici Srbiji, dolazi se do samog cilja izrade ovog rada. Prikazan je proces određivanja najbitnijih karakteristika gasova različitog porekla, čiji udeo u ukupnoj potrošnji postepeno raste, kao i načini na koje mogu biti prilagođeni zahtevanim vrednostima kvaliteta gasa sa što manjim ulaganjima.

2. HEMIJSKI SASTAV I SAGOREVANJE PRIRODNOG GASA

Prirodni gas predstavlja smešu uglavnom gasovitih ugljovodonika. Glavnu komponentu čini metan, CH_4 , čiji sadržaj, u zavisnosti od vrste gasa, može da se kreće i preko 90% zapreminskog udela. Osim ugljovodonika, u prirodnom gasu se nalaze ugljen-dioksid, CO_2 , vodonik-sulfid, H_2S , azot, N_2 , ugljen-monoksid, CO , ređe helijum, He . U odnosu na tip ležišta iz kojeg se gas dobija, razlikuje se prirodni gas iz gasnih, iz gasokondenzatnih i naftnih ležišta. Gas iz gasokondenzatnih i naftnih ležišta ima veći sadržaj tečnih ugljovodonika (C_{5+}).

Vodonik-sulfid, H_2S , predstavlja nepoželjnu komponentu u prirodnom gasu iz razloga što u reakciji sa vodom stvara sumporastu kiselinu, H_2SO_3 , koja je izuzetno korozivna. Takođe, vodonik-sulfid je veoma toksičan, samim tim i opasan po ljude i okolinu. Sve ovo dovodi do toga da postoje strogi zahtevi u pogledu sadržaja vodonik-sulfida u prirodnom gasu, kao i sa ostalim sumpornim jedinjenjima ugljovodonika poput merkaptana (RSH). Na primer, maksimalna koncentracija u prirodnom gasu, uobičajenog sastava, za korišćenje u distribuciji je:

- H_2S ne više od 5 mg S na m_n^3 ;
- RSH ne više od 5,6 mg S na m_n^3 i
- ukupan sumpor, S, ne više od 20 mg na m_n^3 . (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

Ugljen-dioksid, CO_2 , i azot, N_2 , su inertne komponente u prirodnom gasu, što znači da oni ne sagorevaju i samim tim predstavljaju balast, odnosno dovode do smanjenja transportnih i distributivnih kapaciteta, kao i do smanjenja toplotne moći gasa. Osim toga, ugljen-dioksid sa vodom gradi ugljenu kiselinu, H_2CO_3 , koja izaziva koroziju. Ekonomija transporta i distribucije, kao i zahtevi hemijske industrije koja koristi gas kao hemijsku sirovinu, definišu dozvoljeni sadržaj ugljen-dioksida u prirodnom gasu.

Zbog navedenih razloga, teži se tome da sadržaj vodonik-sulfida i ugljen-dioksida u prirodnom gasu, različitim metodama, bude kontrolisan i doveden u propisane granice. Nekada, kada je to neophodno, obavlja se odvajanje ugljen-dioksida i vodonik-sulfida iz gasa u postrojenjima na samim gasnim poljima.

Takođe, prirodni gas u kontaktu sa slobodnom vodom u ležištu apsorbuje vodenu paru, a količina koja će se apsorbovati zavisi od pritiska i temperature. Usled pada temperature i pritiska, prilikom transporta i distribucije gasa, može doći do formiranja slobodne vode u cevovodima koja može dovesti do stvaranja čepova i smanjenja kapaciteta gasovoda. U određenim uslovima dolazi do reakcije između ugljovodonika (metan, etan, propan) sa slobodnom vodom, pri čemu dolazi do formiranja hidrata. Nagomilavanje hidrata, koji predstavljaju kristale, tj. čvrste materije u obliku leda ili mokrog snega, mogu dovesti do stvaranja čepova, pa u nekim slučajevima i do potpunog prekida protoka gasa. Iz tih razloga, obavlja se proces dehidracije gasa, kako bi se ispoštovale propisane dozvoljene granice sadržaja vode u gasu koje iznose $0,1-0,13 \frac{\text{kg}}{1000 \text{ Nm}^3 \text{ gasa}}$. (Prstojević et al., 2005)

Glavna svojstva prirodnog gasa uključuju visoku toplotnu moć, relativno nisku emisiju CO₂ u odnosu na druga fosilna goriva i relativnu čistoću zbog niske emisije sumpora i drugih zagađujućih materija. Stoga, prirodni gas predstavlja izuzetno vredan energent i hemijsku sirovinu koja poseduje i značajne tehnološko-ekonomske i ekološke prednosti u odnosu na konvencionalna goriva. Prirodni gas je gotovo idealno gorivo koje se lako meša sa vazduhom, ima veliku brzinu sagorevanja bez dima, čađi i čvrstih ostataka, te prema tome u manjoj meri zagađuje okolinu. Prirodni gas danas se višestruko koristi: u industriji, za komercijalnu upotrebu, u širokoj potrošnji, za proizvodnju električne energije, kao sirovina u proizvodnji, a koristi se i za pogon motornih vozila.

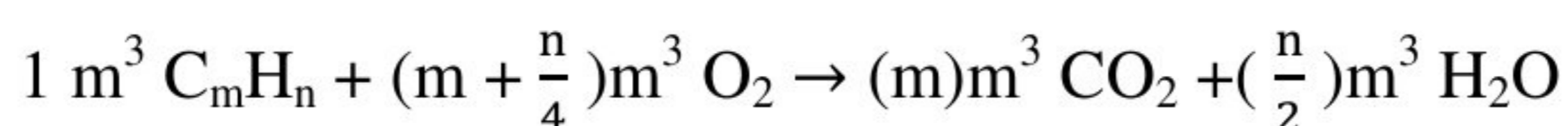
Od sastava gasa zavisi i njegova toplotna vrednost – koliko energije „nosi“ u sebi, ali i ostale termodinamičke karakteristike prirodnog gasa, o kojima će biti više reči u nastavku. Hemijske karakteristike prirodnog gasa prihvatljivog za transportni

sistem u Republici Srbiji biće predstavljene u okviru poglavlja Kvalitet prirodnog gasa u Republici Srbiji.

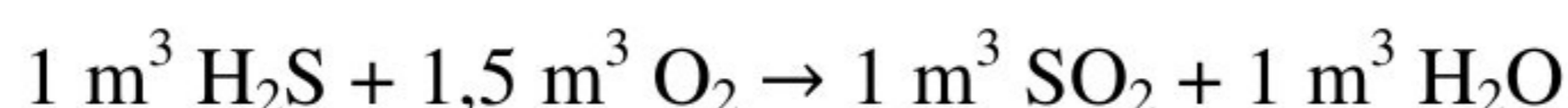
2.1. Sagorevanje prirodnog gasa

Sagorevanje predstavlja proces oksidacije goriva pri čemu se oslobađa toplotna energija. U procesu sagorevanja učestvuju gorivo i oksidator. Gorivo je materija koja ima sposobnost sagorevanja u prisustvu kiseonika, O_2 , pri čemu oslobađa veliku količinu energije, tj. toplote. Sastav gasovitih goriva se izražava u zapreminskom, odnosno, molarnom sastavu. Sagorevanje komponenata, koje ulaze u sastav gasa, može biti prikazano sledećim jednačinama:

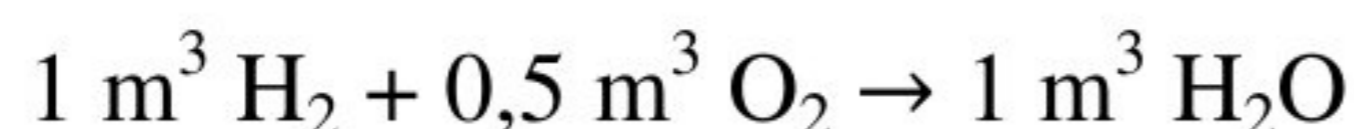
1) Sagorevanje ugljovodonika C_mH_n



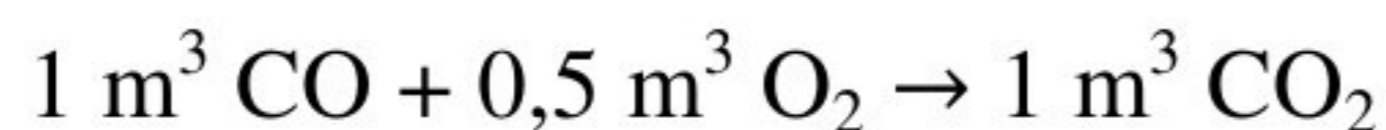
2) Sagorevanje vodonik-sulfida H_2S



3) Sagorevanje vodonika H_2



4) Sagorevanje ugljen-monoksida CO



Kao što je već pomenuto, ugljen-dioksid i azot predstavljaju inertne komponente i kao takve ne učestvuju u procesu sagorevanja.

Određivanje teorijske zapremine kiseonika, $V_{O_2}^0$, tj. zapremine kiseonika neophodne za sagorevanje 1 m^3 gasa pri stehiometrijskim uslovima¹, vrši se preko sledeće jednačine:

¹ Stehiometrijski uslovi označavaju da je dovedeno tačno onoliko kiseonika koliko je potrebno za potpuno sagorevanje goriva.

$$V_{O_2}^0 = \frac{1}{100} * (\Sigma C_m H_n (m + \frac{n}{4}) + 1,5H_2S + 0,5H_2 + 0,5CO - O_2) \left[\frac{m^3 O_2}{m^3 \text{ goriva}} \right]$$

U slučaju da gorivo sadrži slobodan kiseonik

Teorijska zapremina vazduha će se odrediti na sledeći način:

$$V^0 = \frac{V_{O_2}^0}{0,21} \left[\frac{m^3 \text{ vazduha}}{m^3 \text{ goriva}} \right], \text{ gde } 0,21 \text{ predstavlja zapreminski udeo kiseonika u vazduhu.}$$

U produktima sagorevanja, odnosno dimnim gasovima, pojavljuju se: ugljen-dioksid CO_2 (sagorevanjem ugljovodonika i ugljen-monoksida), sumpor-dioksid SO_2 (sagorevanjem vodonik-sulfida), vodena para H_2O (vodena para dobijena sagorevanjem vodonika u prirodnom gasu, dobijena isparavanjem vlage koja se nalazi u prirodnom gasu i dobijena usled prisustva vlage u vazduhu) i azot N_2 (azot iz vazduha, koji se uvek pojavljuje, kao i azot iz goriva, ukoliko ga ima u samom prirodnom gasu). Ukoliko se proces sagorevanja odvija sa viškom vazduha, tj. zapreminom kiseonika koja je veća od zapremine neophodne za sagorevanje u stehiometrijskim uslovima, u produktima sagorevanja će se pojaviti i kiseonik O_2 .

3. TERMODINAMIČKE KARAKTERISTIKE PRIRODNOG GASA

Termodinamičke karakteristike ukazuju na ponašanje gasa na različitim temperaturama i pritiscima. U termodinamičke karakteristike prirodnog gasa ubrajaju se:

1. Toplotna moć prirodnog gasa;
2. Specifična toplota prirodnog gasa i
3. Vobeov broj.

U nastavku će biti prikazan detaljniji opis osobina i njihova važnost.

3.1. Toplotna moć prirodnog gasa

Toplotna moć predstavlja količinu toplote koja se oslobodi prilikom potpunog sagorevanja 1 kg ili 1 m³ goriva, pri čemu su produkti sagorevanja ohlađeni na temperaturu na kojoj su bili oksidator i gorivo pre početka procesa, odnosno, kada su svi uslovi pre i posle sagorevanja isti. Izražava se u jedinici oslobođene energije po jedinici zapremine goriva [$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$].

U poslednje vreme, koristi se i jedinica kilovat-sat [kWh]. Relacija koja povezuje kWh i zapreminu gasa je sledeća:

$$\frac{\text{toplotna moć} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right] * \text{zapremina} [\text{m}^3]}{3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right]} \quad [\text{kWh}]$$

Toplotna moć prirodnog gasa zavisi od njegovog hemijskog sastava. U produktima sagorevanja, dimnim gasovima, ima ugljen-dioksida, koji nastaje sagorevanjem ugljenika, sumpor-dioksida, koji nastaje sagorevanjem sumpora, vodene pare, koja nastaje sagorevanjem vodonika,... U zavisnosti od agregatnog stanja u kojem se nalazi vodena para kao produkt sagorevanja, razlikuju se donja i gornja toplotna moć.

Donja toplotna moć (H_d) predstavlja količinu toplote koja se dobije prilikom potpunog sagorevanja 1 kg ili 1 m³ goriva, kada su svi uslovi pre i posle sagorevanja isti, a vodena para se nalazi u gasovitom stanju.

Gornja toplotna moć (H_g) predstavlja količinu toplote koja se dobije prilikom potpunog sagorevanja 1 kg ili 1 m³ goriva, kada su svi uslovi pre i posle sagorevanja isti, a vodena para se nalazi u tečnom stanju.

Gornja toplotna moć je veća od donje toplotne moći za vrednost toplote promene faze (vrednost toplote isparavanja vode): H_g > H_d. Razlika je upravo količina toplote koja se oslobodi prilikom kondenzacije mase jedinice vodene pare.

Važno je napomenuti da sva ugljovodonična goriva proizvode nešto vodene pare, ali postoje izuzeci. Ugljen-monoksid (CO) u svom sastavu ne sadrži vodonik,

samim tim sagoreva bez stvaranja vodene pare, pa su mu gornja i donja toplotna moć jednake. S druge strane, vodonik, koji proizvodi proporcionalno više vodene pare nego druga goriva, ima veću razliku između svoje gornje i donje toplotne moći nego druga goriva. Gas sa većim sadržajem viših ugljovodonika ima veću toplotnu moć.

Uobičajeni sastav uvoznog prirodnog gasa u Republici Srbiji prikazan je u Tabeli 3.1.1. (O prirodnom gasu, SrbijaGas)

Tabela 3.1.1 - Uobičajeni sastav uvoznog prirodnog gasa u Republici Srbiji

| Komponenta | Udeo u molekulskim procentima |
|---|-------------------------------|
| Metan CH ₄ | 96,184 |
| Etan C ₂ H ₆ | 1,624 |
| Propan C ₃ H ₈ | 0,508 |
| i-Butan C ₄ H ₁₀ | 0,086 |
| n-Butan C ₄ H ₁₀ | 0,089 |
| i-Pentan C ₅ H ₁₂ | 0,018 |
| n-Pentan C ₅ H ₁₂ | 0,012 |
| Heksan C ₆ H ₁₄ | 0,019 |
| Azot N ₂ | 0,990 |
| Ugljen-dioksid CO ₂ | 0,471 |

Donja toplotna moć gasa sastava datog u Tabeli 3.1.1. iznosi $34432 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$, dok gustina takvog gasa iznosi $0,7112 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. (O prirodnom gasu, SrbijaGas)

3.1.1. Određivanje toplotne moći

Merenje i određivanje toplotne moći goriva odnosi se na termodinamičku analizu efekata sagorevanja, procesa koji ima za cilj određivanje količine toplote koja se oslobodi prilikom sagorevanja.

Stabilnost goriva prilikom sagorevanja je neophodna kako bi se obezbedila stabilna konverzija hemijske u toplotnu energiju, a potom toplotne energije u mehaničku, mehaničke energije u električnu, itd.

Jedan od načina da se proceni energetska kvaliteta goriva je određivanje njegove toplotne moći. Danas postoji više metoda za određivanje toplotne moći, a koja će se metoda primeniti zavisi prvenstveno od vrste goriva koja se analizira. Metode su komplikovane i zahtevaju primenu specijalne merne opreme i uređaja. Toplotna moć prirodnog gasa može se odrediti merenjem, preko uređaja namenjenih za određivanje vrednosti toplotne moći, ili računskim putem, ukoliko se poznaje hemijski sastav prirodnog gasa.

Računsko određivanje toplotne moći prirodnog gasa

Toplotna moć se može odrediti na osnovu poznavanja hemijskog sastava prirodnog gasa. Ova metoda se zasniva na tome da je kalorijska (toplotna) vrednost goriva (gas) jednaka zbiru proizvoda toplotnih moći pojedinačnih komponenti u jedinjenju i njihovog procentualnog sadržaja u gorivu.

$$H_o = \sum Y_i * H_{oi}, \text{ odnosno:} \quad (3.1.1.1)$$

$$H_d = \sum Y_i * H_{di},$$

$$H_g = \sum Y_i * H_{gi},$$

gde su:

H_o i H_{oi} - toplotna moć gasa, odnosno komponente „i“ $[\frac{kJ}{m^3}]$;

H_d i H_g – donja i gornja toplotna moć gasa $[\frac{kJ}{m^3}]$;

H_{di} i H_{gi} – donja i gornja toplotna moć komponente „i“ $[\frac{kJ}{m^3}]$;

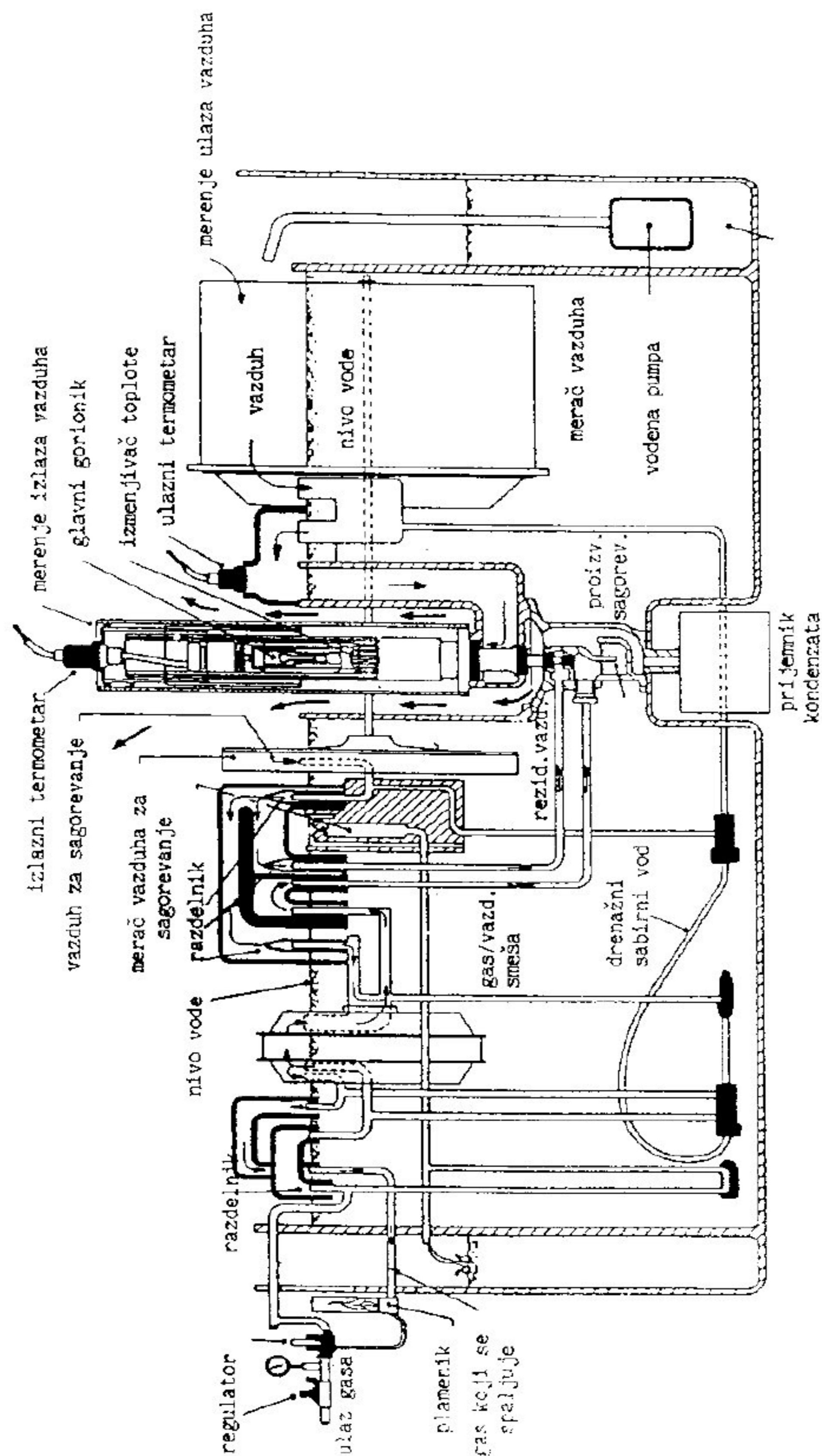
Y_i – zapreminski udeo komponente „i“ u gasu [u delovima jedinice].

(Prstojević et al., 2005)

Merenje toplotne moći prirodnog gasa

Najrasprostranjeniju primenu danas nalaze uređaji za merenje toplotne moći gasa, oni čiji je princip rada zasnovan na sagorevanju gasa. Kod ovih uređaja se uzorak kontinualno uzima iz gasovoda i odvodi na sagorevanje. Sagorevanje se odvija u zatvorenom prostoru, a unutar izmenjivača toplote. Ovaj prostor za sagorevanje je zatvoren sa gornje i sa bočnih strana tako da produkti sagorevanja moraju izlaziti kroz donju stranu. Vodena para, proizvod sagorevanja, se hladi na putu, kretanjem na niže, pri čemu dolazi i do kondenzacije. Toplota oslobođena prilikom kondenzacije pare se predaje izmenjivaču toplote kao neto toplota sagorevanja. Tako izmenjivač toplote prihvata i prenosi na svoju spoljnu stranu ukupnu toplotu sagorevanja. Sa spoljne strane izmenjivača toplote struji vazduh u kontrolisanim količinama i on preuzima toplotu sa izmenjivača toplote. Ovaj vazduh prolazi kroz merač, pre ulaza, kao i pored termometra, potom preko izmenjivača toplote i izlaznog termometra na izlazu. Ovo daje porast temperature specifične jedinice vazduha što znači da se broj toplotnih jedinica koje su proizvele povećanje temperature može izračunati. Gas koji je sagoreo je isporučen preko merača protoka; pošto se ustanovio broj toplotnih jedinica dobijenih od plamena izračunava se broj toplotnih jedinica po m^3 . Uređaj inače raspolaže posebnim sistemom za kontrolu vazduha potrebnog za sagorevanje. (Prstojević et al., 2005)

Na slici 3.1.1.1. je šematski prikazan merač toplotne moći gasa Cutler-Hammer. Ovaj uređaj se sastoji od ćelije sa gorionikom u kojoj se obavlja sagorevanje gasa, kao i od instrumenta za registrovanje merenih veličina.



Slika 3.1.1.1 - Merač toplotne moći Cutler-Hammer

U okviru ovog uređaja postoje tri toka fluida: tok gasa, tok vazduha za sagorevanje i tok vazduha za hlađenje proizvoda sagorevanja. Svaki od ovih tokova je opremljen meraćem protoka i termometrima (uređajima za registovanje merenih veličina).

Drugi uređaj po rasprostranjenosti primene predstavlja uređaj koji određuje toplotnu moć na bazi hromatografske analize. Uređaj se sastoji od hromatografa, koji daje hemijski sastav gasa, i od računara koji izračunava toplotnu moć. Računar se obično koristi za izračunavanje kvantitativnog sastava gasa i za izračunavanje toplotne moći. (Prstojević et al., 2005)

Vrednost donje toplotne moći koja je prihvatljiva za gasovode u Republici Srbiji je $33500 \pm 1000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$. (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

Ako određeni gas ima veću toplotnu moć od prihvatljive, mora se obaviti proračun u svedeni metar kubni. Svedeni kubni metar (Sm^3) označava proteklu zapreminu prirodnog gasa koja se izražava u zapreminskoj jedinici Sm^3 , donje toplotne vrednosti od $33500 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$, pri temperaturi sagorevanja od 15°C i temperaturi merenja zapremine od 15°C i pritisku od 1,01325 bar ($1 \text{ Sm}^3 = 33,5 \text{ MJ}$) (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

Primer: ako gas ima toplotnu moć od $41,9 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, a prihvatljivo je $33,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, proračun će se obaviti na sledeći način:

1 m^3 (isporučena količina gasa) * $\frac{41,9}{33,5} = 1,25 \text{ m}^3$ svedenog prirodnog gasa, odnosno gas toplotne moći $41,9 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$ će se naplaćivati 25% više u odnosu na gas standardnih karakteristika.

3.2. Specifična toplota prirodnog gasa

Specifičnom toplotom se smatra ona količina toplote koja je neophodna da se jedinica količine nekog tela zagreje za 1°C ili 1K. U zavisnosti od toga da li je jedinica količine nekog tela 1kg, 1m^3 ili 1 mol, razlikuju se:

1) masena specifična toplota ili samo specifična toplota $c [\frac{\text{J}}{\text{kgK}}]$;

2) zapreminska specifična toplota $c' [\frac{\text{J}}{\text{m}^3\text{K}}]$ i

3) molska specifična toplota $C [\frac{\text{J}}{\text{molK}}]$.

Relacije između navedenih veličina su sledeće:

$$c' = c * \rho \text{ (prelaz sa masene na zapreminsku specifičnu toplotu);} \quad (3.2.1.)$$

$$c' = \frac{C}{M_v} = \frac{C}{22,4} \text{ (prelaz sa molske na zapreminsku specifičnu toplotu); (3.2.2.)}$$

$$c = \frac{C}{M_g} \text{ (prelaz sa molske na masenu specifičnu toplotu); (3.2.3.)}$$

gde su:

M_g – molekulska masa [kg];

M_v – zapremina jednog mola [m^3_N],

za normalne uslove ($t = 0^\circ\text{C}$ i $p = 1,01325 \text{ bar}$) $M_v = 22,4 \text{ m}^3_N$;

ρ – gustina gasa [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$].

Kod zagrevanja gasova potrebna količina toplote ne zavisi samo od početne i krajnje temperature već i od načina zagrevanja gasa, pa tako i molarni toplotni kapacitet ima različite vrednosti u zavisnosti od vrste termodinamičkog procesa pri kome se zagreva gas. Za gasove, specifična toplota može da se meri pri:

- 1) konstantnoj zapremini i
- 2) konstantnom pritisku.

Prema tome, razlikuju se specifična toplota pri stalnoj zapremini C_v i specifična toplota pri stalnom pritisku C_p . Majerova jednačina daje vezu između molarnih toplotnih kapaciteta pri konstantnom pritisku i konstantnoj zapremini:

$$C_p = C_v + R_u \text{ i (3.2.4.)}$$

$$C_p - C_v = MR = 8,3145 \text{ (3.2.5.)}$$

gde su C_p i C_v dati u [$\frac{\text{J}}{\text{molK}}$], R_u predstavlja univerzalnu gasnu konstantu čija je vrednost $8,3145$ [$\frac{\text{J}}{\text{molK}}$], M predstavlja molarnu masu gasa [$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$], a R predstavlja specifičnu gasnu konstantu [$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$].

Drugi oblik Majerove jednačine za specifične toplote pri stalnom pritisku i stalnoj zapremini izražene u [$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$] je:

$$c_p = c_v + R, \text{ ili } c_p - c_v = R, \text{ (3.2.6.)}$$

gde je R specifična gasna konstanta koja ima različite vrednosti za različite gasove i koja predstavlja odnos univerzalne gasne konstante R_u i molarne mase gasa M , odnosno: $R = \frac{R_u}{M} \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right]$.

Na osnovu Majerove jednačine jasno je da je $C_p > C_v$, a to je očekivano jer se kod zagrevanja gasa pri konstantnoj zapremini sva toplota koristi na promenu unutrašnje energije gasa, a kod zagrevanja pri konstantnom pritisku pored količine toplote potrebne za promenu unutrašnje energije gasa potrebna je količina toplote i za rad koji gas vrši pri širenju.

Za idealne gasove vrednosti za specifičnu toplotu pri stalnom pritisku i stalnoj zapremini su prikazani na Slici 3.2.1. (Kozić et al., 1979)

| G A S | $M \cdot 10^3$ $\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$ | R $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ | c_p $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ | c_v $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ | κ - |
|--|--|--|---|---|---------------|
| | | | | | |
| Acetilen (C_2H_2) | 26 | 320 | 1,44 | 1,12 | 1,28 |
| Amonijak (NH_3) | 17 | 489 | 2,20 | 1,71 | 1,28 |
| Argon (Ar) | 40 | 208 | 0,52 | 0,31 | 1,67 |
| Azot (N_2) | 28 | 297 | 1,04 | 0,74 | 1,40 |
| Benzol (C_6H_6) | 78 | 107 | 0,48 | 0,37 | 1,28 |
| Butan (C_4H_{10}) | 58 | 143 | 0,64 | 0,50 | 1,28 |
| Eten (C_2H_4) | 30 | 277 | 1,25 | 0,97 | 1,28 |
| Etilen (C_2H_4) | 28 | 297 | 1,34 | 1,04 | 1,28 |
| Etilhlorid ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$) | 64,5 | 129 | 0,58 | 0,45 | 1,28 |
| Helijum (He) | 4 | 2078 | 5,20 | 3,12 | 1,67 |
| Hlorovodonik (HCl) | 36,5 | 228 | 0,80 | 0,57 | 1,40 |
| Kiseonik (O_2) | 32 | 260 | 0,91 | 0,65 | 1,40 |
| Metan (CH_4) | 16 | 520 | 2,34 | 1,82 | 1,28 |
| Metilhlorid (CH_3Cl) | 50,5 | 165 | 0,74 | 0,58 | 1,28 |
| Neon (Ne) | 20 | 416 | 1,04 | 0,62 | 1,67 |
| Ozon (O_3) | 48 | 173 | 0,72 | 0,61 | 1,28 |
| Pentan (C_5H_{12}) | 72 | 115 | 0,52 | 0,40 | 1,28 |
| Propan (C_3H_8) | 44 | 189 | 0,85 | 0,66 | 1,28 |
| Sumpordloksid (SO_2) | 64 | 130 | 0,58 | 0,45 | 1,28 |
| Sumporvodonik (H_2S) | 34 | 244 | 1,10 | 0,86 | 1,28 |
| Ugljendloksid (CO_2) | 44 | 189 | 0,85 | 0,66 | 1,28 |
| Ugljenmonoksid (CO) | 28 | 297 | 1,04 | 0,74 | 1,40 |
| Vazduh | 29 | 287 | 1,00 | 0,72 | 1,40 |
| Vodonik (H_2) | 2 | 4157 | 14,55 | 10,40 | 1,40 |

1) Zaokružene vrednosti, dobijene pomoću vrednosti $(MR) = 8,314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ i vrednosti iz tabele 3.3

Slika 3.2.1– Vrednosti specifične toplote za idealne gasove pri konstantnom pritisku i konstantnoj zapremini

Specifične toplote pri konstantnoj zapremini i konstantnom pritisku, c_v i c_p , izražene u $\left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right]$, za prirodni gas se izračunavaju kao suma proizvoda specifičnih toplota za

odgovarajuće komponente gasa i masenih udela komponenti u smeši preko jednačina:

$$c_{vg} = \sum g_i * c_{vi} \quad (3.2.7.)$$

$$c_{pg} = \sum g_i * c_{pi} \quad (3.2.8.)$$

gde su:

c_{vg} i c_{pg} – specifične toplote gasa (smeše) pri konstantnoj zapremini i konstantnom pritisku;

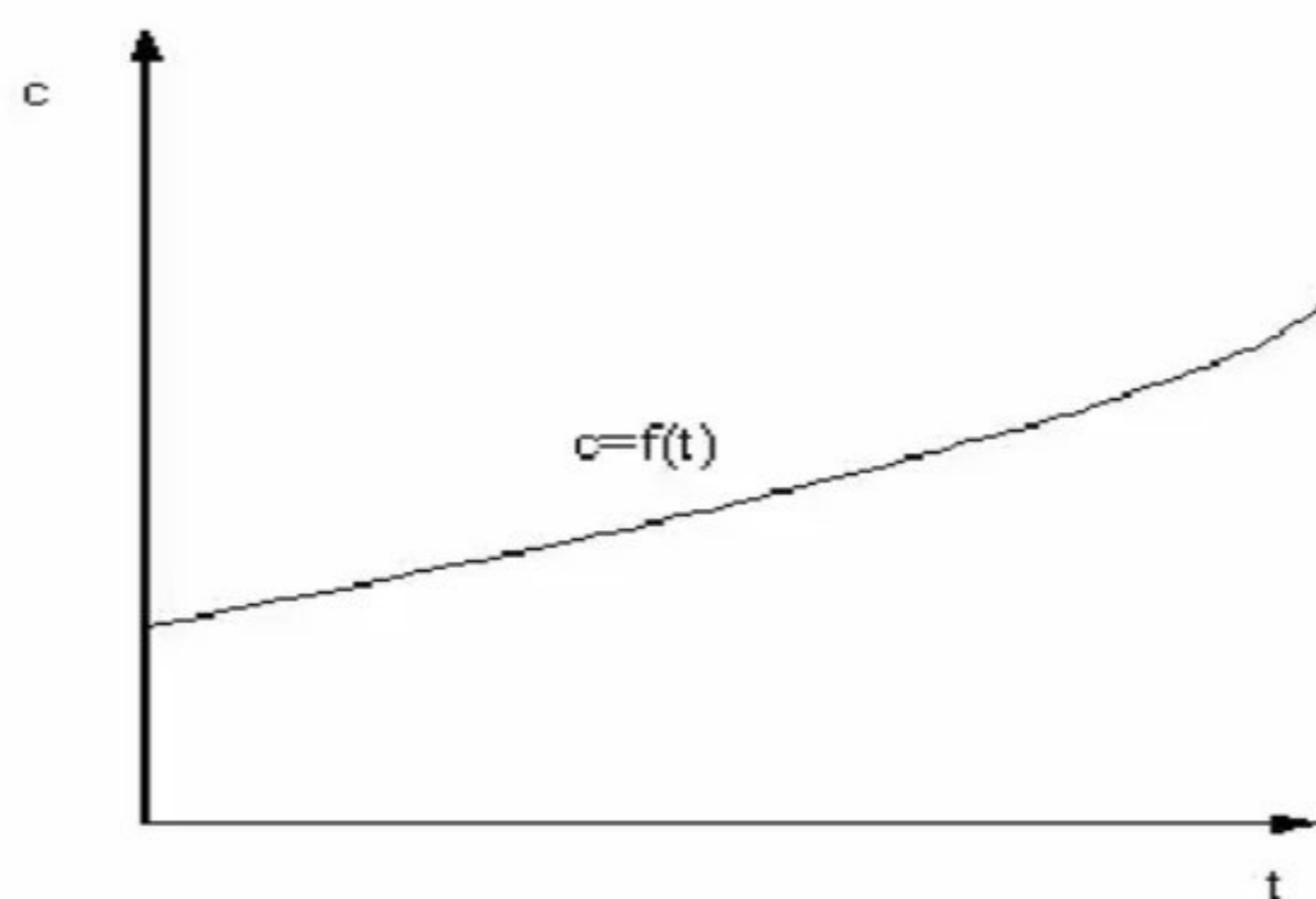
c_{vi} i c_{pi} – specifične toplote komponente „i“ u smeši, pri konstantnoj zapremini i konstantnom pritisku i

g_i – maseni udeo komponente „i“ u smeši. (Prstojević et al., 2005)

Odnos između c_p i c_v naziva se izentropski eksponent ili adijabatski eksponent, κ , i funkcija je broja atoma u molekulima supstance:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{Mc_p}{Mc_v} = \frac{c_p}{c_v} . \quad (3.2.9.)$$

Specifična toplota za supstancu nije konstanta, već raste sa porastom temperature, što je prikazano na slici 3.2.2. (Kozić et al., 1979) U praktične svrhe se može koristiti srednja vrednost.



Slika 3.2.2 – Dijagram zavisnosti specifične toplote idealnog gasa od temperature

3.3. Vobeov broj (indeks)

Vobeov broj (W_o), ili Vobeov indeks, je pokazatelj toplotnog opterećenja gorionika. Količina toplote dovedena gasom u gorionik u jedinici vremena predstavlja toplotno opterećenje gorionika. Toplotno opterećenje se po pravilu izražava u kilovatima [kW].

Energija koju gas donosi na gorionik se određuje preko sledeće jednačine:

$$Q_T = Q_v * H, \quad (3.3.1.)$$

gde su:

Q_v – zapreminski protok prirodnog gasa [$\frac{m^3}{s}$];

H – toplotna moć prirodnog gasa [$\frac{kJ}{m^3}$] i

Q_T – energija na gorioniku dovedena od strane gasa [$\frac{kJ}{s}$] ili [kW].

Zapreminski protok jednak je:

$$Q_v = V_g * A_g * \mu, \quad (3.3.2.)$$

gde su:

V_g – brzina strujanja gasa u gorioniku [$\frac{m}{s}$];

A_g – površina poprečnog preseka grla gorionika [m^2] i

μ – kontrakcija mlaza.

Brzina strujanja gasa se određuje preko Bernulijeve jednačine:

$$p_1 + \rho * \frac{v_1^2}{2} = p_g + \rho * \frac{v_g^2}{2}, \quad (3.3.3.)$$

i kako je površina poprečnog preseka grla gorionika znatno manja od površine poprečnog preseka pre suženja, tj. $A_g \ll A_1$, iz jednačine kontinuiteta ($A_1 V_1 = A_g V_g$),

zaključuje se da je brzina strujanja gasa u grlu gorionika znatno veća u odnosu na brzinu strujanja gasa pre ulaska gasa u suženje, odnosno $V_g \gg V_1$. Prema tome, u Bernulijevoj jednačini član $\rho \frac{v_1^2}{2}$ se zanemaruje i dolazi se do izraza za brzinu strujanja gasa u grlu gorionika:

$$V_g = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (3.3.4.)$$

Dobijeni izraz za brzinu strujanja gasa u grlu gorionika se ubacuje u jednačinu za protok pri čemu se dobija sledeći izraz:

$$Q_v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} * A_g * \mu \quad (3.3.5.)$$

Ubacivanjem prethodnog izraza u jednačinu za energiju koju gas donosi na gorionik, dobija se izraz:

$$Q_T = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} * A_g * \mu * H \quad (3.3.6.)$$

Veličina poprečnog preseka grla gorionika, A_g , i veličina pada pritiska prilikom proticanja gasa kroz gorionik, Δp , predstavljaju konstruktivne karakteristike gorionika, dok gustina gasa, ρ , i toplotna moć, H , zavise od samih karakteristika prirodnog gasa koji se dovodi na gorionik.

Kada se umesto gustine gasa uvede relativna gustina, $\rho_r = \frac{\rho}{\rho_{vaz}}$, dobije se sledeći izraz:

$$Q_T = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\frac{\rho}{\rho_{vaz}} * \rho_{vaz}}} * A_g * \mu * H \quad (3.3.7.)$$

Odnosno:

$$Q_T = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_{vaz}}} * A_g * \mu * \frac{H}{\sqrt{\rho_r}}, \quad (3.3.8.)$$

gde poslednji član u jednačini predstavlja izraz za izračunavanje Vobeovog broja, koji zavisi isključivo od karakteristika prirodnog gasa.

Prilikom određivanja efikasnosti rada gorionika, kao i u njegovom projektovanju, Vobeov broj ima veoma bitnu ulogu. Kao što je prikazano u prethodnoj jednačini, predstavlja odnos gornje (ili donje) toplotne moći i kvadratnog korena relativne gustine gasa:

$$W_o = \frac{H_o}{\sqrt{\rho_r}}, \quad (3.3.9.)$$

gde su:

H_o - gornja (ili donja) toplotna moć prirodnog gasa $[\frac{kJ}{m^3}]$;

ρ_r – relativna gustina gasa koja predstavlja odnos gustine gasa i gustine suvog vazduha pri istim uslovima (p,t); izražava se u odnosu na normalno ili standardno stanje; relativna gustina je bezdimenzionalna veličina i

W_o – gornji (ili donji) Vobeov broj ili indeks, izražava se u $[\frac{kJ}{m^3}]$ ili u $[\frac{kWh}{m^3}]$.

Ukoliko se u jednačini (3.3.9.) umesto gornje toplotne moći za izračunavanje koristi donja toplotna moć, tada je reč o donjem Vobeovom indeksu.

Pri konstantnom pritisku, Vobeov broj je proporcionalan toploti oslobođenoj na grlu gorionika. (Prstojević et al., 2005)

Gasovi različitog porekla i različitog hemijskog sastava, a istog Vobeovog broja, mogu sagorevati na istom gorioniku bez promene mlaznica jer stvaraju isto toplotno opterećenje.

Ako se želi preći sa jednog gasnog goriva na drugo, na primer sa gradskog gasa na prirodni gas, novi prečnik mlaznice i pritisak gasa ispred gorionika se određuju pomoću poznatih Vobeovih brojeva za gasna goriva:

$$W_{o2} * A_{g2} = W_{o1} * A_{g1} \text{ ili u drugom obliku:}$$

$$\frac{W_{o1}}{W_{o2}} = \frac{A_{g2}}{A_{g1}} = \frac{D_2^2}{D_1^2}, \quad (3.3.10.)$$

gde su:

W_{o1} i W_{o2} – Vobeovi brojevi za prethodno korišćeno gasno gorivo i gorivo na koje se prelazi;

A_{g1} i A_{g2} – površine poprečnog preseka prethodnog gorionika i gorionika na koji se prelazi usled promene gasnog goriva i

D_1 i D_2 – prečnici prethodnog gorionika i gorionika na koji se prelazi usled promene gasnog goriva.

Iz prethodne jednačine, dobija se izraz za odnos prečnika mlaznica:

$$\frac{D_2}{D_1} = \sqrt{\frac{W_{o1}}{W_{o2}}}, \text{ odakle se može izračunati prečnik novog gorionika kao:}$$

$$D_2 = D_1 * \sqrt{\frac{W_{o1}}{W_{o2}}} \quad (\text{Strelec, 1982}) \quad (3.3.11.)$$

Pritisak gasa ispred gorionika se može odrediti na sledeći način:

$$\sqrt{p_1} * W_{o2} = \sqrt{p_2} * W_{o1}, \text{ odnosno}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{W_{o2}}{W_{o1}}\right)^2 \text{ odakle se dobija pritisak gasa ispred gorionika kao:}$$

$$p_2 = p_1 * \left(\frac{W_{o2}}{W_{o1}}\right)^2 \quad (\text{Strelec, 1982}) \quad (3.3.12.)$$

Ostala svojstva gasa, na primer brzina širenja plamena i emisija gasova, nisu obuhvaćeni u Vobeovom broju.

Standardna vrednost donjeg Vobeovog broja, za gasovode u Republici Srbiji, kreće se u opsegu 42 - 46 $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$. (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

3.3.1. Određivanje Vobeovog broja

Kao i toplotna moć, i Vobeov broj se može odrediti eksperimentalno, odnosno direktno putem merača, ili računski, na osnovu poznavanja hemijskog sastava.

Računsko određivanje Vobeovog broja bazire se na primeni sledeće jednačine:

$$W_o = \frac{H_o}{\sqrt{\rho_r}}$$

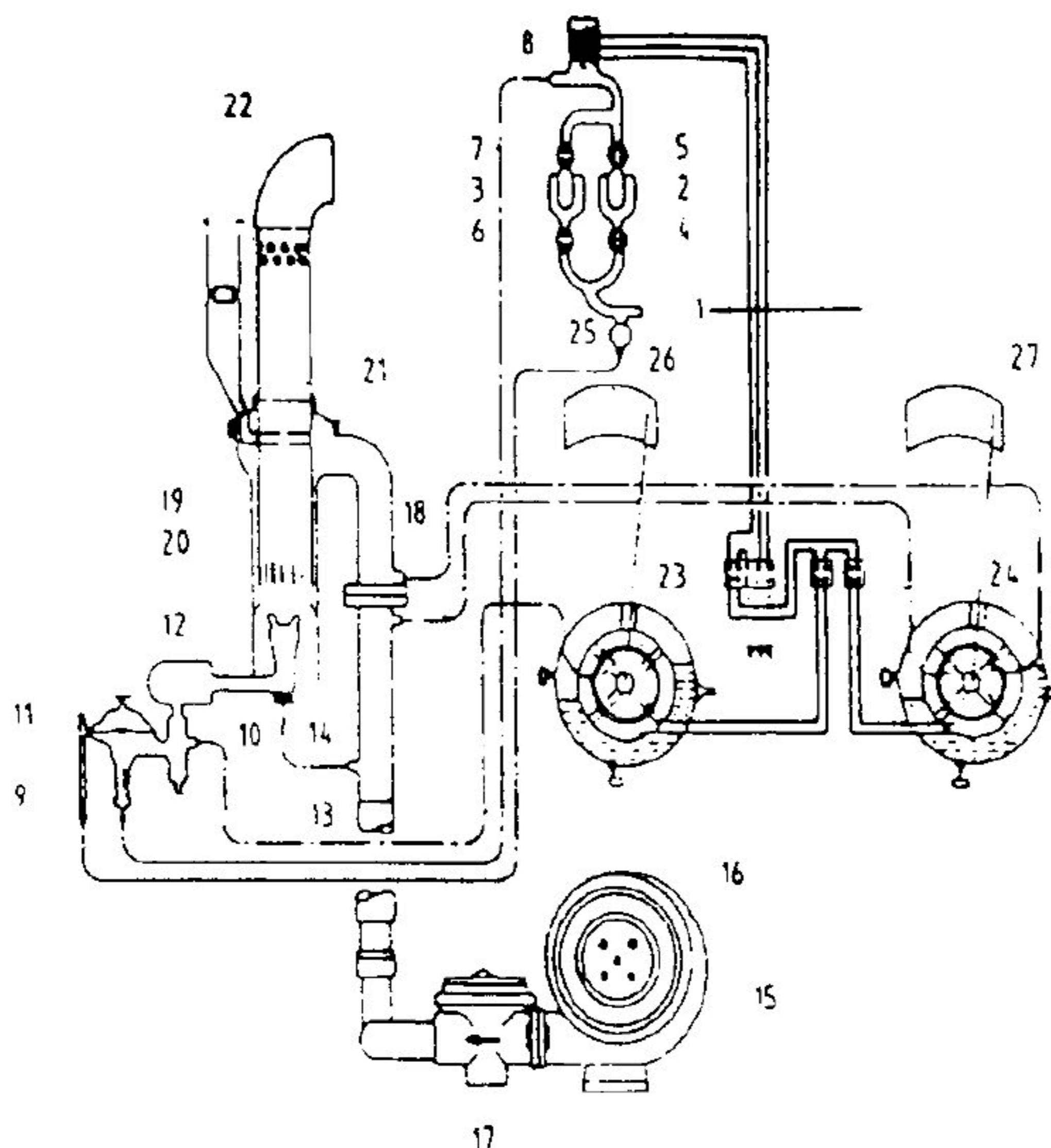
Na osnovu poznavanja komponentalnog sastava gasa, kao i zapreminskog udela svake komponente u gasu, odnosno poznavanjem hemijskog sastava gasa, izračunava se gornja ili donja toplotna moć gasa, kao i relativna gustina gasa. Primenom ove dve veličine u gore navedenoj jednačini, izračunava se Vobeov broj.

Eksperimentalno određivanje Vobeovog broja

Drugi način određivanja Vobeovog broja jeste direktno, putem merača Vobeovog broja. Princip rada se zasniva na sagorevanju određene količine gasa, potom hlađenju proizvoda sagorevanja vazduhom mešanjem u izmenjivaču toplote i određivanju razlike temperature između ohlađenih proizvoda sagorevanja i vazduha za hlađenje.

Gas, čiji se Vobeov broj određuje (Slika 3.3.1.1.), ulazi u merač (1) preko keramičkih filtera (2) i (3), potom prolazi kroz solenoidni ventil (8). Solenoid reaguje kada je pritisak vazduha suviše visok. Nakon toga, gas ide kroz regulator (9) i preko ograničivača (10) na gorionik (12). Ventilator (15) isporučuje vazduh koji odlazi do izmenjivača toplote (20) preko filtera (16) i regulatora pritiska (17). Mali deo ovog vazduha, koji se koristi kao vazduh za sagorevanje, isporučuje se gorioniku preko gumenog creva (13) i ograničivača (14). Vazduh koji je namenjen za hlađenje proizvoda sagorevanja prolazi kroz prigušnicu (18) na kojoj se određuje, odnosno meri, pritisak vazduha (24). Meračem (23) se obavlja merenje pritiska gasa. Pritisak koji je izmeren jeste onaj koji vlada u vodu koji izlazi iz

regulatora (9). Merač pritiska (23) je serijski povezan sa solenoidom (8) koji upravlja glavnim ventilom za gas. Isporuka gasa se obustavlja, ukoliko je pritisak vazduha suviše nizak. Gorionik takođe ima uređaj za kontrolu plamena koji obustavlja isporuku gasa ako je plamen ugašen. Kada je gas sagoreo, proizvodi sagorevanja prolaze kroz izmenjivač toplote (20), u kojem se proizvodi sagorevanja mešaju sa vazduhom za hlađenje. U termo-ćeliji (21), postavljenoj iznad izmenjivača toplote, meri se razlika u temperaturi između izmešanih proizvoda sagorevanja i vazduha za hlađenje. Izmešani proizvodi sagorevanja napuštaju merač preko otvora (22). Razlika u temperaturi, utvrđena u termo-ćeliji, pretvara se u signal izražen u milivoltima [mV] koji je direktno proporcionalan razlici temperature. Ovaj signal u [mV] prolazi kroz konvektor kako bi se dobio signal u miliamperima [mA] koji je proporcionalan Vobeovom broju u dijapazonu 35-50 $[\frac{MJ}{m^3_N}]$. (Prstojević et al., 2005)



Slika 3.3.1.1- Merač Vobeovog broja

Kao što je već objašnjeno, značaj poznavanja Vobeovog broja ogleda se u tome da gasovi različitog porekla i sastava odgovarajućim procesom namešavanja mogu dati zahtevane vrednosti toplotne moći, a samim tim i zahtevane vrednosti Vobeovog broja, čime se dolazi do zaključka da će oni moći sagorevati na istom gorioniku bez promene mlaznica, što je svakako značajna informacija prilikom uvoza različitih gasova koji moraju biti prilagođeni standardima srpskih, već izgrađenih, gasovoda. U nastavku rada biće prikazan sam proces namešavanja gasova u okviru studije slučaja pod nazivom Mogućnost korišćenja prirodnog gasa različitog porekla u Republici Srbiji.

3.4. Džul-Tomsonov efekat

Godine 1852, Vilijam Tomson i Džejms Preskot Džul izveli su eksperiment koji je pokazao da pri naglom (adijabatskom²) širenju realnih gasova dolazi do promene temperature (tj. hlađenja ili, ređe, zagrevanja) gasa. Zapaženoj pojavi je dat naziv Džul-Tomsonov efekat, i uz likvefakciju gasova, predstavlja jedan od dva neposredna dokaza postojanja međumolekulskih interakcija u gasovima. Drugim rečima, ovaj efekat se može opisati kao promena temperature gasa pri sniženju pritiska opisan Džul-Tomsonovim koeficijentom:

$$\mu = \left(\frac{\delta T}{\delta p} \right)_i, i = \text{const} \quad (3.4.1.)$$

$$\text{ili} \quad \mu = - \frac{\left(\frac{\delta i}{\delta p} \right)_T}{\left(\frac{\delta i}{\delta T} \right)_p} \quad (3.4.2.)$$

Jednačina 3.4.1. predstavlja promenu temperature sa promenom pritiska pri konstantnoj entalpiji³. (Prstojević et al., 2005)

Polazeći od izraza za toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku i termodinamičke jednačine stanja, može se pokazati da važi sledeća zavisnost:

² Adijabatski proces predstavlja proces u kojima gas ne razmenjuje toplotu sa okolinom, tj. $Q=0$. Saglasno Prvom zakonu termodinamike, $Q = \Delta U + A$, sistem vrši rad samo na račun svoje unutrašnje energije.

³ Entalpija I je toplotna energija koja se razmenjuje između sistema i okoline pri konstantnom pritisku: $I = U + PV$ [J]. Entalpija je funkcija stanja sistema.

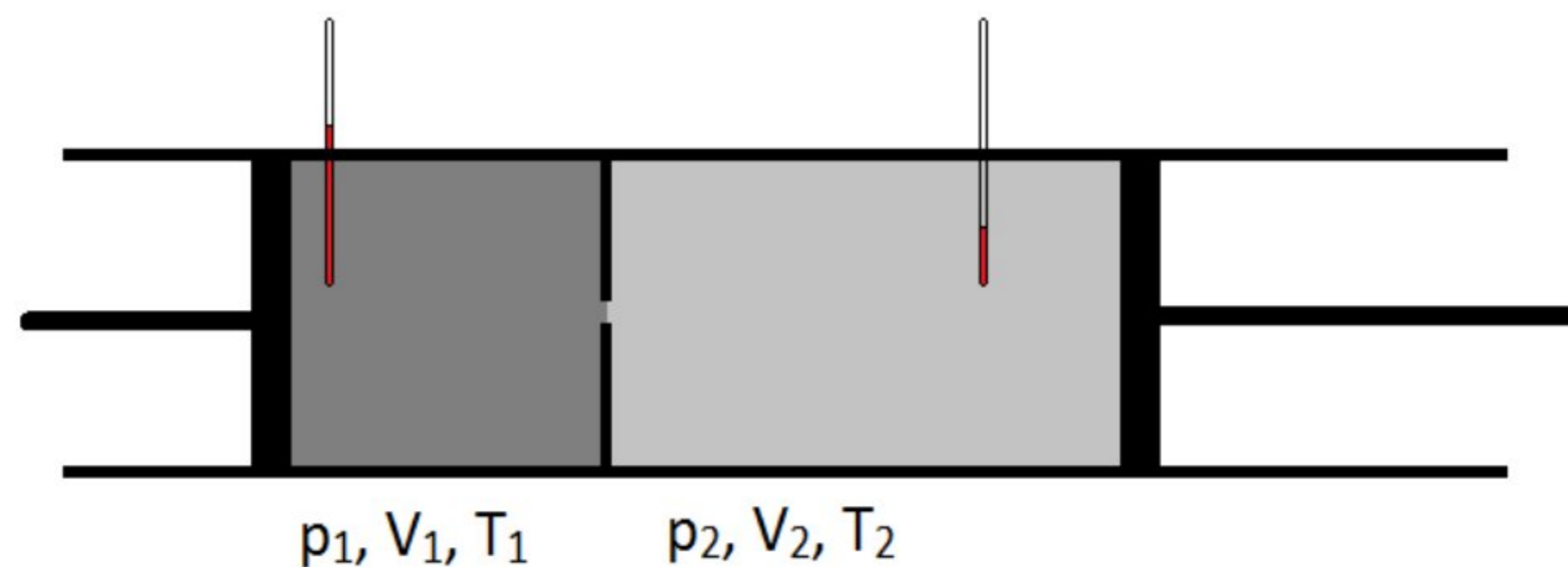
$$\mu = \frac{T^* \left(\frac{\delta V}{\delta T} \right)_{p-V}}{c_p} \quad (3.4.3.)$$

Kombinacijom sa Van der Valsovom jednačinom, prethodni izraz može da se napiše kao sledeća jednačina:

$$\mu = \frac{\frac{2a}{RT} - b}{c_p} \quad (3.4.4.)$$

koja pokazuje zavisnost Džul-Tomsonovog efekta od prirode razmatranog gasa (konstante a i b). Takođe, promena temperature, osim sastava, zavisi i od temperature gasa, kao i od njegovog pritiska. (Džul-Tomsonov efekat, Fakultet za fizičku hemiju)

Šematski, Džul-Tomsonov koeficijent se može odrediti merenjem pada ili porasta temperature gasa za dati pad pritiska (slika 3.4.1.). Aparat je izolovan tako da ne dolazi do razmene toplote sa okolinom, što ekspanziju čini adijabatskom. (Fleming, P., The Joule-Thomson Effect)



Slika 3.4.1 – Šematski prikaz merenja Džul-Tomsonovog koeficijenta

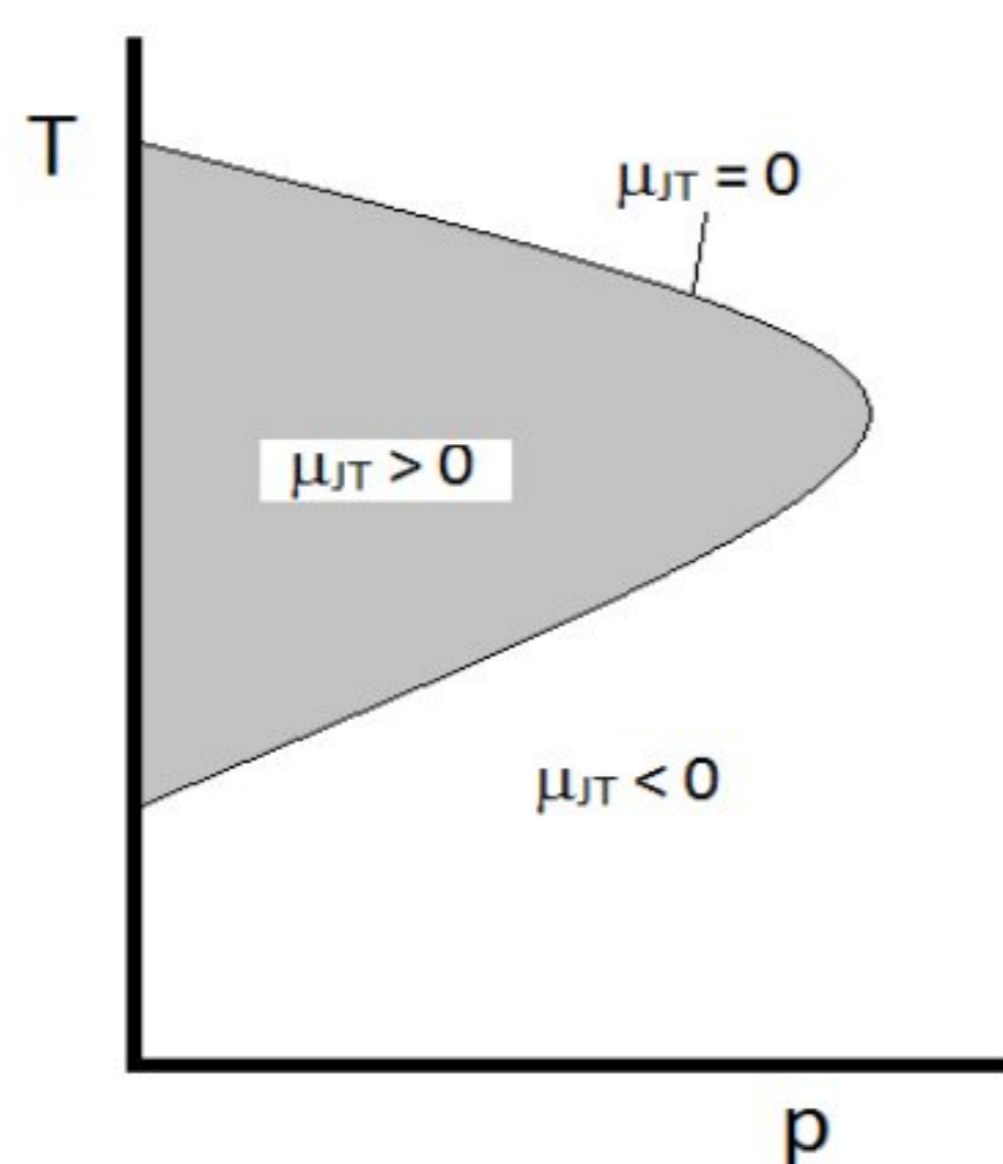
Do hlađenja dolazi zbog vršenja rada kako bi se prevazišlo privlačenje između molekula gasa dok se udaljavaju, odnosno, kada privlačne sile nadjačaju odbojne, sistem vrši rad nasuprot privlačnih sila na račun unutrašnje energije gasa, usled čega se gas hladi. Međutim, nisu svi gasovi podložni efektu hlađenja prilikom ekspanzije. Na primer, gasovi poput vodonika i helijuma doživljavaju zagrevanje pri ekspanziji u uslovima bliskim sobnoj temperaturi i pritisku. Shodno prethodnom objašnjenju pojave pozitivnog Džul-Tomsonovog efekta, odnosno hlađenja,

analogno se dolazi do zaključka kako i zašto se javlja negativan Džul-Tomsonov efekat. Vodonik i helijum će se ohladiti pri ekspanziji samo ako su njihove početne temperature veoma niske, jer su privlačne sile u ovim gasovima neobično slabe. Smer promene temperature može se odrediti merenjem Džul-Tomsonovog koeficijenta. (Fleming, P., The Joule-Thomson Effect)

Za idealno gasno stanje, Džul-Tomsonov koeficijent je jednak nuli, $\mu=0$. Ukoliko se gas hladi, gas pokazuje pozitivan Džul-Tomsonov efekat ($\Delta T < 0$, $\Delta p < 0$, $\mu > 0$). Ako se gas zagreva, tada gas pokazuje negativan Džul-Tomsonov efekat ($\Delta T > 0$, $\Delta p < 0$, $\mu < 0$). Tipično ponašanje Džul-Tomsonovog koeficijenta može se prikazati na slici 3.4.2. Na vrednostima temperature i pritiska za koje je $\mu > 0$ (unutar osenčenog regiona), uzorak će se ohladiti nakon ekspanzije. Na uslovima pritiska i temperature gde je $\mu < 0$ (uslovi izvan osenčenog regiona), gas će biti podvrgnut povećanju temperature pri ekspanziji. Duž granice, gas neće biti podvrgnut niti povećanju, niti smanjenju temperature pri ekspanziji. Može se zaključiti da postoji temperatura koja se zove inverziona temperatura, pri kojoj je Džul-Tomsonov koeficijent jednak nuli:

$$T_i = \frac{2a}{Rb}, \text{ gde } T_i \text{ predstavlja temperature inverzije [K].} \quad (3.4.5.)$$

Iz jednačine se zaključuje da ako je $\frac{2a}{RT} > b$, tada je Džul-Tomsonov koeficijent pozitivan. Analogno, za slučaj $\frac{2a}{RT} < b$, javlja se negativan Džul-Tomsonov efekat. (Džul-Tomsonov efekat, Fakultet za fizičku hemiju)



Slika 3.4.2 - Tipično ponašanje Džul-Tomsonovog koeficijenta na različitim pritiscima i temperaturama

Postoji više načina za izračunavanje promene temperature gasa sa promenom pritiska. Jedan način jeste pomoću opšte jednačine stanja Van der Valsa i termodinamičke formule za diferencijalni pad pritiska ($\frac{\delta T}{\delta p}$) kod konstantne entalpije, gde se integralni pad temperature Δt za određenu razliku pritiska izračunava pomoću sledeće jednačine, čime je odstupanje izračunatih vrednosti od izmerenih na ovaj način ispod $\pm 7\%$:

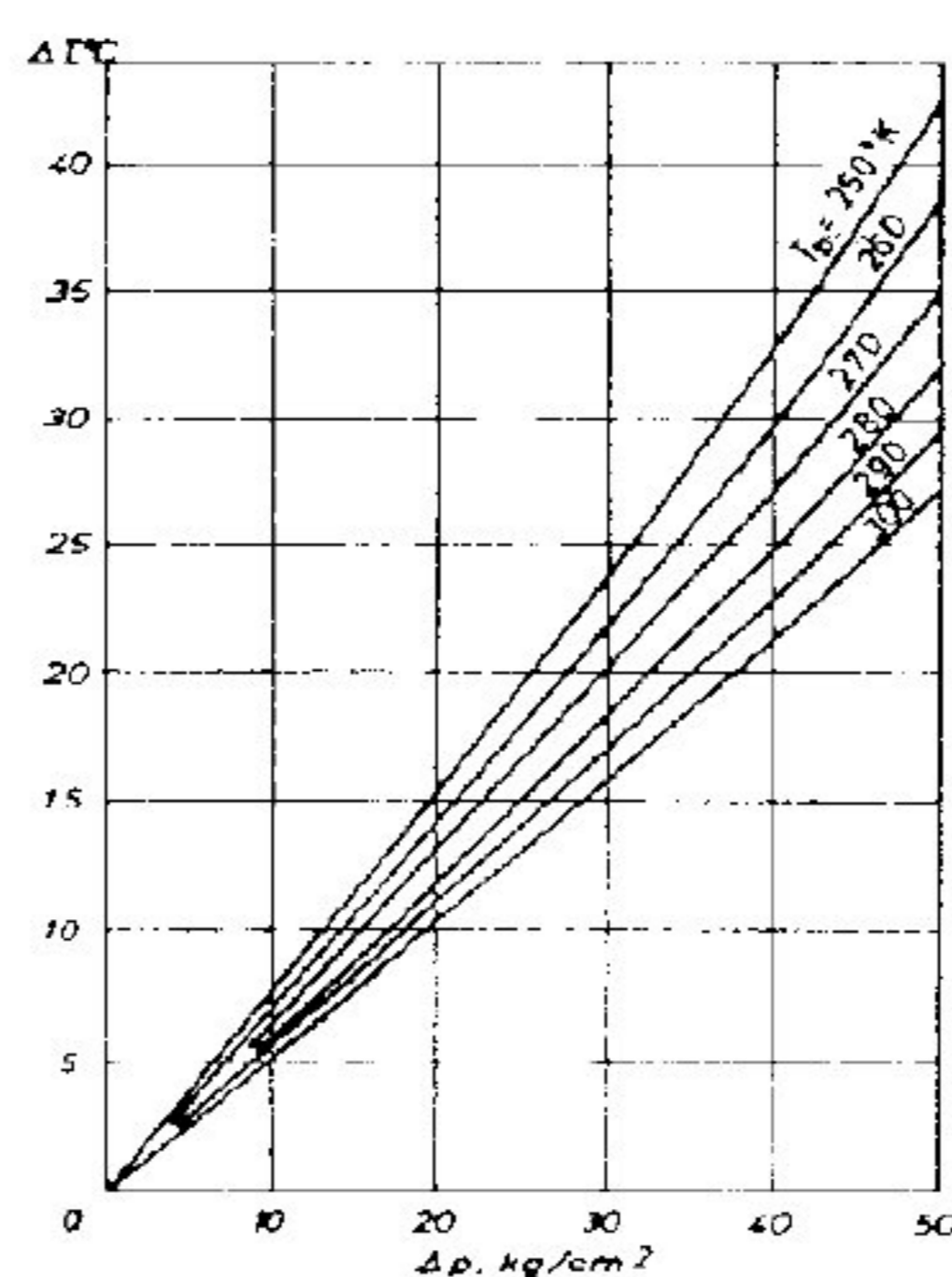
$$t_1 - t_2 = \left(\frac{p_1^2}{1,03911 \cdot 10^6} * (28 - 2,85 * \sqrt{t_1}) + 0,486 - \frac{2270}{10^6} * t_1 \right) * (p_1 - p_2) \quad (3.4.6.)$$

gde su:

t_1 i t_2 – temperature na početku i kraju ekspanzije ($^{\circ}\text{C}$) i

p_1 i p_2 – pritisci pre i posle ekspanzije (bar). (Prstojević et al., 2005)

Drugi način određivanja promene temperature prilikom ekspanzije gasa je korišćenjem Molijerovog dijagrama za gas, uz pretpostavku da se entalpija gasa ne menja. Na slici 3.4.3. dat je dijagram za određivanje pada temperature u zavisnosti od pada pritiska i može se koristiti za izračunavanje pada temperature usled ekspanzije gasa. Dijagram je urađen od strane B. L. Krivošeina i I. E. Hodanovića za prirodni gas uobičajenog sastava. (Prstojević et al., 2005)



Slika 3.4.3 - Dijagram za određivanje pada temperature prirodnog gasa usled ekspanzije

3.5. PVT ponašanje prirodnog gasa

Veličine kojima se opisuju gasovi, a koje se mogu direktno meriti su: pritisak, zapremina i temperatura gasa. Upravo PVT ponašanje prirodnog gasa opisuje kako se prirodni gas ponaša u različitim uslovima pritiska (p), zapremine (V) i temperature (T). PVT ponašanje prirodnog gasa može da se odredi eksperimentalno ili računski pomoću odgovarajućih jednačina stanja. Kako eksperimentalno određivanje zahteva primenu odgovarajuće opreme i aparature koja nije lako dostupna, kao i duži vremenski period potreban za dobijanje rezultata, ovaj način nije rasprostranjen u praksi. Drugi način, češće primenjivan, jeste određivanje PVT ponašanja prirodnog gasa korišćenjem odgovarajućih jednačina stanja, koje mogu biti korišćene i za određivanje nekih termodinamičkih veličina kao što su entalpija, specifična toplota i Džul-Tomsonov efekat. Prirodni gas se često posmatra kao idealan u mnogim inženjerskim proračunima i tada se primenjuje Klajperonova jednačina stanja. Međutim, u realnosti, osobine prirodnog gasa mogu se bolje opisati korišćenjem jednačine stanja, kao što je Van der Valsova jednačina ili modifikovane jednačine koje uzimaju u obzir stvarna međumolekulska dejstva.

3.5.1. Jednačine stanja za idealne gasove

Idealni gas je gas kod kojeg se mogu zanemariti međumolekulske sile i zapremina samih molekula gasa, odnosno, njegovi molekuli se ponašaju kao tačkaste mase i samim tim je celokupna zapremina suda, u kome se oni nalaze, slobodna za njihovo kretanje. Takođe, smatra se da su svi sudari molekula gasa, kao i sudari sa zidovima suda, elastični, pri čemu se ukupna kinetička energija molekula u toku sudara ne menja. Još jedna pretpostavka koja važi za idealne gasove jeste ta da nisu prisutne sile uzajamnog privlačenja i odbijanja između molekula, kreću se potpuno nezavisno jedan od drugog.

U realnosti, idealan gas ne postoji. Međutim, samo izučavanje termodinamike zasniva se na modelu idealnog gasa iz razloga što se mnogi realni gasovi, pri određenim uslovima, kada se nalaze daleko od temperature i pritiska pri kojima se taj gas pretvara u tečno stanje, ponašaju približno kao idealan gas. Što je gas dalje od tečnog stanja, rastojanje između njegovih molekula je veće i privlačne molekulske sile slabe. Približavanje realnih gasova idealnom se dešava usled povećanja temperature i smanjenja pritiska, čime dolazi do povećanja zapremine gasa, a samim tim i do slabljenja dejstva privlačnih međumolekulskih sila.

Klajperonova jednačina stanja, koja definiše stanje idealnih gasova, ima sledeći oblik:

$$p * V = R * T \quad (3.5.1.1.)$$

Veličina $R \left[\frac{J}{kgK} \right]$, u jednačini 3.5.1.1, predstavlja specifičnu gasnu konstantu, koja ima različite vrednosti za različite (idealne) gasove.

Za m kilograma gasa, može da se napiše:

$$p * V = m * R * T, \quad (3.5.1.2.)$$

a kako je masa m [kg] jednaka proizvodu količine supstancije, n [mol], i molarne mase određenog gasa, $M \left[\frac{kg}{mol} \right]$, odnosno $m = n * M$, jednačina dobija sledeći oblik:

$$p * V = n * M * R * T \quad (3.5.1.3.)$$

Veličina MR predstavlja univerzalnu gasnu konstantu $R_u \left[\frac{J}{molK} \right]$ i to je fizička konstanta koja ima istu vrednost za sve idealne gasove.

Uvođenjem molarne zapremine, V_m , jednačina stanja idealnog gasa može da se napiše u obliku:

$$p * V_m = R_u * T \quad (3.5.1.4.)$$

Pri normalnim uslovima ($t_N=0$ °C tj. $T_N=273,15$ K i $p_N=101325$ Pa), zapremina jednog kilomola idealnog gasa iznosi:

$$V_{m,N} = (22,414 \pm 0,003) \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} \right]$$

Sa ovim rezultatom, na osnovu jednačine (3.5.1.4.), može da se dobije brojna vrednost univerzalne gasne konstante:

$$R_u = \frac{p_N \cdot V_{m,N}}{T_N} = (8314,51 \pm 0,07) \left[\frac{\text{J}}{\text{kmolK}} \right], \text{ odnosno } R_u = 8,3145 \left[\frac{\text{J}}{\text{molK}} \right] \quad (3.5.1.5.)$$

Upravo korišćenjem zaokružene vrednosti univerzalne gasne konstante može se izračunati gasna konstanta za bilo koji idealan gas na osnovu izraza:

$$R = \frac{(MR)}{M} = \frac{R_u}{M} = \frac{8,3145}{M} \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right], \text{ gde je molarna masa, } M, \text{ izražena u } \left[\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right]. \quad (3.5.1.6.)$$

Jednačina stanja idelnog gasa je primenljiva za izračunavanje veličina stanja realnih gasova na nižim pritiscima. Na pritiscima bliskim atmosferskim, primena jednačine stanja idelnog gasa dovodi do greške od 2 do 3%. Na višim pritiscima, primena jednačine stanja idealnih gasova može dovesti do greške izračunatih veličina stanja i veće od 500%. Da bi se jednačina stanja idealnog gasa primenila za realne gasove, uveden je popravni faktor kojim se proširuje jednačina stanja idealnog gasa, o čemu će biti više reči u nastavku rada.

3.5.2. Jednačine stanja realnih gasova

Ukoliko je stanje gasa određeno takvim vrednostima pritiska i temperature pri kojima se gas ne ponaša kao idealan, postoji više načina rešavanja problema ponašanja realnih gasova. Jedan od prvih pokušaja jeste jednačina Van der Valsa, iz 1873. godine, koja uzima u obzir međumolekulske sile i zapreminu samih molekula. Ima sledeći oblik:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2} \right) \cdot (V_m - b) = R \cdot T \quad (3.5.2.1.)$$

ili u drugom obliku:

$$\left(p + n^2 \cdot \frac{a}{V^2} \right) \cdot (V - n \cdot b) = n \cdot R \cdot T$$

Jednačina (3.5.2.1.) predstavlja korigovanu Klajperonovu jednačinu stanja.

Koeficijenti a i b u Van der Valsovoj jednačini predstavljaju empirijske konstante koje opisuju interakcije između molekula gasa i zapremine koju zauzimaju. Konstante a , b i R zavise od vrste gasa.

Koeficijent a predstavlja privlačne interakcije između molekula gasa. Veći koeficijent a ukazuje na jače međumolekulske privlačne sile. U Van der Valsovoj jednačini, a se koristi u izrazu $\frac{a}{V_m^2}$ kao korekcija pritiska zbog privlačnih sila između molekula.

Koeficijent b predstavlja korekciju zbog zapremine koju zauzimaju sami molekuli gasa. On uzima u obzir činjenicu da molekuli imaju određeni prostorni volumen koji nije zanemarljiv, naročito pri visokim pritiscima. U Van der Valsovoj jednačini, b se koristi kao korekcija zapremine u izrazu $(V_m - b)$, odnosno, prostor koji je slobodan za kretanje molekula je određen razlikom između zapremine koju zauzima gas (zapremine suda) i zapremine b (tzv. kovolumena).

Konstante a i b se utvrđuju za svaki gas posebno. Te konstante su zavisne od kritičnog pritiska⁴, P_k , i kritične temperature⁵, T_k , gasa i ta zavisnost se izražava preko izraza:

$$a = \frac{27}{64} \cdot R^2 \cdot \frac{T_k^2}{P_k}, b = \frac{R}{8} \cdot \frac{T_k}{P_k} \quad (\text{Prstojević et al., 2005}) \quad (3.5.2.2.)$$

Za gasne smeše važi odnos:

$$a = \sum Y_i \cdot a_i, b = \sum Y_i \cdot b_i \quad (3.5.2.3.)$$

gde su:

a i b – konstante za gasnu smešu i

a_i i b_i – konstante za komponentu i u smeši, izračunavaju se preko jednačine (3.5.2.2.).

⁴ Kritičan pritisak predstavlja pritisak neophodan za prevođenje gasa u tečno stanje na kritičnoj temperaturi.

⁵ Kritična temperatura predstavlja temperaturu iznad koje gas pod dejstvom pritiska bilo koje veličine ne može biti preveden u tečno stanje.

Obe vrednosti su tabelarne veličine.

Uprkos tome što jednačina Van der Valsa kvalitativno dobro opisuje svojstva realnih gasova, za mnoge tehničke probleme, u nekim opsezima pritiska, temperature i specifične zapremine, njena tačnost nije zadovoljavajuća. Druga mogućnost rešavanja problema ponašanja realnih gasova, koja ima veći praktičan značaj, jeste uvođenje tzv. faktora stišljivosti, odnosno, faktora kompresibiliteta z . Faktor kompresibiliteta, z , se definiše kao odnos stvarnog volumena gasa, V , i volumena koji bi zauzeo idealni gas pri istoj temperaturi i pritisku, V_{ideal} . Matematički, faktor kompresibiliteta se može izraziti kao:

$$z = \frac{V}{V_{ideal}} = \frac{V}{\frac{n \cdot R \cdot T}{p}} = \frac{p \cdot V}{n \cdot R \cdot T} \quad (3.5.2.4.)$$

gde su p pritisak gasa, V stvarni volumen gasa, n broj molova gasa, R univerzalna gasna konstanta, T temperatura gasa, a V_{ideal} je volumen koji bi zauzeo idealni gas pod istim uslovima.

Kod idealnih gasova, faktor kompresibiliteta je uvek 1, dok kod realnih gasova može varirati sa promenama temperature, pritiska i hemijskog sastava i najčešće se daje grafički, u obliku dijagrama. (Kozić, 2019)

Osim jednačine Van der Valsa, postoje brojne jednačine kojima se opisuje PVT ponašanje realnih gasova. Ipak, oblici opštih jednačina stanja za realne gasove su drugog ili višeg reda što ih čini dosta nepovoljnim za brzo izračunavanje, a samim tim i za njihovu primenu. Iz tih razloga, u naftnoj industriji se najčešće koristi izražavanje PVT ponašanja gasa preko gore pomenutog faktora kompresibiliteta, koji se uvodi u opštu jednačinu stanja za idealne gasove, čime se dobija sledeći oblik jednačine:

$$p \cdot V = n \cdot z \cdot R \cdot T \quad (3.5.2.5.)$$

Faktor kompresibiliteta je bezdimenzionalni broj koji predstavlja odstupanje od jednačine za idealne gasove. Njegovo određivanje može da se obavi pomoću PVT aparature, aparatom Bean i Burnet-a, a za gas koji se sastoji samo od jedne komponente, mogu da se koriste dijagrami, ali taj način nije praktičan, s obzirom da se u prirodi ne mogu ili se veoma retko mogu naći dve iste smeše. Samim tim,

faktor kompresibiliteta za smeše se određuje eksperimentalno, pomoću posebne opreme, ili češće korišćenim, računskim postupkom. (Prstojević et al., 2005)

Na slici 3.5.2.1. prikazan je dijagram koji služi za određivanje faktora kompresibiliteta za prirodni gas preko pseudoredukovanog pritiska i pseudoredukovane temperature.

Odnos između temperature na kojoj se gas nalazi, tj. temperature za koju se traže određena svojstva T , i kritične temperature, T_k , naziva se redukovana temperatura, T_r . Odnos između pritiska na kojem se gas nalazi, p , i kritičnog pritiska, p_k , naziva se redukovani pritisak, p_r . Predstavljaju bezdimenzionalne veličine i prikazuju se u obliku sledećih jednačina:

$$T_r = \frac{T}{T_k} ; \quad (3.5.2.6.)$$

$$p_r = \frac{p}{p_k} .$$

S obzirom da prirodni gas predstavlja smešu različitih gasova, za primenu dijagrama, najpre je neophodno odrediti vrednosti pseudokritičnih temperatura i pseudokritičnih pritisaka, na osnovu kojih se dobijaju pseudoredukovane vrednosti.

Pseudokritična temperatura, T_{pk} , i pseudokritični pritisak, p_{pk} , za smeše gasova određuju se preko sledećih relacija:

$$T_{pk} = \sum Y_i * T_{ki} ; \quad (3.5.2.7.)$$

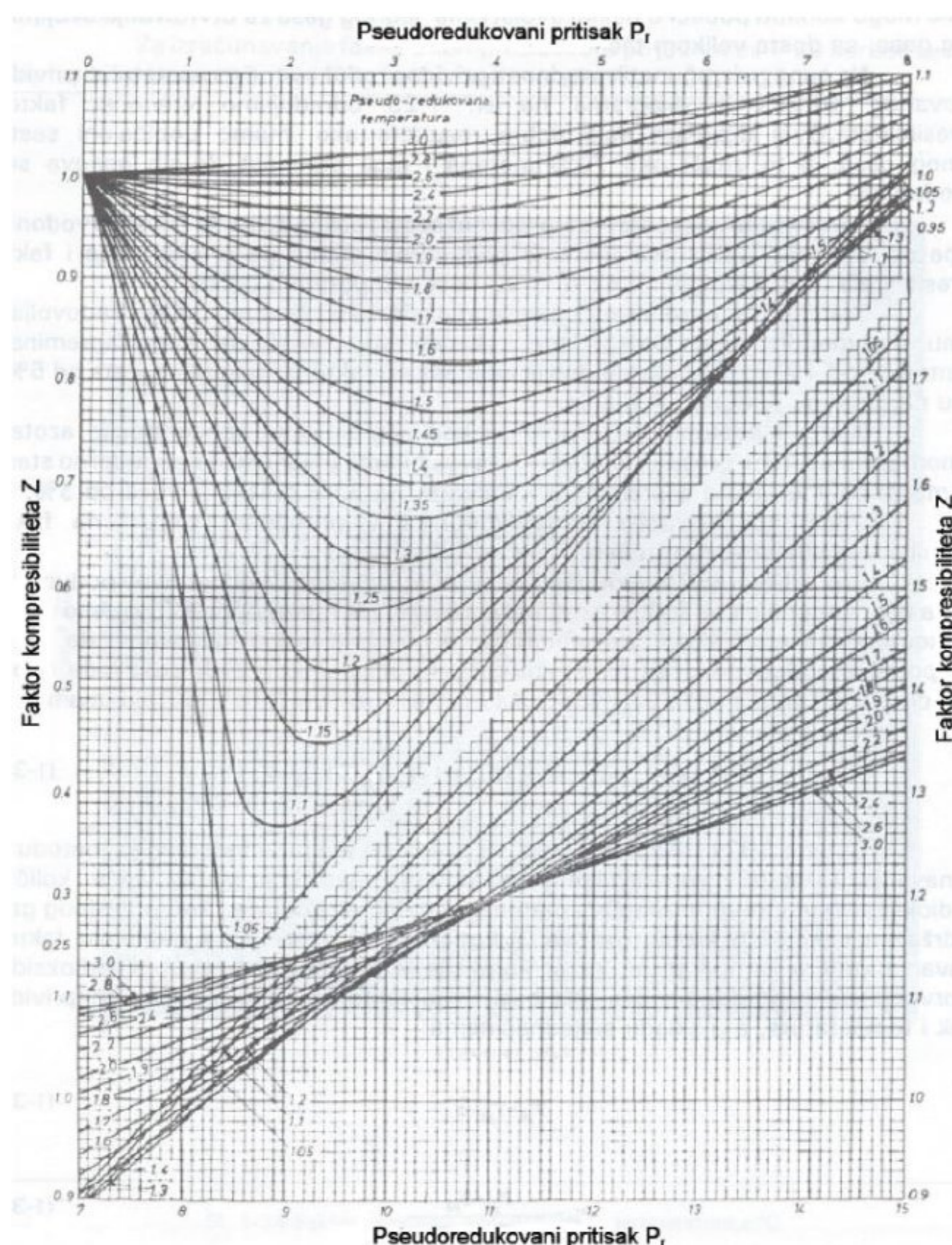
$$p_{pk} = \sum Y_i * p_{ki} ,$$

gde su:

T_{ki} i p_{ki} – kritična temperatura i kritični pritisak komponente i u smeši
 Y_i – zapreminski udeo pojedinih komponenti.

Na osnovu pseudokritičnih vrednosti, izračunavaju se vrednosti pseudoredukovane temperature, T_{pr} , i pseudoredukovanog pritiska, p_{pr} , na osnovu kojih se očitava vrednost faktora kompresibiliteta sa dijagrama prikazanog na slici 3.5.2.1:

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pk}} ; p_{pr} = \frac{p}{p_{pk}} . \quad (3.5.2.8.)$$



Slika 3.5.2.1 – Dijagram Katz-a; Faktor kompresibiliteta za prirodni gas

Pojam pseudoredukovane temperature i pritiska uveden je na bazi Van der Valsove teoreme podudarnih stanja, prema kojoj će dva gasa imati isto odstupanje od zakona za idealne gasove, ako je odnos temperatura i pritiska prema pseudokritičnim temperaturama i pseudokritičnim pritiscima oba gasa isti, tj. ako imaju iste vrednosti pseudoredukovanih temperatura i pseudoredukovanih pritiska.

Dijagram daje dobre rezultate ako je u pitanju uobičajeni sastav prirodnog gasa, a to znači oko 70% metana i mali procenat drugih gasova sem ugljovodonika. Samim tim, prirodni gas koji sadrži veći procenat azota, ugljen-dioksida, sumporvodonika, odstupa od Van der Valsove teoreme podudarnih stanja i faktor kompresibiliteta dat u dijagramu na slici 3.5.2.1. neće biti potpuno tačan. (Prstojević et al., 2005)

Postoji mogućnost izračunavanja faktora kompresibiliteta na uslovima kada je temperatura $t=12\text{ }^{\circ}\text{C}$, pritisak manji od 70 bar-a, $p<70\text{ bar}$, i relativna gustina gasa, $\rho_r=0,65$, preko formule:

$$z \approx 1 - \frac{p_m}{460}, \quad (3.5.2.9.)$$

gde p_m predstavlja srednju vrednost pritiska u gasovodu i izračunava se preko formule:

$$p_m = \frac{2}{3} * \frac{p_1^3 - p_2^3}{p_1^2 - p_2^2}. \quad (3.5.2.10.)$$

gde su:

p_1 – pritisak gasa na ulazu u gasovod [bar]

p_2 – pritisak gasa na izlazu iz gasovoda [bar].

4. PRIRODNI GAS NA EVROPSKOM TRŽIŠTU

Geografija igra ključnu ulogu u trgovini prirodnim gasom jer se većina ovog resursa transportuje cevovodima sa često udaljenih lokacija do potrošača, koji mogu biti stotinama ili čak hiljadama kilometara daleko. Oslanjanje na uvoz prirodnog gasa preko cevovoda može predstavljati rizik za energetske sigurnost, što je postalo očigledno tokom globalne energetske krize izazvane ruskom invazijom na Ukrajinu 2022. godine.

Razvoj tehnologije utečnjelog prirodnog gasa (LNG) omogućio je nove opcije za transport gasa tankerima, na sličan način kao što se transportuje nafta, čime bi se olakšao transport i smanjila zapremina. Ipak, infrastruktura za LNG je složena i skupa, pa je mreža gasovoda i dalje neophodna za transport, a potom i distribuciju gasa do krajnjih korisnika. (Where does Europe get its natural gas, IEA)

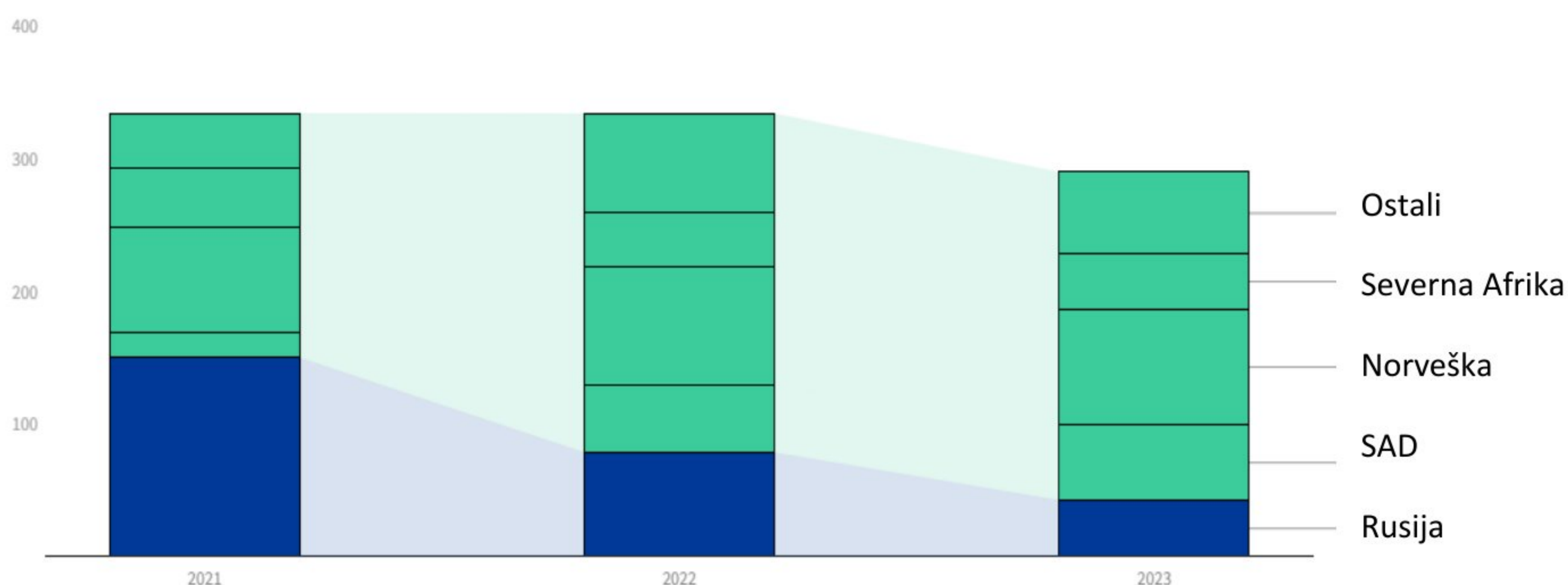
Sve je uočljivije smanjenje zavisnosti od ruskih fosilnih goriva. Uvoz gasa iz cevovoda koji dolaze iz Rusije drastično je opao, dok je obim uvoza LNG-a od

pouzdanih partnera poput Sjedinjenih Američkih Država i Norveške u porastu. (Where does the EU's gas come from, Consilium Europa)

4.1. Količine prirodnog gasa na tržištu Evrope prema poreklu

Udeo ruskog gasa u uvozu Evropske unije putem gasovoda opao je sa više od 40% u 2021. godini na oko 8% u 2023. godini. Ovaj pad u udelu je prvenstveno rezultat naglog povećanja uvoza LNG-a, kao i ukupnog smanjenja potrošnje gasa u Evropskoj uniji. (Where does the EU's gas come from, Consilium Europa)

Na slici 4.1.1. je dat grafički prikaz promene snabdevanja gasom od glavnih partnera u Evropskoj uniji u periodu 2021-2023.



Slika 4.1.1 – Grafički prikaz promene snabdevanja gasom od glavnih partnera u EU u periodu 2021-2023. (Quarterly report on European gas markets)

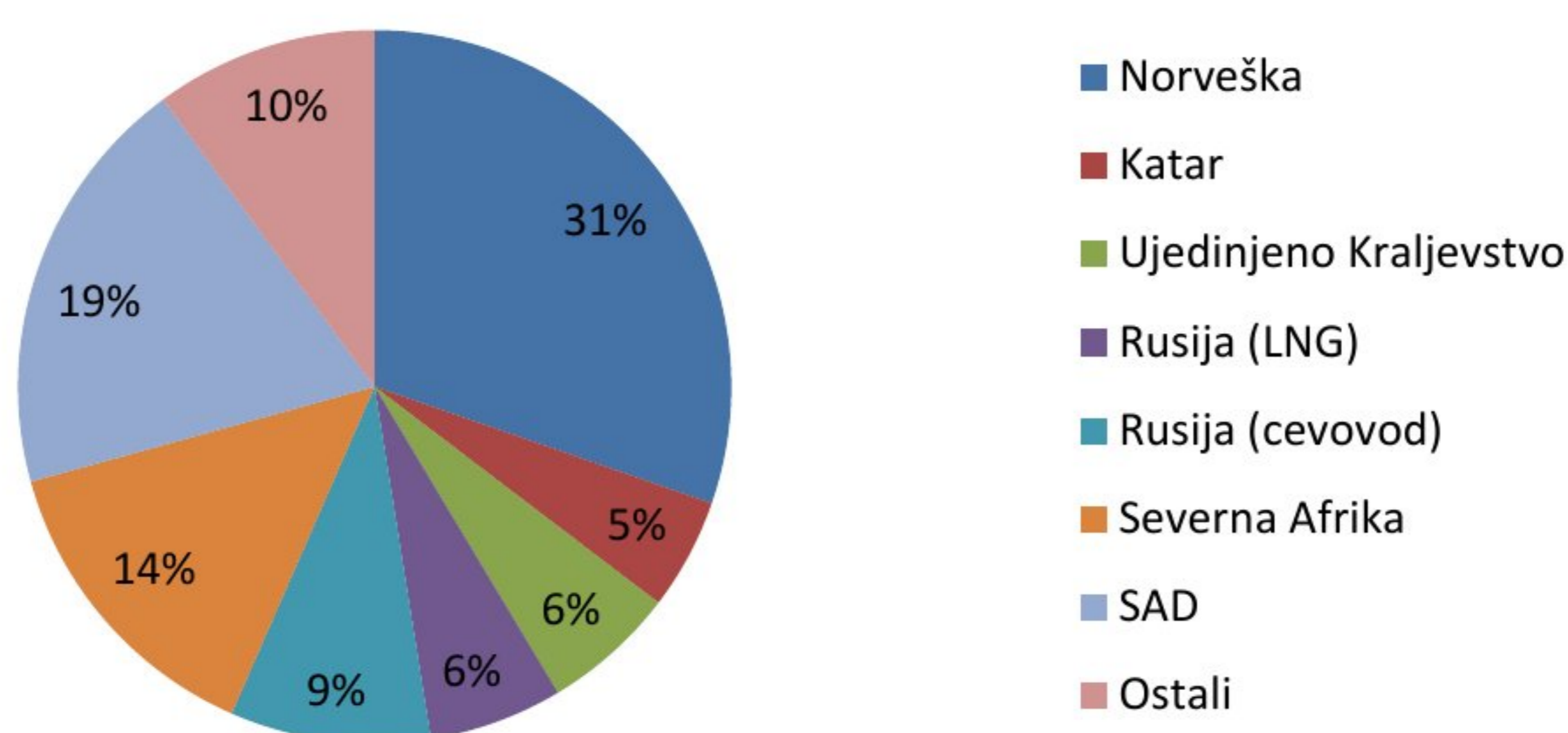
Uvoz prirodnog gasa iz Rusije je opao sa preko 150 milijardi kubnih metara u 2021. godini na manje od 43 milijarde kubnih metara. Ovaj pad je uglavnom nadoknađen rastućim udelom ostalih partnera. Uvoz iz SAD-a je porastao sa 18,9 milijardi kubnih metara u 2021. na 56,2 milijarde kubnih metara u 2023. Uvoz iz Norveške je porastao sa 79,5 milijardi kubnih metara u 2021. na 87,7 u 2023. Uvoz od drugih

partnera je porastao sa 41,6 milijardi kubnih metara u 2021. na 62 milijarde kubnih metara u 2023. godini. (Quarterly report on European gas markets)

Norveška i Sjedinjene Američke Države bile su najveći izvoznici gasa u 2023. godini. Norveška je obezbedila skoro 30% ukupnog uvoza gasa. U ostale dobavljače gasa spadaju severnoafričke zemlje, Ujedinjeno Kraljevstvo i Katar.

Na slici 4.1.2. su prikazani vodeći dobavljači prirodnog gasa za Evropsku uniju u 2023. godini, uključujući i cevovodni transport i LNG, u procentima. Udeli vodećih dobavljača su sledeći:

- Norveška: 30,3%, 87,8 milijardi kubnih metara
- Sjedinjene Američke Države: 19,4%, 56,2 milijarde kubnih metara
- Severna Afrika: 14,1%, 41 milijarda kubnih metara
- Rusija (cevovodi): 8,7%, 25,1 milijarda kubnih metara
- Rusija (LNG): 6,1%, 17,8 milijardi kubnih metara
- Ujedinjeno Kraljevstvo: 5,7%, 16,6 milijardi kubnih metara
- Katar: 5,3%, 15,5 milijardi kubnih metara
- Ostali: 10,3%, 29,9 milijardi kubnih metara.



Slika 4.1.2 – Vodeći dobavljači prirodnog gasa za EU u 2023. godini (Quarterly report on European gas markets)

Kada je reč o LNG-u, Evropska unija je 2023. godine uvezla preko 120 milijardi kubnih metara LNG-a. Sjedinjene Američke Države bile su najveći dobavljač

LNG-a u Evropskoj uniji u 2023. godini sa skoro 50% ukupnog uvoza LNG-a. Upoređujući 2023. sa 2021. godinom, uvoz iz SAD-a se skoro utrostručio.

Najveći uvoznici LNG-a u Evropskoj uniji su:

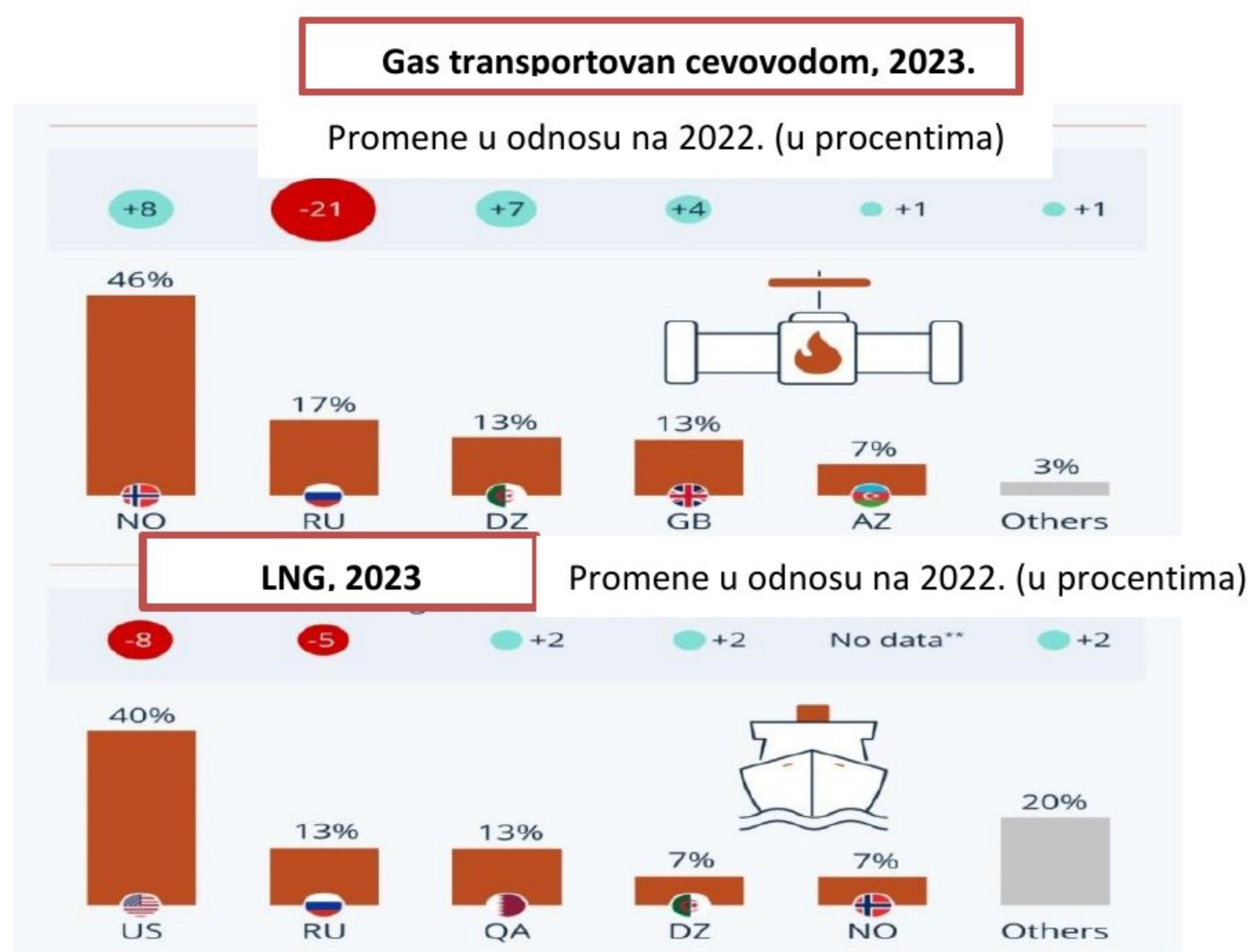
- Francuska;
- Španija;
- Holandija;
- Belgija i
- Italija. (Where does the EU's gas come from, Consilium Europa)

Oslonjena na ruski gas, Evropa je morala da potraži alternativne načine snabdevanja među kojima se kao vodeći izvoznik našao Azerbejdžan, od koga će korist imati i Srbija. Trenutni petogodišnji ugovor o tranzitu gasa između Rusije i Ukrajine ističe krajem 2024. godine, što stvara zabrinutost u vezi s budućim protokom ovih količina prirodnog gasa. Prema procenama kompanije „Rystad Energy”, ruski gas će morati da se preusmeri alternativnim putevima u Evropu, što će zahtevati dodatnih 7,2 milijarde kubnih metara utečnjelog prirodnog gasa (LNG-a) godišnje da bi se nadoknadio gas koji trenutno prolazi kroz Ukrajinu. (Petrović, Stojanović, J., 2024)

Iako je EU smanjila uvoz prirodnog gasa iz Ruske Federacije sa 40 do današnjih 13%, pojedine države poput Austrije, Mađarske, Slovačke i Srbije nalaze se na istom nivou zavisnosti od ruskog uvoza kao i pre zvaničnog početka ruske agresije na Ukrajinu. Upravo su ove države potencijalno najranjivije kad je reč o eventualnom prekidu isporuka tranzita ruskog gasa kroz ukrajinske gasovode. Međutim, dodatne količine LNG-a, kao i prirodnog gasa iz Azerbejdžana, trebalo bi da budu dovoljne u narednom periodu. Takođe, Azerbejdžan ima mogućnost uvoza dodatnih količina prirodnog gasa iz Rusije, ukoliko bi to bilo neophodno usled potreba za izvozom dodatnih količina u Evropu. (Petrović, Stojanović, J., 2024)

Skoro dve decenije Azerbejdžan radi na tome da postane značajan izvoznik gasa u Evropu, što je kulminiralo krajem 2020. puštanjem u rad Transjadranskog gasovoda

(TAP) kojim azerbejdžanski gas ide kroz Grčku i Albaniju i preko Jadranskog mora do Italije. TAP je poslednji deo Južnog gasnog koridora dugog 3500 kilometara, koji pumpa gas iz gigantskog azerbejdžanskog polja Šah Deniz 2 u Kaspijskom moru. Južni gasni koridor napravljen je da bi se diverzifikovalo snabdevanje prirodnim gasom EU i smanjio broj njenih članica koje imaju jedan izvor snabdevanja. Mada gas iz Azerbejdžana može da pomogne državama EU da se odviknu od ruskog gasa, količine u toj zemlji jednostavno nisu dovoljne da ga u potpunosti zamene. U jeku rasta regionalnih tenzija, ali pre nego što su ruske snage krenule u invaziju na Ukrajinu 24. februara, Brisel i Baku su razmatrali povećanje isporuka azerbejdžanskog gasa u EU. Međutim, čak i povećani izvoz azerbejdžanskog gasa samo će pokriti deo potreba Evropske unije za gasom, a štaviše, još uvek je nejasno da li Azerbejdžan može da ispuni svoje veće izvozne ciljeve (Wesolowsky, T., 2022). Na slici 4.1.3. prikazani su najveći dobavljači prirodnog gasa za Evropsku uniju za 2023. godinu prema udelu vrednosti izvoza. Na gornjem grafiku predstavljen je udeo gasa različitog porekla transportovan cevovodom, dok je na donjem grafiku udeo utečnjelog prirodnog gasa, LNG-a, po državama. (Armstrong, M., 2023)



Slika 4.1.3 – Najveći dobavljači prirodnog gasa za EU u 2023. godini prema udelu vrednosti izvoza

4.2. Hemijske karakteristike prirodnog gasa različitog porekla

Najveći problemi s gasom leže u tome što se udeo metana u njemu menja od države do države, pa tako, na primer, udeo metana u prirodnom gasu u Rusiji se kreće oko 98% dok je u Holandiji taj udeo od 80% do 85%.

Uobičajeni hemijski sastav prirodnog gasa različitog porekla prikazan je u tabeli 4.2.1. (Prstojević et al., 2005), (Natural Gas Composition, 2024), (Liquified Natural Gas Specifications)

Tabela 4.2.1 – Uobičajeni hemijski sastav prirodnog gasa različitog porekla

| Prirodni gas | Hemijski sastav (% mol) | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------|
| | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ | C ₅ H ₁₂ | C ₆ H ₁₄ | C ₇ H ₁₆ | N ₂ | CO ₂ |
| Alžir | 88,6 | 8,2 | 2,0 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,6 | 0,0 |
| Azerbejdžan | 93,7 | 3,2 | 1,3 | 0,7 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,8 |
| Holandija | 80,5 | 2,8 | 0,4 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 14,2 | 1,9 |
| Norveška | 88,2 | 5,4 | 1,2 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,2 | 1,4 |
| Katar | 94,0 | 4,0 | 1,0 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 0,5 |
| Rusija | 96,2 | 1,2 | 0,3 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,8 | 0,3 |
| SAD (LNG) | 96,0 | 2,0 | 0,6 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,8 | 0,0 | 0,0 |
| Ujedinjeno Kraljevstvo | 88,5 | 6,0 | 3,0 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 1,0 |

Toplotna moć prirodnog gasa zavisi od države u kojoj se prirodni gas koristi i cevovoda kojim se transportuje, pa samim tim vrednost toplotne moći varira u opsegu od 34 do 52 $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$. Kao što je već objašnjeno, hemijski sastav prirodnog gasa definiše njegovu toplotnu moć. Najjednostavnije rečeno, toplotna moć prirodnog gasa zavisi od toga koliko je efikasna toplotna energija koja može da se dobije iz prirodnog gasa. Jedinica „megadžul po kubnom metru“ $[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}]$ pokazuje koliko se energije (u megadžulima) oslobodi prilikom sagorevanja 1 metra kubnog prirodnog gasa. Proizvođači prirodnog gasa moraju da ispune mnogo kriterijuma i parametara

kvaliteta pre izvoza svog proizvoda. Alat poznat kao hromatograf meri kvalitet prirodnog gasa, pa samim tim može odrediti i komponente izvezenih fosilnih goriva čime će biti poznata i njegova toplotna moć. Cena prirodnog gasa nije određena njegovom količinom, već će kvalitet i toplotna moć prirodnog gasa definisati koliko će svaka država platiti za ovaj energent. Formula po kojoj se izračunava cena je sledeća:

$$\text{Cena } 1 \text{ m}^3 \text{ prirodnog gasa} = \text{zapremina (m}^3\text{)} * \text{toplotna moć } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}\right) * \text{cena } \left(\frac{\text{valuta}}{\text{MJ}}\right)$$

(Calorific Value of Natural Gas)

Uopšteno, može se konstatovati da toplotna moć zavisi od hemijskog sastava prirodnog gasa, kvaliteta proizvođača, pa čak i od uslova kućnog sistema grejanja. Internacionalna Energetska Agencija (International Energy Agency, IEA) je objavila gornje toplotne moći prirodnog gasa za standardne uslove za različite države. U Tabeli 4.2.2. prikazane su donje toplotne moći za standardne uslove i Vobeovi indeksi prirodnog gasa različitog porekla, dok su u Tabeli 4.2.3. prikazane njihove gornje toplotne moći, kao i gornji Vobeovi indeksi. (Natural Gas Composition, 2024), (Calculated methane number and Wobbe index for the original gas compositions), (Requirements for gas quality and gas appliances, 2015), (Call for Input, 2024)

Tabela 4.2.2 – Donje toplotne moći za standardne uslove i Vobeovi indeksi prirodnog gasa različitog porekla

| Država porekla | Donja toplotna moć [$\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$] | Vobeov indeks [$\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$] |
|-------------------------------|---|--|
| Alžir | 39,48 | 47,95 |
| Azerbejdžan | 37,89 | 46,76 |
| Holandija | 31,21 | 37,09 |
| Norveška | 36,82 | 44,61 |
| Katar | 37,35 | 46,58 |
| Rusija | 35,71 | 45,16 |
| SAD | 38,60 | 47,68 |
| Ujedinjeno Kraljevstvo | 38,84 | 46,83 |

Tabela 4.2.3 – Gornje toplotne moći za standardne uslove i Vobeovi indeksi prirodnog gasa različitog porekla

| Država porekla | Gornja toplotna moć [$\frac{MJ}{m^3}$] | Vobeov indeks [$\frac{MJ}{m^3}$] |
|------------------------|--|------------------------------------|
| Alžir | 43,72 | 53,09 |
| Azerbejdžan | 42,01 | 51,86 |
| Holandija | 34,64 | 41,18 |
| Norveška | 40,82 | 49,45 |
| Katar | 41,44 | 51,68 |
| Rusija | 39,68 | 50,16 |
| SAD | 42,79 | 52,87 |
| Ujedinjeno Kraljevstvo | 43,01 | 51,86 |

Tabele su date u standardnim metrima kubnim (1,01325 bar, 15°C), prilikom preračunavanja za normalne uslove (1,01325 bar, 0°C), vrednosti za toplotne moći iz tabele je potrebno pomnožiti sa 1,0549. Do ove vrednosti se došlo preko odnosa molarnih zapremina za standardne i normalne uslove, odnosno, deljenjem vrednosti molarne zapremine za standardne uslove, koja iznosi $23,646 \frac{m^3}{kmol}$, vrednošću molarne zapremine za normalne uslove od $22,415 \frac{m^3}{kmol}$, pri čemu se dobija veličina od 1,0549 koja upravo služi za konverziju veličina iz standardnih u normalne uslove. Drugi način jeste deljenjem vrednosti temperatura za standardne i normalne uslove, odnosno, $\frac{273+15}{273} = 1,0549$.

5. KVALITET PRIRODNOG GASA U REPUBLICI SRBIJI

Kao što je već prikazano, prirodni gas se primarno sastoji od metana, ali uključuje i ostale teže ugljovodonike, kao i ugljen-dioksid i azot. Od sastava gasa zavisi i njegova toplotna vrednost. U nastavku će biti objašnjena terminologija koja će se pominjati u ostatku rada:

- Transport prirodnog gasa – prenošenje prirodnog gasa transportnim sistemom do krajnjih kupaca ili drugog transportnog sistema, distributivnih sistema ili skladišta prirodnog gasa, a ne obuhvata snabdevanje;
- Distribucija prirodnog gasa – prenošenje prirodnog gasa preko distributivnog sistema radi isporuke prirodnog gasa krajnjim kupcima, odnosno drugom distributivnom sistemu, a ne obuhvata snabdevanje prirodnim gasom;
- Operator sistema ili OS – operator transportnog sistema prirodnog gasa, operator distributivnog sistema prirodnog gasa i operator skladišta prirodnog gasa;
- Operator transportnog sistema prirodnog gasa ili OTS – energetski subjekt koji obavlja delatnost transporta prirodnog gasa i upravljanja transportnim sistemom za prirodni gas i odgovoran je za rad, održavanje i razvoj transportnog sistema na određenom području, njegovo povezivanje sa drugim sistemima i za obezbeđenje dugoročne sposobnosti sistema da ispuni potrebe za transportom prirodnog gasa na ekonomski opravdan način;
- Operator distributivnog sistema prirodnog gasa ili ODS - energetski subjekt koji obavlja delatnost distribucije prirodnog gasa i upravljanja distributivnim sistemom za prirodni gas i odgovoran je za rad, održavanje i razvoj distributivnog sistema na određenom području, njegovo povezivanje sa drugim sistemima i za obezbeđenje dugoročne sposobnosti sistema da ispuni potrebe za distribucijom prirodnog gasa na ekonomski opravdan način;
- Operator skladišta prirodnog gasa ili OSS – energetski subjekt koji obavlja delatnost skladištenja i upravljanja skladištem prirodnog gasa i odgovoran je za rad, održavanje i razvoj skladišta prirodnog gasa;
- Mesto isporuke ili MI – merna stanica ili merni uređaj;
- kWh – jedinica isporučene energije iz prirodnog gasa koja je obračunata u skladu sa Uredbom;
- Gasni mesec je vremenski period koji počinje u 8.00 časova pre podne po centralnom evropskom vremenu prvog dana kalendarskog meseca i završava se u 8.00 časova pre podne po centralnom evropskom vremenu prvog dana sledećeg kalendarskog meseca;

- Gasni dan je vremenski period od 24 časa koji počinje u 8.00 časova pre podne po centralnom evropskom vremenu bilo kog dana i završava se u 8.00 časova pre podne po centralnom evropskom vremenu sledećeg dana. Prilikom prelaska sa “zimskog vremena” na “letnje vreme” i obrnuto, dan će činiti 23 ili 25 sati, u zavisnosti od slučaja;
- Korisnik sistema je energetska subjekt, proizvođač prirodnog gasa, ili kranji kupac koji je zaključio ugovor o transportu prirodnog gasa;
- Neutralna cena prirodnog gasa je cena po kojoj je operator transportnog sistema nabavio prirodni gas za potrebe balansiranja, a koja se utvrđuje i objavljuje za svaki gasni mesec i
- Operativno balansiranje je skup aktivnosti koje OTS preduzima na uspostavljanju fizičkog uravnoteženja Sistema. (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

Prirodni gas koji se isporučuje mora da ispuni uslove u pogledu pritiska, sastava, toplotne moći, Vobeovog indeksa i drugih svojstava prirodnog gasa utvrđenih propisima i Pravilima Operatora sistema na čijem se sistemu nalazi ugovoreno mesto isporuke. (Opšti uslovi prodaje energije iz prirodnog gasa kupcima na slobodnom tržištu)

5.1. Snabdevanje Republike Srbije prirodnim gasom

Sigurnost snabdevanja prirodnim gasom je u 2023. godini bila zadovoljavajuća, odnosno, prirodnog gasa je bilo dovoljno da se zadovolje sve potrebe kupaca.

Srbija teži obezbeđivanju alternativnih pravaca snabdevanja. Od 2021. godine, puštanjem u rad interkonektora od bugarsko-srpske granice do srpsko-mađarske granice (gasovod Gastrans) sigurnost snabdevanja je povećana i infrastrukturni standard snabdevanja N-1 u Republici Srbiji je zadovoljen. U decembru 2023. godine je završena izgradnja gasovoda Niš-Dimitrovgrad čime je realizovano povezivanje sa bugarskim transportnim sistemom. Probni rad ovog interkonektora

je započeo u decembru 2023. godine, čime se dodatno povećala sigurnost snabdevanja i vrednost infrastrukturnog standarda N-1 u Republici Srbiji. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Infrastrukturni standard N-1 se koristi kao mera za ocenu sigurnosti snabdevanja prirodnim gasom, odnosno na obezbeđenje i pravovremenu isporuku potrebnih količina prirodnog gasa kupcima. Ovaj N-1 indikator ukazuje na dnevnu operativnu fleksibilnost gasovodnog sistema i njegovu sposobnost da odgovori zahtevima potrošnje u ekstremnim uslovima i računa se na sledeći način:

$$N-1 (\%) = \frac{E_{pm} + P_m + S_m - I_m}{D_{max}} * 100, \text{ gde su:} \quad (5.1.1.)$$

D_{max} - ukupna dnevna potražnja za gasom na dan najveće potražnje za gasom koja se statistički javlja jednom u 20 godina $[\frac{m^3}{dan}]$

E_{pm} - suma tehničkih kapaciteta svih ulaza iz drugih transportnih sistema $[\frac{m^3}{dan}]$;

P_m - tehnički kapacitet proizvodnje (ukupni) $[\frac{m^3}{dan}]$;

S_m - maksimalni tehnički kapacitet ulaza iz podzemnog skladišta prirodnog gasa $[\frac{m^3}{dan}]$;

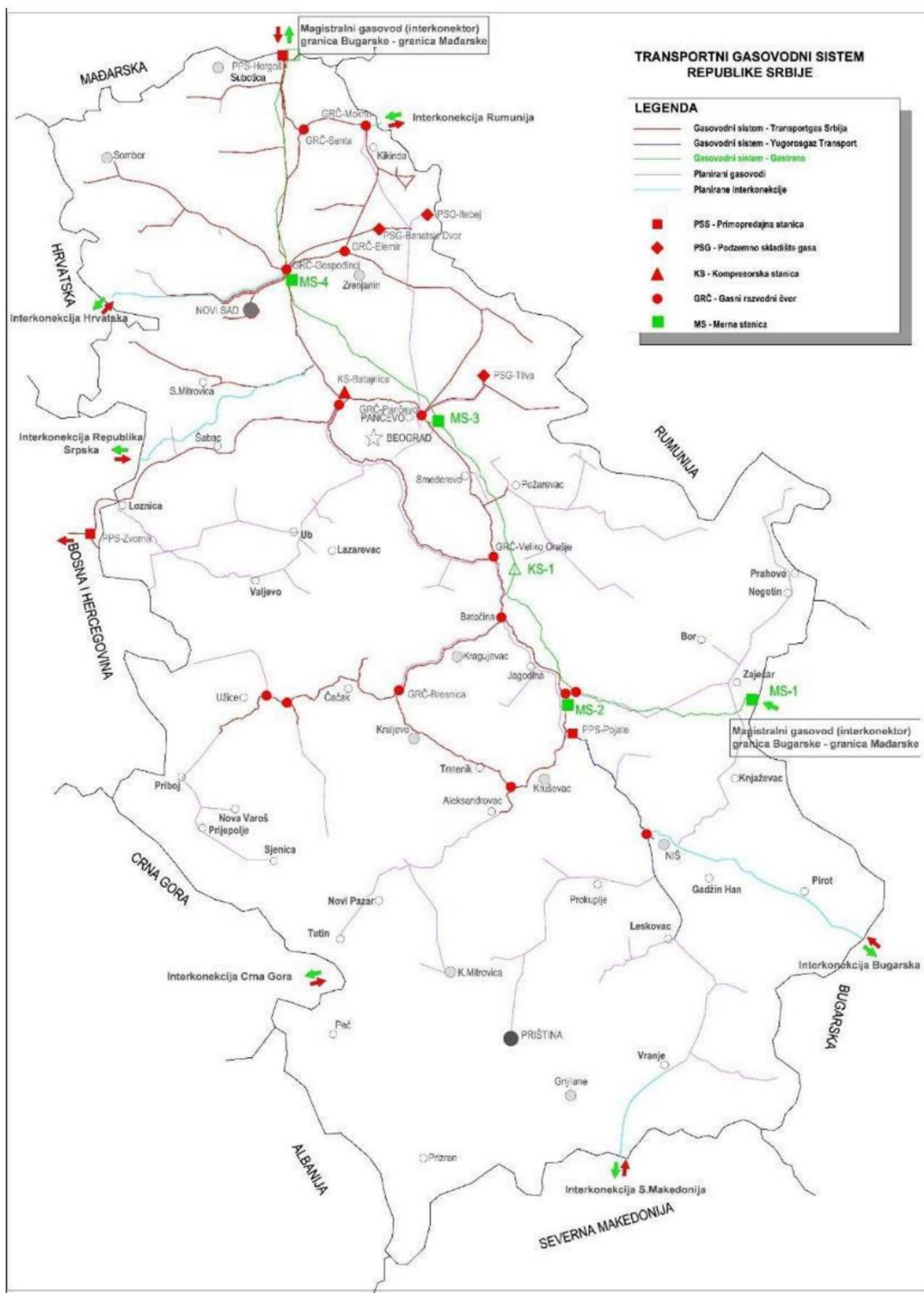
I_m - tehnički kapacitet najvećeg ulaza u transportni sistem $[\frac{m^3}{dan}]$. (Uredba o utvrđivanju preventivnog akcionog plana radi obezbeđivanja sigurnosti snabdevanja prirodnim gasom, 2018)

Za gasovodni sistem se smatra da je u infrastrukturnom smislu, sa stanovišta sigurnosti snabdevanja, zadovoljavajući ukoliko su kapaciteti ulaza u transportni sistem takvi da se zadovolje ukupne potrebe za prirodnim gasom i u slučaju prekida pojedinačno najvećeg infrastrukturnog ulaza u transportni sistem, tokom dana sa izuzetno velikim potrebama za prirodnim gasom koja se statistički javljaju jednom u 20 godina. Ovo odgovara vrednostima (N-1) indikatora većim od 100%. Ukoliko se

ubacivanjem odgovarajućih vrednosti u gore navedenu jednačinu dobije vrednost znatno manja od zahtevanih 100%, to ukazuje da svako i najmanje odstupanje od normalnih uslova funkcionisanja gasovodnog sistema može da izazove ozbiljne posledice po snabdevanje tržišta. (Uredba o utvrđivanju preventivnog akcionog plana radi obezbeđivanja sigurnosti snabdevanja prirodnim gasom, 2018)

Za povećanje sigurnosti snabdevanja bi, takođe, bilo korisno povezivanje sa gasovodima drugih susednih zemalja, poput Rumunije i Hrvatske, koje imaju razvijenu gasnu infrastrukturu i dodatne mogućnosti obezbeđenja prirodnog gasa. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Na slici 5.1.1. prikazan je transportni sistem i pravci kojima se Republika Srbija snabdeva prirodnim gasom. (Plan razvoja transportnog gasovodnog sistema za period 2022-2031. sa planom investicija za period 2022-2024, 2023)



Slika 5.1.1 – Transportni sistem i pravci snabdevanja Republike Srbije prirodnim gasom

Gas iz Azerbejdžana će dolaziti do Srbije novim interkonektorom, odnosno vezom preko Bugarske, ali njime će moći da se zadovolji tek manji deo godišnjih potreba. Najveći deo potrebnih količina gasa Srbija dobija preko Turskog toka. Od kada je 8. januara 2021. godine energent počeo da stiže iz Rusije ovim putem, Srbija ima dovoljne količine gasa. Gasovod Turski tok postavljen je duž Crnog mora od Rusije

do obale Turske, a zatim kopneni tranzitni krak ide do Bugarske, ulazi u Srbiju i dalje vodi ka Mađarskoj i Austriji. Sve dok gas nije tekao ovim putem, Srbija je imala samo jedan pravac snabdevanja - preko Mađarske.

Južni gasni koridor (Southern Gas Corridor, SGC) je najveći projekat gasovoda na svetu od 2017. godine. Transanadolijskim gasovodom (TANAP), gas sa nalazišta u Kaspijskom jezeru, pred obalom Azerbajdžana, preko Gruzije, Turske, Grčke iz Albanije, Jadranskog mora, stiže do juga Italije. Jedan krak, TANAP, ide preko preko Grčke, Bugarske i ulazi u Srbiju, zahvaljujući novom interkonektoru. Takođe, preko njega će do potrošača u južnoj Evropi stizati i američki gas s terminala u Grčkoj, a na njega su priključeni i terminali u Turskoj.

Interkonektor između Srbije i Bugarske je dužine 109 kilometara, ukupna dužina dvosmernog gasovoda kroz obe države je 170 kilometara, a projektovan je za kapacitet od 1,8 milijardi kubnih metara gasa godišnje. Interkonektor je otvorio put novom dogovoru, a novembra 2022. Srbija i Azerbejdžan su potpisali memorandum o saradnji. Ugovorom kompanije Srbijagas i azerbejdžanske državne naftne kompanije Sokara dogovoreno je da u Srbiju do kraja 2024. godine stigne do 400 miliona kubnih metara gasa. Međutim, ta količina dovoljna je tek za oko 40 dana potrošnje u Srbiji.

Evropa je delimično finansirala srpsku deonicu interkonektora Srbija-Bugarska da bi se na neki način dobijao utečnjeni prirodni gas preko Grčke, odnosno Aleksandropulosa gde se gradi terminal. Ali LNG-a nema u dovoljnim količinama.

Iako će interkonektor doprineti boljem snabdevanju Srbije, ruski gas ostaje najvažniji izvor. Tokom 2022. godine, Srbija je uvezla nešto više od 2,7 milijardi kubnih metara gasa, a najveći deo iz Rusije. Prirodni gas u Srbiji se proizvodi iz 78 bušotina, pokazuje Energetski bilans Srbije. Srbija može da zadovolji samo 10 odsto potreba iz domaće proizvodnje, sve ostalo uvozi. U 2022. godini potpisan je trogodišnji sporazum sa Rusijom oko nastavka isporuke gasa i ceni po kojoj će se kupovati. (Srbija i energetika, bbc)

5.2. Kapaciteti za proizvodnju, transport, distribuciju i skladištenje

5.2.1. Proizvodnja

Proizvodnja prirodnog gasa u Srbiji se realizuje na području Vojvodine i jedini proizvođač prirodnog gasa je NIS. Proizvedeni prirodni gas se, nakon pripreme koja omogućava da ga koriste krajnji kupci, isporučuje na 9 mesta u transportni sistem, dok se mnogo manje količine (oko 2,6% proizvodnje) isporučuju na 4 mesta u distributivni sistem. Ukupna godišnja proizvodnja, koja je isporučena u transportni i distributivni sistem, u 2023. godini bila je 2043 GWh, što je za 1,3% manje od proizvodnje u prethodnoj godini. 2,4% ukupno isporučenih količina u transportni i distributivni sistem u 2023. godini, odnosno 50 GWh prirodnog gasa, prodato je drugim snabdevačima, dok su ostale količine prirodnog gasa potrošene od strane NIS-a za sopstvene potrebe, najviše u rafineriji nafte Pančevo. Kako bi zadovoljio sopstvenu potrošnju prirodnog gasa od 3162 GWh, NIS je kupio od JP Srbijagas 1168 GWh prirodnog gasa u 2023. godini. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

5.2.2. Transport

Dužina transportnog sistema na kome Transportgas Srbija d.o.o. obavlja delatnost je bila 2604 km u severnoj i centralnoj Srbiji na kraju 2023. godine, a transportnog sistema Yugorosgaz-Transport d.o.o. 125 km u jugoistočnom delu Srbije. Gastrans d.o.o. obavlja delatnost transporta na 402 km gasovoda od granice sa Bugarskom do granice sa Mađarskom od 1. januara 2021. godine. Transportgas Srbija d.o.o. upravlja sa 83,2% transportne gasovodne mreže u Srbiji, Gastrans d.o.o. sa 12,8%, a Yugorosgaz-transport sa preostalih 4,0%. Ukupna dužina transportnih gasovoda u Srbiji je data u Tabeli 5.2.2.1. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Tabela 5.2.2.1 – Dužina transportnih gasovoda u Republici Srbiji u periodu 2014-2023. godine

| Godina | 2014. | 2015. | 2016. | 2017. | 2018. | 2019. | 2020. | 2021. | 2022. | 2023. |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dužina mreže, km | 2498 | 2498 | 2498 | 2534 | 2539 | 2539 | 2539 | 3005 | 3028 | 3131 |

Novi gasovod Dimitrovgrad-Niš, dužine 109 km i prečnika DN 700, je u decembru 2023. godine povezan na transportni sistem bugarskog operatora transportnog sistema u mestu Kalotine sa jedne strane i na transportni sistem Yugorosgaz-transport d.o.o. u mestu Trupale u blizini Niša sa druge strane. Gasovod Dimitrovgrad-Niš je dvosmeran i njegovom izgradnjom se povećala sigurnost snabdevanja prirodnim gasom i omogućila diverzifikacija izvora snabdevanja prirodnim gasom. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

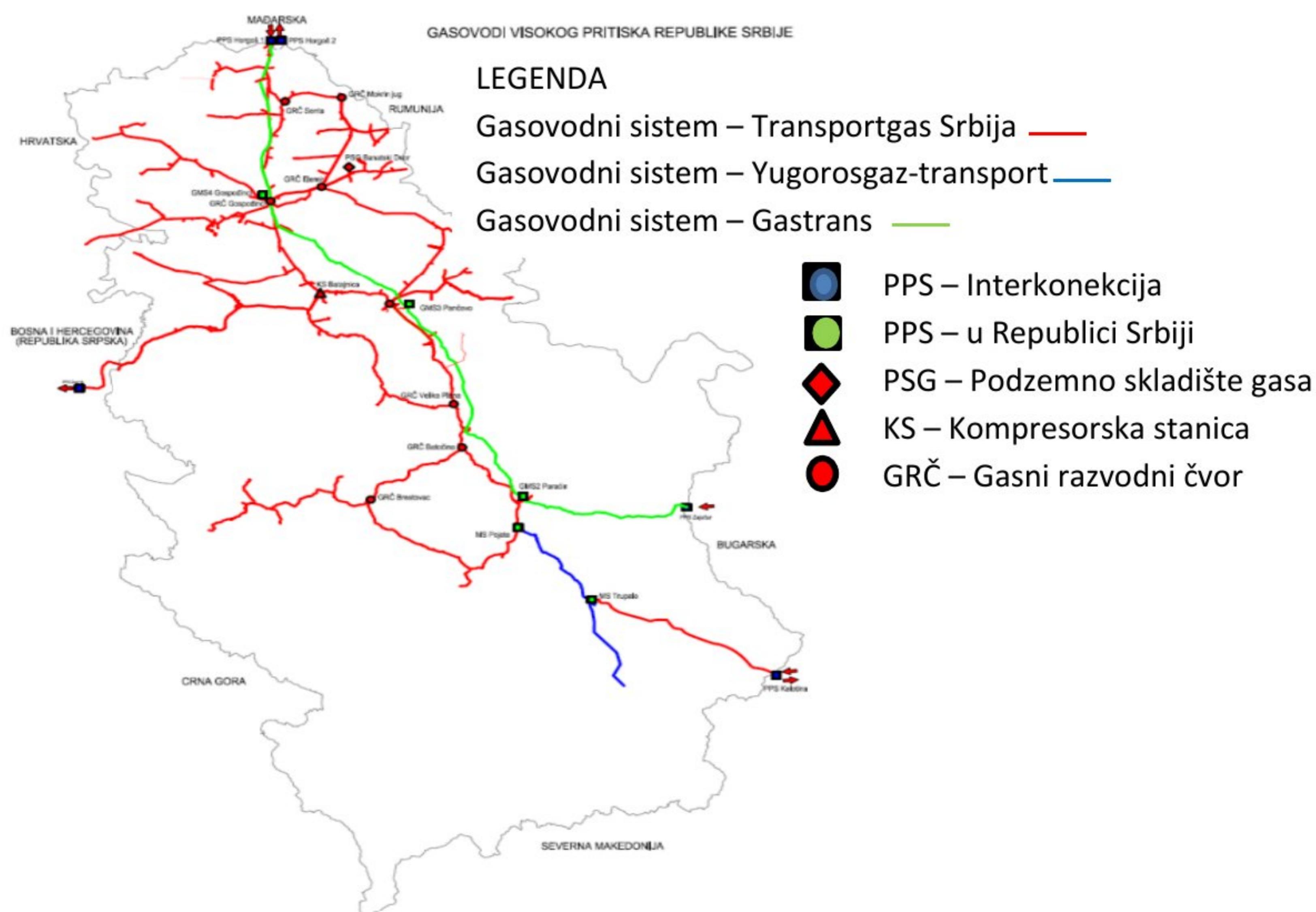
Preko 70% stanovnika Srbije živi u oblastima koje imaju izgrađene transportne gasovode koji su preduslov za dalji razvoj gasnog sistema, odnosno izgradnju distributivnih gasovoda i rast potrošnje prirodnog gasa. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

U Tabeli 5.2.2.2. prikazane su najvažnije tehničke karakteristike transportnih sistema kojima upravljaju Transportgas Srbija d.o.o, Gastrans d.o.o. i Yugorosgaz-transport d.o.o. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Tabela 5.2.2.2 – Značajne tehničke karakteristike transportnih sistema

| Glavne tehničke karakteristike transportnog sistema | Gastrans d.o.o. | Transportgas Srbija d.o.o. | Yugorosgaz-transport d.o.o. |
|---|-----------------|----------------------------|-----------------------------|
| Kapacitet (GWh/dan) | ≈355 | ≈245 | ≈23 |
| Pritisak (bar) | 66-75 | 16-75 | 16-55 |
| Dužina (km) | 402 | 2604 | 125 |

| Prečnici | DN 1200 | DN 150 – DN 750 | DN 168 – DN 530 |
|---|---------|-----------------|-----------------|
| Snaga kompresorske stanice (MW) | 19,287 | 4,4 | - |
| Broj ulaza u transportni sistem | 1 | 15 | 2 |
| Iz drugog transportnog sistema | 1 | 5 | 2 |
| Sa proizvodnih polja – domaći gas | 0 | 9 | - |
| Iz skladišta | 0 | 1 | - |
| Broj izlaza sa transportnog sistema | 4 | 251 | 7 |
| Merno regulacione stanice na izlazu sa transportnog sistema | 0 | 246 | 6 |
| Primopredajne stanice | 4 | 2 | 1 |
| Izlaz u transportni sistem Jugorosgaz | 0 | 1 | - |
| Interkonektor prema BiH | 0 | 3 | - |
| Izlaz u transportni sistem Transportgas Srbija | 3 | 0 | 1 |
| Interkonektor prema Mađarskoj | 1 | 0 | 0 |
| Skladište prirodnog gasa | 0 | 1 | 0 |



Slika 5.2.2.1 – Transportni sistem prirodnog gasa Republike Srbije

5.2.3. Distribucija

U Srbiji je, početkom 2023. godine, delatnost distribucije i upravljanja distributivnim sistemom prirodnog gasa obavljao 31 operator distributivnog sistema (ODS), kao i prethodne godine. Takođe, postoji još jedan licencirani operator distributivnog sistema koji još uvek nije započeo obavljanje delatnosti. Pored JP Srbijagas i Yugorosgaz a.d, delatnost distribucije prirodnog gasa i upravljanja distributivnim sistemom za prirodni gas obavlja još 29 preduzeća, od kojih je najveći broj u vlasništvu opština i gradova, deo je u mešovitom, a deo u privatnom vlasništvu. Svi ODS, izuzev ODS JP Srbijagas, pored distribucije prirodnog gasa u okviru istog pravnog lica mogu da obavljaju i snabdevanje po regulisanim cenama i snabdevanje na slobodnom tržištu prirodnim gasom, jer imaju manje od 100 000 priključenih krajnjih kupaca, tako da nisu u obavezi da pravno razdvoje obavljanje

delatnosti distribucije od delatnosti snabdevanja. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Na kraju 2023. godine, bilo je ukupno 62 energetska subjekta koja su imala licencu za snabdevanje prirodnim gasom od kojih je 24 bilo aktivno. Javnim snabdevanjem krajnjih kupaca prirodnim gasom, po regulisanim cenama, bavi se 31 javni snabdevač, koji se istovremeno bave i distribucijom prirodnog gasa. Tokom 2023. godine je 5 snabdevača dobilo licencu za snabdevanje na veliko prirodnim gasom, ali ovi snabdevači tokom 2023. godine nisu bili aktivni. Vlada Republike Srbije je, u skladu sa Zakonom, odredila da JP Srbijagas bude snabdevač javnih snabdevača i rezervni snabdevač prirodnim gasom za 2023. godinu. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Dužina distributivne mreže u Srbiji je povećana za 22,57% u periodu od 2019. do kraja 2023. godine i sada iznosi 23639 km (bez priključaka), čime su stvoreni uslovi za priključenje novih kupaca. U odnosu na 2022. godinu, mreža je uvećana za 1467 km, što je povećanje od 6,62%. Najveće procentualno povećanje dužine mreže u 2023. godini je ostvario ODS Srem Gas u iznosu od 11,65%, zatim Srbijagas u iznosu od 8,97%, koji obavlja delatnost na 62,59% ukupne distributivne mreže u Srbiji. Treće najveće povećanje dužine distributivne mreže je ostvareno kod ODS Yugorosgaz i iznosilo je 4,08%. Kod 17 ODS dužina distributivne mreže nije promenjena u odnosu na 2022. godinu. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

U Tabeli 5.2.3.1. dat je prikaz dužine distributivne mreže u Srbiji u periodu od 2019. do 2023. godine. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Tabela 5.2.3.1 – Dužina distributivne mreže u Srbiji u periodu 2019-2023. godine

| Godina | 2019. | 2020. | 2021. | 2022. | 2023. |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Dužina distributivne mreže (km) | 19286 | 19883 | 20932 | 22172 | 23639 |

Broj aktivnih priključaka (mesta isporuke) na distributivnim mrežama je 324925 i u odnosu na 2022. godinu je uvećan za 18110 priključaka (odnosno za 5,90%).

U Tabeli 5.2.3.2. je dat prikaz dužine distributivne mreže za različite distributere prirodnog gasa, kao i broj aktivnih priključaka na kraju 2023. godine. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Tabela 5.2.3.2 – Dužina distributivnih mreža i broj mesta isporuke na kraju 2023. godine

| Redni broj | Naziv distributera prirodnog gasa | Dužina distributivne mreže (m) | Broj aktivnih priključaka |
|-------------------|--|---------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 7. Oktobar, Novi Kneževac | 55200 | 1644 |
| 2 | Beogas, Beograd | 525428 | 14097 |
| 3 | Beogradske elektrane, Novi Beograd | 336790 | 5268 |
| 4 | Boss construction, Trstenik | 9733 | 87 |
| 5 | Čoka, Čoka | 27195 | 838 |
| 6 | Drugi oktobar, Vršac | 200843 | 13454 |
| 7 | Elgas, Senta | 67190 | 2207 |
| 8 | Gas-Feromont, Stara Pazova | 507810 | 18024 |
| 9 | Gas-Ruma, Ruma | 580091 | 9589 |
| 10 | Gas, Bečej | 198197 | 2487 |
| 11 | Gas, Temerin | 266500 | 7508 |
| 12 | Graditelj, Srbobran | 150200 | 2664 |
| 13 | Ingas, Indija | 374174 | 11733 |
| 14 | Interklima, Vrnjačka banja | 109075 | 1446 |
| 15 | Komunalac, Novi | 121158 | 2665 |

| | | | |
|-----------|--------------------------------|-----------------|---------------|
| | Bečej | | |
| 16 | Kovin-Gas, Kovin | 333694 | 4706 |
| 17 | Loznica-Gas, Loznica | 191900 | 3442 |
| 18 | Novi Sad-Gas, Novi Sad | 2456891 | 52310 |
| 19 | Polet, Plandište | 239300 | 3580 |
| 20 | Resava Gas, Svilajnac | 67316 | 629 |
| 21 | Cyrus energy, Beograd | 22078 | 2147 |
| 22 | Sigas, Požega | 67848 | 570 |
| 23 | Sombor-Gas, Sombor | 182000 | 3194 |
| 24 | Srbijagas, Novi Sad | 14794378 | 144173 |
| 25 | Srem-Gas, Sremska Mitrovica | 332021 | 7110 |
| 26 | Standard, Ada | 43280 | 1288 |
| 27 | Suboticagas, Subotica | 454294 | 14017 |
| 28 | Toplana-Šabac, Šabac | 170381 | 3676 |
| 29 | Užice-gas, Užice | 204519 | 3349 |
| 30 | Vrbas-Gas, Vrbas | 189158 | 2334 |
| 31 | Yugorosgaz, Beograd | 360111 | 2604 |
| | Ukupno | 23638753 | 342840 |

5.2.4. Skladištenje

Operator skladišta obavlja delatnost skladištenja i upravljanja skladištem prirodnog gasa. Postoji samo jedno podzemno skladište prirodnog gasa Banatski

Dvor d.o.o, čiji su osnivači i vlasnici JP Srbijagas (49%) i Gazprom Germania (51%), na osnovu Sporazuma između Vlade Republike Srbije i Vlade Ruske Federacije o saradnji u oblasti naftne i gasne privrede, zaključenog januara 2008. godine. Ovo skladište je veoma značajno za obezbeđivanje sigurnosti snabdevanja prirodnim gasom u Srbiji. Ukupna površina skladišta je oko 54 km², radna zapremina skladišta je 4617 GWh prirodnog gasa, a maksimalni dnevni kapacitet istiskivanja iz skladišta je 51,3 $\frac{\text{GWh}}{\text{dan}}$. Nalazi se u prostoru iscrpljenog gasnog ležišta ukupne zapremine 3,3 milijarde m³ prirodnog gasa. Skladište Banatski Dvor je počelo sa radom tokom novembra 2011. godine.

Neometano i potpuno povezivanje skladišta gasa sa transportnim sistemom Transportgas Srbija je omogućeno dvosmernim gasovodom Gospođinci-Banatski Dvor. Dužina ovog gasovoda iznosi 42,5 km, nazivnog je prečnika DN 500, maksimalnog radnog pritiska od 75 bara-a ($p_{\text{max}}=75$ bar), a maksimalni protoci gasa su sledeći:

- pri povlačenju iz PSG Banatski Dvor $Q=102,6 \frac{\text{GWh}}{\text{dan}}$ i
- pri utiskivanju u PSG Banatski Dvor $Q=51,3 \frac{\text{GWh}}{\text{dan}}$.

Tokom 2023. godine, manje prirodnog gasa je povučeno iz skladišta nego što je predato. Na početku 2023. godine je bilo 5971 GWh komercijalnog gasa. Iz transportnog sistema u skladište je predato 2476 GWh, od toga je 38 GWh potrošeno za sopstvenu potrošnju skladišta, a preostalih 2438 GWh gasa je utisnuto za komercijalne potrebe. Korisnici su iz skladišta povukli i predali u transportni sistem 980 GWh prirodnog gasa. Na kraju 2023. godine, u skladištu je bilo 7428 GWh komercijalnog gasa.

Nakon druge faze razvoja, radna zapremina skladišta će se povećati na 8208 GWh prirodnog gasa. Podzemno skladište je sa dva gasovoda povezano sa gasnim razvodnim čvorom u Elemiru.

Tokom 2023. godine, maksimalni tehnički kapacitet utiskivanja je bio $27,702 \frac{\text{GWh}}{\text{dan}}$, a maksimalni tehnički kapacitet istiskivanja iz skladišta je bio $51,300 \frac{\text{GWh}}{\text{dan}}$. Maksimalne dnevne utisnute količine su u 2023. godini bile $25,423 \frac{\text{GWh}}{\text{dan}}$, a maksimalne dnevne povučene količine su iznosile $45,401 \frac{\text{GWh}}{\text{dan}}$. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

5.3. Izvori snabdevanja prirodnim gasom i ostvarena potrošnja

Prema Zakonu o energetici („Službeni glasnik RS”, br. 145/14 i 95/18 - dr. zakon, 40/21, 35/23 i 62/23), usvojenog krajem 2014. godine, svi krajnji kupci prirodnog gasa imaju pravo da slobodno biraju svog snabdevača na tržištu. Domaćinstva i mali kupci prirodnog gasa to pravo su mogli da ostvare od 1. januara 2015. godine, ali su, takođe, i dalje imali pravo na javno snabdevanje. Kupci koji nemaju pravo na javno snabdevanje kupuju prirodni gas od licenciranih snabdevača na slobodnom tržištu. Krajnji kupac koji nema pravo na javno snabdevanje iz razloga propisanih članom 302. Zakona o energetici⁶, ima pravo na rezervno snabdevanje, u periodu od 60 dana, u kome je dužan da pronađe novog snabdevača (u suprotnom je operator sistema dužan da mu obustavi isporuku prirodnog gasa). Cena rezervnog snabdevanja je po pravilu viša od tržišnih cena jer, saglasno članu 303. Zakona o energetici, ne može biti niža od prosečne cene po kojoj operator transportnog sistema prodaje prirodni gas za balansiranje sistema. (Tržište prirodnog gasa u Srbiji, AERS)

U 2023. godini, za potrošnju je bilo raspoloživo ukupno 29812 GWh, računajući uvoz, domaću proizvodnju i podzemno skladište. Potrošeno je 27437 GWh prirodnog gasa, što je za 3% manje nego u 2022. godini. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

⁶ Pravo na rezervno snabdevanje ima krajnji kupac prirodnog gasa koji nema pravo na javno snabdevanje, u skladu sa odredbama ovog zakona, u slučaju: stečaja ili likvidacije snabdevača koji ga je do tada snabdevao; prestanka ili oduzimanja licence snabdevaču koji ga je do tada snabdevao; da nije našao novog snabdevača nakon prestanka ugovora o snabdevanju sa prethodnim, osim ako je prestanak ugovora posledica neizvršavanja obaveza plaćanja kupca. [25]

Najveći deo prirodnog gasa je obezbeđen uvozom iz Ruske Federacije po dugoročnom ugovoru. Prirodni gas od Gazprom-a, za kupce u Srbiji, nabavlja preduzeće Yugorosgaz a.d. (akcionari su Gazprom 50%, JP Srbijagas 25% i Central ME Energy and Gas, Beč 25%). Uvoz prirodnog gasa iz Ruske Federacije je u 2023. godini iznosio 26102 GWh i realizovao se preko transportnog sistema Gastrans d.o.o. iz pravca Bugarske. Osim uvoza prirodnog gasa iz Ruske Federacije, JP Srbijagas je tokom 2023. godine kupovao prirodni gas od još tri snabdevača, i te količine su uskladištene u skladištu prirodnog gasa u Mađarskoj, a za potrebe snabdevanja u Srbiji su preuzete iz transportnog sistema Mađarske. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Što se domaće proizvodnje tiče, u 2023. godini iznosila je 2043 GWh čime je moglo da se zadovolji svega 7,4% potreba, što je za 0,1% više u odnosu na prethodnu godinu. U 2023. godini nije bilo izvoza gasa. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

U Tabeli 5.3.1. prikazani su izvori snabdevanja i ostvarena potrošnja prirodnog gasa u 2022. i 2023. godini. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Tabela 5.3.1 – Izvori snabdevanja i ostvarena potrošnja prirodnog gasa u 2022. i 2023. godini

| | 2022. GWh | 2023. GWh | 2023/2022. Indeks |
|--|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Domaća proizvodnja | 2070 | 2043 | 98,7 |
| Uvoz iz Ruske Federacije po dugoročnom ugovoru | 23786 | 26102 | 109,7 |
| Uvoz iz drugih izvora/po drugim ugovorima | 8041 | 1584 | 19,7 |
| Uvoz ukupno | 31827 | 27686 | 86,9 |

| | | | |
|--|--------------|--------------|-------------|
| Preuzeto iz podzemnog skladišta | 2262 | 83 | 3,7 |
| UKUPNO RASPOLOŽIVO | 36159 | 29812 | 82,4 |
| Utisnuto u skladište | 7559 | 1922 | 25,42 |
| Bruto potrošnja | 28600 | 27890 | 97,5 |
| Razlika količina kupljenih i prodatih od operatora transportnih sistema za gubitke, balansiranje i sopstvene potrošnje | 143 | 197 | 137,7 |
| Gubici u distributivnoj mreži i potrošnje u okviru pravnog lica | 249 | 256 | 102,8 |
| Izvoz | 0 | 0 | 0 |
| Za finalnu potrošnju | 28208 | 27437 | 97,3 |

Broj mesta isporuke je na kraju 2023. godine iznosio 342904, što je za 17913 više u odnosu na prethodnu godinu. Od ukupnog broja mesta isporuke, 64 je na transportnom, a 342840 na distributivnom sistemu, a od toga je 326503, odnosno 95%, su domaćinstva. U Tabeli 5.3.2. je prikazan broj mesta isporuke po različitim kategorijama potrošnje na kraju 2022. i 2023. godine. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Tabela 5.3.2 – Broj mesta isporuke na kraju 2022. i 2023. godine

| Kategorije potrošnje | 2022. | 2023. | Razlika 2023-2022 |
|-----------------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| Domaćinstva | 309176 | 326503 | 17327 |
| Toplane | 162 | 173 | 11 |
| Industrije i ostali | 15653 | 16228 | 575 |
| Ukupno | 324991 | 342904 | 17913 |

U 2023. godini je potrošeno 27437 GWh prirodnog gasa, za 3% manje nego u 2022. godini. Potrošnja u domaćinstvima je smanjena za 1%, u toplanama za 3% zbog blaže zime, i u industriji za 3% u odnosu na prethodnu godinu. Potrošnja u domaćinstvima je učestvovala sa 14% u ukupnoj potrošnji prirodnog gasa u 2023. godini, potrošnja toplana sa 20%, a preostalih 66% predstavlja potrošnju industrije i ostalih kupaca (količine kupljene na tržištu i količine koje je NIS potrošio iz sopstvene proizvodnje). Struktura potrošnje po kategorijama je prikazana u Tabeli 5.3.3. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

Tabela 5.3.3 – Struktura potrošnje u 2022. i 2023. godini

| Kategorije potrošnje | 2022. GWh | 2023. GWh | 2023/2022. Indeks |
|-----------------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| Domaćinstva | 3876 | 3825 | 98,7 |
| Toplane | 5530 | 5369 | 97,1 |
| Industrija i ostali | 18797 | 18244 | 97,1 |
| Ukupno | 28203 | 27437 | 97,3 |

Prosečna godišnja potrošnja prirodnog gasa po priključenom domaćinstvu bila je 11714 kWh u 2023. godini, računajući i aktivna mesta isporuke domaćinstvima na kojima nije bilo potrošnje gasa tokom 2023. godine, što je za 6,5% manje nego u 2022. godini. Ako se posmatraju samo domaćinstva koja su tokom 2023. godine imala potrošnju prirodnog gasa (bilo ih je 307540), prosečna godišnja potrošnja po domaćinstvu je bila 12436 kWh. (Izveštaj o radu Agencije za energetiku, 2024)

5.4. Zahtevani kvalitet prirodnog gasa u Republici Srbiji

Pojmovi Ulaz i Izlaz, koji će se upotrebljavati u okviru ovog poglavlja, imaju sledeće značenje:

- **Ulaz** je mesto na transportnom sistemu na kojem operator transportnog sistema preuzima prirodni gas u transportni sistem: iz drugog transportnog sistema, iz skladišta prirodnog gasa ili od proizvođača prirodnog gasa.
- **Izlaz** je mesto na transportnom sistemu na kojem operator transportnog sistema isporučuje prirodni gas iz transportnog sistema u: distributivni sistem, drugi transportni sistem, skladište prirodnog gasa, objekat krajnjeg kupca priključenog na transportni sistem ili objekat proizvođača prirodnog gasa. (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

Prirodni gas koji se preuzima na **Ulazu** u Sistem mora da ispuni uslove u pogledu sastava, toplotne vrednosti, pritiska, Vobeovog indeksa i drugih svojstava prirodnog gasa utvrđenih propisima i pravilima.

Pritisak prirodnog gasa koji se preuzima na Ulazu za gasovode projektovanog pritiska:

- do 50 bar, ne može biti manji od 40 bar, niti veći od 45 bar;
- do 75 bar, ne može biti manji od 60 bar, niti veći od 68 bar.

Prirodni gas koji se preuzima na Ulazu mora da bude takav da donji Vobeov indeks bude u granicama $42 - 46 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$.

Svojstva prirodnog gasa na Ulazu moraju biti u skladu sa vrednostima prikazanim u Tabeli 5.4.1. (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

Tabela 5.4.1 – Zahtevana svojstva prirodnog gasa u Republici Srbiji

| | | |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Hemijski sastav | Metan C1 | Min. 90 molskih procenata |
| | Etan C2 | Maks. 4 molska procenta |
| | Propan C3, butan C4... | Maks. 2 molska procenta |
| | Azot + ugljen-dioksid | Maks. 5 molskih procenata |
| Sadržaj sumpora | Vodonik-sulfid H ₂ S | Maks. 5 mg/m ³ |
| | Sumpor iz merkaptana RSH | Maks. 5,6 mg/m ³ |
| | Sumpor ukupno | Maks. 20 mg/m ³ |
| Tačka rose vode⁷ | | -5°C (na 40 bar) |
| Donja toplotna vrednost | | 33500 ± 1000 kJ/m ³ |

Prirodni gas koji se preuzima na Ulazu ne sme da sadrži čvrste nečistoće, smolu ili supstance koje proizvode smolu i tečnosti kao što su ugljovodonici, kondenzati, glikoli, voda i slično. Dozvoljen sadržaj vode u prirodnom gasu iznosi 0,1- 0,13 kg/1000 Nm³ gasa.

Prirodni gas koji se isporučuje na **Izlazu** iz Sistema mora da ispuni uslove u pogledu sastava, donje toplotne vrednosti, pritiska, Vobeovog indeksa i drugih svojstava prirodnog gasa utvrđenih propisima i pravilima

Pritisak prirodnog gasa koji se isporučuje na Izlazu mora biti veći ili jednak 16 bar, za isporuku prema krajnjim kupcima ili distribuciji. Za Izlaz prema drugom OTS-u ili Operatoru skladišta prirodnog gasa, pritisak gasa na Izlazu je utvrđen Sporazumom o radnom režimu⁸.

Prirodni gas koji se isporučuje na Izlazu mora da bude takav da donji Vobeov indeks bude u granicama 42-46 $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$.

Svojstva prirodnog gasa na Izlazu iz Sistema moraju biti u skladu sa vrednostima koje su identične vrednostima zahtevanim na Ulazu (Tabela 5.4.1.). Prirodni gas

⁷ Tačka rosišta (tačka rose) je parametr za iskazivanje sadržaja vode u gasu. Predstavlja temperaturu na kojoj će se vodena para, na datom pritisku, početi izdvajati iz gasa u vidu rose, odnosno, tečne faze.

⁸ OTS i povezani operator, odnosno proizvođač prirodnog gasa, zaključuju sporazum o radnom režimu kojim međusobno usaglašavaju režime upravljanja i rada sistema i uređuju druga pitanja od značaja za pouzdano preuzimanje i transport prirodnog gasa.

koji se isporučuje na Izlazu, takođe, ne sme sadržati čvrste nečistoće, smolu ili supstance koje proizvode smolu i tečnosti kao što su ugljovodonici, kondenzati, glikoli, voda i slično. (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

Za određivanje kvaliteta prirodnog gasa koriste se gasni hromatografi. Gasni hromatografi mogu biti procesni gasni hromatografi (PGH) i laboratorijski hromatografi. Gasnim hromatografom određuju se sledeće veličine: sastav prirodnog gasa, relativna gustina, donja toplotna vrednost, faktor komresibilnosti i donji Vobeov indeks. Navedene veličine se izračunavaju po ISO 6976. PGH se ugrađuju na Ulazima, Izlazima i čvorištima gde se može očekivati odstupanje kvaliteta od propisanog, a obavezno na Ulazima na kojima je protekla zapremina prirodnog gasa veća od 0,5 mil.m³/dan. Rezultati dobijeni sa PGH u čvorištima se primenjuju na sve Izlaze iza gasnog čvorišta, ukoliko između čvora i predmetnih Izlaza nema Ulaza. OTS vrši ručno uzorkovanje prirodnog gasa na Ulazima/Izlazima na kojima se ne primenjuju rezultati PGH. Redovno uzorkovanje se vrši najmanje 2 puta u toku gasnog meseca. Kvalitet prirodnog gasa za ručno uzete uzorke se utvrđuje na laboratorijskim hromatografima. OTS dostavlja Korisniku izveštaj o kvalitetu prirodnog gasa izdat od strane akreditovane laboratorije. (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

OTS ima pravo da prekine dalje preuzimanje prirodnog gasa u Sistem, ako je protekla zapremina izražena u Sm³/h veća od 1/24 raspoloživog kapaciteta na tom Ulazu u tom gasnom danu. Korisnik je dužan da na Ulazu preda prirodni gas u skladu sa kvalitetom i pritiskom koji su navedeni u okviru ovog poglavlja. (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

5.5. Uslovi za pouzdan i siguran rad sistema

Prirodni gas koji je preuzet na **Ulazu** se smatra homogenom zapreminom, odnosno smatra se da je prirodni gas koji je određenog dana OTS preuzeo na Ulazu istog kvaliteta za sve Korisnike na tom Ulazu. OTS ima pravo da prekine dalje preuzimanje prirodnog gasa u Sistem, ako je protekla zapremina izražena u Sm³/h veća od 1/24 raspoloživog kapaciteta na tom Ulazu u tom gasnom danu. Korisnik je

dužan da na Ulazu preda prirodni gas u skladu sa kvalitetom i pritiskom utvrđenim u poglavlju 5.4. OTS će ograničiti, odnosno, prekinuti dalje preuzimanje neodgovarajućeg prirodnog gasa na Ulazu, ukoliko opravdano smatra da na bilo kom Izlazu neće moći da obezbedi isporuku prirodnog gasa u skladu sa kvalitetom utvrđenim u poglavlju 5.4. (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

Ukoliko je na Ulazu isporučen prirodni gas neodgovarajućeg kvaliteta bez odobrenja OTS-a, OTS ima pravo da Korisniku:

- obračuna i naplati penal za neodgovarajući kvalitet prirodnog gasa ako je donji Vobeov indeks prirodnog gasa izvan opsega utvrđenog u poglavlju 5.4.
- zahteva naknadu štete prouzrokovanu isporukom neodgovarajućeg prirodnog gasa u skladu sa zakonom.

Iznos penala se obračunava za svaki gasni dan u sledećim slučajevima:

1. kada je odstupanje od dozvoljenih granica donjeg Vobeovog indeksa manje ili jednako 5%, prema formuli:

$PU_1 = 0,1 * NCG * KU_1$, gde su:

PU_1 – iznos penala prvog nivoa na Ulazu (u dinarima);

NCG – neutralna cena prirodnog gasa utvrđena za gasni mesec u kome je prirodni gas neodgovarajućeg kvaliteta predat u Sistem (u dinarima/ Sm^3) i

KU_1 – količina prirodnog gasa neodgovarajućeg kvaliteta sa odstupanjem manjim ili jednakim 5% na Ulazu (u Sm^3).

2. kada je odstupanje od dozvoljenih granica donjeg Vobeovog indeksa veće od 5%, a manje ili jednako od 10%, prema formuli:

$PU_2 = 0,2 * NCG * KU_2$

3. kada je odstupanje od dozvoljenih granica donjeg Vobeovog indeksa veće od 10%, prema formuli:

$PU_3 = 0,5 * NCG * KU_3$ (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

Prirodni gas koji je isporučen na **Izlazu** se smatra homogenom zapreminom, odnosno smatra se da je prirodni gas koji je određenog dana OTS isporučio na Izlazu istog kvaliteta za sve Korisnike na tom Izlazu. OTS ima pravo da obustavi dalju isporuku prirodnog gasa iz Sistema, ako je protekla zapremina izražena u Sm^3/h veća od 1/16 raspoloživog kapaciteta na tom Izlazu u tom gasnom danu. OTS je dužan da na Izlazu isporuči prirodni gas u skladu sa kvalitetom i pritiskom utvrđenim u poglavlju 5.4. Korisnik može da na Izlazu odobri isporuku prirodnog gasa koji nije u skladu sa kvalitetom utvrđenim u poglavlju 5.4. Korisnik ima pravo da obračuna penal OTS-u i u situaciji kada je odobrio preuzimanje prirodnog gasa neodgovarajućeg kvaliteta. (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)

Ukoliko je na Izlazu isporučen prirodni gas neodgovarajućeg kvaliteta bez odobrenja Korisnika, Korisnik ima pravo da OTS-u:

- obračuna i naplati penal OTS-u za neodgovarajući kvalitet prirodnog gasa ako je donji Vobeov indeks prirodnog gasa izvan opsega utvrđenog u poglavlju 5.4.
- zahteva naknadu štete prouzrokovanu isporukom neodgovarajućeg prirodnog gasa u skladu sa zakonom.

Iznos penala se obračunava dnevno u sledećim slučajevima:

1. kada je odstupanje od dozvoljenih granica donjeg Vobeovog indeksa manje ili jednako od 5%, prema formuli:

$PI_1 = 0,1 * NCG * KI_1$, gde su:

PI_1 – iznos penala prvog nivoa na Izlazu (u dinarima);

NCG – neutralna cena prirodnog gasa utvrđena za gasni mesec u kome je prirodno gas neodgovarajućeg kvaliteta isporučen iz Sistema (u dinarima/ Sm^3) i

KI_1 – količina prirodnog gasa neodgovarajućeg kvaliteta sa odstupanjem manjim ili jednakim 5% na Izlazu (u Sm^3)

2. kada je odstupanje od dozvoljenih granica donjeg Vobeovog indeksa veće od 5%, a manje ili jednako od 10%, prema formuli:

$$PI_2 = 0,2 * NCG * KI_2$$

3. kada je odstupanje od dozvoljenih granica donjeg Vobeovog indeksa veće od 10%, prema formuli:

$$PI_3 = 0,5 * NCG * KI_3 \text{ (Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013)}$$

6. STUDIJA SLUČAJA : Mogućnost korišćenja prirodnog gasa različitog porekla u Republici Srbiji

Zadatak: Proveriti da li prirodan gas iz Azerbejdžana ili američki LNG ispunjavaju zahteve prema Pravilima o radu transportnog sistema. Ukoliko ne ispunjavaju, definisati proces namešavanja sa ruskim prirodnim gasom, tako da se dobiju propisane vrednosti Vobeovog broja. Pretpostaviti da se prirodni gas uvozi na pravcu Dimitrovgrad-Niš. Proračun uraditi za ulazni protok od $214000 \frac{Sm^3}{dan}$ i za 5,5 miliona $\frac{Sm^3}{dan}$.

Proračun toplotnih moći i Vobeovih indeksa za ruski, azerbejdžanski gas i američki LNG je izvršen na osnovu poznatog hemijskog sastava gasova iz Tabele 4.2.1.

Na osnovu toplotnih moći komponenata koje čine prirodni gas, kao i na osnovu njihovih gustina, izvršen je proračun korišćenjem podataka iz Tabele 4.2.1, na osnovu sledećih formula:

Tabela 6.1 – Toplotne moći i gustina komponenata u prirodnom gasu

| | $H_{di} [\frac{MJ}{m^3}]$ | $H_{gi} [\frac{MJ}{m^3}]$ | $\rho_i [\frac{kg}{m^3}]$ |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| CH ₄ | 35,8 | 39,8 | 0,716 |
| C ₂ H ₆ | 63,8 | 69,6 | 1,342 |
| C ₃ H ₈ | 91,2 | 99,1 | 1,969 |
| C ₄ H ₁₀ | 117,7 | 127,5 | 2,595 |
| C ₅ H ₁₂ | 144,7 | 156,4 | 3,221 |
| C ₆ H ₁₄ | 172,1 | 185,8 | 3,847 |
| C ₇ H ₁₆ | 199,5 | 215,2 | 4,473 |

| | | | |
|-----------------|---|---|-------|
| CO ₂ | / | / | 1,964 |
| N ₂ | / | / | 1,251 |

- Primer proračuna toplotne moći i Vobeovog indeksa za prirodni gas iz Azerbejdžana:

Hemijski sastav:

$$93,7 \% \text{ CH}_4 = 0,937 (y_1)$$

$$3,2 \% \text{ C}_2\text{H}_6 = 0,032 (y_2)$$

$$1,3 \% \text{ C}_3\text{H}_8 = 0,013 (y_3)$$

$$0,7 \% \text{ C}_4\text{H}_{10} = 0,007 (y_4)$$

$$0,2 \% \text{ C}_5\text{H}_{12} = 0,002 (y_5)$$

$$0,0 \% \text{ C}_6\text{H}_{14} = 0,000 (y_6)$$

$$0,0 \% \text{ C}_7\text{H}_{16} = 0,000 (y_7)$$

$$0,8 \% \text{ CO}_2 = 0,008 (y_8)$$

0,1 % N₂ = 0,001 (y₉), gde "y" predstavlja zapreminske udele komponenata u prirodnom gasu.

Donja i gornja toplotna moć će se računati preko jednačine (3.1.1.): $H_d = \sum y_i * H_{di}$,

$$H_g = \sum y_i * H_{gi}.$$

$$H_d = 0,937*35,8 + 0,032*63,8 + 0,013*91,2 + 0,007*117,7 + 0,002*144,7$$

$$H_d = 37,8851 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

$$H_g = 0,937*39,8 + 0,032*69,6 + 0,013*99,1 + 0,007*127,5 + 0,002*156,4$$

$$H_g = 42,0134 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

Gustina prirodnog gasa će se računati pomoću jednačine $\rho = \sum y_i * \rho_i$, odnosno:

$$\rho = 0,937*0,716 + 0,032*1,342 + 0,013*1,969 + 0,007*2,595 + 0,002*3,221 + 0,008*1,964 + 0,001*1,251$$

$$\rho = 0,781 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Pomoću gustine vazduha na 25°C, $\rho_{\text{vaz}} = 1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, izračunava se relativna gustina:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_{\text{vaz}}} = \frac{0,781}{1,19} = 0,656$$

Koristeći izračunate vrednosti toplotnih moći i relativne gustine, izračunavaju se donji i gornji Vobeov indeks:

$$W_d = \frac{H_d}{\sqrt{\rho_r}} = \frac{37,8851}{\sqrt{0,656}} = 46,764 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

$$W_g = \frac{H_g}{\sqrt{\rho_r}} = \frac{42,0134}{\sqrt{0,656}} = 51,860 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

Analogno prikazanom postupku, izračunavaju se vrednosti toplotnih moći i Vobeovih indeksa i za američki LNG, sledećeg hemijskog sastava: 96% CH₄; 2% C₂H₆; 0,6% C₃H₈; 0,3% C₄H₁₀; 0,2% C₅H₁₂; 0,1% C₆H₁₄; 0,8% C₇H₁₆.

Tabela 6.2 – Vrednosti donji toplotnih moći i Vobeovih indeksa za azerbejdžanski gas i američki LNG

| Zahtevane vrednosti | Toplotna moć | Vobeov indeks |
|---------------------|---|--|
| | $H_d = 33,5 \pm 1 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$ | $W_d = 42 - 46 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$ |
| Azerbejdžan | 37,885 | 46,764 |
| Američki LNG | 38,602 | 47,684 |

Kao što je prikazano u Tabeli 6.2, ni azerbejdžanski, ni američki LNG ne ispunjavaju zahteve u pogledu propisanog kvaliteta prirodnog gasa u Republici Srbiji.

Rešenje koje je moguće primeniti u vezi sa gasovima različitih Vobeovih brojeva, izvan zahtevanog opsega, jeste to da se obezbede zasebni gorionici i cevovodi kojima se gasovi dopremaju. Međutim, ovo je svakako skupo rešenje koje se ne primenjuje. Metoda koja je rasprostranjenija jeste namešavanje. Postoji više načina:

- 1) kako bi se Vobeov indeks umanjio, i sveo na željeni opseg, komponenta koja ima nizak Vobeov indeks (poželjno jednak nuli) se dodaje u gas i vrši namešavanje. Komponente koje se mogu dodati su azot i ugljen-dioksid;
- 2) kako bi se Vobeov indeks povećao, postoji mogućnost dodavanja komponente visokog Vobeovog indeksa (etan, propan, vrlo često mešavina propana i butana, takozvani tečni naftni gas ili LPG) ili da se iz gasa odstrani komponenta niskog Vobeovog indeksa i
- 3) namešavanje sa drugim prirodnim gasom i svođenje Vobeovog broja na zahtevani opseg. (Methods of Adjusting the Wobbe Index of a Fuel and Compositions Thereof, 2003)

Kako Studija slučaja zahteva namešavanje sa ruskim gasom, ova metoda će biti prikazana u nastavku rada.

Ruski prirodni gas, sa kojim je potrebno namešati drugi prirodni gas, ima donji Vobeov indeks $43,546 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$. Gustina mu je jednaka $0,744 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, a relativna gustina u odnosu na vazduh iznosi 0,625. Do ovih vrednosti se došlo identičnim postupkom koji je prikazan za proračun toplotne moći i Vobeovog indeksa za azerbejdžanski gas.

6.1. Namešavanje azerbejdžanskog i ruskog prirodnog gasa

Kako ruski gas ima donji Vobeov indeks $43,546 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, a azerbejdžanski $46,764 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, potrebno je definisati vrednost Vobeovog broja koja bi zadovoljila zahtevani opseg $42 - 46 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$. U ovom slučaju, moguće je odlučiti se za vrednost od $45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, koja će biti označena sa W_s (Vobeov indeks smeše).

Za početak, određuje se toplotna moć smeše preko zapreminskih udela komponenata i njihovih toplotnih moći:

$$H_s = x * H_a + (1 - x) * H_r$$

H_s – toplotna moć smeše $[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}]$;

x – zapreminski udeo azerbejdžanskog gasa u smeši;

H_a – toplotna moć azerbejdžanskog gasa izračunata u prethodnom potpoglavlju na osnovu poznatog hemijskog sastava. $H_a = 37,885 [\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}]$;

$(1 - x)$ – zapreminski udeo ruskog gasa u smeši i

H_r – toplotna moć ruskog gasa, $H_r = 34,432 [\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}]$

Ubacivanjem vrednosti toplotne moći azerbejdžanskog i ruskog gasa u prethodnu jednačinu, dobije se sledeći izraz:

$$H_s = x * 37,885 + (1 - x) * 34,432 [\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}]$$

Relativna gustina smeše se može, takođe, odrediti preko zapreminskih udela azerbejdžanskog gasa i udela ruskog gasa, i njihovih relativnih gustina. Jednačina koja izražava relativnu gustinu smeše ima sledeći oblik:

$$\rho_{rs} = x * \rho_{ra} + (1 - x) * \rho_{rr}$$

ρ_{rs} – relativna gustina smeše azerbejdžanskog i ruskog gasa;

x – zapreminski udeo azerbejdžanskog gasa u smeši;

ρ_{ra} – relativna gustina azerbejdžanskog gasa;

$(1 - x)$ – zapreminski udeo ruskog gasa u smeši i

ρ_{rr} – relativna gustina ruskog gasa.

Unošenjem poznatih vrednosti relativnih gustina azerbejdžanskog i ruskog gasa, dobija se izraz za relativnu gustinu smeše:

$$\rho_{rs} = x * 0,656 + (1 - x) * 0,625$$

Vobeov indeks smeše se može zapisati kao odnos toplotne moći smeše i kvadratnog korena relativne gustine smeše, odnosno:

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\rho_{rs}}} = \frac{x * 37,885 + (1 - x) * 34,432}{\sqrt{x * 0,656 + (1 - x) * 0,625}},$$

gde W_s predstavlja Vobeov indeks koji je potrebno postići, tj. $W_s = 45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, kako bi se postigla vrednost Vobeovog indeksa smeše koja je u zahtevanom opsegu ($42 - 46 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$).

Iz ove jednačine je potrebno izraziti veličinu x , odnosno zapreminski udeo azerbejdžanskog gasa u smeši, postupkom prikazanom u nastavku.

$$45,5 = \frac{x * 37,885 + (1 - x) * 34,432}{\sqrt{x * 0,656 + (1 - x) * 0,625}} = \frac{x * 37,885 + 34,432 - 34,432 * x}{\sqrt{x * 0,656 + 0,625 - 0,625 * x}},$$
 jednačinu je potrebno

kvadrirati pri čemu se dobija:

$$2070,25 = \frac{11,923 * x^2 + 2 * 3,453 * x * 34,432 + 1185,563}{0,031 * x + 0,625} = \frac{11,923 * x^2 + 237,787 * x + 1185,563}{0,031 * x + 0,625}$$

i leva i desna strana jednačine se množe članom $(0,031 * x + 0,625)$, pri čemu se dobija:

$$64,178 * x + 1293,906 = 11,923 * x^2 + 237,787 * x + 1185,563$$

$$11,923 * x^2 + 173,418 * x - 108,779 = 0$$

Sada je potrebno rešiti kvadratnu jednačinu po sledećem obrascu:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \text{ gde je}$$

$$a = 11,923$$

$$b = 173,418$$

$$c = - 108,779$$

Prilikom ubacivanja odgovarajućih vrednosti u jednačinu iznad, dobija se sledeći zapreminski udeo azerbejdžanskog gasa u smeši:

$$x = 0,6023 = 60,23\%$$

i zapreminski udeo ruskog gasa:

$$(1 - x) = 0,3977 = 39,77\%$$

U smeši čiji je Vobeov indeks jednak $45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, potrebno je namešati **60,23%** azerbejdžanskog gasa i **39,77%** ruskog gasa.

Toplotna moć namešanog gasa će iznositi:

$$H_s = x * 37,885 + (1 - x) * 34,432 = 0,6023 * 37,885 + 0,3977 * 34,432$$

$$H_s = 36,512 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

Relativna gustina namešanog gasa će biti jednaka:

$$\rho_{rs} = x * 0,656 + (1 - x) * 0,625 = 0,6023 * 0,656 + 0,3977 * 0,625$$

$$\rho_{rs} = 0,644$$

Vobeov indeks namešanog gasa će se izraziti kao odnos toplotne moći namešanog gasa i kvadratnog korena njegove relativne gustine:

$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\rho_{rs}}} = \frac{36,512}{\sqrt{0,644}} = 45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, čime je potvrđeno da je zadovoljen postavljeni uslov za Vobeov broj, kao i da je odnos gasova u smeši odgovarajući.

U zavisnosti od veličine ulaznog protoka azerbejdžanskog gasa, menjaće se i potreban dnevni protok ruskog gasa kako bi se obezbedio željeni Vobeov indeks.

Za ulazni protok azerbejdžanskog gasa od:

1) $Q_a = 214000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, količina ruskog gasa će se izračunati kao:

$$Q_r = \frac{Q_a * 39,77}{60,23} = \frac{214000 * 39,77}{60,23} = 141304,665 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$$

2) $Q_a = 5500000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, količina ruskog gasa će se izračunati kao:

$$Q_r = \frac{Q_a * 39,77}{60,23} = \frac{5500000 * 39,77}{60,23} = 3631661,96 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$$

Dakle, za ulazni protok azerbejdžanskog gasa od $214000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, potrebno je dodati $141304,665 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ ruskog gasa kako bi se dobile propisane vrednosti Vobeovog broja.

Prilikom transporta 5,5 miliona $\frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ azerbejdžanskog gasa, bilo bi neophodno dodati $3631661,96 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ ruskog gasa. Međutim, maksimalni kapacitet gasovoda na pravcu Dimitrovgrad-Niš je 5,5 miliona $\frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, samim tim namešavanje sa ruskim gasom ne bi bilo moguće, s obzirom da bi maksimalni kapacitet gasovoda na ovaj način bio premašen. (Plan razvoja transportnog gasovodnog sistema za period 2020-2029. godine, 2019)

6.2. Namešavanje američkog LNG-a i ruskog prirodnog gasa

Proces namešavanja ruskog prirodnog gasa i američkog LNG-a je identičan postupku namešavanja ruskog i azerbejdžanskog prirodnog gasa. Dobijene vrednosti su prikazane u nastavku.

Kako ruski gas ima donji Vobeov indeks $43,546 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, a američki LNG $47,684 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, potrebno je definisati vrednost Vobeovog broja koja bi zadovoljila zahtevani opseg $42 - 46 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$. U ovom slučaju, moguće je odlučiti se za vrednost od $45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, koja će biti označena sa W_s (Vobeov indeks smeše).

Za početak, određuje se toplotna moć smeše preko zapreminskih udela komponenata i njihovih toplotnih moći:

$$H_s = x * H_{\text{lng}} + (1 - x) * H_r$$

H_s – toplotna moć smeše $[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}]$;

x – zapreminski udeo LNG-a u smeši;

H_{lng} – toplotna moć LNG-a izračunata u prethodnom potpoglavlju na osnovu poznatog hemijskog sastava. $H_{\text{lng}} = 38,602 [\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}]$;

$(1 - x)$ – zapreminski udeo ruskog gasa u smeši i

H_r – toplotna moć ruskog gasa, $H_r = 34,432 [\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}]$

Ubacivanjem vrednosti toplotne moći američkog LNG-a i ruskog gasa u prethodnu jednačinu, dobija se sledeći izraz:

$$H_s = x * 38,602 + (1 - x) * 34,432 [\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}]$$

Relativna gustina smeše se može, takođe, odrediti preko zapreminskih udela američkog LNG-a i udela ruskog gasa, i njihovih relativnih gustina. Jednačina koja izražava relativnu gustinu smeše ima sledeći oblik:

$$\rho_{rs} = x * \rho_{\text{rlng}} + (1 - x) * \rho_{rr}$$

ρ_{rs} – relativna gustina smeše LNG-a i ruskog gasa;

x – zapreminski udeo LNG-a u smeši;

ρ_{rLNG} – relativna gustina LNG-a;

$(1 - x)$ – zapreminski udeo ruskog gasa u smeši i

ρ_{rr} – relativna gustina ruskog gasa.

Unošenjem poznatih vrednosti relativnih gustina LNG-a i ruskog gasa, dobija se izraz za relativnu gustinu smeše:

$$\rho_{rs} = x * 0,655 + (1 - x) * 0,625$$

Vobeov indeks smeše se može zapisati kao odnos toplotne moći smeše i kvadratnog korena relativne gustine smeše, odnosno:

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\rho_{rs}}} = \frac{x * 38,602 + (1 - x) * 34,432}{\sqrt{x * 0,655 + (1 - x) * 0,625}},$$

gde W_s predstavlja Vobeov indeks koji je potrebno postići, tj. $W_s = 45,5 \frac{MJ}{m^3}$, kako bi se postigla vrednost Vobeovog indeksa smeše koja je u zahtevanom opsegu ($42 - 46 \frac{MJ}{m^3}$).

Iz ove jednačine je potrebno izraziti veličinu x , odnosno zapreminski udeo LNG-a u smeši, postupkom prikazanom u nastavku.

$$45,5 = \frac{x * 38,602 + (1 - x) * 34,432}{\sqrt{x * 0,655 + (1 - x) * 0,625}} = \frac{x * 38,602 + 34,432 - 34,432 * x}{\sqrt{x * 0,655 + 0,625 - 0,625 * x}},$$

jednačinu je potrebno kvadrirati pri čemu se dobija:

$$2070,25 = \frac{17,389 * x^2 + 2 * 4,17 * x * 34,432 + 1185,563}{0,030 * x + 0,625} = \frac{17,389 * x^2 + 287,163 * x + 1185,563}{0,030 * x + 0,625}$$

i leva i desna strana jednačine se množe članom $(0,030 * x + 0,625)$, pri čemu se dobija:

$$62,107 * x + 1293,906 = 17,389 * x^2 + 287,163 * x + 1185,563$$

$$17,389 * x^2 + 224,763 * x - 108,779 = 0$$

Sada je potrebno rešiti kvadratnu jednačinu po sledećem obrascu:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \text{ gde je}$$

$$a = 17,389$$

$$b = 224,763$$

$$c = -108,779$$

Prilikom ubacivanja odgovarajućih vrednosti u jednačinu iznad, dobija se sledeći zapreminski udeo LNG-a u smeši:

$$x = 0,4671 = 46,71\%$$

i zapreminski udeo ruskog gasa:

$$(1 - x) = 0,5329 = 53,29\%$$

U smeši čiji je Vobeov indeks jednak $45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, potrebno je namešati **46,71%** američkog LNG-a i **53,29%** ruskog gasa.

Toplotna moć namešanog gasa će iznositi:

$$H_s = x * 38,602 + (1 - x) * 34,432 = 0,4671 * 38,602 + 0,5329 * 34,432$$

$$H_s = 36,379 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

Relativna gustina namešanog gasa će biti jednaka:

$$\rho_{rs} = x * 0,655 + (1 - x) * 0,625 = 0,4671 * 0,655 + 0,5329 * 0,625$$

$$\rho_{rs} = 0,639$$

Vobeov indeks namešanog gasa će se izraziti kao odnos toplotne moći namešanog gasa i kvadratnog korena njegove relativne gustine:

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\rho_{rs}}} = \frac{36,379}{\sqrt{0,639}} = 45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}, \text{ čime je potvrđeno da je zadovoljen postavljeni uslov}$$

za Vobeov broj, kao i da je odnos gasova u smeši odgovarajući.

U zavisnosti od veličine ulaznog protoka američkog LNG-a, menjaće se i potreban dnevni protok ruskog gasa kako bi se obezbedio željeni Vobeov indeks.

Za ulazni protok američkog LNG-a od:

1) $Q_{\text{lng}} = 214000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, količina ruskog gasa će se izračunati kao:

$$Q_r = \frac{Q_{\text{lng}} * 53,29}{46,71} = \frac{214000 * 53,29}{46,71} = 244146,007 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$$

2) $Q_{\text{lng}} = 5500000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, količina ruskog gasa će se izračunati kao:

$$Q_r = \frac{Q_{\text{lng}} * 53,29}{46,71} = \frac{5500000 * 53,29}{46,71} = 6274780,56 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$$

Dakle, za ulazni protok američkog LNG-a od $214000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, potrebno je dodati $244146,007 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ ruskog gasa kako bi se dobile propisane vrednosti Vobeovog broja.

Prilikom transporta 5,5 miliona $\frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ američkog LNG-a, bilo bi neophodno dodati $6274780,56 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ ruskog gasa. Međutim, kao što je već rečeno, maksimalni kapacitet gasovoda na pravcu Dimitrovgrad-Niš je 5,5 miliona $\frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, samim tim namešavanje sa ruskim gasom ne bi bilo moguće, s obzirom da bi maksimalni kapacitet gasovoda na ovaj način bio znatno premašen. (Plan razvoja transportnog gasovodnog sistema za period 2020-2029. godine, 2019)

6.3. Namešavanje prirodnog gasa i ugljen-dioksida

Ukoliko bi se umesto namešavanja sa ruskim prirodnim gasom primenila neka druga metoda namešavanja radi svođenja vrednosti Vobeovih brojeva na zahtevani opseg, sam postupak bi se razlikovao.

Kao što je već rečeno, ukoliko je Vobeov indeks određenog prirodnog gasa iznad vrednosti propisanih Pravilima o radu transportnog sistema, njegovo smanjenje je

moguće dodavanjem komponente niskog Vobeovog indeksa, ili, još poželjnije, dodavanjem komponente koja je inertna i kao takva ima Vobeov indeks jednak nuli, što je slučaj sa azotom ili ugljen-dioksidom.

Kako i azerbejdžanski gas i američki LNG imaju Vobeov indeks veći od propisanih vrednosti, u nastavku će biti prikazan proces namešavanja sa ugljen-dioksidom, CO₂, kako bi se njihove vrednosti smanjile i svele na željeni opseg.

6.3.1. Namešavanje azerbejdžanskog gasa i ugljen-dioksida

Kako bi se odredila potrebna količina ugljen-dioksida za namešavanje, neophodno je definisati Vobeov indeks koji treba postići. Za početak, određuje se toplotna moć smeše preko zapreminskih udela komponenata, a kako CO₂ ne sagoreva, toplotna moć smeše se može napisati na sledeći način:

$H_s = H_a * x$, gde su:

H_s – toplotna moć smeše [$\frac{MJ}{m^3}$];

H_a – toplotna moć azerbejdžanskog gasa izračunata u prethodnom potpoglavlju na osnovu poznatog hemijskog sastava. $H_a = 37,885$ [$\frac{MJ}{m^3}$] i

x – zapreminski udeo azerbejdžanskog gasa u smeši.

Ubacivanjem vrednosti toplotne moći azerbejdžanskog gasa u prethodnu jednačinu, dobije se sledeći izraz:

$$H_s = 37,885 * x \left[\frac{MJ}{m^3} \right]$$

Relativna gustina smeše se može, takođe, odrediti preko zapreminskih udela azerbejdžanskog gasa i udela ugljen-dioksida, i njihovih relativnih gustina. Relativna gustina ugljen-dioksida, u odnosu na vazduh na standardnim uslovima,

iznosi 1,53, dok je relativna gustina azerbejdžanskog gasa izračunata i iznosi 0,656. Jednačina koja izražava relativnu gustinu smeše ima sledeći oblik:

$$\rho_{rs} = 0,656 * x + 1,53 * (1 - x), \text{ gde su:}$$

ρ_{rs} – relativna gustina smeše azerbejdžanskog gasa i ugljen-dioksida i

$(1 - x)$ – zapreminski udeo ugljen-dioksida u smeši.

Vobeov indeks smeše se može zapisati kao odnos toplotne moći smeše i kvadratnog korena relativne gustine smeše, odnosno:

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\rho_{rs}}} = \frac{37,885 * x}{\sqrt{0,656 * x + 1,53 * (1 - x)}},$$

gde W_s predstavlja Vobeov indeks koji je potrebno postići, tj. $W_s = 45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, kako bi se postigla vrednost Vobeovog indeksa smeše koja je u zahtevanom opsegu $(42 - 46 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3})$.

Iz ove jednačine je potrebno izraziti veličinu x , odnosno zapreminski udeo azerbejdžanskog gasa u smeši postupkom prikazanom u nastavku.

$$45,5 = \frac{37,885 * x}{\sqrt{0,656 * x + 1,53 * (1 - x)}}, \text{ jednačinu je potrebno kvadrirati pri čemu se dobija:}$$

$$2070,25 = \frac{1435,27 * x^2}{0,656 * x + 1,53 - 1,53 * x}$$

$$2070,25 = \frac{1435,27 * x^2}{1,53 - 0,874 * x},$$

i leva i desna strana jednačine se množe članom $(1,53 - 0,874 * x)$, pri čemu se dobija:

$$2070,25 * (1,53 - 0,874 * x) = 1435,27 * x^2$$

$$3167,48 - 1809,39 * x = 1435,27 * x^2$$

$$1435,27 * x^2 + 1809,39 * x - 3167,48 = 0$$

Sada je potrebno rešiti kvadratnu jednačinu po sledećem obrascu:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \text{ gde je}$$

$$a = 1435,27$$

$$b = 1809,39$$

$$c = -3167,48$$

Prilikom ubacivanja odgovarajućih vrednosti u jednačinu iznad, dobija se sledeći zapreminski udeo azerbejdžanskog gasa u smeši:

$$x = 0,9834 = 98,34\%$$

i zapreminski udeo CO₂

$$(1 - x) = 0,0166 = 1,66\%.$$

U smeši čiji je Vobeov indeks jednak $45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, potrebno je namešati **98,34%** azerbejdžanskog gasa i **1,66%** ugljen-dioksida.

Toplotna moć namešanog gasa će iznositi:

$$H_s = x * 37,885 = 0,9834 * 37,885$$

$$H_s = 37,256 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

Relativna gustina namešanog gasa će biti jednaka:

$$\rho_{rs} = x * 0,656 + (1 - x) * 1,53 = 0,9834 * 0,656 + 0,0166 * 1,53$$

$$\rho_{rs} = 0,671$$

Vobeov indeks namešanog gasa će se izraziti kao odnos toplotne moći namešanog gasa i kvadratnog korena njegove relativne gustine:

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\rho_{rs}}} = \frac{37,256}{\sqrt{0,671}} = 45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}, \text{ čime je potvrđeno da je zadovoljen postavljeni uslov}$$

za Vobeov broj, kao i da je odnos gasova u smeši odgovarajući.

U zavisnosti od veličine ulaznog protoka azerbejdžanskog gasa, menjaće se i potrebna količina ugljen-dioksida kako bi se obezbedio željeni Vobeov indeks.

Za ulazni protok azerbejdžanskog gasa od:

1) $Q_a = 214000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, količina CO_2 će se izračunati kao:

$$Q_{\text{co2}} = \frac{Q_a * 1,66}{98,34} = \frac{214000 * 1,66}{98,34} = 3612,365 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$$

2) $Q_a = 5500000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, količina CO_2 će se izračunati kao:

$$Q_{\text{co2}} = \frac{Q_a * 1,66}{98,34} = \frac{5500000 * 1,66}{98,34} = 92841,163 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$$

Dakle, za ulazni protok azerbejdžanskog gasa od $214000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, potrebno je dodati $3612,365 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ ugljen-dioksida kako bi se dobile propisane vrednosti Vobeovog broja.

Prilikom transporta 5,5 miliona $\frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ azerbejdžanskog gasa, bilo bi neophodno dodati $92841,163 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ ugljen-dioksida. Kao i u prethodnim slučajevima, zbog kapaciteta gasovoda, nije moguće ostvariti ovaj protok.

6.3.2. Namešavanje američkog LNG-a i ugljen-dioksida

Postupak namešavanja je identičan postupku prikazanom u primeru namešavanja azerbejdžanskog gasa i ugljen-dioksida. Toplotna moć smeše LNG-a i ugljen-dioksida se može napisati na sledeći način:

$$H_s = H_{\text{lng}} * x$$

Ubacivanjem vrednosti toplotne moći LNG-a, dobija se izraz:

$$H_s = 38,602 * x \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right]$$

Relativna gustina smeše se izražava preko zapreminskih udela LNG-a i CO₂ i njihovih relativnih gustina (relativna gustina LNG-a iznosi 0,655).

$$\rho_{rs} = 0,655 * x + 1,53 * (1 - x)$$

Vobeov indeks smeše ima sledeći oblik:

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\rho_{rs}}} = \frac{38,602 * x}{\sqrt{0,655 * x + 1,53 * (1 - x)}} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right]$$

Kao i u prethodnom slučaju vrednost W_s će biti jednaka $45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$.

Postupak određivanja zapreminskog udela LNG-a je identičan određivanju zapreminskog udela azerbejdžanskog gasa u prethodnom primeru. Rešavanjem kvadratne jednačine dolazi se do zapreminskog udela LNG-a i udela CO₂ u smeši kako bi se zadovoljio definisan Vobeov indeks W_s .

$$x = 0,9718 = 97,18\%$$

$$(1 - x) = 0,0282 = 2,82\%$$

U smeši čiji je Vobeov indeks jednak $45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, potrebno je namešati **97,18%** LNG-a i **2,82%** ugljen-dioksida.

Toplotna moć namešanog gasa će iznositi:

$$H_s = x * 38,602 = 0,9718 * 38,602$$

$$H_s = 37,513 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

Relativna gustina namešanog gasa će biti jednaka:

$$\rho_{rs} = x * 0,655 + (1 - x) * 1,53 = 0,9718 * 0,655 + 0,0282 * 1,53$$

$$\rho_{rs} = 0,679$$

Vobeov indeks namešanog gasa će se izraziti kao odnos toplotne moći namešanog gasa i kvadratnog korena njegove relativne gustine:

$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\rho_{rs}}} = \frac{37,513}{\sqrt{0,679}} = 45,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, čime je potvrđeno da je zadovoljen postavljeni uslov za Vobeov broj, kao i da je odnos gasova u smeši odgovarajući.

U zavisnosti od veličine ulaznog protoka LNG-a, menjaće se i potrebna količina ugljen-dioksida kako bi se obezbedio željeni Vobeov indeks.

Za ulazni protok američkog LNG-a od:

1) $Q_{\text{lng}} = 214000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, količina CO_2 će se izračunati kao:

$$Q_{\text{co2}} = \frac{Q_{\text{lng}} * 2,82}{97,18} = \frac{214000 * 2,82}{97,18} = 6209,919 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$$

2) $Q_{\text{lng}} = 5500000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, količina CO_2 će se izračunati kao:

$$Q_{\text{co2}} = \frac{Q_{\text{lng}} * 2,82}{97,18} = \frac{5500000 * 2,82}{97,18} = 159600,741 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$$

Dakle, za ulazni protok američkog LNG-a od $214000 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$, potrebno je dodati $6209,919 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ ugljen-dioksida kako bi se dobile propisane vrednosti Vobeovog broja.

Prilikom transporta 5,5 miliona $\frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ LNG-a, bilo bi neophodno dodati $159600,741 \frac{\text{Sm}^3}{\text{dan}}$ ugljen-dioksida. Kao i u prethodnim slučajevima, zbog kapaciteta gasovoda, nije moguće ostvariti ovaj protok.

7. ZAKLJUČAK

Ciljevi rada su zadovoljeni. Prikazane su najvažnije karakteristike prirodnog gasa kao osnova za dalje razumevanje rada, količine prirodnog gasa na evropskom tržištu, njihove varijacije tokom godina, kao i karakteristike gasova iz različitih zemalja koje su iskorišćene u procesu rešavanja Studije slučaja. Takođe, definisan je i kvalitet prirodnog gasa koji je zahtevan u Republici Srbiji, kao i načini i sigurnost snabdevanja ovim energentom. Kao što je već spomenuto i prikazano, Studija slučaja je pokazala postupak određivanja i dobijanja konkretnih vrednosti osobina različitih gasova, njihovo poređenje sa zahtevanim kvalitetom, a potom i definisanje različitih procesa namešavanja kako bi se njihove vrednosti prilagodile propisanim.

Rešavanjem Studije slučaja došlo se do zaključka da prirodni gasovi različitog porekla mogu da se koriste u Republici Srbiji, pod uslovom da se različitim procesima namešavanja njihove vrednosti toplotnih moći, a samim tim i Vobeovih brojeva, svedu na zahtevani opseg. Vobeov broj predstavlja najbitniju karakteristiku namešavanja različitih gasova i kao takva je bila osnova za izradu ovog rada i osnova za rešavanje Studije slučaja. Rad je dokazao mogućnost snabdevanja Republike Srbije prirodnim gasom iz različitih zemalja, što će svakako doprineti većoj energetske sigurnosti u budućnosti.

U Beogradu, septembra 2024.

Literatura

- 1 Armstrong, M., 2023., Where Does the EU's Gas Come From?, URL: <https://www.statista.com/chart/31017/eu-Ing-and-pipeline-natural-gas-imports-by-country/> (29.07.2024)
- 2 Calculated methane number and Wobbe index for the original gas compositions. URL: https://www.researchgate.net/figure/Calculated-methane-number-and-Wobbe-index-for-the-original-gas-compositions_tbl3_365509871 (23.08.2024)
- 3 Call for Input: Open letter to industry to gauge interest in revisiting the opportunity to raise the upper limit of the Wobbe Index, 2024. URL: <https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/2024-01/Call%20for%20input%20upper%20limit%20of%20Wobbe%20Index%20February%202024.pdf> (07.09.2024)
- 4 Calorific Value of Natural Gas. URL: <https://group.met.com/en/media/energy-insight/calorific-value-of-natural-gas> (29.07.2024)
- 5 Džul-Tomsonov efekat. URL: <https://www.ffh.bg.ac.rs/uploads/sr/2020/05/%D1%83%D0%BF%D1%83%D1%82%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE-27.pdf> (08.07.2024)
- 6 Fleming, P., The Joule-Thomson Effect, California State University East Bay. URL: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Physical_Chemistry_\(Fleming\)/04%3A_Put_ting_the_First_Law_to_Work/4.05%3A_The_Joule-Thomson_Effect](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Physical_Chemistry_(Fleming)/04%3A_Put_ting_the_First_Law_to_Work/4.05%3A_The_Joule-Thomson_Effect) (08.07.2024)
- 7 Guo, B., Ghalambor, A., *Natural Gas Engineering Handbook*
- 8 Izveštaj o radu Agencije za energetiku za 2023. godinu, 2024., Beograd. URL:

- <https://aers.rs/Files/Izvestaji/Godisnji/Izvestaj%20Agencije%202023.pdf> (01.09.2024)
- 9 Kozić, Đ., 2019. *Termodinamika – inženjerski aspekti*, Mašinski fakultet, Beograd
- 10 Kozić, Đ., Bekavac, V., Vasiljević, B., 1979. *Priručnik za termodinamiku u jedinicama SI*, Mašinski fakultet, Beograd
- 11 Liquefied Natural Gas Specifications. URL: http://www.americanhopepetroleum.com/wp-content/themes/americanhopepe/pdf/Liquefied_Natural_Gas_Specifications.pdf (24.08.2024)
- 12 Markowski, J., Imilkowski, P., Nowacki, M., Olejniczak, D., Madry, J., Netter, K., Jesionek, K., Wieczorkiewicz, G., 2020., The concept of measurement of calorific value of gaseous fuels, URL: https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/67/e3sconfpepm2020_01025.pdf (07.07.2024)
- 13 Methods of Adjusting the Wobbe Index of a Fuel and Compositions Thereof, 2003. URL: <file:///C:/Users/HP/Downloads/WO2004005440A1.pdf> (11.09.2024)
- 14 Molarni toplotni kapacitet gasa pri konstantnom pritisku i konstantnoj zapremini. URL: https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/termodinamika_3_idealni_gas_2_1413980201362.pdf (07.07.2024)
- 15 Natural Gas Composition, Georgian Gas Transportation Company, 2024., URL: <https://e-platform.ggtc.ge/gasanalysisen.aspx> (23.08.2024)
- 16 O prirodnom gasu. URL: https://www.srbijagas.com/?page_id=1410&pismo=lat (08.07.2024)
- 17 Opšti uslovi prodaje energije iz prirodnog gasa kupcima na slobodnom tržištu. URL: <https://www.srbijagas.com/wp-content/uploads/2022/08/Opsti-uslovi-prodaje-energije-iz-prirodnog-gasa-slobodno-trziste.pdf> (01.09.2024)

- 18 Petrović, Stojanović, J., 2024. Može li azerbejdžanski gas da zameni ruski, URL: <https://www.politika.rs/scc/clanak/627165/Moze-li-azerbejdzanski-gas-da-zameni-ruski> (25.07.2024)
- 19 Plan razvoja transportnog gasovodnog sistema za period 2020-2029, 2019. URL: <https://www.aers.rs/FILES/AktiAERS/AERSDajeSaglasnost/Plan%20razvoja%202020-2029%20Transportgas%20Srbija.pdf> (15.09.2024)
- 20 Plan razvoja transportnog gasovodnog sistema za period 2022-2031. sa planom investicija za period 2022-2024, 2023. URL: <https://www.transportgas-srbija.rs/wp-content/uploads/Plan-razvoja-transportnog-gasovodnog-sistema-za-period-2022-2031-sa-planom-investicija-za-period-2022-2031.pdf> (15.09.2024)
- 21 Pravila o radu transportnog sistema prirodnog gasa, 2013. URL: <https://www.transportgas-srbija.rs/wp-content/uploads/2013-08-16-Pravila-rada-TS-PrGas-SG-74-2013.pdf> (06.09.2024)
- 22 Prstojević, B., Đajić N., Vuletić, V., 2005. *Distribucija prirodnog gasa*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- 23 Quarterly report On European gas markets. URL: https://energy.ec.europa.eu/document/download/64002c8c-5961-4ef2-a576-80ad135fbdde_en?filename=New_Quarterly_Report_on_European_Gas_Markets_Q3_2023.pdf (25.07.2024)
- 24 Requirements for gas quality and gas appliances, 2015. URL: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2016/01/DNV%20GL%20-%20EZ%20RVO%20-%20Requirements%20for%20gas%20quality%20and%20gas%20appliances%20-%20fina....pdf> (07.09.2024)
- 25 Specifična toplota. URL: <https://www.scribd.com/doc/92159275/Specifcna-toplota> (07.07.2024)

- 26 Srbija i energetika: Ruski gas i dalje najvažniji, azerbejdžanski može da popuni zalihe. URL: <https://www.bbc.com/serbian/lat/balkan-67648577> (24.08.2024)
- 27 Strelec, V., 1982. *Plinarski priručnik 3. Izdanje*, Zagreb
- 28 Tržište prirodnog gasa u Srbiji. URL: <https://www.aers.rs/Index.asp?l=1&a=42.01&tp=TEG> (06.09.2024)
- 29 Uredba o utvrđivanju preventivnog akcionog plana radi obezbeđivanja sigurnosti snabdevanja prirodnim gasom, ("Sl. glasnik RS", br. 102/2018). URL: http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2018_12/t12_0361.htm (06.09.2024)
- 30 Wesolowsky, T., 2022., Može li Azerbejdžan da pomogne Evropi u oslobađanju od ruskog gasa, URL: <https://www.slobodnaevropa.org/a/azerbejdzan-gas-eu/31834296.html> (26.07.2024)
- 31 Where does Europe get its natural gas? URL: <https://www.iea.org/regions/europe/natural-gas> (25.07.2024)
- 32 Where does the EU's gas come from? URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/eu-gas-supply/> (25.07.2024)

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента Lana Mitrović

Број индекса R1/20

И з ј а в љ у ј е м

да је завршни рад под насловом

Analiza toplotne moći i Vobeovog indeksa prirodnog gasa različitog porekla

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, _____

Потпис студента

ИЗЈАВА
О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента Lana (Stevica) Mitrović

Број индекса R1/20

Студијски програм Inženjerstvo nafte i gasa

Наслов рада Analiza toplotne moći i Vobeovog indeksa prirodnog gasa različitog porekla

Ментор prof. dr Dejan Ivezić

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, _____

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

Analiza toplotne moći i Vobeovog indeksa prirodnog gasa različitog porekla

који је моје ауторско дело.

Завршни рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је *(заокружити једну од две опције)*:

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)

У Београду, _____

Потпис ментора

Потпис студента

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
 2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
 3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
 4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
 5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
 6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.
-

Библиотека Рударско-геолошког факултета

ПОТВРДА

О ПРЕДАЈИ ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ЗАВРШНОГ РАДА

Потврђује се да је студент _____,
(име (име родитеља) презиме)

бр. индекса _____ / _____ предао/ла електронску верзију завршног рада на
основним/мастер академским студијама под насловом:

који је урађен под менторством _____
(име, презиме и звање)

за Дигитални репозиторијум завршних радова РГФ-а.

Потврда се издаје за потребе Одељења за студентска и наставна питања и не може се
користити у друге сврхе.

У Београду, _____

Библиотекар
