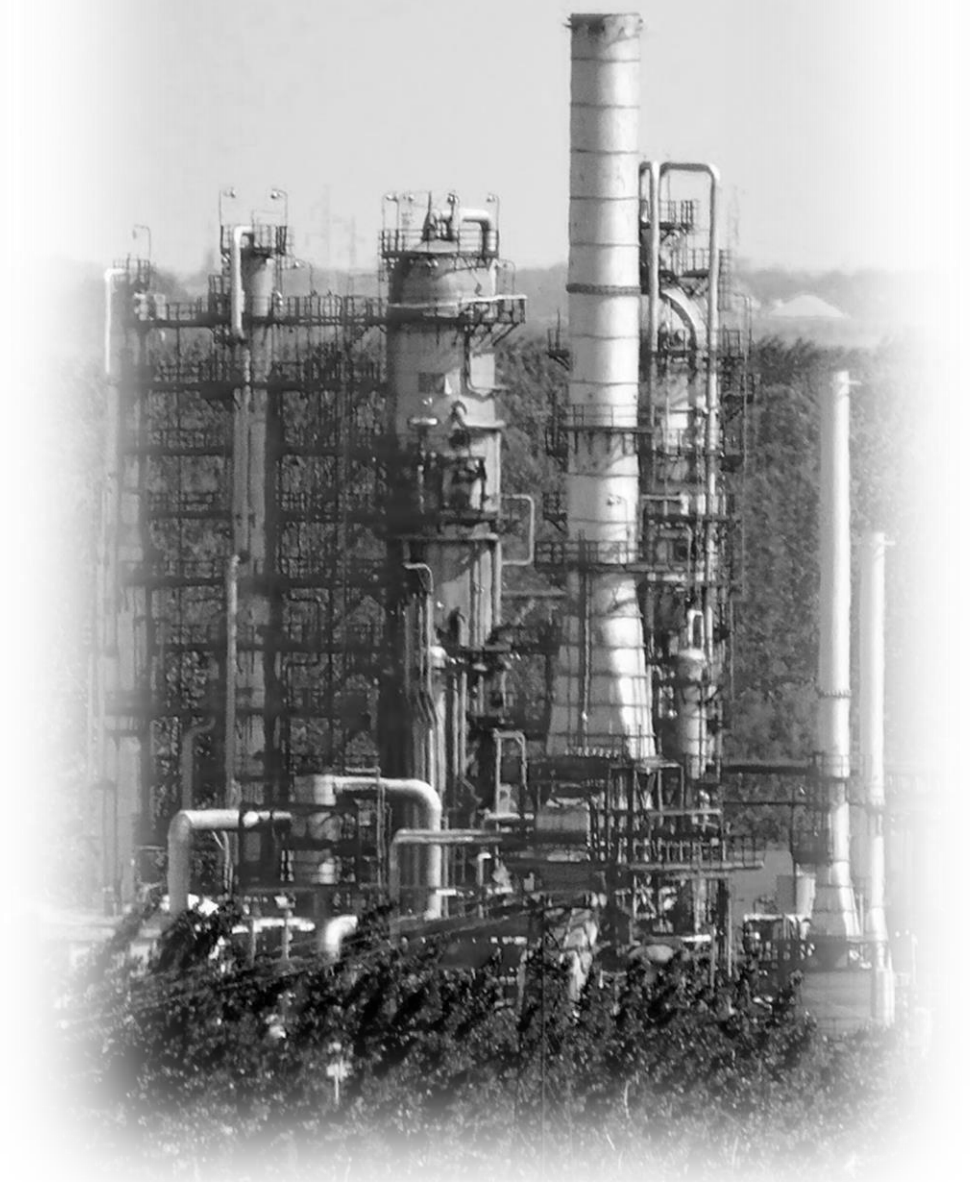


Radoslav D. Mićić



**Osnove tehnologije i tehnološki
kompleksi (koji su uključeni u struku)**

Radoslav D. Mičić

Osnove tehnologije i tehnološki kompleksi (koji su uključeni u struku)

Industrijsko inženjerstvo u eksploataciji nafte i gasa

Univerzitet u Novom Sadu
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin"
Zrenjanin
2019

Osnove tehnologije i tehnološki kompleksi (koji su uključeni u struku)

Autor:

Docent dr Radoslav D. Mičić

Redaktori:

Prof. dr Zvonimir Bošković

Prof. dr Zvonimir Sajfert

Izdavač:

Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin

Za izdavača:

Prof. dr Dragica Radosav, dekan Tehničkog fakulteta „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin

CIP - Katalogizacija u publikaciji Biblioteke Matice srpske, Novi Sad

622.276(175.8)

MIČIĆ, Radoslav, 1955-

Osnove tehnologije i tehnološki kompleksi (koji su uključeni u struku: industrijsko inženjerstvo u eksploataciji nafte i gasa / Radoslav D. Mičić. - Zrenjanin : Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", 2019 (Novi Sad : NS Digiprint). - 259 str. : ilustr. 107; 24 cm. - (Biblioteka Udžbenici / Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin ; 233)

Tiraž 30. - Bibliografija.

ISBN 978-86-7672-326-3

a) Nafta -- Eksploatacija -- Kompleksi b) Gas -- Eksploatacija -- Kompleksi

COBISS. SR -ID 331558151

Sadržaj:

1. Uvod	1
1.1. Iz istorije nafte i prirodnog gasa	1
1.2. Svetske rezerve nafte i gasa	2
1.2.1. Svetske rezerve, potrošnja i eksploatacija nafte	2
1.3. Naftno-gasna ležišta	3
2. Prirodne bitumije	4
2.1. Klasifikacija kaustobiolita i bitumija	5
2.2. Petrobitumije	6
3. Tečne petrobitumije-nafta	7
3.1. Sastav i fizičke karakteristike nafte	7
3.1.1. Sastav	7
3.1.1.1. Parafini	7
3.1.1.2. Cikloparafini	8
3.1.1.3. Aromati	8
3.1.1.4. Hibridni ugljovodonici	9
3.1.1.5. Heteroatomska jedinjenja	9
3.1.1.6. Sumporna jedinjenja	10
3.1.1.7. Azotna jedinjenja	10
3.1.1.8. Jedinjenja kiseonika	11
3.1.1.9. Metali	11
3.2. Fizičke karakteristike nafte	13
3.2.1. Površinski napon	13
3.2.2. Gustina	13
3.2.3. Viskozitet	15
3.2.3.1. Viskozitet nafte	21
3.2.4. Klasifikacija fluida na njutnovske i nenjutnovske fluide	21
3.2.5. Isplake	23
3.2.5.1. Viskozitet isplake	24
3.2.6. Stišljivost nafte	25
3.2.7. Toplotne karakteristike	26
a. Tačka zamućenja	26
b. Tačka tečenja (ili stinjavanja)	26
c. Tačka smrzavanja	26
d. Filtrabilnost	26
a. Toplotna vrednost, toplotna moć ili toplota	27
b. Isparljivost	27
c. Tačka paljenja	27
d. Tačka gorenja	27
3.2.8. Destilacija	27
3.2.9. Anilinska tačka	28

3.2.10. Dielektrična svojstva nafte.....	28
3.2.11. Optička svojstva.....	28
a. Indeks refrakcije	28
b. Refrakcijska disperzija.....	28
c. Specifična refrakcija	29
3.3. Klasifikacija i karakterizacija nafte.....	29
3.3.1. Razlike u osobinama nafte u okviru naftnog sloja	29
3.3.2. Empirijska karakterizacija nafte	30
a. Karakterizacioni broj (K)	30
b. Indeks korelacije (I_k)	30
3.3.3. Strukturno-grupna analiza.....	30
3.3.4. Podela nafte na osnovu grupnog sastava	30
3.4. Svetske rezerve, potrošnja i eksploatacija nafte.....	31
4. Sastav i fizičko-hemijske karakteristike slojne vode	44
4.1. Fizičko-hemijske karakteristike slojne vode	45
4.1.1. Gustina slojne vode	47
4.1.2. Viskozitet slojne vode.....	48
4.1.3. Koeficient toplotne ekspanzije.....	48
4.1.4. Faktor kompresibilnosti.....	48
4.1.5. Zapreminski koeficient.....	48
4.1.6. Soli slojnih voda - elektroliti.....	49
4.1.7. Koeficient rastvorljivosti	49
5. Gasovite petrobitumije - gasovi	50
5.1. Sastav i fizička svojstva gasa	50
5.2. Prednosti i nedostaci naftnih gasova	51
5.3. Poreklo, geneza i tipovi ležišta PNG.....	51
5.4. Klasifikacija ležišta prirodnog naftnog gasa.....	52
5.5. Sastav i fizičko-hemijska svojstva prirodnih gasova	53
5.6. Terminologija	53
5.7. Osobine prirodnih naftnih gasova	54
5.8. Ugljovodonici u prirodnim naftnim gasovima.....	55
5.9. Neugljovodonici u prirodnim naftnim gasovima.....	55
5.10. Hemijski sastav PNG iz gasno-kondenzatnih ležišta.....	56
5.11. Hemijski sastav kaptažnih naftnih gasova.....	56
5.12. Poreklo i osobine neugljovodonika u PNG.....	57
5.13. Svetske rezerve, potrošnja i eksploatacija gasa	60
5.13.1. Lokacije super gigantskih gasnih polia	64
5.13.2. Države i regije sa najvećim rezervama gasa u periodu 1982/2018	64
5.13.3. Prognoze za otkrivanje novih rezervi PNG	65
5.13.4. Tokovi proizvodnje PNG u svetu	65
6. Teorijski uvod vezan fenomene gasnih i tečnih ugljovodonika	69
6.1. Nauka koja se bavi proučavanjem fizičkih promena.....	69

6.2. Osnovi tehnologije-prirodni zakoni	73
6.3. Osnovni pojmovi mehanike	76
7. Njutnovi zakoni	77
8. Dimenzije i merne jedinice.....	78
8.1. Dimenzije	78
8.2. Merne jedinice.....	78
8.2.1.1. Internacionalni sistem (SI).....	78
8.2.1.2. Osnovne i izvedene jedinice	79
8.2.1.3. Dopunske merne jedinice su:	80
9. Zakonitosti i jednačine koje određuju karakteristike idealnih gasova	84
9.1. Boyleov zakon.....	84
9.2. Charles-ov zakon.	85
9.3. Gay-Lussacov - Amontonov zakon	85
9.4. Avogadrov zakon	86
9.5. Zakon idealnog gasa, kombinovana jednačina.....	86
9.6. Jednačina idealnog gasnog stanja	87
9.7. Opšta i individualna gasna konstanta.....	88
10. Gasne smeše, Molarna masa, molarna zapremina, Avogadrov broj	95
10.1. Daltonov zakon za gasne smeše	97
10.2. Amagatov zakon za gasne smeše	97
11. Fizičke-hemijske osobine prirodnih naftnih gasova	104
11.1. Gustina naftnih gasova.....	104
11.2. Viskoznost naftnih gasova.....	107
11.3. Toplota sagorevanja:	107
11.4. Vlažnost prirodnih naftnih gasova.....	108
11.5. Tačka rose	108
11.6. Rastvorljivost gasa u nafti i vodi.....	109
11.7. Koeficijent degazacije	110
11.8. Pritisak zasićenje naftnog gasa	110
12. Realan gas	121
12.1. Korekcije za realne gasove	121
12.2. Van der Waalsova jednačina stanja	121
12.3. Faktor kompresibilnosti	121
12.4. Jednačina stanja realnog gasa (JS, engl. compressibility real gas equation).....	122
12.5. Zakon (načelo) korespondentnih stanja (ZKS).....	123
12.6. Kritični parametri naftnih gasova	124
12.7. Generalizovana korelacija za određivanje Z-faktora smese	125
12.8. Primena faktora kompresibilnosti.....	127
12.8.1. Zapreminski faktor realnog gasa (Bg)	127
13. MEHANIKA FLUIDA	137
13.1. Pojam i priroda fluida.....	137

14. Statika fluida.....	138
14.1. Masene i površinske sile	138
14.2. Hidrostatički pritisak	138
14.3. Ojlerove diferencijalne jednačine ravnoteže	139
14.4. Bilans sila za ukupnu zapreminu	140
14.5. Paskalov zakon	140
14.6. Sile hidrostatičkog pritiska.....	141
14.7. Hidrostatička sila na dno posude	142
15. Hidrodinamika fluida. Zakon kontinuiteta	148
15.1. Režimi strujanja fluida	149
15.2. Ekvivalentni prečnik međucevnog prostora.....	152
15.3. Strujanje kroz cevne vodove	153
15.4. Bernulijeva teorema	154
15.5. Primena Bernulijeve teoreme na strujanje idealnih i realnih fluida	154
15.6. Primena Bernulijeve teoreme na gasove	159
16. Primena Bernulijeve jednačine na merenje brzine strujanja	175
16.1. Direktna merenja	175
16.2. Dinamička merenja	175
17. Bušenje.....	185
18. Osnovne postavke i delovi postrojenja za bušenje	188
18.1. Tehnološki proces bušenja.....	188
18.2. Podela bušaćih postrojenja.....	189
18.3. Delovi bušaćih postrojenja.....	190
18.3.1. Rotaciona dleta	190
18.3.1.1. Opterećenje na dleto	192
18.3.1.2. Uklanjanje razrušenih čestica (reznica).....	192
18.3.2. Toranj.....	192
18.3.3. Pogonski sastav.....	193
18.3.3.1. Pogonski motori.....	193
18.3.3.2. Prenosnici.....	194
18.3.4. Sistem za manipulaciju alatima	195
18.3.4.1. Dizalica.....	195
18.3.4.2. Sistem koturača.....	196
18.3.4.3. Bušaće uže.....	197
18.3.4.4. Sistem bušaćih alatki	198
18.3.4.5. Isplačna glava	198
18.3.4.6. Radna šipka i rotacioni sto.....	198
18.3.4.7. Bušaće alatke	200
18.3.5. Sistem za ispiranje	201
18.3.5.1. Fluid za ispiranje (isplaka).....	201
18.3.5.2. Bazeni i isplačne sisaljke.....	202
18.3.5.3. Vibraciona sita	202

18.3.6.Sustem za kontrolu ušća bušotine	203
18.3.6.1. Preventerski sistem	203
18.3.6.2. “ Koomey” uređaj	204
18.3.6.3. Podesiva mlaznica (Choke)	204
18.3.6.4. Odvajači gasa	205
18.3.7.Pomoćna sredstva.....	205
19. Priprema nafte i gasa za transport.....	207
19.1. Fazni dijagram.....	207
20. Priprema nafte za transport.....	210
20.1. Analize koje se rade kod nafte i proizvoda za isporuku	210
20.2. Oprema koja se koristi za dobijanje deklarisanog kvaliteta	211
20.3. Tehnološka šema procesa sabiranja i primarne obrade nafte i gasa	212
20.4. Izdvajanje vode iz nafte.....	213
20.5. Odsoljavanje nafte.....	213
20.6. Uređaji za izdvajanje nafte iz ležišne vode	213
20.7. Separatori.....	213
20.7.1.Princip rada separatora.....	214
20.8. Osnovni delovi vertikalnog separatora	215
20.8.1.Različiti tipovi separatora, po nameni	217
21. Priprema prirodnog gasa za transport	218
21.1. Industrijski postupci za sušenje prirodnog gasa:	219
21.2. Degazolinaža prirodnog gasa - izdvajanje gazolina	220

Legenda:

%CA, procenat ugljenika u aromatskim strukturama

%CN, procenat ugljenika u naftenskim strukturama

%CP, procenat ugljenika u parafinskim strukturama.

α , koeficient Joule-Thomson (zavisi od prirode gasa, pritiska, temperature);

α , koeficient rastvorljivosti gasa;

β , koeficient kompresibilnosti, stišljivosti (ili elastičnosti zapremine), GPa^{-1}

β_n , koeficient kompresibilnosti, stišljivosti (ili elastičnosti zapremine) nafte, GPa^{-1}

\exists_i , ekvivalent i jona

B_w , faktor kompresibilnosti. Pa^{-1} , promena zapremine kada se pritisak promeni za jedinicu

μ , dinamički viskozitet, Pa s , Nsm^{-2} , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$

A, površina kontakta sloja tečnosti (gasa), koji se kreću, m^2

A, površina poprečnog preseka;

CFPP, tačka zagušenja hladnog filtera, filtrabilnost, $^{\circ}\text{C}$

C_{H^+} , koncentracija vodonikovih jona, mmol/l

CP, tačka zamućenja, $^{\circ}\text{C}$

d, prečnik;

d, relativna gustina

dv, razlika između brzine koja se kreće sloj tečnosti (gasa).

dy, rastojanje između pokretnih sloj tečnosti (gasa), m

E, koeficient toplotne ekspanzije, promena zapremine kada promeni temperatura za 1°C

E_h , potencijalna energija ($= F_g \cdot h = m \cdot g \cdot h (=) \text{J}$);

F, sila sa kojom se deluje na ploče, $\text{N} = 1 \text{kgm/s}^2$

FP, tačka smrzavanja, $^{\circ}\text{C}$

g, gravitaciono ubrzanje, m/s^2

GCV, ukupna toplotna vrednost, MJ/kg , kJ/kg

g_i , maseni udeo frakcije, težinski udeo

H, dubina, m

H_{tot} , ukupna tvrdoća vode, ($= H_{\text{carb}} + H_{\text{nocarb}}$, $(\frac{\text{mg}_{\text{ekv}}}{\text{l}})$), sadržaj soli u miligramima ekvivalenta po litri:

Ik, indeks korelacije

K, Karakterizacioni broj

K. Henrijeva konstanta Genri ($K=f(\alpha)$).

K_{dry} , koeficient suvoće;

k_{wet} , koeficient vlažnosti;

M, molekulska masa, kg/kmol

$m_{v,i}$, koncentracija jona u vodi (mg/l);

N, količina supstance, kmol ;

n, indeks refrakcije

$N_A = 6,023 \times 10^{23}$ molekula, Avogadrov broj

NCV, neto toplotna vrednost, MJ/kg, kJ/kg

n_i , kmol, broj molova

N_i , broj molekula (čestica)

P, apsolutni pritisak, Pa;

P, pritisak gasa iznad površine tečnosti; Pa

P_i , parcijalni pritisak i-te komponente u smeši

PP, tačka stinjanja, °C

Q_n , donja toplota sagorevanja, MJ/kg, kJ/kg

Q_v , gornja toplota sagorevanja, MJ/kg, kJ/kg

Q_v , zapreminski protok, m³/s

R, univerzalna gasna konstanta, Pa × m³ / (kmol × stepeni), u SI 8.3145 $\left[\frac{\text{kPa m}^3}{\text{K kmol}} \right]$

$Re = f(d, v, \rho, \mu)$, Rejnoldsov broj;

T, apsolutna temperatura, K;

t, vreme, s

V, brzina smicanja, s⁻¹

v, specifična zapremina, m³/kg.

V, zapremina m³;

V_{deg} , zapremina nafte pri atmosferskom pritisku i temperaturi od 20°C posle degazacije, m³

V_g , zapremina gasa, rastvorenog na datoj temperaturi; m³

V_i , zapreminski udeo frakcija

V_l , zapremina tečnog rastvarača; m³

V_m, v , molarna zapremina, 22,4 dm³/mol pri 0°C i 101,3 kPa, zapremina 1 mola gasa ili 23.645 m³/kgmol pri 15°C, 1.01325 bar

V_{sl} , zapremina nafte na uslovima sloja; m³

x, dužina puta u pravcu brzine v, m

Y, rastojanje između ploča, m

y_i , molarni (molski) udeo frakcija

Z, faktor kompresibilnosti gasa

γ ili ρ^o , relativna gustina.

Δ , pogonska sila (razlika temperature, razlika koncentracije, razlika količine kretanja, ili razlika pritisaka, itd.) između dva mesta na rastojanju l između kojih se vrši transport.

ϵ , dielektrična konstanta nafte, F/m, As/Vm

μ_p , plastična viskoznost, Pa s, Nsm⁻², kg·m⁻¹s⁻¹

v, kinematski viskozitet, m²/s, cSt (1 mm²·s⁻¹ = 10⁻⁶m²·s⁻¹)

v, molarna zapremina (=22.414 $\left[\frac{\text{dm}^3}{1 \text{ g mol}} \right]$ = 22.414 $\left[\frac{\text{m}^3}{1 \text{ kg mol}} \right]$ pri T=273.15 K i p=1.01325 bar,

zapremina 1 mola gasa);

ρ , gustina, g/cm³; kg/m³.

σ , provodljivost, S/m, $\mu\text{S/cm}$

τ , smicajno naprezanje, Pa, $\frac{F^{(N)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{\text{lb}}{100\text{ft}^2}$

τ_0 , granica tečenja (kritično naprezanje na smicanje), MPa

Φ , fluidnost, m^2/Ns

χ , koeficient proporcionalnosti

ϕ , fluks posmatrane veličine (toplote, mase, količine kretanja itd.), tj. količinu te veličine koja se prenese za jedinicu vremena u površinu kroz jediničnu površinu normalnu na pravac transporta;

1. Uvod

1.1. Iz istorije nafte i prirodnog gasa

Ljudi su se upoznali sa naftom pre više od 4000 godina.

U osvit civilizacije, nafta nije igrala veliku ulogu u svakodnevnom životu i tehnologiji. Na osnovu istorijskih podataka, može se zaključiti da su naftu koristili Grci, Egipćani i Asirci i to uglavnom za medicinske svrhe, u građevinarstvu (asfalt), u proizvodnji mastila i za vojnu namenu (*"Grčka vatra"*), kao i za rasvetu i podmazivanje točkova na kolima

Kao jeftin izvor za dobijanje goriva i naftnih derivata, nafta se koristi, tek, u poslednjih sto godina. U ovom trenutku, razvoj tehnologije i industrije ne može se zamisliti bez upotrebe nafte i proizvoda koji se dobijaju njenom preradom.

Od nafte se proizvodi gorivo za motore sa unutrašnjim sagorevanjem, gorivo za gasne turbine i kotlove, ulja za podmazivanje, bitumen za kolovoze, čađ za gumarsku industriju, koks za elektrode, kao i mnogi drugi industrijski proizvodi i roba široke potrošnje. Pored toga nafta predstavlja jeftin izvor za dobijanje sirovine u proizvodnji polimera, sintetičkih vlakana, gume, deterdženata, alkohola, aldehida i mnogih drugih vrednih materijala.

Prirodni gas, gasni kondenzat (Associated petroleum gas (APG)), rafinerijski gas, aromatski ugljovodonici, tečni i čvrsti parafini - koriste se kao sirovina u petrohemijskoj industriji.

Razvoj naučno-tehničke baze čovečanstva, na osnovu koje se istražuju i eksploatišu postojeće rezerve nafte i gasa zasniva se na postizanju napretka u oblasti fizike naftno-gasnog sloja. Podaci o naftim i gasnim rezervoarima, kolektorskim i filtracionim osobinama stena (poroznosti, propustljivost, zasićenju, elektroprovodljivosti), fizičkim osobinama rezervoara tečnosti i gasova, kao i faznom satavu ugljovodoničnih sistema su podaci koji se uspešno koriste u praksi.

Napredak u oblasti fizike naftno-gasnog sloja, kroz savremeniji sistem projektovanja, sistema za eksploataciju, omogućuje kompetentniji rad u istraživanju nafte i gasa, kao i razvoj i implementaciju novih metoda za povećanje mogućnosti eksploatacije naftnih i gasnih zaliha.

Moderni inženjeri-naftaši, koji se bave racionalnim razvojem naftnih i gasnih polja, moraju biti upoznati sa geološke građom zamljišta (stena), njegovim fizičkim karakteristikama, fizičkim i fizičko-hemijskim osobinama nafte, gasa i vode, zasićenja stena; i na osnovu svega toga treba da budu u stanju da pravilno obrade i procene podatke dobijene na osnovu istražnih radnji vezanih za naftno-gasni sloj (rezervoar) i tokom kasnije eksploatacije. Ovi podaci omogućavaju nam da utvrdimo početne rezerve ugljovodonika u rezervoaru, kao i za objektivno prikazivanje procesa koji se dešavaju u rezervoaru u različitim fazama eksploatacije. Na osnovu ovih složenih informacija, zasnovano je i projektovanje načina eksploatacije terena, kao i izbor različitih metoda veštačkog uticaja na rezervoar, ukoliko se utvrdi da su te metode neophodne.

1.2. Svetske rezerve nafte i gasa

1.2.1. Svetske rezerve, potrošnja i eksploatacija nafte

Svetske rezerve nafte i gasa su jedan od najdragocenijih izvora energije kojima današnje čovečanstvo raspolaže. One su smeštene u različitim ležištima na celoj Zemlji, no njihova raspodela nije ravnomerna.

Izraz rezerve nafte odnose se na količinu nafte u ležištu (engl. "Original Oil In Place") koje se mogu u datom trenutku pridobiti uz pozitivnu ekonomsku računicu. U skladu sa time, nafta se ne smatra rezervom ako je nije moguće ekonomski pridobiti, tj. Ako su troškovi pridobijanja veći od iznosa koji je moguće zaraditi sa dobijenim količinama.

Procena rezervi nafte zasniva se na izračunavanju geološkog i ekonomskog rizika. Oba ova podatka, zajednički, pokazuju verovatnoću da će se posmatrane količine nafte biti moguće otkriti te ekonomski pridobiti na površinu. U skladu sa time rezerve nafte se klasifikuju kroz nekoliko sistema, zavisno o državi u kojima se klasifikacija sprovodi.



Slika 1.1: Zemlje sa najvećim rezervama nafte

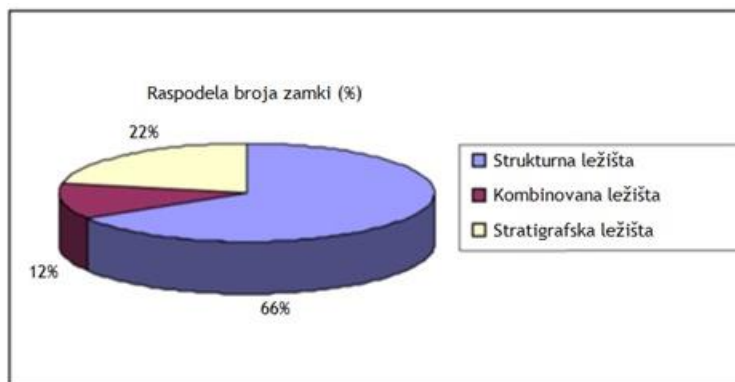
Neke od zemalja proizvođača nafte i gasa udružene su u dve najveće Svetske asocijacije: OPEK i Organizacija za ekonomsku saradnju i razvoj.

Organizacija zemalja izvoznica nafte – OPEK (engl. *OPEC, Organization of the Petroleum Exporting Countries*) skraćena je za organizaciju zemalja izvoznica nafte, koju sačinjavaju: Alžir, Indonezija, Irak, Iran, Kuvajt, Libija, Nigerija, Katar, Saudijska Arabija, Ujedinjeni Arapski Emirati i Venezuela. Ova multinacionalna organizacija je osnovana 1960. godine u Bagdadu, da bi koordinirala proizvodnju i izvoz nafte među svojim članicama. Sedište organizacije je u Beču od 1965. godine.

Organizacija za ekonomsku saradnju i razvoj (engl. *Organisation for Economic Co-operation and Development*) je osnovana 14. decembra 1960. godine. Nastala je iz **Organizacije za evropsku ekonomsku saradnju** - OEES, osnovane 1948. godine s ciljem da pomogne ostvarenju i administraciji Maršalovog plana o rekonstrukciji Evrope nakon Drugog svetskog rata. Kasnije je njeno članstvo bilo prošireno na neevropske zemlje, a 1961. godine reformisana je u **Organizaciju za ekonomsku saradnju i razvoj**. Ovu organizaciju čine: Belgija, Danska, Francuska, Grčka, Holandija, Irska, Island, Luksemburg, Zapadna Nemačka, Norveška, Portugal,

Austrija, Španija, Švajcarska, Švedska, Italija, Turska, Ujedinjeno Kraljevstvo, SAD i Kanada Japan, Finska, Australija, Novi Zeland, Meksiko, Češka, Mađarska, Poljska, Republika Koreja, Slovačka, Čile, Slovenija, Izrael

Zanimljivo je uočiti odnos broja zamki (u procentima) Mapirane u najvećim svetskim poljima (engl. " *giant fields* "). Prema očekivanju, najveći broj ležišta, to jest njih 2/3, smešten je u strukturnim zamkama. Nešto više od petine ležište ugljovodonika nalazi se u stratigrafskim tipovima zamki, a preostala pripadaju kombinovanim tipovima ležišta.



Slika 1.2. Raspodela vrsti zamki mapirane u najvećim svetskim poljima (STOKER, GRAY, HAILE, ANDREWS i CAMERON, 2004

1.3. Naftno-gasna ležišta

Prostorni raspored vode, nafte i gasa u jednom prirodnom rezervoaru zavisi od međusobnog niza faktora. Po ranijoj gravitacionoj teoriji, pomenuti fluidi su u vertikalnom profilu potpuno izdvojeni jedan od drugog i raspoređeni u strogoj zavisnosti od svoje gustine odozgo nadole:

- najlakši gas („gasna kapa),
- nafta i
- voda, kao teži fluid od nafte.

Kasnija istraživanja pokazuju da tako oštre granice u ležištima nafte i gasa ne postoje, odnosno da u poroznom prostanstvu naftnog sloja postoji i određena količina vezane vode. Pomenuta voda se obično zadržava u sloju, pa bušotine mogu davati bezvodnu naftu ili gas.

Kod eksploatacije naftnih polja postepeno dolazi do povećanja količine vode tokom eksploatacije. Sadržaj proizvedene vode tokom eksploatacije može da dostigne i novo od 95 - 98%. Zbog toga je važno znati kakav efekat ima formiranje vode u procesu eksploatacije nafte i gasa.

U kolektorima sa naftom i gasom, na kontaktima gas-voda, nafta-voda, zapaže se kapilarno podizanje vode, a na kontaktu gas-nafta, podizanje nafte.

2. Prirodne bitumije

Sve stene koje izgrađuju zemljinu koru dele se na osnovu načina postanka u tri grupe:

- a. Magmatske
- b. Sedimentne
- c. Metamorfne

Sedimentne stene u čiji okvir spadaju i prirodne bitumije, dele se na osnovu nastanka na stene koje su nastale na suvom-kontinentalne i stene koje su nastale pod vodom-podvodne stene (rečni, jezerski i morski sedimenti).

Obrazovanje podvodnih sedimenata može nastati na tri načina, te razlikujemo tri osnovne vrste takvih stena:

- a. Klastične (mehanogeni sedimenti)
- b. Hemijske (hemogeni sedimenti)
- c. Organske (organogeni sedimenti)

Stene organskog porekla ili bioliti postale su od nagomilanih ostataka životinja i biljaka, te se dele na grupu zoogenih i biogenih stena.

Neke stene organskog porekla, kao na primer: koralski, brizojski i drugi krečnjaci, dijatomejska zemlja i druga nisu zapaljivi. Nasuprot njima, u zemljinoj kori postoje i organogene stene koje imaju strukturu formiranu od ugljenika i njegovih jedinjenja. Takve stene su zapaljive i mogu da sagorevaju pa predstavljaju fosilna goriva. Prema osobini da li mogu da gore ili ne, H.Potonié (H.Potonié), je podelio stene organskog porekla na kaustobiolite, tj. organogene stene koje gore i akaustobiolite, stene koje ne gore.

Reč „kaustobiolit“ je sastavljena iz grčkih reči kausto-gorući, bios-život i litos-kamen.

H.Potonié je predložio podelu kaustobiolita na tri osnovna reda:

- a. Sapropeliti
- b. Humoliti
- c. Liptobioliti

Prema *H.Potonié* u red sapropela spadaju, prirodni gorući gasovi, nafta i prirodni produkti njenog preobražaja kao što su asfalt i ozokerit. U red humulita spadaju ugljevi, što znači da ovaj red obuhvata mnogobrojne organske materije biljnog porekla u svim stepenima njihovog preobražaja od biljnog organskog ostatka do čistog ugljenika ili grafita.

Liptobioliti predstavljaju produkte preobražaja nekih specifičnih organskih materija, pretežno biljnog porekla, kao što su smole, voskovi, balzam, sterini, polen i sl. U ovu grupu kaustobiolita spadaju minerali iz grupe jantara i smola.

Glavni nedostatak ove podele je što ona u osnovi nije genetska, s obzirom da se ugljevi obrazuju iz humusa i iz sapropela. S druge strane ugljovodonici i smolaste materije koje grade naftu, takođe se obrazuju iz sapropelnog i iz humusnog materijala.

Polazeći od ovako postavljenih shvatanja o postanku kaustobiolita *I.M.Gubkin* ih deli u dve osnovne grupe:

- a. Ugljeve
- b. Bitumije

Pod pojmom bitumija, *H.Hefer* podrazumeva prirodne goruće gasove, naftu i čvrste bitumije, koje su genetski vezane za naftu.

Ugljevi, prema materijalu od koga su nastali mogu biti: humusni ili humulitni, sapropeliti i liptobioliti.

U sastav bitumija i ugljeva ulaze isti hemijski elementi koji se nalaze i u živoj materiji: ugljenik, vodonik, kiseonik, azot i sumpor. No i pored toga, bitumije se razlikuju od ugljeva po mnogim osobinama, pa i po količinskom odnosu biogenih elemenata koji ulaze u njihov sastav, a naročito po odnosu ugljenika prema vodoniku.

U bitumijama se taj odnos kreće u uskim granicama od 6 do 8 %, dok u humusnim ugljevima taj odnos varira od 10-40 %. Za grupu sapropelita i liptobiolita taj odnos iznosi od 7-10 %, te ovi ugljevi čine prelaz između humusnih ugljeva i bitumija.

Grupa bitumija se razlikuje od ugljeva i po načinu pojavljivanja u zemljinoj kori, kao i po načinu formiranja svojih ležišta, što je posledica suštinskih razlika.

Bitumije se po organskoj teoriji stvaraju postupkom bitumizacije, koji se sastoji od razlaganja organskih materija, naročito masnoća, bez prisustva kiseonika, pod specifičnim uslovima i njihovim preobražajem u naftu.

2.1. Klasifikacija kaustobiolita i bitumija

U suštini za sada konačna i prava genetska klasifikacija kaustobiolita ne postoji, usled još nedovoljnog poznavanja geneze svih kaustobiolita. Iz ovog razloga često se upotrebljavaju klasifikacije po *H.Potonié* i *M.Gubkinu*, zasnovane na fizičkim osobinama kaustobiolita. Po toj klasifikaciji svi poznati kaustobioliti dele se na:

- a. Gasovite (gorući gasovi-naftni, ugljeni i ostali)
- b. Tečne (nafta)
- c. Čvrste (ugljeve, asfalte, ozokerite...)

Na IV svetskom petrolejskom kongresu-održanom u Rimu 1955 godine bila je predložena sledeća klasifikacija kaustobiolita ili bitumija:

I Petrobitumije (rastvorljive)

- a. Prirodni naftni gas
- b. Sirova nafta
- c. Prirodni asfalt
- d. Ozokerit
- e. Asfaltit

II Kerobitumije (nerastvorljive)

- a. Organske materije iz naftnih matičnih stena
- b. Kerogen
- c. Fosilne mikroalge

III Ugljevite materije-karbobitumije (nerastvorljive)

- a. Treset
- b. Lignit
- c. Ugalj
- d. Antracit

2.2. Petrobitumije

Predstavljaju smešu ugljovodonika i materija, koje po pravilu imaju ugljovodonični karakter i sadrže izvesne količine sumpora, kiseonika i azota.

Petrobitumije se sreću u prirodi u tri agregatna stanja: čvrste, tečne i gasovite.

Čvrste i tečne bitumije su rastvorljive u ugljendisulfidu i hloroformu.

Prirodni naftni gas, kao predstavnik gasovitih petrobitumija, sastavljen je od ugljovodonika, koji se kondenzuju na temperaturi od 20°C i atmosferskom pritisku (metan, etan, propan, butan...). Pored ovih ugljovodonika u gasu se mogu nalaziti u manjim količinama i teži ugljovodonici (pentan, heksan...), kao i azot, ugljendioksid, sumporvodoničnik, plemeniti gasovi i možda vodonik.

U prirodnim podzemnim uslovima naftni gasovi mogu biti i u tečnom stanju.

Sirova nafta je tečna petrobitumija. Predlaže se da se naftom smatra ona petrobitumija koja se nalazi u tečnom stanju na temperaturi od < 20°C.

Prirodni (neutralni) asfalt je čvrsta petrobitumija, koja se nalazi u žitkom i čvrstom stanju na temperaturi >20°C.

Po *Francuskom naftnom institutu (L'Institut Français du Pétrole)* sirovom naftom može se smatrati ona petrobitumija, koja sadrži >50% uljnih komponenti, a asfaltom, ako je sadržaj uljnih komponenti < 50%.

Ozokerit je čvrsta petrobitumija. Boja ozokerita varira od žute do tamnomrke (braon) i ima tačku topljenja između 65-85 °C. Ozokerit se sastoji uglavnom od ugljovodonika sa mikrokristalnom strukturom, u kojima se nalaze male količine tečnih komponenta.

Asfaltit je crna i tamnomrka (braon) petrobitumija, sa tačkom topljenja preko 110 °C. Asfaltit se dosta dobro rastvara u ugljendisulfidu i hloroformu, a samo delimično u ugljenik tetrahloridu.

3. Tečne petrobitumije-nafta

3.1. Sastav i fizičke karakteristike nafte

3.1.1. Sastav

Nafta (zemno ulje, petroleum, crude oil) - na molekulskom nivou sadrži ugljikovodonična jedinjenja kao i organska jedinjenja sumpora, azota i kiseonika, a mogu biti prisutni i metali ali u manjoj količini. I ako se nafta uglavnom sastoji od ugljikovodonika, vrstu i način njene finalne obrade, uglavnom, određuje njen neugljikovodični sastav (jedinjenja sumpora, kiseonika i azota). Organska jedinjenja sumpora, azota i kiseonika imaju tendenciju koncentriranja u naftnim frakcijama s višim temperaturama ključanja i na taj način bez obzira na njihov početni sadržaj u sirovoj nafti znatno otežavaju obradu tih naftnih frakcija. Ugljikovodični deo nafte većinom se sastoji od parafinskih, naftenskih i aromatskih organskih jedinjenja. Olefinska jedinjenja se uobičajeno ne nalaze u sirovoj nafti, kao ni acetilenski ugljikovodonici.

Udeo parafina u sirovoj nafti zavisi od vrste nafte, međutim, uopšteno, se udeo parafinskih ugljikovodonika smanjuje s povećanjem molekulske mase. U benzinskim frakcijama će udeo parafinskih ugljikovodonika dostizati 80 %, dok će u mazivim uljima iznositi i do 30 %. Količina različitih jedinjenja nekog homolognog niza, znatno, varira s obzirom na njihov apsolutni i relativni sadržaj. U bilo kojoj frakciji sirove nafte može postojati manji broj jedinjenja koje čine veći dio sadržaja te frakcije, a vrsta tih jedinjenja zavisiće od prirode izvornog materijala kao i od relativnog sadržaja pojedinih jedinjenja koji preovladavaju u uslovima stvaranja sirovine.

Elementarni sastav - prosečno (%):

C 83-87	↗ Parafini: n-, izo-, razgranati
H 11-14	
S 0.5-6	Ugljovodonici → Cikloparafini (= nafteni)
N 0.1-2.0	↘ Aromati → derivati benzena
O 0.05-1.5	

Metali u tragovima (najvažniji): Fe, Al, Ca, Mg, Ni, V.

3.1.1.1. Parafini

Parafini su zasićeni ugljikovodonici s opštom formulom: C_nH_{2n+2} (alkani); mogu biti ravno lančani (normalni, n-parafini) ili razgranati (izoparafini). Lakši gasoviti parafini, C_1-C_4 , nalaze se rastvoreni u nafti ili u ležištima prirodnog gasa gde im je udeo veći od 95 %, a pretežno su to metan, etan, propan, butan, izobutan i 2,2-dimetilpropan. Tečni parafini, C_5-C_{17} , najzastupljenija su parafinska ugljikovodična jedinjenja u nafti, a njihova temperatura ključanja raste s porastom molekulske mase. Njihov sadržaj u nafti je 30 - 70%. S povećanjem broja ugljenikovih atoma u

parafinskim jedinjenjima progresivno raste i broj mogućih izomera ($C_6...5$ izomera, $C_{12}...355$ izomera, $C_{18}...60532$ izomera) koji imaju veći oktanski broj od n-parafina.

Čvrsti parafini, $C_{16}-C_{78}$, prisutni su u svim naftama, otopljeni ili dispergovani, s različitim udelima koji često mogu biti i do 5%, ali u nekim naftama je utvrđen njihov viši sadržaj 7%, odnosno 12 %, od čega oko 50 % čine n-parafini.

3.1.1.2. Cikloparafini

Cikloparafini (cikloalkani) su zasićeni aliciklični ugljovodonici sa opštim formulama: za monociklične, C_nH_{2n} (cikloalkani, nafteni), biciklične C_nH_{2n-2} , triciklične C_nH_{2n-4} i tetraciklične C_nH_{2n-6} . Od monocikličnih ugljovodonika u nafti su prisutni u značajnoj količini petočlani i šestočlani nafteni. S obzirom na strukturu pored monocikličnih, bicikličnih cikloparafina u nafti se mogu naći i kondenzovane ciklične structure (analizama su određene strukture sa bočnim lancima do 30 C atoma i kondenzovani spojevi sa 4 i više prstenova).

Cikloparafini su najzastupljenija ugljovodonična jedinjenja u nafti i može ih biti od 25 do 75%. Njihov sadržaj u nafti raste sa povećanjem molekulske težine nafte.

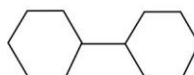
1. Monociklični parafini



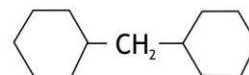
Ciklopentan



Cikloheksan

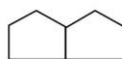


Dicikloheksil



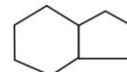
Dicikloheksilmetan

2. Biciklični cikloparafini (združeni prstenovi)



Diciklo (3,3,0) oktan

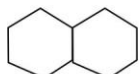
Pentalan



Diciklo (4,3,0) nonan

hidrindan

3. Kondenzovani cikloparafini



Diciklo (4,4,0)

dekan
dekalin



Diciklo (2,2,1)

heptan
nonbornan



$C_{10}H_{16}$

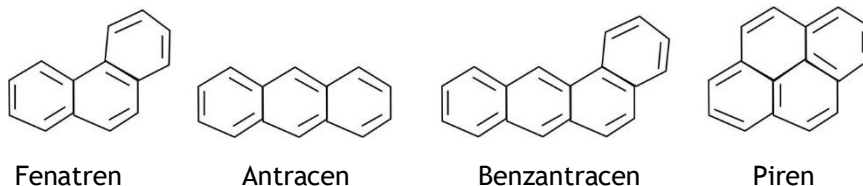
adamantan

3.1.1.3. Aromati

Aromati (areni) su ugljovodonična jedinjenja čiji su molekuli prisutni u cikličnom – konjugovanom sistemu. Uglavnom njihovu osnovu čine benzenovi prstenovi, a u nafti se nalaze sa udelom između 10 i 20 % (posebno do 30 %). Najvažniji aromatski jedinjenja u nafti su pored benzena i njegovih homologa (toluen, etilbenzen, o-, m-, p-ksileni), biciklični aromati: naftalen i njegovi

homoloji, triciklični aromati: fenantren, antracen i njihovi homoloji i tetraciklični aromati: piren, homoloji i dr. (manje od 3 %).

Derivati naftalena:

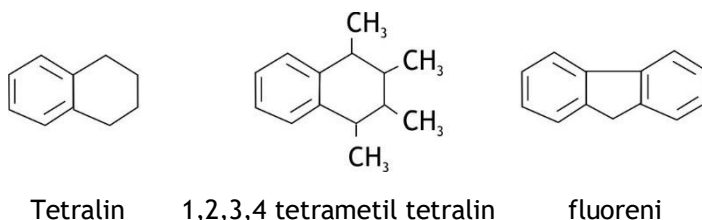


3.1.1.4. Hibridni ugljovodonici

Hibridni ugljovodonici (ceresins) su ugljovodonična jedinjenja koja sadrže strukturne karakteristike aromata i cikloparafina. Čine ih mešovite strukture parafina-naftena, parafina, aromatičnih ugljovodonika i nafteni-aromati. U osnovi oni su čvrsti alkani sa dugim lancima sa smešom ugljovodonika koji sadrže ciklične ili aromatične prstenove.

Oni su glavni deo parafinskog depozita u procesima proizvodnje i prerade. Tetra- i penta- ciklični ugljovodonici nađeni su u teškim frakcijama gasnih i mazivih ulja.

Hibridni ugljovodonici:



3.1.1.5. Heteroatomska jedinjenja

To su ugljovodonici, u kojima je molekulsku strukturu uključen kiseonik, sumpor, azot i metali. U heteroatomska jedinjenja spadaju:

1. **Oksigenati** - fenoli, naftenske kiseline, masne kiseline, itd. Sadržaj u nafti im je od 0.1 do 1%;
2. **Sumporna jedinjenja** - merkaptani, sulfidi, disulfidi, tiofeni itd, Sadržaj u nafti im je od 0,1 do 1-6%;
3. **Azotna jedinjenja** - amini, piridin, hinolin, pirol, sl, kao i njihove derivati, sadržaj u nafti im je od oko 0,02 do oko 0,4 -1%;
4. **Porfirini** - imaju strukturu baze, koju čine četiri pirolova prstena sa koordinacionim jedinjenjima vanadijuma, nikl, itd. Sadržaj u nafti im je manji od 1%;
5. **Smole i asfaltene** - visoko molekularna jedinjenja koja sadrže dva ili više heteroatoma; Sadržaj u nafti im je od 1 do 35%.

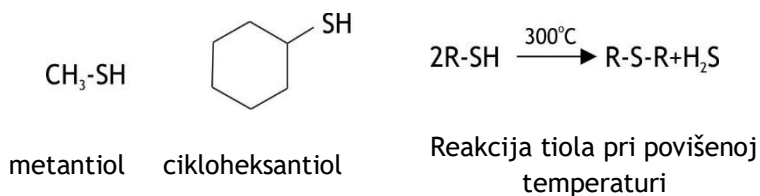
Najveća količina heteroatomskih jedinjenja nalazi se u naftnim frakcijama velike molekulske mase, koja ima temperaturu ključanja iznad 300 °C. U naftama

iz Zapadnog Sibira sadržaj heteroatoma je i do 15%. Pored heteroatoma nafte sadrže i male količine minerala i vode.

3.1.1.6. Sumporna jedinjenja

Sumporna jedinjenja su jedna od najvažnijih heteroatomskih organskih jedinjenja koja se nalaze u nafti s udelom između 0.1 i 2 % (vrlo retko do 7 %). U nafti je prisutno više od 200 različitih sumpornih jedinjenja, a najčešće su to sumporovodonik, merkaptani (tioli), sulfidi, disulfidi, i tiofeni.

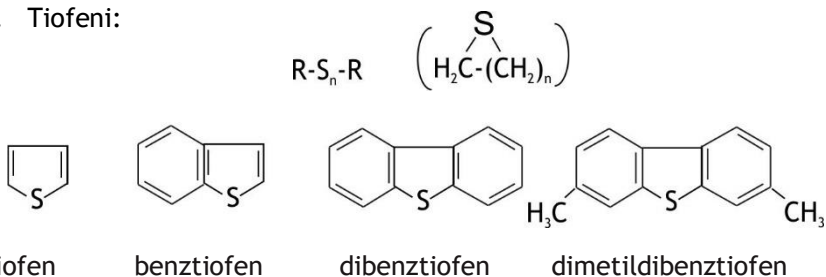
1. Merkaptani (tioli): imaju opštu formulu: R-SH, korozivni su i vrlo neugodnog mirisa (etiltiol, C₂H₅-SH, oseća se pri koncentracijama 0.6-0.02 mg/kg)



2. Sulfidi: imaju opštu formulu: R-S-R, disulfidi: R-S-S-R,

Polisulfidi: R-S_n-R

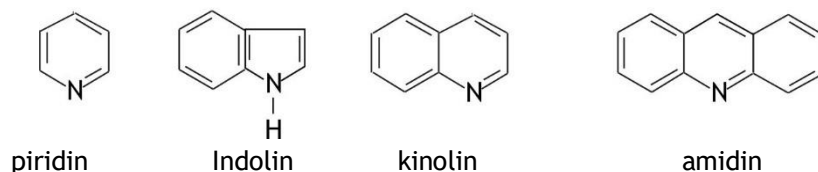
3. Tiofeni:



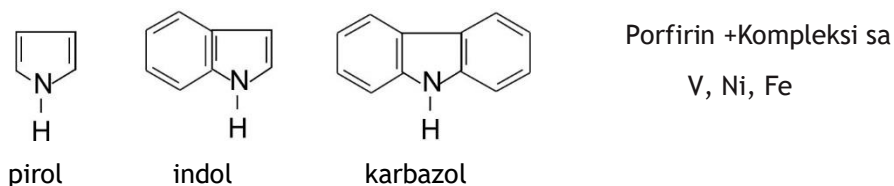
3.1.1.7. Azotna jedinjenja

Azotna jedinjenja - prisutna su u nafti u udelima koji variraju između 0.02 i 1.5 %, a mogu biti bazni (izdvajaju se s H₂SO₄) i neutralni.

Bazni (cca.30%):



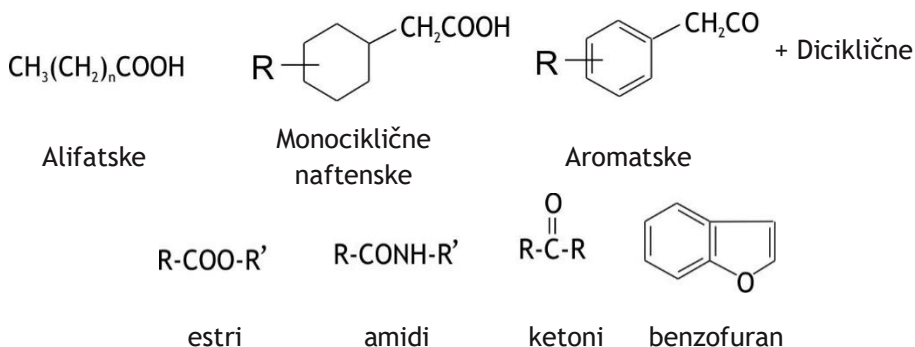
Neutralni (cca.70%)



3.1.1.8. Jedinjenja kiseonika

Jedinjenja kiseonika se u nafti mogu nalaziti u različitim oblicima organskih jedinjenja te je njihov udeo uobičajeno manji do 2%. Organska kiseonikova jedinjenja na višim temperaturama su vrlo korozivna.

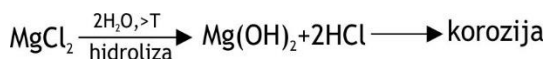
Karboksilne kiseline



3.1.1.9. Metali

Metali - V, Ni, Fe, Mo, Cu, Na, Si, Al, Zn i njihova jedinjenja koja se pojavljuju u sirovoj nafti s udelima između 0.02 i 0.03% imaju veliki uticaj na kvalitet nafte u odnosu na njihov vrlo mali sadržaj. Taj uticaj se naročito manifestuje tokom finalne katalitičke prerade. Na primer, čak i tragovi gvožđa, bakra, a naročito nikla i vanadijuma u ulaznim sirovinama za katalitičko kreovanje utiču na smanjenje aktivnosti i pogoršanje selektivnosti katalizatora u tom procesu. Ovo ima za posledicu povećane prinose gasa i koksa, uz smanjenje prinosa primarnog proizvoda benzina. Metali koji se pojavljuju u značajnijim koncentracijama u izvornim sirovim naftama podeljeni su u dve grupe:

Cink, titanijum, kalcijum i magnezijum nalaze se u obliku soli i organometalnih sapuna koji imaju površinski aktivne karakteristike, a adsorbovani su na međufaznoj površini voda/nafta, čime se ponašaju se kao stabilizatori emulzija. Pri povišenoj temperaturi dolazi do hidrolize njihovih soli pri čemu nastaju spojevi koji prouzrokuju pojavu korozije.



Vanadijum, bakar, nikal i deo gvožđa nalaze se u obliku jedinjenja topljivih u nafti. Ovi metali imaju sposobnost stvaranja kompleksa s pigmentima pirola koji se nalaze u hlorofilu i hemoglobinu, delu izvornog biljnog i životinjskog materijala. Nikal i vanadijum često stvaraju i komplekse s porfirinom.

Frakcioni sastav nafte odražava sadržaj jedinjenja koja ključaju na pojedinim temperaturnim opsezima. Nafta ključa u veoma širokom temperaturnom opsegu - 28-540 °C.

- 28-180°C - široka benzinska frakcija;
- 140-200°C - vajt špirit;

- 180-320°C - široka kerozinska frakcija;
- 150-240°C - kerozin;
- 180-280°C- avionsko gorivo;
- 140-340°C - dizelsko gorivo (letnje);
- 180-360°C - dizelsko gorivo (zimsko);
- 350-500°C - široka uljna frakcija;
- 380-540°C - vakuumgasno ulje.

Frakcionisanje se vrši na AVT - atmosferskom i vakuum separatoru.

Primer sastava nafte - Ponca City (SAD):

1. Parafini

n- $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{R}$

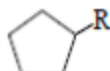
izo- $\text{CH}_3 - \text{CH}(\text{CH}_3) - \text{R}$

razgranati $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}(\text{CH}_3)_n - \text{R}$

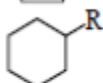
14%

} 18%

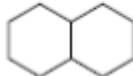
2. Cikloparafini



alkil-ciklopentani 10%

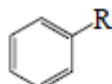


alkil-cikloheksani 6%

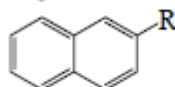


kondenzovani prstenovi 5%

3. Aromati

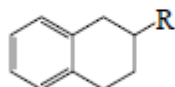


alkil-benzeni 18%

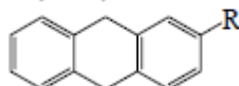


binuklearni 17%

tri + tetra 4%



arom. cikl. 5%



Fluoreni 3%

$\Sigma = 100\%$

3.2. Fizičke karakteristike nafte

Osnovna fizička svojstva nafte ujedno su fizička svojstva karakteristična za sve tečnosti. Prema *Aksinu* (1967) fizička svojstva nafte mogu se svrstati u pet grupa i to mehanička, optička, termička, električka i mirisna.

3.2.1. Površinski napon

To je svojstvo koje je vrlo važno pri migraciji nafte zbog razlike u površinskom naponu vode i nafte. Površinski napon je posledica međusobnog privlačenja molekula, silom koja je proporcionalna proizvodu njihovih masa, a obrnuto proporcionalna kvadratu njihovog rastojanja:

Molekul koji je udaljen od površine tečnosti ili dodira 2 tečnosti nalazi se u stanju ravnoteže, jer je okružena istovrsnim molekulima, pa je rezultanta privlačnih sila izbalansirana. No, molekuli na površini nisu okruženi istovrsnim molekulima jednakih masa, pa će rezultirajuća sila imati neku veličinu, te će se stvarati napetost površine oblikujući je poput opne (membrane). Da bi molekuli prešli preko te površine trebaju određenu količinu rada nazvanog površinska energija.

Odnosi između jedinica su sledeći: 1 erg=1 dyn·cm, 1 dyn=10⁻⁵ N, a 1 dyn·cm⁻¹ = 10⁻³ N·m⁻¹

3.2.2. Gustina

Gustina - definiše se kao masa uzorka u jedinici zapremine pri određenoj temperaturi, a izražava se u g / cm³; kg / m³.

$$\rho = m / V$$

Na gustinu naftnih frakcija utiče njihov hemijski sastav. Povećanje sadržaja aromatskih jedinjenja izaziva povećanje gustine dok povećanje sadržaja zasićenih jedinjenja izaziva smanjenje gustine naftne frakcije.

Obično gustina razdvojene (stabilisane i separisane) nafte je u opsegu 820-950 kg/m³. Gustine nafte su konvencionalno razdvojene u 3 opsega: lake nafte imaju gustinu u opsegu od 820-860; srednje u opsegu od 860-900, i teške od 900-950 kg/m³.

Što je niža gustina nafte, i što je lakša nafta, veći je prinos svetlih derivata (benzin, dizel, kerozin).

Relativna gustina (ρ^o) - definiše se kao odnos mase određene zapremine uzorka, nafte (ρ_n) i mase iste zapremine vode (ρ_w) na istoj temperaturi (ta temperatura za naftu je obično 21°C), pa je prema tome bezdimenziona veličina.

$$\rho^o = \frac{\rho_n}{\rho_w}$$

Gustina (ρ_n) i relativna gustina (ρ^o , specifična težina (d_n)) se ne poklapaju uvek.

Gustina i relativna gustina ugljikovodičnih naftnih frakcija dve su karakteristike koje imaju široku primenu za njihovu preliminarnu karakterizaciju. Gustina se još izražava i u stepenima °API (*API, American Petroleum Institute*), a izračunava se iz sledećeg izraza: