

# Uzorkovanje ležišnih fluida

---

Mesarić, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:238335>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**UZORKOVANJE LEŽIŠNIH FLUIDA**

Završni rad

Ivan Mesarić

N4423

Zagreb, 2022.

## UZORKOVANJE LEŽIŠNIH FLUIDA

IVAN MESARIĆ

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Svojstva fluida, odnos tlaka, volumena i temperature (engl. pressure-volume-temperature, PVT) sastavni su dio određivanja iscrpka nafte tj. karakterizacije ležišta i kao takve su vitalni alat u pokušajima poboljšanja proizvodnosti ležišta. Međutim, budući da je uzimanje i priprema, kao i sama eksperimentalna laboratorijska analiza dugotrajna i skupa, često se PVT studije temelje na analizama nekoliko (ili samo jednom) uzoraka fluida iz bušotine, tj. sa separatora na površini, koji se zatim primjenjuju na cijelo ležište. Stoga je od iznimne važnosti pridobiti reprezentativne uzorke jer su oni temeljni za pouzdanost i točnost proučavanja. Kritično za uspješno uzorkovanje fluida iz ležišta je ispravna primjena postupaka uzorkovanja i kondicioniranje bušotine prije i tijekom uzorkovanja. Postoje dvije opće metode uzorkovanja - uzorkovanje s površine i dubinsko uzorkovanje u bušotini, na dubini intervala od interesa. Razmotrit će se metode uzorkovanja za svaku vrstu ležišta s naglaskom na scenarije u kojima se pojavljuju poteškoće, kao što su gotovo blizu-kritični ležišni fluidi i zasićena ležišta.

Ključne riječi: uzorkovanje, bušotina, ležišni fluidi, PVT analize, reprezentativni uzorak

Završni rad sadrži: 24 stranice, 3 slike i 22 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNF  
Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 21.9.2022, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS KRATICA .....</b>	<b>II</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. POVIJEST HVATAČA UZORAKA.....</b>	<b>3</b>
<b>3. PROCESI U RAZLIČITIM VRSTAMA LEŽIŠTA.....</b>	<b>4</b>
3.1. Podzasićena ležišta nafte .....	4
3.2. Zasićena ležišta nafte .....	4
3.3. Ležišta plina/kondenzata.....	5
3.4. Oporavak uzoraka loše kvalitete .....	6
3.5. Priprema (kondicioniranje) bušotine .....	7
3.6. Obrasci valjanosti za uzorke iz bušotine.....	9
<b>4. TEHNIKE UZORKOVANJA .....</b>	<b>11</b>
4.1. Površinske tehnike uzorkovanja.....	11
4.2. Alati za podzemno uzorkovanje .....	11
4.2.1. <i>WFT-ovi</i> .....	11
4.2.2. <i>Protočni/konvencionalni uređaji za uzorkovanje s dna</i> .....	12
4.2.3. <i>Uređaji za uzorkovanje klipnog tipa</i> .....	13
4.2.4. <i>Jednofazni uređaji za uzorkovanje</i> .....	14
4.2.5. <i>Egzotermni uređaji za uzorkovanje</i> .....	14
4.3. Uzimanje uzoraka teške nafte .....	14
<b>5. OSTALE KOMPONENTE.....</b>	<b>16</b>
5.1. Asfalti .....	16
5.2. Parafin .....	16
5.3. Sumporni spojevi.....	17
5.4. Sadržaj žive .....	17
<b>6. STUDIJE SLUČAJA NEKONVEKCIONALNOG UZORKOVANJA.....</b>	<b>19</b>
6.1. Slučaj 1. – niskopropusno plinsko-kondenzatno ležište .....	19
6.2. Slučaj 2. - uzorak s plina s dna bušotine s previsokim tlakom zasićenja .....	19
6.3. Slučaj 3. - Uzimanje uzoraka iz neplanirane formacije .....	19
6.4. Slučaj 4. - Bušotina hlapljive nafte iz slabopropusne formacije .....	20
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>21</b>
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>22</b>

## **POPIS SLIKA**

<b>Slika 1-1.</b> Dubinsko uzorkovanje .....	2
<b>Slika 3-1.</b> Fazni dijagram nafte .....	5
<b>Slika 3-2.</b> Fazni dijagram fluida za koji je karakteristično retrogradno ponašanje.....	6

## **POPIS KRATICA**

CGR – Omjer kondenzat/plin (engl. *Condensate to Gas Ratio*)

DST – Ispitivanje bušenjem (engl. *Drill Stem Test*)

GOC – Kontakt plin/nafta (engl. *Gas Oil Contact*)

GOR – Omjer plin/nafta (engl. *Gas Oil Ratio*)

OAP – Početak taloženja asfaltena (engl. *Onset of Asphaltene Precipitation*)

OBM – Isplaka na bazi ulja (engl. *Oil Based Mud*)

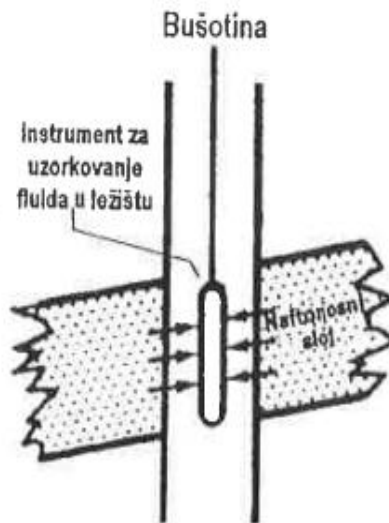
WFT – Hvatač uzoraka na žici (engl. *Wireline Formation Testers*)

## 1. UVOD

Uzorci ležišnog fluida uzimaju se iz više razloga, uključujući PVT analizu za naknadne inženjerske izračune, određivanje komponentnog sastava ugljikovodika (i drugih fluida) u određenom ležištu kako bi se razumjela ekonomska vrijednost fluida, poznavanje sadržaja, odnosno određenih komponenti poput sumpornih spojeva i ugljičnog dioksida te korozivnosti fluida za daljnje planiranje i buduće programe bušenja. Također je bitno poznavanje hidrodinamičkih i reoloških svojstava, tj. sposobnosti fluida da teče kroz proizvodne cijevi, cjevovode i druge vodove protoka te mogućih problema koji mogu nastati zbog promjena viskoznosti uzrokovanih taloženjem krutih tvari kao što je parafin i/ili asfalten te određivanje kontaminirajućih komponenti koje utječu na dizajn postrojenja, kao što je sadržaj žive, sumpornih komponenti i radioaktivnih komponenti.

Ako je tlak zasićenja približno jednak tlaku u ležištu, tada može biti prisutna druga faza. Ovo je osobito relevantno za ležišta plina, gdje se daljnjim bušenjem može pojaviti kondenzat. Reprezentativni uzorci uzeti tipičnim jednofaznim hvatačima uzoraka na dnu bušotine često se koriste za određivanje sastava ležišnog fluida, PVT analize i proučavanje asfaltena ovisno o ležištu. Međutim, ti alati često nisu prikladni za mjerenje sadržaja sumpornih spojeva ili žive. Dobro poznavanje sadržaja parafina i problema koji mogu nastati zbog parafina mogu se dobiti iz studija provedenih na nafti iz separatora. Sumporni spojevi i živa uglavnom su prisutni u struji plina, tako da se analiza može provesti na strujama plina separatora ili bušotine. Dok bi se idealno svi parametri mogli dobiti iz istog uzorka, u praksi različiti uzorci mogu odgovarati različitim potrebama. Najvažnije je utvrditi potrebu za uzorkom kako bi se mogli uzeti ispravni uzorci. Time se mogu izbjeći dodatni troškovi uzorkovanja za parametre koji se neće mjeriti ili trošak ponovnog uzorkovanja.

Cilj je ovog rada opisati različite metode uzorkovanja i kritički razmotriti za što su najprikladnije. Fokus je na dobivanju reprezentativnih uzoraka ležišnog fluida pomoću hvatača uzoraka na površini ili u dubini (slika 1-1.) te karakteriziranju proizvodnje iz ležišta.



**Slika 1-1.** Dubinsko uzorkovanje (Goričnik, 2006)



## 2. POVIJEST HVATAČA UZORAKA

Svojstva uzoraka fluida iz ležišta nafte i plina, u izvornim uvjetima i kako su pronađena u različitim fazama tijekom proizvodnje, predmet su interesa otkako naftna industrija ima ležišne inženjere. Kvaliteta ovih uzoraka od najveće je važnosti za donošenje ispravnih odluka o upravljanju ležištem. Također, stalno poboljšavanje podataka o sastavu pomaže razvoju budućnosti industrije u planiranju objekata. Očekuje se detaljniji opis svojstava fluida, a činjenicom da se mnogi stručnjaci u ovom području sada nazivaju „stručnjacima za osiguranje protoka“ (engl. *flow assurance experts*) naglašava se potreba za kvalitetnim podacima o sastavu, svojstvima fluida i faznom ponašanju. Metode uzorkovanja s dna bušotine postoje više od 60 godina (Reudelhuber, 1957; Fevang i Whitson, 1994), kada je većina operatera došla do vlastitog dizajna hvatača uzoraka iz bušotine. To su bili ili protočni uređaji koji su neprestano pročišćavali fluid ili prethodno ispražnjene komore koje su, kada su ih aktivirali satovi ili drugi mehanički uređaji, zarobljavale uzorke fluida iz bušotine.

Postojao je veći konsenzus u površinskom uzorkovanju i uglavnom su se svi složili oko toga kako uzorkovati iz separatora, a u nekim slučajevima i iz ušća bušotine. Inženjeri su od samog početka bili svjesni povremenog prijenosa kapljica fluida u plinsku fazu, a rani pokušaji izokinetičkog uzorkovanja isprva su zamijenjeni poboljšanjem svojstava odvajanja separatora povećanjem njihove veličine i/ili smanjenjem protoka kako bi se postigla ravnoteža (Fevang i Whitson, 1994). Najveći izazov leži u poboljšanju kvalitete sve popularnijih uzoraka uzetih pomoću opreme na žici (engl., *wireline formation testers, WFT*). WFT su prvi put uvedeni u industriju 1955. godine (Ayala et al., 1996). Glavna svrha alata bila je mjerenje početnog tlaka formacije i prikupljanje uzorka fluida. Tek sredinom 1970-ih došlo je do velikog napretka u razvoju alata. Uzorci uzeti ovim alatima bili su u potpunosti diskreditirani od strane stručnjaka za fluide sve do 1990-ih kada se tehnologija alata uvelike poboljšala baveći se problemima koji se posebno odnose na tipizaciju i uzorkovanje fluida. Upravo zahvaljujući tome, takvi su uređaji danas od nezamjenjive važnosti.

### 3. PROCESI U RAZLIČITIM VRSTAMA LEŽIŠTA

Odmah nakon što je bušotina izbušena, nastupa period čišćenja umjereno jakim protokom kako bi se bušaći fluidi istisnuli iz bušotine i područja oko nje (Reudelhuber, 1957; Towler, 1989; McCain i Alexander, 1992; Strong et al., 1993; El-Banbi i McCain, 2001; Cobenas i Crotti, 1999). Ovisno o tome koliko je fluid u ležištu podzasićen, pad tlaka izazvan za pokretanje protjecanja može rezultirati padom tlaka ispod tlaka zasićenja na različitim radijusima od bušotine. To će uzrokovati ili izlazak otopljenog plina (za naftne bušotine) ili retrogradnu kondenzaciju (za plinsko-kondenzatne bušotine).

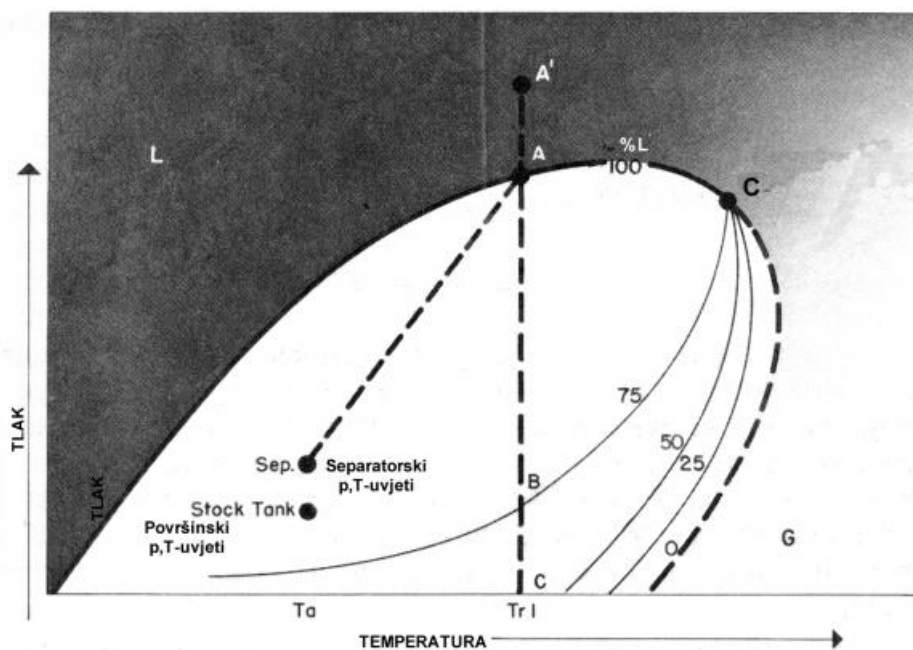
#### 3.1. Podzasićena ležišta nafte

Uzorkovanje nedovoljno zasićenih naftnih ležišta trebalo bi biti najjednostavnije. U idealnom slučaju, ako je ležište u točki pri tlaku i temperaturi daleko od tlaka zasićenja (izrazito podzasićen fluid) na dnu bušotine, ono može ostati iznad tlaka zasićenja i stoga će kroz bušotinu teći izvorni fluid iz ležišta. Ako se zbog protjecanja prilikom čišćenja ili bilo kojeg drugog razloga ležište spusti ispod tlaka zasićenja, tada se dvofazni fluid mora istisnuti s izvornim fluidom iz ležišta. To se može postići promjenom brzine protjecanja, čime se minimizira smanjenje tako da je dinamički tlak u dnu bušotine još uvijek iznad tlaka zasićenja. U početku će zbog učinaka kapilarnog tlaka oslobođeni plin otopine ostati nepokretan u prostoru pora sve dok se ne postigne kritično zasićenje plinom, a nakon toga može poteći višak plina. Na površini praćenje omjera plin/nafta (engl. *gas-oil ratio*, *GOR*) može pokazati kada treba započeti postupak uzorkovanja. U početku će *GOR* biti prenizak. Treba tražiti takav korak smanjenja tlaka da se nakon produljenog vremena uzorkovanja postigne stabilan *GOR*. Za uzorke s dna bušotine fluid koji ulazi u bušotinu mora biti jednofazni. Ako znatna količina vode teče zajedno s naftom, protok možda neće biti dovoljno velik da potisne vodu iz bušotine. Kako bi se izbjeglo uzorkovanje vode, prije uzorkovanja treba izmjeriti statički gradijent tlaka. Za površinske uzorke vrijedi da će, sve dok je fluid (pod pretpostavkom dvofaznog toka plina i fluida koji protječe u bušotinu i blizu bušotine) u istom omjeru kao izvorni fluid iz ležišta, uzorci iz separatora biti dobri.

#### 3.2. Zasićena ležišta nafte

Uzimanje uzoraka iz zasićenih ležišta nije jednostavno jer strujanje u ležištu rezultira smanjenjem brzine koje će dovesti do smanjenja dinamičkog tlaka na dnu bušotine ispod tlaka zasićenja (engl. *bubble point pressur*) (Reudelhuber, 1957; Towler, 1989; Strong et

al., 1993; Dake, 1994). Mogući problem koji bi se mogao pojaviti i koji treba izbjeći jest to što smanjenje brzine protjecanja nafte rezultira oslobađanjem otopine plina iz fluida u ležištu. Uzorci s dna bušotine se ne preporučuju jer mogu sakupiti neproporcionalnu količinu nafte ili plina (Towler, 1989). Zatvaranje bušotine radi ponovnog povećanja tlaka može ponovno otopiti plin u nafti (Towler, 1989), što pomaže postizanju stabilnog GOR-a, iako je ovo teško izvedivo. Nižom brzinom protjecanja može se naposljetku postići stabilizirani protok i može se promatrati konstantan GOR. Fluid, iako teče u dvije faze (dvofazno područje na slici 3-1.), nosi tekućinu i plin s istim GOR-om kao i fluid iz netaknutog ležišta. Ako je jedina opcija uzimanje uzorka s dna bušotine, uzorak treba uzeti pri malom protoku kako bi pad bio što je moguće manji, čime se minimaliziraju poremećaji otopljenog plina u porama i maksimizira plin otopine otopljen u tekućini. Ako postoji plinska kapa, tlak na kontaktu plin-nafta (engl. *gas-oil contact*, *GOC*) treba koristiti kao tlak zasićenja za fluid u ležištu ako je potrebna korekcija.

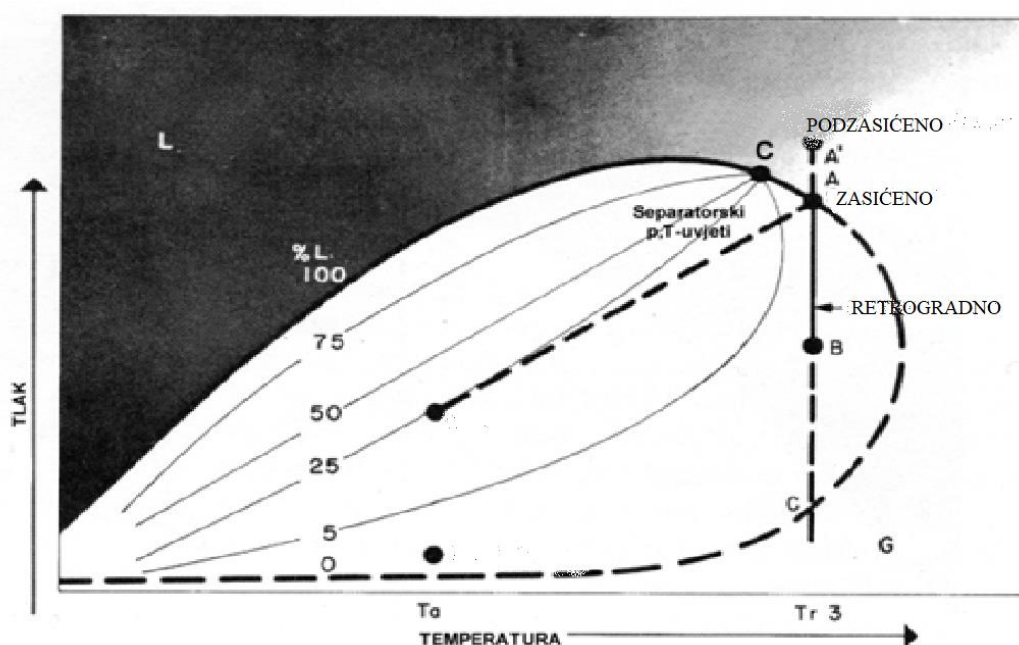


**Slika 3-1.** Fazni dijagram nafte (Vulin, 2015)

### 3.3. Ležišta plina/kondenzata

Slično podzasićenom naftnom ležištu, ako je plinsko-kondenzatno ležište premalo zasićeno te pod uvjetom da se tlak u bušotini ne spusti ispod tlaka rosišta, neće se pojaviti kondenzat (slika 3-2.). Ako je fluid u ležištu zasićen ili je tlak blizu tlaka rosišta, period protoka koji rezultira smanjenjem neizbježno će rezultirati pojavom kondenzata koji se izdvaja iz plina. Slično plinu u zasićenoj nafti, kondenzat koji u početku izlazi iz nafte ispunjavat će prostor pora sve dok se ne postigne kritična zasićenost. Ovaj fluid potrebno

je isprati s netaknutim fluidom iz ležišta. Kod površinskog uzorkovanja brzina protoka mora biti dovoljno velika da prenese kondenzat na površinu, ali ako je protok previsok, neće se postići stabilan protok i možda će čak doći do lošeg odvajanja u separatoru jer fluid ima malo vremena da postigne ravnotežu. Izdvajanje kondenzata u blizini bušotine ima i druge učinke, posebno u ležištima niske propusnosti: kako manje mobilni kondenzat ispunjava pore, tako se propusnost za plin smanjuje, ponekad ozbiljno utječući na protok. Smanjenje brzine protoka rezultira povećanjem tlaka na dnu bušotine i tlaka u malom radijusu drenaže. To uzrokuje ponovno isparavanje dijela kondenzata u porama smanjujući omjer kondenzata naprema plinu (engl. *condensate to gas ratio, CGR*) ispod onoga fluida iz netaknutog ležišta. Nakon smanjenja brzine protjecanja, mora se pričekati nekoliko dana ili čak mjeseci za ležišta niske propusnosti prije uzorkovanja (McCain i Alexander, 1992).



**Slika 3-2.** Fazni dijagram fluida za koji je karakteristično retrogradno ponašanje (Vulin, 2015)

### 3.4. Oporavak uzoraka loše kvalitete

Ako su dobiveni uzorci loše kvalitete, moguće je ponovno dobivanje uzoraka u laboratoriju. Međutim, to može rezultirati promjenama u sastavu tako da bi se trebalo primijeniti samo ako ponovno uzorkovanje nije održivo. Treba donijeti prosudbu o tome koliko je loša kvaliteta početnog uzorka i kolika će biti promjena u sastavu uslijed sljedećih procesa. Razlika u sastavu i naknadno izmjerenim PVT parametrima može biti mala i stoga unutar prihvatljive granice pogreške. Ako dobiveni uzorci imaju tlak zasićenja

iznad tlaka u ležištu, još se uvijek može dobiti reprezentativan uzorak. Ako dobiveni uzorci imaju nizak GOR i dostupan je separatorski plin ili plin na ušću bušotine, može se dodati dodatni plin za podizanje GOR-a na tlak u ležištu. To rezultira malo drugačijim sastavom, jer će plin imati drugačiji sastav (lakši) od plina otopine. Jednadžba stanja ili korelacije mogu se koristiti kao pomoć pri izračunavanju volumena plina potrebnog za povećanje tlaka zasićenja. Za sustave plin/kondenzat, ako prikupljeni uzorak ima previsoki tlak zasićenja, tj. tlak rosišta (engl. *dew point*) i omjer kondenzat/plin (engl. *condensate to gas ratio*, *CGR*), reprezentativni uzorak još se uvijek može dobiti uspostavljanjem ravnoteže u PVT ćeliji pri uvjetima ležišta. Nakon što se postigne ravnoteža i višak kondenzata je u tekućoj fazi, plinovita faza se poduzorkuje iz PVT ćelije. Ovaj proces daje uzorak plina koji je zasićen u uvjetima ležišta.

### 3.5. Priprema (kondicioniranje) bušotine

PVT uzorci trebaju predstavljati fluid koji se proizvodi iz ležišta. Što se prije bušotina nakon bušenja uzorkuje, to su veće šanse za reprezentativno uzorkovanje, jer je vjerojatnije da se nisu dogodili padovi tlaka koji mogu stvoriti dvije faze u ležištu (Amyx, et al., 1960; Dake, 1994). Ako je ležišni fluid u blizini bušotine podijeljen u dvije faze, primjenjuje se kondicioniranje bušotine kako bi se ispravio ovaj učinak i jednofazni fluid vratio natrag u bušotinu i njezinu blizinu. Budući da se WFT općenito izvodi odmah nakon bušenja, kada još nije došlo do protoka ili pada, obično nije potrebno nikakvo rigorozno kondicioniranje, osim eliminacije što je više moguće fluida za bušenje. Ovo je posebno važno kada je tijekom bušenja korištena isplaka na bazi nafte (engl. *oil based mud*, *OBM*). Fluid za bušenje uklanja se tako da prolazi preko raznih senzora, a zatim u prstenasti prostor dok se ne dobiju indikacije maksimalne čistoće (Michaels et al., 1995). Nakon toga se protok fluida usmjerava u komoru za uzorke. U slučaju konvencionalnog ili jednofaznog uzorkovanja iz otvora na dnu, pitanje kondicioniranja bušotine važnije je jer će bušotina već proći kroz period protoka prije uzorkovanja. Razdoblje protoka će rezultirati smanjenjem i stoga postoji potreba za većom razboritošću prilikom kondicioniranja bušotine za uzorkovanje. Izlaganje ležišnog fluida tlakovima u ležištu koji su niži od originalnih može uzrokovati prijelaz fluida u dvije ili tri faze, ovisno o njegovom tlaku zasićenja i ponašanju faze. Tlak će se morati povećati iznad tlaka zasićenja uz postupni pristup kratkim periodima protoka i periodima zatvaranja s nižim brzinama kako bi se fluid koji teče kroz bušotinu vratio u svoje izvorno stanje. To se nastavlja sve dok se ne uspostavi najniža brzina protjecanja pri kojoj postoji stabilan GOR. Kada se to dogodi, to

znači da jednofazni fluid teče u bušotinu. Nakon toga obično slijedi dulje razdoblje zatvaranja kako bi se povećao tlak na dnu bušotine. Ovaj stabilni GOR može se potvrditi metodom pokušaja i pogreške uzorkovanjem s dna bušotine, što je skupo; može se pretpostaviti zbog stabilnog tlaka na ušću bušotine nakon nekoliko razdoblja smanjenog protoka; ili se može odrediti mjerenjem GOR-a tijekom proizvodnje kroz ispitni separator. U posljednjem slučaju uvijek treba uzeti uzorke separatora kako bi se potvrdila kvaliteta uzoraka s dna bušotine i kako bi se osigurali rezervni uzorci. Uzimanje konvencionalnih ili jednofaznih uzoraka iz bušotine obično je, ali ne uvijek, izvedeno zajedno s ispitivanjem bušotine kroz površinski separator. Ispitivanja bušotine dat će tlak u bušotini različitih brzina. Jednofazni fluid treba vratiti u bušotinu. To je najlakše učiniti ako povijest protoka pokazuje da isti nije bio ispod procijenjenog tlaka zasićenja. U slučaju da to nije poznato, mora se pretpostaviti najgori mogući scenarij (da je fluid u ležištu zasićen) i bušotina mora biti kondicionirana kao takva. Ako se uzimaju površinski uzorci, kriterij postojanja jednofaznog reprezentativnog ležišnog fluida u zatvorenoj bušotini zamjenjuje se priljevom dvofaznog fluida gdje plin i nafta teku na GOR-u izvornog ležišnog fluida. Iako se isti principi kondicioniranja primjenjuju za uzorkovanje (engl. *drill stem test, DST*), oni se obično ne koriste jer se ti uzorci obično uzimaju samo za identifikaciju fluida i za određivanje svojstava fluida u spremniku. Međutim, ako je fluid nedovoljno zasićen, uzorci s dna bušotine dobre kvalitete mogu se dobiti u DST hvatačima uzoraka za uzorkovanje. Nadalje, ako se DST može produžiti dovoljno dugo kroz separator, mogu se dobiti uspješni uzorci fluida u separatoru PVT kvalitete. Ako je izbor bušotina dostupan za uzorkovanje, bušotine s boljom produktivnošću trebale bi imati veće tlakove u bušotini. Prilikom odabira reprezentativne bušotine za uzorkovanje, najbolja bušotina za uzorkovanje bit će ona s najvećim tlakom u bušotini pri stabiliziranom protoku i GOR. Ako se vidi povećanje GOR-a, to znači da se proizvodi slobodni otopljeni plin, a uvjeti zasićenja na dnu bušotine neće dati reprezentativne uzorke. Treba izbjegavati bušotine koje proizvode vodu; međutim, ako se to ne može učiniti, važno je pokrenuti ispitivanje statičkog gradijenta kako bi se pronašao kontakt nafta/voda unutar bušotine s ciljem uzorkovanja iznad te dubine. Ako su uzorci potrebni za analizu asfaltena, potrebno je poduzeti sve pokušaje da se pad smanji na minimum. Ako se kapljevina spusti ispod tlaka početka taloženja asfaltena (Jamaluddin et al., 2001), tada će uzorak trebati ponovno kondicionirati u laboratoriju prije analize. Ne postoji konsenzus o metodi ponovnog kondicioniranja uzoraka s asfaltenima koji su bili ispod tlaka na kojem se počinju taložiti asfalteni (engl., *onset-of-asphaltene-precipitation, OAP*) ili čak razmišljanja o tome može

li se to učiniti. Međutim, često se postiže ili se pokušava upotrebom produljenog razdoblja (tjedno) održavanja uzorka na tlaku i temperaturi u ležištu ili višoj i povremenog preokretanja uzorka. To se radi s namjerom ponovnog otapanja istaloženih asfaltena. Ako je moguće, uzorci se uzimaju u idealnim uvjetima (jednofazni), ali ako to nije moguće, tu se činjenicu mora prihvatiti. Ponovno kondicioniranje je stoga od najveće važnosti u ovim okolnostima kako bi se osiguralo dobivanje najboljeg prolaznog i najreprezentativnijeg uzorka. Za plinsko-kondenzatna ležišta preporučuje se površinsko uzorkovanje kroz stabilni separator. Bušotina se obično proizvodi uzastopno većim brzinama (McCain i Alexander, 1992). Retrogradno ispadanje fluida dogodit će se nakon što se ležište povuče u dvije faze. Ovaj fluid će se akumulirati u područje u blizini bušotine: ali na kraju, s kontinuiranim protokom fluida kroz te prostore pora, taj isti fluid će se mobilizirati i njegova će proizvodnja rezultirati konstantnom CGR. Najbolji uzorci će se uzeti pri najnižoj brzini protjecanja koja proizvodi stabilnu CGR, ali preporučuje se uzimanje dvostrukih kompleta i pri drugim brzinama. Priprema uključuje čišćenje/pročišćavanje bušotine, separatora, opreme za žičano uzorkovanje i cilindara.

### 3.6. Obrasci valjanosti za uzorke iz bušotine

Što se više provjera kvalitete uzetih uzoraka napravi na licu mjesta, to je lakše odlučiti o tome je li potrebna promjena procesa kondicioniranja kako bi uzorkovanje bilo poboljšano. Potrebno je provjeriti tlak za otvaranje i tlak zasićenja na površini. Ključno je mjerenje tlaka otvaranja svakog uzorka uzetog s dna bušotine. Tlak otvaranja komore sa uzorkom različitih uzoraka iz iste formacije trebao bi biti unutar prihvatljive granice pogreške i trebao bi se usporediti s tlakom u bušotini. S konvencionalnim uzorcima (nepojedinačna faza), tlak zasićenja može se mjeriti u površinskim uvjetima s različitim stupnjem točnosti. Točna mjerenja lako su se postigla u nekoliko godina mjerenjem tlaka zasićenja pomoću žive s konvencionalnim protočnim hvatačima uzoraka. Ovo više nije opcija, ali se može primijeniti isti princip. S uređajem za uzorkovanje klipnog tipa, mjerenje će biti točno ako alat unutra sadrži mehanizam za miješanje. Mjerenja zasićenja tlaka uzoraka iz iste formacije treba zatim međusobno usporediti, a ti se uzorci tada mogu odvesti do uvjeta u ležištu i koristiti za provjeru uzorka. Ponekad se utvrdi da je tlak zasićenja viši od tlaka u bušotini što znači da uzorci nisu reprezentativni i da je prikupljeno previše plina. Ako su uzeti jednofazni uzorci, tlak otvaranja je unaprijed postavljen i samim time bez vrijednosti. Tlak zasićenja se može mjeriti, ali u tom se slučaju mora žrtvovati ili jedan uzorak iz serije ili mali dio svakog uzorka. Međutim, provjere valjanosti su kompliciranije, skuplje i

zahtijevaju više opreme. Ako se neke analize provode na licu mjesta, primjerice, mjerenje tlaka točke zasićenja (temperatura površine ili temperatura bušotine) ili analize za dobivanje GOR-a, valjanost uzorka može se odmah odrediti usporedbom jednog uzorka sa sljedećim te potvrđivanjem utvrđenih vrijednosti s podacima proizvodnog ispitivanja.



## 4. TEHNIKE UZORKOVANJA

S obzirom na mjesto uzorkovanja, tehnike se mogu podijeliti na površinske i podzemne, a za tešku naftu primjenjuju se kombinirane tehnike.

### 4.1. Površinske tehnike uzorkovanja

Ovisno o stanju fluida koje će se uzorkovati, biraju se tehnike s različitih dijelova površine. Za fluide ležišta plinskog kondenzata ili zasićene crne i hlapljive nafte koriste se uzorci iz ispitnih ili proizvodnih separatora. Fluid i plin ravnotežnog separatora rekombiniraju se u svom proizvedenom omjeru kako bi se dobili reprezentativni uzorci fluida iz ležišta. S druge strane, za nedovoljno zasićene fluide koji su još uvijek u jednoj fazi, koriste se uzorci s ušća bušotine. Kod razmjerno-kondicioniranog homogenog dvofaznog protoka kroz mini separator primjenjuje se izokinetičko uzorkovanje. Moguća je i opcija uzorkovanja iz cjevovoda ili protočnih vodova postrojenja. Neovisno o odabranom načinu, bitno je osigurati da stvarni dobiveni fluid bude što bliži netaknutom fluidu otkrivenom u ležištu čime se osigurava da uzorak bude što reprezentativniji. Sve bušotine obično moraju biti kondicionirane da dovedu takav fluid u bušotinu ili separator. Budući da je ovaj proces kompliciraniji nego što zvuči, preporuča se uzimanje uzoraka na više načina, dakle dobivanje različito kondicioniranih fluida iz istog ležišta, kako bi se bolje definirala njegova svojstva. Nova saznanja omogućuju razlučivanje između jednostavnijih situacija s jednostavnijim rješenjima uzorkovanja te složenijih problema za koje je potrebno osmisliti naprednija rješenja.

### 4.2. Alati za podzemno uzorkovanje

#### 4.2.1. WFT-ovi

Reprezentativni uzorci često se uzimaju s WFT-ovima (Jamaluddin et al., 1999). Ako je to slučaj, može se izbjeći dodatni trošak kasnijeg dobivanja uzoraka s dna bušotine. Stoga, umjesto pretpostavke da su uzorci loši, treba ih pretpostaviti dobrima i provjeriti kvalitetu prije donošenja odluke o njihovoj valjanosti. Međutim, ako postoji bilo kakva sumnja o ispravnosti reprezentativnih uzoraka, potrebno je provesti mjerenje DST-om budući da nedostatak dobrog razumijevanja PVT svojstava fluida iz ležišta može imati mnogo veće posljedice tijekom dugog vremena. WFT zahtijevaju umetanje sonde u kanal bušotine. Tekućina teče u komoru s niskim povlačenjem. Uzorak uzet u ovoj fazi potpuno je netaknut prije bilo kakvog protoka i pada u ležištu. Moderniji WFT uređaji također

osiguravaju protutlak i održavaju uzorak u jednoj fazi. Za ležišta plina/kondenzata, prikupljeni volumen uzorka može biti premali za dobru analizu fluida iz ležišta. WFT ima ograničen kapacitet za uklanjanje filtrata isplake iz formacije. Noviji WFT uređaji imaju opciju ispumpavanja što znači da se ispumpani fluid iz ležišta umjesto sakupljanja može izbaciti u bušotinu. Ako je korišten OBM, uzorci će biti kontaminirani, ograničavajući točnost naknadne analize koja se izvodi na uzorku. Ključna je prednost WFT-ova to što se koriste prije bilo kojeg drugog oblika uzorkovanja. Ovo je osobito važno za zasićena ležišta. Međutim, zbog pada tlaka kojem su uzorci izloženi, uzorci možda neće biti dobre kvalitete. To je poseban problem za plinske kondenzate jer je tlak rosišta nemonotoničan: ne raste stalno s povećanjem tlaka i temperature, već se povećava, a zatim smanjuje nakon što se dosegne krikondenbarska točka. Dakle, nereprezentativni uzorak može imati tlak rosišta viši, niži ili jednak stvarnom tlaku rosišta (Fevang i Whitson, 1994). Također, ovi hvatači uzoraka često se vraćaju na površinu s fluidom za bušenje i malim uzorkom. Poboljšani senzori u bušotini za praćenje drugih svojstava fluida mogli bi poboljšati kvalitetu uzorka, ali nažalost, smanjenje tlaka ne može se eliminirati, već samo minimizirati. Uz uvjerenje u buduća poboljšanja, trenutna je pozicija ovih alata sasvim prihvatljiva i uzorci dobiveni na ovaj način u većini slučajeva daju pouzdane podatke o svojstvima fluida – i za uzvodnu i za nizvodnu naftnu industriju. Ova će poboljšanja biti posebno potrebna za problematične fluide iz kojih se kruti materijal taloži s promjenama temperature i tlaka jer je ležište izloženo manjim promjenama u fazi uzorkovanja WFT-ova. Budući da prenošenje uzoraka čini iste podložne promjenama, bolja bi se procjena faznog dijagrama mogla postići usavršavanjem senzora i promatranjem uzoraka s dna bušotine na licu mjesta te simuliranjem iscrpljivanja iz bušotine na različitim dubinama. Usavršavanje senzora na dnu bušotine, osim toga, pomoglo je boljem uvidu u prisutna onečišćenja i njihova je pouzdanost sve veća.

#### *4.2.2. Protočni/konvencionalni uređaji za uzorkovanje s dna*

Protočni uređaji za uzorkovanje s dna bušotine najjednostavniji su i najstariji alati za uzorkovanje dna bušotine. Alat se s otvorenim ventilima uvodi u bušotinu na užetu. Dok putuje kroz bušotinu, fluid prisutan u bušotini teče kroz uređaj. Kada dosegne dubinu uzorkovanja, ventili se zatvaraju pomoću nekog mehanizma (bez obzira je li on mehanički, električni ili ih pokreće sat). Hvatač uzoraka tada preuzima uzorak koji se potom prenosi. Kada se uzorak izvuče, smanjuje se temperatura, a time i tlak uzorka; za uzorke nafte, ovo gotovo uvijek razdvaja uzorak u dvije faze. Na površini se plin otopine mora otopiti natrag

u fluid prije prijenosa uzorka u cilindar. Staromodna metoda tlačila je naftu živom; međutim, zbog mjera zaštite zdravlja i sigurnosti na radu, ovo se rijetko ili više uopće ne koristi. Velika prednost korištenja žive jest u tome što se mogu izvršiti točne provjere valjanosti, a kao mehanizam miješanja pri ponovnom pretvaranju uzorka u jednofazni, živa je nenadmašna. Alternativa je prenijeti uzorak natrag u laboratorij, no to nije dobra praksa jer se tada uzorkuje naslijepo, a to ne bi trebalo činiti osim ako je apsolutno neophodno. Druga mogućnost jest korištenje zakiseljene slane vode, ali zbog male razlike u gustoći u odnosu na naftu, ona nije učinkovita kao mehanizam miješanja, a sadržaj vode u uzorku ne može se analizirati. Kako bi se izbjegla uporaba žive na terenu i problemi koji mogu nastati zbog korištenja slane vode, dizajnirani su hvatači uzoraka s klipovima. Za uzorke s dna bušotine uvijek je važno provođenje provjere kvalitete na licu mjesta, čak i ako se radi samo o tlaku otvaranja. Budući da iste nije moguće provesti na jednofaznim uzorcima s dna bušotine, postoji potreba za razvojem sofisticiranijih sustava koji bi uključivali analizu sastava i tlakova zasićenja u laboratoriju na licu mjesta. Inače, kvaliteta jednofaznog uzorka ovisi isključivo o pritisku otvaranja alata. Protočni hvatači neće dobro funkcionirati za uzorke teške i ekstra teške nafte, a budući da se hvatači s klipom moraju spustiti na usisne šipke, iznimno veliko kašnjenje objašnjava planiranje uzorkovanja ovih fluida iz bušotine samo WFT-ovima.

#### *4.2.3. Uređaji za uzorkovanje klipnog tipa*

Klipni hvatači uzoraka u načelu su isti kao i protočni. Međutim, komora za uzorke ima klip, tako da se prijenos uzorka u cilindar za transport može izvršiti bez upotrebe žive ili slane vode. Umjesto toga, klip se gura glikolom da istisne ležišni fluid iz komore za uzorak. No, da bi se uzorak vratio u izvorno jednofazno stanje, neka vrsta mehanizma za miješanje trebala bi postojati u komori za uzorak kako bi se ubrzala ravnoteža te da bi se osiguralo kondenziranje svog plina otopine i/ili ponovno otapanje parafina. Alat se pokreće u bušotini, a jednom kada dođe na zadanu dubinu, zatvara se i otvara. Uzorak se prikupi, ventili se ponovno zatvore, a hvatač se zatim izvuče. Budući da se živa ovih dana rijetko koristi, većina cilindara za uzorkovanje fluida i klipnih komora za uzorkovanje postala je nepotrebno komplicirana. Niz o-prstenova s klipovima čini ove skupe uređaje neprikladnima za dugotrajno skladištenje zbog izmjene fluida preko brtvi kroz osmozu/adsorpciju. Ako uobičajeni cilindri nisu prihvatljivi, potrebno je razmotriti alternativne cilindre za uzorke koji koriste inertne dijafragme za dugotrajno skladištenje.

#### *4.2.4. Jednofazni uređaji za uzorkovanje*

Jednofazni hvatači dizajnirani su za uzorkovanje ležišta koja mogu imati problema s asfaltenima, a s ciljem zadržavanja asfaltena u otopini kako bi se isti mogli proučavati u laboratoriju (Jamaluddin et al., 1999). Budući da taloženje asfaltena možda nije reverzibilno, ideja je ne dopustiti da asfalteni izađu iz otopine. Ovi uređaji stvaraju protutlak s dušikom na klip u komori za uzorke, održavajući uzorak znatno iznad tlaka u ležištu. Ideja je da, čak i kada se uzorak ohladi, pretlak osigurava stanje iznad uvjeta za OAP. Previše skupih jednofaznih uzoraka uzima se u ležištima bez problema s taloženjem krutih tvari, a to je nešto što bi se možda trebalo riješiti, a ne prihvatiti. Problem zdravlja i sigurnosti na radu javlja se kod visokotlačnih ležišta koji su tlakovi vrlo opasni za rad i nalaze se na gornjoj granici ocjene opreme. Punjenje komore s dušikom s nižim tlakom je sigurnije: međutim, to neće dovesti do pretjeranog tlaka uzorka, a uzorak bi ipak mogao biti izvučen ispod OAP-a. Ovdje će egzotermni hvatači biti od koristi budući da će temperaturna kompenzacija također pomoći da uzorak ostane izvan OAP-a.

#### *4.2.5. Egzotermni uređaji za uzorkovanje*

Egzotermni uređaji dizajnirani su s istim ciljem kao i jednofazni hvatači, no njihova je prednost ta što uz osiguravanje kompenzacije tlaka također održavaju visoku temperaturu. Naime, jednofazni uređaji za uzorkovanje izbjegavaju problem temperaturne ovisnosti taloženja asfaltena održavajući uzorak pod tlakom. Ipak, temperatura također utječe na taloženje asfaltena, stoga su dizajnirani egzotermni uređaji. Iako su uočeni problemi s održavanjem temperature, ono je ipak bolje nego kod bilo kojeg drugog alata. Kada se nađe na površini, temperatura uzorka se održava korištenjem grijaćeg omotača na baterije, a uzorci se odmah vraćaju u laboratorij u koji se prenose vrući i drže na tlaku i temperaturi ležišta ili višoj. Daljnji razvoj još je uvijek potreban te je u tijeku kako bi se alat usavršio.

### 4.3. Uzimanje uzoraka teške nafte

Poteškoće prilikom uzorkovanja teških nafte nastaju zbog visoke viskoznosti fluida. Za uzorkovanje s dna bušotine, općenito govoreći, najbolje je uzorke uzimati WFT-ovima (Morton et al., 2005; Achourov et al., 2006; Nagarajan et al., 2006). Naime, uređaji za uzorkovanje fluida tipa DST uspješni su u uzimanju uzoraka, ali oni su primjenjivi samo ako je ležište podzasićeno. Ako je ležište zasićeno, preporučuju se WFT-ovi. Nekoliko je ključnih problema s uzorkovanjem teške nafte s dna bušotine (Morton et al., 2005;

Achourov et al., 2006; Nagarajan et al., 2006). Razliku tlaka u ležištu i bušotini potrebno je svesti na najmanju moguću mjeru kako bi fluid ostao u jednoj fazi, proizvodnja pijeska bila kontrolirana i stvaranje pjene minimizirano, no pritom je važno da ta ista razlika ipak bude dovoljno velika da omogući pokretanje fluida visoke viskoznosti. Što se tiče zagađenja isplakom, filtrat isplake u pribušotinskoj zoni potrebno je očistiti opcijom ispušavanja WFT-ova. Međutim, s duljim razdobljem pumpanja povećava se rizik od zaglavlivanja pumpe. Kod OBM-ova je kontaminacija značajan problem jer dovodi do neupotrebljivosti uzoraka. Konvencionalna mala sonda i gumeni paker nisu primjenjivi za teške nafte. Preporučuje se korištenje modula dvostrukog pakera za hidrauličku izolaciju formacije. S modulom dvostrukog pakera povećava se područje protoka. Rizici su u lošoj brtvi pakera ili curenju, ako aktiviranje i/ili napuhavanje ne uspije. Uzimanje uzoraka s površine također može biti opcija kod ležišta teške nafte. Jednostavan način prihvatljive točnosti jest rekombinacija sirove nafte iz ušća bušotine i plina iz prstenastog prostora ili ušća bušotine, pod uvjetom da se može postići točan GOR. Ekstrapolacija u PVT analizi na rekombiniranom ležišnom fluidu s previsokim GOR-om prihvatljiva je ako je pravi GOR poznat tek nakon provedbe studije. Ispitivanja separatora obično se izvode na fluidu s dodanim razrjeđivačima kako bi se smanjila viskoznost te se, pod uvjetom da se prate dobri volumetrijski podaci, može naknadno izračunati točan GOR za uzorke s ušća bušotine. U važnim slučajevima, možda će biti potrebno uvjeriti operatera da smanji razrjeđivače na što je moguće kraće vrijeme kako bi se dobili kvalitetni uzorci separatora nekontaminiranog sastava. Mjerenja GOR-a mogu biti slaba jer će većina plina otopine ostati u separatorском fluidu i neće se mjeriti s oslobođenim plinom separatora.

## 5. OSTALE KOMPONENTE

Uzorkovanjem je također bitno saznati količinu i postotak postojećih mogućih komponenti u samim uzorcima, a time i u ležištu. Komponente koje se najčešće provjeravaju i čiji sadržaj u uzorku je bitan su asfalteni, parafin, sumporni spojevi i živa.

### 5.1. Asfalteni

Ako je kod uzorkovanja iz ležišta inženjer vrlo uvjeren da asfalteni neće biti problem, a nije predviđeno provođenje studije za krute tvari, tada su jednofazni ili egzotermni alati za uzorkovanje suvišni. Ipak, na poljima gdje se mogu pojaviti problemi s asfaltenima i čiji su uzorci namijenjeni analizi asfaltena, uzorke je potrebno uzimati jednofazno kako bi se sačuvali asfalteni u otopini za naknadnu analizu. Iako su uzorkovanje i analiza asfaltena skupi, prethodno poznavanje problema s kojima se polje može susresti može dugoročno biti od ekonomske koristi. Međutim, ako je analiza asfaltena za uzorke već obavljena i/ili nije predviđena, jednofazno uzorkovanje možda neće biti potrebno. Probleme s asfaltenima također treba posebno imati na umu ako se planira utiskivanje plina u nekoj fazi životnog vijeka ležišta. Naime, poslije će možda biti prekasno za uzimanje reprezentativnih uzoraka. Analiza na asfaltene na živom jednofaznom fluidu izvodi se u laboratorijima sa specijaliziranom opremom. Neke se analize, kao što je izračun težinskog postotka asfaltena u nafti iz spremnika izdvojenog taloženjem n-heptana ili analiza zasićenih, aromatskih spojeva, smola i asfaltena ipak mogu, ako je potrebno, provesti na fluidima iz ležišta na licu mjesta. Reverzibilnost taloženja asfaltena je upitna. Iz tog razloga dizajnirani su jednofazni i egzotermni uređaji za uzorkovanje, tako da uzorak ne prijeđe OAP-točku prije analize.

### 5.2. Parafin

Parafin se može tretirati i kontrolirati održavanjem visoke temperature i tlaka. Ako se tijekom WFT uzorkovanja naiđe na bilo kakve indikacije problema s parafinom, prijenos uzoraka u cilindre za daljnju analizu postaje teži. Stvrdnuti parafin potrebno je ponovno otopiti u fluidu prije prijenosa uzorka u cilindre za uzorke. Ovo se izvodi s produljenim razdobljem zagrijavanja na temperaturi ležišta i miješanjem (čak i do 12 sati za teške slučajeve). Ako u komori za uzorke postoji mehanizam za miješanje, to se vrijeme može skratiti; u suprotnom, miješanje se mora izvršiti gravitacijskim podizanjem jednog kraja komore 30 minuta, a zatim i drugog kraja.

### 5.3. Sumporni spojevi

Uzorkovanje za analizu sadržaja sumpora prisutnog u ležišnom fluidu nije lako i još uvijek se razvija. Ključni problem jest što se spojevi sumpora (sumporovodik, merkaptani, karbonil sulfid) adsorbiraju na stijenke cilindra ili komore za uzorke, posebno onih izrađenih od nehrđajućeg čelika (Elshahawi i Hashem, 2005). Preporučuju se alternativni materijali za očuvanje sadržaja sumpornih spojeva. Ovo je osobito važno ako se analiza provodi u laboratoriju jer je vrijeme potrebno da uzorak stigne u laboratorij (čak i kad se radi o samo tjedan dana) dovoljno da se analizom izmjere znatno smanjeni sadržaji sumporovodika. Ovaj problem se zasad najbolje rješava primjenom suvremene tehnologije u metalurgiji: korištenjem cilindra izrađenih od drugih materijala i metalnih legura. Primjerice, najnovija je generacija cilindra izrađena od silicija. Osim toga, napravljeni su premazi za smanjenje reakcije konvencionalnih cilindra od nehrđajućeg čelika sa sumporovodikom. Ti su premazi obično na bazi politetrafluoroetilena (Elshahawi i Hashem, 2005). Prilikom uzimanja WFT uzoraka, adsorpcija se često javlja tijekom protoka u komorama za uzorke i, ponajviše, u pumpnoj jedinici. Granica pogreške zbog adsorbiranog sumpora manja je ako je u uzorku veći sadržaj sumpora. To je zato što, iako se adsorbira veći volumen, radi se o manjem postotku. Neke analize mogu se obaviti i na licu mjesta. Opet, još uvijek ostaje pitanje jesu li sumporni spojevi prijanjali na stijenke cijevi, kućište i površinsku opremu prije nego što su bili uzorkovani za analizu. Sada postoje i senzori u bušotini koji mogu barem dati naznaku jesu li površinski izmjerene koncentracije sumpornih spojeva pogrešne ili približne. Budućnost mjerenja koncentracija sumpornih spojeva vjerojatno jest u poboljšanju ove tehnologije.

### 5.4. Sadržaj žive

Važno je izmjeriti i sadržaj žive u bušotini kako bi se utvrdilo jesu li potrebni dodatni zahtjevi u procesu rafiniranja. Živa može uzrokovati kvar metalnih dijelova spajanjem i mijenjanjem mehaničkih svojstava metala, osobito aluminijski ili bakra. Slično spojevima sumpora, mjerljivi sadržaj žive opada s vremenom jer se adsorbira na stijenke cilindra od nehrđajućeg čelika i komora za uzorke. Analiza na licu mjesta može se provesti na struji plina separatora. Općenito, živini spojevi koji se prirodno mogu pojaviti u ležišnom fluidu su elementarna živa u strujama plina ugljikovodika te elementarna i organska živa u strujama fluida ugljikovodika (Wilhelm i McArthur, 1995). Postoji nekoliko metoda za mjerenje sadržaja žive u strujama plina (Bingham, 1990). Na terenu se živini spojevi

uklanjaju propuštanjem plina kroz otopinu permanganata koja se zatim analizira u laboratoriju atomskom apsorpcijskom spektroskopijom. To se također može izvoditi na fluidu/kondenzatu iz ležišta. Uzorke treba čuvati u staklenim bočicama s minimalnim prostorom za transport u laboratorij. Sadržaj žive u plinu može se mjeriti i pomoću analizatora živinih para sa zlatnim filmom (Bingham, 1990). Mala ugrađena pumpa na ovim detektorima žive uzima određenu količinu plina kroz sondu za uzorkovanje na čiji se film zlata živa adsorbira. Detektori žive rade na atmosferskim temperaturama. Jedna je od metoda korištenja ovih strojeva propuštanje plina kroz plastičnu bocu s izlazom za održavanje na atmosferskom tlaku i drugim izlazom za plin koji treba proći kroz stroj. Za WFT uzorkovanje, uporaba OBM-a može kontaminirati uzorke (Achourov et al., 2006; Dybdahl, 2006). Ako je to slučaj za naftne bušotine, ovisno o ozbiljnosti onečišćenja, sastav se može izračunati ako je poznat sastav OBM-a. To se radi određivanjem sastava uzorka onečišćene nafte, zatim uzorka s poznatim dodanim volumenom OBM-a i punog sastava OBM-a. Kod plinskih će pak kondenzata puno manja kontaminacija imati teže posljedice: ne samo u pogledu sastava, već i izmjerene točke rosišta mogu biti previsoke. Međutim, isti princip kao i za naftu može se primijeniti na plinove.



## 6. STUDIJE SLUČAJA NEKONVEKCIONALNOG UZORKOVANJA

### 6.1. Slučaj 1. – niskopropusno plinsko-kondenzatno ležište

U zasićenom plinsko-kondenzatnom ležištu niske propusnosti prvo je pokušano odvojeno uzorkovanje. Međutim, budući da je protok bio kroz separator, a CGR bušotinske struje bio je nizak, nije bilo dovoljno kondenzata za prikupljanje uzorka. Čak ni kada je tlak u separatoru snižen, još uvijek nije bilo dovoljno kondenzata za uzimanje uzorka. Uzorkovanje u podijeljenoj fazi bilo je ekonomski neodrživo; stoga je odlučeno prikupiti uzorke s dna bušotine. Uzorci zasićenog plina rijetko se uzimaju na dnu bušotine; ipak, u ovome slučaju, to je bila najlakše izvediva opcija. Iako bi se izokinetičko uzorkovanje u ovom slučaju pokazalo boljim, ekonomija polja ne može ga opravdati.

### 6.2. Slučaj 2. - uzorak plina s dna bušotine s previsokim tlakom zasićenja

Uzorci su uzeti nakon kondicioniranja sa zatvorene bušotine jer je bilo kakav protok stvarao prekomjerno smanjenje. Proveden je statički gradijent tlaka kako bi se osiguralo da je prisutna isključivo plinovita faza. Zaključeno je da je tijekom kondicioniranja ležišni fluid bio povučen u dvije faze i da bušotina nije bila zatvorena dovoljno dugo da se ponovno uspostavi ravnoteža. Kao rezultat toga, bilo je vjerojatno da je uzeta kondenzirana magla te uzorak plina iz ležišta. Analiza sastava provedena je ekvilibriranjem uzorka u PVT ćeliji pri tlaku i temperaturi ležišta, dopuštajući da višak kondenzata ispadne, i isparavanjem samo plina.

### 6.3. Slučaj 3. - uzimanje uzoraka iz neplanirane formacije

Tijekom bušenja naišlo se na neočekivanu zonu. Bušenje je zaustavljeno dok se ne utvrdi je li otkriveno odvojeno ležište ili je ciljana zona bila na manjoj dubini od očekivane. Uzorci s dna bušotine uzeti su što je prije moguće kako bi se izmjerila gustoća fluida. U ovom slučaju kondicioniranje bušotine, onečišćenje isplakom za bušenje i asfalteni nisu bili problemi za program uzorkovanja. Uzeti su konvencionalni uzorci s dna bušotine jer ih je brzo i jednostavno ispitati. Uzorci, iako nisu bili reprezentativni PVT uzorci, odgovarali su svrsi posla uzorkovanja.

#### 6.4. Slučaj 4. - bušotina hlapljive nafte iz slabopropusne formacije

Bušotina je uzorkovana na separatoru. Povlačenje iz DST-a uzrokovalo je da je tlak u dnu bušotine znatno ispod tlaka zasićenja. Uočeno je da se GOR na ispitnom separatoru neprestano kreće: prvo pada, a zatim postupno raste, ali se ne stabilizira. Budući da je povećanje bilo sporo, uzeti su uzorci plina i nafte iz separatora. Ova metoda, iako nije savršena, ipak daje reprezentativne uzorke.

## 7. ZAKLJUČAK

Uzorkovanje se mora izvesti što je prije moguće u životnom vijeku ležišta. Općenito govoreći, što se ranije uzorkuje, to je veća vjerojatnost dobivanja reprezentativnih uzoraka. Kondicioniranje izvora od najveće je važnosti – upravo zato moramo osigurati da je bušotina kondicionirana što je moguće bolje prije uzorkovanja. Priprema dobrog programa kondicioniranja poboljšat će kvalitetu uzorka. WFT uzorke treba držati pod pritiskom i prebaciti ih u cilindar. Uobičajeno je da se ti uzorci puštaju u uvjete skladišnog spremnika uz samo neke osnovne analize. Međutim, napredna tehnologija u ovom području uvelike je poboljšala kvalitetu ovih uzoraka koje treba smatrati reprezentativnima dok se ne dokaže da nije tako. Prilika za prikupljanje uzoraka s dna bušotine ili separatora kasnije možda neće biti moguća. Ipak, treba imati na umu da uzorci WFT-ova i dalje imaju problema s fluidom za bušenje te da možda nisu reprezentativni. Ako je separator uključen dok uzima uzorke s dna bušotine, također je potrebno uzeti uzorke iz separatora s ciljem stvaranja sigurnosne kopije uzoraka s dna bušotine. U slučaju nedostatka asfaltena ili krutine postoji mogućnost korištenja jeftinije alternative jednofaznom uzorkovanju. Problemi uzorkovani asfaltenima eliminiraju se korištenjem jednofaznih uzoraka. Potrebno je provesti više istraživanja o temperaturnoj ovisnosti asfaltena koja bi se iskoristila za bolji dizajn egzotermnih uređaja za uzorkovanje. Budući da je jednofazno uzorkovanje uznapredovalo, potrebno je provesti usporedne studije na konvencionalnim uzorcima naspram jednofaznih uzoraka za različite vrste ležišta i asfaltena. Za teške situacije, dobra retrospektivna provjera kvalitete jest usporedba gustoće fluida iz laboratorija ili na licu mjesta s onom izračunatom iz gradijenata tlaka tijekom karotaže. Nova dostignuća na ovom području izvrstan su napredak i trebala bi se koristiti za poboljšanje uzorkovanja.

## 8. LITERATURA

1. ACHOUROV, V., KAMITOV, I., YATSENKO, V., 2006. A Technique for Measuring Permeability Anisotropy and Recovering PVT Samples in a Heavy Oil Reservoir in North West Siberia. Presented at the *SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, in Moscow, Russia, October 3-6*, SPE 102460
2. AMYX, J.W., BASS, D.M., WHITING, R.L., 1960. *Petroleum Reservoir Engineering*. New York City: McGraw-Hill Book Co.
3. AYALA, C., DOUGLAS, A., KUCHUK, F., 1996. *A Revolution in Reservoir Characterization*. Schlumberger Middle East Well Evaluation Review, 16, str. 44-55.
4. BINGHAM, M.D., 1990. Field Detection and Implications of Mercury in Natural Gas. *SPEPE* 5 (2), str. 120-124.
5. COBENAS, R.H., CROTTI, M.A., 1999. Volatile Oil. Determination of Reservoir Fluid Composition From a Non-Representative Fluid Sample. Presented at the *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Caracas, April 21-23*. SPE 54005
6. DAKE, L.P., 1994. *The Practice of Reservoir Engineering*. Elsevier Science B.V., 33
7. DYBDAHL, B., 2006. A Systematic Approach to Sampling During Well Testing. Presented at the *ENI E&P Division and ENI Technology Conference, Milan, Italy, 23 February*.
8. EL-BANBI, A.H., MCCAIN, W.D. Jr., 2001. Sampling Volatile Oil Wells. Presented at the *SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, March 24-27*. SPE 67232
9. ELSHAHAWI, H., HASEM, M., 2005. Accurate Measurement of the Hydrogen Sulfide Content in Formation Fluid Samples - Case Studies. Presented at the *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October 9-12*. SPE 94707
10. FEVANG, Ø., WHITSON, C.H., 1994. Accurate Insitu Compositions in Petroleum Reservoirs. Presented at the *European Petroleum Conference, London, United Kingdom, October 25-27*. SPE 28829

11. GORIČNIK, B., 2006. *Uzorkovanje Ležišnih Fluida*, Termodinamika ugljikovodika. Zagreb: Rudarsko – Geološko – Naftni Fakultet
12. JAMALUDDIN, A.K.M., ROSS, B., DAIGLE, T., 1999. Single-Phase Reservoir Sampling: Is it a Necessity or Luxury? Presented at the *CSPG and Petroleum Society Joint Convention, Calgary, Alberta, June 14-18*. CIM 99-36
13. JAMALUDDIN, A.K.M., CREEK, J., KABIR, C.S. et al., 2001. A Comparison of Various Laboratory Techniques to Measure Thermodynamic Asphaltene Instability. Presented at the *SPE Asia Pacific Improved Oil Recovery Conference, Kuala Lumpur, October 6-9*. SPE 72154
14. MCCAIN, W.D. Jr., ALEXANDER, R.A., 1992. Sampling Gas-Condensate Wells. *SPE* 7 (3), str. 358-362.
15. MICHAELS, J., MOODY, M., SHWE, T., 1995. Wireline Fluid Sampling. Presented at the *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, October 22-25*. SPE 30610
16. MORTON, K.L., OSMAN, M.S., KEW, S.A., 2005. Heavy-Oil Uncertainties Facing Operators in the North Sea. Presented at the *SPE/PS-CIM/CHOA International Thermal Operation and Heavy Oil Symposium, Calgary, November 1-3*. SPE 97898
17. NAGARAJAN, N.R., HONARPOUR, M.M., SAMPATH, K., 2006. Reservoir Fluid Sampling and Characterization—Key to Efficient Reservoir Management. Presented at the *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, November 5-8*. SPE 101517
18. REUDELHUBER, F.O., 1957. Sampling Procedures for Oil Reservoir Fluids. *JPT* 9 (12), str. 15-18.
19. STRONG, J., THOMAS, F.B., BENNION, D.B., 1993. Reservoir Fluid Sampling and Recombination Techniques for Laboratory Experiments. Presented at the *CIM Annual Technical Conference, Calgary, May 9-12*. CIM 93-54
20. TOWLER, B.F., 1989. *Reservoir Engineering Aspects of Bottomhole Sampling of Saturated Oils for PVT Analysis*. Unsolicited paper from the University of Wyoming. SPE-19438-MS.
21. VULIN, D., 2015. *Osnovna svojstva ležišnih stijena i fluida*. Za korištenje uz skriptu B. Goričnik, 2006. „Termodinamika ugljikovodika“. Zagreb: Rudarsko – Geološko – Naftni Fakultet

22. WILHELM, S.M., MCARTHUR, A., 1995. Removal and Treatment of Mercury Contamination at Gas Processing Facilities. Presented at the *SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference, Houston, March 27-29*. SPE 29721

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko – geološko – naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



---

Ivan Mesarić



KLASA: 602-01/22-01/114  
URBROJ: 251-70-12-22-2  
U Zagrebu, 14.09.2022.

Ivan Mesarić, student

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/114, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 01.05.2022. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### UZORKOVANJE LEŽIŠNIH FLUIDA

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof.dr.sc. Domagoj Vulin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Prof.dr.sc. Domagoj Vulin

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)