

# Cementne kaše olakšane dušikom

---

Gospić, Šime

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:169:316732>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**



Repository / Repozitorij:

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



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

**CEMENTNE KAŠE OLAKŠANE DUŠIKOM**

Diplomski rad

Šime Gospić

N 208

Zagreb, 2018.

## CEMENTNE KAŠE OLAKŠANE DUŠIKOM

ŠIME GOSPIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

### Sažetak

Nakon izbušenog intervala kanala bušotine potrebno je ugraditi zaštitne cijevi te ih cementirati. Mnoge bušotine su izbušene u zonama malog slojnog tlaka i stijena male čvrstoće. Da bi u takvim uvjetima cementacija bila moguća, potrebno je smanjiti gustoću cementne kaše. To se može postići injektiranjem dušika u osnovnu cementnu kašu pri čemu nastaje pjencementna kaša. U radu su obrađena svojstva pjencementne kaše: gustoća, vrijeme zgušnjavanja, filtracija, reološka svojstva te svojstva cementnog kamena nastalog njezinim očvršćavanjem. Prikazani su primjeri laboratorijskih ispitivanja pjencementne kaše te mogućnosti njezine primjene za rješavanje različitih problema u praksi. Osim navedenog, opisana je i tehnologija injektiranja pjencementne kaše u bušotinu.

Ključne riječi: cement, dušik, pjena, gustoća, pjencementna kaša, pjencementni kamen

Diplomski rad sadrži: 69 stranica, 8 tablica, 40 slika i 10 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF  
Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF  
Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF

Datum obrane: 19. siječnja 2018. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

NITROGEN LIGHTWEIGHTED CEMENT SLURRIES  
ŠIME GOSPIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

After the drill bore interval, it is necessary to install casing pipes and cement them. Many wells are drilled in low pressure areas and zones of low rock strength. To be able to cement in such conditions, it is necessary to reduce the density of cement slurry. This can be achieved by injecting nitrogen into the basic cement slurry, causing a foam molding. This thesis deals with the characteristics of foaming slurry: density, thickening time, filtration, rheological properties and the properties of cement stone produced by its hardening. Examples of laboratory tests of foam slurry as well as possibilities for its application in solving various practical problems are presented. In addition to this, the injection molding technology of the foam slurry in the well is described.

Keywords: cement, nitrogen, foam, density, foam cement slurry, foam cement

Thesis contains: 69 pages, 8 tables, 40 figures and 10 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Reviewers: Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD  
Full Professor Zdenko Krištafor, PhD  
Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: January 19<sup>th</sup>, 2018. Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Zahvala:

Srdačno zahvaljujem svojoj mentorici dr. sc. Nediljki Gaurini-Međimurec na strpljenju, pomoći i vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada.

|  |            |
|--|------------|
| Sadržaj  |            |
| <b>POPIS SLIKA</b> .....   | <b>I</b>   |
| <b>POPIS TABLICA</b> .....   | <b>III</b> |
| <b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA</b> .....                                       | <b>IV</b>  |
| <b>1. UVOD</b> .....   | <b>1</b>   |
| <b>2. CEMENTNE KAŠE OLAKŠANE DUŠIKOM</b> .....   | <b>3</b>   |
| <b>3. DIZAJN CEMENTNE KAŠE OLAKŠANE DUŠIKOM</b> .....  | <b>5</b>   |
| 3.1. Cement i aditivi.....   | 6          |
| 3.2. Svojstva cementne kaše olakšane dušikom.....  | 7          |
| 3.2.2. Vrijeme zgušnjavnja .....   | 10         |
| 3.2.3. Reološka svojstva .....   | 12         |
| 3.2.3.1. <i>Određivanje reoloških svojstava pjencementne kaše</i> .....                                | 17         |
| 3.2.3.2. <i>Rezultati mjerenja viskoznosti</i> .....   | 19         |
| 3.2.4. Filtracija.....   | 24         |
| 3.2.5. Postupak utiskivanja pjencementne kaše i potrebna površinska oprema ....                        | 25         |
| 3.2.5.1. <i>Postupak utiskivanja pjencementne kaše pri konstantnoj količini dušika</i><br>.....        | 25         |
| 3.2.5.2. <i>Postupak utiskivanja pjencementne kaše konstantne gustoće</i> .....                        | 27         |
| 3.2.5.3. <i>Površinska oprema za pripremu pjencementne kaše</i> .....                                  | 27         |
| <b>4. PJENOCEMENTNI KAMEN I SVOJSTVA</b> .....   | <b>28</b>  |
| 4.1. Materijal i metode .....  | 29         |
| <b>5. PRIMJER IZ PRAKSE</b> .....  | <b>33</b>  |
| 5.1. Primjer pjencementne kaše za zatvaranje zona gubitka isplake u bušotinama na području Urala ..... | 33         |
| 5.1.1. Izračun volumena pjencementne kaše .....  | 35         |
| 5.1.2. Određivanje debljine zona gubljenja isplake.....  | 36         |
| 5.1.3. Određivanje poroznosti.....   | 36         |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 5.1.4.    | Određivanje dubine utiskivanje .....  | 37        |
| 5.1.5.    | Određivanje dubine prodiranja pjencementne kaše.....  | 37        |
| 5.1.6.    | Određivanje volumena pjencementne kaše za izolaciju .....   | 37        |
| 5.1.7.    | Izračun volumena razdjeljivača .....  | 38        |
| 5.1.8.    | Izračun dubine isplake za istiskivanje .....  | 39        |
| 5.2.      | Procjena pjencementne kaše korištene u dubokim vodama Meksičkog zaljeva.  | 40        |
| 5.2.1.    | Metoda pripreme pjencementne kaše.....  | 40        |
| 5.2.2.    | Cilindar s konstatnim tlakom.....   | 41        |
| 5.2.3.    | Postupak uzimanja uzorka na terenu .....  | 42        |
| 5.2.4.    | CT skeniranje.....  | 44        |
| 5.2.5.    | Fizikalna svojstva pjencementnog kamena .....   | 44        |
| 5.2.6.    | Rezultati ispitivanja pjencementnog kamena .....  | 45        |
| 5.2.7.    | Pjencement s terena .....   | 51        |
| 5.3.      | Primjer korištenja pjencementne kaše u praksi za rješavanje korozivnosti<br>zaštitnih cijevi u vodo-utisnoj bušotini u Sjevernom Omanu..... | 58        |
| 5.4.      | Konstrukcija i bušenje bušotine .....   | 59        |
| <b>6.</b> | <b>ZAKLJUČAK .....</b>  | <b>67</b> |
| <b>7.</b> | <b>LITERATURA .....</b>   | <b>68</b> |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 3-1. Mikrostruktura pjenocementnog kamena za kvalitetu pjene 18% .....   | 9  |
| Slika 3-2. Mikrostruktura pjenocementnog kamena za kvalitetu pjene 72% .....   | 9  |
| Slika 3-3. Dijelovi Fann viskozimetra.....   | 13 |
| Slika 3-4. Dijelovi FYSA viskozimetra.....   | 13 |
| Slika 3-5. Fann viskozimetar i stvarni volumen na kojem se vrši mjerenje .....   | 14 |
| Slika 3-6. FYSA viskozimetar i stvarni volumen na kojem se vrši mjerenje.....  | 14 |
| Slika 3-7. Smično naprezanje je dovoljno da se stvori potpuni profil brzine u međuprostor .....  | 15 |
| Slika 3-8. Prikaz fluida kod kojeg nema potpunoga djelovanja smičnog naprezanja što se očituje slabijim očitanjem torzije .....              | 16 |
| Slika 3-9. Rezultati mjerenja viskoznosti za cementnu i pjenocementnu kašu koristeći Fann i FYSA viskozimetar .....                          | 20 |
| Slika 3-10. Ovisnost viskoznosti o kvaliteti pjene koristeći Fann viskozimetar .....   | 20 |
| Slika 3-11. Ovisnost viskoznosti o kvaliteti pjene koristeći FYSA viskozimetar.....  | 21 |
| Slika 3-12. Utjecaj kvalitete pjene na promjene naprezanja pri pokretanju i viskoznosti pjenocementne kaše koristeći Fann viskozimetar ..... | 22 |
| Slika 3-13. Utjecaj kvalitete pjene na promjene naprezanja pri pokretanju i viskoznosti pjenocementne kaše koristeći FYSA viskozimetar ..... | 22 |
| Slika 3-14. Povećanje gustoće pjenocementne kaše s dubinom.....  | 26 |
| Slika 3-15. Povećanje tlaka s dubinom .....  | 26 |
| Slika 3-16. Pjenogenerator „T“ .....   | 27 |
| Slika 5-1. Količina gubitka isplake prije i poslije izolacije koristeći pjenasti cement gustoće 600 kg/m <sup>3</sup> .....                  | 35 |
| Slika 5-2. Metodologija utiskivanja volumena za pjenocementnu kašu, razdjeljivač i isplaku za istiskivanje.....                              | 35 |
| Slika 5-3. Cilindar za uzimanje uzoraka pjenocementne kaše (aluminijski i čelični).....  | 42 |
| Slika 5-4. Shematski prikaz razdjeljivača za uzimanje uzoraka.....   | 43 |
| Slika 5-5. 2D prikaz CT snimke uzoraka pjenocementnog kamena za kvalitete pjene 10%, 20%, 30% i 40% promjera 6 mm za uzorke FCR1 .....       | 45 |
| Slika 5-6. 2D prikaz CT snimke uzoraka pjenocementnog kamena za kvalitete pjene 10%, 20%, 30% i 40% promjera 6 mm za uzorke FCR2 .....       | 45 |



|  |    |
|--|----|
| Slika 5-7. 3D prikaz sekcije uzorka FCR2 pjenocementnog kamena kvalitete pjene 30% FCR2 .....  | 46 |
| Slika 5-8. Izvod iz CT-a koji prikazuje odnos između mjerene i očekivane kvalitete pjenocementne kaše .....  | 47 |
| Slika 5-9. Odnos poroznosti i kvalitete pjene za pjenocementne kaše receptura FCR1 i FCR2.....   | 48 |
| Slika 5-10. Odnos propusnosti i kvalitete pjene za pjenocementnu kašu recepture FRC1 i FRC2 .....  | 48 |
| Slika 5-11. Prikaz tlačne čvrstoće i Youngova modula kao funkcija kvalitete pjene za FRC1 i FRC2.....  | 50 |
| Slika 5-12. Rekonstruirane medicinske slike CT-a aluminijske posude za D1(lijevo), D2 (sredina), E1 (desno). svaka slika je montaža od pet presjeka kroz XZ ravnine posude ....  | 52 |
| Slika 5-13. 3D rekonstrukcija uzorka D2 pod tlakom. Mjesto injektiranja predstavlja donji desni dio slike. A) Prikaz cijelog uzorka B) Uspravni prikaz C) Izolirani dio niskih poroznih zona D) Niske porozne zone ..... | 53 |
| Slika 5-14. Rekonstruirana slika industrijskog CT-a za uzorak D1. Zone niske gustoće su prikazane bijelom bojom, a visoke zone crvenom bojom. ....   | 53 |
| Slika 5-15. XZ dio E1 posude pod tlakom; 1/3 od dna posude; srednji dio 1/3 posude ....  | 54 |
| Slika 5-16. Slika uzorka CP cilindra .....   | 54 |
| Slika 5-17. Shema prikazuje sekcije uzorka cilindra s izmjerenom poroznošću .....  | 57 |
| Slika 5-18. Shema prikazuje sekcije uzorka cilindra s izmjerenom propusnosti .....   | 57 |
| Slika 5-19. Tipična konstrukcija vodo-utisne bušotine .....  | 59 |
| Slika 5-20. Konstrukcija bušotine s dodanim poveznim cijevima (dvostupanjska cementacija) .....  | 60 |
| Slika 5-21. Simulacija promjene pjenocementne kaše u bušotini .....  | 62 |
| Slika 5-22. Dijagram utiskivanja pjenocementne kaše za vodo-utisnu bušotinu .....  | 64 |
| Slika 5-23. Karotaža cementne veze za cementaciju zaštitnih cijevi od vrha lajnera do ušća .....   | 65 |
| Slika 5-24. Prikaz slika postrojenja i povrata pjenocementne kaše na površinu.....   | 66 |

## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 3-1. Rezultati mjerenja vremena zgušnjavanja cementnih kaša sa i bez pjene .....             | 11 |
| Tablica 3-2. Rezultati mjerenja viskoznosti s pogreškama .....                                       | 19 |
| Tablica 3-3. Gubitak fluida kao funkcija gustoće.....  | 24 |
| Tablica 4-1. Fizikalna i mehanička svojstva pjenocementnog kamena.....                               | 31 |
| Tablica 5-1. Detalji saniranja gubljenja isplake .....   | 34 |
| Tablica 5-2. Parametri uzorka pjenocementne kaše .....   | 51 |
| Tablica 5-3. Redoslijed utiskivanja za 1. stupanjsku cementaciju za vodo-utisnu bušotinu<br>77 ..... | 62 |
| Tablica 5-4. Redoslijed utiskivanja za 2. stupanjsku cementaciju za vodo-utisnu bušotinu<br>77 ..... | 63 |

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

V- volumen, m<sup>3</sup>

$\rho$  - gustoća, kg/m<sup>3</sup>

$\tau$  - naprezanje, Pa

T - temperatura, °C

q - kvaliteta pjene, %

$V_g$  - volumen plina, m<sup>3</sup>

$V_L$  - volumen kaše, m<sup>3</sup>

$\tau_{(q,T)}$  - naprezanje, Pa

$\rho_q$  - gustoća plina, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_o$  - gustoća kaše, kg/m<sup>3</sup>

$\tau_0$  - naprezanje, Pa

$\mu_{\infty(q,T)}$  - viskoznost pri beskonačnoj brzini smičnosti, mPa·s

$H_d$  - dubina istikivanja, m

$H_t$  - „početna točka“ dubine gubljenja isplake, m

$\Delta H_{st}$  - statička razina dubine, m

$V_m$  - volumen pjenocementne kaše, m<sup>3</sup>

$\Delta H_z$  - debljina zone gubljenja isplake, m

$F_p$  - faktor poroznosti, bezdimenzionalna veličina

$\Delta R_m$  - dubina prodiranja pjenocementne kaše, m

$R_w$  - radijus bušotine, m

$V_{s1}$  - volumen gornjeg razdjeljivača, m

$V_{s2}$  - volumen donjeg razdjeljivača, m

$\Delta R_s$  - dubina prodiranja donjeg razdjeljivača, m

BSD (engl. *Bubble Size Distribution*) – distribucija veličine mjehurića

WOC (engl. *Wait-on-Cement*) – vrijeme čekanja na nastavak radova

API (engl. *American Petroleum Institute*) – Američki naftni institut

## 1. UVOD

Nakon izrade pojedinog intervala kanala bušotine i ugradnje kolone zaštitnih cijevi, potrebno je ugrađene cijevi cementirati. Za uspješno cementiranje kolone zaštitnih cijevi neophodan je pravilan dizajn cementne kaše. Primarna cementacija sprječava međuzonalnu komunikaciju, osigurava izoliranje probušenih naslaga stijena tijekom eksploatacije ugljikovodika te osigurava odgovarajuće učvršćenje kolone zaštitnih cijevi. Međutim, postoje čimbenici koji mogu uzrokovati pucanje cementnog kamena. Pucanjem cementnog kamena stvaraju se mali kanali koji omogućuju protok plina ili kapljevine, te na taj način dolazi do potrebe za popravnim radovima kao i do dodatnih troškova. Prema tome, kako bi se spriječile navedene situacije potrebno je izmijeniti sastav cementne kaše. U ovom se radu obrađuju cementne kaše kojima je dodan dušik u svrhu smanjenja njihove gustoće, a nazivaju se pjenocementne kaše. Iako pjenocementne kaše imaju neznatnu gustoću, one očvršćavaju u cementni kamen zadovoljavajuće tlačne čvrstoće.

Mnoge su bušotine izbušene u područjima maloga slojnog tlaka i stijena male čvrstoće u kojima primjena klasične cementne kaše gustoće  $1700 \text{ kg/m}^3$  ne bi bile prikladne. Upravo je iz tog razloga neophodna primjena cementne kaše manje gustoće s ciljem smanjenja tlaka tijekom cementacije. Smanjenje gustoće cementne kaše može se postići na dva načina (McElfresh i Go Boncan, 1982):

- 1) dodavanjem u cement aditiva čija je gustoća manja od gustoće cementa, poput bentonita i glisonita, kojima se smanjuje gustoća cementne kaše do  $1300 \text{ kg/m}^3$  ili šupljih plinovitih pucolanskih kuglica ili šupljih staklenih mikrokuglica kojima se smanjuje gustoća cementne kaše do  $800 \text{ kg/m}^3$ ;
- 2) dodavanjem u cementnu kašu agensa koji uzrokuju pjenjenje i injektiranjem plina (zrak ili još češće dušik) kojima se smanjuje gustoća cementne kaše do  $900 \text{ kg/m}^3$  uz zadržavanje zadovoljavajuće čvrstoće cementnog kamena.

Osnovni je uvjet za uspješnu cementaciju da tlak tijekom cementacije ne prelazi tlak frakturiranja stijena u bilo kojoj točki otvorenog dijela kanala bušotine. Ako se dogodi da tlak tijekom cementacije prelazi tlak frakturiranja stijena stvorit će se pukotine u kojima se mogu gubiti veće količine cementne kaše. Posljedice gubljenja cementne kaše u otvorene pukotine mogu biti: nekvalitetna i/ili nepotpuna cementacija, neadekvatno učvršćenje ugrađene kolone zaštitnih cijevi te popravna cementacija koja zahtijeva dodatno vrijeme i dodatna financijska sredstva.

U nastavku su rada opisane cementne kaše s dušikom, njihova svojstva te primjena pjenocementnih kaša u praksi.

## 2. CEMENTNE KAŠE OLAKŠANE DUŠIKOM

Pjenocementna kaša (*engl. foam slurry*) može biti rješenje kod cementacije kolona zaštitnih cijevi u slučaju da kanal bušotine prolazi kroz propusne, šupljikave i kavernozone zone s niskim gradijentom tlaka frakturiranja. Bušotinski fluidi uzrokuju hidrostatski tlak na dno bušotine koji ovisi o visini stupca tekućine i njezinoj gustoći. Tijekom bušenja se često nailazi na formacije male čvrstoće koje sadrže šupljine ili pukotine te uslijed toga mogu podnijeti isključivo tlak fluida vrlo male gustoće. Neke formacije ne mogu izdržati ni tlak stupca vode. Klasične cementne kaše pripravljene miješanjem API klasa cementa i preporučenom količinom vode daju cementne kaše gustoće od 1776 do 1956 kg/m<sup>3</sup>, što je znatno više od gustoće vode (1000 kg/m<sup>3</sup>). Netom opisane kaše nisu primjenjive za cementiranje u području takvih naslaga. Da bi se omogućilo izvođenje cementacije u takvim bušotinama potrebno je pripremiti cementne kaše vrlo male gustoće (*engl. ultralow-density cements*) i to dodavanjem u klasičnu cementnu kašu šupljih mikrokuglica ili injektiranjem plina.

Pjenocementne su se kaše prije 70-ak godina prvo počele koristiti u građevinskoj industriji pod nazivom plinobeton. Prva je upotreba pjenocementne kaše za cementiranje u bušotini izvedena 1979. godine u svrhu izoliranja kaverne nastale izluživanjem soli koja je služila kao podzemno skladište ukapljenog naftnog plina (*engl. LPG storage cavern*) (Nelson, 1990). Kaverna je bila povezana sa starim rudarskim oknom velikog promjera koje je bilo zatrpano i napušteno. Gustoća korištene pjenocementne kaše iznosila je od 420 do 500 kg/m<sup>3</sup>. Da bi se propuštanje kaverne zaustavilo prvo je utisnuto 226 m<sup>3</sup> pjenocementne kaše nakon čega je još dva puta trebalo ponoviti postupak kako bi se potpuno zaustavilo propuštanje (Nelson, 1990). Nakon ove prve primjene, početkom 1980-ih, počeo je nagli razvoj upotrebe pjenocementnih kaša za cementiranja u naftnim i plinskim bušotinama. Konvencionalno olakšane cementne kaše imaju, za praksu prihvatljivu, donju vrijednost gustoće između 1320 kg/m<sup>3</sup> i 1440 kg/m<sup>3</sup> (Nelson, 1990). Ukoliko se pripremi, uz dodatak olakšivača, cementna kaša manjih vrijednosti gustoće će očvrnuti u cementni kamen premale tlačne čvrstoće i prevelike propusnosti te se neće postići kvalitetna izolacija raskrivenih stijena (*engl. zonal isolation*).

Za pripremu pjenocementne kaše s ciljem smanjenja gustoće mogu se koristiti šuplje i keramičke ili staklene mikrokuglice. Međutim, upotreba takvih materijala je prilično skupa, čak 4 do 10 puta skuplja u odnosu na cementnu kašu (Nelson, 1990). Dodavanjem

mikrokuglica u cementnu kašu njezina gustoća se može smanjiti do  $960 \text{ kg/m}^3$ , a upotreba takvih materijala zahtijeva posebno rukovanje. Reološka svojstva takvih izrazito laganih cementnih kaša moraju biti pažljivo provjeravana kako ne bi došlo do „plutanja“ mikrokuglica u cementnoj kaši. Važno je istaknuti da i najčvršće mikrokuglice pucaju pri tlaku od oko 50 MPa pa je prema tome i dubina do koje se cementne kaše s mikrokuglicama mogu koristiti ograničena tlakom tijekom cementacije. Pjenocementne kaše olakšane plinom su jeftinije od kaša olakšanih mikrokuglicama, a ujedno ih je i lakše dizajnirati. Osim toga, dodatkom plina moguće je pripremiti pjenocementne kaše još manje gustoće koje će i dalje imati bolja svojstva od cementne kaše s mikrokuglicama. Osim male gustoće, pjenocementna kaša očvršćuje u kamen relativno visoke tlačne čvrstoće, uzrokuje manje oštećenje vodoosjetljivih stijena, može smanjiti mogućnost protoka plina kroz prstenasti prostor i omogućiti cementaciju u području zona gubljenja (Nelson, 1990). Budući da dodavanje plina u kašu nema velik utjecaj na njezinu pumpabilnost i vrijeme zgušnjavanja, promjenom koncentracije plina lako se podešava gustoća cementne kaše. Što je gustoća kaše manja, to je manja i mogućnost gubljenja cementne kaše u proizvodne zone, a time se postiže i veća proizvodnost bušotine.



### **3. DIZAJN CEMENTNE KAŠE OLAKŠANE DUŠIKOM**

Prilikom dizajniranja cementne kaše potrebno je osigurati prikladnu cementnu kašu za upotrebu na terenu. To znači da se cementna kaša lako može miješati i utiskivati s konvencionalnom opremom te da se može protisnuti do željene visine unutar prstenastog prostora, odnosno da posjeduje dovoljno dugo vrijeme zgušnjavanja. Tijekom cijelog ovog procesa cementna kaša mora ostati stabilna. Prema tome, pravilan dizajn cementne kaše je ključan za kvalitetnu i uspješnu cementaciju.

Cementiranje dugih horizontalnih intervala često zahtijeva manje protoke tijekom utiskivanja cementne kaše kako bi se smanjili otpori protjecanju u prstenastom prostoru. U navedenom slučaju upotreba aditiva je opravdana.

Dizajn pjenocementne kaše u većini slučajeva je isti kao i dizajn klasičnih cementnih kaša koje nisu olakšane dušikom. Potrebno je pažljivo odabrati tip i količine pojedinih aditiva kako bi se postigle potrebne vrijednosti svojstava cementne kaše (vrijeme zgušnjavanja, filtracija i reološka svojstva) i cementnog kamena (tlačna čvrstoća, propusnost). Kod izrade klasične cementne kaše koja nije olakšana dušikom, omjer vode i cementa je postojan i zbog toga se njezina svojstva mogu podešavati dodavanjem aditiva. Pjenocementna kaša ima jednak omjer vode i cementa kao i klasična cementna kaša, ali to ne znači da ima jednak omjer dušika i cementa. Zbog toga, gustoća ili omjer cementa i dušika ne utječe na fizikalna svojstva kaše. Na takva svojstva uglavnom utječe omjer vode i cementa te se smatraju parametrima o kojima ovisi kemijska reakcija koja se odvija u kaši. Jedno takvo važno svojstvo je vrijeme zgušnjavanja (McElfresh i Go Boncan, 1982).

### 3.1. Cement i aditivi

Za izvedbu cementacije potrebno je pripremiti cementnu kašu. Glavni dio cementne kaše čini Portland cement. Upotreba cementa u bušotinama je određena API standardom (*engl. American Petroleum Institute*), a to je zato jer uvjeti kojima će Portland cement biti izložen u bušotini se bitno razlikuju od uvjeta u građevinarstvu (Nelson, 1990). API odbor za standardizaciju bušotinskih cementa je publicirao dva dokumenta: API spec 10 - specifikacija za cemente i materijale za cementaciju bušotine; API RP 10 - preporučena praksa za ispitivanje bušotinskih cementa. Prema API spec 10 bušotinski su cementi svrstani u 8 klasa (A, B, C, D, E, F, G i H) koji zadovoljavaju propisane kemijske i fizikalne zahtjeve. Za pripremu pjenocementne kaše može se koristiti bilo koja klasa cementa. Prema Međunarodnoj organizaciji za norme (*engl. International Organization for Standardization, ISO*) za pjenocement se koristi ISO 10426-4 (ANSI/API RP10B-4) (Gaurina-Međimurec, 2016). Najvažnija svojstva bušotinskog cementa su gustoća, nasipna masa i finoća mliva. Gustoća se cementa kreće u rasponu od 3050 do 3150 kg/m<sup>3</sup>. Nasipna masa se mijenja i za rahlo stanje iznosi od 0,9 do 1,1 kg/l, a za zbijeno stanje iznosi od 1,4 do 1,7 kg/l. Finoća mliva (*engl. finenesses, specific surface area*) predstavlja vrlo važno svojstvo cementa jer s povećanjem finoće cementnih čestica se ubrzava hidratacija.

Cementne čestice igraju veliku ulogu u stabiliziranju pjene. Kada se kruta čestica cementa spoji s mjehurićem, ona onemogućava spajanje mjehurića i poboljšava stabilnost pjene (*engl. foam stability*).

Kako bi izabrali odgovarajuće sredstvo za izazivanje pjenjenja (pjenušavac) i stabilizatore pjene potrebno je uzeti u obzir sljedeće kriterije: učinkovitost, stabilnost, kompatibilnost, utjecaj na čvrstoću i propusnost cementnog kamena, troškove, sigurnost i drugo. Kemikalije koje se koriste moraju biti učinkovite pri povišenom tlaku i temperaturi u alkalnom okruženju vode. Vrlo je bitno da je pjena stabilna i na dulji period, a ne samo za vrijeme zgušnjavanja (Nelson, 1990).

Također, izrazito je bitna upotreba pjenušavca i stabilizatora pjene. Pošto je dušik inertan plin, može se koristiti većina uobičajenih aditiva. Pjenušavci koji se uglavnom koriste su anionski surfaktanti. Stabilizatori pjene mogu biti surfaktanti, polimeri, gumasti polimeri ili čak krute tvari (Nelson, 1990). Korištenjem površinski aktivnih tvari (PAT) jednake duljine lanca postiže se najmanja veličina mjehurića. Lanci sličnih duljina omogućuju čvršće pakiranje surfaktanata na kontaktnoj površini plina i tekućine. Miješanje

pjenušavaca kod kojih su jedna vrsta ionski surfaktanti, a druga ne-ionski, uzrokuju stvaranje pjena na bazi vode.

Polimeri ili dugolančani alkoholi se mogu koristiti kao stabilizatori pjene. Međutim, njihov mehanizam rada nije u potpunosti razjašnjen. Oni vjerojatno uzrokuju povećanje viskoznosti ili zadebljanje opne mjehurića plina što uzrokuje nemogućnost mjehurića da koalesciraju dok cementna kaša ne stvrdne u cementni kamen.

Za pripremu pjenocementne kaše uz osnovnu cementnu kašu s dodatkom pjenušavaca, stabilizatora pjene i aditiva potrebno je koristiti i inertan plin (dušik) te generator pjenjenja koji ima učinkovitu energiju miješanja (Nelson, 1990).

### 3.2. Svojstva cementne kaše olakšane dušikom

Svojstva pjenocementne kaše su: stabilnost, vrijeme zgušnjavanja, reološka svojstva i filtracija (McElfresh i Go Boncan, 1982).

#### 3.2.1. Stabilnost pjenocementne kaše

Pjenocementna kaša je gruba disperzija plina, obično dušika, u cementnoj kaši koja sadržava površinski aktivnu tvar - surfaktant kao aditiv za stvaranje pjene (pjenušavac) (*engl. foaming agent*) i druge kemijske proizvode za povećanje stabilnosti pjene. Pjena se opisuje njezinom kvalitetom (*engl. foam quality*) koja predstavlja omjer (izražen u postocima) između volumena koji zauzima plin i ukupnog volumena pjene ili pjenocementne kaše. Ovisno o kvaliteti, odnosno volumnom udjelu plina u pjenu, pjena može biti različite strukture, stoga se razlikuju ekstremi odnosno koncentrirane i razrijeđene pjenocementne kaše. Koncentrirane pjene (*engl. concentrated foams*) predstavljaju plinsku fazu, a sastoje se od poliedarskih mjehurića plina (*engl. gas cell*) koji su obloženi tankim filmom tekućine. Razrijeđene pjene (*engl. dilute foams*) se sastoje od sferičnih mjehurića odvojenih gustim filmom viskozne tekućine. Pjenocementna kaša spada u drugu kategoriju, s kvalitetom pjene do 80%, ali u većini slučajeva manjom od 50% (Nelson, 1990).

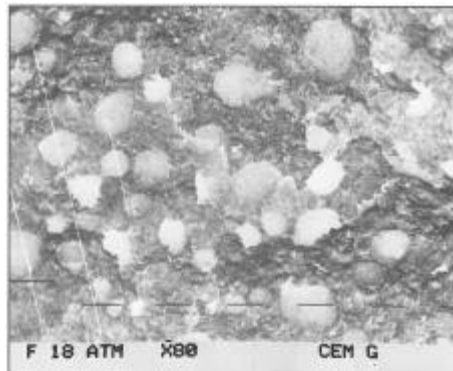
Stabilnost (*engl. foam stability*) ovisi o veličini čestice i sposobnosti vezivanja vode. Način na koji se čvrste čestice održavaju na površini plina ili tekućine srodan je adsorpciji topljive supstance. Također, veličina čestice je bitna jer utječe na brzinu sedimentacije. Stabilnost pjene ovisi o topljivosti čestice. Ukoliko je kontaktni kut premalen, dolazi do

otapanja čestice u tekućini. Ako je kut prevelik, adhezija na lamelu (*engl. lamella*) nije dovoljna da bi se čestica stabilizirala uslijed djelovanja kohezijske sile tekućine. Optimalni kut kontakta je između 40 i 70 stupnjeva (Nelson, 1990).

Pjenocementna kaša predstavlja kompresibilan fluid (*engl. compressible fluid*), što znači da će se njezina kvaliteta mijenjati tijekom cirkuliranja zbog značajnih varijacija tlaka u bušotini. Tipično, kvaliteta pjene stvorene pri tlaku od oko 6,9 MPa će se smanjiti kada se pjenocementna kaša protiskuje kroz kolonu prema dnu bušotine gdje tlak koji na nju djeluje može premašiti 69 MPa (Nelson, 1990). Nakon protiskivanja pjenocementne kaše kroz kolonu zaštitnih cijevi, kvaliteta pjene će ponovo porasti tijekom njezina protjecanja kroz prstenasti prostor od dna prema ušću bušotine. Ova promjena u kvaliteti pjene se može predvidjeti kao prva aproksimacija uzimajući u obzir zakone kompresibilnosti za dušik i njegovu topljivost u osnovnoj cementnoj kaši u koju se dodaje. Premda svojstva kao što je vrijeme zgušnjavanja ne ovise o kvaliteti pjene, provedene su studije u vezi fluida za frakturiranje koji sadrže dušik te su pokazale da za istu kvalitetu pjene, veći tlakovi potiču stvaranje manjih mjehurića (Nelson, 1990).

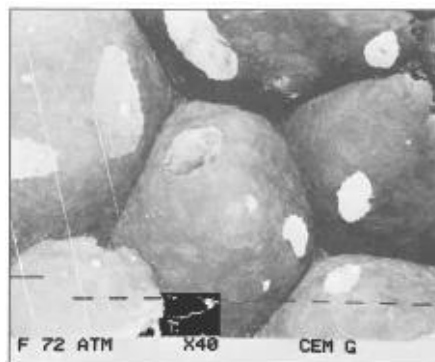
Uz tlak se mnogi drugi parametri moraju uzeti u obzir. Pjenocementna kaša je trofazni sustav (tekućina-plin-krutina) s mnogim fenomenima koji se pojavljuju na međupovršinama. Ovaj sustav se stalno mijenja zbog reorganizacije mjehurića koji mogu rasti, smanjivati se ili se povezivati zbog kemijskih reakcija koje se događaju u cementnoj kaši. Takav je sustav teško okarakterizirati jer su pjene ovisne o smicanju i na njihovu strukturu itekako utječe postupak miješanja. Utvrđeno je da su pjenocementne kaše koje se pripremaju u terenskim uvjetima, u kojima se koriste velike smične brzine i veliki tlakovi, stabilniji od onih koje se pripremaju u laboratorijskim uvjetima (Nelson, 1990). Osim toga, pjene se ne mogu replicirati jer je gotovo nemoguće konzistentno pripremiti dva uzorka pjenocementne kaše s istom početnom distribucijom veličine mjehurića (*engl. bubble-size distribution – BSD*). Pažljivim promatranjem pjenocementnog kamena (*engl. cured foam cement*) može se otkriti mreža cementnog matriksa i struktura pora. Ako je kvaliteta pjene dovoljno visoka tada je svaki mjehurić plina okružen s nekoliko drugih mjehurića.

Na slici 3-1 prikazana je mikroskopska snimka (uvećanje 80 puta) stvrdnutog pjenocementnog kamena nastalog iz pjenocementne kaše kvalitete pjene 18%.



Slika 3-1. Mikrostruktura pjenocementnog kamena za kvalitetu pjene 18% (Nelson, 1990)

Na slici 3-2 prikazana je mikroskopska snimka (uvećanje 40 puta) stvrdnutog pjenocementnog kamena nastalog iz pjenocementne kaše kvalitete pjene 72%.



Slika 3-2. Mikrostruktura pjenocementnog kamena za kvalitetu pjene 72% (Nelson, 1990)

Cjelovitost strukture ovisi o održavanju njihovih međupovršina. Vanjska sila kao što je dehidracija može izazvati puknuća opne mjehurića što dovodi do povezivanja dvaju ili više mjehurića.

Nestabilne cementne kaše rezultiraju u kamenu strukturu pora koja je nesferična i spojena. Ovaj se fenomen pojavljuje za vrijeme stvrdnjavanja cementne kaše u kamen. Događa se zbog puknuća stijenki nestabilnih mjehurića dušika nakon dodira s drugim mjehurićima dušika što za posljedicu ima njihovo srašćivanje – koalescenciju (*engl. coalescence*) i nastanak većih plinskih džepova. Zbog ove će pojave cementni kamen imati strukturu nalik spužvi, malu tlačnu čvrstoću, veću propusnost i lošija svojstva vezivanja (*engl. bonding properties*).

Kaše stabilne pjene koje se stvrdnu u cementni kamen uzrokuju sferične, odvojene, nespojene strukture pora s izraženim cementnim matriksom. Prema prethodno navedenom može se zaključiti da je stabilnost pjene izuzetno važna za kvalitetu cementne kaše i cementnog kamena.

### 3.2.2. Vrijeme zgušnjavanja

S operativnog gledišta, vrijeme tijekom kojeg se kaša može protiskivati je od primarne važnosti. Cementna kaša treba ostati pumpabilna sve dok se ne smjesti u prstenasti prostor. Nakon toga treba što brže stvrdnjavati u cementni kamen tako da se skрати vrijeme čekanja na nastavak radova (*engl. WOC = wait-on-cement*) i smanje troškovi. Kaše se ispituju u laboratoriju uz simuliranje bušotinskih uvjeta (tlak i temperatura). Vrijeme zgušnjavanja se definira kao vrijeme proteklo između početka primjene tlaka i temperature i postizanja viskoznosti od 100 Bc (Bc = API jedinica konzistencije) ili (Uc) (*engl. Uc-unit of consistency*). Vrijeme zgušnjavanja kaše se dizajnira tako da premaši vrijeme utiskivanja ili vrijeme potrebno da se obavi cementacija. U praksi, taj period generalno varira od oko jedan sat pa sve do 50% više od vremena potrebnog da se cementacija obavi (Gaurina-Međimurec, 2016).

Na vrijeme zgušnjavanja cementnih kaša bitno utječu (Gaurina-Međimurec, 2016):

- sastav cementa (povećanje količine  $C_3A$  u klinkeru dovodi do ubrzanja procesa zgušćivanja cementne kaše);
- finoća mliva (povećanjem finoće mliva odnosno specifične površine cementnih čestica ubrzava se zgušćivanje cementne kaše);
- vodocementni faktor (povećanjem vodocementnog faktora usporava se zgušnjavanje cementne kaše odnosno produljuje se vrijeme zgušnjavanja cementne kaše);
- temperatura i tlak (porast temperature i tlaka dovodi do ubrzanja procesa hidratacije čime se skraćuje vrijeme zgušnjavanja, što ograničava upotrebu čistih cementnih kaša).

Određivanje vremena zgušnjavanja pjenocementne kaše se razlikuje od određivanja vremena zgušnjavanja klasičnih cementnih kaša. U radu „*Application of Foam Cement*“ McElfresh i Go Boncan (1982) su opisali ispitivanje vremena zgušnjavanja pjenocementnih kaša.

Oni su vrijeme zgušnjavanja pjenocementne kaše odredili korištenjem visokotlačnog konzistometra i modificiranog atmosferskog konzistometra (komora). U komori visokotlačnog konzistometra održavan je tlak od 276 kPa (40 psi) tijekom cijelog postupka, a u komori modificiranog atmosferskog konzistometra vlada atmosferski tlak od 101,325 kPa. Rezultati mjerenja su prikazani u tablici 3-1. Iz tih rezultata vidljivo je da pjenocementna kaša ima značajno dulje vrijeme zgušnjavanja. Međutim, najveća razlika između ova dva testa, osim u pjenjenju, je i u tlakovima pod kojima su testovi izvedeni. Nakon što je započeto i treće ispitivanje (cement API klase G) u visokotlačnom konzistometru pod tlakom od 276 kPa, razlike između cementne kaše sa i bez pjene se značajno smanjuju (McElfresh i Go Boncan, 1982).

Tablica 3-1. Rezultati mjerenja vremena zgušnjavanja cementnih kaša sa i bez pjene (McElfresh i Go Boncan, 1982)

|                   |      |                                   | Vrijeme zgušnjavanja (h:min)          |                                      |                                     |
|-------------------|------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| API klasa cementa | v/c  | Gustoća kaše (kg/m <sup>3</sup> ) | Pjenocementna kaša pod tlakom 276 kPa | Cementna kaša pri atmosferskom tlaku | Cementna kaša pod tlakom od 276 kPa |
| H                 | 0,46 | 886,72                            | 7:55                                  | 4:53                                 | 8:40                                |
| C                 | 0,56 | 862,75                            | 1:59                                  | 1:08                                 | 3:02                                |
| G                 | 0,44 | 910,68                            | 3:07                                  | 1:34                                 | 2:31                                |

Prema tome, može se zaključiti da pjenocementne kaše pod povećanim tlakom u odnosu na cementnu kašu pri atmosferskim uvjetima imaju duže vrijeme zgušnjavanja. Kao što se vidi iz tablice 3-1, za API klasu cementna H, pri tlaku od 276 kPa pjenocementna kaša ima kraće vrijeme zgušnjavanja od klasične cementne kaše pri istom tlaku (7:55h u odnosu na 8:40h). Trend bržeg stvrdnjavanja prati obje (H i C) klase cementa za pjenocementnu kašu pod tlakom u odnosu na cementnu kašu pod tlakom. Vrijeme zgušnjavanja za cementnu kašu pod tlakom u odnosu na cementu kašu pri atmosferskom tlaku je dulje. To znači da tlak ima značajan utjecaj na vrijeme zgušnjavanja.

### 3.2.3. Reološka svojstva

Reologija (*engl. rheology*) je znanost koja se bavi izučavanjem deformacije i tečenja materije (tvari), osobito strujanjem neNewtonskih tekućina i plastičnim tečenjem čvrstih tvari. Tipovi protoka su laminarni i turbulentni protok (između je prijelazno područje). Za opisivanje ponašanja fluida koriste se reološki parametri, smično naprezanje (*engl. shear stress*) i smična brzina (*engl. shear rate*). Reološka svojstva: plastična viskoznost, naprezanje pri pokretanju, indeks toka i indeks konzistencije se određuju pomoću Fann viskozimetra. Premda vrijednosti reoloških parametara nisu određene API standardom potrebno je da budu dostatne veličine da se, ako to uvjeti u bušotini dozvoljavaju, postigne turbulentno protjecanje. Smatra se da se prilikom turbulentnog protjecanja postiže potpuna zamjena isplake cementnom kašom (Gaurina-Međimurec, 2016).

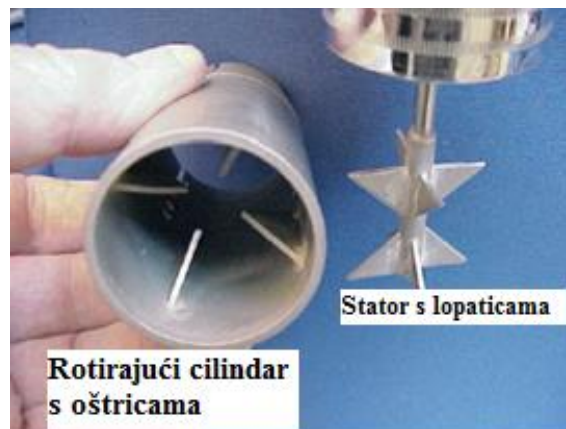
Reološka svojstva pjene su drukčija u odnosu na druge fluide. Mnogi su faktori koji uzrokuju različitost. Pjene su kompresibilni fluidi te se ne mogu smatrati matematički kontinuiranim. One su anizotropne, heterogene u sastavu i promjenjivih svojstava (Olowolagba i Brenneis, 2010).

U radu Olowolagba i Brenneis (2010.) „*Techniques for the Study of Foamed Cement Rheology*“ predstavljene su metode i laboratorijska oprema za određivanje viskoznosti pjenocementnih kaša. Pjene predstavljaju fluid kod kojega može doći do neprekidnog nastajanja i pucanja mjehurića. Iz ovoga razloga, rotacijski viskozimetar nije pogodan za mjerenje viskoznosti pjenocementne kaše. Uzorak se podvrgava modifikacijama tijekom smicanja gdje dolazi do pucanja ili u boljem slučaju do ponovne raspodjele mjehurića. U svakom slučaju tijekom testiranja dolazi do raspada pjene. Viskoznost, gustoća i protok će se konstantno mijenjati usporedno s mijenjanjem tlaka. Rezultat istoga je korekcija jednadžbe za izračun smičnog naprezanja i brzine smicanja. U radu je korišten Fann viskozimetar (*engl. rotational viscometer*) i FYSA viskozimetar (*engl. Fann yield stress adapter*). Fann viskozimetar se sastoji od boba i rotirajućeg cilindra (*engl. bob and sleeve*), (slika 3-3). Njegovi dijelovi su drugačije izvedbe od dijelova FYSA viskozimetra (slika 3-4).





Slika 3-3. Dijelovi Fann viskozimetra (Olowolagba i Brenneis, 2010)

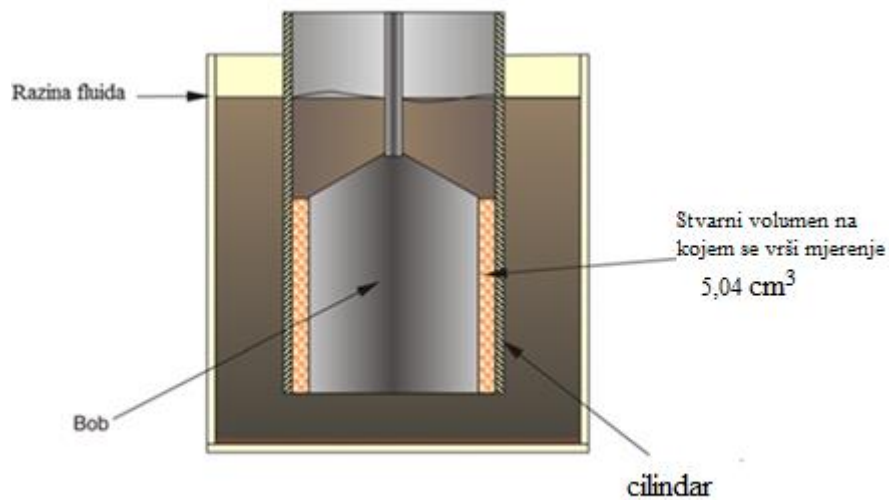


Slika 3-4. Dijelovi FYSA viskozimetra (Olowolagba i Brenneis, 2010)

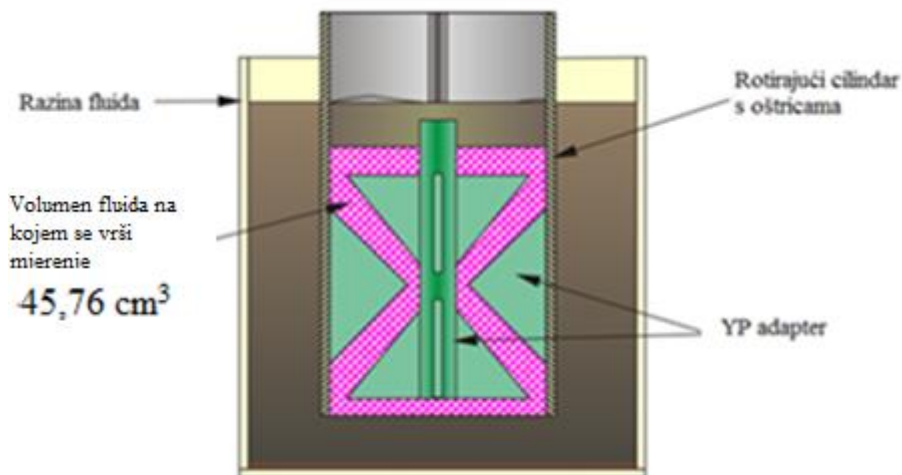
Razlike između Fann viskozimetra i FYSA viskozimetra su:

- Fann viskozimetar može uzrokovati separaciju čestice ili mjehura (*engl. particle and bubble separation*) što može imati negativan utjecaj na mjerenje. FYSA viskozimetar omogućuje potpuno miješanje kako bi se održala homogenost smjese mjehurića i čestica;
- Fann viskozimetar može uzrokovati takozvani „odmak od stijenke“ (*engl. wall slip*) koji predstavlja čest problem kod dvofaznih fluida, a FYSA viskozimetar umanjuje taj odmak;
- Mali broj okretaja u minuti kod Fann viskozimetra ne može postići dostatnu vrijednost smičnog naprežanja kako bi se postigao profil brzine u međuprostoru cilindra/boba što rezultira pogreškama u mjerenju, gdje FYSA viskozimetar omogućuje srednji prikaz vrijednosti smičnog naprežanja/smične brzine.

- Ključna prednost FYSA uređaja je što može direktno mjeriti naprezanje pri pokretanju, pogotovo kod složenijih fluida kao što su pjencementne kaše.
- Kod Fann viskozimetra može se koristiti mala količina uzorka od 5 ml (prostor između boba i rotirajućeg cilindra), što je devet puta manje nego da se koristi FYSA viskozimetar. Ovakvo povećanje volumena uzorka je bolje, jer se s tim dobivaju točnije i reprezentativnije vrijednosti. Slike 3-5 i 3-6 prikazuju viskozimetre i volumene fluida koji se mogu koristiti;

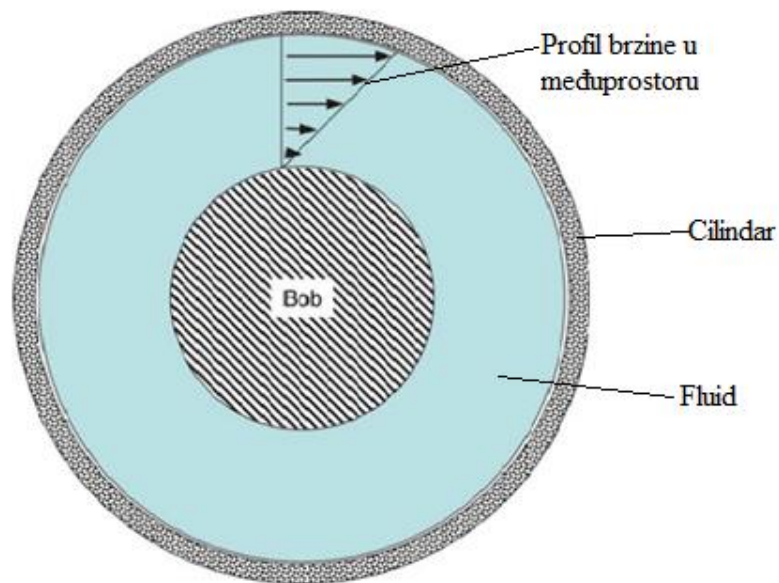


Slika 3-5. Fann viskozimetar i stvarni volumen na kojem se vrši mjerenje (Olowolagba i Brenneis, 2010)

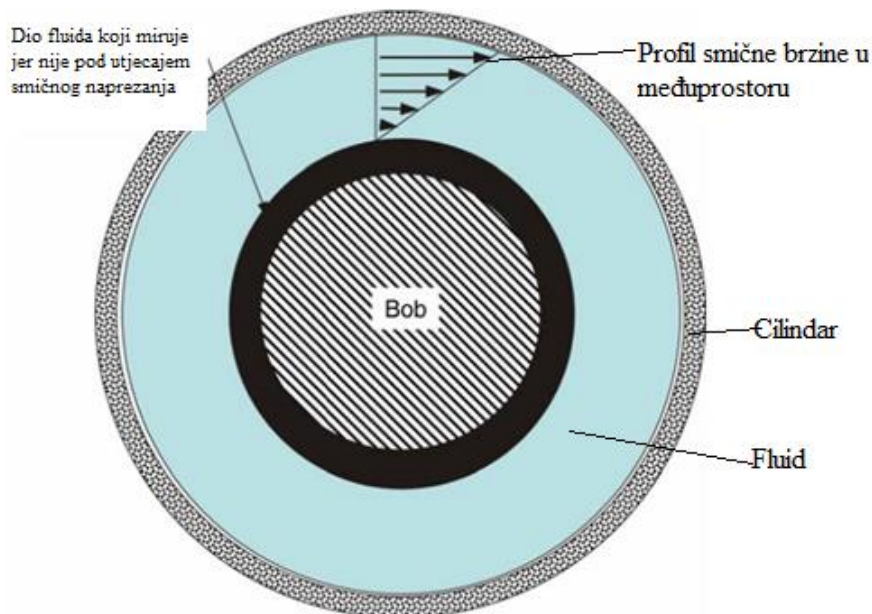


Slika 3-6. FYSA viskozimetar i stvarni volumen na kojem se vrši mjerenje (Olowolagba i Brenneis, 2010)

- Adekvatno područje smičnosti - korištenjem Fann viskozimetra za mjerenje kompleksnih fluida, kao što je pjenocementna kaša, pri niskim brzinama smicanja je moguće da se ne postignu dostatna smična naprezanja da se stvori distribucija profila brzine u prostoru između boba i rotacijskog cilindra. Zbog toga nastaje puno pogrešaka u mjerenju. Za razliku od Fann viskozimetra, FYSA viskozimetar je dizajniran za prikaz profila smičnog naprezanja i smične brzine kroz cijeli međuprostor, pa čak i pri niskim brzinama (slika 3-7 i 3-8).



Slika 3-7. Smično naprezanje je dovoljno da se stvori potpuni profil brzine u međuprostoru (Olowolagba i Brenneis, 2010)



Slika 3-8. Prikaz fluida kod kojeg nema potpunoga djelovanja smičnog naprezanja što se očituje slabijim očitanjem torzije (Olowolagba i Brenneis, 2010)

Ključna prednost FYSA viskozimetra je što izravno mjeri granicu tečenja fluida, što znači da ne ovisi o statističkoj regresiji podataka smične brzine i smičnog naprezanja. Isto tako mjeri omjer između smične brzine i smičnog naprezanja za kompleksne fluide.

Reološka svojstva pjencementne kaše imaju izravan utjecaj na hidraulička svojstva kaše. Prednosti upotrebe pjencementne kaše su (Olowolagba i Brenneis, 2010):

- povećanje smičnog naprezanja kaše koje omogućuje bolje zamjenjivanje isplake u prstenastom prostoru i filtracijskog obloga;
- poboljšanje filtracije;
- smanjenje mogućnosti migracije plina kroz kašu ili dotok vode u kašu za vrijeme zgušnjavanja;
- smanjenje gustoće kaše kako bi se osigurale slabe zone.

### 3.2.3.1. Određivanje reoloških svojstava pjencementne kaše

Osnovna cementna kaša pripravljena je miješanjem 600 g cementa klase H i 258 g vode. Smjesa cementa i vode miješana je pri velikim brzinama kako bi se formirala kaša. Agensi pjenjenja su isto dodani te su miješani ručno i polagano kako se ne bi stvorila pjena. Nakon toga se kaša postavlja u miješalicu zatvorenog volumena, koju određuje API standard (API preporučena praksa 10B-4; za postizanje pjenastog cementa pri atmosferskim uvjetima), i miješa pri velikim smičnim brzinama kako bi se postigla pjena. Za mjerenje je korišten Fann viskozimetar i FYSA viskozimetar. Nakon mjerenja smičnih naprezanja izračunata su reološka svojstva. Kvaliteta pjencementne kaše može biti promjenjiva jer na nju utječe omjer osnovne kaše i pjenušavca. Kvaliteta pjencementne kaše pri bilo kojem tlaku i temperaturi se može definirati kao:

$$q = \frac{V_g}{V_L + V_g} \times 100 \quad (3-1)$$

gdje su :

$V_g$  - volumen plina,  $m^3$

$V_L$  - volumen kaše,  $m^3$

$q$  - kvaliteta pjene, %

Reologija pjencementne kaše se može definirati kao funkcija kvalitete i gustoće, pretpostavljajući da je jednolika veličina i distribucija mjehurića.

$$\tau_{o(q,T)} = \frac{\rho_q}{\rho_o} \tau_{o,o} [q]_{\tau_o} [T]_{\tau_o} \quad (3-2)$$

$$\mu_{\infty(q,T)} = \frac{\rho_q}{\rho_o} \mu_{\infty,o} [q]_{\mu_{\infty}} [T]_{\mu_{\infty}} \quad (3-3)$$

gdje su:

$[q]_{\tau_o}$ ,  $[q]_{\mu_x}$  bezdimenzionalne funkcije kvalitete između pjencementnog kamena i pjencementne kaše te,

$[T]_{\tau_o}$ ,  $[T]_{\mu_x}$  bezdimenzionalne funkcije temperature pjencementnog kamena i pjencementne kaše,

$\rho_q$  - gustoća pjencementne kaše pri kvaliteti pjene (q),  $\text{kg/m}^3$ ,

$\rho_o$  - gustoća osnovne kaše pri atmosferskom tlaku,  $\text{kg/m}^3$ ,

$\tau_o$  - naprezanje pri pokretanju za pjencementnu kašu, Pa.

Ponašanje pjencementne kaše najtočnije i najpreciznije opisuje Herschel-Bulkey model (Olowolagba i Brenneis, 2010), koji je dan izrazom:

$$\left(\frac{\tau}{\tau_{ref}}\right)^m = \left(\frac{\tau_o}{\tau_{ref}}\right)^m + \left(\frac{\mu_x \gamma}{\tau_{ref}}\right)^n \quad (3-4)$$

$\tau_{ref} = 47,88 \text{ Pa} = 1 \text{ lbf}/1000 \text{ f}^2$  (referentno naprezanje pri pokretanju)

$\mu_{(\alpha(q,T))}$  - viskoznost pri beskonačnoj smičnoj brzini, mPaxs

n - indeks konzistencije,

m - eksponent naprezanja,

$\gamma$  - smična brzina, (1/s)

$\tau$  – smično naprezanje pjencementne kaše, Pa

### 3.2.3.2. Rezultati mjerenja viskoznosti

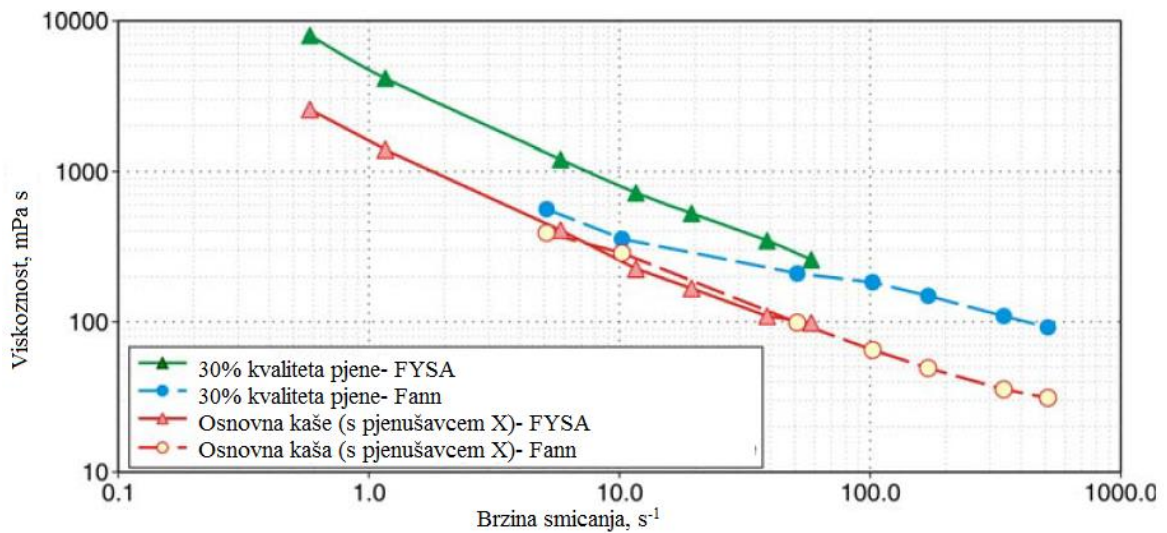
Rezultati mjerenja viskoznosti pjenocementne kaše su dobiveni korištenjem Fann viskozimetra uspoređeni s FYSA viskozimetrom. U tablici 3-2 prikazana je pogreška kod Fann viskozimetra u postotcima (%), te vrijednosti za mjerenu viskoznost koristeći Fann viskozimetar i FYSA viskozimetar pri niskim brzinama smicanja.

Tablica 3-2. Rezultati mjerenja viskoznosti s pogreškama (Olowolagba i Brenneis, 2010)

| Kvaliteta pjene % | Smična brzina, s <sup>-1</sup> | Viskoznost, mPaxs |                   | Greška kod rotacijskog Fann viskozimetra, (%) |
|-------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|---|
|                   |                                | FYSA viskozimetar | Fann viskozimetar |   |
| <b>0</b>          | 5,1                            | 468               | 396               | Zanemarivo                                    |
|                   | 10,2                           | 265               | 284               | Zanemarivo                                    |
|                   | 51,2                           | 102               | 102               | --  |
| <b>30</b>         | 5,1                            | 1370              | 573               | -58   |
|                   | 10,2                           | 815               | 365               | -55   |
|                   | 51,2                           | 294               | 214               | -27   |

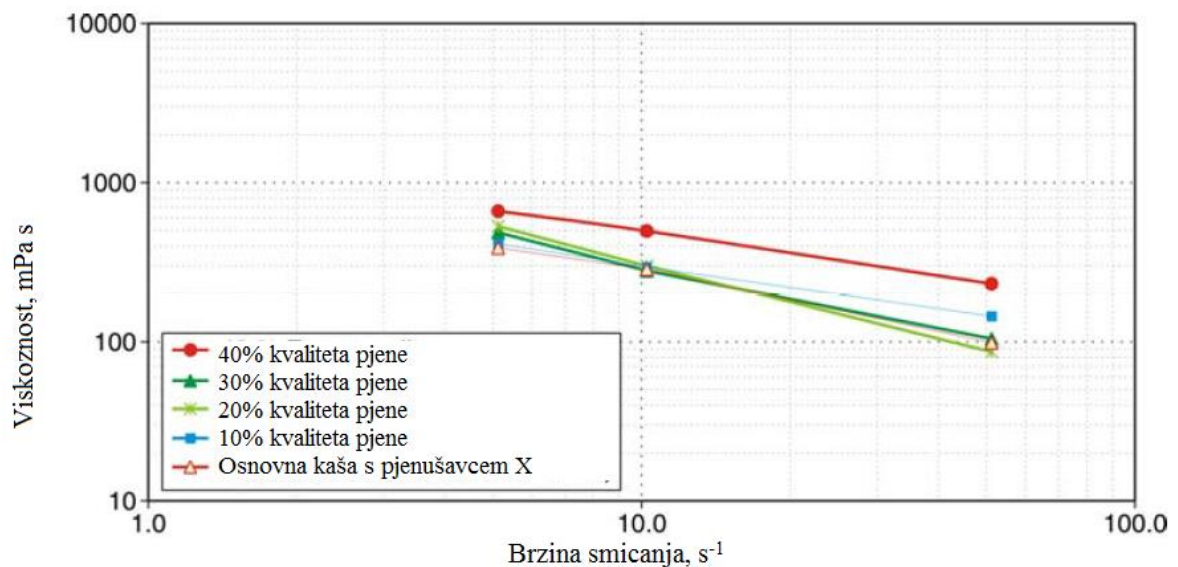
Prikazane vrijednosti ukazuju da je odnos između smične brzine i viskoznosti obrnuto proporcionalan. Odnosno, ako je cementna kaša bez pjene (kvaliteta pjene 0%), tada nema pogrešaka pri mjerenju, što ukazuje na to da su kvaliteta pjene i greške pri mjerenju proporcionalne.

Slika 3-9 prikazuje rezultate mjerenja viskoznosti pri različitim smičnim brzinama pjenocementne kaše kvalitete pjene 30% i cementne kaše bez pjene koristeći Fann viskozimetar i FYSA viskozimetar. Pogreške pri mjerenju su vidljive kod pjenocementne kaše koristeći Fann viskozimetar.



Slika 3-9. Rezultati mjerenja viskoznosti za cementnu i pjenocementnu kašu koristeći Fann i FYSA viskozimetar (Olowolagba i Brenneis, 2010)

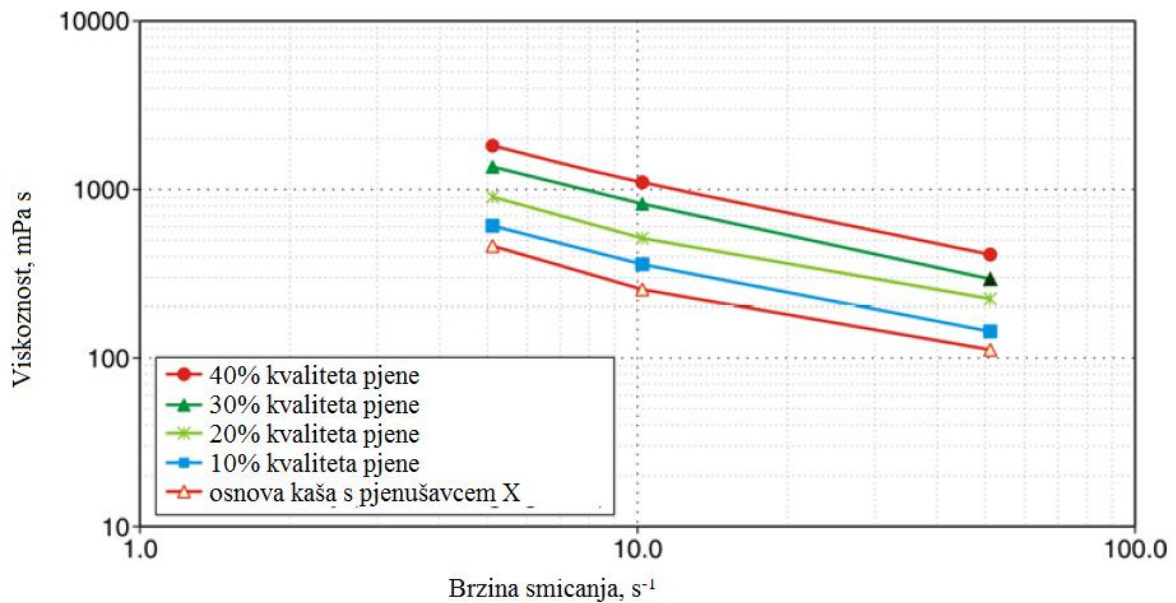
Slika 3-10 prikazuje ovisnost viskoznosti pri niskim brzinama smicanja koristeći Fann viskozimetar.



Slika 3-10. Ovisnost viskoznosti o kvaliteti pjene koristeći Fann viskozimetar (Olowolagba i Brenneis, 2010)

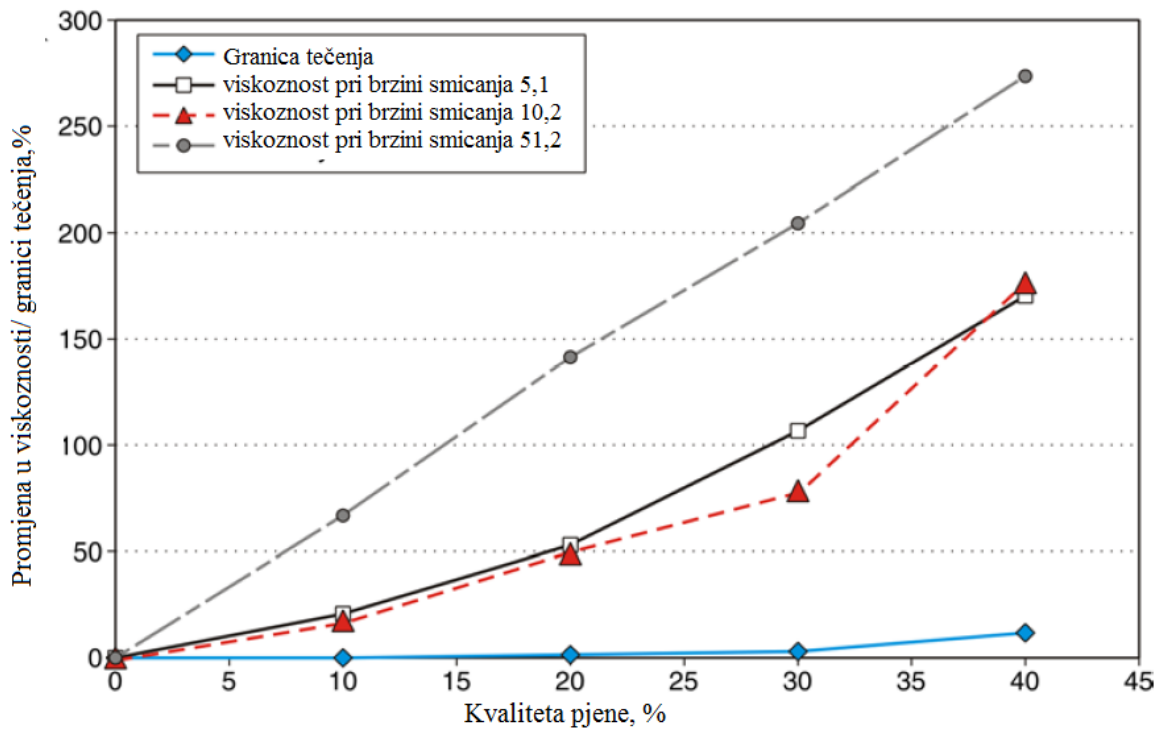
Iz slike se može zaključiti da pri brzini smicanja od  $10 \text{ s}^{-1}$  viskoznost je jednaka za tri različite kvalitete pjene kaše. Prema tome, Fann viskozimetar ne daje točne podatke za pjenocementnu kašu različitih kvaliteta pjene. Slika 3-11 prikazuje smanjivanje razlike u izmjerenim vrijednostima viskoznosti kod FYSA viskozimetra pri niskim brzinama smicanja.



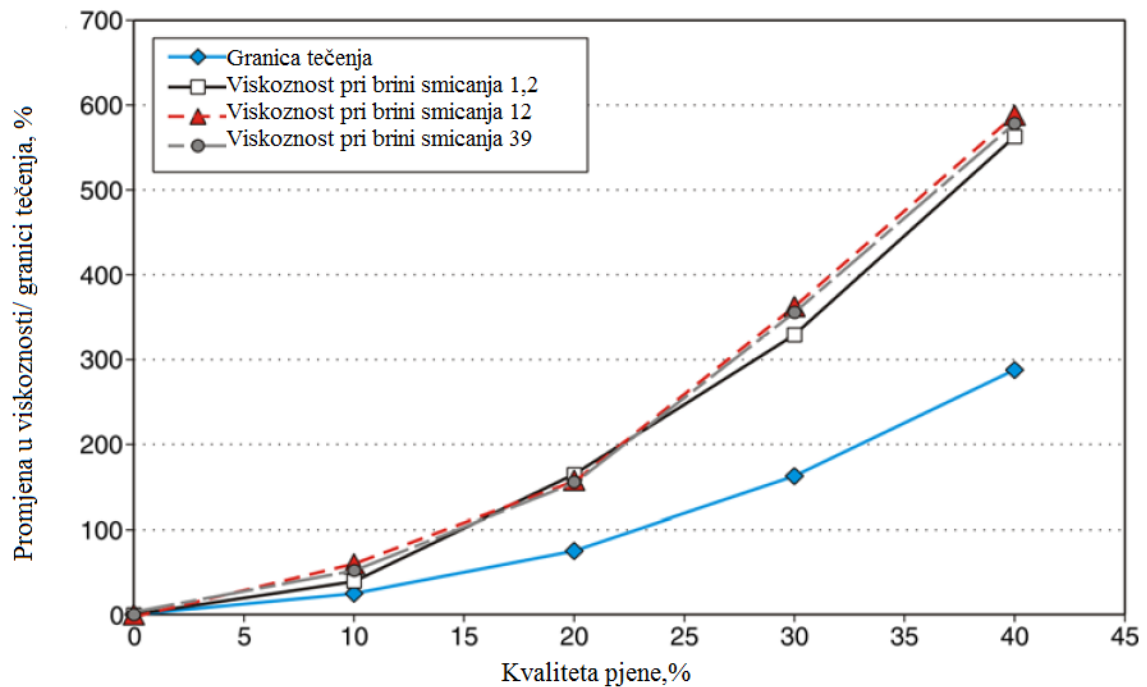


Slika 3-11. Ovisnost viskoznosti o kvaliteti pjene koristeći FYSA viskozimetar (Olowolagba i Brenneis, 2010)

Slika 3-11 pokazuje ovisnost viskoznosti o kvaliteti pjene pri niskim brzinama smicanja koristeći FYSA viskozimetar. FYSA viskozimetar daje bolje i točnije vrijednosti. Na slici su vidljive krivulje za pojedinu kvalitetu pjene, dok kod Fann viskozimetra to nije slučaj. Iz slika je vidljiva razlika između mjerenja. Za pjenocementnu kašu kvalitete pjene 40% viskoznost dobivena pri brzini smicanja oko 10 s<sup>-1</sup> iznosi 1000 mPa·s. Dok korištenjem Fann viskozimetra (slika 3-10), pri istoj brzini smicanja, viskoznost iznosi oko 700 mPa·s. Također, prikazan je utjecaj kvalitete pjene na naprezanje pri pokretanju s Fann i FYSA viskozimetrom (slika 3-12 i 3-13).



Slika 3-12. Utjecaj kvalitete pjene na promjene naprežanja pri pokretanju i viskoznosti pjenocementne kaše koristeći Fann viskozimetar (Olowolagba i Brenneis, 2010)



Slika 3-13. Utjecaj kvalitete pjene na promjene naprežanja pri pokretanju i viskoznosti pjenocementne kaše koristeći FYSA viskozimetar (Olowolagba i Brenneis, 2010)

Iz slika je vidljiva razlika u mjerenim vrijednostima. Na primjer, kod Fann viskozimetra (slika 3-12) za 20% kvalitetu pjene promjena u granici tečenja je približno jednaka nuli, dok kod FYSA viskozimetra (slika 3-13), pri istoj kvaliteti, promjena u granici tečenja iznosi 70%. Kod korištenja FYSA viskozimetra s povećanjem kvalitete pjene povećava se i granica tečenja. Takav odnos ne postoji kod vrijednosti dobivene Fann viskozimetrom.

### 3.2.4. Filtracija

Filtracija (*engl. filtration, fluid loss*) predstavlja proces izdvajanja vode (filtrata) iz cementne kaše pod djelovanjem diferencijalnog tlaka. Rezultat filtracije je izmjerena količina filtrata, koja se izdvoji iz cementne kaše u periodu od 30 minuta, pri tlaku od 6,89 MPa (1 000 psi), kroz sito veličine 325 mesha, pomnožena s 2. API filtracija svih cementnih kaša bez aditiva je visoka i iznosi preko 100 ml. Ovisno o tipu cementacije njezina se veličina prilagođava. Međutim, filtraciju je moguće kontrolirati korištenjem aditiva.

Za pjenocementne kaše se koriste isti aditivi kao i za klasične cementne kaše. U nastavku se opisuju rezultati ispitivanja filtracije objavljeni u radu „*Applications of Foam Cement*“ koje su proveli McElfresh i Boncan (1982). Korišten je cement API klase G, a cementna kaša je sadržavala 44% vode i 0,7% aditiva za smanjivanje filtracije. Mjerenje je provedeno u komori za filtraciju pri temperaturi od 27 °C. Rezultati mjerenja API filtracije za kaše različite gustoće su prikazani u tablici 3-3.

Tablica 3-3. Gubitak fluida kao funkcija gustoće (McElfresh i Go Boncan, 1982)

| Gustoća kaše (kg/m <sup>3</sup> ) | ADITIVI (%)             |            | API<br>Filtracija (ml) |
|-----------------------------------|-------------------------|------------|------------------------|
|                                   | Smanjenje<br>filtracije | Pjenušavac |                        |
| 1821                              | 0,7                     | 0,75       | 206                    |
| 1450                              | 0,7                     | 0,75       | 182                    |
| 1270                              | 0,7                     | 0,75       | 151                    |
| 971                               | 0,7                     | 0,75       | 129                    |

Na temelju prikazanih podataka se može zaključiti da je filtracija proporcionalna smanjenju gustoće. Što znači ako je manja gustoća bit će manja i filtracija. Kod pjenocementne kaše jedino „mjesto“ za gubitak vode je u području mjehurića dušika. Kako se gustoća smanjuje tako se povećava površina membrane mjehura čime se ujedno povećava i udaljenost koju fluid mora prijeći da bi napustio kašu. Posljedica toga jest smanjenje filtracije (McElfresh i Go Boncan, 1982).

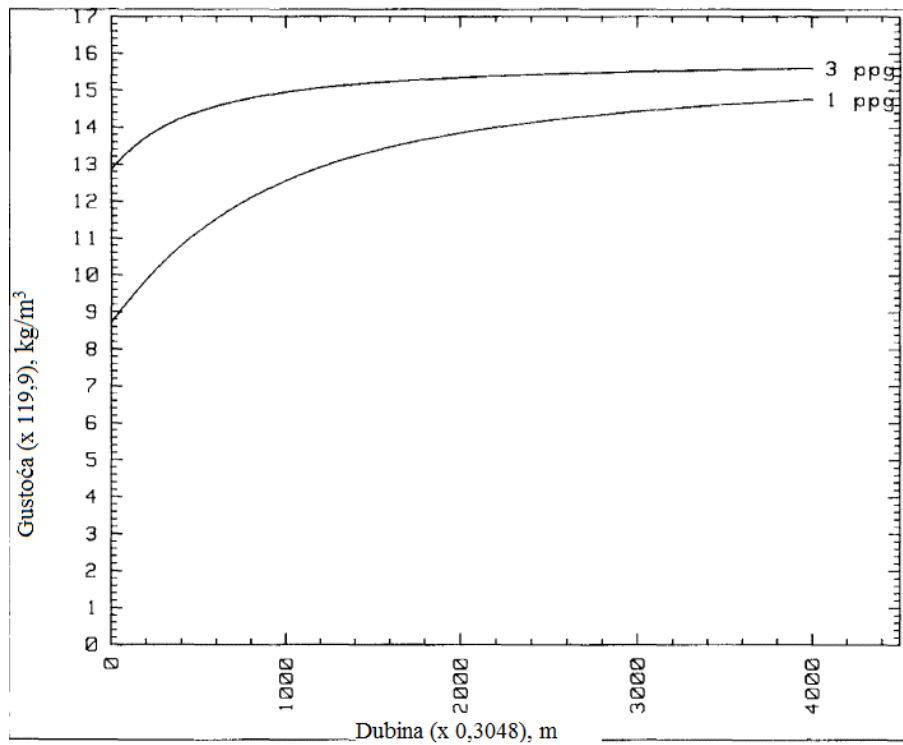
### 3.2.5. Postupak utiskivanja pjencementne kaše i potrebna površinska oprema

Nakon što je postignut pravilan dizajn cementne kaše, pravilno utiskivanje u bušotinu je jednako bitno da bi se postigli željeni rezultati. Postoje dva načina utiskivanja (McElfresh i Go Boncan, 1982):

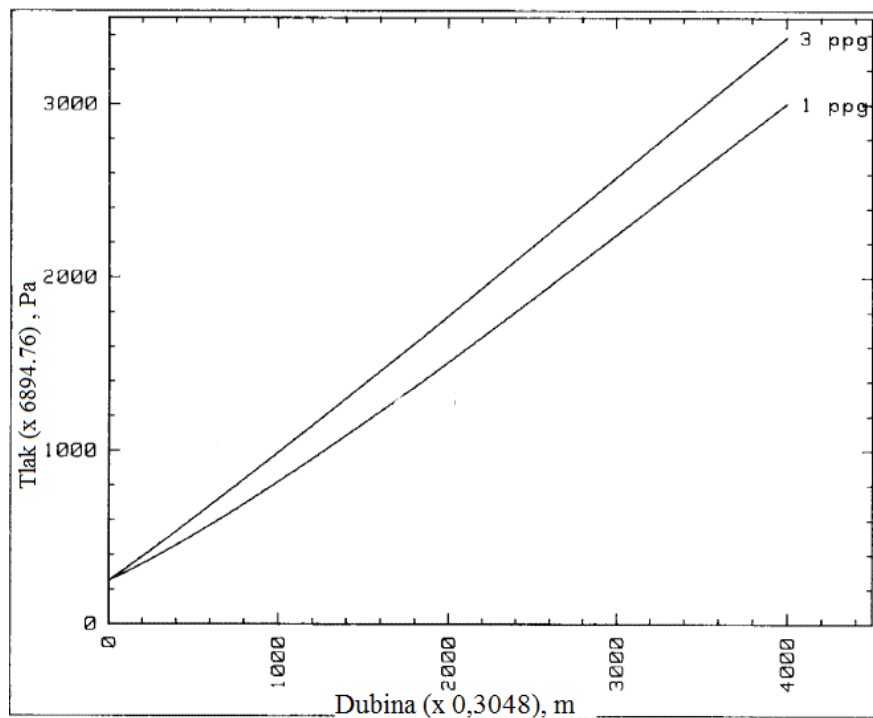
- utiskivanje konstantne količine dušika u cementnu kašu tijekom cijelog vremena utiskivanja cementne kaše, i
- održavanje konstantne gustoće cementne kaše tijekom cijelog vremena utiskivanja.

#### *3.2.5.1.1. Postupak utiskivanja pjencementne kaše pri konstantnoj količini dušika*

Oba postupka imaju određenu primjenu i njihove posebne probleme. Međutim, oba načina se oslanjaju na plinski zakon kontroliranja gustoće kaše pri uvjetima tlaka i temperature u kanalu bušotine. Slike 3-14 i 3-15 prikazuju promjene gustoće s dubinom i promjenom hidrostatskog tlaka. Krivulje na slikama su rezultat računalne simulacije kaše gustoće od  $1906 \text{ kg/m}^3$  koristeći tlak od 1725 kPa i temperaturni gradijent od  $2,7 \text{ }^\circ\text{C/m}$ . Brzina protoka dušika je konstantna tako da gustoća pjencementne kaše na površini iznosi  $360 \text{ kg/m}^3$  u prvom slučaju, a u drugom slučaju iznosi  $120 \text{ kg/m}^3$ . U oba primjera gustoća pjencementne kaše se približava maksimalnoj vrijednosti gustoće od  $1798 \text{ kg/m}^3$  na dubini od 610 m i na 2134 m. Ova promjena gustoće je zbog kompresibilnosti dušika (McElfresh i Go Boncan, 1982). Ovakve promjene u gustoći su karakteristične za slučaj jednoličnog protoka dušika. Kao što je prikazano na slikama 3-14 i 3-15 primjena ove tehnike ima mogućnost postizanja „normalne” pjencementne gustoće za vrijeme pumpanja. Prema tome, potrebno je znati koliki je tlak frakturiranja i ekvivalentna gustoća kako bi se osiguralo da ne dođe do loma formacije. Ovaj postupak utiskivanja pjencementa je općenito korišten za cementiranje plitkih bušotina dubine do 610 m. Primjenom pjencementne kaše na ovim dubinama se omogućuje izoliranje poroznih formacija.



Slika 3-14. Povećanje gustoće pjencementne kaše s dubinom (McElfresh i Go Bocan, 1982)



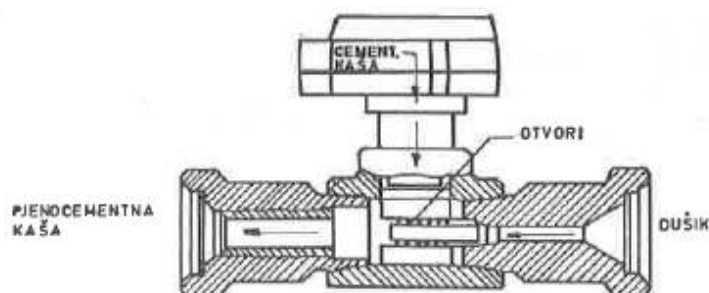
Slika 3-15. Povećanje tlaka s dubinom (McElfresh i Go Bocan, 1982)

### 3.2.5.2. Postupak utiskivanja pjencementne kaše konstantne gustoće

Upotreba pjencementne kaše jednolike gustoće važna je za primarnu cementaciju u području relativno dubokih i slabih formacija. Ovaj postupak predstavlja povećanje protoka dušika kako bi se osigurala jednolika gustoća cementne kaše u prstenastom prostoru. To je omogućeno upotrebom računalnoga programa. Program omogućava iterativni pristup. U svakoj fazi se uzima u obzir tlak, temperatura i volumen kaše da bi se izračunao potreban protok dušika za postizanje željene konstantne gustoće. Program radi na način da koristi podatke prethodne faze za početak proračuna potrebnog protoka dušika za sljedeću fazu. Na ovaj način se omogućuje izračun količine dušika za bilo koji unaprijed odabrani volumen (McElfresh i Go Boncan, 1982).

### 3.2.5.3. Površinska oprema za pripremu pjencementne kaše

U površinsku opremu pripadaju: pjenogenerator, miješalica, pumpe za pjenušavce i dušik. Odabir pravilnog pjenogeneratora (*engl. foam generator*) je od velike važnosti. Stabilnost pjencementnog kamena ovisi o ravnomjernosti i veličini mjehura dušika raspršenog u cementnoj kaši. U radu na terenu se koristi pjenogenerator „T” koji je prikazan je na slici 3-16 (Pavić i dr., 1989). Dizajn sadrži mlaznice za dušik kroz koji se utiskuje dušik u cementnu kašu. Zbog toga je manje vjerojatno da će se raspršivač koristiti tijekom rada, dok istodobno otvori malog promjera na mlaznicama omogućuju dostatnu silu koja će jednoliko raspršiti mjehuriće dušika u cementnoj kaši.



Slika 3-16. Pjenogenerator „T“ (Pavić i dr., 1989)

#### 4. PJENOCEMENTNI KAMEN I SVOJSTVA

Pjenocementna kaša je disperzija plina u tekućini koja nastaje dodavanjem dušika i surfaktanata u osnovnu cementnu kašu. Pjenocementna kaša očvršćuje u pjenocementni kamen (*engl. foamed cement*). Uloga je cementnog kamena osigurati odgovarajuće učvršćenje zaštitnih cijevi, osigurati izoliranje probušenih naslaga stijena tijekom proizvodnog vijeka bušotine te spriječiti međuzonalnu komunikaciju. Svojstva cementnog kamena su tlačna čvrstoća (*engl. compressive strength*), propusnost (*engl. permeability*) i otpornost na djelovanje korozivnih spojeva (*engl. effects of corrosion*). Cilj je dizajnirati cementnu kašu koja će brzo razviti tlačnu čvrstoću kako bi se smanjilo vrijeme čekanja na stvrdnjavanje. Najveći utjecaj na čvrstoću imaju temperatura i tlak. Tlačna čvrstoća cementnog kamena se definira kao najveće opterećenje pri kojem uzorak cementnog kamena puca. Za određivanje tlačne čvrstoće se koristi hidraulička preša (*engl. hydraulic press*) i ultrazvučni analizator (*engl. ultrasonic analyzer*).

Propusnost cementnog kamena karakterizira otpor prodiranju fluida kroz cementni kamen u prstenastom prostoru kanala bušotine. Cementni kamen mora imati malu propusnost jer je njegova primarna funkcija da spriječi migraciju fluida prstenastim prostorom prema površini. U većini je slučajeva propusnost cementnog kamena manja od  $10^{-5} \mu\text{m}^2$ . Propusnost se mjeri pomoću permeametra prema propisima API RP 10B.

Za razliku od klasičnog cementnog kamena nekoliko je prednosti korištenja pjenocementnog kamena. Za početak, pjenocementni kamen je kvalitetniji za integritet bušotine nego cementni kamen. Plin uzrokuje sniženje gustoće cementne kaše i smanjenje tlačne čvrstoće cementnog kamena. Međutim, pjenocementni kamen ima bolja elastična svojstva. Kao rezultat, pjenocementni kamen ima manju mogućnost da će se odvojiti od stjenke kanala bušotine ili zaštitnih cijevi ili da će frakturirati te stvoriti male pukotine na stjenkama kanala bušotine kroz koju može doći do dotoka (Gieger i dr., 2016).

U radu „*Physical and Mechanical Properties of Field-Generated Foam Cement: Implications for Cement Property Prediction and Modeling*“ autora Gieger i dr.(2016) su opisani postupci i testiranja kako bi se predvidjelo ponašanje pjenocementnog kamena u bušotini. Prema Američkom naftnom institutu (API) (*engl. American Petroleum Institution*) definirani su postupci pripreme i testiranja cementnog kamena: API-RP-10B2 i 10B (API 1997, 2004, 2010). Parametri koji su korišteni za procjenu mjerenja svojstava cementnog kamena u kanalu bušotine za bušotinske uvjete su Youngov modul elastičnosti,



Poissonov koeficijent, propusnost i tlačna čvrstoća. Također, koriste se testovi kao što je destruktivno statičko ispitivanje (*engl. destructive static test*) za procjenu tlačne čvrstoće cementa, test dinamičnosti (*engl. dynamic test*) (ne-destruktivan test) koji koristi, primjerice, ultrazvučni analizator (*engl. ultrasonic analyzer*) za određivanje Youngov modula, Poissonovog omjera i niz drugih eksperimenata i testiranja za određivanje propusnosti. Rezultati koji se dobiju u laboratoriju su od iznimne važnosti jer ih je lakše analizirati i prikupiti nego da se eksperimenti vrše na terenu.

Bitno je napomenuti da je standardna procedura pripreme pjenocementne kaše na terenu i u laboratoriju različita. Prvo, uvjeti su rada znatno drugačiji na terenu i u laboratoriju. Drugo, postupak koji se koristi na terenu i u laboratoriju je različit. U laboratoriju, cementna kaša i surfaktanti se stavljaju u zatvorenu posudu kako bi se postigla što „kvalitetnija“ cementna kaša. Pjenocementna kaša sadrži određeni dio plina koji se miješa s cementnom kašom. Pjenocementne kaše imaju pjenastu „kvalitetu“ koja ovisi o postotku utisnutog plina u volumen cementne kaše. Na terenu, kvaliteta pjene je funkcija protoka cementne kaše i injektiranog plina u kašu. Kvaliteta pjene i poroznost su približno jednake, ali nisu iste. Poroznost se očitava u prazninama materije, gdje kvaliteta pjene ovisi o količini injektiranog dušika. Sve će cementirane bušotine u kojima se koristila pjenocementna kaša imati kvalitetu pjene od 15-20% (Gieger i dr., 2016).

Razna mehanička i fizikalna svojstva pjenocementnog kamena se mogu koristiti za određivanje kvalitetne cementacije bušotine. U radu od Gieger i dr. će se objasniti tlačna čvrstoća, Youngov modul, Poissonov koeficijent i propusnost. Osnovna kaša i surfaktanti ostaju isti za ispitivanje metodama koje se koriste u laboratoriju i na terenu. Stvaranje i stvrdnjavanje pjenocementnog kamena će prikazati pukotine odnosno veličinu pora i distribuciju mjehurića u cementu. U radu se pretpostavlja da veličina pore, distribucija i tlak stvrdnjavanja mogu utjecati na mehanička i fizikalna svojstva cementnog kamena.

#### 4.1. Materijal i metode

U provedenim eksperimentima su korišteni uzorci pjenocementnog kamena koje je prikupila kompanija u suradnji s NETL (*engl. national energy technology laboratory*) i u suradnji s Američkim institutom za naftu (API). U radu su radi lakšeg razumijevanja uzorci podijeljeni na uzorak prikupljen na terenu (*engl. field cement system*) na A i B, odnosno (FCSA i FCSB), te na laboratorijski uzorak 1 i 2, odnosno (FCS1 i FCS2). Uzeto je 69 uzoraka s terena, od čega je 36 uzoraka uzeto iz bušotine A, a 36 iz bušotine B.

Pjenocementni kamen je skupljen skretanjem pjenocementne kaše u posudu pod stalnim tlakom (*engl. constant pressure cylinder*) koja je izrađena od nehrđajućeg čelika. U posudi pjenocementna kaša očvrstne u pjenocementni kamen. Cilj je bio postići željenu kvalitetu pjene koja bi se koristila kod postupka cementacije. Međutim željena kvaliteta nije postignuta te se zbog ove nepreciznosti izmjerena poroznost koristi za opis uzorka i odnos svojstava pjenocementnog kamena. Posuda pod tlakom je dostavljena u NEAT tvrtku gdje je izvršena računalna tomografija (*engl. computed tomography scans*). Nakon računalne tomografije (CT) posudi je snižen tlak tako da je uklonjeno 5 ml volumena. Nakon toga su uzorci podijeljeni na manje duljine radi praktičnosti. Propusnost je dobivena na atmosferskim uvjetima koristeći Temco ultra-perm uređaj (Gieger i dr., 2016). Dinamičko ispitivanje uzoraka pjenocementnog kamena je vršeno u Autolab-u 1500 (NER). Dinamičko mjerenje je izvršeno uz primjenu od 5 MPa opterećenja i bez opterećenja. Ultrazvučni sustav šalje P i S valove kroz posudu s jednog kraja te ih na drugom kraju bilježi. Relevantna svojstva dobivena u laboratoriju su Youngov modul, Poissonov koeficijent i dodatna mjerenja propusnosti. Ponašanje cementnog kamena pod djelovanjem tlaka je od iznimne važnosti za ispitivanje integriteta cementnog kamena u bušotini. Statički je test opterećenja proveden pomoću digitalnog analizatora tlačne čvrstoće (*engl. digital compressive strenght analyzer*). API specifikacijom 10A su određena opterećenja za uzorke sve do stanja pucanja. Jednoosna tlačna sila je određena dovodeći sve uzorke do stanja pucanja, čineći ih nemogućim za daljnju upotrebu i analizu.

Rezultati svih uzoraka se nalaze u tablici 4-1.

Tablica 4-1. Fizikalna i mehanička svojstva pjencementnog kamena (Gieger i dr., 2016)

| <b>Fizikalna svojstva pjencementnih kamena</b> |                              |                                |   |  |   |
|--|------------------------------|--------------------------------|---|--|---|
| <b>Sustav cementa</b>                          | <b>Ciljana kvaliteta (%)</b> | <b>Tlak stvrđnjavanja (Pa)</b> | <b>Srednja poroznost (%)</b>  | <b>Srednja propusnost (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b> | <b>Prosječna promijena u propusnosti (%)</b>    |
| <b>FCS A/A1</b>                                | 30                           | 850                            | 44,42   | 217,965  | -27,17  |
| <b>FCS A/A2</b>                                | --                           | 650                            | 49,33   | 1058,697   | -387,02   |
| <b>FCS A/D1</b>                                | 30                           | 310                            | 39,42   | 252,632  | 34,69   |
| <b>FCS A /D2</b>                               | ---                          | 290                            | 42,99   | 359,357  | 163,46  |
| <b>FCS A/E</b>                                 | 20                           | 290                            | 34,05   | 67,531   | -20,71  |
| <b>FCS B/A1</b>                                | 40                           | 490                            | 53,26   | 4834,535   | -2729,54  |
| <b>FCS B/A3</b>                                | 30                           | 363                            | 53,8  | 24371,169  | -8059,26  |
| <b>FCS B/A4</b>                                | 20                           | 201                            | 40,21   | 89,321   | -19,18  |
| <b>FCS B/SSI</b>                               | 20                           | 1109                           | 45,34   | 8605,45  | -590,3  |
| <b>Mehanička svojstva pjencementnog kamena</b> |                              |                                |   |  |   |
| <b>Sustav cementa</b>                          | <b>Ciljana kvaliteta (%)</b> | <b>Tlak stvrđnjavanja (Pa)</b> | <b>Srednja vrijednost Youngova modula (<math>\text{N}/\text{mm}^2</math>)</b> | <b>Srednja vrijednost Poissionova omjera</b>           | <b>Srednja vrijednost tlačne čvrstoće (bar)</b> |
| <b>FCS A/A1</b>                                | 30                           | 850                            | 7,3   | 0,19   | 218,63  |
| <b>FCS A/A2</b>                                | --                           | 650                            | 6,49  | 0,17   | 105,28  |
| <b>FCS A/D1</b>                                | 30                           | 310                            | 9,34  | 0,18   | 205,60  |
| <b>FCS A /D2</b>                               | ---                          | 290                            | 7,09  | 0,22   | 160   |
| <b>FCS A/E</b>                                 | 20                           | 290                            | 13,34   | 0,19   | 383,41  |
| <b>FCS B/A1</b>                                | 40                           | 490                            | 5,5   | 0,21   | 132,24  |
| <b>FCS B/A3</b>                                | 30                           | 363                            | 4,69  | 0,19   | 184,98  |
| <b>FCS B/A4</b>                                | 20                           | 201                            | 8,72  | 0,18   | 287,5   |
| <b>FCS B/SSI</b>                               | 20                           | 1109                           | 6,2   | 0,19   | TBD   |

U tablici 4-1 prikazani su rezultati pjencementnog kamena s terena i laboratorija. Srednja mjerena vrijednost poroznosti ne pokazuje povezanost s ciljanom kvalitetom. Standardna devijacija poroznosti je razmatrana kroz cijelu duljinu spremnika (Gieger i dr., 2016). U eksperimentu je prikazan veliki raspon vrijednosti za poroznost (od vrijednosti 34,05% do 53,8%). Propusnost mjerena niz duljinu cijelog cilindra varira u rasponu od 24371,169  $\mu\text{m}^2$

do  $67,531 \mu\text{m}^2$ . Prosječna promjena propusnosti zbog ciklusa tlaka u prosjeku se smanjuje za sve cilindre. Smanjenje propusnosti zbog tlaka je od vrijednosti 19,18% do 8059,26%. Od svih uzoraka koji su testirani u cilindru samo je jedan uzorak zabilježio smanjenje propusnosti ( $-0.13 \mu\text{m}^2$ ).

Srednja vrijednost mehaničkih svojstva pjenocementnog kamena unutar cilindra prikazana je također u tablici 4-1. Značajan raspon srednje vrijednosti Youngovog modula bio je promatran duž duljine cilindra, što odgovara najvišoj i najnižoj vrijednosti poroznosti. Svi cilindri su zabilježili smanjenje Youngovog modula nakon tlačnog opterećenja. Prosječne vrijednosti Poissonova omjera kreću se od 0,017 do 0,21 bez jasnog odnosa s poroznosti, tlakom ili ciljanom kvalitetom. Značajan raspon prosječne tlačne čvrstoće zabilježen je s 10,53 MPa na maksimalnu vrijednost od 38,34 MPa. Jednoosno mjerenje tlačne čvrstoće za uzorke unutar jednog cilindra također varira široko s prosječnom standardnom devijacijom od 3,35 MPa (Gieger i dr., 2016).

## 5. PRIMJER IZ PRAKSE

Pjenocementna kaša u praksi ima široku primjenu. Kao što je već jednim dijelom navedeno, koristi se za cementiranje slabih formacija, geotermalnih bušotina, bušotina sa zonama gubljenja isplake te za cementaciju „iscrpljenih“ zona i drugoga, što je ujedno i pokazatelj svestranosti te tehnologije. Nekoliko primjera korištenja pjenocementa u praksi je navedeno u nastavku ovog diplomskog rada.

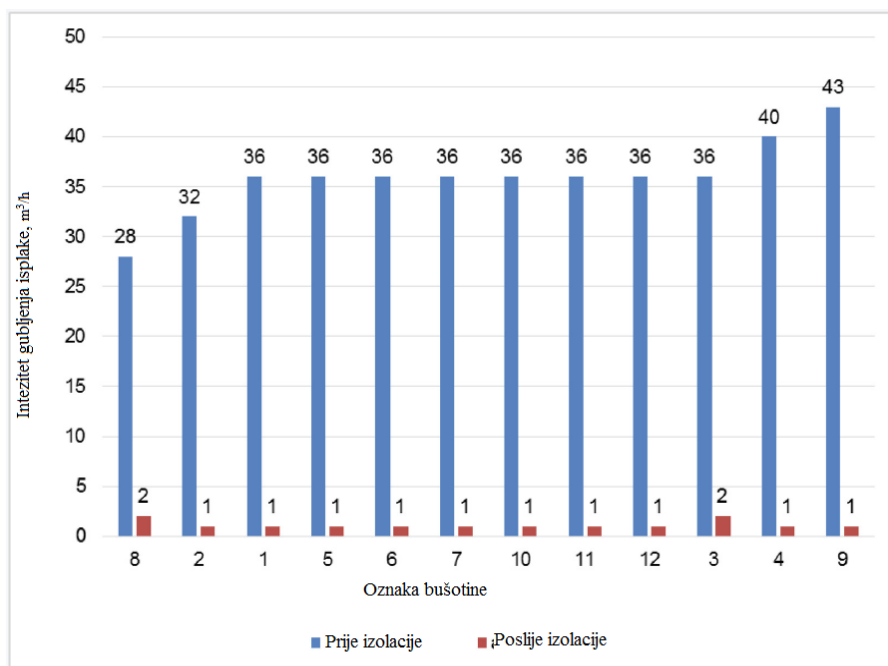
### 5.1. Primjer pjenocementne kaše za zatvaranje zona gubitka isplake u bušotinama na području Urala

Primjena pjenocementne kaše za zatvaranje zona gubljenja isplake u bušotinama je opisana u radu „*Experience of Using the Foamed Cement Technology for Difficult Lost Circulation Control*“ (Bikmukhametov i dr., 2014). Tijekom izrade bušotina na poljima Perm Krai i Nozhovsk u svakoj bušotini je raskrivena zona gubljenja isplake. Bušilo se kroz porozni, kavernozi vapnenac dlijetom promjera 0,1238 m. Unutarnji promjer prethodno ugrađenog niza zaštitnih cijevi je 0,1306 m. Za ispiranje kanala tijekom bušenja korištena je polimerna isplaka na bazi vode. Gustoća isplake je iznosila od 1140 do 1200 kg/m<sup>3</sup>. Svaka bušotina je zabilježila zonu gubljenja isplake, a gubitci isplake su iznosili od 28 m<sup>3</sup>/h do potpunih gubitaka. Zbog gubitka isplake bilo je potrebno napraviti izolaciju (*engl. isolation*) zona gubljenja isplake. Za zatvaranje zona gubljenja isplake u bušotinu je utisnuto od 15 do 24 m<sup>3</sup> pjenocementne kaše gustoće 600 kg/m<sup>3</sup> te od 6 do 10 m<sup>3</sup> razdjeljivača (*engl. spacer fluid*). Za vrijeme utiskivanja razdjeljivača prstenasti prostor je bio zatvoren preventerskim sklopom (BOP). U trenutku kada je razdjeljivač dosegao otvoreni kraj bušaćih šipki pjenocementna kaša se počela utiskivati u zonu gubljenja isplake. Aeracija i homogenizacija pjenocementne kaše je provedena kontinuirano tijekom istiskivanja. Više se detalja o saniranju gubitka uz primjenu pjenocementne kaše nalazi u tablici 5-1.

Tablica 5-1. Detalji saniranja gubljenja isplake (Bikmukhametov i dr., 2014)

| Oznaka bušotine  | 1               | 2               | 3               | 4               | 5               | 6               | 7               |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Broj utiskivanje kaše  | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 2               |
| Dubina dna bušotine, m   | 1666            | 1715            | 1745            | 1460            | 1515            | 1499            | 1470            |
| Dubina gubljenja isplake, m  | 1660            | 1703            | 1730            | 1449            | 1505            | 1490            | 1461            |
| Intenzitet gubljenja isplake, $m^3/h$  | 36 <sup>1</sup> | 32 <sup>1</sup> | 36 <sup>1</sup> | 40 <sup>1</sup> | 36 <sup>1</sup> | 36 <sup>1</sup> | 36 <sup>1</sup> |
| Gustoća fluida za cirkulaciju, $kg/m^3$  | 1190            | 1200            | 1190            | 1400            | 1400            | 1500            | 1140            |
| Volumen pjeno cementne kaše, $m^3$   | 21              | 21              | 21              | 15              | 21              | 21              | 42 <sup>2</sup> |
| Volumen razdjelnikog fluida, $m^3$   | 6               | 6               | 6               | 7               | 10              | 10              | 20 <sup>2</sup> |
| Max tlak pumpanja, MPa   | 6               | 4               | 3               | 3               | 0               | 1               | 2               |
| Količina gubitka isplake nakon izolacije, $\frac{m^3}{h}$  | 0               | 1               | 0               | 1               | 0               | 1               | 2               |
| <b>LEGENDA: 1- bez povratka isplake na površinu</b><br><b>2- potpuno zatvaranje zone gubljenja nakon dva utiskivanja pjencementne kaše</b> |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |

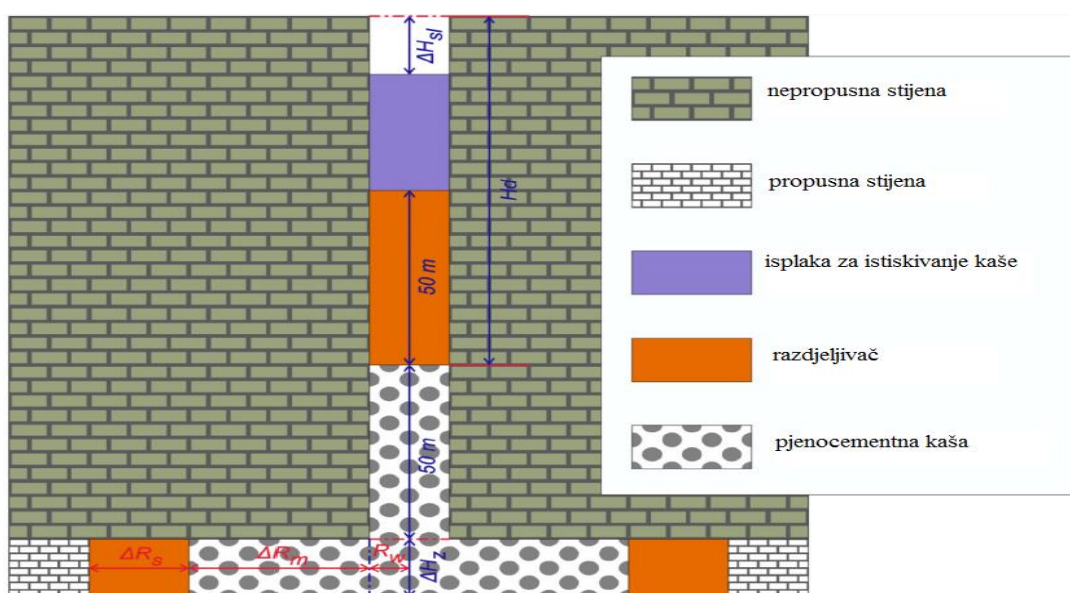
U tablici su priloženi podatci: oznake bušotina, broj utiskivanje pjencementne kaše, dubina bušotine, dubina gubitka isplake, volumen izgubljene isplake, gustoća fluida za cirkulaciju, volumen pjencementne kaše, volumen razdjeljivača, maksimalni tlak utiskivanja i volumen izgubljene isplake nakon saniranja gubitka. Kao što se može vidjeti iz tablice, dubina bušotine je varirala od 1461 do 1730 m. Intenzitet gubljenja isplake je isto varirao za pojedinu bušotinu, u rasponu od 28 do 43  $m^3/h$ . Nakon cementacije pomoću pjencementne kaše intenzitet gubljenja isplake se smanjio na 0 do 2  $m^3/h$  te se stoga može zaključiti da je u ovom slučaju zatvaranje zone gubljenja u potpunosti uspjelo. Sve bušotine su imale jednake cikluse utiskivanja osim jedne (oznaka broj 7) bušotine kod koje je bilo 2 ciklusa utiskivanja kaše. U većini postupaka je zabilježen porast tlaka tijekom utiskivanja pjencementne kaše. Podaci o gubljenju isplake prije i nakon zatvaranja zona gubljenja utiskivanjem pjencementne kaše prikazani su na slici 5-1 (Bikmukhametov i dr., 2014).



Slika 5-1. Količina gubitka isplake prije i poslije izolacije koristeći pjenasti cement gustoće  $600 \text{ kg/m}^3$  (Bikmukhametov i dr., 2014)

#### 5.1.1. Izračun volumena pjenocementne kaše

Prije cementacije je potrebno izračunati potrebni volumen pjenocementne kaše, razdjeljivača i isplaku za protiskivanje kaše. Na temelju izračuna volumena dodaju se aditivi za pripremu pjenocementne kaše. Prikaz svih proračuna i količina volumena su prikazani na slici 5-2.



Slika 5-2. Metodologija utiskivanja volumena za pjenocementnu kašu, razdjeljivač i isplaku za istiskivanje (Bikmukhametov i dr., 2014)

Izračun potrebnog volumena pjenocementne kaše za izolaciju

Da bi izračunali volumen potreban za izolaciju potrebno je poznavati debljinu zona gubljenja isplake (*engl. thickness of the loss circulation zone*), poroznost formacije (*engl. porosity*), gdje dolazi do gubljenja isplake i dubinu utiskivanja (*engl. displacement depth*).

#### 5.1.2. Određivanje debljine zona gubljenja isplake

Debljinu zone gubljenja isplake je moguće odrediti na sljedeća dva načina:

- po intervalima gdje je uočena veća brzina bušenja. Ako se brzina bušenja poveća, to je indikator da se buši kroz stijene koje su jako propusne;
- po intervalima gdje se isto tako očituje povećanje gubljenja isplake u odnosu na normalnu razinu gubljenja;

Najmanja će vrijednost između ove dvije ukazati na „početak“ gubljenja isplake, što znači:

- dubina gdje dolazi do povećanja brzine bušenja i
- dubina gdje dolazi do povećanja gubljenja isplake

Sukladno tome najveća će vrijednost od navedena dva parametra ukazati na „krajnju točku“ zone gubljenja isplake.

#### 5.1.3. Određivanje poroznosti

Poroznost (*engl. porosity*) predstavlja omjer između praznine u stijeni i ukupnog volumena stijene. Praznine mogu biti pore, pukotine, kaverne ili bilo kakva druga mala šupljina bez obzira na njihovu veličinu, oblik ili podrijetlo.

Za intervale kroz koje se buši i nemaju nikakvo povećanje brzine bušenja ili gubljenja isplake se smatra da im je faktor poroznosti jednak nuli (poroznosti=0). Za intervale kod kojih dolazi do povećanja brzine bušenja ili povećanja gubljenja isplake, a pritom dolazi do propadanja niza bušačkih šipki, se smatra da faktor poroznosti iznosi 0,5. Intervali kod kojih dolazi do propadanja niza bušačkih šipki se smatra da imaju 100% poroznost, odnosno da im faktor poroznosti iznosi 1 (poroznost= 1).



#### 5.1.4. Određivanje dubine utiskivanja

Dubinu utiskivanja se određuje pomoću sljedeće formule:

$$H_d = H_t - \Delta H_{sl} - 50 \quad (5-1)$$

gdje su :

$H_d$  - dubina utiskivanja, m

$H_t$  - „početna točka“ dubine gubljenja isplake, m

$\Delta H_{sl}$  - statička razina dubine gdje dolazi do gubljenja isplake, m

Što znači da je dubina utiskivanja plića od „početne točke“ dubine gubljenja isplake za statičku razinu plus 50 m.

#### 5.1.5. Određivanje dubine prodiranja pjencementne kaše

Dubina prodiranja pjencementne kaše ovisi o tipu šupljine u zoni gubljenja isplake, otvorenosti pora, pukotina i drugih šupljina, faktoru poroznosti i debljini zone gubljenja isplake.

Dubina prodiranja većinom varira između 0,5 m za jednostavne uvjete i do 1 m za kompleksne uvjete.

#### 5.1.6. Određivanje volumena pjencementne kaše za izolaciju zone gubljenja isplake

Volumen pjencementne kaše, koji je potreban za izolaciju, se određuje prema sljedećoj formuli:

$$V_m = \pi x \Delta H_z x [F_p x (\Delta R_m + R_w)^2] - R_w^2 \quad (5-2)$$

gdje su:

$V_m$  - volumen pjencementne kaše, m<sup>3</sup>

$\Delta H_z$  - debljina zone gubljenja isplake, m

$F_p$  - faktor poroznosti, bezdimenzionalna veličina

$\Delta R_m$  - dubina prodiranja pjencementne kaše, m

$R_w$  - radijus bušotine, m

To znači da je ukupni volumen satkan od potrebnog volumena pjencementne kaše u zoni gubljenja isplake i od volumena unutar intervala istiskivanja do krajnje dubine zone gubljenja isplake.

#### 5.1.7. Izračun volumena razdjeljivača

Tijekom cementacije bušotina (*engl.cement job*) razdjeljivač (*engl. spacer fluid*) služi za razdvajanje isplake od cementne kaše u kanalu bušotine te voda ili kemikalija koje se pumpaju u zaštitnu kolonu bušotine nakon bušaće isplake i prije donjeg cementacijskog čepa.

U radu su se koristila dva razdjeljivača, najprije donji, koji je utisnut prije pjencementne kaše, a zatim i gornji razdjeljivač, koji je utisnut poslije pjencementne kaše. Potreban ukupni volumen razdjeljivača je sastavljen od izračunatog volumena gornjeg i donjeg razdjeljivača.

Volumen gornjeg razdjeljivača:

$$V_{s1} = 50 \times \pi \times R_w^2 \quad (5-3)$$

gdje su:

$V_{s1}$  - volumen gornjeg razdjeljivača, m<sup>3</sup>

$R_w$  - radijus bušotine, m

Volumena donjeg razdjeljivača:

$$V_{s2} = \pi \times \Delta H_z \times \{F_p \times [(\Delta R_s + \Delta R_m + \Delta R_w)^2 - (\Delta R_m + \Delta R_w)^2 - R_w^2]\} \quad (5-4)$$

gdje su:

$V_{s2}$  - volumen donjeg razdjeljivača, m<sup>3</sup>

$\Delta H_z$  - debljina zone gubljenja isplake, m

$F_p$  - faktor poroznosti, bezdimenzionalan veličina,

$\Delta R_s$  - dubina prodiranja donjeg razdjeljivača, m

$\Delta R_m$  - dubina prodiranja pjencementne kaše, m

$\Delta R_w$  - radijus bušotine, m

Svojstva razdjeljivača su sljedeća:

- fizikalno-kemijska inertnost,
- otpornost na otapanje i razrjeđivanje,
- gustoća mora biti u rasponu od 1200 do 1400 kg/m<sup>3</sup>,
- u odnosu na pjenocementnu kašu ne smije prelaziti 20%,
- dobra svojstva pečačenja (da zatvara pore u otvorenom dijelu kanala bušotine do zona gubljenja isplake )

Upotreba svježe vode ili drugih tekućina koje mogu utjecati na stabilnost pjenocementne kaše je strogo zabranjena.

Sastav razdjeljivača

Razdjeljivač se sastojao od vode, bentonita, alkilnih silikata i finog zrnatog punila. Ako se u bušotini nalazi isplaka na bazi ulja, tada razdjeljivač mora sadržavati dodatne surfaktante. Surfktantni u razdjeljivaču bi trebali ukloniti hidrofobni isplačni oblog i popraviti vezivanje pjenocementne kaše.

#### 5.1.8. Izračun volumena isplake za istiskivanje

Kao opće pravilo isplaka se koristi kao fluid za istiskivanje. Volumen za istiskivanje ovisi o specifičnoj tehnici koja se koristi za utiskivanje pjenocementne kaše.

## 5.2. Procjena pjencementne kaše korištene u dubokim vodama Meksičkog zaljeva

Upotreba pjencementnih kaša pri cementiranju u dubokim morima postepeno raste iz godine u godinu. Međutim, nema dovoljno znanja o ponašanju pjencementnih kaša i kamena u bušotinama. Prema tome, članak iz 2014. godine (Kutchko i dr., 2014) pod nazivom „*Assessment of Foamed Cement Used in Deep Offshore Wells*“ je izvrstan primjer za prikaz korištenja pjencementa u dubokim vodama Meksičkog zaljeva. U radu je prikazana upotreba pjencementne kaše pripremljene na terenu i u laboratoriju. Uzorak s terena je prikupljen u cilindru pod tlakom (*engl. constant pressure sample cylinder - CP*). Uzorak je snimljen dok je još u cilindru koristeći X-zrake računalne tomografije (*engl. computed tomography*) s rezolucijom skeniranja  $35 \mu\text{m}$ .

### 5.2.1. Metoda pripreme pjencementne kaše

#### *Priprema pjencementne kaše u atmosferskim uvjetima*

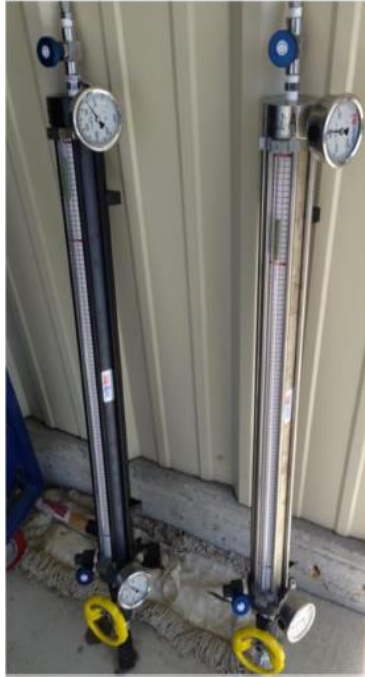
Dvije su vrste pjencementnih kaša pripremljene koristeći osnovnu cementu kašu gustoće  $1970 \text{ kg/m}^3$ . Za pripremu kaše korišten je Portland cement API klasa H. Uzorci su pripremljeni prema API standardu 10B-4. Četiri uzorka pjencementne kaše kvalitete pjene, 10%, 20%, 30% i 40% su miješana koristeći dva različita pjenušavca i recepture (označeni kao FCR1 i FCR2). Pripremljeno je osam različitih uzoraka pjencementnih kaša koje su nakon očvršćivanja u kamen jezgropane. Jezgra je bušena na veličinu promjerom od 2,54 cm (1") za sve četiri kvalitete pjene za bolje snimanje. Iz tih jezgri su uzete manje jezgre veličine promjera 6 mm (15/64") kako bi se postigla što bolja razlučivost. Ukupno je izvršeno 16 skeniranja (snimanja): 8 skeniranja niske rezolucije velikih jezgri (makro) i 8 skeniranja visoke rezolucije (mikro).

#### *Uzimanje uzoraka pjencementne kaše na terenu*

Uzorak pjencementnog kamena je pripravljen koristeći osnovnu kašu, sačinjenu na bazi API klase H Portland cementa, gustoće  $1970 \text{ kg/m}^3$ . Dodatni aditivi nisu korišteni osim pjenušavaca i stabilizatora pjene koji su dodani u vodu za pripremu kaše. Korištena je voda koja je bila dostupna na postrojenju. Uzorak pjencementne kaše je uzet u cilindar promjera 5,08 cm (2"), duljine 91,44 cm (3 ft) (Kutchko i dr., 2014).

### 5.2.2. Cilindar s konstantnim tlakom

Pjenocementu je kašu bilo potrebno prikupiti, uskladištiti dok se ne stvrdne u pjenocementi kamen te transportirati uzorke u odjel NETL- Računalne tomografije (*engl. scanning facility*) u Morgantown, WV, USA. CP cilindar za uzorke (*engl. constant pressure sample cylinder*) se često koristi u industrijskim rafinerijama za prikupljanje fluida koji protječu kroz visoko tlačne cijevi održavajući fluid pod visokim tlakom. Cilindar predstavlja cijev koja na svojim krajevima ima mjerač tlaka. Na jednom kraju cijevi se nalazi usis (*engl. inlet*) s kuglastim ventilom (*engl. ball valve*) za prikupljanje uzoraka fluida. Nakon usisa se nalazi ventil za čišćenje (*engl. purge valve*) koji omogućava ispuštanje neželjenih fluida ili zraka iz linije za obradu (*engl. treating line*), pa se može uzeti „čisti“ uzorak. Unutar cijevi se nalazi klip koji uvlači fluid u cilindar, a na drugom kraju cijevi se nalazi usisni ventil (*engl. inlet valve*) 0,635 cm ( $\frac{1}{4}$ " ) te se stoga cilindar može prethodno napuniti dušikom do određenog tlaka. Na vanjskoj strani nalazi se magnetni pokazivač kako bi se locirao položaj klipa unutar cilindra, a time i razina fluida u cilindru. CP cilindri su napravljeni od aluminijske i nehrđajućeg čelika. Općenito, CT skener bolje radi s aluminijskim cilindrom nego s čeličnim, međutim aluminijski cilindar je ograničen s radnim tlakom od 4136,85 kPa (600 psi). Zbog tog su četiri uzorka pjenocementne kaše prikupljeni aluminijskim cilindrom s radnim tlakom od 3447 kPa, a i dva uzorka pomoću čeličnog cilindra s radnim tlakom od 6894,74 kPa. Radi usporedbe, raspored se prikupljanja sastojao od dva uzorka pjenocementne kaše kvalitete pjene 20% u aluminijskom cilindru, od čega jedan uzorak s kvalitetom 40% i jedan s kvalitetom 30%. Čeličnim cilindrom je uzet jedan uzorak pjenocementne kaše kvalitete pjene 20% i jedan s kvalitetom 30%. Na slici 5-3 su prikazani cilindri za uzimanje uzorka.

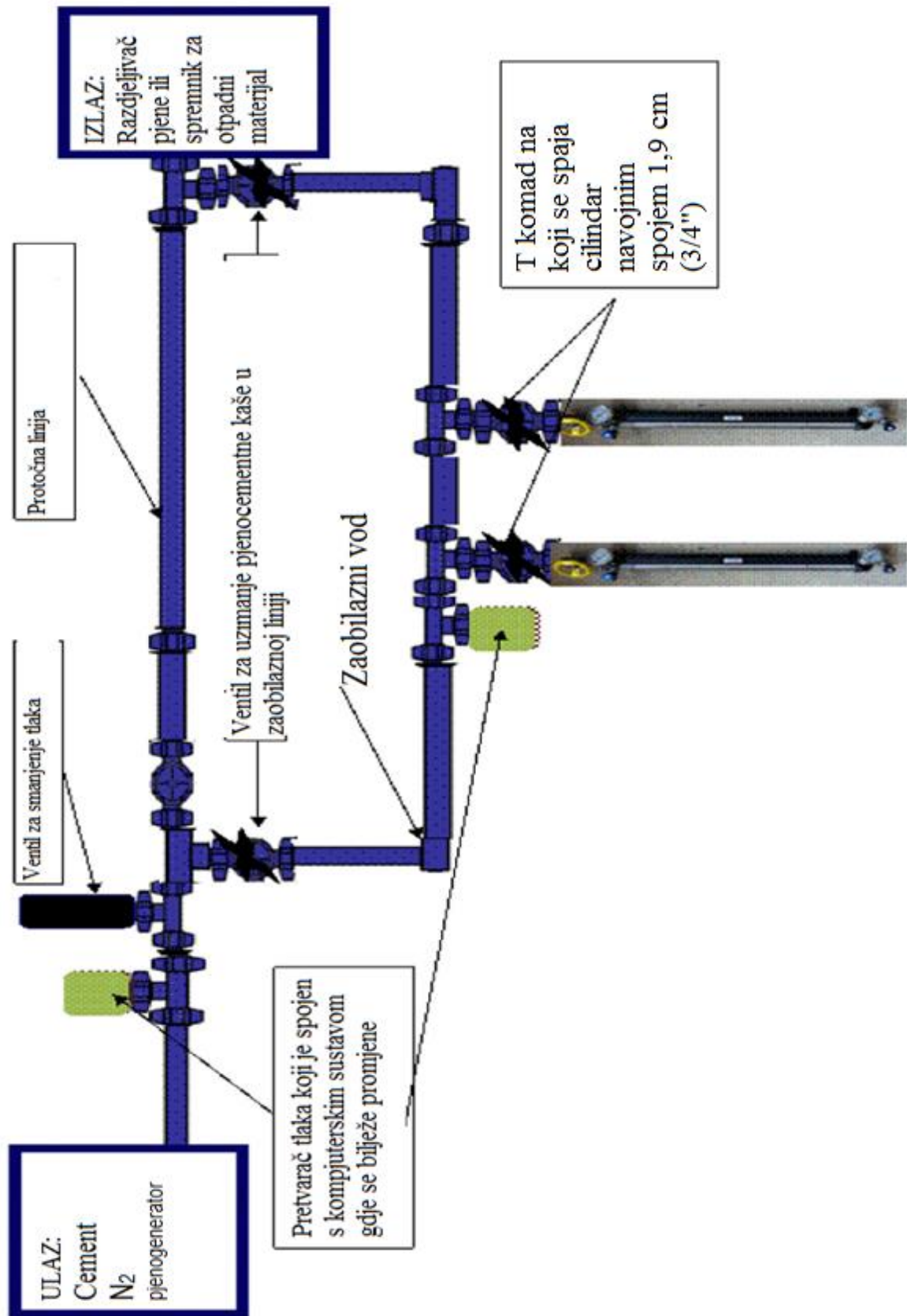


Slika 5-3. Cilindar za uzimanje uzoraka pjenocementne kaše (aluminijски i čelični)  
(Kutchko i dr., 2014)

### 5.2.3. Postupak uzimanja uzorka na terenu

Postupak terenskog uzorkovanja podrazumijeva uzimanje malih količina pjenocementne kaše pri tlaku. Nakon uzimanja uzorka trebalo je ostaviti uzorak da se stvrdne i tada ga transportirati u laboratorij na analizu. Procedura koja je kreirana u svrhu uzimanja uzorka se sastojala od cijevnog razdjelnika (*engl. manifold*) koji je skretao dio toka pjenocementne kaše iz glave cijevi (*engl. main treating line*) i omogućavao uzimanje uzorka pod tlakom, dok je glavna cijev ostala otvorena za kontinuirani tok. Opisana cijev za skretanje toka je nazvana „cijevni razdjelnik za uzimanje uzoraka“ (*engl. sample manifold*).

Cijevni razdjelnik za uzimanje uzoraka je instaliran pomoću cijevnog T-komada koji je sa svake strane spojen preko visoko tlačnog ventila. S glavnim vodom (cijevi) je omogućeno prikupljanje uzorka i njegovo pohranjivanje. Isto tako, omogućavao je spajanje 5.08 cm (2“) glavne cijevi sa 1,9 cm ( $\frac{3}{4}$ “) navojnim spojem cilindra. Slika 5-4 prikazuje cijevni razdjelnik za uzimanje uzorka. Nizvodno od razdjeljivača je sigurnosni ventil koji omogućava dostatan podtlak. Nakon sigurnosnog ventila nalazi se mjesto za utiskivanje agensa protiv pjenjenja kako bi se spriječilo prerano pjenjenje, prije odlaska u spremnik za odlaganje. Radi sigurnosti na radu je ugrađen obilazni vod (*engl. bypass line*) na razdjeljivač (Kutchko i dr., 2014).



Slika 5-4. Shematski prikaz razdjeljivača za uzimanje uzoraka (Kutchko i dr., 2014)

Procedura uzimanja uzorka pjenocementne kaše korištenjem CP cilindra pod tlakom obuhvaćala je sljedeće korake: otvoriti izolacijski ventil na razdjelniku i glavnoj obradnoj liniji, zatvoriti izolacijski ventil ispod CP cilindra, otvoriti kuglasti ventil na cilindru i zatvoriti ventil za čišćenje, namjestiti tlak na cilindru malo veći nego što je predviđen, utisnuti pjenocementnu kašu kroz glavni vod i razdjelnički vod, zatvoriti izolacijski ventil, otvoriti visokotlačni ventil ispod cilindra, otvoriti ventil za čišćenje i pričekati dok ne proteče čista kaša, zatvoriti ventil za čišćenje, otvoriti iglu ventila tako da se ispustio dio dušika kako bi se omogućilo povlačenja klipa, promatrati pomicanje klipa i brzinu preko pokazivača na vanjskoj strani cilindra, nakon što se dovoljno pomakao klip zatvara se igla ventila i pomicanje klipa bi trebalo stati, zatvoriti usisni kuglasti ventil i odvojiti cilindar, postaviti cilindar na sigurno mjesto dok se pjenocementna kaša ne stvrdne u pjenocementni kamen te na kraju promatrati i zabilježiti tlak u cilindru tijekom 48 sati.

#### 5.2.4. CT skeniranje

Svi su prikupljeni uzorci skenirani industrijskim skenerom „*North Star Imaging (NSI) M-5000*“ s rasponom rezolucije od 22 do 41  $\mu\text{m}$ . Terenski uzorci pjenocementnog kamena prvo su skenirani medicinskim CT skenerom (Toshiba Aquilon RXL) pri manjoj rezoluciji (0,43 mm) kako bi se odredila svojstva pjenocementnog kamena. Dobivene su 1440 projekcije za vrijeme okretanja uzorka te je napravljeno pet rendgenskih slika za svaku projekciju. Te slike su pretvorene u volumene koristeći napredne softvere koji omogućuju pretvaranje iz dvodimenzionalne (2D) u trodimenzionalnu sliku (3D).

#### 5.2.5. Fizikalna svojstva pjenocementnog kamena

Poroznost uzoraka pjenocementnog kamena je izmjerena koristeći helijski porozimetar, HP-401 (TEMCO.inc s pogreškom mjerenja od 1%). Za svaki uzorak napravljena su tri mjerenja kako bi se osigurala ponovljivost rezultata. Propusnost uzoraka pjenocementnog kamena mjerena je u permeamtru s konstantnim protokom, UltraPerm-500 (TEMCO.inc), koristeći dušik kao porni fluid. Napravljeno je nekoliko mjerenja propusnosti uzoraka pjenocementnog kamena pri različitim brzinama. Isto tako, su vršena ispitivanja tlačne čvrstoće. Po pet uzoraka od svake recepture cementne kaše s 4 različite kvalitetne pjene, odnosno ukupno 40 uzoraka radi pouzdanosti statističke obrade podataka, prikupljeni su sljedeći parametri (Kutchko i dr., 2014):

- tlačna čvrstoća,

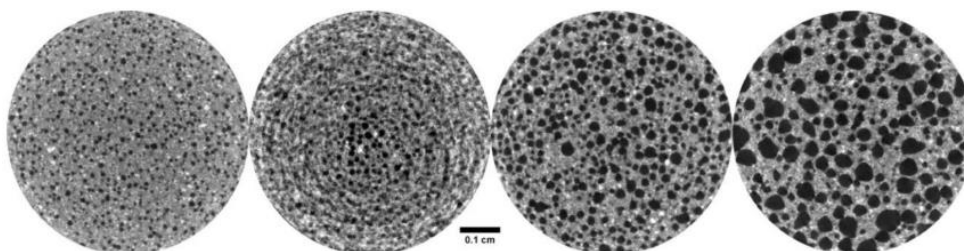


- aksijalne i radijalne deformacije i
- Youngov modul i Poissonov omjer.

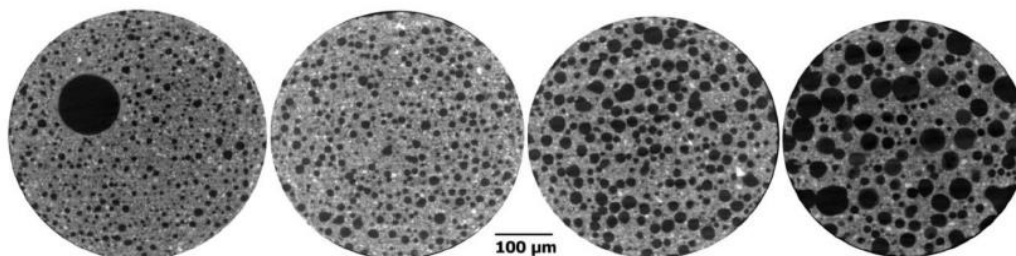
Kako bismo izmjerili fizikalna svojstva pjenocementnog kamena s terena potrebno je CP cilindre osloboditi djelovanja tlaka (*engl. depressurized*) da ne dođe do promjene integriteta uzorka. Nakon što se smanji tlak, cilindar s uzorkom se dijeli u sekcije promjera 5.08 cm (2<sup>“</sup>) iz kojih se jezgrovanjem uzimaju manji uzorci promjera, približno, 3.81 cm (1.5<sup>“</sup>). Manji uzorci su skenirani u tri dijela (*engl. subcored segments*). Nakon što su uzorci terenskog pjenocementnog kamena skenirani, izmjerene su im poroznost i propusnost.

#### 5.2.6. Rezultati ispitivanja pjenocementnog kamena

Slika 5-5 i 5-6 prikazuju 2D snimak skeniranog uzorka pjenocementne kaše za svaku kvalitetu pjene. U ovim bijelo-crnim CT slikama tamniji dijelovi predstavljaju područje male gustoće materijala, odnosno prazan prostor u cementu. Kao što se može vidjeti, tamnija područja variraju što je indicacija da se srednja vrijednost tamnih tonova uzorka mijenja od skeniranja do skeniranja.

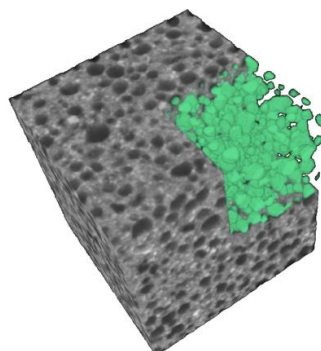


Slika 5-5. 2D prikaz CT snimke uzoraka pjenocementnog kamena za kvalitete pjene 10%, 20%, 30% i 40% promjera 6 mm za uzorke FCR1 (Kutchko i dr., 2014)



Slika 5-6. 2D prikaz CT snimke uzoraka pjenocementnog kamena za kvalitete pjene 10%, 20%, 30% i 40% promjera 6 mm za uzorke FCR2 (Kutchko i dr., 2014)

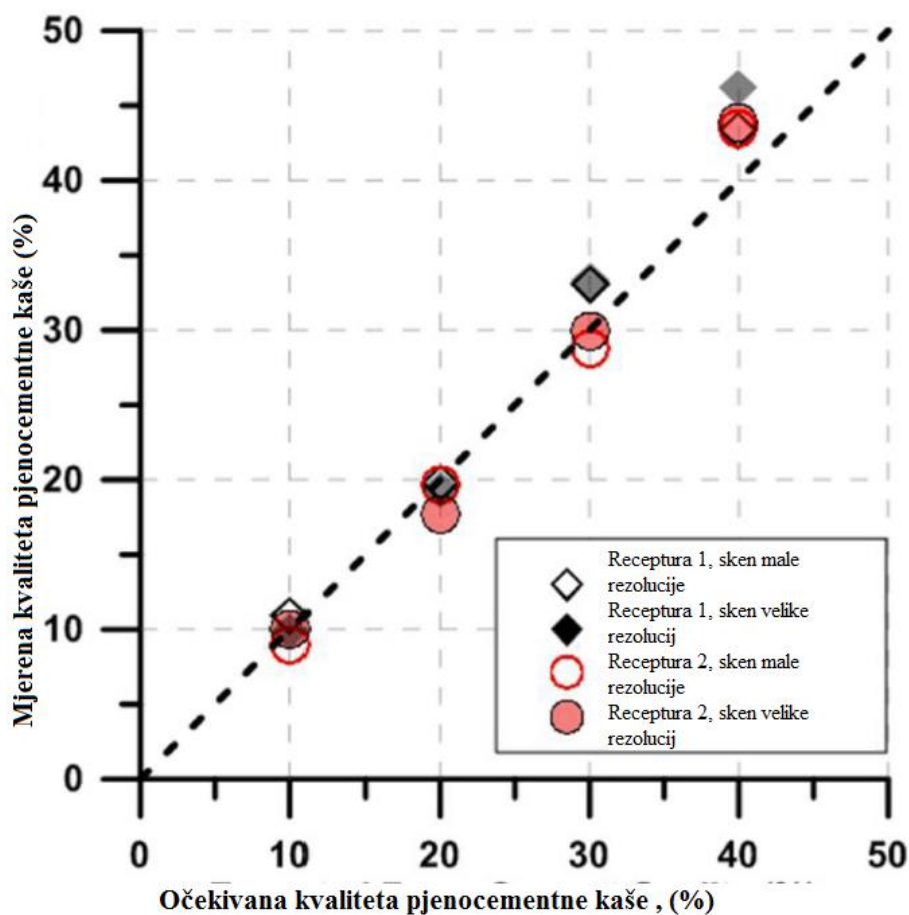
Na slici 5-7 je prikazan 3D snimak koji pokazuje uzorak podsekcije pjencementnog kamena s kvalitetom pjene 30%.



Slika 5-7. 3D prikaz sekcije uzorka FCR2 pjencementnog kamena kvalitete pjene 30% FCR2 (Kutchko i dr., 2014)

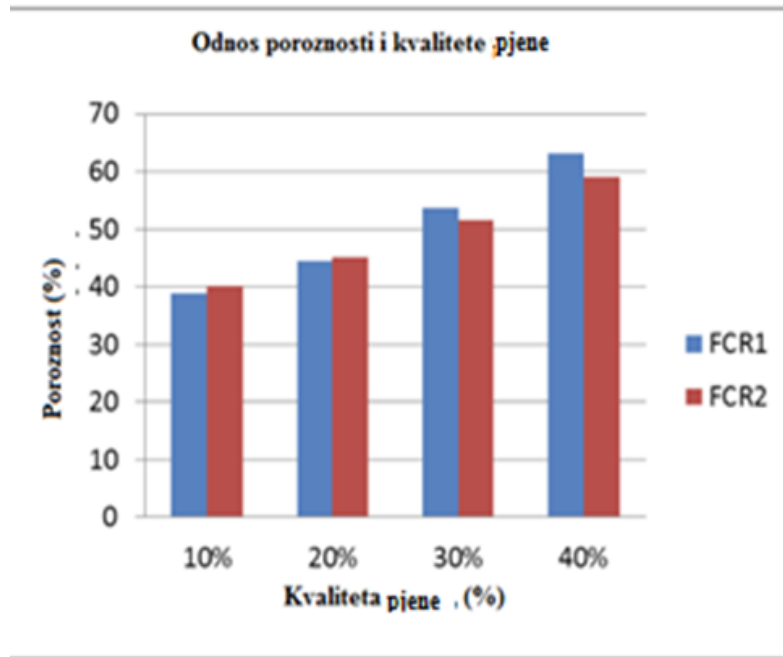
Kako bi se provjerila sama točnost dobivenih iz CT snimaka, kvaliteta pjene pjencementne kaše je uspoređena s distribucijom veličine mjehurića, koja je isto tako dobivena iz CT-a (prikaz slika 5-6). Odnos između zahvaćenog zraka i mjenog zraka pomoću CT-a se pokazala iznimno dobre kvalitete. Za kvalitetu pjene od 10% i 20% pjencementa izračunata poroznost je bila unutar 1,3% eksperimentalnog postotka volumena plina. 30%-tna kvaliteta pjene pjencementa je najviše varirala te je imala najveću poroznost u odnosno na očekivanu.

Poroznost u pjencementnom kamenu ima različite vrste i veličine. Većina poroznosti je mikroskopske veličine, a odnosi se na mikropore, mezopore, makropore i kapilarne pore. Ove pore, s mogućom iznimkom vrlo velikih kapilarnih pora, su ispod mogućnosti detekcije skenera najveće rezolucije skeniranja koji su korišteni u ovom istraživanju te se ne mogu prikazati u CT slikama. Na osnovi distribucije veličina pore može se pretpostaviti da su veličine pora ispunjene zrakom (*engl. air voids*) ( $\geq 10 \mu m$ ) glavne strukture pora koje su utvrđene i analizirane u ovom radu. Korišteni skenovi najvećih rezolucija mogu zabilježiti pore veličine i do  $3.5 \mu m$ . Na slici je prikazan omjer mjerene i očekivane kvalitete pjene, slika 5-8.

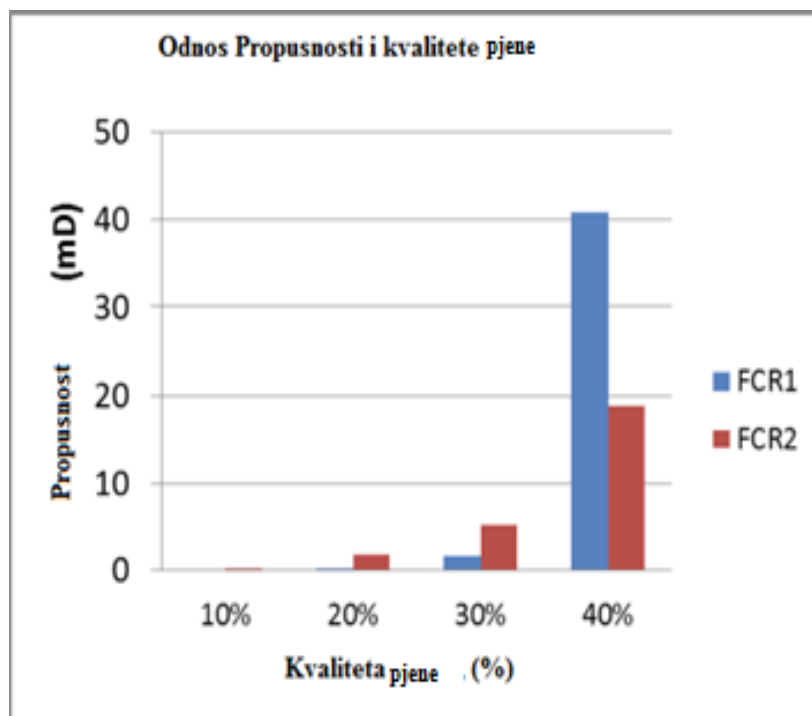


Slika 5-8. Izvod iz CT-a koji prikazuje odnos između mjerene i očekivane kvalitete pjencementne kaše (Kutchko i dr., 2014)

Pjencementni kamen visoke kvalitete ima veći postotak velikih mjehurića i to zato što uzorak koji je uzet ima veći volumen međusobno povezanih mjehurića. Usporedba raspodjele veličine mjehura (BSD-ova) između receptura FRC1 i FRC2 pokazuje da je raspodjela veličine mjehura (BSD) vrlo slična za sve kvalitete pjene koji su ocjenjeni. Poroznost i propusnost pjencementnog kamena se povećava s kvalitetom pjene. Grafovima se prikazuju izmjerene vrijednosti što je prikazano na slici 5-9 i 5-10.



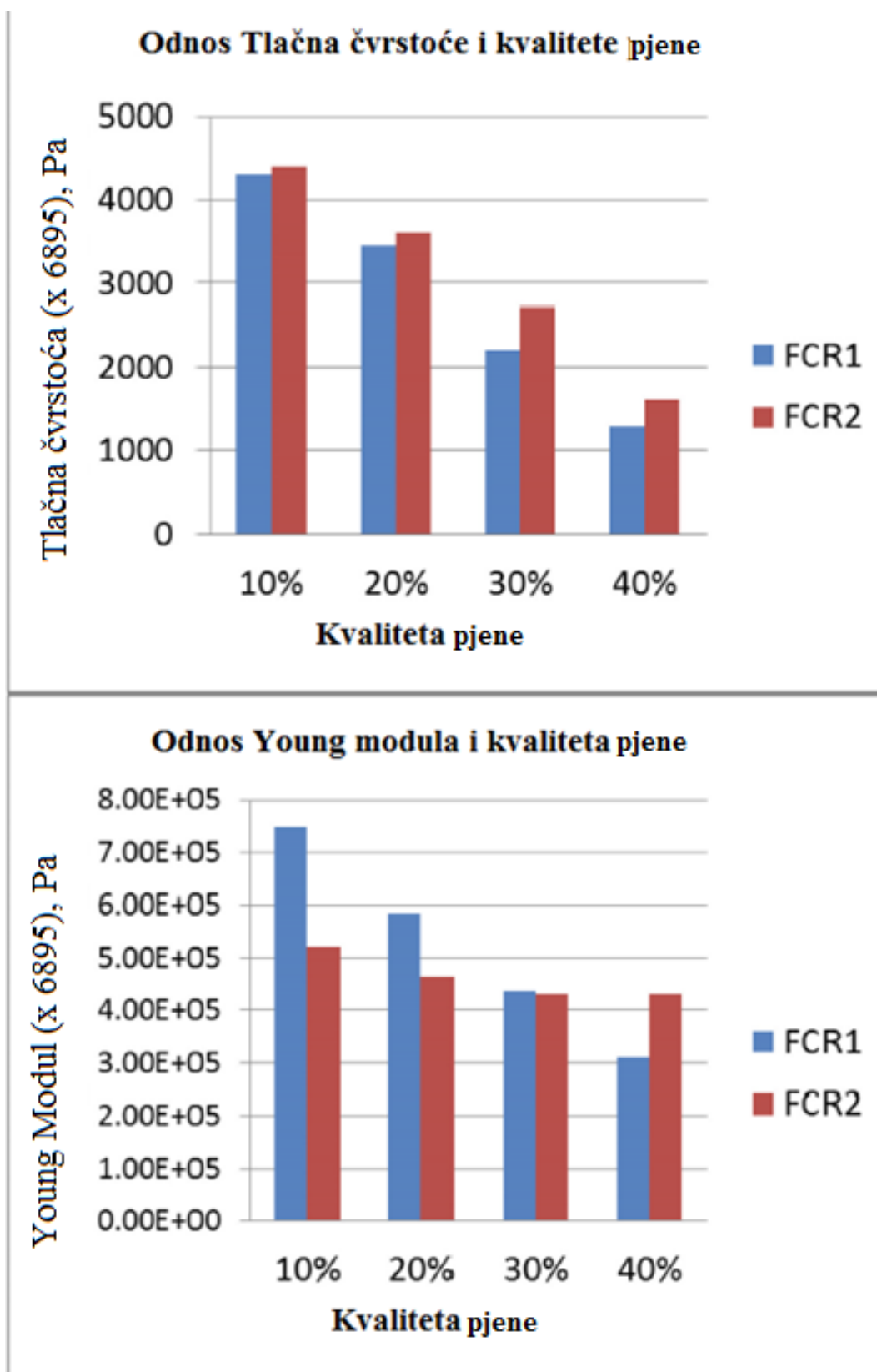
Slika 5-9. Odnos poroznosti i kvalitete pjene za pjenocementne kaše receptura FCR1 i FCR2 (Kutchko i dr., 2014)



Slika 5-10. Odnos propusnosti i kvalitete pjene za pjenocementnu kašu recepture FRC1 i FRC2 (Kutchko i dr., 2014)

Vrijednosti propusnosti pjenocementnog kamena kvalitete pjene od 10% i 20% su bile unutar raspona čistog cementnog kamena (FCR1-10%  $K = 0,1 \pm 0,0 \text{ mD}$ , FCR1-20%  $K = 0,3 \pm 0,1 \text{ mD}$ , FCR2-10%  $K = 0,2 \pm 0,0 \text{ mD}$ , FCR2-20%  $K = 1,7 \pm 0,2 \text{ mD}$ ), vrijednosti se nalaze na slici 5-10. Propusnost za 30%-tnu kvalitetu pjene je nešto malo veća (FCR1-30%  $K = 1,7 \pm 0,7 \text{ mD}$ , FCR2-30%  $K = 5,3 \pm 0,2 \text{ mD}$ ). Međutim, propusnost se dramatično povećava za 40%-tnu kvalitetu pjene u oba sustava (FRC1-40  $K = 40,8 \pm 18,9 \text{ mD}$ ; FCR2-40%  $K = 18,9 \pm 3,4 \text{ mD}$ ). Povećanjem propusnosti, mjerenja za FCR1-40% su bila vrlo promjenjiva. To je možda zbog toga što su za FCR1 i FCR2 korišteni različiti surfaktanti.

Kod tlačne čvrstoće je zapaženo smanjenje vrijednosti s povećanjem kvalitete pjene i prema grafu se čini da slijedi linearan odnos ( FCR1  $R^2 = 0,98$ ; FCR2  $R^2 = 0,98$ ), prikaz ovisnosti čvrstoće s kvalitetom pjene na slici 5-11. Međutim, kod tlačne čvrstoće se pojavila značajna razlika između uzorka kvalitete pjene 10% i 40%. Vrijednosti za uzorak 10% kvalitete pjene je za FCR1=29668 kPa i FCR2=30371 kPa) i za uzorak od 40% kvalitete pjene (FCR1=8852 kPa i FCR2=11148 kPa). Vrijednosti tlačne čvrstoće za uzorak FCR1 kvalitete pjene od 40% se smanjio za nekih 70% u odnosu na uzorak s 10% kvalitetom pjene. Smanjenje je bilo slično i za uzorak od FCR2 gdje je smanjenje iznosilo 63%. Isto tako Youngov modul je pratio trend smanjenja i linearan prikaz (FCR1  $R^2 = 0,98$ ; FCR2  $R^2 = 0,7$ ), slika 5-11. Youngov modul se smanjio za približno 59% od 10% kvalitete pjene do 40% kvalitete pjene. Također, smanjenje je karakteristično i za uzorke od FCR2, ali je smanjenje iznosilo manje u odnosu na FCR1.



Slika 5-11. Prikaz tlačne čvrstoće i Youngova modula kao funkcija kvalitete pjene za FRC1 i FRC2. (Kutchko i dr., 201)

### 5.2.7. Pjenocement s terena

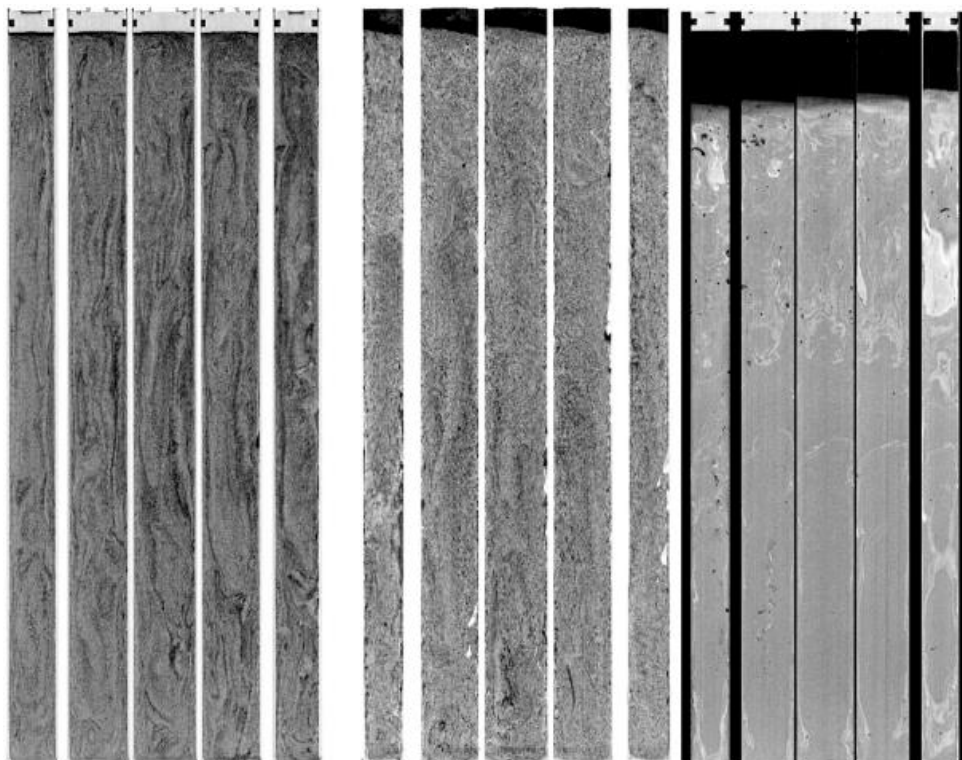
Pet uzoraka pjenocementne kaše je prikupljeno u prvom ispitivanju. Parametri za uzorke se nalaze u tablici 5-2. Detalji tlakova za vrijeme i nakon prikupljanja uzoraka su također navedeni. Kvaliteta pjene je izračunata prema podacima količine dušika, količini kaše, tlaku i temperaturi iz obradne cijevi za vrijeme stvaranja pjene. Postupkom uzimanja uzorka na terenu je bilo teško održati kvalitetu pjene ispod 30%.

Tablica 5-2. Parametri uzorka pjenocementne kaše (Kutchko i dr., 2014)

| Oznaka uzorka                      | A1     | A2     | E1     | D1     | D2     |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Red prikupljanja                   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| Intenzitet utiskivanja kaše (o/m)  | 3      |        | 3      | 3      |        |
| Ciljana količina utiskivanja (l/m) | 352,8  |        | 82,12  | 156,3  |        |
| Kvaliteta pjene, %                 | 25     |        | 16     | 25     |        |
| Tlak prije uzimanja uzorka, kPa    | 8135,8 | 6481,1 | 3309,5 | 2278   | 2668,3 |
| Tlak poslije uzimanja uzorka, kPa  | 6481,1 | 5377,1 | 2227   | 2668,3 | 2178,7 |

Potrebno je naglasiti da za vrijeme CT mjerenja nije bilo moguće odraditi kvalitetnu analizu zbog utjecaja buke i smetnji prilikom mjerenja. Međutim, kao što je prikazano na slici 5-14, medicinski CT je uspio prikazati kompleksnost cementne strukture unutar D1, D2 i E1 aluminijske posude. U crno-sivoj slici 5-12 tamne zone predstavljaju područje niske gustoće s malim brojem CT-ovih brojeva (CTN), a svjetlije područje predstavlja veće gustoće s većim brojem CT (CTN). Varijacije u gustoći u uzorku su očigledne, sa zonama veće poroznosti. Ovakve strukture podsjećaju na čestice koje koalesciraju u turbulentnom protoku. Međutim, Reynoldsov broj ( $Re \approx 1,1$ ) za kašu je bio ispod očekivanog te nije okarakteriziran kao turbulentan protok. Heterogena priroda pjenocementnog kamena je lako vidljiva u skenovima posuda. Broj visokih poroznih zona u CT-u pokazuje da se povećavaju na mjestu utiskivanja (na dnu) u odnosu na mjesto povlačenja klipa (na vrhu). Uzorak E1 je izrazito drugačiji u odnosu na druge uzorke. U ovom uzorku može se vidjeti značajna količina cementa visoke gustoće, što je prikazano kao svjetlije područje na slici 5-12. Očituje se na području rubova posude, u mjestu injektiranja i u prostoru povlačenja klipa. Uočena je velika duža praznina veličine 4,9 cm u prostoru povlačenja klipa, ali

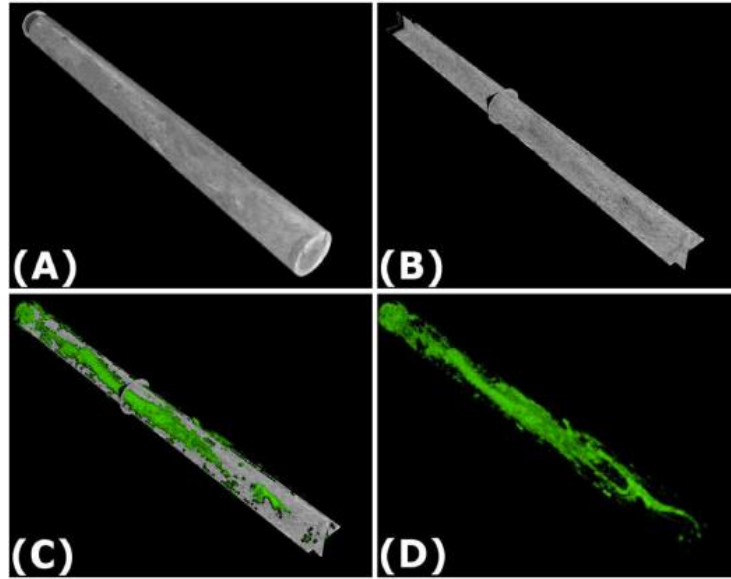
detaljnijom analizom je uočeno da je ispunjena tekućinom manje gustoće (Kutchko i dr., 2014).



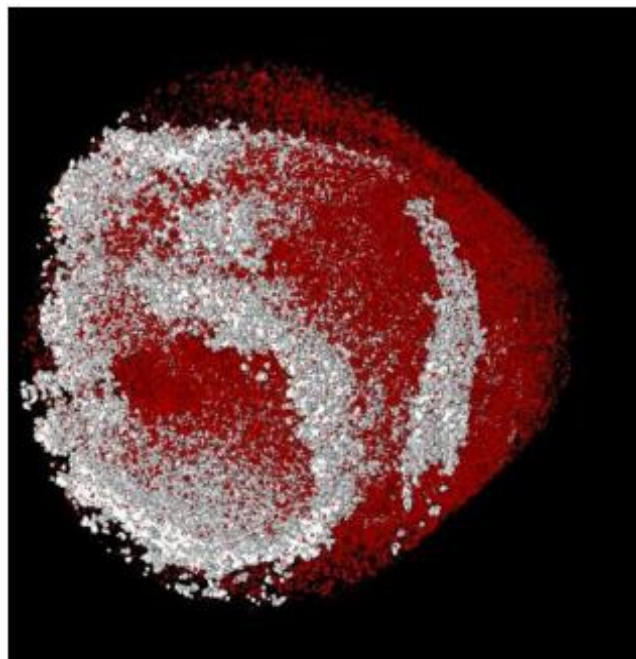
Slika 5-12. Rekonstruirane medicinske slike CT-a aluminijske posude za D1(lijevo), D2 (sredina), E1 (desno). svaka slika je montaža od pet presjeka kroz XZ ravnine posude. (Kutchko i dr., 2014)

Iako se uzorak D2 čini ujednačeniji nego uzorak D1, postoji izražena distribucija zona niskih gustoća kroz posudu uzorka D2. Najbolji prikaz je u 3D-u, što je i prikazano na slici 5-13. Na istoj slici je prikazana 3D rendgenska snimka cijele jezgre bez izolacije područja niskih gustoća (slika 5-13 C i D). Odmah do mjesta utiskivanja u području niskih gustoća počinje kao mali „tok“ gdje se povećavaju nakupljanjem kroz posudu (D). Otprilike na trećini puta od dna posude zona s niskom gustoćom se razdvaja u dvije veće zone koje slijede rub posude uzorka.



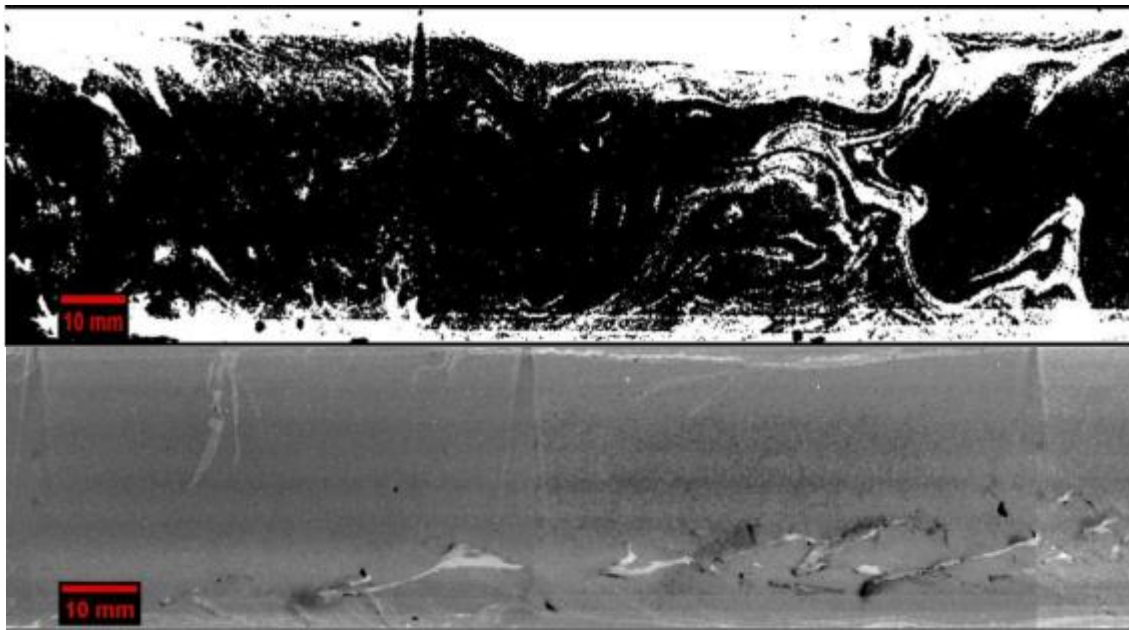


Slika 5-13. 3D rekonstrukcija uzorka D2 pod tlakom. Mjesto injektiranja predstavlja donji desni dio slike. A) Prikaz cijelog uzorka B) Uspravni prikaz C) Izolirani dio niskih poroznih zona D) Niske porozne zone (Kutchko i dr., 2014)



Slika 5-14. Rekonstruirana slika industrijskog CT-a za uzorak D1. Zone niske gustoće su prikazane bijelom bojom, a visoke zone crvenom bojom. (Kutchko i dr., 2014)

Industrijski CT-sken pokazuje detaljniju analizu strukture uzorka pjenocementa. Slika 5-14 prikazuje D1, odnosno segment uzorka D1, prikazujući izoliranu zonu niskih gustoća (bijelo) sa zasebnim prazninama (crveno). Slika 5-15 prikazuje dio uzorka E1 koji je skeniran i spojen u jednu sliku. Gušće regije cementa, gdje je cement manje porozan, su prikazane na slici 5-15. Gušće regije koje su pokraj praznina koje formiraju „trake“ koje su paralelne i nalaze se na jednoj strani jezgre (slika 5-15). Slika 5-16 prikazuje uzorak CP cilindra.



Slika 5-15. XZ dio E1 posude pod tlakom; 1/3 od dna posude; srednji dio 1/3 posude (Kutchko i dr., 2014)



Slika 5-16. Slika uzorka CP cilindra (Kutchko i dr., 2014)

Kako bi se dobile izmjerene vrijednosti fizikalnih svojstava, uzorku s terena je smanjen tlak, presječen i maknut iz posude. Ovakvi uzorci su ponovno skenirani radi integriteta strukture. Drugi uzorci su korišteni za dobivanje vrijednosti poroznosti i propusnosti. Slike 5-16 i 5-17 prikazuju mjerene i prosječne vrijednosti poroznosti i propusnosti uzoraka A1, A2, E1, D1 i D2 za pojedine sekcije. Vrijednosti poroznosti i propusnosti su se mijenjale kroz cijeli cilindar. U većini slučajeva je primijećen isti obrazac ponavljanja: vrijednosti propusnosti su najmanje na dnu cilindra te se povećavaju prema sredini te opet od sredine padaju prema vrhu.

Uzorak A1 ima izračunatu kvalitetu pjene oko 30%. Mjerena poroznost u cilindru je prosječnih 43,5% sa standardnom devijacijom od  $\pm 1,45\%$ . Prosječna propusnost A1 uzorka se može usporediti s vrijednošću uzorka s kvalitetom pjene 20% u atmosferskim uvjetima. Propusnost se razlikovala značajno kroz uzorak s prosječnom vrijednošću  $0,015 \text{ mD}$  i standardnom devijacijom od  $\pm 0,18 \text{ mD}$ . Propusnost je najmanja kod dotoka, te se postepeno povećava prema sredini cilindra prije nego li počne opet padati. Međutim, najveća je izmjerena vrijednost poroznosti ( $0,51 \text{ mD}$  u području sredine cilindra) bila manja u odnosu na prosječnu vrijednost slične kvalitete pjene dobivene u atmosferskim uvjetima ( $1,7 : 5,3 \text{ mD}$ ).

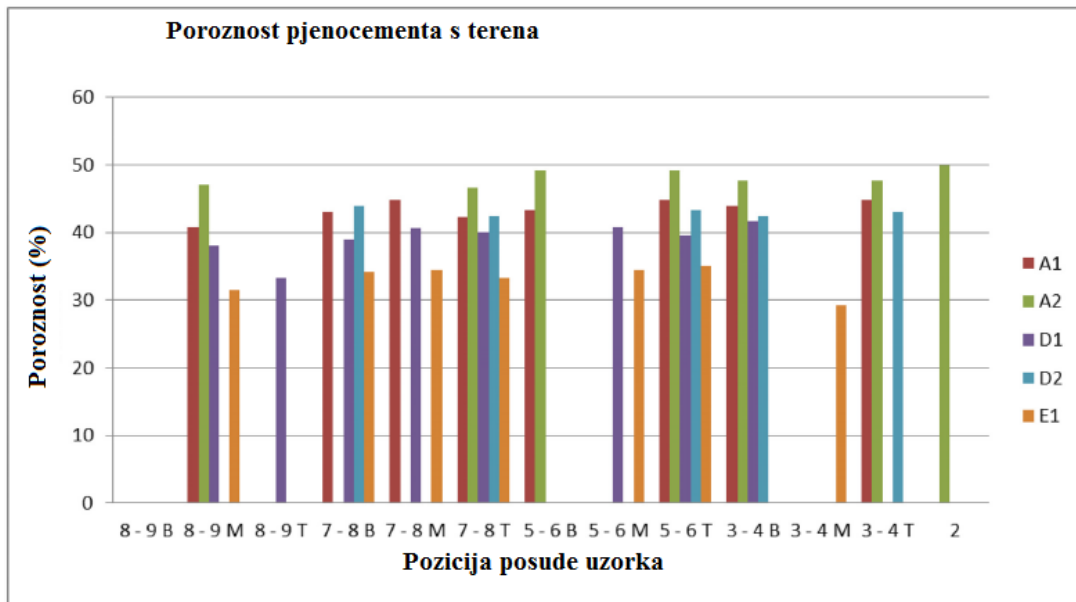
Uzorak A2 (s izračunatom kvalitetom pjene 34,4%) je imao izmjerenu vrijednost poroznosti sličnu s uzorkom kvalitete pjene 20% dobivene u atmosferskim uvjetima. Mjerena poroznost uzorka A2 ostaje dosta stabilna s prosječnom vrijednošću  $48,2 \pm 1,2\%$ .

Međutim, primijećena je velika promjena u propusnosti kroz cilindar. Propusnost je izrazito niska u blizini ulaza ( $0,21-0,34 \text{ mD}$ ) te se povećava prema vrhu cilindra ( $0,93-1,52 \text{ mD}$ ). Prosječna je propusnost cilindra uzorka  $1,05 \pm 0,57 \text{ mD}$ .

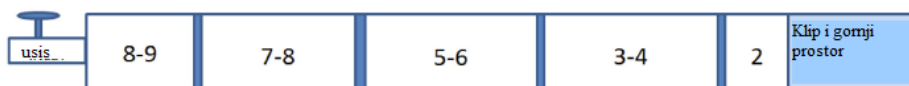
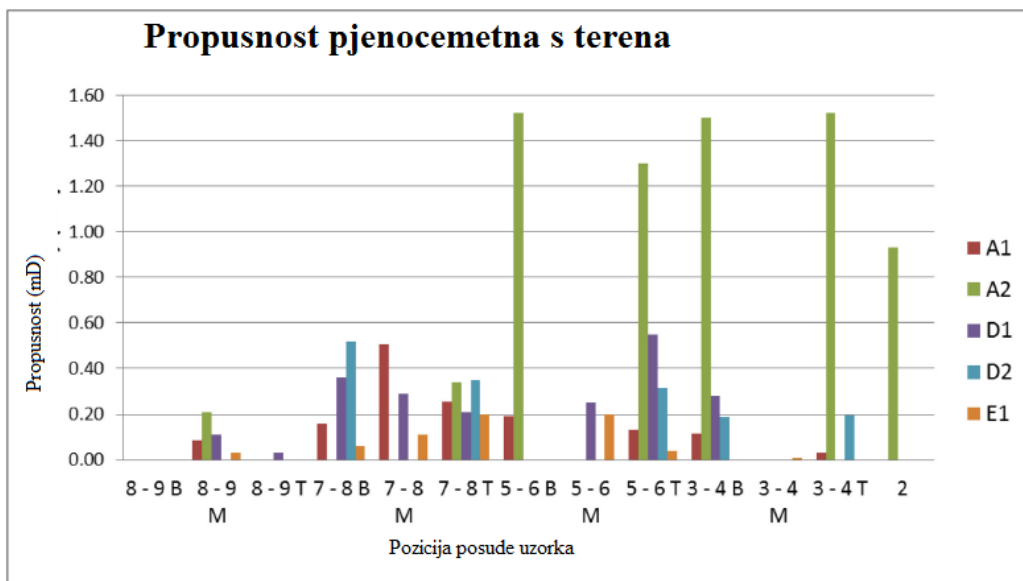
Uzorak D1 je imao izračunatu kvalitetu pjene 41% i izmjerenu vrijednost poroznosti između 33-42% (prosječna= $39,1 \pm 2,6\%$ ). Ovako izračunata kvaliteta pjene i izmjerena poroznost su nedosljedne. Zbog nerazdvojene poroznosti cementnog matriksa, mjerena poroznost bi trebala biti veća od kvalitete pjene (uvjetno: mjerena poroznost= udio utisnutog plina+ poroznost matriksa). Obje vrijednosti propusnosti i poroznosti su bile usporedive s kvalitetom pjene 10% pjenocementa dobivenog pri atmosferskim uvjetima. Prosječna propusnost je iznosila  $0,26 \pm 0,16 \text{ mD}$  (Kutchko i dr., 2014).

Uzorak D2 je imao izračunatu kvalitetu pjene od 47,8%, koja bi trebala predstavljati najveću vrijednost poroznosti. Međutim, D2 uzorak je bio u skladu s vrijednostima uzorka A1, dok je uzorak A2 imao najveću vrijednost. Uzorak D2 je imao prosječnu poroznost od  $(43 \pm 0,6\%)$  i propusnost  $(0,31 \pm 0,14)$  koja se može usporediti s kvalitetom pjene od 20% dobivene pri atmosferskim uvjetima.

Izračunata vrijednost kvalitete pjene za uzorak E1 je iznosila 33.6%, a izmjerena vrijednost prosječne poroznosti je iznosila  $33,1 \pm 2,1\%$ . Kao i kod uzorka D1, kvaliteta pjene i poroznost uzorka E1 su nedosljedne i vrijednosti su manje nego očekivane. Raspon propusnosti je varirao od 0,03 *mD* na dnu cilindra (ulaz), te se povećava na vrijednost 0,55 *mD* prije nego li počne padati na vrijednost od 0,28 *mD* . Prosječna propusnost je iznosila  $0,08 \pm 0,09$  *mD*- usporedno s uzorkom kvalitete pjene od 10% dobivenoj pri atmosferskim uvjetima.



Slika 5-17. Shema prikazuje sekcije uzorka cilindra s izmjerenom poroznošću (Kutchko i dr., 2014)



Slika 5-18. Shema prikazuje sekcije uzorka cilindra s izmjerenom propusnosti (Kutchko i dr., 2014)

### 5.3. Primjer korištenja pjencementne kaše u praksi za rješavanje korozivnosti zaštitnih cijevi u vodo-utisnoj bušotini u Sjevernom Omanu

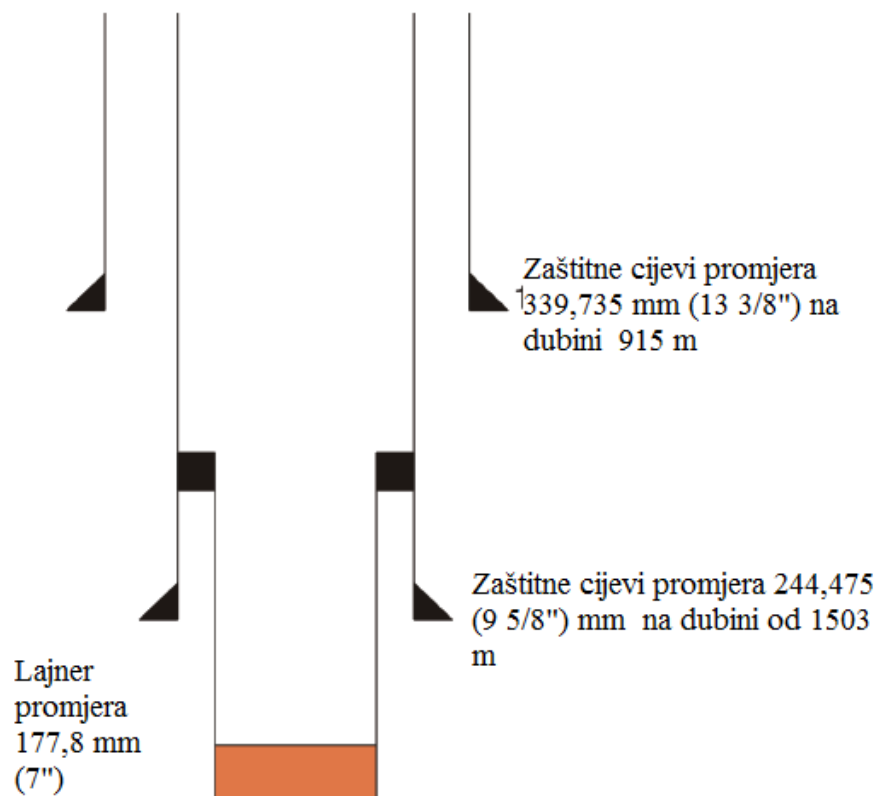
Gubitak cirkulacije isplake je fenomen koji se pojavljuje u bušotinama gdje se isplaka gubi u porama formacija. Gubitak cirkulacije može prouzročiti ozbiljne probleme prilikom bušenja i cementiranja. Ako se gubitak ne riješi tijekom bušenja, gubitci koji se pojave za vrijeme cementacije mogu prouzročiti nepotpunu cementaciju prstenastog prostora i nastanak korozije. Autori Weerd i dr. su objavili članak „*Innovative Application of Foamed Cement for Zonal Isolation of a Tieback Casing across Highly Corroded Casing*“ (2010) u kojem su opisali primjer upotrebe pjencementne kaše u Sjevernom Omanu za izolaciju korodiranih zaštitnih cijevi.

Tijekom popravka u jednoj vodo-utisnoj bušotini u Sjevernom Omanu utvrđeno je da je proizvodna kolona zaštitnih cijevi promjera 244,475 mm (9 5/8“) jako korodirana. U ovoj bušotini su površinske zaštitne cijevi prekrivale plitko zalježuće vodonosnike (*engl. shallow aquifers*). Ovakva kombinacija vodonosnih slojeva je rezultirala neuspješnom cementacijom zaštitnih cijevi. Na temelju stanja bušotine samo su dvije opcije bile moguće: napuštanje ili povratiti integritet zaštitnih cijevi i izolirati područje vodonosnih slojeva. Dodatna analiza je utvrdila nekoliko korozivnih zona ujedno i na koloni promjera 339,725 mm (13 3/8“) i proizvodnim zaštitnim cijevima promjera 244,475 mm (9 5/8“).

Odlučeno je pristupiti popravku integriteta na drugačiji način, a odluka je bila da se izvede cementacija zaštitnih cijevi koja bi išla od vrha lajnera promjera 177,8 mm do ušća bušotine. Zaštitne cijevi koje bi išle od vrha lajnera do ušća (*engl. tieback casing*) bi bile cementirane do ušća kako bi se izbjegla korozija uzrokovana vodonosnim slojevima. Ako bi se postigla cementacija do ušća, tada bi pjencementni kamen trebao omogućiti izolaciju. Zbog ovih razloga korišten je pjencementni kamen, odnosno pjencementna kaša za cementiranje zaštitnih cijevi od vrha lajnera do ušća (Weerd i dr., 2010).

#### 5.4. Konstrukcija i bušenje bušotine

Tipičan se konvencionalan dizajn vodo-utisne bušotine sastojao od dva niza zaštitnih cijevi različitih promjera i jednog lajnera (slika 5-18). Zaštitne cijevi promjera 339,725 mm su ugrađene od ušća do 915 m dubine, kako bi izolirale plitke vodonosne slojeve i potencijalne zone gubitka isplake. Proizvodne zaštitne cijevi promjera 244,475 mm (9 5/8") su ugrađene do dubine od 1503 m prije ulaska u ležište te su cementirane do prethodnih zaštitnih cijevi. Ležišna sekcija je izolirana s cementiranim lajnerom promjera 177,8 mm (7"). Lajner je ugrađen do oko 2000 m i cementiran.



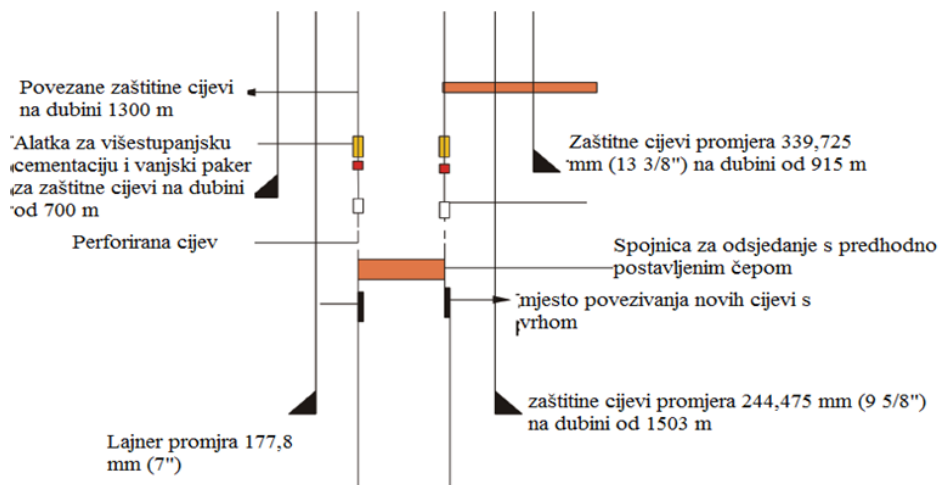
Slika 5-19. Tipična konstrukcija vodo-utisne bušotine (Weerd i dr., 2010)

Unutar prethodnih zaštitnih cijevi koje su bile korodirane ugrađen je još jedan niz cijevi (*engl. tieback*) promjera 177,8 mm (7"). Pjenocementna kaša je izabrana kao najbolja opcija zbog niske gustoće, visoke viskoznosti, kompresibilnosti i mogućnosti ekspaniranja jer je u nju plin utisnut. Kao što je prethodno spomenuto, planirano je koristiti DV uređaj za dvostupanjsku cementaciju kako bi se smanjila duljina korodiranih zaštitnih cijevi i potencijalne zone gubljenja isplake. Svaki stupanj se smatrao zasebnim kako bi se postigla što kvalitetnija cementacija (Weerd i dr., 2010).

Tijekom popravne cementacije koristio se razdjeljivač. U prvoj se bušotini kao razdjeljivač koristila svježja voda, a u ostalim bušotinama razdjeljivač u kojeg je utisnut dušik. Razdjeljivač je korišten kako bi se smanjio hidrostatski tlak u prstenastom prostoru, te kako bi se potisnula voda ili fluid prisutan u prstenastom prostoru. Pri projektiranju cementne kaše za svaku fazu razmatrana su dva glavna cilja:

- kvaliteta pjene (količina plina u kaši) je trebala biti velika kako bi se zatvorile zone gubitka isplake
- pjencementni kamen, koji bi ostao iza dva niza zaštitnih cijevi za vrijeme radnog vijeka bušotine, je trebao biti na bazi pjencementne kaše kvalitete pjene od 18% do 38%. Time bi operator iskoristio sve prednosti pjencementnog kamena (malu propusnost i rastezljivost i dr.) kako bi postigao kvalitetnu izolaciju prstenastog prostora i zaštitu cijevi od korozije.

Kako bi se postigla oba kriterija, svaki stupanj utiskivanja (*engl. foamed-cement stage*) (ispod i iznad alatke za cementiranje u stupnjevima (*engl. stage tool*)) se sastojao od sedam obroka pjencementne kaše različite kvalitete pjene. Prikaz konstrukcije bušotine s povezanim cijevima (dvostupanjska cementacija) se nalazi na slici 5-19.



Slika 5-20. Konstrukcija bušotine s dodanim poveznim cijevima (dvostupanjska cementacija) (Weerd i dr., 2010)

Za pjencementnu kašu, osnovna cementna kaša je dizajnirana pri 15,0 kPa/m. Pripremljena je suha mješavina koja se sastojala od cementa, šupljih mikrokuglica i drugih



olakšivača (extenders) i ubrzivača. S volumenom prstenastog prostora od 6 m<sup>3</sup>, pjencementna kaša je utiskivana u sedam obroka. Prva su četiri obroka pjencementne kaše s visokom kvalitetom pjene utiskivana kako bi zatvorili zone gubljenja isplake i omogućili skretanje pjencementne kaše prema površini u oba prstenasta prostora te zadržali preostala tri obroka pjencementne kaše iza zaštitne cijevi na kraju cementacije. Ta zadnja tri obroka pjencementne kaše imaju zahtjevna svojstva. Repna cementna kaša volumena 2 m<sup>3</sup> je utisnuta kako bi omogućila kvalitetnu izolaciju u petu kolone zaštitnih cijevi. Još 2 m<sup>3</sup> vršne cementne kaše je utisnuto kako bi komprimiralo dušik i poboljšalo kvalitetu pjencementne kaše s površine kroz prstenasti prostor.

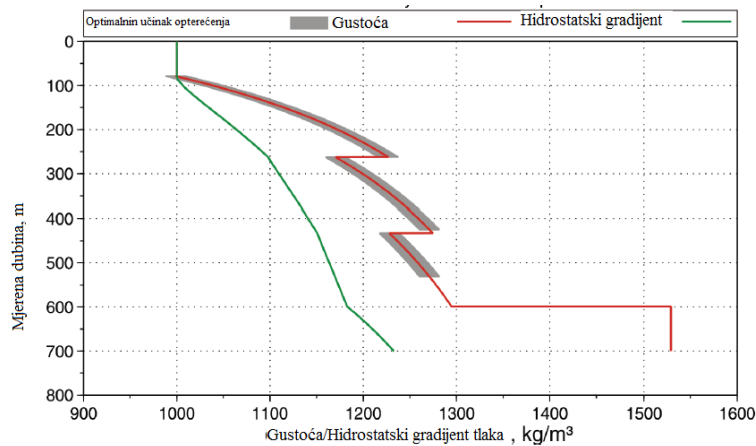
Prije pripreme na terenu je bila potrebna priprema cementne mješavine. Kontrola kvalitete je provedena u laboratoriju. Potrebno je primijeniti odgovarajuće procedure koje će omogućiti da se kaša miješa, utiskuje pri jednolikoj gustoći i viskoznosti.

Pošto je ovo bila prva primjena pjencementne kaše za ponovno postizanje integriteta bušotine, korištena je alatka za višestupanjsku cementaciju te vanjski paker za zaštitne cijevi.

Kaša svakog stupnja cementacije utiskivana je u sedam manjih obroka. Prva četiri obroka volumena od 30 m<sup>3</sup> su korištena za sprječavanje gubljenja isplake. Volumen pjencementne kaše i kvaliteta pjene su prikazani ispod (Weerd i dr., 2010):

- 1 obrok - 10 m<sup>3</sup> pjencementne kaše s kvalitetom pjene 50% pri bušotinskim uvjetima
- 2 obrok - 10 m<sup>3</sup> pjencementne kaše kvalitetom pjene 45% pri bušotinskim uvjetima
- 3 obrok - 5 m<sup>3</sup> pjencementne kaše kvalitetom pjene 40% pri bušotinskim uvjetima
- 4 obrok - 5 m<sup>3</sup> pjencementne kaše kvalitetom pjene 35% pri bušotinskim uvjetima

Slika 5-20 prikazuje simulaciju promjene gustoće pjencementne kaše s dubinom, od konačne dubine (TD) do ušća.



Slika 5-21. Simulacija promjene pjencementne kaše u bušotini (Weerd i dr., 2010)

Teoretski potreban volumen iza zaštitnih cijevi za 1. i 2. stupanj cementacije iznosio je samo 6 m<sup>3</sup> i taj je volumen podijeljen u 3 obroka po 2 m<sup>3</sup>. Kvaliteta pjene je iznosila za svaki obrok 25%, što je omogućilo da se postigne dobra kvaliteta pjencementnog kamena iza zaštitnih cijevi tijekom preostalog radnog vijeka. Otprilike 2 m<sup>3</sup> repne cementne kaše je planirano utisnuti u oba stupnja (iznad i ispod alatke za višestupanjsku cementaciju) i utisnuti 2m<sup>3</sup> vršne cementne kaše u 2. stupnju iznad navedene alatke u slučaju da se pjencementna kaša protisne do površine. Raspored utiskivanja za svaku fazu je prikazan u tablici 5-3 i 5-4. Bez obzira na povratak cementne kaše u prvoj fazi ispod opreme, vanjski će prstenasti paker uvijek biti aktiviran i oprema će biti otvorena slijedeći drugu fazu cementiranja iznad opreme. Ovo će omogućiti da se postigne dobra kvaliteta pjencementa iza zaštitnih cijevi.

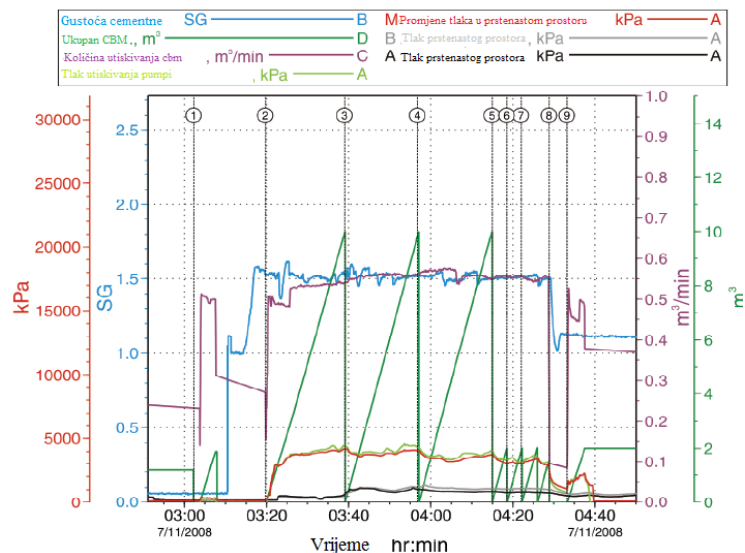
Tablica 5-3. Redosljed utiskivanja za 1. stupanjsku cementaciju za vodo-utisnu bušotinu 77 (Weerd i dr., 2010)

| Obrok | Fluid                 | Intezitet utiskivanja, m <sup>3</sup> /min | Osnovni fluid  |       | Komentar                                 |
|-------|-----------------------|--|----------------|-------|--|
|       |                       |  | m <sup>3</sup> | kPa/m |  |
| 1.    | Svježa voda           | 0,5  | 5              | 10    | Cementna kaša                            |
| 2.    | Pjencementna kaša 1   | 0,3  | 10             | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p)            |
| 3.    | Pjencementna kaša 1   | 0,3  | 10             | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p)            |
| 4.    | Pjencementna kaša 1   | 0,5  | 5              | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p)            |
| 5.    | Pjencementna kaša 1   | 0,5  | 5              | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p)            |
| 6.    | Pjencementna kaša 1   | 0,5  | 2              | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p)            |
| 7.    | Pjencementna kaša 1   | 0,5  | 2              | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p)            |
| 8.    | Pjencementna kaša 1   | 0,5  | 2              | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p)            |
| 9.    | Repna cementna kaša   | 0,5  | 2              | 15    | Povrat kroz oba p.p,N <sub>2</sub> opada |
| 10.   | Fluid za istiskivanje | 0,5- 0,8                                   | +/- 26,65      | 10    | Potpuni povrat kroz oba p.p              |

Tablica 5-4. Redosljed utiskivanja za 2. stupanjsku cementaciju za vodo-utisnu bušotinu 77 (Weerd i dr., 2010).

| Obrok | Fluid                 | Intezitet utiskivanja, m <sup>3</sup> /min | Osnovni fluid  |       | Komentar                      |
|-------|-----------------------|--|----------------|-------|-------------------------------|
|       |                       |  | m <sup>3</sup> | kPa/m |                               |
| 1.    | Svježa voda           | 0,5  | 5              | 10    | Cementna kaša                 |
| 2.    | Pjenocementna kaša 1  | 0,5  | 10             | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p) |
| 3.    | Pjenocementna kaša 1  | 0,5  | 10             | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p) |
| 4.    | Pjenocementna kaša 1  | 0,5  | 10             | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p) |
| 5.    | Pjenocementna kaša 1  | 0,5  | 2              | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p) |
| 6.    | Pjenocementna kaša 1  | 0,5  | 2              | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p) |
| 7.    | Pjenocementna kaša 1  | 0,5  | 2              | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p) |
| 8.    | Pjenocementna kaša 1  | 0,5  | 2              | 15    | Potpuni povrat kaše (oba p.p) |
| 9.    | Fluid za istiskivanje | 0,5 do 0,8                                 | +/-<br>14,35   | 15    | Povrat kroz oba p.p           |
| 10.   | Vršna kaša (cementna) | 0,5  | 1,0            | 10    | -                             |

Posao je obavljen kao što je predviđeno, te se pjenocementna kaša vratila na površinu u oba stupnja utiskivanja kroz oba prstenasta prostora (prstenasti prostor između kolona 177,84 mm (7“) i 244,475 mm 9 5/8“, p.p između kolona zaštitnih cijevi 244,475 mm (9 5/8“) i 339,725 mm(13 3/8“) koji su bili otvoreni i kontrolirani površinskim sapnicama (*engl. choke*) tijekom cementacijskog postupka. Slika 5-21 prikazuje dijagram utiskivanja pjenocementne kaše .



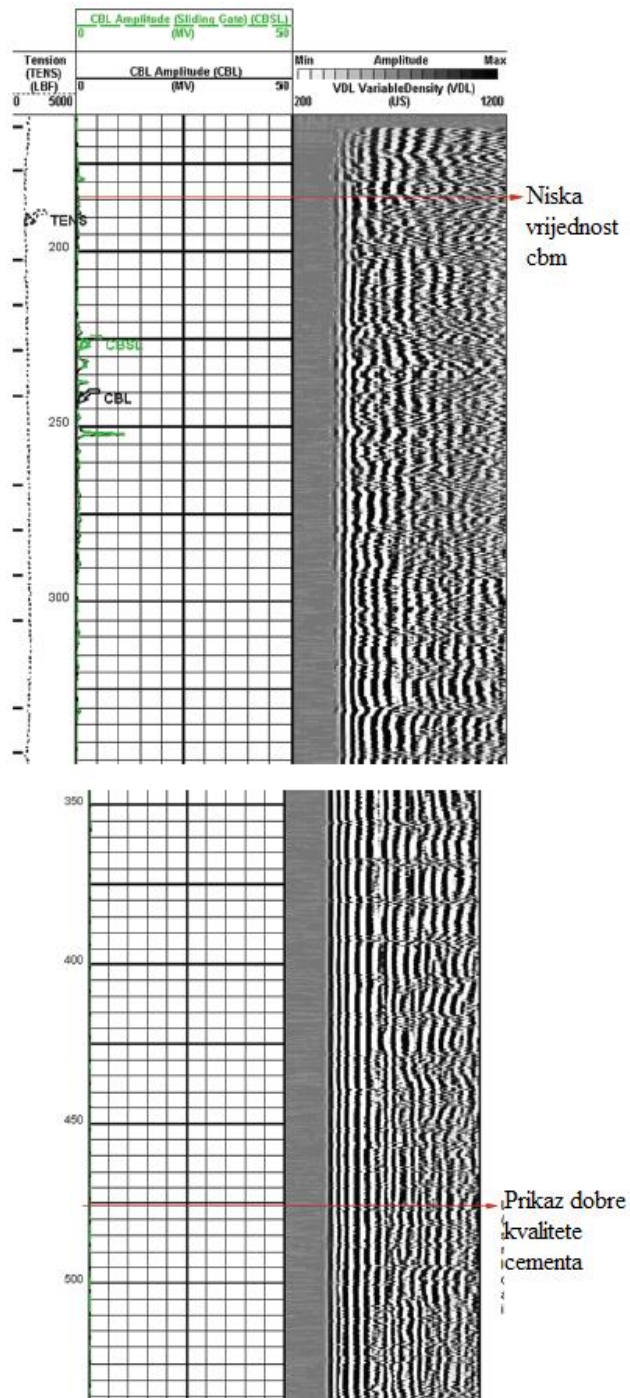
**LEGENDA:**

**Vrijeme utiskivanja pojedinog fluida**

|                                       |          |                                       |          |                                       |          |
|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
| <b>1) Svježa voda</b>                 | 03:02:19 | <b>2) pjenocementna kaša obrok1</b>   | 03:19:45 | <b>3) pjenocementna kaša 1 obrok</b>  | 03:19:45 |
| <b>4) pjenocementna kaša 3. obrok</b> | 03:56:48 | <b>5) pjenocementna kaša 4. obrok</b> | 04:14:58 | <b>6) pjenocementna kaša 5. obrok</b> | 04:18:33 |
| <b>7) pjenocementna kaša 6. obrok</b> | 04:22:01 | <b>8) pjenocementna kaša 7. obrok</b> | 04:28:51 | <b>9) pjenocementna kaša 8. obrok</b> | 04:33.13 |

Slika 5-22. Dijagram utiskivanja pjenocementne kaše za vodo-utisnu bušotinu (Weerd i dr., 2010)

Karotaža je cementne veze (CBL-VDL-USIT) pokazala kvalitetan cement što je znak dobre cementacije, a navedeno je prikazano na slici 5-22. Oba prstenasta prostora su podvrgnuta ispitivanju tlaka loma formacije, što je kao rezultat imalo dobru izolaciju. Obavljen je posao bio uspješan i pokazao je potencijal za druge bušotine sličnoga problema.



Slika 5-23. Karotaža cementne veze za cementaciju zaštitnih cijevi od vrha lajnera do ušća (Weerd i dr., 2010)

Na kraju se nalaze slike postrojenja i povrata pjencementne kaše na površinu, slika 5-23 (Weerd i dr., 2010).



Slika 5-24. Prikaz slike postrojenja i povrata pjencementne kaše na površinu (Weerd i dr., 2010)

Utiskivanjem pjencementne kaše je poboljšana zonalna izolacija u području frakturiranih formacija i korodiranih sekcija kolone zaštitne cijevi, a to je omogućilo produljenje radnog vijeka vodo-utisnih bušotina na sjeveru, a kasnije i na jugu Omana.

## 6. ZAKLJUČAK

Iz obrađenog se primjera može zaključiti da se pjenasti cement koristi u različitim slučajevima. U nekim je slučajevima pjenasti cement više ekonomski isplativ. Pjenasti cement je teže dizajnirati i utisnuti nego konvencionalnu kašu. Valja istaknuti da takav cement ima mogućnost primjene u različitim situacijama. Može se koristiti kao kaša izrazito lagane gustoće, kao cement za poboljšanje izolacije propusnih zona bušotine te kao cement za poboljšanje kontrole gubitka isplake i druge.

Većina se testiranja kakvoće cementa obavlja u laboratorijskim uvjetima, te bi stoga bilo poželjno testirati cement dobiven na terenu koristeći iste tehnike kao i kod laboratorijskog testiranja te usporediti dobivene rezultate. Svojstva koja je potrebno testirati su: poroznost, šupljikavost, Youngov modul, Poissionov omjer, tlačna čvrstoća i akustična impedancija. Vjeruje se da je poroznost određena načinom pripreme cementne kaše budući da su bazne kaše iste za laboratorijski i terenski rad. Fizička i mehanička svojstva ovise o kvaliteti, tlaku stvrdnjavanja i mjerenoj poroznosti. Testirajući uzorke terenskih cementih kaša zamijećen je porast šupljikavosti koja je proporcionalna porastu poroznosti. S druge strane, Youngov modul i tlačna čvrstoća su se smanjivali s porastom propusnosti. Svaka od ovih pojava zamijećena je, kako na terenu, tako i u laboratorijskim testiranjima, osim šupljikavosti koja je niža za cemente dobivene na terenu.

Razvoj novih pjenastih cemenata je omogućio korištenje uspješnih metoda cementacije u zonama niskog gradijenta frakturiranja bez pogoršavanja svojstava cementne kaše uslijed izloženosti visokom tlaku. Nove su metode omogućile značajno smanjenje gubitka cirkulacije i bolju kontrolu tlaka u pribušotinskoj zoni tijekom i nakon procesa cementiranja. Čvrsta se cementna veza može dokazati pomoću karotažnih mjerenja. Uspješnost primjene pjenocementa isključuje potrebu za sekundarnom cementacijom što smanjuje operativno vrijeme, sigurnosne rizike i trošak same operacije

## 7. LITERATURA

1. API 2004. API Recommended Practice 10B-4. Recommended Practice on Preparation and testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure, First Edition, Washington DC: American Petroleum Institute.
2. BIKMUKHAMETOV, A., ILIASOV, S., OKROMELIDZE, G., GARSHINA, O., CHUGAEVA, O., 2014. Experience of Using the Foamed Cement Technology for Difficult Lost Circulation Control. SPE-171803-MS paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UEA, 10-13 November 2014.
3. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2016. Bušotinski fluidi 2, predavanja. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
4. GIEGER, C., FAZIO, J., SPAULDING, R., KUTCHKO, B., 2016. Physical and Mechanical Properties of Field-Generated Foam Cements: Implications for Cement Property Prediction and Modeling. SPE-180333-MS paper presented at the SPE Deepwater Drilling and Completions Conference, Galveston, Texas, USA, 14-15 September 2015.
5. KUTCHKO, B., CRANDALL, D., MOORE, J., GIERGE, C., GILL, M., HALJASMAA, I., SPAULDING, R., HARBERT, W., MERGAMA, A., DALTON, L., RESENBAUM, E., MCINTYRE, D., BENGE, G., BUFORD, C., SHINE, J., 2015. Assessment of Pressurized Foamed Cement Used in Deep Offshore Wells. SPE-170298-MS paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 4-7 May 2015.
6. MCELFRISH, P., GO BONCAN, V., 1982. Application of Foam Cement. SPE 11203 paper presented at the 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME, New Orleans, LA, Sept 26-29-1982
7. NELSON, E., 1990. Well Cementing. Developments in Petroleum Science, 28. Dowell Schlumberger, Elsevier Science Publishing Company Inc., The Netherlands
8. OLOWOLAGBA, K., BRENNEIS, C., 2010. Techniques for the Study of Foamed Cement Rheology. SPE 133050 paper presented at the SPE Production and Operations Conference and Exhibition. Tunis, Tunisia, 8-10 June 2010
9. PAVIĆ, V., GAURINA-MEĐIMUREC, N. I RUŽIĆ, M., 1989. Pjenocementne kaše u naftnoj industriji. NAFTA 40 (12), str. 753-761
10. WEERD, A., AL HANSHI, S., AL AGHBARI, ALFADHLI, A., 2010. Innovative Application of Foamed Cement for Zonal Isolation of a Tieback Casing across Highly



Corroded Casing. SPE 128261 paper presented at the SPE North Africa Tehnical Conference and Exhibiton. Cairo, Egypt, 14-17 February 2010.

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad samostalno izradio.

---

Šime Gospić