

Cementne kaše za zatvaranje mjesta gubljenja isplake

Šango, Jurica

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:169:670375>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**



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 ZA ZATVARANJE MJESTA
GUBLJENJA ISPLAKE**

DIPLOMSKI RAD

Jurica Šango
N 169

Zagreb, 2017.

CEMENTNE KAŠE ZA ZATVARANJE MJESTA GUBLJENJA ISPLAKE

JURICA ŠANGO

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Sažetak

U radu su uspoređene različite cementne kaše za zatvaranje mjesta gubljenja isplake. Uspoređene cementne kaše različitih su sastava i svojstava te o tome ovisi njihova sposobnost čepjenja pora i pukotina u stijenama. Nadalje, obrazložen je postupak utiskivanja cementne kaše i važnost razdjelnice koja prethodi cementnoj kaši za uspješnost cementacije. Odabiranjem cementne kaše odgovarajućeg sastava i svojstava, moguće je začepiti i najveće pore i pukotine u stijenama, kako bi izrada bušotine mogla biti nastavljena sigurno i u što kraćem roku.

Ključne riječi: cementne kaše, razdjelnica, mjesta gubljenja, materijali za čepljenje

Diplomski rad sadrži: 62 stranice, 7 tablica, 13 slika i 17 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski jezik

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

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

Ocjenjivači: Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNF-a
Dr.sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNF-a
Dr.sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Datum obrane: 9. lipnja 2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

CEMENT SLURRIES FOR CLOSURE OF DRILLING MUD THIEF ZONES

JURICA ŠANGO

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

Abstract

Various cement slurries for closure of drilling mud thief zones are compared in this thesis. Cement slurries have different compositions and properties and therefore act differently when placed in loss circulation zones. Furthermore, the thesis describes the process of pumping cement slurry into position in the annular space or in an openhole, as well as the importance of spacer for appropriate cement bonding and successful cementation. By selecting cement slurry of right properties, it is possible to seal even the biggest fractures and enable further well development without loss circulation problems.

Key words: cement slurry, spacer, loss circulation zones, lost circulation materials

Thesis contains: 62 pages, 7 tables, 13 figures i 17 references.

Original in: Croatian

Archived 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 Katarina Simon, PhD
Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defence: June 9th, 2017, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
University of Zagreb

Iskreno i od srca zahvaljujem svojoj mentorici dr.sc. Nediljki Gaurini-Međimurec na ukazanoj pomoći, savjetima i strpljenju ukazanom prilikom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem docentu dr.sc. Borivoju Pašiću i redovitoj profesorici dr.sc. Katarini Simon na ukazanoj pomoći i doprinosu kvaliteti diplomskog rada.

Hvala svim profesorima, onim odličnima na strasti za struku i prenešenom znanju, ali i onima koji su me svojim postupcima naučili kakav autoritet i osoba ne treba biti.

Velike zahvale svim kolegama i prijateljima koji su mi pomagali i poticali me tijekom studiranja.

I na kraju, najveće zahvale mojoj obitelji, koja je bila uz mene bez obzira na sve teškoće i prepreke i pružila mi bezuvjetnu potporu i ljubav. Bez njih ovo postignuće ne bi bilo moguće.

SADRŽAJ:

POPIS TABLICA.....	I
POPIS SLIKA	II
POPIS KRATICA	III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA	IV
FAKTORI KONVERZIJE IZ ANGLOSAKSONSKIH U SI JEDINICE.....	V
1. UVOD	1
2. SASTAV I SVOJSTVA CEMENTNIH KAŠA	3
2.1. Gustoća cementne kaše	3
2.2. Vrijeme zgušćivanja cementne kaše	6
2.3. Reološka svojstva cementne kaše.....	7
2.4. Filtracija cementne kaše	7
2.5. Svojstva cementnog kamena	9
3. GUBLJENJE ISPLAKE TIJEKOM BUŠENJA.....	11
3.1. Vrste stijena u kojima dolazi do gubljenja isplake	12
3.2. Preventivne mjere	13
3.3. Intenzitet gubljenja isplake	16
3.4. Saniranje gubljenja isplake.....	17
4. GUBLJENJE CEMENTNE KAŠE TIJEKOM CEMENTACIJE	19
5. GUBITAK CIRKULACIJE PRILIKOM RAZLIČITIH FAZA IZRADA BUŠOTINE I PRIMARNE CEMENTACIJE ZAŠTITNIH CIJEVI	21
5.1. Iniciranje gubljenja cirkulacije.....	21
5.2. Utjecaj cementne kaše na smanjenje gubljenja cirkulacije	23
6. CEMENTNE KAŠE ZA CEMENTIRANJE KROZ ZONE GUBLJENJA CIRKULACIJE.....	25
6.1. Cementiranje propusnih zona u poljima Tunu, Tambora i Handil	25
6.1.1. Cementne kaše sa staklenim mikrokuglicama visoke otpornosti na drobljenje.....	26
6.1.2. Primjena cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama na poljima Handil i Tunu	30
6.1.3. Procjena uspješnosti cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama kao olakšivačima.....	31
6.2. Silikatna vlakna kao aditiv za sprječavanje gubljenja cirkulacije prilikom cementiranja zaštitnih cijevi	33

6.2.1. Testiranje i primjena silikatnih vlakana	34
6.2.2. Primjer cementacije zaštitnih cijevi HPLW kašom s dodatkom silikatnih vlakana u prirodno raspucalim stijenama polja Mesaverde	36
6.2.3. Cementiranje zaštitnih cijevi HPLW cementnom kašom u zonama naslaga ugljena	37
6.3. Saniranje gubljenja cirkulacije razdjelnicom	38
6.3.1. Mehanizam čepjenja pukotina razdjelnicom s modificiranim polisaharidima	39
6.3.2. Geološka struktura polja Lockihar	40
6.3.3. Cementiranje zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m (13 3/8 in)	41
6.3.4. Cementiranje zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8 in)	42
6.3.5. Cementiranje zaštitnih cijevi u geotermalnoj bušotini promjera 0,508 m (20 inch).....	44
6.3.6. Cementiranje zaštitnih cijevi promjera 0,339 m (13 3/8 in) u geotermalnoj bušotini	45
7. CEMENTNI ČEPOVI ZA ZATVARANJE ZONA GUBLJENJA CIRKULACIJE	49
7.1. Cementne kaše tiksotropnih svojstava za zatvaranje zona gubljenja cirkulacije.....	49
7.1.1. Cementni čep za sprječavanje gubljenja isplake u kaveroznom vapnencu .	49
7.1.2. Cementni čep za zaustavljanje zapjenjene cementne kaše prilikom cementiranja kolone zaštitnih cijevi zapjenjenom cementnom kašom	51
7.2. Umrežene cementne kaše za zatvaranje zona gubljenja cirkulacije	55
7.2.1. Sprječavanje gubljenja cementne kaše prilikom cementiranja izgubljene kolone zaštitnih cijevi postavljanjem MCC čepa u zonu gubitaka	56
7.2.2. Postavljanje RCC čepa za čepljenje zone katastrofalnih gubitaka.....	57
8. ZAKLJUČAK	58
9. LITERATURA	61

POPIS TABLICA

Tablica 6-1. Laboratorijski utvrđena svojstva cementne kaše sa staklenim mikrokuglicama korištene na poljima Tunu, Tambora i Handil.....	28
Tablica 6-2. Usporedba vremena potrebnog za postizanje čvrstoće od 13,79 MPa (2000 psi) cementnih kaša sa staklenim i keramičkim mikrokuglicama kao olakšivačima	29
Tablica 6-3. Gubljenje isplake pri različitim hodovima pumpe	43
Tablica 6-4. Volumeni utisnutih cementnih kaša obzirom na razdjelnicu koja prethodi utiskivanju cementne kaše	47
Tablica 7-1. Svojstva tiksotropne cementne kaše (THIX)	51
Tablica 7-2. Svojstva ultratiksotropne cementne kaše (UTHX)	53
Tablica 7-3. Vrijeme očvršćivanja u odnosu na temperaturu sloja	53

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Konstrukcija i izgled bušotine tijekom cementacije kolone zaštitnih cijevi.....	1
Slika 2-1. Keramičke mikrokuglice – cenosfere	5
Slika 3-1. Pukotine nastale premašivanjem tlaka frakturiranja	11
Slika 3-2. Stijene u kojima se može očekivati gubitak isplake	12
Slika 3-3. Mehanizam djelovanja isplake s afronima.....	15
Slika 3-4. Utjecaj različitih veličina i tipova LCM-a na sposobnost čepjenja pukotina	18
Slika 4-1. Slijed postupaka za rješenje problema gubljenja nakon uočavanja gubljenja cirkulacije	19
Slika 5-1. Pojava prvog gubljenja cirkulacije na 40 različitih sekcija.....	22
Slika 5-2. Utjecaj cementne kaše na smanjenje gubljenja cirkulacije obzirom na intenzitet gubljenja	23
Slika 6-1. Usporedba olakšanih cementnih kaša obzirom na otpornost na drobljenje	27
Slika 6-2. Usporedba cementnih kaša s keramičkim i staklenim mikrokuglicama obzirom na probleme koji se mogu očekivati prilikom izvođenja cementacije.....	31
Slika 6-3. Svitak silikatnih vlakana	33
Slika 6-4. Formiranje nepropusnog mosta modificiranim polisaharidima iz razdjelnice ...	40

POPIS KRATICA

AEUB – regulatorna energetska agencija savezne države Alberte u Kanadi (*engl. Alberta energy utility board*)

API – naftni institut Sjedinjenih američkih država (*engl. American petroleum institute*)

C – oznaka za krupni materijal za zatvaranje mjesta gubljenja isplake (*engl. coarse*)

DOB – mješavina dizel ulja i bentonita (*engl. diesel oil bentonite*)

DOBC – mješavina dizel ulja, bentonita i cementa (*engl. diesel oil bentonite cement*)

ECD – ekvivalentna cirkulacijska gustoća (*engl. equivalent circulating density*)

F – oznaka za sitni materijal za zatvaranje mjesta gubljenja isplake (*engl. fine*)

HCl – klorovodična kiselina

HPHT – visoki tlak i temperatura (*engl. high pressure, high temperature*)

HPLW cement slurry – vrsta cementne kaše niske gustoće, sa širokim rasponom veličina čvrstih čestica i visokom koncentracijom čvrstih čestica (*engl. high performance light weight*)

LCM – materijali za zatvaranje mjesta gubljenja isplake (*engl. lost circulation materials*)

M – oznaka za srednje veliki materijal za zatvaranje mjesta gubljenja isplake (*engl. medium*)

MCC – magnezijske umrežene cementne kaše (*engl. Magnesia cross linked cement*)

PCP – čep na bazi umreženih polimera (*engl. polymer – based cross – linked pill*)

RCC – standardne umrežene cementne kaše (*engl. Regular cross linked cement*)

SCP – povećani tlak u zacijevljenom prstenastom prostoru (*engl. sustained casing pressure*)

SM – sigurnosni raspon (*engl. safety margin*)

THIX – oznaka za tiksotropnu cementnu kašu

TTH – Tunu, Tambora i Handil

UTHX – oznaka za ultra tiksotropnu cementnu kašu

WOC – čekanje na stvrdnjavanje cementnog kamena (*engl. wait on cement*)

WSM – materijali za očvršćavanje stijenki kanala bušotine (*engl. wellbore strengthening materials*)

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

μ - viskoznost, Pa·s

l – duljina, m

m – masa, kg

p – tlak, Pa

t – temperatura, °C

V – volumen, kg/m³

ρ – gustoća, kg/m³

FAKTORI KONVERZIJE IZ ANGLOSAKSONSKIH U SI JEDINICE

$$1 \text{ bbl} = 0,159 \text{ m}^3 \text{ (engl. barrel)}$$

$$1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m (engl. feet)}$$

$$1 \text{ gal} = 0,00379 \text{ m}^3 \text{ (engl. gallon)}$$

$$1 \text{ in} = 0,0254 \text{ m (engl. inch)}$$

$$1 \text{ lbm} = 0,454 \text{ kg (engl. pound)}$$

$$1 \text{ lbm/bbl} = 2,853 \text{ kg/m}^3 \text{ (engl. pounds per barrel)}$$

$$1 \text{ lbm/gal (1 ppg)} = 120 \text{ kg/m}^3 \text{ (engl. pounds per gallon)}$$

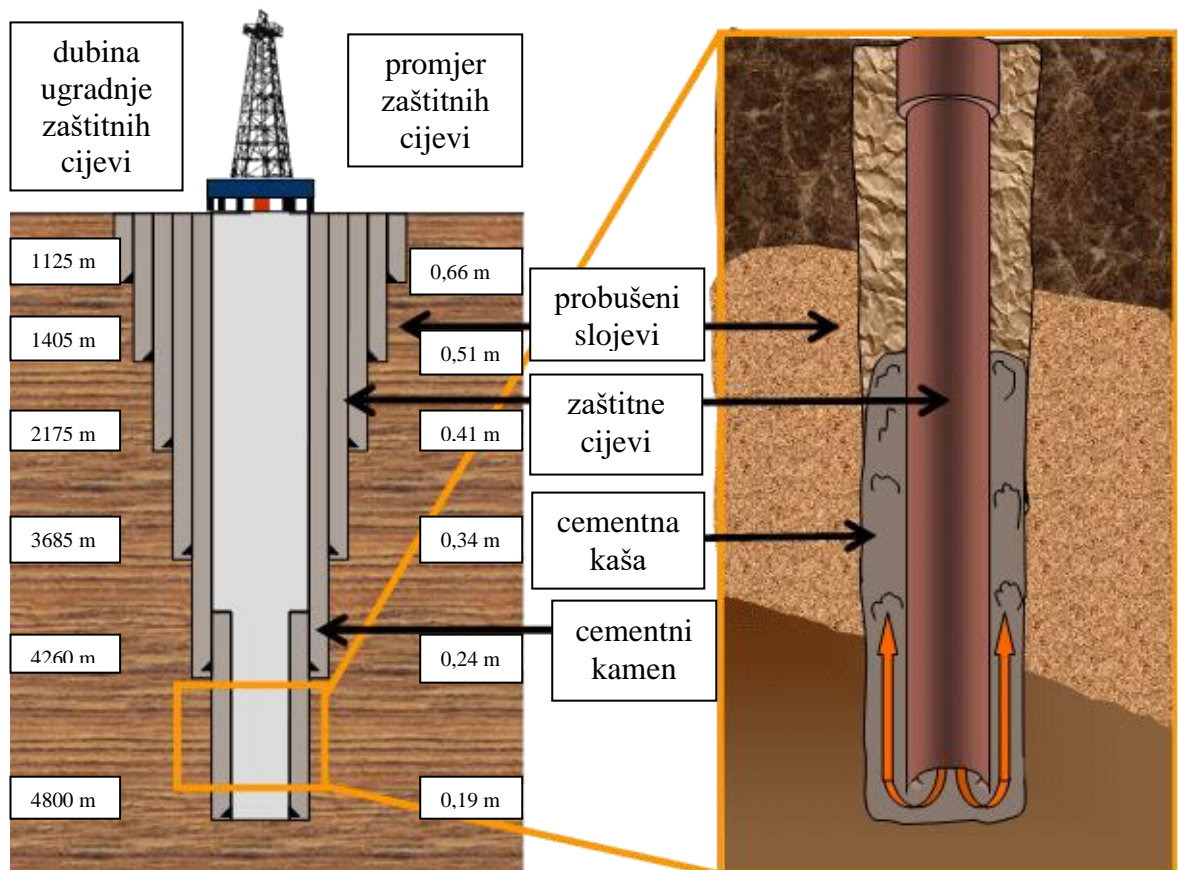
$$1 \text{ }^\circ\text{F} = 1,8 \text{ }^\circ\text{C} + 32$$

$$1 \text{ psi} = 6895 \text{ Pa}$$

1. UVOD

Cementacija niza zaštitnih cijevi (slika 1-1.), predstavlja utiskivanje cementne kaše u prstenasti prostor između niza zaštitnih cijevi i stijenki kanala bušotine. Utisnuta cementna kaša se nakon određenog vremena pretvara u cementni kamen, koji bi trebao omogućiti (Gaurina-Međimurec, 2013):

- učvršćivanje kolone zaštitnih cijevi u bušotini;
- izoliranje proizvodnih slojeva od drugih propusnih slojeva ispod ili iznad proizvodnog;
- sprječavanje protjecanja slojnih fluida između zaštitnih cijevi i stijenki kanala bušotine;
- sprječavanje problema korodiranja zaštitnih cijevi zbog doticaja sa slojnim fluidima;
- sprječavanje gubljenja isplake u nabušene slojeve prilikom izrade kanala bušotine.



Slika 1-1. Konstrukcija i izgled bušotine tijekom cementacije kolone zaštitnih cijevi

(www.bauchemie-tum.de, 2014)

Zaštitne cijevi mogu biti cementirane po cijeloj duljini odjednom, u dva ili više stupnjeva ili pak mogu biti cementirane samo u određenom segmentu (Gaurina-Međimurec, 2013).

Osim primarnog cementiranja prstenastog prostora između zaštitnih cijevi i stijenki bušotine, u praksi se koriste tri metode sekundarnog utiskivanja cementne kaše u kanal bušotine ili prstenasti prostor. U metode sekundarnog, odnosno popravnog cementiranja spadaju (Gaurina-Međimurec, 2013):

- cementiranje pod povećanim tlakom,
- ponovno cementiranje,
- postavljanje cementnih mostova, odnosno čepova.

Cementiranje pod povećanim tlakom, odnosno skviziranje, koristi se pri (Gaurina-Međimurec, 2013):

- popravljajući neuspjeh primarne cementacije,
- izolirajući zone prije perforiranja (blok skviziranje),
- popravljajući oštećenja zbog korozivnog djelovanja fluida iz sloja,
- zatvarajući mjesta gubljenja isplake itd.

Kod ponovnog cementiranja, cementna kaša se protiskuje u određeni dio prstenastog prostora kroz perforacije pri vrhu i dnu željenog intervala kako bi se popravila neuspjela primarna cementacija ili pak zaštitio dio zaštitnih cijevi iznad vrha cementnog kamena.

Posljednja metoda sekundarnog cementiranja, koristi se utiskivanjem čepa cementne kaše u određeni dio bušotine, a razlozi za to mogu biti (Gaurina-Međimurec, 2013):

- napuštanje bušotine,
- postavljanje klina za skretanje kanala bušotine,
- izoliranje dna bušotine ukoliko je prisutan dotok slojnog fluida na dnu,
- zatvaranje mjesta gubljenja isplake.

U ovome radu opisuju se upravo cementne kaše za zatvaranje mjesta gubljenja isplake, odnosno njihov sastav i svojstva.

2. SASTAV I SVOJSTVA CEMENTNIH KAŠA

Osnovna komponenta bušotinskog cementa najčešće je Portland cement. Smjesa za proizvodnju Portland cementa sastoji se minimalno od dvije komponente: vapnenac i glina u omjeru približno 3:1. Fino mljevena mješavina ovih komponenti žari se do temperature sinteriranja, odnosno početnog taljenja (1400 – 1450 °C) pri čemu se vapno (CaO), kemijski veže s oksidima silicija, aluminijskim i željeznim (SiO₂, Al₂O₃ i Fe₂O₃) iz gline, te nastaje čvrst proizvod klinker čije su granule promjera 3 do 25 mm, koji već sadrži osnovna svojstva cementa. Nakon sinteriranja, klinker se hladi i skladišti. U zadnjoj fazi nastanka cementa, klinker se melje te mu se pri mljevenju dodaje 3-6% gipsa, čija je uloga reguliranje vremena vezivanja i povećanje početne čvrstoće te 10-15% mineralnih dodataka u koje spadaju troska, fosilno brašno, pijesak itd. Veličina čestica cementa je nakon mljevenja od 2 do 80 μm.

Cementna kaša nastaje miješanjem praškastog cementa s vodom. Pri tom dolazi do hidratacije minerala klinkera pri čemu se voda ugrađuje u kristalne rešetke minerala klinkera te se stvaraju hidrati i hidroksidi. Hidratacija je egzoterman proces, te se zbog toga mjerenjem temperature može odrediti kvaliteta cementnog kamena i dubina vrha cementne kaše u prstenastom prostoru nakon obavljene cementacije. Cementi koji se primjenjuju u naftnoj industriji proizvode se prema API (*engl. American petroleum institute*) zahtjevima dubine i temperature. Tako postoje klase A, B i C za primjenu do dubine od 1830 m, klasa D za dubine od 1830 m do 3050 m, klasa E za uporabu u uvjetima visokih temperature i tlakova, na dubini bušotine između 3050 m i 4270 m, klasa F za uporabu u uvjetima ekstremno visokih temperatura i tlakova, od 3050 m do 4880 m. Postoje i cementi klase G i H koji su slični cementu klase B, ali se proizvode prema većim kemijskim i fizikalnim zahtjevima te ne sadrže dodatke. Cementi klase G i H kompatibilni su s ubrzivačima i usporivačima pa se prema tome s odgovarajućim aditivima mogu koristiti pri svakoj cementaciji (Gaurina-Međimurec, 2016).

2.1. Gustoća cementne kaše

Gustoća cementne kaše glavni je pokazatelj kvalitete cementne kaše prilikom izvođenja operacije bušenja. Dozvoljena promjena gustoće za određenu cementnu kašu ne

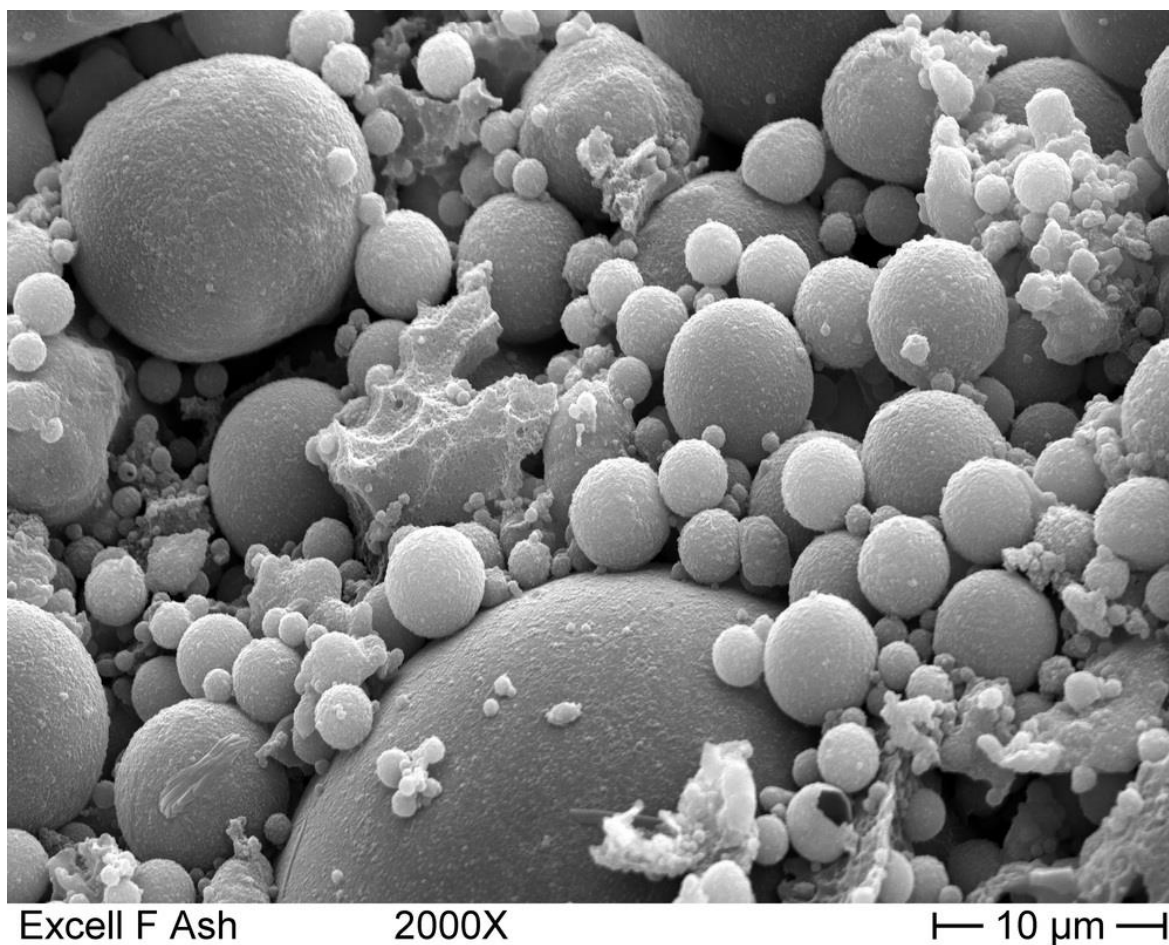
smije prelaziti 20 kg/m^3 . Veće oscilacije ukazuju na promjenu vodocementnog faktora što može kao posljedicu imati promjenu niza drugih parametara poput brzine zgušćavanja, filtracije, promjenu reoloških svojstava itd. Sve navedeno može dovesti do nekvalitetnog i propusnog cementnog kamena.

Ovisno o uvjetima u bušotini, cementnu kašu dobivenu miješanjem vode i cementa u određenom omjeru, odnosno cementnu kašu spravljenju s određenim vodocementnim faktorom v/c , potrebno je olakšati ili pak otežati. Stoga se u spravljenju cementnu kašu dodaju aditivi za smanjenje, odnosno povećanje gustoće.

Prilikom cementiranja osjetljivih formacija, da bi se izbjeglo frakturiranje stijena u bušotini, koriste se cementne kaše smanjene gustoće. Gustoću je moguće smanjiti jednostavno dodavanjem više vode u cementnu kašu prilikom miješanja, dodavanjem čvrstih materijala male gustoće ili pak kombinacijom prethodna dva načina.

Stoga se za smanjenje gustoće cementne kaše obično primjenjuju sljedeće 2 metode (Gaurina-Međimurec, 2016):

- dodavanje bentonita ili drugih ekstendera silikatnog tipa poput natrijevog silikata i pucolana (dijatomejska zemlja ili lebdeći pepeo) uz istovremeno povećanje vodocementnog faktora; ili
- dodavanje materijala čija je gustoća manja od gustoće samog cementa u većim količinama, poput keramičkih mikrokuglica (slika 2-1.) ili dušika.



Slika 2-1. Keramičke mikrokuglice – cenosphere (www.indiacenosphere.com, 2014)

Povećanje gustoće cementne kaše, zahtijeva se u dubokim bušotinama, gdje je zbog visokog slojnog tlaka okolnih formacija, potrebno uspostaviti adekvatnu protutežu tom tlaku; prilikom postavljanja cementnih čepova za skretanje kanala bušotine ili za čepljenje zona gubljenja isplake.

Povećanje gustoće postiže se (Gaurina-Međimurec, 2016):

- smanjenjem vodocementnog faktora; pri čemu je neophodno dodati dispergator da se održi pumpabilnost kaše;
- dodavanjem oteživača odnosno materijala velike gustoće.

Veličina čestica oteživača trebala bi biti kompatibilna s cementom jer veće čestice teže taloženju, a manje povećavaju viskoznost kaše. Oteživači bi također trebali biti inertni u vezi hidratacije cementa i zahtijevati manje vode.

Kaše s manje vode uglavnom se koriste za pripremu čepova za skretanje kanala bušotine, dok su ograničene za druge primjene zbog vrlo teškog usklađivanja kontrole filtracije, prihvatljivih reoloških svojstava i izbjegavanja taloženja čestica.

Za druge primjene, primjerice cementiranje duboke kolone zaštitnih cijevi, koriste se kaše velike gustoće nastale dodavanjem materijala velike gustoće: hematit Fe_2O_3 , ilmenit FeTiO_3 , barit BaSO_4 ili manganov tetraoksid Mn_3O_4 (Gaurina-Međimurec, 2016).

2.2. Vrijeme zgušćivanja cementne kaše

Zgušćivanje cementne kaše, odnosno vrijeme tijekom kojeg je cementna kaša pumpabilna, dakle može se protiskivati, od primarne je važnosti prilikom projektiranja bilo koje operacije cementiranja. Cementna kaša trebala bi biti pumpabilna sve dok se ne smjesti u planom predviđeni prostor unutar bušotine. Nakon toga, trebala bi što brže očvrnuti i stvoriti nepropustan i čvrst cementni kamen.

Ukoliko je potrebno vrlo brzo očvršćivanje cementne kaše u cementni kamen, najčešće prilikom cementiranja plićih kolona zaštitnih cijevi ili postavljanja cementnih čepova na manjim dubinama, u cementnu kašu se dodaju ubrzivači kako bi se smanjilo čekanje na nastavak radova nakon cementacije (*engl. Wait-On-Cement - WOC*).

Ubrzivači djeluju tako da ubrzavaju reakciju hidratacije cementa s vodom te pritom: povećavaju početnu čvrstoću cementa, smanjuju vrijeme očvršćivanja kaše u kamen ili jedno i drugo. Najpoznatiji ubrzivači su: kalijev klorid (KCl), kalcijev klorid (CaCl_2), gips, natrijev silikat ili pak natrijev klorid (NaCl).

Ukoliko je potrebno duže vrijeme za očvršćivanje cementne kaše u kamen, najčešće prilikom izvođenja dubokih cementacija, u cementnu kašu se dodaju usporivači. Oni djeluju tako što se (Gaurina-Međimurec, 2016):

- adsorbiraju na površini cementnih čestica ili
- stvaraju taloge na površini cementnih čestica.

Pritom se produljuje vrijeme stvrdnjavanja cementne kaše, jer je potrebno određeno vrijeme da se voda "probije" do cementa i odvije se proces hidratacije.

Najkorišteniji usporivači su: lignini, smole, škrob, slabe organske kiseline i derivati celuloze (Gaurina-Međimurec, 2016).

2.3. Reološka svojstva cementne kaše

U prstenastom prostoru bušotine potrebno je ostvariti što bolju zamjenu isplake sa cementnom kašom. U tom cilju, potrebno je cementnu kašu protiskivati određenom dobavom. Da bi protjecanje kaše bilo turbulentno, potrebno je povećati dobavu do određene razine. Samim povećanjem dobave, povećava se i trenje u prstenastom prostoru što dovodi do neželjenog povećanja tlaka na stijenke i dno kanala bušotine. Kako bi se izbjeglo povećanje tlaka zbog trenja, a pritom omogućilo turbulentno protjecanje cementne kaše u prstenastom prostoru, u kašu se dodaju aditivi za smanjenje trenja, odnosno dispergatori.

Osim što smanjuju trenje pri protjecanju kroz suženja, te time smanjuju tlak na dno i stijenke bušotine, dispergatori djeluju i tako da (Gaurina-Međimurec, 2016):

- smanjuju viskoznost cementne kaše;
- omogućuju turbulentno protjecanje pri manjim dobavama;
- povećavaju opseg zahvaćenosti prstenastog prostora turbulencijom pri istoj dobavi;
- smanjuju filtraciju kod gustih kaša spremljenih s manje vode.

Međutim, prilikom doziranja treba biti na oprezu jer dispergatori u većim količinama povećavaju izdvajanje slobodne vode iz cementne kaše što dovodi do upitne kvalitete cementnog kamena.

U najčešće korištene dispergatore spadaju: sulfonati (lignosulfonat), polifosfati, organske kiseline i sol (Gaurina-Međimurec, 2016).

2.4. Filtracija cementne kaše

Pri utiskivanju cementne kaše u prstenasti prostor, vrlo je važno kontrolirati količinu filtrata, odnosno vode izdvojene iz cementne kaše pod djelovanjem diferencijalnog tlaka. Na količinu izdvojenog filtrata najviše utječu: gustoća cementne kaše, temperatura kaše i tlak utiskivanja.

Gustoća cementne kaše je manja ukoliko je u kaši veći udio vode, što znači da je kod kaša s većim vodocementnim faktorom, omogućeno veće izdvajanje filtrata.

Povećanjem temperature u početku se povećava volumen filtrata da bi se kasnije smanjio. To se odvija zbog toga što se u početku povišenjem temperature smanji viskoznost cementne kaše te se samim time poveća volumen filtrata u okolnim stijenama, da bi se kasnije, zbog povećanja brzine hidratacije uslijed povišenja temperature, dakle povećanja brzine stvrdnjavanja cementne kaše u kamen, filtracija smanjila i u konačnici prestala.

Filtracija se odvija i zbog razlike između dinamičkog tlaka tijekom protiskivanja cementne kaše i slojnog tlaka u stijenama koje su u kontaktu s cementnom kašom. Što je veća ta razlika, veće je izdvajanje filtrata iz cementne kaše, odnosno veći diferencijalni tlak, veća filtracija. Povećanje filtracije uslijed povećanja diferencijalnog tlaka najizraženije je kod utiskivanja kaše pod povećanim tlakom, odnosno skviziranja. Ukoliko je tlak utiskivanja kaše prevelik, može doći do prevelikog izdvajanja filtrata, te se kaša prebrzo pretvara u kamen jer dolazi do ubrzane dehidracije kaše. To dovodi do onečišćenja sloja i neujednačene cementacije svih perforacija. Isto tako, ukoliko je filtracija prevelika, može doći do potpunog čepljenja kanala bušotine nasuprot perforacijama, jer se stvara čep dehidrirane cementne kaše. Nadalje, ubrzanom dehidracijom cementne kaše, povećavaju se gustoća i viskoznost cementne kaše, što umanjuje uspješnost istiskivanja isplake zbog nemogućnosti turbulentnog protjecanja, a povećanje tlaka u bušotini zbog povećanja gustoće kaše dodatno povećava filtraciju i potencira nastanak pukotina u kojima je moguće gubljenje kaše.

Zbog svega navedenog, kontrola filtracije je jako bitna prilikom svake operacije cementiranja i njena regulacija je neophodna.

Filtraciju cementne kaše može se regulirati (Gaurina-Međimurec, 2016):

- poboljšanjem distribucije čestica dodavanjem dispergatora ili bentonita u kašu,
- povećanjem viskoznosti tekuće faze cementne kaše, primjerice dodatkom celuloze,
- stvaranjem nepropusnog filma između cementnog obloga i poroznih formacija stijenki bušotine, što omogućuje dodatak sintetičkih polimera u cementnu kašu (Gaurina-Međimurec, 2016).

2.5. Svojstva cementnog kamena

Cementni kamen nastao stvrdnjavanjem cementne kaše, trebao bi omogućiti (Gaurina-Međimurec, 2016):

- izoliranje probušenih naslaga stijena tijekom vremena eksploatacije ležišta;
- sprječavanje međuzonalne komunikacije;
- odgovarajuću kvalitetu učvršćenja zaštitnih cijevi.

Da bi sve nabrojane funkcije bile zadovoljene, cementni kamen bi trebao imati dovoljno veliku tlačnu čvrstoću, biti male propusnosti za vodu i biti otporan na djelovanje korozivnih slojnih voda. Odnosno cementna kaša bi trebala stvrdnuti u cementni kamen dovoljno čvrst za kvalitetno učvršćenje zaštitnih cijevi koje će potrajati minimalno onoliko vremena koliko je potrebno za eksploataciju željenog fluida iz ležišta. To znači da bi cementni kamen trebao ostati kompaktan i oduprijeti se korozivnom djelovanju sulfata iz slojnih fluida. Nadalje, propusnost cementnog kamena mora biti minimalna, kako bi se izolirali proizvodni slojevi i spriječila međuzonalna komunikacija.

Cementna kaša trebala bi, nakon utiskivanja u za to predviđeno mjesto u kanalu bušotine ili prstenastom prostoru, što prije očvrstnuti u cementni kamen, kako bi se nastavile operacije bušenja, proizvodnje ili opremanja bušotine, ovisno o planiranim radovima. Tlačna čvrstoća cementnog kamena ovisi o mnogo faktora, među kojima su najvažniji: sastav cementa, specifična površina čestica cementa, vodocementni faktor, tlak, temperatura itd.

Najveći utjecaj na tlačnu čvrstoću cementnog kamena ima temperatura na kojoj se cementna kaša hidratira u cementni kamen. Povišenjem temperature ubrzava se hidratacija cementne kaše u cementni kamen, ali se istovremeno smanjuje čvrstoća. Nakon 110 °C očito je opadanje čvrstoće, a daljnjim rastom temperature, čvrstoća cementnog kamena ubrzano opada. Kako bi se problem opadanja čvrstoće cementnog kamena na višim temperaturama, odnosno u dubljim bušotinama spriječio, u cementnu kašu se dodaje kvarc i to u većim količinama, ovisno o vrsti cementa i temperaturi, ali u većini slučajeva između 35 i 40% u odnosu na masu cementa. Takve kaše nazivaju se stabilizirane cementne kaše (Gaurina-Međimurec, 2016).

Kako bi "transformacija" cementnih kaša u cementni kamen što bolje prošla, u industriji se pojavila zanimljiva tehnika vibriranja cementnih kaša. Metoda se sastoji od utiskivanja fluida: zrak ili voda u prstenasti prostor iznad cementne kaše pod tlakom i u

kratkim vremenskim razmacima. Pri tome prstenasti prostor služi kao sredstvo prijenosa energije sa pumpe ili kompresora na vrh cementne kaše. Cilj ove metode je spriječiti neželjene fluide da uđu u cementnu kašu prije nego se ona stvrdne u cementni kamen, odnosno popuniti sve praznine ukoliko ih ima. Iako ova metoda u praksi nikada nije zaživjela, odrađeni su uspješni pokusi i dokazano je da mali tlak primijenjen na vrh cementne kaše nakon utiskivanja, uvelike utječe na hidrostatički tlak na dnu cementne kaše, što daje naslutiti kako bi ova metoda u stvarnim uvjetima mogla biti praktična i korisna.

Ovaj primjer pokazuje koliko je važna kvalitetna i potpuna transformacija cementne kaše u cementni kamen te koliko je važan svaki korak u pripremi cementne kaše, kako bi se u konačnici dobio cementni kamen željenih svojstava (Haberman i Wolhart, 1997).

3. GUBLJENJE ISPLAKE TIJEKOM BUŠENJA

Gubitak isplake predstavlja volumen isplake koja se gubi u stijene pribušotinske zone. Pore ili pukotine u koje se gubi isplaka, mogu biti prirodne ili tehnološki izazvane.

Prirodne pukotine su već otprije postojale u probušenoj zoni i na njih ne utječe proces bušenja, a nalaze se u stijenama koje su (Gaurina-Međimurec i dr., 2016):

- visoko propusne, nekonsolidirane (poput šljunaka i pijesaka na manjim dubinama);
- raspucane, sa kavernama (najčešće karbonati: vapnenci i dolomiti);
- rasjedi ili prijelazne zone u karbonate ili tvrde šejlove (poput glinenih škriljavaca, tvrdih lapora ili konglomerata);
- općenito visoke poroznosti (najčešće pješčenjaci).

Tehnološke pukotine (slika 3-1.) mogu nastati tijekom procesa izrade kanala bušotine ukoliko dinamički tlak u kanalu bušotine premaši tlak frakturiranja stijena.

Zone gubljenja će biti detaljnije opisane u nastavku rada, a na slici 3-2. prikazane su neke od stijena u kojima se može očekivati gubljenje isplake.

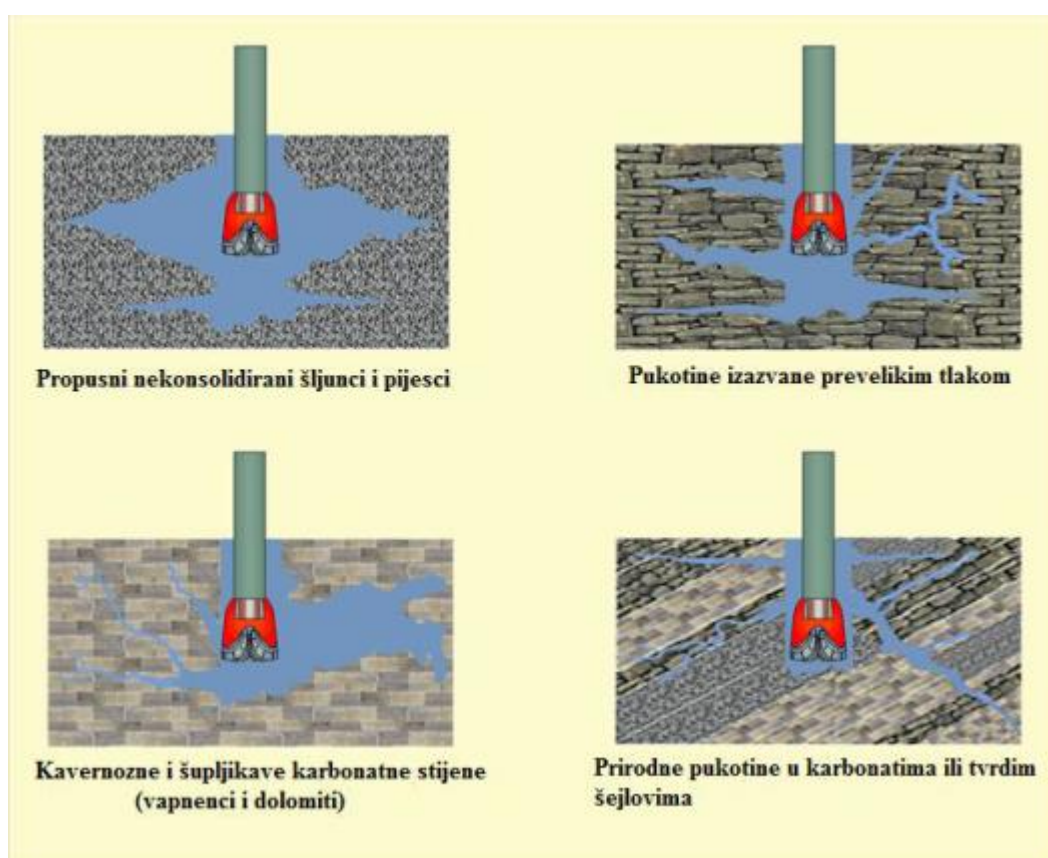


Slika 3-1. Pukotine nastale premašivanjem tlaka frakturiranja (www.bakerhughes.com, 2015)

3.1. Vrste stijena u kojima dolazi do gubljenja isplake

Stijene u kojima dolazi do gubljenja isplake (Gaurina-Međimurec i dr., 2016):

- plitke, nekonsolidirane stijene čija propusnost može premašiti $14 \mu\text{m}^2$;
- kaverozne i šupljikave karbonatne stijene;
- stijene u kojima postoje prirodno izazvane pukotine, poput vapnenaca i tvrdih šejlova;
- stijene sa umjetno izazvanim pukotinama zbog primjene pretjerane sile ili tlaka u kanalu bušotine.



Slika 3-2. Stijene u kojima se može očekivati gubitak isplake (Gaurina-Međimurec i dr., 2016)

Kod plitkih, odnosno nekonsolidiranih stijena visoke propusnosti, vrlo je važno prikupiti što više podataka o sastavu i propusnosti stijena sa susjednih bušotina na istom polju. Nadalje, prilikom izrade bušotine, može se uočiti postupno snižavanje razine isplake u isplačnim bazenima, jer se isplaka gubi postepeno i ujednačeno. U slučaju nastavka bušenja, mogući su potpuni gubici.

Kod kaveroznih i šupljikavih karbonatnih stijena, najčešće vapnenaca i dolomita, gubici su iznenadni i potpuni. Do iznenadnih i potpunih gubitaka dolazi zbog toga što su veličine šupljina ili pukotina u stijenama mnogostruko veće od onih u nekonsolidiranim stijenama. Prilikom bušenja kroz kaverozne i šupljikave karbonatne stijene, može doći do iznenadnog propadanja niza bušaćih alatki od nekoliko cm pa sve do nekoliko dm prije detektiranja gubljenja isplake. Isto tako, može doći i do prekomjerne torzije bušaćih alatki prilikom bušenja kroz ovakve naslage (Gaurina-Međimurec i dr., 2016).

Kod stijena u kojima postoje prirodno izazvane pukotine, također su važni podaci prikupljeni na susjednim bušotinama. Stijene sa prirodno izazvanim pukotinama, najčešće su tvrde i krte stijene, a gubljenje u njih je najčešće malo i postepeno. Međutim, prilikom nastavljanja bušenja kroz ovakve stijene i raskrivanjem sve više naslaga, može doći i do potpunih gubitaka (Gaurina-Međimurec i dr., 2016).

Umjetno izazvane pukotine, mogu se javiti u bilo kojoj vrsti stijena, ali se najčešće mogu očekivati u stijenama male čvrstoće poput mekanih šejlova. Gubici isplake su iznenadni i potpuni, a mogu se javiti nakon povećanja gustoće isplake ili zbog iznenadnog kolebanja tlaka u kanalu bušotine.

Da bi uopće moglo doći do gubljenja isplake, istovremeno moraju biti zadovoljena dva uvjeta (Gaurina-Međimurec i dr., 2016):

- promjer pora ili pukotina mora biti 3 puta veći od promjera čvrstih čestica prisutnih u isplaci;
- tlak u kanalu bušotine mora biti veći od slojnog tlaka.

3.2. Preventivne mjere

Kako bi se izbjeglo nepotrebno gubljenje isplake, mogu se upotrijebiti tri različite preventivne mjere (Gaurina-Međimurec i dr., 2016):

- primjena najbolje bušaće prakse,
- korištenje isplake odgovarajućih svojstava,
- primjena materijala za očvršćavanje stijenki kanala bušotine.

Primjena najbolje bušaće prakse podrazumijeva izradu kanala bušotine u uvjetima kontroliranog tlaka, bušenje u uvjetima podtlaka ili pak bušenje uz primjenu kolone zaštitnih cijevi.

Kada je razlika tlaka frakturiranja sloja i slojnog tlaka mala, bušenje se obavlja u uvjetima kontroliranog tlaka jer malo povećanje gustoće isplake može uzrokovati frakturiranje stijena, dok malo smanjenje gustoće može dovesti do dotoka slojnog fluida u bušotinu.

Bušenje u uvjetima podtlaka onemogućuje gubljenje isplake u sloj, a obavlja se samo ako je osigurana stabilnost stijenci kanala bušotine.

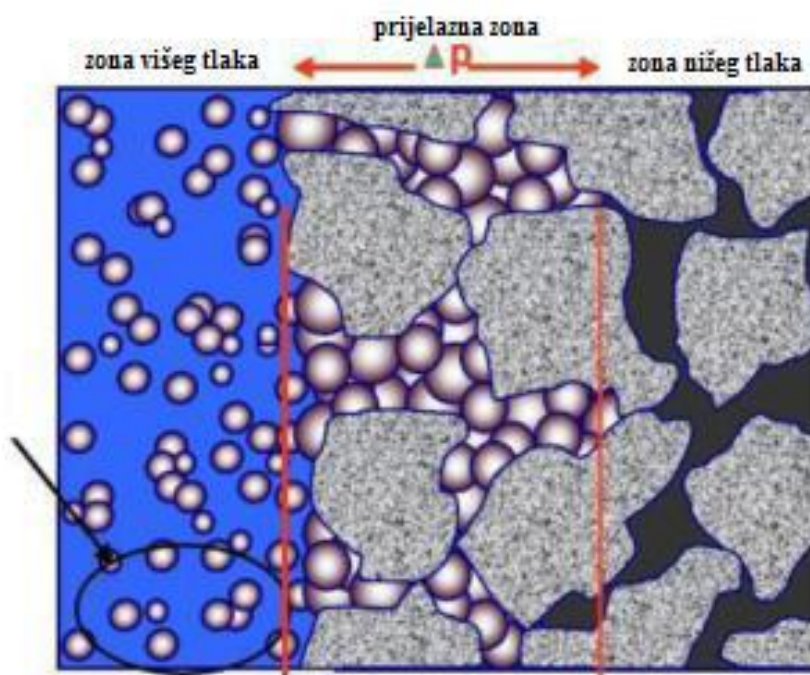
Primjena kolone zaštitnih cijevi prilikom bušenja omogućuje bolje popunjavanje šupljina i pukotina čvrstim česticama iz isplake i česticama nabušenih stijena zbog smanjenja zazora u prstenastom prostoru (Gaurina-Međimurec i dr., 2016).

Osim navedenih tehnologija bušenja, gubljenje isplake sprječava se korištenjem same isplake odgovarajućih svojstava. Isplaka bi prije svega trebala biti što niže gustoće i viskoznosti, ali da se pritom ne ugrozi njena sposobnost iznošenja krhotina i reološka svojstva. Prevelika viskoznost isplake uzrokuje povećanje ekvivalentne cirkulacijske gustoće što dovodi do povećanja tlaka koji može uzrokovati frakturiranje stijena. Nadalje, prilikom ponovnog uspostavljanja cirkulacije isplake nakon mirovanja, može doći do naglog povećanja tlaka zbog otpora protjecanju gelirane isplake u prstenastom prostoru, što može prouzrokovati nastanak pukotina. Stoga naprezanje pri pokretanju isplake treba održati na niskoj razini.

S druge pak strane, premala gustoća isplake može dovesti do deformacije kanala bušotine i u konačnici dotoka slojnog fluida u kanal bušotine uslijed nadvišenja hidrostatskog tlaka stupca isplake slojnim tlakom. Stoga vrijednost ekvivalentne gustoće isplake u cirkulaciji (*engl. equivalent circulating density, ECD*) treba zadržavati unutar sigurnog raspona gustoće (*engl. safety margin - SM*), kako ne bi došlo do gubljenja ili dotoka fluida.

Međutim, sigurni raspon gustoće je vrlo teško održati u ležištima koja su djelomično iscrpljena ili niskog slojnog tlaka. Bušenjem kroz takva ležišta, dolazi do nekontroliranog gubljenja isplake i vrlo često do diferencijalnog prihvata bušaćih alatki u kanalu bušotine. Kako bi se izbjegli ti problemi, moguće je bušenje u uvjetima podtlaka ili pak primjena isplaka s afromima.

Afroni su mikromjehurići koji nastaju dadavanjem površinski aktivnih tvari u isplaku. Razlikuju se od običnih mjehurića zraka jer su stabilniji u bušotinskim uvjetima. Promjer afrona je obično između 10 μm i 150 μm , a mijenja se promjenom tlaka. Produranjem afrona u sloj promjer se povećava uslijed pada tlaka, što omogućuje čepljenje pukotina. Na slici 3-3. prikazan je mehanizam djelovanja afrona u propusnim stijenama niskog ležišnog tlaka (Gaurina-Međimurec i dr., 2016).



Slika 3-3. Mehanizam djelovanja isplake s afronima (Gaurina-Međimurec i dr., 2016)

Očvršćavanje stijenki kanala bušotine, primjenjuje se u sljedećim uvjetima (Gaurina-Međimurec i dr., 2016):

- prilikom izrade bušotina u područjima učestalih gubitaka isplake;
- kod male razlike slojnog tlaka i tlaka frakturiranja;
- u iscrpljenim ležištima i ležištima s niskim slojnim tlakom.

Očvršćavanje se postiže dodatkom zrnatih materijala, poput CaCO_3 ili grafita u isplaku. Veličina čvrstih čestica koje se dodaju u isplaku, odgovara veličini pukotina koje moraju biti začepljene. Materijali za očvršćavanje stijenki kanala bušotine (*engl. Wellbore Strengthening Materials – WSM*) razlikuju se od materijala za čepljenje mjesta gubljenja isplake po tome što se oni koriste preventivno i omogućuju povećanje čvrstoće stijena jer

zatvaraju postojeće prirodne pukotine. Stoga je moguće nadvladati tlak frakturiranja stijena, a da ne dođe do širenja pukotina i gubljenja isplake.

U posljednje vrijeme, vrlo je zastupljeno bušenje horizontalnih bušotina kroz šejlove vrlo male propusnosti. Oni sadrže nanopore veličina između 10 i 30 nm u koje se gubi filtrat isplake. Kako bi se spriječila filtracija i destabilizacija stijenki kanala bušotine, u isplaku se dodaje 3 do 10% težinski nanočestica SiO_2 veličina između 5 i 100 nm. Takve čestice ulaze u pore šejla i čepe ih, čime se onemogućuje gubljenje filtrata u stijene i povećava se stabilnost kanala bušotine.

Prethodno navedene metode mogu ali i ne moraju riješiti problem gubljenja isplake. Ukoliko se tim metodama gubljenje isplake ne može riješiti, utvrđuje se intenzitet gubitaka te se sukladno tome određuju daljnji postupci sa ciljem zatvaranja zona gubljenja isplake (Gaurina-Međimurec i dr., 2016).

3.3. Intenzitet gubljenja isplake

Intenzitet gubljenja isplake opisuje količinu isplake izgubljene u jedinici vremena, a određuje se i prema dubini statičke razine isplake u kanalu bušotine. Ukoliko gubici nadmašuju $0,16 \text{ m}^3/\text{h}$, može se govoriti o gubljenju isplake. Postoje četiri tipa intenziteta gubljenja isplake (Gaurina-Međimurec i dr., 2016):

- gubici tipa filtracije,
- djelomični gubici,
- potpuni gubici,
- katastrofalni gubici.

Do gubitaka tipa filtracije - $0,16 - 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$ (1 do 10 bbl/h), dolazi u propusnim stijenama, ukoliko u isplaci nema dovoljno čvrstih čestica malog promjera za čepljenje pukotina duž kanala bušotine.

Djelomični gubici - $1,6 - 16 \text{ m}^3/\text{h}$ (10 do 100 bbl/h) javljaju se u poroznim i raspucanim stijenama, najčešće šljuncima ili pak stijenama u kojima postoje prirodne ili pak izazvane manje, otvorene pukotine. Osim šljunaka i pješčenjaka, to mogu biti i šejlovi, lapori, konglomerati itd.

Do potpunih gubitaka, u kojima je statički nivo isplake 61 – 152 metra ispod ušća bušotine (200 do 500 ft), dolazi u stijenama koje su sastavljene od šljunaka, konglomerata

ili pješčenjaka, kod kojih su pukotine manjih promjera, ali na duljim intervalima, ili pak u kaveroznim stijenama poput karbonata ili u stijenama s izazvanim pukotinama.

Katastrofalni gubici, kod kojih je statički nivo isplake 152 do 305 metara (500 do 1000 ft) i više ispod ušća bušotine, javljaju se samo u stijenama sa velikim prirodnim pukotinama ili kavernama ili pak umjetno izazvanim kavernama i pukotinama većeg promjera (Gaurina-Međimurec i dr., 2016).

3.4. Saniranje gubljenja isplake

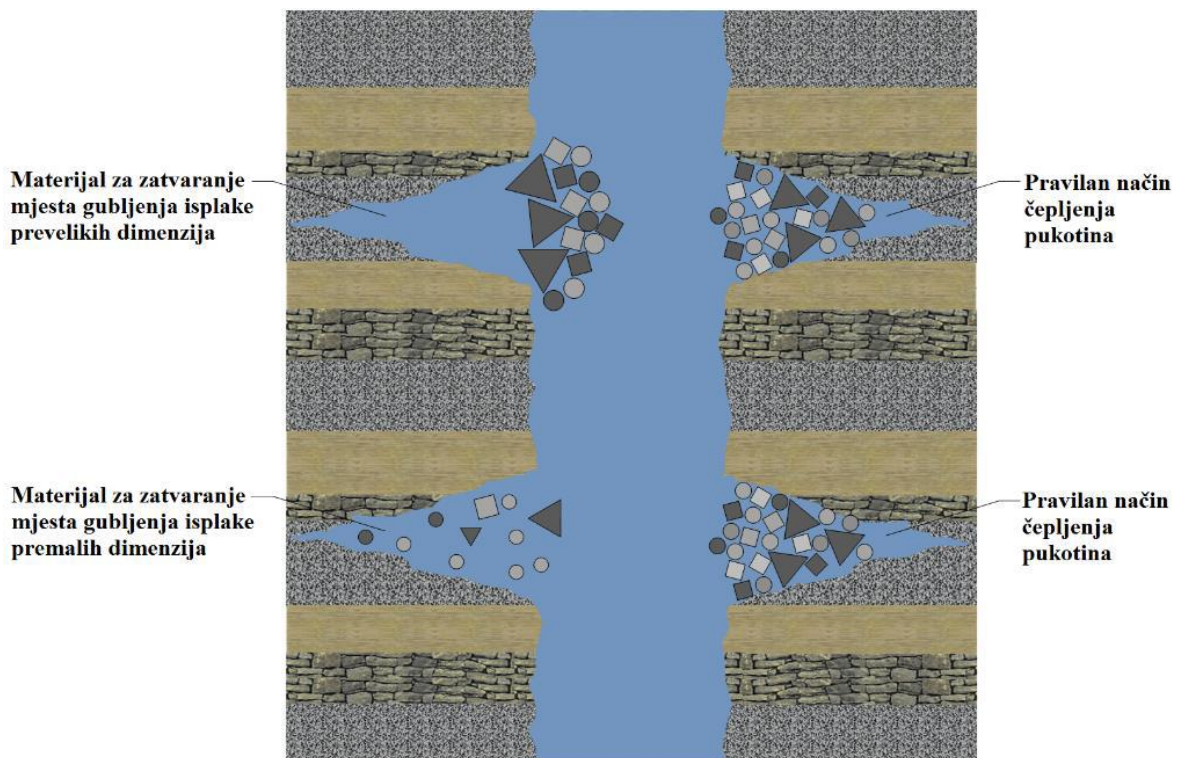
Nakon što se otkrije intenzitet i mjesto gubljenja isplake, pristupa se izboru veličine i tipa materijala za čepljenje mjesta gubljenja isplake koji se dodaju u isplaku s ciljem čepjenja pora i pukotina u stijenama.

Klasični materijali za zatvaranje mjesta gubljenja isplake (*engl. lost circulation materials - LCM*), dijele se na (Gaurina-Međimurec i dr., 2016):

- vlaknaste (*engl. fibrous*) – sirovi pamuk, juta, drvena vlakna, repini rezanci, perje,
- listićave (*engl. flakes*) – listići celofana, žito, pluto, sitni ugljen, tinjac, pljeva,
- zrnate (*engl. granules*) – CaCO_3 , perlit, mljevena plastika, gilsonit i dr.

Nabrojani materijali na tržištu su dostupni u različitim veličinama. Tako postoje sitni (*engl. Fine – F*), srednji (*engl. Medium – M*) i krupni (*engl. Coarse – C*) materijali za čepljenje mjesta gubljenja isplake.

Na slici 3-4. prikazan je utjecaj veličine i tipa čestica materijala za zatvaranje mjesta gubljenja isplake na sposobnost čepjenja pukotina u stijenama.



Slika 3-4. Utjecaj različitih veličina i tipova LCM-a na sposobnost čepljenja pukotina (Gaurina-Međimurec i dr., 2016)

Osim veličine i tipa LCM-a, na sposobnost čepljenja pora i pukotina u stijenama utječe i koncentracija LCM-a u isplaci, koja ovisi o veličini pora i pukotina koje je potrebno začepiti. Tako zrnati materijali mogu čepiti pore veličine do 5 mm i dodaju se u isplaku do koncentracije od oko 45 kg/m^3 . Vlaskasti i ljuskavi materijali čepu pore veličina manjih od 3 mm, a dodaju se u isplaku do koncentracije od oko 50 kg/m^3 .

Za zatvaranje pora i pukotina većeg promjera, koje nije moguće čepiti dodavanjem LCM-a u isplaku, u zonu gubljenja mogu se utisnuti čepovi (*engl. pills*), koji mogu biti mješavina (Gaurina-Međimurec i dr., 2016.):

- dizel ulja i bentonita (*engl. diesel oil bentonite – DOB, gunk plug*),
- dizel ulja, bentonita i cementa (*engl. diesel oil bentonite cement – DOBC*),
- čep na bazi umreženih polimera (*engl. polymer – based cross – linked Pill – PCP*).

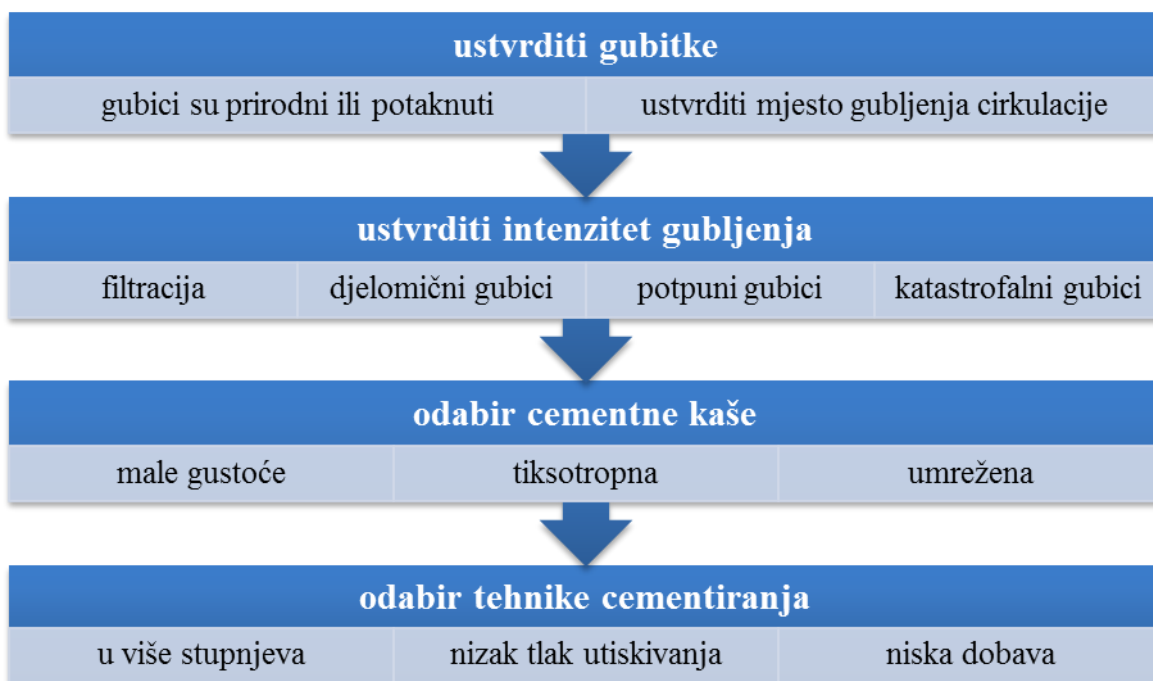
Nabrojani čepovi mogu se utisnuti u zone gubljenja pod povećanim tlakom, a u zoni gubljenja reagiraju s vodom i stvaraju kompaktnu ljepljivu smjesu koja zatvara mjesta gubljenja isplake (Gaurina-Međimurec i dr., 2016).

4. GUBLJENJE CEMENTNE KAŠE TIJEKOM CEMENTACIJE

Cementne kaše se prilikom cementacije zaštitnih cijevi također gube u propusne naslage. Štoviše, zbog veće ekvivalentne cirkulacijske gustoće i manjeg zazora kroz koji protječu, za očekivati je da će cementne kaše povećati postojeće pukotine i samim time gubljenje cirkulacije. Kako bi se smanjilo ili spriječilo gubljenje cementne kaše u propusne stijene, koriste se različite metode i tehnike pripreme cementnih kaša, pa tako postoje sljedeće cementne kaše za cementiranje kroz zone gubljenja cirkulacije (Jarouj i dr., 2004):

- cementne kaše male gustoće,
- tiksotropne cementne kaše i
- umrežene cementne kaše.

Ukoliko je gubljenje cirkulacije utvrđeno, potrebno je primarno locirati zonu gubljenja i ustvrditi intenzitet gubljenja cirkulacije. Tek nakon što su ustanovljene zone gubljenja i intenzitet gubljenja cirkulacije, pristupa se odabiru cementne kaše odgovarajućih svojstava za sprječavanje gubljenja cirkulacije. Na slici 4-1. prikazan je slijed postupaka od uočavanja gubitaka do rješavanja problema gubljenja cirkulacije utiskivanjem cementne kaše (Jarouj i dr., 2004).



Slika 4-1. Slijed postupaka za rješenje problema gubljenja cirkulacije prilikom cementacije zaštitnih cijevi (Jarouj i dr., 2004)

U nekim slučajevima, dovoljno je smanjiti gustoću cementne kaše, da bi se spriječili gubici cirkulacije. Smanjenje gustoće cementne kaše tijekom cementiranja zaštitnih cijevi, postiže se (Jarouj i dr., 2004):

- dodavanjem kugličastih olakšivača u cementnu kašu;
- dodavanjem vlakana u cementnu kašu;
- zapjenjenjem cementne kaše.

Tiksotropne cementne kaše koriste se uglavnom kao cementni čepovi u zonama gubljenja cirkulacije. Tiksotropna svojstva omogućuju brzo geliranje cementnih kaša odmah nakon prestanka cirkuliranja. Nadalje, vrijeme očvršćivanja tiksotropne cementne kaše u kamen vrlo je brzo te se izrada bušotine može nastaviti u kratkom roku nakon postavljanja cementnog čepa (Babadagli i dr., 2004 b).

Umrežene cementne kaše također se koriste kao cementni čepovi u zonama gubljenja cirkulacije. Dobivaju se miješanjem smjese cementnog praha u gelu umjesto u vodi poput ostalih cementnih kaša. Rezultat ovog miješanja je cementna kaša koja gelira prije samog prestanka cirkulacije u uvjetima visokih temperatura, za razliku od tiksotropnih cementnih kaša, koje geliraju hidratacijom. To onemogućuje gubljenje umreženih cementnih kaša u sloj čak i prije samog prestanka cirkulacije. Nadalje, umrežene cementne kaše topive su u kiselini (15% HCl), što ih čini pogodnijima za primjenu, posebno u proizvodnim zonama (Mata i Veiga, 2004).

5. GUBITAK CIRKULACIJE PRILIKOM RAZLIČITIH FAZA IZRADE BUŠOTINE I PRIMARNE CEMENTACIJE ZAŠTITNIH CIJEVI

Gubljenje cirkulacije nije poželjno ni u kojoj fazi izrade kanala bušotine i cementiranja zaštitnih cijevi. Međutim, prema istraživanju API-a, u gotovo 20 do 25% operacija izrade bušotina i cementiranja kolone zaštitnih cijevi diljem svijeta dolazi do nekog oblika gubljenja cirkulacije (Babadagli i dr., 2004 a). Rješavanje problema gubljenja cirkulacije uzrokuje velik gubitak u vremenu i materijalima potrebnim za saniranje gubljenja, što naftnu industriju diljem svijeta stoji milijarde dolara godišnje. Kako bi se gubici spriječili ili umanjili, sastav i svojstva bušotinskih fluida potrebno je podesiti u skladu s uvjetima u bušotini. Stoga je potrebno dobro poznavanje procesa i mehanizama koji se odvijaju u kontaktu isplake ili cementne kaše sa stijenama kanala bušotine.

U cilju boljeg razumijevanja pojave gubljenja cirkulacije, vršena je opsežna analiza gubljenja cirkulacije u 40 različitih intervala bušotina na 4 različita lokaliteta (Meksički zaljev, Ujedinjeno Kraljevstvo, Angola i Azerbajdžan). U svih 40 intervala bušotina, došlo je do gubljenja cirkulacije u različitim fazama izrade kanala bušotine. U nastavku ovog dijela rada, prikazani su rezultati ove opsežne analize (Therond i dr., 2017).

5.1. Iniciranje gubljenja cirkulacije

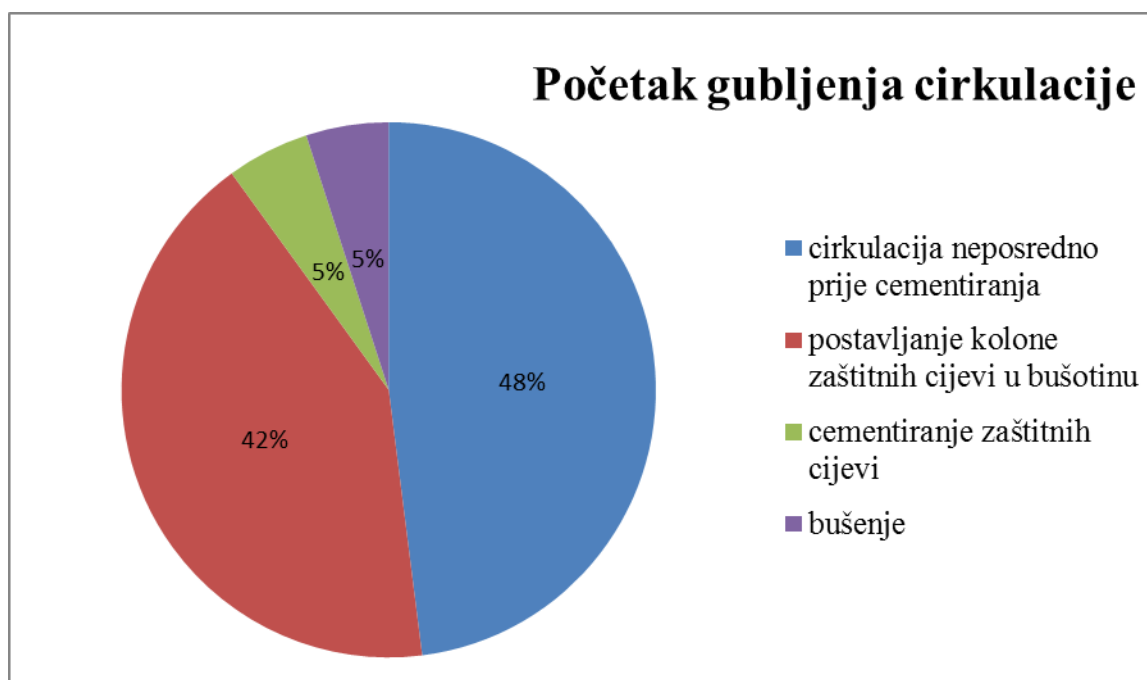
Prva vršena analiza odnosi se na iniciranje gubljenja cirkulacije, odnosno pokazuje u kojoj je fazi izrade kanala bušotine i primarnog cementiranja zaštitnih cijevi, prvi put došlo do gubljenja cirkulacije na 40 različitih sekcija. Faze izrade kanala bušotine i primarne cementacije zaštitnih cijevi u ovom istraživanju razdvojene su na (Therond i dr., 2017):

- bušenje,
- postavljanje kolone zaštitnih cijevi u bušotinu,
- cirkulaciju neposredno prije cementiranja i
- cementiranje kolone zaštitnih cijevi.

Cementiranje kolone zaštitnih cijevi se u ovoj studiji odnosi na utiskivanje cementne kaše u prstenasti prostor i ne uključuje vrijeme protiskivanja cementne kaše kroz unutrašnjost niza zaštitnih cijevi. Protiskivanje cementne kaše kroz unutrašnjost niza zaštitnih cijevi u ovoj studiji spada u fazu cirkulacije neposredno prije cementiranja.

Iz studije su dobiveni sljedeći podaci. Na čak 19 od 40 sekcija do prvih primijećenih gubitaka došlo je u fazi cirkuliranja fluida koji prethode cementnoj kaši. Na 17 sekcija je do pojave gubitaka došlo tijekom ugradnje kolone zaštitnih cijevi, dok je kod samo 2 sekcije do pojave prvih gubitaka došlo prilikom bušenja ili prilikom protiskivanja cementne kaše u prstenasti prostor.

Na slici 5-1. prikazan je postotni udio prvog pojavljivanja gubljenja cirkulacije u svakoj od 4 faze izrade kanala bušotine i primarne cementacije na 40 ispitanih sekcija.

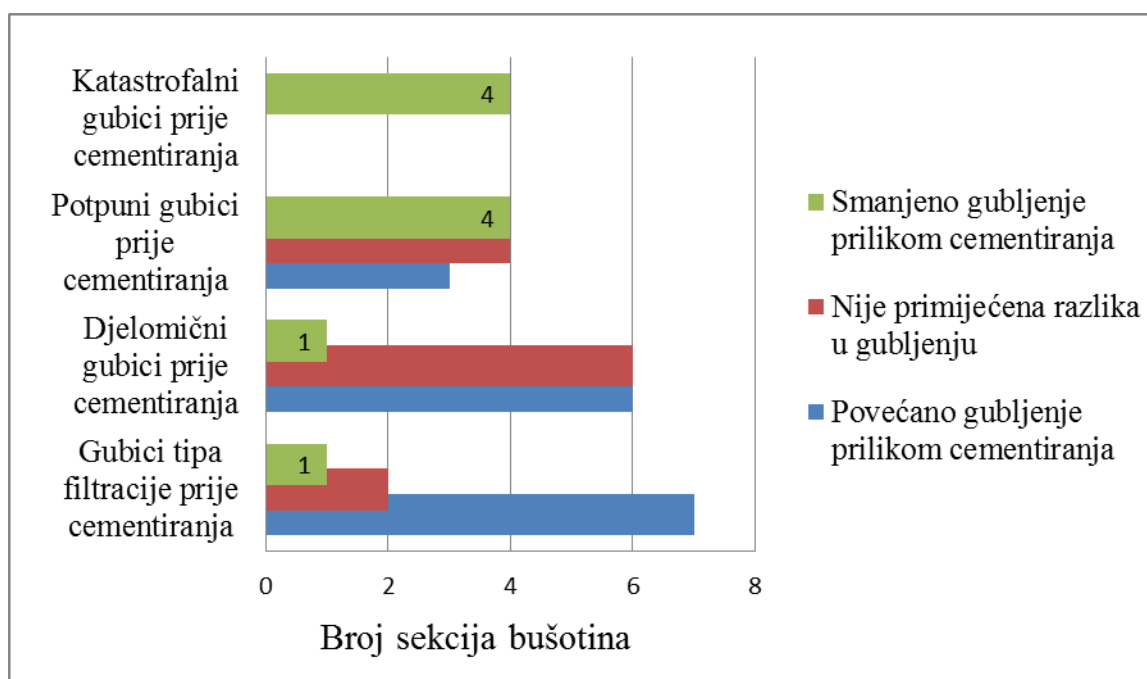


Slika 5-1. Pojava prvog gubljenja cirkulacije na 40 različitih sekcija (Therond i dr., 2017)

Podaci ove analize, vrlo su važni jer daju uvid u vjerojatnost pojave prvih gubitaka cirkulacije prilikom izrade kanala bušotine i primarne cementacije zaštitnih cijevi. Iz tih podataka, može se doći do zaključka da ukoliko se gubici cirkulacije spriječe u fazama koje prethode cementiranju zaštitnih cijevi, vrlo vjerojatno neće doći do gubljenja cirkulacije prilikom protiskivanja cementne kaše u prstenasti prostor (Therond i dr., 2017)

5.2. Utjecaj cementne kaše na smanjenje gubljenja cirkulacije

Drugo važno ispitivanje na primjeru 40 različitih sekcija bušotina, bilo je otkriveno u kojoj mjeri protiskivanje cementne kaše u prstenasti prostor utječe na gubljenje cirkulacije. Za pretpostaviti je da cementne kaše, kao gušći i viskoziji fluidi od isplake, protjecanjem kroz užu zazor od onoga kojim protječe isplaka, rezultiraju puno većom ekvivalentnom cirkulacijskom gustoćom, zbog čega stvaraju veći tlak na stijene bušotine, što dovodi do proširenja pora i pukotina. Međutim, spomenuta ispitivanja pokazala su upravo suprotno. U slučajevima gdje je došlo do katastrofalnih gubitaka isplake neposredno prije protiskivanja cementne kaše u prstenasti prostor, cementna kaša je smanjila ili čak u potpunosti spriječila gubljenje kaše u sloj. Kod gubljenja isplake manjeg intenziteta (potpuni gubici, djelomični gubici ili filtracija), nije primijećen značajan utjecaj cementne kaše na gubljenje cirkulacije. Na slici 5-2. grafički je prikazan utjecaj cementne kaše koja se protiskuje u prstenasti prostor na gubljenje cirkulacije uočeno neposredno prije cementiranja obzirom na intenzitet gubljenja cirkulacije (Therond i dr., 2017).



Slika 5-2. Utjecaj cementne kaše na smanjenje gubljenja cirkulacije obzirom na intenzitet gubljenja (Therond i dr., 2017)

Ne može se s potpunom sigurnošću ustvrditi zašto cementna kaša bolje sprječava gubljenje cirkulacije prilikom katastrofalnih gubitaka cirkulacije neposredno prije cementiranja u odnosu na gubljenja manjeg intenziteta. Međutim, pretpostavlja se da kod većih gubitaka i pri većem diferencijalnom tlaku primijenjenom na pore i pukotine, cementna kaša brzo popunjava pukotine i stvara čvrstu barijeru daljnjem prodoru cementne kaše na tom mjestu (Therond i dr., 2017).

Ova ispitivanja izvor su vrlo važnih podataka o iniciranju gubljenja cirkulacije i sposobnosti cementne kaše da smanji ili sprječi gubljenje cirkulacije. Istraživanje pokazuje kako u 95% slučajeva do pojave gubljenja cirkulacije dolazi prije cementiranja zaštitnih cijevi. Ukoliko je zacijevljenje postavljeno u bušotinu te je isplaka procirkulirana bez gubitaka neposredno prije protiskivanja cementne kaše u prstenasti prostor, vjerojatnost gubljenja cementne kaše prilikom cementiranja vrlo je mala. Nadalje, ukoliko je neposredno prije cementacije prstenastog prostora došlo do potpunih ili katastrofalnih gubitaka cirkulacije, protiskivanje cementne kaše u prstenasti prostor je u preko 50% slučajeva rezultiralo smanjenjem gubljenja cirkulacije u stijene. Kod pojave djelomičnog gubljenja cirkulacije ili filtracije neposredno prije cementiranja prstenastog prostora, cementna kaša u spomenutoj studiji nije značajnije utjecala na gubljenje cirkulacije u sloj (Therond i dr., 2017).

6. CEMENTNE KAŠE ZA CEMENTIRANJE KROZ ZONE GUBLJENJA CIRKULACIJE

U nastavku rada dati su primjeri korištenja cementnih kaša za zatvaranje mjesta gubljenja cirkulacije prilikom cementiranja zaštitnih cijevi. Opisane su tehnike i tehnologije korištene prilikom utiskivanja odgovarajućih cementnih kaša za primjenu u zonama gubljenja, kao i parametri bušenja koji utječu na odabir i primjenu određene cementne kaše. Posebna pažnja je usmjerena na aditive koji pomažu zatvoriti šupljine i pukotine kako bi se spriječilo gubljenje, kao i na sastav i svojstva cementnih kaša, koji su opisani u poglavlju 2. Sve to u kombinaciji s laboratorijskim ispitivanjima i iskustvom stečenim prilikom cementiranja prethodnih bušotina, dovodi do odabira odgovarajućeg rješenja za problem gubljenja isplake, odnosno utiskivanja odgovarajuće cementne kaše u prstenasti prostor između stijenki kanala bušotine i zaštitnih cijevi s ciljem sprječavanja daljnjeg gubljenja cirkulacije.

6.1. Cementiranje propusnih zona u poljima Tunu, Tambora i Handil

U radu pod naslovom: "Tehnološki projektirane cementne kaše s mikrokuglicama visoke otpornosti na drobljenje za sprječavanje gubljenja cirkulacije" objavljenom 2015. godine, čiji su autori Veisi i dr. iz kompanije Total E&P Indonesie, opisan je utjecaj dva različita tipa kugličastih olakšivača (keramičke i staklene mikrokuglice) u cementnim kašama za čepljenje mjesta gubljenja isplake. Prirodni plin proizvodi se iz ležišta niskog gradijenta slojnog tlaka, sklonih urušavanju na poljima Tunu, Tambora i Handil (TTH) u delti rijeke Makaham, Indonezija. Iz tog razloga, priprema cementne kaše male gustoće za sprječavanje gubljenja cirkulacije, predstavljala je poseban izazov na ovim poljima.

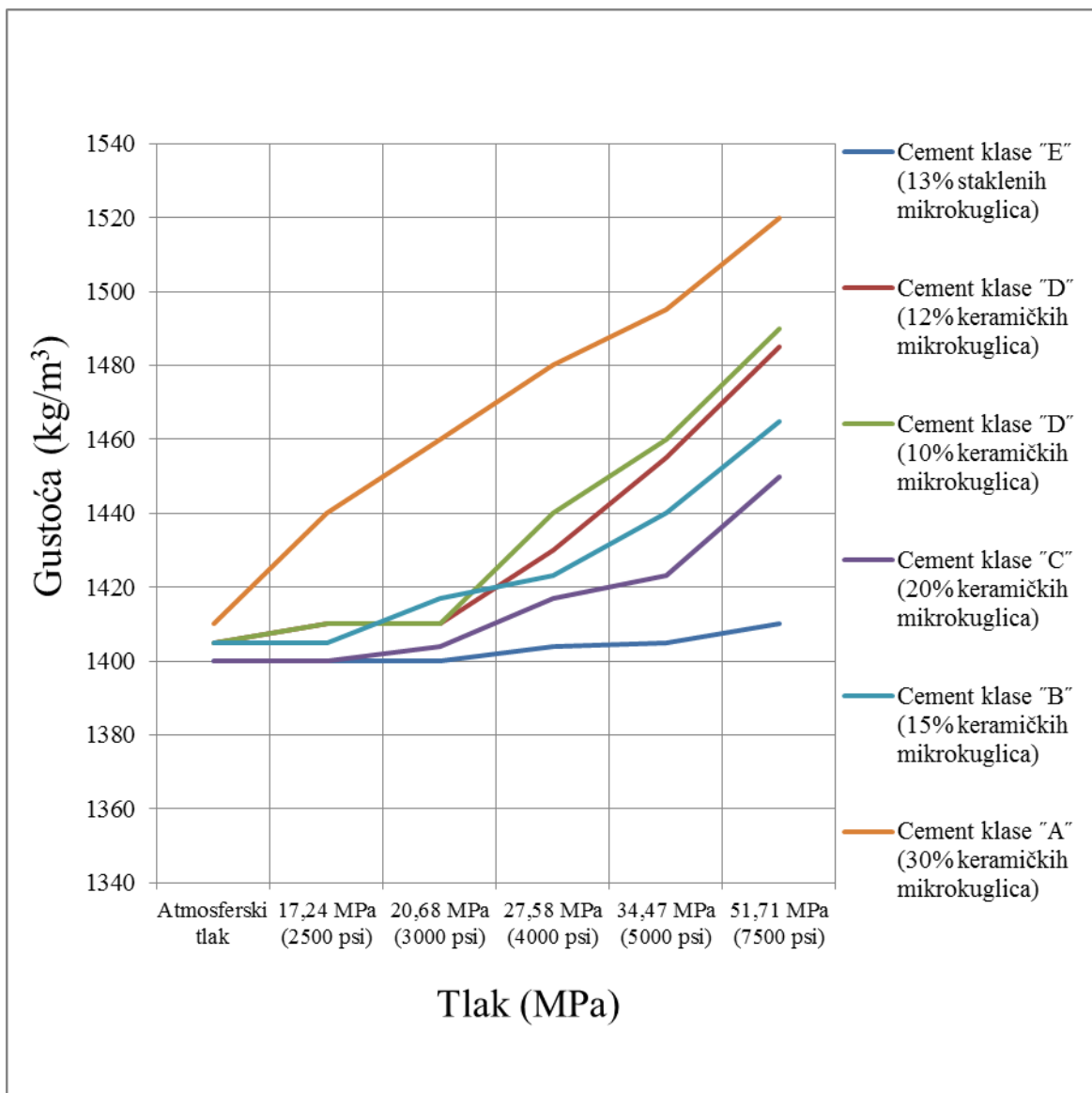
U počecima bušenja na poljima TTH, kao olakšivač su se koristile keramičke mikrokuglice (cenosfere) koje nastaju kao nusprodukt izgaranja ugljena u termoelektranama. To su šuplje kuglice promjera od 2 do 50 μm i alumino-silikatnog sastava koje imaju specifičnu gustoću manju od vode. Iako su se keramičke mikrokuglice pokazale kao vrlo dobar i jeftin olakšivač, na većim dubinama i pod većim hidrostatičkim tlakom keramičke mikrokuglice su sklone drobljenju pri čemu cementna kaša puni prostor unutar ovojnice prethodno ispunjen zrakom, što dovodi do povećanja gustoće cementne kaše. Nadalje, povećanje gustoće cementne kaše uslijed drobljenja mikrokuglica, može

uzrokovati proširivanje pora i pukotina u stijenama zbog povećanja ekvivalentne cirkulacijske gustoće. U bušotinama TTH polja, dolazilo je do oba neželjena slučaja. Stoga je bilo potrebno razviti olakšane cementne kaše s mikrokuglicama koje mogu izdržati tlakove na većim dubinama, što je uspješno učinjeno nakon brojnih laboratorijskih ispitivanja (Veisi i dr., 2015).

6.1.1. Cementne kaše sa staklenim mikrokuglicama visoke otpornosti na drobljenje

Staklene mikrokuglice visoke otpornosti na drobljenje, pokazale su se otpornijima na drobljenje od keramičkih mikrokuglica u laboratorijskim uvjetima pa se one počinju upotrebljavati kao olakšivač prilikom cementiranja zaštitnih cijevi na poljima TTH. U nastavku ovog dijela rada obrazložit će se postupak cementacije dviju bušotina u ovom polju, kao i sastav i svojstva cementnih kaša s mikrokuglicama visoke otpornosti na drobljenje.

Na slici 6-1., grafički je prikazano povećanje gustoće cementnih kaša sa staklenim i keramičkim mikrokuglicama zbog drobljenja mikrokuglica prilikom povećanja hidrostatičkog tlaka cementne kaše u prstenastom prostoru. Uspoređene su cementne kaše s različitim udjelima keramičkih mikrokuglica i cementna kaša s dodatkom staklenih mikrokuglica. Testiranje je obavljeno u laboratorijskim uvjetima, a simulira uvjete u prstenastom prostoru između kanala bušotine i zaštitnih cijevi. Raspon tlaka primijenjenog na olakšane cementne kaše s različitim udjelima mikrokuglica je od atmosferskog tlaka do tlaka od 51,71 MPa (7 500 psi) (Veisi i dr., 2015).



Slika 6-1. Usporedba olakšanih cementnih kaša obzirom na otpornost na drobljenje (Veisi i dr., 2015)

Na temelju rezultata prikazanih na slici 6-1. može se zaključiti da se cementnoj kaši u koju su dodane staklene mikrokuglice kao olakšivači, gustoća nije značajnije promijenila povećanjem tlaka te je čak i pri tlaku od 51,71 MPa (7 500 psi) gustoća porasla za samo 10 kg/m³ u odnosu na gustoću kaše pri atmosferskom tlaku. Kod cementnih kaša s keramičkim mikrokuglicama kao olakšivačima, gustoća se značajno promijenila povećanjem tlaka. Tako se cementnoj kaši klase "A" s 30% keramičkih mikrokuglica gustoća povećala za 110 kg/m³ povećanjem tlaka na 51,71 MPa u odnosu na atmosferski tlak. Ostalim cementnim kašama s dodatkom keramičkih mikrokuglica, gustoća se također

značajnije povećala povećanjem tlaka zbog drobljenja mikrokuglica, a najveće povećanje gustoće je između 34,47 MPa i 51,71 MPa.

Iz ovog ispitivanja, može se zaključiti da su staklene mikrokuglice neusporedivo bolji olakšivač cementnih kaša od keramičkih mikrokuglica, posebno u uvjetima visokih tlakova. Ispitivanjem je ustanovljena optimalna koncentracija od 13% staklenih mikrokuglica u odnosu na ukupan volumen čvrstih čestica u cementnoj kaši, pri kojoj je omogućeno formiranje kvalitetnog i čvrstog cementnog kamena, a da pritom gustoća cementne kaše ostane niska pri visokom hidrostatičkom tlaku na dnu bušotine.

Pripremljena mješavina staklenih mikrokuglica i cementa, teglenicama se transportira na lokaciju, jer močvarni uvjeti na TTH poljima onemogućuju druge načine transporta. Prije prve uporabe ovako pripremljene cementne kaše, obavljen je test mješivosti cementnog praha i staklenih mikrokuglica s vodom. Prva probna cementacija započeta je tek nakon što je test pokazao da je cementna kaša lako mješiva.

Tablica 6-1. Laboratorijski utvrđena svojstva cementne kaše sa staklenim mikrokuglicama korištene na poljima Tunu, Tambora i Handil

Svojstva cementne kaše	Površinski uvjeti T - 26,7°C (80°F) p - atmosferski	Uvjeti na dnu bušotine T - 53,3°C (128°F), P - 22,7 MPa (3300 psi)
Gustoća cementne kaše (kg/m³)	1400	1400
Viskoznost (Pa·s)	0,053	0,059
Naprezanje pri pokretanju (Pa)	5,41	7,90
Čvrstoća 10-s gel (Pa)	3,58	5,11
Čvrstoća 10 min gel (Pa)	9,71	14,31
Slobodna voda (mL/2h)	Nije mjereno	0
API filtracija (mL/30 min)	Nije mjereno	48,4
Vrijeme zguščavanja do 70 Bc (hr:mm)	Nije mjereno	09:13

Tablica 6-1. prikazuje ispitivanje svojstava cementne kaše sa staklenim mikrokuglicama u laboratorijskim uvjetima. Simulirani su uvjeti na površini (temperatura 26,7 °C i atmosferski tlak) i u bušotinskim uvjetima (temperatura 53,3 °C i tlak 22,7 MPa).

Iz podataka prikazanih u tablici 6-1., može se zaključiti kako cementna kaša s dodatkom staklenih mikrokuglica omogućuje brzo formiranje čvrstog gela u bušotinskim uvjetima, povećanje viskoznosti je minimalno, a API filtracija u granicama normale. Uz nabrojane prednosti, cementna kaša sa staklenim mikrokuglicama pokazuje i poboljšanje u brzini postizanja čvrstoće cementnog kamena od 13,79 MPa (2000 psi).

U tablici 6-2. prikazano je vrijeme potrebno za postizanje čvrstoće cementnog kamena od 13,79 MPa (2000 psi) kod primjene cementnih kaša sa staklenim i keramičkim mikrokuglicama te pri različitim dubinama i na različitim temperaturama. Cementne kaše sa staklenim mikrokuglicama kao olakšivačima brže postižu čvrstoću cementnog kamena od 13,79 MPa u odnosu na cementne kaše sa keramičkim mikrokuglicama kao olakšivačima. Razlika u brzini postizanja čvrstoće od 13,79 MPa, izraženija je pri većim temperaturama i na većim dubinama.

Tablica 6-2. Usporedba vremena potrebnog za postizanje čvrstoće od 13,79 MPa (2000 psi) cementnih kaša sa staklenim i keramičkim mikrokuglicama kao olakšivačima

Br.	Dubina bušotine (m)	Temp. (°C)	Čvrstoća cementnog kamena (MPa)	Vrijeme očvršć. cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama (hr:mm)	Vrijeme očvršć. cementnih kaša sa keramičkim mikrokuglicama (hr:mm)
1	350	35	13,79	48:00	>48:00
2	545	42,8	13,79	36:02	>48:00
3	778	50	13,79	27:00	37:50
4	1046	58,3	13,79	23:48	45:00
5	1800	78,3	13,79	22:03	38:00

Nakon svih obavljenih laboratorijskih testova, zbog nabrojanih prednosti staklenih mikrokuglica, cementne kaše s keramičkim mikrokuglicama potpuno su zamijenjene cementnim kašama sa staklenim mikrokuglicama kao olakšivačima prilikom cementiranja zaštitnih cijevi na opisanim poljima. U nastavku će se obrazložiti postupak izvođenja cementacije na dvije različite bušotine na spomenutim poljima (Veisi i dr., 2015).

6.1.2. Primjena cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama na poljima Handil i Tunu

Prva probna cementacija cementnim kašama olakšanim staklenim mikrokuglicama na TTH poljima izvedena je na polju Handil, a cementirane su zaštitne cijevi promjera 0,244 m (9 5/8 - in), postavljene do dubine od 1 364 metra. Planirano je cementirati kolonu zaštitnih cijevi od dna do ušća bušotine u jednom stupnju. Kako bi se stijenke bušotine isprale od nepoželjnih naslaga zaostalih od isplake, odnosno isplačnog obloga, zbog što boljeg prijanjanja cementne kaše, prvo je utisnuto 25 m³ otopine KCl-a gustoće 1 150 kg/m³. Slijedilo je 15 m³ razdjelnice gustoće 1 300 kg/m³ te potom 89,38 m³ cementne kaše sa staklenim mikrokuglicama visoke otpornosti na drobljenje, gustoće 1 400 kg/m³. Nakon cementne kaše, iza nahodnog čepa utisnuto je 49,63 m³ isplake gustoće 1 150 kg/m³ kako bi se cementnu kašu istisnulo iz kolone zaštitnih cijevi u prstenasti prostor.

Cementacija je bila uspješna i nisu primijećeni gubici cementne kaše, a tlak u prstenastom prostoru na dnu bušotine nije se povećao. Cementna kaša je popunila svih 1 388 metara od dna bušotine do ušća, a 20,3 m³ cementne kaše vratilo se na površinu kao višak. Zvučna karotaža je pokazala da je cementni kamen kompaktan i nepropustan, a bušenje je uspješno nastavljeno do iduće ugradnje i cementacije kolone zaštitnih cijevi.

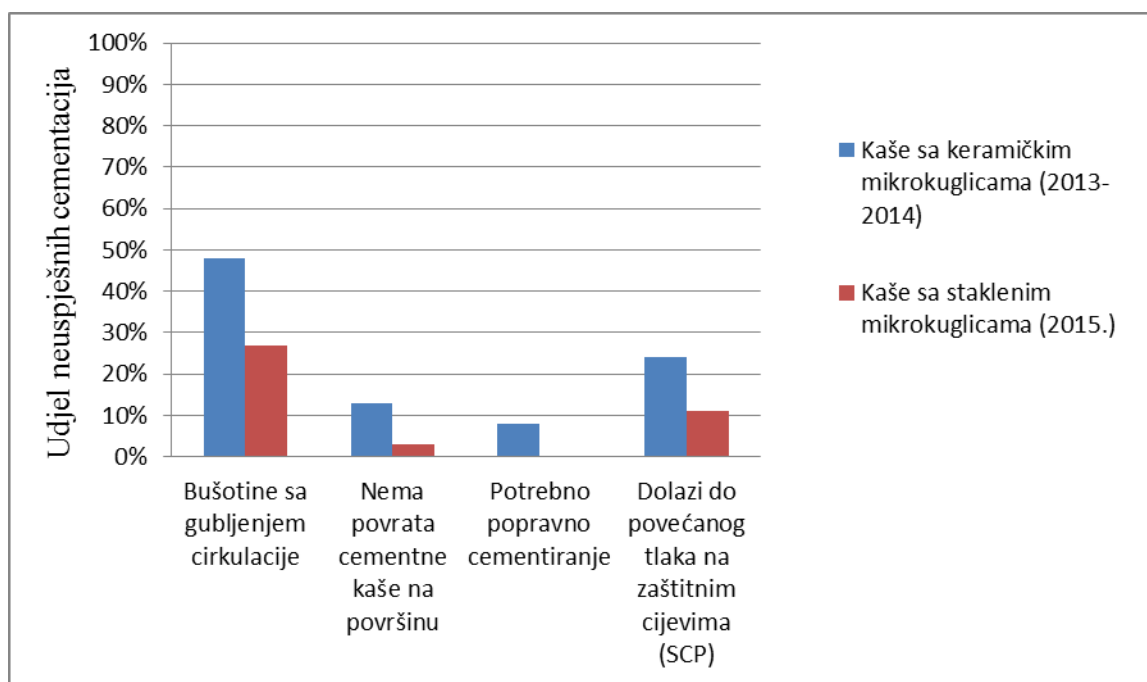
Druga cementacija s cementnom kašom istog sastava, izvedena je na polju Tunu, a ovoga puta je cementirana proizvodna kolona zaštitnih cijevi promjera 0,244 m (9 5/8 in). Kao razdjelnica, utisnuto je 30 m³ fluida gustoće 1 300 kg/m³. Razdjelnica je u ovom slučaju bila i fluid za ispiranje isplačnog obloga sa stijenci kanala bušotine. Nakon razdjelnice, koja je utisnuta kroz donji cementacijski vod, te između prehodnog i nahodnog čepa, kroz srednji vod utisnuto je 68,29 m³ nove cementne kaše sa staklenim mikrokuglicama visoke otpornosti na drobljenje gustoće 1 400 kg/m³. Nakon što je ukupna količina nove cementne kaše utisnuta, kroz gornji vod utiskuje se slana, nefiltrirana otopina KCl-a gustoće 1 060 kg/m³, te preko nahodnog čepa počinje potiskivati cementnu kašu prema cementacijskoj peti. Na peti odsjeda prehodni čep čija membrana puca nakon premašivanja određenog tlaka te se cementna kaša istiskuje u prstenasti prostor, sve dok nahodni čep ne nasjedne na prehodni, odnosno dok se ne protisne čitava količina cementne kaše koja se nalazi između dva čepa.

Cementacija je uspješno provedena i na površinu se vratilo 9,2 m³ viška cementne kaše. Zvučna karotaža potvrdila je uspješnost cementacije te je ostvarena odlična zonalna izolacija bez potrebe za skviziranjem ili ponovnim cementiranjem. Bušotina je bila spremna za proizvodnju bez većih komplikacija (Veisi i dr., 2015).

6.1.3. Procjena uspješnosti cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama kao olakšivačima

Nakon probnih cementacija, nastavljena je primjena cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama kao olakšivačima na TTH poljima. Primjena cementne kaše sa staklenim mikrokuglicama visoke otpornosti na drobljenje, pokazala se i kasnije vrlo uspješnom u cementiranju visoko propusnih slojeva na poljima TTH. Kaša sa staklenim mikrokuglicama je kompaktnija, ravnomjernije raspoređena i ujednačenije gustoće te očvršćuje u kamen manje propusnosti od onog koji nastaje očvršćivanjem cementnih kaša sa keramičkim mikrokuglicama kao olakšivačima.

Na slici 6-2. prikazan je postotni udjel neuspješnih cementacija cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama u odnosu na kaše s keramičkim mikrokuglicama kao olakšivačima na poljima TTH u razdoblju između siječnja 2013. godine i veljače 2015. godine.



Slika 6-2. Usporedba cementnih kaša s keramičkim i staklenim mikrokuglicama obzirom na probleme koji se mogu očekivati prilikom izvođenja cementacije (Veisi i dr., 2015)

Iz slike 6-2. se može zaključiti da su se cementne kaše sa staklenim mikrokuglicama u praksi pokazale puno pouzdanijima od cementnih kaša s keramičkim mikrokuglicama. Tako se postotak bušotina s gubljenjem cirkulacije smanjio sa 48% kod primjene cementnih kaša sa keramičkim mikrokuglicama, na 27% bušotina kod primjene

cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama. U samo 3% slučajeva kod primjene staklenih mikrokuglica, gubitak cementne kaše u pukotine probušenih stijena je bio toliki da se kaša nije vratila na površinu, dok se kod čak 13% bušotina cementiranih cementnim kašama sa dodatkom keramičkih mikrokuglica kaša nije vratila na površinu.

Nadalje, cementacija kašama sa staklenim mikrokuglicama toliko je uspješna da niti jednom nije bilo potrebno popravno cementiranje, dok se na čak 8% bušotina cementiranih uz dodatak keramičkih mikrokuglica mora primijeniti postupak popravne cementacije. Zbog veće mogućnosti drobljenja keramičkih mikrokuglica u odnosu na staklene mikrokuglice, u čak 24% slučajeva cementiranja kašama s keramičkim mikrokuglicama je dolazilo do povećanja tlaka u prstenastom prostoru pri dnu zaštitnih cijevi (*engl. sustained casing pressure - SCP*), dok je kod samo 11% cementacija uz dodatak staklenih mikrokuglica došlo do povećanja tlaka u prstenastom prostoru na dnu zaštitnih cijevi (Veisi i dr., 2015).

6.2. Silikatna vlakna kao aditiv za sprječavanje gubljenja cirkulacije prilikom cementiranja zaštitnih cijevi

Vlakna se u građevinarskoj industriji već dugo koriste kao aditiv za povećanje čvrstoće cementnog kamena. Povezuju cementnu smjesu u kompaktnu masu te onemogućuju odlamanje komada cementnog kamena u slučaju pojave lomova ili pukotina. Nadalje, vlakna se već neko vrijeme koriste i u naftnoj industriji kao materijali za sprječavanje gubljenja cirkulacije (*engl. lost circulation material - LCM*). Međutim, veliki problem predstavlja nemogućnost pravilnog raspršivanja i homogeniziranja vlakana u cementnoj kaši, u dovoljnoj količini za uspješnu primjenu. Problem se javlja u veličini i materijalu od kojeg su sastavljena do sad primjenjivana komercijalno dostupna vlakna.

Stoga su razvijena i u primjenu uvedena nova, silikatna vlakna specijalno razvijena za primjenu u bušotinskim uvjetima. Zbog cilindričnog oblika, duljine od oko 12 mm te promjera od samo 20 μm u kombinaciji sa silikatnim materijalom od kojeg su građena, ova vlakna su vrlo savitljiva i omogućuju povezivanje cementne kaše u kompaktnu i nepropusnu masu uz niske tlakove protiskivanja, što ih čini pogodnima za primjenu u zonama visoke propusnosti i niskog frakturnog gradijenta tlaka.

Silikatna vlakna dopremaju se na lokaciju bušotine u obliku svitaka (slika 6-3.), isjeckana na odgovarajuću veličinu i pakirana u vreće kako bi transport i rukovanje bili što jednostavniji i praktičniji (Low i dr., 2003).



Slika 6-3. Svitak silikatnih vlakana (www.acit-usa.com, 2013)

6.2.1. Testiranje i primjena silikatnih vlakana

Glavni cilj primjene silikatnih vlakana u kombinaciji s cementnim kašama prilikom cementiranja zaštitnih cijevi je zaustavljanje gubitka cirkulacije, odnosno sprječavanje prodiranja cementne kaše u pore i pukotine pribušotinskih stijena, kao i sprječavanje gubitka cementne kaše u zonama rasjeda ili visokopropusnim stijenama kanala bušotine.

Upravo iz tih razloga, autori Low, Daccord i Bedel iz naftne kompanije Schlumberger u radu pod naslovom: "Dizajniranje cementnih kaša s dodatkom silikatnih vlakana za primjenu u zonama gubljenja cirkulacije", objavljenom 2003. godine, ispitali su utjecaj silikatnih vlakana u cementnim kašama na zatvaranje zona gubljenja cirkulacije. U laboratoriju su simulirani uvjeti visokih tlakova i visokih temperatura u bušotinama. U visokotemperaturne, visokotlačne (*engl. high pressure, high temperature - HPHT*) filter preše, s probušenim, odnosno razrezanim dnom, ulijevana je cementna kaša. Uz primjenu određenog tlaka preko metalne pločice na vrhu, koja djeluje kao klip, ispitivana je mogućnost različitih cementnih kaša da spriječe prodiranje cementne kaše kroz probušeno, odnosno razrezano dno posude.

Veličine probušenih otvora su: 1 mm, 2 mm, 4 mm i 6 mm, a ukupna površina otvora svake pločice je jednaka (300 mm^2) te simulira pore u stijenama. Razrezane pločice simulirale su frakture, odnosno rasjedne zone, a razlikovale su se po širini razrezane površine. Prva je duljine 46 mm i širine 1 mm, dok je druga također duljine 46 mm i širine 2 mm.

Dvije različite cementne kaše, različitih reoloških svojstava i gustoća, uz dodatak silikatnih vlakana u različitim postocima, uzete su kao reprezentativni uzorci za ispitivanje mogućnosti čepljenja pukotina ili fraktura u simuliranim uvjetima bušotina prethodno opisanom metodom.

Prva cementna kaša je standardno primjenjivana cementna kaša gustoće 1900 kg/m^3 ($15,8 \text{ lbm/gal}$) s dodatkom aditiva za povećanje viskoznosti.

Druga cementna kaša je cementna kaša male gustoće (1140 kg/m^3) sa širokim rasponom veličina čvrstih čestica i visokom koncentracijom čvrstih čestica označena kraticom HPLW (*engl. high performance light weight - HPLW*).

U testovima se pokazalo kako cementne kaše imaju veću sposobnost čepljenja pora i pukotina, što im je veća viskoznost. Međutim, viskoznost bi trebala biti u granicama pumpabilnosti, stoga prevelika viskoznost može izazvati čepljenje pumpi ili pak preuranjeno očvršćivanje kaše u cementni kamen. Nadalje, HPLW cementna kaša pokazala

se neusporedivo boljom za čepljenje pukotina i fraktura pod primjenom istog tlaka od standardno primjenjivane cementne kaše. Razlog leži u tome što silikatna vlakna, zbog svoje duljine i fleksibilnosti u područjima gubljenja naprave mrežu koju čvrste čestice različitih veličina i visoke koncentracije iz HPLW kaše počnu popunjavati, dok ne naprave premoštenje zone gubitaka. Jednako uspješnima su se pokazala testiranja na probušenim i razrezanim pločicama.

Međutim, što je promjer pora ili pukotina veći, potrebno je dodati i više vlakana u cementnu kašu, te bi bilo poželjno da vlakna budu veće duljine. Nadalje, kod pločice sa većom širinom pukotine (2 mm), pokazalo se da pod višim tlakovima cementna kaša može iscuriti, kao da vlakna ne postoje. Razlog leži u tome da se vlakna, ukoliko su u manjoj koncentraciji i ukoliko se paralelno poredaju u smjeru otvora pukotine, ne mogu stvoriti mrežu potrebnu za taloženje čvrstih čestica i premoštenje pukotine. Stoga bi koncentracija vlakana, kao i duljina pojedinačnih vlakana trebala biti što veća. Velikim brojem ponavljanja ovog testa u laboratoriju, sa različitim duljinama i koncentracijama silikatnih vlakana u HPLW kašama, utvrđeno je da je optimalna duljina silikatnih vlakana za zadovoljavanje uspješnog čepjenja velike većine pora i pukotina, uz mogućnost sigurne pumpabilnosti kaše, 12 do 14 mm. Nadalje, optimalna, odnosno maksimalna moguća koncentracija silikatnih vlakana, a da pumpabilnost ne bude ozbiljno ugrožena, iznosi 6 kg/m^3 (2,1 lbm/bbl), za HPLW cementne kaše.

Ova testiranja pokazala su koliko je bitno u obzir uzeti reološke parametre i veličinu čestica prilikom odabira optimalne kombinacije za čepljenje pukotina i pora stijenci kanala bušotine. Nadalje, pokazano je kako primjena silikatnih vlakana u standardno primjenjivanoj cementnoj kaši neće previše utjecati na kvalitetu čepjenja pora i pukotina, jer je potrebno mrežu vlakana ispuniti česticama različitih veličina. Isto tako, potrebno je podesiti gustoću cementne kaše kako ne bi došlo do frakturiranja stijena i povećanja gubitaka u pribušotinsku zonu uslijed povećanja gustoće cementne kaše. Upravo zbog navedenog, visoko učinkovita cementna kaša male gustoće sa visokom količinom čvrstih čestica različitih veličina, pokazala se idealnom u kombinaciji sa silikatnim vlaknima u točno određenoj koncentraciji (oko 6 kg/m^3 cementne kaše) i duljini vlakana (12 do 14 mm), za čepljenje zona gubitaka cirkulacije. U iduća 2 primjera, biti će objašnjena primjena ove vrste cementne kaše u zonama gubljenja cirkulacije (Low i dr., 2003).

6.2.2. Primjer cementacije zaštitnih cijevi HPLW kašom s dodatkom silikatnih vlakana u prirodno raspucalim stijenama polja Mesaverde

Na polju Mesaverde u Novom Meksiku, SAD, punom prirodnih fraktura, prethodno je cementirano šest bušotina. Proizvodni niz zaštitnih cijevi promjera 0,114 m (4 1/2 inch) cementiran je do dubine 1 546 metara u dva stupnja standardnom cementnom kašom s materijalima za zapunjavanje mjesta gubljenja cirkulacije. Prilikom cirkuliranja isplake nije dolazilo do gubitaka, međutim prilikom prvog stupnja cementiranja došlo je do gubljenja cementne kaše kroz pukotine u stijenama.

Nadalje, zvučna karotaža također je pokazala kako primjena standardnih cementnih kaša nije kvalitetno rješenje za cementiranje u visoko raspucalim stijenama niskog frakturnog gradijenta polja Mesaverde. Čak se i HPLW kaša gustoće $1\ 140\ \text{kg/m}^3$ (9,5 lbm/gal) s visokim rasponom veličina i velikim udjelom čvrstih čestica u kombinaciji s pločicama celofana kao aditivom za čepljenje, pokazala neuspješnom zbog brzog uklanjanja cementnog obloga, stvorenog prilikom protiskivanja cementne kaše kroz prstenasti prostor, sa stijenki kanala bušotine.

Zbog svega navedenog bilo je potrebno promijeniti sastav dotad utiskivane cementne kaše. Odlučeno je pokušati s istom HPLW kašom gustoće $1\ 140\ \text{kg/m}^3$ (9,5 lbm/gal), uz zamjenu pločica celofana s $5,8\ \text{kg/m}^3$ (2,0 lbm/bbl) silikatnih vlakana. Nadalje, kako bi se omogućilo formiranje nepropusne mreže na stijenama kanala bušotine, u razdjelnicu koja prethodi cementnoj kaši, također je dodano $5,8\ \text{kg/m}^3$ (2,0 lbm/bbl) silikatnih vlakana.

Cementiranje HPLW cementnim kašama s dodatkom silikatnih vlakana je također obavljeno u dva stupnja. Gubici nisu uočeni, a zvučna karotaža potvrdila je uspješnost cementacije i kompaktnost nastalog cementnog kamena.

Kombinacija silikatnih vlakana s HPLW kašom, kao i s razdjelnicom, pokazala se vrlo uspješnom u sprječavanju gubljenja cirkulacije u zonama gubljenja s niskim frakturnim gradijentom tlaka, te je ubrzo postala standard u korištenju, čak i u zonama jako visokih gubitaka cirkulacije (Low i dr., 2003).

6.2.3. Cementiranje zaštitnih cijevi HPLW cementnom kašom u zonama naslaga ugljena

U poljima sjevernog Wyominga (SAD), eksploatira se metan iz naslaga ugljena. Naslage ugljena niskog su frakturnog gradijenta tlaka te su česti problemi gubljenja cirkulacije u izbušene proizvodne slojeve. Iz tog razloga primjenjivane su standardne olakšane i zapjenjene cementne kaše, a cementiranje je provođeno u dva stupnja. Međutim, čak i uz ogromne količine (preko 100%) viška cementne kaše, često se događalo da cementna kaša ne dođe do površine, te je stoga bilo potrebno primijeniti drukčije cementne kaše za premoštenje pukotina u slojevima ugljena.

Ležišta plina u slojevima ugljena u Wyomingu prilično su plitka, a zacijevljenje se sastoji od uvodne kolone promjera 0,273 m (10 ¾ in) do dubine 26 - 30 m (85 – 100 ft) i proizvodne kolone promjera 0,1397 m (5 ½ in) do dubine 244 - 335 m (800 – 1 100 ft). Kanal za ugradnju proizvodne kolone izbušen je dlijetom promjera 0,2 m (7 ⅞ in). Ovakve bušotine završavaju se u vrlo kratkom vremenskom periodu (1 do 1,5 dan), a mjerenja stvarnog stanja širine prstenastog prostora i odstupanja u širini kanala bušotine kaliperom se u pravilu ne obavljaju. Stoga se prilikom izvođenja cementacije olakšanim i zapjenjenim cementnim kašama utiskuje 100% viška cementne kaše, a u slučaju gubljenja isplake prilikom bušenja i više od toga. Međutim, čak i s tolikim sigurnosnim faktorom, u oko 25% slučajeva nužna je bila popravna cementacija.

Bušotine su cementirane standardnom cementnom kašom u dva stupnja. Prvo je protisnuta cementna kaša gustoće 1 300 kg/m³ (11 lbm/gal), a nakon nje kaša gustoće 1 600 kg/m³ (13,5 lbm/gal). Međutim, preveliki gubici ove kaše i učestala potreba za popravnim operacijama cementiranja, doveli su do potrebe za zamjenom ovih cementnih kaša.

Cementna kaša odabrana kao rješenje problema gubljenja cirkulacije u naslagama ugljena je HPLW kaša gustoće 1 140 kg/m³ (9,5 lbm/gal) s visokom količinom i velikim rasponom veličina čvrstih čestica. U nju su dodana silikatna vlakna čija je uloga stvoriti mrežu vlakana koja omogućuje premošćenje pukotina u slojevima ugljena. Kako je primijenjena HPLW kaša niske viskoznosti, moguće je dodati vlakna u visokim koncentracijama, a da kaša ostane pumpabilna i podatna miješanju.

Obavljeno je deset cementacija HPLW cementnim kašama sa silikatnim vlaknima te je tijekom svih deset cementacija došlo do povrata cementne kaše na površinu, uz minimalne gubitke. Nadalje, u gotovo 44% slučajeva, došlo je do potpunog povrata viška

cementne kaše, dok je kod prije primjenjivanih cementnih kaša u 100% slučajeva dolazilo do određenih gubitaka.

Prema tome, smanjeno je i zagađenje produktivnih zona cementnim kašama koje uz primjenu HPLW cementnih kaša s dodatkom silikatnih vlakana ostaju netaknutima te su pukotine uspješno premoštene (Low i dr., 2003).

6.3. Saniranje gubljenja cirkulacije razdjelnicom

Vrlo je bitno, prije početka cementiranja, utvrditi frakturni gradijent tlaka propusnih slojeva u kontaktu s cementnom kašom i prilagoditi gustoću utiskivanog fluida, kako ne bi došlo do daljnjeg narušavanja integriteta sloja i iniciranja pukotina.

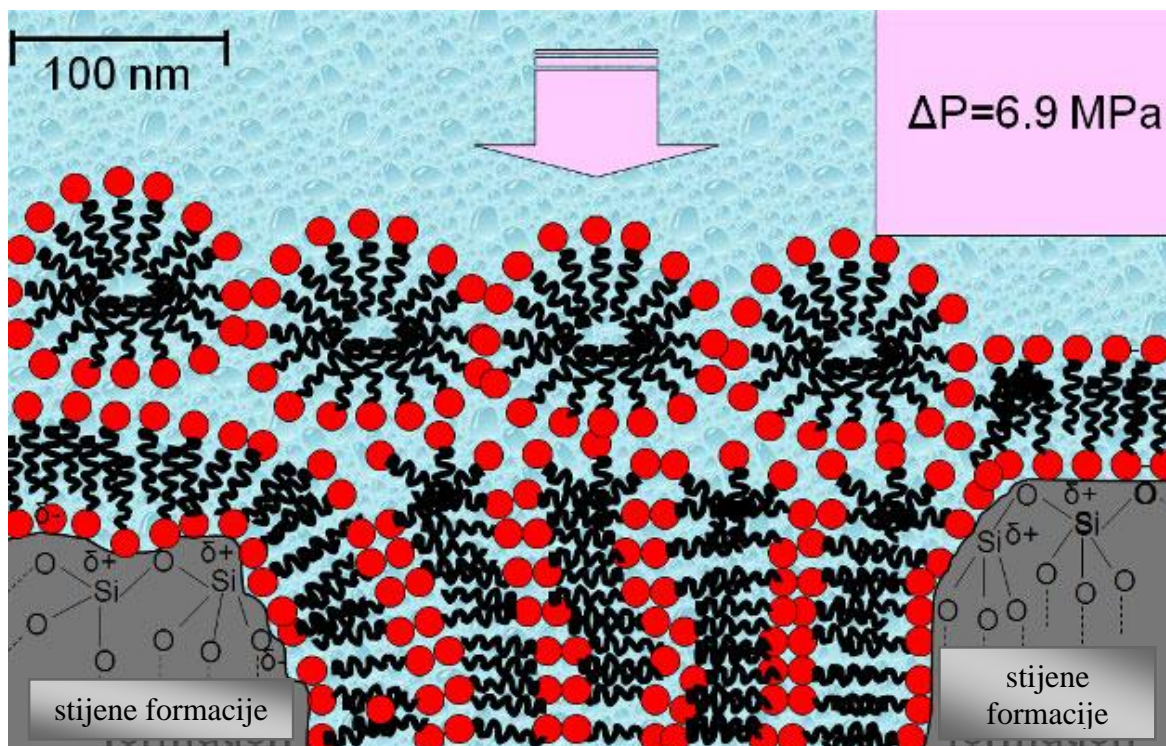
Kako bi se postigla potpuna zamjena isplake cementnom kašom, bez narušavanja stabilnosti sloja, potrebno je prilagoditi fizikalna svojstva razdjelnice, ali i ostalih fluida prilikom cementiranja uvjetima u bušotini. Tako bi gustoća razdjelnice trebala biti 60 do 120 kg/m³ (0,5-1,0 ppg) veća u odnosu na gustoću isplake. Gustoća cementne kaše, također bi trebala biti veća od gustoće razdjelnice u istom rasponu. Isplaka mora biti dobro promiješana pa zbog toga pri cementaciji treba povećati brzinu protjecanja i dobavu kako bi protjecanje isplake stalno bilo turbulentno. Pritom treba paziti da se ne premaši ekvivalentna cirkulacijska gustoća (*engl. equivalent circulating density – ECD*) koja dovodi do frakturiranja stijena u zonama cementiranja.

Uz prilagodbu fizikalnih svojstava fluida u bušotini, potrebno je i pravilno smještanje niza zaštitnih cijevi u kanalu bušotine. Tako bi trebalo podizati i spuštati zaštitne cijevi prilikom cementiranja, ukoliko je moguće, kako bi se ostvarilo što bolje uklanjanje isplačnog obloga. Niz zaštitnih cijevi bi također trebao biti dobro centraliziran, kako bi se svi dijelovi prstenastog prostora jednako očistili od zaostale isplake. Ukoliko taj uvjet nije zadovoljen, ispiranje razdjelnicom će biti kvalitetno na široj strani prstenastog prostora, međutim, na užoj strani zazor je manji i isplačni oblog neće moći biti uklonjen. Sposobnost ispiranja se eksponencijalno smanjuje malim smanjenjima zazora. Tako pri odstupanju od samo 33% od centralne osi dvostruko više fluida teče širim dijelom prstenastog prostora, a pri 60% odstupanja od centralne osi, čak 5 puta više fluida teče širom nego užom stranom prstenastog prostora što gotovo u potpunosti onemogućuje uklanjanje ostataka isplačnog obloga na užoj strani prstenastog prostora.

U slučaju da neki od navedenih postupaka nije dobro proveden, velika je vjerojatnost da cementni kamen neće zadovoljiti kriterije kvalitetne izolacije sloja, a svako propuštanje može onemogućiti nastavak daljnjih radova. U radu pod naslovom: "Sprječavanje gubitaka pomoću razdjelnice projektirane za primjenu u zonama gubljenja cirkulacije", objavljenom 2016. godine, autori Mofunlewi iz kompanije Baker Hughes i Okoto iz kompanije Grisa - Dienonoos energy services, opisali su mehanizam čepjenja pukotina razdjelnicom projektiranom za primjenu u zonama gubljenja cirkulacije u propusnim zonama polja Lokichar u Keniji. Nadalje, primjerima iz prakse potvrdili su važnost razdjelnice s modificiranim polisaharidima za uspješno obavljanje cementacije prstenastog prostora u bušotinama polja Lokichar (Mofunlewi i Okoto, 2016).

6.3.1. Mehanizam čepjenja pukotina razdjelnicom s modificiranim polisaharidima

Primarna uloga razdjelnice primijenjene na polju Lokichar u Keniji je sprječavanje prodiranja bušotinskih fluida u pore ili pukotine u stijenama. Kako bi se to postiglo, u fluid se dodaju modificirani polisaharidi, koji u dodiru s vodenom otopinom formiraju nakupine zvane micelle. Modificirani polisaharidi sastoje se od hidrofilne glave i hidrofobnih repova, te se zbog toga u vodenoj otopini vezuju u micelle kod kojih se repovi privlače "bježeći" od vode dok glave ostaju lebdjeti u vodi. Kada se nakupine polisaharida nađu u zonama gubitaka, pri hidrostatskom tlaku stupca fluida višem od slojnog tlaka, formiraju nakupine u obliku mosta na ulasku u pukotine (slika 6-4). Prilikom daljnjeg povećanja tlaka, most postaje čvršći i nepropusniji zahvaljujući većoj gustoći nakupina polisaharida na mjestima otvora. Time se sprječava ulazak drugih fluida u pribušotinsku zonu, a pošto prodiranje nakupina polisaharida nije duboko u formaciju, sprječava se oštećenje sloja i zagađenje slojnog fluida (Mofunlewi i Okoto, 2016).



Slika 6-4. Formiranje nepropusnog mosta modificiranim polisaharidima iz razdjelnice (Brandl i dr., 2011)

Na slici 6-4. prikazano je formiranje nepropusnog mosta polisaharidima iz razdjelnice u uvjetima višeg hidrostatskog tlaka u odnosu na slojni tlak.

U idućih nekoliko primjera, biti će opisani postupci cementiranja bušotina na polju Lockihar u Keniji, kao i važnost razdjelnice za uspješnu cementaciju raspuknutih zona u bušotinama polja Lockihar (Mofunlewi i Okoto, 2016).

6.3.2. Geološka struktura polja Lockihar

Ležišta polja Lockihar sastoje se od slojeva pješčenjaka s malom primjesom glina, vulkanskih stijena i pješčenjaka zatvorenih između slojeva glina.

Tipična konstrukcija bušotina na ovom polju sastoji se od uvodne kolone promjera 0,508 m (20 in) ugrađene do dubine od 50 do 100 metara unutar kanala bušotine promjera 0,660 m (26 in). Uvodna kolona cementira se od dna do površine cementnom kašom gustoće $1\,576\text{ kg/m}^3$ (15,8 ppg). Nakon ugradnje uvodne kolone slijedi izrada kanala bušotine dlijetom promjera 0,438 m (17 ¼ in) do dubine 1 000 m i ugradnja zaštitnih cijevi promjera 0,340 m (13 ⅜ in) do dubine od 700 do 1 000 m. Ovaj niz zaštitnih cijevi

cementira se od dna do površine vršnom (prethodnom) cementnom kašom gustoće $1\,247\text{ kg/m}^3$ (12,5 ppg), dok se repnom (nahodnom) cementnom kašom gustoće $1\,576\text{ kg/m}^3$ (15,8 ppg) popunjava donjih 150 metara prstenastog prostora između otvorenog kanala bušotine i zaštitnih cijevi. Nakon ugradnje i cementacije zaštitnih cijevi promjera 0,340 m ($13\frac{3}{8}$ in) nastavljeno je bušenje dlijetom promjera 0,311 m ($12\frac{1}{4}$ inch) do dubine 2 500 m te je ugrađena proizvodna kolona zaštitnih cijevi promjera 0,244 m ($9\frac{5}{8}$ in) od 1 800 do 2 500 m. Proizvodna kolona zaštitnih cijevi cementirana je od dna do 150 metara unutar prethodne kolone zaštitnih cijevi. Cementna kaša za cementiranje prstenastog prostora između otvorenog kanala bušotine i proizvodnog niza zaštitnih cijevi te između prethodnog niza zaštitnih cijevi i proizvodnog niza, može biti

(Mofunlewi i Okoto, 2016):

- kombinacija vršne kaše gustoće $1\,247\text{ kg/m}^3$ (12,5 ppg) i repne kaše gustoće $1\,576\text{ kg/m}^3$ (15,8 ppg) za prekrivanje posljednjih 150 metara prstenastog prostora ili
- cementna kaša gustoće $1\,576\text{ kg/m}^3$ (15,8 ppg), za prekrivanje prstenastog prostora od dna (2 500 m) do 150 metara unutar prethodne kolone zaštitnih cijevi.

6.3.3. Cementiranje zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m ($13\frac{3}{8}$ in)

Zaštitne cijevi promjera 0,3397 m ($13\frac{3}{8}$ in) ugrađene su do dubine od 712 metara. Najveći izazov prilikom cementiranja ove kolone zaštitnih cijevi predstavlja propusna zona vulkanskih stijena u plitkom dijelu bušotine. Prvi pokušaj cementiranja izveden je utiskivanjem kombinacije standardne vršne cementne kaše gustoće $1\,498\text{ kg/m}^3$ (12,5 ppg), za prekrivanje 512 metara prstenastog prostora od dubine vrha repne cementne kaše do površine i standardno korištene repne kaše gustoće $1\,893\text{ kg/m}^3$ (15,8 ppg) za prekrivanje 200 metara prstenastog prostora od dna bušotine (712 m).

Vršna kaša puni prstenasti prostor između otvorenog kanala i zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m ($13\frac{3}{8}$ inch) u donjem dijelu te prstenasti prostor između uvodne kolone zaštitnih cijevi i zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m ($13\frac{3}{8}$ in) u gornjem dijelu bušotine, dok repna kaša popunjava prstenasti prostor između otvorenog kanala bušotine i zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m ($13\frac{3}{8}$ in).

Pokušaj cementiranja opisanog prstenastog prostora standardnim cementnim kašama rezultirao je velikim gubicima cementne kaše u spomenuti sloj te stoga cementna kaša nije dosegla površinu.

Kako bi se gubici smanjili i onemogućilo gubljenje cementne kaše u vulkanske propusne stijene ili pak u krhke formacije ugrožene povećanjem ekvivalentne cirkulacijske gustoće, predloženo je trostupanjsko rješenje uz pomoć razdjelnice s modificiranim polisaharidima.

Niz fluida za cementaciju utiskuje se kroz zaštitne cijevi do cementacijske pete nakon koje se istiskuje u prstenasti prostor.

Prvi u nizu utisnutih fluida je kemijska otopina volumena $6,36 \text{ m}^3$ (40 bbl), a njena uloga je razrijediti isplaku i ukloniti isplačni oblog sa stijenki kanala bušotine. Niska gustoća od 999 kg/m^3 (8,34 ppg) omogućuje postizanje turbulentnog toka pri maloj dobavi te time dobro uklanjanje naslaga uz malu opasnost od iniciranja fraktura.

Nakon kemijske otopine, u bušotinu se utiskuje $9,54 \text{ m}^3$ (60 bbl) razdjelnice s modificiranim polisaharidima čija je uloga zatvoriti pukotine u stijenama i omogućiti izolaciju sloja kako bi se spriječio gubitak cementne kaše.

Iza razdjelnice utiskuje se cementna kaša. Odabrana je cementna kaša niske gustoće zbog niskog frakturnog gradijenta. Stoga se prvo utiskuje vršna kaša gustoće $1\,138 \text{ kg/m}^3$ (9,5 ppg), koju slijedi repna kaša gustoće $1\,893 \text{ kg/m}^3$ (15,8 ppg) za sprječavanje utoka plitkog plina koji može narušiti kvalitetu cementacije i onemogućiti kvalitetnu izolaciju sloja.

Ustanovljen je potpuni povrat utisnutih fluida te nisu primijećeni gubici. Zonalna izolacija obavljena je uspješno, a zvučna karotaža obavljena 48 sati nakon cementacije, pokazala je odlično vezivanje cementnog kamena po cijeloj duljini cementiranog intervala (Mofunlewi i Okoto, 2016).

6.3.4. Cementiranje zaštitnih cijevi promjera 0,2445 m (9 5/8 in)

Zaštitne cijevi promjera 0,2445 m, ugrađene su do dubine 1 255 metara. Cementiranje prstenastog prostora izvedeno je u jednom stupnju od dna do vrha bušotine. Cementacija je obavljena istiskivanjem kaše kroz niz zaštitnih cijevi u prstenasti prostor, jednako kao pri cementiranju zaštitnih cijevi promjera 0,3397 m (13 3/8 in).

U prvom pokušaju cementacije, utisnuto je $30,84 \text{ m}^3$ (194 bbl) prethodne cementne kaše gustoće $1\,318 \text{ kg/m}^3$ (11 ppg) koja za cilj ima popuniti prstenasti prostor od 1 100 m do površine. Vršnu kašu potiskuje $6,67 \text{ m}^3$ (42 bbl) repne kaše gustoće $1\,893 \text{ kg/m}^3$ (15,8

ppg) koja treba spriječiti ulazak plina u cementnu kašu. Repna kaša treba popuniti donjih 150 metara prstenastog prostora.

Utiskivanju cementne kaše prethodilo je utiskivanje dviju standardno upotrebljivanih razdjelnica. Prvo je utisnuto 4,77 m³ (30 bbl) kemijske otopine gustoće 999 kg/m³ (8,34 ppg) kako bi se dispergirala i uklonila zaostala isplaka, te potom 9,54 m³ (60 bbl) standardne otežane razdjelnice, koja treba ukloniti posljednje ostatke isplačnog obloga i začepiti veće pukotine kako bi se spriječilo gubljenje cementne kaše.

Prilikom ugradnje zaštitnih cijevi u bušotinu i cirkulacije isplake pri dobavi 1,27 m³/h (8 bbl/h), primijećeni su djelomični gubici. Nakon odsjedanja zaštitnih cijevi i povećanja dobave fluida, gubici isplake su povećani na 22,89 m³/h (144 bbl/h). Nakon toga cirkulacija je obustavljena, a gubici su prestali. Kako bi se preciznije ustanovio utjecaj povećanja dobave na gubitak fluida, izveden je test gubitaka isplake pri različitim dobavama pumpe (Tablica 6-3).

Tablica 6-3. Gubljenje isplake pri različitim hodovima pumpe

Hod pumpe (o/min)	Gubitak fluida (m ³ /10 min)
0	Nema gubitaka
50	1,27
100	2,86
150	Potpuni

U tablici 6-3. je prikazan gubitak isplake u ovisnosti o broju hodova pumpe, a time posredno i o dobavi. U opisanim bušotinskim uvjetima gubitak fluida u potpunosti ovisi o dobavi, što dovodi do zaključka da je tlak frakturiranja stijena vrlo nizak i povećanjem ekvivalentne cirkulacijske gustoće dolazi do proširenja pukotina i gubitka isplake u sloj.

Zbog visokih gubitaka isplake prilikom spuštanja zaštitnih cijevi i kondicioniranja odlučeno je ne kondicionirati isplaku, a tijekom cementiranja, između otežane razdjelnice i cementne kaše, utisnuti 7,95 m³ (50 bbl) razdjelnice s modificiranim polisaharidima, čija je uloga premostiti pukotine i spriječiti gubitak cementne kaše u propusne stijene.

Tijekom cementacije fluidi su utiskivani dobavom od 318 l/min (2 bbl/min), a povrat fluida na površinu je bio potpun. Stoga je dobava povećana na 1 272 l/min (8 bbl/min), što je dovelo do neželjenih gubitaka, pa se dobava smanjila, prvo na 636 l/min (4 bbl/min), što nije u potpunosti prekinulo gubitke, pa onda na staru razinu pri kojoj gubici nisu detekirani. Kasnije je, međutim, dobava opet povećana na 636 l/min jer su gubici bili prihvatljivi, a vrijeme čekanja na radove je smanjeno.

Membrane cementacijskih čepova su uspješno probijene tlakom na površini od 9,56 MPa (1 400 psi), koji je zadržan 10 minuta. Ukupna količina od 15,90 m³ (100 bbl) razdjelnice zagađene isplakom, vratila se na površinu potisnuta cementnom kašom, a gubitak isplake u formacije iznosio je 8,90 m³ (56 bbl). Nakon što se cementna kaša stvrdnula, obavljena su karotažna mjerenja i ustanovljen je čvrst i nepropustan cementni kamen cijelom duljinom cementiranog kanala bušotine (Mofunlewi i Okoto, 2016).

6.3.5. Cementiranje zaštitnih cijevi u geotermalnoj bušotini promjera 0,508 m (20 inch)

Kanal bušotine za ugradnju uvodne kolone izrađen je dlijetom promjera 0,660 m (26 in). Bušenje je obavljano bez gubitaka, sve do dubine od 20 metara, kada ulaskom u kaverozne naslage vrlo brzo dolazi do potpunih gubitaka. Kako je isplaka preskupa, a bušotina plitka, umjesto isplake u nastavku bušenja je korištena voda kao isplačni fluid. Unatoč bušenju na "slijepo", čak i uz potpune gubitke, izbušena je prva sekcija bušotine do 72 metra. U izrađeni kanal ugrađena je uvodna kolona zaštitnih cijevi promjera 0,508 m (20 in) do dubine 69 metara.

Nakon ugradnje uvodne kolone, odmah se pristupilo njenom cementiranju, bez prethodnog kondicioniranja isplake. Prvo je utisnuta voda kao fluid za čišćenje stijenki kanala bušotine od isplačnog obloga. Ukupno je utisnuto 4,77 m³ (30 bbl) vode, a nakon toga slijedilo je utiskivanje razdjelnice s modificiranim polisaharidima. Gustoća razdjelnice iznosila je 1 090 kg/m³ (9,1 ppg), a utisnuto je ukupno 10,33 m³ (65 bbl). Na kraju je u prstenasti prostor istisnuto 15,90 m³ (100 bbl) cementne kaše gustoće 1 749 kg/m³ (14,6 ppg). U tu istisnutu količinu cementne kaše, uračunat je sigurnosni višak od čak 50%, što bi trebalo osigurati povrat cementne kaše na površinu. Unatoč velikoj količini utisnute cementne kaše i razdjelnice s modificiranim polisaharidima, koja za cilj ima začepiti pukotine i spriječiti gubljenje cementne kaše u stijene, nije došlo do povrata cementne kaše na površinu. Stoga je bilo potrebno s površine u prstenasti prostor između

kanala bušotine i zaštitnih cijevi nadoliti cementnu kašu. Tako je dodatno utisnuto 15,90 m³ (100 bbl) cementne kaše u dva obroka, kako bi cementna kaša došla do površine.

Međutim, prilikom cementiranja uvodne kolone u obližnjoj bušotini, bilo je potrebno nadoliti čak 16 obroka cementne kaše u prstenasti prostor kroz otvor na površini. Primarno je utisnuto 13,99 m³ (88 bbl) cementne kaše gustoće 1 749 kg/m³ (14,6 ppg), a do povrata cementne kaše na površinu također nije došlo. Ukupno je nadoliveno 167,10 m³ (1 051 bbl) cementne kaše u 16 obroka ulijevanja kaše u prstenasti prostor nakon primarne cementacije.

Razlog leži u tome što je umjesto razdjelnice s modificiranim polisaharidima, korištena standardna razdjelnica, koja nije uspjela premostiti pukotine ni približno toliko dobro kao razdjelnica s modificiranim polisaharidima.

Ukupna količina utisnute cementne kaše pri primjeni razdjelnice s modificiranim polisaharidima iznosi 31,80 m³ (200 bbl), što je znatno manje od 181,09 m³ (1 139 bbl) utisnutih u cementaciji obližnje bušotine gdje je korištena standardna razdjelnica. Razdjelnica s modificiranim polisaharidima je uvelike smanjila troškove materijala za pripremu cementne kaše, kao i troškove čekanja na završetak radova cementacije (Mofunlewi i Okoto, 2016).

6.3.6. Cementiranje zaštitnih cijevi promjera 0,339 m (13 3/8 in) u geotermalnoj bušotini

Prilikom izrade ove geotermalne bušotine, bušenje je završeno bez većih poteškoća. Kanal je izbušen dlijetom promjera 0,445 m (17 ½ in) do dubine 355 metara. Tijekom bušenja, za ispiranje kanala je korištena standardna isplaka s aditivima za sprječavanje gubljenja cirkulacije. Gubici nisu primijećeni do dubine 144 metra. Nakon te dubine, a zbog ulaska u jako propusne naslage dolazi do potpunih gubitaka u sloj. Preostali dio kanala bušotine bušen je "na slijepo", bez povrata cirkulacije, uz utiskivanje vode. Uz vodu, povremeno su utiskivani obroci prethodno korištene isplake, kako bi se onemogućilo taloženje krhotina na dnu. Nakon što je dosegnuta planirana dubina, izvučen je niz bušačih alatki iz bušotine, te je započela ugradnja zaštitnih cijevi promjera 0,339 m (13 3/8 in) do 351 metra dubine i njihova cementacija.

Prilikom primarne cementacije zaštitnih cijevi promjera 0,339 m ($13 \frac{3}{8}$ in), utiskivanju cementne kaše je prethodilo utiskivanje $12,72 \text{ m}^3$ (80 bbl) isplake u koju je dodan materijal za čepljenje mjesta gubljenja cirkulacije.

Nakon isplake, kroz zaštitne cijevi, u prstenasti prostor je utisnuto $10,33 \text{ m}^3$ (65 bbl) razdjelnice s modificiranim polisaharidima. Na kraju je utisnuto $38,16 \text{ m}^3$ (240 bbl) cementne kaše gustoće 1431 kg/m^3 (14,34 ppg). Cementna kaša je potisnuta kroz zaštitne cijevi s $27,98 \text{ m}^3$ (176 bbl) vode. Međutim, nije došlo do povrata cementne kaše na površinu. Stoga je bilo potrebno nadolijevanje cementne kaše u prstenasti prostor s površine. Izvršena su dva nadolijevanja, prvi put je nadoliveno $17,97 \text{ m}^3$ (113 bbl) cementne kaše, a drugi put $20,03 \text{ m}^3$ (126 bbl) nakon čega je kaša došla do površine.

Na obližnjoj bušotini na istom polju, vršena je cementacija zaštitnih cijevi odsjednutih na približno istoj dubini. Međutim, umjesto razdjelnice s modificiranim polisaharidima, utiskivana je standardna razdjelnica. Prilikom primarnog cementiranja, utisnuto je $44,04 \text{ m}^3$ (277 bbl) cementne kaše gustoće 1447 kg/m^3 (14,5 ppg), ali cementna kaša nije dosegla površinu. Nakon toga se prstenasti prostor bušotine s površine nadopunjava čak 9 puta cementnom kašom. Ukupno je uliveno $91,58 \text{ m}^3$ (576 bbl) kako bi kaša došla do površine (Mofunlewi i Okoto, 2016).

U tablici 6-4. prikazane su gustoće i volumeni utisnutih cementnih kaša svakog stupnja utiskivanja prilikom cementiranja zaštitnih cijevi u dvjema prethodno opisanim bušotinama.

Tablica 6-4. Volumeni utisnutih cementnih kaša obzirom na razdjelnicu koja prethodi utiskivanju cementne kaše

Cementiranje uz primjenu standardno korištene razdjelnice			Cementiranje uz primjenu razdjelnice s modificiranim polisaharidima		
Dubina ugradnje zaštitnih cijevi (m)	Gustoća cementne kaše (kg/m ³)	Volumen utisnute cementne kaše (m ³)	Dubina ugradnje zaštitnih cijevi (m)	Gustoća cementne kaše (kg/m ³)	Volumen utisnute cementne kaše (m ³)
		<u>Primarna cementacija:</u>			<u>Primarna cementacija:</u>
	1 447	V = 44,04		1 447	V = 38,16
		<u>Dopunjavanje prstenastog prostora s površine:</u>			<u>Dopunjavanje prstenastog prostora s površine:</u>
355	1 497	1. = 19,87	343	1 447	1. = 17,97
	1 537	2. = 11,77		1 447	2. = 20,03
	1 557	3. = 10,02			
	1 557	4. = 11,29			<u>Ukupno utisnuto:</u>
	1 537	5. = 7,15			76,15
	1 576	6. = 2,54			
	1 566	7. = 12,56			
	1 576	8. = 8,74			
	1 576	9. = 7,63			
		<u>Ukupno utisnuto:</u>			
		135,62			

Iz tablice 6-4., vidljivo je kako je u primjeru dviju vrlo sličnih bušotina na istom polju potrebno utisnuti gotovo dvostruko manje cementne kaše, ukoliko utiskivanju cementne kaše prethodi razdjelnica s modificiranim polisaharidima, u odnosu na standardno korištenu razdjelnicu. Tako je prilikom cementiranja zaštitnih cijevi cementnom kašom kojoj prethodi standardno korištena razdjelnica, bilo potrebno 9 dopunjavanja da bi kaša došla do površine, a ukupno je utisnuto 135,62 m³ cementne kaše. Međutim, u situaciji kad je cementnoj kaši prethodilo utiskivanje razdjelnice s modificiranim polisaharidima, bila su potrebna 2 dopunjavanja nakon primarne cementacije, a ukupno je utisnuto 76,15 m³ cementne kaše. To pokazuje kako razdjelnica s modificiranim polisaharidima puno bolje čepi pore i pukotine u stijenama od standardno korištene razdjelnice te time smanjuje gubitke cementne kaše koja se utiskuje nakon nje u prstenasti prostor između zaštitnih cijevi i stijenki kanala bušotine (Mofunlewi i Okoto, 2016).

7. CEMENTNI ČEPOVI ZA ZATVARANJE ZONA GUBLJENJA CIRKULACIJE

Cementni čepovi krajnje su rješenje za sprječavanje gubljenja cirkulacije. Ukoliko gubitke nije moguće spriječiti ili smanjiti na prihvatljivu razinu odabiranjem isplake odgovarajućih svojstava prilikom bušenja ili cementne kaše prilikom cementiranja zaštitnih cijevi, najčešće se pristupa utiskivanju čepa cementne kaše u dio otvorenog kanala bušotine u kojem su ustanovljeni gubici. Nadalje, odabrane su vrste cementa, aditivi i svojstva cementne kaše koja su se u laboratorijskim uvjetima i kasnije u samoj bušotini pokazala najboljima za rješenje problema gubljenja isplake. Cementni čepovi za zatvaranje mjesta gubljenja isplake u sljedećim primjerima omogućili su smanjenje ukupnih troškova izrade bušotina zbog saniranja gubljenja isplake i vremena potrebnog za izradu kanala bušotina, kao i siguran nastavak bušenja uz osiguranje dobre stabilnosti kanala bušotine.

7.1. Cementne kaše tiksotropnih svojstava za zatvaranje zona gubljenja cirkulacije

U idućim primjerima, autori Babadagli i dr., u radu pod naslovom: "Uporaba cementnih kaša za sprječavanje gubljenja cirkulacije – primjeri iz prakse", objavljenom 2004. godine, opisali su primjenu cementnih kaša tiksotropnih svojstava kao cementnih čepova. U prvom primjeru, cementni čep postavlja se s ciljem sprječavanja gubljenja cirkulacije u kanal bušotine, dok u drugom primjeru cementni čep služi kao barijera prolasku zapjenjene cementne kaše prilikom ekspanzije u prstenastom prostoru prema ušću bušotine, te se utiskuje u prvih 100 metara prstenastog prostora sa ušća bušotine. Iako cementni čep u drugom primjeru ne služi za zatvaranje mjesta gubljenja cirkulacije, upotrebljena je ultratiksotropna cementna kaša koja u uvjetima nižih temperatura omogućuje puno brže formiranje cementnog čepa zadovoljavajuće čvrstoće od tiksotropne cementne kaše.

7.1.1. Cementni čep za sprječavanje gubljenja isplake u kaveroznom vapnencu

Gubljenje cirkulacije ustanovljeno je u 8 od 9 bušotina na promatranom polju u saveznoj državi Alberti u Kanadi, uslijed bušenja kroz porozne i kaverozne karbonatne

stijene. Korištena je kompleksna inverzna kalijeva isplaka gustoće između 970 i 1 050 kg/m³ i primijećeni gubici nisu mogli biti zaustavljeni samo dodatkom materijala za čepljenje mjesta gubljenja u isplaku. Stoga je odlučeno da je najbolje rješenje za saniranje gubljenja isplake na bušotinama ovog polja utiskivanje cementnog čepa u zonu gubljenja.

Utiskivanju cementnog čepa prethodi uklanjanje inverzne kalijeve isplake iz zone cementiranja te promjena močivosti stijene iz naftnomočive u vodomočivu stijenu, kako bi cementna kaša što bolje i čvršće začepila otvore i pukotine u stijenama i vezala se za stijenske bušotine čineći čvrstu i nepropusnu barijeru. Utiskivanje cementne kaše za postavljanje cementnog čepa, vrši se kroz niz bušaćih cijevi postavljenih do dubine nekoliko metara iznad dna bušotine, koje se nakon istiskivanja ukupne količine cementne kaše izvlače iz kanala bušotine.

Kako bi se inverzna kalijeva isplaka lakše i učinkovitije uklonila iz kanala bušotine, utiskuje se 1,5 m³ dizela pomiješanog sa 6 l/m³ površinski aktivnih tvari i 6 l/m³ otapala. Otapalo i površinski aktivne tvari omogućuju što bolje miješanje dizela i isplake. Nakon dizela, u bušotinu se utiskuje 1,5 m³ razdjelnice gustoće 1 100 m³, kako bi se što bolje uklonila isplaka olakšana dizelom. Primijenjena razdjelnica ne sadrži barit te stoga nije potrebna velika količina opreme za miješanje isplake u površinskim bazenima te se miješanje fluida ostvaruje mlaznim miješalicama za isplaku. To uvelike smanjuje trošak same operacije te ne ugrožava uspješnost posla. Nadalje, u razdjelnicu se dodaju površinski aktivne tvari, a nakon nje se utiskuje vodena otopina obogaćena površinski aktivnim tvarima. To omogućuje promjenu močivosti pribušotinskih stijena u vodomočive stijene što omogućuje bolje vezivanje cementa i stijenci bušotine te samim time kvalitetniju izolaciju sloja. Nakon što je ostvareno kvalitetno uklanjanje isplake olakšane dizelom i promijenjena je močivost zone saniranja, pristupa se cementiranju.

Odabrana cementna kaša, tiksotropna je smjesa cementa klase C i klase F koju se naziva i lebdeći pepeo. Ova cementna kaša skraćeno se naziva THIX upravo zbog tiksotropnih svojstava koje posjeduje. Utisnuto je 9 m³ ove cementne kaše obogaćene s 4 kg/ton polisaharidnog plosnatog materijala za čepljenje mjesta gubljenja isplake te u manjim količinama ostalih aditiva za poboljšanje reoloških svojstava i povećanje učinkovitosti čepljenja pukotina. Cementna kaša u opisanoj bušotini, treba popuniti 287 metara otvorenog kanala bušotine od dubine 1 300 metara prema površini, a osnovna svojstva tiksotropne cementne kaše opisana su u tablici 7-1 (Babadagli i dr., 2004 b).

Tablica 7-1. Svojstva tiksotropne cementne kaše (THIX)

Svojstva	Tiksotropna cementna kaša (THIX)
Tiksotropija	Niska viskoznost prilikom protiskivanja kaše i brzo povećanje viskoznosti prilikom prestanka protiskivanja omogućuje nizak gubitak cementne kaše u pukotine i sprječava migriranje plina u cementnu kašu
Gustoća	1 600 kg/m ³ – niska gustoća + tiksotropna svojstva onemogućuju veliku filtraciju cementne kaše uslijed visokog hidrostatskog tlaka te se vrlo brzo stvara čvrst i kompaktan cementni kamen
Vrijeme postizanja čvrstoće (hr:mm)	16:36 , p = 3,5 MPa, T = 20°C 63:00 , p = 12,7 MPa, T = 20°C
Filtracija	<100 ml/h

Nakon postavljanja cementnog čepa u opisanoj bušotini, na istom polju postavljeno je još osam čepova u sličnim uvjetima i na približno istim dubinama. I prethodno opisana cementna kaša (THIX), pokazala se kao savršeno rješenje za sprječavanje gubljenja isplake. Nadalje, zvučnom karotažom je detektiran vrh cementnog kamena na približno istim razinama kao što je procijenjeno proračunima, što znači da nije ostvarena značajnija invazija filtrata cementne kaše u zone propuštanja. Bušenje je nastavljeno bez primijećenih gubitaka isplake u zonama premoštenim THIX cementnom kašom (Babadagli i dr., 2004 b).

7.1.2. Cementni čep za zaustavljanje zapjenjene cementne kaše prilikom cementiranja kolone zaštitnih cijevi zapjenjenom cementnom kašom

Također na poljima Alberte u Kanadi, obavljeno je bušenje duboke bušotine, a korištena je K₂SO₄ isplaka na bazi vode gustoće 1 130 kg/m³. Problematična zona sastoji se od raspucalog vapnenca visoke propusnosti koji počinje na 799 metara dubine, a ukupna dubina bušotine iznosi 3364 m. Izazov je postaviti i cementirati kolonu zaštitnih cijevi koja

seže od 699 metara dubine do samog dna bušotine (3364 m), a pri tome prekriva 4 različite formacije, uključujući i problematični sloj vapnenca. Zbog sigurnosnih faktora energetske regulatorne agencije Alberte (*engl. Alberta Energy Utility Board - AEUB*) potrebno je premostiti i cementirati 100 metara iznad vrha problematične formacije. Važno je istaknuti da su gubici isplake u problematični sloj vapnenca nakon što je sloj probušen iznosili čak 350 m^3 , a dodatkom zrnaca CaCO_3 različitih veličina gubici su smanjeni na 3 - 4 m^3/h . Nadalje, uvodna kolona zaštitnih cijevi cementirana je do dubine 500 m, te je time spriječena komunikacija kanala bušotine i podzemnih voda.

Kako bi cementna kaša omogućila kvalitetno premoštenje zona gubitaka, a uz to mogla biti protisnuta bez opasnosti od frakturiranja nestabilnijih naslaga te prevelike invazije u proizvodnu zonu, odabrana je zapjenjena cementna kaša gustoće 1300 kg/m^3 . Njoj prethodi reaktivna razdjelnica na bazi vode koja za cilj ima očistiti i pripremiti stijenke bušotine za kontakt sa cementnom kašom. Nadalje, zapjenjena kaša visoke je viskoznosti, a ekspanzija prilikom pjenjenja dodatno poboljšava izolaciju sloja. Cementna kaša ekspandira sve dok se kaša ne stvrdne u kamen jer dušik, kao sretstvo za pjenjenje nastoji "pobjeći" iz cementne kaše. Procjenjuje se da je za promatranu bušotinu anularno povećanje volumena cementne kaše oko 30%.

Međutim, kako je u slojevima bližim površini niža temperatura, a u cementnu kašu se dodaju i usporivači, kaši treba više vremena da hidratira u cementni kamen te je omogućena ekspanzija kaše do površine, što onemogućuje daljnje radove i povećava troškove zbog produljenja vremena izrade bušotine. Stoga se preporuča postavljanje cementnog čepa u prstenasti prostor s površine kako bi se spriječio prodor zapjenjene cementne kaše prema površini. Cementni čep obično se postavlja od površine do dubine 50 – 100 metara u prstenastom prostoru i stvrdnjava vrlo brzo, oko 4 sata do čvrstoće koja zadovoljava uvjete nastavka bušenja, što omogućava skraćenje vremena čekanja na nastavak bušenja (Babadagli i dr., 2004 b).

Iako se u ovoj bušotini nije očekivalo prelijevanje cementne kaše na površini, iz sigurnosnih razloga je na površini pripremljena smjesa ultratiksotropne cementne kaše visoke brzine stvrdnjavanja UTHX, spremne za utiskivanje u prstenasti prostor u slučaju potrebe. Svojstva ove cementne kaše opisana su u tablici 7-2.

Tablica 7-2. Svojstva ultratiksotropne cementne kaše (UTHX)

Svojstva	Ultratiksotropna cementna kaša (UTHX)
Tiksotropija i općenite karakteristike	Vrlo brzo geliranje i hidratacija, moguće zapjenjivanje, staklene kuglice mogu se dodati kao olakšivači, vrlo skupa
Gustoća	1 740 kg/m ³
Vrijeme postizanja čvrstoće od 3,5 MPa	16:14 h, T = 10 °C
Primjena	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cementna kapa kod primjene zapjenjenih cementnih kaša, ➤ cementacija proizvodnog niza zaštitnih cijevi, ➤ kaša za sprječavanje migracije plina, ➤ pri popravnom cementiranju.

Brzina stvrdnjavanja, međutim, ovisna je o temperaturi, što određuje koju će se smjesu utisnuti: THIX ili daleko skuplji UTHX (tablica 7-3).

Tablica 7-3. Vrijeme očvršćivanja u odnosu na temperaturu sloja

Temperatura u cirkulaciji na dnu, BHCT (°C)	Vrijeme očvršćivanja UTHX kaše (hr:min)	Vrijeme očvršćivanja THIX kaše (hr:min)
10	<u>4:00</u>	
15	<u>2:30</u>	4:30
20	<u>1:30</u>	4:15
25	<u>1:00</u>	4:00
30		<u>3:20</u>
35		<u>2:00</u>
40		<u>0:45</u>

Za cementni čep u primjeru opisane bušotine nije moguće pripremiti THIX kašu jer bi vrijeme stvrdnjavanja cementne kaše u kamen bilo predugo pri temperaturi od 10 °C i izgubilo bi se daleko više novaca čekajući na cementnu kašu da se stvrdne nego na razliku

cijene UTHX-a i THIX-a. Stoga je odlučeno da u pripremi bude cementna kaša UTHX, koja unatoč većoj cijeni jedina zadovoljava uvjet dovoljne čvrstoće nakon 4 sata prilikom cementiranja sloja neposredno ispod površine, temperature oko 10 °C.

Zapjenjena kaša, koja se sastoji od cementa tipa ZS-II uz dodatak 0,1 % lignosulfonata kao usporivača, uspješno je utisnuta u kanal bušotine. Početna gustoća cementne kaše iznosila je 1 705 kg/m³, no smanjena je dušikom kao zapjenjivačem na 1 300 kg/m³. Dodano je 12 l/m³ dušika te je ova cementna kaša popunila interval od 699 do 3 000 metara. Ukupna težina utisnute zapjenjene cementne kaše iznosi 51 tonu.

Nakon zapjenjene kaše, utisnuta je repna cementna kaša gustoće 1726 kg/m³ da popuni donji interval bušotine, između 3 000 i 3 364 m. Bilo je potrebno 15 MPa tlaka na površini primijenjenog na membranu nahodnog čepa, da čep pukne i repna cementna kaša počne svoju redistribuciju u prstenasti prostor.

Volumetrijske procjene pokazale su da je vrh zapjenjenog cementnog kamena točno tamo gdje treba biti, na oko 700 metara dubine, i cementacija je obavljena uspješno.

Cementacija zapjenjenim kašama u frakturiranim zonama očituje se u sljedećim prednostima (Babadagli i dr., 2004 b):

- gubici se mogu sanirati prilikom cementiranja;
- cementni kamen je kompaktan i ravnomjerno raspoređen;
- niska gustoća kaše sprječava izazivanje otvaranja novih pukotina;
- minimalna invazija u proizvodnu zonu;
- vrhunsko vezivanje cementne kaše uz stijenke kanala bušotine zbog ekspanzije cementne kaše i njene visoke viskoznosti;
- eliminira potrebu višestupanjske cementacije zbog velikog intervala cementiranja, čime pridonosi uštedi u opremi i vremenu cementiranja od oko 25 000 \$.

7.2. Umrežene cementne kaše za zatvaranje zona gubljenja cirkulacije

U radu pod naslovom: "Umrežene cementne kaše za rješenje problema gubljenja cirkulacije", objavljenom 2004. godine, autori Mata i Veiga iz kompanije BJ services, opisali su dvije vrste umreženih cementnih kaša za zatvaranje zona gubljenja cirkulacije. Umrežene cementne kaše utiskuju se u kanal bušotine jednako kao i tiksotropne cementne kaše opisane u poglavlju 7.1., kao cementni čepovi za sprječavanje gubljenja cirkulacije.

Umrežene cementne kaše dizajnirane za primjenu u proizvodnim zonama zovu se magnezijske umrežene cementne kaše zbog visokog udjela magnezija u klinkeru cementnog praha. Osim magnezija, visok je udio kalcijevih oksida, karbonata i sulfata. Magnezijske umrežene kaše (*engl. Magnesia cross linked cement - MCC*) 97% su topive u kiselini (15% HCl), te se zbog toga najčešće koriste prilikom postavljanja cementnih čepova u proizvodnim zonama. Jeftinija, ali manje topiva alternativa magnezijskim umreženim kašama su standardne umrežene cementne kaše (*engl. Regular cross linked cement, RCC*). One su 73% topive u 15% otopini HCl-a i namijenjene su za postavljanje cementnih čepova u neproduktivnim zonama. Za razliku od magnezijskih kaša, u kojima je glavna komponenta cementnog praha magnezij, kod regularnih cementnih kaša, upotrebljava se standardni cement (klase A, B, H ili G).

Umrežene cementne kaše pripremaju se miješanjem smjese cementne kaše sa sredstvom za geliranje. Magnezijska cementna kaša miješa se s karboksimetil - hidroksietilcelulozom koji se dodaje kao gelirajuća komponenta te sprječava filtraciju kaše, zatim s boraksom kao usporivačem, cirkonijem za umreživanje i česticama kalcijevog karbonata za zapunjavanje pukotina. Obe opisane umrežene cementne kaše, mogu se pripremiti i izmiješati na površini i utisnuti u jednom obroku. Međutim, moguće je pripremiti smjesu cementne kaše i umreživača, odvojeno od sredstva za geliranje. Smjese se zatim istodobno protiskuju dvjema pumpama i mješaju na ulazu u bušaće šipke.

U iduća dva primjera, opisano je utiskivanje umreženih cementnih kaša u kanal bušotine kako bi se spriječilo gubljenje cirkulacije u propusne stijene. Cementni čepovi nastali stvrdnjavanjem umreženih cementnih kaša trebali bi zaustaviti gubljenje cirkulacije i omogućiti siguran nastavak izrade kanala bušotine (Mata i Veiga, 2004).

7.2.1. Sprječavanje gubljenja cementne kaše prilikom cementiranja izgubljene kolone zaštitnih cijevi postavljanjem MCC čepa u zonu gubitaka

Prilikom cementiranja izgubljene kolone zaštitnih cijevi na polju kompleksne geološke strukture smještenom ispod jezera Maracaibo u Venezueli, dolazi do velikih gubitaka cementne kaše u prirodne pukotine kojima ovo polje obiluje. Pokušano je cementiranje običnim cementnim kašama, cementnim kašama sa mikrokuglicama i zapnjenim cementnim kašama. Međutim, u svakom od pokušaja dolazilo je do velikih gubljenja cementne kaše u sloj te se moralo primijeniti 2 – 4 utiskivanja pod povećanim tlakom u zone u kojima je ustanovljen dotok slojnog fluida u prstenasti prostor između stijenki kanala i izgubljene kolone ili loše vezivanje utisnute cementne kaše.

Razmatrana bušotina je duboka 3 136 metara, a proizvodni sloj pješčenjaka nalazi se između 3 109 m i 2 710 m. Očekivana je dnevna proizvodnja od 179 m³ nafte i vode (1 500 bbl) na dan, od čega je udio vode 60%. Prilikom bušenja, ukupno je izgubljeno 305,86 m³ isplake u propusnim zonama duž kanala bušotine. Iako se dodavanje materijala za sprječavanje gubljenja isplake pokazalo djelomično uspješnim, prilikom cementiranja izgubljene kolone na bušotinama istog polja, konstantno je dolazilo do gubitaka i bilo je potrebno popravno cementiranje.

Kako bi se spriječile operacije popravnog cementiranja, odlučeno je u zone gubljenja utisnuti MCC cementni čep. Prvi MCC čep utisnut je u jednom stupnju kroz bušaću cijev od dna bušotine, odnosno od 3 136 m do 2 834 m. Utisnuto je 11,45 m³ (96 bbl), a gubitak u formacije iznosio je 0,16 m³ (1,34 bbl). Odmah nakon utiskivanja prve umrežene cementne kaše, kroz iste bušće cijevi utisnuto je 12,24 m³ (102,65 bbl) MCC kaše od 2 838 m do 2 512 m, a 0,32 m³ (2,68 bbl) cementne kaše izgubljeno je u formaciju.

Procijenjeno je da je vrijeme potrebno da se kaša pretvori u kamen čvrstoće dovoljne da se može nastaviti bušiti kroz njega bez opasnosti od narušavanja integriteta samog kamena, 6 sati. Stoga su oba cementna čepa probušena nakon 6 sati dlijetom promjera 0,19 m (7 ½ in) te je u bušotinu postavljena izgubljena kolona promjera 0,14 m (5 ½ in) koja seže od dna do 100 metara unutar prethodne kolone zaštitnih cijevi. Kolona zaštitnih cijevi uspješno je cementirana cijelom duljinom te nisu primijećeni gubici cementne kaše. MCC čep je uspješno začepio pukotine i omogućio cementiranje izgubljene kolone zaštitnih cijevi bez potrebe za popravnim cementiranjem (Mata i Veiga, 2004).

7.2.2. Postavljanje RCC čepa za čepljenje zone katastrofalnih gubitaka

Na bušotinama polja Neuquen u Argentini, dolazi do velikih gubitaka isplake prilikom bušenja intervala bušotine promjera 0,222 m (8 ¾ in) i cementne kaše prilikom cementiranja uvodne kolone zaštitnih cijevi promjera 0,244 m (9 5/8 in) do dubine 120 m. Pošto se dodavanje materijala za čepljenje mjesta gubljenja pokazalo neuspješnim, odlučeno je utisnuti umreženu cementnu kašu u kanal bušotine u zone u kojima je ustanovljeno gubljenje cirkulacije. Iako je u početku planirano postavljanje MCC čepa, zbog isplativosti i zbog toga što se čep postavlja u dio kanala u kojem nisu produktivne formacije ipak je odabrana RCC kaša za formiranje cementnog čepa.

Bušaće cijevi spuštene su 15,25 metara unutar zone gubljenja i utisnuto je ukupno 50 m³ umrežene cementne kaše. Cementna kaša priprema se odvojeno od sredstva za geliranje. Tako se u jednom bazenu u vodu dodaje 3,5% guar gume i 10% CaCO₃ u odnosu na masu cementa, a u drugom se priprema cementna kaša miješanjem: cementne kaše klase "A", 36% vode, 1,2% pufera, 0,8% boratnog umreživača i 0,02% antipjenušavca u odnosu na masu cementa. Oba fluida pripremljeno je po 25 m³ te se nakon miješanja u bazenima istovremeno potiskuju pumpama kroz odvojene utisne vodove i miješaju na ulasku u bušaće cijevi.

Utiskivanju umrežene cementne kaše, prethodilo je 1,11 m³ (7 bbl) vode kao fluida za ispiranje, a cementnu kašu je protiskivalo 0,79 m³ (5 bbl) vode koju je pogurivala isplaka. Nakon što je ukupna količina od 50 m³ RCC kaše utisnuta u kanal bušotine, bušaće cijevi su polako izvučene iznad teoretskog vrha cementne kaše te je kaša ostavljena 3 sata da se stvrdne u cementni kamen.

Nakon čekanja na stvrdnjavanje, cementni čepovi su probušeni i cirkuliranje isplake je nastavljeno bez evidentiranih gubitaka. RCC kaša je uspjela stvoriti čvrst i nepropusan cementni kamen te do kraja bušenja nije bilo gubljenja isplake u zoni u kojoj su prije postavljanja cementnog čepa bili evidentirani potpuni gubici isplake (Mata i Veiga, 2004).

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada je bio ispitati i usporediti cementne kaše za zatvaranje mjesta gubljenja isplake. Ispitivan je njihov sastav, svojstva i mehanizmi koji omogućuju čepljenje pora ili pukotina u stijenama. Uspoređene su standardne kaše prethodno korištene u zonama gubljenja s kašama poboljšanih svojstava koje su se pokazale puno efikasnijima i isplativijima od prethodno korištenih kaša na istim poljima. U nastavku je sažeto objašnjen razlog i primjena svake od prethodno opisanih cementnih kaša za zatvaranje mjesta gubljenja isplake.

Primjena cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama visoke otpornosti na drobljenje omogućila je sigurnije i kvalitetnije obavljanje cementacija zaštitnih cijevi u visoko propusnim formacijama na poljima TTH. Nadalje, čvrstoća i kompaktnost novonastalog cementnog kamena nije se narušila, već samo poboljšala u odnosu na cementni kamen nastao stvrdnjavanjem cementnih kaša sa dodatkom keramičkih mikrokuglica. Gubitak cirkulacije, tijekom i nakon cementiranja, smanjio se primjenom cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama, kao i povišeni tlak u prstenastom prostoru, koji je kod primjene keramičkih mikrokuglica često bio prisutan u donjem dijelu prstenastog prostora zbog urušavanja mikrokuglica pri dnu bušotine pod visokim hidrostatskim tlakom stupca fluida. Uspješnost primjene cementnih kaša sa staklenim mikrokuglicama umanjuje i potrebu za popravnim cementiranjem što uvelike smanjuje vrijeme i troškove izrade bušotina.

Druga ispitana cementna kaša za cementiranje u zonama gubljenja cirkulacije je olakšana kaša sa dodatkom silikatnih vlakana. Vlakna odgovarajuće duljine i visoke fleksibilnosti pokazala su se i više nego uspješnima u čepljenju zona gubljenja cirkulacije, posebno u srednje i jako propusnim stijenama. Mreža silikatnih vlakana nad pukotinama ili šupljinama djeluje poput platforme za taloženje čvrstih čestica iz cementne kaše. Posebno uspješnom se pokazala kombinacija sa visoko učinkovitom cementnom kašom male gustoće (HPLW kaša). Niska gustoća omogućuje utiskivanje kaše u zonama niskog frakturnog gradijenta tlaka bez iniciranja novih fraktura, dok kombinacija vlakana i čvrstih čestica različitih veličina iz HPLW kaše omogućuje stvaranje čvrstog i nepropusnog obloga nad pukotinama stijenki bušotine što onemogućuje daljnje gubljenje cirkulacije.

U radu je također naglašena važnost razdjelnice za obavljanje uspješne cementacije prstenastog prostora. Razdjelnica za cilj ima ukloniti zaostalu isplaku i isplačni oblog, ali i spriječiti prodor cementne kaše u pore i pukotine stijena te omogućiti kvalitetnu podlogu za nadolazeću cementnu kašu. U bušotinama polja Lokichar u Keniji, razvijena je razdjelnica s modificiranim polisaharidima koji nad pukotinama i šupljinama formiraju nepropusni most koji priječi gubljenje cementne kaše u sloj. Nadalje, omogućuje se kvalitetno obavljanje cementacije čak i kad isplačni oblog nije u potpunosti uklonjen. Primjeri cementacija na polju Lokichar u Keniji, prikazuju važnost primjene odgovarajuće razdjelnice na kvalitetu cementacije. Gubici cirkulacije u propusne slojeve su smanjeni, a u nekim slučajevima i u potpunosti uklonjeni primjenom razdjelnice s modificiranim polisaharidima. To je omogućilo velike uštede u materijalu i vremenu čekanja na obavljanje cementacije, a posebne uštede ostvarene su prilikom cementiranja geotermalnih bušotina gdje je količina cementne kaše potrebne za uspješno obavljanje cementacije u nekim slučajevima smanjena za više od 5 puta primjenom razdjelnice s modificiranim polisaharidima. Zbog svega navedenog, razdjelnica s modificiranim polisaharidima u kombinaciji s cementnom kašom niske gustoće, pokazala se neizbježnom prilikom cementiranja jako propusnih slojeva niskog frakturnog gradijenta tlaka bušotina na polju Lokichar.

Cementni čepovi kao rješenje problema gubljenja cirkulacije, utiskuju se u bušotinu tek kada se ustanovi da niti jednom drugom metodom nije moguće spriječiti gubljenje cirkulacije. Cementni čep je najčešće nepovratno rješenje jer se jednom utisnuta cementna kaša ne može vratiti na površinu. Stoga treba biti vrlo oprezan pri odabiru cementne kaše čiji sastav i svojstva trebaju omogućiti kvalitetno izoliranje propusnih slojeva.

U prvom primjeru, cementni čepovi dobiveni su stvrdnjavanjem cementnih kaša tiksotropnih svojstava naziva THIX i UTHX. One se proizvode miješanjem cementa klase C i klase F koju se naziva i leteći pepeo s vodom i ubrzivačima. Posjeduju sposobnost brzog stvaranja gela prilikom mirovanja, pa ih se naziva tiksotropnim kašama i omogućuju brzo vezivanje te postizanje visoke čvrstoće u kratkom vremenskom periodu. To omogućuje postizanje kvalitetne izolacije propusnih naslaga i brz nastavak bušenja. U primjerima saniranja gubitaka u propusnim zonama polja Alberte u Kanadi, cementni čepovi nastali stvrdnjavanjem kaša tiksotropnih svojstava pokazali su se vrlo uspješnima. Gubljenje cirkulacije nije primijećeno, a bušenje je nastavljeno u najkraćem mogućem roku.

Umrežene cementne kaše također se utiskuju u kanal bušotine kao cementni čepovi za sprječavanje gubljenja cirkulacije u propusne stijene. Za razliku od tiksotropnih cementnih kaša, koje prilikom protiskivanja kroz bušaću cijev ostaju približno iste viskoznosti od ušća do dna bušotine i neko vrijeme u samom kanalu bušotine, umrežene cementne kaše geliraju povišenjem temperature pa im se viskoznost povećava istiskivanjem prema dnu kanala bušotine te se u kanal utiskuje kaša visoke viskoznosti. Time se sprječava gubitak cementne kaše prilikom postavljanja čepa pa je u slučaju katastrofalnih gubitaka utiskivanje umrežene cementne kaše puno bolja opcija od utiskivanja tiksotropne cementne kaše za zatvaranje zona gubljenja cirkulacije.

U primjerima su opisane magnezijske i obične umrežene cementne kaše za postavljanje cementnih čepova. Magnezijske umrežene cementne kaše (MCC) postavljaju se kao čepovi u zonama proizvodnih naslaga jer su 97% topive u kiselini, dok su standardne umrežene cementne kaše (RCC) jeftinija alternativa i postavljaju se u neproduktivnim zonama kao cementni čepovi. U prvom primjeru, utisnuta su dva MCC čepa, jedan za drugim u zonu u kojoj je prije prilikom cementiranja zaštitnih cijevi dolazilo do gubljenja cementne kaše. Nakon postavljanja čepova i čekanja na stvrdnjavanje, čepovi su probušeni i cementacija zaštitnih cijevi izvršena je bez gubitaka cementne kaše u sloj. U drugom primjeru, dolazilo je do gubljenja isplake u propusne slojeve, a kako slojevi nisu proizvodni, odlučeno je utisnuti RCC kašu za postavljanje cementnog čepa. Nakon protiskivanja kroz bušaću cijev i čekanja na stvrdnjavanje, čep je probušen i bušenje je nastavljeno bez gubitaka u sloj u zoni postavljanja cementnog čepa.

Iz svega navedenog, može se zaključiti kako tehnike i tehnologije u vidu zatvaranja mjesta gubljenja cirkulacije cementnim kašama jako napreduju, te da sastav i svojstva cementne kaše, kao i fluida koji im prethode treba pažljivo odabrati u skladu s uvjetima u bušotini kako bi cementacija bila uspješna i kako bi se sanirali gubici.

9. LITERATURA

1. BABADAGLI, T., KURU, E., FIDAN, E. 2004. a) Use of cement as Lost Circulation Material: Best Practices. Paper 2004-090, Petroleum Society's 5th Canadian International Petroleum Conference (55th Annual Technical Meeting), Calgary, Alberta, Canada, 8. – 10.6.2004.
2. BABADAGLI, T., KURU, E., FIDAN, E. 2004. b) Use of cement as lost circulation material – field case studies. IADC/SPE 88005, Asia Pacific drilling technology conference and exhibition, Kuala Lumpur, Malaysia, 13. – 15.9.2004.
3. BRANDL, A., BRAY, W.S., MOLAEI, F., 2011. Curing lost circulation issues and strengthening weak formations with a sealing fluid for improved zonal isolation of wellbores. Australian geothermal energy conference 2011., str. 25 - 28.
4. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2013. Bušenje 2, Cementacija kolona zaštitnih cijevi, Predavanja, Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
5. GAURINA-MEĐIMUREC, N., 2016. Bušotinski fluidi 2, Predavanja, Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
6. GAURINA-MEĐIMUREC, N., PAŠIĆ, B., MIJIĆ, P., 2016. Bušenje kroz zone gubljenja isplake – problemi i rješenja. Časopis nafta i plin, 2016., str. 1 - 18.
7. HABERMAN, J.P., WOLHART S.L. 1997. Cementing operations: Reciprocating cement slurries after placement. SPE/IADC 37619, Drilling conference, Amsterdam, Netherlands, 4. – 6.3.1997.
8. JAROUI, R.A.H., DOLE, S., JUNAIDI, E.H., EL-HASSAN, H., FRANCIS, L., HORNSBY, L., MCCRAITH, S., SHUTTLEWORTH, N., PLAS, K., MESSIER, E., MUNK, T., NODLAND, N., THEROND, R.K.S.E., TAOUTAOU S., 2004. A safety net for controlling lost circulation. Oilfield review, winter 2003/2004, str. 20-27.

9. LOW, N., , DACCORD, G., BEDEL, J.P., 2003. Designing fibered cement slurries for lost circulation applications: case histories. SPE 84617, Annual technical conference and exhibition, Denver, Colorado, U.S.A., 5.10.2003. – 8.10.2003.
10. MATA, F., VEIGA, M., 2004. Crosslinked cements solve lost circulation problems. SPE 90496, Annual technical conference and exhibition, Houston, Texas, U.S.A, 26. – 29.9.2004.
11. MOFUNLEWI, S.S., OKOTO, F., 2016. Curing lost circulation with an engineered spacer during cement placement. SPE 184350, Nigeria annual international conference and exhibition, Lagos, Nigeria, 2. – 4.8.2016.
12. THEROND, E., TAOUTAOU, S., JAMES, S.G., WAY, P.W., GOMES, P., DONDALE, A., 2017. Understanding lost circulation while cementing: field study and laboratory research. SPE/IADC 184673, Drilling conference and exhibition, Hague, Netherlands, 14. - 16.3.2017.
13. VEISI, S.M., TAOUTAOU, S., STEVEN, A., PASTERIS, M., WEDHASWARI, V.R., AWALT, M., KADRIE, M., PERMATA, E., 2015. Engineered highly crush-resistant cement slurry to prevent lost circulation. SPE/IATMI 176038, Asia Pacific oil & gas conference and exhibition, Nusa Dua, Bali, Indonesia, 20. – 22.10.2015.
14. Hollow spheres - Petra buildcare products URL: <http://www.indiacenosphere.com/prod/2.jpg> (15.11.2016.)
15. PLANK, J., 2007. Oil well cementing, Technische universität München, Lehrstuhl für Bauchemie URL: <http://www.bauchemie-tum.de/master-framework/data/dynamic/Image/tbz1e.gif> (13.2.2017.)
16. Shale Gas Fracturing URL: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/81/b6/ce/81b6ce0e4c2b73850dcfc2585ecf5fa7.jpg> (3.4.2017.)
17. Silica Chopped Fibers URL: http://www.acit-usa.com/wp-content/uploads/2012/04/chopped_fibers_305x300.png (13.1.2017.)

IZJAVA:

Izjavljujem da sam diplomski rad pod naslovom: "Cementne kaše za zatvaranje mjesta gubljenja isplake" izradio samostalno.

Jurica Šango