Cementacija zaštitnih cijevi u uvjetima visokog tlaka i temperature

Smrečki, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:410580

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







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

CEMENTACIJA ZAŠTITNIH CIJEVI U UVJETIMA VISOKOG TLAKA I TEMPERATURE

Diplomski rad

Filip Smrečki
N 261

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

CEMENTACIJA ZAŠTITNIH CIJEVI U UVJETIMA VISOKOG TLAKA I TEMPERATURE

FILIP SMREČKI

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Cementacija zaštitnih cijevi predstavlja završnu fazu u izradi bušotina. Izrada bušotine u uvjetima visokog tlaka i visoke temperature predstavlja velik izazov i zahtijeva pažljivo planiranje i izvođenje procesa bušenja i cementacije kolone zaštitnih cijevi. Razlika između slojnog tlaka i tlaka frakturiranja u ovakvim bušotinama je mala što rezultira malom sigurnosnom marginom. Cijena izrade bušotine u uvjetima visokog tlaka i visoke temperature je puno veća nego izrade bušotine u uvjetima manjeg tlaka i temperature te je bitno da primarna cementacija bude uspješna. Da bi u HPHT uvjetima cementacija bila uspješna, potrebno je pravilno dizajnirati cementnu kašu. U radu su obrađene klasifikacije HPHT uvjeta, problemi koji se javljaju u HPHT uvjetima, integritet bušotine u HPHT uvjetima i potreban dizajn cementnih kaša za HPHT uvjete. Na kraju rada su prikazani primjeri iz prakse cementacije zaštitnih cijevi u HPHT uvjetima.

Ključne riječi: HPHT, cementacija, cement, cementna kaša, cementni kamen

Diplomski rad sadrži: 57 stranica, 9 tablica, 15 slika i 22 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

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

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica RGNf-a

2. Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNf-a

3. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNf-a

Datum obrane: 17. svibnja 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's thesis

WELL CEMENTING IN HIGH PRESSURE AND HIGH TEMPERATURE CONDITIONS

FILIP SMREČKI

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Casing cementation represents the final stage in the design of the wells. High pressure high temperature wells represent great challenges due to the high pressures and temperatures present in these wells.. Pore pressure and fracture pressure in these wells result in a small narrow windowsafety margin. Due to the high cost of the HPHT wells, it is essential that the primary cementation is successful. To be able to cement in such conditions it is necessary to properly design cement slurries. Classification of HPHT conditions, the problems that occur in HPHT conditions, well integrity in HPHT conditions, the required design of cement slurries for HPHT conditions are presented in this thesis. In additon to this, case studies about casing cementation ih HPHT conditions are shown.

Keywords: HPHT, well cementing, cement, cement slurry, set cement

Thesis contains: 57 pages, 9 tables, 15 figures and 22 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

Reviewers: 1. Full Professor Nediljka Gaurina-Međimurec, PhD

2. Full Professor Zdenko Krištafor, PhD

3. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: May 17th, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
University of Zagreb

Zahvala:

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

Velike zahvale svim prijateljima koji su me podržavali tijekom studiranja.

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

SADRŽAJ

POPIS SLIKA I

POPIS TABLICA II

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA I

1 UVOD 1

2 KLASIFIKACIJA HPHT UVJETA 4

3 PROBLEMI U HPHT BUŠOTINAMA 7

3.1 Reološka svojstva isplake 7

3.2 Utjecaj temperature na svojstva isplake i cementne kaše 7

3.3 Utjecaj tlaka u bušotini 8

3.4 Migracija plina 9

3.4.1 Kratkoročni problemi migracije plina 9

3.4.2 Dugoročni problemi migracije plina 9

3.5 Smanjenje čvrstoće cementnog kamena na visokim temperaturama 9

4 INTEGRITET HPHT BUŠOTINA 11

5 DIZAJN CEMENTNE KAŠE ZA HPHT UVJETE 14

5.1 Bušotinski cement 18

5.2 Aditivi za smanjenje filtracije 23

5.3 Usporivači 23

5.4 Oteživači 24

5.5 Razdjelni fluid 26

5.6 Korištenje aditiva za povećanje volumena cementnog kamena 26

5.7 Učinkovito istiskivanje isplake 27

5.8 Dizajn cemente kaše za spriječavanje migracije plina u HPHT bušotinama 27

6 PRIMJERI IZ PRAKSE 29

6.1 Cementacije kolona u bušotinama HPHT polja u Sjevernom moru. 29

6.1.1 Prethodno planiranje 30

6.1.2 Organizacija 33

6.1.3 Zaštita okoliša 35

6.1.4 Simulator temperatura 35

6.1.5 Procjenjivanje osjetljivosti cementnih kaša 38

6.1.6 Testiranje cementne kaše 40

6.1.7 Odobalna potvrda vremena zgušćivanja cementne kaše 41

6.1.8 Istiskivanje isplake 43
6.1.9 Kvaliteta kontrole 44
6.1.10 Odobalna procedura 44
6.1.11 Procjena uspješnosti cementacije 44
6.1.12 Rezultati 45
6.2 Cementacija HPHT bušotina u Italiji 46
6.3 Razrada HPHT ležišta u Maleziji 49
6.3.1 Cementacija 52
7 ZAKLJUČAK 53
8 LITERATURA 55

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Shematski prikaz cementacije zaštitnih cijevi 1

Slika 1-2. Mala sigurnosna margina bušenja..... 3

Slika 2-1. Matrica HPHT operacija 4

Slika 2-2. Prikaz klasifikacije HPHT uvjeta koju koristi kompanija Baker Huges..... 5

Slika 2-3. Prikaz klasifikacije HPHT uvjeta koju koristi kompanija Schlumberger. 5

Slika 5-1. Izgled 10µm manganovog oksida (Povećanje 1200 puta) 25

Slika 5-2. Izgled 1µm manganovog oksida (Povećanje 10000 puta) 25

Slika 6-1. Shematski prikaz konstrukcije bušotine..... 29

Slika 6-2. Elfov sustav za postupanje kod izrade bušotine..... 33

Slika 6-3. Promjena temperature cementne kaše s vremenom. 36

Slika 6-4. Promjena temperature fluida u cirkulaciji s dubinom..... 37

Slika 6-5. Korelacija predviđene i izmjerene statičke (BHST) i dinamičke (BHCT) temperature 37

Slika 6-6. Osjetljivost cementne kaše na promjenu temperature i koncetraciju usporiača . 39

Slika 6-7. Osjetljivost cementne kaše na volumen usporivača..... 39

Slika 6-8. Početni (a) i konačni (b) program zacjevljenja HPHT bušotine KN UUD..... 51

POPIS TABLICA

Tablica 5-1 Podaci o korištenim cementnim kašama 15

Tablica 5-2. Dizajn cementacije u 3 koraka 17

Tablica 5-3. Klasifikacija cementra prema ASTM-u. 19

Tablica 5-4 Podaci karakteristični za API klase cementa..... 20

Tablica 6-1. Usporedba temperature predviđene kompjuterskom cimulacijom i API standardom 32

Tablica 6-2. Vrijeme zgušćivanja cementne kaše u usporedbi s rezultatima laboratorija na kopnu 42

Tablica 6-3. Provjera reologije razdjelnih fluida i cementne kaše 6 42

Tablica 6-4. Podaci Fan 70 za N-alkalnu sintetičku isplaku gustoće 2150 kg/m^3..... 43

Tablica 6-5. Pregled korištenih podataka o cementaciji i korištenim cementnim kašama.. 48

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

HPHT (engl. *high pressure, high temperature*) – visok tlak, visoka temperatura

BHCT (engl. *bottom hole circulating temperature*) – temperatura u cirkulaciji na dnu bušotine

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

ASTM (engl. *American society for testing and materials*) - Američko društvo za ispitivanje i materijale

SGS (engl. *static gel strength*) – čvrstoća gela

ECD (engl. *equivalent circulating density)* - ekvivalentna gustoća

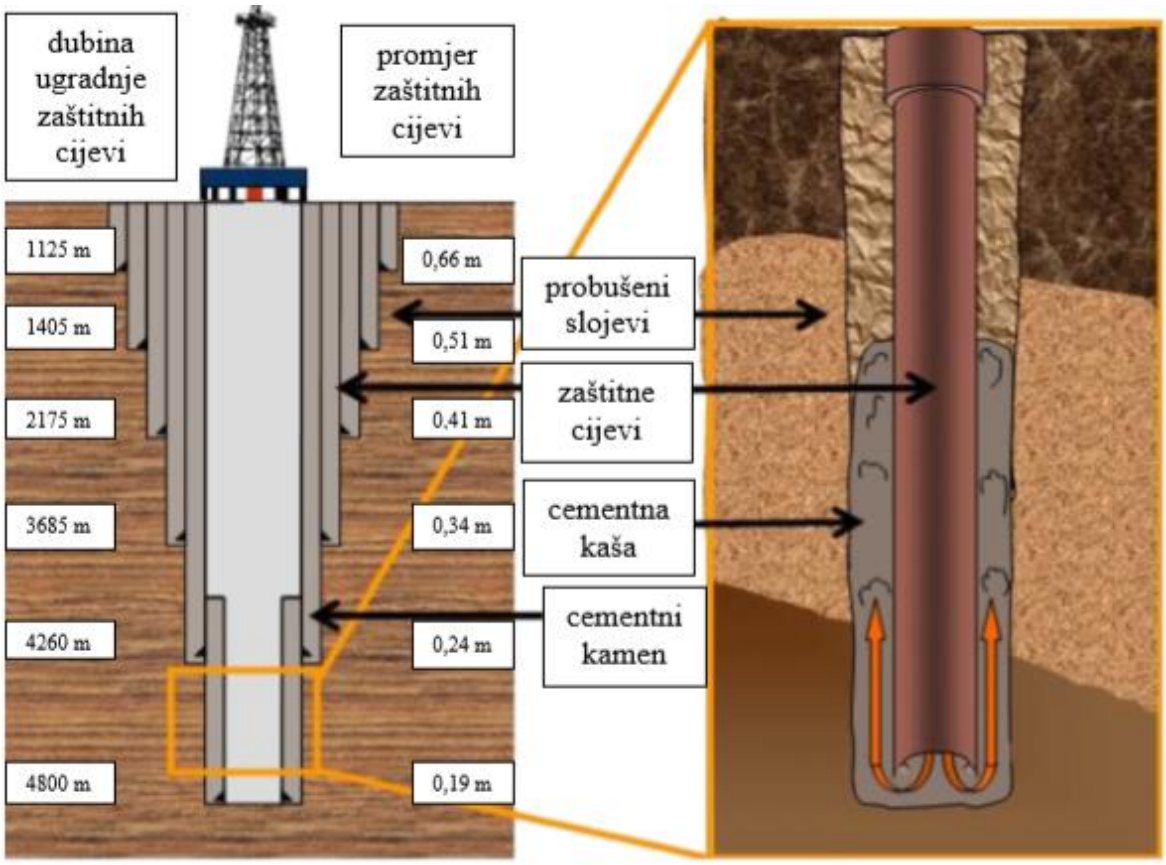
OCTG (engl. *oil country tubular goods*) – cijevi u naftnoj industriji

1 UVOD

Cementacija je sastavni dio procesa izrade naftnih i plinskih bušotina. Neuspješno izvedena cementacija može umanjiti sve uspjehe prethodnih faza, a s druge strane svi propusti iz prethodnih faza izrade bušotine utjecat će na kvalitetu izvedene cementacije.

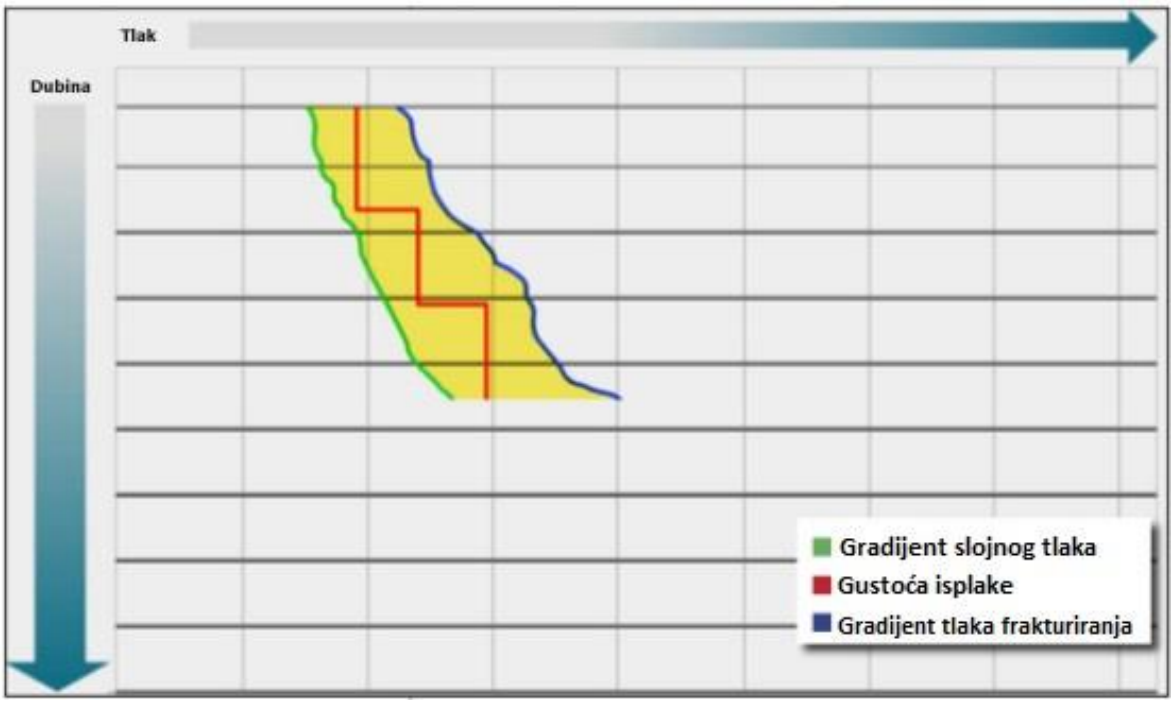
Cementacija kolone zaštitnih cijevi (engl. *casing cementing or well cementing*) predstavlja postupak utiskivanja cementne kaše u prstenasti prostor između kolone (niza) zaštitnih cijevi i stijenki bušotine odnosno prethodno ugrađene kolone. Kolona zaštitnih cijevi može se, ovisno o njenoj namjeni i uvjetima u bušotini, cementirati po cijeloj duljini ili samo u jednom dijelu.

Glavna svrha cementacije je učvršćivanje zaštitnih cijevi u kanalu bušotine, izoliranje proizvodnih naslaga te rješavanje različitih „bušaćih“ problema. Na slici 1-1. prikazana je kontrukcija bušotine i cementacija zaštitnih cijevi.



Slika 1-1. Shematski prikaz konstrukcije bušotine i cementacije zaštitnih cijevi (www.bauchemie-tum.de, 2014)

Osim prethodno navedene glavne svrhe, cementacijom se sprječava: korozija ugrađene kolone zaštitne cijevi uslijed djelovanja slojnih fluida, dotok slojnih fluida u bušotinu, zatvaranje zone gubljenja isplake u raskrivene slojeve u fazi izrade bušotine i dr. (Gaurina-Međimurec, 2016.). Ako je primarna cementacija loše izvedena, bušotina možda nikada neće doseći svoj puni potencijal proizvodnje ugljikovodika. U takvim situacijama potrebno je napraviti postupak popravne cementacije. Zbog visokog troška izrade bušotina u uvjetima visokog tlaka i visoke temperature (HPHT, *engl. high pressure, high temperature*), u nastavku „HPHT bušotine“, bitno je da primarna cementacija bude uspješna. Istraživanje i proizvodnja ugljikovodika postaju sve zahtjevniji, a povećanje dubina do kojih se buši prisiljava naftnu industriju da provodi aktivnosti u HPHT uvjetima. Prema Shardavaniju i Amaniju (2012) HPHT uvjeti su svi uvjeti pri kojima je tlak u ležištu veći od 690 bar i temperatura veća od 149 °C. HPHT bušotine obično se izrađuju u dubokim morima što dodatno povećava troškove jer cijena najma bušaćeg postrojenja često iznosi oko 70% ukupnih troškova izrade bušotina na moru (Radwan i Karimi 2011). Prosječno vrijeme bušenja HPHT bušotina je 30% dulje jer se bušenje kroz vrlo zbijene formacije odvija vrlo sporo (Radwan i Karimi 2011). Bušenje HPHT bušotina predstavlja velike izazove, zbog visokih tlakova i temperatura koje su prisutne u ovim bušotinama. Slojni tlak i tlak frakturiranja u bušotinama koje se izrađuju u dubokim morima rezultiraju malom sigurnosnom marginom bušenja. Prema Međunarodnoj udruzi izvođača bušenja, sigurnosna margina bušenja je razlika između maksimalnog slojnog tlaka i minimalnog tlaka frakturiranja. U HPHT bušotinama razlika između slojnog tlaka i tlaka frakturiranja je mala kao što je prikazano na slici 1-2, što znači da se gustoća isplake mora podesiti kako bi se tlak zadržao unutar sigurnosnih margina bušenja (IADC Drilling lexicon, 2013).



Slika 1-2. Mala sigurnosna margina bušenja (Chief Counsels Report, 2011)

Upravljanje ekvivalentnim cirkulacijskim gustoćama (*engl*. *Equivalent Circulating Density*-ECD) je jedna od najbitnih operacija u takvim bušotinama. Visoka cijena HPHT bušotina zahtijeva visoki stupanj proizvodnosti bušotine da bi se ostvario povrat uloženih sredstava. Vjerojatnost kolapsa zaštitnih cijevi je visoka u HPHT bušotinama zbog komplikacija u cementaciji i zbog radnog okruženja. Cementni kamen igra važnu ulogu u održavanju integriteta bušotine. Cementni kamen treba osigurati konstrukcijski integritet bušotine i kontinuiranu nepropusnost prstenastog prostora kako bi se spriječio nekontrolirani dotok fluida iz ležišta u prostor iza zaštitnih cijevi (Zhaoguang i dr., 2012). Zbog varijacija tlaka i temperature na dnu bušotine dolazi do skupljanja cementnog kamena i do promjena naprezanja u cementnom kamenu. Problemi u dizajnu HPHT bušotina zahtijevaju upotrebu lajnera (*engl. liner*) i povezivog lajnera (*engl. tie back liner*). Ugradnja dugog niza zaštitnih cijevi ili lajnera u kombinaciji s povezivim lajnerom predmet je rasprave u naftnoj industriji (Rommetveit i dr., 2003).

2 KLASIFIKACIJA HPHT UVJETA

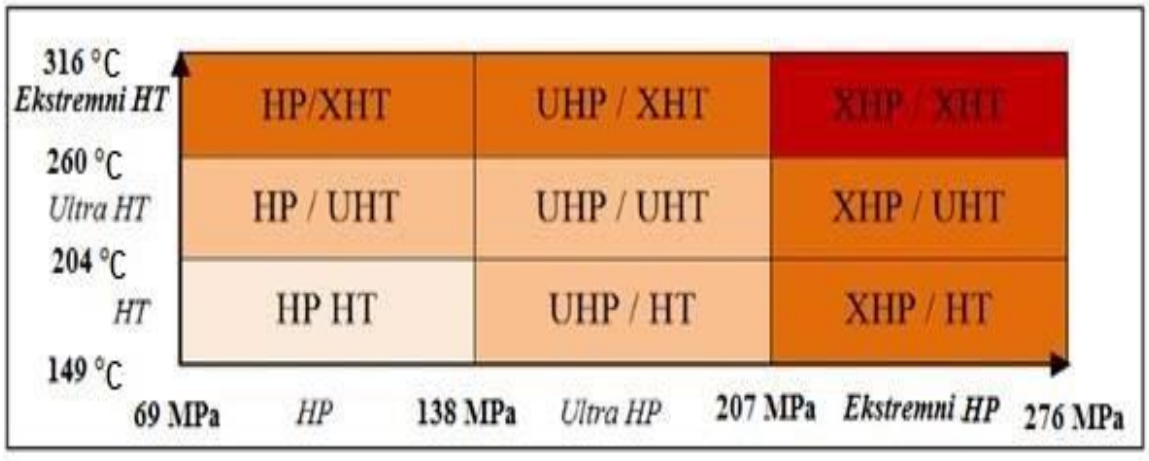
Da bi se lakše identificirali HPHT uvjeti razvijene su nove klasifikacije. Klasifikacije u nastavku dijele HPHT operacije u tri glavne razine koje se u nastavku podrobnije opisuju (Shadravan i Amani, 2012).

Razina 1 odnosi se na bušotine s početnim tlakom u ležištu između 690 bar i 1 379 bar i/ili s temperaturama u ležištu između 149 °C i 205 °C. Do danas, većina HPHT operacija koje se izvode u škriljavcima te mnoge HPHT plinske /naftne bušotine u Meksičkom zaljevu, spadaju u razinu 1. U Norveškoj se nalazi HPHT Kristinovo polje s tlakom od 910 bar i temperaturom od oko 177 °C.

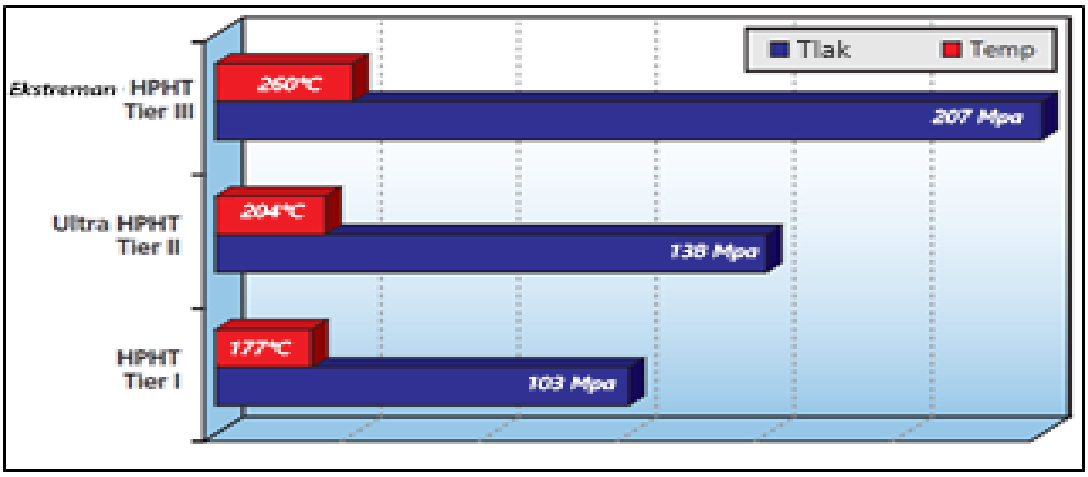
Razina 2 odnosno "Ultra" HPHT uključuje bilo koje ležište s početnim tlakom u ležištu između 1 379 bar i 2 068 bar i/ili temperaturama u ležištu između 205 °C i 260 °C. U tu kategoriju spada nekoliko dubokih plinskih ležišta na tlu američkog kontinentalnog šelfa i u Meksičkom zaljevu.

Razina 3 obuhvaća "ekstremne" HPHT bušotine, s tlakom u ležištu između 2 068 bar i 2 758 bar i/ili temperaturama u ležištu između 260 °C i 316 °C.

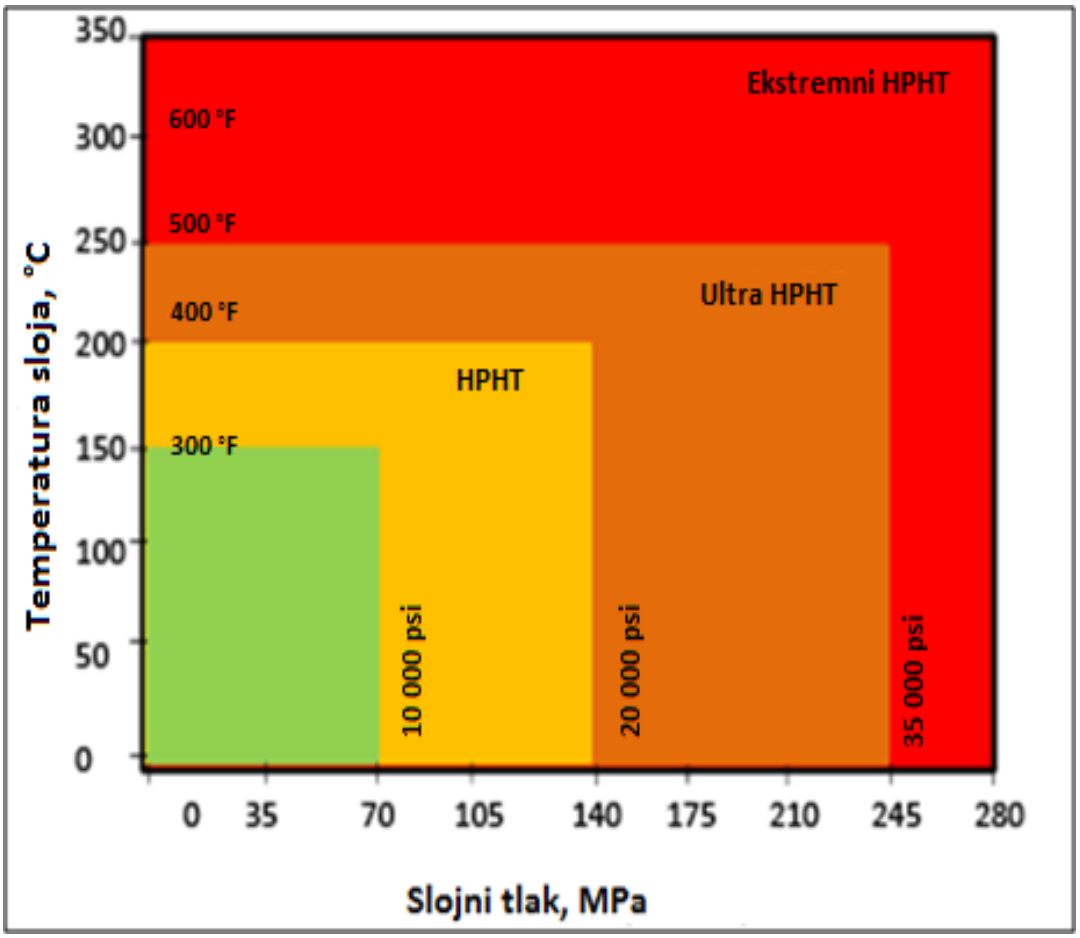
Servisne kompanije, operatori, kompanije za izradu opreme za ispitivanje svojstava isplake i cementne kaše, te proizvođači cijevi ili alata, dali su malo drugačiju definiciju HPHT uvjeta. Većina kompanija trenutno kategorizira svoje operacije, proizvode ili alate u tri glavne razine prikazane na slici 2-1. Na slikama 2-2 do 2-6 prikazane su razine HPHT uvjeta s različitim granicama tlaka i temperature (Shadravan i Amani, 2012).



Slika 2-1. Matrica HPHT operacija (Shadravan i Amani, 2012)



Slika 2-2. Prikaz klasifikacije HPHT uvjeta koju koristi kompanija Baker Huges (Shadravan i Amani, 2012)



Slika 2-3. Prikaz klasifikacije HPHT uvjeta koju koristi kompanija Schlumberger (Shadravan i Amani, 2012)

	Temperatura sloja	Slojni tlak
HPHT	>300°F (150°C) - 350°F (175°C)	>10,000 psi (69 MPa) - 15,000 psi (103 MPa)
Ekstremni HPHT	>350°F (175°C) - 400°F (200°C)	>15,000 psi (103 MPa) - 20,000 psi (138 MPa)
Ultra HPHT	>400°F (200°C) i iznad	>20,000 psi (138 MPa) i iznad

Slika 2-4. Prikaz klasifikacije HPHT uvjeta koju koristi kompanija Halliburton (Shadravan i Amani, 2012)

Propisi u različitim državama mogu utjecati na definiciju HPHT uvjeta, na primjer u Norveškoj «ili» se koristi umjesto «i» u definiranju HPHT uvjeta, drugim riječima, ako temperatura ili tlak odgovaraju HPHT uvjetima (690 bar ili 148 °C), projekt se računa kao HPHT. U Velikoj Britaniji, HPHT bušotina se formalno definira kao bušotina s temperaturom na dnu bušotine većom od 149 °C i gradijentom tlaka većim od 0,18 bar/m ili zahtijeva preventer (protuerupcijski uređaj) s tlakom većim od 690 bar. U Sjevernom moru neke bušotine s temperaturama većim od 121 °C (umjesto > 149 °C) se još uvijek smatraju HPHT bušotinama (Shadravan i Amani, 2012).

3 PROBLEMI U HPHT BUŠOTINAMA

HPHT uvjeti uzrokuju veću složenost same cementacije. Takvi otežani uvjeti mogu povećati rizik kratkotrajne migracije plina nakon postavljanja cementne kaše i eventualno stvoriti pukotine u cementnom kamenu tijekom radnog vijeka bušotine. Također visok tlak i visoka temperatura utječu na fizičko i kemijsko ponašanje cementnog kamena. U nastavku su navedeni problemi koji se mogu pojaviti u HPHT bušotinama (Shadravan, 2013).

3.1 Reološka svojstva isplake

Vrijednosti reoloških svojstva isplake često su aproksimirane da budu neovisna o tlaku i temperaturi. U mnogim slučajevima to je dobra aproksimacija. Za plitke bušotine promjene temperature nisu tako velike, pa su varijacije u reološkim svojstvima isplake s temperaturom male. U mnogim bušotinama je velika razliku između slojnog tlaka i tlaka frakturiranja, tako da pogreške u procjeni dinamičkog tlaka tijekom cirkulacije imaju male posljedice za integritet bušotine ili dotok slojnog fluida. Međutim, za bušotine u kojima je mala razlika između slojnog tlaka i tlaka frakturiranja potrebna je pažljiva procjena i analiza učinaka temperature i tlaka na reološka svojstva isplake, hidrauličke modele i vjerojatnost dotoka (Rommetveit i dr., 2003).

3.2 Utjecaj temperature na svojstva isplake i cementne kaše

Temperatura isplake može se brzo promijeniti na određenoj dubini u bušotini, ovisno o načinu bušenja. Temperatura isplake se približava statičkoj temperaturi nakon perioda dugog mirovanja isplake u kanalu bušotine. Kada cirkulacija počne, donji dio prstenastog prostora će se ohladiti hladnom isplakom koja izlazi iz niza bušaćih alatki, a gornji dio prstenastog prostora će se zagrijati jer vruća isplaka teče prema gore. Uslijed toga, u ovoj fazi, na određenim dubinama, brzo će doći do promjene gustoće isplake i reoloških svojstva isplake. To obično rezultira promjenom ukupnog volumena isplake u kanalu bušotine (Frittella i dr., 2009).

U HPHT bušotinama, cementna kaša postaje osjetljiva na visoku temperaturu, tako da se vrijeme zgušćivanja cemente kaše jako smanjuje jer se njena konzistencija povećava, a pumpabilnost smanjuje brže nego u bušotinama s prosječnim temperaturama. Temperatura

utječe i na reološka svojstva cementne kaše. Ravi i Sutton (1990) navode da se vrijedosti plastične viskoznosti i naprezanja pri pokretanju smanjuju s povećanjem temperature.

Točno predviđanje temperature u cirkulaciji na dnu bušotine (*engl. Bottom hole circulating temperature*) također je vrlo bitno za proces cementacije, jer promjena temperature od 5°C rezultira velikom promjenom vremena zgušćivanja (Frittella i dr., 2009). North i suradnici (2000) su u radu o cementaciji bušotina u Sjevernom moru naglasili da postoje dvije temperature od važnosti u bušotinama i to su:

- **temperatura u cirkulaciji na dnu bušotine** (BHCT); to je temperatura koja djeluje na cementnu kašu tijekom utiskivanja u bušotinu i ona utječe na vrijeme zgušćivanja cementne kaše.
- **statička temperatura na dnu bušotine** (BHST); to je temperatura kojoj će cementna kaša biti podvrgnuta nakon što je proteklo određeno vrijeme od završetka protiskivanja cementne kaše. Njoj će biti izložen i cementni kamen tijekom stvrdnjavanja.

3.3 Utjecaj tlaka u bušotini

Tlak ima utjecaj na zaštitne cijevi, te na svojstva isplake i cementne kašu. U slučajevima kada se tlak neispravno procijeni, odabrane zaštitne cijevi neće biti sposobne izdržati slojni tlak te će to dovesti do kolapsa zaštitnih cijevu u bušotini i doći će do dotoka slojnog fluida u bušotinu (Shadravan i Amani, 2012.).

Varijacije tlaka u HPHT bušotinama su veće nego u ostalim bušotinama. Neki od razloga su (Rommetveit i dr., 2003):

- hidrostatički tlak više varira zbog promjene gustoće isplake uzrokovane utjecajem temperature;
- tlakovi uslijed klipovanja i tlakovi uzrokovani spuštanjem kolone cijevi mogu biti kritičniji zbog dva faktora; prvo, vrijednosti viskoznosti u najdubljim i najtoplijim dijelovima kanala bušotine mogu biti veće (zbog povećanja temperature) i drugo, čvrstoća gela nekih isplaka se s vremenom povećava s povećanjem temperature.

3.4 Migracija plina

Migracija plina se definira kao ulaz plina iz plinskog sloja u prstenasti prostor kanala bušotine. Plin migrira kroz stupac cementne kaše i stvara kanale s mogućnošću osiguravanja puta za daljnji protok fluida prema površini. Prethodna laboratorijska istraživanja pokazala su da je potrebna čvrstoća gela cementne kaše od 255 Pa (500 lbf / 100 ft^2) ili više kako bi se spriječila migracija plina kroz stupac cementne kaše (Shadravan, 2013).

3.4.1 Kratkoročni problemi migracije plina

Najčešći problem koji se javlja tijekom primarne cementacije je migracija plina kroz stupac cementne kaše nakon njenog protiskivanja u prstenasti prostor u prijelaznom periodu iz cementne kaše u cementni kamen. Zgušćivanjem cementne kaše, gubi se sposobnost prijenosa hidrostatičkog tlaka. Tijekom tog razdoblja voda i/ili plin mogu prodrijeti u cementni kamen i formirati kanale. Ova kratkotrajna migracija plina često dovodi do dugoročnih problema izolacije raskrivenih zona (Shadravan, 2013).

3.4.2 Dugoročni problemi migracije plina

Promjene tlaka i temperature koje izazivaju širenje i skupljanje zaštitnih cijevi i cementnog kamena mogu uzrokovati slabu vezu cementnog kamena za zaštitne cijevi i stijene. Cementni kamen na bazi portland cementa je krhki materijal i osjetljiv je na pucanje kada je izložen toplinski induciranim ili tlakom izazvanim vlačnim opterećenjima. Dugotrajna migracija plina nastaje zbog pukotina ili kanala u cementnom kamenu (Shadravan, 2013).

3.5 Smanjenje čvrstoće cementnog kamena na visokim temperaturama

U HPHT bušotinama visoke temperature utječu na zaštitne cijevi, uzrokujući njihovo širenje i skupljanje. Ovo širenje i skupljanje zaštitnih cijevi uzrokuje pukotine u cementnom kamenu (Yetunde i Ogbonna, 2011). Pukotine također mogu nastati zbog smanjenja čvrstoće cementnog kamena. Smanjenje čvrstoće cementnog kamena je fenomen koji se prirodno pojavljuje kad je cementni kamen na bazi Portland cementa izložen temperaturi od 110 °C do 120 °C. Dvanaest mjeseci ili više, nakon postavljanja cemente kaše, cementni kamen nastavlja hidratizirati i razvijati čvrstoću. Nakon tog vremena cementni kamen održava čvrstoću koju je postigao. Cementni kamen će postići maksimalnu čvrstoću nakon što je dva tjedna izložen temperaturama većim od 110 °C (Yetunde i Ogbonna, 2011). Nakon ova prva

dva tjedna čvrstoća se polako počinje smanjivati. Strukturne promjene i filtracija (gubitak vode) su uzročnici pukotina u cementnom kamenu. Kada je cementna kaša postavljena u prstenasti prostor, u procesu očvršćivanja sadrži složeni kalcijev silikatni hidrat koji se naziva tobermorit. Pri temperaturama iznad 110 °C, tobermorit (umjetni mineral) se pretvara u slabu poroznu strukturu koja uzrokuje smanjenje čvrstoće cementnog kamena. Brzina pri kojoj se ove promjene događaju ovisi o temperaturi (Yetunde i Ogbonna, 2011).

Kvarcno brašno ili kvarcni pijesak obično se koriste za sprječavanje opadanja čvrstoće cementnog kamena modificiranjem kemijske hidratacije i mogu se koristiti sa svim API klasama portland cementa. Dodavanje 30 do 40% silicijevog dioksida obično je dovoljno za nastanak cementog kamena male propusnosti < 0,1 x 10^{-3} μm^2 (<0,1 mD) kod kojeg ne dolazi do opadanja čvrstoće, iako se može dodati od 30 do 100%. Na visokim temperaturama (> 150 °C) dolazi do reakcije SiO_2 s cementom i vodom pri čemu nastaje xonotlit umjesto tobermorita. Xonotlite je puno čvršći umjetni mineral i rezultira značajno manjim povećanjem propusnosti cementnog kamena (Yetunde i Ogbonna, 2011).

4 INTEGRITET HPHT BUŠOTINA

Kanal bušotine mora imati potpunu zonsku izolaciju da bi održao svoj integritet. To se prvenstveno postiže pomoću cementnog kamena koji se nalazi između zaštitnih cijevi i kanala bušotine. Međutim, na učinkovitu zonsku izolaciju mogu nepovoljno utjecati uvjeti poput visokog tlaka, visokih temperatura i velikih kutova otklona kanala bušotine. Ovi uvjeti se sve više pojavljuju tijekom bušenja u dubokim morima i mogu ugroziti čvrstoću i integritet cementnog kamena ukoliko se ne predvide pravovremeno. Integritet bušotine postiže se korištenjem tehničkih, operativnih i organizacijskih rješenja za postizanje potpune zonske izolacije naftne/plinske bušotine radi održavanja cjelovitosti kanala bušotine i ekonomičnosti proizvodnje. Nažalost, u praksi se ne sačuva uvijek integritet bušotine. Povijest je pokazala neke razorne posljedice gubljenja integriteta bušotine kao što su (Wilcox i dr., 2016):

- erupcija slojnog fluida iz bušotine Bravo u Sjevernom moru tvrtke Philips Petroleum iz 1997. godine,
- erupcija slojnog fluida iz bušotine 2/4-14 tvrke Sage Petroleum u Sjevernom moru 1989. godine,
- erupcija slojnog fluida iz bušotine tvrtke PTT u zapadnoj Australiji 2009. godine i
- erupcija slojnog fluida iz bušotine Macondo tvrtke BP u Meksičkom zaljevu 2010. godine.

Istraživači i inženjeri također su identificirali "loš dizajn cementacije" kao primarni uzrok gore navedenih izlijevanja nafte. Postupci cementiranja u HPHT bušotinama predstavljaju izazov zbog različitih promjena u fizičkom i kemijskom ponašanju cementnog kamena. Ovi oštri uvjeti predstavljaju prijetnju tijekom cementacije, nakon što je cementni kamen postavljen te tijekom svog životnog ciklusa.

Da bi se održao integritet bušotine, cijeli prstenasti prostor se, nakon uklanjanja isplake, mora popuniti cementnom kašom. Dobro funkcioniranje cementne kaše ovisi u velikoj mjeri o uvjetima na dnu bušotine, ali cementna kaša mora posjedovati određene karakteristike koje su potrebne za cjelokupni završetak cementacije (Wilcox i dr., 2016).

Svojstva cementne kaše i cementnog kamena mijenjaju se u skladu s ciljevima cementiranja. Cementna kaša mora (Gaurina-Međimurec, 2016):

1. posjedovati određenu gustoću uz zadržavanje ostalih željenih svojstva;
2. lako se miješati (pripremati) i protiskivati;
3. posjedovati optimalna reološka svojstva potrebna za istiskivanje isplake;
4. zadržati fizičke i kemijske karakteristike tijekom protiskivanja i
5. biti nepropusna za plin (ako je prisutan) tijekom prijelaznog perioda (vezivanje kaše i očvršćavanje u cementni kamen).

Nakon što je cementna kaša utisnuta u prostor iza cijevi ona prelazi u cementni kamen koji treba (Gaurina-Međimurec, 2016):

1. razviti čvrstoću brzo nakon protiskivanja kaše;
2. razviti dovoljnu čvrstoću kroz dulje vrijeme, čak i ako je kaša zagađena isplakom;
3. razviti čvrstu vezu s kolonom zaštitnih cijevi i sa stijenkama kanala bušotine;
4. imati što manju propusnost i
5. zadovoljiti uvjete navedena pod 2,3,4 i u uvjetima visokih tlakova i temperatura.

Temeljito procjenjivanje svojstava cementne kaše koja utječu na dugoročni integritet cementnog kamena presudno je za projektiranje dizajna cementne kaše koja će izdržati visoke temperature i visoke tlakove. Bilo kakav neuspjeh cementnog kamena može potencijalno uzrokovati stvaranje pukotina i puteva za kretanje plina prema površini (Wilcox i dr., 2016). Prema Ugwu (2008) cementni kamen može izgubiti integritet zbog:

- slabe veze cementnog kamena za kolonu zaštitnih cijevi i stijene,
- radijalnog pucanja cementnog kamena i
- plastične deformacije cementnog kamena.

Skupljanje cementog kamena rezultira slabom vezom između cementnog kamena i zaštitnih cijevi ili cementnog kamena i stijene (Wilcox i dr., 2016).

Postupno stvaranje pukotina u cementnom kamenu uslijed zamora, opterećenja i konstantnog tlaka dovodi do radijalnog pucanja cementnog kamena. Naprezanja uzrokovana velikim razlikama tlaka i temperature tijekom kasnijih operativnih faza, kao što su stimulacija stijena pribušotinske zone i eksploatacija ugljikovodika, uzrokuju smanjenje i eventualni gubitak integriteta cementnog kamena. Životni ciklus naftne/plinske bušotine može se podijeliti u dvije glavne faze koje su važne za cjelovitost cementnog kamena (Wilcox i dr., 2016). Prva faza je izrada bušotine i sastoji se od (Wilcox i dr., 2016): bušenja, cementiranja i završnog proizvodnog opremanja bušotine.

Tijekom faze bušenja, naprezanja u stijenama oko kanala bušotine često se mijenjaju zbog promjene gustoće fluida unutar kanala bušotine. To dovodi do pojave naprezanja u cementnom kamenu.

Druga, kasnija faza odnosi se na uvjete/radove u bušotini kao što su (Wilcox i dr., 2016):

- iscrpljenost ležišta (*engl*. *depletion*),
- radovi u HPHT uvjetima,
- utiskivanje vode i vodene pare,
- eksploatacija,
- frakturiranje itd.

Tijekom kasnije faze, opterećenja koja se prirodno razvijaju zajedno s drugim planiranim intervencijama uvelike će utjecati na integritet cementnog kamena. Kako bi se izbjegli problemi s integritetom, realni ekstremi proizvodnje trebaju biti pravilno definirani. Oštećenje cementnog kamena najčešće je posljedica naprezanja uzrokovanih promjenama u tlaku i/ili temperaturi (Wilcox i dr., 2016).

5 DIZAJN CEMENTNE KAŠE ZA HPHT UVJETE

Cementne kaše za HPHT uvjete zahtijevaju posebni dizajn, modificirane postupke ispitivanja i posebne aditive (Frittella i dr., 2009). Za dizajniranje sustava i svojstava cementne kaše za HPHT uvjete, neophodno je prikupiti osnovne podatke o bušotini, kao što su: dubina, otklon kanala, promjer kanala bušotine, karotažni podatci, podatke o gubljenju isplake i ostalim eventualnim problemima tijekom bušenja. Također je neophodno predvidjeti temperaturu na dnu bušotine u cirkulaciji pomoću softvera za određivanje temperature. Nakon prikupljenih podataka projektiranje cementacije zahtijevat će simulaciju procesa cementacije, specifična laboratorijska ispitivanja sukladno API uputama, dobru procjenu istiskivanja isplake, kontrolu kvalitete materijala na licu mjesta i plan postupanja na lokaciji u slučaju da uvjeti na lokaciji nisu kao što se očekivalo (Frittella i dr., 2009).

Odstupanje u promjeru kanala bušotine, zazor, te loša centralizacija mogu uzrokovati nepotpuno istiskivanje isplake. Također takve nepravilnosti mogu pridonijeti preuranjenom vezivanju cementne kaše prije nego što je istiskivanje isplake završeno, te mogu pridonjeti slaboj kvaliteti cementne kaše. Dobar dizajn cementacije zahtijeva točno predviđanje temperature na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT) pomoću matematičkog proračuna, API tablica ili softvera za simulaciju osnovnih uvjeta. Pomoću računalne simulacije dokazane u terenskim uvjetima, može se izračunati podhlađenje koje se javlja tijekom cirkulacije koristeći podatke o EK mjerenju ili povijesne podatake i podatke za razmatrano područje.

Izračunata temperatura u cirkulaciji (BHCT) je funkcija statičke temperature, brzine protoka, toplinskog kapaciteta čelika, ulazne temperature fluida, toplinskih svojstava stijene, vrste fluida i njihovih reoloških svojstva. Rezultat temeljitog simulacijskog izračuna je profil temperature kroz bušotinu koji ukazuje na moguće vruće mjesto (*eng. hot spot*) ili moguću temperaturu u cirkulaciji (BHCT) (Frittella i dr., 2009). Zanimljivo je da temperatura na dnu bušotine tijekom cirkulacije (BHCT) ne mora biti ista kao temperatura vruće točke, a vruća točka nije nužno na peti kolone zaštitnih cijevi. Umjesto toga, može biti uzduž kanala bušotine u bilo kojoj točki. Softver može simulirati i pratiti ponašanje cementne kaše ili bilo kojeg drugog fluida od početka cementacije do postavljanja cementne kaše do ušća ili željene visine u prstenastom prostoru. Vrijednost temperature fluida se bilježi unutar zaštitnih cijevi i prstenastog prostora. Softver za simulaciju temperatura fluida može predvidjeti volumen cementne kaše i brzinu istiskivanja isplake u funkciji slojnog tlaka i tlaka frakturiranja i na

temelju tog rezultata, temperatura u cirkulaciji može se koristiti za postizanje realističnijeg dizajna cementnacije.

Predviđanje operativnog vremena još je jedno važno razmatranje prije provođenja laboratorijskog ispitivanja cementne kaše. Također, predviđanje temperature u cirkulaciji te porasta temperature (*eng. temperature ramp*) pomaže u dobivanju rezultata laboratorijskih ispitivanja cemente kaše (Frittella i dr., 2009). Za uspješno cementiranje HPHT bušotine, glavna razmatranja trebaju biti posvećena dizajnu cementne kaše i tehnikama postavljanja kaše. Specifične karakteristike određene bušotine diktiraju svojstva i performanse cementne kaše. U tablici 5-1 su prikazane cementne kaše koje su korištene za cementaciju proizvodnih kolona zaštitnih cijevi u HPHT uvjetima (North i dr. 2000)

Tablica 5-1. Podaci o korištenim cementnim kašama

Izvor	Kompanija	Lokacija	Kolona zaštitnih cijevi	Sastav cementne kaše	Svojstva cementne kaše	Napomena
North i dr. 2000	Elf/Haliburton	Srednji Greben Sjevernog mora	0,178 m (7“)	-mješavina cementa, šupljih keramičkih kuglica i drugih aditiva	-lagana cementna kaša (1520 kg/m^3) -odličan razvoj tlačne čvrstoće -osigurala brz razvoj čvrstoće gela -plinon-epropusna	-postignuta zonalna izolacija -nije potrebna popravna cementacija
Frittella i dr., 2009	Nije dostupno	Sj. Italija	0,244 m (9 5/8”)	- na bazi Portland cementa klase G s 40% kvarcnog brašna -30% oteživača	-gustoća cementne kaše iznosila je 2150 kg/m^3	-
Frittella i dr., 2009	Nije dostupno	Sj. Italija	0,178 m (7”)	- na bazi Portland cementa klase G s 40% kvarcnog brašna -25% oteživača	-gustoća cementne kaše iznosila je 2100 kg/m^3 -poboljšana kvaliteta, ponovljivost i brzina rezultata laboratorijskih ispitivanja	-
Frittella i dr., 2009	Nije dostupno	Sj. Italija	0,127 m (5”)	- na bazi Portland cementa klase G s 40% kvarcnog brašna -10% oteživača	-gustoća cementne kaše iznosila je 2 000 kg/m^3	-
Pine i dr.,2003	Shell Expro/Halliburton	Srednji Greben Sjevernog more	0,273 m (10 ¾“) x 0,251 m (9 7/8“)	-na bazi pjenocementa -dodan akrilni polimer viskozifer	-gustoća osnovne cementne kaše iznosila je 1 527 kg/m^3	-nije zabilježena migracija N_2
Srivastava i dr., 2019.	Nije dostupno	Oklahoma	Ispitivanje u laboratoriju na Sveučilište u Oklahomi	- na bazi Portland cementa klase H s 5%	- gustoća cementne kaše iznosila je 1970 kg/m^3	- cementni kamen nastao zgušćivanjem cementne kaša

				hidroksiapatita ($Ca_5(PO_4)_3(OH)$) - aditiv protiv pjenjenja (0,38 L/vreći cementa)	- gubitak filtrata pri 7,5 min iznosio je 67 ml - dodavanje 5% hidroksiapatita značajno poboljšalo otpornost na ugljičnu kiselinu u rasponu temperatua od 38 do 177 °C - tlačna čvrstoća cementnog kamena smanjila se u prosjeku za 17% zbog karbonizacije hidroksiapatita	na bazi Portland cementa klase H s dodatkom 5% hidroksiapatita osigurao je zonalnu izolaciju u HPHT uvjetima
Li i dr., 2015.	Baker Hughes	-	Ispitivanje u laboratoriju	- na bazi Portland cementa klase H s aditivom protiv taloženja i aditivom protiv pjenjenja - testirale su se bazne cementne kaše koje su sadržavale samo hidroksietilnu celulozu, mineralnu vunu ili polivinilni alkohol ili su sadržavale kombinaciju dva ili tri navedenih aditiva	- smanjena tlačna, a povećana vlačna čvrstoća cementnog kamena na bazi mineralne vune - opadanje tlačne čvrstoće i povećanje vlačne čvrstoće cementnog kamena na bazi polivinilnog alkohola - povećanje elastičnosti cementnog kamena na bazi hidroksietilne celuloze	-

Cementna kaša treba očvrsnuti u cementni kamen koji će s vremenom razviti tražena svojstva i izolirati raskrivene zone, kao i zaštititi kolonu zaštitnih cijevi. Postupak cementacije dubokih bušotina u osnovi je isti kao i prilikom cementacije plitkih bušotina; međutim, takve se bušotine općenito smatraju kritičnijim, zbog težih uvjeta bušenja i veće složenosti programa zaštitnih cijevi (Yetunde i Ogbonna, 2011). Kako bi se osigurala izgradnja bušotine koja osigurava sigurnu i ekonomski isplativu proizvodnju ugljikovodika neophodan je proces dizajna cementacije u tri koraka koja uključuju (1) inženjersku analizu, (2) dizajn i ispitivanje cementne kaše i kamena, te (3) praćenje procesa cementacije kao što je prikazano u tablici 5-2.

Tablica 5-2. Dizajn cementacije u tri koraka (Yetunde i Ogbonna, 2011)

Korak 1 Inženjerska analiza	Utjecaji radova u bušotini na integritet cementnog kamena Ocjena svojstava cementnog kamena radi smanjenja rizika oštećenja
Korak 2 Dizajn i ispitivanje	Laboratorijsko ispitivanje - vrijeme stvrdnjavanja, mehanička svojstva Ostali testovi - postavljanje cementne kaše
Korak 3 Praćenje cementacije	Ljudi, oprema, proces kvalitete Ocjena kvalitete cementne veze, praćenje, učenje i napredak

Slijedom toga, dizajn cementne kaše može biti složen, uključujući izbor niza usporivača, aditiva za smanjenje filtracije, dispergatora, silicijeva dioksida i oteživača (Yetunde i Ogbonna, 2011).

Simulator cementiranja je računalni program koji izračunava i prikazuje sve podatke vezane uz cementaciju, kao što su podaci o dobavi, brzini protoka i diferencijalnom tlaku. Pomoću njega može se predvidjeti ekvivalentna cirkulacijska gustoća (ECD), učinkovitost istiskivanja isplake, postotak centriranosti zaštitnih cijevi u bušotini (*engl. casing standoff: 100 % kolona je savršeno centrirana; 0% kolona dodiruje stijenke*), vrijeme zgušćivanja cementne kaše i vrijednosti Reynoldsova broja. U osnovi, softver se koristi za podešavanje postupka cementiranja preporučujući najbolju brzinu istiskivanja i gustoću cementne kaše. Simulator može osigurati da tijekom procesa cementiranja tlak na dnu bušotine ne prelazi tlak frakturiranja stijene niti da bude manji od slojnog tlaka. Simulator uzima u obzir utjecaj reoloških svojstva svih radnih fluida (isplake, razdjelnog fluida i cementne kaše) kako bi se predvidjela učinkovitost istiskivanja isplake i brzina u prstenastom prostoru (Frittella i dr., 2009).

5.1 Bušotinski cement

Osnovna komponenta bušotinskog cementa najčešće je portland cement. Portland cement predstavlja smjesu usitnjenih materijala određenog mineralnog sastava. Proizvodi se iz sirovine koja se sastoji najmanje od gline i vapnenca. Vapnenac je bazična komponenta sirovinske mješavine koja sadrži CaO, dok je glina kisela komponenta, a sadrži: SiO_2, Al_2O_3 i Fe_2O_3. Žarenjem pripremljene smjese, nakon finog mljevenja i miješanja, do temperature sinteriranja (1 400 – 1 450 °C) odnosno do temperature početnog talenja u rotacijskoj peći, vapno (CaO) se kemijski veže s oksidima silicija, aluminija i željeza (SiO_2, Al_2O_3 i Fe_2O_3) stvarajući čvrst proizvod – klinker. Klinker su granule veličine 3 do 25 mm koje posjeduju osnovna svojstva cementa. Nakon izlaska iz rotacijske peći klinker se hladi i uskladišti. Klinkeru se pri mljevenju dodaje 3 do 6% gipsa (kalcij sulfat dihidrat, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) za reguliranje vremena vezivanja (sprječavanje trenutnog vezanja) i povećanje početne čvrstoće te mu se dodaje 10 do 15% mineralnih dodataka (troska, fosilno brašno, pijesak i dr.) (Gaurina-Međimurec, 2016).

U Portland cementu postoje četiri glavna minerala klinkera (Gaurina-Međimurec, 2016; Teodoriu i dr., 2008) :

- trikalcijev-silikat, C_3S, alit,
- dikalcijev-silikat, C_2S, belit,
- tetrakalcijev aluminatferit, C_4AF, celit,
- trikalcijev aluminat, C_3A.

Cementni kamen na bazi Portland cementa razvija tlačnu čvrstoću uslijed hidratacije kao rezultat reakcije između vode i minerala klinkera. Hidratacija je egzoterman proces, te se zbog toga mjerenjem temperature može odrediti dubina vrha cementne kaše u prstenastom prostoru nakon obavljene cementacije (Gaurina-Međimurec, 2016). Brzina hidratacije cementne kaše ovisi o temperaturi, veličini čestica cementa i udjelu pojedinog minerala klinkera. Najbrže hidrira C_3A, zatim C_3S, nakon njega C_4AF i na kraju C_2S. Reakcija hidratacije rezultira smanjenjem volumena što čini portland cement skupljenim kada se postavi. Ekspanzivni cement, koji je modificirani portland cement, koristi se za kompenzaciju smanjenja volumena zbog skupljanja. Specifikacija C-150 Američkog društva za ispitivanje i materijale (*eng. American society for testing and materials*) klasificirala je osam tipova portland cementa kao što je prikazano u tablici 5-3., s cementom tipa I koji je

normalan, te koji se koristi u građevinske svrhe. Više od 92% portland cementa proizvedenog u Sjedinjenim Državama je tip I i II (ili tip I / II). Na tip III otpada oko 3,5% proizvodnje cementa. Cement tipa IV dostupan je samo na poseban zahtjev, a tip V također može biti teško dobiti (manje od 0,5% proizvodnje).

Američki naftni institut (eng. *American Petroleum Institute*-API), s druge strane, definirao je Specifikacije za materijale i ispitivanje bušotinskih cementa (API Specifikacija 10A), koji uključuje zahtjeve za osam klasa bušotinskog cementa (klase A do H) i tri razreda (Ocjene O - obični MSR - umjereno otporan na sulfat, i HSR - otporan na visoku koncetraciju sulfata) kao što je prikazano u tablici 5-4. Svaka klasa primjenjiva je za uporabu u određenom rasponu dubina, temperatura, tlakova i sredina s prisutnošću sulfata. Klase cementa A, B, C, G i H primarno su u SAD-u za cementiranje bušotina. Industrija nafte također koristi konvencionalne vrste portland cementa s prikladnim modifikatorima cementa (Teodoriu i dr., 2008).

Tablica 5-3. Klasifikacija cementa prema ASTM-u (Teodoriu i dr., 2008)

ASTM klasa cementa	Primjena
I	Cement opće namjene, sličan API klasi A
II	Umjereno sulfatno otporan. Sličan API klasi B.
III	Kada se zahtijeva brz razvoj tlačne čvrstoće. Sličan API klasi C.
IV	Kada je potrebna niska toplina hidratacije.
V	Kada je potrebna otpornost na visoku koncetraciju sulfata.
IA[4]	A tip I cement sadržava sredstvo za stvaranje mjehurića zraka
IIA[4]	A tip II cement sadržava sredstvo za stvaranje mjehurića zraka
IIIA[4]	A tip III cement sadržava sredstvo za stvaranje mjehurića zraka

Tablica 5-4. Podaci karakteristični za API klase cementa (Gaurina-Međimurec, 2016)

API klasa cementa	Vodocem. faktor (v/c)	Gustoća kaše (kg/m)	Dubina bušotine (m)	Statička temp. (°C)	Minimalno vrijeme zgušnjavanja cementne kaše (min)
A[1]	0.46	1872	0-1830	27-77	90
B[2,3]	0.46	1872	0-1830	27-77	90
C[1,2,3]	0.56	1776	0-1830	27-77	90
D[2,3]	0.38	1956	1830-3660	77-127	90
E[2,3]	0.38	1956	1830-3660	77-143	100
F[2,3]	0.38	1956	3050-4880	110-160	100
G[2,3]	0.44	1896	0-2440	27-93	90
H[2,3]	0.38	1956	0-2440	27-93	90

Legenda: 1- običan tip cementa

2- umjereno sulfatno otporan tip cementa (MSR), sadrži ≤ 8 % C^3A

3 - visoko sulfatno otporan tip cementa (HSR), sadrži ≤ 3 % C^3A

Za cementacije u uvjetima visoke temperature općenito se koriste cementi API klase G ili H. Različiti omjer gipsa i hemihidrata u sirovom cementu može drukčije djelovati na ponašanje cementne kaše u uvjetima visoke temperature, a drastične varijacije u temperaturi mogu promijeniti vezivanje klasične cementne kaše. Kako bi se poboljšala sposobnost predviđanja ponašanja HPHT cementnih kaša u laboratoriju, time i kvaliteta cementiranja na terenu. Za pripremu cementne kaše za HPHT uvjete koristi se kombinacija cementa API klase G i 40% kvarcnog brašna. Poznato je da ova cementna mješavina odlično reagira na uobičajene usporivače, pa je odgovarajući udio silicijevog dioksida neophodan za sprječavanje opadanja čvrstoće cementnog kamena (Frittella i dr., 2009).

Posebne situacije zahtijevaju inovativne akcije. Potreba za dubljim bušenjem i proizvodnjom nafte i plina u HPHT uvjetima motivirala je inženjere da osmisle ono što se smatra "dizajnerskim" ili "supercementim" sustavima koji su zapravo konvencionalni cementi koji su modificirani tako da poboljšaju dugoročni integritet cementnog kamena u HPHT bušotinama. U nekim slučajevima, ovi dizajnerski cementi nisu bazirani na portland cementu. Cementi/vezivni materijali koji nisu bazirani na portland cementu su: pucolanski cementi (*engl. Pozzolanic cements*), epoksidna smola, geopolimeri, grafit i vlakna (staklo,

čelik) koji polimeriziraju na prikladnim temperaturama i/ili vremenu da bi proizveli fleksibilan i mehanički poboljšan cementni kamen. Pucolanski cementi reagiraju na uobičajenoj temperaturi s kalcijevim hidroksidom u prisustvu vlage te formiraju spoj s vezivnim svojstvima (Teodoriu i dr., 2008).

Modificirani konvencionalni cementi uključuju (Teodoriu i dr., 2008) :

- ekspanzivne cemente (*engl*. *expansive cements*),
- neskupljajuće cemente (*engl*. *non-shrinking cement*),
- pjenocemente (*engl*. *foamed cement*),
- tiksotropne cemente (*engl*. *thixotropic cement*) i
- POZMIX cement (mješavina Pucolana i Portland cement).

Svaki od tih "dizajnerskih" cementa bira se na temelju uvjeta koji vladaju u bušotini. Provedena su istraživanja o učinkovitosti cementnog kamena nastalog očvršćivanjem cementne kaše na bazi novih cemenata u osiguravanju dugoročnog integriteta za HPHT bušotine. Istraživanja su provedena korištenjem novih cemenata koji uključuju ekspanzivni cement koji se temelji na portland cementu i cement koji se ne temelji na portland cementu (epoksidna smola) (Teodoriu i dr., 2008). Prema eksperimentalnim rezultatima cementna kaša na bazi ekspanzivnog cementa je pokazala dobre rezultate, što ju čini dobrim kandidatom za HPHT uvjete. Kada se cementa kaša postavi, cementni kamen razvija unutarnju tlačnu čvrstoća koja mu omogućuje suprotstavljanje vlačnim naprezanjima nasuprot uobičajenim cementima.

Cementne kaše na bazi ekspazivnog cementa omogućuju (Teodoriu i dr., 2008):

a) poboljšano brtvljenje prstenastog prostora u HPHT uvjetima

Rezultati ispitivanja, u usporedbi s konvencionalnim portland cementom (portland cement, usporen, s 35% SiO_2), pokazali su da cementni kamen nastao očvršćivanjem cementne kaše na bazi ekspanzivnog cementa osigurava vrlo dobro brtvljenje u čvrstim formacijama. Na temelju broja ciklusa primijenjenih na svakoj razini tlaka (do 689 bar s porastom od 69 bar i temperaturom od 93 °C), cementni kamen apsorbira 5 puta više energije prije razrušenja nego cementni kamen nastao očvršćivanjem cementne kaše na bazi konvencionalnog cementa.

b) poboljšano smično vezanje (*engl. shear bonding*)

Pri testiranju smične veze, cementni kamen nastao očvršćivanjem cementne kaše na bazi konvencionalnog cementa imao je čvrstoću veze (otpornost na smicanje) od oko 9,7 x 10^5 N/m^2 (140 psi) za razliku od cementnog kamena nastalog očvršćivanjem cementne kaše na bazi ekspazivnog cementa koji je imao čvrstoću veze od 127 x 10^5 N/m2 (1 840 psi), što je povećanje od približno 13 puta.

c) poboljšano hidrauličko vezanje (*eng. improved hydraulic bonding*)

Otpornost cementnog kamena nastalog očvršćivanjem cementnih kaša na bazi raznih materijala na protok vode mjerena je na sobnoj temperaturi. Cementni kamen nastao očvršćivanjem cementne kaše na bazi klasičnih cemenata imao je hidrauličku vezu od 262 x 10^5 N/m^2 (3 800 psi) za razliku od cementnog kamena nastalog očvršćivanjem cementne kaše na bazi ekspazivnog cementa koji je imao 414 x 10^5 N/m^2 (6 000 psi).

U praksi je za rješavanje problema gubitka integriteta bušotine u HPHT uvjetima korištena i pjenocementna kaša.

Pjenocementna kaša je korištena za cementaciju zaštitnih cijevi u bušotinama na polju Shearwater u središnjem dijelu Grabena u Sjevernom moru (Teodoriu i dr., 2008). Prisutnost povećanih tlakova u prstenastom prostoru u bušotinama koje su izrađene na polju Shearwater rezultirala je ozbiljnom zabrinutošću oko dugoročnog integriteta bušotine. Ležište je označeno kao HPHT s početnom ležišnom temperaturom od 182 °C i ležišnim tlakom od 1 048 bar pri izmjerenoj dubini od 5455 m. Predloženo je korištenje pjenocementne kaše gustoće od približno 1830 kg/m^3 zbog sljedećih prednosti (Teodoriu i dr., 2008):

a. u usporedbi s cementnim kašama na bazi klasičnog cementa, pjenocementne kaše posjeduju izvrsna svojstva za istiskivanje isplake, imaju manji ukupni gubitak filtrata i kompenziraju skupljanje cementnog kamena koje je prisutno kod cementnih kamena nastalih očvršćivanjem cementnih kaša na bazi klasičnih cemenata;
b. cementni kamen nastao očvršćivanjem pjenocementne kaše je fleksibilniji i ima sposobnost izdržati naprezanja izazvana visokim temperaturama i tlakovima;
c. visoka vlačna čvrstoća cementnog kamena na bazi pjenocementne kaše učinila ga je otpornijim na pukotine izazvane vlačnim naprezanjem.

Korištenjem pjenocementnih kaša u HPHT uvjetima postiže se isplativost cementacije iako početni trošak može biti viši od cementnih kaša na bazi klasičnog cementa, a također smanjuju se zdravstveni i ekološki rizici. Ovisno o uvjetima u bušotini, može se zahtijevati određena kvaliteta cementnog kamena. Aditivi koji se dodaju portland cementu kod pripreme cementne kaše mogu se koristiti za postizanje određenih svojstava cementne kaše i cementnog kamena. Na primjer, cementni kamen nastao očvršćivanjem cementnih kaša na bazi portland cementa može se modificirati dodavanjem aditiva tako da izdrži vrlo visoke temperature do 371 °C i velike tlakove do 2 068 bar (Teodoriu i dr., 2008).

5.2 Aditivi za smanjenje filtracije

Pri utiskivanju cementne kaše u prstenasti prostor, vrlo je važno kontrolirati volumen izdvojenog filtrata, odnosno volumen izdvojene tekuće faze iz cementne kaše pod djelovanjem diferencijalnog tlaka. Filtracija se odvija zbog razlike između dinamičkog tlaka tijekom protiskivanja cementne kaše i slojnog tlaka u stijenama koje su u kontaktu s cementnom kašom. Izdvajanje filtrata iz cementne kaše je veće što je ta razlika veća, odnosno što je veći diferencijalni tlak (Gaurina-Međimurec, 2016). Aditivi za smanjenje filtracije (*eng. fluid loss control additives*) u HPHT uvjetima koriste se za održavanje konstantnog omjera vode i krutih tvari u cementnim kašama. Aditivi za smanjenje filtracije pomažu u sprečavanju (Frittella i dr., 2009):

- prerane dehidratacije cemente kaše,
- promjene reoloških svojstava cemente kaše i
- oštećenja ležišnih stijena filtratom cementne kaše.

Količina filtrata izračunata prema API Spec. 10 ovisi o tipu cementacije. Za duboko ugrađene kolone zaštitnih cijevi ili lajnere, maksimalni gubitak filtrata trebao bi biti između 40 i 100 ml za 30 minuta (Frittella i dr., 2009).

5.3 Usporivači

Ukoliko je potrebno dulje vrijeme zgušćivanja cementne kaše, najčešće prilikom izvođenja cementacije duboko ugrađenih kolona, 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 zgušćivanja cementne kaše, jer je potrebno određeno vrijeme da se voda ″probije″ do cementa i započne proces hidratacije minerala klinkera. Izbor usporivača je još jedan važan aspekt u HPHT bušotinama jer mala promjena u temperaturi od oko 5 °C može rezultirati velikom promjenom vremena zgušnjavanja, jer su neki usporivači osjetljiviji na temperaturu od ostalih (Frittella i dr., 2009). Jednako tako, male varijacije ne bi trebale davati velike promjene u vremenu zgušćivanja. Vrijeme zgušćivanja u uvjetima visokih temperatura ovisi o količini usporivača koji je dodan u vodu za priremu cementne kaše. Važno je zadržati dobar omjer aditiva i cementa. Da bi imali dobar rezultat, obično se koristi visokotemperaturni lignosulfonatni usporivač ili sintetski visokotemperaturni usporivač (Frittella i dr., 2009).

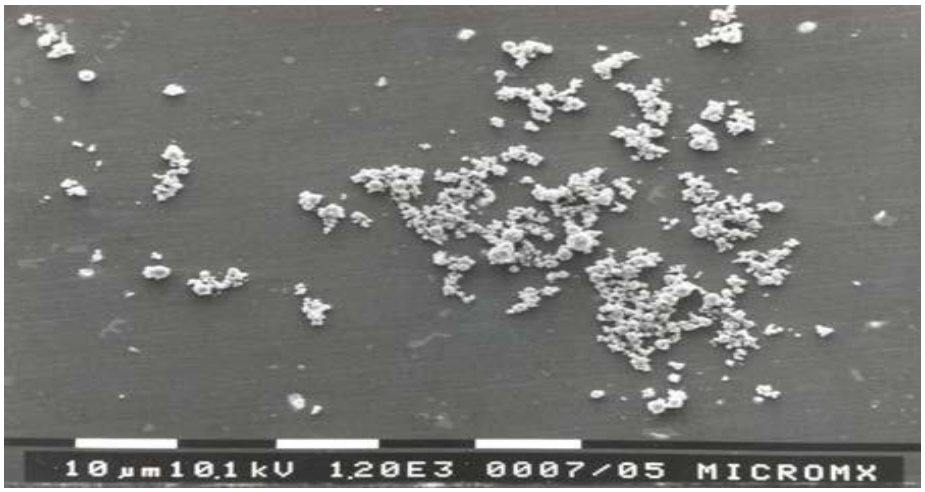
5.4 Oteživači

Oteživači se dodaju cementnoj kaši radi povećanja njene gustoće. HPHT uvjeti zahtjevaju gustoće cementne kaše veće od 2 000 kg/m^3. Oteživači su: barit, hematit i manganov tetraoksid. Barit je izvorni oteživač koji se koristi za bušotine u HPHT uvjetima. Ima gustoću od približno 4 200 kg/m^3, ali zahtijeva značajne količine vode za vlaženje čestica cementa. Volumen barita koji je potreban da se postigne zahtjevana gustoće cementne kaše za HPHT bušotine može dovesti do velikih vrijednosti reoloških svojstava i smanjiti tlačnu čvrstoću cementnog kamena. Osim toga, barit se brzo taloži kada se doda u vodu za pripremu kaše i zato se mora suho miješati s cementom (Frittella i dr., 2009).

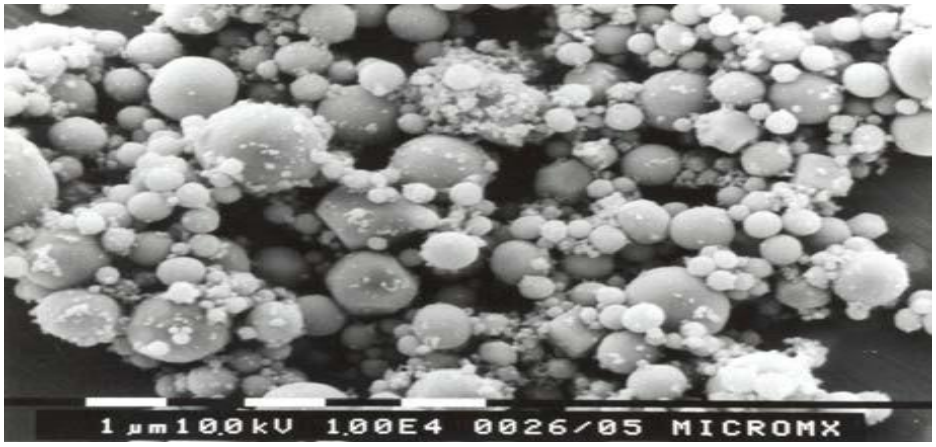
Hematit je uveden za prevladavanje problema koji se javljaju pri korištenju barita. Nastaje mljevenjem minerala te ima gustoću od približno 4 900 kg/m^3. Kao i kod barita, pojavljuju se problemi kao što su velike vrijednosti viskoznost cementne kaše, poteškoće pri miješanju cementne kaše i još uvijek je potrebno pomiješati suh hematit s cementom. Suho miješanje oteživača s cementom može dovesti do varijacija u postotku tijekom dodavanja suhe cementne mješavine u jedinicu za pripremu cementne kaše (*eng. cementing unit*), što otežava postizanje jednake gustoće cementne kaše (Frittella i dr., 2009).

Manganov tetraoksid (Mn_3O_4) je uveden 1991. godine i to kao novi oteživač koji dispergira u vodi (slike 5-1 i 5-2). Manganov tetraoksid sadrži > 95% manganovog oksida i ima gustoću od 4 800 kg/m^3 (Frittella i dr., 2009). Ovaj materijal je nusproizvod u proizvodnji fero-mangana, nastao nakon reakcije pri ekstremnim temperaturama. Njegove čestice su

veličine 5 μm i uvelike poboljšavaju svojstva suspenzije, što omogućuje jednoliku gustoću cementne kaše i bolju kontrolu tlaka u bušotini. Najvažnija karakteristika manganovog tetraoksida je da se može dodati direktno u vodu za pripremu cementne kaše (eng. *mixing water*), a da ne dođe do njegovog naglog taloženja. Ako se uvjeti cementiranja promjene na lokaciji bušotine, dodavanje ovog proizvoda izravno u vodu može uštedjeti vrijeme i novac. Također, cementne kaše koje sadrže manganov tetraoksid obično očvršćavaju u cementni kamen veće tlačne čvrstoće od kaša otežanih na istu gustoću dodavanjem hematita ili barita (Frittella i dr., 2009).



Slika 5-1. Izgled 10μm manganovog oksida (povećanje 1200 puta) (Frittella i dr., 2009).



Slika 5-2. Izgled 1μm manganovog oksida (povećanje 10000 puta) (Frittella i dr., 2009).

5.5 Razdjelni fluid

Uklanjanje isplake je važno u svim cementacijama, ali je posebno važno kada se cementacija odvija u HPHT uvjetima radi potpunijeg protiskivanja cementne kaše i dobre cementne veza. Razdjelni fluid se općenito koristi kako bi se održala kontrola tlaka u bušotini, jer se tijekom protiskivanja cementne kaše mora održavati minimalni nad tlak. Važno je uzeti u obzir razliku između gustoće razdjelnog fluida i gustoće isplake, te između gustoće cementa i gustoće razdjelnog fluida. Razlika u gustoći između svaka dva fluida bi trebala biti oko 10%. Za najbolje uklanjanje isplake tijekom cementacije, turbulentni tok biti će postignut ako je brzina u prstenastom prostoru veća od 80 m/min (262 ft/min). Najmanje 200 m razdjelnog fluida treba protisnuti ispred cementne kaše i 50 m iza cementne kaše kako bi se izbjeglo onečišćenje cementne kaše isplakom (Frittella i dr., 2009). Uklanjanja isplake ispred cementne kaše, dodatno se poboljšava pomicanjem kolone zaštitnih cijevi (rotacija i pomicanje gore-dolje) i centriranjem kolone zaštitnih cijevi u kanalu bušotini (Frittella i dr., 2009).

5.6 Korištenje aditiva za povećanje volumena cementnog kamena

Žareni magnezijev oksid (MgO) može se upotrijebiti kao dodatak cementu za povećanje volumena (ekspanziju) cementnog kamena i poboljšanja cementne veze. Yetunde i Ogbonna (2011) su, na temelju provedenih istraživanja zaključili da se dodavanjem ovog aditiva (ekspandera) povećava smična čvrstoća cementnog kamena, ali se smanjuje tlačna čvrstoća cementnog kamena do vrijednosti koja je još uvijek veća od preporučene minimalne vrijednosti tlačne čvrstoće. Vrijednosti smične i tlačne čvrstoće cementnog kamena smanjuju se proporcionalno povećanju temperature žarenja MgO. Općenito, što je veća temperatura žarenja, to MgO postaje čvršći i teže reagira s cementom. Žarenje magnezijevog oksida provodi se radi usporavanja procesa hidratacije cementa kad mu se doda voda. Ovi aditivi potpuno su hidrirani nakon stvrdnjavanja cementnog kamena, što im omogućuje da osiguraju izvrsnu ekspanziju cementnog kamena pri temperaturi stvrdnjavanja do 288 °C. Magnezijev oksid žaren na 1 200 °C dodaje se u cementnu kašu namjenjenu za cementiranje pri temperaturama iznad 140 °C, a onaj žaren na 1000 °C koristi se za temperature od 100 °C do 150 °C. Korištenje MgO na temperaturama ispod onih za koje je namijenjen neće biti korisno jer će hidratacija biti prespora da osigura potrebnu ekspanziju cementnog kamena. Odgovarajući učinak ekspanzijskog aditiva postići će se ako MgO reagira istovremeno s hidratacijom cementa (Yetunde i Ogbonna, 2011).

5.7 Učinkovito istiskivanje isplake

Najvažniji čimbenik za uspješnu primarnu cementaciju je pravilno i potpuno istiskivanje isplake te kvalitetna veza cementnog kamena za kolonu zaštitnih cijevi i za stijenu koja osigurava hermetičnost prstenastog prostora. Ako isplaka nije pravilno istisnuta kanalići (*eng. channels*) i/ili džepovi isplake mogu ostati u cementiranom prstenastom prostoru, što može dovesti do komunikacije između zona i korozije zaštitnih cijevi. Na kvalitetu veze između cementnog kamena i kolone zaštitnih cijevi negativno utječu: premazi od isplačnih aditiva (polimeri, inhibitori korozije, itd.), uljne i sintetičke isplake. Razdjelni fluid (*eng. spacer*) i ispirni fluid (*eng. washer*) su učinkovita sredstva za efektivno istiskivanje isplake jer odvajaju cementnu kašu i isplaku, te poboljšavaju uklanjanje gelirane isplake što omogućuje kvalitetniju cementnu vezu. Ispitivanje kompatibilnosti isplake i cementne kaše s razdjelnim fluidom mora se provesti kako bi se osiguralo da neće biti problema s nekompatibilnošću kada se cementna kaša utiskuje u bušotinu (Yetunde i Ogbonna, 2011).

Istiskivanje isplake važno je u svim cementacijama jer je dodirna površina između cementne kaše (kasnije cementnog kamena) i stijene ovisna o njezinoj učinkovitosti, ali je u HPHT bušotinama osobito važno postići potpuno popunjavanje prstenastog prostora cementnom kašom i dobru vezu zaštitne cijevi/cementni kamen/stijene. Da bi isplaka bila učinkovito istisnuta, mora imati (Yetunde i Ogbonna, 2011) :

- niski omjer plastične viskoznost i naprezanja pri pokretanju,
- minimalan razvoj čvrstoće gela.

Dizajn isplake, njeno istiskivanje iz prstenastog prostora i zamjenjivanje cementnom kašom važano je za uspjeh cementiranja, jer ne smije postojati nekompatibilnost koja bi mogla uzrokovati nastanak taloga (*engl. sludge*) i probleme na dnu kanala bušotine.

5.8 Dizajn cemente kaše za spriječavanje migracije plina u HPHT bušotinama

Migracija plina je u 25% slučajeva uzrok neuspjele primarne cementacije (Yetunde i Ogbonna, 2011). Glavna svrha cementacije prstenastog prostora je osigurati učinkovitu zonsku izolaciju tijekom radnog vijeka bušotine kako bi se nafta i plin mogli pridobiti sigurno i ekonomično. Jedan od glavnih problema za postizanje ovog cilja je migracija plina u prstenastom prostoru nakon cementiranja bušotine. Glavni čimbenik koji sprječava prodor

plina u stupac cementne kaše neposredno nakon cementacije je hidrostatički tlak stupca cementne kaše i stupca isplaka iznad njega. Ovaj tlak mora biti veći od slojnog tlaka u ležištu plina radi sprečavanje prodora plina u stupac cementne kaše. Osim toga, tlak u prstenastom prostoru ne smije prelaziti tlak frakturiranja stijene kako bi se izbjegli gubici cementne kaše. Sposobnost cementne kaše da prenosi hidrostatički tlak koji utječe na ukupni hidrostatički tlak u prstenastom prostoru, funkcija je čvrstoće gela cementne kaše. Što je veća čvrstoća gela, niža je transmisivnost hidrostatičkog tlaka u prstenastom prostoru na dno i stijenke kanala (Yetunde i Ogbonna, 2011).

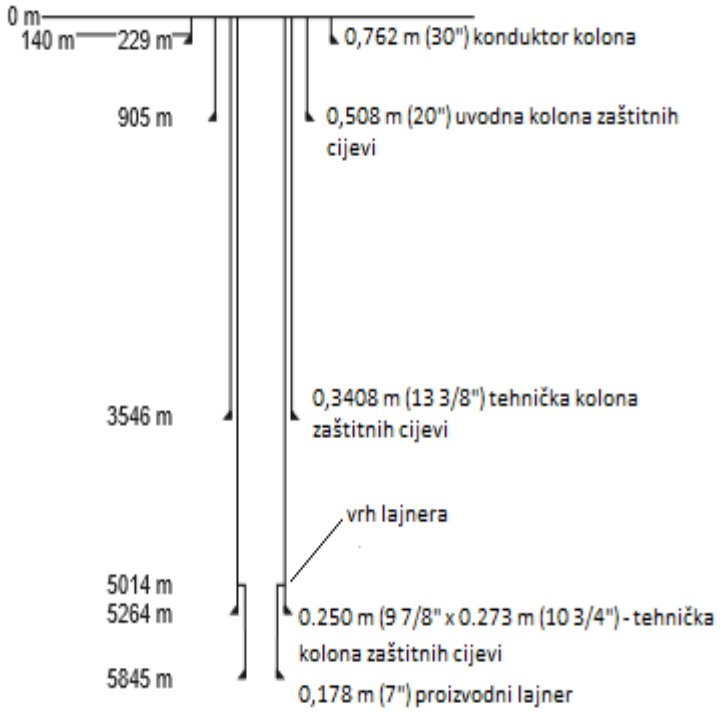
Vrijeme od trenutka kad se zaustavi protiskivanje cementn kaše pa sve do trenutka kad čvrstoća gela cementne kaše (*SGS, eng. Static Gel Strength*) ne dosegne 51 Pa (100 lb/100 ft^2) naziva se vrijeme "nultog gela". Kada vrijednost čvrstoće gela cementne kaše dosegne 51 Pa, cementna kaša počinje gubiti sposobnost prijenosa hidrostatičkog tlaka. Kada vrijednost čvrstoće gela cementne kaše dosegne 255 Pa, kaša više nije fluid već očvršćava u cementni kamen (ali nedovoljne čvrstoće da spriječi migraciju plina) i ne prenosi hidrostatički tlak na dno i na stijenke kanala bušotina . Vrijeme potrebno za povećanje čvrstoće gela cementne kaše od 51 Pa do 255 Pa naziva se "prijelazno" vrijeme (*engl. transition time*). Za sprječavanje migracije plina kroz stupac cementne kaše, vrijeme "nultog gela" može biti dugo, ali "prijelazno" vrijeme mora biti što kraće, poželjno je do 30 minuta (Yetunde i Ogbonna, 2011).

6 PRIMJERI IZ PRAKSE

U nastavku se navode primjeri cementiranja kolona zaštitnih cijevi u HPHT uvjetima na poljima u sjevernom moru, u Italiji i u Maleziji.

6.1 Cementacije kolona u bušotinama HPHT polja u Sjevernom moru.

U nastavku se opisuje cementiranje kolona zaštitnih cijevi u šest bušotina na dva odobalna polja na području Srednjeg Grebena Sjevernog mora, pet bušotina je izbušeno na polju Franklin i jedna je izbušena na polju Gleng. Na slici 6-1 prikazana je tipična konstrukcija jedne od navedenih šest bušotina.



Slika 6-1. Shematski prikaz konstrukcije bušotina na polju Franklin i Greben u Sjevernom moru (North i dr., 2000)

Stvarna vertikalna dubina bila je u prosjeku 6 000 m, temperature su bile preko 200 °C, razlika između tlaka frakturiranja i pornog tlaka bila je mala, a tlak na dnu bušotine premašio je 1 100 bar (North i dr., 2000). Kut otklona kanala bušotine od vertikale iznosio je od 0° do maksimalno 35°. Navedeni bušotinski uvjeti su jedni od najzahtjevnijih u razradi polja u Sjevernom moru. Zbog HPHT uvjeta, svi aspekti cementacije morali su se pažljivo

procijeniti. Osim toga bilo je potrebno razviti novu i poboljšati postojeću opremu, procese i materijale. Oprema za miješanje cementa je modificirana kako bi se mogli miješati fluidi visoke gustoće potrebne za cementaciju lajnera. Za uspješnost cementacije, trebalo je postići protiskkivanje cementne kaše do željene visine i dobro učvršćenje zaštitnih cijevi bez prekoračenja dopuštene ECD vrijednosti (North i dr., 2000).

Za navedene bušotine, uz visoke temperature značajan je bio brz porast slojnog tlaka u prijelaznoj zoni. Ugradnja kolone zaštitnih cijevi vanjskog promjera 0,25 m (9 7/8“) bila je kritična za postizanje dovoljnog tlaka primanja (*engl*. *leakoff*) da bi se moglo bušiti do potpune dubine uz primjenu isplake gustoće 2150 kg/m^3. Čak i kada je bila ispravno odabrana dubina konačne ugradnje kolone zaštitnih cijevi, mala sigurnosna margina između slojnog tlaka i tlaka frakturiranja predstavljala je problem za korištenje isplake tijekom bušenja kanala promjera 0,216 m (8 ½“) (North i dr., 2000).

Margina predviđenog slojnog tlaka bila je velika i vrlo je brzo rasla na dnu kanala promjera 0,318 m (12 ½“). Na vrhu ležišta, vrijednosti slojnog tlaka i tlaka frakturiranja su bile vrlo blizu, te je razlika između njih odgovarala razlici gustoće od 150 kg/m^3. Prijelazna zona na vrhu ležišta ima tendenciju dotoka i gubitaka, uzrokujući zabrinutost tijekom bušenja. Ona se ponašala kao da „diše“ (*engl. formation breathing*). Zbog toga su svojstva isplake bila od velikog značaja za osiguravanje najboljih uvjeta za cementaciju, u smislu smanjenja ECD-a i postizanja željenih svojstava isplake za cementaciju. ECD je bila izračunata pomoću posebnog računalnog modela koji je dokazan mjerenjem tlaka na dnu bušotine. Zbog točnosti potrebne u izračunima ECD i potrebe da se ima reprezentativne podatke o reološkim svojstvima na dnu bušotine za ispitivanje isplake je korišten novi HPHT reometar. Reometar se također koristio za određivanje reoloških svojstava razdjelnog fluida i cementne kaše kako bi se osigurala maksimalna učinkovitost istiskivanja isplake i protiskivanja kaše (North i dr., 2000).

6.1.1 Prethodno planiranje

Uvjeti s kojima su se izvođači susretali pri cementaciji kolona zaštitnih cijevi u ovim bušotinama bili su jedni od najzahtjevnijih u svijetu. Moralo je biti uključeno opsežno laboratorijsko ispitivanje cementne kaše, posebice one koja je korištena za cementaciju proizvodnog lajnera. Korišteni razdjelni fluid, cement, aditivi i niz opreme namijenjen

visokotemperaturnim radovima, trebali su biti odabrani tako da zadovolje za rad na očekivanim temperaturama.

Karakteristike svake bušotine diktirale su potrebna svojstva cementne kaše. Pažljivi i temeljiti pregled ovih svojstava bio je bitan za osmišljavanje sastava cementne kaše. Inženjeri su kombinirali vrijednosti pojedinih varijabli cementacije kako bi razvili dizajn ukupne cementacije. Poboljšanja u tehnologiji cementiranja omogućila su proizvodnju ugljikovodika iz ležišta koja su preskupa ili preopasna da bi bila ekonomična. Opremanje bušotina u HPHT ležištima ostaje i dalje vrlo skupo i iznosi 40 do 60 miliona dolara. Sigurnosna razmatranja, koja su uvijek važna, morala su biti još intenzivnija u opremanju ovih HPHT bušotina. Primarna cementacija morala je biti uspješna kako bi se izbjegla popravna cementacija ovih šest bušotina (North i dr., 2000).

Temperatura u bušotini je jedan od najvažnijih čimbenika koji utječe na kemijske reakcije i uspješnost cementacije. Tijekom cementacije kolona zaštitnih cijevi u naftnim bušotinama, cementna kaša, postavljena na stvarnu dubinu bušotine, podvrgnuta je progresivnom povećanju temperature od trenutka kada se miješa na površini i utiskuje u bušotinu sve do trenutka u kojem se cementna kaša stvrdne u cementni kamen, a okolne stijene ponovo poprime statičku temperaturu. Temperatura u cirkulaciji i statička temperature utječu na dizajn cementne kaše.

Temperatura na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT) je temperatura koja djeluje na cementnu kašu tijekom njenog utiskivanja u bušotinu. Ona utječe na vrijeme zgušćivanja ili pumpabilnost cementne kaše. U tablici 6-1 prikazana je usporedba temperature predviđene kompjuterskom simulacijom i API standardom (Ispitne tablice su objavljene u API RP 10 B). Temperatura na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT) se može potvrditi s dubinskim termometrima (*engl. downhole temperature recorders)* i kompjuterskim simulatorima cementacije (*engl. computer-based-cemen-job simulator*) Statička temperatura je temperatura stijene koja djeluje na cementnu kašu nakon prekida cirkulacije, tijekom perioda očvršćavanja kaše u cementni kamen. Iako statička temperatura utječu na stvrdnjavanje cementne kaše, temperatura u cirkulaciji ima na cementnu kašu još veći utjecaj (North i dr., 2000).

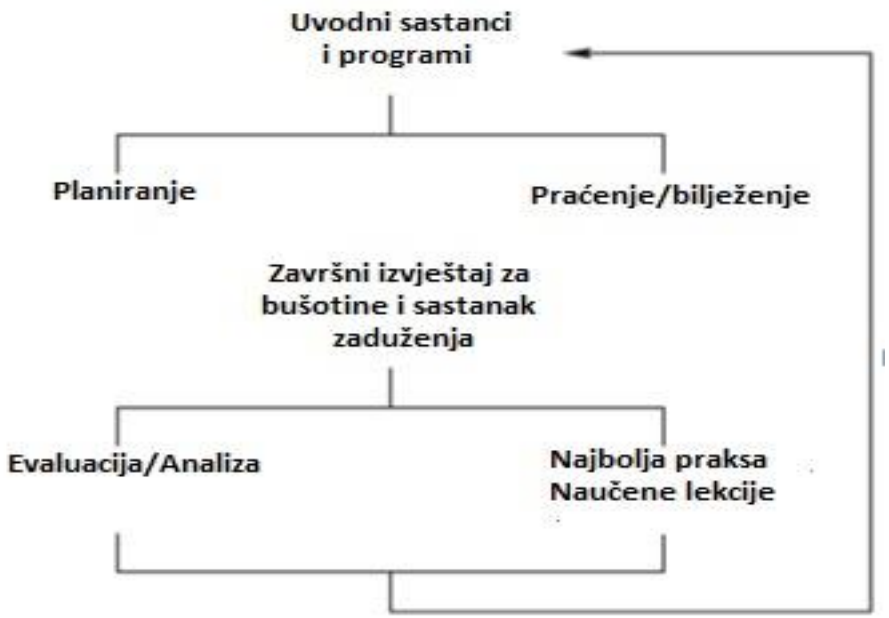
Tablica 6-1. Usporedba temperature predviđene kompjuterskom cimulacijom i API standardom (North i dr., 2000).

Promjer zaštitnih cijevi mm (in)	**Simulirana maksimalna temperatura (°C)**	**API Standard (°C)**
340.8 (13 3/8)	80	109
273 x 250 (10 ¾ x 9 7/8)	125	146
178 (7) (lajner)	180	176

Inženjeri trebaju poznavati statičku temperaturu (BHST) kako bi dizajnirali i ocijenili dugoročnu stabilnost ili brzinu razvijanja tlačne čvrstoće cementnog kamena. Određivanje statičke temperature osobito je važno kod cementacije kolona u dubokim bušotinama, jer temperaturna razlika između vrha i dna stupca cementne kaše može biti velika. Na primjer, cementne kaše koje su dizajnirane tako da se mogu sigurno protisnuti u prstenasti prostor mogu biti preusporene pri temperaturama koje su na dubini vrha stupca cementne kaše što će dovesti do njenog sporijeg očvršćivanja u cementni kamen. Općenito, preveliko usporavanje cementne kaše ne očekuje se ako statička temperatura na vrhu stupca cementne kaše premašuje temperaturu u cirkulaciji (BHCT) (North i dr., 2000). Precizna očitanja temperature su neophodna za cementaciju, osobito pri visokim temperaturama, jer pogreška koja je manja od 3 do 5°C može značajno utjecati na rezultate, čak i kada su za pripremu cementne kaše odabrani materijali kojima se smanjuje njena osjetiljivost na temperaturu. Općenito osjetljivost cementne kaše se povećava kako se povećava temperatura na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT). Zbog toga se, sva laboratorijska ispitivanja cementne kaše trebaju izvoditi s uzorcima cementa iste šarže, vode za pripremu cementne kaše i kemijskih aditiva koji će se na terenu koristiti za razmatranu cementaciju. Uvjeti u bušotini moraju se oponašati što je moguće točnije. Izračunate vrijednosti tlaka i vremena potrebnog da cementna kaša dođe do dna treba koristiti za ispitivanje vrijednosti koje su prikazane u ispitnim tablicama u API RP10B. Korištenje kompjuterskog simulatora je najbolja metoda procjene temperatura na dnu HPHT, horizontalnih ili koso usmjerenih bušotina (North i dr., 2000).

6.1.2 Organizacija

Budući da HPHT operacije povećavaju kritičnost svakog proizvodnog opremanja bušotine, kompanija Elf Exploration UK PLC je razvija te i dalje unapređuje sustav za upravljanje bušotinama (*eng. drilling managment system –DMS*) (slika 6-2) koji omogućuje planiranje i bušenje bušotina te omogućuje analizu izvedbe tako da se naučene lekcije mogu primjenjivati na iduće poslove (North i dr., 2000).



Slika 6-2. Elfov sustav za postupanje kod izrade bušotine (North i dr., 2000)

Elfov sustav za postupanje kod izrade bušotine primijenjen je i na šest razmatranih HPHT bušotina u Sjevernom moru. Programi i uvodni sastanci prije bušenja (*eng. prespud meetings*) omogućili su vezu od planiranja preko cementacije do konačnog bušotinskog izvještaja. U faza prethodnog planiranja uključen je bio Elfov tim za fluide u Aberdeenu, Elfov istraživački center u Francuskoj i Halliburtonov europski istraživački centar u Nizozemskoj. Oni su osmislili proceduru sveobuhvatnog odobalnog programa prije svake cementacije. Takvi programi sadrže sljedeće (North, i dr., 2000).:

- podatke o bušotini,
- program centralizacije kolone zaštitnih cijevi,
- detaljanu pripremu prije cementacije,
- podatke o tlaku u cirkulaciji na temelju podataka iz prethodnih bušotina,

- postupke pripreme razdjelnog fluida i cemente kaše,
- parametre miješanja i utiskivanja, uključujući provjere reoloških svojstava cementne kaše i razdjelnog fluida, kondicioniranje isplake koja je ispred cementne kaše i redoslijed dodavanja aditiva u cementnu kašu,
- predviđenu ECD tijekom protiskivanja odnosno zamjene fluida,
- detalje predviđene cirkulacije, prethodnu predviđenu temperaturu na izlazu (*engl. floline temperature*), bušenja pod tlakom (*engl*. *pressure while drilling*) i
- detaljna izvješća o ispitivanju cemente kaše.

Uspjeh cementacije postignut u ovim zahtjevnim uvjetima bio je izravna posljedica rigoroznih i sveobuhvatnih ispitivanja fluida prije cementacije, pravilnog izvođenja cementacije na terenu, dokumentacije o rezultatima izvještavanja nakon cementacije i analizi rezultata (North i dr., 2000).

Elfov tim za fluide trebao je imati sljedeće osobine i vještine (North i dr., 2000):

- stalno i kompetentno osoblje sposobno za timski rad,
- jasno razumijevanje svojih uloga i odgovornosti,
- odabrano osoblje za svaki specijalni zahvat,
- svijest o platformi i postrojenju,
- odabranu obalnu i odobalnu ekipu,
- dobru komunikaciju između posade na platformi i na kopnu,
- posadu od šest osoba na platformi za kritične poslove: dva iskusna servisna operatera, jedan inženjer, jedan laboratorijski tehničar, jedan nadzornik servisa jedan mehaničare i
- svijest o kritičnosti izvođenja operacija u HPHT uvjetima.

U svrhu stvaranja jedinstvenog tima, za svo obalno i odobalno osoblje osigurane su trening i vježbe za rad u HPHT uvjetima. Inženjer za cementaciju i isplaku bio je unutar iste kompanijske grupe i dijelio je isti ured, što je olakšavalo komunikaciju i pomoglo u stvaranju timskog okruženja. Cilj tima zaduženog za fluide bio je dizajniranje cementne kaše koja (North i dr., 2000) :

- je relativno neosjetljiva na promjene temperature i koncentraciju usporivača,
- ima dobru stabilnost,
- pokazuje smanjenu filtraciju,

- je nepropusna za plin te sprječava moguću migraciju plinova i
- očvršćavanjem u cementni kamen osigurava dugoročnu zonsku izolaciju.

Cementna kaša za cementaciju lajnera napravljena je od mješavine cementa API klase G i 35% kvarcnog brašna. U vodu za miješanje dodani su sljedeći tekući aditivi (North i dr., 2000):

- aditiv za smanjenje filtracije,
- dispergator,
- sintetički usporivač,
- pojačivač usporivača i
- aditivi za stabilnu ranu čvrstoću.

Tijekom miješanja dodani su sljedeći suhi aditivi (North i dr., 2000).:

- oteživač,
- aditiv za ekspanziju cementnog kamena i
- polimer stabilan na visokoj temperaturi.

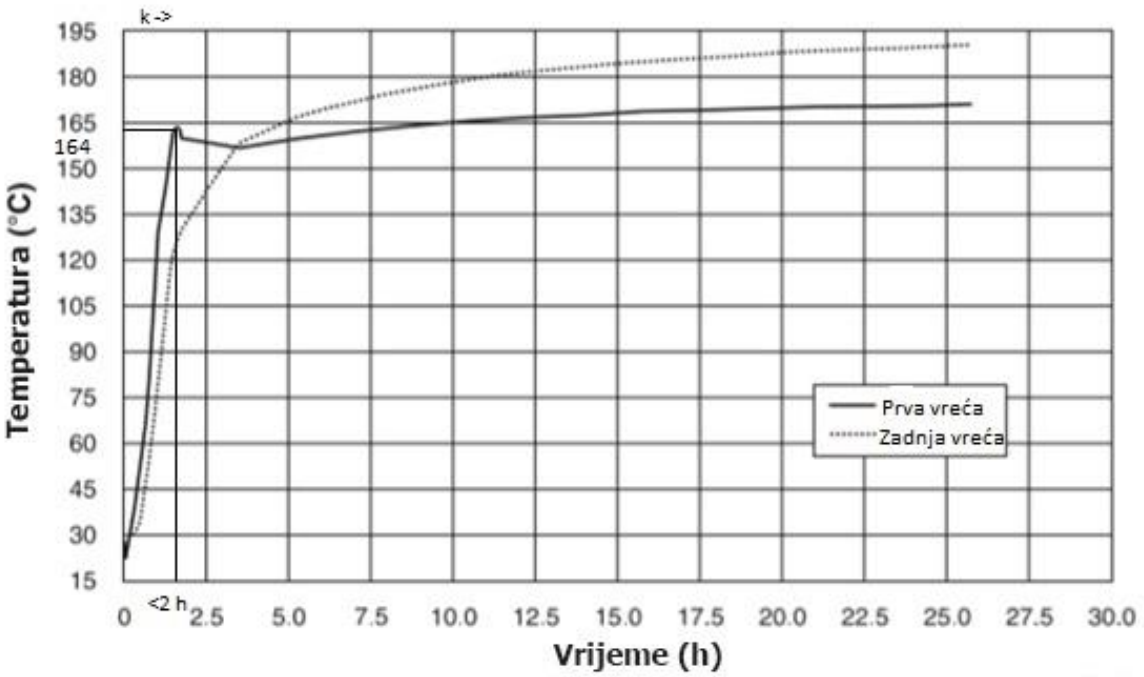
6.1.3 Zaštita okoliša

Za sektor Ujedinjenog Kraljevstva u Sjevernom moru vrijede vladini propise koji zahtijevaju materijale koji moraju biti u skladu s propisima o zaštiti okoliša (The Offshore Chemical Notification Scheme - OCNS). Materijali su karakterizirani volumenima koji mogu biti ispušteni u more. Za cementne materijale kategorije su od A do E. Za materijale kategorije A, ispuštanja su strogo ograničena, dok se materijali kategorije E mogu slobodnije ispuštati u more. U ovom je projektu, osima cementa i cementnih mješavina, upotrijebljeno i 19 aditiva za cement i za razdjelni fluid. Od tih 19 aditiva 68% je zadovoljilo klasifikaciju E kategorije. Od preostalih 32%, 16% je bilo kategorije D i preostalih 16% kategorije C. Korištenje tih materijala, od kojih je većina uvrštena u kategoriju E, nije ometalo tehničku izvedbu kaša te je pokazano da se mogu postići kvalitetni rezultati, a da se istovremeno poštuju propisi o zaštiti okoliša (North i dr., 2000).

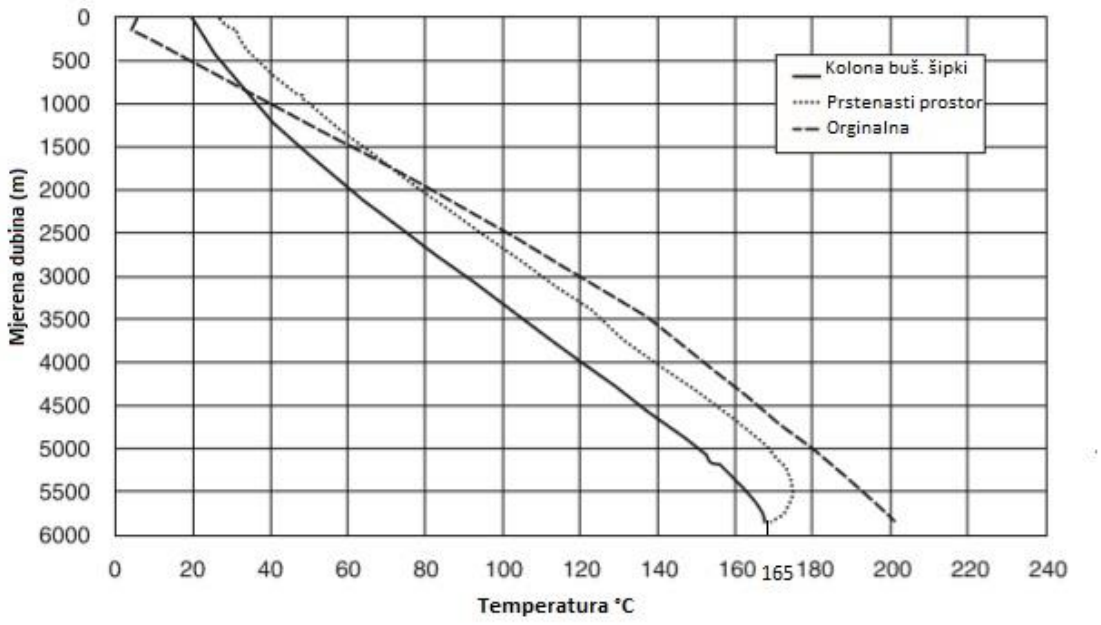
6.1.4 Simulator temperatura

Temperatura ima značajan utjecaj na sigurno protiskivanje cementne kaše. U normalnim uvjetima cementacije kolona u vertikalnim bušotinama, API tablice i proračuni uspješno se

koriste već dugi niz godina. Međutim, u HPHT bušotinama, visoke temperature utječu na svojstva kaše i stoga je izuzetno važna točnost predviđene temperature tijekom cementacije. Također, zbog dubine ugradnje kolone zaštitnih cijevi i potrebnog volumen cementne kaše i vrijemena protiskivanja su bila veća od normalnih. To povećava prihvatljivo vrijeme zgušnjavanja cementne kaše potrebno za njeno protiskivanje do željene visine u prstenastom prostoru. Stoga je za HPHT uvjete, potrebno dodati više usporivača u cementnu kašu. Ako cementna kaša sadrži previše usporivača, razvitak tlačne čvrstoće može potrajati duže nego je to potrebno. Na primjer, povećanje koncetracije usporivača negativno će djelovati na razvoj tlačne čvrstoće na vrhu stupca cemente kaše, odnosno na vrhu dugačkog lajnera. Također previše usporivača može također štetno utjecati na druga svojstva, kao što je otpor cementne kaše migraciji plina. Iz tih je razloga za predviđanje temperature tijekom cementacije korištena kompjuterizirana, simulacija temperature bušotinskih fluida za predviđanje temperature cementacije (North i dr., 2000).

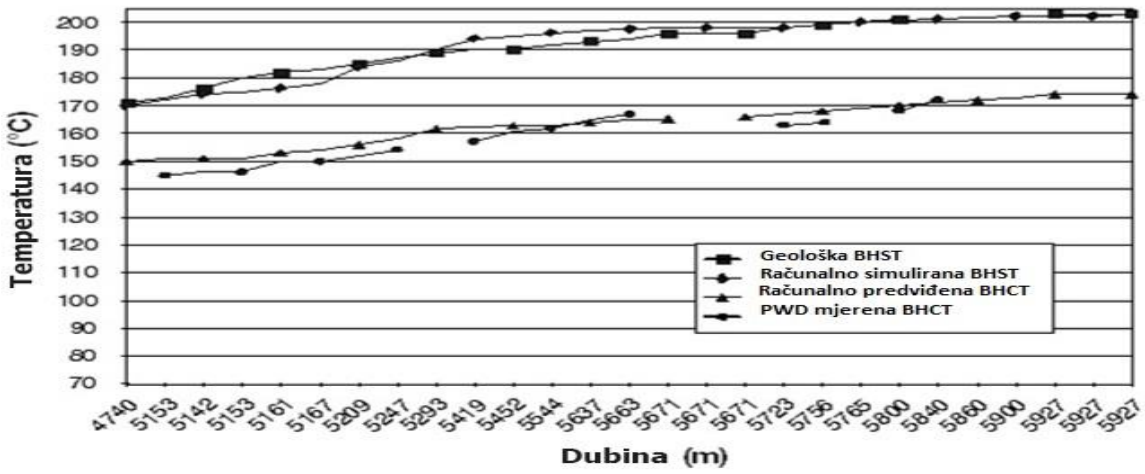


Slika 6-3. Promjena temperature cementne kaše s vremenom (North i dr., 2000).



Slika 6-4. Promjena temperature fluida u cirkulaciji s dubinom (North i dr., 2000)

Ovaj program simulacije temperature koristio se opsežno za sve cementacije zaštitne cijevi. Točnost softvera testirana je godinama, a prethodno je potvrđena mjerenjima u bušotini. Stvarne temperature u bušotini mjerene su na jednoj od tih bušotina pomoću alata za mjerenje tlaka tijekom karotaže (*engl. logging tools*) za korelaciju s računalnim simulacijskim programom. Podaci su pokazali dobru korelaciju između simuliranih temperatura, računalom predviđenih temperatura i temperatura izmjerenih u bušotini (slika 6-5) (North i dr., 2000).

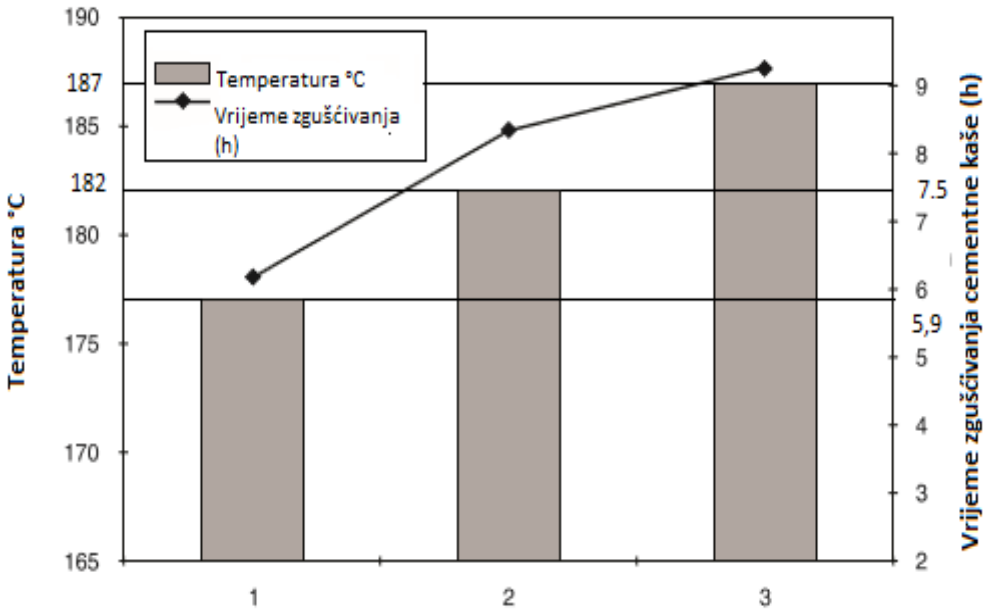


Slika 6-5. Korelacija predviđene i mjerene statičke (BHST) i dinamičke (BHCT) temperature (North i dr., 2000)

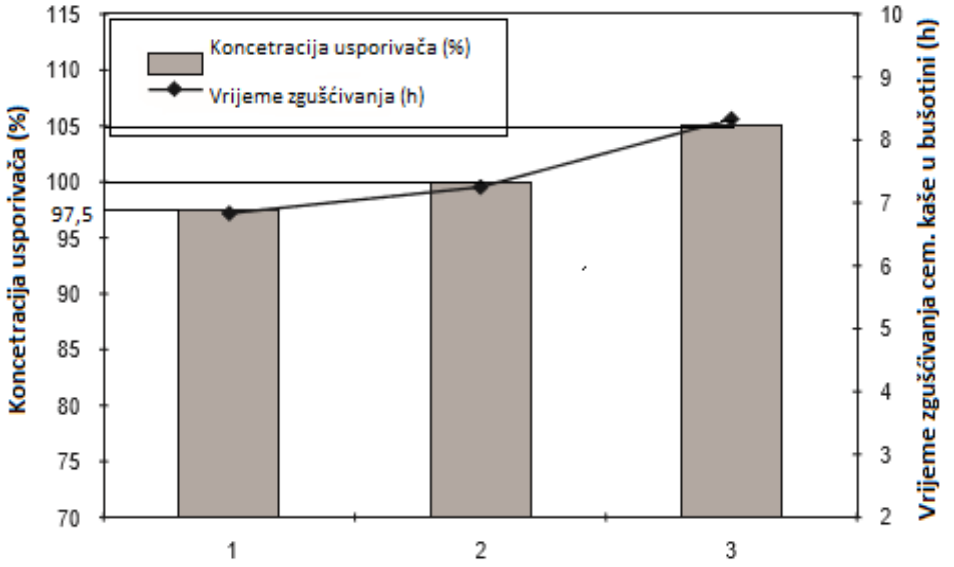
Maksimalna temperatura u cirkulaciji (BHCT) za ispitivanje vremena zgušnjavanja kaše određena je za najgori scenarij niske brzine protoka i najkraćeg vremena cirkulacije prije cementacije. Najgori scenarij ponovnog postizanja statičke temperature temelji se na najdužoj cirkulaciji prije početka cementacije pri najvišim mogućim protocima. Ta se temperatura primjenjuje za određivanje razvoja tlačne čvrstoće cementnog kamena na vrhu lajneara (slika 6-3) (North i dr., 2000). Za ispitivanje razvoja tlačne čvrstoće cementnog kamena s vremenom korišten je ultrazvučni analizator (*engl. Ultrasonic cement analyzer - UCA*). Ovaj je instrument izmijenjen kako bi se omogućila primjena stvarnog tlaka na dnu bušotine, umjesto najmanje 207 bar preporučenih prema API standardu. Pri određenim HPHT uvjetima primjena stvarnog tlaka na dnu bušotine rezultirala je za 50% manjim vremenom vezivanja (*eng. set time*) od onog koji je postignut pri uobičajenom minimalnom tlaku prema API (North i dr., 2000).

6.1.5 Procjenjivanje osjetljivosti cementnih kaša

Da bi utvrdili da li se cementna kaša može koristiti pri ovim ekstremnim temperaturama, provođeni su testovi za procjenu osjetljivosti cementne kaše jer su cementne kaše jako osjetljive na promjenu temperature. U početku vrijeme zgušnjavanja je izmjereno s ± 10% preporučene koncentracije usporivača. Kaša je ispitana na temperaturi koja je bila ± 10 °C od ciljane temperature na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT). Istraživale su se i razlike u gustoći. Svi ovi faktori pokazuju da li je kaša prikladna za operacije u HPHT uvjetima. Parametri koji su se ispitivali bili su izmijenjeni za vrijeme projekta, a ± granice su smanjene nakon što su utvrđeni rasponi temperature u bušotini i svojstva cementne kaše. Ovi testovi pokazali su da je kaša za cementaciju lajnera relativno neosjetljiva na promjenu temperature ili koncentraciju usporivača kao što je prikazano na slikama (slike 6-6 i 6-7) (North i dr., 2000).



Slika 6-6. Osjetljivost cementne kaše na promjenu temperature i koncetraciju usporivača na 182 °C (North i dr., 2000)



Slika 6-7. Osjetljivost cementne kaše na koncetraciju usporivača (North i dr., 2000)

Za lajner sekciju odabrali su se (1) nelignosulfatni usporivač (NLS) i (2) usporivači/pojačivači usporivača za visoke temperature (RI) koji su pomogli u pojednostavljenju dizajna cementne kaše. Nelignosulfatni usporivač je učinkovit u cementnim kašama pripremljenim sa svježom vodom na temperaturi na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT) do 121 ºC (250 °F). U cementnim kašama koje su pripremljene sa solju

zasićenom vodom, ovaj usporivač se može koristiti kod temperature na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT) između 121 ºC i 177 ºC (250 ºF i 350 ºF). U kombinaciji s određenim sredstvima za pospješivanje usporivača (*engl. retarder enhancing agents*), nelignosulfatni usporivač može se koristiti u cementnim kašama pripremljenim sa svježom vodom pri temperaturi na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT) do 221 °C (430 °F). Usporivač za visoke temperature je prvenstveno dizajniran za pojačivanje djelovanja uobičajenih usporivača. On je visoko topljiv u vodi i zato cementna kaša pokazuje ujednačena vremena zgušćivanja u laboratoriju te ima manji učinak od drugih usporivača na razvoj tlačne čvrstoće cementnog kamena, naročito u gornjem dijelu dugačkog cementnog stupca (North i dr., 2000).

6.1.6 Testiranje cementne kaše

Postupak ispitivanja cemente kaše odabran je na temelju sljedećih svojstava (North, i dr., 2000):

1. temperatura: najviša simulirana temperatura na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT) i promjena usporivača i temperature;

2. tlak: stvarni tlak na dnu bušotine za vrijeme zgušnjavanja;

3. tlačna čvrstoća pri sljedećim uvjetima na vrha lajnera:

- simulirana temperatura i tlak,
- najniža simulirana temperatura na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT) koja se koristila s najduljim ponovnim postizanjem statičke temperature,
- ultrazvučni analizatori cementa postavljeni na simuliranu temperaturu i stvarni tlak na dnu bušotine (BHP), a ne API minimum od 207 bar (3000 psi) ,

4. standardizirani postupak miješanja:

- redoslijed dodavanja,
- vrijeme potrebno za dodavanje,
- održavanje vode za pripremu kaše,
- vrijeme miješanja kaše na površini i
- temperature miješanja na površini/efekti smicanja,

5. stabilnost kaše:

- sedimentacijski test i

- reološka svojstva u HPHT uvjetima.

6. mala filtracija :

- smanjena mogućnost dehidracije i
- sinergističko skraćenje vremena prijelaza kaše u kamen radi poboljšanja otpornosti na migraciju plina.

Testiranje razdjelnog fluida temeljilo se na sljedećim svojstvima (North i dr., 2000):

- kompatibilnost s isplakom i cementnom kašom,
- sposobnost vlaženja vodom s odgovarajućom upotrebom površinski aktivnih tvari,
- stabilnost pri visokim temperaturama,
- varijabilna reološka svojstva kako bi se omogućilo učinkovito uklanjanje isplake bez povećanja ECD do visokih razina,
- razdjelni fluid na bazi vode s dodatkom površinski aktivnih tvari i
- HPHT uvjeti.

Zbog visokog tlaka, dugog intervala lajnera pokrivenog cementnim kamenom i malih razlika između slojnog tlaka i tlaka frakturiranja postojala je velika mogućnost migracije plina. Kako bi se smanjio taj rizik, cementne kaše postavljene u tim zonama bile su oblikovane tako da se odupiru utoku plina, a kombinacija aditiva je osigurala kratko prijelazno vrijeme iz kaše u kamen. Prijelazna vremena za kaše za cementaciju lajnera varirala su od 10 do 16 minuta, prosječno 12 minuta. Vrijeme nultog-gela (*eng. zero gel time*) cementne kaše koje pokazuje koliko dugo djeluje hidrostatiski tlak u prosjeku je iznosilo više od 2 sata. Primjenom hidrostatičkog tlaka tijekom dugog perioda, a zatim samim prijelazom iz niske čvrstoće gela u visoke čvrstoće gela, smanjena je mogućnost migracije plinova (North i dr., 2000).

6.1.7 Odobalna potvrda vremena zgušćivanja cementne kaše

Vrijeme zgušćivanja cementne kaše za cementaciju lajnera vanjskog promjera 0,178 m (7“) na odobalnoj lokaciji određeno je korištenjem prijenosnog konzistometru koji je odobren prema API standardu. Općenito, vremena zgušćivanja cementne kaše određeno na odobalnoj lokaciji u usporedbi s rezultatima ispitivanja u laboratoriju na kopnu prikazana su u tablici 6-2 (North i dr., 2000).

Tablica 6-2. Vrijeme zgušćivanja cementne kaše u usporedbi s rezultatima laboratorija na kopnu (North i dr., 2000)

Bušotina	Kopno (hr:min)	More (hr:min)
F1	7:18	9:35
F2	7:26	7:40
F3	7:25	6:50
F4	8:20	8:23
F5	7:27	6:06
4d-4	7:33	7:28

U slučajevima u kojima je došlo do znatne varijacije, kao uzrok su bili identificirani fizički čimbenici. U bušotini F1, voda za pripremu cementne kaše se izgubila prije nego što su dodani usporivači, što je rezultiralo lagano preusporenom kašom. Na bušotini F5, voda za pripremu cementne kaše je bila držana na površini dulje od 8 sati, a zbog operativnih ograničenja cementna kaša je bila recirkulirana u miješalici dulje vrijeme (North i dr., 2000).

Uspoređivanje vremena zgušćivanja cementne kaše na moru i na kopnu i reoloških parametara u laboratorijskim testovima omogućilo je dodatne provjere kontrole kvalitete i osiguralo je da miješanje i ispitivanje na kopnu predstavlja fluide. Također su se provodile provjere reoloških svojstava razdjelnog fluida i cementne kaše u pojedinim fazama njihovog miješanja kako bi se osigurala kvaliteta fluida kao što je prikazano u tablici 6-3 (North i dr., 2000).

Tablica 6-3. Provjera reologije razdjelnih fluida i cementne kaše 6 (North i dr., 2000)

	Fluidi	Temp (°C)	Gustoća (kg/m^3)	F300	F200	F100	F60	F30	F6	F3
				Očitanja Pa ($lb/100ft^2$)						
Kopno	Isplaka	50	2150	71	49	30	-	-	9	7
	Razdjelni fluid	82	2250	114	93	69	-	-	38	36
	Cementna kaša	88	2300	275	208	112	69	38	10	6
	Isplaka	50	2150	87	48	28	20	13	6	4

Ispitivanje na moru										
	Razdjelni fluid	82	2250	114	98	78	72	67	67	63
	Cementna kaša	82	2300	270	182	106	61	35	10	5

Početne karakteristike isplake bile su povoljne. Posjedovale su niski omjer PV/YP, ali bez taloženja barita i minimalni razvoj čvrstoće gela (tablica 6-4).

Tablica 6-4. Podaci Fan 70 za N-alkalnu sintetičku isplaku gustoće 2150 kg/m^3 (North i dr., 2000)

Tlak	1205 bar
Temperatura	180°C
Plastična viskoznost (PV)	22 Pa·s
Naprezanje pri pokretanju (YP)	1244,88 Pa

6.1.8 Istiskivanje isplake

Isplaka je imala mali omjer PV/YP , ali bez taloženja barita i minimalnu čvrstoću gela. Sljedeće procedure i postupci korišteni su za što uspješnije istiskivanje isplake (North i dr., 2000):

- kombinacija krutih i opružnih centralizera (*eng. solid and bow spring*) koristila se za sve kritične sekcije s 80% odstupanjem (*eng. standoff*);
- podatljivost stijene eroziji (*eng. erodibility*) pomoglo je optimizirati uklanjanje isplake;
- novi simulator za cementaciju koristio se za oblikovanje fluida i dobava kako bi se osiguralo uklanjanje isplake u ekscentričnom prstenastom prostoru unutar vrijednosti gradijenta tlaka frakturiranja;
- prije cementacije lajnera korišteno je oko 50 m^3 obrađene isplake s nižiom vrijednosti naprezanja pri pokretanju od one koju je imala orginalna isplaka;
- reološka svojstva cementne kaše i razdjelnog fluida izmjerena su pri bušotinskim uvjetima, a stabilnost kaše potvrđena je mjerenjima HPHT reometrom;

- test koji se koristio za određivanje čvrstoća statičkih gelova koristio se za mjerenje erodibilnosti isplake pri stvarnim statičkim vremenima, temperaturama i tlakovima u bušotini.

6.1.9 Kvaliteta kontrole

Postupci korišteni za osiguranje kontrole kvalitete uključivali su (North, i dr., 2000):

• korištenje kvalitetnog cementa API klase G s poznatim ponašanjem u HPHT uvjetima kako bi se postigle uspješne cementacije;

• dokumentiranje broja serije (*engl. batch number*) za svaki aditiv kako bi se osiguralo njegovo praćenje;

• svi materijali su bili odobreni za rad prvi ekstremnim temperaturama;

• uzimanje uzoraka na postrojenju;

• provjerao se sadržaj klorida u vodi za pripremu cementne kaše ;

• koristili su se samo uzorci za ispitivanje koju su se uzeli na platformi (materijali su bili unarpijed dostupni).

6.1.10 Odobalna procedura

Osim gor navedenih postupaka, tim je koristio sljedeće postupke kako bi osigurao kontrolu kvalitete tijekom odobalnih radova (North i dr., 2000):

- pridržavao se detaljnih procedura rada,
- imao je odgovarajuće zalihe materijala za pripremu cementne kaše, serijski evidentiranih i testiranih i
- koristili su kalibriranu vagu za isplaku pod tlakom (*engl. pressurized mud balance*), kako bi se provjerila gustoća svih fluida u svakoj fazi tijekom miješanja.

6.1.11 Procjena uspješnosti cementacije

Za procjenu uspješnosti cementacije korištene su karotaža cementne veze (*engl. Cement Bond Log*) i karotaža varijabilne gustoće (*engl. variable density logging*). Postupci prije cementacije uključivali su upotrebu detaljnog popisa za provjeru, koji je uključivao provjeru

alata za kalibraciju, alata za centralizaciju i kompenzaciju za zaštitne cijevi, veće debljine stijenke, npr. lajner vanjskog promjera 0,178 m (7“), jedinične mase 63,5 kg/m (42,7 lb/ft).

Za lajner vanjskog promjera 0,178 m (7“) približne vrijednosti za slobodnu cijev (*eng. free pipe*) bile su: ± 61 mV, a prijelazno vrijeme (*eng. transition time*) je 280 ms. Prijelazno vrijeme u ultrazvučnom cementnom analizatoru (UCA) koristilo se za dobivanje vrijednosti akustičke impedancije za umjeravanje opreme za karotažu. UCA pokazuje razvoj relativne tlačne čvrstoće uzorka cementne kaše, koji očvršćava u uvjetima tlaka i temperature koji odgovaraju bušotinskim uvjetima. Tlačna čvrstoća se određuje mjerenjem promjene brzine ultrazvučnog signala koji se prenosi kroz cementni uzorak tijekom stvrdnjavanja. S povećanjem tlačne čvrstoće cementnog uzorka, smanjuje se vrijeme prolaza ultrazvučnog signala kroz uzorak.

Na prve dvije bušotine bilo je potrebno nadopunjavati prstenasti prostor cementnom kašom s površine jer je došlo do smanjenje razine u prstenastom prostoru zbog padanja kaše prema dnu nakon cementacije. Na ostalim bušotinama, koristila se posebna lagana cementna kaša (*eng. special light weight cement blend - SLCB*) koja se koristila kao vršna cementna kaša. SLCB se sastojao od mješavine cementa, šupljih keramičkih kuglica i drugih aditiva koji poboljšavaju svojstva cementne kaše i sinergistički čine cementnu kašu niske gustoće s odličnim razvojem tlačne čvrstoće i tiksotropnim svojstvima. Osnovna SLCB kaša imala je gustoću 1 520 kg/m^3. Fizička svojstva cementnog kamena u koji je očvrsnula ova lagana cementna kaša, naročito razvoj tlačne čvrstoće, bila su bolja nego cementnog kamena nastalog od kaše pripremljene s cementom klase G ili cementa s brzim stvrdnjavanjem (*eng. rapid hardening cement - RHC*) koja je imala gustoću 1 920 kg/m^3. Osim toga, kaša je osiguravala tiksotropna svojstva i brzi razvoj čvrstoće gela, što ju je činilo idealnom za elimininiranje propadanja cementne kaše prema dnu i nadopunjavanja prstenastog prostora. Ova SLCB kaša također se klasificirala kao plino-nepropusna. Korištenje ove mješavine uklonilo je potrebu za nadopunjavanjem iza cijevnog prostora cementnom kašom (North i dr., 2000).

6.1.12 Rezultati

U kritičnoj zoni nije bilo potrebe za popravnom cementacijom. Dubina vrha cementnog kamena nakon cementacije u svim bušotinama bila je u rasponu od nekoliko metara od predviđene teoretske dubine vrha cementnog kamena. CBL-om je zabilježena kvalitetna

cementna veza u području proizvodnih zona, što je pokazalo da je zonalna izolacija postignuta (North i dr., 2000).

6.2 Cementacija HPHT bušotina u Italiji

Frittela i dr. (2009) su opisali 15-godišnje iskustvo u cementiranju kolona zaštitnih cijevi ugrađenih u bušotine u sjevernoj Italiji u kojima su na dnu bile visoke temperature i visoki tlakovi. Za dizajniranje cementacije potrebno je imati sljedeće informacije prije nego što se dobije laboratorijski izvještaj o rezultatima ispitivanja cementne kaše (Frittella i dr., 2009):

- opis bušotine,
- temperaturu,
- svojstva isplake,
- slojni tlak i tlak frakturiranja i
- informacije o prethodno izrađenim susjednim bušotinama.

Od 1991. do 2009. svake godine u Italiji je provedeno nekoliko cementacija kolona zaštitnih cijevi u HPHT uvjetima. Kao primjer, podaci za četiri različita slučaja prikazana su u tablici 7-1. Ova četiri slučaja odabrana su kako bi se pokazao napredak tehnologije i poboljšanja koja su tijekom vremena napravljena u dizajniranju i protiskivanju cementnih kaša u HPHT uvjetima (Frittella i dr., 2009).

Cementacija prvih HPHT bušotina započela je 1991. godine te je tada uveden novi oteživač manganov tetraoksid za cementaciju lajnera koji je ugrađen do dubine od ± 5400 m. Temperatura u cirkulaciji na dnu bušotine bila je 132 °C. Tijekom cementacije utisnutno je 140 m^3 cementne kaše gustoće 2000 kg / m^3. Jedno od bitnijih poboljšanja bila je mogućnost dodavanja oteživača izravno u vodu za pripremu kaše izbjegavajući suho miješanje oteživača s cementom prije cementacije. To je omogućilo veću fleksibilnost s obzirom na promjene volumena i parametara cementne kaše sve do trenutka miješanja kaše. Osim toga, kaša je bila manje viskozna i lako se miješala, održavajući dobru stabilnost (Frittella i dr., 2009).

Cementne kaše broj 2 i 3 utiskivane su u 2002 godine u istu bušotinu. Cementna kaša broj 2 je korištena za cementiranje lajnera promjera 0,244 m (9 5/8”) koja je ugrađena do dubine od ± 6000 m s temperaturom na dnu bušotine u cirkulaciji (BHCT) od 139 °C. Gustoća

cementne kaše iznosila je 2150 kg/m^3, a pripremljena je na bazi Portland cementa klase G s 40% kvarcnog brašna (od dobavljača 1). Tijekom cementacije utisnuto je 109 m^3 cementne kaše, od toga 60 m^3 vršne i 49 m^3 repne cementne kaše s različitim vremenom vezivanja (*engl. setting time*).

Cementna kaša broj 3 korištena je 2002. godine za cementiranje lajnera promjera 0,178 m (7“) koji je ugrađen do dubine od ± 6700 m s temperatuom u cirkulaciji (BHCT) od 145 °C. Gustoća cementne kaše iznosila je 2100 kg/m^3, a također je pripremljena na bazi Portland cemena klase G s 40% kvarcnog brašna. U prstenasti prostor je bilo utisnuto 13 m^3 cementne kaše koja je bila mješana u cementnoj mješalici (*eng. batch mixer*) i utisnuta u bušotinu. Tijekom ove cementacije nije bilo nikakvih problema. Za projektiranje ove vrste cementacije pri ovakvim temperaturama bilo je potrebno laboratorijsko ispitivanje. Glavna poteškoća bila je dizajnirati cementnu kašu koja bi bila kompatibilna s zahtjevima korisnika. Odluka o promjeni dobavljača cementa donesena je na temelju kvalitete kako bi se dobili konzistentni laboratorijski rezultati. Nakon zamjene dobavljača cementa poboljšana je kvaliteta, ponovljivost i brzina rezultata laboratorijskih ispitivanja (Frittella i dr., 2009).

Od 2004. do 2008 godine dizajnirane su i cementirane mnoge kolone zaštitnih cijevi u HPHT uvjetima bez ikakvih problema. Cementna kaša broj 4 korištena je 2008. godine za lajner vanjskog promjera 0,127 m (5“) u HPHT uvjetima. Lajner je ugrađen do dubine od ± 6200 m s temperaturom u cirkulaciji (BHCT) od 171 °C. Gustoća cementne kaše iznosila je 2000 kg/m^3, a za pripremu cementne kape korišten je cement novog dobavljača klase G s 40% kvarcnog brašna. Volumen kaše je bio 10 m^3. Kaša je miješana u cementnoj mješalici i kasnije je utisnuta u bušotinu. Tijekom cementacije nije bilo nikakvih problema (Frittella i dr., 2009). Podaci o cementacijama i cementnoj kaši prikazani su u Tablici 7-1

Tablica 6-5. Pregled korištenih podataka o cementaciji i korištenim cementnim kašama (Frittella i dr., 2009).

Povijesni pregled korištenih cementnih kaša				
Broj cementne kaše	1	2	3	4
Godina	1991	2002	2002	2008
Vanski promjer lajner kolone koja je cementirana	0,244 m (9 5/8”)	0,244 m lajner (9 5/8”)	0,178 m (7”)	0,127 m (5”)
Dubina, m	±5 400	±6 000	±6 700	±6 200
BHST, °C	N/A	157	170	180
BHCT, °C	132	139	145	171
Volumen cementne kaše, m^3	140	109	13	16
Gustoća, kg/m^3	2000	2150	2100	2000
Oteživač, %	20,7	30,0	25,0	10,0
Vrsta cementa	Nije dostupno	Dobavljač 1 Klasa G + 40% $Si0_2$	Dobavljač 1 Klasa G + 40% Si02	Dobavljač 2
Gubitak filtrata pri BHCT, ml	205	212	230	385
Očitanja na Fann-u, Pa ($lb/100ft^2$)pri	27 °C / 90 °C	27 °C / 90 °C	27 °C / 90 °C	27 °C / 90 °C
300 o/min	60 / 32	224 / 114	205 / 96	207 / 110
200 o/min	42 / 23	162 / 82	150 / 70	141 / 77
100 o/min	25 / 14	95 / 49	94 / 41	76 / 45
6 o/min	6 / 4	34 / 14	34 / 18	32 / 20
3 o/min	8 / 3	11 / 8	27 / 7	13 / 9

Oprema potrebna za cementaciju kolona zaštitnih cijevi u HPHT uvjetima koristeći manganov tetraoksid u osnovi je ista kao za bilo koju drugu cementaciju. Preporučuje se periodično mješanje (*eng. batch mixing*) jer je kaša za HPHT uvjete osjetljiva na varijacije gustoće, a bilo kakve fluktuacije mogu smanjiti ili povećati vrijeme zguščivanja (*engl. thickening time*). Za cementacije u kojima se koristi veliki volumen cementne kaše (*engl. large volume job*), preporučuje se jedinica za pripremu cementne kaše s automatskom kontrolom cementa tako da se gustoća cementne kaše tijekom cementacije može točno kontrolirati pomoću kompjutera (Frittella i dr., 2009).

Na temelju 15 godišnjeg iskustva zaključeno je sljedeće (Frittella i dr., 2009):

1. manganov tetraoksid se kao oteživač u Italiji upotrebljava od 1991. godine, dajući veću stabilnost cementnoj kaši u usporedbi s onim što je viđeno u prošlosti, kada su korišteni barit i hematit;
2. za postizanje boljih i dosljednijih rezultata laboratorijskih ispitivanja svojstava cementnih kaša koje će se koristiti u HPHT uvjetima, promijenjen je proizvođač cementa te je cement s 40% kvarcnog brašna postao standard;
3. mogućnost dodavanja manganovog tetraoksida izravno u vodu za pripremu cementne kaše pružala je veću fleksibilnost u pogledu promjene volumena i parametara cementne kaše do trenutka miješanja kaše;
4. dodavanje oteživača u vodu za pripremu cementne kaše pomaže u smanjenju troškova u slučajevima kada se volumen mijenja u posljednjem trenutku.

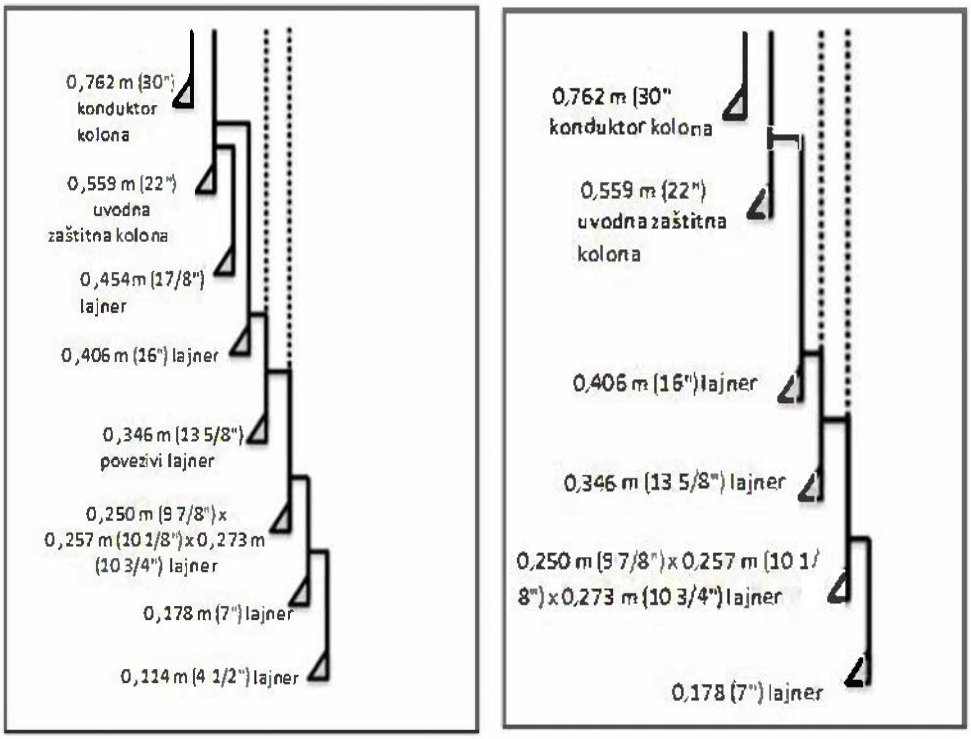
6.3 Razrada HPHT ležišta u Maleziji

Prvi zabilježeni slučaj razrade HPHT ležišta kompanije Petronas, a ujedno i prvi takav slučaj u azijsko-pacifičkoj regiji odvijao se na polju KN u Maleziji. Polje KN nalazi se u blizini obale istočne Malezije. Prvi istražni radovi bili su ležišta tijekom sredine devedesetih godina prošlog stoljeća s ciljem otkrivanja gornjih ležišta nafte s normalnim tlakom i temperaturom. Dublje zalježuća ležišta plina s visokim tlakom otkrivena su 2008. godine jednom istražnom bušotinom. Razrada HPHT plinskog ležišta je podijeljena u dvije faze u kojima se gornji dio ležišta s tlakom na dnu bušotine iznad 896 bar (13 000 psi) i temperaturom blizu 148 °C (300 °F) razrađuje prije nego dublja ležišta s ekstremnim HPHT uvjetima (Sofian i dr., 2016).

Ležišta su sadržavala uglavnom plin s malo kondenzata. Potvrđena je prisutnost CO_2 i H_2S te je bila potrebno poduzeti preventivne mjere sprječavanja korozije. Klastične formacije sadržavale su pješčenjake (*engl. sands*) s tankim slojevima šejla koji je izolirao područja bitno različitog tlaka. Intervali ugljikovodika bili su prisutni na dubini od 1 890 m i nastavljali su se kroz cijelu bušotinu. Predviđanje slojnog tlaka provedeno je na temelju nekoliko metoda. Mjerenja pornog tlaka u ležištu i podaci o slojnom tlaku susjednog operatora analizirani su kao osnova za izradu profila slojnog tlaka u plićim naftnim ležištima. Zatim je korišten simulacijski model ležišta za provjeru podudarnosti podataka s iscrpljenim ležištima s predviđenim padom tlaka tijekom očekivanog datuma bušenja. Dvije nezavisne studije provedene su kako bi se u potpunosti razumio utjecaj na gradijent tlaka frakturiranja kao posljedica iscrpljenosti gornjih ležišta plina. Postignuto je dobro podudaranje predloženih gradijenata geostatičkog tlaka (*engl. overburden gradient*), međutim predviđanje krivulja gradijenta tlaka frakturiranja značajno je variralo između dvije kompanije. Podaci jedne kompanije i podaci susjdenih bušotina ukazivali su da bi gradijen tlaka frakturiranja mogao prekoračiti gradijent geostatičkog tlaka na dubini od 4694 m (15 400 ft), što znači da je gradijent geostatičkog tlaka limitirajući faktor. Uz iznimku dviju plitkih točaka, nisu se mogli naći pouzdani podaci o tlaku primanja formacije (*engl. leak off test data*). Za potrebe dizajna zaštitnih cijevi, dvije krivulje gradijenta tlaka frakturiranja izvedene su pomoću Eatonove jednadžbe za šejl s procijenjenim Poisssonovim omjerom za šejl i pješčenjak. Za projektiranje zaštitnih cijevi korišten je gradijent tlaka frakturiranja šejla, dok je gradijent tlaka frakturiranja pješčenjaka korišten za određivanje dubine postavljanja pete zaštitne kolone. Zbog pada slojnog tlaka i nepoznavanja njegovog utjecaja na gradijent tlaka frakturiranja i opasnosti od nadtlaka koji može dovesti do diferencijalnog prihvata, potrebni su dodatni nizovi zaštitnih cijevi kao plan u slučaju najgoreg scenarija. Kriteriji za odabir konfiguracije zaštitnih cijevi bili su sljedeći (Sofian i dr., 2016). :

- jednostavna i pouzdana opcija,
- smanjenje rizika mogućeg gubitka cirkulacije kroz iscrpljena naftna ležišta koja se nalaze na manjim dubinama i
- postizanje konačne dubine bušotine s dlijetom promjera 0,216 m (8 ½“) uz mogućnost postavljanja još jednog niza zaštitnih cijevi ukoliko dođe do problema zbog male sigurnosne margine tijekom bušenja HPHT intervala.

Ukupno osam kolona zaštitnih cijevi (uključujući konduktor kolonu) je planirano. Usvojena osnovna konfiguracija oslanja se na lajner i povezivi lajner (*eng. tieback liner*) koji je gotovo sličan konfiguraciji koja se primjenjuje u cementaciji zaštitnih cijevi u Meksičkom zaljevu.



Slika a) Slika b)

Slika 6-8. Početni (a) i konačni (b) program zacjevljenja HPHT bušotine KN UUD (Sofian i dr., 2016)

Učeći iz iskustva cementiranja HPHT bušotina s kojim su se susreli operateri u Sjevernom moru, glavni fokus je bio na održavanju integriteta tijekom radnog vijeka bušotina. Lajner i povezivi lajner su ugrađeni na intervalima gdje su bili prisutni ugljikovodici. To je bilo nužno radi poboljšanja pouzdanosti konstrukcije i povećanja razine pouzdanosti uvođenjem dodatne barijere u prstenastom prostoru. Ovaj se dizajn pokazao vrlo učinkovit u teškim bušotinskim uvjetima gdje je zbog male sigurnosne margine teško postići optimalne parametre za dobru primarnu cementaciju (Sofian i dr., 2016).

Promjene profila slojnog tlaka duž kanala bušotine tijekom radnog ciklusa bušotine predstavljale su značajan izazov za dizajn. Očekivalo se da će u plitkim naftnim ležištima koja se protežu između 1 981 m do 2 500 m stvarne vertikalne dubine doći do daljnjeg smanjenja tlaka uslijed eksploatacije i da će to na kraju dovesti do djelovanja većeg diferencijalnog tlaka na kolonu zaštitnih cijevi. Korištenje zaštitnih cijevi debljih stijenki kako bi se zadovoljilo projektnom opterećenju dovelo bi do ograničenja promjera i zasigurno

bi ugrozilo ciljeve bušotine. Kao alternativa, upotrebljena je koncentrična konstrukcija s dvostruko cementiranim prstenastim prostorm kao što je to uobičajeno za bušotine u Meksičkom zaljevu. Detaljne preporuke API RP96 marljivo su upisane u dizajniranje bušotine. Temeljni fokus je bio na kriterijima odabira spojnica u kojima je ISO 13679 CAL-IV kvalifikacija postavljena kao obvezni zahtjev za kritične nizove koji uključuju sva kućišta veličine 0,346 m (13 5/8") i manje. Zbog nedostupnosti ISO 13679 testnih podataka za povezivanje 0,273 m (10 3/4") zaštitnih cijevi s materijalima od 8620 bar (125 000 psi), provedena je analiza konačnih elemenata (*eng. Finite Element Analysis, FEA*). To je učinjeno kako bi se potvrdilo brtvljenje u najgorem slučaju primijenjenih naprezanja i usporedili nalazi s istom spojnicom s 7 580 bar (110 000 psi) materijalima koji su već testirani. Rezultat ukazuje na to da spojnca s materijalom od 8 620 bar ima bolje brtvljenje u usporedbi s materijalom od 7 580 bar (Sofian A i dr., 2016).

Za izračunavanje otpornosti opterećenja na opstanak (*eng. survival load*) za jednu od planiranih zaštitnih cijevi za bušotinu. Korištena je metoda dvoosnog naprezanja (*eng. biaxial stress*) prema normi ISO TR10400. To je učinjeno nakon što je utvrđeno da je opterećenje premašilo ocjenu dobivenu API 5C3 s malom marginom. Kao dodatno osiguranje za dizajn bušotine angažiran je konzultant treće strane da provede neovisnu provjeru dizajna. Dobra podudarnost rezultata projekta postignuta je tijekom postupka vrednovanja.

6.3.1 Cementacija

Sa širim rasponom promjena tlaka i temperature koji se očekuje u HPHT razradnim bušotinama, trajnost cementnog kamena je svakako ključni čimbenik za dugotrajnu izolaciju raskrivenih stijena i integritet bušotine. Iz tog razloga, svaka cementacija u planiranoj bušotini je projektirana tako da cementni kamen izdrži promijenu opterećenja zbog promjena tlaka i temperature tijekom radnog vijeka bušotine. Simulacija je provedena putem softvera kako bi se kvantificirala opasnost od propasti cementnog kamena pri raznim opterećenjima tijekom niza operacija u bušotini. Analizom radijalnih i tangencijalnih naprezanja može se odrediti učinkovitost cementnog kamena tijekom djelovanja tlačnog, vlačnog ili kombiniranog naprezanja. Ovaj detaljni inženjerski postupak doveo je do upotrebe fleksibilnog cementa u područjima gdje se najvjerojatnije može vidjeti promjena amplitude cikličkog naprezanja, tj. kod proizvodnog povezivog lajnera. Nekoliko je izazova naišlo i uspješno se vodilo tijekom cijelog procesa (Sofian A i dr., 2016).

7 ZAKLJUČAK

HPHT uvjeti su svi uvjeti pri kojima je tlak u ležištu iznad 690 bar i temperatura iznad 149 °C. Uvjeti visokog tlaka i temperature ograničavaju raspon dostupnih materijala i tehnologija za iskorištavanje HPHT ležišta, iako se HPHT bušotine izrađuju, privode proizvodnji i prate slično bušotinama s manje zahtjevnim uvjetima.

Prosječno vrijeme bušenja HPHT bušotina je 30% dulje jer je brzina bušenja vrlo mala kroz vrlo zbijene stijene. U HPHT bušotinama razlika između tlaka frakturiranja i slojnog tlaka je mala što znači da se gustoća isplake mora podesiti kako bi se tlak tijekom bušenja zadržao unutar uske sigurnosne margine. HPHT uvjeti uzrokuju i veću složenost cementacije. Takvi otežani uvjeti mogu povećati rizik migracije plina nakon postavljanja cementne kaše i eventualno stvoriti pukotine u cementnom kamenu tijekom životnog vijeka bušotine. Migracija plina je u 25% slučajeva uzrok neuspjele primarne cementacije.

Cementne kaše za HPHT uvjete zahtijevaju posebni dizajn, modificirane postupke ispitivanja i posebne aditive. Za cementacije u uvjetima visoke temperature općenito se koriste cementi API klase G ili H. HPHT uvjeti zahtjevaju gustoće cementne kaše veće od 2000 kg/m^3. Oteživači koji se dodaju radi povećanja gustoće su: barit, hematit i manganov tetraoksid. Ukoliko je potrebno dulje vrijeme zgušćivanja cementne kaše, najčešće prilikom izvođenja cementacije duboko ugrađenih kolona, u cementnu kašu se dodaju visokotemperaturni lignosulfonatni ili sintetički usporivač. Previše usporivača može usporiti vrijeme čekanja na stvrdnjavanja te u bušotinama pod visokim tlakom može dovesti do ulaska plina u stupac cementne kaše. Kombinacija kvarcnog pijeska, kvarnog brašna, hematita, manganovog tetraoksida s aditivima za povećanje volumena cementnog kamena pokazala je najbolje rezultate u smislu smanjenja migracije plina i gubitka filtrata. Da bi se kontrolirala migracija plina, vrijeme "nultog gela" može biti dugo, ali vrijeme prijelaza kaše u kamen treba biti što kraće. Procjena kvalitete cementnog kamena može se obaviti s CBL, VDL, ultrazvučnom karotažom ili kombinacijom istih.

Da bi se prevladao problem opadanje čvrstoće cementnog kamena pri statičkoj temperaturi iznad 110 °C, Portland cementu potrebno je dodati 35% do 40% kvarca. Općenito, cementne kaše pripremljena na bazi cementa u kojem je omjer CaO/SiO_2 manji ili jednak 1 očvršćavaju u cementni kamen veće tlačne čvrstoće i manju vodopropusnost.

Uklanjanje isplake je važno u svim cementacijama, ali je posebno važno kada se cementacija odvija u HPHT uvjetima radi potpunijeg protiskivanja cementne kaše i dobre cementne veza. Razdjelni fluid se općenito koristi kako bi se održala kontrola tlaka u bušotini jer se tijekom protiskivanja cementne kaše mora održavati minimalni nadtlak.

Da bi se osigurala veća kontrola i konzistentnost cementacije u HPHT uvjetima zahtijevaju se velike količine fluida i spemnici. U budućnosti se očekuje izrada bušotina do većih dubina s temperaturom do 260 °C i tlakom od 2068 bar na dnu bušotine što predstavlja velike izazove za pravilan dizajn cementne kaše te planiranje i uspješno izvođenje cementacije kolona zaštitnih cijevi.

8 LITERATURA

1. FRITTELLA F., BABBO M. i Muffo A. 2009. Best Practices and Lesson Learned From 15 Years of Experience of Cementing HPHT Wells in Italy, paper SPE/IADC 125175 presented at the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition held in Manama, Bahrain, 26-28 October 2009.

2. GAURINA-MEĐIMUREC, N.: Predavanja iz kolegija Bušotinski fluidi 2, ak. god. 2016./2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu.

3. IADC Drilling lexicon, 2013. Drilling window.

4. LI L. VIRGILIO C. BONCAN B., BRANDL A. i JORDAN A. 2015. Fundamental Investigation of Mechanical Properties of Additives and Class H Cement Under Downhole Conditions, paper SPE-176175-MS presemted at the SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition held in Nusa Dua, Bali, Indonesia, 20 –22 October 2015.

5. NORTH J., BRANGETTO M. i GRAY E. 2000. Central Graben Extreme Offshore High-Pressure/High-Temperature Cementing Case Study, paper IADC/SPE 59169 presented at the 2000 IADC/SPE Drilling Conference held in New Orleans, Louisiana, 23-25 February 2000.

6. PINE M., HUTTER L, MUTCH J., ADAM J i GRIFFITH J, 2003 Selection of Foamed Cement for HPHT Gas Well Proves Effective for Zonal Isolation—Case History, paper SPE/IADC 79909 presented at presentation at the SPE/IADC Drilling Conference held in Amsterdam, The Netherlands, 19–21 February 2003.

7. RADWAN, A i KARIMI, M. 2011. Feasibility Study of Casing Drilling Application in HPHT Environments,.paper SPE-148433-MS presented at SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, 24-26 October, Muscat, Oman.

8. RAVI S. i SUTTON D. 1990. New Rheological Correlation for Cement Slurries as a Function of Temperature, paper SPE -20449-MS presented at at the 65th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in New Orleans, LA, September 23-26, 1990.

9. ROMMETVEIT, R., FJELDE, K., AAS B., DAY N., LOW E. i SCHWARTZ D. 2003. HPHT Well Control; An Integrated Approach. Paper OTC 15322 Presented at the OTC Drilling Conference, Houston, Texas, 5-8 May.

10. SHADRAVAN A. 2013. A METHOD FOR CEMENT INTEGRITY EVALUATION IN UNCONVENTIONAL WELLS, Submitted to the Office of Graduate and Professional Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of science.

11. SHADRAVAN A., AMANI M. 2012. HPHT 101 - What Every Engineer or Geoscientist Should Know about High Pressure High Temperature Wells, paper SPE 163376 presented at the SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition held in Kuwait City, Kuwait, 10–12 December 2012.

12. SOFIAN A., JAYAH M., BAKAR M., AZMI N,, SYAHMI M., YUSOF M., RAHMAN I., NIZAM BAHARUDDIN M. i IZHAM KAMIL ISHAK M. 2016. Pioneering HPHT Field Development in Malaysia, paper OTC-26735-MS presented at at the Offshore Technology Conference Asia held in Kuala Lumpur, Malaysia, 22–25 March 2016.

13. SRIVASTAVA A., AHMED R., i SHAH S. 2019. Carbonic Acid Resistance of Hydroxyapatite Based Cement, paper SPE-193585-MS presented at the SPE International Conference on Oilfield Chemistry held in Galveston, Texas, USA, 8–9 April 2019

14. TEODORIU C., SCHUBERT J. i UGWU I. 2008. Cement Fatigue and HPHT Well Integrity with Application to Life of Well Prediction, Final Project Report Prepared for the Minerals Management Service Under the MMS/OTRC Cooperative Research Agreement

15. UGWU, I. 2008. Cement Fatigue and Well Integrity With Application To Life of Well Prediction. Texas, USA. MSc Thesis, Texas A&M University.

16. YETUNDE S. i OGBONNA J. 2011. Challanges and Remedy for Cementing HPHT Wells in Nigerian Operation, paper SPE-150751-MS presented at Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 30 July - 3 August, Abuja, Nigeria.

17. WILCOX B., OYENEYIN B. i ISLAM S. 2016. HPHT Well Integrity and Cement Failure, SPE-184254-MS presented at the SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition held in Lagos, Nigeria, 2– 4 August 2016.

18. ZHAOUNG Y., SCHUBERT J., TEODORIU C. i GARDONI P. 2012. HPHT Gas Well Cementing Complications and its Effect on Casing Collapse Resistance, paper SPE-153986-MS presented at SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, 28-30 March, Mumbai, India.

Internet izvori:

19. Chief Counsels Report. 2011. Macondo the Gulf Oil Disaster National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spil and Offshore Drilling. http://www.wellintegrity.net/documents/ccr_macondo_disaster.pdf (01.10.2018).

20. Petrowiki. 2015a. Casing and Tubing http://petrowiki.org/Casing_and_tubing#Production_casing (10.11.2018.)

21. PLANK, J., 2007. Oil well cementing, Technische universität München, Lehrstühl für Bauchemie http://www.bauchemietum.de/masterframework/data/dynamic/Image/tbz1e.gif (11.01.2019.)

22. Schlumberger 2016. HPHT wells, www.slb.com/- /media/Files/...series/Defining-HPHT.pdf. (25.09.2018).

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad samostalno izradio.

_____

Filip Smrečki