

Optimiranje sastava isplake u funkciji povećanja stabilnosti kanala bušotine

Pašić, Borivoje

Doctoral thesis / Disertacija

2012

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:169:387359>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**



Repository / Repozitorij:

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





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Borivoje Pašić

**OPTIMIRANJE SASTAVA ISPLAKE U
FUNKCIJI POVEĆANJA STABILNOSTI
KANALA BUŠOTINE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2012.



UNIVERSITY OF ZAGREB

FACULTY OF MINING, GEOLOGY AND PETROLEUM
ENGINEERING

Borivoje Pašić

**DRILLING FLUID OPTIMIZATION AS A
FUNCTION OF WELLBORE STABILITY
IMPROVEMENT**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2012.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Borivoje Pašić

**OPTIMIRANJE SASTAVA ISPLAKE U
FUNKCIJI POVEĆANJA STABILNOSTI
KANALA BUŠOTINE**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec

Zagreb, 2012.

MENTORICA:

Prof. dr. sc. Nediljka Gaurina-Međimurec, redovita profesorica - trajno zvanje
Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Pierottijeva 6, Zagreb

SAŽETAK

Nestabilnost kanala bušotine vrlo je ozbiljan problem koji prati naftnu industriju od njenih početaka, a najviše je vezan uz izradu kanala bušotine kroz šejl. Prema različitim izvorima šejl čini 75% svih stijena kroz koje se buši, te uzrokuje 90% svih problema vezanih uz nestabilnost kanala bušotine. Osnovni uzrok nestabilnosti kanala bušotine u šejlu je fizikalno-kemijsko međudjelovanje isplake na bazi vode i minerala gline prisutnih u šejlu. Tijekom međudjelovanja dolazi do kretanja vode i iona u/iz šejla, hidratacije, a samim tim i bubrenja minerala gline čime se stvara preduvjet za pojavu nestabilnosti stijenki kanala bušotine. Kako bi se spriječila pojava nestabilnosti kanala bušotine, tijekom bušenja se koriste inhibirane isplake.

Unatoč razvoju novih aditiva za sprječavanje hidratacije šejla i njegovu stabilizaciju, problem nestabilnosti kanala bušotine i dalje se kontinuirano pojavljuje tijekom procesa izrade kanala bušotine. Stoga su u okviru ovog doktorskog rada provedena laboratorijska ispitivanja djelovanja vodenih otopina soli (KCl-a, NaCl-a i CaCl₂) i inhibiranih isplaka (kalijske, slane i gipsne) na smanjenje bubrenja umjetno stvorenih uzoraka stijene (peleta). Peleti su pripremani komprimiranjem praškastog materijala koji se sastojao od montmorilonita, kvarca i kaolinita u točno određenim masenim udjelima. Na temelju dobivenih rezultata bubrenja peleta napravljene su simulacije promjene promjera kanala bušotine, a time i promjene protočne površine u prstenastom prostoru te gradijenta tlaka koji nastaje uslijed otpora protjecanju isplake kroz prstenasti prostor kanala bušotine.

Na temelju rezultata ispitivanja bubrenja peleta u otopinama soli različitih koncentracija utvrđeno je da povećanje koncentracije soli u vodi ne doprinosi značajnijem smanjenju bubrenja. U drugom dijelu ispitivanja posebna pažnja posvećena je definiranju sastava inhibirane isplake te ispitivanju utjecaja koncentracije polianionske celuloze na bubrenje peleta. Sve ispitivane isplake djelovale su na način da su smanjile ukupno bubrenje i intenzitet bubrenja peleta.

Rezultati laboratorijskih ispitivanja prezentirani u ovom doktorskom radu, predstavljaju početak ispitivanja o mogućoj široj primjeni peleta kao zamjene za originalni uzorak šejla u laboratorijskim ispitivanjima međudjelovanja šejla i isplake.

EXTENDED ABSTRACT

Wellbore instability was and is one of the most frequent problems in petroleum industry, especially in the field of drilling and exploration. Anomalies appearing within wellbore instability are mainly caused by the shale formations represented with 75% of all drilled formations. Problems involving wellbore instability include tight hole spots, wellbore diameter enlargement, cavings appearance, inability of carrying out wireline operations, poor hole cleaning and unsuccessful wellbore cementing operations and other. Sometimes, these problems cause even the abandonment of a certain sections or the whole well. According to recent studies, wellbore instability and associated problems costs are more than one billion US dollars per year.

Wellbore instability is a result of mechanical and physico-chemical causes mostly acting concurrently. Shale instability cause basically comes out of its mineralogical composition (especially clay minerals content) and physico-chemical properties. Shale-mud interaction includes water/ions movement in and out of the shales due to pressure differential, osmosis, diffusive flow and capillary pressure. Water entering the shale hydrates clay minerals, i.e. shale swelling. This process changes shale's physico-chemical and mechanical properties.

Many research activities about shale instability causes and shale properties (affecting shale behavior) definition have been carried out by now. Different shale samples, laboratory equipment and inhibitive muds have been used. Laboratory tested shale samples are provided by the wellbore cores, surface sampling or, which is the simplest method, by collecting the samples at the shale shakers during drilling operation. The amount of these samples (cores retrieved) is not enough for laboratory investigation. Another problem is closely connected to sample quality and preservation. During the testing different inhibitive muds are used (water or oil based), sometimes containing more than one shale inhibitor. That way results analysis is more complicated as it is very hard to estimate influence of each inhibitor on lessening and prohibition of clay hydratation and shale swelling. Different laboratory equipment and methods are used by different researchers during the testing processes, which include simple linear swelling measurement of shale samples, pressure transmission measurement and downhole simulation cell measurements. These various methods, equipment, shale samples and muds used make difficult to compare test results and conclusions made by different authors.

Laboratory tests presented within this thesis are done with artificial samples (pellets) made by compacting the powderish material containing exact amount of quartz, montmorillonite and kaolinite. There was total of twelve samples tested divided into three basic groups having different quartz content (0, 10 and 20% by mass weight). There are four samples in each group with different montmorillonite content (80, 60, 40 and 20% by mass weight). Pellets are compacted for thirty minutes by applying pressure of 34,5 MPa, which is equivalent to overburden pressure acting on a shale layer at 1500 m of depth. Laboratory testing is done by treating the powderish samples 24 hours a day inside the dessicator with exact relative humidity, 30-minute compaction, 24-hour swelling in linear swellmeter and 24-hour drying. Sample swelling is tested within different mud types and the sample mass is measured in each above mentioned phase.

In the first phase of laboratory testing pellet swelling is measured in salt solutions (sodium chloride, potassium chloride and calcium chloride) with different salt content (5, 10 and 15% by mass weight). Second phase includes inhibitive muds testing (potassium mud, salt water and gypsum muds). Inhibitive cations content (K^+ , Na^+ and Ca^{2+}) in these muds was constant but the polyanionic cellulose content was changed.

Results of the laboratory tests have shown that higher salt concentration does not contribute to shale swelling lessening. It is very important as higher salt amounts used in muds are ecologically unacceptable due to the great impact on flora and fauna. That was the reason why minimal salt contents (5% by mass weight) were used. Used muds influence on the total pellet swelling and swelling intensity, especially at the early phase of testing. Given results of swelling measurement and inhibitive muds properties gave the simulation of wellbore diameter change, flow area change and pressure drop due to friction induced by resistance of the flowing mud in the annular. This simulation has shown that swelling greatly influences pressure drop in case of smaller wellbore diameter. During the laboratory testing, special attention is directed to preparation and pellets content definition as a good replacement for original shale in laboratory testing of shale and drilling fluid interaction.

Ključene riječi: nestabilnost kanala bušotine, šejl, hidratacija, bubrenje, inhibirane isplake, gipsna isplaka, slana isplaka, kalijaska isplaka

Key words: Wellbore instability, shale, hydration, swelling, inhibitive muds, gyp mud, saltwater mud, potassium mud

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. NESTABILNOST KANALA BUŠOTINE.....	4
2.1. Uzroci nestabilnosti kanala bušotine.....	7
2.1.1. Mehanički uzroci nestabilnosti kanala bušotine	9
2.2. Fizikalno-kemijski uzroci nestabilnosti kanala bušotine	21
2.2.1. Uzorci korišteni u dosadašnjim ispitivanjima.....	23
2.2.2. Laboratorijska oprema korištena za ispitivanja	24
2.2.3. Korišteni fluidi i dobiveni rezultati.....	28
2.3. Šejl	30
2.3.1. Proces stvaranja šejla	30
2.3.2. Gline	31
2.3.2.1. <i>Smektiti (montmoriloniti)</i>	34
2.3.2.2. <i>Ilit</i>	35
2.3.2.3. <i>Kaolinit</i>	36
2.3.2.4. <i>Klorit</i>	37
2.3.2.5. <i>Miješanoslojni minerali gline</i>	38
2.3.3. Hidratacija minerala gline.....	38
2.3.3.1. <i>Kristalinsko bubrenje (površinska hidratacija)</i>	38
2.3.3.2. <i>Osmotsko bubrenje (apsorpcija vode)</i>	39
2.3.4. Podjela šejlova	39
2.3.5. Mehanizmi reakcija između isplake i šejla	41
2.3.5.1. <i>Kretanje isplake uslijed diferencijalnog tlaka</i>	42
2.3.5.2. <i>Kemijska osmoza</i>	43
2.3.5.3. <i>Kapilarni tlak</i>	46
2.3.5.4. <i>Difuzni tok</i>	47
3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA MEĐUDJELOVANJA PELETA RAZLIČITOG MINERALOŠKOG SASTAVA I INHIBIRANIH FLUIDA.	49
3.1. Sastav peleta koji su korišteni u ispitivanjima	51
3.2. Fluidi korišteni tijekom ispitivanja	56
3.2.1. Kalijaska isplaka.....	59
3.2.2. Slana isplaka	61
3.2.3. Gipsna isplaka.....	62
3.3. Opis provedenih ispitivanja	64
3.4. Rezultati laboratorijskih ispitivanja	75
3.4.1. Rezultati laboratorijskih ispitivanja svojstava inhibiranih isplaka	75
3.4.1.1. <i>Filtracijska svojstva inhibiranih isplaka</i>	76
3.4.1.2. <i>Reološka svojstva inhibiranih isplaka</i>	78

3.4.1.3. Vrijeme kapilarnog upijanja	90
3.4.2. Bubrenje peleta različitog mineraloškog sastava u vodenim otopinama soli	92
3.4.2.1. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K u vodenim otopinama soli.....	94
3.4.2.2. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K u vodenim otopinama soli.....	97
3.4.2.3. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K u vodenim otopinama soli.....	100
3.4.2.4. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K u vodenim otopinama soli.....	103
3.4.2.5. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K u vodenim otopinama soli.....	106
3.4.2.6. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K u vodenim otopinama soli.....	109
3.4.2.7. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K u vodenim otopinama soli.....	112
3.4.2.8. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K u vodenim otopinama soli.....	115
3.4.2.9. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K u vodenim otopinama soli.....	118
3.4.2.10. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K u vodenim otopinama soli.....	121
3.4.2.11. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K u vodenim otopinama soli.....	124
3.4.2.12. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K u vodenim otopinama soli.....	127
3.4.3. Bubrenje peleta različitog mineraloškog sastava u inhibiranim isplakama.....	130
3.4.3.1. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K u inhibiranim isplakama.....	136
3.4.3.2. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K u inhibiranim isplakama.....	139
3.4.3.3. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K u inhibiranim isplakama.....	143
3.4.3.4. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K u inhibiranim isplakama.....	146
3.4.3.5. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K u inhibiranim isplakama.....	150
3.4.3.6. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K u inhibiranim isplakama.....	154
3.4.3.7. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K u inhibiranim isplakama.....	157
3.4.3.8. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K u inhibiranim isplakama.....	160
3.4.3.9. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K u inhibiranim isplakama.....	164
3.4.3.10. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K u inhibiranim isplakama.....	167
3.4.3.11. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K u inhibiranim isplakama.....	171
3.4.3.12. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K u inhibiranim isplakama.....	174
4. DISKUSIJA REZULTATA.....	178
4.1. Bubrenje peleta u kalijskoj isplaci	179
4.2. Bubrenje peleta u slanoj isplaci	183
4.3. Bubrenje peleta u gipsnoj isplaci.....	186
4.4. Bubrenje peleta s jednakim udjelom montmorilonita u inhibiranim isplakama...	189
4.5. Usporedba bubrenja peleta u različitim inhibiranim isplakama	193
4.6. Utjecaj bubrenja peleta na smanjenje protočne površine i povećanje gradijenta tlaka u prstenastom prostoru	196
5. ZAKLJUČAK.....	212
6. LITERATURA	219

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Glavna naprezanja u Zemljinoj kori	9
Slika 2-2. Preraspodjela naprezanja u stijeni tijekom bušenja	10
Slika 2-3. Utjecaj gustoće isplake na vrijednosti naprezanja na stijenkama kanala bušotine ..	11
Slika 2-4. Koordinatni sustavi za prikaz naprezanja u stijeni tijekom bušenja	11
Slika 2-5. Promjena pornog tlaka u pribušotinskoj zoni šejla	20
Slika 2-6. Shematski prikaz instrumenta za mjerenje prijenosa tlaka i efikasnosti membrane	26
Slika 2-7. Čelija za simuliranje uvjeta u bušotini	27
Slika 2-8. Tetraedar (a) i tetraedarski listić s heksagonalnim strukturama u jednoj ravnini (b)	32
Slika 2-9. Oktaedar (a) i oktaedarski listić (b)	33
Slika 2-10. T-O sloj (a) i T-O-T sloj (b)	33
Slika 2-11. Struktura smektita (a) i SEM fotografija smektita (b)	35
Slika 2-12. Struktura ilita (a) i SEM fotografija ilita (b)	36
Slika 2-13. Struktura kaolinita (a) i SEM fotografija kaolinita (b)	37
Slika 2-14. Struktura klorita (a) i SEM fotografija klorita (b)	37
Slika 3-1. Izgled peleta nakon komprimiranja	53
Slika 3-2. Bubrenje peleta Wyoming bentonita i Gelplesa u vodovodnoj vodi	55
Slika 3-3. Djelomična dehidracija glinene čestice uslijed zamjene Na ⁺ kationa s Ca ²⁺ kationima	62
Slika 3-4. Eksikator s uzorcima	65
Slika 3-5. Čelija za izradu peleta (a) i uređaj za komprimiranje praškastog materijala s pumpom (b)	66
Slika 3-6. Ispitivanje utjecaja vremena komprimiranja na bubrenje Wyoming bentonita u vodovodnoj vodi pri različitim uvjetima	68
Slika 3-7. Uređaj za mjerenje bubrenja peleta	69
Slika 3-8. Jedinica za mjerenje bubrenja peleta	70
Slika 3-9. Umetanje peleta i sita u ispitnu čeliju	71
Slika 3-10. API filter preša	76
Slika 3-11. Utjecaj koncentracije polianionske celuloze na filtraciju i debljinu isplačnog obloga	77
Slika 3-12. Fann viskozimetar (a) i OFITE viskozimetar model 900 (b)	78
Slika 3-13. Utjecaj polianionske celuloze na plastičnu viskoznost ispitivanih inhibiranih isplaka	81
Slika 3-14. Utjecaj polianionske celuloze na naprezanje pri pokretanju ispitivanih inhibiranih isplaka	82
Slika 3-15. Utjecaj polianionske celuloze na indeks toka i indeks konzistencije ispitivanih inhibiranih isplaka	83
Slika 3-16. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na plastičnu viskoznost kalijске isplake	86
Slika 3-17. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na plastičnu viskoznost slane isplake	86

Slika 3-18. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na plastičnu viskoznost gipsne isplake	87
Slika 3-19. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na naprezanje pri pokretanju kalijske isplake.....	88
Slika 3-20. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na naprezanje pri pokretanju slane isplake.....	89
Slika 3-21. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na naprezanje pri pokretanju gipsne isplake.....	89
Slika 3-22. Uređaj za određivanje vremena kapilarnog upijanja isplake.....	91
Slika 3-23. Vrijeme kapilarnog upijanja inhibiranih isplaka	91
Slika 3-24. Udjel vode u praškastom uzorku neposredno prije komprimiranja.....	93
Slika 3-25. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	94
Slika 3-26. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	95
Slika 3-27. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 0Q80M20K.....	96
Slika 3-28. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	97
Slika 3-29. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	98
Slika 3-30. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 0Q60M40K.....	99
Slika 3-31. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	100
Slika 3-32. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	101
Slika 3-33. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 0Q40M60K.....	102
Slika 3-34. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	103
Slika 3-35. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	104
Slika 3-36. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 0Q20M80K.....	105
Slika 3-37. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	106
Slika 3-38. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	107
Slika 3-39. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 10Q80M10K.....	108
Slika 3-40. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	109
Slika 3-41. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	110
Slika 3-42. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 10Q60M30K.....	111
Slika 3-43. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	112
Slika 3-44. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	113

Slika 3-45. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 10Q40M50K.....	114
Slika 3-46. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	115
Slika 3-47. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	116
Slika 3-48. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 10Q20M70K.....	117
Slika 3-49. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	118
Slika 3-50. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	119
Slika 3-51. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 20Q80M0K.....	120
Slika 3-52. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	121
Slika 3-53. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	122
Slika 3-54. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 20Q60M20K.....	123
Slika 3-55. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	124
Slika 3-56. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	125
Slika 3-57. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 20Q40M40K.....	126
Slika 3-58. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli	127
Slika 3-59. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli	128
Slika 3-60. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 20Q20M60K.....	129
Slika 3-61. Udjel vode u praškastom uzorku neposredno prije komprimiranja.....	131
Slika 3-62. Korelacija između izmjenjenog bubrenja peleta i odgovarajućeg suženja kanala bušotine	135
Slika 3-63. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama	136
Slika 3-64. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	137
Slika 3-65. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 0Q80M20K.....	138
Slika 3-66. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama	139
Slika 3-67. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	140
Slika 3-68. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 0Q60M40K.....	141
Slika 3-69. Izgled poprečnog presjeka peleta 0Q60M40K nakon bubrenja u kalijskoj isplaci K2PAC	142
Slika 3-70. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama	143
Slika 3-71. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	144
Slika 3-72. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 0Q40M60K.....	145

Slika 3-73. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama	146
Slika 3-74. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	147
Slika 3-75. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 0Q20M80K.....	148
Slika 3-76. Izgled poprečnog presjeka peleta 0Q20M80K nakon bubrenja u gipsnoj isplaci G2PAC	149
Slika 3-77. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama.....	150
Slika 3-78. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	151
Slika 3-79. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 10Q80M10K.....	152
Slika 3-80. Izgled poprečnog presjeka peleta 10Q80M10K nakon bubrenja u kalijskoj isplaci K4PAC	153
Slika 3-81. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama.....	154
Slika 3-82. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	155
Slika 3-83. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 10Q60M30K.....	156
Slika 3-84. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama.....	157
Slika 3-85. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	158
Slika 3-86. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 10Q40M50K.....	159
Slika 3-87. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama.....	160
Slika 3-88. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	161
Slika 3-89. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 10Q20M70K.....	162
Slika 3-90. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama	164
Slika 3-91. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	165
Slika 3-92. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 20Q80M0K.....	166
Slika 3-93. Izgled poprečnog presjeka peleta 20Q80M0K nakon bubrenja u kalijskoj isplaci K4PAC (a) te u gipsnoj isplaci G4PAC (b)	167
Slika 3-94. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama.....	168
Slika 3-95. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	169
Slika 3-96. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 20Q60M20K.....	170
Slika 3-97. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama.....	171
Slika 3-98. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	172

Slika 3-99. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 20Q40M40K.....	173
Slika 3-100. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama.....	174
Slika 3-101. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama	175
Slika 3-102. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 20Q20M60K.....	176
Slika 4-1. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima bez kvarca na bubrenje u kalijskoj isplaci.....	179
Slika 4-2. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 10%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u kalijskoj isplaci	180
Slika 4-3. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 20%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u kalijskoj isplaci	181
Slika 4-4. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima bez kvarca na bubrenje u slanoj isplaci	183
Slika 4-5. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 10%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u slanoj isplaci	184
Slika 4-6. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 20%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u slanoj isplaci	185
Slika 4-7. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima bez kvarca na bubrenje u gipsnoj isplaci.....	186
Slika 4-8. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 10%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u gipsnoj isplaci	187
Slika 4-9. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 20%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u gipsnoj isplaci	188
Slika 4-10. Utjecaj smanjenja udjela kaolinita u peletima s 80%-tnim udjelom montmorilonita na njihovo bubrenje u inhibiranim isplakama	189
Slika 4-11. Utjecaj smanjenja udjela kaolinita u peletima sa 60%-tnim udjelom montmorilonita na njihovo bubrenje u inhibiranim isplakama	190
Slika 4-12. Utjecaj smanjenja udjela kaolinita u peletima s 40%-tnim udjelom montmorilonita na njihovo bubrenje u inhibiranim isplakama	191
Slika 4-13. Utjecaj smanjenja udjela kaolinita u peletima s 20%-tnim udjelom montmorilonita na njihovo bubrenje u inhibiranim isplakama	192

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Direktni i indirektni pokazatelji nestabilnosti kanala bušotine.....	6
Tablica 2-2. Podjela uzroka nestabilnosti kanala bušotine s obzirom na mogućnost njihove kontrole	8
Tablica 2-3. Vrste smičnog loma	15
Tablica 2-4. Vrste vlačnog loma	17
Tablica 2-5. Podjela uvjeta osiguranja stabilnosti stijene	17
Tablica 2-6. Kapacitet kationske zamjene za različite minerale gline	34
Tablica 2-7. Podjela šejlova	40
Tablica 2-8. Primjeri kategoriziranih šejlova	41
Tablica 2-9. Primjeri hidratiranih i nehidratiranih kat	48
Tablica 3-1. Uzorci šejla korišteni u različitim laboratorijskim ispitivanjima.....	52
Tablica 3-2. Mineraloški sastav peleta korištenih u laboratorijskim ispitivanjima.....	54
Tablica 3-3. Kapacitet kationske zamjene Wyoming bentonita i Gelplesa	55
Tablica 3-4. Sastav inhibiranih isplaka	56
Tablica 3-5. Sastav vodenih otopina soli	58
Tablica 3-6. Sastav kalijских isplaka	60
Tablica 3-7. Sastav slanih isplaka	61
Tablica 3-8. Sastav gipsnih isplaka	63
Tablica 3-9. Ekvivalentne dubine izračunate na osnovu tlaka komprimiranja	67
Tablica 3-10. Rezultati laboratorijskih ispitivanja filtracijskih svojstava inhibiranih isplaka .	76
Tablica 3-11. Reološka svojstva ispitivanih inhibiranih isplaka (Fann viskozimetar)	79
Tablica 3-12. Reološka svojstva kalijске isplake (viskozimetar OFITE Model 900).....	84
Tablica 3-13. Reološka svojstva slane isplake (viskozimetar OFITE Model 900).....	84
Tablica 3-14. Reološka svojstva gipsne isplake (viskozimetar OFITE Model 900).....	85
Tablica 4-1. Minimalno bubrenje peleta izmjereno u različitim inhibiranim isplakama nakon 120 minuta ispitivanja.....	193
Tablica 4-2. Minimalno bubrenje peleta izmjereno u različitim inhibiranim isplakama nakon 24 sata ispitivanja.....	194
Tablica 4-3. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 0Q80M20K) ...	196
Tablica 4-4. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 0Q60M40K) ...	197
Tablica 4-5. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 0Q40M60K) ...	198
Tablica 4-6. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 0Q20M80K) ...	199
Tablica 4-7. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 10Q80M10K) .	200
Tablica 4-8. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 10Q60M30K) .	201

Tablica 4-9. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 10Q40M50K) .	202
Tablica 4-10. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 10Q20M70K) .	203
Tablica 4-11. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 20Q80M0K) ...	204
Tablica 4-12. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 20Q60M20K) .	205
Tablica 4-13. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 20Q40M40K) .	206
Tablica 4-14. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 20Q20M60K) .	207
Tablica 4-15. Utjecaj inhibiranih isplaka na 24-satno bubrenje peleta i povećanje gradijenta tlaka u prstenastom prostoru između kanala bušotine promjera 0,4445 m i teških šipki vanjskog promjera 0,2858 m	208
Tablica 4-16. Utjecaj inhibiranih isplaka na 24-satno bubrenje peleta i povećanje gradijenta tlaka u prstenastom prostoru između kanala bušotine promjera 0,4445 m i bušaćih šipki vanjskog promjera 0,127 m	209
Tablica 4-17. Utjecaj inhibiranih isplaka na 24-satno bubrenje peleta i povećanje gradijenta tlaka u prstenastom prostoru između kanala bušotine promjera 0,3112 m i bušaćih šipki vanjskog promjera 0,2413 m	210
Tablica 4-18. Utjecaj inhibiranih isplaka na 24-satno bubrenje peleta i povećanje gradijenta tlaka u prstenastom prostoru između kanala bušotine promjera 0,3112 m i bušaćih šipki vanjskog promjera 0,127 m	211

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

σ_1 - maksimalno glavno naprezanje [Pa]

σ_2 - srednje glavno naprezanje [Pa]

σ_3 - minimalno glavno naprezanje [Pa]

σ_v - vertikalno naprezanje [Pa]

σ_H - maksimalno horizontalno naprezanje [Pa]

σ_h - minimalno horizontalno naprezanje [Pa]

σ_a - aksijalno naprezanje [Pa]

σ_r - radijalno naprezanje [Pa]

σ_t - tangencijalno naprezanje [Pa]

i_b – kut odklona kanala bušotine [°]

A_b - azimut bušotine [°]

p_b - tlak u kanalu bušotine [Pa]

θ - kut između promatrane točke i referentne osi [°]

r - polumjer [m]

r_b - polumjer bušotine [m]

ν - Poissonov omjer [-]

σ_x - normalno lokalno (in-situ) naprezanje u smjeru osi x [Pa]

σ_y - normalno lokalno (in-situ) naprezanje u smjeru osi y [Pa]

τ_{xy} - lokalno (in-situ) smično naprezanje u koordinatnom sustavu x,y i z [Pa]

σ_z - normalno lokalno (in-situ) naprezanje u smjeru osi z (Pa)

$\tau_{\theta z}$ - smično naprezanje na stijenrama kanala bušotine (Pa)

τ_{yx} - lokalno in-situ smično naprezanje u koordinatnom sustavu x,y i z [Pa]

τ_{xz} - lokalno in-situ smično naprezanje u koordinatnom sustavu x,y i z [Pa]

$\tau_{r\theta}$ - smično naprezanje na stijenrama kanala bušotine [Pa]

τ_{rz} - smično naprezanje na stijenrama kanala bušotine [Pa]

α_p - Biotova konstanta [-]

p_{pp} – početni porni tlak [Pa]

E - Youngov modul elastičnosti [Pa]

α_t - konstanta volumetrijskog termalnog širenja [1/°C]

T_{st} - temperatura stijenki kanala bušotine [°C]

T_s – početna temperatura stijene [°C]

p_p – porni tlak [Pa],
 C_o - kohezijska čvrstoća stijene [Pa],
 φ – unutarnji kut trenja [$^\circ$].
 v_o - brzina toka fluida [m/s]
 k - propusnost šejla [m²]
 μ - viskoznost fluida [Pa·s]
 ∇p - gradijent tlaka između tlaka u kanalu bušotine i pornog tlaka [Pa/m]
 ρ - objamska masa (gustoća) isplake [kg/m³]
 g - gravitacija [m/s²]
 μ_i - kemijski potencijal određene komponente [J/mol]
 μ_i^0 - kemijski potencijal određene komponente kod standardnih uvjeta [J/mol]
 R - plinska konstanta [8,314 J/(mol·°K)]
 T - apsolutna temperatura [K]
 a_i - aktivitet vode za određenu komponentu [-]
 α_m - efikasnost membrane [dijelovi cijelog]
 Δp_{os} - stvarni osmotski tlak [Pa]
 $\Delta \pi$ - teoretski osmotski tlak [Pa]
 V - parcijalni molarni volumen vode [0,018 m³/mol]
 a_{sh} - aktivitet vode u šejlu [-]
 a_{df} - aktivitet vodene faze isplake [-]
 p_c - kapilarni tlak [Pa]
 σ - površinska napetost [N/m]
 θ - kontaktni kut [$^\circ$]
 r - radijus pore [m]
 J_i - maseni tok i-tog iona [mol/(m²·s)]
 D_{si} - koeficijent difuzije i-tog iona [m²/s]
 $C_{i,sh}$ - koncentracija i-tog iona u pornom fluidu [mol/m³]
 $C_{i,m}$ - koncentracija i-tog iona u isplaci [mol/m³]
 Δx - duljina promatranog intervala šejla [m]
 μ_p - plastična viskoznost [Pa·s]
 τ_{1020} - smično naprezanje kod smične brzine od 1020 1/s [Pa]
 τ_{510} - smično naprezanje kod smične brzine od 510 1/s [Pa]
 τ_o - naprezanje pri pokretanju [Pa]

n_{pp} - indeks toka [-]
 τ_{170} - smično naprežanje kod smične brzine od 170 1/s [Pa]
 $\tau_{5,1}$ - smično naprežanje kod smične brzine od 5,1 1/s [Pa]
 K_{pp} - indeks konzinstencije [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n_{pp}$]
 v - brzina protjecanja isplake [m/s]
 Q_p - dobava isplačne pumpe [m^3/s]
 D_b - promjer kanala bušotine [m]
 D_a - promjer alata u bušotini [m]
 Re - Reynoldsov broj [-]
 ρ_i - gustoća isplake [kg/m^3]
 Re_c - kritični Reynoldsov broj [-]
 μ_e - ekvivalentna viskoznost isplake [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
 p - smanjenje tlaka [Pa]
 l - duljina prstenastog prostora određene površine [m]
 c - koeficijent [-]
 b - koeficijent [-]

1. UVOD

Nestabilnost kanala bušotine prati naftnu industriju od njenih početaka pa sve do danas, a najjednostavnije bi se mogla definirati kao svaka neželjena promjena promjera kanala bušotine u odnosu na nominalni promjer dlijeta s kojim se kanal izrađuje. Postoji čitav niz problema vezanih uz nestabilnost kanala bušotine (otežano čišćenje kanala bušotine, otežano izvođenje cementacijskih radova i karotažnih mjerenja i dr.), što može imati za posljedicu produljenje vremena potrebnog za izradu kanala bušotine, ulaganje dodatnih financijskih sredstava te ponekad napuštanje jednog dijela ili u najgorem slučaju cijele bušotine. Prema podacima o rastućim troškovima naftnih kompanija za rješavanje problema nestabilnosti kanala bušotine i sanaciju njenih posljedica, može se zaključiti kako problem i dalje postoji.

Nestabilnost kanala bušotine najčešće se veže uz šejl, finozrnatu klastičnu sedimentnu stijenu koja čini približno 75% svih stijena kroz koje se buši i uzrokuje 90% svih problema vezanih uz nestabilnost kanala bušotine. Ponašanje šejla ovisi o njegovim fizikalno-kemijskim karakteristikama (maloj propusnosti, kemijskom sastavu porne vode i dr.), ali i mineraloškom sastavu. Na ponašanje šejla najviše utječe njegov mineraloški sastav, osobito ukupni udjel minerala gline sklonih hidrataciji, te posljedično bubrenju i disperziji.

Uzroci nestabilnosti kanala bušotine mogu biti različiti, a u pravilu se dijele na mehaničke i fizikalno-kemijske. Iako se ove dvije skupine uzroka nestabilnosti kanala bušotine mogu promatrati odvojeno, najčešće je pojava nestabilnosti kanala bušotine posljedica njihovog zajedničkog djelovanja. Ukoliko se tijekom bušenja koristi isplaka na bazi vode, u trenutku kada isplaka dođe u kontakt sa šejlom dolazi istovremeno do razvoja nekoliko procesa: konvekcijskog toka, difuzije iona, osmoze i kapilarnog upijanja. Kretanje vode i iona u/iz šejla može uzrokovati hidrataciju minerala gline prisutnih u stijeni, bubrenje ili disperziju same stijene, porast pornog tlaka u pribušotinskoj zoni stijene, ali i promjenu njenih svojstava poput čvrstoće ili Youngovog modula elastičnosti čime se direktno smanjuje stabilnost kanala bušotine.

Zbog različitog mineraloškog sastava, osobito udjela minerala gline kao i zbog različitog ponašanja u kontaktu s isplakom na bazi vode šejlovi su podijeljeni u pet različitih skupina. Stoga se i istraživači u svojim laboratorijskim ispitivanjima usmjeravaju na rješavanje problema stabilnosti kanala bušotine za konkretni šejl ili konkretnu skupinu šejla. Prema podacima dostupnim u literaturi može se zaključiti kako je većina šejlova uspješno stabilizirana primjenom uljne isplake ili inhibiranih isplaka na bazi vode. Međutim problem

se javlja kod mekih „Gumbo“ šejlova, koji su zbog visokog udjela minerala gline iz skupine smektita skloni hidrataciji, te izraženom bubrenju.

Prilikom planiranja i provedbe određenih laboratorijskih istraživanja vezanih uz stabilnost kanala bušotine, potrebno je osmisliti ispitivanja kojim će se što bolje simulirati stvarno međudjelovanje šejla i isplake. Iz dostupnih podataka o rezultatima laboratorijskih ispitivanja može se zaključiti da su u njima korišteni različiti uzorci šejla, različiti fluidi kao i različiti laboratorijski instrumenti. Najčešće se u laboratorijskim ispitivanjima koriste uzorci šejla dobiveni jezgrovanjem stijene ili iz površinskih kopova, a u manjoj mjeri se koriste krhotine stijena sakupljene na vibracijskim sitima. Kvaliteta laboratorijskih ispitivanja ovisi o dostupnosti dovoljne količine reprezentativnih uzoraka šejla, što je teško ostvariti na jedan od gore navedenih načina. Mala količina dostupnih uzoraka šejla, kao i njihova slaba kvaliteta sprječavaju provođenje opsežnih laboratorijskih ispitivanja kao i njihovu ponovljivost. Osim problema vezanih uz nabavu odgovarajućih kvalitetnih uzoraka šejla, pojavljuju se i problemi vezani uz odabir aditiva kojima se smanjuje hidratacija i bubrenje šejla. Često se u literaturi mogu pronaći podaci o inhibiranim isplakama koje u svom sastavu sadrže i nekoliko različitih aditiva za inhibiranje hidratacije šejla. Prisutnost velikog broja različitih inhibitora hidratacije šejla otežava kvalitetnu procjenu utjecaja pojedinog aditiva na smanjenje hidratacije šejla.

U provedenim laboratorijskim ispitivanjima posebna pažnja je posvećena odabiru i pripremi uzoraka šejla i inhibiranih isplaka. Kod odabira materijala i uvjeta pripreme peleta (valjkastih uzoraka promjera 29 mm i visine približno 10 mm) nastojalo se što više približiti stvarnim uvjetima u kojima se šejl nalazi. Kako ponašanje šejla uvelike ovisi o njegovom mineraloškom sastavu, osobito udjelu minerala gline, za potrebe ovog ispitivanja nastojalo se simulirati meke „Gumbo“ šejlove koji se nalaze na manjoj dubini, a zbog visokog udjela smektita skloni su hidrataciji i bubrenju, te uzrokovanju nestabilnosti kanala bušotine. Osim montmorilonita nabavljeni su kaolinit i kvarc (tri osnovne komponente koje određuju ponašanje šejla) te su iz njihove smjese izrađivani peleti koji su simulirali uzorak stijene. Peleti su izrađivani iz praškaste smjese (s točno definiranim masenim udjelima pojedine komponente) u uređaju za komprimiranje uzoraka. Tlak komprimiranja prilagođen je geostatičkom tlaku koji vlada na određenoj dubini. Kako bi se postigla ujednačenost svih uzoraka tijekom ispitivanja, prije komprimiranja uzoraka smjesa je držana u eksikatoru na relativnoj vlažnosti koja odgovara prosječnoj relativnoj vlažnosti šejla na određenoj dubini. Bubrenje pojedinog peleta mjereno je u uređaju za mjerenje bubrenja. U laboratorijskim ispitivanjima korišteni su fluidi koji mogu pozitivno djelovati na suzbijanje hidratacije i bubrenja peleta, što uključuje vodene otopine različitih soli i različite inhibirane isplake. Kako

bi se utvrdila uspješnost pojedinog aditiva u sprječavanju bubrenja, definirano je početno stanje. Za referentnu vrijednost uzeto je bubrenje svakog pojedinog peleta u vodovodnoj vodi, u kojoj je bubrenje najveće. Inhibirane isplake pripremane su neposredno prije svakog ispitivanja te su im određena osnovna fizikalna svojstva (gustoća, filtracija, viskoznost, čvrstoća gela i dr.). Usporedbom podataka o fizikalnim svojstvima isplake i rezultata mjerenja bubrenja peleta određenog mineraloškog sastava moguće je utvrditi opravdanost upotrebe pojedinog tipa aditiva te njegovu optimalnu koncentraciju. Osim optimalne koncentracije određena je i djelotvornost pojedinog tipa aditiva za sprječavanje bubrenja na peletima različitog mineraloškog sastava. Kroz optimalnu koncentraciju aditiva moguće je postići stabilnost kanala bušotine, smanjiti utjecaj na okoliš (pojedini aditivi kod visokih koncentracija imaju nepovoljan utjecaj na okoliš, npr. KCl) te smanjiti jediničnu cijenu isplake. Nakon provedenih laboratorijskih ispitivanja, dobiveni rezultati bubrenja peleta iskorišteni su za simuliranje suženja kanala bušotine te su na taj način dobiveni podaci o utjecaju ispitivanih isplaka na promjenu hidrauličkih parametara tijekom bušenja.

Cilj ispitivanja bio je ispitati utjecaj različitih inhibiranih isplaka na bazi vode (natrijske, kalijске i kalcijске) na bubrenje glinovitih uzoraka - peleta određenog mineraloškog sastava, te simulirati utjecaj nastalih promjena na proces bušenja. Na osnovu dobivenih rezultata bilo je potrebno predložiti najpovoljniji fluid za stabilizaciju stijenki kanala bušotine i postizanje optimalnog hidrauličkog režima tijekom procesa bušenja.

Hipoteza - pravilnim definiranjem sastava inhibiranih isplaka moguće je postići zadovoljavajuće inhibiranje hidratacije šejlova te pospješiti proces bušenja.

2. NESTABILNOST KANALA BUŠOTINE

Izrada kanala bušotine vrlo je zahtjevan tehničko-tehnološki proces tijekom kojega se javljaju brojni problemi koji usporavaju ili u potpunosti onemogućavaju njegovu provedbu. Jedan od najizraženijih problema koji se mogu pojaviti tijekom bušenja odnosi se na pojavu nestabilnosti kanala bušotine. Nestabilnost kanala bušotine može se definirati kao svaka neželjena promjena promjera kanala bušotine, odnosno njegovo suženje ili proširenje. Iako se problemi vezani uz nestabilnost kanala bušotine najčešće vežu uz proces bušenja, moguća je njihova pojava i tijekom opremanja i održavanja bušotine, proizvodnje ili obrade stijena nosilaca ugljikovodika, odnosno tijekom cijelog radnog vijeka bušotine. Posljedice nestabilnosti kanala bušotine mogu biti različite, od relativno lako rješivih problema pa sve do problema čije rješavanje zahtijeva ulaganje dodatnih financijskih sredstava i produljenje vremena predviđenog za obavljanje pojedine operacije. Ponekad ti problemi mogu biti toliko izraženi da rezultiraju gubitkom dijela kanala bušotine, a u određenim okolnostima i cijele bušotine.

Problemi vezani uz nestabilnost kanala bušotine nisu novi, već prate naftnu industriju od njenih početaka pa sve do danas. Unatoč razvoju i napretku tehnologija kojima se nastoji osigurati izrada stabilnog kanala bušotine, problemi vezani uz nestabilnost kanala bušotine postaju sve izraženiji s izradom dubokih bušotina (visoki tlakovi i temperature), bušotina malog promjera, re-entry bušotina i višekanalnih bušotina te bušenja u uvjetima podtlaka (McLellan, 1994; van Oort et al., 1996). U prilog navedenoj činjenici idu i podaci o povećanju financijskih ulaganja koje naftne kompanije izdvajaju za sanaciju posljedica nestabilnosti kanala bušotine. Prema Chenevertu i Pernotu (1998.) nestabilnost kanala bušotine koštala je naftnu industriju krajem prošlog stoljeća približno 500 milijuna dolara godišnje, dok prema posljednjim podacima ti troškovi iznose i preko jedne milijarde dolara godišnje (Tare et al., 2002; Zhang et al., 2004; Khodja et al., 2010). Kako je bušenje u odnosu na istraživanje i proizvodnju najskuplji segment naftne industrije za pretpostaviti je da se navedeni iznos u najvećoj mjeri odnosi na sanaciju posljedica nestabilnosti kanala bušotine tijekom bušenja. Na osnovu desetogodišnjeg prikupljanja podataka, Muniz i sur. (Muniz et al., 2005^a) došli su do zaključka da približno 30% svih neplanskih troškova koji se mogu pojaviti tijekom bušenja otpada na rješavanje posljedica nestabilnosti kanala bušotine.

Nestabilnost kanala bušotine u prošlosti se najčešće rješavala metodom pokušaja i pogrešaka (van Oort et al., 1996; Tare et al., 2002) odnosno pristup rješavanju problema bio

je usmjeren na probleme koji su se pojavili na konkretnoj bušotini, često bez rješenja koja bi se mogla primijeniti i na drugim poljima i novim bušotinama. Kako bi se izbjegli navedeni problemi, suvremeni pristup projektiranju bušotine podrazumijeva i procjenu stabilnosti kanala (Simangunsong et al., 2006). Procjena stabilnosti kanala bušotine postaje još važnija ukoliko se zna da svaka bušotina predstavlja objekt za sebe, odnosno da problemi vezani uz nestabilnost kanala mogu varirati od bušotine do bušotine čak i na istom polju. Međutim za kvalitetnu procjenu stabilnosti kanala prije njegove izrade potreban je veliki broj podataka poput onih o litološkom profilu, mineraloškom sastavu stijena te njihovim mehaničkim i petrofizikalnim svojstvima, dubini zalijeganja, debljini i nagibu pojedinih slojeva, planiranoj putanji i konstrukciji kanala bušotine (kutu otklona, azimutu, dubini ugradnje pojedine kolone zaštitnih cijevi) i dr. Prikupljanje navedenih podataka može biti posebno teško ukoliko se radi o istražnoj bušotini u području u kojem do tada nije bilo bušenja. Stoga je za procjenu nestabilnosti kanala bušotine nužan multidisciplinarni pristup koji uključuje zajednički rad stručnjaka koji se bave bušenjem, bušotinskim fluidima, geologijom i mehanikom stijena. Ponekad problem nestabilnosti kanala bušotine može biti toliko zahtjevan za rješavanje da je nužna detaljna analiza uz primjenu laboratorijskih istraživanja i razvoj specifičnih modela. Na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja i razvijenog modela može se simulirati razvoj nestabilnosti kanala bušotine i pronaći odgovarajuće rješenje (Nguyen et al., 2007). Evidentiranje svih problema koji su se pojavili tijekom bušenja, a mogu se povezati s mogućnošću pojave nestabilnosti kanala bušotine, može biti korisno kod naknadne procjene nestabilnosti kanala bušotine (razvoja i provjere modela) i kod prevencije pojave istih ili sličnih problema na novim bušotinama na istom polju.

Tijekom bušenja potrebno je posebnu pažnju posvetiti praćenju svih parametara procesa kako bi se problem nestabilnosti kanala bušotine pravovremeno uočio te se krenulo u njegovo rješavanje, odnosno saniranje njegovih posljedica. U praksi se pojavljuje čitav niz problema koji mogu biti posljedica nestabilnosti kanala bušotine poput lošeg čišćenja kanala bušotine, loše cementacije, nemogućnosti obavljanja karotažnih mjerenja, problema prilikom izvlačenja/spuštanja niza bušaćih alatki ili spuštanja zaštitnih cijevi i sl. (Chenevert i Osisanya, 1989; Simpson i Dearing, 2000; Labenski et al., 2003; Osuji et al., 2008; Qu et al., 2009). Pri tome je potrebno voditi računa da ne moraju nužno svi problemi tijekom bušenja biti posljedica nestabilnosti kanala bušotine. U tablici 2-1 navedeni su pokazatelji (direktni i indirektni) koji mogu ukazivati na narušavanje stabilnosti kanala bušotine, odnosno odstupanje stvarnog promjera kanala bušotine od nominalnog. Tako su u lijevom stupcu navedeni direktni pokazatelji odnosno oni koji nedvojbeno ukazuju da je došlo do

nestabilnosti kanala bušotine. S druge strane, postoji i čitav niz pokazatelja koje se može svrstati u skupinu indirektnih, a koji ne moraju nužno biti posljedica narušavanja stabilnosti kanala bušotine. Tako npr. oštećenje niza bušačih alatki može biti posljedica zarušavanja stijenki kanala bušotine ali i nepravilnog rukovanja, problemi prilikom spuštanja niza bušačih alatki mogu biti posljedica nestabilnosti kanala bušotine, ali i promjene sastava i krutosti samog niza i slično.

Tablica 2-1. Direktni i indirektni pokazatelji nestabilnosti kanala bušotine (McLellan, 1994)

DIREKTNI POKAZATELJI	INDIREKTNI POKAZATELJI
Proširenje kanala bušotine (kaliper)	Povećani nateg i torzija
Suženje kanala bušotine	Prihvat alatki
Povećani volumen krhotina i odlomljenih komada stijene	Problemi tijekom spuštanja niza bušačih alatki, zaštitnih cijevi ili savitljivog tubinga
	Povećanje tlaka tijekom optoka isplake
Potreban veći volumen cementne kaše	Izraženije vibracije niza bušačih alatki
	Oštećenje niza bušačih alatki
Pojava odlomljenih komada stijene na površini	Utok plina u prstenasti prostor uslijed neuspjele cementacije
	Izraženije nagle promjene smjera bušotine
Zapunjavanje kanala bušotine prilikom spuštanja/izvlačenja niza bušačih alatki	Pojava ključanice
	Slabi rezultati karotažnih mjerenja
	Nemogućnost obavljanja karotažnih mjerenja
	Problem kontrole putanje kanala bušotine

2.1. Uzroci nestabilnosti kanala bušotine

Nestabilnost kanala bušotine je vrlo ozbiljan problem u naftnoj industriji osobito u području bušenja. Posljedice nestabilnosti kanala bušotine mogu biti različite, a najčešće rezultiraju dodatnim financijskim ulaganjima te produljenjem vremena potrebnog za realizaciju predviđenih radova u bušotini. Kako bi se ovi i slični problemi izbjegli potrebno je detaljno razumijevanje osnovnih uzroka nestabilnosti kanala bušotine. Osnovni uzroci nestabilnosti kanala bušotine, osobito oni vezani uz šejl bili su poznati već tridesetih godina prošlog stoljeća. Tome u prilog govori i činjenica da su Halbouty i Kaldenbach u svom radu objavljenom 1938. godine definirali gotovo sve osnovne uzroke nestabilnosti kanala bušotine u šejlu (Darley, 1969). Također, važno je napomenuti da su s razvojem laboratorijske opreme i računalne tehnologije u drugoj polovici prošlog stoljeća postignuti značajni napreci u detaljnoj analizi uzroka nestabilnosti kanala bušotine. Unatoč tome na osnovu sve većeg broja radova koji se objavljuju na temu stabilnosti kanala bušotine može se zaključiti da problem i dalje postoji te da ne postoji njegovo univerzalno rješenje.

Uzroci nestabilnosti kanala bušotine su brojni i razlikuju se prema načinu na koji djeluju na stabilnost kanala bušotine. U pravilu, nestabilnost kanala bušotine najčešće je posljedica djelovanja više uzroka istovremeno. Najčešće ih se dijeli u dvije skupine, na (Gaurina-Međimurec, 1992; Chenevert i Pernot, 1998; Osuji et al., 2008):

1. mehaničke i
2. fizikalno-kemijske uzroke nestabilnosti kanala bušotine.

Mehanički uzroci nestabilnosti kanala bušotine rezultat su mehaničkih svojstava stijena kroz koje se buši kao i promjene stanja naprezanja na stijenkama kanala bušotine, dok su fizikalno-kemijski uzroci rezultat međudjelovanja stijene i isplake. Navedena podjela može se uzeti samo kao okvirna, dok je u stvarnosti najčešće nestabilnost kanala bušotine posljedica i jedne i druge skupine uzroka (Ballard et al., 1994; Fink, 2011). Za primjer se može uzeti hidratacija šejla koja je primarno posljedica nepovoljnog međudjelovanja isplake i glinovite stijene. Kao posljedica hidratacije javlja se hidratacijsko naprezanje koje utječe na promjenu mehaničkih svojstava stijene te promjenu naprezanja na stijenkama kanala bušotine.

Osim navedene podjele, u literaturi postoji i podjela uzroka nestabilnosti kanala bušotine na osnovu mogućnosti utjecanja na njih. Tako McLellan u svom radu objavljenom

1994. godine dijeli uzroke nestabilnosti kanala bušotine u dvije skupine, odnosno na (McLellan, 1994):

1. Uzroke na koje nije moguće utjecati i
2. Uzroke na koje je moguće utjecati.

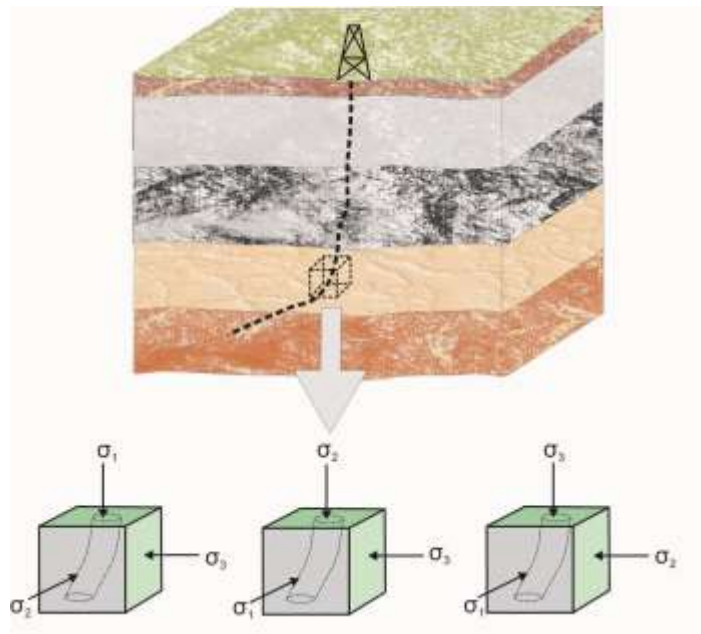
Slična podjela može se pronaći u radu Mohiuddina i sur. iz 2005. godine. Nešto detaljnija raščlamba dviju navedenih skupina nalazi se u tablici 2-2. Ukoliko se pogleda skupina uzroka na koje nije moguće utjecati vidljivo je da nju prvenstveno čine uzroci vezani uz mehanička i petrofizikalna svojstva stijene, mineraloški sastav kao i prirodno stanje napreznja u njima. Za razliku od njih, u skupini uzroka na koje je moguće utjecati nalaze se uzroci povezani s projektiranom putanjom kanala bušotine, odabirom i svojstvima isplake koja se koristi te u konačnici dobrom bušačom praksom. Za osiguravanje stabilnosti kanala bušotine vrlo je bitno razumjeti navedene uzroke, definirati mehanizme njihovog djelovanja, ali i razumjeti njihovu međuovisnost.

Tablica 2-2. Podjela uzroka nestabilnosti kanala bušotine s obzirom na mogućnost njihove kontrole (McLellan, 1994)

UZROCI NESTABILNOSTI KANALA BUŠOTINE	
Uzroci na koje nije moguće utjecati	Uzroci na koje je moguće utjecati
Prirodno frakturirane i rasjednute zone	Kut otklona i azimut kanala bušotine
Visoki porni tlak	Tlak na dnu bušotine
	Fizikalno-kemijska reakcija između stijene i isplake
Velika lokalna (in-situ) napreznja	Vibracija bušačeg niza
Nekonsolidirane stijene	Erozija
Pokretne stijene	Temperatura
Reaktivne stijene	Osciliranje tlaka u kanalu bušotine
Tektonski napregnute stijene	Zarušavanje cementnog kamena ispod pete kolone

2.1.1. Mehanički uzroci nestabilnosti kanala bušotine

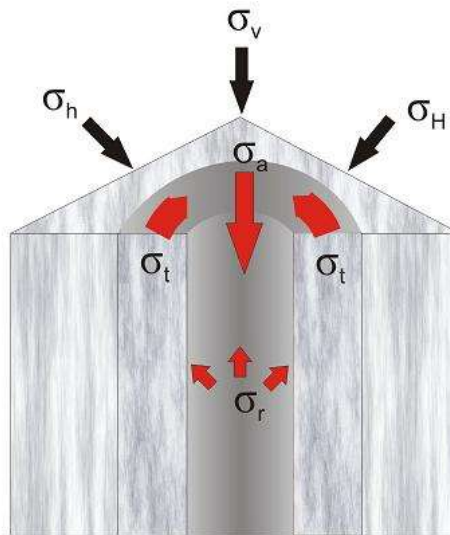
Za razumijevanje mehaničkih uzroka nestabilnosti kanala bušotine potrebno je usporediti stanje u kojem se stijena nalazi neposredno prije i nakon izrade kanala bušotine kroz nju. Gledano sa stanovišta mehanike stijena, stijena se prije bušenja nalazi u stanju prirodne ravnoteže naprezanja. Navedeno ravnotežno stanje stijene na određenoj dubini rezultat je prvenstveno tlaka pokrovnih stijena, ali i različitih dodatnih naprezanja koja su posljedica tektonskih promjena (boranja, rasjedanja i sl.). Takvo stanje naprezanja može se prikazati pomoću tri međusobno okomita naprezanja, maksimalnim glavnim naprežanjem (σ_1), srednjim glavnim naprežanjem (σ_2) te minimalnim glavnim naprežanjem (σ_3). Na slici 2-1 prikazana su tri moguća slučaja međusobnih položaja pojedinih glavnih naprezanja. U slučaju da ne postoje dodatna naprezanja uzrokovana tektonskim aktivnostima maksimalno glavno naprežanje bit će posljedica tlaka pokrovnih stijena odnosno bit će jednako vertikalnom naprežanju (σ_v), dok se istovremeno srednje i minimalno glavno naprežanje mogu prikazati kao maksimalno (σ_H) i minimalno (σ_h) horizontalno naprežanje (Lake, 2006).



Slika 2-1. Glavna naprezanja u Zemljinoj kori (Gaurina-Međimurec et al., 2007)

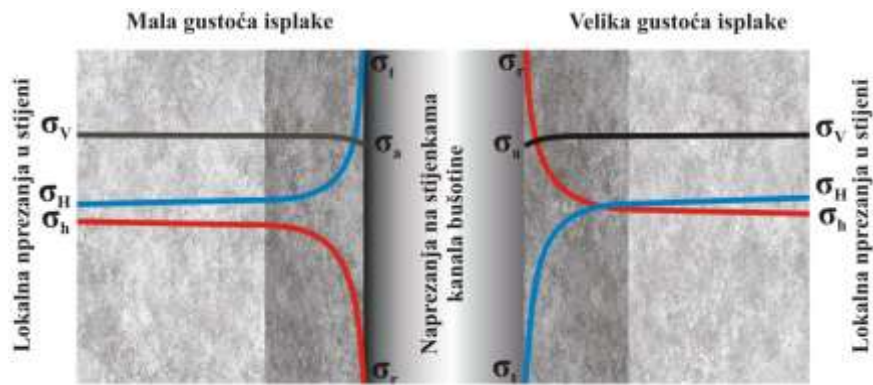
U trenutku kada dlijeto probuši određenu stijenu dolazi do narušavanja postojećeg stanja ravnoteže te uspostave novog sustava naprezanja na stijenama kanala bušotine i u pribušotinskoj zoni, dok na određenoj udaljenosti od kanala bušotine i dalje djeluju originalna

lokalna (in-situ) naprezanja. Nova preraspodjela naprezanja posljedica je zamjene određenog izbušenog volumena stijene s korištenom isplakom određene gustoće. Raspodjela naprezanja koja se pojavljuje tijekom bušenja prikazana je na slici 2-2. Na slici je vidljivo da se na samim stijenjkama kanala bušotine pojavljuje aksijalno (σ_a), radijalno (σ_r) i tangencijalno (σ_t) naprezanje, dok na određenoj udaljenosti od kanala bušotine i dalje djeluju originalna početna naprezanja (McLean i Addis, 1990).



Slika 2-2. Preraspodjela naprezanja u stijeni tijekom bušenja

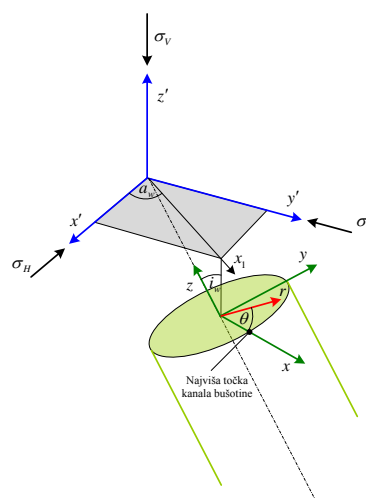
Novonastala naprezanja razlikuju se po smjeru djelovanja. Tako radijalno naprezanje djeluje okomito na stijenke kanala bušotine, tangencijalno po obodu stijenki dok aksijalno djeluje paralelno s osi kanala bušotine. Vrijednosti i raspodjele naprezanja na stijenjkama kanala bušotine ovisit će o zajedničkom djelovanju mehaničkih, kemijskih, termalnih i hidrauličkih efekata (Zhang et al., 2006^b). Vrlo je važno naglasiti utjecaj fizikalno-kemijskih svojstava isplake na održavanje stabilnosti kanala bušotine. Isplaka s jedne strane svojom gustoćom direktno utječe na radijalna naprezanja na stijenjkama kanala bušotine, dok s druge strane kroz međudjelovanje sa stijenom utječe na promjenu njenih mehaničkih svojstava (osobito kohezijske čvrstoće). Utjecaj gustoće isplake na vrijednosti naprezanja na stijenjkama kanala bušotine prikazan je na slici 2-3.



Slika 2-3. Utjecaj gustoće isplake na vrijednosti naprezanja na stijenjkama kanala bušotine (***, Rock Mechanics - Self Learning Course)

Iz slike 2-3 je vidljivo da gustoća isplake ima najmanji utjecaj na vrijednosti aksijalnog naprezanja, dok se vrijednosti tangencijalnog i radijalnog naprezanja značajno mijenjaju s promjenom gustoće isplake. Kod niže vrijednosti gustoće isplake, tangencijalna naprezanja su najveća a radijalna najmanja, dok je u slučaju većih gustoća isplake situacija obrnuta.

Kako bi se lakše razumjelo djelovanje već spomenutih efekata na raspodjelu i vrijednosti naprezanja te izraze koji to opisuju, bušotina je prikazana u dvostrukom troosnom koordinatnom sustavu (slika 2-4). Koordinatnim sustavom s osima x' , y' i z' prikazano je djelovanje originalnih in-situ naprezanja, dok je koordinatnim sustavom x , y i z prikazan smjer djelovanja naprezanja koja djeluju na stijenjkama kanala bušotine.



Slika 2-4. Koordinatni sustavi za prikaz naprezanja u stijeni tijekom bušenja (Pašić et al., 2007)

Kod izrade vertikalne bušotine navedeni koordinatni sustavi se poklapaju, a naprezanja na stijenkama kanala bušotine ($r = r_b$) u određenoj točki mogu se izračunati prema sljedećim izrazima (***, Rock Mechanics - Self Learning Course):

$$\begin{aligned}\sigma_r &= p_b \\ \sigma_t &= (\sigma_H + \sigma_h) - 2 \cdot (\sigma_H - \sigma_h) \cdot \cos 2\theta - p_b \\ \sigma_a &= \sigma_v - 2 \cdot (\sigma_H - \sigma_h) \cdot \nu \cdot \cos 2\theta\end{aligned}\quad (2 - 1)$$

Gdje su:

σ_r - radijalno naprezanje [Pa],

p_b - tlak u kanalu bušotine [Pa],

σ_t - tangencijalno naprezanje [Pa],

σ_H - maksimalno horizontalno naprezanje [Pa],

σ_h - minimalno horizontalno naprezanje [Pa],

θ - kut između promatrane točke i referentne osi [°],

σ_a - aksijalno naprezanje [Pa],

σ_v - vertikalno naprezanje [Pa],

ν - Poissonov omjer [-].

S povećanjem udaljenosti od stijenki kanala bušotine dolazi do promjene naprezanja, pa se naprezanja u promatranoj točki na velikoj udaljenosti od stijenki kanala bušotine ($r \rightarrow \infty$) mogu izračunati prema sljedećim izrazima (***, Rock Mechanics - Self Learning Course):

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_H + \sigma_h) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_H - \sigma_h) \cdot \cos 2\theta \\ \sigma_t &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_H + \sigma_h) - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_H - \sigma_h) \cdot \cos 2\theta \\ \sigma_a &= \sigma_v\end{aligned}\quad (2 - 2)$$

Iz navedenih jednadžbi može se zaključiti da se s povećanjem udaljenosti od stijenki kanala bušotine radijalna, tangencijalna i aksijalna naprezanja sve više izjednačavaju s originalnim lokalnim (in-situ) naprezanjima. Tako npr. za promatranu točku koja leži na smjeru pružanja maksimalnog horizontalnog naprezanja ($\theta = 0$) dolazi do potpunog poklapanja naprezanja odnosno izjednačavanja radijalnog i maksimalnog horizontalnog, tangencijalnog i minimalnog horizontalnog te aksijalnog i vertikalnog naprezanja.

Za razliku od navedenih jednadžbi, za računanje naprezanja na stijenkama otklonjenog ili horizontalnog kanala bušotine ($r = r_b$) koriste se nešto složenije jednadžbe (Awal et al., 2001; Zhang et al., 2006^b; Simangunsong et al., 2006):

$$\begin{aligned}\sigma_r &= p_b \\ \sigma_t &= (\sigma_x + \sigma_y) - 2 \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\theta - 4 \cdot \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta - p_b \\ \sigma_a &= \sigma_z - \nu \cdot [2 \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\theta + 4 \cdot \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta] \\ \tau_{\theta z} &= 2 \cdot (\tau_{yx} \cdot \cos \theta - \tau_{xz} \cdot \sin \theta) \\ \tau_{r\theta} &= \tau_{rz} = 0\end{aligned}\quad (2 - 3)$$

Gdje su:

- σ_x - normalno lokalno (in-situ) naprezanje u smjeru osi x [Pa],
- σ_y - normalno lokalno (in-situ) naprezanje u smjeru osi y [Pa],
- τ_{xy} - lokalno (in-situ) smično naprezanje u koordinatnom sustavu x,y i z [Pa],
- σ_z - normalno lokalno (in-situ) naprezanje u smjeru osi z [Pa],
- $\tau_{\theta z}$ - smično naprezanje na stijenkama kanala bušotine [Pa],
- τ_{yx} - lokalno (in-situ) smično naprezanje u koordinatnom sustavu x,y i z [Pa],
- τ_{xz} - lokalno (in-situ) smično naprezanje u koordinatnom sustavu x,y i z [Pa],
- $\tau_{r\theta}$ - smično naprezanje na stijenkama kanala bušotine [Pa],
- τ_{rz} - smično naprezanje na stijenkama kanala bušotine [Pa].

Prilikom razmatranja naprezanja koja se javljaju na stijenkama kanala bušotine potrebno je uzeti u obzir da na njihovu vrijednost također utječu temperaturne razlike i fizikalno-kemijsko međudjelovanje stijene i isplake (Gaurina-Međimurec, 1992). Promjene u naprezanjima na stijenkama kanala bušotine ($r = r_b$) mogu se prikazati sljedećim jednadžbama (Chen et al., 2001; Zhang et al., 2006):

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 0 \\ \sigma_t &= \frac{\alpha_p \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{1 - \nu} \cdot (p_b - p_{pp}) + \frac{E \cdot \alpha_t}{3 \cdot (1 - \nu)} (T_{st} - T_s) \\ \sigma_a &= \frac{\alpha_p \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{1 - \nu} \cdot (p_b - p_{pp}) + \frac{E \cdot \alpha_t}{3 \cdot (1 - \nu)} (T_{st} - T_s)\end{aligned}\quad (2 - 4)$$

Gdje su:

- α_p - Biotova konstanta [-],
- p_{pp} - početni porni tlak [Pa],
- E - Youngov modul elastičnosti [Pa],

α_t - konstanta volumetrijskog termalnog širenja [$1/^\circ\text{C}$],

T_{st} - temperatura stijenki kanala bušotine [$^\circ\text{C}$],

T_s – početna temperatura stijene [$^\circ\text{C}$].

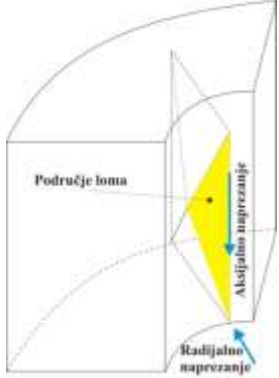
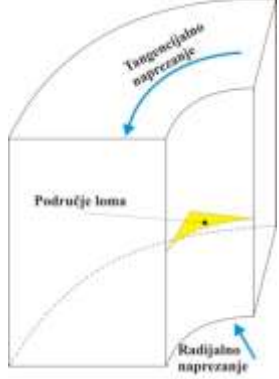
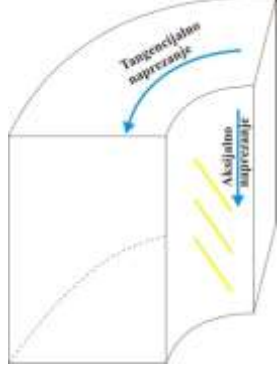
Navedene jednadžbe jasno ukazuju da promatrane promjene tlaka i temperature na stijenkama kanala bušotine utječu na promjenu tangencijalnih i aksijalnih naprezanja dok radijalna ostaju nepromijenjena. Prvi dio jednadžbe za tangencijalna i aksijalna naprezanja odnosi se na naprezanja izazvana razlikom između tlaka u kanalu bušotine p_b (hidrostatičkog ili hidrodinamičkog) i pornog tlaka, a što je posljedica hidrauličkog (konveksijskog) toka i osmotskog procesa. Drugi dio jednadžbi odnosi se na naprezanja nastala uslijed temperaturne razlike između temperature stijenki kanala bušotine i temperature same stijene. Do promijene temperature na stijenkama kanala bušotine dolazi uslijed kontakta isplake sa stijenkama kanala bušotine pri čemu dolazi do termalne difuzije (Chen et al., 2001). Kako se temperatura isplake razlikuje od temperature stijene dolazi do izmjene topline, odnosno hlađenja i zagrijavanja stijenki kanala bušotine. Smanjenjem temperature na stijenkama kanala bušotine uslijed cirkulacije isplake dolazi do smanjenja pornog tlaka i tangencijalnih naprezanja čime se postiže efekt stabilizacije stijenki kanala bušotine. Prema Chenu i sur. (2001.) većina bušotina ima srednju „neutralnu točku“ kod koje su srednja temperatura isplake i temperatura stijene izjednačene. Gledano sa stajališta utjecaja termalnih efekata na stabilnost kanala bušotine područje iznad definirane točke bit će manje stabilno od područja ispod nje.

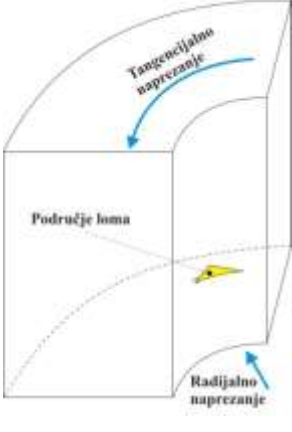
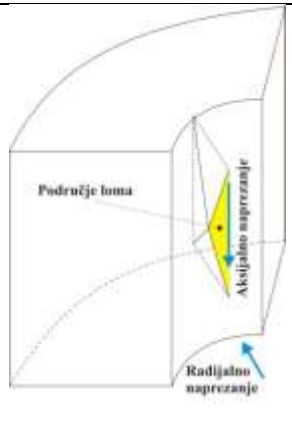
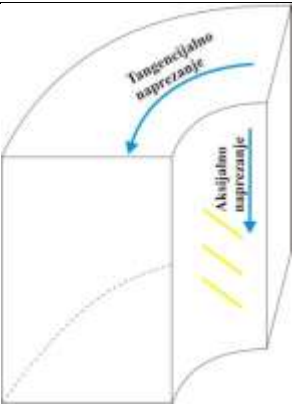
Prema rezultatima istraživanja koje su proveli Chen i sur. (2001.) te Zhang i sur. (2006.) hlađenje i zagrijavanje stijenki kanala bušotine ima dvojak utjecaj na stabilnost kanala bušotine. Zagrijavanjem stijene povećava se njen tlak frakturiranja, ali i tlak kod kojeg postoji opasnost da dođe do zarušavanja stijenki kanala bušotine (povećava se vrijednost minimalne potrebne gustoće isplake), dok njenim hlađenjem dolazi do smanjenja tlaka frakturiranja, ali i tlaka kod kojeg je moguće da dođe do zarušavanja stijenki kanala bušotine (potrebna je manja minimalna gustoća isplake).

Iz svega navedenog proizlazi da će stabilnost kanala bušotine ovisiti primarno o originalnim lokalnim (in-situ) naprezanjima koja djeluju na stijenu prije bušenja, te o novonastalim naprezanjima koja se javljaju na stijenkama kanala bušotine. Ukoliko novonastala naprezanja premaše čvrstoću stijene može doći do pojave jednog od dva oblika nestabilnosti kanala bušotine. Ako je tlak u kanalu bušotine manji od minimalne potrebne vrijednosti doći će do pojave smičnog loma stijene (*engl. shear ili collapse failure*) i zarušavanja stijenki kanala bušotine (Simangunsong et al., 2006). U tablici 2-3 prikazano je

šest oblika smičnog loma stijene uz pretpostavku da se stijena ponaša po linearno elastičnom modelu. Kao što je to u tablici vidljivo oblik i veličina smičnog loma direktno će ovisiti o međusobnom odnosu između radijalnog, aksijalnog i tangencijalnog napreznja (***, Rock Mechanics - Self Learning Course).




Tablica 2-3. Vrste smičnog loma (Pašić et al. 2007)

VRSTA LOMA	OPIS LOMA	SLIKA
<p>Plitki smični lom</p> $\sigma_a > \sigma_t > \sigma_r$	<p>Lom se događa u radijalno/aksijalnoj ravnini (vertikalna ravnina) jer maksimalno (σ_a) i minimalno (σ_r) napreznje leže u toj ravnini.</p>	
<p>Široki smični lom</p> $\sigma_t > \sigma_a > \sigma_r$	<p>Lom se događa u radijalno/tangencijalnoj ravnini (horizontalna ravnina) jer maksimalno (σ_t) i minimalno (σ_r) napreznje leže u toj ravnini.</p>	
<p>Smični lom s velikim kutom</p> $\sigma_a > \sigma_r > \sigma_t$	<p>Lom se događa u aksijalno/tangencijalnoj zakrivljenoj plohi (stijenke kanala bušotine) jer maksimalno (σ_a) i minimalno (σ_t) napreznje leže u toj plohi.</p>	

<p>Uzak smični lom</p> $\sigma_r > \sigma_a > \sigma_t$	<p>Lom se događa u radijalno/tangencijalnoj ravnini (horizontalna ravnina) jer maksimalno (σ_r) i minimalno (σ_t) naprezanje leže u toj ravnini.</p>	
<p>Duboki smični lom</p> $\sigma_r > \sigma_t > \sigma_a$	<p>Lom se događa u radijalno/aksijalnoj ravnini (vertikalna ravnina) jer maksimalno (σ_r) i minimalno (σ_a) naprezanje leže u toj ravnini.</p>	
<p>Smični lom s malim kutom</p> $\sigma_t > \sigma_r > \sigma_a$	<p>Lom se događa u aksijalno/tangencijalnoj zakrivljenoj plohi (stijenke kanala bušotine) jer maksimalno (σ_t) i minimalno (σ_a) naprezanje leže u toj plohi.</p>	

Drugi oblik nestabilnosti koji se može pojaviti tijekom bušenja je frakturiranje stijene odnosno vlačni lom (*engl. tensile failure*) koji se javlja u slučajevima kada efektivna vrijednost jednog od tri glavna naprezanja premaše vlačnu čvrstoću stijene. U odnosu na tlačnu čvrstoću stijene koja je bitna kod smičnog loma, vlačna čvrstoća stijene daleko je manja i iznosi manje od 10% vrijednosti tlačne čvrstoće određene stijene (***, Rock Mechanics - Self Learning Course). U tablici 2-4 prikazana su tri osnovna mehanizma vlačnog loma, odnosno ovisno o efektivnom naprezanju koje uzrokuje lom (radijalno, aksijalno ili tangencijalno) dolazi do stvaranja koncentrične, horizontalne ili vertikalne frakture.

Tablica 2-4. Vrste vlačnog loma (Pašić et al. 2007)

VRSTA LOMA	OPIS LOMA	SLIKA
<p>Cilindrični lom</p> $\sigma_r \leq -T_o$	<p>Nastali lom je koncentričan s kanalom bušotine i ne može se vidjeti na karotaži slike. Mala gustoća isplake pogoduje ovom lomu zbog niže vrijednosti σ_r.</p>	
<p>Horizontalni lom</p> $\sigma_a \leq -T_o$	<p>Dolazi do stvaranja horizontalnih fraktura.</p>	
<p>Vertikalni lom</p> $\sigma_t \leq -T_o$	<p>Na ovaj način nastaje fraktura paralelna s maksimalnim horizontalnim naprežanjem, jer su tangencijalna naprežanja premašila najmanju vlačnu čvrstoću stijene.</p>	

Kako bi se spriječila nestabilnost kanala bušotine uzrokovana promjenama naprežanja na stijenama kanala bušotine potrebno je prije svega definirati određene kriterije, odnosno uvjete kod kojih može doći do pojave smičnog odnosno vlačnog loma stijene. Prema McLeanu i Addisu (1990.) navedene kriterije stabilnosti kanala bušotine može se podijeliti u četiri osnovne grupe, kao što je to prikazano u tablici 2-5.

Tablica 2-5. Podjela uvjeta osiguranja stabilnosti stijene (McLean i Addis, 1990)

Uvjet	Glavna naprežanja koja se uzimaju u obzir prilikom definiranja uvjeta stabilnosti stijene	
	Maksimalno (σ_1), srednje (σ_2) i minimalno (σ_3) glavno naprežanje	Maksimalno (σ_1) i minimalno (σ_3) glavno naprežanje
Linearni uvjet	Kategorija A	Kategorija B
	Drucker-Prager	Mohr-Coulomb
Nelinearni uvjet	Kategorija C	Kategorija D
	Pariseau	Hoek-Brown

Iz navedene tablice vidljivo je da se kategorije uvjeta stabilnosti stijene odnosno stijenki kanala bušotine razlikuju po tome radi li se o linearnom ili nelinearnom uvjetu, odnosno uzimaju li se u proračun sva tri glavna naprežanja (maksimalno, srednje i minimalno) ili samo maksimalno i minimalno glavno naprežanje.

Od navedenih uvjeta stabilnosti kanala bušotine u praksi se najčešće koristi Mohr-Coulombov uvjet, koje se može prikazati sljedećom jednadžbom (Zhang et al, 2006^b; Pašić et al., 2007):

$$(\sigma_1 - \alpha_p \cdot p_p) \leq C_o + (\sigma_3 - \alpha_p \cdot p_p) \cdot \tan^2 \cdot \phi \quad (2 - 5)$$

Gdje su:

p_p - porni tlak [Pa],

C_o - kohezijska čvrstoća stijene [Pa],

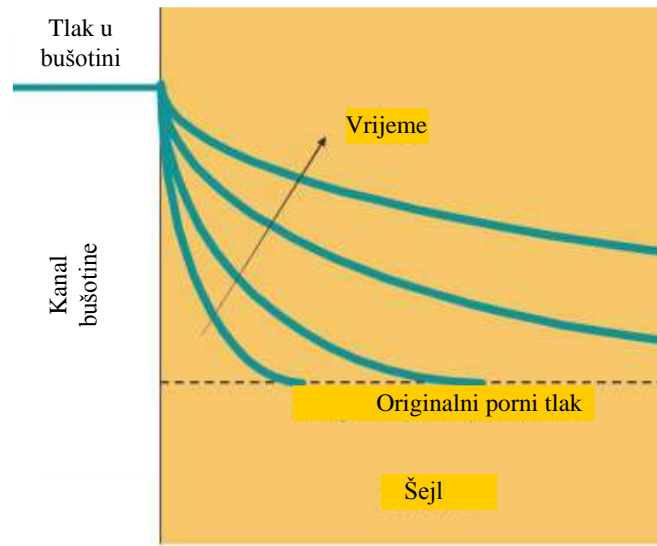
ϕ - unutarnji kut trenja [°].

Osim definiranih uvjeta stabilnosti kanala bušotine postoji i više modela kojima se simulira ponašanje stijene poput elastičnog modela, elasto-plastičnog, poro-elastičnog, kruto-plastičnog, elasto-izotropnog i dr (McLean i Addis, 1990; Chen et al., 2001; Simangunsong et al., 2006). Navedeni modeli razlikuju se prvenstveno po opisu ponašanja stijene, ali i po količini ulaznih podataka koji su potrebni tijekom simulacije. Za primjenu određenog modela i definiranja uvjeta stabilnosti kanal bušotine (navedenih u tablici 2-5) potrebno je imati točne podatke o naprezanjima koja djeluju na stijenu (smjer i vrijednost), ali i njenim mehaničkim svojstvima. Ovi podaci mogu se dobiti ispitivanjima u kanalu bušotine (leak-off testom, karotažnim mjerenjima), standardnim laboratorijskim triaksijalnim testovima na originalnom uzorku jezgre stijene te publiciranim korelacijama. Stoga se postavlja pitanje mogućnosti dobivanja određenih podataka i njihove točnosti. Za provođenje triaksijalnih ispitivanja potrebno je imati originalni nepromijenjeni uzorak jezgre, dobiven jezgrovanjem iz kanala bušotine na kojem bi se provodila višestruka ispitivanja (Lal, 1999). Ograničavajući faktor ove metode dobivanja podataka o mehaničkim svojstvima stijena je mali volumen stijene dobiven jezgrovanjem te utjecaj promjena nastalih na jezgri od trenutka jezgrovanja do obavljanja ispitivanja (utjecaj korištene isplake tijekom jezgrovanja, mehanička dezintegracija jezgre, utjecaj vlažnosti zraka uslijed neodgovarajućeg skladištenja i sl.). Mjerenjem u kanalu bušotine mogu se dobiti direktno ili indirektno podaci o smjeru djelovanja i intenzitetu lokalnih (in-situ) naprezanja, ali i podaci o mehaničkim svojstvima stijene. Tako primjerice vertikalno naprezanje može se dobiti interpretacijom rezultata karotaže gustoće, maksimalno horizontalno naprezanje može se dobiti proračunom uz pomoć podataka dobivenih leak-of testom dok se minimalna horizontalna naprezanja dobivaju na osnovu publiciranih korelacija (Rojas et al., 2006^a). Smjer djelovanja glavnih naprezanja može se dobiti interpretacijom podataka dobivenih karotažnim mjerenjima kaliperom. Podatke o kohezijskoj čvrstoći stijene

i kutu trenja između čestica također je moguće dobiti interpretacijom karotažnih mjerenja. Kod interpretacije ovih podataka valja biti oprezan jer promjene na stijenkama kanala bušotine nastale hidratacijom mogu značajno utjecati na rezultate mjerenja, odnosno hidratacijom dolazi do porasta pornog tlaka i smanjenja kohezijske čvrstoće stijene (Lal, 1999).

Kod razmatranja stabilnosti kanala bušotine bitnu ulogu ima kut koji zatvara os kanala bušotine i određeni sloj. Prema Labenskom i sur. (2003.) vjerojatnost pojave nestabilnosti povećava se sa smanjenjem kuta između osi kanala bušotine i kuta nagiba sloja, dok se najveća stabilnost postiže u slučaju kada kanal bušotine raskriva sloj pod kutom od 90°. Kod projektiranja bušotine potrebno je uzeti u obzir i međusobne odnose između pojedinih komponenti lokalnih (in-situ) naprezanja te njihov smjer pružanja. Tako se primjerice u slučaju normalnog sustava naprezanja kada je vertikalno naprezanje veće od maksimalnog i minimalnog horizontalnog ($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$) stabilnost kanala bušotine postiže izradom vertikalne bušotine, dok se u slučaju obrnutog sustava naprezanja kada je maksimalno horizontalno naprezanje veće od vertikalnog ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$) veća stabilnost postiže izradom usmjerenih i horizontalnih bušotina. Prilikom izrade horizontalnih i usmjerenih bušotina potrebno je izbjegavati izradu kanala bušotine paralelno sa smjerom pružanja maksimalnih horizontalnih naprezanja kako bi se smanjila nestabilnost stijenki kanala bušotine i ublažile njene posljedice (Zhang et al., 2006^b).

Ukoliko se razmatranje mehaničke stabilnosti kanala bušotine ograniči na šejl kao stijenu kroz koju se najčešće buši, potrebno je posebno razmotriti neke njegove karakteristike te utjecaj isplake na promjenu nekih njegovih mehaničkih svojstava. Šejl je stijena relativno male čvrstoće s izrazito malom propusnošću i određenim udjelom minerala gline (Steiger, 1982; Bol et al., 1994; Ewy i Stankovich, 2002). Zbog relativno male propusnosti šejla, na stijenkama kanala bušotine ne dolazi do stvaranja isplačnog obloga (Ewy i Morton, 2009). Izravna posljedica nepostojanja isplačnog obloga je porast pornog tlaka u pribušotinskoj zoni s vremenom (slika 2-5). Osim porasta pornog tlaka uslijed nepovoljna međudjelovanja isplake i šejla, može doći do promjene mehaničkih svojstava stijene poput čvrstoće i Youngovog modula elastičnosti (Zhang et al., 2004; Rojas et al., 2006^a). Kod procjene stabilnosti kanala bušotine u šejlu potrebno je također uzeti u obzir i mehanički integritet same stijene te pojavu dodatnih naprezanja izazvanih hidratacijom/dehidratacijom stijene.



Slika 2-5. Promjena pornog tlaka u pribušotinskoj zoni šejla (Ewy i Morton, 2009)

2.2. Fizikalno-kemijski uzroci nestabilnosti kanala bušotine

Istovremeno s procesom preraspodjele naprezanja na stijenkama kanala bušotine koja se događaju tijekom bušenja, može doći i do fizikalno-kemijskog međudjelovanja isplake i stijene. Ukoliko nije pravilno definiran sastav isplake može doći do pojave različitih mehanizama koji destabiliziraju kanal bušotine. Nestabilnost kanala bušotine uzrokovana fizikalno-kemijskim uzrocima najčešće se povezuje s već spomenutim šejlovima zbog visokog udjela minerala gline i izrazito male propusnosti. Kontaktom vode iz isplake i šejla može doći do hidratacije šejla i uslijed toga do promjene volumena stijene te smanjenja njene kohezijske čvrstoće.

Međutim vrlo je teško izdvojiti samo hidrataciju kao osnovni uzrok bubrenja stijenci i nestabilnosti kanala bušotine. Štoviše, tijekom kontakta isplake i stijene dolazi do nekoliko različitih procesa poput već spomenute hidratacije (adsorpcije ili apsorpcije vode), difuzijskog toka iona (pri čemu dolazi do promjene u međuslojnom prostoru glinene čestice), toka filtrata isplake uslijed nadtlaka u kanalu bušotine te kapilarnih sila (Fink, 2011). Kod adsorpcije (*engl. adsorption*) dolazi do vezanja jednog ili više slojeva vode na površinu minerala gline, dok kod apsorpcije (*engl. absorption*) dolazi do prodora vode i otopljenih iona u strukturu minerala gline. Zajednička osobina ovim procesima je kretanje molekula vode i iona u ili iz šejla, te da se događaju istovremeno. Ovi procesi odvijaju se sve dok se ne postigne uravnoteženost između stijene i isplake. Hoće li i u kojoj mjeri doći do razvoja ovakvih procesa prvenstveno ovisi o samom mineraloškom sastavu glinovite stijene, ali i o svojstvima isplake koja je u kontaktu sa stijenom.

Gledano sa stajališta mogućih fizikalno-kemijskih interakcija najvažnija komponenta u sastavu stijene je glina. U sastavu šejla najčešće se nalaze minerali gline iz skupine smektita (najčešće montmorilonit), ilita, klorita i kaolinit te miješanoslojni minerali gline u različitim omjerima. Svaki od ovih minerala gline ima specifičnu kristalinsku strukturu o kojoj će ovisiti i reakcije prilikom kontakta s isplakom, osobito na bazi vode. Ponašanje šejla kao stijene direktno će ovisiti o ponašanju određenog tipa minerala gline. Problem hidratacije minerala gline nije samo vezan uz nestabilnost kanala bušotine, već i uz ležišne stijene. Prema istraživanjima približno 75% svih ležišta nafte i plina sadrže gline, koje mogu uslijed kontakta s isplakom bubriti i migrirati te uzrokovati oštećenja ležišne stijene (Berry et al., 2008).

Kako bi se izbjegli fizikalno-kemijski uzroci nestabilnosti kanala bušotine potrebno je pravilno definirati sastav isplake koja će se koristiti tijekom bušenja kroz određenu stijenu.

Da bi se to postiglo potrebno je prije svega imati točne podatke o mineraloškom sastavu šejla (osobito o udjelu pojedinih minerala gline), ali i o drugim karakteristikama šejla kao što su propusnost, šupljikavost i sl. Za proces bubrenja posebno je bitan udio minerala gline podložnih hidrataciji, vrijednost aktiviteta vode u šejlu te mogućnost zamjene kationa u međuslojnom prostoru glinene čestice. Najtočnije podatke moguće je dobiti jedino uzimanjem originalnog uzorka stijene te provođenjem detaljnih laboratorijskih analiza na njemu.

U počecima razvoja bušenja, problemi vezani uz nestabilnost kanala bušotine, rješavali su se metodom pokušaja i pogrešaka (Tare et al., 2002). Na ovaj su se način postizali određeni rezultati u konkretnom slučaju, međutim nisu bili ključ rješenja za nova polja i nove bušotine. Kako bi se što bolje razumjela nestabilnost kanala bušotine, potrebno je prvenstveno definirati mehanizme koji dovode do nje. Samo pomoću točno definiranih mehanizama može se poduzeti odgovarajuće mjere kako bi se izbjegla pojava nestabilnosti kanala bušotine, odnosno kako bi se ublažile posljedice ukoliko do nje dođe. Prilikom procjene stabilnosti kanala bušotine u određenoj stijeni, potrebno je poznavati moguće mehanizme koji uzrokuju nestabilnost, ali i njihovu međuovisnost. Tijekom bušenja cijeli se proces međudjelovanja isplake i šejla odvija na određenoj dubini te je vrlo teško pratiti promjene u realnom vremenu, tako da se nameće nužnost laboratorijskih ispitivanja u ovom području. Isto tako se ne smije zanemariti primjena određenih laboratorijskih rezultata u konkretnom slučaju na bušotini, jer je to jedini način da se dobiju točni podaci i povratna informacija o učinkovitosti primjene istih.

Već je ranije naglašeno da najveći dio stijena kroz koje se buši čini šejl, koji uzrokuje najveći dio problema vezanih uz nestabilnost kanala bušotine. Za razliku od kompaktnih pješčenjaka i vapnenaca koji ne sadrže značajniji udio gline, kod šejla je nestabilnost kanala posljedica zajedničkog djelovanja mehaničkih i kemijskih faktora. Za proučavanje utjecaja različitih isplaka na ponašanje šejla, u posljednjih je pedesetak godina osmišljeno nekoliko laboratorijskih instrumenata i metoda koje u manjoj ili većoj mjeri simuliraju stvarno stanje u bušotini. Tijekom laboratorijskih ispitivanja korišteni su različiti uzorci šejla, ali i različiti fluidi. Cilj svih ispitivanja bio je na što realniji način ispitati ponašanje šejla u kontaktu s isplakom kroz praćenje kretanja vode i iona, deformacije uzorka stijene, promjene tlaka, propusnosti ili mehaničkih svojstava uzorka stijene.

Jedno od najvažnijih otkrića, presudno za daljnji razvoj laboratorijskih ispitivanja u ovom području je utvrđivanje da se šejl ponaša poput polupropusne membrane te da postoji mogućnost poticanja osmotskog toka vode kroz promjenu aktiviteta isplake. Također je vrlo značajno i ispitivanje efikasnosti membrane kod osmotskog toka kroz komprimirane uzorke

glina koje su obavili Fritz i Marine 1983. godine, a na osnovu čega su razvijeni današnji instrumenti i postupak mjerenja promjena koje nastaju tijekom međudjelovanja šejla i isplake (Ewy i Morton, 2009).

U nastavku će biti dan kratki pregled dijela dosadašnjih laboratorijskih ispitivanja međudjelovanja isplake i šejla. Kako bi se lakše pratilo što je i na koji način ispitivano, pregled je podijeljen u tri cjeline koje se odnose na uzorke na kojima je provođeno ispitivanje, korištenu laboratorijsku opremu te fluide korištene u ispitivanjima. Navedeni pregled vrlo je bitan jer su kroz prethodna laboratorijska ispitivanja definirani osnovni mehanizmi međudjelovanja šejla i isplake te uočeni potencijalni problemi na koje treba usmjeriti ispitivanja.

2.2.1. Uzorci korišteni u dosadašnjim ispitivanjima

U dosadašnjim su ispitivanjima korišteni uzorci šejla različitog porijekla i sastava. U pravilu se najčešće radi o originalnim uzorcima jezgara iz različitih bušotina, ali i uzorcima šejla dobivenim iz površinskih kopova. Korištenjem ovih uzoraka nastojalo se približiti stvarnim uvjetima u bušotini. Osim navedenih uzoraka šejla, laboratorijska ispitivanja su provođena i na krhotinama šejla sakupljenim na vibracijskom situ (Benayada et al., 2003), kao i na komprimiranim krhotinama šejla. U laboratorijskim ispitivanjima koje su proveli Al-Awad i Smart 1995. godine, korišteni su u jednom dijelu ispitivanja uzorci koji su dobiveni komprimiranjem krhotina šejla. Na temelju rezultata mjerenja bubrenja originalnog uzorka šejla i uzorka dobivenog komprimiranjem krhotina zaključeno je da rekonstruirani uzorak šejla pokazuje nešto veću sklonost bubrenju, što je najvjerojatnije posljedica narušenih prirodnih veza između čestica glina. Do sličnih rezultata došli su na temelju laboratorijskih ispitivanja i Chenevert i Osisanya (1989.), koji sugeriraju da ukoliko je potrebno, rekonstruirani uzorci šejla mogu se koristiti za ispitivanja čiji je cilj odabir najbolje inhibirane isplake. Komprimirane krhotine šejla u svojim laboratorijskim ispitivanjima koristili su i Khodja i sur. (2010.).

Posebna je pažnja posvećena načinu jezgrovanja i pripremi uzorka za ispitivanje kako bi se smanjio utjecaj na sam uzorak (osobito utjecaj fluida za jezgrovanje i vlage iz zraka). Različiti su autori za čuvanje uzorka najčešće koristili isplaku na bazi ulja ili različita mineralna ulja (Simpson i Dearing, 2000; Chenevert i Amanullah, 2001; Munitz et al., 2005^a; Al-Bazali et al., 2006; Ewy i Morton, 2009).

Prije bilo kakvih ispitivanja na uzorcima šejla, određen im je mineraloški sastav (posebna pažnja posvećena je određivanju udjela gline), sastav porne vode, udjel vode u uzorku te njezin aktivitet. Udjel vode u uzorku šejla određen je sušenjem uzorka kroz 24 sata na temperaturi od 93°C. Pretpostavlja se da su ovi uvjeti sušenja dovoljni da se ukloni sva slobodna voda osim one vezane na površinu gline (Steiger, 1982; Zhang et al, 2004). Iako su u svom radu Muniz i sur. (Muniz et al., 2005^a) koristili temperaturu od 105°C, pretpostavlja se da, ukoliko bi se primijenila temperatura viša od 93°C, postoji opasnost od stvaranja pukotina i mikropukotina u uzorku što bi moglo direktno utjecati na rezultate ispitivanja. Aktivitet porne vode u ispitivanim uzorcima određen je u laboratorijskim uvjetima na osnovu adsorpcijske izoterme pri čemu nije navedeno jesu li dobivene i prezentirane vrijednosti korigirane za utjecaj dubine, tlaka i temperature.

Mineraloški sastav uzoraka određen je laboratorijskim analizama. Uzorci korišteni u ispitivanjima imali su različite udjele glinovite komponente, koja se najčešće sastojala od smektita, ilita, kaolinita, klorita i miješanoslojnih minerala gline (Simpson i Dearing, 2000; Oleas et al., 2010). Ove su skupine minerala gline izabrane jer cjelokupno ponašanje šejla ovisi o njihovim međusobnim udjelima (O'Brien i Chenevert, 1973; Steiger, 1982; Gaurina-Međimurec, 1992). Za korištene uzorke određivan je i ukupni kapacitet kationske zamjene jer utječe i na proces hidratacije gline, ali i na moguće fizikalno-kemijske promjene samog uzorka.

Osim mineraloškog sastava, određivana su i svojstva poput šupljikavosti, raspodjele veličine pora i propusnosti uzorka. Određivanje svih ovih parametara nužno je kako bi se odabrao odgovarajući fluid za ispitivanja, pratile promjene tijekom ispitivanja međudjelovanja s odabranim fluidom te utvrdile naknadne promjene koje nastaju na uzorku.

2.2.2. Laboratorijska oprema korištena za ispitivanja

Uočeno je da su tijekom razvoja laboratorijskih ispitivanja utjecaja isplake na ponašanje uzoraka šejla korišteni različiti instrumenti uz različite postupke ispitivanja. U ovisnosti o primijenjenom postupku ispitivanja i tipu instrumenta dobiveni su i različiti rezultati, od kojih je jedan dio direktno ukazivao na nastale promjene na uzorku šejla, dok su se kod nekih instrumenata dobiveni rezultati tek naknadnom interpretacijom mogli povezati sa stvarnim promjenama u šejlu. Iako su neki od instrumenata prilagođeni i za korištenje na terenu, zbog težnje za što boljim simuliranjem uvjeta u bušotini (što se postiže kroz primjenu sofisticirane opreme), većina instrumenata pogodna je samo za korištenje u laboratorijskim

uvjetima. Razvoj računalnih programa za procjenu stabilnosti kanala bušotine, omogućio je direktnu implementaciju podataka dobivenih mjerenjima u računalne simulacije (Pašić, 2011). U literaturi se najčešće koriste sljedeći testovi za direktno praćenje ponašanja šejla, osobito bubrenja tijekom kontakta s isplakom:

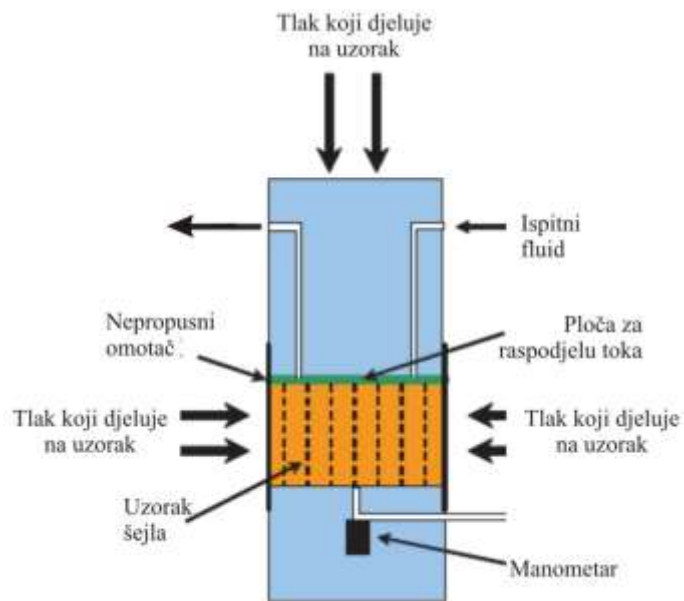
- **Test gravimetrijskog bubrenja** (*engl. gravimetric-swelling test-GST*) (Zhang et al., 2004; Rojas et al., 2006^a),
- **Test prijenosa tlaka** (*engl. pressure transmission test ili membrane efficiency test*) (van Oort et al., 1996; Ewy i Stankovich, 2002; Al-Bazali et al., 2006; Ewy i Morton; 2009; Oleas et al., 2010),
- **Ispitivanje u ćeliji za simuliranje uvjeta u bušotini** (*eng. downhole simulation cell-DSC*) (Simpson et al., 1989; Santarelli, 1995).

Test gravimetrijskog bubrenja

Test gravimetrijskog bubrenja koristi se kao jednostavna metoda za određivanje kompatibilnosti između određene isplake i uzorka šejla. Test je razvila skupina znanstvenika na čelu sa Zhangom 2004. godine, i to kombinacijom dva neovisna testa - gravimetrijskog i testa bubrenja. Sam test provodi se na način da se uzorak točno određenih dimenzija umetne u plastičnu vrećicu, koja se potom umetne između pomične i nepomične ploče (preko kojih se određuje postotak bubrenja) te se u vrećicu ulije 50 ml ispitnog fluida. Tijekom vremena bilježi se promjena debljine uzorka iz čega se dobiva postotak bubrenja, dok se vaganjem uzorka prije i nakon testa (suhog i vlažnog uzorka) dobivaju podaci o udjelu vode i iona u određenom trenutku. Kao osnovni nedostatak ovog testa autori navode neprimjenjivost u slučaju jako reaktivnih šejlova s izraženom tendencijom prema disperziji te navode primjer potpuna neuspjeha u slučaju ispitivanja Gumbo i Speeton šejla (Zhang et al., 2004; Rojas et al., 2006^a).

Test prijenosa tlaka

Test prijenosa tlaka ili test efikasnosti membrane koristi se za ispitivanje promjena koje nastaju u šejlu uslijed kontakta s različitim fluidima. Za razliku od prethodnog testa koji se odvija u statičkim uvjetima, ovdje na uzorak šejla djeluje određeni tlak (koji simulira naprezanja u stijeni), ali i hidraulički i kemijski potencijal čime se ostvaruju uvjeti ispitivanja slični onima koji vladaju u bušotini. Shematski prikaz instrumenta dan je na slici 2-6.



Slika 2-6. Shematski prikaz instrumenta za mjerenje prijenosa tlaka i efikasnosti membrane (Ewy i Morton, 2009)

Slične instrumente, uz određene modifikacije može se pronaći i u radovima van Oorta i sur. (1995.), van Oorta i sur. (1996.), Stowea i sur. (2001.), Ewya i Stankovicha (2002.), Al-Bazalia i sur. (2006.) i Oleasa i sur. (2010.). Princip rada zasniva se na sljedećem: očuvani uzorak šejla umeće se u ćeliju te se primjeni odgovarajući tlak koji simulira naprezanja koja djeluju na stijenu na određenoj dubini, a zatim se u uzorak utiskuje simulirani porni fluid dok se ne postigne potpuno zasićenje. Nakon što se postigne potpuno zasićenje, u uzorak se utiskuje ispitni fluid (pod tlakom koji simulira nadtlak u kanalu bušotine) koji lagano protječe između vrha uzorka i ploče za raspodjelu toka, dok se istovremeno, s donje strane uzorka bilježi tlak na manometru. Na ovaj se način mogu dobiti podaci o porastu pornog tlaka tijekom međudjelovanja šejla i isplake, efikasnosti membrane, propusnosti (i

promjeni propusnosti), ali i bubrenju samog uzorka (pomoću mjerenja brzine širenja longitudinalnih i transverzalnih valova).

Ispitivanje u ćeliji za simuliranje uvjeta u bušotini

Najviše podataka kod ispitivanja međudjelovanja određenog fluida i šejla može se dobiti korištenjem ćelije za simuliranje uvjeta u bušotini (slika 2-7). Tijekom ovakvih je ispitivanja uzorak šejla izložen djelovanju određenog tlaka (slično kao i u prethodnom testu) i temperature čime se postižu još realniji uvjeti ispitivanja. Određene inačice uređaja imaju mogućnost izrade malih kanala „bušotina“ kroz uzorak (slično kao i tijekom stvarnog bušenja) uz primjenu stvarnog optoka fluida. Simuliranjem bušenja tijekom ispitivanja omogućava se praćenje promjena u šejlu u realnom vremenu. Osim mjerenja bubrenja cijelog uzorka i promjene promjera kanala, uređaj ima mogućnost i mjerenja tlačne čvrstoće uzorka (odnosno njene promjene s vremenom). Vizualnim pregledom uzorka mogu se utvrditi i neke druge promjene, poput postojanja pukotina i mikropukotina, dubine prodora filtrata isplake i sl. (Simpson et al., 1989; Hale et al., 1993; Santarelli, 1995; Horsrud et al., 1998).

I sami postupci ispitivanja mogu biti različiti. Tako npr., ukoliko se tlak ispitnog fluida izjednači s pornim tlakom, dobivaju se podaci o promjenama šejla koje su posljedica difuzije iona i osmoze. S druge strane, ukoliko se ispitni fluid zamijeni simuliranim pornim fluidom, mogu se pratiti promjene u uzorku šejla koje nastaju uslijed djelovanja nadtlaka.



Slika 2-7. Ćelija za simuliranje uvjeta u bušotini

2.2.3. Korišteni fluidi i dobiveni rezultati

Za ispitivanje međudjelovanja fluida i šejla korišteni su različiti fluidi jednostavnog sastava (otopine soli ili polimera) ili kompletne isplake, sve s ciljem pronalaska optimalnog fluida koji će osigurati stabilnost kanala bušotine, ali i ispuniti sve ostale zahtjeve koje nameće proces bušenja. Iako se već desetljećima zna da određene isplake daju zadovoljavajuće rezultate u stabilizaciji stijenci kanala bušotine, nova istraživanja ukazuju da problem nije u potpunosti riješen. Razlog tome leži u prilično složenom sastavu šejla (osobito udjelu različitih minerala gline i njihovom međusobnom omjeru), ali i njegovim fizikalno-kemijskim karakteristikama. Propusnost šejla, heterogenost, čvrstoća, sastav porne vode i njen aktivitet te razlika u tim svojstvima između pojedinih slojeva šejla samo su neki od razloga koji čine određenu isplaku koja ima inhibirajuća svojstva, djelomično ili potpuno nedjelotvornom.

Prema Simpsonu i Dearingu (2000.), većina se problema vezanih uz stabilnost kanala bušotine može riješiti pomoću uljne isplake. Razlozi neuspjeha primjene uljne isplake tijekom bušenja kroz šejlove na određenim poljima su različiti. U svom radu Oleas i sur. (2010.) navode kako se neuspjeh uljne isplake u stabilizaciji stijenci kanala bušotine može pripisati nestabilnosti uljne emulzije (u istom radu prezentirani su i rezultati laboratorijskih ispitivanja na ovu temu), dok Rojas i sur. (2006.^b) sugeriraju da i aktivitet vodene faze uljne isplake igra značajnu ulogu u stabilizaciji šejla (osobito frakturiranog).

Međutim zbog značajnog utjecaja na okoliš i visoke cijene, uljna se isplaka nastoji zamijeniti ekološki prihvatljivom isplakom na bazi vode, koja bi davala iste rezultate u stabilizaciji glinovitih stijena. Kao što je to već ranije spomenuto, značajan su doprinos u tom području dali Chenevert i Mondshine sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Nakon toga su brojni autori nastojali definirati optimalni sastav isplake na bazi vode, ali i ispitati koji parametri u jednoj takvoj isplaci djeluju na stabilnost kanala te kako na njih utječu sastav i fizikalno-kemijske karakteristike šejla. U svom radu, publiciranom 1973. godine, O'Brien i Chenevert daju rezultate ispitivanja utjecaja koncentracije različitih soli i polimera na bubrenje i disperziju uzoraka šejla. Također je dano i posebno objašnjenje djelotvornosti soli kalija u stabilizaciji šejla. Slični rezultati prezentirani su u radu iz 1982. (Steiger) gdje je autor posvetio pažnju istraživanju utjecaja koncentracije KCl-a, ksantan gume i djelomično hidroliziranih poliakrilamida na stabilizaciju šejla s udjelom montmorilonita od 9,2 i 34,6%. U radu su također prezentirani i rezultati primjene kalijsko-polimerne isplake u rješavanju problema nestabilnosti kanala bušotine na određenim bušotinama, između ostalog i rezultati

primjene kalijsko-polimerne isplake kod bušenja kroz vodoosjetljive Gumbo šejlove s udjelom montmorilonita od 25,2%. U konkretnom slučaju većina problema riješena je tek s povećanjem koncentracije KCl-a do 285,3 kg/m³ (100 lb_m/bbl). U svom zaključku Steiger sugerira da i dalje postoje šejlovi koji su ekstremno skloni hidrataciji i mehaničkoj nestabilnosti te ih nije moguće stabilizirati ni pomoću optimalno pripremljene inhibirane isplake. Premda su već prvi rezultati ukazali na djelotvornost kalijske isplake, u laboratorijskim ispitivanjima se i dalje koriste i druge soli osobito natrijev klorid (NaCl), kalcijev klorid (CaCl₂), kalijev formijat (HCOOK) i natrijev formijat (HCOONa) (Bol et al., 1994; Chenevert i Pernot, 1998; Muniz et al., 2004^a; Muniz et al., 2005^b). U novijim je istraživanjima posebna pažnja posvećena utjecaju različitih parametara i sastava isplake na efikasnost membrane. Prema rezultatima istraživanja Al-Bazalia i sur. (2006.) efikasnost membrane će rasti sa smanjenjem propusnosti šejla (za očekivati je da su s povećanjem dubine zalijeganja određenog sloja promjeri pora sve manji, a samim time i efikasnost membrane veća), s povećanjem hidratiranog radijusa aniona i kationa te većim omjerom između kapaciteta kationske zamjene i propusnosti. Utjecaj propusnosti šejla na njegovo ponašanje može se vidjeti iz rezultata istraživanja Ewya i Mortona iz 2009. godine iz kojih je vidljivo da se upotrebom različitih komercijalnih stabilizatora šejla i čepila za pore postiže smanjenje propusnosti uzorka, čime se pomaže očuvanju nadlaka na stijenke kanala bušotine.

Neki autori poput Simpsona i Dearinga (2000.), Andersona i sur. (2010.) ili Finka (2011.) sugeriraju da se stabilnost šejlova može postići i dodavanjem u isplaku metilglukoze, neionskog poliola (*engl. nonionic polyol*), anionskih polimera, kvartenarnih amonijevih soli, vodotopivih organskih makromolekula (koje imaju i hidrofilno i hidrofobno svojstvo) ili djelomično hidroliziranih poliakrilamida (*engl. partially hydrolysed polyacrylamide - PHPA*).

Različite inhibitore hidratacije minerala gline, a samim tim i stabilizatore šejla, može se podijeliti u dvije skupine: privremene i trajne. Za sprječavanje hidratacije minerala gline i osiguranje stabilnosti kanala bušotine tijekom bušenja, opremanja ili frakturiranja koriste se privremeni inhibitori. Najčešće je riječ o različitim solima poput KCl-a, NaCl-a, NH₄Cl-a ili CaCl₂. Poseban napredak ostvaren je u području razvoja trajnih inhibitora poput kvaternarnih polimera amina (Patel et al., 2007; Berry et al., 2008).

2.3. Šejl

Šejl je klastična finožrnata sedimentna stijena s određenim udjelom minerala gline, koja čini približno 75% svih stijena kroz koje se buši (Khodja et al., 2010). Ukupni udjel glinovite komponente kao i udjel svakog pojedinog tipa minerala gline razlikuje se od šejla do šejla, a direktno je povezan s procesom stvaranja šejla. Osim glina u sastavu šejla nalazi se i određeni udjel kvarca, feldspata, kalcita i dolomita. Ove komponente utječu na neka njegova svojstva poput šupljikavosti, propusnosti, čvrstoće te na taj način direktno utječu na mehanizme interakcije stijene i isplake, te posredno na proces bubrenja.

Osim udjela gline, na ponašanje šejla i procese koji dovode do nestabilnosti kanala bušotine bito utječe i njegova propusnost. Iako je šejl porozna stijena, njegova propusnost za razliku od pješčenjaka je jako mala i nalazi se u rasponu od jedan do nekoliko desetaka 10^{-9} μm^2 (nekoliko nanodarcya do nekoliko desetaka nanodarcya) (Hale et al., 1993; Gazaniol et al., 1995; Labanski et al., 2003; Ewy i Morton, 2009). Uzrok male propusnosti je mala veličina pora koje se nalaze u rasponu od 0,01 do 0,001 μm te njihove slabe povezanosti. Zbog male veličine pora i male propusnosti šejla ne dolazi do stvaranja isplačnog obloga na stijenama kanala bušotine, te je isplaka u direktnom kontaktu sa stijenom čime može doći do njihovog međudjelovanja.

Kako bi se razumio proces bubrenja, ali i cjelokupno ponašanje šejla potrebno je prvo krenuti od proučavanja procesa stvaranja šejla i njegovog mineraloškog sastava. Isto tako potrebno je razumjeti sve mehanizme koji dovode do kretanja vode i iona u ili iz šejla.

2.3.1. Proces stvaranja šejla

Kao što je ranije rečeno šejl spada u skupinu sedimentnih stijena. Njegovo stvaranje povezano je s procesom erozije odnosno dezintegracije (mehaničke ili kemijske) eruptivnih i metamorfnih stijena. Nakon procesa dezintegracije materijal se prenosi do mjesta njegove ponovne sedimentacije tijekom čega se dodatno usitnjava. Postepena sedimentacija materijala odvija se u vodenoj sredini. Prije nego dođe do kompakcije (zbijanja) i stvaranja sloja šejla, sedimentirani sloj ima visoku propusnost i šupljikavost, te sadrži 70 do 90% vode koja je u kontaktu sa slobodnom vodom iznad sloja. S daljnjim procesom sedimentacije dolazi do povećanja tlaka na sloj čime počinje proces kompakcije (zbijanja) šejla.

Prema Lal (Lal, 1999) kompakcija (zbijanje) šejla odvija se u tri osnovne faze:

1. U prvoj fazi, koja se odvija pod djelovanjem tlaka istaloženog materijala, dolazi do istiskivanja većeg dijela slobodne porne vode, osmotske te jednog dijela kristalinske vode. Proces kompakcije (zbijanja) u ovoj fazi ovisit će o nekoliko faktora: tlaku koji djeluje na istaloženi materijal, veličini zrna, brzini taloženja, prisutnim mineralima gline, udjelu organske komponente te geokemijskim faktorima. Nakon početnog zbijanja, šejl sadrži još uvijek približno 30% vode.
2. Druga faza zbijanja šejla počinje pri temperaturi od približno 100°C, pri čemu može doći i do određenih dijagenetskih promjena na mineralima gline. Uslijed dehidracije udjel vode u šejlu se smanjuje za dodatnih 10 do 15%.
3. Zadnja faza procesa zbijanja i dehidracije šejla je vrlo spora i odvija se uslijed djelovanja temperature.

Upravo kroz proces razrušavanja (dezintergracije) različitih stijena, te taloženja i zbijanja materijala nastat će sloj šejla s određenim karakteristikama. Ponašanje i svojstva šejla ovisit će u prvom redu o vrsti materijala koji je sedimentiran (osobito o udjelu gline), ali i o uvjetima sedimentacije i zbijanja te naknadnim tektonskim promjenama (rasjedanje, boranje i sl.). Sve navedeno odrazit će se na svojstva šejla poput propusnosti, šupljikavosti, udjel vode, stupanj dehidracije, in-situ naprezanja, čvrstoću šejla i dr.

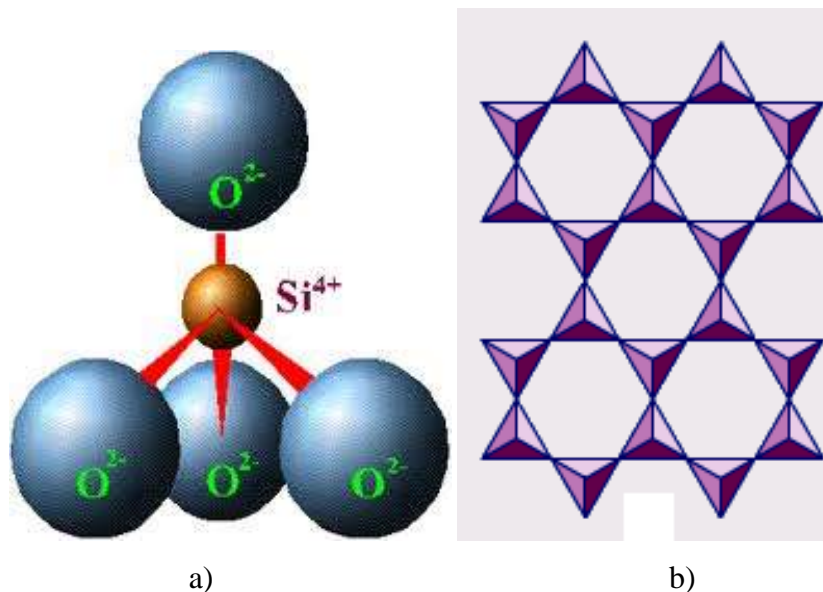
Osim promjene u udjelu vode i petrofizikalnim karakteristikama šejla, tijekom kompakcije, s povećanjem tlaka i temperature dolazi i do kemijske promjene stijenskog materijala uslijed dijagenetskih procesa. Dijagenetski procesi u šejlu uzrokuju u određenom trenutku promjenu u kristalinskoj strukturi montmorilonita te nastaju minerali gline poput illita, klorita i kaolinita. Da bi uopće došlo do dijagenetskih procesa nužno je postojanje kalijevih kationa u samom šejlu tijekom kompakcije (Chilingarian i Vorabour, 1981; Bourgoyne et al., 2005).

2.3.2. Gline

Šejl može sadržavati određenu količinu različitih minerala gline koji bitno određuju njegovo ponašanje. Ukupni udjel i udjel pojedinih minerala gline može biti različit, a ovisi o ishodišnom materijalu iz kojeg je šejl nastao, ali i o mogućim preobrazbama iz jednog minerala u drugi (uslijed dijagenetskih procesa) (Pašić, 2010).

Gline su slojeviti minerali iz skupine filosilikata čiju osnovnu strukturnu jedinicu (jedinični sloj) čine dvodimenzionalni tetraedarski i oktaedarski listići koji unutar sloja mogu biti orijentirani na različite načine, te pripadajući međusloj. Više strukturnih jedinica čine glinenu česticu i određuju njena svojstva.

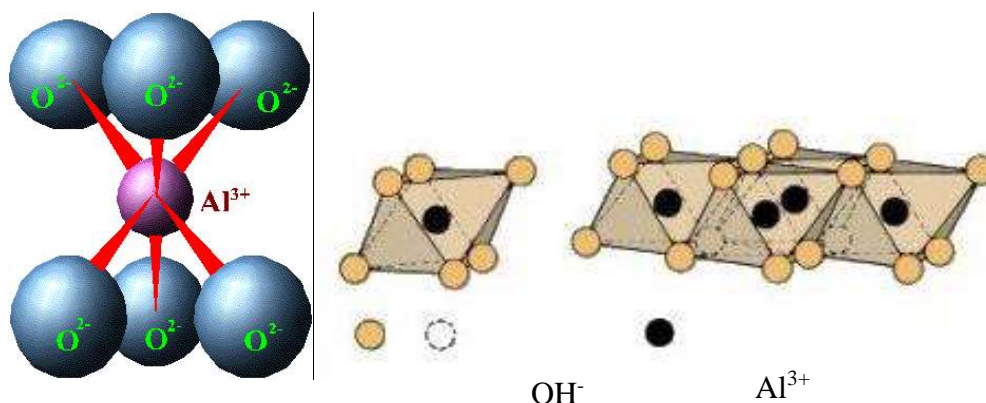
Tetraedarski (silikatni) listić ili mrežu čine više tetraedara u kojima je centralni atom silicija povezan s četiri atoma kisika koji se nalaze u vrhovima tetraedra. Tri od četiri atoma kisika dijele se s ostalim atomima silicija, čime dolazi do stvaranja heksagonalne strukture u jednoj dimenziji sa šest isturenih atoma kisika. Strana rešetke na kojoj se nalaze vrhovi tetraedra čini aktivnu (nezasićenu) stranu koja se može preko kisika vezati s kationima okruženim oktaedarski sa šest atoma kisika. Na slici 2-8 a) prikazan je osnovni tetraedar, a na slici 2-8 b) tetraedarski listić s heksagonalnim strukturama u jednoj ravnini (Chilingarian i Vorabour, 1981; Schlemmer et al., 2003; Gaurina-Međimurec et al., 2006; Anderson et al., 2009; Heriot-Watt University „Drilling Engineering“).



Slika 2-8. Tetraedar (a) (<http://pheysonian.com>) i tetraedarski listić s heksagonalnim strukturama u jednoj ravnini (b) (<http://www.britannica.com>)

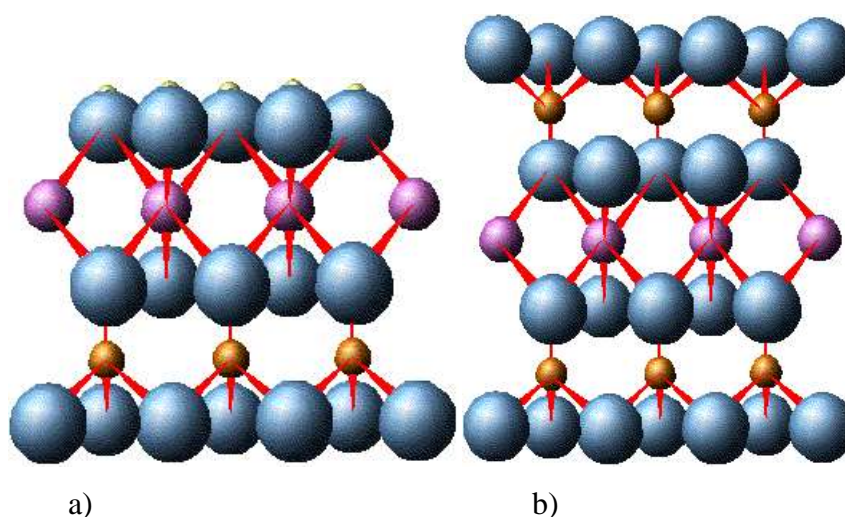
Oktaedarski listić ili mreža sastoji se od oktaedara u čijem se centru nalazi atom aluminija, a na vrhovima četiri ili šest atoma kisika (dva atoma kisika mogu biti zamijenjena s dva OH⁻ iona). Ovim rasporedom stvara se heksagonalna zatvorena struktura. Na slici 2-9 a) prikazan je oktaedar, a na slici 2-9 b) način povezivanja više oktaedara u oktaedarsku mrežu.

Oktaedarski listić naziva se još i gibsitni ili brucitni listić (Chilingarian i Vorabour, 1981; Gaurina-Međimurec et al., 2006; Anderson et al., 2009).



Slika 2-9. Oktaedar (a) (<http://pheyloian.com>) i oktaedarski listić (b) (<http://echo2.epfl.ch>)

Tetraedarski i oktaedarski listići mogu se zbog analogne simetrije i približno istih dimenzija spajati preko slobodnog atoma kisika tvoreći strukturnu jedinicu. Moguće su dvije kombinacije spajanja ovih listića. Spajanjem jednog tetraedarskog i jednog oktaedarskog listića nastaje T-O sloj (T-tetraedar, O-oktaedar) (slika 2-10 a), dok se spajanjem dva tetraedarska listića i jednog oktaedarskog nastaje T-O-T sloj (slika 2-10 b). Kod T-O-T sloja oktaedarski listić je umetnut između dva tetraedarska listića.



Slika 2-10. T-O sloj (a) (<http://pubpages.unh.edu/>) i T-O-T sloj (b) (<http://pubpages.unh.edu/>)

Tijekom procesa stvaranja gline moguće su izomorfne zamjene silicija u tetraedarskom ili aluminijskom u oktaedarskom listiću s atomima manjeg naboja. Na taj način dolazi do preraspodjele naboja na strukturnoj jedinici gline, što ima za posljedicu vezanje različitih kationa kako na vanjskoj površini sloja tako i u međuslojnom prostoru gline. Kod odgovarajućih uvjeta može doći do zamjene kationa u međuslojnom prostoru s drugim kationima ili organskim tvarima malih dimenzija. Mogućnost zamjene kationa određena je kapacitetom kationske zamjene (*engl. cation exchange capacity - CEC*) koja je karakteristična za svaku pojedinu vrstu minerala gline (tablica 2-6). Kapacitet kationske zamjene ovisi o veličini kristala, pH vrijednosti i vrsti kationa koji se zamjenjuje (Anderson et al., 2009), a definira se kao količina naboja u ekvivalentima ili miliekvivalentima na 100 g suhog uzorka gline pri temperaturi od 105°C. Zbog razlike u mogućnosti kationske zamjene, ali i zbog razlika u kristalinskoj strukturi postoji više vrsta glina. Međutim u ovom radu obradit će se samo neke od njih, odnosno one koje se najviše sreću tijekom procesa izrade kanala bušotine, a podložne su promjenama uslijed kontakta s isplakom.

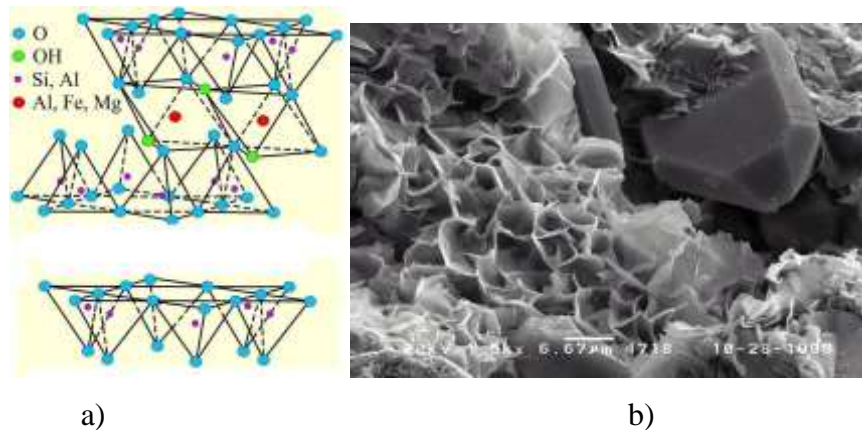
Tablica 2-6. Kapacitet kationske zamjene za različite minerale gline (Gaurina-Međimurec, 1992)

MINERAL GLINE	CEC vrijednost (meq/100 g pri pH=7)
Kaolinit	3 – 15
Klorit	10 – 40
Ilit	10 – 40
Smektit (montmorilonit)	80 – 150

2.3.2.1. Smektiti (*montmoriloniti*)

Prema Chilingarianu i Vorabutru smektiti čine 50% svih minerala gline. U skupini smektita nalaze se sljedeći minerali: montmorilonit kao najzastupljeniji član, bajdelit, nontronit, saponit, hektorit, saukonit te stevensit (Chilingarian i Vorabour, 1981; Gaurina-Međimurec et al., 2006). Jedinичni sloj montmorilonitna sastoji se od dva tetraedarska i jednog oktaedarskog listića. U oktaedarskom listiću, do jedne četvrtine kationa Al^{3+} može se zamijeniti s kationima Mg^{2+} , dok je u tetraedarskom listiću jedan dio kationa Si^{4+} zamijenjen s kationima Al^{3+} . Uslijed ove izomorfne zamjene dolazi do promjene naboja na sloju, koji se

kompenzira vezanjem slojeva vode i zamjenjivih kationa. Kapacitet kationske zamjene je dosta visok i varira između 80 i 150 meq/100 g suhog uzorka (prema nekim autorima 70 do 130, odnosno 60 do 120) (Gaurina-Međimurec et al., 2006), kao i vrijednost specifične površine koja varira od 400 do 800 m²/g. Slika 2-11 a) prikazuje strukturu jediničnog sloja smektita, dok slika 2-11 b) prikazuje fotografiju smektita dobivenu korištenjem elektronskog mikroskopa (*engl. scanning electron microscope-SEM*).



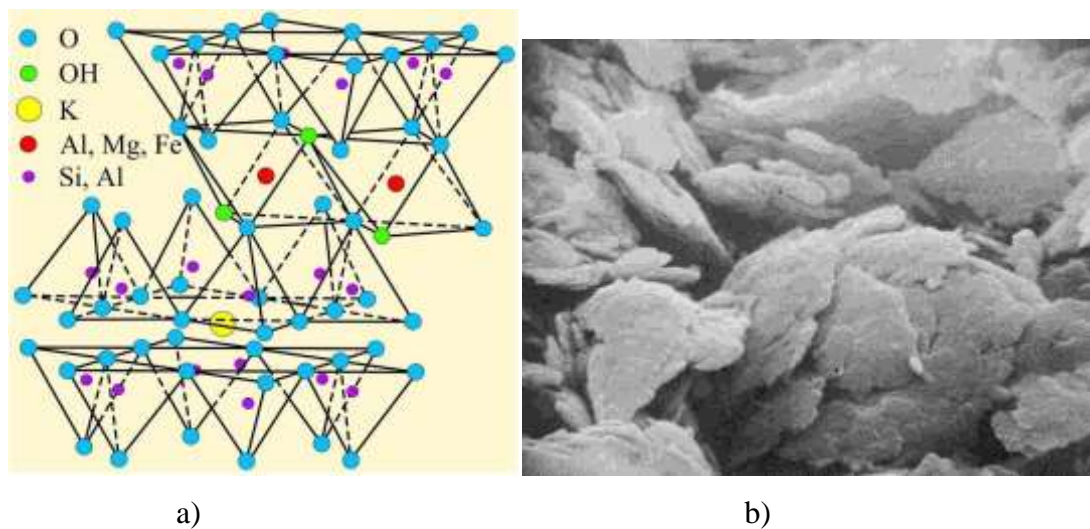
Slika 2-11. Struktura smektita (a) (<http://pubs.usgs.gov/>) i SEM fotografija smektita (b) (<http://webmineral.com/>)

Vrsta kationa koji će se vezati u međuslojnom prostoru te na rubovima ovisi o sredini u kojoj je došlo do stvaranja gline, te o stupnju kompakcije. Tako npr. kod slatkovodnih sredina najveći dio zamjenjivih kationa čini Ca²⁺, dok kod slanih sredina Mg²⁺ nastoji zamijeniti Ca²⁺ i Na⁺. Međutim s povećanjem dubine zalijeganja i zbijanjem gline, najveći dio zamjenjivih kationa čini Na⁺. Otprilike 80% svih zamjenjivih kationa smješteno je u međuslojni prostor za kompenziranje negativnog naboja dok se ostatak kationa nalazi na rubovima.

2.3.2.2. *Ilit*

Ilitna skupina minerala gline često se nalazi u sastavu kako šejla tako i pješčenjaka. Zbog strukturne sličnosti sa skupinom tinjaca, često se ilitna skupina naziva i hidrotinjci. Kao i kod smektitne skupine osnovni jedinični sloj sastavljen je od dva tetraedarska i jednog oktaedarskog listića. U tetraedarskom listiću jedan dio kationa Si⁴⁺ zamijenjen je s kationima

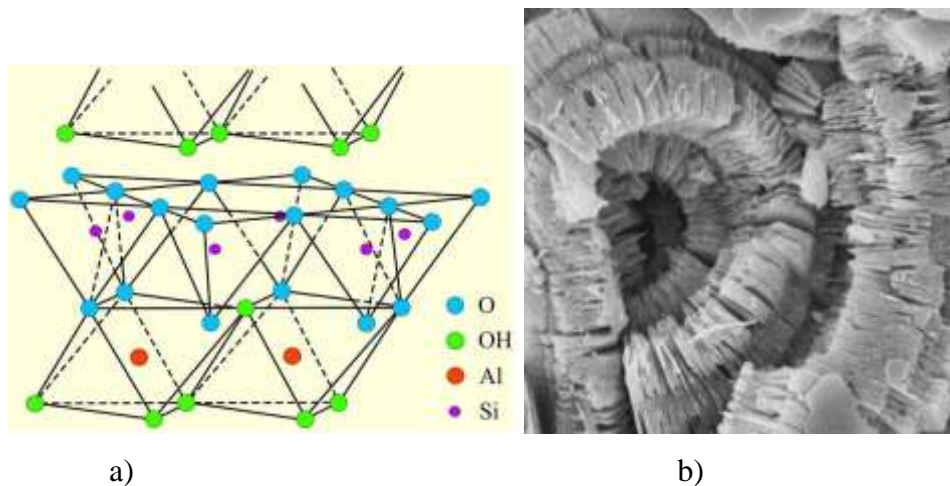
Al^{3+} , dok je jedan dio kationa Al^{3+} u oktaedarskom listiću zamijenjen s kationima Mg^{2+} i Fe^{2+} . Za razliku od smektitne skupine ovdje je razlika u naboju uravnotežena s ionima kalija. Ioni kalija se smještaju u heksagonalnu strukturu tetraedarskog listića tvoreći zatvorenu strukturu. Stoga ilit ima i mali kapacitet kationske zamjene i to 20 do 50 meq/100 g suhog uzorka, a samim tim i malu tendenciju prema hidrataciji i bubrenju. Slika 2-12 a) prikazuje strukturu jediničnog sloja ilita, dok slika 2-12 b) prikazuje SEM fotografiju ilita (Chilingarian i Vorabour, 1981; Gaurina-Međimurec et al., 2006; <http://pubs.usgs.gov/>).



Slika 2-12. Struktura ilita (a) (<http://pubs.usgs.gov/>) i SEM fotografija ilita (b) (<http://www.evsc.virginia.edu/>)

2.3.2.3. Kaolinit

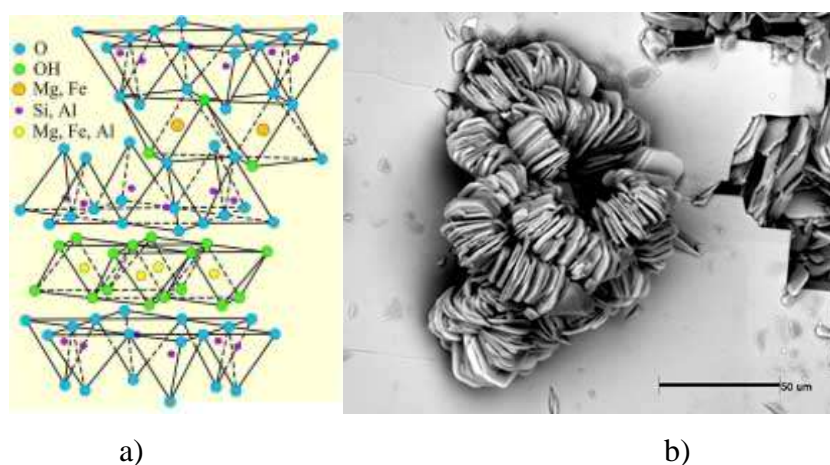
Kaolinit je mineral gline čiju osnovnu strukturu čine kombinacija tetraedarskog i oktaedarskog listića. Zbog male izomorfne zamjene kationa u pojedinom listiću slojevi su međusobno povezani vodikovim vezama. Posljedica ovakvog stanja je i mala vrijednost kationske zamjene i to 3 do 15 meq/100 g suhog uzorka. Zbog male vrijednosti kationske zamjene i male specifične površine (svega $15 \text{ m}^2/\text{g}$), kaolinit pokazuje malu sklonost prema hidrataciji i bubrenju. Slika 2-13 a) prikazuje strukturu jediničnog sloja kaolinita, dok slika 2-13 b) prikazuje SEM fotografiju kaolinita (Chilingarian i Vorabour, 1981; Gaurina-Međimurec et al., 2006; <http://pubs.usgs.gov/>).



Slika 2-13. Struktura kaolinita (a) (<http://pubs.usgs.gov/>) i SEM fotografija kaolinita (b) (<http://originoflife.net/>)

2.3.2.4. Klorit

Jedinični sloj klorita sačinjen je iz dva dijela: T-O-T sloja s negativnim nabojem i brucitnog (gibsitnog) listića s pozitivnim nabojem. Razlika u naboju na površini slojeva posljedica je izomorfne zamjene u jednom i drugom dijelu strukture. Zbog jakih veza koje vladaju između slojeva, klorit pokazuje malu tendenciju bubrenju. Slika 2-14 a) prikazuje strukturu jediničnog sloja klorita, dok slika 2-14 b) prikazuje SEM fotografiju klorita (Chilingarian i Vorabourt, 1981; Gaurina-Medimurec et al., 2006; <http://pubs.usgs.gov/>).



Slika 2-14. Struktura klorita (a) (<http://pubs.usgs.gov/>) i SEM fotografija klorita (b) (<http://www.museumwales.ac.uk/>)

2.3.2.5. Miješanoslojni minerali gline

Većina miješanoslojnih minerala gline sastavljena je od interstratigrafskih slojeva različitih sastava. Miješanoslojni minerali gline predstavljaju zajednički naziv za skupinu glina čija se čestica sastoji od spojenih strukturnih jedinica različitog tipa. Strukturne jedinice mogu se spajati u pravilnom redosljedu (ABABABAB) ili u slučajnom rasporedu (ABABBAAB) (<http://www.usgs.gov/>; Gaurina-Međimurec, 1992). U pravilu najčešće dolazi do povezivanja slojeva s različitim sklonostima prema hidrataciji poput kombinacije ilit-smektit, klorit-smektit, kaolinit-smektit, klorit-vermekulit i dr. Miješanoslojni minerali gline mogu nastati na različite načine, poput raspadanja minerala tijekom kojeg dolazi do vezanja ili otpuštanja iona (npr. K^+) ili uslijed hidrotermalnih promjena. Ponekad miješanoslojni minerali nastaju kao međufaza tijekom prelaska bubreive gline u neubrivu i obrnuto.

2.3.3. Hidratacija minerala gline

Tijekom kontakta isplake i šejla dolazi do razvoja nekoliko procesa koji za posljedicu imaju kretanje molekula vode u/iz šejla. Ukoliko dođe do kretanja molekula vode u šejl doći će do hidratacije prisutnih minerala gline, te ovisno o tipu gline do bubrenja ili disperzije kako minerala gline tako i šejla u cjelini. Hidratacija minerala gline odvija se kroz dva procesa odnosno kroz adsorpciju i apsorpciju vode (Fink, 2011).

2.3.3.1. Kristalinsko bubrenje (površinska hidratacija)

Tijekom stvaranja šejla, uslijed zbijanja (kompakcije), istovremeno dolazi i do procesa istiskivanja vode odnosno dehidratacije šejla. Kako se u šejlu istovremeno nalaze i slobodna i međuslojna vezana voda, tijekom kompakcije prvo dolazi do istiskivanja slobodne vode iz šejla. Daljnjim povećanjem tlaka i temperature dolazi do istiskivanja većine vode iz šejla (Bourgoyne et al., 2005). U trenutku kada dlijeto prođe kroz šejl dolazi do upijanja vode iz isplake i to silom jednakoj onoj koja je uzrokovala istiskivanje vode iz šejla. Zbog velike specifične površine minerala gline, u kontaktu s vodom doći će do površinske hidratacije, čime se nastoji smanjiti površinska energija gline. Površinskoj hidrataciji (adsorpciji vode) podložni su svi tipovi minerala gline (Gaurina-Međimurec et al., 2006; Pašić, 2010).

Površinskom hidratacijom u pravilu su obuhvaćene obje vanjske (bazalne) površine, ali moguća je i hidratacije rubnih dijelova i međuslojnog prostora pojedine glinene čestice.

Tijekom površinske hidratacije dolazi do vezivanja jednomolekularnog sloja vode na kristalinsku strukturu gline pomoću vodikovih veza s izloženim kisikovim atomima. Kako su kisikovi atomi posloženi unutar kristalinske strukture na način da tvore heksagonalnu strukturu, molekule vode koje se vežu na nju raspoređene su na isti način. Na prvi sloj vode vežu se sljedeći slojevi i to na isti način, pri čemu je važno napomenuti da snaga vodikove veze između pojedinih slojeva slabi s udaljenošću od kristalinske rešetke. Smatra se da ovako vezana voda egzistira na udaljenosti od 75 do 100 Å od vanjske površine glinene čestice. Zamjenjivi hidratirani kationi također se nastoje vezati na površinu gline te istovremeno narušiti strukturu vezane vode (Darley i Grey, 1988; Baker Hughes „Drilling Fluids-Reference Manual“, 2006). Strukturna voda (voda vezana uz glinenu česticu) ima veću viskoznost i gustoću nego slobodna voda (Darley i Grey, 1988; Bourgoyne et al., 2005).

Usljed površinske hidratacije dolazi do malog povećanja volumena gline te isto tako i malog povećanja međuslojnog prostora unutar glinene čestice. Prema Andersonu i sur. tijekom površinske hidratacije dolazi do povećanja međuslojnog prostora unutar glinene čestice u rasponu od 9 do 20 Å (Anderson et al., 2009).

2.3.3.2. Osmotsko bubrenje (apsorpcija vode)

Za razliku od kristalinskog bubrenja odnosno površinske hidratacije, apsorpcija vode događa se samo kod određenog tipa gline. Osnovni preduvjet za pojavu apsorpcije vode je postojanje zamjenjivih kationa u međuslojnom prostoru gline. Usljed razlike u ionskoj koncentraciji kationa u glini i isplaci može doći do apsorpcije vode, pri čemu se glina ponaša poput polupropusne membrane. Kretanje vode se odvija sve dok se ne uspostavi ravnotežno stanje. Prilikom apsorpcije vode dolazi do višestrukog povećanja volumena gline te povećanja međuslojnog prostora u rasponu od 20 do 130 Å (Darley i Gray, 1988; Gaurina-Međimurec et al., 2006; Anderson et al., 2009).

2.3.4. Podjela šejlova

Iz svega do sad navedenog u ovom poglavlju vidljivo je da sastav šejla može varirati, a samim tim dolazi i do varijacija u svojstvima šejla poput propusnosti, šupljikavosti, čvrstoće i dr. Stoga je i vrlo teško klasificirati šejlove na određeni način, a da se pri tome uzme u obzir sve varijabilne veličine. Kako najveći dio šejla čini glina, najčešće se u literaturi susreće podjela šejlova na osnovu udjela pojedinog tipa minerala gline i pripadajućih promjena koje

se mogu pojaviti tijekom kontakta s isplakom (bubrenje, disperzija, sklonost odlamanju većih komada stijene, osipanje i sl.). Prema O'Breinu i Chenevertu (O'Brein i Chenevert, 1973) šejlove se može klasificirati ili podijeliti u 5 grupa što je i prikazano u tablici 2-7. (sličnu podjelu moguće je pronaći u Steiger, 1982 te Gaurina-Međimurec, 1992).

Tablica 2-7. Podjela šejlova (O'Brein i Chenevert, 1973)

GRUPA	OPIS ŠEJLA	UDJEL GLINE	PONAŠANJE ŠEJLA
1	Meki šejl (Gumbo)	Puno montmorilonita s nešto ilita	Jako bubri i dispergira
2	Meki šejl	Puno montmorilonita i ilita	Jako bubri i dispergira
3	Srednje tvrdi šejl	Puno miješanoslojnih minerala gline, puno ilita, klorit	Umjerena disperzija, sklonost osipanju
4	Tvrdi šejl	Ilit i klorit	Mala disperzija, sklonost osipanju
5	Vrlo tvrdi šejl	Puno ilita, klorit	Krti, zanemariva disperzija, sklonost odlamanju komada stijene

Vidljivo je da se podjela zasniva na četiri skupine najzastupljenijih minerala gline u šejlu, montmorilonitu (jako hidratira i dispergira), ilitu (manja tendencija prema bubrenju i disperziji), miješanoslojnim mineralima (čije ponašanje ovisi o strukturi) te kloritu kao stabilnoj strukturi (izrazito malo hidratira i bez sklonosti prema disperziji). Udjel pojedine skupine minerala gline odredit će i ukupno ponašanje šejla u kontaktu s isplakom određenog sastava. Kako je udjel gline u pojedinoj grupi samo eksplicitno naznačen, za bolju ilustraciju i pomoć prilikom klasifikacije šejla u određenu grupu od pomoći može biti i tablicama s primjerima šejlova iz određene skupine (tablica 2-8). Međutim i tu treba biti oprezan, jer ponašanje šejla ne ovisi samo o udjelu pojedine gline već i o udjelu drugih komponenti poput kvarca, ali i o karakteristikama šejla (propusnosti, šupljikavosti, udjelu vode, čvrstoći i dr.).

Tablica 2-8. Primjeri kategoriziranih šejlova (O'Brein i Chenevert, 1973)

NAZIV ŠEJLA	GRUPA	UDJEL GLINE (mas. %)			
		Montmorilonit	Ilit	Miješanoslojni	Klorit
Anahuac	1	40,4	5,5	-	-
Vermilion	2	25,4	42,0	-	6,7
Atoka	3	-	38,8	18,1	13,0
Midway	3	-	35,0	15,0	15,0
Wolfcamp	4	-	14,8	-	3,2
Tvrđi kanadski šejl	5	-	48,3	-	8,3

Kako bi se pojedini uzorak šejla pravilno klasificirao potrebno je prije svega napraviti točnu mineralošku analizu uzorka. Mineralošku analizu uzorka šejla najbolje je napraviti na originalnom očuvanom uzorku stijene (jezgre). Ukoliko isti ne postoji, analizu je moguće napraviti i na krhotinama sakupljenim na vibracijskim sitima, ali pri tome treba voditi računa da je već došlo do reakcija između isplake i šejla. Nakon što se definira mineraloški sastav na uzorku se provode različita laboratorijska ispitivanja kako bi se utvrdila potencijalna sklonost prema hidrataciji, bubrenju, disperziji, osipanju i dr.).

2.3.5. Mehanizmi reakcija između isplake i šejla

Tijekom procesa izrade kanala bušotine paralelno se odvijaju dva procesa koja u konačnici mogu utjecati na destabilizaciju kanala bušotine. S jedne strane uslijed bušenja uklanja se određeni volumen stijene, te se on nadomješta isplakom određene gustoće. Kako je gustoća isplake manja od gustoće stijene dolazi do preraspodjele naprezanja na stijenama kanala bušotine. Istovremeno s preraspodjelom naprezanja dolazi do interakcije isplake koja se koristi i stijene, a koja se odvija kroz nekoliko procesa poput difuzije, osmoze, hidratacije, porasta pornog tlaka i dr. Ono što je zajedničko svim ovim procesima je kretanje molekula vode i odgovarajućih iona u ili iz stijene. Iako se kanal bušotine izrađuje kroz različite vrste stijena, ovi navedeni procesi karakteristični su za šejlove zbog velikog udjela minerala gline u njima, ali i fizikalno-kemijskih karakteristika šejla (osobito propusnosti).

Kao što je to ranije navedeno, šejl posjeduje izrazito malu propusnost pa se na njegovoj površini ne stvara isplačni oblog. Na taj način ne postoji fizička prepreka protjecanju filtrata isplake u stijenu, osobito vodenog filtrata koji direktno može izazvati hidrataciju minerala gline u raskrivenim stijenama. Stoga je za stabilnost kanala bušotine koji prolazi kroz naslagu šejla ključno poznavanje mehanizama kretanja vode i iona, te njihov međusobni

odnos. Kod određivanja ponašanja određene stijene u kontaktu s isplakom posebno je bitno međudjelovanje pojedinih procesa jer će o rezultanti njihovog zajedničkog djelovanja ovisiti ponašanje stijenske mase. Iako je razvoj znanosti i tehnologije omogućio detaljna istraživanja na ovom području i dalje nisu u potpunosti utvrđeni svi utjecaji isplake na glinovite stijene (Chenevert i Pernot, 1998).

2.3.5.1. Kretanje isplake uslijed diferencijalnog tlaka

U pornom prostoru netaknutog šejla nalazi se fluid pod određenim tlakom, a koji je posljedica preuzimanja dijela geostatičkog tlaka (tlaka pokrovnih stijena). Ostatak geostatičkog tlaka na sebe preuzima skelet stijene pri čemu se javlja intergranularno naprezanje. Kako bi se kontrolirao porni tlak, isplaka se otežava do vrijednosti koja će rezultirati tlakom nešto većim od pornog tlaka. Upravo ta razlika tlaka u bušotini i pornog tlaka jedan je od uzrok kretanja vode i iona u šejl (*engl. convective flow, hydraulic flow*) (Abass et al., 2006). Brzina toka fluida kroz poroznu sredinu definirana je izrazom 2-6 (Darcyeva jednadžba) (Zhang et al., 2006^a):

$$v_0 = -\frac{k}{\mu}(\nabla p - \rho \cdot g) \quad (2 - 6)$$

Gdje su:

v_0 - brzina toka fluida [m/s],

k - propusnost šejla [m²],

μ - viskoznost fluida [Pa·s],

∇p - gradijent tlaka između tlaka u kanalu bušotine i pornog tlaka [Pa/m],

ρ - obujamska masa (gustoća) fluida [kg/m³],

g - gravitacija [m/s²].

Zbog vrlo male propusnosti šejla kao i male razlike tlaka između tlaka u bušotini i pornog tlaka, ovaj proces odvijat će se vrlo sporo. U slučaju da je stijena prirodno frakturirana javlja se sustav dvostruke propusnosti (primarna i sekundarna) koja će znatno ubrzati proces prodora vode i iona, jer će se većina fluida kretati kroz pukotine (Chen et al., 2002).

Uslijed male propusnosti i male veličine pora šejla prodor vode i iona u porni prostor uzrokovat će porast pornog tlaka u pribušotinskoj zoni čime se poništava stabilizirajući učinak dobiven uslijed tlaka stupca isplake. Ovakav efekt karakterističan je samo za slabopropusne stijene poput šejla, dok se kod stijena s većom propusnošću uočava efekt „raspršenja tlaka“

(velika propusnost i mala brzina utoka fluida rezultirat će dovoljnim vremenom da dođe do „raspršenja tlaka“). Voda i ioni koji su ušli u šejl mogu uzrokovati i promjene na samim mineralima gline prisutnim u šejlu. Ovisno o tipu prisutne gline može doći do procesa bubrenja, što u kombinaciji s porastom pornog tlaka može uzrokovati destabilizaciju šejla. U slučaju postojanja fraktura u šejlu proces se ubrzava jer hidratacijom površina frakture smanjuje se trenje između ploha, što može dovesti do odlamanjem čitavih komada šejla i njihovim zarušavanjem u kanal bušotine. Za razliku od isplaka na bazi vode kod uljne isplake ne dolazi do kretanja uslijed razlike tlaka zbog kapilarnog tlaka koji djeluje kao protusila, te se na taj način dobiva veće radijalno naprezanje na stijenke kanala bušotine i bolji stabilizirajući efekt (Abass et al., 2006; Baker Hughes „Drilling Fluids- Reference Manual“, 2006)

2.3.5.2. Kemijska osmoza

Najvažniji uzrok kretanja vode u ili iz šejla je kemijska osmoza (*engl. chemical osmosis*). Kemijska osmoza nastaje kao posljedica razlike u kemijskom potencijalu između pornog fluida i isplake, uz postojanje polupropusne membrane. Kemijski potencijal određenog sustava vrlo je teško odrediti, te se umjesto njega češće koristi aktivitet vode (*engl. water activity*). Veza između aktiviteta vode i kemijskog potencijala prikazana je jednadžbom 2-7 (Zhang et al., 2006^a; Rojas et al., 2006^a):

$$\mu_i = \mu_i^0 + R \cdot T \cdot \ln \cdot (a_i) \quad (2 - 7)$$

Gdje su:

μ_i - kemijski potencijal određene komponente [J/mol],

μ_i^0 - kemijski potencijal određene komponente kod standardnih uvjeta [J/mol],

R - plinska konstanta [8,314·J/(mol·°K)],

T - apsolutna temperatura [°K],

a_i - aktivitet vode za određenu komponentu [-].

Kretanje vode iz jednog sustava u drugi uslijed razlike u aktivitetu vodene faze vidljiv je i u sustavu šejl/isplaka (Zhang et al., 2004). S jedne se strane nalazi šejl s pornim fluidom određenog aktiviteta, dok se s druge strane nalazi isplaka određenog aktiviteta vodene faze. Voda će se uvijek kretati iz područja većeg u područje manjeg aktiviteta vode.

Još jedan nužni preduvjet za pokretanje vode uslijed kemijske osmoze je postojanje polupropusne membrane. Zbog mogućnosti kationske zamjene i male propusnosti (negativno nabijene površine i pora malog promjera) šejl se ponaša poput polupropusne membrane. Idealna polupropusna membrana označava se s 1 (100%), te je takva membrana propusna za molekule vode, ali ne i za otopljenje soli u sustavu. Međutim brojna ispitivanja pokazala su da se šejl ne ponaša poput idealne polupropusne membrane, te da se paralelno s kemijskom osmozom događa i proces difuzije iona. U svojim istraživanjima Al-Bazali i sur. (2006.) zaključuju da se prilikom kontakta isplake na bazi vode određenog aktiviteta i šejla razvija polupropusna membrana u rasponu od 0,18 do 4,23% (Al-Bazali et al., 2006). S druge strane pojedini tipovi isplake poput npr. uljne s podešenim aktivitetom vodene faze pokazuju daleko veće efikasnosti membrane od 55 do 85% (Tan et al., 2002). Stvarna vrijednost šejla kao polupropusne membrane direktno utječe na razvoj stvarnog osmotskog tlaka u sustavu šejl-isplaka. Vrijednost efikasnosti membrane moguće je izračunati pomoću izraza 2-8:

$$\alpha_m = \frac{\Delta p_{os}}{\Delta \pi} \quad (2 - 8)$$

Gdje su:

α_m - efikasnost membrane [dijelovi cijelog],

Δp_{os} - stvarni osmotski tlak [Pa],

$\Delta \pi$ - teoretski osmotski tlak [Pa].

Prema istraživanjima koje su proveli van Oort i sur. 1995. godine efikasnost membrane u šejlu ovisi o svojstvima isplake (npr. veličini hidratirane otopljene tvari), svojstvima šejla (npr. veličini otvora pore, specifičnoj površini, kapacitetu kationske zamjene) i ostalim faktorima poput stupnja kompakcije ili stupnja dijageneze šejla (van Oort et al., 1995).

Prema Schlemmeru i sur. (2003.) postoje tri tipa membrane koje se pojavljuju kod šejla. Prvi tip odnosi se na membrane koje nastaju u samom šejlu, a ovise o svojstvima šejla, svojstvima isplake te međudjelovanju šejla i isplake. U drugi tip membrane svrstane su vanjske membrane ili membrane u matriksu šejla u pribušotinskoj zoni, a koje nastaju kao posljedica taloženja materijala, dok treći tip membrane čine membrane povezane s emulzijskim isplakama.

Za izračunavanje efikasnosti membrane potrebno je izmjeriti stvarni osmotski tlak koji se razvija u sustavu isplaka/šejl. Stvarni osmotski tlak dobiva se na temelju rezultata testa

prijenosa tlaka (*engl. pressure transmission test*) provedenog na uzorku šejla (Osuji et al., 2008; Ewy i Morton, 2009). Teoretski osmotski tlak ($\Delta\pi$) koji se može razviti između određene isplake i šejla može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$\Delta\pi = -\frac{R \cdot T}{V} \ln\left(\frac{a_{sh}}{a_{df}}\right) \quad (2 - 9)$$

Gdje su:

V - parcijalni molarni volumen vode [0,018 m³/mol],

a_{sh} - aktivitet vode u šejlu [-],

a_{df} - aktivitet vodene faze isplake [-].

Istovremeno, s postojanjem kemijske osmoze između isplake i pornog fluida u šejlu dolazi i do osmoze između izmijenjenog sastava porne vode (utokom vode u ili iz šejla mijenja se aktivitet porne vode) i kristalinske vode (vode koja se nalazi u međuslojnom prostoru glinene čestice, a u kojoj se nalaze zamjenjivi kationi). Ukoliko aktivitet isplake nije dobro definiran, na ovaj način može doći do pojave apsorpcije vode te osmotskog bubrenja glinenih čestica pri čemu glina višestruko povećava svoj obujam i dolazi do pojave hidratacijskog naprezanja. Stoga se ovaj mehanizam smatra i temeljnim uzrokom bubrenja i destabilizacije šejla.

Aktivitet vode u šejlu

Aktivitet vode u šejlu posljedica je kemijskog sastava porne vode, tlaka, temperature, razmaka između slojeva unutar glinene čestice te vrsti minerala gline. Kako na sastav porne vode nije moguće utjecati potrebno je prilagoditi aktivitet vodene faze isplake kako bi se izazvala dehidracija šejla. Za predviđanje aktiviteta vode u šejlu koriste se sljedeće metode (Rojas et al., 2006):

- metoda efektivnog vertikalnog naprezanja,
- metoda srednjeg efektivnog naprezanja i
- modificirana metoda.

Navedene metode koriste se različitim podacima kako bi se dobila približna vrijednost aktiviteta vode u šejlu. Temeljna pretpostavka svake metode je da je osnovni uzrok istiskivanja vode iz šejla efektivno naprezanje. Prema metodi efektivnog vertikalnog

naprezanja, aktivitet vode u šejlu funkcija je razlike između ukupnog vertikalnog naprezanja i pornog tlaka. U odnosu na ovu metodu kod metode srednjeg efektivnog naprezanja dodatno je uzeto u obzir i maksimalno i minimalno horizontalno naprezanje. Najtočniji podaci o aktivitetu vode u šejlu dobivaju se korištenjem modificirane metode gdje je, u odnosu na prethodne metode uzeto u obzir okruženje u kojem je došlo do taloženja te promjena koncentracije soli u šejlu s dubinom.

Aktivitet vode u isplaci

Na osnovu predviđenog aktiviteta vode u šejlu određuje se i potrebni aktivitet vode u isplaci. Njegova vrijednost mora biti takva da bude manji od aktiviteta vode u šejlu, čime se stvaraju uvjeti da uslijed kemijske osmoze dođe do kretanja vode iz šejla u isplaku. Za postizanje određenog aktiviteta vode u isplaci koriste se različite soli (KCl, NaCl, CaCl₂ i dr.). Aktivitet vode u isplaci postiže se povećavanjem koncentracije pojedine soli (što je koncentracija soli veća aktivitet vode je manji). Točna vrijednost potrebne količine soli određuje se iz publiciranih tablica i dijagrama.

2.3.5.3. Kapilarni tlak

Jedno od mogućih rješenja za stabilizaciju naslaga šejla je i korištenje uljnih isplaka. Osnovni mehanizam stabilizacijskog djelovanja ovih isplaka je stvaranja kapilarnog tlaka na stijenkama kanala bušotine tijekom kontakta između dva različita fluida između kojih se javlja određena površinska napetost. Nastali kapilarni tlak sprječava da isplaka prodre u porni prostor stijene, odnosno istovremeno neutralizira mogući tok isplake u stijenu uslijed razlike tlaka. Kapilarni tlak koji nastaje u stijeni može se prikazati sljedećim izrazom (van Oort et al., 1996; Zhang et al., 2006^a):

$$p_c = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}{r} \quad (2 - 10)$$

Gdje su:

- p_c – kapilarni tlak [Pa],
- σ – površinska napetost [N/m],
- θ – kontaktni kut [°],
- r – radijus pore [m].

Zbog malog promjera pora u šejlu može doći do razvoja velikih kapilarnih tlakova. Tako npr. kod srednjeg radijusa pora od 10 nm može doći do razvoja kapilarnog tlaka od približno 15 MPa (van Oort et al., 1996).

2.3.5.4. Difuzni tok

Kada bi se šejl ponašao poput idealno polupropusne membrane tijekom kontakta s isplakom došlo bi do kretanja samo molekula vode u ili iz šejla, dok bi kretanje različitih iona (kationa i aniona) bilo spriječeno. Međutim kao što je to ranije rečeno šejl se ne ponaša poput idealno polupropusne membrane već je moguće određeno kretanje iona u ili iz šejla. Kretanje iona direktno ovisi o razlici u koncentraciji iona u šejlu i u isplaci, a može se prikazati pomoću izraza 2-11 (van Oort et al., 1996; Zhang et al., 2006^a). Ukoliko je koncentracija iona u isplaci veća od one u šejlu doći će do kretanja iona iz isplake u šejl (sve dok se ne uspostavi ravnoteža) i obrnuto. Ispitivanja su pokazala da kretanje iona direktno ovisi o karakteristikama i veličini samih pora u šejlu, ali i o veličini hidratiranih iona. U tablici 2-9 dani su promjeri nekih hidratiranih kationa koji se mogu naći u isplaci. Iz tablice je vidljivo da promjer hidratiranog kationa varira ovisno o stupnju hidratacije.

$$J_i = -D_{si} \cdot \left(\frac{C_{i,sh} - C_{i,m}}{\Delta x} \right) \quad (2 - 11)$$

Gdje su:

J_i - maseni tok i-tog iona [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],

D_{si} - koeficijent difuzije i-tog iona [m^2/s],

$C_{i,sh}$ - koncentracija i-tog iona u pornom fluidu [mol/m^3],

$C_{i,m}$ - koncentracija i-tog iona u isplaci [mol/m^3],

Δx - duljina promatranog intervala šejla [m].

Tablica 2-9. Primjeri hidratiranih i nehidratiranih kationa (Al-Bazali et al., 2006)

Kationi	Promjer nehidratiranog kationa (Å)	Promjer hidratiranog kationa (Å)	Srednji promjer hidratiranog kationa (Å)
Natrij	1,9	5,5 do 11,2	8,35
Kalij	2,66	4,67 do 7,6	6,12
Cezij	3,34	4,6 do 7,2	5,9
Manezij	1,3	21,6	21,6
Kalcij	1,9	19	19

U pravilu ukoliko je promjer kationa veći od promjera pore neće doći do njegovog ulaska u nju. Ulaskom kationa u šejl dolazi do povećanja koncentracije iona u pornom fluidu šejla čime se smanjuje efekt kemijske osmoze. S druge strane ulaskom različitih iona u šejl moguće je da dođe do kationska zamjene kako na površini glinene čestice tako i u međuslojnom prostoru. Ukoliko dođe do prodora određenih kationa u strukturu gline smanjuje se razmak između susjednih listića, a time i bubrenje.

3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA MEĐUDJELOVANJA PELETA RAZLIČITOG MINERALOŠKOG SASTAVA I INHIBIRANIH FLUIDA

Proučavanje nestabilnosti kanala bušotine vrlo je zahtjevan i kompliciran zadatak koji uključuje prepoznavanje problema, planiranje i provedbu odgovarajućih laboratorijskih ispitivanja, korelaciju dobivenih rezultata sa zapažanjima zabilježenim na terenu te u konačnici donošenje određenih zaključaka i praktičnih rješenja. Unatoč činjenici da su osnovni uzroci i mehanizmi nestabilnosti kanala bušotine već poznati, trenutno ne postoji univerzalno rješenje za sprječavanje pojave nestabilnosti kanala bušotine ili ublažavanje njenih posljedica. Potvrda ove tvrdnje može se pronaći u svakodnevnim novim ispitivanjima koja se provode diljem svijeta, a čiji se rezultati mogu vidjeti kroz kontinuirano objavljivanje znanstvenih i stručnih radova.

Značajni su pomaci napravljeni u razvoju novih aditiva za stabilizaciju vodoosjetljivih stijena poput šejla, dok su s razvojem novih tehnologija u izradi kanala bušotine (izrada dubljih bušotina, bušotina malog promjera i dr.) inženjeri suočeni s podjednakim, ali i većim brojem problema vezanih uz nestabilnost kanala bušotine.

Zbog složenosti uvjeta rada na terenu i nemogućnosti kontinuiranog praćenja promjena koje se dešavaju u bušotini, nužno je provođenje detaljnih laboratorijskih ispitivanja. Zadatak je takvih ispitivanja definiranje mehanizma koji dovodi do nestabilnosti kanala bušotine u konkretnom slučaju, te pronalazak odgovarajućih rješenja koja bi bila primjenjiva u praksi. Za njihovo provođenje nužno je nabavljanje odgovarajuće laboratorijske opreme, sakupljanje odgovarajućih uzoraka, odabir fluida koji će se koristiti tijekom ispitivanja te razrada postupka ispitivanja ovisno o tome koji se podaci žele dobiti.

Zbog raznovrsnosti u mineraloškom sastavu šejla, razlikama u petrofizikalnim i mehaničkim svojstvima te različitog ponašanja u kontaktu s isplakom, rješavanje problema nestabilnosti kanala bušotine u ovakvim stijenama tehnički je vrlo zahtjevan zadatak. Na osnovu dijela do sada objavljenih ispitivanja, provedenih od strane različitih autora, može se zaključiti da problem nestabilnosti kanala bušotine nije ni približno riješen i da postoje određena slabo istražena područja. Jedno od takvih područja odnosi se na osiguravanje stabilnosti kanala bušotine tijekom bušenja kroz šejl s visokim udjelom montmorilonita (šejl I skupine prema klasifikaciji navedenoj u tablici 2-7). Ovi meki šejlovi u literaturi poznati još pod nazivom Gumbo šejlovi, skloni su izraženom osmotskom bubrenju u kontaktu s vodenom fazom isplake te uzrokuju brojne probleme prilikom bušenja kroz njih, poput suženja kanala

bušotine ili obljepljivanja dlijeta. Većina dosadašnjih ispitivanja vezana za stabilnost kanala bušotine rađena je na uzorcima šejla koji po svom mineraloškom sastavu i karakteristikama odgovaraju šejlovima II, III i IV skupine, a čija se nestabilnost zadovoljavajuće rješava upotrebom inhibiranih isplaka. Međutim iz tih ispitivanja vrlo je teško izvući općenite zaključke zbog razlika u odabiru uzoraka, razlika u sastavu fluida koji su korišteni, korištenim instrumentima te različitim postupcima ispitivanja i uvjetima kod kojih su provedena ispitivanja. Stoga će uspjeh laboratorijskih ispitivanja ovisiti o pravilnom odabiru svih gore navedenih parametara.

Prilikom odabira uzoraka koji će simulirati šejl u ispitivanjima u okviru ovog doktorskog rada, posebna je pažnja posvećena točnom definiranju mineraloškog sastava te uvjeta pripreme uzorka za ispitivanje. Kako su ispitivanja usmjerena prema proučavanju mekših (Gumbo) šejlova čije ponašanje uvelike ovisi o udjelu montmorilonita, minerala gline iz smektitne skupine, nastojalo se kroz kontinuiranu promjenu udjela ove komponente istražiti ponašanje cjelokupnog uzorka u kontaktu s ispitnim fluidom. Uzorci dobiveni iz površinskih kopova ili jezgrovanjem u bušotini nisu pogodni za ovakav način ispitivanja. Stoga je kao zamjena za originalni uzorak šejla odabran uzorak u obliku peleta koji se dobiva komprimiranjem praškastog materijala točno određenog mineraloškog sastava. Na ovaj je način istražena i mogućnost primjene peleta u laboratorijskim ispitivanjima međudjelovanja šejla i isplake.

Drugi vrlo važan cilj ovog doktorskog rada je ispitivanje utjecaja vodenih otopina soli i inhibiranih isplaka (kalijske, natrijske i kalcijске) na ponašanje odabranih uzoraka. Prilikom definiranja sastava fluida nastojalo se ujednačiti sastave kako bi bili međusobno usporedivi, s posebnim naglaskom na komponente koje mogu izravno utjecati na hidrataciju, odnosno bubrenje uzorka (udio soli i polimera). Kako su konkretna ispitivanja usmjerena na ispitivanje Gumbo šejlova koji se nalaze na manjoj dubini, a gdje su zbog većeg promjera kanala bušotine nužne veće količine inhibirane isplake, nastojalo se ispitati mogućnost njihove stabilizacije primjenom jeftinijih isplaka jednostavnog sastava.

Nakon definiranja sastava uzorka-peleta koji bi trebali simulirati šejl te odabira fluida koji će se koristiti tijekom ispitivanja, odabrani su instrumenti na kojima će se provoditi ispitivanja, definiran je postupak ispitivanja kao i uvjeti ispitivanja, što će biti detaljno opisano u nastavku. Cjelokupno ispitivanje usmjereno je prema postizanju osnovnih ciljeva definiranih u uvodnom dijelu doktorskog rada.

3.1. Sastav peleta koji su korišteni u ispitivanjima

U prethodnom poglavlju posebna pažnja posvećena je analizi dosadašnjih ispitivanja, te se može zaključiti da su do sada provedena brojna i različita ispitivanja koja je vrlo teško međusobno korelirati. Poseban problem predstavlja odabir odgovarajućeg uzorka stijene za ispitivanje. Za dobivanje kvalitetnijih rezultata najbolje je koristiti originalne uzorke jezgre dobivene jezgrovanjem u bušotini, pri čemu je posebnu pažnju potrebno posvetiti očuvanju jezgre od trenutka jezgrovanja do njene upotrebe u ispitivanjima. Zbog različitih problema koji se mogu pojaviti tijekom jezgrovanja (osipanje jezgre, međudjelovanje jezgre i fluida koji se koristi tijekom jezgrovanja i dr.), ali i relativno malog volumena i heterogenosti dobivene jezgre u istraživanjima se najčešće koriste jezgre dobivene iz površinskih izdanaka sloja šejla. Površinskim uzorkovanjem moguće je dobiti veće količine uzorka koji je svojim mineraloškim sastavom sličan stijeni iz bušotine. Nedostatak ovih uzoraka je njihova moguća heterogenost kao i uvjeti tlaka i temperature na kojima se stijena nalazila prije uzorkovanja. Treći način sakupljanja uzoraka odnosi se na rekonstrukciju stijene dobivenu mljevenjem i komprimiranjem krhotina sakupljenih na vibracijskom situ. Zbog promjena na samim krhotinama uslijed njihovog međudjelovanja s isplakom u određenoj bušotini, kao i promjena koje nastaju tijekom pripreme uzorka vrlo je teško predvidjeti ponašanje takvih uzoraka.

Prilikom odabira uzoraka koji će se koristiti u ispitivanjima potrebno je imati u vidu kako je svaka bušotina jedinstvena kako u konstrukcijskom smislu tako i po mineraloškom sastavu stijena kroz koje se buši. Isto tako postoji i razlika u mineraloškom sastavu i mehaničkim svojstvima između uzoraka koji se koriste u laboratorijskim ispitivanjima. Prilična raznolikost uzoraka koji su korišteni u laboratorijskim ispitivanjima vezanim uz stabilnost kanala bušotine, djelomično je vidljiva iz tablice 3-1.

Tablica 3-1. Uzorci šejla korišteni u različitim laboratorijskim ispitivanjima

Komponenta	Udjel pojedine komponente (mas. %)									
	Pierre I šejl (Zhang, et al., 2006 ^b)	Arco šejl (Zhang, et al., 2006 ^a)	Pierre II šejl (Rojas et al., 2006 ^a)	GoM šejl (Rojas et al., 2006 ^a)	Gumbo šejl (Rojas et al., 2006 ^a)	Arco-China šejl (Al-Bazali et al., 2006)	C1 šejl (Al-Bazali et al., 2006)	C2 šejl (Al-Bazali et al., 2006)	Arco-China šejl (Oleas et al., 2010)	
	Površinski uzorak	Jezgra	Površinski uzorak	Jezgra	-	Jezgra	Jezgra	Jezgra	Jezgra	
Kvarc	19	23,6	15-20	15-20	20,8	51	14	18	42	
Feldspati	4	4	1-2	-	5,4	12	2	3	16	
Kalcit	3	-	-	-	-	3	0	0	19	
Dolomit	7	1,2	-	-	-	1	0	0	-	
Pirit	2	2,4	-	-	-	2	0,5	0,7	-	
Siderit	1	4,1	-	-	-	0	0	0	-	
Ukupni udjel gline u uzorku	64	64,7	75-90	70-85	67,1	31,2	76	70	24,3	
Glina	Klorit	2,6	3,6	-	-	1,5	3,1	-	-	2,9
	Kaolinit	7	5,7	5-10	10-15	10,7	4,3	29,6	18,2	3,6
	Ilit	12,1	15	20-25	25-30	26,2	13,6	-	-	10,1
	Smektit	10,9	11	-	-	2,5	4	-	-	5,3
	Miješanoslojni minerali gline	31,4	29,4	50-55	35-40	26,2	6,2	-	-	2,4
Udjel vode u uzorku (%)	10,2	3,2	17,7	8,25	12	9,88	14,45	5,53	-	
Aktivitet vode u uzorku (-)	0,98	0,78	0,98	0,82	0,86	0,85	0,98	0,94	0,72	

Iz tablice 3-1 vidljivo je kako se ispitivani uzorci prvenstveno razlikuju po ukupnom udjelu glinovite komponente, ali i udjelu pojedine skupine minerala gline, udjelu vode i aktivitetu vode u uzorku. Uz već spomenute parametre, na ponašanje šejla bitno utječe i ukupni kapacitet kationske zamjene, heterogenost uzorka te propusnost (primarna i sekundarna) i šupljikavost uzorka. Ukoliko se navedene vrijednosti usporede s vrstama šejla, vidljivo je da se radi o različitim vrstama šejla te se očekuje i različito ponašanje takvih uzoraka u kontaktu s isplakom.

Stoga je prvi korak u planiranju laboratorijskih ispitivanja odabir uzorka koji će svojim mineraloškim sastavom biti što sličniji stvarnoj stijeni odnosno šejlu čije se ponašanje u kontaktu s fluidom želi utvrditi. Mineraloški sastav ispitivanih uzoraka određen je sukladno ciljevima doktorskog rada, koji se odnose na ispitivanja ponašanja i stabilizacije mekših, plićih slojeva šejla (Gumbo šejl) s viskom udjelom minerala gline iz smektitne skupine. Minerali gline iz skupine smektita mogu se nalaziti samostalno u uzorku šejla, ali isto tako mogu činiti i značajni dio miješanoslojnih minerala gline. Osim minerala gline smektitne skupine, na ponašanje šejla značajno utječe i udio kaolinita. Ove dvije skupine minerala gline u najvećoj mjeri određuju ponašanje šejla tijekom hidratacije, odnosno bubrenja i disperzije. Iako se kvarc sa stajališta hidratacije može svrstati u skupinu neaktivnih komponenti, u ova razmatranja je uključen zbog visokog udjela u šejlu i utjecaja na njegova mehanička i petrofizikalna svojstva.

Ranije spomenuta heterogenost uzoraka šejla, ali i različitost njegovih petrofizikalnih i mehaničkih svojstava kao posljedice procesa nastajanja šejla, bitno utječu na njegovo ponašanje. U ispitivanjima čiji su rezultati prikazani u okviru ovog doktorskog rada, umjesto originalnih uzoraka korišteni su komprimirani peleti, odnosno valjkasti uzorci dobiveni komprimiranjem određene mase praškastog materijala pri definiranim uvjetima (slika 3-1). Na ovaj način moguće je dobiti uzorak koji simulira stijenu točno određenog mineraloškog sastava. Točan opis pripreme i nastanka peleta detaljno je opisan u potpoglavlju 3.3.



Slika 3-1. Izgled peleta nakon komprimiranja

U provedenim laboratorijskim ispitivanjima korišteno je ukupno dvanaest peleta (uzoraka stijene), čiji je mineraloški sastav prikazan u tablici 3-2. Svaki od dvanaest peleta ima karakterističnu oznaku koja se sastoji od tri jedno ili dvoznamenkasta broja koji označavaju masene udjele (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 i 80) i tri slova (Q, M i K) koja označavaju mineraloške komponente stijene na koje se odnose navedeni udjeli (Q - kvarcni pijesak, M - montmorilonit i K – kaolinit). Tako npr. oznaka peleta **10Q80M10K** označava pelet koji se sastoji od 10 mas. % kvarcnog pijeska, 80 mas. % montmorilonita te 10 mas. % kaolinita. Peleti navedeni u tablici 3-2 mogu se uvjetno podijeliti u tri skupine s po četiri uzorka, od kojih prvu skupinu čine uzorci bez kvarcnog pijeska, drugu skupinu čine uzorci s 10% kvarcnog pijeska te treću u kojoj se nalaze uzorci s 20% kvarcnog pijeska. Unutar pojedine skupine peleti se razlikuju po masenim udjelima montmorilonita (80, 60, 40 i 20%), dok ostatak do 100% čini kaolinit. Odabranim sastavom peleta nastojalo se ispitati utjecaj masenog udjela montmorilonita na ponašanje peleta tijekom međudjelovanja s ispitivanim fluidima, kao i utjecaj masenog udjela kvarcnog pijeska.

Tablica 3-2. Mineraloški sastav peleta korištenih u laboratorijskim ispitivanjima

Oznaka peleta	Udjel pojedine komponente (mas. %)		
	Kvarcni pijesak	Montmorilonit	Kaolinit
0Q80M20K	0	80	20
0Q60M40K	0	60	40
0Q40M60K	0	40	60
0Q20M80K	0	20	80
10Q80M10K	10	80	10
10Q60M30K	10	60	30
10Q40M50K	10	40	50
10Q20M70K	10	20	70
20Q80M0K	20	80	0
20Q60M20K	20	60	20
20Q40M40K	20	40	40
20Q20M60K	20	20	60

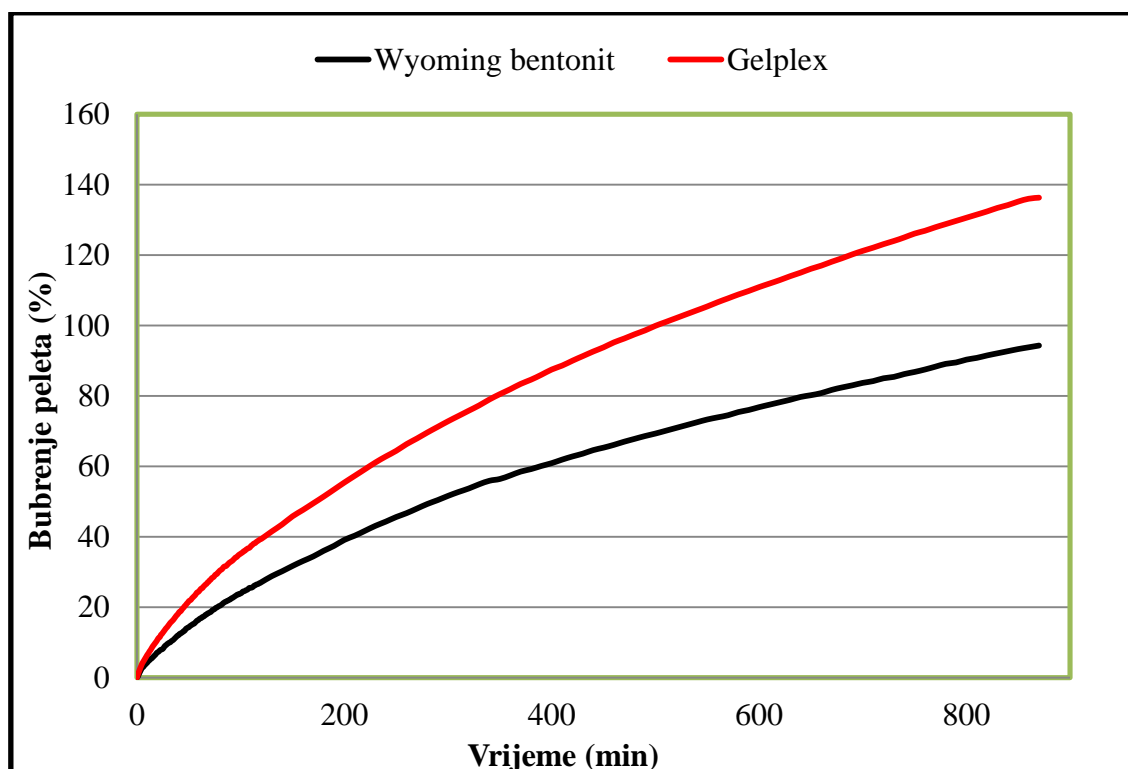
Svi peleti izrađeni su komprimiranjem mješavine kvarcnog pijeska, montmorilonita i kaolinita s navedenim masenim udjelima pojedinih komponenti. Sama mješavina pripravljena je iz komercijalno dostupnih praškastih materijala. Prilikom nabave pojedine komponente za pripremu mješavine, nastojalo se odabrati komponentu koja je svojim fizikalno-kemijskim karakteristikama što sličnija stvarnim mineralima koji se nalaze u uzorku šejla. Kao nadomjestak za mineral kvarc korišten je kvarcni pijesak veličine zrna od 0,1 do 0,5 mm, dok je za mineral gline kaolinit korišten proizvod kompanije Fluca, kaolin pH Eur (laboratorijski kaolinit vrlo visoke čistoće) (Sigma-Aldrich - sigurnosno tehnički list, 2012). Kao mineral gline montmorilonit u peletima su se koristila dva komercijalna bentonita, odnosno Wyoming bentonit kompanije Skw polymers te Gelpex kompanije MI SWACO. Wyoming bentonit korišten je u peletima u prvom dijelu ispitivanja, dok je Gelpex korišten u preostalim ispitivanjima. Razlog prelaska s jednog uzorka montmorilonita na drugi je proširenje ispitivanja te nemogućnost nabave dovoljne količine Wyoming bentonita kako bi se završila planirana ispitivanja. Međutim kako se u oba slučaja radi o neobrađenom natrijskom montmorilonitu, za očekivati je bilo da ne dolazi do značajnije razlike u njihovom ponašanju. Kako bi se potvrdila navedena očekivanja provedena su ispitivanja navedenih materijala s ciljem određivanja kapaciteta kationske zamjene i bubrenja peleta u vodovodnoj vodi.

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 3-3 i na slici 3-2. Iz tablice 3-3 vidljivo je kako uzorak Wyoming bentonita ima nešto viši kapacitet kationske zamjene i početni udjel

vode (udjel vode u praškastom materijalu prije komprimiranja i bubrenja) u odnosu na Gelplex.

Tablica 3-3. Kapacitet kationske zamjene Wyoming bentonita i Gelplexa

Glina	Kapacitet kationske zamjene	Udjel vode
	meq/100 g suhog uzorka	%
Wyoming bentonit	94,83	16,3
Gelplex	78,37	13,4



Slika 3-2. Bubrenje peleta Wyoming bentonita i Gelplexa u vodovodnoj vodi

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 3-2 može se zaključiti kako Gelplex više bubri u vodovodnoj vodi u odnosu na Wyoming bentonit. Nažalost, zbog tehničkog ograničenja instrumenta za mjerenje bubrenja nije bilo moguće provesti mjerenje bubrenja kroz vremenski period od 24 sata. Dobivene rezultate potrebno je uzeti u obzir kod usporedbe rezultata cjelokupnog ispitivanja.

3.2. Fluidi korišteni tijekom ispitivanja

Jedan od ciljeva laboratorijskih ispitivanja provedenih u okviru ovog doktorskog rada bio je ispitivanje utjecaja različitih inhibiranih isplaka na bazi vode na bubrenje peleta različitog mineraloškog sastava. Kako bi se to postiglo, nužno je odabrati odgovarajuće isplake i definirati njihove sastave, koji bi nakon ispitivanja trebali dati mjerljive i usporedive podatke. U praksi se najčešće koriste tri vrste inhibiranih isplaka na bazi vode, a to su kalijsko-polimerne, slane i kalcijske isplake. Mehanizam njihovog djelovanja u sprječavanju hidratacije te posljedično bubrenja i disperzije, zasniva se na pozitivnom djelovanju prisutnih kationa: kalija, natrija i kalcija. Osim zbog kationa, navedene isplake djeluju inhibirajuće i zbog toga što u njihovom sastavu mogu biti aditivi za čepljenje pora šejla, aditivi za inkapsulaciju (zaštitni koloidi) i aditivi za mehaničku stabilizaciju šejla i sl. Kao primjer mogu se uzeti podaci o sastavu isplaka koje su korištene u laboratorijskim ispitivanjima koje su 2009. godine proveli Ewy i Morton (tablica 3-4).

Tablica 3-4. Sastav inhibiranih isplaka (Ewy i Morton, 2009)

ISPLAKA A			ISPLAKA B		
Voda	m ³	0,78	Voda	m ³	0,88
Derivat škroba	kg/m ³	5,71	NaCl	kg/m ³	342,37
Ksantan guma	kg/m ³	2,85	Stabilizator šejla	kg/m ³	5,72
Inkapsulator	kg/m ³	5,71	Flokulant	kg/m ³	4,28
NaCl	kg/m ³	195,73	Inhibitor šejla	dm ³ /m ³	20,13
Inhibitor šejla	vol. %	3	Polianionska celuloza	kg/m ³	5,71
Aditiv za povećanje napretka bušenja	vol. %	3	Derivat škroba	kg/m ³	2,83
Aditiv za stvaranje membrane	kg/m ³	28,53	Ksantan guma	kg/m ³	2,83
Aditiv za čepljenje pora	% vol	3	Glikol	dm ³ /m ³	20,13
ISPLAKA C			ISPLAKA D		
Voda	m ³	0,69	Voda	m ³	0,88
Ksantan guma	kg/m ³	6,42	Delomično hidrolizirani poliakrilamid	kg/m ³	1,13
Inhibitor šejla	vol. %	20	Polianionska celuloza	kg/m ³	5,72
Aditiv za povećanje napretka bušenja	vol. %	5	Inhibitor šejla	kg/m ³	17,11
Aditiv za smanjenje filtracije	kg/m ³	22,83	NaCl	kg/m ³	219,71
Kalijev silikat	kg/m ³	11,41	Aditiv za čepljenje pora	vol. %	3
Kalijev karbonat	kg/m ³	11,41	NaOH	kg/m ³	0,57
KCl	kg/m ³	213,99			

Vidljivo je da se u svakoj od navedenih isplaka nalaze četiri do pet različitih aditiva (označenih crvenom bojom) koji mogu pozitivno utjecati na stabilizaciju šejla. Osim nekoliko, istovremeno prisutnih inhibitora bubrenja šejla, kvalitetnu interpretaciju rezultata ispitivanja i donošenje nekih općih zaključaka otežava i upotreba komercijalnih inhibitora jer nije poznato o kojem se točno inhibitoru radi te je nepoznat njegov kemijski sastav i način djelovanja. Nažalost, ni u navedenom, ali ni u drugim radovima, nije moguće saznati točnu cijenu jediničnog volumena inhibirane isplake (kn/m^3). Cijena jediničnog volumena ovisit će dakako o upotrijebljenim aditivima (potrebnoj masi/volumenu i cijeni), ali i ukupnoj potrebnoj količini isplake za ispiranje kanala bušotine tijekom bušenja.

Istovremena upotreba više različitih komponenti koje pozitivno djeluju na stabilizaciju šejla otežava kvalitetnu interpretaciju rezultata ispitivanja, te je vrlo teško ocijeniti koja od navedenih komponenti u stvarnosti najviše pridonosi sprječavanju negativnih pojava vezanih uz međudjelovanje isplake i šejla. Definiranje sastava inhibirane isplake, odnosno odabir jednog ili više inhibitora potrebnih za stabilizaciju šejla ovisit će prvenstveno o samoj vrsti šejla, ali dakako i o uvjetima u bušotini (osobito temperaturi) te zadacima koje isplaka mora ispunjavati. Kako su provedena ispitivanja usmjerena prema ispitivanju međudjelovanja mekih „Gumbo“ šejlova i isplake, sastav korištenih isplaka prilagođen je rješavanju problema vezanih uz ovu vrstu šejla. Osnovna karakteristika ove skupine šejla je visoki udjel glina iz skupine smektita, mala čvrstoća te ekstremna sklonost prema bubrenju i disperziji. Zbog visokog udjela smektita, male propusnosti i nepostojanja isplačnog obloga može se zaključiti da osnovni problem predstavlja hidratacija prisutnih minerala gline, kroz procese osmotskog i kristalinskog bubrenja. Stoga je definiranje sastava isplake išlo u smjeru odabira komponenti koje bi usporile ili u potpunosti spriječile bubrenje šejla.

Fluidi korišteni u provedenom ispitivanju podijeljeni su u dvije skupine: vodene otopine soli i inhibirane isplake. Kako je već ranije spomenuto, osnovni mehanizam inhibirajućeg djelovanja ovih fluida je prisutnost soli koje služe kao izvor kationa kalija, natrija i kalcija te smanjuju aktivitet tekuće faze isplake. U prvom dijelu ispitivanja nastojalo se utvrditi stvarni utjecaj kationa na bubrenje peleta. Još jedan od razloga ovakvom pristupu koncipiranja ispitivanja je utvrđivanje utjecaja koncentracije pojedine soli kao izvora kationa na bubrenje peleta različitih mineraloških sastava. U ispitivanjima su korištene vodene otopine tri različite soli (KCl-a, NaCl-a i CaCl_2). Vodene otopine svake soli pripremljene su s tri različite koncentracije: 5, 10 i 15 mas. % soli. Sastavi navedenih vodenih otopina soli dani su u tablici 3-5, a odnose se na pripremu 1 000 ml otopine približno jednake gustoće za

jednake koncentracije soli (Baker Hughes „Fluid Facts – Engineering Handbook“, 1998). Sve navedene vodene otopine soli pripremljene su dodavanjem soli u vodovodnu vodu.

Tablica 3-5. Sastav vodenih otopina soli (Baker Hughes „Fluid Facts – Engineering Handbook“, 1998)

SOL	OTOPINA	Masa soli	Volumen vode
		g	ml
KCl	5% KCl	51,7	979
	10% KCl	106,6	957
	15 % KCl	164,6	931
NaCl	5% NaCl	52,0	984
	10% NaCl	107,4	965
	15% NaCl	166,9	944
CaCl ₂	5% CaCl ₂	52,2	990
	10% CaCl ₂	108,7	976
	15% CaCl ₂	170,0	962

Nakon ispitivanja bubrenja peleta u vodenim otopinama različitih soli, napravljena je analiza podataka te su odabrane koncentracije soli koje su korištene u daljnjim ispitivanjima.

U drugom dijelu provedenih laboratorijskih ispitivanja korištene su isplake (kalijska, slana te gipsna) čiji je sastav definiran sukladno rezultatima ispitivanja dobivenim bubrenjem peleta u otopinama različitih soli. Pri tome su isplake sadržavale inhibirajuće komponente (soli ili druge materijale poput gipsa) koje su s obzirom na koncentraciju prisutnih kationa bile jednake ili ekvivalentne koncentraciji kationa sadržanih u pet postotnom masenom udjelu odgovarajuće soli. Prilikom odabira koncentracije soli za daljnja ispitivanja vodilo se i željom za dobivanjem fluida čiji će sastav biti ekološki prihvatljiv. Kod velikih koncentracija ispitivanih soli javlja se problem s velikom koncentracijom klorida u fluidu koji je potrebno nakon obavljenog posla na odgovarajući ekološki prihvatljiv način zbrinuti (Berry et al., 2008; Anderson et al., 2010)

Međutim prisutnost određene soli odnosno kationa u isplaci ne osigurava samo po sebi potpuno sprječavanje hidratacije i bubrenja minerala glina, što je i potvrđeno provedenim ispitivanjima. Razlog tome je veća mobilnost (pokretljivost) molekula vode u odnosu na katione. Kako bi se usporilo kretanje vode, a samim tim i hidratacija minerala gline u peletima, te posljedično bubrenje, u sve isplake je dodana polianionska celuloza male viskoznosti. Polianionska celuloza male viskoznosti (*engl. polyanionic cellulose „ultra-low“ - PAC UL*) je prirodni polimer koji se primarno koristi u isplaci kao aditiv za smanjenje filtracije, dok u većim koncentracijama služi i kao inkapsulator šejla. Kroz smanjenje filtracije

te inkapsulaciju nastojalo se usporiti kretanje molekula vode u pelete, ta na taj način osigurati dovoljno vremena za djelovanje kationa. Još jedan od razloga odabira polianionske celuloze je njen mali utjecaj na reološka svojstva ispitivanih isplaka, osobito na viskoznost, čime se omogućava praćenje njenog utjecaja na bubrenje peleta različitog mineraloškog sastava, ali i međusobna usporedba rezultata bubrenja peleta u različitim inhibiranim isplakama.

U isplakama koje su korištene u ispitivanjima provedenim u okviru doktorskog rada korištena je polianionska celuloza male viskoznosti, proizvod kompanije MI SWACO komercijalnog naziva Poly Pac UL. Prema uputama proizvođača, preporučene koncentracije aditiva Poly Pac UL za smanjenje filtracije su u rasponu od 0,71 do 2,85 g/l, a za sprječavanje hidratacije stijenci kanala bušotine i krhotina šejla u rasponu od 2,85 do 8,56 g/l (MI SWACO „Poly Pac UL – Product Bulletin“, 2007). Kod pripreme inhibiranih isplaka korištene su tri različite koncentracije i to: 2, 4 i 6 g/l isplake.

Sastav inhibiranih isplaka, odnosno udjel preostalih komponenti definiran je prema osnovnim recepturama iz dostupne literature (MI SWACO „Drilling Fluids Manual“, 1998; Baker Hughes „Fluid Facts – Engineering Handbook“, 1998; Amoco „Drilling Fluids Manual“, 1994). U nastavku se detaljno opisuju korištene isplake.

3.2.1. Kalijska isplaka

Kalijska odnosno kalijsko-polimerna isplaka je jedna od najčešće korištenih inhibiranih isplaka za bušenje kroz vodoosjetljive stijene poput šejla. Mehanizam inhibiranja bubrenja šejla ostvaren je kroz pozitivno djelovanje kationa K^+ zbog njegove veličine (2,66 Å) i male hidratacijske energije (Amoco „Drilling Fluids Manual“, 1994). Promjer kalijevog kationa neznatno je manji od međusobne udaljenosti dva tetraedarska listića susjednih jediničnih slojeva glinene čestice (smektita ili ilita) koja iznosi 2,8 Å. Pilikom kontakta isplake sa šejlom, kalijev kation ulazi u međuprostor i zatvara strukturu sprječavajući prodor vode i daljnje bubrenje i disperziju šejla. Za stabilizaciju šejla također je vrlo bitna i zamjena kationa prisutnih u mineralima glina (najčešće Na^+ ukoliko se radi o „Gumbo“ šejlu) s kalijevim kationom prisutnim u isplaci. Tako će na primjer ukoliko koncentracija kalijevih iona u odnosu na natrijeve premašuje omjer od 3:1 doći do zamjene kationa, čime se stvara struktura manje sklona hidrataciji i bubrenju (MI SWACO „Drilling Fluids Manual“, 1998).

Osnovni izvor kalijevih kationa je kalijev klorid koji se dodaje u isplaku u različitim koncentracijama ovisno o vrsti šejla kroz koji se buši. Korištene koncentracije kalijevog klorida iznose od 14,3 do 200 g/l isplake, pri čemu valja naglasiti da su one manje u

isplakama koje se koriste tijekom bušenja kroz starije šejlove s većim udjelom ilitne komponente, a veće u isplakama koje se koriste tijekom bušenja kod mekše „Gumbo“ šejlove s većim udjelom minerala gline iz skupine smektita (MI SWACO „Drilling Fluids Manual“, 1998; Baker Hughes „Fluid Facts – Engineering Handbook“, 1998; Amoco „Drilling Fluids Manual“, 1994). Sa stajališta utjecaja na okoliš, visoke koncentracije kalijevog klorida su ekološki neprihvatljive zbog toksičnosti i utjecaja na bentonske organizme, te ih je stoga potrebno izbjegavati (Anderson et al, 2010). Sukladno ovoj spoznaji, te analizi utjecaja koncentracije kalijevog klorida u otopini na bubrenje peleta odlučeno je da će se u nastavku ispitivanja koristiti koncentracija KCl-a od 51,7 g/l. U tablici 3-6 prikazan je sastav kalijevih isplaka korištenih u drugoj fazi ispitivanja. Radi jednostavnosti i lakše usporedbe s drugim vrstama isplake, isplakama su pridružene oznake: K2PAC, K4PAC i K6PAC. Navedena oznaka sastoji se od tri segmenta: slova koje označava isplaku (K-kalijska), broja koji označava koncentraciju polianionske celuloze (2, 4 ili 6 g/l) i kratice PAC.

Iz tablice je također vidljivo kako je udjel bentonita, lignosulfonata (Spersen CF), KOH i antipjenušavca (EMEC DefoamerNT) identičan za sve tri navedene recepture, kako bi se rezultati ispitivanja mogli međusobno uspoređivati. Ovim pristupom moguće je ne samo definirati utjecaj polianionske celuloze (Poly Pac UL) na bubrenje već i njen utjecaj na reološka svojstva isplake. Udjel vode i barita neznatno se razlikuje zbog postizanja točno određene gustoće isplake.

Tablica 3-6. Sastav kalijevih isplaka

Komponenta	Jedinica	Isplaka		
		K2PAC	K4PAC	K6PAC
Voda	ml	889	888	887
Bentonit	g	75	75	75
Lignosulfonat	g	20	20	20
Polianionska celuloza male viskoznosti	g	2	4	6
KCl	g	51,7	51,7	51,7
KOH	g	4,5	4,5	4,5
Barit	g	57,9	57	56,1
Antipjenušavac	ml	2	2	2

3.2.2. Slana isplaka

Pod pojmom slane isplake podrazumijeva se isplaka koja sadrži natrijev klorid, a koristi se tijekom bušenja kroz različite šejlove. Koncentracija natrijevog klorida u slanoj isplaci može se kretati u rasponu od 25 g/l pa sve do potpunog zasićenja odnosno približno 315 g/l (Amoco „Drilling Fluids Manual“, 1994). Mehanizam inhibirajućeg djelovanja zasniva se na utjecaju povećanja koncentracije natrijevog klorida (a samim tim i povećanja koncentracije Na⁺ kationa) na smanjenje aktiviteta vodene faze isplake. Smanjenjem aktiviteta vodene faze isplake ispod aktiviteta vodene faze šejla potiče se osmotski tok vode iz šejla u kanal bušotine i očvršćavanje stijenki kanala bušotine.

Kao što je već ranije navedeno, u prvom dijelu ispitivanja provedeno je ispitivanje bubrenja peleta u vodenim otopinama s različitim koncentracijama soli. Nakon analize dobivenih rezultata utvrđeno je da će se u daljnjim ispitivanjima koristiti koncentracija od 52 g/l. Jedan od razloga odabira navedene koncentracije je i mogućnost usporedbe dobivenih rezultata s rezultatima koji su dobiveni kod primjene drugih isplaka. U tablici 3-7 naveden je sastav korištenih slanah isplaka. Pojedine isplake označene su po istoj analogiji kao i kalijске isplake. Koncentracija bentonita i lignosulfonata (Spersen CF) identična je onoj korištenoj u pripremi kalijске isplake. U isplakama je mijenjana koncentracija polianionske celuloze (Poly PAC UL).

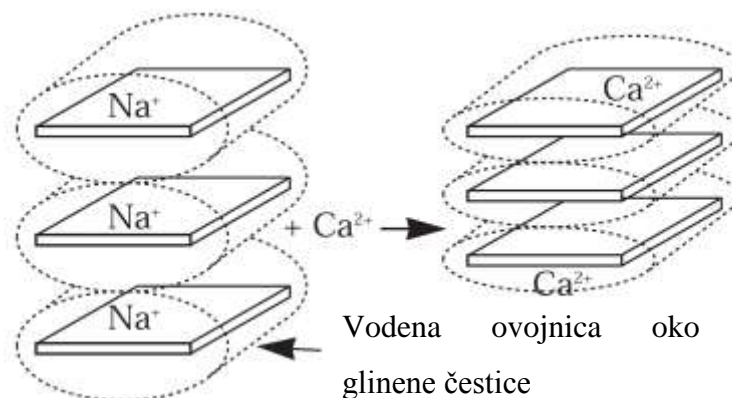
Tablica 3-7. Sastav slanah isplaka

Komponenta	Jedinica	Isplaka		
		S2PAC	S4PAC	S6PAC
Voda	ml	892	891	890
Bentonit	g	75	75	75
Lignosulfonat	g	20	20	20
Polianionska celuloza male viskoznosti	g	2	4	6
NaCl	g	52	52	52
NaOH	g	3	3	3
Barit	g	55,8	54,9	54
Antipjenušavac	ml	2	2	2

3.2.3. Gipsna isplaka

Osim navedene kalijске i natrijske isplake u skupinu inhibiranih isplaka spadaju i kalcijske isplake. Kalcijske isplake primarno se koriste za bušenje kroz jako reaktivne šejlove, a njihov mehanizam djelovanja zasniva se na pozitivnom djelovanju Ca^{2+} kationa koji zamjenjuje postojeće zamjenjive Na^+ katione u mineralima gline. Zamjenom postojećih Na^+ kationa s Ca^{2+} kationima koji imaju veću energiju vezivanja, dolazi do djelomične dehidratacije minerala gline i približavanja jediničnih slojeva (slika 3-3).

Izvor kalcijevih kationa u kalcijskim isplakama može biti vapno ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ili gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Stoga se i kalcijske isplake s obzirom na izvor Ca^{2+} kationa dijele na vapnene i gipsne. Ovisno o vrsti šejla kroz koji se buši, ali i željenim svojstvima isplake, u isplaku se dodaju različite koncentracije vapna ili gipsa. Vapno se najčešće dodaje u koncentraciji od 1,4 do 28,5 g/l, dok se gips koristi u koncentracijama od 11,4 do 34,2 g/l (MI SWACO „Drilling Fluids Manual“, 1998; Baker Hughes „Fluid Facts – Engineering Handbook“, 1998; Amoco „Drilling Fluids Manual“, 1994).



Slika 3-3. Djelomična dehidratacija glinene čestice uslijed zamijene Na^+ kationa s Ca^{2+} kationima (MI SWACO „Drilling Fluids Manual“, 1998)

U provedenim ispitivanjima korištena je gipsna isplaka čiji je sastav prikazan u tablici 3-8. Za razliku od kalijске i slane isplake s identičnom koncentracijom soli KCl-a i NaCl-a u vodenim otopinama soli i inhibiranim isplakama, kod gipsne isplake bilo je potrebno odrediti koncentraciju gipsa koja će dati koncentraciju Ca^{2+} koja odgovara koncentraciji Ca^{2+} u 52,2 g/l CaCl_2 . Proračunom je utvrđeno da bi se istovjetna koncentracija Ca^{2+} dobila dodavanjem približno 81 g/l gipsa čime bi se znatno premašila maksimalna

preporučena koncentracija gipsa u isplaci. Stoga je u daljnjim ispitivanjima korištena polovica izračunate vrijednosti, odnosno 40,5 g/l što je nešto više od maksimalne preporučene vrijednosti koja iznosi 34,2 g/l. Koncentracije bentonita, lignosulfonata te antipjenušavca identične su onima korištenima kod pripreme kalijске i slane isplake, dok količina vode i koncentracija barita varira kako bi se dobilo 1000 ml isplake definirane gustoće. Varijabilni dio u sastavu isplake je udjel polianionske celuloze koji varira u koncentracijama od 2, 4 i 6 g/l.

Korištene oznake gipsne isplake napravljene su po analogiji identičnoj onoj kod kalijске i slane isplake.

Tablica 3-8. Sastav gipsnih isplaka

Komponenta	Jedinica	Isplaka		
		G2PAC	G4PAC	G6PAC
Voda	ml	897	896	895
Bentonit	g	75	75	75
Lignosulfonat	g	20	20	20
Polianionska celuloza male viskoznosti	g	2	4	6
Gips	g	40,5	40,5	40,5
NaOH	g	3,5	3,5	3,5
Barit	g	62,1	61,2	60,4
Antipjenušavac	ml	2	2	2

3.3. Opis provedenih ispitivanja

Nakon što su definirani uvjeti pripreme i sastav peleta, te sastavi fluida u nastavku su opisani korišteni instrumenti te postupak provođenja ispitivanja. Za ispitivanje utjecaja inhibiranih isplaka na bubrenje peleta bilo je potrebno definirati:

- uvjete ispitivanja,
- postupak ispitivanja te
- parametre koji će se pratiti.

Ispitivanje hidratacije svakog peleta u odabranom fluidu zamišljeno je i provedeno kao cjeloviti ciklus od četiri faze u trajanju od 72,5 sata. Svaki ciklus sastojao se od:

- **FAZE I** - 24-satnog držanja mješavine praškastog materijala u eksikatoru u kontroliranoj relativnoj vlažnosti;
- **FAZE II** - 30-minutnog komprimiranja praškastog materijala u uređaju za komprimiranje uzoraka (izrada peleta);
- **FAZE III** - 24-satnog bubrenja peleta u uređaju za mjerenje bubrenja peleta;
- **FAZE IV** - 24-satnog sušenja peleta nakon bubrenja.

Svaka od navedene četiri faze ispitivanja posebno je opisana u nastavku.

FAZA I - Držanje mješavine praškastog materijala u eksikatoru

Različita ispitivanja pokazala su kako je jedno od bitnih svojstava šejla, koje utječe na njegovo ponašanje u kontaktu s isplakom, i aktivitet vodene faze. Aktivitet vodene faze šejla direktno utječe na proces osmotskog toka vode u/ili iz šejla, a samim tim i na proces hidratacije/dehidratacije te posljedično na bubrenje ili sažimanje šejla. Iako aktivitet vodene faze šejla ovisi o različitim parametrima (dubini zalijeganja šejla, salinitetu slojne vode i sl.) u pravilu se kreće u rasponu od 0,75 do 1 (Popp, 2004). Stoga je vrlo bitno kod čuvanja uzorka šejla prije provođenja laboratorijskih ispitivanja osigurati uvjete koji će omogućiti zadržavanje početnog (originalnog) aktiviteta vodene faze šejla. Za postizanje ovih uvjeta koristi se eksikator, laboratorijska posuda koja osigurava čuvanje uzoraka u strogo kontroliranoj atmosferi (relativnoj vlažnosti). Osim za očuvanje uzoraka šejla eksikator se često koristi za provođenje ispitivanja kojima je cilj dobivanje adsorpcijsko/desorpcijske izoterme koja je potrebna za dobivanje točnog podatka o aktivitetu vode u šejlu (Al-Awad i Smart, 1995).

Eksikator je staklena laboratorijska posuda koja se sastoji od dva dijela međusobno odvojena pločom s otvorima, odnosno donjeg dijela u kojem se nalazi supstanca koja na sebe veže vlagu ili otopina koja daje određenu relativnu vlažnost, te gornjeg dijela na koji se stavljaju uzorci za čuvanje. U provedenim ispitivanjima koristio se eksikator čiji je donji dio bio ispunjen zasićenom otopinom KCl-a. Zasićena otopina KCl-a pripravljena je na način da je 567 g KCl-a otopljeno u deioniziranoj vodi zagrijanoj na 80°C. Nakon tridesetminutnog miješanja otopina je ulivena u eksikator. Zbog razlike u topivosti KCl-a pri višim temperaturama i sobnoj temperaturi, prilikom hlađenja na dnu eksikatora izdvojili su se kristali soli što ukazuje da je pri sobnim temperaturama otopina u potpunosti zasićena. Ovako zasićena otopina KCl-a trebala bi osiguravati relativnu vlažnost u gornjem dijelu eksikatora koja bi odgovarala aktivitetu od 0,85 (Popp, 2004). Aktivitet odabrane zasićene otopine soli približno odgovara srednjoj vrijednosti izmjerenih aktiviteta uzoraka šejla navedenih u tablici 3-1. Eksikator s uzorcima prikazan je na slici 3-4.



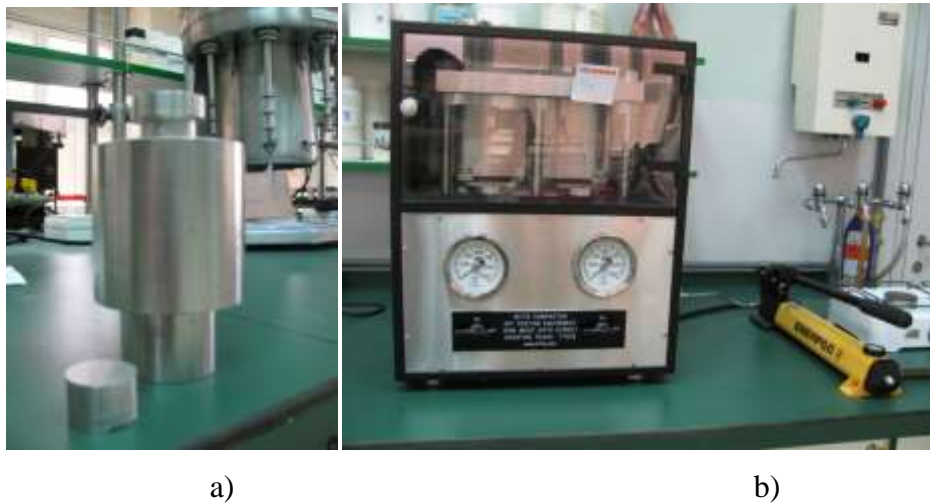
Slika 3-4. Eksikator s uzorcima

Sličnom analogijom mješavine uzoraka korištenih u ispitivanjima čuvane su u eksikatoru u atmosferi sa strogo kontroliranom relativnom vlažnošću. Osim toga, na ovaj način eliminira se utjecaj uvjeta koji vladaju u laboratoriju na same uzorke. Postupak obuhvaća vaganje 12 g praškastog uzorka koliko je potrebno za izradu peleta te ostavljanje praškastog uzorka u eksikatoru kroz 24 sata. Tijekom tih 24 sata dolazi do kretanja molekula vode između samog uzorka i atmosfere koja ga okružuje. Nakon 24 sata uzorak je ponovno vagan kako bi se utvrdilo da li je došlo do promjene mase. Važno je napomenuti da je vrijeme

mirovanja uzorka u eksikatoru odabrano sukladno mogućnosti izvođenja ispitivanja, ali i na osnovu probnih ispitivanja koja su pokazala da nema promjene u masi uzorka nakon 24 i 48 sati.

FAZA II - Priprema peleta iz praškastih materijala

Nakon 24-satnog držanja praškastog uzorka u eksikatoru u uvjetima kontrolirane vlažnosti, te vaganja uzorka pristupilo se izradi peleta u uređaju za komprimiranje uzoraka. Uređaj se sastoji od tri komponente: dva kompleta ćelija za izradu peleta iz praškastog materijala (slika 3-5 a), kućišta uređaja za komprimiranje praškastog uzorka te pripadajuće ručne pumpe potrebne za ostvarenje željenog tlaka komprimiranja (slika 3-5 b). Pumpom je moguće ostvariti maksimalni tlak komprimiranja od 68,95 MPa (10 000 psi). Korišteni uređaj svojom konstrukcijom omogućava istovremeno komprimiranje dva praškasta uzorka, odnosno istovremenu izradu dva peleta.



Slika 3-5. Ćelija za izradu peleta (a) i uređaj za komprimiranje praškastog materijala s pumpom (b)

Tijekom planiranja ispitivanja bilo je potrebno definirati masu praškastog materijala koji će se komprimirati, tlak komprimiranja te vrijeme komprimiranja. Masa praškastog materijala koji se komprimirao kako bi se stvorio pelet odabrana je na osnovu preporuke proizvođača uređaja. U uputama priloženim uz uređaj navodi se kako bi masa praškastog materijala potrebna za izradu jednog peleta trebala iznositi od 10 do 20 g (Ofite „Dynamic Linear Swellmeter with Compactor – Instruction Manual“, 2011). Iako je prvotno planirano

da se uzme srednja vrijednost, odnosno 15 g, nakon probnih ispitivanja ta je vrijednost smanjena na 12 grama zbog tehničkih ograničenja. Naime, iako su debljine peleta različitog mineraloškog sastava približno jednake, volumeni koje zauzimaju praškasti uzorci prije komprimiranja značajno variraju između uzorka, pri čemu se posebno ističe uzorak 0Q20M80K. Navedeni uzorak u praškastom obliku zauzima najveći volumen za jednaku masu, te je volumen koji zauzima 12 g uzorka maksimalni volumen koji je moguće smjestiti u ćeliju uređaja.

Prilikom odabira tlaka na kojem će se komprimirati uzorci uzeta je u obzir vrsta šejla koju bi konkretni pelet simulirao te uvjeti kojima je takav šejl izložen u podzemlju. Tlak komprimiranja u najopćenitijem smislu može se poistovjetiti s geostatičkim tlakom (tlakom pokrovnih stijena) koji djeluje na šejl na razmatranoj dubini. Ukoliko se uzme u obzir prosječna gustoća stijena od 2300 kg/m³ moguće je izračunati prosječnu dubinu na kojoj se nalazi stijena (ili šejl) koja je izložena određenom geostatičkom tlaku. U tablici 3-9 prikazane su izračunate prosječne ekvivalentne dubine na kojima vlada geostatički tlak, odnosno u ovom slučaju tlak komprimiranja. Navedene vrijednosti tlaka komprimiranja moguće je postići pomoću ručne pumpe.

Tablica 3-9. Ekvivalentne dubine izračunate na osnovu tlaka komprimiranja

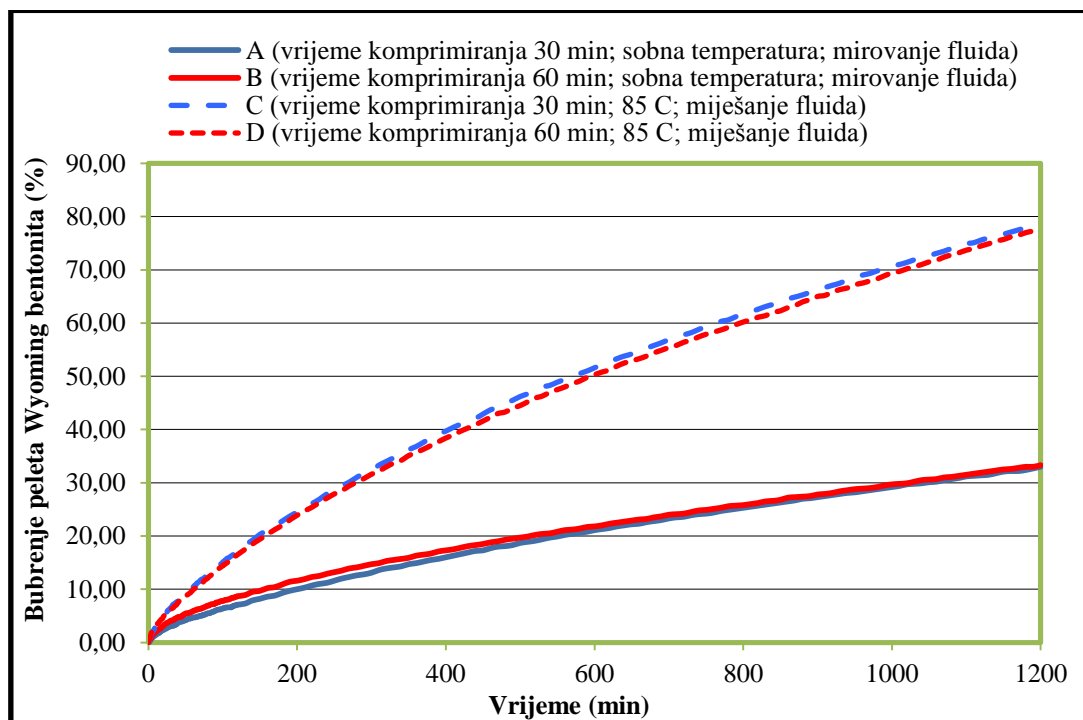
Tlak komprimiranja uzorka, MPa (psi)	Ekvivalentna dubina (m)
6,9 (1000)	306
13,8 (2000)	611
20,7 (3000)	917
27,6 (4000)	1223
34,5 (5000)	1528
41,4 (6000)	1834
48,3 (7000)	2140
55,2 (8000)	2445
62,1 (9000)	2751
68,9 (10000)	3057

Kako je cilj ispitivanja bio ispitati utjecaj inhibiranih isplaka na bubrenje mekih (Gumbo) šejlova, koji se nalaze na manjim dubinama, odabrana je vrijednost tlaka komprimiranja od 34,5 MPa što bi odgovaralo vrijednosti geostatičkog tlaka na dubini od 1528 m. Navedena vrijednost odabrana je jednim dijelom i zbog tehničkih ograničenja uređaja. Prvo ograničenje odnosi se na vrlo grubu skalu manometra (od po 100 psi) koji se

nalazi na uređaju, te je vrlo teško postići određenu unaprijed definiranu vrijednost. Drugo ograničenje odnosi se na način ostvarivanja i održavanja željenog tlaka ručnom pumpom, što zahtijeva neprestano nadziranje i održavanje željenog tlaka.

Vrijeme komprimiranja peleta odabrano je sukladno preporukama proizvođača uređaja i iznosi 30 minuta. Kako zbog kompakcije uzorka dolazi do smanjenja tlaka u sustavu, potrebno je neprestano uređaj nadzirati te po potrebi, ukoliko dođe do smanjenja tlaka, djelovanjem pumpe povećati tlak na željenu vrijednost. Na ovaj način osigurava se kontinuirano komprimiranje svih peleta kroz vremenski period od trideset minuta tlakom od 34,5 MPa (5 000 psi).

Provedena su i probna ispitivanja bubrenja peleta Wyoming bentonita koji su komprimirani u trajanju od 30 i 60 minuta pri tlaku od 34,5 MPa (slika 3-6). Ispitivanja su provedena kod sobne te temperature od 85°C. Iz slike 3-6 vidljivo je kako vrijeme komprimiranja nema značajniji utjecaj na bubrenje peleta kako kod sobne temperature tako i kod temperature od 85°C.



Slika 3-6. Ispitivanje utjecaja vremena komprimiranja na bubrenje Wyoming bentonita u vodovodnoj vodi pri različitim uvjetima (Pašić, 2011)

FAZA III - Ispitivanje bubrenja peleta u različitim fluidima

Nakon isteka predviđenog vremena komprimiranja, gotovi peleti su istisnuti iz čelije uređaja za komprimiranje praškastog materijala, obrađeni (fizički su uklonjene sve nepravilnosti na peletu koje mogu dovesti do pogreške prilikom ispitivanja) te izvagani. Određivanje mase peleta prije njihovog umetanja u uređaj za mjerenje bubrenja važno je kako bi se odredilo povećanje mase peleta uslijed bubrenja odnosno usporedio postotak bubrenja peleta u predviđenom vremenu s promjenom mase peleta uslijed bubrenja.

U ispitivanjima je korišten uređaj za mjerenje bubrenja peleta kompanije OFITE koji se sastoji od četiri nezavisne jedinice koje omogućavaju istovremeno mjerenje bubrenja četiri peleta pri različitim uvjetima, jedinice za prikupljanje i obradu podataka te kompjutorske jedinice s odgovarajućim programom (slika 3-7).



Slika 3-7. Uređaj za mjerenje bubrenja peleta

Svaka jedinica uređaja za mjerenje bubrenja peleta sastoji se od postolja u koje je integriran grijač za zagrijavanje cijelog sustava (maksimalna temperatura koju sustav može postići je 480 °C) te magnetske miješalice koja omogućava miješanje fluida tijekom ispitivanja (maksimalna brzina miješanja koju sustav može postići je 1100 o/min). Sustav je tako koncipiran da omogućava neovisno podešavanja temperature i brzine miješanja na svakoj jedinici, ali problem predstavlja sustav za podešavanje temperature preko mehaničkih prekidača s vrlo grubom brojevnom skalom od 1 do 10, gdje određeni broj predstavlja ekvivalentnu vrijednost temperature. Ovakav način podešavanja, osobito željene temperature ispitivanja, može se značajno odraziti na točnost ispitivanja. Probna ispitivanja su pokazala da

kod ispitivanja pri unaprijed zadanoj temperaturi od 90 °C (broj 3 na mehaničkom regulatoru) ispitne jedinice ostvaruju različite temperature ispitivanja u rasponu od 85 do 95°C. Kako bi se izbjeglo ovaj nedostatak, prije ispitivanja provjerena je svaka pojedina jedinica te je napravljena korekcija (mehanički regulatori temperature su tako postavljeni da daju identične temperature u svakoj jedinici). Temperatura sustava registrira se preko sonde koja se uranja u fluid nakon početka ispitivanja.

Na postolje je pričvršćen i sustav koji omogućava mjerenje jednodimenzionalnog bubrenja peleta. Između sustava za mjerenje bubrenja peleta i ploče postolja smješta se ćelija uređaja u koju se umeću pelet te ulijeva fluid. Između ćelije i segmenta koji služi za mjerenje bubrenja peleta moguće je i stavljanje brončanog utega mase 431 g, kojim se ostvaruje određena sila koja djeluje suprotno od smjera bubrenja peleta. Na slici 3-8 prikazana je jedna sastavljena jedinica za mjerenje bubrenja peleta s ćelijom i utegom.



Slika 3-8. Jedinica za mjerenje bubrenja peleta

Sklop ćelije sastoji se od posude u kojoj su smještene ispitna cijev u koju se umeće pelet i segment koji osigurava prijenos vertikalnog pomaka (koji je izazvan bubrenjem) s peleta na sklop za mjerenje. Kod ispitivanja su korištene i metalne mrežice koje su postavljene iznad i ispod peleta unutar ispitne cijevi (slika 3-9). Postavljanjem mrežica sprječava se drobljenje peleta prilikom njegovog istiskivanja iz ispitne cijevi na kraju ispitivanja, kao i bubrenje peleta kroz otvore na postolju ispitne cijevi ili segmentu za prijenos vertikalnog pomaka.



Slika 3-9. Umetanje peleta i sita u ispitnu ćeliju

Svi podaci dobiveni korištenjem uređaja za mjerenje bubrenja prikazuju se na monitoru u realnom vremenu i istovremeno pohranjuju u obliku Microsoft Excel dokumenta. Priloženi kompjuterski program prvenstveno omogućava podešavanje vremenskog intervala (učestalosti) bilježenja podataka. Tako je vrijeme ispitivanja podijeljeno na dva dijela, odnosno početni period te vrijeme preostalo do kraja ispitivanja. U početnom periodu očekuju se najveće promjene u bubrenju peleta pa je stoga odabrano da taj period traje 120 minuta i da se u tom periodu bubrenje bilježi svaku minutu. Nakon početnog perioda bubrenja, kada se očekuju promjene manjeg intenziteta, bubrenje je bilježeno svakih deset minuta sve do kraja ispitivanja. Ukupno trajanje ispitivanja iznosilo je 24 sata. U navedenom Microsoft Excel dokumentu, koji se kreira za svaku ispitnu jedinicu posebno, pohranjeni su podaci o peletu i fluidu, zabilježeno je vrijeme ispitivanja, postotak bubrenja u pojedinom trenutku, početna debljina peleta te temperatura sustava u trenutku kada se bilježi bubrenje peleta.

Prije svakog ispitivanja potrebno je pripremiti uređaj, složiti ćelije uređaja te upisati potrebne podatke u kompjuterski program (naziv uzorka, opis uzorka i fluida, definirati vremenske intervale u kojima će uređaj obaviti mjerenja). Nakon toga u svaku pojedinu ćeliju umeće se netom komprimirani i izvagani pelet. Vrijeme između vaganja peleta i početka mjerenja bubrenja trebalo bi biti što kraće, kako bi se smanjila mogućnost utjecaja vlažnosti zraka u laboratoriju na sami pelet. Tijekom provođenja ispitivanja taj vremenski period nije bio dulji od 5 minuta. Nakon umetanja peleta u ispitnu cijev ćelije, započinje postupak mjerenja bubrenja te se u ćeliju ulijeva približno 180 ml svježe pripremljenog fluida (u konkretnom slučaju vodene otopine soli ili isplake). Pokretanje mjerenja prije ulijevanja

fluida nužno je kako bi uređaj zabilježio početnu debljinu peleta, na osnovu koje program računa postotak samog bubrenja. Fluid se ulijevao je pomoću šprice volumena 60 ml (tri obroka) kroz otvor za termostat koji se nalazi na poklopcu ćelije. Nakon ulijevanja fluida potrebno je na mehaničkim prekidačima podesiti željenu vrijednost temperature na kojoj će se mjeriti bubrenje te brzinu kojom će se miješati fluid. Za miješanje fluida odabrana je brzina rotacije magnetske miješalice od 720 okretaja u minuti. Za razliku od brzine miješanja fluida, temperatura pri kojoj se ispitivalo bubrenja peleta u inhibiranim isplakama razlikovala se od temperature pri kojoj je mjereno bubrenje peleta u vodenim otopinama soli. Naime, u prvom dijelu laboratorijskih ispitivanja mjereno je bubrenje peleta u različitim vodenim otopinama soli čiji je sastav dan u tablici 3-5 pri temperaturi od približno 90°C. Navedena temperatura odabrana je na osnovu temperaturnog gradijenta od 5°C na 100 metara, razmatrane dubine od 1528 m te temperature na površini zemlje od 12°C, čime se dobiva temperatura od približno 88°C. Međutim prilikom odabira moralo se voditi računa i o već spomenutim tehničkim ograničenjima uređaja (problem podešavanja željene vrijednosti pomoću mehaničkog regulatora), što je rezultiralo odabirom temperature od 90°C koja odgovara brojčanoj vrijednosti 3 na mehaničkom regulatoru. Unatoč tome što su sve četiri ispitne jedinice bile postavljene na istu brojčanu vrijednost, zabilježene su različite vrijednosti temperature (maksimalna razlika temperature između pojedinih jedinica iznosila je 10°C) te je izvršeno podešavanje vrijednosti na mehaničkom regulatoru. Iako se u stvarnosti tijekom bušenja, zbog hlađenja isplake i stijena pribušotinske zone ostvaruje temperatura niža od one primijenjene u ispitivanjima, navedena temperatura odabrana je da bi se odredilo maksimalno bubrenje te ocijenio utjecaj temperature na bubrenje. Navedeni uvjeti postigli bi se samo u slučaju duljeg mirovanja isplake u bušotini, čime bi se omogućio prijenos temperature sa stijenske mase na isplaku, odnosno njihovo izjednačavanje. Prije provođenja glavnih laboratorijskih ispitivanja provedena su probna ispitivanja bubrenja peleta Wyoming bentonita komprimiranih pri različitim tlakovima u vodovodnoj vodi pri različitim temperaturama. Iz probnih ispitivanja zaključeno je da povećanje temperature ispitivanja na približno 90°C uzrokuje od 1,9 do 2,8 puta veće bubrenje u početnom periodu u odnosu na bubrenje ostvareno pri sobnoj temperaturi, dok je taj odnos na kraju ispitivanja iznosio od 2,2 do 3 puta. Međutim potrebno je uzeti u obzir kako su navedeni rezultati dobiveni bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi koja za razliku od vodenih otopina soli i inhibiranih isplaka ne sadrži inhibirajuće komponente koje bi usporile ili u potpunosti spriječile bubrenje peleta.

U drugom dijelu provedenih laboratorijskih ispitivanja, mjereno je bubrenje peleta u u kontaktu s različitim inhibiranim isplakama pri sobnoj temperaturi. Sobna temperatura

odabrana je na osnovu već spomenutih tehničkih ograničenja instrumenta te problema uočenih tijekom provođenja probnih ispitivanja. Naime, tijekom probnih ispitivanja uočen je problem geliranja isplake uzrokovan isparavanjem dijela tekuće faze zbog povećanja temperature ispitivanja, zbog čega postoji opasnost od gubljenja kontakta između peleta i isplake. Još jedan ograničavajući faktor kod odabira temperature ispitivanja odnosio se i na maksimalno bubrenje peleta koje uređaj može registrirati. Na osnovu provedenih ispitivanja može se zaključiti da korišteni uređaj može registrirati maksimalno bubrenje peleta od približno 1,4 puta ako se uzme u obzir ranije definirana debljina peleta. Kako je već ranije spomenuto peleti u čijem se sastavu nalazi Gleplex ostvaruju nešto veće bubrenje u odnosu na pelete s Wyoming bentonitom. To predstavlja problem upravo kod bubrenja peleta u vodovodnoj vodi jer je kod bubrenja pojedinih peleta koji sadržavaju Gelplex pri sobnoj temperaturi uočeno da dolazi gotovo do maksimalnog bubrenja koje uređaj može registrirati, te je zaključeno da kod viših temperatura, zbog povećanog bubrenja uređaj neće biti u mogućnosti izmjeriti bubrenje kroz cijeli period ispitivanja (24 sata). Zbog svega navedenog odlučeno je da se u nastavku laboratorijskih ispitivanja, ispituje bubrenje peleta kod sobne temperature.

Nakon završetka mjerenja bubrenja peleti su istisnuti iz ispitne cijevi svake pojedine ćelije te izvagani kako bi se odredila njihova masa nakon bubrenja. Svaki pelet je pregledan vizualno te fotografiran. Zabilježene su njegove karakteristike: izgled, tvrdoća prilikom rezanja te izgled poprečnog presjeka.

FAZA IV - Sušenje peleta nakon bubrenja

Posljednja faza ispitivanja sastojala se od 24-satnog sušenja peleta, nakon bubrenja, na temperaturi od 105°C. Cilj provedenih laboratorijskih ispitivanja nije bio očuvanje mehaničkog integriteta peleta pa je stoga odabrana navedena temperatura sušenja kako bi se osiguralo potpuno uklanjanje vode iz peleta nakon bubrenja. Peleti korišteni u ovim ispitivanjima već su prepolovljeni neposredno nakon bubrenja kako bi se utvrdile promjene koje nastaju, dok je cilj sušenja bio određivanje stvarnog udjela vode u peletu nakon bubrenja. Nakon sušenja uzorci su vagani, a na osnovu gubitka mase određen je stvarni udjel vode u uzorku nakon bubrenja.

Osim sušenja peleta nakon bubrenja, u sušioniku su sušeni i praškasti uzorci koji su prethodno stavljani u eksikator s ciljem utvrđivanja točnog udjela vode u pojedinom uzorku

neposredno prije komprimiranja i bubrenja. Ovi podaci su vrlo važni kako bi se moglo usporediti početni s ukupnim udjelom vode dobivenim nakon bubrenja peleta.

3.4. Rezultati laboratorijskih ispitivanja

U ovom poglavlju su prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja. Osim podataka o bubrenju peleta pri različitim uvjetima prikazani su i rezultati laboratorijskih ispitivanja svojstava inhibiranih isplaka, koji su vrlo bitni za daljnje analize dobivenih podataka te moguće korelacije s rezultatima bubrenja peleta.

3.4.1. Rezultati laboratorijskih ispitivanja svojstava inhibiranih isplaka

U okviru provedenih laboratorijskih ispitivanja korištenih inhibiranih isplaka određena su njihova osnovna fizikalna svojstva, pri čemu je posebna pažnja posvećena svojstvima koja mogu utjecati na intenzitet bubrenja peleta. Ispitana su filtracijska i reološka svojstva inhibiranih isplaka (pri sobnoj temperaturi i temperaturi od 50°C). Određivanjem reoloških svojstava dobiveni su podaci o naprezanju pri pokretanju, plastičnoj viskoznosti, indeksu toka i indeksu konzistencije. Na temelju njih i podataka o bubrenju peleta izračunate su vrijednosti tlaka koji nastaje prilikom protjecanja isplake kroz prstenasti prostor otvorenog dijela kanala bušotine. Ispitivanja su provedena prema standardu koji je propisao Američki naftni institut (*engl. American Petroleum Institute - API*), odnosno prema preporukama oznake API RP 13B-1 (*engl. Recommended practice - RP*) koje se odnose na standardne postupke ispitivanja isplaka na bazi vode (*API RP 13B-1 Recommended Practice - Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 1997; Gaurina-Međimurec, 1995*).

Osim rezultata ispitivanja reoloških svojstava i filtracije, u nastavku su prikazani i podaci o vremenu kapilarnog upijanja ispitivanih isplaka. Iako se vrijeme kapilarnog upijanja ne ubraja u osnovna fizikalna svojstva isplake koja su obuhvaćena navedenim standardom, vrlo su bitna kod naknadne analize rezultata laboratorijskih ispitivanja te moguće usporedbe s intenzitetom bubrenja.

3.4.1.1. Filtracijska svojstva inhibiranih isplaka

Filtracijska svojstva inhibiranih isplaka određena su upotrebom standardne API filter preše (slika 3-10).



Slika 3-10. API filter preša (<http://www.ofite.com>)

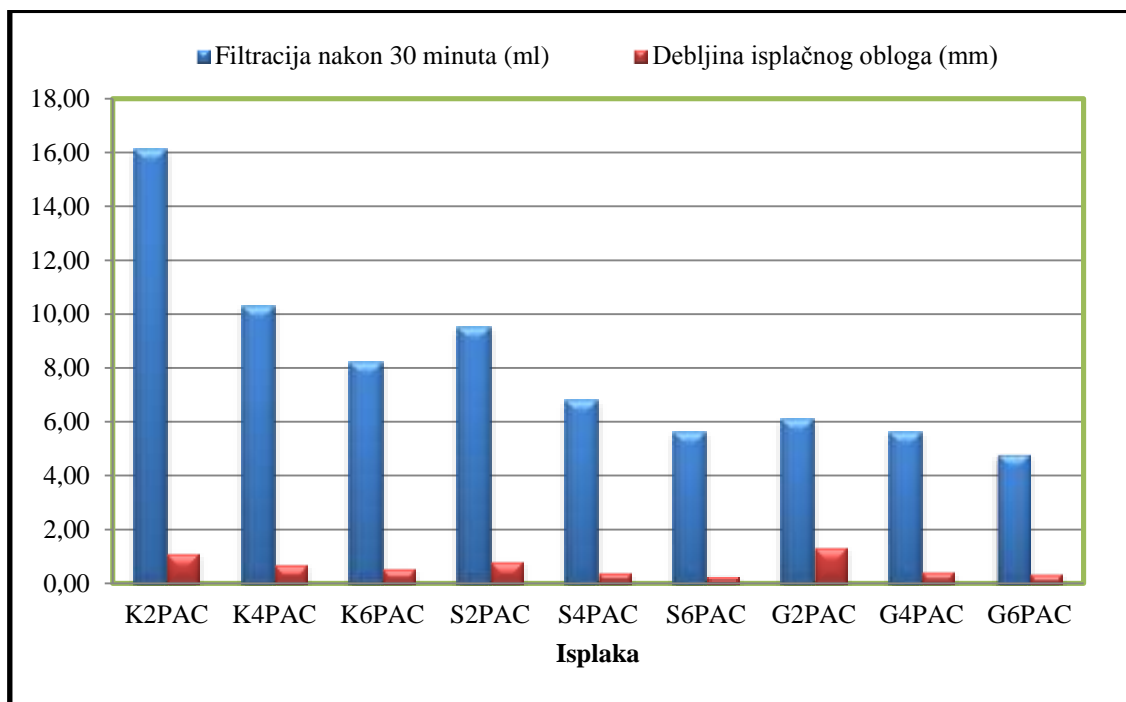
Ispitivanja su provedena prema uvjetima propisanim API standardom, odnosno pri sobnoj temperaturi i tlaku od 700 kPa, a rezultati su prikazani u tablici 3-10. Tijekom ispitivanja bilježen je volumen filtrata (u mililitrima) u određenim vremenskim intervalima (nakon jedne minute, pet minuta, sedam i pol minuta itd.) kao i ukupni volumen filtrata ostvaren nakon trideset minuta ispitivanja. Za svaku isplaku određen je ukupni volumen filtrata i debljina isplaćnog obloga.

Tablica 3-10. Rezultati laboratorijskih ispitivanja filtracijskih svojstava inhibiranih isplaka

Vrijeme (minuta)	Volumen filtrata (ml)								
	K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
1	2,00	0,90	0,50	0,70	0,20	0,10	0,40	0,20	0,10
5	5,80	3,40	2,40	3,00	1,90	1,40	2,00	1,50	1,00
7,5	7,40	4,40	3,20	3,90	2,60	2,00	2,50	2,10	1,60
10	8,80	5,40	4,00	4,80	3,30	2,50	3,20	2,60	2,00
15	11,40	6,90	5,20	6,30	4,30	3,40	4,10	3,50	2,90
20	13,10	8,10	6,30	7,50	5,30	4,20	4,90	4,30	3,60
25	14,70	9,20	7,20	8,60	6,10	4,90	5,50	5,00	4,20
30	16,10	10,30	8,20	9,50	6,80	5,60	6,10	5,60	4,80
Debljina isplaćnog obloga (mm)	1,11	0,69	0,55	0,8	0,4	0,29	1,32	0,43	0,37

Iz tablice 3-10 vidljivo je da se dobiveni volumeni filtrata razlikuju kako između pojedinih tipova inhibiranih isplaka tako i unutar određene inhibirane isplake ovisno o koncentraciji polianionske celuloze. Najveći volumen filtrata od 16,1 mililitar zabilježen je kod kalijске isplake s 2 g/l polianionske celuloze (K2PAC), dok je najmanji volumen od 4,8 mililitara filtrata izmjeren kod gipsne isplake sa 6 g/l polianionske celuloze (G6PAC). Općenito, kod sva tri tipa inhibiranih isplaka uočeno je smanjenje volumena filtrata s povećanjem koncentracije polianionske celuloze. Taj trend uočen je ne samo kod ukupne filtracije nakon trideset minuta, već vrijedi i za svaki interval ispitivanja.

Izmjerene debljine isplačnih obloga su u rasponu od 1,32 mm (izmjerena kod isplake G2PAC) do 0,29 mm (izmjerena kod isplake S6PAC). Ukoliko se usporede različiti tipovi inhibiranih isplaka s jednakom koncentracijom polianionske celuloze, može se zaključiti da je najmanja debljina obloga slane isplake. Može se zaključiti da s povećanjem koncentracije polianionske celuloze, za pojedini tip inhibirane isplake, dolazi do smanjenja debljine isplačnog obloga isplake (slika 3-11).



Slika 3-11. Utjecaj koncentracije polianionske celuloze na filtraciju i debljinu isplačnog obloga

3.4.1.2. Reološka svojstva inhibiranih isplaka

Reološka svojstva inhibiranih isplaka ispitana su pomoću dva uređaja - Fann viskozimetra (slika 3-12 a) i viskozimetra OFITE model 900 (slika 3-12 b).



a)



b)

Slika 3-12. Fann viskozimetar (a) i OFITE viskozimetar model 900 (b)
(<http://www.ofite.com>)

Na temelju dobivenih rezultata mjerenja određena su reološka svojstva poput viskoznosti, naprezanja pri pokretanju te čvrstoće gela. Na Fann viskozimetru direktno se očitaju smična naprezanja pri pojedinim smičnim brzinama kao i 10-s i 10-min čvrstoća gela, dok se plastična i prividna viskoznost izračunavaju iz očitanih podataka pri definiranim smičnim brzinama. Mjerenja su provedena pri atmosferskom tlaku i sobnoj temperaturi. Za razliku od Fann viskozimetra, viskozimetar OFITE model 900 je u potpunosti kompjuteriziran te se svi podaci kako direktni tako i oni računski dobivaju u digitalnom obliku, odnosno u obliku Excel tablice. Mjerenja na ovom instrumentu provedena su pri temperaturama 25°C i 50°C, kako bi se utvrdio utjecaj temperature na reološka svojstva ispitivanih isplaka.

Reološka svojstva inhibiranih isplaka dobivena Fann viskozimetrom

Rezultati ispitivanja reoloških svojstava inhibiranih isplaka na Fann viskozimetru prikazani su u tablici 3-11. U tablici su navedene izmjerene vrijednosti smičnih naprezanja, te izmjerene vrijednosti čvrstoće gela nakon deset sekundi (10-s) i deset minuta (10-min) mirovanja isplake, dok su ostale vrijednosti dobivene računskim putem iz jednadžbi navedenih u literaturi (Kavedžija et al., 1990). Premda čvrstoća gela nema utjecaja na bubrenje peleta, bitno je poznavati njenu vrijednost za ispitivane isplake kako bi se utvrdilo da li izmjerene vrijednosti odgovaraju prosječnim vrijednostima za pojedini tip isplake i za primjenu u praksi. Isto tako na osnovu dobivenih podataka može se utvrditi utjecaj polianionske celuloze na promjenu vrijednosti čvrstoće gela izmjerene nakon deset sekundi, odnosno deset minuta. Izmjerene vrijednosti 10-s čvrstoće gela kreću se u rasponu od 1,3 do 3,57 Pa (obije vrijednosti odnose se na kalijsku isplaku), dok vrijednosti 10-min čvrstoće gela iznose od 2,04 do 17,34 Pa (najmanja vrijednost izmjerena je kod gipsne isplake G2PAC dok je najviša izmjerena kod slane isplake S6PAC). Izmjerene vrijednosti čvrstoće gela odgovaraju prosječnim vrijednostima čvrstoće gela za pojedine tipove isplake (Amoco - Drilling Fluids Manual, 1994). Također se može zaključiti kako se s povećanjem koncentracije polianionske celuloze povećavaju vrijednosti čvrstoće gela. Geliranje je najviše izraženo kod slane isplake, a najslabije kod gipsne isplake.

Tablica 3-11. Reološka svojstva ispitivanih inhibiranih isplaka (Fann viskozimetar)

Smična brzina (1/s)	Smično naprezanje (Pa)								
	K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
1020	22,95	34,94	44,63	28,82	40,8	53,55	24,74	37,23	56,36
510	13,52	21,42	27,54	17,34	24,48	33,15	13,77	21,68	33,15
340	9,95	16,32	20,91	12,75	18,36	25,5	9,95	16,07	24,48
170	6,38	10,20	13,52	7,65	11,22	16,83	6,12	9,69	14,79
10,2	2,04	2,55	3,57	1,28	2,04	3,57	1,02	2,04	2,30
5,1	1,28	2,3	2,81	1,02	1,53	2,55	0,77	1,53	1,79
Plastična viskoznost (Pa·s)	0,018	0,027	0,034	0,023	0,032	0,04	0,022	0,03	0,046
Naprezanje pri pokretanju (Pa)	4,09	7,90	10,45	5,86	8,16	12,75	2,80	6,13	9,94
10-s čvrstoća gela (Pa)	1,28	3,06	3,57	1,53	2,04	2,55	1,53	2,04	2,04
10-min čvrstoća gela (Pa)	7,14	7,65	9,69	8,67	10,71	17,34	2,04	5,10	7,65
Indeks toka (-)	0,458	0,425	0,448	0,575	0,569	0,538	0,591	0,527	0,603
Indeks konzistencije (Pa·sⁿ)	0,606	1,150	1,353	0,399	0,605	1,060	0,293	0,648	0,670

Sa stajališta stabilnosti kanala bušotine, za optimiranje hidrauličkih parametara tijekom bušenja kao i utvrđivanja mogućeg utjecaja na pojavu i intenzitet bubrenja puno su važniji podaci o plastičnoj viskoznosti, naprezanju pri pokretanju te indeksu toka i indeksu konzistencije nego podaci o čvrstoći gela. Podaci o ovim reološkim parametrima izračunati su pomoću jednadžbi navedenih u literaturi. Podaci su bitni i kako bi se utvrdio utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na promjenu promatranih reoloških parametara, ali i na promjenu tlaka u bušotini. Vrijednosti plastične viskoznosti, naprezanja pri pokretanju, indeksa toka i indeksa konzistencije dobiveni su pomoću jednadžbi 3-1, 3-2, 3-3 i 3-4 (Gulf Publishing Company - Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual, 1982; Kavedžija et al., 1990).

$$\mu_p = \frac{\tau_{1020} - \tau_{510}}{1020 - 510} \quad (3 - 1)$$

Gdje su:

μ_p - plastična viskoznost [Pa·s],

τ_{1020} - smično naprezanje kod smične brzine od 1020 1/s [Pa],

τ_{510} - smično naprezanje kod smične brzine od 510 1/s [Pa].

$$\tau_0 = \tau_{1020} - 2 \cdot (\tau_{1020} - \tau_{510}) \quad (3 - 2)$$

Gdje je:

τ_0 - naprezanje pri pokretanju (granica tečenja) [Pa].

$$n_{pp} = 0,657 \cdot \log \frac{\tau_{170}}{\tau_{5,1}} \quad (3 - 3)$$

Gdje su:

n_{pp} - indeks toka [-],

τ_{170} - smično naprezanje kod smične brzine od 170 1/s [Pa],

$\tau_{5,1}$ - smično naprezanje kod smične brzine od 5,1 1/s [Pa].

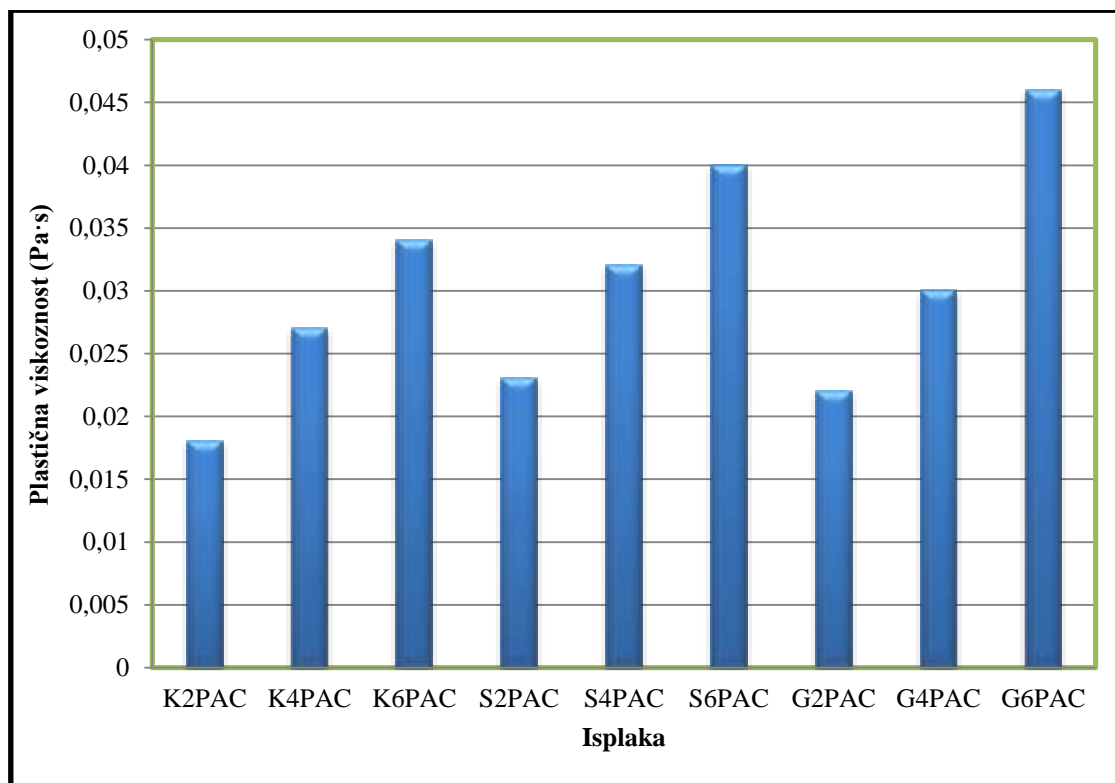
$$K_{pp} = \frac{\tau_{170}}{170^{n_{pp}}} \quad (3 - 4)$$

Gdje je:

K_{pp} - indeks konzistencije [Pa·s^{n_{pp}}].

Plastična viskoznost

Dobivene vrijednosti plastične viskoznosti ispitivanih isplaka prikazane su u tablici 3-11, te na slici 3-13.

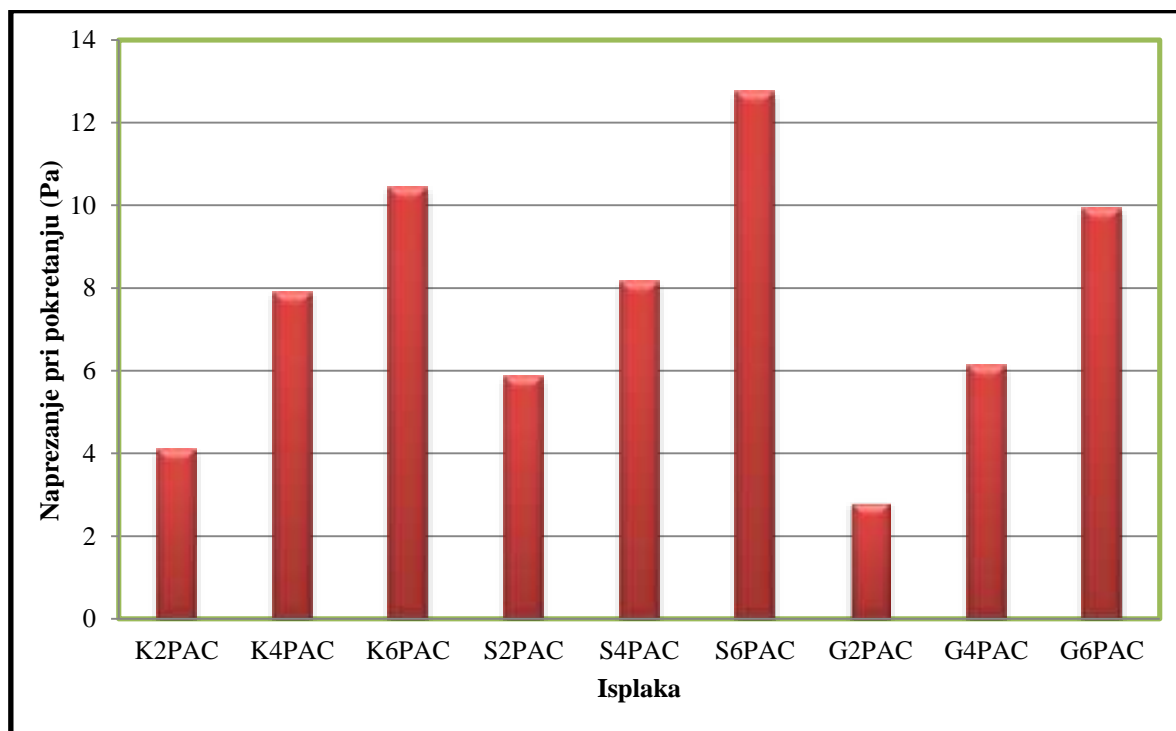


Slika 3-13. Utjecaj polianionske celuloze na plastičnu viskoznost ispitivanih inhibiranih isplaka

Najniža vrijednost plastične viskoznosti od 0,018 Pa·s dobivena je kod kalijске isplake K2PAC, dok je najviša vrijednost od 0,046 Pa·s zabilježena kod gipsne isplake G6PAC. Za sve ispitivane isplake može se zaključiti da s povećanjem koncentracije polianionske celuloze dolazi do povećanja vrijednosti plastične viskoznosti (slika 3-13). Na osnovu usporedbe dobivenih vrijednosti plastične viskoznosti za različite tipove inhibiranih isplaka s jednakom koncentracijom polianionske celuloze, može se zaključiti da kalijška isplaka ima najniže vrijednosti plastične viskoznosti za sve koncentracije polianionske celuloze.

Naprezanje pri pokretanju

Dobivene vrijednosti naprezanja pri pokretanju prikazane su u tablici 3-11 i na slici 3-14. Iz navedene tablice vidljivo je da se vrijednosti naprezanja pri pokretanju nalaze u rasponu od 2,84 pa do 12,75 Pa, ovisno o tipu inhibirane isplake i koncentraciji polianionske celuloze.

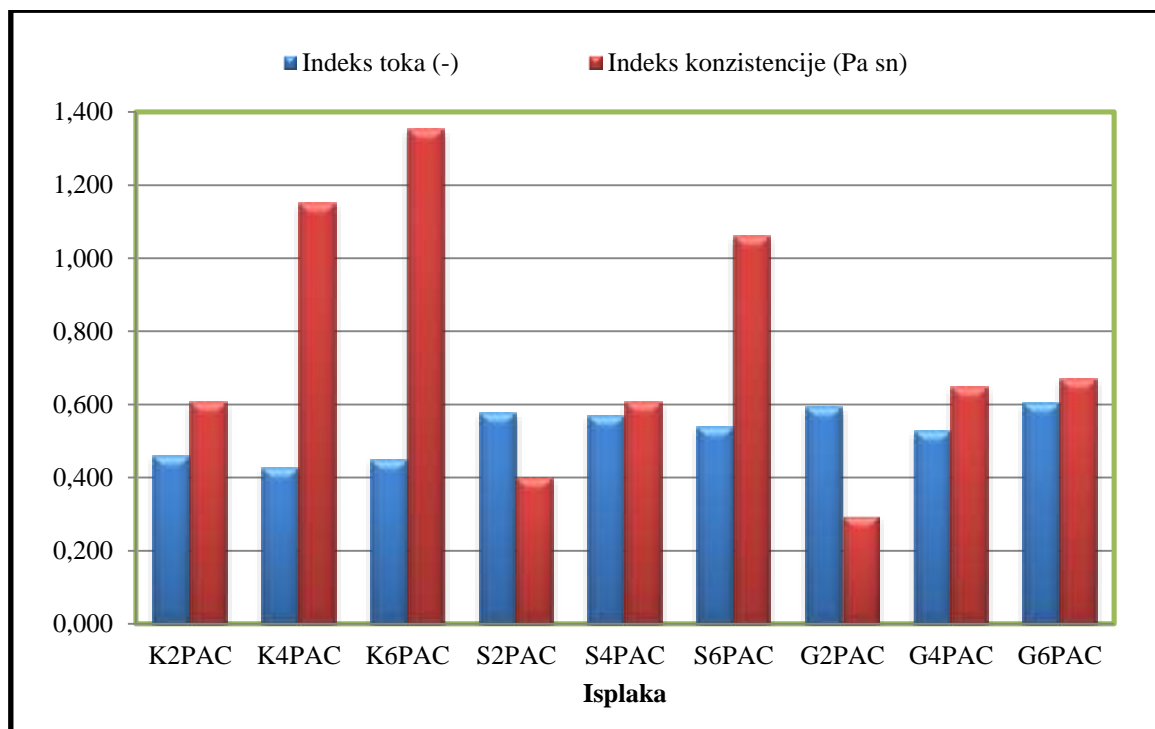


Slika 3-14. Utjecaj polianionske celuloze na naprezanje pri pokretanju ispitivanih inhibiranih isplaka

Iz slike 3-14 vidljivo je kako najveće vrijednosti naprezanja pri pokretanju kod jednake koncentracije polianionske celuloze ima slana isplaka, a najmanje gipsna isplaka. Također se može zaključiti da s povećanjem koncentracije polianionske celuloze dolazi do povećanja naprezanja pri pokretanju za sva tri tipa ispitivanih inhibiranih isplaka.

Indeks toka i indeks konzistencije

Vrijednosti indeksa toka i indeksa konzistencije prikazane su također u tablici 3-11 i na slici 3-15.



Slika 3-15. Utjecaj polianionske celuloze na indeks toka i indeks konzistencije ispitivanih inhibiranih isplaka

Povećanje koncentracije polianionske celuloze u svim inhibiranim isplakama uzrokuje povećanje vrijednosti indeksa konzistencije. Iz prikazanih podataka može se zaključiti da najviše vrijednosti indeksa konzistencije ima kalijaska isplaka, a najniže gipsna isplaka. Promatranjem vrijednosti indeksa toka može se zaključiti da je najmanja vrijednost zabilježena kod kalijaska isplake, te da dobivene vrijednosti osciliraju s promjenom koncentracije polianionske celuloze.

Reološka svojstva inhibiranih isplaka određena OFITE viskozimetrom Model 900

Reološka svojstva ispitivanih isplaka određena su, osim na Fann viskozimetru, i viskozimetrom Model 900, i to pri temperaturama 25°C i 50°C. Dobiveni podaci o reološkim svojstvima kalijске, slane i gipsne isplake prikazani su u tablicama 3-12, 3-13 i 3-14.

Tablica 3-12. Reološka svojstva kalijске isplake (viskozimetar OFITE Model 900)

Smična brzina (1/s)	K2PAC		K4PAC		K6PAC	
	Smično naprežanje (Pa)					
	25°C	50°C	25°C	50°C	25°C	50°C
1020	20,5	15,2	30,7	19,9	39,5	25,5
510	11,3	8,1	17,8	10,9	23,1	14,6
340	8,1	5,7	13,1	8,3	17,2	10,8
170	4,6	3	8,3	4,9	10,8	6,8
10,2	0,3	1,1	1,8	0	2,4	1,9
5,1	0,2	1	1,7	0	2,1	1,8
Plastična viskoznost (Pa·s)	0,018	0,014	0,025	0,018	0,032	0,021
Naprežanje pri pokretanju (Pa)	2,1	1	4,9	1,9	6,7	3,7
10-s čvrstoća gela (Pa)	0,2	1,1	1,7	0	2,1	1,8
10-min čvrstoća gela (Pa)	4,7	2,3	4,4	2,6	5,9	3,4

Tablica 3-13. Reološka svojstva slane isplake (viskozimetar OFITE Model 900)

Smična brzina (1/s)	S2PAC		S4PAC		S6PAC	
	Smično naprežanje (Pa)					
	25°C	50°C	25°C	50°C	25°C	50°C
1020	25,8	18,9	37,8	25,6	48,5	33,1
510	14,1	10,5	21,6	14,4	28,7	19,6
340	10,2	6,7	15,5	9,7	21,1	14,5
170	5,1	4	9,3	6	13	8,6
10,2	0	0	1,2	0	2,2	1,5
5,1	0	0	1,1	0	2,1	1,4
Plastična viskoznost (Pa·s)	0,023	0,017	0,032	0,022	0,039	0,026
Naprežanje pri pokretanju (Pa)	2,3	2,1	5,4	3,3	8,8	6,2
10-s čvrstoća gela (Pa)	0	0	1,1	0	2,5	1,6
10-min čvrstoća gela (Pa)	4,9	6,1	6,8	5,6	11,7	9,8

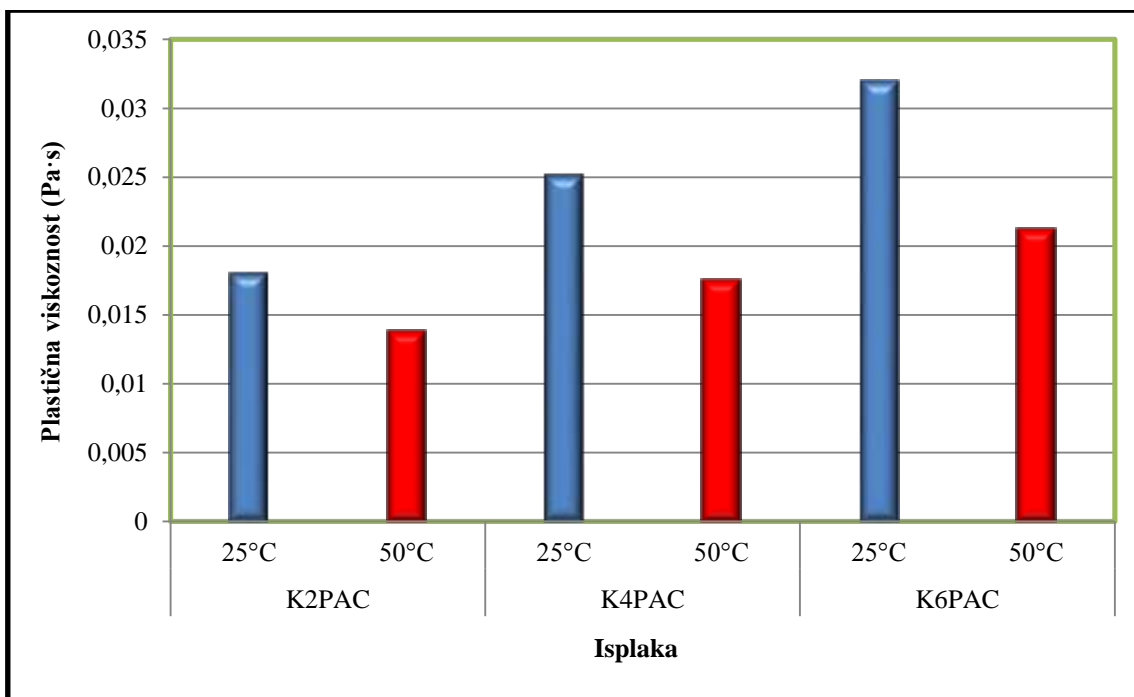
Tablica 3-14. Reološka svojstva gipsne isplake (viskozimetar OFITE Model 900)

Smična brzina (1/s)	G2PAC		G4PAC		G6PAC	
	Smično naprezanje (Pa)					
	25°C	50°C	25°C	50°C	25°C	50°C
1020	21	15,1	32,1	21,3	49,7	30,1
510	11,3	7,9	18,1	12	28,9	16,8
340	8,2	5,5	13,1	9	20,6	12,3
170	4,7	3,7	7,7	5,3	12,5	7,4
10,2	0	0	0,9	0,7	1,4	1
5,1	0	0	0,6	0,6	1,2	0,9
Plastična viskoznost (Pa·s)	0,019	0,014	0,027	0,018	0,041	0,026
Naprezanje pri pokretanju (Pa)	1,5	0,7	4,2	2,7	8,1	3,5
10-s čvrstoća gela (Pa)	0	0	0,6	0,6	1,3	0,9
10-min čvrstoća gela (Pa)	1,1	1,1	2,3	3	4,6	3,1

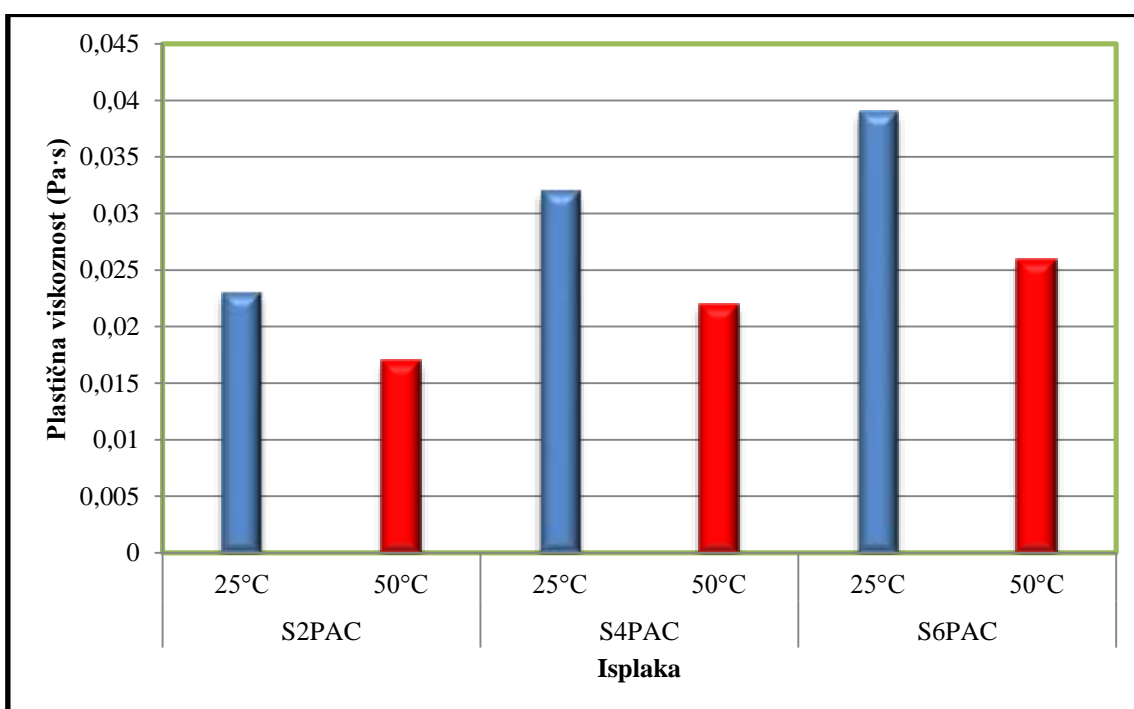
Iz navedenih tablica vidljivo je kako ispitivane isplake razvijaju relativno slabe gelove, osobito gipsna isplaka, dok su najviše vrijednosti zabilježene kod slane isplake. Vrijednosti početne (10-s) čvrstoće gela izmjerene kod temperature od 25°C nalaze se u rasponu od 0 do 2,5 Pa, a 10-min čvrstoće gela od 1,1 do 11,7 Pa. S povećanjem temperature na 50°C kod svih se isplaka uočava smanjenje početne i desetominutne čvrstoće gela. Izmjerena početna vrijednost čvrstoće gela nalazila se u rasponu od 0 do 1,8 Pa, dok se desetominutna čvrstoća gela nalazila u rasponu od 1,1 do 9,8 Pa. Ukoliko se razmatra svaki tip inhibirane isplake zasebno, može se zaključiti da s povećanjem koncentracije polianionske celuloze dolazi do povećanja vrijednosti početne i desetominutne čvrstoće gela.

Plastična viskoznost

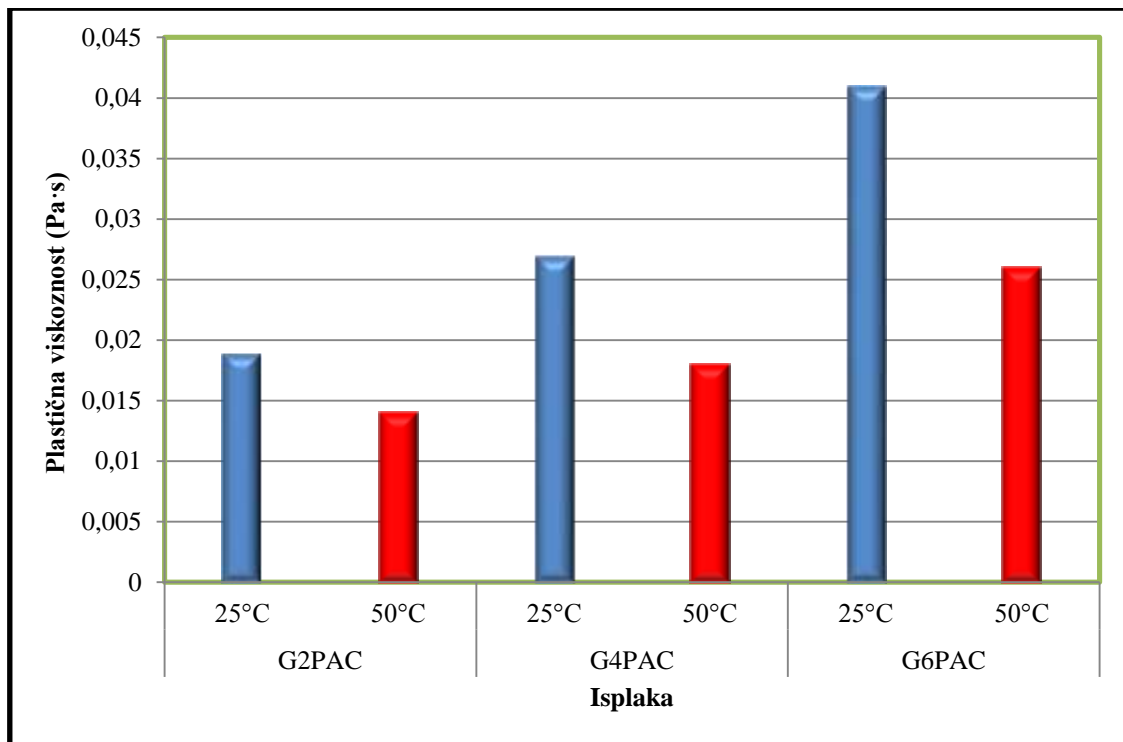
Dobivene vrijednosti plastične viskoznosti prikazane su za pojedine tipove inhibiranih isplaka u odgovarajućim tablicama (tablice 3-12, 3-13 i 3-14) te na slikama 3-16, 3-17 i 3-18.



Slika 3-16. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na plastičnu viskoznost kalijске isplake



Slika 3-17. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na plastičnu viskoznost slane isplake



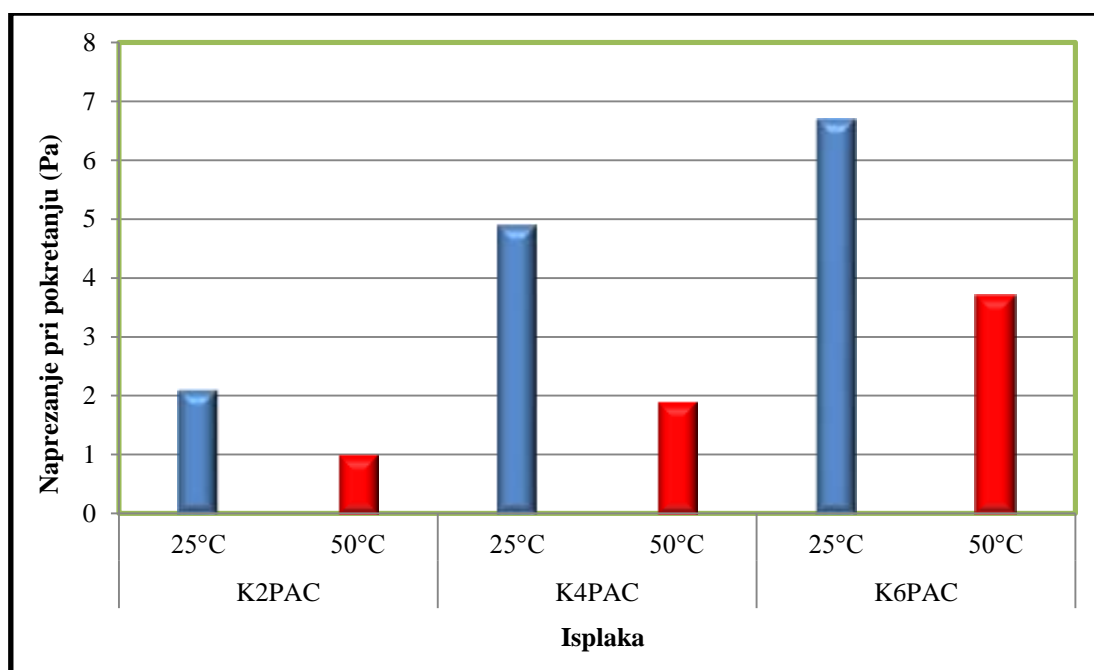
Slika 3-18. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na plastičnu viskoznost gipsne isplake

Iz prikazanih vrijednosti može se zaključiti kako su najveće vrijednosti plastične viskoznosti dobivene kod slane isplake (jedino odstupanje zabilježeno je kod isplaka sa 6 g/l polianionske celuloze gdje je najveća vrijednost zabilježena kod isplake G6PAC), dok su najmanje vrijednosti zabilježene kod kalijске isplake i na temperaturi 25°C i na 50°C. Kod temperature od 25°C vrijednosti plastične viskoznosti su od 0,018 do 0,023 Pa·s za isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 0,025 do 0,032 Pa·s za inhibirane isplake s 4 g/l te od 0,032 do 0,041 Pa·s za isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Povećanje temperature ispitivanja s 25°C na 50°C uzrokovalo je smanjenje plastične viskoznosti svih ispitivanih inhibiranih isplaka te su se njene vrijednosti nalazile u rasponu od 0,014 do 0,017 Pa·s za inhibirane isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 0,018 do 0,022 Pa·s za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze te u rasponu od 0,021 do 0,026 Pa·s za inhibirane isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Ukoliko se usporede vrijednosti izmjerene kod 25°C i 50°C za pojedine tipove isplaka može se zaključiti kako povećanje temperature uzrokuje smanjenje plastične viskoznosti za 0,004 do 0,006 Pa·s kod isplaka s 2 g/l polianionske celuloze, za 0,007 do 0,01 Pa·s za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze te za 0,011 do 0,015 Pa·s za isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Povećanje koncentracije polianionske celuloze uzrokovalo je povećanje vrijednosti plastične viskoznosti svih ispitivanih inhibiranih isplaka.

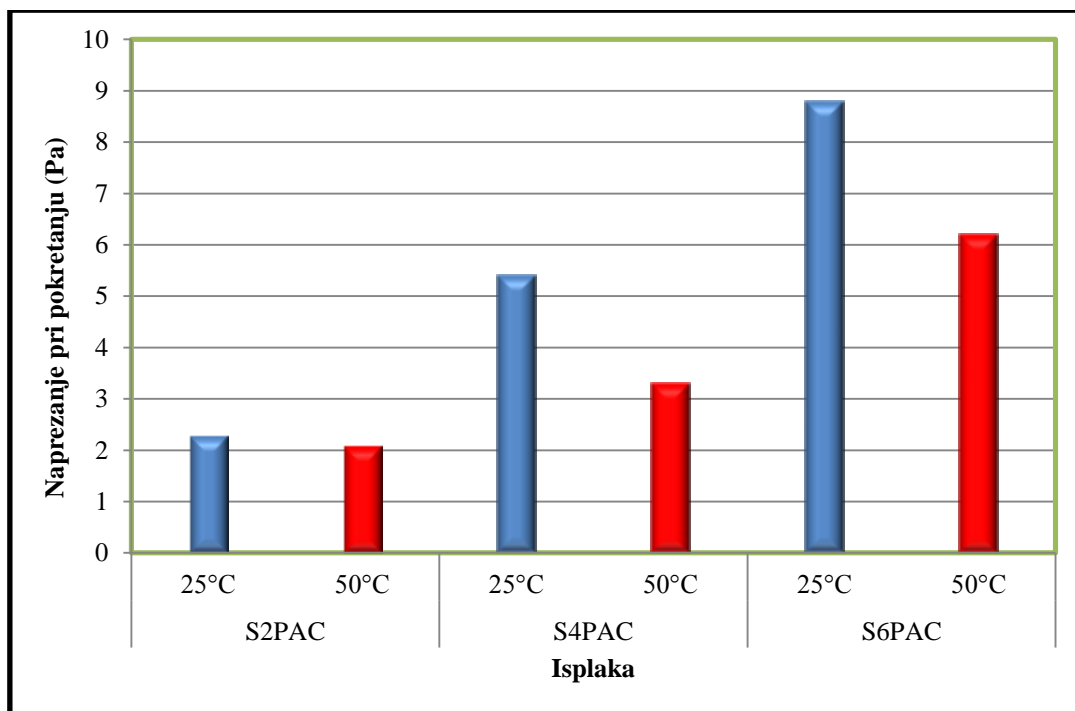
Ukoliko se vrijednosti plastične viskoznosti dobivene viskozimetrom Model 900 usporede s onima dobivenim Fann viskozimetrom, može se zaključiti da ne dolazi do značajnijih odstupanja.

Naprezanje pri pokretanju

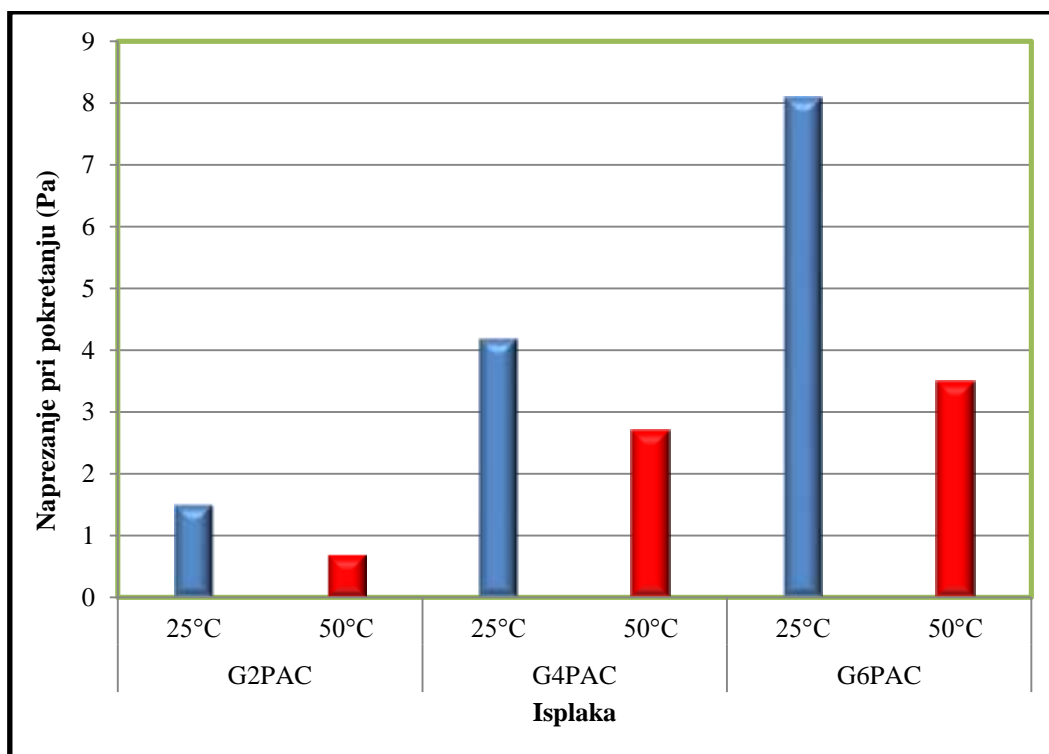
Dobivene vrijednosti napreznja pri pokretanju inhibiranih isplaka prikazane su u tablicama 3-12, 3-13 i 3-14, te na slikama 3-19, 3-20 i 3-21.



Slika 3-19. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na naprezanje pri pokretanju kalijске isplake



Slika 3-20. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na naprezanje pri pokretanju slane isplake



Slika 3-21. Utjecaj polianionske celuloze i temperature na naprezanje pri pokretanju gipsne isplake

Najviše vrijednosti naprezanja pri pokretanju dobivene su kao i u slučaju plastične viskoznosti, kod slane isplake, kako kod niže (25°C) tako i kod više temperature (50°C). Kod temperature od 25°C naprezanje pri pokretanju je u rasponu od 1,5 do 2,3 Pa za isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 4,2 do 5,4 Pa za isplake s 4 g/l polianionske celuloze te od 6,7 do 8,8 Pa za isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Porast temperature kod koje su provedena ispitivanja uzrokovao je smanjenje vrijednosti naprezanja pri pokretanju kod svih ispitivanih inhibiranih isplaka te su se njegove vrijednosti nalazile u rasponu od 0,7 do 2,1 Pa za inhibirane isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 2,7 do 3,3 Pa za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze te u rasponu od 3,4 do 6,2 Pa za inhibirane isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Ukoliko se usporede vrijednosti izmjerene kod više i niže temperature za pojedine tipove isplaka može se zaključiti kako porast temperature uzrokuje smanjenje naprezanja pri pokretanju za 0,2 do 1,1 Pa kod isplaka s 2 g/l polianionske celuloze, za 1,5 do 3 Pa za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze te za 2,6 do 4,6 Pa za isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Povećanje koncentracije polianionske celuloze uzrokovalo je povećanje vrijednosti naprezanja pri pokretanju kod svih ispitivanih isplaka bez obzira na temperaturu ispitivanja.

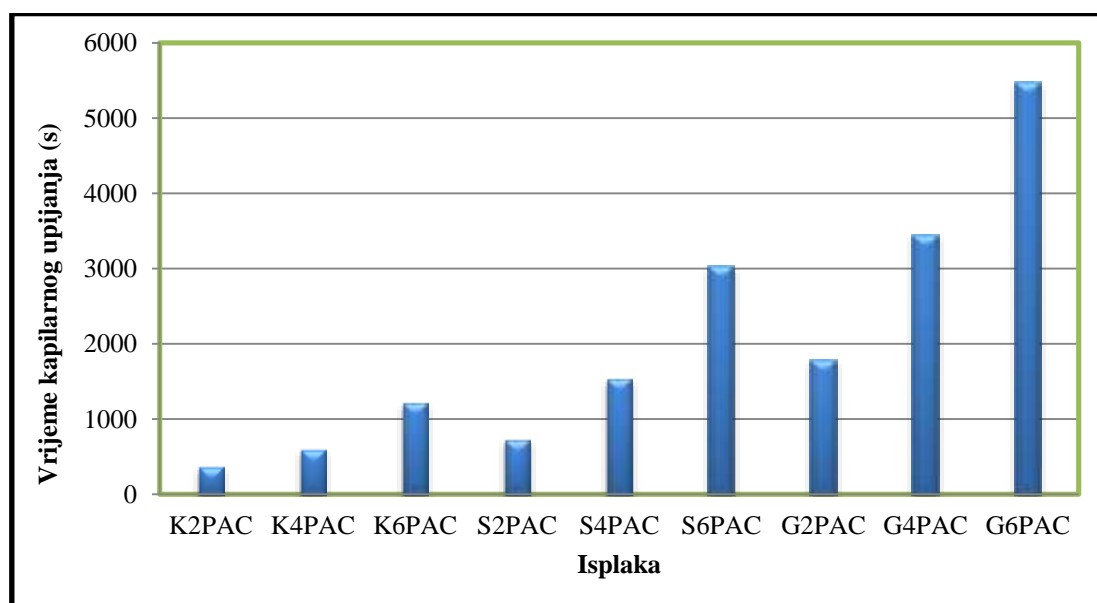
3.4.1.3. Vrijeme kapilarnog upijanja

Test vremena kapilarnog upijanja u naftnoj se industriji koristi za karakterizaciju šejla, određivanje optimalne koncentracije elektrolita u isplaci te ispitivanje mogućnosti kontrole filtracije fluida kroz propusni medij (Hoff et al., 2005; Berry et al., 2008). Vrijeme kapilarnog upijanja također može biti vrijedan podatak o inhibirajućem djelovanju određene isplake. Stoga je u okviru provedenih laboratorijskih ispitivanja osnovnih fizikalnih svojstava isplake određeno i vrijeme kapilarnog upijanja za svaku ispitanu isplaku. Za određivanje vremena kapilarnog upijanja korišten je uređaj za određivanje vremena kapilarnog upijanja kompanije OFITE (slika 3-22).



Slika 3-22. Uređaj za određivanje vremena kapilarnog upijanja isplake

Uređaj se sastoji od digitalnog mjerača vremena, postolja, pokrovne ploče s elektrodama, filter papira te šupljeg valjka u koji se ulijeva fluid koji se ispituje. Postupak ispitivanja sastoji se od slaganja uređaja, kao što je to prikazano na slici 3-22, te ulijevanja fluida u valjak koji je širim krajem oslonjen na filter papir. Tijekom ispitivanja dolazi do filtracije i širenja tekuće faze fluida kroz filter papir. U trenutku kada fronta filtrata dosegne prvi par elektroda aktivira se digitalni mjerač vremena i mjeri vrijeme potrebno da filtrat dođe do treće (vanjske) elektrode (Ofite „Capillary Suction Timer – Instruction Manual“, 2011). Dobiveno vrijeme predstavlja vrijeme kapilarnog upijanja. Dobivene vrijednosti vremena kapilarnog upijanja prikazane su na slici 3-23.



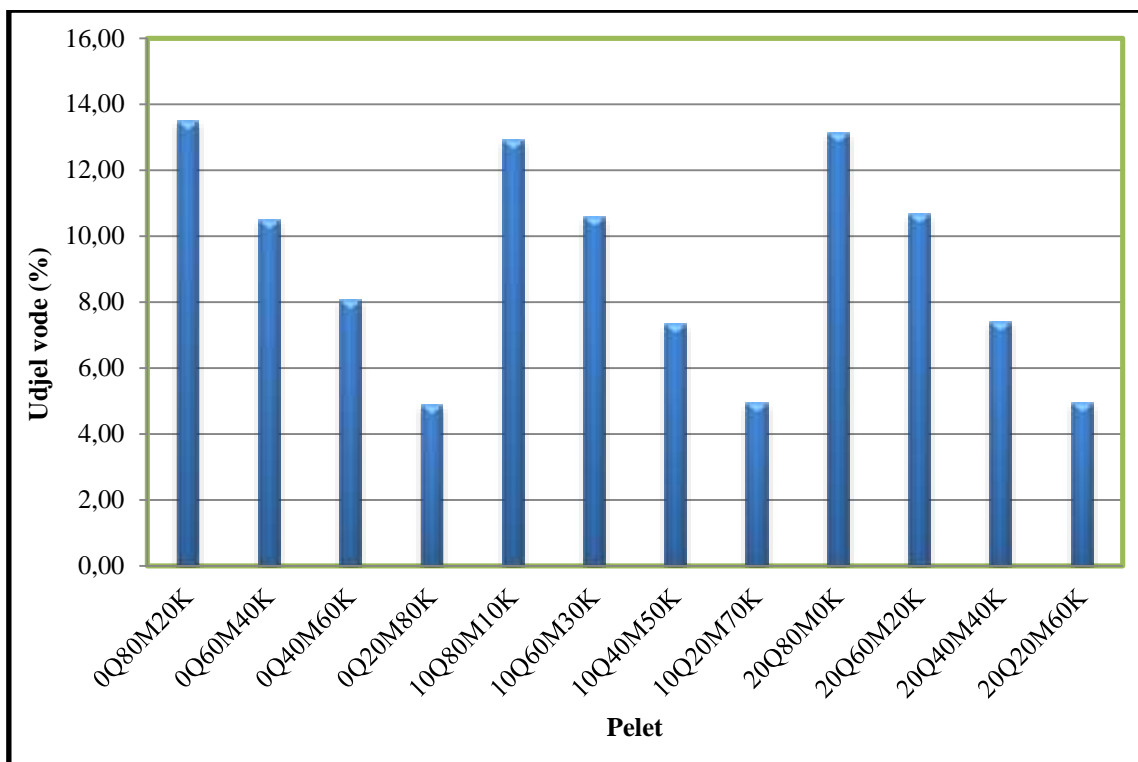
Slika 3-23. Vrijeme kapilarnog upijanja inhibiranih isplaka

Iz prikazanih vrijednosti može se zaključiti kako kalijaska isplaka pokazuje najmanje vrijeme kapilarnog upijanja, dok su najviše vrijednosti zabilježene kod gipsne isplake. Ukoliko se promatraju pojedini tipovi inhibirane isplake zasebno može se zaključiti kako s povećanjem koncentracije polianionske celuloze dolazi do povećanja vremena kapilarnog upijanja. Dobiveni se podaci dobro slažu s podacima o volumenu filtrata dobivenim na API filter preši, te se može zaključiti kako su ove dvije vrijednosti obrnuto proporcionalne, odnosno isplake s najvećom filtracijom imaju najmanje vrijeme kapilarnog upijanja i obrnuto.

3.4.2. Bubrenje peleta različitog mineraloškog sastava u vodenim otopinama soli

Kao što je to navedeno, ispitivanje bubrenja peleta različitog mineraloškog sastava započelo je primjenom različitih otopina soli. U ispitivanjima su korištene otopine sljedećih soli: kalijevog klorida, natrijevog klorida te kalcijevog klorida čije su recepture dane u tablici 3-5. Kako su recepture definirane prema masenom udjelu soli potrebnom za pripremu 1000 ml otopine određene gustoće, u daljnjem tekstu za pojedine otopine koristit će se oznake sastavljene od brojčane vrijednosti koja predstavlja udjel soli i kemijske formule soli (npr. 5% KCl, 10% NaCl ili 15% CaCl₂ i sl.). Osim samog bubrenja, u razmatranje je uzeta i ukupna masa peleta nakon bubrenja, udjel vode u peletu nakon bubrenja kao i stvarni udjel vode dobiven bubrenjem. Posebna pažnja posvećena je određivanju intenziteta bubrenja, odnosno definiranju vremenskog perioda unutar kojeg pelet postiže maksimalno bubrenje u pojedinom fluidu. Važno je napomenuti da su sve dobivene vrijednosti uspoređene s vrijednostima dobivenim bubrenjem peleta pri jednakim uvjetima u vodovodnoj vodi kada se i očekuje najveće bubrenje peleta, kao i najveći udjel vode u peletu nakon bubrenja.

Kako bi se definirao stvarni udjel vode dobiven bubrenjem određen je udjel vode u praškastom materijalu prije komprimiranja i bubrenja. Na osnovu izmjerenog podatka o udjelu vode u praškastom uzorku te određivanja udjela vode u peletu nakon bubrenja moguće je odrediti stvarni udjel vode dobiven bubrenjem. Podaci o početnim udjelima vode prikazani su na slici 3-24.

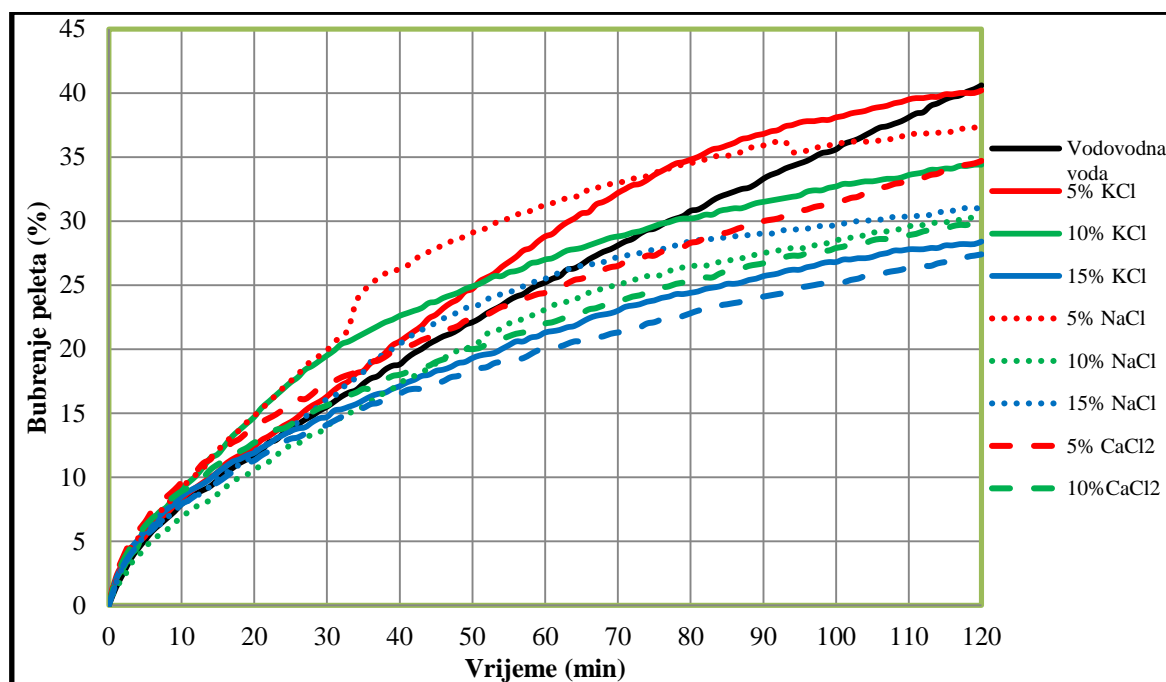


Slika 3-24. Udjel vode u praškastom uzorku neposredno prije komprimiranja

Iz priložene slike vidljivo je kako udjeli vode variraju s mineraloškim sastavom pojedinog peleta, te se nalaze u rasponu od 4,88 do 13,49%. Dobivene vrijednosti nalaze se unutar vrijednosti dobivenih određivanjem udjela vode u stvarnim uzorcima stijena koje se nalaze u rasponu od 3,2 do 17,7% (tablica 3-1). Za sve tri skupine uzoraka (podjela u skupine odnosi se na udjele kvarca u peletu, odnosno skupinu bez kvarca te skupinu s 10 i 20 mas. % kvarca) uočeno je kako se udjel vode u uzorku smanjuje sa smanjenjem udjela bentonita (odnosno Na-montmorilonita) i s povećanjem udjela kaolinita.

3.4.2.1. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K u vodenim otopinama soli

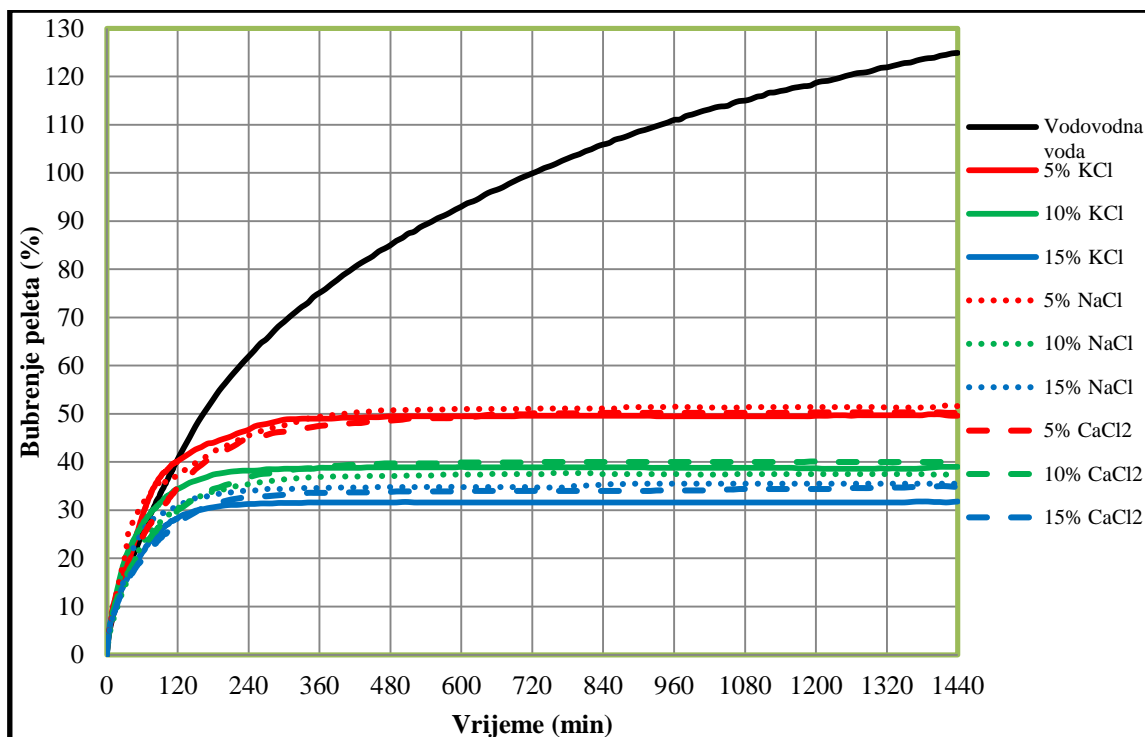
Rezultati dobiveni ispitivanjem bubrenja peleta 0Q80M20K u vodenim otopinama soli prikazani su na slikama 3-25, 3-26 te 3-27.



Slika 3-25. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

Na slici 3-25 prikazani su rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K u početnom ili ranom periodu kada su i očekivane najveće promjene. Iz navedene slike vidljivo je da se u prvih desetak minuta rezultati dobiveni bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi preklapaju s onima dobivenim bubrenjem u vodenim otopinama s različitim koncentracijama soli, što upućuje na zaključak kako tip i koncentracija soli nemaju značajniji utjecaj na samom početku bubrenja. Međutim u nastavku dolaze do izražaja i tip i koncentracija soli. Na osnovu usporede rezultata bubrenja nakon 120 minuta može se zaključiti da kod jednake koncentracije soli pelet najviše bubri u otopini KCl-a, a najmanje u otopini CaCl₂ (odstupanje od navedenog trenda uočen je tijekom bubrenja peleta u otopini 15% NaCl-a). Nakon 120 minuta ispitivanja najmanje bubrenje peleta od 27,4% izmjereno je u otopini 15% CaCl₂, a najveće od 40,2% u otopini 5% KCl, što je neznatno niže od bubrenja ostvarenog u vodovodnoj vodi (40,6%).

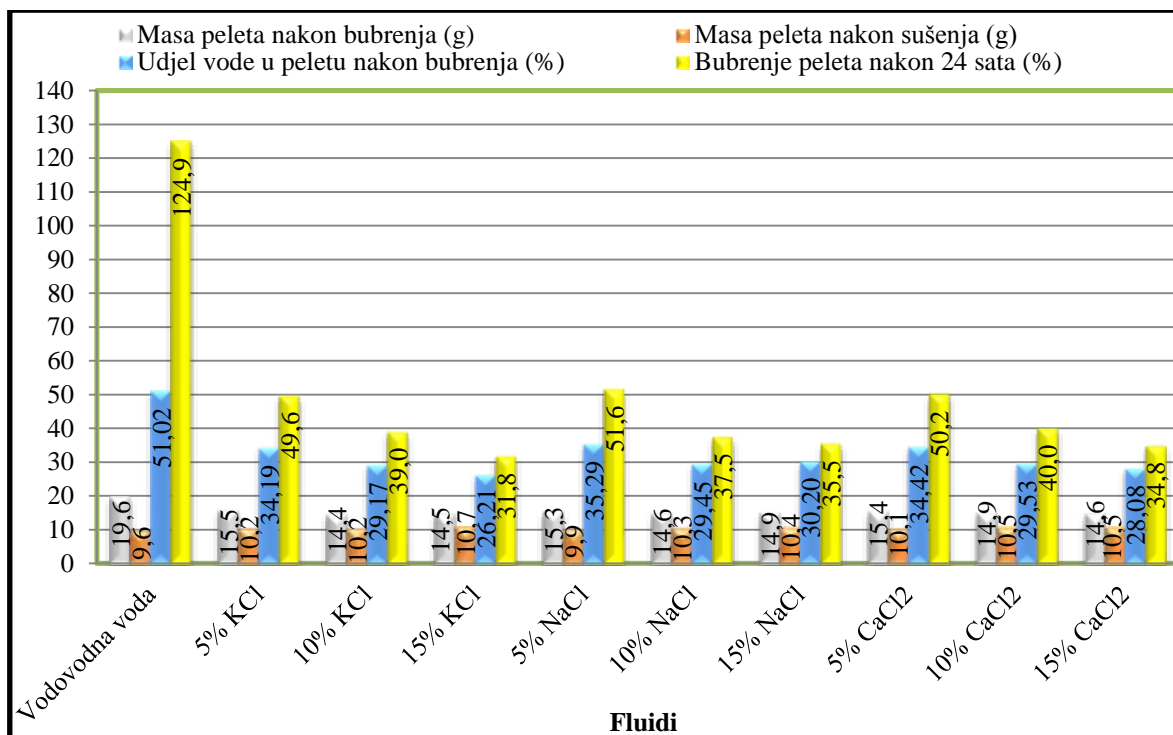
Na slici 3-26 prikazano je bubrenje peleta 0Q80M20K tijekom 24-satnog ispitivanja.



Slika 3-26. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Kao što je i očekivano najveće bubrenje peleta izmjereno je u vodovodnoj vodi, pri čemu je debljina peleta povećana za 1,25 puta u odnosu na početnu debljinu uz daljnju tendenciju rasta. Iz slike 3-26 je vidljivo da je maksimalno bubrenje peleta u pojedinoj otopini soli ostvareno unutar 240 do 720 minuta od početka ispitivanja. Općenito, maksimalno bubrenje peleta u pojedinoj vodenoj otopini soli postignuto je brže kod viših koncentracija soli i obrnuto. Kod nižih koncentracija soli to jest 5%, ukupno bubrenje je u rasponu od 49,6 do 51,6%. S povećanjem koncentracije soli dolazi do daljnjeg smanjenja maksimalnog bubrenja. Najmanja vrijednost bubrenja peleta od 31,8% postignuta je u otopini 15% KCl.

Rezultati dobiveni vaganjem i sušenjem peleta nakon bubrenja prikazani su na slici 3-27.

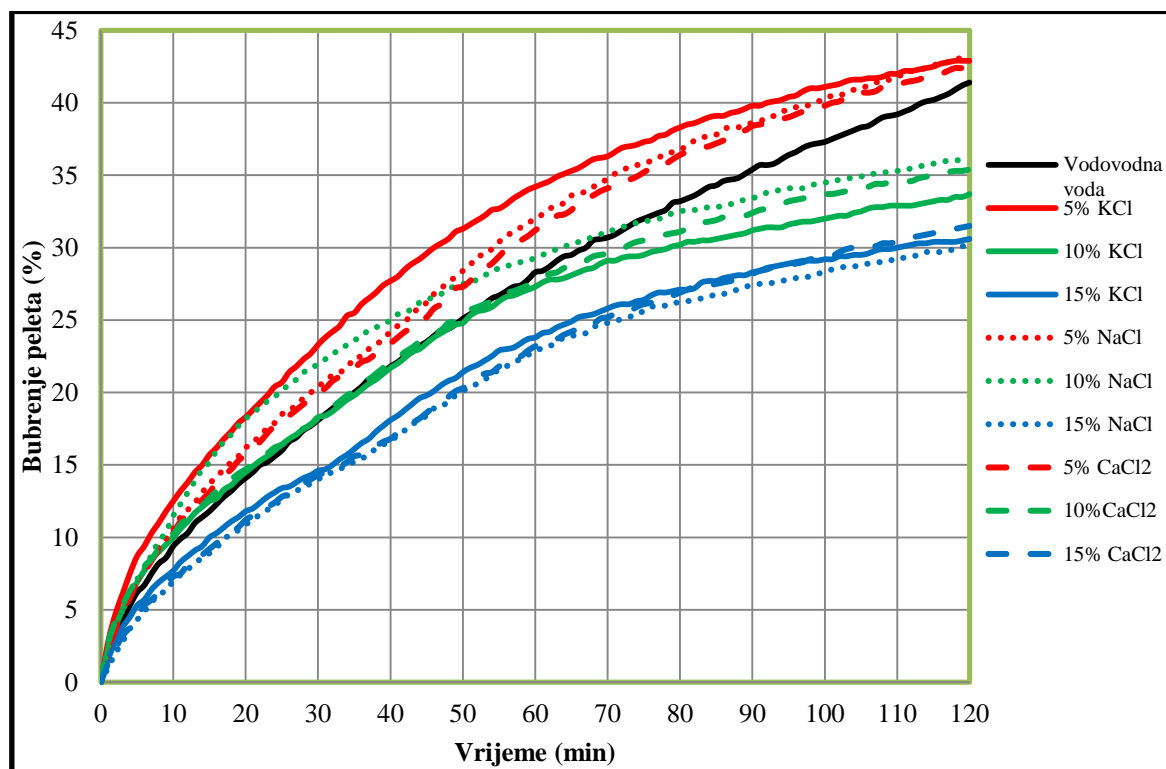


Slika 3-27. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 0Q80M20K

Iz slike je vidljivo da je najveći udjel vode od 51,02% sadržavao pelet koji je bubrio u vodovodnoj vodi što je u skladu s izmjerenim maksimalnim bubrenjem peleta. Udjel vode u peletu nakon ispitivanja u otopinama soli nalazio se u rasponu od 34,19 do 35,29% za otopine s 5% soli, od 29,17 do 29,53% za otopine s 10% soli te od 26,21 do 30,20% za otopine s 15% soli, pri čemu su najmanje vrijednosti izmjerene za otopinu KCl-a. Također se može zaključiti kako u pravilu s povećanjem koncentracije pojedine soli u otopini dolazi do smanjenja mase peleta nakon bubrenja zbog manje količine vode, te povećanja mase suhog uzorka nakon sušenja. Za dobivanje stvarnog udjela vode u peletu dobivenog bubrenjem potrebno je navedene vrijednosti udjela vode nakon bubrenja umanjiti za 13,49%, odnosno za udjel vode koji je sadržavao pelet prije bubrenja.

3.4.2.2. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K u vodenim otopinama soli

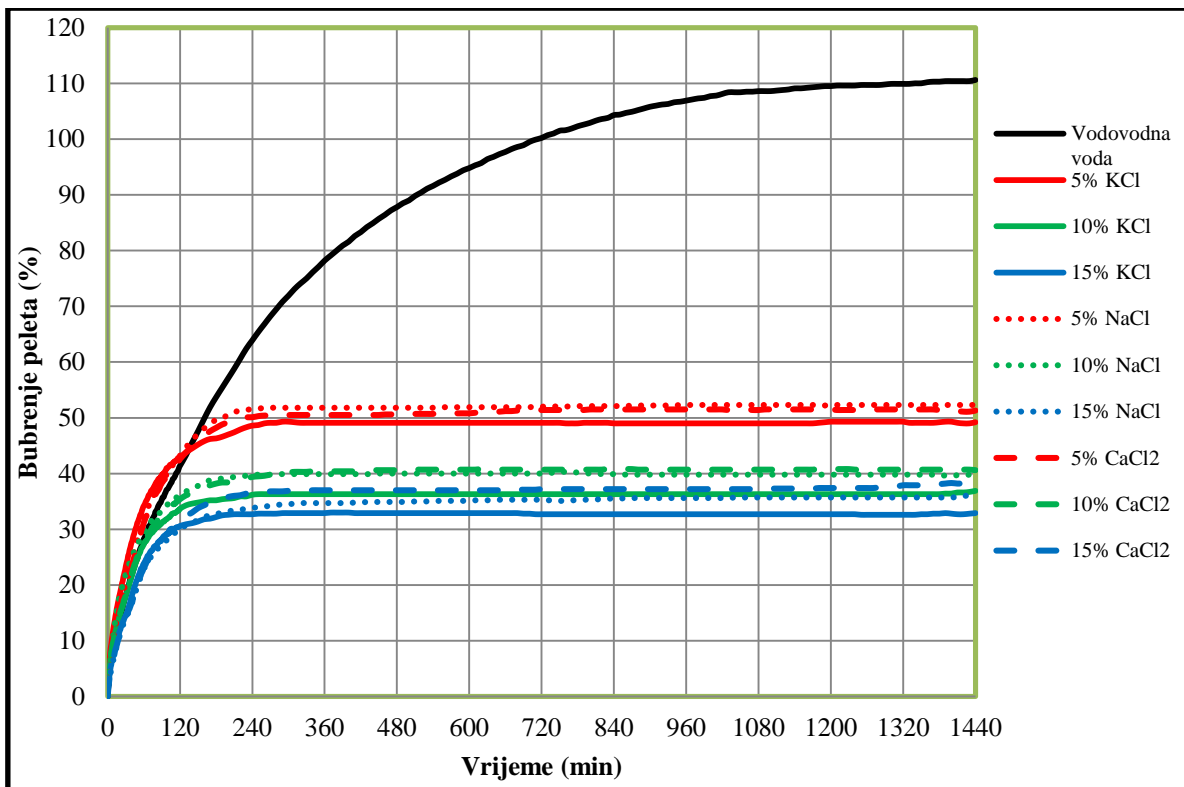
Podaci o bubrenju peleta 0Q60M40K prikazani su na slikama 3-28 i 3-29, dok su podaci o udjelu vode u peletu nakon bubrenja, te masama peleta nakon bubrenja i sušenja prikazani na slici 3-30.



Slika 3-28. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

Na slici 3-28 prikazano je bubrenje peleta 0Q60M40K tijekom prvih 120 minuta ispitivanja. Premda u prvih nekoliko minuta pelet pokazuje jednako bubrenje u svim fluidima (uključujući i vodovodnu vodu), nakon šezdeset minuta dolazi do grupiranja krivulja te je jasno vidljiva razlika u bubrenju u otopinama s 5, 10 i 15% soli. Najveće bubrenje peleta zabilježeno je u 5%-tnim otopinama soli, a nalazilo se u rasponu od 42,6 do 43,2%, dok je najniža vrijednost zabilježena u 15%-tnim otopinama soli i to od 30,1 do 31,5%. Iz navedenog se može zaključiti da bez obzira na tip soli, povećanje koncentracije soli uzrokuje smanjenje intenziteta bubrenja (bubrenja u jedinici vremena) i ukupne vrijednosti bubrenja mjerene nakon 120 minuta.

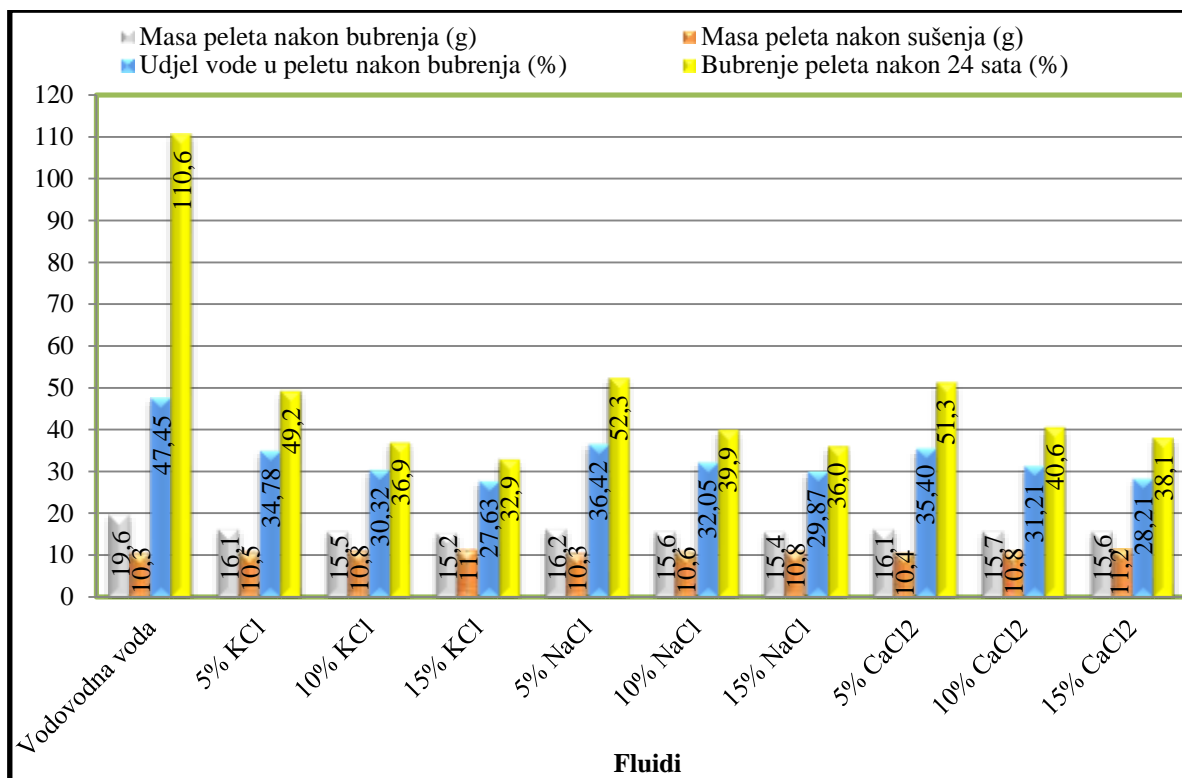
Podaci o bubrenju peleta tijekom 24 sata prikazani su na slici 3-29.



Slika 3-29. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Kao što je bilo i za očekivati najveće bubrenje nakon dvadeset četiri sata izmjereno je u vodovodnoj vodi, s daljnjom tendencijom rasta. Iz slike 3-29 je vidljivo da maksimalna vrijednost bubrenja ovisi o tipu i koncentraciji soli. Usporedbom svih ispitivanih vodenih otopina soli može se zaključiti kako je najveće bubrenje peleta ostvareno u 5%-tnim otopinama soli i to od 49,2 do 52,3 %. Povećanje koncentracije soli u otopini za daljnjih 5% uzrokovalo je smanjenje bubrenja za sve ispitivane soli, te se ono nalazilo u rasponu od 36,9 do 40,6%, dok je pelet 0Q60M40K najmanje bubrio u 15%-tnim otopinama soli i to u rasponu od 32,9 do 38,1%. Najniže vrijednosti ukupnog bubrenja peleta kod svih koncentracija soli, izmjerene su u vodenim otopinama KCl-a.

Na slici 3-30. prikazani su podaci o udjelu vode u peletu nakon bubrenja te masama peleta nakon bubrenja i sušenja.

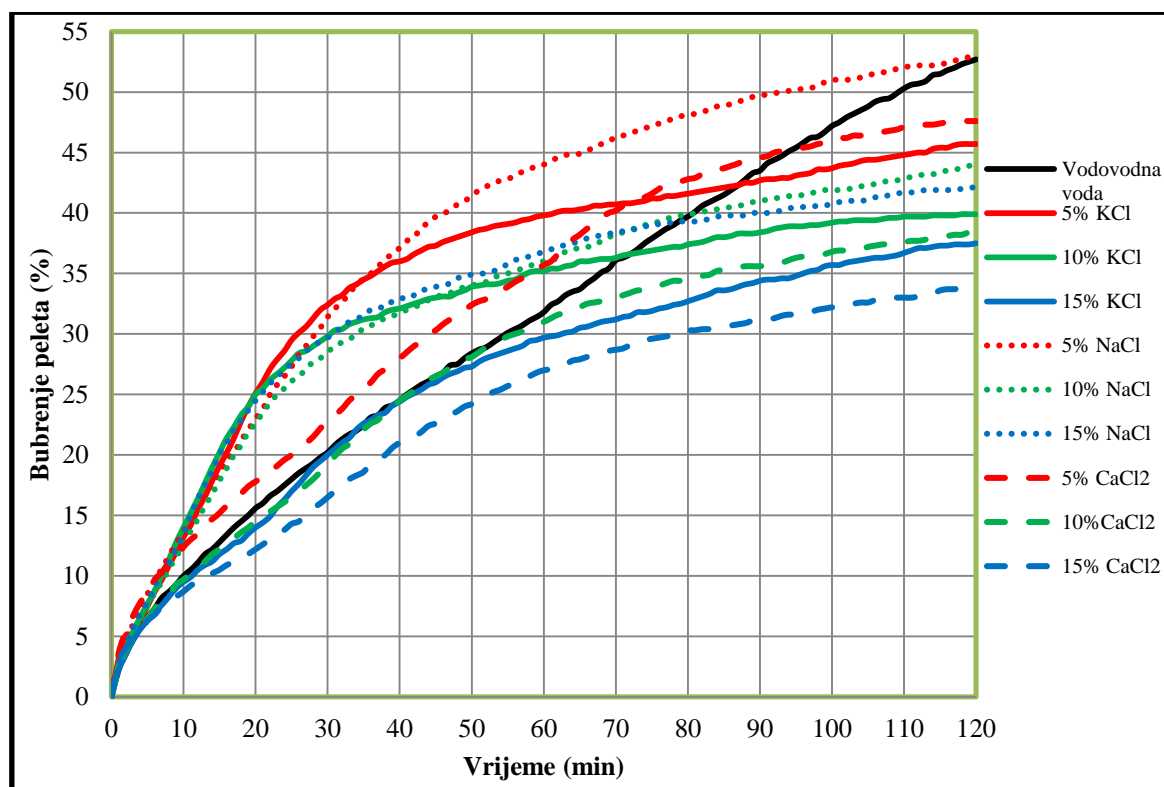


Slika 3-30. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 0Q60M40K

Najveći udjel vode nakon bubrenja od 47,45% izmjeren je kod peleta koji je bubrio u vodovodnoj vodi što se slaže i s maksimalnim bubrenjem izmjerenim nakon 24 sata. Kod bubrenja peleta u vodenim otopinama soli zabilježeno je da s povećanje koncentracije soli dolazi do smanjenja udjela vode u peletu 0Q60M40K nakon bubrenja. Tako se kod peleta koji su bubrili u otopinama s 5% soli udjel vode nalazio u rasponu od 34,78 do 36,42%, dok se kod otopina s 10% soli ta vrijednost nalazila u rasponu od 30,32 do 32,05%. Najmanja vrijednost zabilježena je kod otopina s 15% soli te se nalazila u rasponu od 27,63 do 29,87%. Od navedenih vrijednost udjela vode najmanje su izmjerene kod otopine KCl-a, a najviše kod otopine NaCl-a. Ukoliko se želi dobiti podatak o stvarnom udjelu vode koji je dobiven bubrenjem potrebno je navedene vrijednosti umanjiti za početni udjel vode u peletu prije komprimiranja, odnosno za 10,48%.

3.4.2.3. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K u vodenim otopinama soli

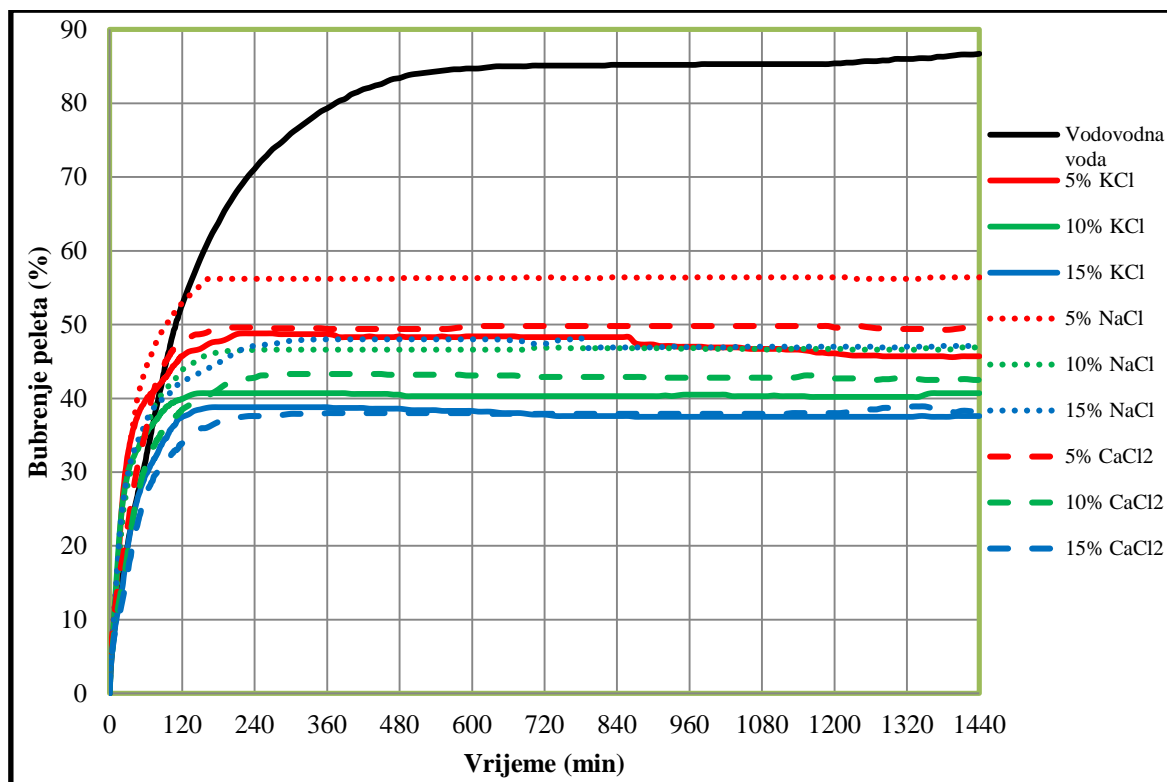
Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K u različitim fluidima prikazani su na slikama 3-31, 3-32 i 3-33.



Slika 3-31. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

Podaci o bubrenju peleta u početnih 120 minuta prikazani su na slici 3-31. Iz slike je vidljivo da sve otopine osim otopina CaCl_2 i 15% KCl uzrokuju veći prirast bubrenja u prvih trideset minuta ispitivanja u odnosu na bubrenje peleta u vodovodnoj vodi. Unatoč početnom preklapanju pojedinih krivulja različitih koncentracija iste soli, nakon 120 minuta jasno je vidljiv utjecaj koncentracije pojedine soli na bubrenje peleta. U početnih 120 minuta najveće bubrenje od 53% zabilježeno je u otopini 5% NaCl -a. To je neznatno više od bubrenja peleta ostvarenog u vodovodnoj vodi koje iznosi 52,7%. Najmanja vrijednost od 33,9% dobivena je bubrenjem peleta 0Q40M60K u vodenoj otopini 15% CaCl_2 .

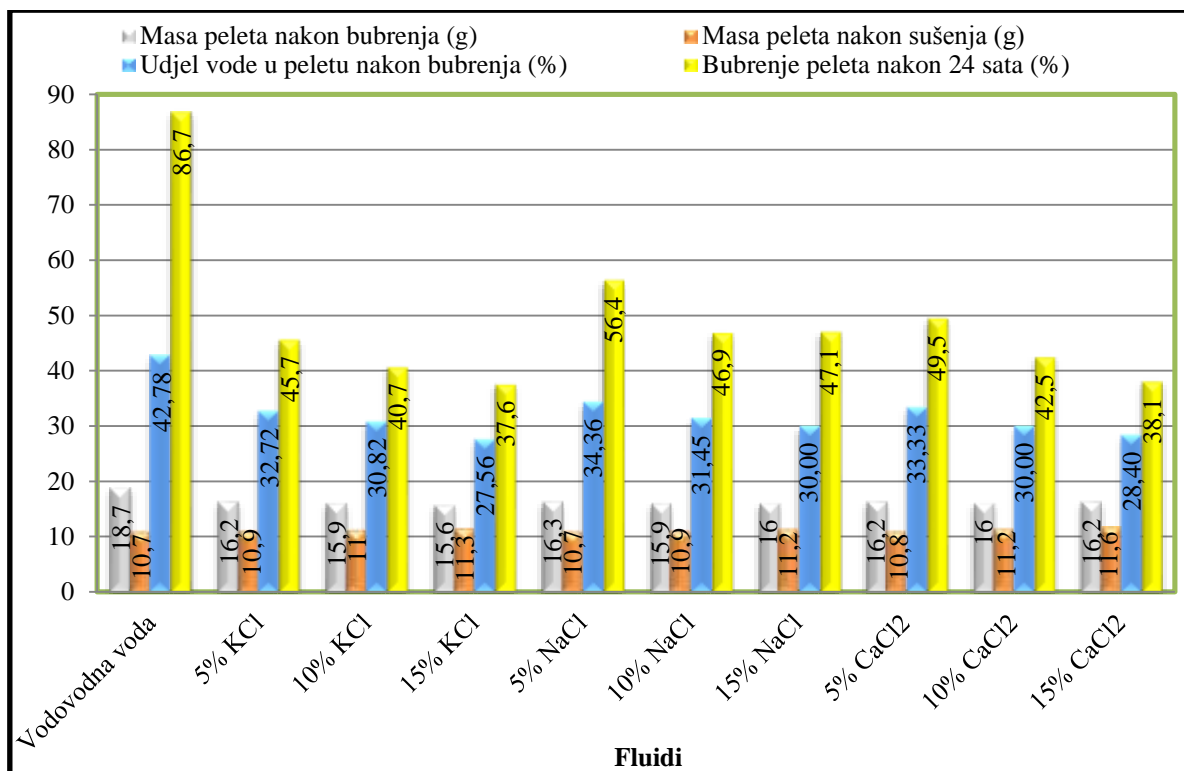
Slika 3-32 prikazuje bubrenje peleta 0Q40M60K kroz 24-satno ispitivanje.



Slika 3-32. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Maksimalna vrijednost ukupnog bubrenja peleta 0Q40M60K nakon 24 sata, od 86,7% postignuta je bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi, te je ona postignuta nakon približno 720 minuta ispitivanja. Sve ispitivane vodene otopine soli uzrokuju smanjenje bubrenja peleta u odnosu na bubrenje peleta izmjereno u vodovodnoj vodi, a ukupno bubrenje ovisi o tipu i koncentraciji soli. Maksimalne vrijednosti ukupnog bubrenja peleta u otopinama soli ostvarene su u vremenu od 150 do 360 minute od početka ispitivanja. Kod otopina s 5%-tnim udjelom soli najmanje bubrenje od 45,7% zabilježeno je u otopini KCl-a, dok je najveće od 56,4% zabilježeno u otopini NaCl-a. Kod 10%-tnih otopina soli bubrenje se nalazilo u rasponu od 40,7 do 46,9%, dok se kod otopina s 15% soli ta vrijednost nalazila u rasponu od 37,6 do 47,1 %. I kod viših koncentracija soli najbolji rezultati u smanjenju bubrenja peleta postignuti su u vodenoj otopini KCl-a, a najslabiji u vodenoj otopini NaCl-a.

Udjel vode u peletu nakon 24-satnog bubrenja od 42,78% ostvaren je kod bubrenja peleta u vodovodnoj vodi, što ujedno i predstavlja maksimalni udjel vode dobiven bubrenjem peleta 0Q40M60K (slika 3-33).

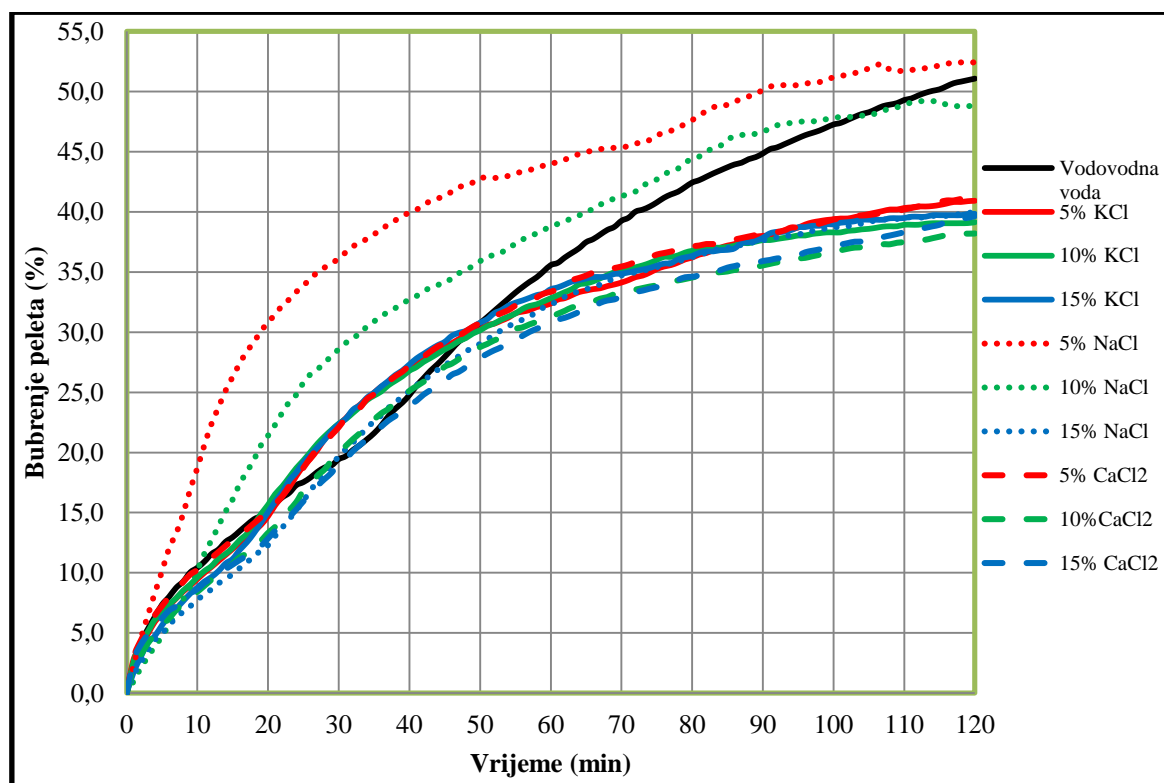


Slika 3-33. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 0Q40M60K

Iz slike 3-33 vidljivo je kako su kod peleta koji su bubrili u različitim otopinama soli izmjereni manji udjeli vode u usporedbi s peletom koji je bubrio u vodovodnoj vodi. Povećanje koncentracije pojedine soli pozitivno utječe na smanjenje kako bubrenja tako i udjela vode u peletu nakon bubrenja. Najmanji udjeli vode za pojedine koncentracije soli izmjereni su u otopinama KCl-a, dok su najveće vrijednosti ostvarene u različitim otopinama NaCl-a, što se u potpunosti slaže s izmjerenim ukupnim bubrenjem. Kako bi se dobio stvarni udjel vode dobiven bubrenjem potrebno je vrijednosti navedene na slici 3-33 umanjiti za vrijednost početnog udjela vode u peletu prije komprimiranja i bubrenja koji iznosi 8,06%.

3.4.2.4. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K u vodenim otopinama soli

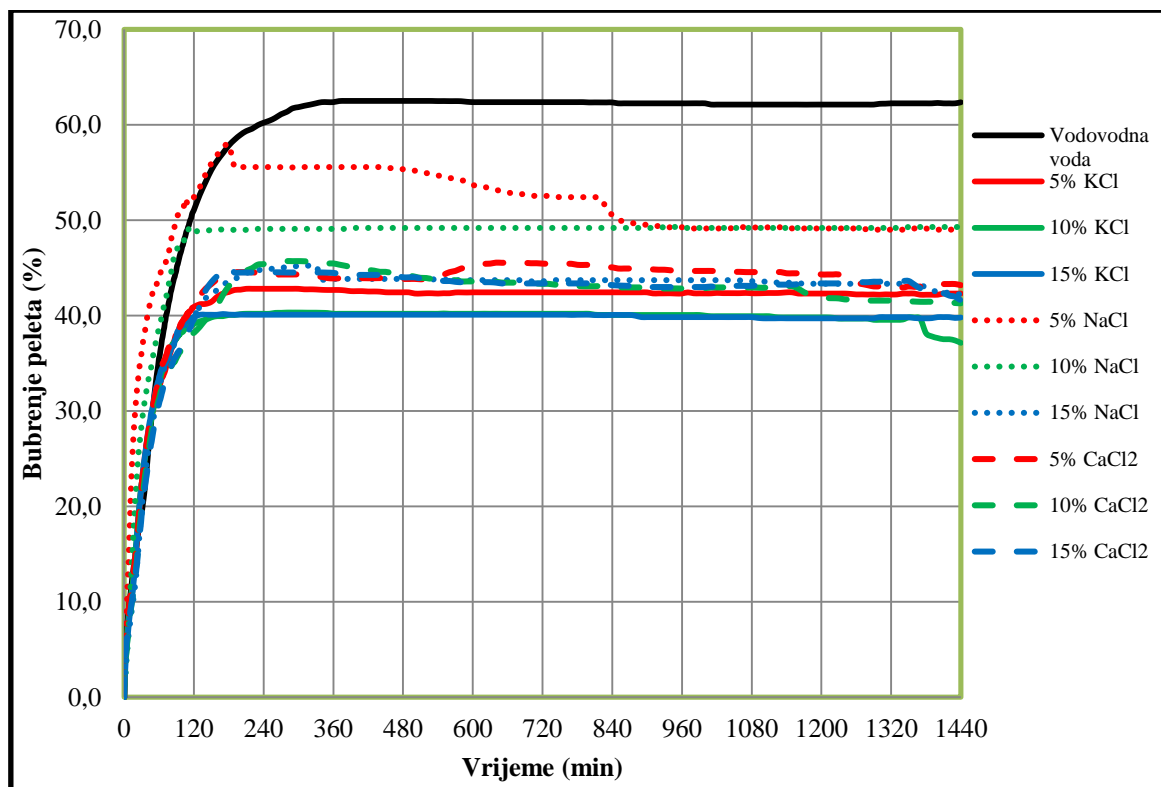
Podaci o bubrenju peleta 0Q20M80K u različitim vodenim otopinama soli i vodovodnoj vodi prikazani su na slikama 3-34, 3-35 i 3-36.



Slika 3-34. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

U prvih pedeset minuta ispitivanja gotovo u svim vodenim otopinama soli (osim otopina 5% NaCl-a i 10% NaCl-a) intenzitet bubrenja peleta s vremenom jednak je onom postignutom bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi (slika 3-34). U nastavku ispitivanja vidljiv je utjecaj soli prisutnih u vodenim otopinama, odnosno dolazi do smanjenja intenziteta bubrenja u odnosu na intenzitet bubrenja peleta u vodovodnoj vodi. Nakon početnih 120 minuta ispitivanja bubrenja peleta 0Q20M80K u vodenim otopinama različitih soli ne postoji vidljiv utjecaj povećanja koncentracije soli na izmjereno bubrenje (odstupanje je vidljivo samo kod već spomenutih vodenih otopina 5% i 10% NaCl-a). U svim ispitivanim otopinama soli (osim otopina 5% NaCl-a i 10% NaCl-a) postignuto je bubrenje od 38,2 do 41,2%.

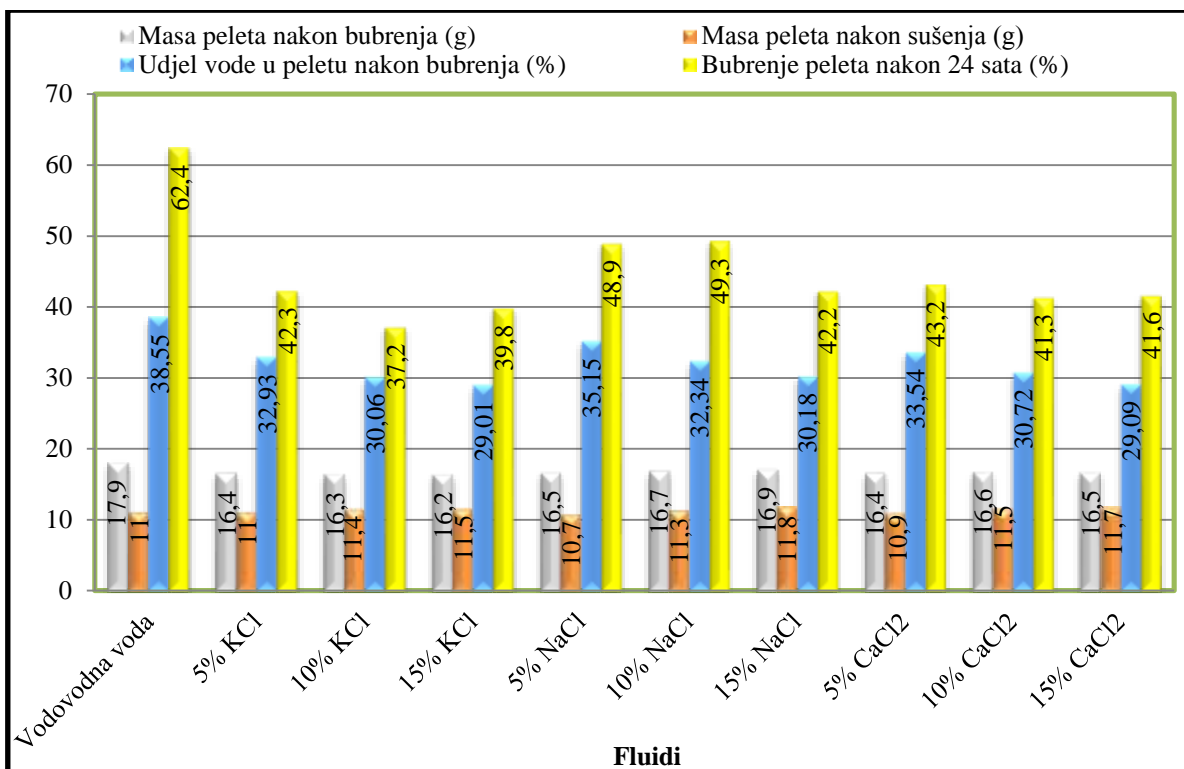
Bubrenje peleta 0Q20M80K u vodenim otopinama različitih soli i vodovodnoj vodi kroz 24-satno ispitivanje prikazano je na slici 3-35.



Slika 3-35. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Kao što je i očekivano najveće bubrenje zabilježeno je kod bubrenja peleta u vodovodnoj vodi te iznosi 62,4%. Maksimalno bubrenje peleta 0Q20M80K u vodovodnoj vodi (62,4%) ostvareno je već nakon 360 minuta ispitivanja, dok su maksimalne vrijednosti bubrenja za pojedine otopine soli postignute do 240 minute ispitivanja. Iako većina peleta nakon navedenog vremena zadržava postignutu vrijednost bubrenja (konstantna debljina peleta) kod određenih otopina poput 5%-tne otopine NaCl-a dolazi do smanjenja bubrenja, odnosno smanjenja debljine peleta. Ovakvo ponašanje peleta može se pripisati intenzivnom bubrenju te maloj čvrstoći nabubrenog peleta. Nakon ispitivanja bubrenja, pelet 0Q20M80K je prilično mekan kod rezanja osobito nakon bubrenja u vodenim otopinama s manjom koncentracijom soli. Uslijed mekanosti nabubrenog peleta i mase utega, vjerojatno dolazi do tonjenja mrežice i stalka za prijenos vertikalnog pomaka u pelet. Usporedbom podataka prikazanih na slici može se zaključiti kako su najbolji rezultati u smanjenju bubrenja peleta postignuti u vodenim otopinama KCl-a, dok su najslabiji rezultati postignuti u vodenim otopinama NaCl-a.

Iz slike 3-36 vidljivo je da je najveći udjel vode nakon bubrenja izmjeren u peletu koji je bubrio u vodovodnoj vodi te on iznosi 38,55%, a što je u skladu i s maksimalnom vrijednošću bubrenja peleta 0Q20M80K.

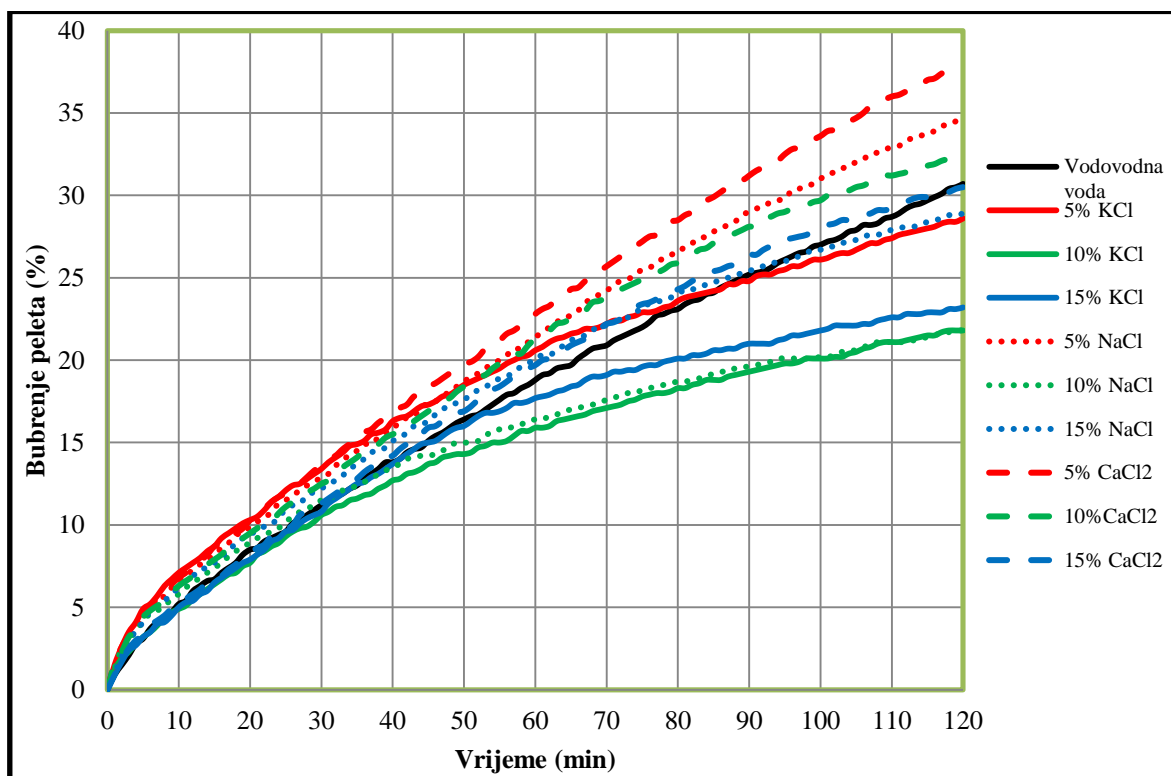


Slika 3-36. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 0Q20M80K

Ukoliko se usporede otopine jednake koncentracije, ali različitih tipova soli, može se zaključiti kako je u pravilu najveći udjel vode zabilježen kod 5%-tnih otopina soli pri čemu je minimalna vrijednost od 32,93% zabilježena u otopini 5% KCl-a, a maksimalna (35,15%) u otopini 5% NaCl-a. Kod 10%-tnih vodenih otopina soli udjeli vode su se nalazili u rasponu od 30,06 do 32,34% dok se kod 15%-tnih otopina soli ta vrijednost nalazila u granicama od 29,01 do 30,18%. Masa peleta nakon sušenja povećava se s povećanjem koncentracije pojedine soli, dok masa peleta nakon bubrenja pokazuje različite trendove ovisno o vrsti soli u otopini. Tako se masa peleta nakon bubrenja smanjuje s povećanjem koncentracije KCl-a, povećava s porastom koncentracije NaCl-a, dok u slučaju povećanja koncentracije CaCl₂ masa peleta nakon bubrenja varira. Ukoliko se želi dobiti stvarni udjel vode dobiven bubrenjem potrebno je navedene vrijednosti umanjiti za 4,88%, odnosno za udjel vode koji je sadržavao pelet prije bubrenja.

3.4.2.5. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K u vodenim otopinama soli

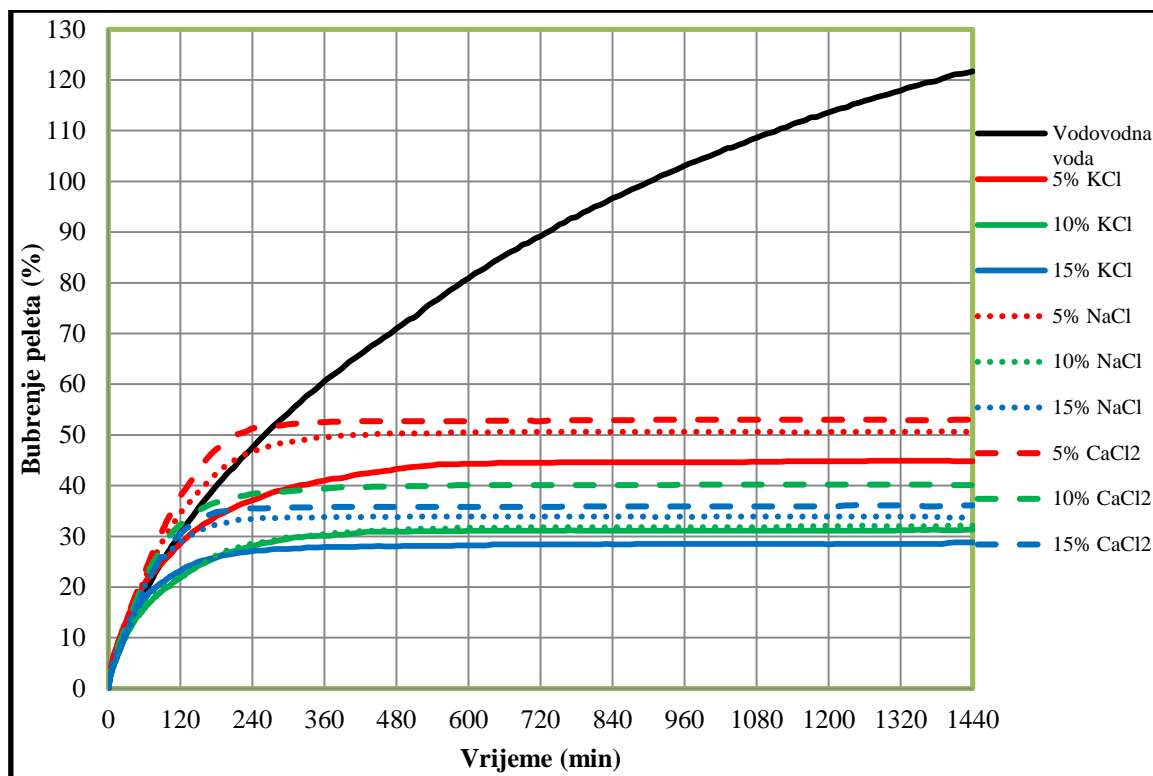
Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K prikazani su na slikama 3-37 i 3-38, dok su na slici 3-39 prikazani podaci o udjelu vode, te masi peleta nakon bubrenja i sušenja u sušioniku kroz 24 sata.



Slika 3-37. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

U prvih trideset minuta ispitivanja uočen je isti trend bubrenja peleta u različitim otopinama soli i u vodovodnoj vodi (slika 3-37). U nastavku ispitivanja dolazi do izražaja vrsta i koncentracija soli u otopinama. U početnom periodu, odnosno 120 minuta nakon početka ispitivanja, najveće bubrenje peleta od 38% zabilježeno je u otopini 5% CaCl₂, dok je najmanja vrijednost (21,8%) zabilježena za pelet koji je bubrio u otopinama 10% KCl-a i 10% NaCl-a.

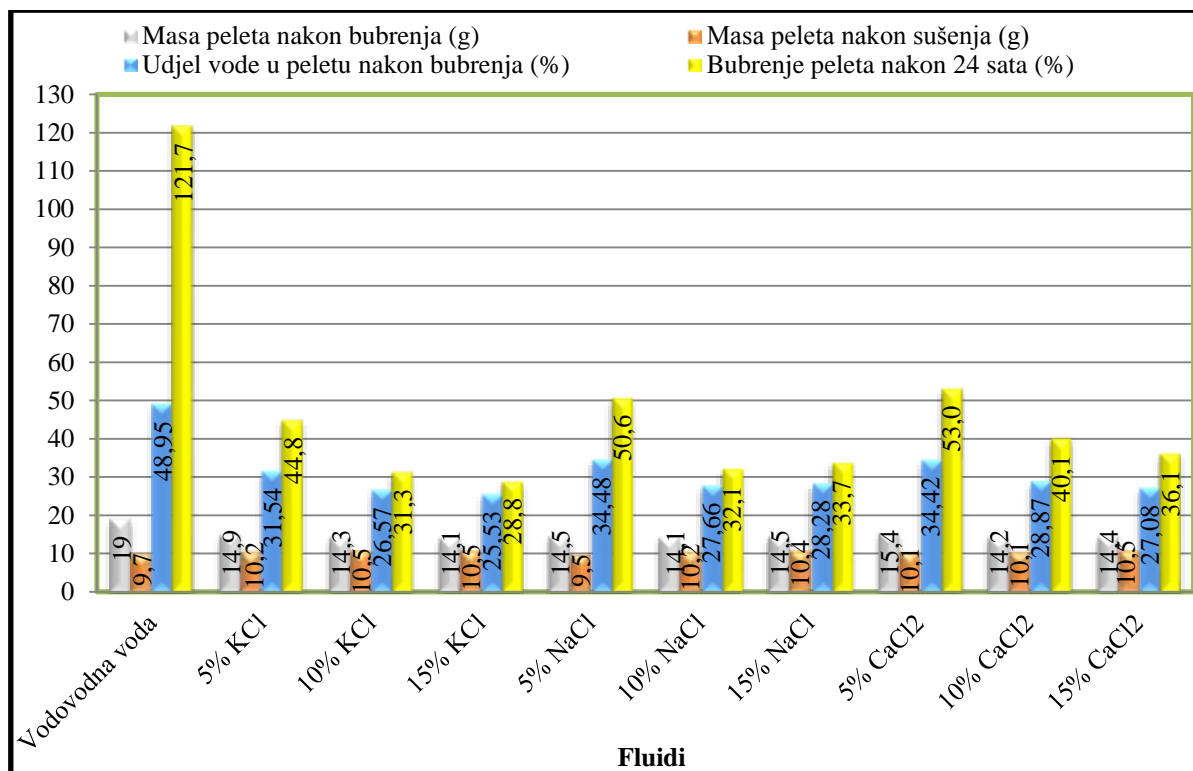
Bubrenje peleta 10Q80M10K tijekom 24 satnog ispitivanja prikazano je na slici 3-38.



Slika 3-38. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Opet je najviše bubrio pelet u vodovodnoj vodi uslijed čega je došlo do povećanja njegove debljine za približno 1,22 puta. U svim ispitivanim otopinama soli zabilježeno je manje bubrenje peleta nego u vodovodnoj vodi, a maksimalne vrijednosti bubrenja u pojedinim otopinama soli postignute su u vremenu od približno 360 do 600 minuta od početka ispitivanja. Ukoliko se usporede podaci bubrenja za pojedine koncentracije soli može se zaključiti da se ukupno bubrenje peleta 10Q80M10K u 5%-tnim otopinama soli nalazi u rasponu od 44,8 do 53% (najmanja vrijednost zabilježena je u otopini 5% KCl-a), dok se ukupno izmjereno bubrenje u 10%-tnim otopinama soli nalazi u rasponu od 31,3 do 40,1% (najmanja vrijednost zabilježena je u otopini 10% KCl-a). Najmanja bubrenja peleta 10Q80M10K ostvarena su u 15%-tnim otopinama soli te se ona nalaze u rasponu od 28,8 do 36,1%, pri čemu je najmanja vrijednost također zabilježena u otopini KCl-a. U pravilu s povećanjem koncentracije soli u otopini dolazi do smanjenja ukupnog bubrenja.

Podaci o udjelu vode u peletu 10Q80M10 nakon bubrenja prikazani su na slici 3-39, pri čemu je vidljivo da je najveći udjel vode postignut bubrenjem peleta 10Q80M10K u vodovodnoj vodi te on iznosi 48,95%.

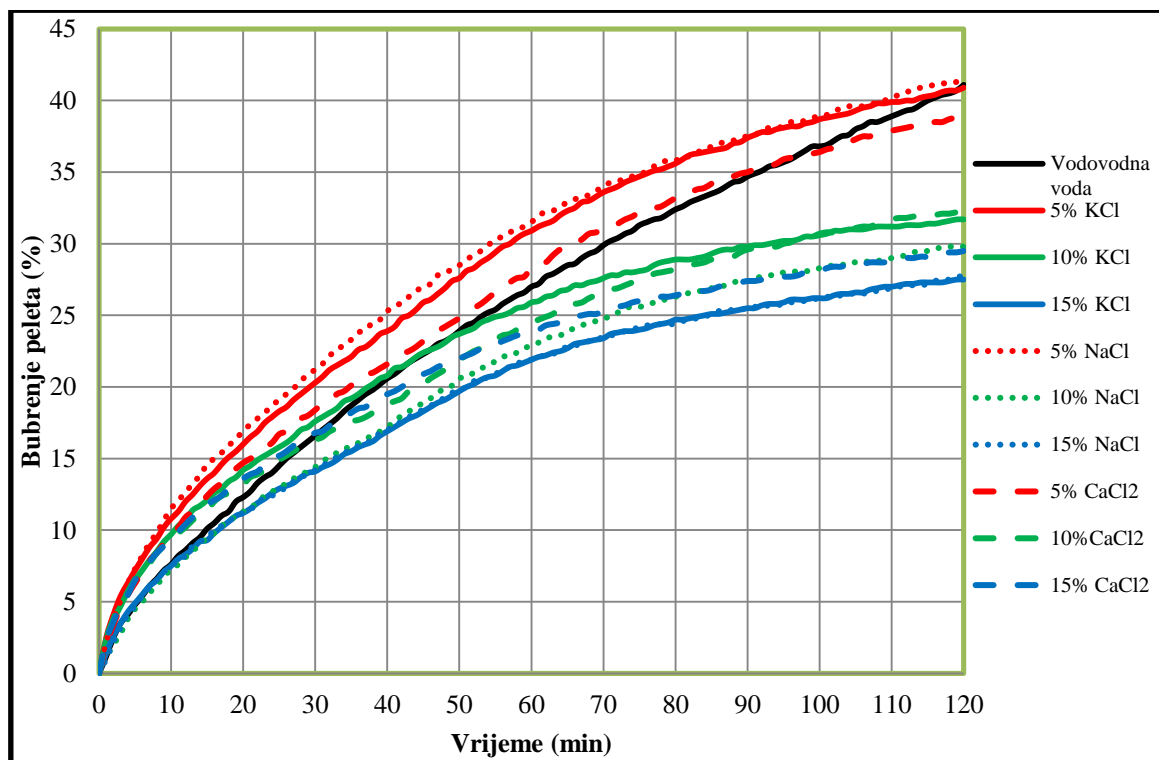


Slika 3-39. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 10Q80M10K

Prilikom razmatranja navedene vrijednosti, kao i razmatranja udjela vode u peletima koji su bubrili u različitim vodenim otopinama soli potrebno je uzeti u obzir da je pelet prije bubrenja sadržavao 12,9 mas. % vode. Udjeli vode u peletima koji su bubrili u različitim otopinama soli niži su od udjela vode u peletu koji je bubrio u vodovodnoj vodi, s tendencijom smanjenja udjela vode s povećanjem koncentracije soli. Usporedbom vrijednosti udjela vode u peletima koji su bubrili u otopinama različitih soli pri jednakoj koncentraciji, može se zaključiti kako su najmanje vrijednosti postignute u vodenim otopinama KCl-a, što se dobro slaže s podacima o ukupnom bubrenju peleta. Kod svih peleta vidljivo je povećanje mase peleta nakon sušenja s povećanjem koncentracije soli u vodenoj otopini u kojoj je pelet bubrio.

3.4.2.6. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K u vodenim otopinama soli

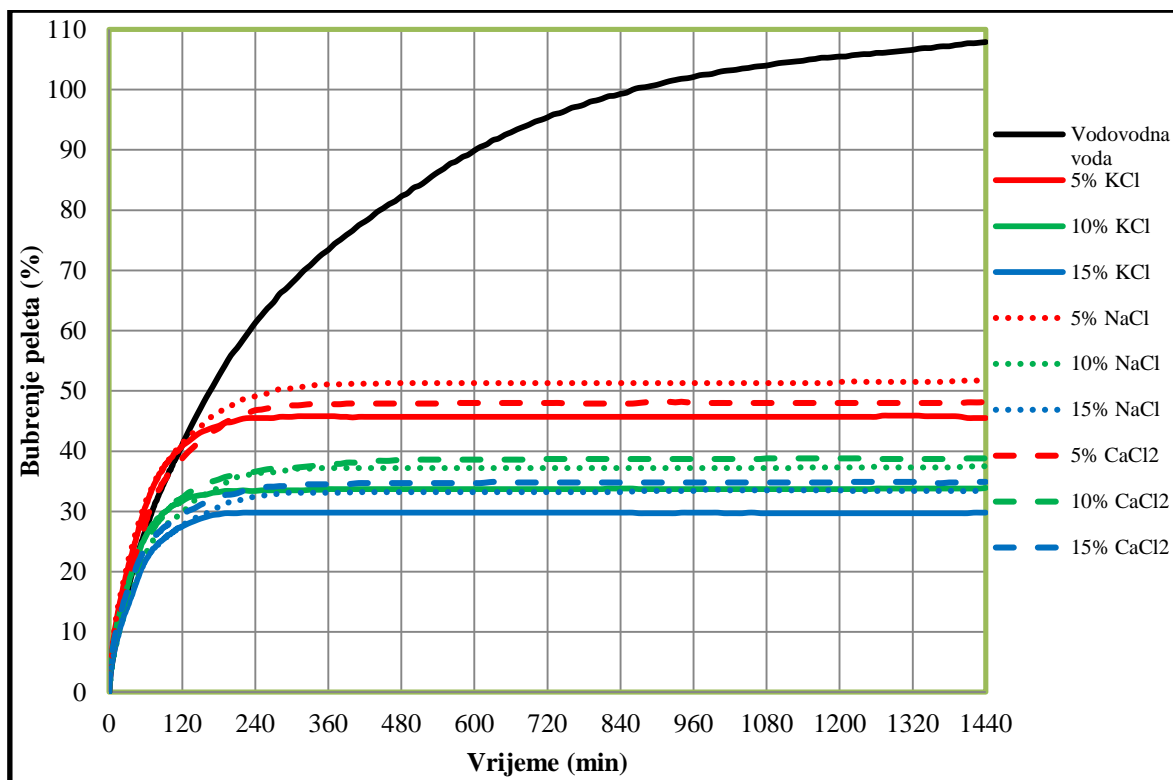
Podaci o bubrenju peleta 10Q60M30K u početnom periodu kao i nakon 24-satnog ispitivanja prikazani su na slikama 3-40 i 3-41.



Slika 3-40. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

U samom početku ispitivanja (prvih 10 do 40 minuta) dolazi do izdvajanja krivulja koje predstavljaju 5%-tne otopine soli, koje pokazuju veći intenzitet bubrenja u odnosu na bubrenje ostvareno u vodovodnoj vodi. Iako u početku ispitivanja dolazi do oscilacija u izmjerenom bubrenju, već nakon početnih dva sata jasno je vidljiv utjecaj koncentracije pojedine vrste soli na bubrenje, odnosno dolazi do smanjenja bubrenja s povećanjem koncentracije soli. Najveće bubrenje peleta 10Q60M30K od 41,4% izmjereno je u vodenoj otopini 5% NaCl-a, dok je najmanje 27,5% izmjereno u otopini 15% KCl-a.

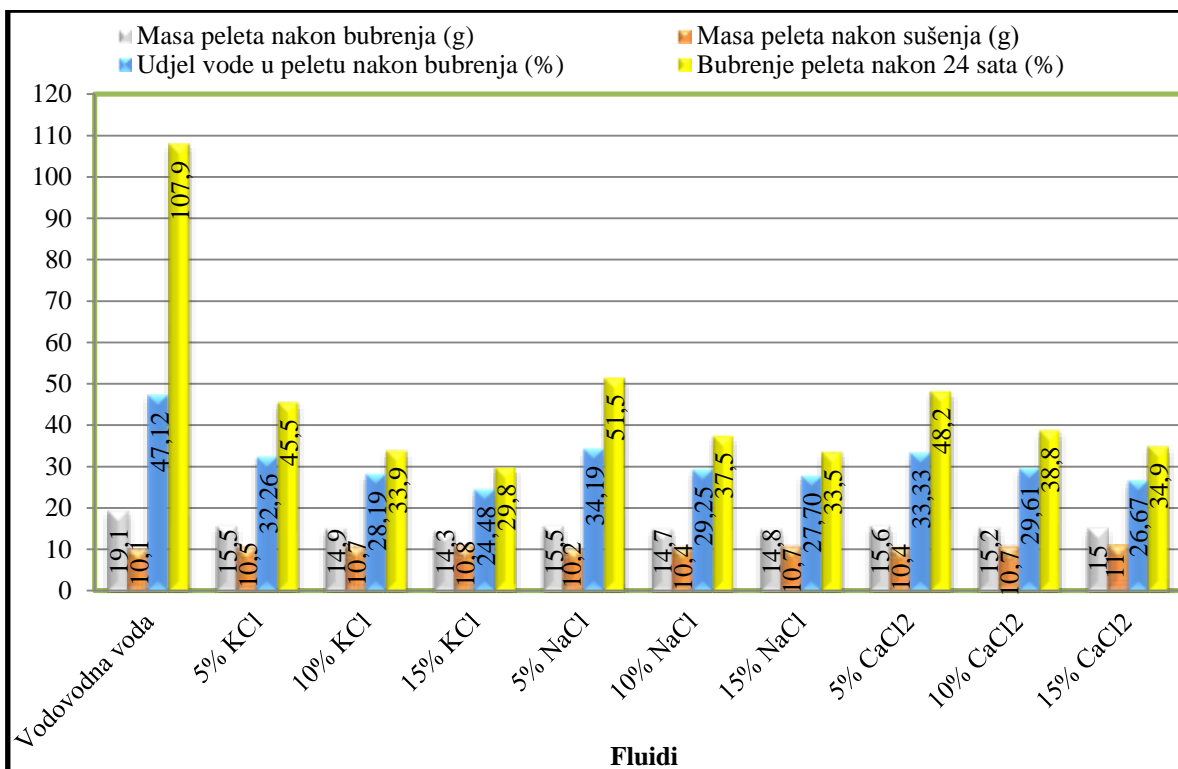
Na slici 3-41 jasno je vidljivo da je najveća vrijednost ukupnog bubrenja nakon 24 sata ostvarena bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi, pri čemu je zabilježeno povećanje debljine peleta od približno 1,08 puta.



Slika 3-41. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Važno je istaknuti kako unatoč smanjenju intenziteta bubrenja peleta u vodovodnoj vodi, unutar 24 sata nije ostvareno maksimalno moguće bubrenje peleta, te postoji trend daljnjeg povećanja. Sve ispitivane otopine soli daju manje vrijednosti bubrenja nakon 24 sata u odnosu na vrijednost dobivenu bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi, te je vidljivo kako povećanje koncentracije soli u otopini uzrokuje smanjenje ukupnog bubrenja izmjenog nakon 24 sata ispitivanja. Maksimalne vrijednosti bubrenja u svim otopinama soli postignute su u periodu od 200 do 520 minuta. Kod 5%-tnih otopina soli bubrenje peleta se nalazi u rasponu od 45,5 do 51,5%, kod 10%-tnih u rasponu od 33,9 do 38,8% dok su kod bubrenja peleta u 15%-tnim otopinama te vrijednosti najniže te se nalaze u rasponu od 29,8 do 34,9%. Najmanje vrijednosti bubrenja peleta za sve koncentracije soli u otopinama postignute su u vodenim otopinama koje sadrže KCl.

U skladu s maksimalnim bubrenjem peleta i maksimalni udjel vode nakon bubrenja (47,12%) izmjeren je u peletu koji je bubrio u vodovodnoj vodi.

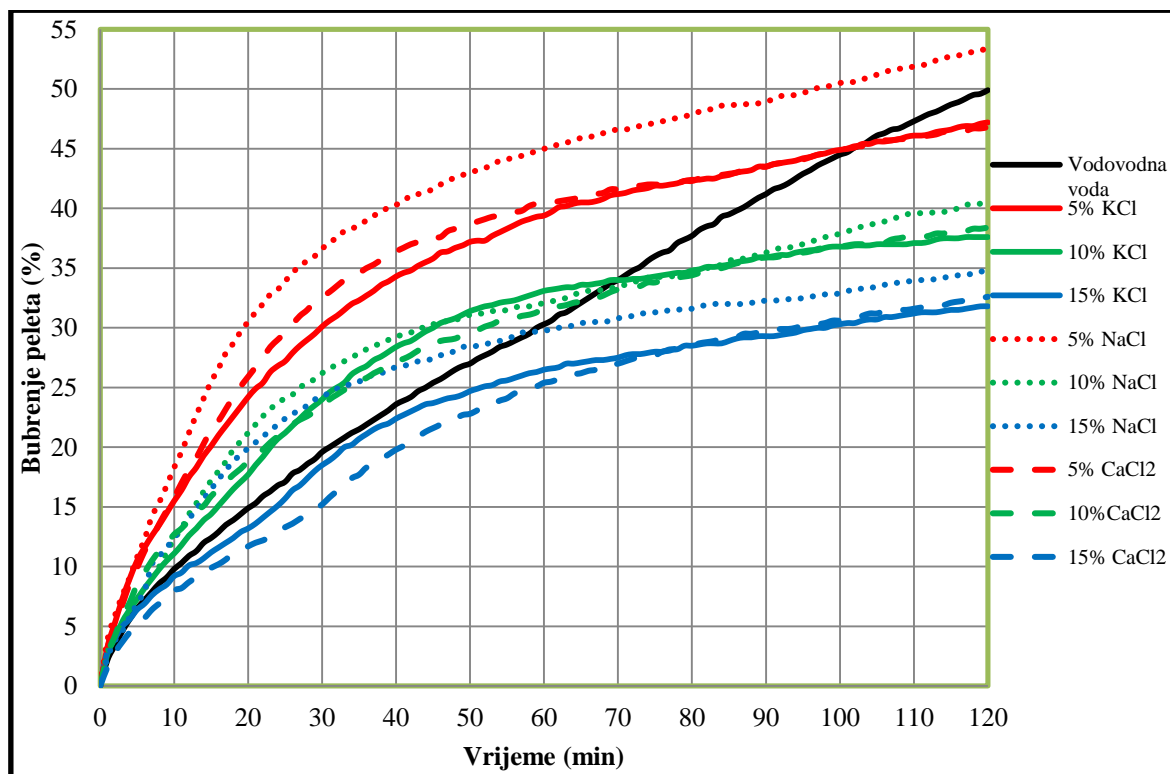


Slika 3-42. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 10Q60M30K

Kod peleta koji su bubrili u otopinama soli izmjereni su manji udjeli vode, pri čemu su najmanje vrijednosti uspoređujući jednake koncentracije različitih vrsta soli, zabilježene kod otopina koje sadrže KCl (slika 3-42). Usporedbom dobivenih podataka o udjelu vode u peletu nakon bubrenja za svaku ispitivanu sol posebno, može se zaključiti da povećanje koncentracije soli uzrokuje smanjenje udjela vode u peletu nakon bubrenja, što se poklapa s podacima o bubrenju peleta. Prilikom razmatranja udjela vode u peletu nakon bubrenja, važno je napomenuti da je udjel vode dobiven bubrenjem peleta manji od ukupnog izmjerenog udjela vode jer je uzorak prije komprimiranja i bubrenja sadržavao 10,57% vode. U pravilu, s povećanjem koncentracije soli dolazi do smanjenja mase peleta nakon bubrenja te povećanja izmjerene mase peleta nakon sušenja. Ukupni udjeli vode u peletima za 5%-tne otopine soli nalaze se u rasponu od 32,26 do 34,19%, za 10%-tne vodene otopine soli od 28,19 do 29,61% dok su kod 15%-tnih otopina te vrijednosti najniže i nalaze se u rasponu od 24,48 do 27,7%.

3.4.2.7. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K u vodenim otopinama soli

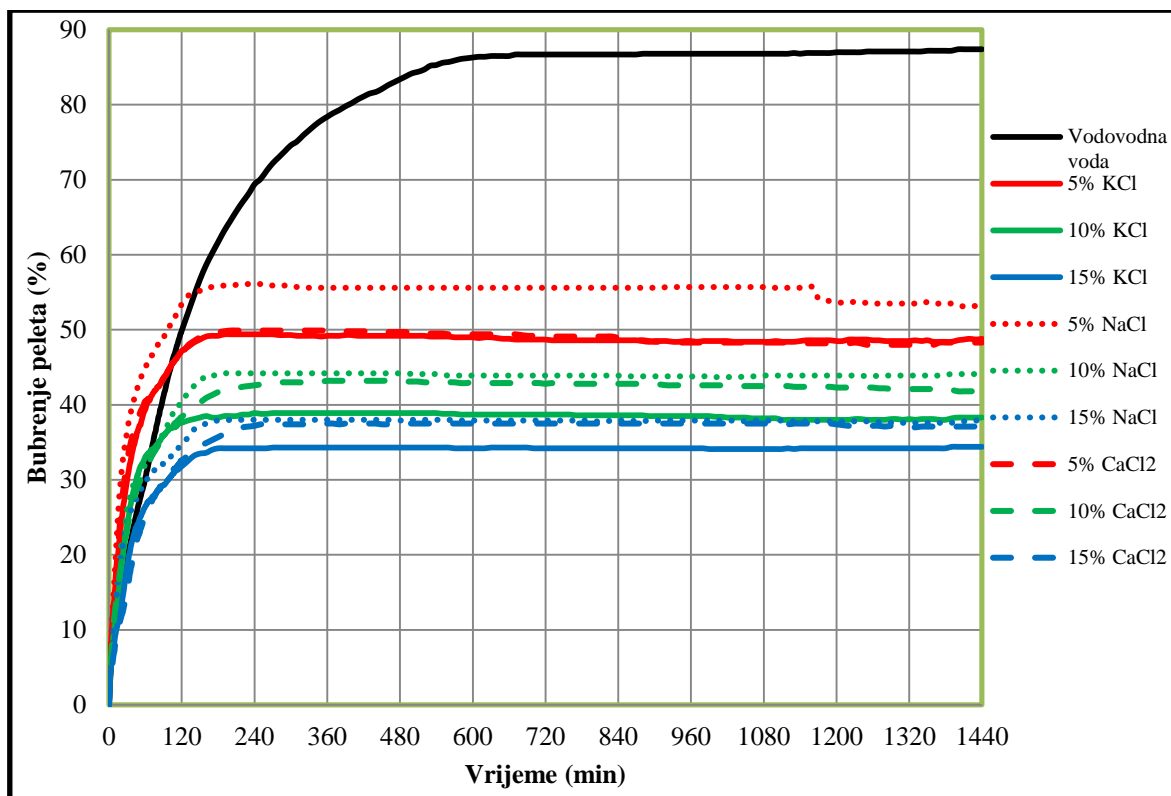
Podaci o bubrenju peleta 10Q40M50K u vodovodnoj vodi i otopinama različitih soli prikazani su na slikama 3-43 i 3-44.



Slika 3-43. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

U prvih šezdeset minuta ispitivanja vidljivo je kako gotovo sve 5%-tne i 10%-tne otopine soli daju veći intenzitet bubrenja peleta 10Q40M50K u odnosu na intenzitet bubrenja izmjeren u vodovodnoj vodi. Međutim već nakon prvih desetak minuta ispitivanja vidljiv je utjecaj povećanja koncentracije soli na smanjenje intenziteta bubrenja. U početnom periodu najveće bubrenje peleta od 53,5% izmjereno je u vodenoj otopini 5% NaCl-a (navedeno bubrenje veće je i od bubrenja izmjenog u vodovodnoj vodi koje iznosi 49,9%), dok je najmanja vrijednost od 31,8% izmjerena kod bubrenja peleta 10Q40M50K u otopini 15% KCl-a.

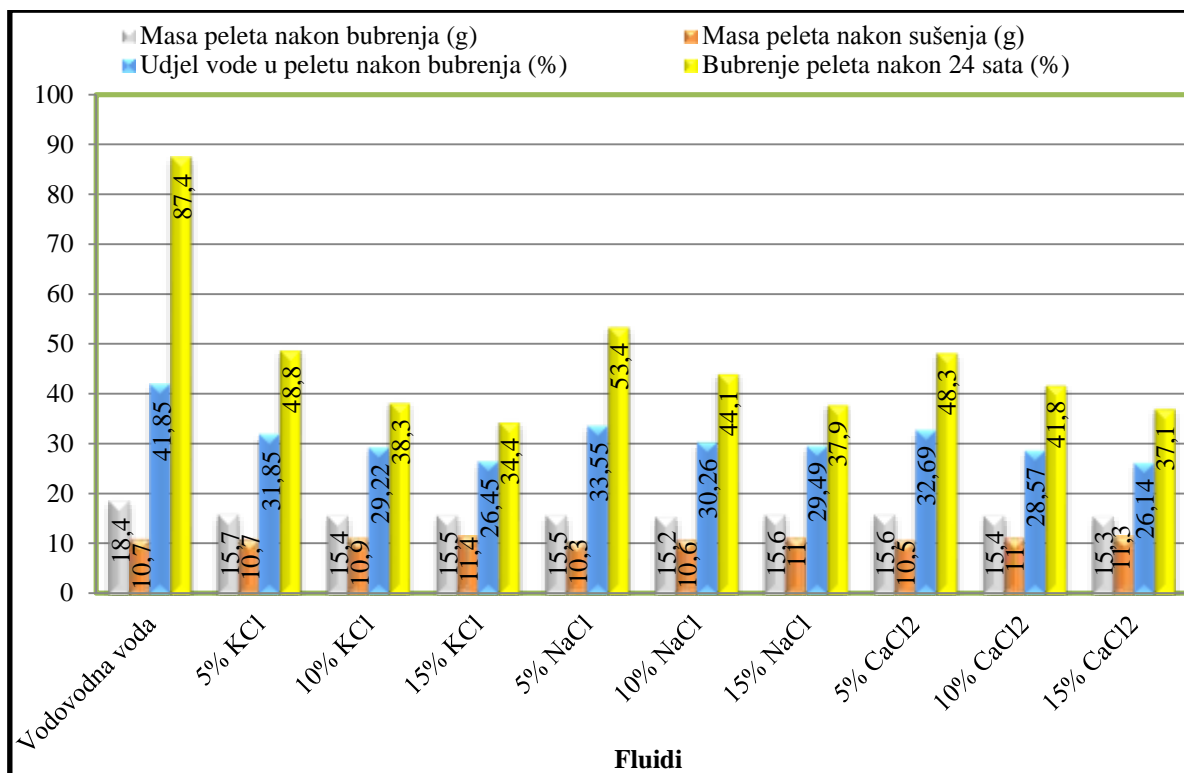
Maksimalno bubrenje peleta 10Q40M50K od 87,4% ostvareno je u vodovodnoj vodi, a navedena vrijednost postignuta je već nakon 680 minuta ispitivanja nakon čega nema značajnije promjene (slika 3-44).



Slika 3-44. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

U svim ispitivanim otopinama soli izmjereno je manje bubrenje peleta nego u vodovodnoj vodi. Izmjereno bubrenje peleta u 5%-tnoj otopini soli nalazi se u rasponu od 48,3 do 53,4%, u 10%-tnoj otopini ukupno bubrenje iznosi od 38,3 do 44,1%, dok su u 15%-tnim otopinama soli izmjerene vrijednosti bubrenja peleta od 34,4 do 37,9%. Maksimalne vrijednosti bubrenja peleta u svim otopinama soli postignute su u prvih 170 do 360 minuta ispitivanja. U pravilu, najmanje vrijednosti bubrenja peleta za pojedine koncentracije soli izmjerene su u otopinama KCl-a. Izuzetak od navedenog pravila predstavlja jedino otopina 5% CaCl₂ u kojoj je izmjereno nešto manje bubrenje peleta u donosu na vrijednost dobivenu u otopini 5% KCl-a. Na slici je vidljivo i određeno smanjenje bubrenja peleta u otopini 5% NaCl-a, što se može pripisati mekoći uzorka i tonjenju mrežice i stalka za prijenos vertikalnog pomaka u sami uzorak zbog mase utega.

Kao što je i za očekivati najveći udjel vode od 41,85% dobiven je bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi što se slaže s maksimalnom izmjerenom vrijednosti bubrenja peleta 10Q40M50K (slika 3-45).



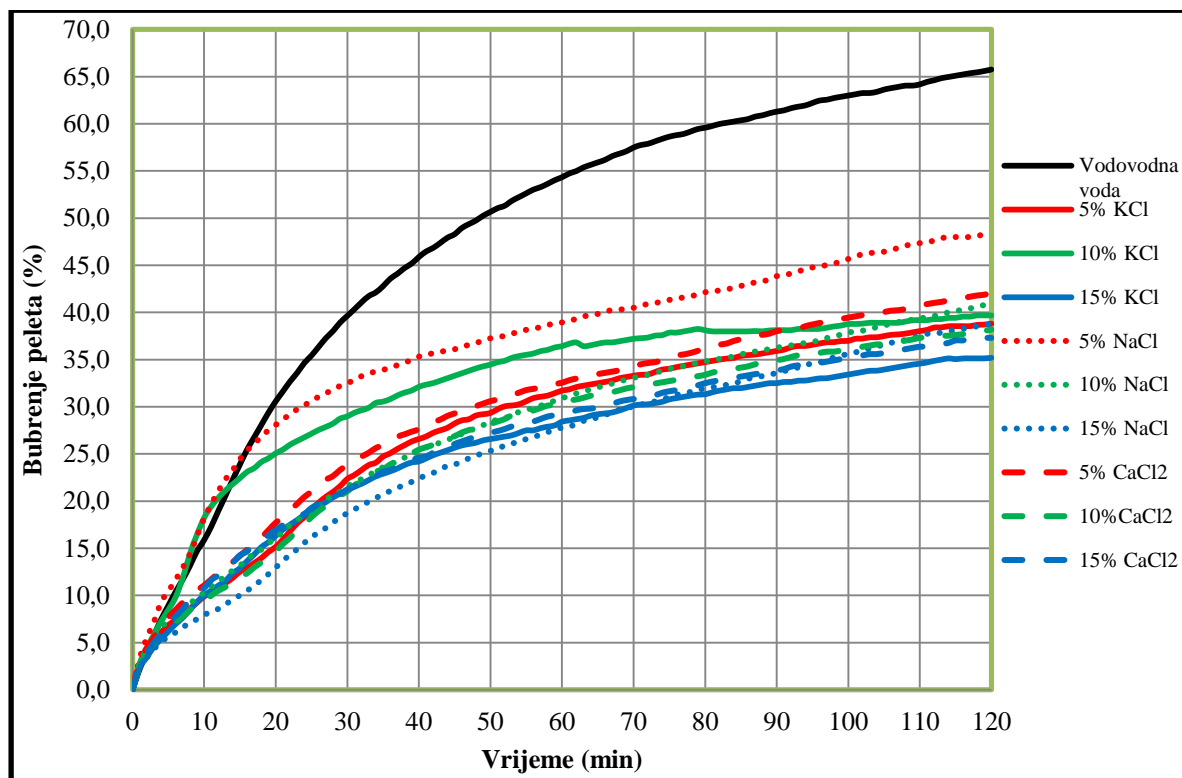
Slika 3-45. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 10Q40M50K

Bubrenjem peleta 10Q40M50K u vodenim otopinama soli dobiveni su manji udjeli vode u odnosu na udjel vode dobiven bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi, s tendencijom smanjenja udjela vode s povećavanjem koncentracije soli. Ovisno o koncentraciji soli u otopini navedeni udjeli vode nakon bubrenja nalazi se u rasponu od 31,85 do 33,55% za 5%-tne otopine, od 28,57 do 30,26% za 10%-tne otopine, dok su se vrijednosti udjela vode u peletu nakon bubrenja u 15%-tnoj otopini soli nalazile u rasponu od 26,14 do 29,49%. Najveće vrijednosti udjela vode u peletu za sve koncentracije soli zabilježene su u otopini NaCl-a. Početni udjel vode u uzorku prije bubrenja iznosio je 7,32 mas. %.

Iz slike 3-45 je također vidljivo da s povećanjem koncentracije soli dolazi do povećanja mase peleta nakon sušenja, dok se masa peleta nakon bubrenja smanjuje s povećanjem koncentracije soli (kao što je to slučaj s peletima koji su bubrili u otopinama CaCl₂) ili varira (kao što je to slučaj s peletima koji su bubrili u otopinama KCl-a i NaCl-a). Navedene oscilacije posljedica su otežanog istiskivanja peleta iz ispitne cijevi uređaja za mjerenje bubrenja.

3.4.2.8. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K u vodenim otopinama soli

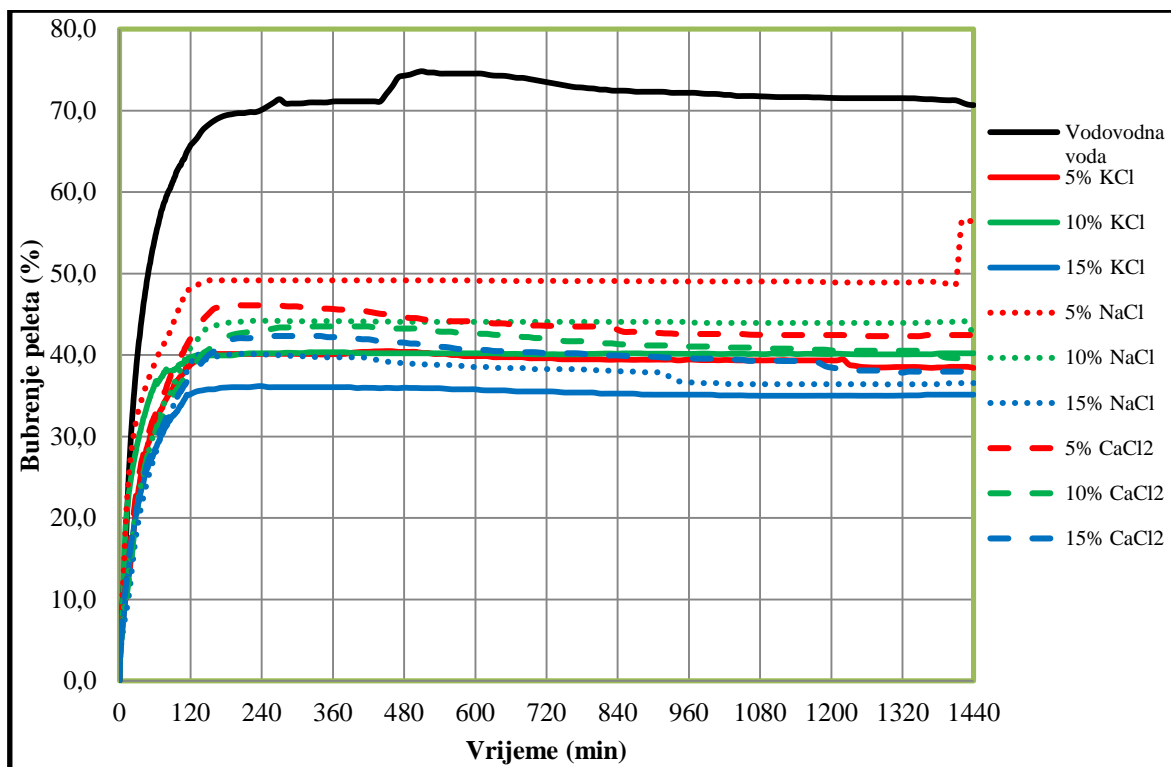
Bubrenje peleta 10Q20M70K u vodovodnoj vodi i otopinama soli prikazano je na slikama 3-46 i 3-47.



Slika 3-46. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

U početnom periodu (prvih 120 minuta ispitivanja) najveće bubrenje peleta od 65,7% izmjereno je u vodovodnoj vodi. Sve ispitivane otopine soli uzrokovale su smanjenje bubrenja u odnosu na bubrenje peleta u vodovodnoj vodi. Nakon 120 minuta bubrenja peleta 10Q20M70K u različitim otopinama soli može se zaključiti kako se izmjerene vrijednosti nalaze u vrlo uskom rasponu od 35,2 do 42,1% s izuzetkom bubrenja peleta u otopini 5% NaCl-a u kojoj je izmjereno bubrenje peleta od 48,4%. Iz slike 3-46 može se zaključiti kako ne postoji jasno vidljivi trend smanjenja bubrenja s povećanjem koncentracije soli u početnom periodu, a koji je bio vidljiv kod ostalih peleta s 10 mas. % kvarca.

Na slici 3-47 prikazani su rezultati mjerenja bubrenja peleta 10Q20M70K u različitim otopinama soli tijekom 24-satnog ispitivanja.



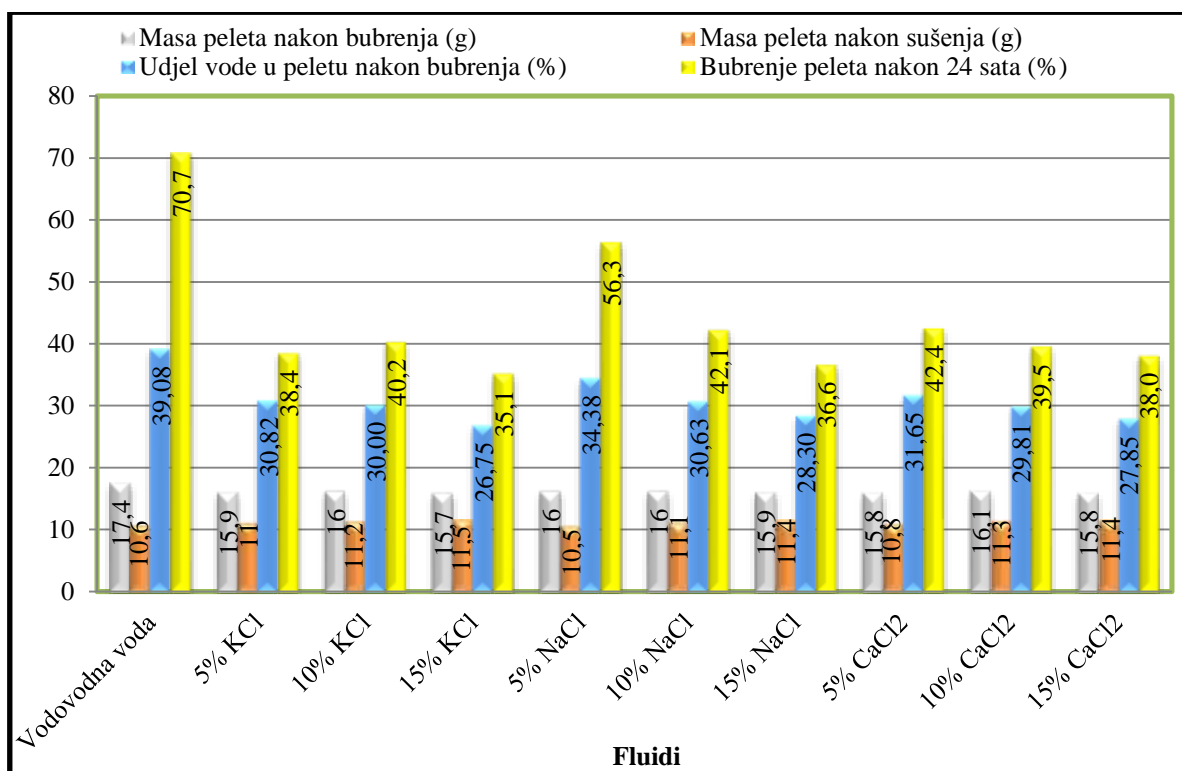
Slika 3-47. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Maksimalno bubrenje peleta tijekom 24 sata izmjereno je kod peleta koji je bubrio u vodovodnoj vodi. Pri tome je vidljivo da je maksimalno bubrenje od 70,7% ostvareno nakon približno 510 minuta ispitivanja, te kako je navedena vrijednost neznatno veća od vrijednosti ostvarene nakon 120 minuta (65,7%). Izmjerene vrijednosti bubrenja peleta u otopinama soli nakon 24 sata manje su od vrijednosti dobivenih bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi, s trendom smanjenja bubrenja s povećanjem koncentracije soli. Maksimalno bubrenje peleta u vodenim otopinama soli postignuto je već u periodu od 150 do 350 minuta od početka ispitivanja. Iz slike 3-47 može se zaključiti da je u 5%-tnim otopinama soli izmjereno bubrenje peleta od 38,4 do 56,3%, u 10%-tnim otopinama soli od 39,5 do 42,1%, dok su najmanje vrijednosti od 35,1 do 38%, izmjerene u 15%-tnim vodenim otopinama soli. Kod određenih fluida poput vodovodne vode ili otopina soli CaCl₂, zabilježeno je smanjenje maksimalnog bubrenja u kasnijem periodu ispitivanja.

Na slici 3-47 vidljiva je i oscilacija bubrenja u zadnjih dvadeset minuta ispitivanja kod bubrenja peleta 10Q20M70K u 5%-tnoj otopini NaCl-a. Ukoliko se promotri cjelokupni razvoj bubrenja peleta u navedenoj otopini soli može se zaključiti kako je već nakon 180 minuta bubrenje doseglo vrijednost od približno 49%, koja je održavana približno

konstantnom do pred kraj ispitivanja, kada dolazi do oscilacije koja je vjerojatno posljedica pogreške u radu instrumenta.

Izmjereni podaci o udjelu vode u peletu nakon bubrenja, te mase peleta nakon bubrenja i nakon sušenja prikazani su na slici 3-48.

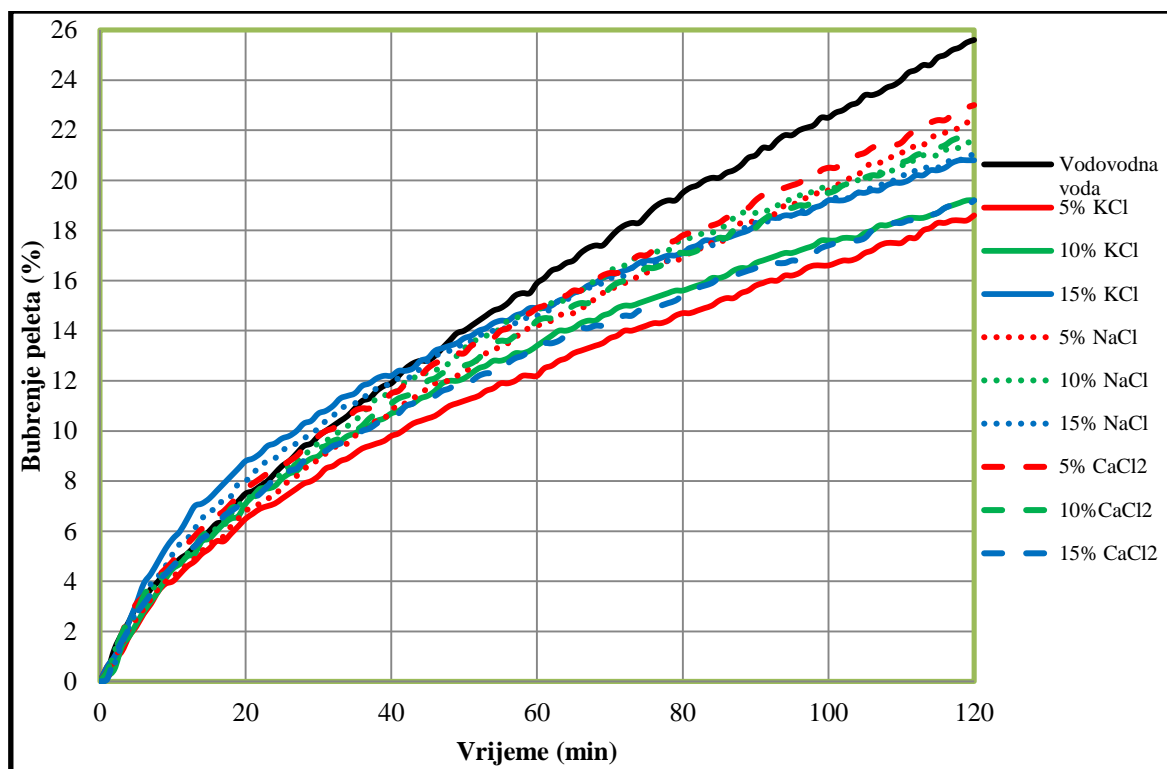


Slika 3-48. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 10Q20M70K

Sukladno očekivanju, ali i podacima prethodno analiziranih peleta, najveći udjel vode u peletu izmjeren je u peletu koji je bubrio u vodovodnoj vodi (39,08%). Izmjereni maksimalni udjel vode u skladu je s maksimalnim izmjerenim bubrenjem koje je također ostvareno u vodovodnoj vodi. Udjel vode u praškastom uzroku 10Q20M70K neposredno prije ispitivanja iznosio je 4,92%. Udjel vode u peletima koji su bubrili u 5%-tnim otopinama soli nalazi se u rasponu od 30,82 do 34,38%. Kod 10%-tnih otopina soli udjel vode u peletu nakon bubrenja nalazi se u rasponu od 29,81 do 30,63% , dok je kod 15%-tnih otopina ta vrijednost još niža i nalazi se u rasponu od 26,75 do 28,30%. Također se može zaključiti da povećanje koncentracije soli utječe na smanjenje udjela vode u peletu nakon bubrenja. Masa peleta nakon sušenja povećava se s povećanjem koncentracije soli u otopini.

3.4.2.9. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K u vodenim otopinama soli

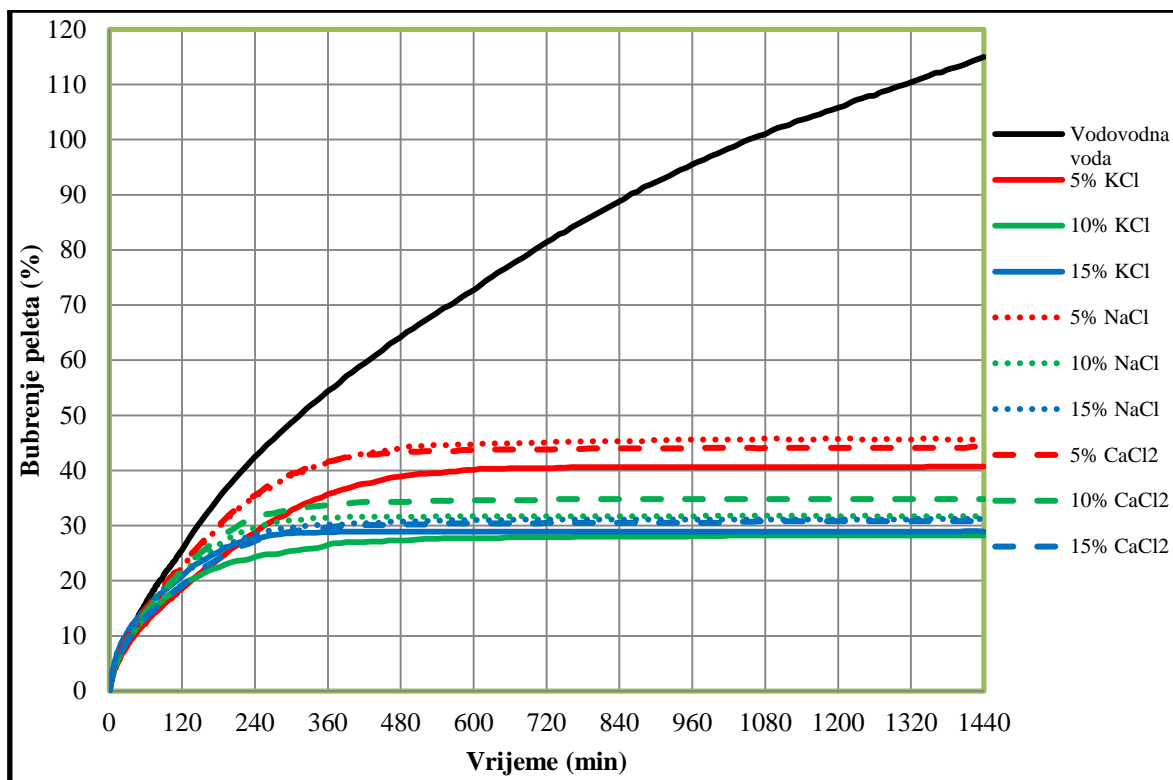
Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K prikazani su na slikama 3-49 i 3-50.



Slika 3-49. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

Na slici 3-49 prikazano je bubrenje peleta u prvih 120 minuta ispitivanja kada se i očekuju najveće promjene. U prvih dvadesetak minuta ispitivanja vidljiv je približno jednaki intenzitet bubrenja peleta u svim ispitivanim fluidima, dok u nastavku dolazi do izražaja utjecaj soli u vodenim otopinama bez jasno izraženog utjecaja povećanja koncentracije soli. Na kraju početnog perioda, najveće bubrenje od 25,6% dobiveno je bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi, dok se bubrenje peleta u različitim otopinama soli nalazilo u vrlo uskom rasponu od 18,6 do 23%.

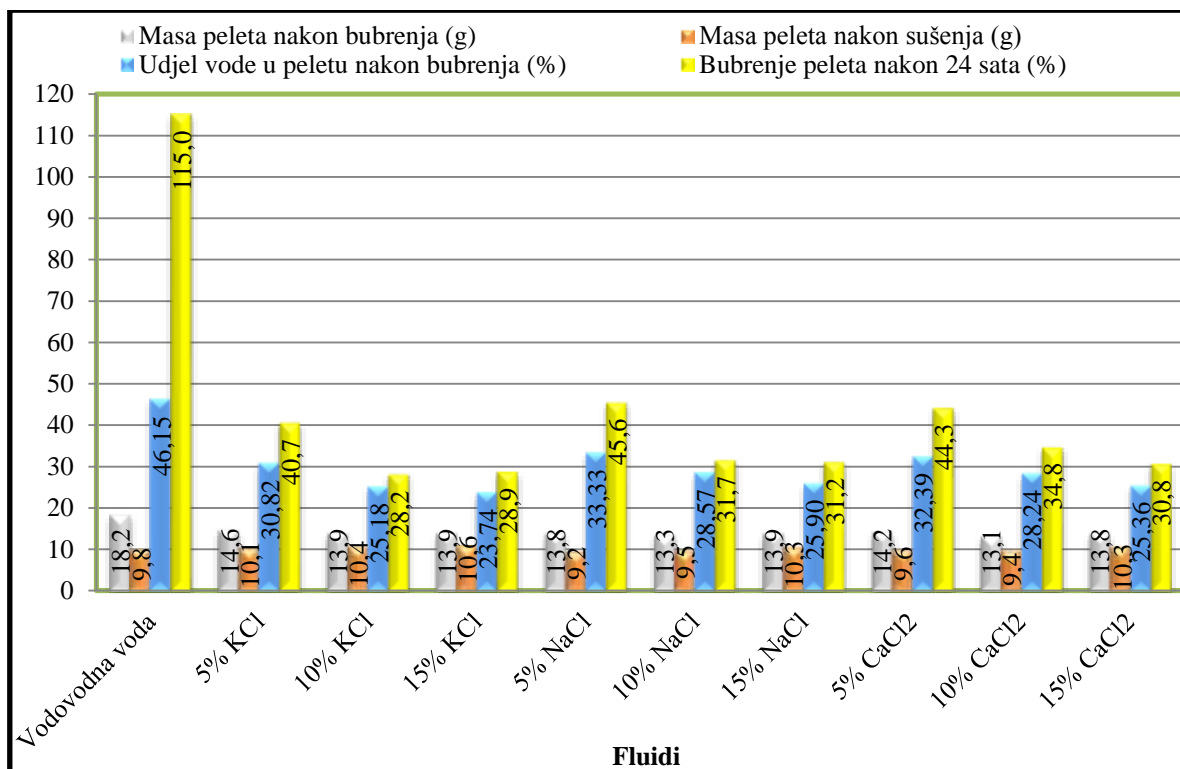
Kao što je i očekivano, najveće ukupno bubrenje peleta 20Q80M0K nakon 24 sata ispitivanja izmjereno je u vodovodnoj vodi, te je kod njega zabilježeno povećanje debljine peleta od 1,15 puta (slika 3-50).



Slika 3-50. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Sve ispitivane soli djelovale su na način da su smanjile ukupno bubrenje peleta nakon 24 sata u odnosu na vodovodnu vodu. Na osnovu izmjerenih podataka moguće je zaključiti da povećanje koncentracije soli u otopini pozitivno djeluje na smanjenje ukupnog bubrenja. Minimalno odstupanje od navedenog pravila zabilježeno je kod viših koncentracija KCl-a gdje je u 10%-tnoj otopini KCl-a izmjereno bubrenje peleta od 28,2%, a u 15%-tnoj otopini od 28,9%. Izmjerene vrijednosti bubrenja peleta u svim 5%-tnim otopinama soli nalazile su se u rasponu od 40,7 do 45,6%, u 10%-tnim otopinama soli od 28,2 do 34,8%, dok su u 15%-tnim otopinama soli te vrijednosti bile najmanje odnosno u rasponu od 28,9 do 31,2%. Ukoliko se usporede sve ispitivane soli, kod svake koncentracije soli u otopini najbolji rezultati postignuti su u otopini KCl-a. Iz slike 3-50 vidljivo je kako je maksimalna vrijednost bubrenja peleta u pojedinim otopinama soli ostvarena u periodu od 350 do 780 minuta od početka ispitivanja.

Udjel vode u peletu nakon bubrenja, kao i masa peleta nakon bubrenja i nakon sušenja prikazani su na slici 3-51.

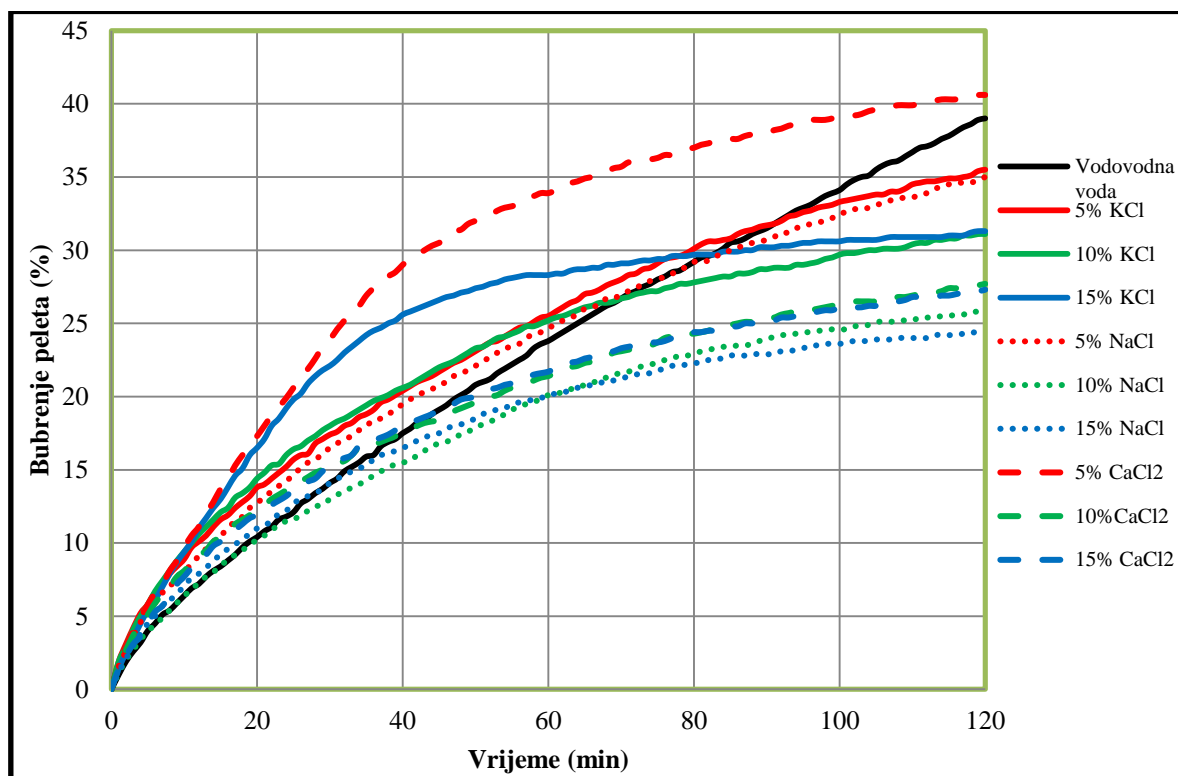


Slika 3-51. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 20Q80M0K

Maksimalni udjel vode u peletu 20Q80M0K izmjeren je nakon bubrenja u vodovodnoj vodi, što je i u skladu s maksimalnim izmjerenim bubrenjem koje je također izmjereno u vodovodnoj vodi. Prilikom razmatranja udjela vode u peletu nakon bubrenja, potrebno je uzeti u obzir da je pelet 20Q80M0K sadržavao 13,11% vode prije komprimiranja i bubrenja. Udjel vode izmjeren kod peleta koji su bubrili u otopinama soli manji je od vrijednosti dobivene kod vodovodne vode s tendencijom smanjenja vrijednosti s povećanjem koncentracije soli u otopini. Izmjereni udjel vode u peletu za 5%-tne otopine nalazi se u rasponu od 30,82 do 33,33%, za 10%-tne otopine od 25,18 do 28,57% dok je kod 15%-tnih otopina ta vrijednost najniža i nalazi se u rasponu od 23,74 do 25,9%. Najniže vrijednosti za sve navedene koncentracije soli u otopini zabilježene su u otopinama KCl-a, a najviše u otopinama NaCl-a. Za sve ispitivane otopine vidljiv je trend smanjenja udjela vode u peletu s povećanjem koncentracije soli u otopini.

3.4.2.10. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K u vodenim otopinama soli

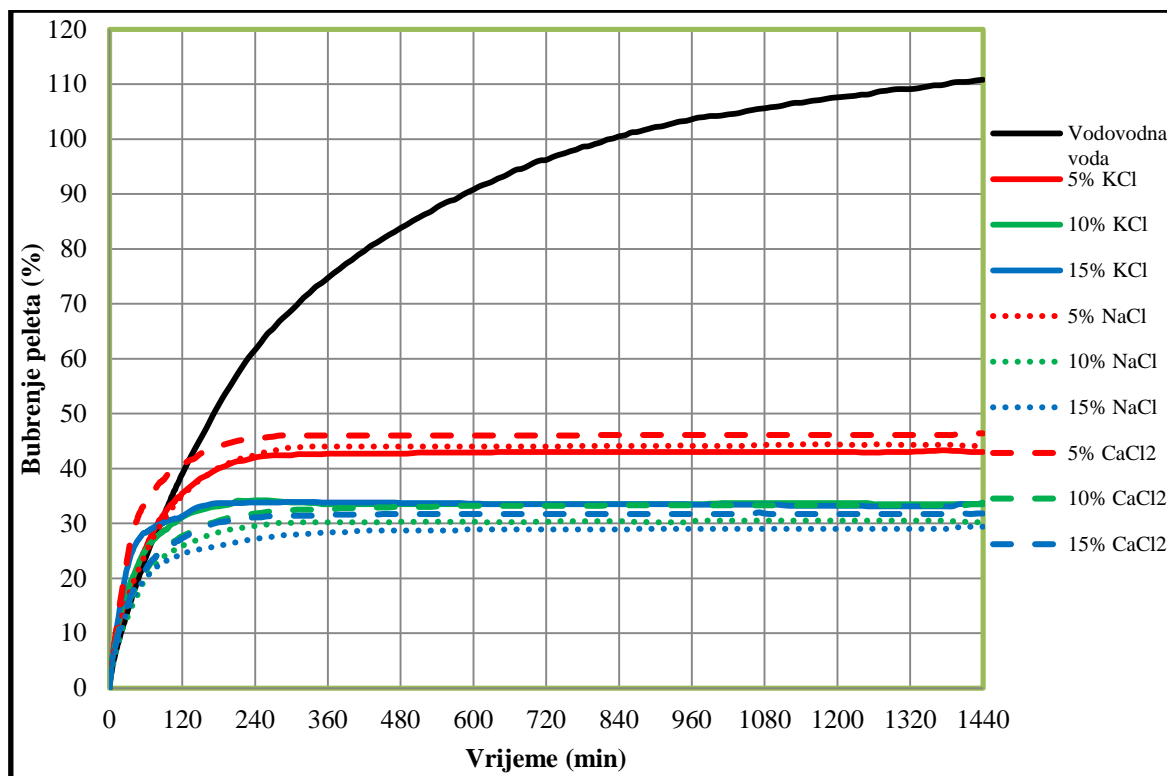
Podaci o bubrenju peleta 20Q60M20K u vodovodnoj vodi i različitim otopinama soli prikazani su na slikama 3-52 i 3-53, dok su na slici 3-54 prikazani podaci o ukupnom udjelu vode u peletu nakon bubrenja, kao i podaci o masi peleta nakon bubrenja i nakon sušenja.



Slika 3-52. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

U prvih dvadeset minuta ispitivanja intenzitet bubrenja peleta u ispitivanim otopinama soli veći je ili, u određenim slučajevima, jednak intenzitetu postignutom bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi. Tek nakon dvadesetak minuta ispitivanja, postepeno dolazi do izražaja utjecaj tipa i koncentracije soli. Nakon 120 minuta ispitivanja najveća vrijednost bubrenja peleta zabilježena je u otopini 5% CaCl₂ (40,6%), dok je najmanja vrijednost od 24,5% izmjerena kod bubrenja peleta u otopini 15% NaCl-a. Iz slike 3-52 vidljivo je da su izmjerene vrijednosti bubrenja u otopinama s većom koncentracijom soli (10 i 15%) približno jednake za različite soli.

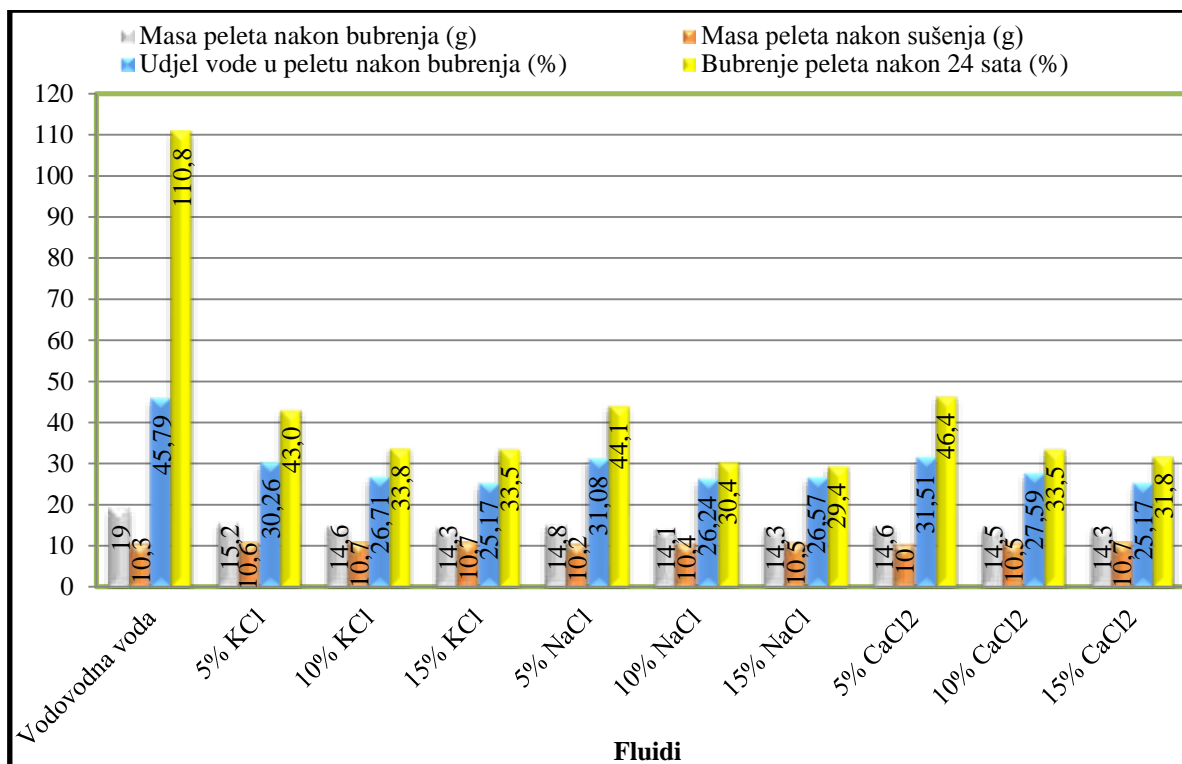
Na slici 3-53 prikazani su podaci o bubrenju peleta 20Q60M20K tijekom 24 sata.



Slika 3-53. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Iz slike 3-53 je vidljivo da je maksimalno bubrenje peleta 20Q60M20K postignuto u vodovodnoj vodi, dok su kod ispitivanja bubrenja peleta u otopinama soli izmjerene niže vrijednosti ukupnog bubrenja. Isto tako, kod peleta koji je bubrio u vodovodnoj vodi došlo je do povećanja njegove debljine 1,11 puta s daljnjom tendencijom porasta vrijednosti, dok je u slučaju bubrenja u otopinama soli nakon dosezanja maksimalnog bubrenja u određenoj otopini postignuta vrijednost održavana do kraja ispitivanja. Maksimalno bubrenje za ispitivanja provedena u vodenim otopinama soli postignuto je u vremenu od 180 do 600 minuta od početka ispitivanja. Bubrenje peleta 20Q60M20K u 5%-tnim vodenim otopinama nalazi se u rasponu od 43 do 46,4%, u 10%-tnim otopinama od 30,4 do 33,8% dok se ta vrijednost kod bubrenja peleta u 15%-tnim otopinama soli nalazi u rasponu od 29,4 do 33,5%. Ukoliko se usporede vodene otopine različitih soli, ali jednake koncentracije, može se zaključiti kako je u otopini najmanje koncentracije soli (5%) najmanje bubrenje postignuto u vodenoj otopini KCl-a, dok je kod viših koncentracija soli najbolji rezultat u smanjenju bubrenja postignut u vodenoj otopini NaCl-a.

Na slici 3-54 prikazani su podaci o djelu vode u peletu nakon bubrenja te masama peleta nakon bubrenja i nakon sušenja.



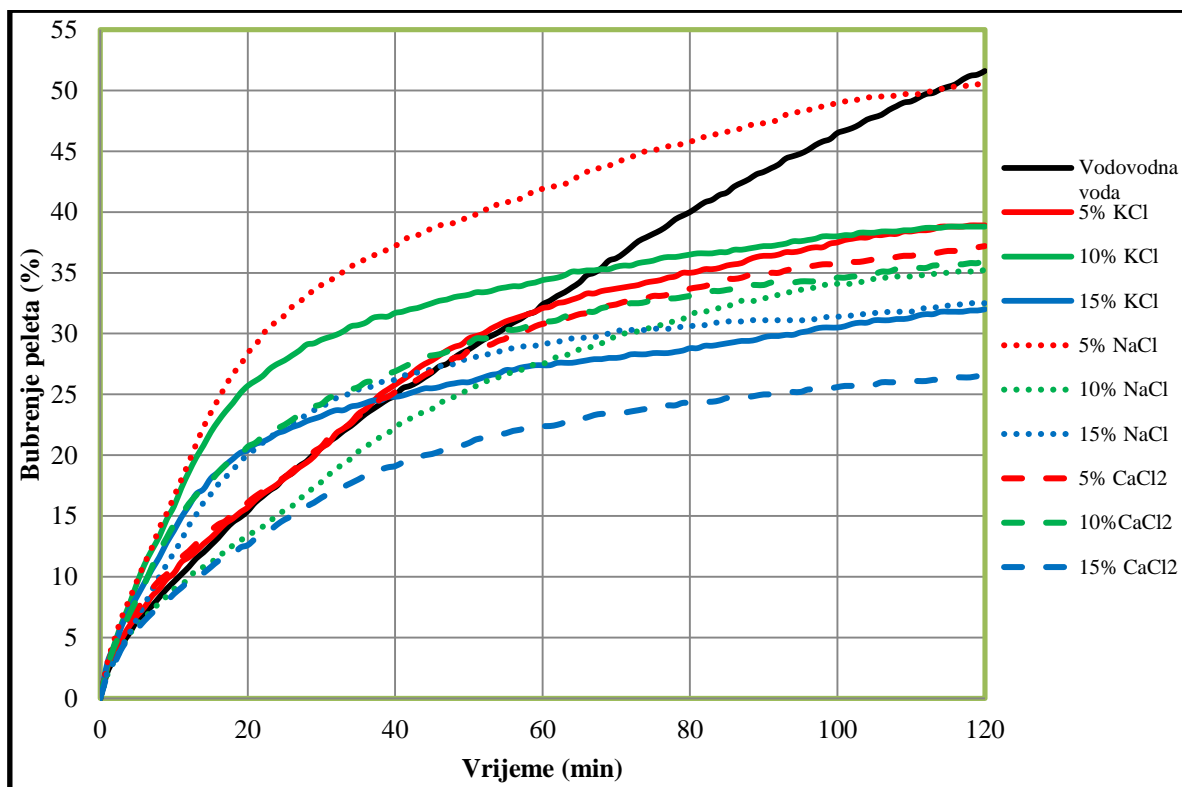
Slika 3-54. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 20Q60M20K

Najveći udjel vode od 45,79% imao je pelet koji je bubrio u vodovodnoj vodi. Dobiveni udjeli vode kod peleta koji su bubrili u vodenim otopinama soli manji su od dobivene vrijednosti za pelet koji je bubrio u vodovodnoj vodi. Također je uočen trend smanjenja udjela vode u peletu s povećanjem koncentracije soli u otopini u kojoj je bubrio. Udjeli vode u peletu dobiveni nakon bubrenja peleta 20Q60M20K u 5%-tnim vodenim otopinama soli nalaze se u rasponu od 30,26 do 31,51%, pri čemu je najmanja vrijednost dobivena nakon bubrenja u vodenoj otopini KCl-a. Kod bubrenja u 10%-tnim vodenim otopinama soli udjel vode u peletu nalazi se u rasponu od 26,24 do 27,59%, dok kod bubrenja peleta u vodenim otopinama s najvećom koncentracijom soli (15%) ta vrijednost iznosi od 25,17 do 26,57%. Stvarni udjeli vode u peletu dobiveni bubrenjem su manji od navedenih vrijednosti jer je potrebno uzeti u obzir kako je praškasti uzorak prije komprimiranja i bubrenja sadržavao 10,66% vode.

Izmjerena masa peleta nakon bubrenja smanjuje se s povećanjem koncentracije soli. Jedino odstupanje od navedenog pravila uočeno je kod bubrenja peleta u vodenoj otopini 10% NaCl-a, dok se istovremeno masa peleta nakon sušenja povećava s povećanjem koncentracije soli za sve ispitivane vodene otopine soli.

3.4.2.11. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K u vodenim otopinama soli

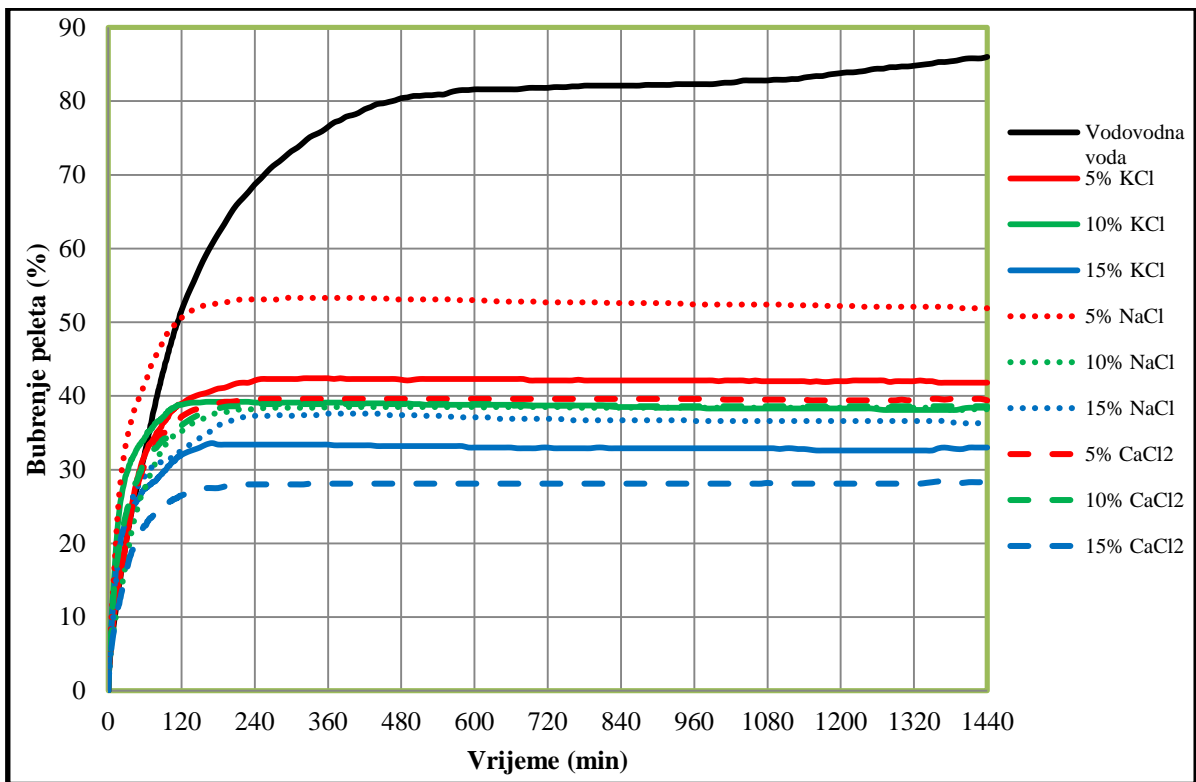
Bubrenje peleta 20Q40M40K u vodovodnoj vodi i vodenim otopinama različitih soli prikazano je na slikama 3-55 i 3-56.



Slika 3-55. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

Prema rezultatima bubrenja prikazanim na slici 3-55 može se zaključiti da u prvih 20 do 40 minuta dolazi do intenzivnijeg bubrenja peleta, u većini vodenih otopina soli, nego u vodovodnoj vodi. Tek nakon približno 40 minuta ispitivanja dolazi do izražaja djelovanje vrste i koncentracije soli, da bi se tek na kraju početnog perioda (početnih 120 minuta ispitivanja) jasno vidio utjecaj povećanja koncentracije soli u vodenim otopinama na smanjenje bubrenja peleta. Nakon 120 minuta ispitivanja najveće bubrenje peleta od 51,6% izmjereno je u vodovodnoj vodi, dok je najmanje bubrenje od 26,5% izmjereno kod peleta koji je bubrio u vodenoj otopini 15% CaCl₂.

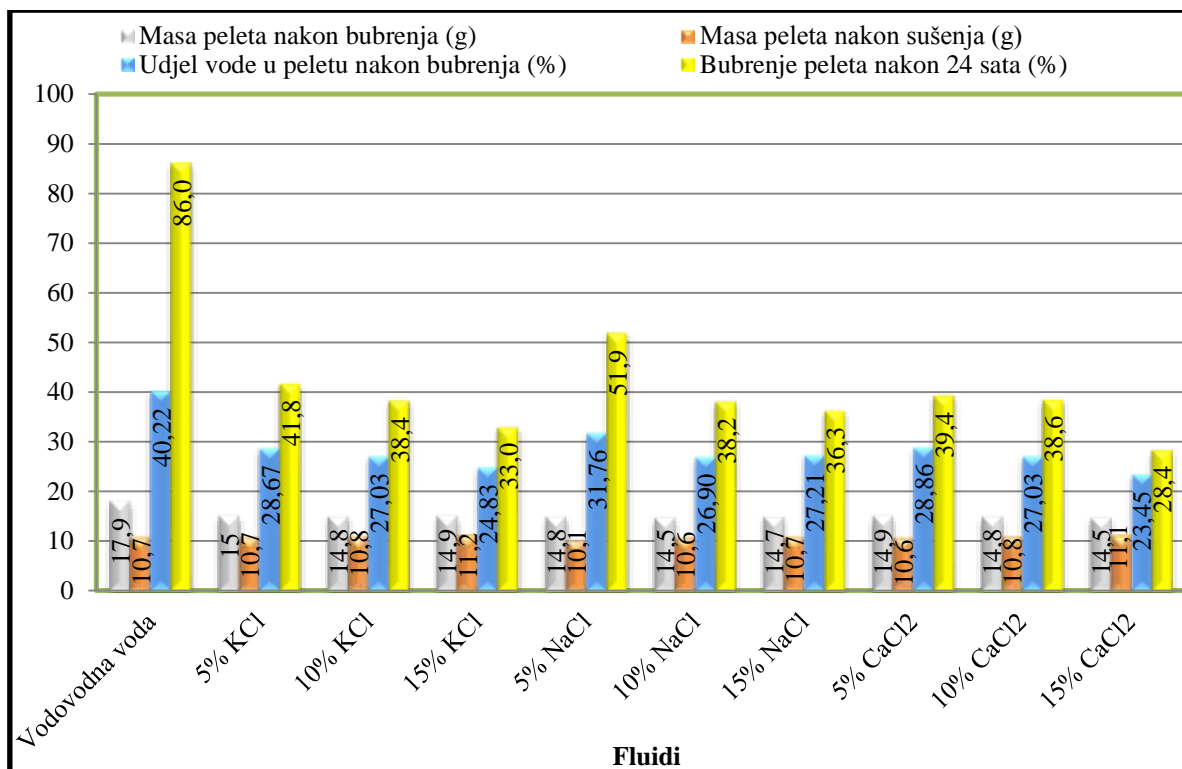
Ukupno bubrenje peleta mjereno tijekom 24 sata prikazano je na slici 3-56.



Slika 3-56. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Iz slike je vidljivo kako je maksimalno bubrenje od 86% izmjereno kod peleta 20Q40M40K koji je bubrio u vodovodnoj vodi. Bubrenje peleta 20Q40M40K u vodovodnoj vodi može se podijeliti u dva dijela, odnosno na prvi dio koji obuhvaća prvih 600 minuta ispitivanja kada je ostvareno bubrenje od približno 82% te drugi dio (preostalo vrijeme ispitivanja) u kojem je došlo do laganog porasta bubrenja od svega nekoliko postotaka do maksimalno izmjerene vrijednosti (86%). Izmjereno ukupno bubrenje peleta u 5%-tnim vodenim otopinama soli nalazi se u rasponu od 39,4 do 51,9%, u 10%-tnim vodenim otopinama od 38,2 do 38,6% te od 28,4 do 36,3% u 15%-tnim vodenim otopinama soli. Iz navedenog je vidljivo kako je ukupno bubrenje peleta u različitim vodenim otopinama soli manje od bubrenja peleta izmjenjenog u vodovodnoj vodi. Maksimalno bubrenje peleta nakon 24 sata u različitim vodenim otopinama soli ostvareno je već u 140 do 360 minuta ispitivanja.

Podaci o udjelu vode u peletu 20Q40M40K nakon bubrenja u vodovodnoj vodi i različitim vodenim otopinama soli, te podaci o masi peleta nakon bubrenja i nakon sušenja prikazani su na slici 3-57.



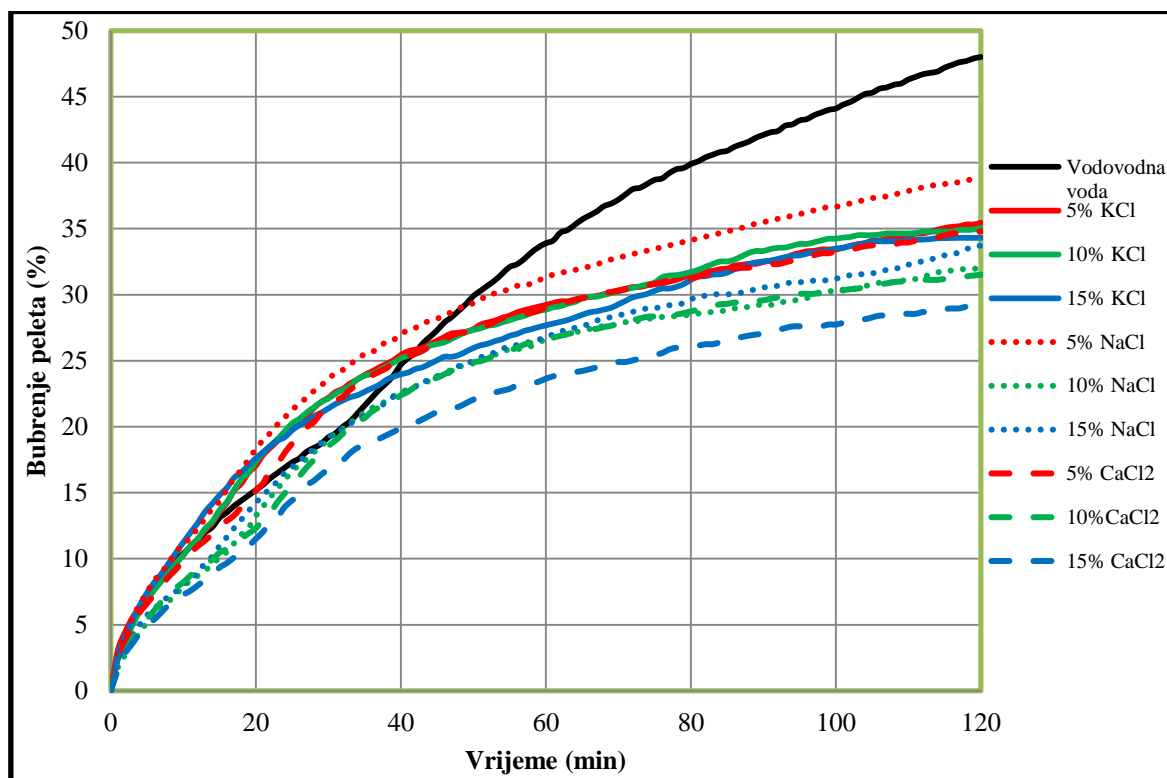
Slika 3-57. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 20Q40M40K

Maksimalni udjel vode izmjeren je kod peleta koji je bubrio u vodovodnoj vodi te iznosi 40,22%. Kod peleta koji su bubrili u vodenim otopinama soli zabilježene su manje vrijednosti udjela vode nakon bubrenja, s tendencijom smanjenja udjela vode s povećanjem koncentracije svih ispitivanih soli. Udjeli vode u peletima koji su bubrili u 5%-tnim vodenim otopinama soli nalazi se u rasponu od 28,67 do 31,76%. U 10%-tnim otopinama soli ta se vrijednost nalazi u rasponu od 26,9 do 27,03% dok su najmanje vrijednosti udjela vode u peletu izmjerene u 15%-tnim otopinama soli te se nalaze u rasponu od 23,45 do 27,21%. Prilikom razmatranja udjela vode koji je pelet dobio bubrenjem treba imati u vidu da je praškasti materijal prije komprimiranja i bubrenja sadržavao 7,38% vode.

Iz slike 3-57 vidljivo je kako u pravilu s povećanjem koncentracije soli dolazi do smanjenja mase peleta nakon bubrenja (odstupanje od pravila odnosi se na vrijednosti bubrenja peleta u vodenim otopinama 10% NaCl i 10% KCl), te povećanje mase peleta nakon sušenja.

3.4.2.12. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K u vodenim otopinama soli

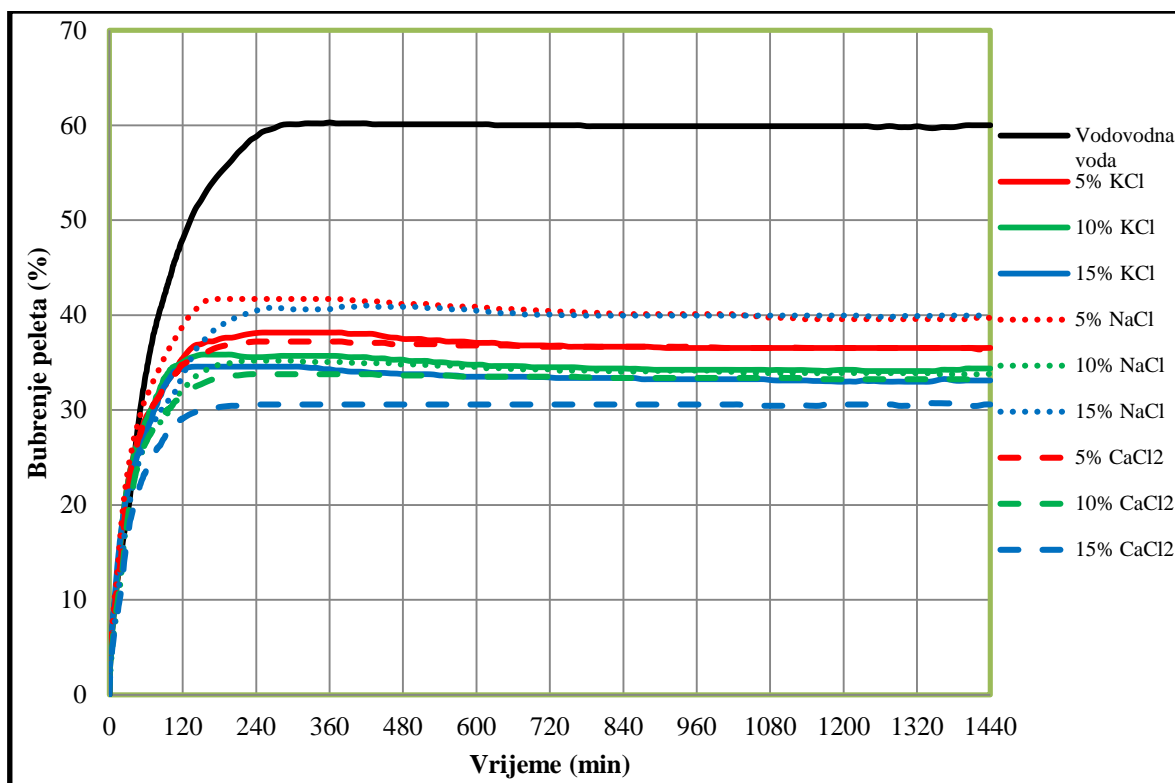
Podaci o bubrenju peleta 20Q20M60K u vodovodnoj vodi i vodenim otopinama različitih soli prikazani su na slikama 3-58 i 3-59, dok su na slici 3-60 prikazani udjeli vode u peletima nakon bubrenja, kao i mase peleta nakon bubrenja i nakon sušenja.



Slika 3-58. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K tijekom 120 minuta u vodenim otopinama soli

U prvih trideset minuta ispitivanja ne dolazi do značajnije razlike u intenzitetu bubrenja između peleta koji su bubrili u vodovodnoj vodi i peleta koji su bubrili u vodenim otopinama različitih soli. Do kraja početnog perioda jedino je kod vodenih otopina CaCl_2 uočen trend smanjenja bubrenja s povećanjem koncentracije soli, dok su kod peleta koji su bubrili u vodenim otopinama KCl-a izmjerene približno jednake vrijednosti bubrenja (vrijednosti se nalaze u rasponu od 34,3 do 35,5%). Nakon početnih 120 minuta maksimalna vrijednost bubrenja od 48% zabilježena je kod peleta koji je bubrio u vodovodnoj vodi, dok je najniža vrijednost bubrenja peleta od 29,1% izmjerena u vodenoj otopini 15% CaCl_2 .

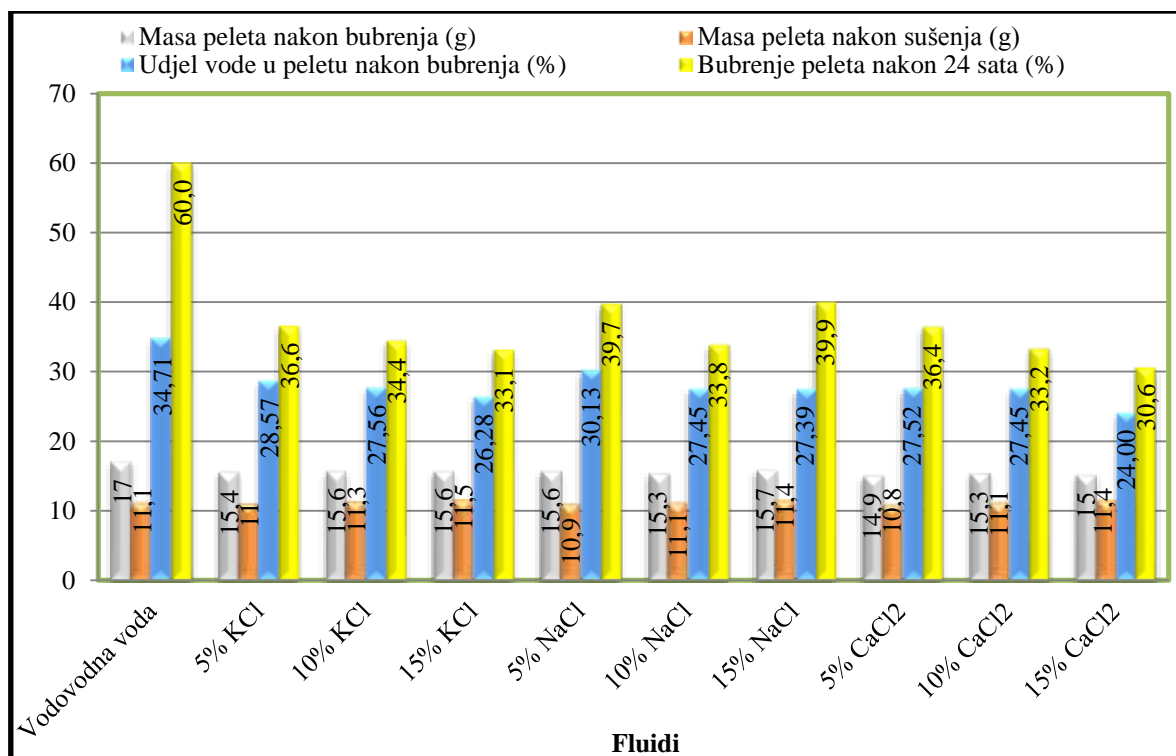
Maksimalno bubrenje peleta nakon dvadeset četiri sata zabilježeno je u vodovodnoj vodi, dok su kod bubrenja peleta u vodenim otopinama različitih soli zabilježene niže vrijednosti u odnosu na bubrenje ostvareno u vodovodnoj vodi (slika 3-59).



Slika 3-59. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K tijekom 24 sata u vodenim otopinama soli

Ukoliko se usporede bubrenja peleta 20Q20M60K u vodovodnoj vodi nakon 120 minuta i 24 sata, može se zaključiti da je pelet u nastavku ispitivanja (kroz 22 sata) ostvario dodatno bubrenje od svega 12%, odnosno bubrenje se povećalo s 48% na 60% koliko je ono iznosilo na kraju ispitivanja. Iz slike 3-59 vidljivo je kako je maksimalno bubrenje peleta u vodovodnoj vodi ostvareno već nakon 280 minuta od početka ispitivanja, nakon čega je postignuta vrijednost zadržana konstantnom do kraja ispitivanja. Nakon 24 sata bubrenja zabilježene su vrijednosti od 36,4 do 39,7% u 5%-tnim vodenim otopinama soli, od 33,2 do 34,4 u 10%-tnim otopinama soli, dok je kod bubrenja peleta u 15%-tnim otopinama ta vrijednost najniža i nalazi se u rasponu od 30,6 do 39,9%. Maksimalno bubrenja kod peleta koji su bubrili u vodenim otopinama različitih soli ostvareno je već u vremenu od 120 do 270 minuta od početka ispitivanja.

Maksimalni udjel vode u peletu nakon bubrenja od 24 sata zabilježen je kod peleta 20Q20M60K koji je bubrio u vodovodnoj vodi te iznosi 34,71%, što se dobro slaže i s maksimalnim bubrenjem koje je također zabilježeno u vodovodnoj vodi (3-60).



Slika 3-60. Utjecaj soli na ispitivane parametre peleta 20Q20M60K

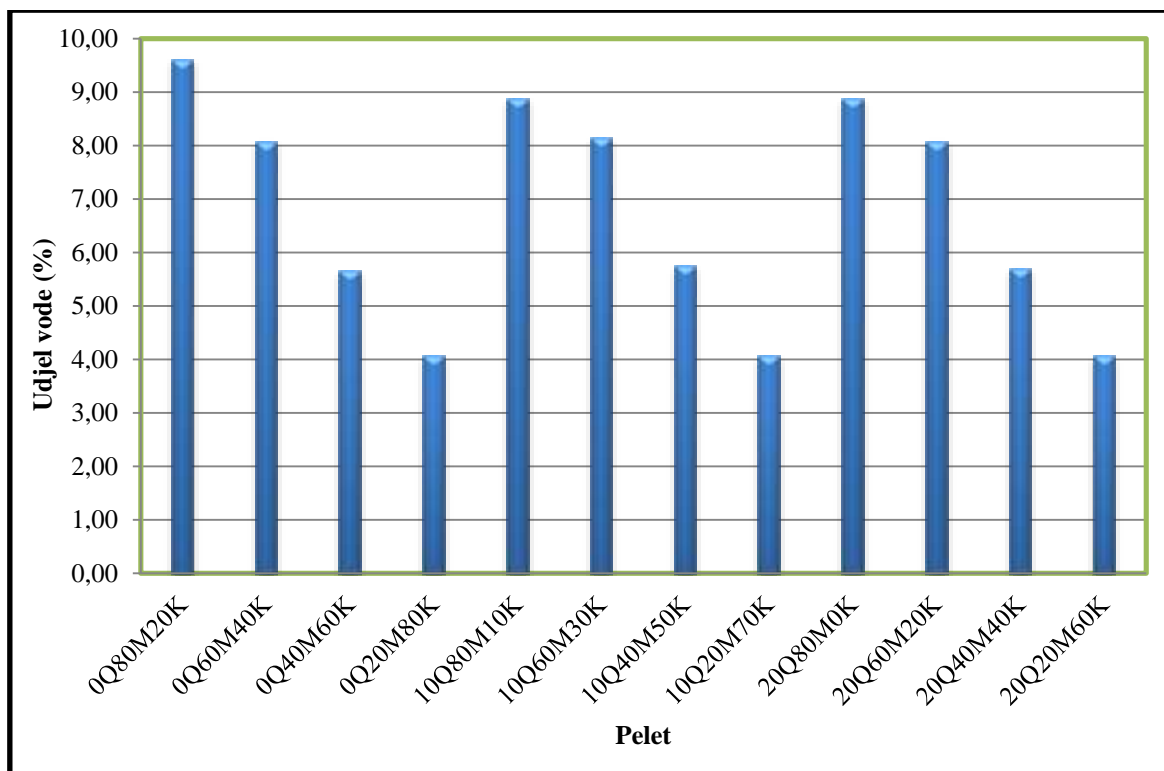
Međutim prilikom analize rezultata treba uzeti u obzir da je stvarni udjel vode u peletu dobiven bubrenjem nešto niži od navedene vrijednosti (34,71%), zbog udjela vode od 4,92% koji je postojao u peletu neposredno prije komprimiranja i bubrenja. Udjeli vode nakon bubrenja peleta 20Q20M60K u vodenim otopinama soli manji su od vrijednosti dobivene kod bubrenja peleta u vodovodnoj vodi. Iz slike 3-60 može se zaključiti da za sve ispitivane vodene otopine soli postoji trend smanjenja udjela vode s povećanje koncentracije soli u vodenoj otopini, što se u pravilu slaže i sa smanjenjem bubrenja peleta. Udjeli vode u peletima koji su bubrili u 5%-tnim vodenim otopinama soli nalaze se u rasponu od 27,52 do 30,13%, u peletima koji su bubrili u 10%-tnim vodenim otopinama od 27,45 do 27,56% dok su udjeli vode u peletima koji su bubrili u 15%-tnim vodenim otopinama soli u rasponu od 24 do 27,39%. Masa peleta 20Q20M60K nakon sušenja povećava se s povećanjem koncentracije soli u vodenoj otopini, dok masa peleta nakon bubrenja oscilira odnosno u pojedinim slučajevima dolazi čak i do njenog porasta s povećanjem koncentracije soli u vodenoj otopini.

Na temelju analiziranih rezultata bubrenja peleta u vodenim otopinama različitih soli može se zaključiti da povećanje koncentracije soli u vodenim otopinama ne utječe značajnije na smanjenje bubrenja peleta. Povećanje koncentracije soli za 5 mas. % uzrokuje manje bubrenje peleta u odnosu na bubrenje izmjereno u 5%-tnim otopinama soli i to u rasponu od 0 do 13,5% (srednja vrijednost 7,8%) kod otopine KCl-a, od 0 do 18,5% (srednja vrijednost 11,6%) kod otopine NaCl-a te od 0,8 do 12,9% (srednja vrijednost 7,3%) kod otopine CaCl₂. Povećanje koncentracije soli za dodatnih 5 mas. % uzrokovalo je nešto veće smanjenje bubrenja u usporedbi s bubrenjem peleta u 5%-tnim otopinama i to u rasponu od 2,5 do 17,8% (srednja vrijednost 10,6%) kod otopine KCl-a, od 0 do 19,7% (srednja vrijednost 13,6%) kod otopine NaCl-a te od 1,6 do 16,9% (srednja vrijednost 11%) kod otopine CaCl₂. Stoga su u nastavku ispitivanja korištene inhibirane isplake u kojima je koncentracija kationa K⁺, Na⁺ i Ca²⁺ odgovarala koncentraciji kationa u 5%tnim vodenim otopinama soli.

3.4.3. Bubrenje peleta različitog mineraloškog sastava u inhibiranim isplakama

Nakon ispitivanja bubrenja peleta u vodenim otopinama različitih soli čiji su rezultati prikazani u prethodnom poglavlju, u ovom poglavlju su prikazani rezultati bubrenja peleta u inhibiranim isplakama. U provedenim ispitivanjima bubrenja peleta korištene su kalijaska, slana i gipsna isplaka s različitim koncentracijama polianionske celuloze (2, 4 i 6 g/l). Kao i kod analize rezultata ispitivanja bubrenja peleta u vodenim otopinama soli i u ovom je poglavlju analizirano djelovanje inhibiranih isplaka na bubrenje pojedinog peleta. Utjecaj inhibiranih isplaka na bubrenje peleta promatran je kroz nekoliko parametara kao što su bubrenje tijekom 120 minuta (početni period) i tijekom 24 sata, intenzitet bubrenja peleta u pojedinim inhibiranim isplakama, ukupni udjel vode u peletu nakon bubrenja te kroz promjenu mase peleta nakon bubrenja i nakon sušenja.

Prilikom analize ukupnog udjela vode u peletu nakon 24-satnog bubrenja potrebno je imati u vidu udjel vode u peletu prije komprimiranja i bubrenja. Udjeli vode u peletima prije komprimiranja i bubrenja prikazani su na slici 3-61.



Slika 3-61. Udjel vode u praškastom uzorku neposredno prije komprimiranja

Iz slike 3-61 vidljivo je kako najveći udjel vode prije komprimiranja i bubrenja imaju peleti s najvećim udjelom bentonita (Gelplesa), dok su najniže vrijednosti zabilježene kod peleta s najmanjim udjelom bentonita. Također je vidljivo da sa smanjenjem masenog udjela bentonita (Gelplesa) dolazi do smanjenja početnog udjela vode bez obzira na maseni udjel kvarca.

Kao referentne vrijednosti za sva provedena ispitivanja uzeti su podaci dobiveni bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi.

Osim procjene utjecaja ispitivanih inhibiranih isplaka na promatrane parametre, za svaki pelet napravljena je simulacija utjecaja bubrenja peleta u inhibiranoj isplaci na promjenu gradijenta tlaka koji se javlja uslijed otpora protjecanju isplake kroz prstenasti prostor kanala bušotine. Kako su ispitivanja usmjerena na šejlove koji se nalaze na manjoj dubini (do približno 1500 m), za simulaciju su odabrani karakteristični promjeri kanala bušotine za navedenu dubinu (promjeri dlijeta) i to 0,4445 m (17 ½") i 0,3112 m (12 ¼"). Za svaki od navedenih promjera kanala bušotine (promjera dlijeta) definirani su vanjski promjeri bušaćih alatki, odnosno vanjski promjeri teških i bušaćih šipki. Za promjere kanala bušotine 0,4445 m odabrane su teške šipke 0,2858 m (11 ¼") i bušaće šipke nominalnog promjera 0,127 m (5"), dok su kod kanala bušotine promjera 0,3112 m odabrane bušaće šipke istog

nominalnog promjera kao i kod kanala bušotine promjera 0,4445 m te teške šipke vanjskog promjera 0,2413 m (9 1/2") (Institut Francais du Petrole Publications „Drilling Dana Handbook“, 1999).

Proračun gradijenta tlaka napravljen je prema jednadžbama za Bingham i eksponencionalni (Power-law) model, koje su objavljene u literaturi (Kavedžija et al. 1990). Usporedbom dobivenih rezultata zaključeno je kako ne dolazi do značajnije razlike u dobivenim vrijednostima gradijenta smanjenja tlaka izračunatim po jednom i po drugom modelu, te su u radu prikazani rezultati samo za eksponencionalni model.

Postupak proračuna smanjenja tlaka koje nastaje uslijed otpora protjecanju isplake u prstenastom prostoru sastoji se od nekoliko koraka (Kavedžija et al. 1990). U prvom se koraku iz podataka o dimenzijama prstenastog prostora kroz koji protječe isplaka i dobave pumpe izračunava brzina protjecanja isplake u promatranom prstenastom prostoru kanala bušotine (jednadžba 3-5).

$$v = \frac{4 \cdot Q_p}{\pi \cdot (D_b^2 - D_a^2)} \quad (3-5)$$

Gdje su:

v - brzina protjecanja isplake [m/s],

Q_p - dobava isplačne pumpe [m³/s],

D_b - promjer kanala bušotine [m],

D_a - promjer alata u bušotini [m].

Za provedeni proračun odabrane su dobave pumpe od 0,055 m³/s za promjer kanala bušotine 0,4445 m i 0,038 m³/s za promjer kanala bušotine 0,3112 m. Navedene vrijednosti su prosječne vrijednosti dobave isplačne pumpe koje se koriste u praksi da bi se osiguralo kvalitetno iznošenje krhotina na površinu (Gaurina-Međimurec, 2009).

U drugom se koraku na osnovu izračunate brzine protjecanja isplake kroz prstenasti prostor (korak 1), dimenzija prstenastog prostora, gustoće isplake u sustavu, te parametara koji karakteriziraju eksponencionalni model (indeks toka i indeks konzistencije) izračunava Reynoldsov broj (jednadžba 3-6). Na temelju usporedbe dobivene vrijednosti Reynoldsova broja i kritične vrijednosti Reynoldsova broja dobivene pomoću jednadžbe 3-7, određuje se tip protjecanja isplake. Ukoliko je izračunati Reynoldsov broj veći od kritične vrijednosti

protjecanje je turbulentno, odnosno ukoliko je manji od kritične vrijednosti protjecanje je laminarno (Kavedžija et al., 1990).

$$\text{Re} = \frac{0,8165 \cdot v^{2-n_{pp}} \cdot (D_b - D_a)^{n_{pp}} \cdot \rho_i}{K_{pp} \cdot 12^{n_{pp}-1} \cdot \left(\frac{2 \cdot n_{pp} + 1}{3 \cdot n_{pp}}\right)^{n_{pp}}} \quad (3-6)$$

$$\text{Re}_c = 3470 - 1370 \cdot n_{pp} \quad (3-7)$$

Gdje su:

Re - Reynoldsov broj [-],

ρ_i - gustoća isplake [kg/m^3],

Rec - kritični Reynoldsov broj [-].

U sljedećem koraku određuje se ekvivalentna viskoznost isplake prema jednadžbi 3-8, te na kraju smanjenje tlaka pomoću jednadžbe 3-9 ukoliko se radi o turbulentnom protjecanju odnosno pomoću jednadžbe 3-10 ukoliko se radi o laminarnom protjecanju (Kavedžija et al., 1990).

$$\mu_e = K_{pp} \cdot \left(\frac{12 \cdot v}{D_b - D_a} \cdot \frac{2 \cdot n_{pp} + 1}{3 \cdot n_{pp}}\right)^{n_{pp}-1} \quad (3-8)$$

Gdje je:

μ_e - ekvivalentna viskoznost isplake [$\text{Pa} \cdot \text{s}$].

$$p = \frac{48 \cdot l \cdot \mu_e \cdot v}{(D_b - D_a)^2} \cdot \frac{2 \cdot n_{pp} + 1}{3 \cdot n_{pp}} \quad (3-9)$$

Gdje su:

p - smanjenje tlaka [Pa],

l - duljina prstenastog prostora određene površine [m].

$$p = \left[\frac{2 \cdot c \cdot l \cdot \rho_i^{1-b} \cdot v^{2-b}}{(0,8165 \cdot (D_b - D_a))^{1+b}} \right] \cdot \left[\mu_e^b \cdot \left(\frac{2 \cdot n_{pp} + 1}{3 \cdot n_{pp}}\right)^b \right] \quad (3-10)$$

$$c = \frac{\log n_{pp} + 2,5}{50}$$

$$b = \frac{1,4 - \log n_{pp}}{7}$$

Gdje su:

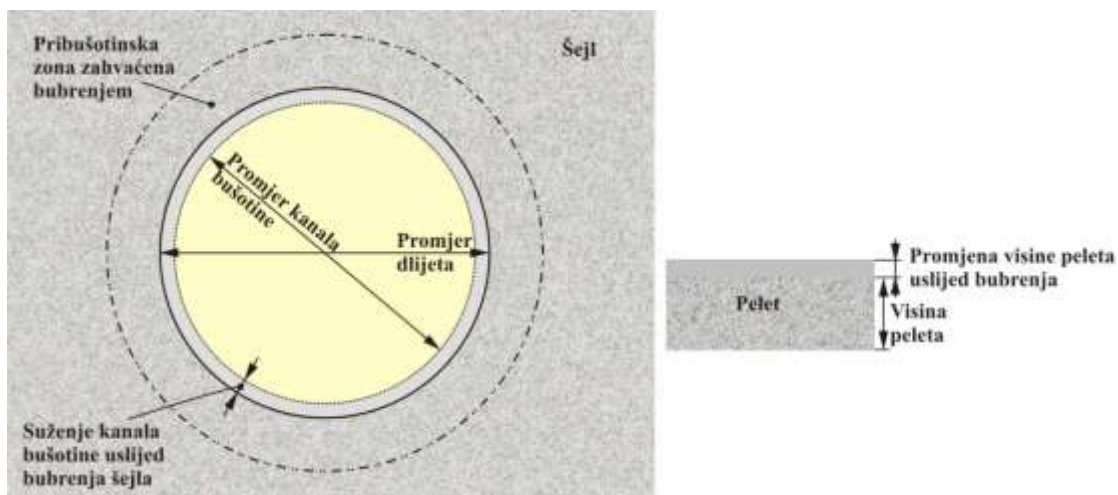
c - koeficijent [-],

b - koeficijent [-].

Gradijent tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz prstenasti prostor dobiven je na način da je u jednadžbama za izračunavanje smanjenja tlaka (jednadžbe 3-9 i 3-10) korištena jedinična duljina prstenastog prostora kanala bušotine od 1 m.

Kako su mjerenja na viskozimetru model 900 obavljena nakon mjerenja na Fann viskozimetru, zbog utjecaja soli na reološka svojstva ispitivanih isplaka nije bilo moguće dobiti očitavanja smičnih naprezanja za određene smične brzina, a koja su potrebna za dobivanje indeksa toka i indeksa konzistencije. Stoga su u provedenom proračunu korištene vrijednosti indeksa toka i indeksa konzistencije dobivene na temelju izmjerenih smičnih naprezanja na Fann viskozimetru.

Simulacija promjene promjera kanala bušotine s bubrenjem napravljena je na način da je bubrenje peleta predstavljalo bubrenje stijenki kanala bušotine, gdje je početna debljina peleta prije bubrenja predstavljala pribušotinsku zonu zahvaćenu bubrenjem. Na ovaj način za svako mjerenje bubrenja peleta u bilo kojem trenutku ispitivanja moguće je dobiti simulirani promjer kanala bušotine koji je u odnosu na početni umanjen za dvostruku vrijednost povećanja debljine peleta uslijed bubrenja (slika 3-62).

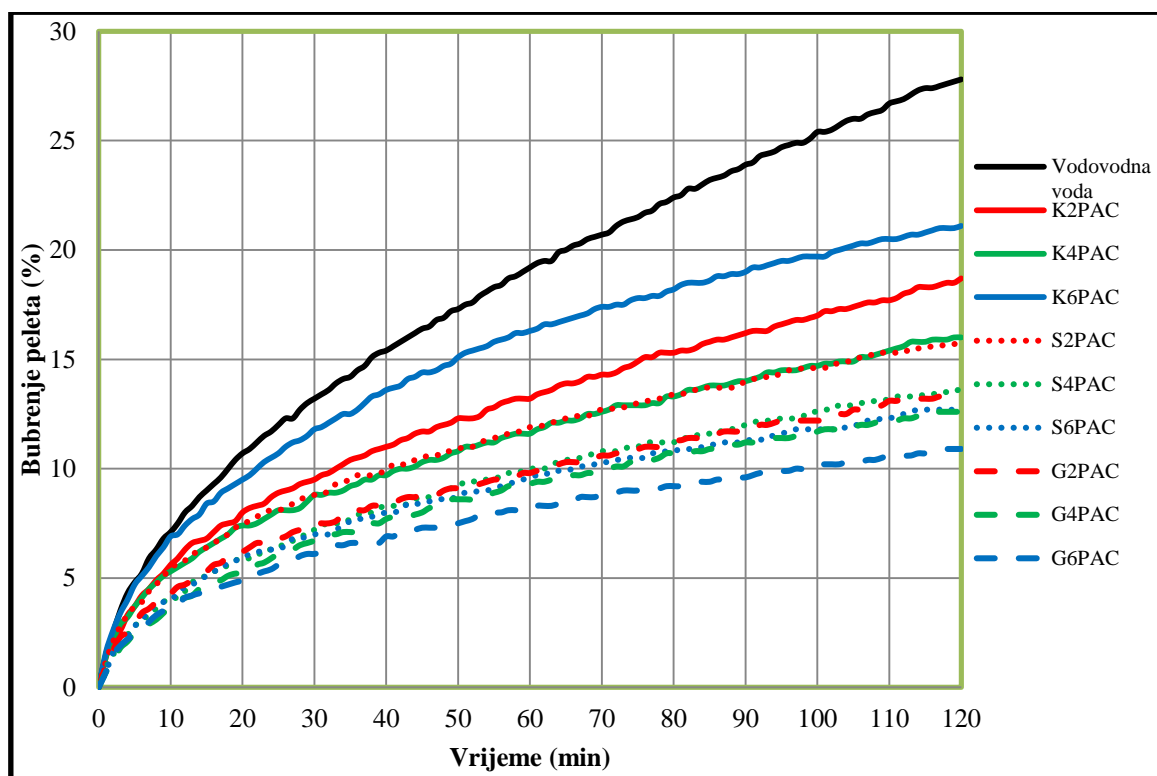


Slika 3-62. Korelacija između izmjerenog bubrenja peleta i odgovarajućeg suženja kanala bušotine

Rezultati i analiza rezultata provedene simulacije utjecaja bubrenja na smanjenje protočne površine prstenastog prostora i promjenu gradijenta tlaka koji nastaje uslijed otpora protjecanju isplake prikazani su u poglavlju 4-6.

3.4.3.1. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K u inhibiranim isplakama

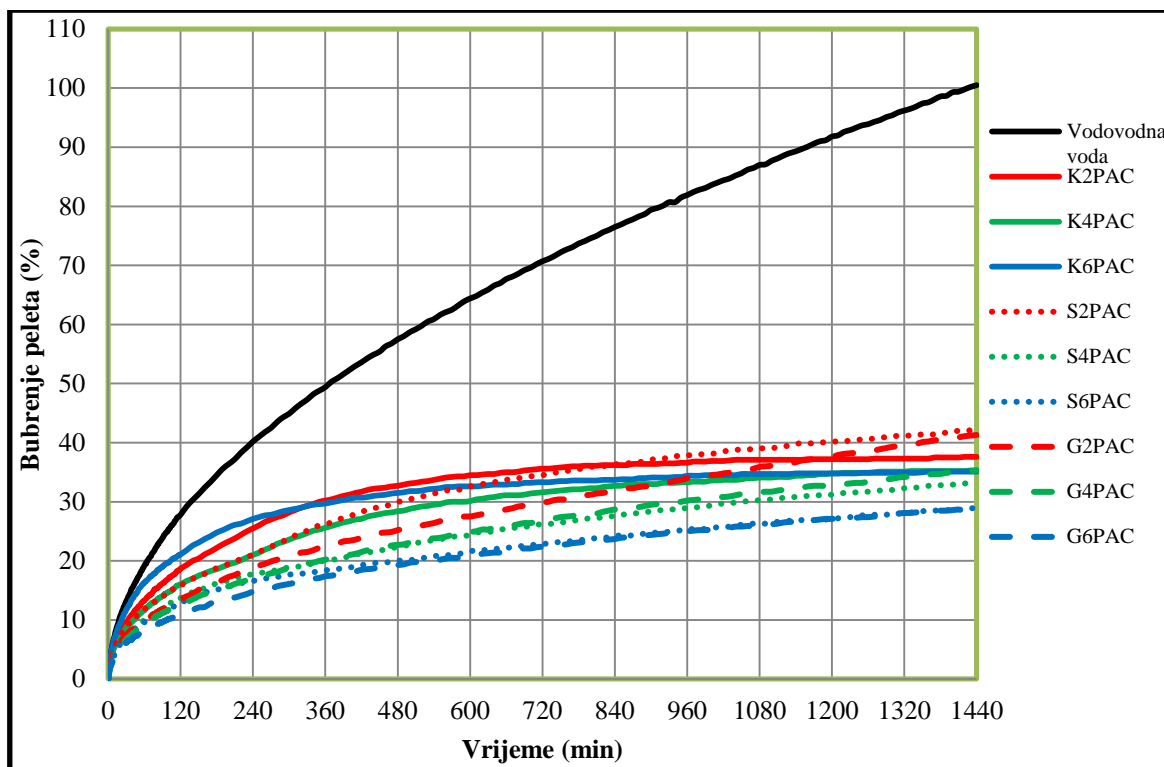
Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K u vodovodnoj vodi i različitim inhibiranim isplakama tijekom 120 minuta i tijekom 24 sata prikazani su na slikama 3-63 i 3-64.



Slika 3-63. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Najveće ukupno bubrenje peleta 0Q80M20K u početnom periodu, kao i najveći intenzitet bubrenja izmjereni su u vodovodnoj vodi (slika 3-63). U prvih 120 minuta, kod peleta koji su bubrili u slanoj i gipsnoj isplaci zabilježeno je smanjenje intenziteta bubrenja i ukupnog bubrenja s povećanjem koncentracije polianionske celuloze. Maksimalno bubrenje peleta 0Q80M20K nakon 120 minuta ispitivanja zabilježeno je kod njegovog bubrenja u vodovodnoj vodi (27,8%), dok je najmanje bubrenje izmjereno u gipsnoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze (G6PAC).

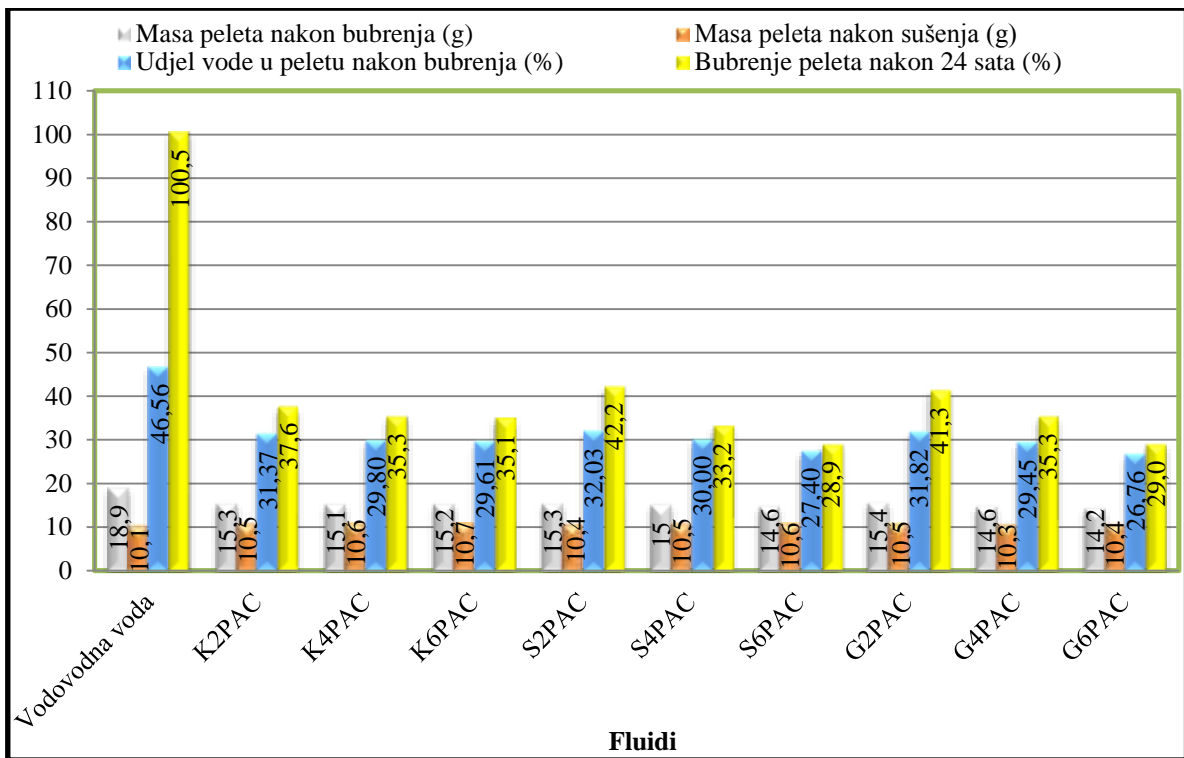
Ukupno bubrenje peleta 0Q80M20K mjereno tijekom 24 sata prikazano je na slici 3-64.



Slika 3-64. Rezultati bubrenja peleta 0Q80M20K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Iz slike 3-64 vidljivo je kako je najveće bubrenje peleta od približno 100% u odnosu na početnu debljinu peleta izmjereno u vodovodnoj vodi, s jasno izraženom tendencijom daljnjeg rasta. Kod bubrenja peleta u inhibiranim isplakama, vidljivo je smanjenje ukupnog bubrenja peleta nakon 24 sata s povećanjem koncentracije polianionske celuloze. Ukupno bubrenje peleta u inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalazilo se u rasponu od 37,6 do 42,2%, u inhibiranim isplakama s 4 g/l polianionske celuloze od 33,2 do 35,3%, dok je u isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze ta vrijednost najniža i nalazi se u rasponu od 28,9 do 35,1%. Na temelju podataka prikazanih na slici 3-64 može se zaključiti kako samo u slučaju bubrenja peleta u kalijskoj isplaci dolazi do maksimalnog bubrenja unutar trajanja ispitivanja (od 1080 do 1200 minute), dok je kod ostala dva tipa inhibiranih isplaka (gipsnoj i slanoj) uočeno bubrenje tijekom cijelog perioda ispitivanja. Međutim važno je napomenuti, da je u prvih približno 240 minuta intenzitet bubrenja peleta daleko veći nego u nastavku ispitivanja.

Na slici 3-65 prikazani su podaci o udjelu vode u peletu 0Q80M20K nakon 24-satnog ispitivanja te mase peleta nakon bubrenja kao i nakon sušenja.



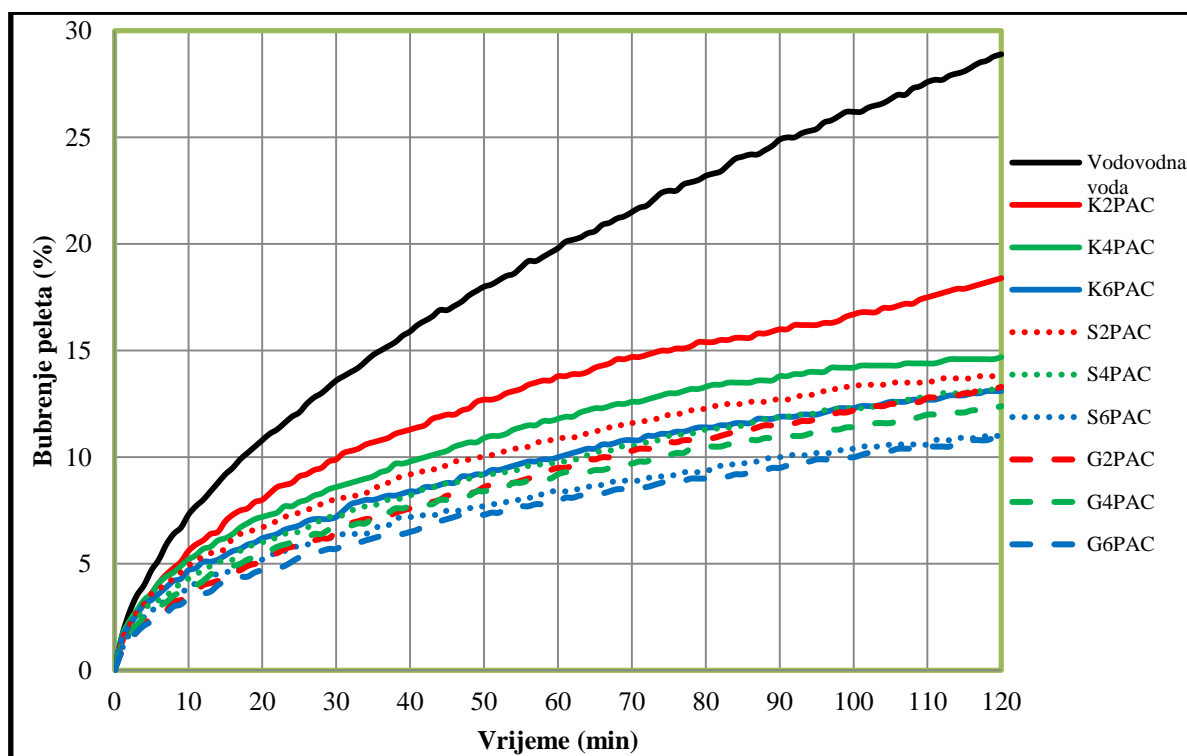
Slika 3-65. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 0Q80M20K

Najveći udjel vode nakon bubrenja peleta 0Q80M20K od 46,56% zabilježen je kod bubrenja u vodovodnoj vodi, što se slaže s podacima o maksimalnom bubrenju. Ukoliko se navedeni udjel vode (46,56%) izmjeren nakon bubrenja umanjuje za udjel vode u peletu prije komprimiranja i bubrenja (9,6%) može se zaključiti da je stvarni udjel vode u peletu dobiven bubrenjem u vodovodnoj vodi 36,96%. Udjel vode nakon bubrenja u inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalazio se u rasponu od 31,37 do 32,03%, dok se kod isplaka s 4 g/l polianionske celuloze ta vrijednost nalazila u rasponu od 29,45 do 30%. Najmanji udjel vode u peletu nakon bubrenja izmjeren je u isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze te se nalazio u rasponu od 26,76 do 29,61%, iz čega je vidljivo da se udjel vode u peletima koji su bubrili u inhibiranim isplakama smanjivao s povećanjem koncentracije polianionske celuloze u isplaci. Iz slike 3-65 vidljivo je da se u pravilu, s povećanjem koncentracije polianionske celuloze smanjuje masa peleta nakon bubrenja (kod kalijске isplake zabilježena je lagana oscilacija vrijednosti), te povećava masa peleta nakon sušenja (jedino odstupanje zabilježeno je kod gipsne isplake).

Nakon bubrenja pelet je prerezan te je na vrhu peleta uočen tamniji sloj (sloj boje isplake) debljine približno 1 do 1,5 mm. Prilikom rezanja uočeno je da povećanje koncentracije polianionske celuloze u isplaci dovodi do povećanja tvrdoće peleta.

3.4.3.2. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K u inhibiranim isplakama

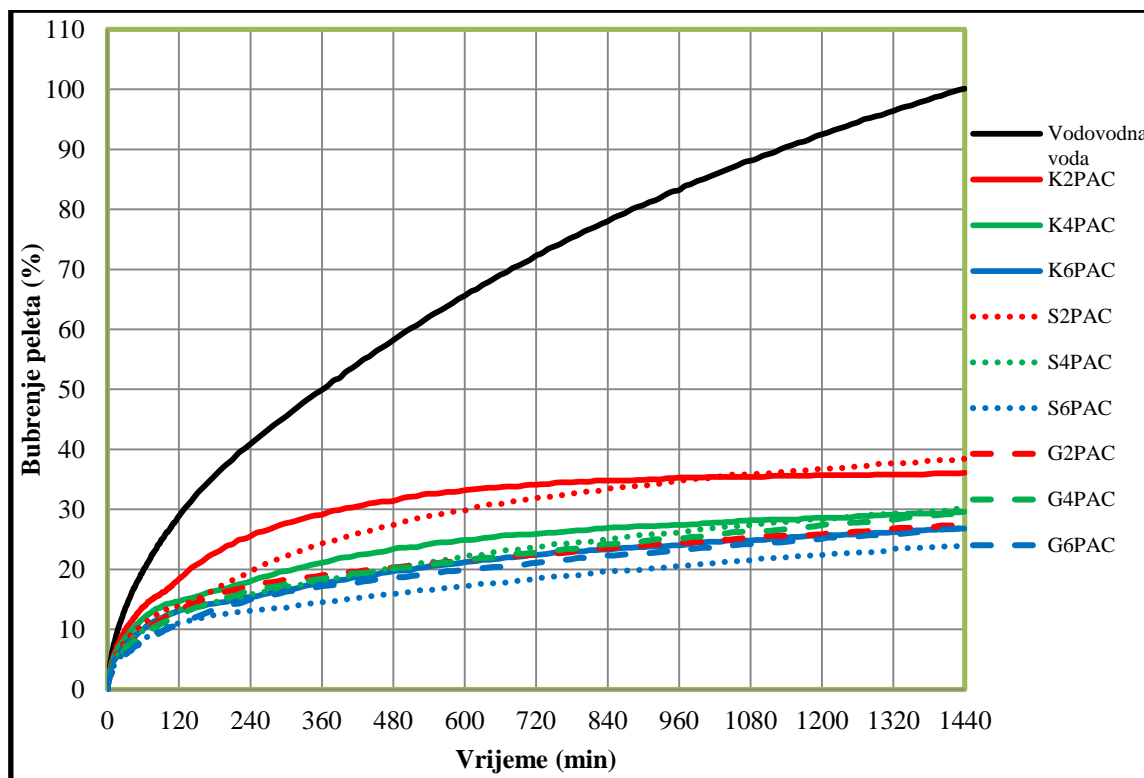
Bubrenje peleta 0Q60M40K u vodovodnoj vodi i inhibiranim isplakama tijekom 120 minuta, odnosno 24 sata prikazano je na slikama 3-66 i 3-67.



Slika 3-66. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Najveće bubrenje kao i najveći intenzitet bubrenja peleta 0Q60M40K u prvih 120 minuta ispitivanja ostvareni su kod peleta koji je bubrio u vodovodnoj vodi (slika 3-66). Bubrenje peleta u svim inhibiranim isplakama bilo je manje od njegovog bubrenja u vodovodnoj vodi. Pritom je kod sva tri tipa inhibiranih isplaka jasno vidljiv utjecaj koncentracije polianionske celuloze, odnosno s porastom koncentracije polianionske celuloze u isplaci dolazi do smanjenja intenziteta bubrenja peleta kao i ukupnog bubrenja peleta nakon početnih 120 minuta. Najveće bubrenje peleta 0Q60M40K u ovom periodu od 28,9% izmjereno je u vodovodnoj vodi, dok je najmanje bubrenje od 10,9% izmjereno kod gipsne isplake G6PAC.

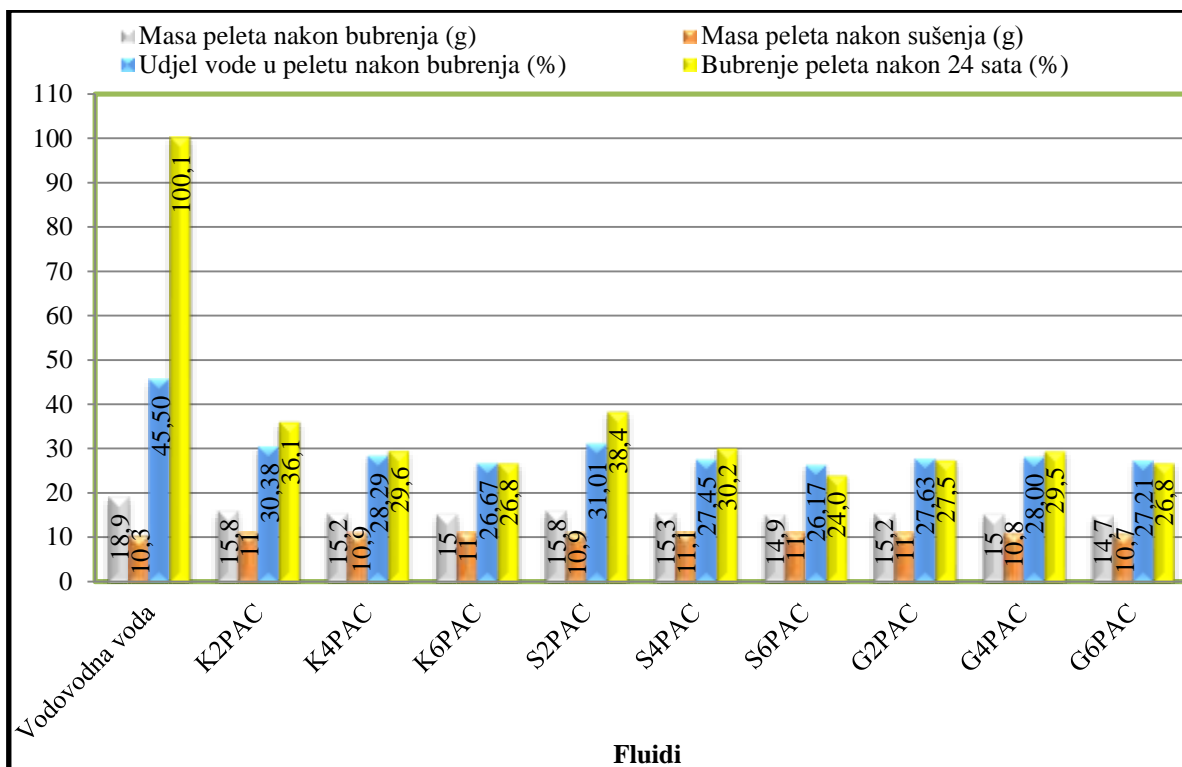
Kao što je i bilo za očekivati, najveće bubrenje peleta 0Q60M40K nakon 24 sata zabilježeno je kod peleta koji je bubrio u vodovodnoj vodi (slika 3-67).



Slika 3-67. Rezultati bubrenja peleta 0Q60M40K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Tijekom 24-satnog bubrenja u vodovodnoj vodi, pelet 0Q60M40K je udvostručio svoju debljinu u odnosu na onu izmjerenu prije bubrenja. Kod peleta koji su bubrili u inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze bubrenje se nalazilo u rasponu od 27,5 do 38,4%, pri čemu je najmanja vrijednost bubrenja peleta zabilježena u inhibiranoj isplaci G2PAC, a najviša u isplaci S2PAC. S povećanjem koncentracije polianionske celuloze u isplaci dolazi do smanjenja vrijednosti ukupnog bubrenja peleta pa se one nalaze u rasponu od 29,5 do 30,2% za pelete koji su bubrili u inhibiranim isplakama s 4 g/l polianionske celuloze te od 24 do 26,8% za pelete koji su bubrili u inhibiranim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze. Osim toga, iz slike 3-67 je vidljivo kako, kod nijednog peleta, nije dosegnuto maksimalno bubrenje unutar vremena ispitivanja.

Na slici 3-68 prikazani su podaci o udjelu vode u peletu nakon bubrenja, kao i izmjerene mase peleta nakon bubrenja i nakon sušenja.



Slika 3-68. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 0Q60M40K

Najveći udjel vode u peletu od 45,5% nakon bubrenja od 24 sata zabilježen je kod peleta 0Q60M40K koji je bubrio u vodovodnoj vodi što se slaže i s podacima o maksimalnom bubrenju peleta koje je također izmjereno kod bubrenja peleta u vodovodnoj vodi (slika 3-68). U slučaju bubrenja peleta u inhibiranim isplakama uočen je trend smanjenja vrijednosti udjela vode s povećanjem koncentracije polianionske celuloze (jedino odstupanje od navedenog pravila uočeno je za bubrenje peleta u gipsnoj isplaci G4PAC). Udjeli vode u peletu nakon bubrenja nalazili su se u rasponu od 27,63 do 31,01% za bubrenje peleta u inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze, od 27,45 do 28,29% za bubrenje u inhibiranim isplakama s 4 g/l polianionske celuloze te od 26,17 do 27,21% za bubrenje u inhibiranim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze. Za dobivanje stvarnog udjela vode u peletu dobivenog bubrenjem, potrebno je navedene vrijednosti udjela vode u peletu nakon bubrenja umanjiti za vrijednost početnog udjela vode koji je pelet sadržavao prije komprimiranja i bubrenja, odnosno za 8,06%. Kod bubrenja peleta 0Q60M40K u različitim inhibiranim isplakama uočeno je smanjenje mase peleta nakon bubrenja s povećanjem koncentracije polianionske celuloze.

Tijekom obrade i vizualnog pregleda peleta nakon bubrenja, uočeno je da osim smanjenja bubrenja i udjela vode, inhibirane isplake uzrokuju i povećanje tvrdoće peleta

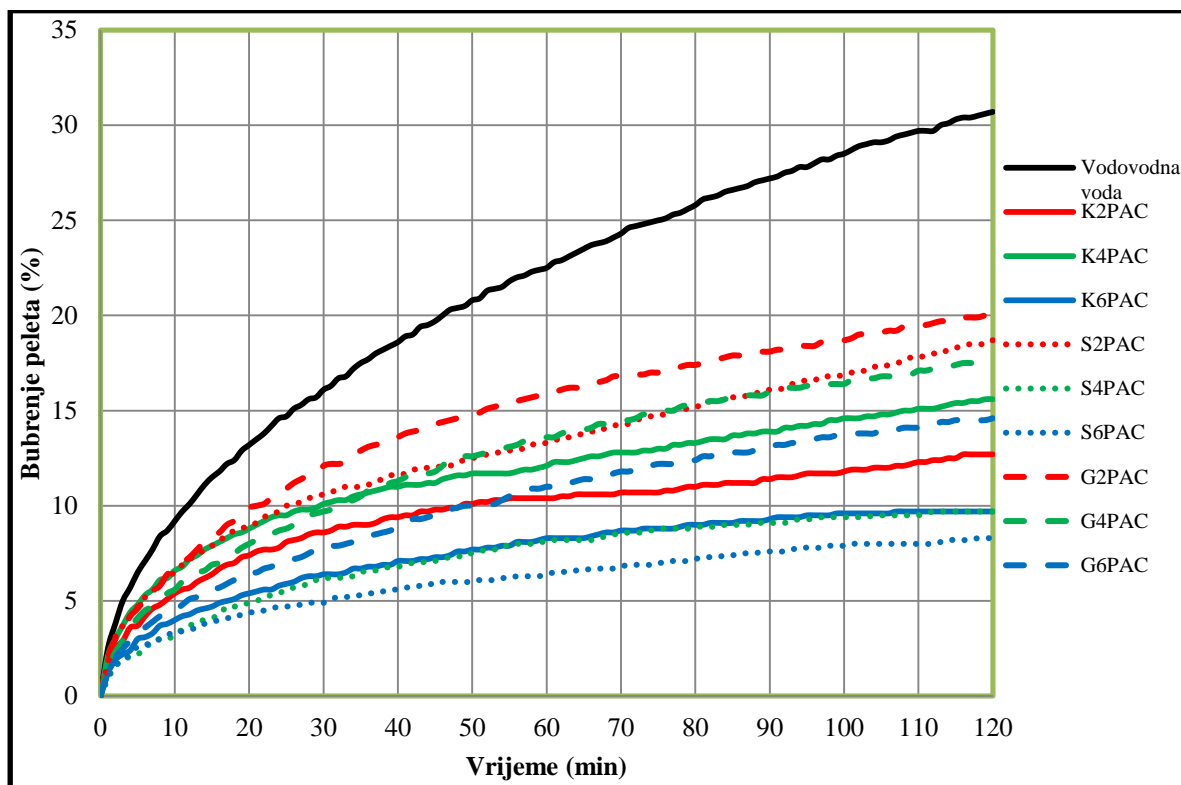
nakon bubrenja u odnosu na pelet koji je bubrio u vodovodnoj vodi, osobito kod viših koncentracija polianionske celuloze. Na presjeku peleta 0Q60M40K vidljiv je tamniji sloj na površini debljine oko 1 mm (slika 3-69). Spomenuti sloj kod peleta 0Q60M40K je nešto tanji i svjetliji u odnosu na sloj koji se formirao tijekom bubrenja peleta 0Q80M20K.



Slika 3-69. Izgled poprečnog presjeka peleta 0Q60M40K nakon bubrenja u kalijskoj isplaci K2PAC

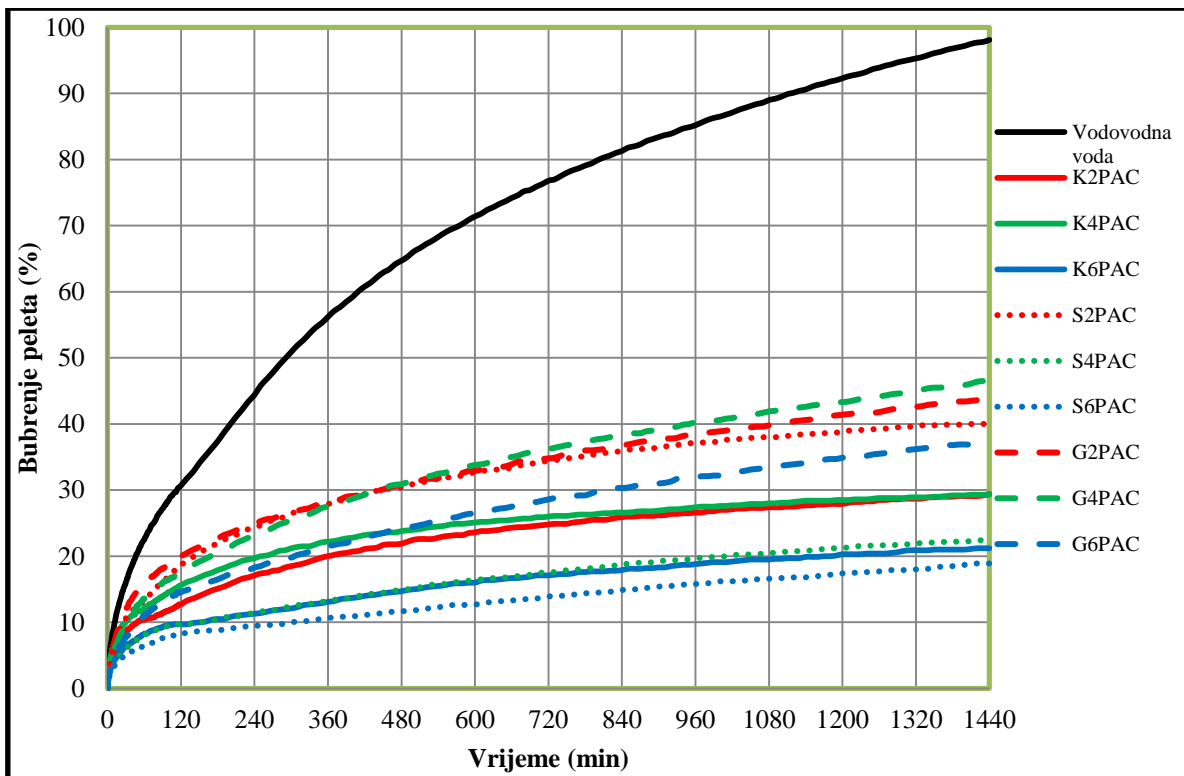
3.4.3.3. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K u inhibiranim isplakama

Podaci dobiveni mjerenjem bubrenja peleta 0Q40M60K u vodovodnoj vodi i različitim vrstama inhibiranih isplaka prikazani su na slikama 3-70 i 3-71, dok su na slici 3-72 prikazani podaci o udjelu vode u peletu nakon bubrenja, masi peleta nakon bubrenja i masi peleta nakon sušenja.



Slika 3-70. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

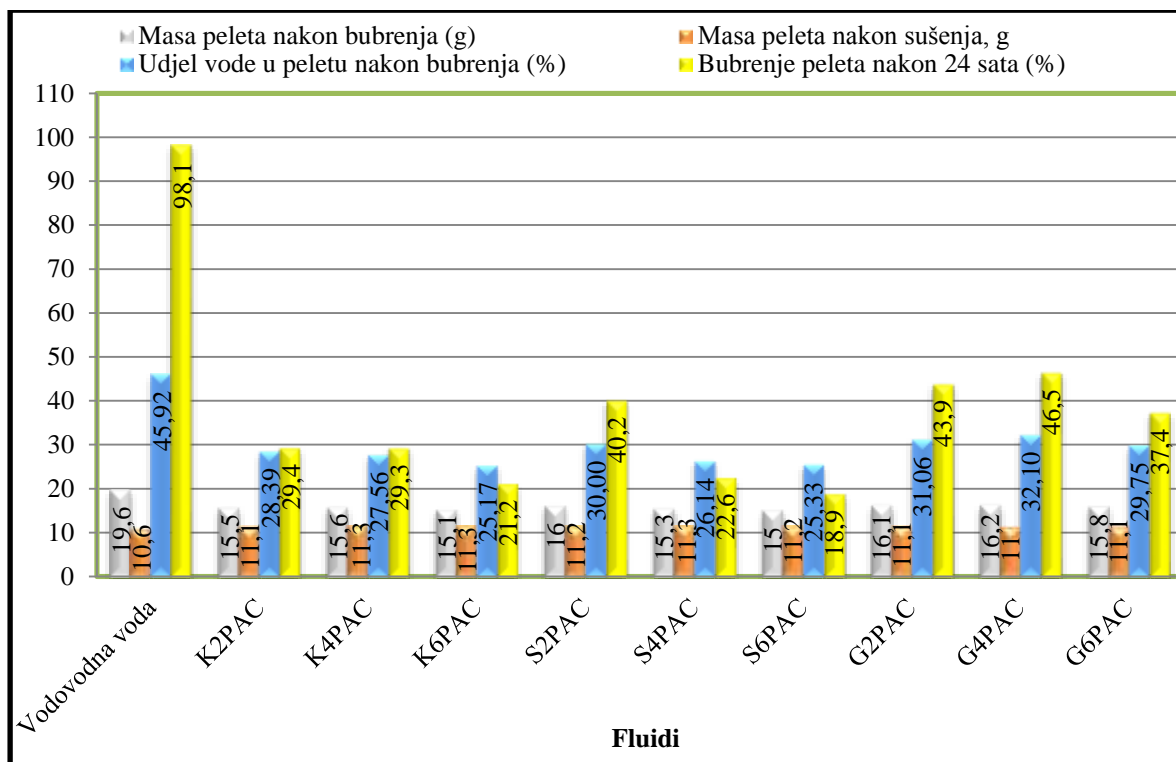
Prema podacima prikazanim na slici 3-70 vidljivo je da je najveće bubrenje peleta od 30,7% izmjereno u vodovodnoj vodi, dok je najmanje (8,3%) dobiveno bubrenjem peleta u slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze. Utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze u isplaci na smanjenje bubrenja peleta vidljiv je u prvih 120 minuta kod bubrenja peleta u gipsnoj i slanoj isplaci, dok su kod bubrenja peleta u kalijskoj isplaci uočena određena odstupanja. Kod bubrenja peleta u vodovodnoj vodi zabilježene su maksimalne vrijednosti bubrenja u početnom periodu i maksimalni intenzitet bubrenja peleta.



Slika 3-71. Rezultati bubrenja peleta 0Q40M60K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Na slici 3-71 prikazani su izmjereni podaci o 24-satnom bubrenju peleta 0Q40M60K u vodovodnoj vodi i inhibiranim isplakama. Ukupno bubrenje peleta 0Q40M60K u vodovodnoj vodi nakon 24 sata iznosilo je 98,1% s daljnjom tendencijom rasta, dok je u inhibiranim isplakama izmjereno bitno manje bubrenje bez vidljivijeg utjecaja povećanja koncentracije polianionske celuloze (osim u slučaju slane isplake). Ukupno bubrenje peleta u inhibiranim isplakama izmjereno nakon 24 sata nalazilo se u rasponu od 29,4 do 43,9% za isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 22,6 do 46,5% za isplake s 4 g/l polianionske celuloze, dok je u inhibiranim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze ta vrijednost najniža i nalazi se u rasponu od 18,9 do 37,4%. Prema podacima prikazanim na slici 3-71, kod viših koncentracija polianionske celuloze u inhibiranim isplakama (4 i 6 g/l) najboljom se u sprječavanju bubrenja pokazala slana isplaka, dok se kod najmanje koncentracije polianionske celuloze najboljom pokazala kalijaska isplaka K2PAC.

Podaci o udjelu vode u peletu nakon bubrenja, te masi peleta nakon bubrenja i nakon sušenja prikazani su na slici 3-72.



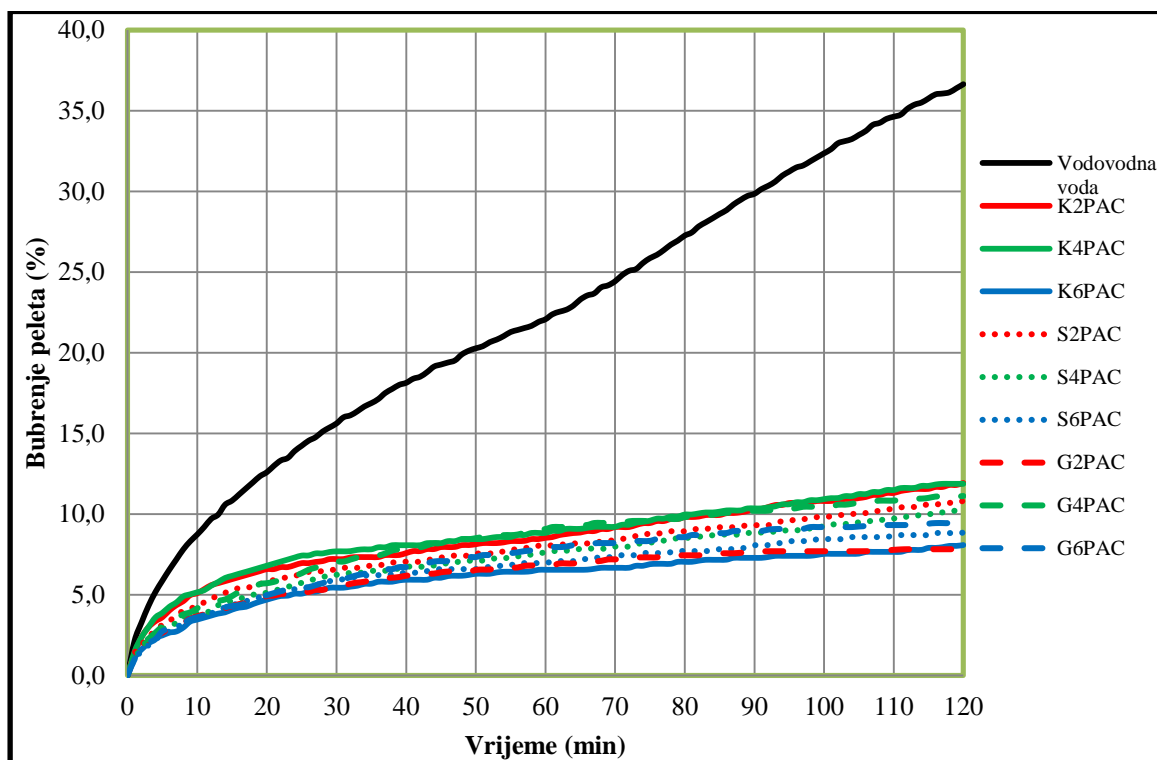
Slika 3-72. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 0Q40M60K

Sukladno maksimalno postignutom bubrenju, i maksimalni udjel vode postignut je kod peleta 0Q40M60K koji je bubrio u vodovodnoj vodi. Ukoliko se želi saznati koliki je stvarni udjel vode dobiven bubrenjem, potrebno je izmjeriti udjel vode od 45,92% umanjiti za vrijednost udjela vode koji je sadržan u praškastom uzorku prije komprimiranja i bubrenja, odnosno za 5,65%. Nakon bubrenja peleta u kalijskoj i slanoj isplaci uočeno je smanjenje udjela vode s povećanjem koncentracije polianionske celuloze u navedenim inhibiranim isplakama. U peletima koji su bubrili u gipsnim isplakama dolazi s povećanjem koncentracije polianionske celuloze u isplaci prvo do povećanja udjela vode, a potom smanjenja udjela vode, što je u skladu s podacima o mjerenju bubrenja peleta 0Q40M60K u gipsnoj isplaci. Udjeli vode u peletima koji su bubrili u inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalaze se u rasponu od 28,39 do 31,06%. U peletima koji su bubrili u inhibiranim isplakama s 4 g/l polianionske celuloze ta vrijednost se nalazila u rasponu od 26,14 do 32,10%, te od 25,17 do 29,75% za isplake sa 6 g/l polianionske celuloze.

Na osnovu vizualnog pregleda peleta nakon bubrenja, te obrade peleta (presijecanje i vaganje) može se zaključiti kako je pelet mekši od peleta 0Q80M20K i 0Q60M40K nakon bubrenja u istoj isplaci. Presijecanjem peleta utvrđeno je da se na vrhu peleta stvorio tanak sloj isplake približne debljine od 0,5 do 1 mm.

3.4.3.4. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K u inhibiranim isplakama

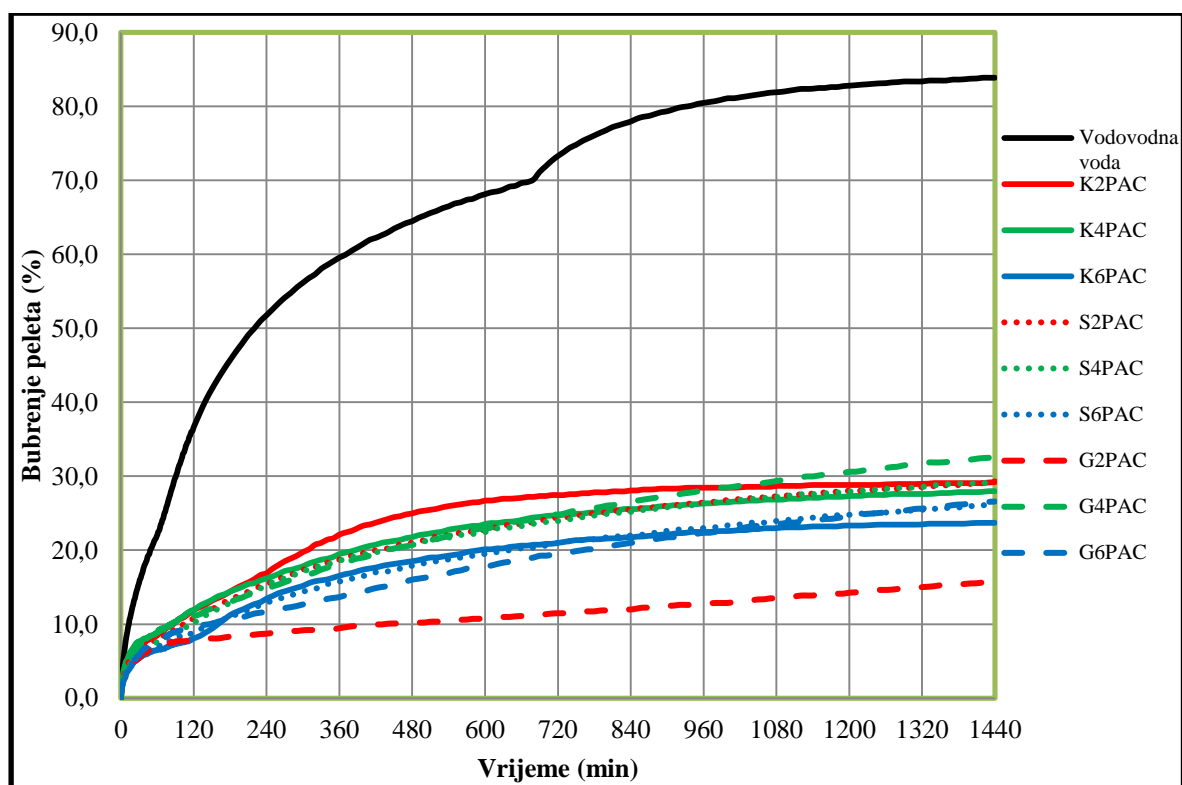
Na slikama 3-73 i 3-74 prikazani su rezultati mjerenja bubrenja peleta 0Q20M80K u vodovodnoj vodi, te u kalijskoj, slanoj i gipsnoj isplaci s različitim koncentracijama polianionske celuloze.



Slika 3-73. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Kao i kod preostala tri peleta bez kvarca i kod peleta 0Q20M80K najveće bubrenje izmjereno je u vodovodnoj vodi, te je ono iznosilo 36,6% (slika 3-73). Nakon 120 minuta ispitivanja bubrenja peleta u različitim inhibiranim isplakama uočeno je da se dobivene vrijednosti bubrenja nalaze u rasponu od 7,8 % (gipsna isplaka s 2 g/l polianionske celuloze) do 11,9% koliko je izmjereno bubrenje peleta u kalijskoj isplaci s 2 i 4 g/l polianionske celuloze. Osim u slučaju slane isplake, kod ostalih inhibiranih isplaka s povećanjem koncentracije polianionske celuloze nije zamijećen trend smanjenja kako ukupnog bubrenja nakon početnog perioda tako i intenziteta bubrenja.

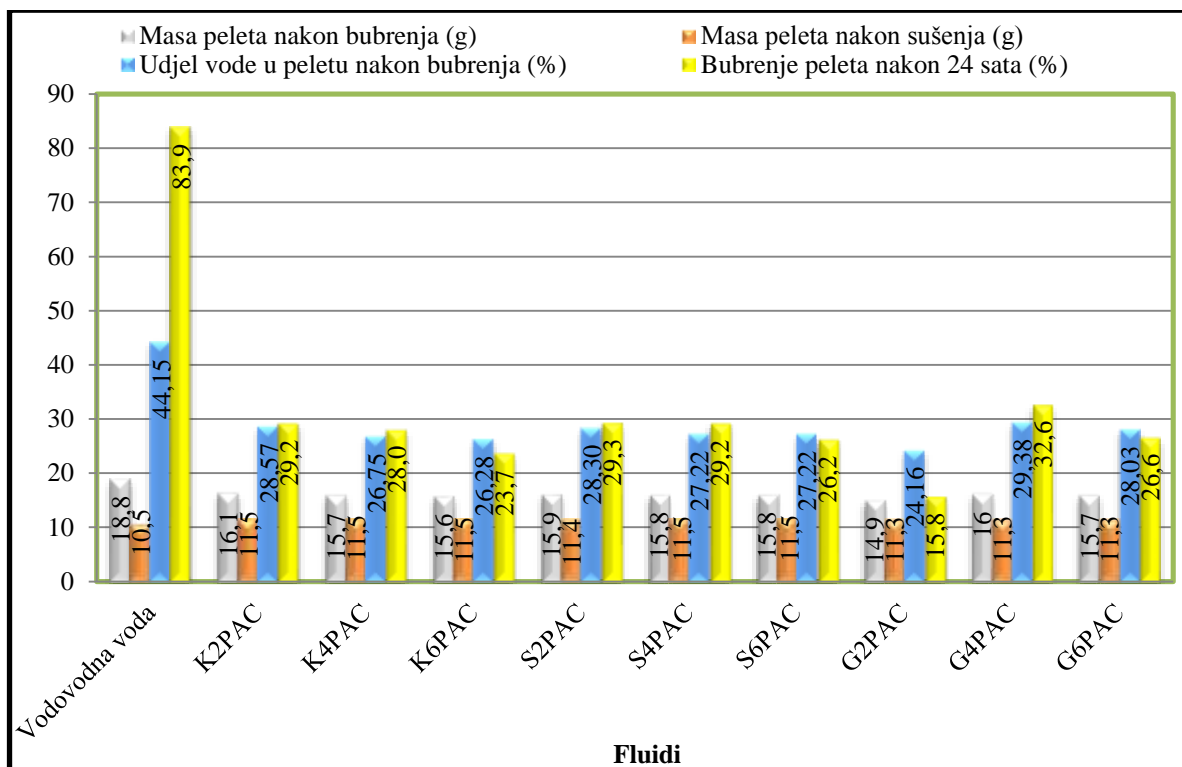
Na osnovu 24-satnog mjerenja bubrenja peleta 0Q20M80K može se zaključiti da je maksimalna vrijednost bubrenja od 83,9% izmjerena u vodovodnoj vodi (slika 3-74).



Slika 3-74. Rezultati bubrenja peleta 0Q20M80K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Ukoliko se usporede isplake s jednakom koncentracijom polianionske celuloze može se zaključiti kako se ukupno bubrenje peleta nakon 24 sata u isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalazi u rasponu od 15,8 do 29,3%, pri čemu je najmanja vrijednost dobivena u isplaci G2PAC. U inhibiranim isplakama s višom koncentracijom polianionske celuloze ukupno bubrenje peleta nalazilo se u rasponu od 28 do 32,6% u isplakama s 4 g/l polianionske celuloze, te od 23,7 do 26,6% u inhibiranim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze, pri čemu je potrebno naglasiti kako su najmanje vrijednosti dobivene bubrenjem peleta u kalijskoj, a najveće u gipsnoj isplaci. Pozitivan utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze u isplaci na smanjenje ukupnog bubrenja peleta vidljiv je kod kalijske i slane isplake, dok je kod gipsne isplake uočena oscilacija vrijednosti.

Slikom 3-75 prikazani su podaci o udjelu vode u peletu nakon bubrenja, te podaci o masi peleta nakon bubrenja i nakon sušenja.



Slika 3-75. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 0Q20M80K

Maksimalni udjel vode u peletu 0Q20M80K nakon bubrenja od 44,15% zabilježen je kod peleta koji je bubrio u vodovodnoj vodi. Međutim ukoliko se želi dobiti stvarni udjel vode dobiven bubrenjem, potrebno je vrijednosti udjela vode u peletu nakon bubrenja koji su prikazani na slici 3-75 umanjiti za vrijednost početnog udjela vode u peletu prije komprimiranja i bubrenja, a koji je iznosio 4,07%. Povećanje koncentracije polianionske celuloze u isplaci pozitivno utječe na smanjenje udjela vode u peletu kod kalijске i slane isplake, što se slaže i s podacima o maksimalnom bubrenju peleta u navedenim isplakama. Kod gipsne isplake uočena je oscilacija vrijednosti. S povećanjem koncentracije polianionske celuloze u gipsnoj isplaci dolazi prvo do povećanja vrijednosti udjela vode u peletu, a potom do smanjenja, što se također dobro slaže s podacima o ukupnom bubrenju peleta izmjenom nakon 24-satnog ispitivanja. Udjel vode u peletu nakon bubrenja u isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalazi se u rasponu od 24,16 do 28,57%, pri čemu je najmanja vrijednost dobivena kod peleta koji je bubrio u gipsnoj isplaci (G2PAC). Kod bubrenja peleta u inhibiranim isplakama s višom koncentracijom polianionske celuloze, udjel vode u peletu nakon bubrenja nalazio se u rasponu od 26,75 do 29,38% za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze, te od 26,28 do 28,03% za inhibirane isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Izmjerene mase peleta nakon bubrenja smanjuju se s povećanjem koncentracije

polianionske celuloze kod kalijске i slane isplake (kod gipsne isplake zabilježena je oscilacija vrijednosti koja je u skladu s oscilacijom bubrenja i udjela vode u peletu nakon bubrenja). Za razliku od mase peleta nakon bubrenja, povećanje koncentracije polianionske celuloze nema značajniji utjecaj na promjenu mase peleta nakon sušenja, odnosno izmjerene vrijednosti su konstantne za pojedinu isplaku.

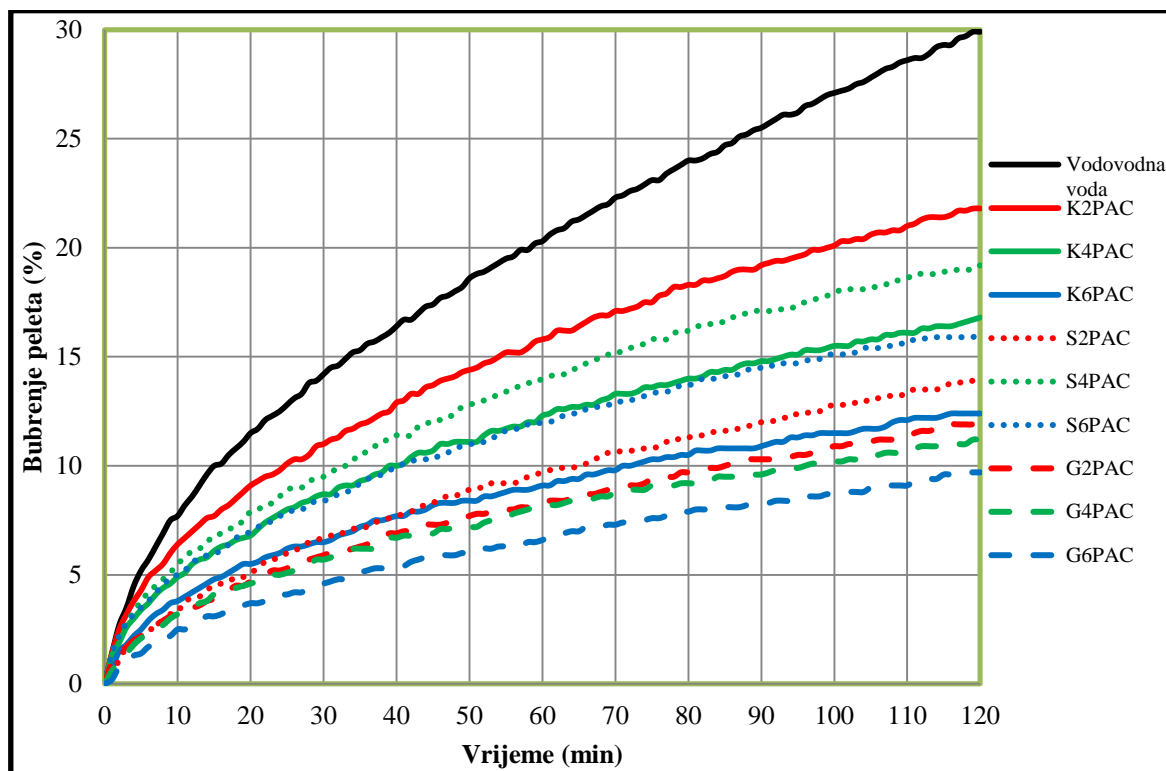
Vizualnim pregledom te obradom peleta nakon mjerenja bubrenja zaključeno je kako je pelet 0Q20M80K mekši nakon bubrenja u odnosu na ostale pelete bez kvarca, bilo da se radi o vodovodnoj vodi ili inhibiranim isplakama. Također je uočeno kako se tvrdoća peleta u svim isplakama povećava s povećanjem koncentracije polianionske celuloze. Presijecanjem peleta uočen je tanki tamniji sloj zahvaćen isplakom debljine približno 0,05 do 1 mm i to kod peleta koji su bubrili u kalijскоj i slanoj isplaci, dok je kod peleta koji je bubrio u gipsnoj isplaci (G2PAC) taj sloj potpuno izostao ili je vrlo tanak (slika 3-76).



Slika 3-76. Izgled poprečnog presjeka peleta 0Q20M80K nakon bubrenja u gipsnoj isplaci G2PAC

3.4.3.5. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K u inhibiranim isplakama

Na slikama 3-77 i 3-78 prikazani su rezultati mjerenja bubrenja peleta 10Q80M10K tijekom početnih 120 minuta ispitivanja te tijekom 24-satnog ispitivanja. Mjereno je bubrenje peleta u vodovodnoj vodi te u inhibiranim isplakama s različitim koncentracijama polianionske celuloze.

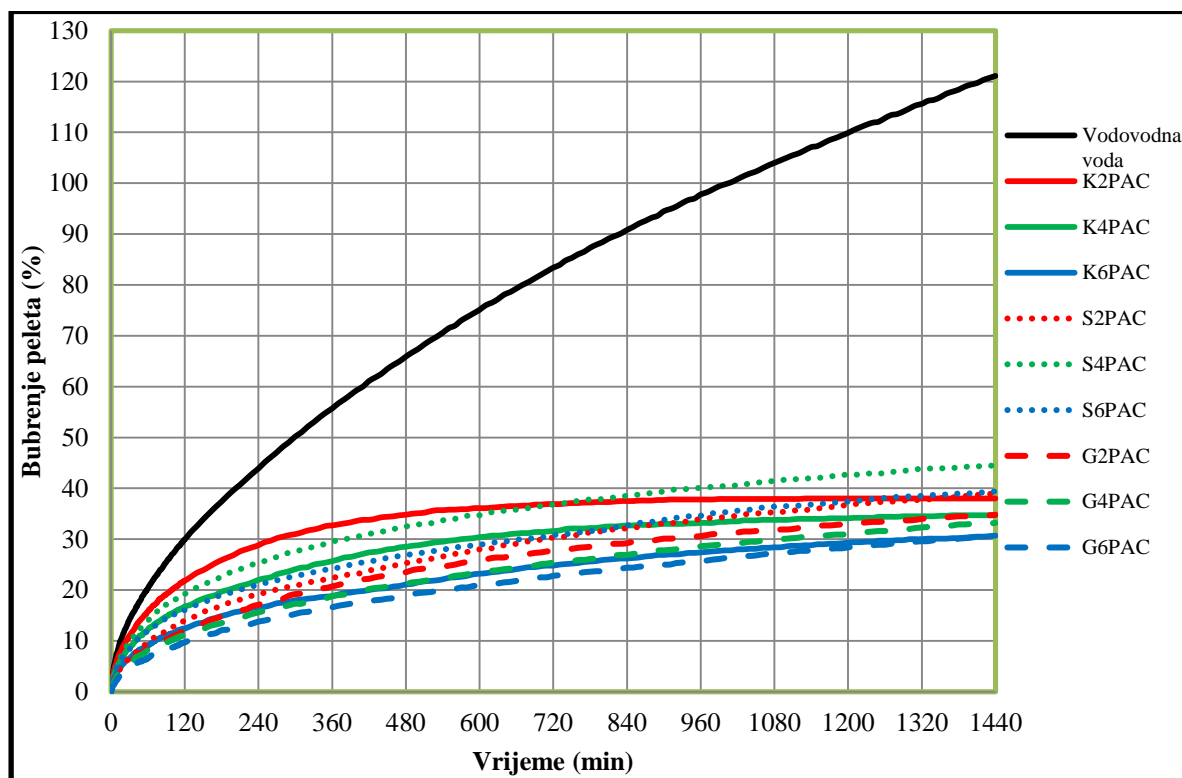


Slika 3-77. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Prema rezultatima prikazanim na slici 3-77 može se zaključiti kako je u početnom periodu, pelet 10Q80M10K najviše bubrio u vodovodnoj vodi pri čemu je izmjereno bubrenje od 29,9%. Izmjereno bubrenje peleta nakon 120 minuta u inhibiranim isplakama bilo je manje u odnosu na vrijednost dobivenu bubrenjem u vodovodnoj vodi, pri čemu je najmanji intenzitet kao i najmanje ukupno bubrenje peleta na kraju početnog perioda zabilježeno u gipsnoj isplaci. Utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje ukupnog bubrenja i intenziteta bubrenja uočen je kod kalijске i gipsne isplake, dok je kod slane isplake uočena oscilacija mjerenih vrijednosti tijekom ispitivanja (slika 3-77). Najmanje bubrenje

nakon 120 minuta ispitivanja i najmanji intenzitet bubrenja peleta 10Q80M10K zabilježen je u gipsnoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze.

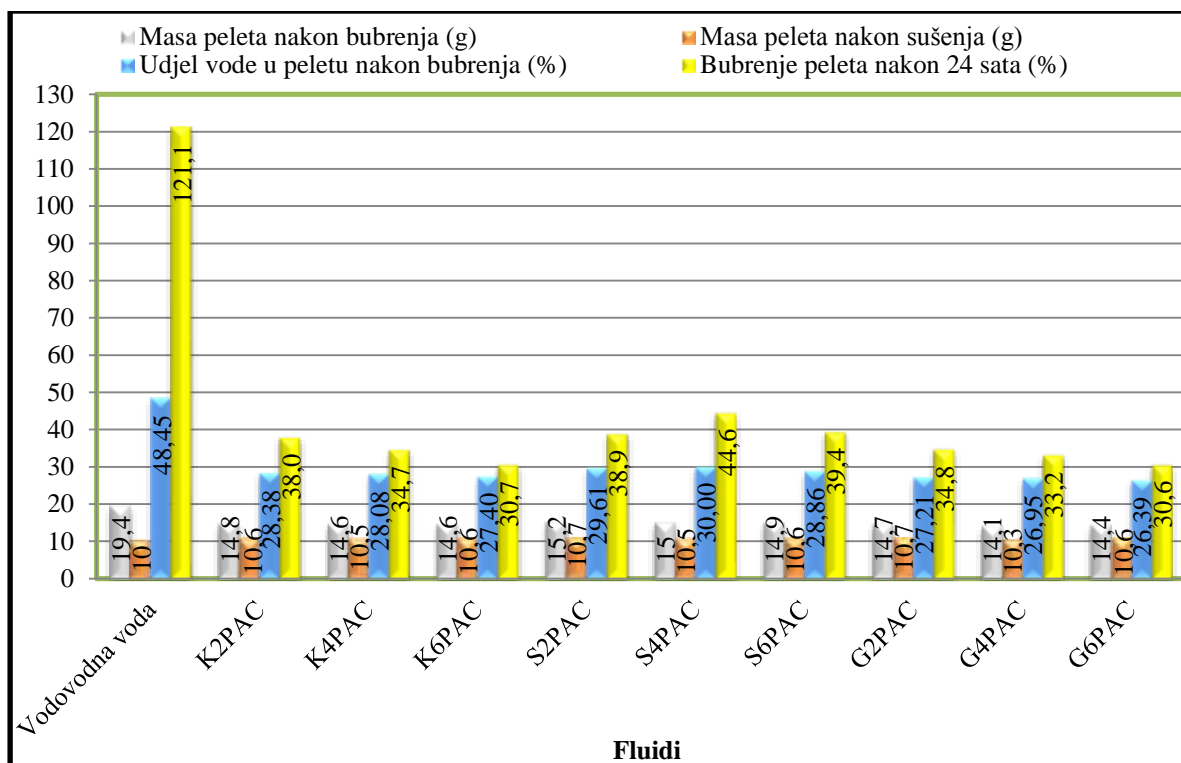
Kao što je i očekivano, najveće bubrenje peleta 10Q80M10K tijekom 24 sata zabilježeno je u vodovodnoj vodi, pri čemu je zabilježeno povećanje debljine peleta od 1,21 puta u odnosu na debljinu peleta izmjerenu na početku ispitivanja (slika 3-78).



Slika 3-78. Rezultati bubrenja peleta 10Q80M10K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Sukladno trendu uočenom u početnom periodu, i u nastavku ispitivanja kod kalijске i gipsne isplake uočeno je smanjenje intenziteta i ukupne vrijednosti bubrenja s povećanjem koncentracije polianionske celuloze, dok je odstupanje od navedenog pravila zabilježeno kao i u početnom periodu kod slane isplake. Ukupno bubrenja za inhibirane isplake koje sadržavaju polianionsku celulozu u koncentraciji od 2 g/l nalazilo se u rasponu od 34,8 do 38,9%, kod inhibiranih isplaka s 4 g/l polianionske celuloze od 33,2 do 44,6%, dok se kod isplaka sa 6 g/l polianionske celuloze vrijednost ukupnog bubrenja nakon 24-satnog ispitivanja nalazila u rasponu od 30,6 do 39,4%. Kod svih koncentracija polianionske celuloze najmanje bubrenje zabilježeno je kod gipsne isplake, a najveće kod slanih isplaka. Također treba napomenuti kako kod nijednog ispitivanog fluida nije zabilježeno postizanje maksimalnog bubrenja nakon 24-satnog ispitivanja (slika 3-78).

Na slici 3-79 prikazani su podaci o udjelu vode u peletu nakon 24-satnog bubrenja peleta u vodovodnoj vodi i inhibiranim isplakama, te podaci o masi peleta nakon bubrenja te nakon sušenja.



Slika 3-79. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 10Q80M10K

Izmjereni udjel vode u praškastom materijalu za izradu peleta 10Q80M10K, neposredno prije komprimiranja i bubrenja iznosio je 8,87%. Udjeli vode nakon bubrenja peleta u različitim fluidima prikazani su na slici 3-79, gdje je vidljivo kako je najveća vrijednost zabilježena kod peleta koji je bubrio u vodovodnoj vodi (48,45%). Stvarni udjeli vode u peletu dobiveni bubrenjem manji su od vrijednosti prikazanih na slici 3-79, zbog već spomenutog početnog udjela vode u peletu. Kod peleta koji su bubrili u inhibiranim isplakama zabilježene su niže vrijednosti udjela vode u odnosu na vrijednost dobivenu bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi, s tendencijom smanjenja udjela vode s povećanjem koncentracije polianionske celuloze. Jedino odstupanje od spomenutog trenda vidljivo je kod peleta koji je bubrio u slanoj isplaci, gdje s povećanjem koncentracije polianionske celuloze dolazi prvotno do povećanja udjela vode, a potom do smanjenja, što se slaže i s rezultatima bubrenja peleta u istoj vrsti inhibirane isplake. Udjeli vode u peletu nakon bubrenja nalazili su se u rasponu od 27,21 do 29,61% za inhibirane isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 26,95

do 30% za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze, dok su najmanje vrijednosti udjela vode od 26,39 do 28,86% zabilježene nakon bubrenja u inhibiranim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze. Najmanje vrijednosti udjela vode za sve koncentracije polianionske celuloze zabilježene su nakon bubrenja peleta u gipsnoj isplaci, dok su najveće dobivene kod slane isplake.

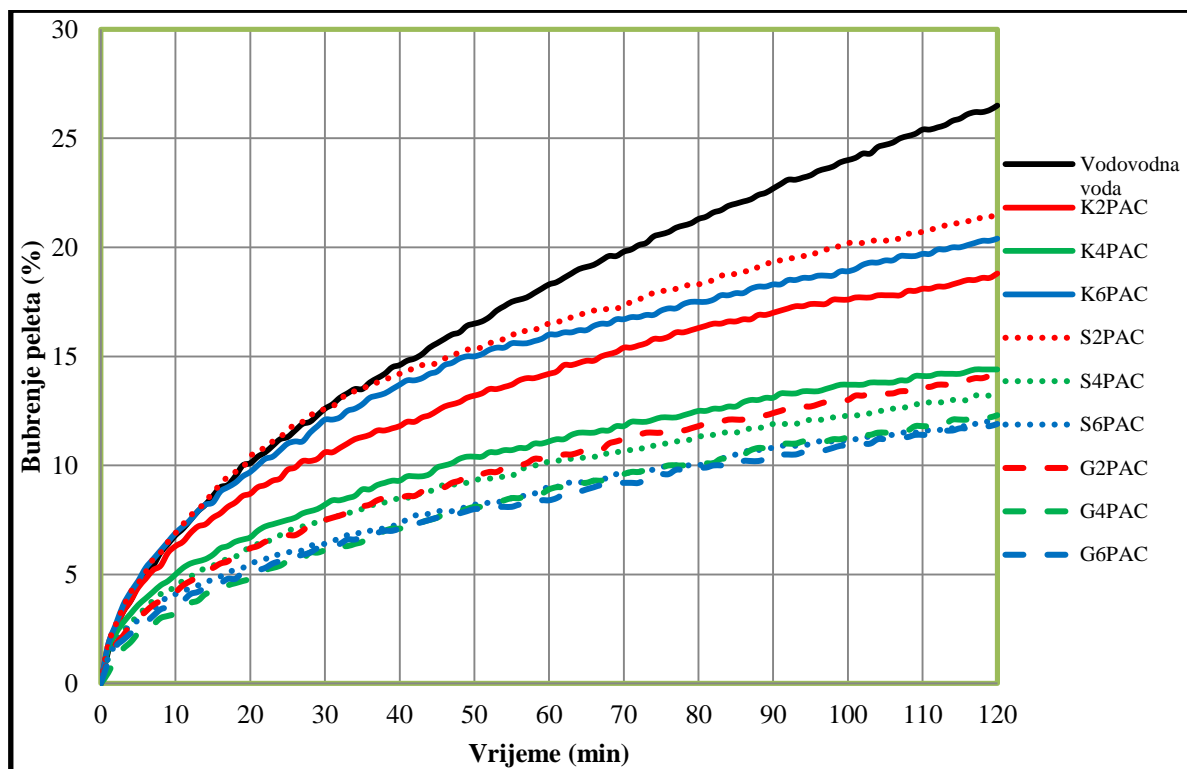
Na osnovu obrade peleta nakon bubrenja te vizualnog pregleda može se zaključiti kako pelet 10Q80M10K nakon bubrenja u inhibiranim isplakama postaje osjetno tvrdi u odnosu na pelet koji je bubrio u vodovodnoj vodi. Također s povećanjem koncentracije polianionske celuloze vidljivo je i povećanje tvrdoće peleta nakon bubrenja, osobito nakon bubrenja u gipsnoj isplaci. Kod peleta koji su bubrili u vodovodnoj vodi te kalijskoj i gipsnoj isplaci uočena je promjena tvrdoće peleta s visinom, odnosno pelet od vrha prema dnu postaje tvrdi. Isto kao i kod bubrenja peleta 0Q80M20K i kod peleta 10Q80M10K vidljiv je tamniji sloj debljine 1 do 1,5 mm (slika 3-80). Kod bubrenja peleta u pojedinim isplakama poput K6PAC i G6PAC zamijećeno je da je pelet nakon bubrenja jako tvrd, osobito u donjoj zoni gdje se i djelomično osipa (poput vlažnog odlamanja komada peleta).



Slika 3-80. Izgled poprečnog presjeka peleta 10Q80M10K nakon bubrenja u kalijskoj isplaci K4PAC

3.4.3.6. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K u inhibiranim isplakama

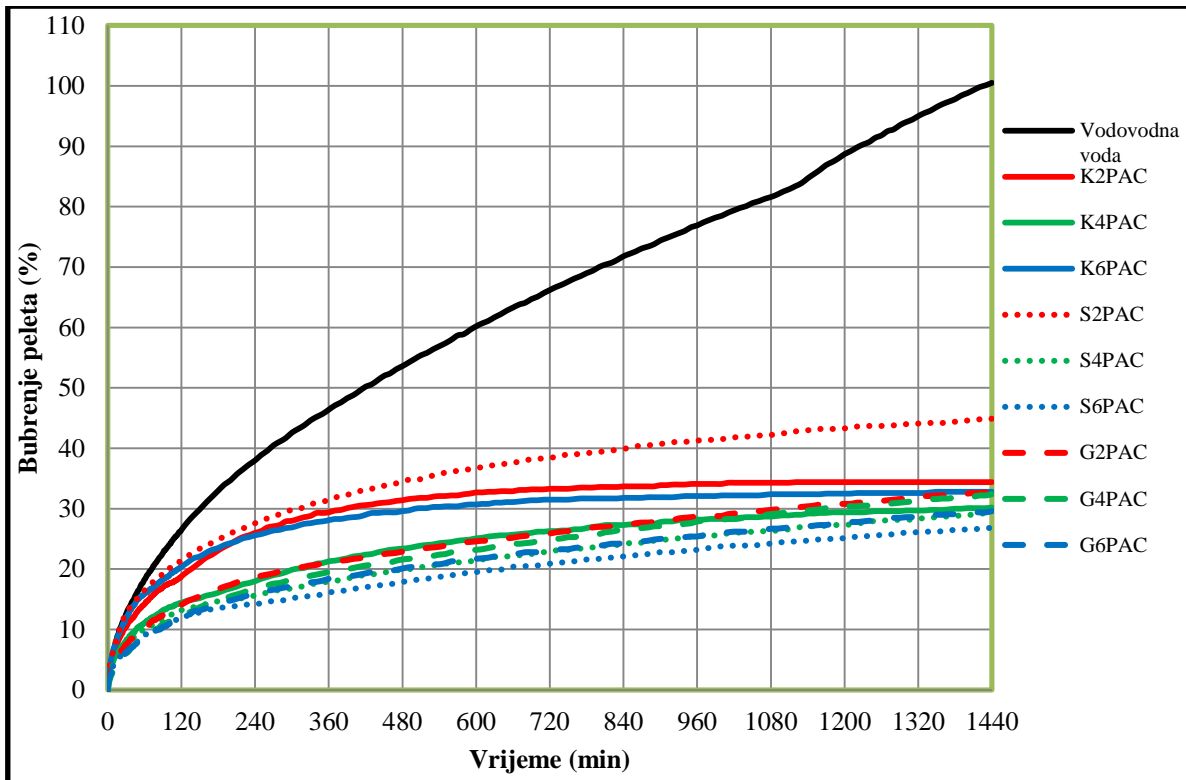
Bubrenje peleta 10Q60M30K u vodovodnoj vodi i inhibiranim isplakama s različitim koncentracijama polianionske celuloze prikazano je na slikama 3-81 i 3-82.



Slika 3-81. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Iz podataka prikazanih na slici 3-81 vodljivo je da je najveće bubrenje peleta 10Q60M30K nakon 120 minuta ispitivanja (26,5%) i najveći intenzitet bubrenja tijekom navedenog vremena zabilježen u vodovodnoj vodi. Izmjerena vrijednost bubrenja peleta u različitim inhibiranim isplakama manja je u odnosu na bubrenje ostvareno u vodovodnoj vodi. Na osnovu usporedbe podataka o bubrenju peleta 10Q60M30K nakon 120 minuta u različitim inhibiranim isplakama može se zaključiti da je utjecaj povećanje koncentracije polianionske celuloze na smanjenje bubrenja peleta vidljiv u gipsnoj te naročito u slanoj isplaci, dok je u kalijskoj isplaci uočena oscilacija vrijednosti. Najmanje bubrenje peleta na kraju početnog perioda zabilježeno je u gipsnoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze (G6PAC).

Podaci o bubrenju peleta 10Q60M30K u različitim fluidima tijekom 24-satnog ispitivanja prikazani su na slici 3-82.

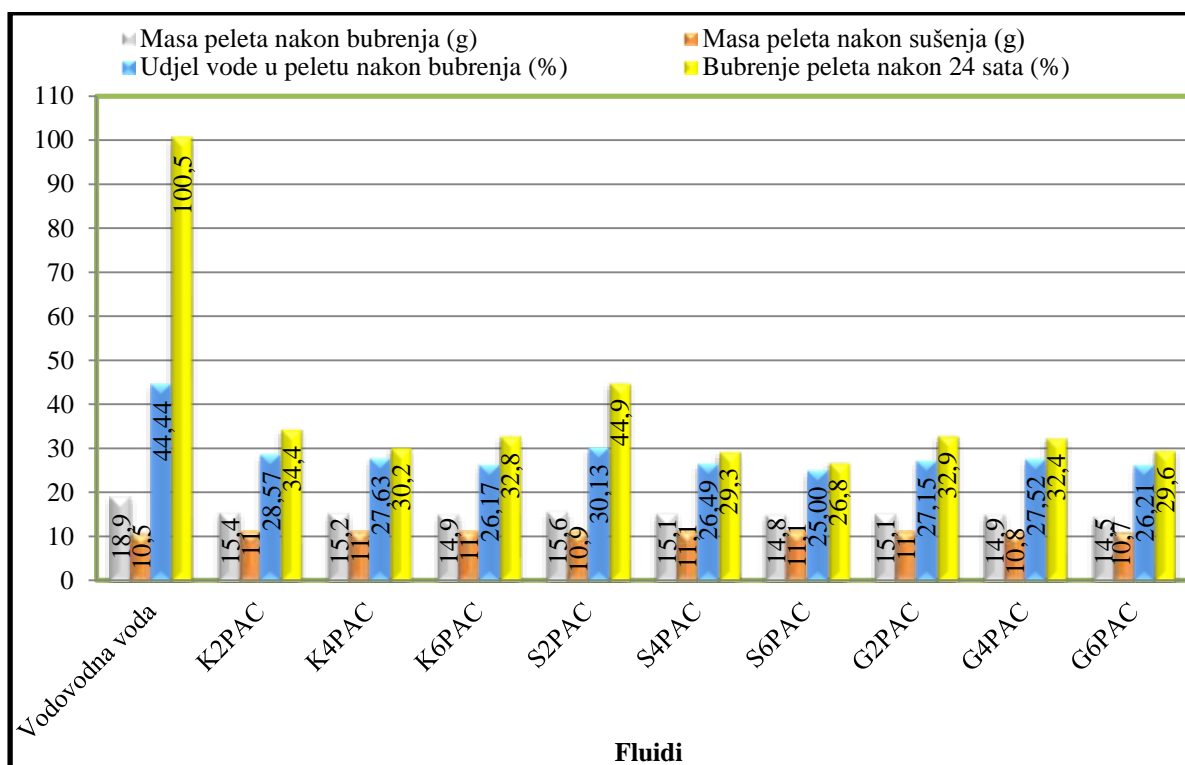


Slika 3-82. Rezultati bubrenja peleta 10Q60M30K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Kao što je i očekivano najveće bubrenje od približno 100% zabilježeno je kod bubrenja peleta u vodovodnoj vodi, dok su izmjerene vrijednosti bubrenja peleta u inhibiranim isplakama znatno niže. Iz slike 3-82 vidljivo je da je samo bubrenjem peleta u kalijskoj isplaci došlo do postizanja maksimalnog bubrenja unutar vremena trajanja ispitivanja, dok je u drugim ispitivanim fluidima uočena tendencija daljnjeg bubrenja i nakon isteka vremena ispitivanja (24 sata). Međutim potrebno je naglasiti kako je intenzitet bubrenja u drugoj polovici ispitivanja, osobito pred sam kraj daleko manji od intenziteta bubrenja zabilježenog u početnom periodu (početnih 120 minuta ispitivanja). Kao i u početnom periodu tako i u nastavku ispitivanja vidljiv je utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje intenziteta bubrenja peleta i ukupnog bubrenja za ispitivanja provedena u slanoj i gipsnoj isplaci, dok je u kalijskoj isplaci ponovno uočena oscilacija izmjerenih vrijednosti. Maksimalno bubrenje kod peleta koji su bubrili u isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalazilo se u rasponu od 32,9 do 44,9%, za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze od 29,3 do 32,4% dok se bubrenje peleta u inhibiranim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze nalazilo u rasponu od 26,8 do 32,8%.

Dobivene vrijednosti udjela vode u peletu 10Q60M30K nakon bubrenja u vodovodnoj vodi i različitim inhibiranim isplakama prikazane su na slici 3-83. Osim podataka

o udjelu vode u peletu nakon bubrenja, na slici su prikazani i podaci o masi peleta nakon bubrenja, kao i masi peleta nakon sušenja.



Slika 3-83. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 10Q60M30K

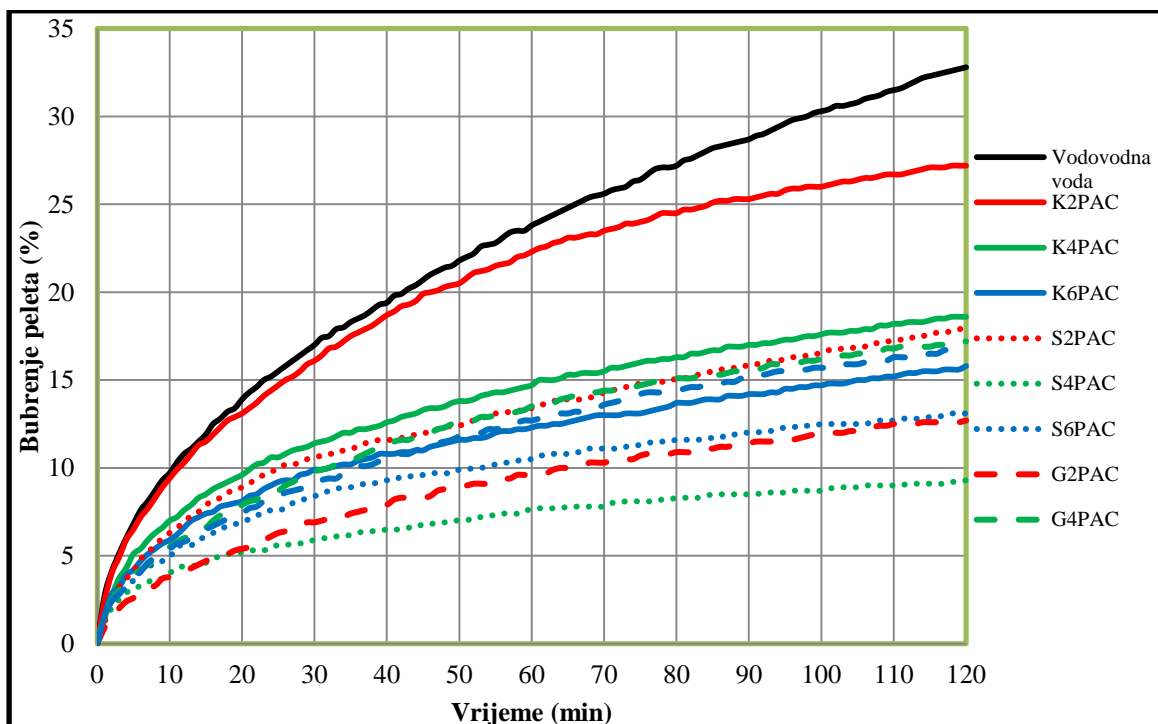
U skladu s maksimalnim bubrenjem peleta koje je zabilježeno u vodovodnoj vodi, i maksimalni udjel vode nakon bubrenja zabilježen je kod ispitivanja u istom fluidu te je iznosio 44,44%. Nakon bubrenja peleta 10Q60M30K u inhibiranim isplakama s različitom koncentracijom polianionske celuloze dobiveni su manji udjeli vode u odnosu na vrijednost zabilježenu u vodovodnoj vodi, s tendencijom smanjenja udjela vode s povećanjem koncentracije polianionske celuloze. Kod inhibiranih isplaka s 2 g/l polianionske celuloze udjeli vode nalazili su se u rasponu od 27,15 do 30,13%, za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze od 26,49 do 27,63%, dok se vrijednost udjela vode nakon bubrenja peleta u inhibiranim isplakama s najvećom koncentracijom polianionske celuloze nalazila u rasponu od 25 do 26,21%.

Obradom peleta nakon bubrenja, te vizualnim pregledom uočeno je kako pelet nakon bubrenja u inhibiranim isplakama srednje tvrd do tvrd, s tendencijom povećanja tvrdoće s povećanjem koncentracije polianionske celuloze. Najtvrdi peleti nakon bubrenja bili su oni koji su bubrili u gipsnim isplakama. Pregledom vertikalnog presjeka peleta uočeno je

postojanje tamnijeg sloja na vrhu približne debljine od 0,5 do 1 mm (navedeni sloj nešto je slabije vidljiv kod peleta koji su bubrili u gipsnoj isplaci). U odnosu na peleta 10Q80M10K pelet 10Q60M30K kod bubrenja u istim isplakama ima nešto manju tvrdoći i slabije izraženi tamniji sloj u gornjoj zoni peleta.

3.4.3.7. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K u inhibiranim isplakama

Podaci o bubrenju peleta 10Q40M50K tijekom prvih 120 minuta ispitivanja (početni period) te tijekom 24-satnog ispitivanja prikazani su na slikama 3-84 i 3-85. Prikazani podaci odnose se na bubrenje peleta u vodovodnoj vodi te kalijskoj, slanoj te gipsnoj isplaci s različitim koncentracijama polianionske celuloze.

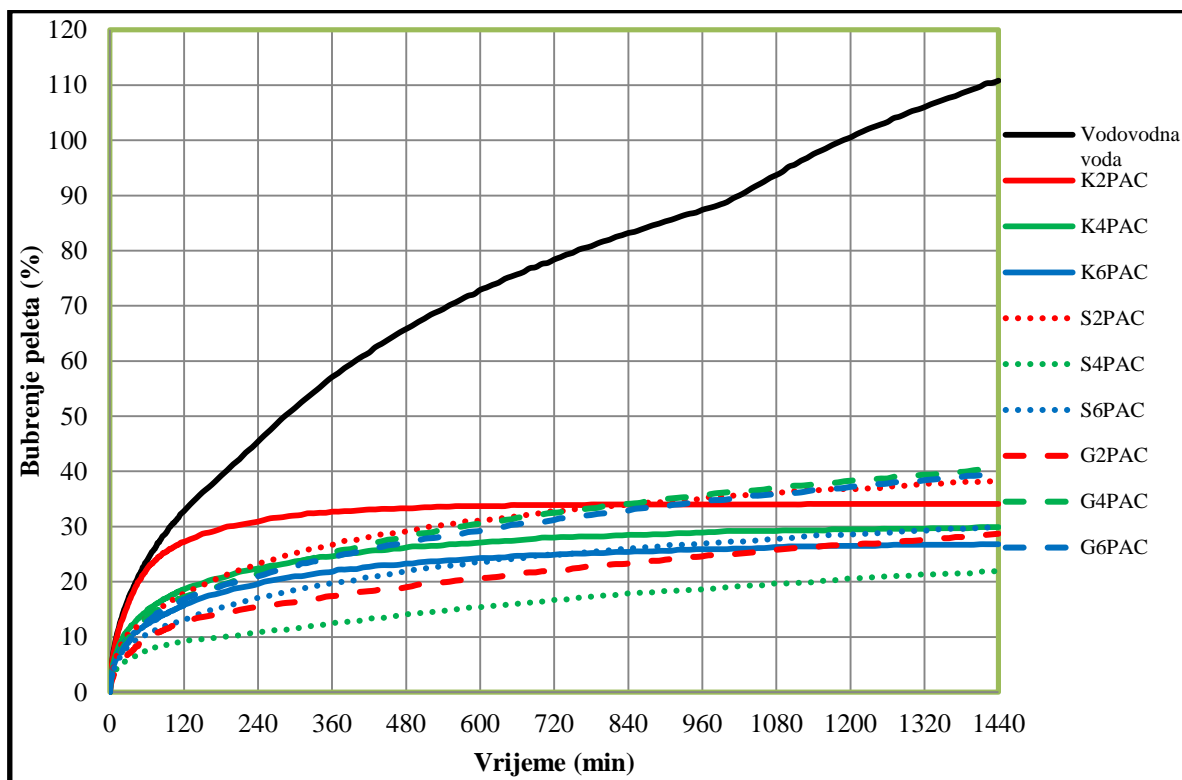


Slika 3-84. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Iz slike 3-84 vidljivo je da je najveće bubrenje peleta od 32,8% zabilježeno u vodovodnoj vodi, dok je najmanja vrijednost bubrenja izmjerena za pelet 10Q40M50K koji je bubrio u slanoj isplaci s koncentracijom polianionske celuloze od 4 g/l. Već nakon približno početnih dvije minute ispitivanja vidljiv je utjecaj inhibiranih isplaka na smanjenje intenziteta bubrenja (od navedenog trenda odstupa jedino kalijaska isplaka s 2 g/l polianionske celuloze

kod koje je izmjereni intenzitet bubrenja peleta u prvih 40 minuta približno jednak vrijednostima dobivenim bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi), pri čemu je samo kod kalijске isplake vidljiv utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje bubrenja.

Rezultati 24-satnog mjerenja bubrenja peleta 10Q40M50K u različitim inhibiranim isplakama i vodovodnoj vodi prikazani su na slici 3-85.

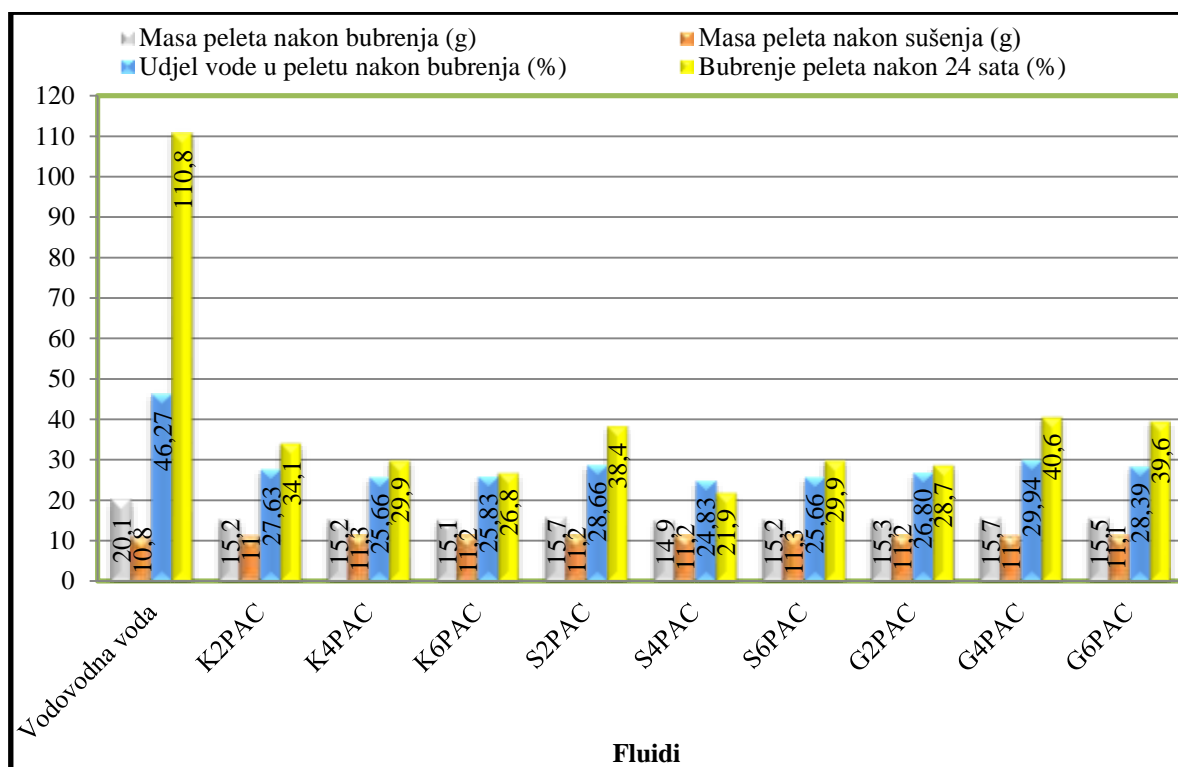


Slika 3-85. Rezultati bubrenja peleta 10Q40M50K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Sukladno očekivanjima i u nastavku ispitivanja najveća vrijednost bubrenja dobivena je kod bubrenja peleta 10Q40M50K u vodovodnoj vodi. Tijekom bubrenja peleta u vodovodnoj vodi došlo je do povećanja debljine peleta u odnosu na izmjerenu vrijednost na početku bubrenja od 1,11 puta. Kao i u početnom periodu tako i tijekom cijelog ispitivanja utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje bubrenja vidljiv je samo kod kalijске isplake, dok su u ostalim inhibiranim isplakama zabilježene oscilacije dobivenih vrijednosti, odnosno dobiveni rezultati ne slijede očekivani trend. Ukoliko se usporede rezultati 24-satnog bubrenja peleta 10Q40M50K u različitim vrstama inhibiranih isplaka s jednakom koncentracijom polianionske celuloze, može se zaključiti da se izmjereno bubrenje peleta za inhibirane isplake s 2 g/l polianionske celuloze nalazi u rasponu od 28,7 do 38,4%,

za inhibirane isplaka s 4 g/l polianionske celuloze od 21,9 do 40,6% te za inhibirane isplake sa 6 g/l polianionske celuloze od 26,8 do 39,6%.

Tijekom ispitivanja određen je i udjel vode u peletu nakon bubrenja, a dobiveni rezultati prikazani su na slici 3-86.



Slika 3-86. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 10Q40M50K

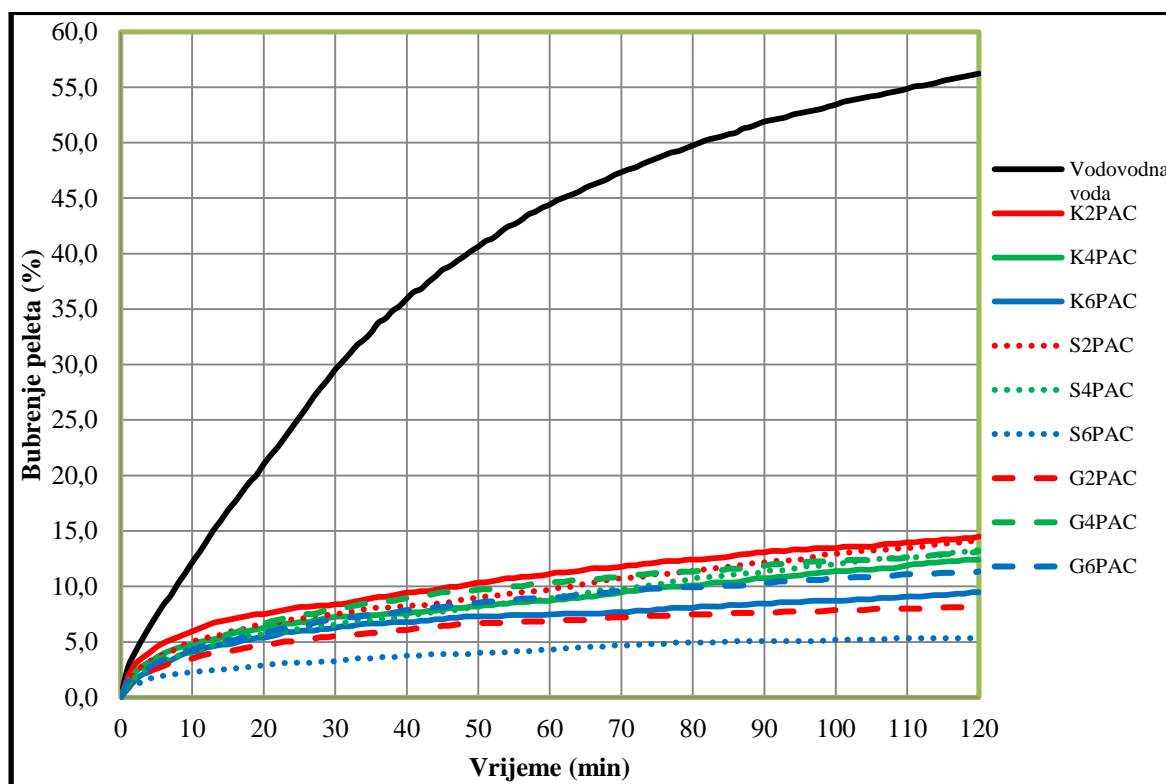
Na temelju podataka prikazanih na slici može se zaključiti da je najveći udjel vode od 46,27% dobiven bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi, dok su izmjerene vrijednosti udjela vode u peletima nakon bubrenja u inhibiranim isplakama znatno manje. Iz slike je vidljivo da se udjel vode nakon bubrenja nalazi u rasponu od 26,8 do 28,66% za inhibirane isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 24,83 do 29,94% za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze te od 25,66 do 28,39% za isplake s najvećom koncentracijom polianionske celuloze (6 g/l polianionske celuloze). Ukoliko se usporede vrijednosti udjela vode dobivenog bubrenjem pelet (slika 3-86) s maksimalnim bubrenjem nakon 24 sata zabilježenim kod pojedine isplake (slika 3-85), može se zaključiti kako se s promjenom koncentracije polianionske celuloze trendovi za jednu i drugu vrijednost poklapaju. Tako npr. kod kalijске isplake dolazi do smanjenja udjela vode i maksimalnog bubrenja s povećanjem koncentracije polianionske celuloze, dok je kod npr. slane isplake uočen trend smanjenja pa potom povećanja

maksimalnog bubrenja s povećanjem koncentracije polianionske celuloze u isplaci što prati i trend promjene udjela vode u peletu nakon bubrenja. Za dobivanje stvarnog udjela vode potrebno je prikazane vrijednosti ukupnog udjela vode umanjiti za vrijednost početnog udjela vode u peletu prije bubrenja, odnosno za 5,74%.

Vizualnim pregledom te obradom peleta nakon bubrenja uočeno je da je pelet koji je bubrio u vodovodnoj vodi dosta mekan, dok su peleti koji su bubrili u inhibiranim isplakama mekani do srednje tvrdi. Kao i kod prethodnih peleta s 10%-tnim udjelom kvarca i kod peleta 10Q40M50K nakon bubrenja u inhibiranim isplakama vidljiv je tanki tamniji sloj na vrhu peleta debljine 0,5 do 1 mm.

3.4.3.8. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K u inhibiranim isplakama

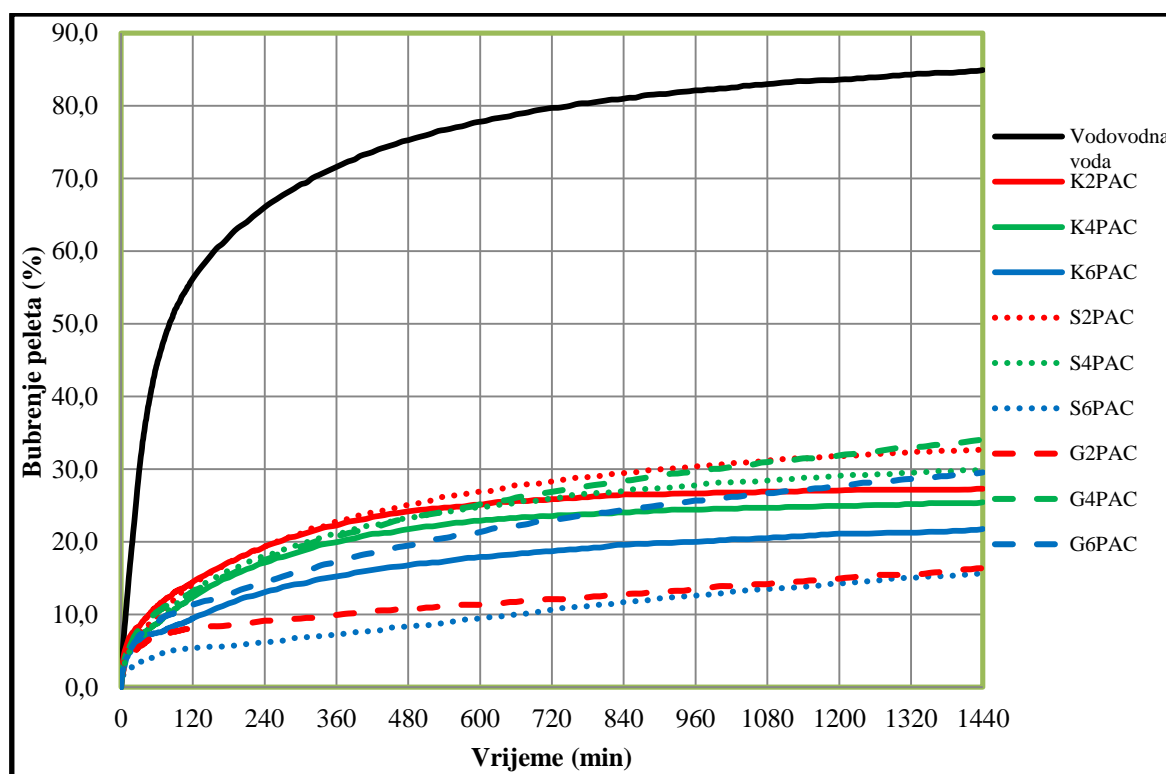
Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K nakon prvih 120 minuta ispitivanja prikazani su na slici 3-87, dok je bubrenje peleta tijekom 24 sata prikazano na slici 3-88.



Slika 3-87. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Iz slike 3-87 vidljivo je da je daleko najveće bubrenje peleta od 56,2% zabilježeno u vodovodnoj vodi. Utjecaj inhibiranih isplaka na smanjenje intenziteta bubrenja vidljiv je već nakon samo početka ispitivanja, odnosno u prvih dvije do tri minute. Osim smanjenja intenziteta bubrenja peleta inhibirane isplake su djelovale i na smanjenje ukupnog bubrenja izmjenjenog na kraju početnog perioda, a koje se nalazilo u rasponu od 14,5% (izmjereno u kalijskoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze) do 5,3% (izmjereno u slanoj isplaci 2 g/l polianionske celuloze). Utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje intenziteta bubrenja peleta i ukupnog bubrenja izmjenjenog nakon 120 minuta ispitivanja vidljiv je u kalijskoj i slanoj isplaci, dok je u gipsnoj isplaci zamijećena oscilacija vrijednosti (slični trend ponašanja gipsne isplake zabilježen je kod bubrenja peleta 10Q40M50K).

Maksimalno ukupno bubrenje peleta 10Q20M70K nakon 24-satnog ispitivanja od 84,9% izmjereno je u vodovodnoj vodi (slika 3-88).

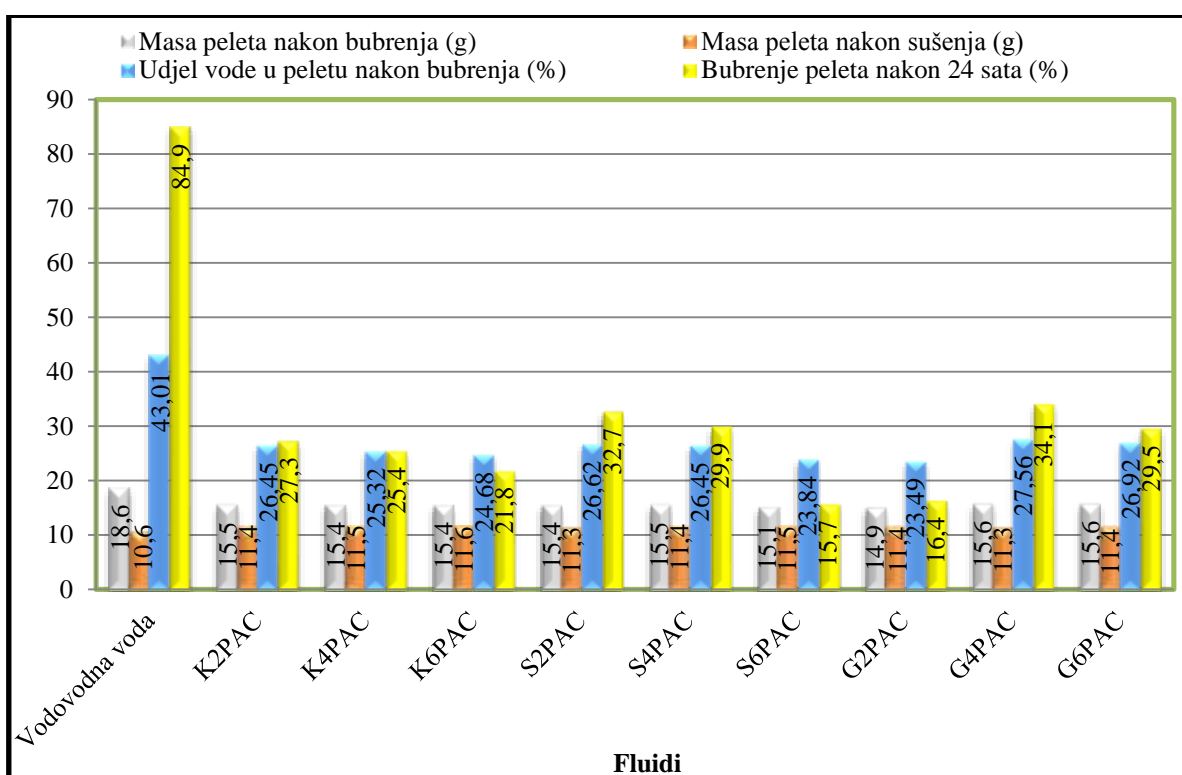


Slika 3-88. Rezultati bubrenja peleta 10Q20M70K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Iz usporedbe bubrenja peleta u vodovodnoj vodi nakon 120 minuta ispitivanja te nakon 24 sata, vidljivo je da je najveći dio ukupnog bubrenja postignut već u početnom periodu. Maksimalno bubrenje peleta 10Q20M70K nakon 24 sata u različitim inhibiranim isplakama manje je u odnosu na bubrenje peleta postignuto u vodovodnoj vodi. Nakon 24-

satnog ispitivanja ukupno bubrenje nalazilo se u rasponu od 16,4 do 32,7% za inhibirane isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 25,4 do 34,1% za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze te od 15,7 do 29,5% za inhibirane isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Kod inhibiranih isplaka s višom koncentracijom polianionske celuloze najveće bubrenje peleta izmjereno je u gipsnim isplakama. Utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje ukupnog bubrenja peleta vidljiv je u kalijskoj i slanoj isplaci, dok istovremeno gipsna isplaka ne slijedi spomenuti trend.

Dobiveni podaci o udjelu vode u peletu nakon bubrenja kao i podaci o masi peleta nakon bubrenja i nakon sušenja prikazani su na slici 3-89.



Slika 3-89. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 10Q20M70K

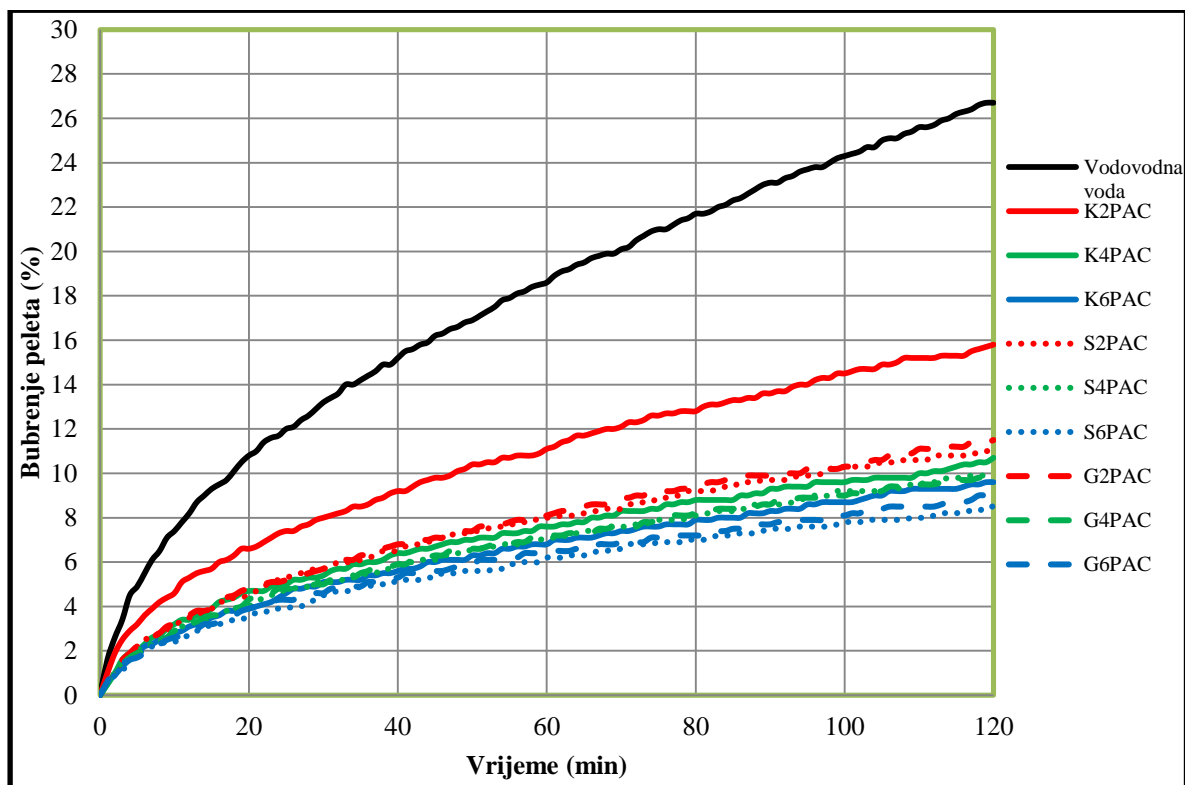
Maksimalna vrijednost udjela vode u peletu 10Q20M70K od 43,01% izmjerena je nakon bubrenja peleta u vodovodnoj vodi, što se poklapa s maksimalnom vrijednošću bubrenja izmjenom nakon 24-satnog ispitivanja. Peleti koji su bubrili u različitim inhibiranim isplakama imali su manji udjel vode u peletu nakon bubrenja u odnosu na vrijednost dobivenu bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi. Promjena udjela vode u peletu s povećanjem koncentracije polianionske celuloze slijedi isti trend kao i promjena maksimalne vrijednosti bubrenja gledano za iste isplake. Tako npr. povećanje koncentracije polianionske

celuloze u kalijskoj i jednim dijelom u slanoj isplaci uzrokuje smanjenje maksimalne vrijednosti bubrenja peleta i udjela vode u peletu nakon bubrenja. Iz usporedbe vrijednosti udjela vode u peletima koji su bubrili u inhibiranim isplakama s jednakim udjelom polianionske celuloze, vidljivo je kako se udjeli vode u peletu nakon bubrenja nalaze u rasponu od 23,49 do 26,62% za inhibirane isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 25,32 do 27,56% za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze, dok se za inhibirane isplake sa 6 g/l polianionske celuloze ta vrijednost nalazila u rasponu od 23,84 do 26,92%. Za dobivanje stvarnog udjela vode dobivenog bubrenjem peleta 10Q20M70K potrebno je vrijednosti prikazane na slici 3-89 umanjiti za vrijednost početnog udjela vode u uzorku prije komprimiranja i bubrenja, odnosno za 4,07%.

Na temelju obrade i vizualnog pregleda peleta 10Q20M70K nakon bubrenja u različitim fluidima može se zaključiti da su peleti koji su bubrili u inhibiranim isplakama meki do srednje tvrdi, s tendencijom povećanja tvrdoće s povećanjem koncentracije polianionske celuloze. Međutim u usporedbi s ostalim peletima s 10%-tnim udjelom kvarca peleti 10Q20M70K nakon bubrenja imaju manju tvrdoću.

3.4.3.9. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K u inhibiranim isplakama

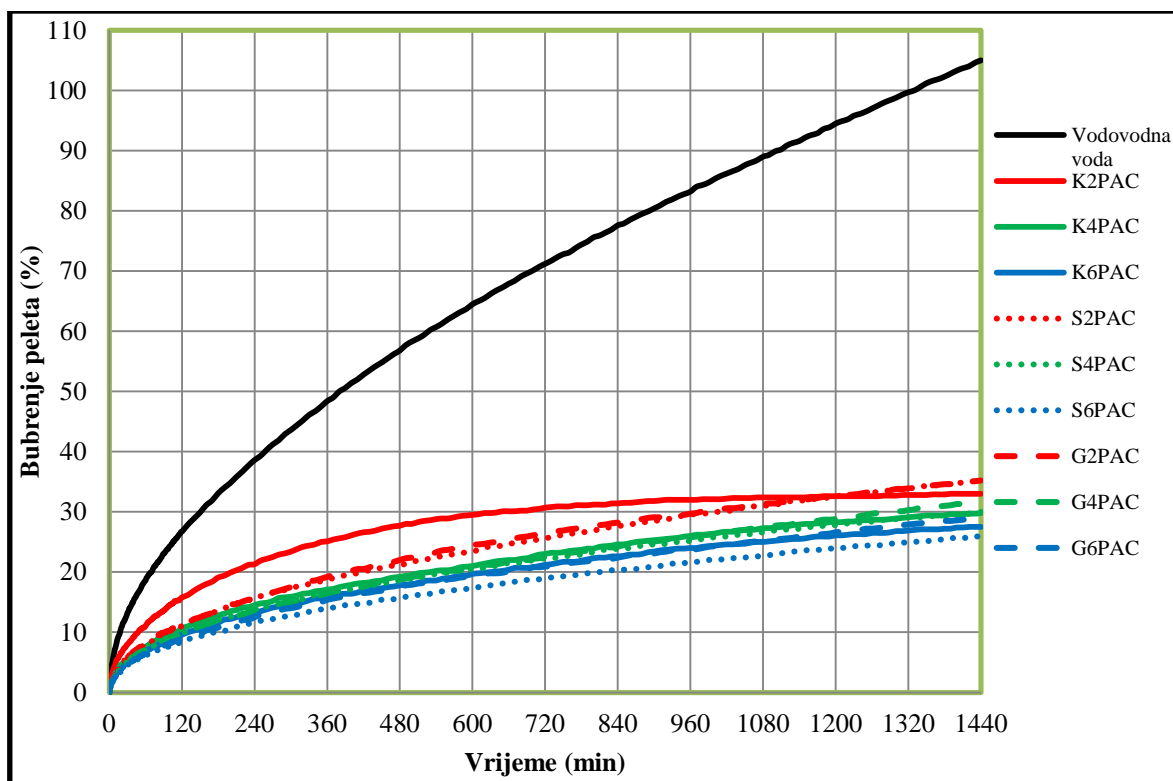
Rezultati mjerenja bubrenja peleta 20Q80M0K u vodovodnoj vodi i inhibiranim isplakama prikazani su na slikama 3-90 i 3-91.



Slika 3-90. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Iz slike 3-90 može se zaključiti da je najveće bubrenje peleta 20Q80M0K od 26,7% izmjereno u vodovodnoj vodi. Bubrenjem peleta u svim inhibiranim isplakama dobivene su manje vrijednosti bubrenja peleta u odnosu na vrijednost izmjerenu u vodovodnoj vodi, te se nalaze u rasponu od 8,5% koliko je dobiveno bubrenjem peleta u slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze, do 11,5% koliko je zabilježeno bubrenje peleta u gipsnoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze. Jedino odstupanje od navedenih vrijednosti zabilježeno je u kalijskoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze, gdje je izmjereno bubrenje peleta nakon 120 minuta ispitivanja od 15,8%. Isto tako vidljiv je utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze u svim ispitivanim inhibiranim isplakama na smanjenje intenziteta bubrenja peleta i ukupnog bubrenja u početnom periodu.

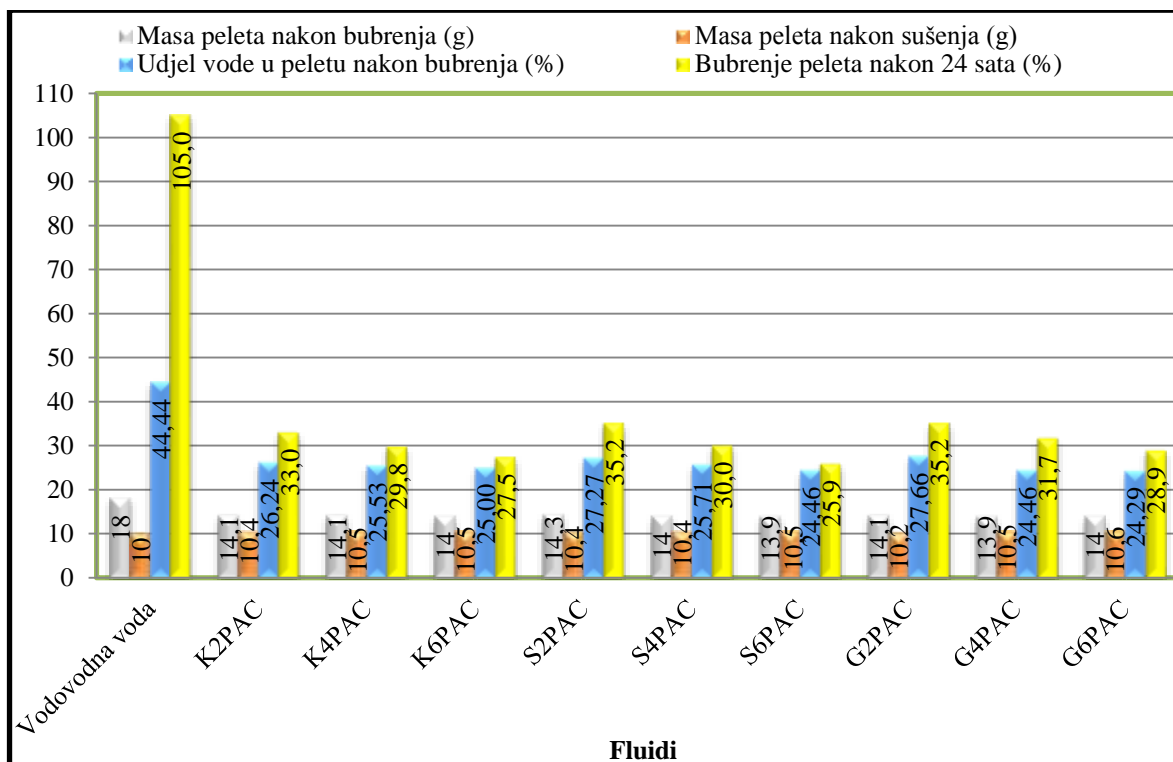
I nakon 24-satnog ispitivanja najveće bubrenje peleta 20Q80M0K izmjereno je u vodovodnoj vodi, pri čemu je zabilježeno povećanje debljine peleta u odnosu na početnu debljinu peleta za 1,05 puta (slika 3-91).



Slika 3-91. Rezultati bubrenja peleta 20Q80M0K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Izmjerene vrijednosti bubrenja peleta u inhibiranim isplakama manje su u odnosu na vodovodnu vodu, te se nalaze u rasponu od 25,9 do 35,2%. Usporedbom rezultata prikazanih na slici 3-91 može se zaključiti da se bubrenje peleta u inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalazi u rasponu od 33 do 35,2%, u inhibiranim isplakama s 4 g/l polianionske celuloze od 29,8 do 31,7%, dok su najmanje vrijednosti bubrenja peleta od 25,9 do 28,9% izmjerene u isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze. Isto kao i u početnom periodu i u nastavku ispitivanja uočeno je pozitivno djelovanje povećanja koncentracije polianionske celuloze u inhibiranim isplakama na smanjenje maksimalne vrijednosti bubrenja peleta. Tijekom 24-satnog ispitivanja bubrenja peleta, niti u jednoj od ispitivanih isplaka nije dosegnuta maksimalna vrijednost bubrenja

Udjeli vode u peletu nakon 24-satnog bubrenja prikazani su na slici 3-92.



Slika 3-92. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 20Q80M0K

Maksimalni udjel vode u peletu nakon bubrenja od 44,44% zabilježen je u vodovodnoj vodi, dok su u inhibiranim isplakama dobivene niže vrijednosti udjela vode nakon bubrenja peleta (slika 3-92). Ukoliko se želi dobiti stvarni udjel vode u peletu dobiven bubrenjem u različitim fluidima, potrebno je vrijednost prikazanu na slici 3-92 umanjiti za vrijednost početnog udjela vode u peletu odnosno za 8,87%. Iz slike 3-92 vidljivo je da povećanje koncentracije polianionske celuloze u inhibiranim isplakama uzrokuje smanjenje udjela vode u peletu nakon bubrenja. Udjel vode u peletu 20Q80M0K nakon bubrenja u inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalazi se u rasponu od 26,24 do 27,66%, u inhibiranim isplakama s 4 g/l polianionske celuloze od 24,46 do 25,71%, dok su najmanje vrijednosti udjela vode u peletu nakon bubrenja izmjerene u inhibiranim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze, te se nalaze u rasponu od 24,49 do 25%.

Obradom i vizualnim pregledom peleta nakon bubrenja u inhibiranim isplakama utvrđeno je da je tvrdoća peleta veća u odnosu na tvrdoću peleta zabilježenu nakon bubrenja u vodovodnoj vodi. Također je uočen trend promjene tvrdoće peleta po visini (gornja polovica peleta mekša je u odnosu na donju), te trend povećanja tvrdoće peleta s povećanjem koncentracije polianionske celuloze za sve tipove inhibiranih isplaka. I kod bubrenja peleta

20Q80M0K u inhibiranim isplakama dolazi do stvaranja tamnijeg sloja na vrhu peleta debljine približno 1 mm (slika 3-93).

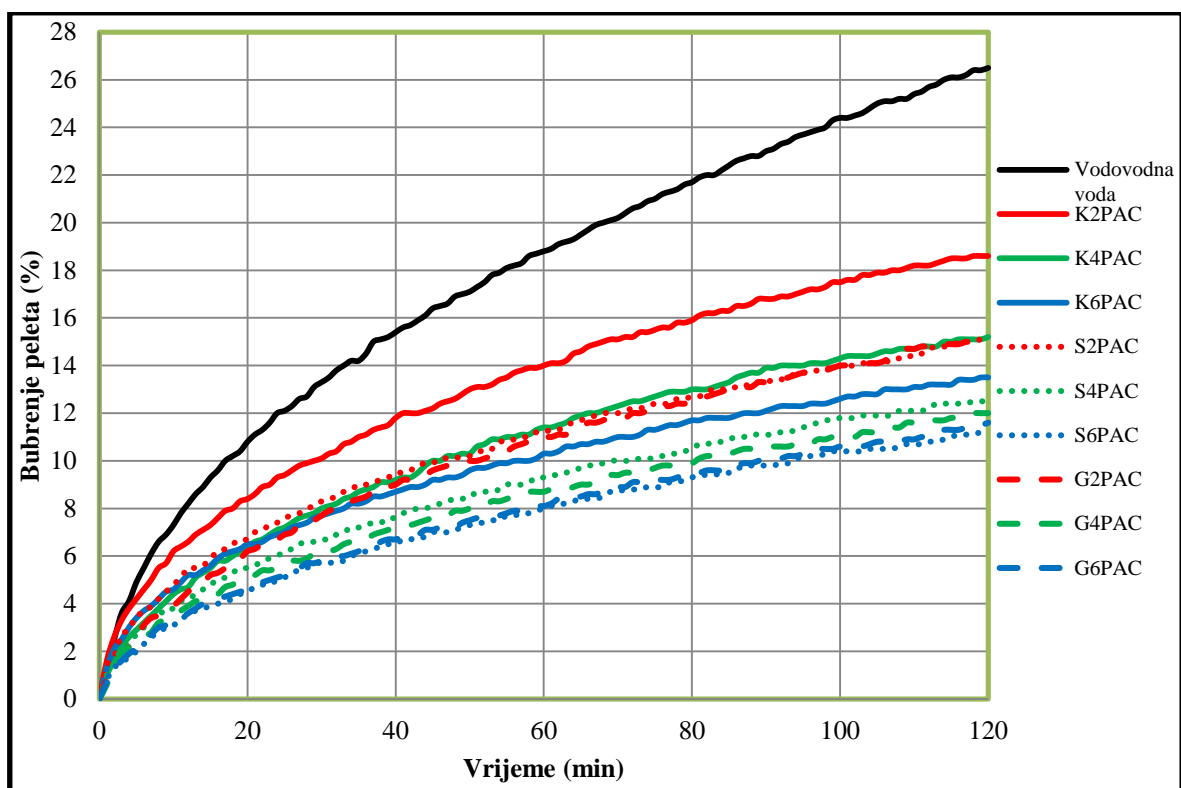


Slika 3-93. Izgled poprečnog presjeka peleta 20Q80M0K nakon bubrenja u kalijskoj isplaci K4PAC (a) te u gipsnoj isplaci G4PAC (b)

Na slici 3-39 b jasno je vidljiva razlika između gornje polovice peleta koja je mekša i tvrđe donje polovice peleta.

3.4.3.10. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K u inhibiranim isplakama

Podaci o rezultatima dobivenim mjerenjem bubrenja peleta 20Q60M20K prikazani su na slikama 3-94 i 3-95.

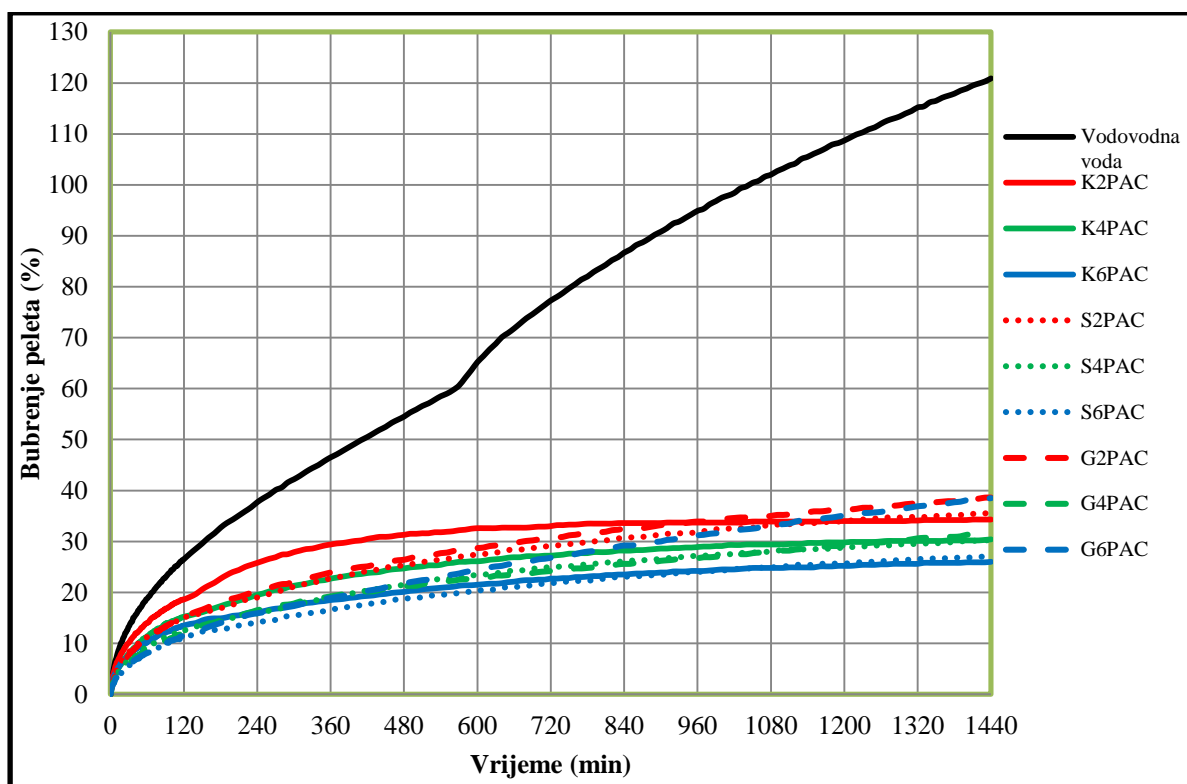


Slika 3-94. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Najveće bubrenje peleta 20Q60M20K od 26,5% nakon 120 minuta ispitivanja izmjereno je u vodovodnoj vodi (slika 3-94). Bubrenjem peleta u inhibiranim isplakama dobivene su manje vrijednosti bubrenja u početnom periodu u odnosu na vodovodnu vodu. Već u početnom periodu uočen je pozitivan utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze u inhibiranim isplakama na smanjenje intenziteta bubrenja kod svih tipova inhibiranih isplaka. Najveća vrijednost bubrenja peleta u inhibiranim isplakama nakon 120 minuta ispitivanja izmjerena je u kalijskoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze, dok je najmanja vrijednost izmjerena u slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze. Najveće vrijednosti bubrenja peleta u inhibiranim isplakama kod svih koncentracija polianionske celuloze izmjerene su u kalijskoj isplaci.

Sukladno očekivanju i na temelju rezultata mjerenja bubrenja u početnom periodu, nakon 24-satnog ispitivanja najveća vrijednost bubrenja izmjerena je u vodovodnoj vodi pri

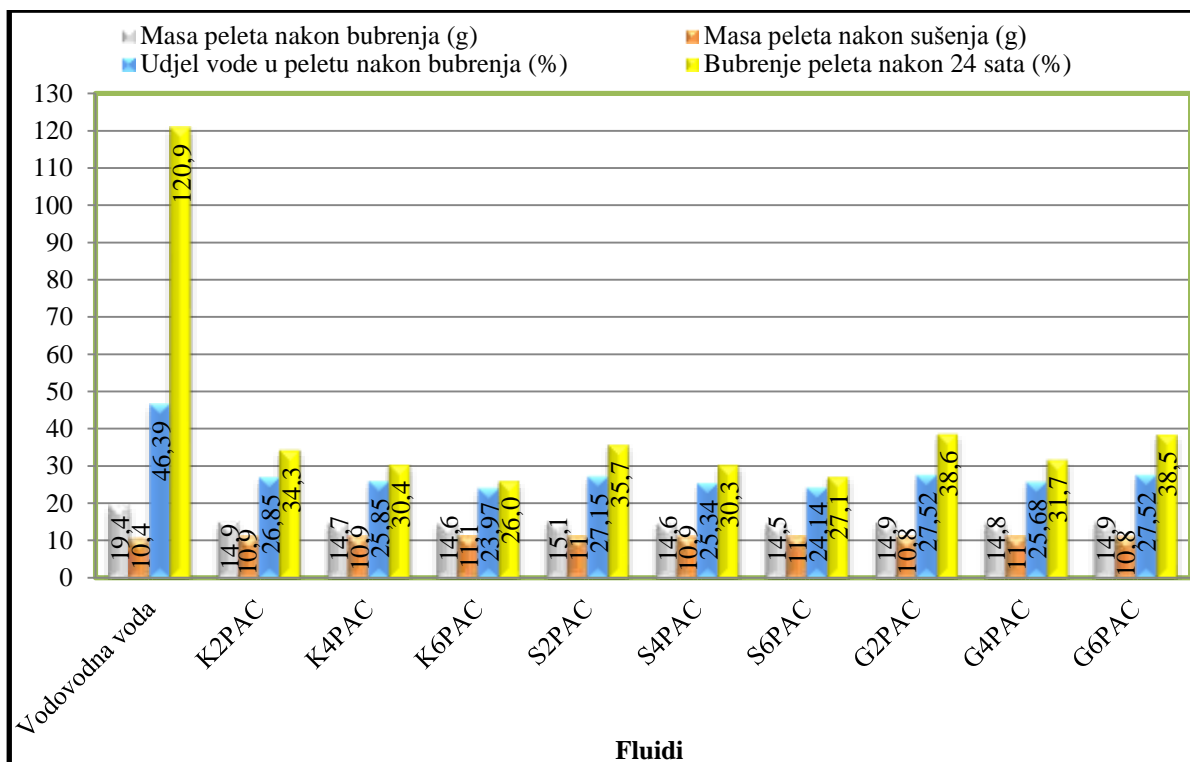
čemu je došlo do povećanja debljine peleta u odnosu na vrijednost izmjerenu prije bubrenja za 1,21 puta (slika 3-95).



Slika 3-95. Rezultati bubrenja peleta 20Q60M20K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze u inhibiranim isplakama na smanjenje intenziteta bubrenja i ukupnog bubrenja vidljiv je u kalijskoj i slanoj isplaci, dok je u gipsnoj isplaci zabilježeno odstupanje od navedenog trenda. Nakon 24-satnog ispitivanja bubnja peleta u inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze bubrenje peleta se nalazilo u rasponu od 34,3 do 38,6%, u inhibiranim isplakama s 4 g/l polianionske celuloze bubrenje peleta se nalazilo u rasponu od 30,3 do 31,7%, dok su najmanje vrijednosti bubrenja od 26 do 38,5% zabilježene u inhibiranim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze. Maksimalna vrijednost bubrenja peleta tijekom 24-satnog ispitivanja postignuta je samo u kalijskoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze, dok je kod ostalih ispitivanih isplaka vidljiv trend daljnjeg bubrenja i nakon 24 sata.

Na slici 3-96 prikazani su podaci o udjelu vode u peletu nakon bubrenja, te podaci o masi peleta nakon bubrenja i nakon sušenja.



Slika 3-96. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 20Q60M20K

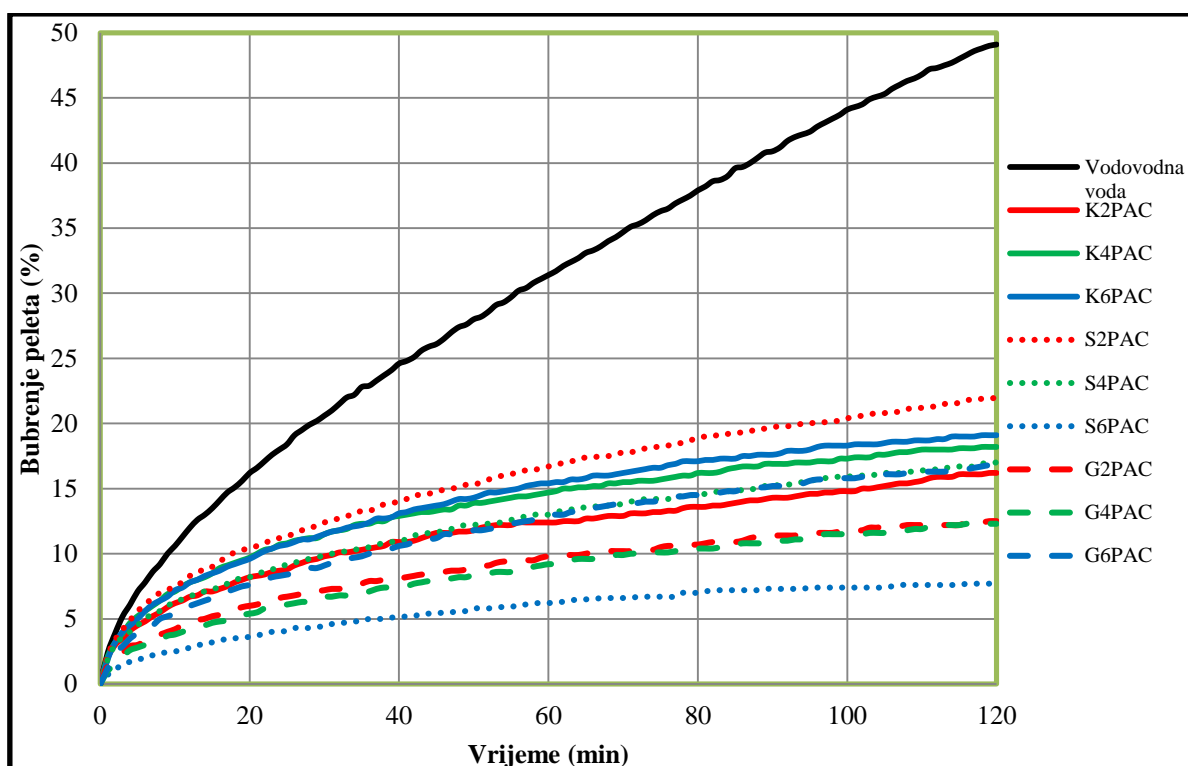
Najveći udjel vode u peletu nakon bubrenja od 46,39% izmjeren je u vodovodnoj vodi. Udjeli vode u peletima koji su bubrili u inhibiranim isplakama manji su od vrijednosti dobivene bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi. Udjeli vode u peletu nakon bubrenja u inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalazili su se u rasponu od 26,85 do 27,52%. Kod većih koncentracija polianionske celuloze u inhibiranim isplakama izmjereni su manji udjeli vode, koji su se nalazili u rasponu od 25,34 do 25,85% za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze, te od 23,97 do 27,52% za inhibirane isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Promjena udjela vode u peletu nakon bubrenja s promjenom koncentracije polianionske celuloze u isplakama slijedi trendove promjene bubrenja peleta izmjenjenog nakon 24 sata.

Obradom i vizualnim pregledom peleta nakon bubrenja uočeno je da se tvrdoća peleta nakon bubrenja povećava s povećanjem koncentracije polianionske celuloze u inhibiranim isplakama. Na poprečnom presjeku peleta nakon bubrenja vidljiv je tamniji sloj na samom vrhu peleta debljine približno 1 mm. Općenito, nakon bubrenja peleti 20Q60M20K su manje tvrdoće od peleta 20Q80M0K za istu inhibiranu isplaku.

3.4.3.11. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K u inhibiranim isplakama

Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K u vodovodnoj vodi i različitim inhibiranim isplakama prikazani su na slikama 3-97 i 3-98.

Na slici 3-97 prikazano je bubrenje peleta 20Q40M40K u vodovodnoj vodi i različitim inhibiranim isplakama u početnom periodu odnosno tijekom početnih 120 minuta ispitivanja, kada se i očekuju najveće promjene u bubrenju peleta.

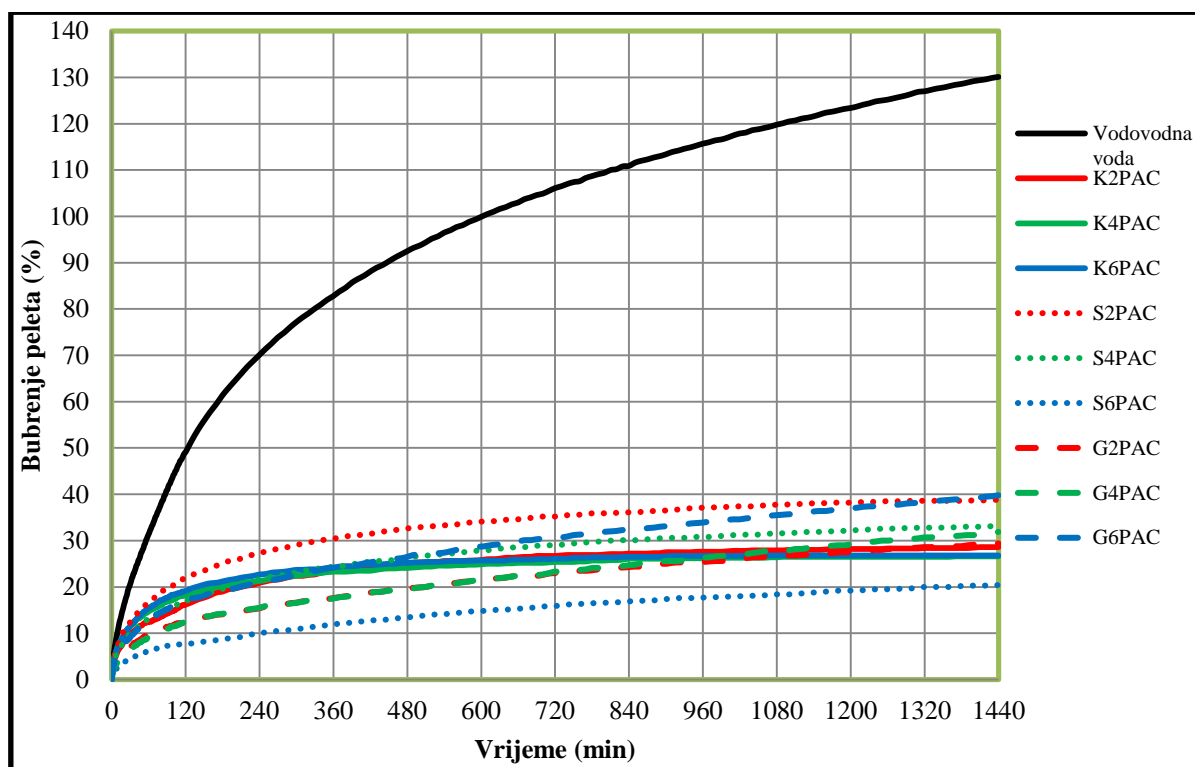


Slika 3-97. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Prema podacima prikazanim na slici 3-97 može se zaključiti da je najveće bubrenje peleta nakon 120 minuta ispitivanja od 49,1% kao i najveći intenzitet bubrenja u istom vremenskom periodu zabilježen u vodovodnoj vodi. Maksimalno i minimalno bubrenje peleta u inhibiranim isplakama zabilježeno je u slanoj isplaci odnosno, maksimalno bubrenje peleta od 22% izmjereno je u slanoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze, dok je najmanje bubrenje izmjereno u slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze. Ukoliko se usporede svi podaci prikazani na slici 3-97 može se zaključiti da povećanje koncentracije polianionske celuloze u

isplaci pozitivno utječe na smanjenje kako ukupnog bubrenja tako i intenziteta bubrenja samo u slanoj isplaci, dok u kalijskoj i gipsnoj isplaci nije zamijećen isti trend.

Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K u različitim fluidima tijekom 24 sata prikazani su na slici 3-98.

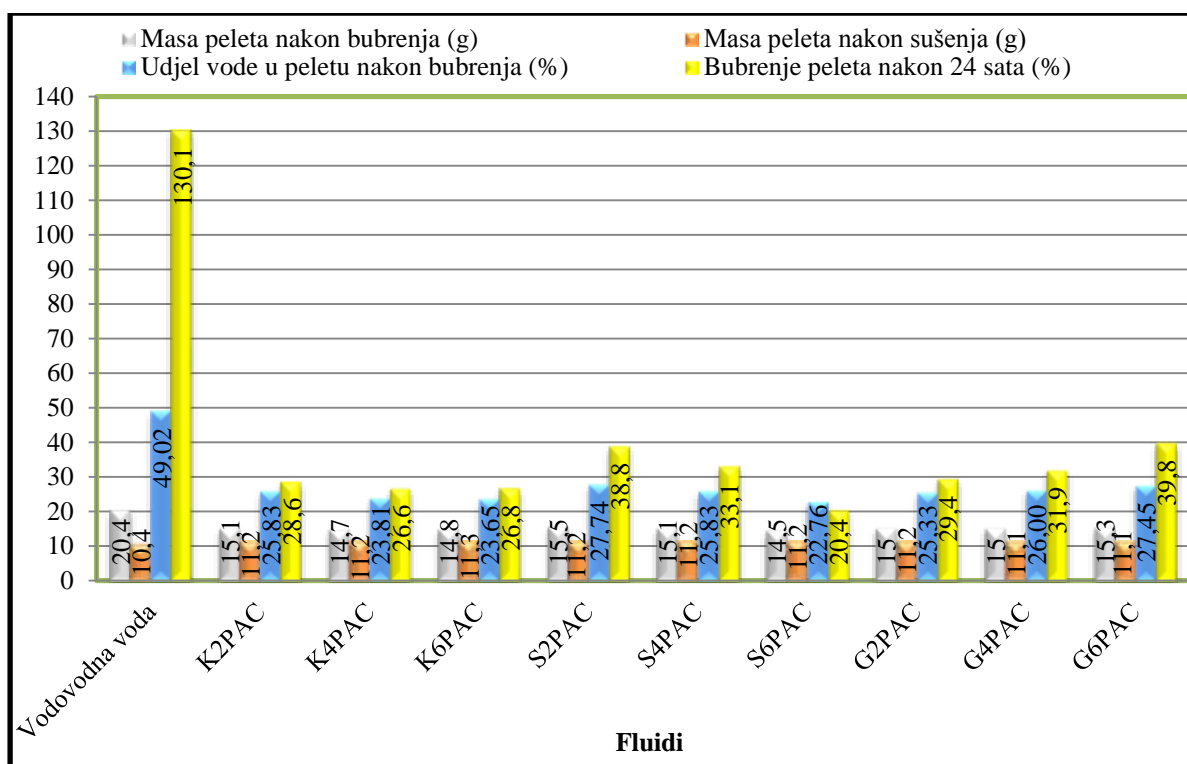


Slika 3-98. Rezultati bubrenja peleta 20Q40M40K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Isto kao i u početnom periodu, i nakon 24-satnog ispitivanja najveće bubrenje peleta 20Q40M40K izmjereno je u vodovodnoj vodi, pri čemu je došlo do povećanja debljine peleta za 1,3 puta. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako je bubrenje peleta u vodovodnoj vodi bilo najintenzivnije u početnom periodu, s tendencijom smanjenja intenziteta bubrenja u drugom dijelu ispitivanja. Izmjerene vrijednosti bubrenja peleta u različitim inhibiranim isplakama znatno su niže u odnosu na vrijednosti dobivene bubrenjem peleta u vodovodnoj vodi. Osim na smanjenje ukupne vrijednosti bubrenja, inhibirane isplake pozitivno su djelovale i na smanjenje intenziteta bubrenja tijekom 24-satnog ispitivanja. Ukoliko se usporede rezultati bubrenja peleta u isplakama s jednakim koncentracijama polianionske celuloze u isplaci, može se zaključiti kako se bubrenje peleta nakon 24 sata nalazilo u rasponu od 28,6 do 38,8% za isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 26,6 do 33,1% za pelete koji su bubrili u inhibiranim isplakama s 4 g/l polianionske celuloze, dok se bubrenje peleta

20Q40M40K u inhibiranim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze nalazilo u rasponu od 20,4 do 39,8%. Pozitivan utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze u isplaci na smanjenje ukupnog bubrenja i intenziteta bubrenja, uočen je u slanoj isplaci što se slaže s trendom uočenim u početnom periodu. Važno je napomenuti da su se rezultati bubrenja peleta u kalijским isplakama s različitim koncentracijama polianionske celuloze nalazili u vrlo uskom rasponu od 26,6 do 28,6%.

Na slici 3-99 prikazani su podaci o udjelu vode u peletima nakon 24-satnog bubrenja u različitim fluidima te masama peleta nakon bubrenja kao i nakon sušenja.



Slika 3-99. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 20Q40M40K

Sukladno očekivanjima i rezultatima bubrenja prikazanim na slici 3-98, i najveći udjel vode u peletu nakon 24-satnog bubrenja od 49,02% izmjeren je u vodovodnoj vodi (slika 3-99). Prilikom razmatranja udjela vode u peletu dobivenog bubrenjem treba imati u vidu kako je praškasti uzorak 20Q40M40K prije komprimiranja i bubrenja sadržavao 5,69 mas. % vode. Udjel vode u peletu nakon 24-satnog bubrenja u inhibiranim isplakama nalazio se u rasponu od 25,33 do 27,74% za inhibirane isplake s 2 g/l polianionske celuloze, od 23,81 do 26% za inhibirane isplake s 4 g/l polianionske celuloze te od 22,76 do 25,45% za inhibirane isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Povećanje koncentracije polianionske

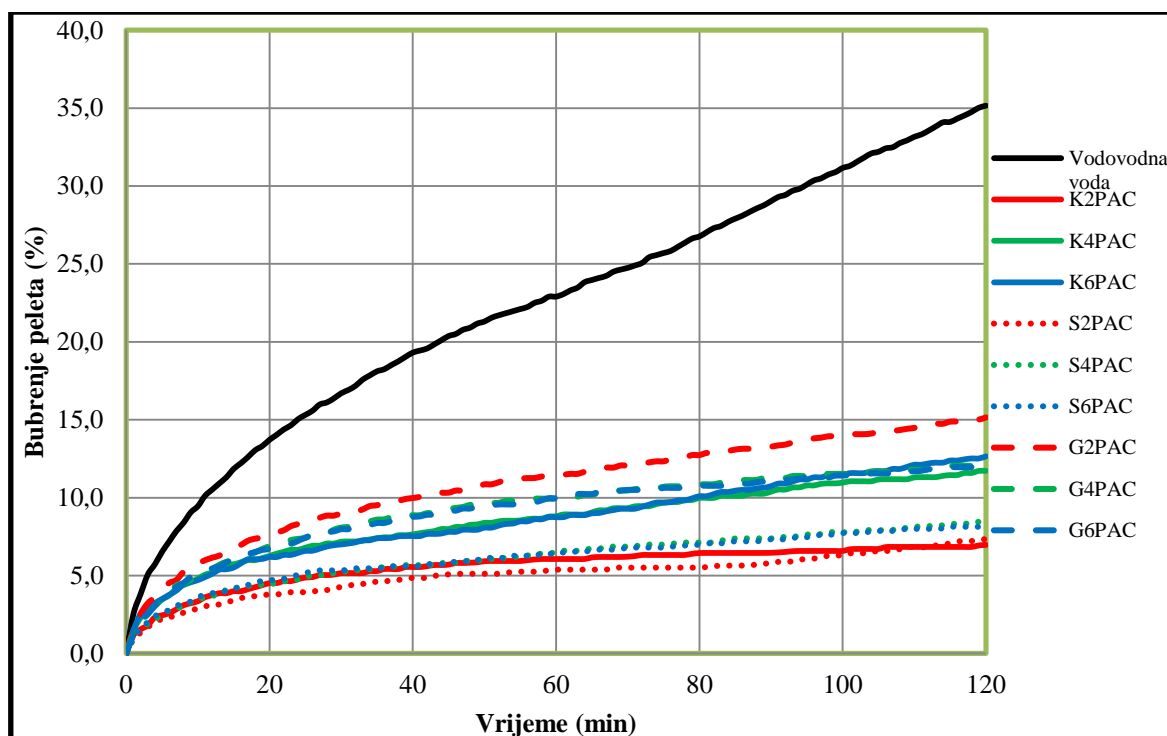
celuloze u isplaci pozitivno utječe na smanjenje udjela vode u peletima koji su bubrili u kalijskoj i slanoj isplaci. U gipsnoj isplaci uočen je suprotan trend, odnosno s povećanjem koncentracije polianionske celuloze u isplaci dolazi do povećanja udjela vode u peletu nakon bubrenja, što se također dobro slaže s izmjerenim vrijednostima bubrenja peleta 20Q40M40K nakon 24 sata u gipsnim isplakama s različitim koncentracijama polianionske celuloze.

Nakon bubrenja peleti su bili različite tvrdoće, ovisno o fluidu u kojem su bubrili pri čemu je najmekši pelet bio onaj koji je bubrio u vodovodnoj vodi. Vizualnim pregledom presjeka peleta nakon bubrenja uočeno je postojanje tamnijeg sloja na vrhu pojedinih peleta.

3.4.3.12. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K u inhibiranim isplakama

Na slikama 3-100 i 3-101 prikazani su rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K u različitim fluidima tijekom početnog perioda (početnih 120 minuta) i tijekom 24 sata, dok su na slici 3-102 prikazani podaci o masi peleta nakon bubrenja, masi peleta nakon sušenja te udjelu vode u peletu nakon bubrenja.

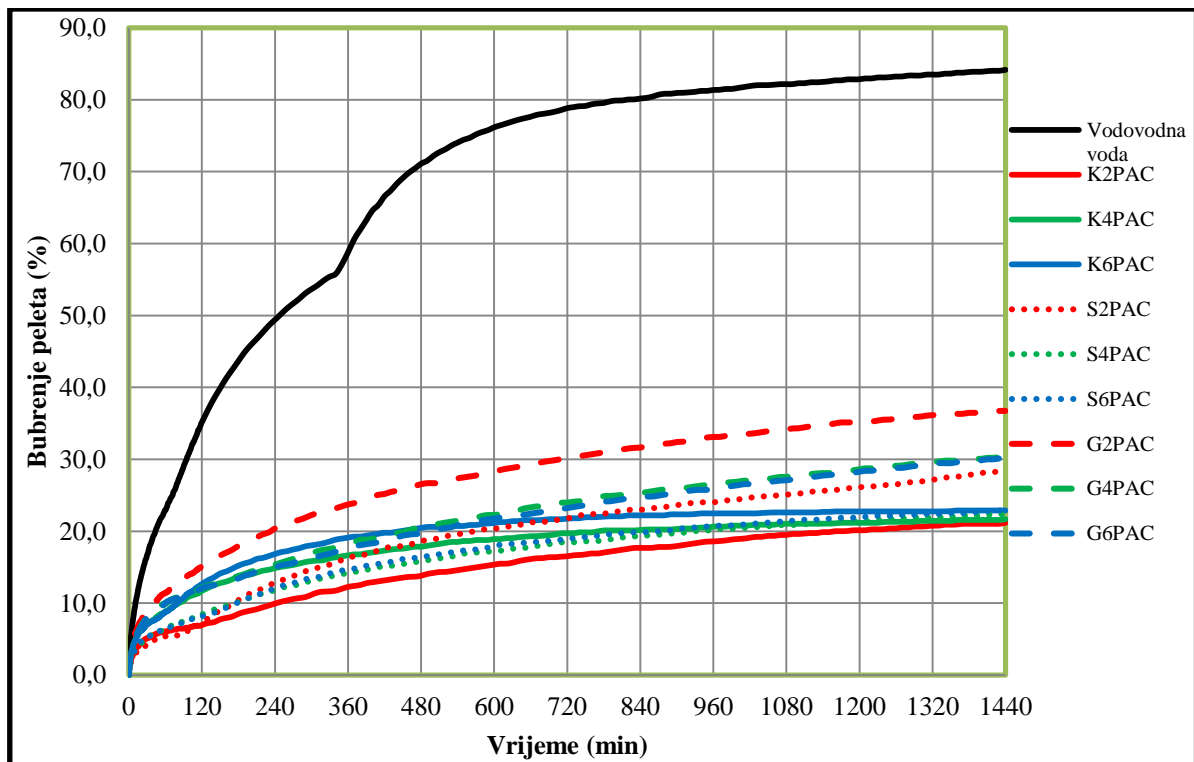
Podaci o bubrenju peleta 20Q20M60K u vodovodnoj vodi i različitim inhibiranim isplakama tijekom početnih 120 minuta ispitivanja prikazani su na slici 3-100.



Slika 3-100. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K tijekom 120 minuta u inhibiranim isplakama

Najveće bubrenje peleta 20Q20M60K od 35,2%, kao i najveći intenzitet bubrenja peleta u početnom periodu izmjeren je u vodovodnoj vodi. Prema podacima prikazanim na slici 3-100 može se zaključiti kako su sve inhibirane isplake pozitivno djelovale na smanjenje kako intenziteta tako i ukupnog bubrenja u prvih 120 minuta ispitivanja. Bubrenje peleta 20Q20M60K nakon 120 minuta ispitivanja u različitim inhibiranim isplakama nalazilo se u rasponu od 7% koliko je izmjereno u kalijskoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze do 15,1% koliko je izmjereno u gipsnoj isplaci s jednakom koncentracijom polianionske celuloze. Pozitivno djelovanje povećanja koncentracije polianionske celuloze u isplaci na smanjenje intenziteta bubrenja i ukupnog bubrenja nakon početnog perioda uočeno je samo kod gipsne isplake.

Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K u vodovodnoj vodi i različitim inhibiranim isplakama tijekom 24-satnog ispitivanja prikazani su na slici 3-101.

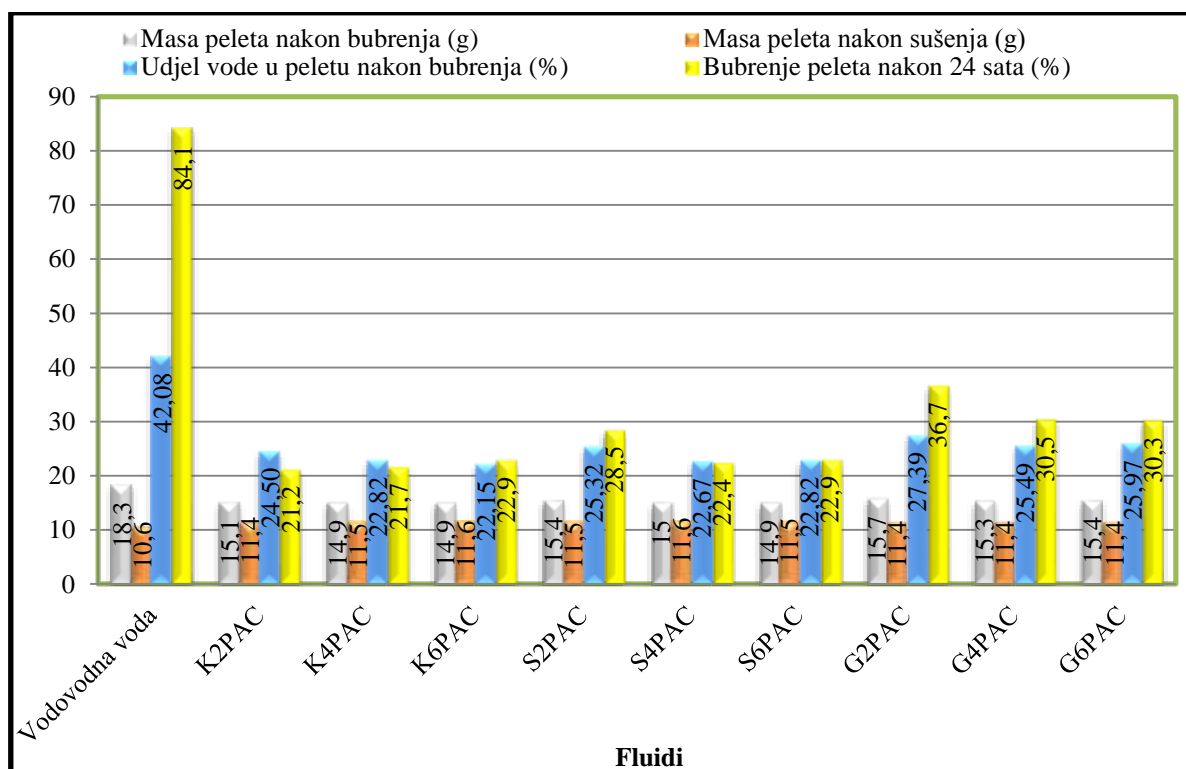


Slika 3-101. Rezultati bubrenja peleta 20Q20M60K tijekom 24 sata u inhibiranim isplakama

Nakon 24-satnog ispitivanja bubrenja peleta u različitim fluidima, najveće bubrenje peleta 20Q20M60K od 84,1% izmjereno je u vodovodnoj vodi. Intenzitet bubrenja peleta u vodovodnoj vodi najizraženiji je u prvom dijelu ispitivanja (u prvih 800 minuta ispitivanja) kada je i ostvaren najveći dio bubrenja, dok je u drugom dijelu intenzitet bubrenja daleko

manji. Izmjereno bubrenje peleta u inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalazilo se u rasponu od 21,2 do 36,7%, u inhibiranim isplakama s 4 g/l polianionske celuloze bubrenje peleta 20Q20M60K nalazilo se u rasponu od 21,7 do 30,5% dok se bubrenje peleta u inhibiranim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze nalazilo u rasponu od 22,9 do 30,3%. Kod svih koncentracija polianionske celuloze u isplakama najveće bubrenje peleta izmjereno je u gipsnoj isplaci. Pozitivan utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje bubrenja peleta uočen je samo u gipsnoj isplaci, dok je pak u kalijskoj isplaci trend bio potpuno suprotan odnosno s povećanjem koncentracije polianionske celuloze u kalijskoj isplaci uočen je i veći intenzitet i veće ukupno bubrenje peleta nakon 24 sata ispitivanja.

Podaci o udjelu vode u peletu nakon 24-satnog bubrenja, kao i podaci o masi peleta nakon bubrenja i nakon sušenja prikazani su na slici 3-102.



Slika 3-102. Utjecaj inhibiranih isplaka na ispitivane parametre peleta 20Q20M60K

Isto kao i najveće bubrenje i najveći udjel vode u peletu nakon bubrenja od 42,08% izmjeren je u vodovodnoj vodi. U svim peletima koji su bubrili u različitim inhibiranim isplakama udjeli vode nakon bubrenja bili su znatno niži u odnosu na udjel vode izmjeren u peletu koji je bubrio u vodovodnoj vodi. Ukoliko se usporede isplake s jednakim udjelom polianionske celuloze može se zaključiti da se udjel vode u peletima koji su bubrili u

inhibiranim isplakama s 2 g/l polianionske celuloze nalazi u rasponu od 24,5 do 27,39%, u peletima koji su bubrili u inhibiranim isplakama s 4 g/l polianionske celuloze udjel vode nalazi se u rasponu od 22,67 do 25,49%, dok za inhibirane isplake sa 6 g/l polianionske celuloze udjel vode u peletu nakon bubrenja iznosi od 22,15 do 25,97%. Trend promjene udjela vode u peletu nakon bubrenja s promjenom koncentracije polianionske celuloze u slanoj i gipsnoj isplaci slijedi trend promjene vrijednosti ukupnog bubrenja nakon 24 sata u istim isplakama. Odstupanje od navedenog trenda uočeno je kod kalijске isplake, gdje povećanje koncentracije polianionske celuloze u kalijškoj isplaci uzrokuje smanjenje udjela vode u peletu nakon bubrenja ali i lagano povećanje ukupnog bubrenja koje se nalazi u rasponu od 21,2 do 22,9%. Prilikom određivanja stvarnog udjela vode koji je pelet dobio bubrenjem treba uzeti u obzir da je pelet prije bubrenja sadržavao 4,07 mas. % vode.

Nakon bubrenja u različitim fluidima uočeno je da su peleti srednje tvrdi do tvrdi, dok je vizualnim pregledom uočeno postojanje tankog tamnijeg sloja nakon bubrenja samo kod određenih peleta.

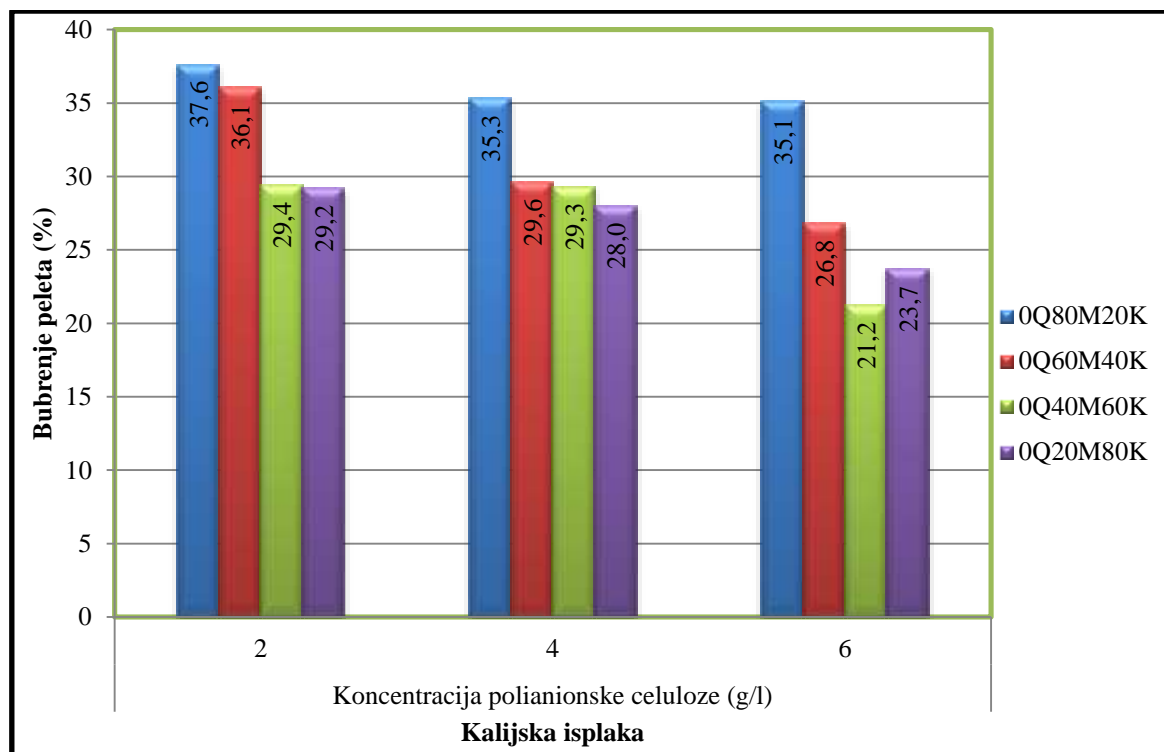
4. DISKUSIJA REZULTATA

U prethodnom poglavlju opisan je postupak provedenih laboratorijskih ispitivanja te su prikazani dobiveni rezultati. Rezultati su prikazani na način da je dana zasebna analiza rezultata laboratorijskih ispitivanja svojstava inhibiranih isplaka i analiza bubrenja pojedinih peleta u vodovodnoj vodi, vodenim otopinama različitih soli te inhibiranim isplakama s različitim udjelima polianionske celuloze. U ovom poglavlju prikazana je usporedna analiza dobivenih rezultata s posebnim naglaskom na analizi rezultata bubrenja peleta u različitim inhibiranim isplakama. Također su detaljno analizirani rezultati simulacije utjecaja bubrenja na smanjenje protočne površine i promjenu gradijenta tlaka koji nastaje kao otpor protjecanju isplake kroz prstenasti prostor kanala bušotine.

Tijekom provedenih laboratorijskih ispitivanja ispitano je bubrenje 12 peleta različitog mineraloškog sastava koji su svrstani u tri skupine koje su se razlikovale po masenom udjelu kvarca. Unutar svake skupine nalazila su se četiri uzorka koja su se međusobno razlikovala po masenom udjelu montmorilonita i kaolinita. Stoga je u nastavku napravljena analiza rezultata bubrenja peleta po skupinama za svaku inhibiranu isplaku posebno, pri čemu je posebna pažnja posvećena promatranju utjecaja povećanja koncentracije polianionske celuloze na bubrenje peleta. Na sljedećim slikama prikazani podaci o bubrenju peleta odnose se na bubrenje izmjereno nakon 24 sata ispitivanja.

4.1. Bubrenje peleta u kalijskoj isplaci

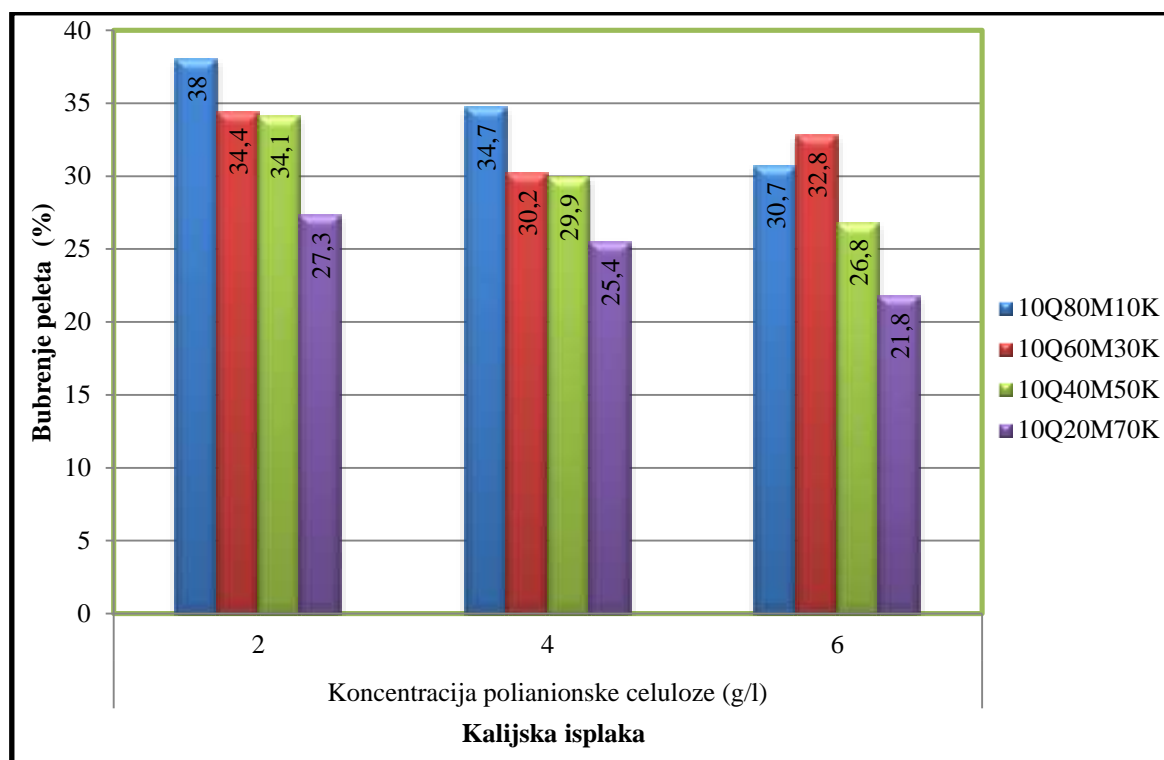
Izmjereno bubrenje pojedinih skupina peleta u kalijskoj isplaci prikazano je na slikama 4-1 do 4-3. Na slici 4-1 prikazan je utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima bez kvarca na njihovo bubrenje u kalijskoj isplaci s različitim koncentracijama polianionske celuloze.



Slika 4-1. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima bez kvarca na bubrenje u kalijskoj isplaci

Ukoliko se promotre rezultati bubrenja peleta bez kvarca u kalijskim isplakama s jednakim udjelom polianionske celuloze vidljivo je da se sa smanjenjem udjela montmorilonita i povećanjem udjela kaolinita smanjuje 24-satno bubrenje peleta. Odstupanje od navedenog trenda uočeno je kod bubrenja peleta 0Q20M80K u kalijskoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze, gdje je zabilježeno povećanje 24-satnog bubrenja u odnosu na pelet 0Q40M60K. Usporedbom rezultata bubrenja peleta s jednakim udjelom montmorilonita i kaolinita u kalijskoj isplaci s različitim koncentracijama polianionske celuloze može se zaključiti da se s povećanjem koncentracije polianionske celuloze smanjuje bubrenje peleta.

Rezultati 24-satnog bubrenja peleta s 10%-tnim udjelom kvarca u kalijskoj isplaci s različitim koncentracijama polianionske celuloze prikazani su na slici 4-2.

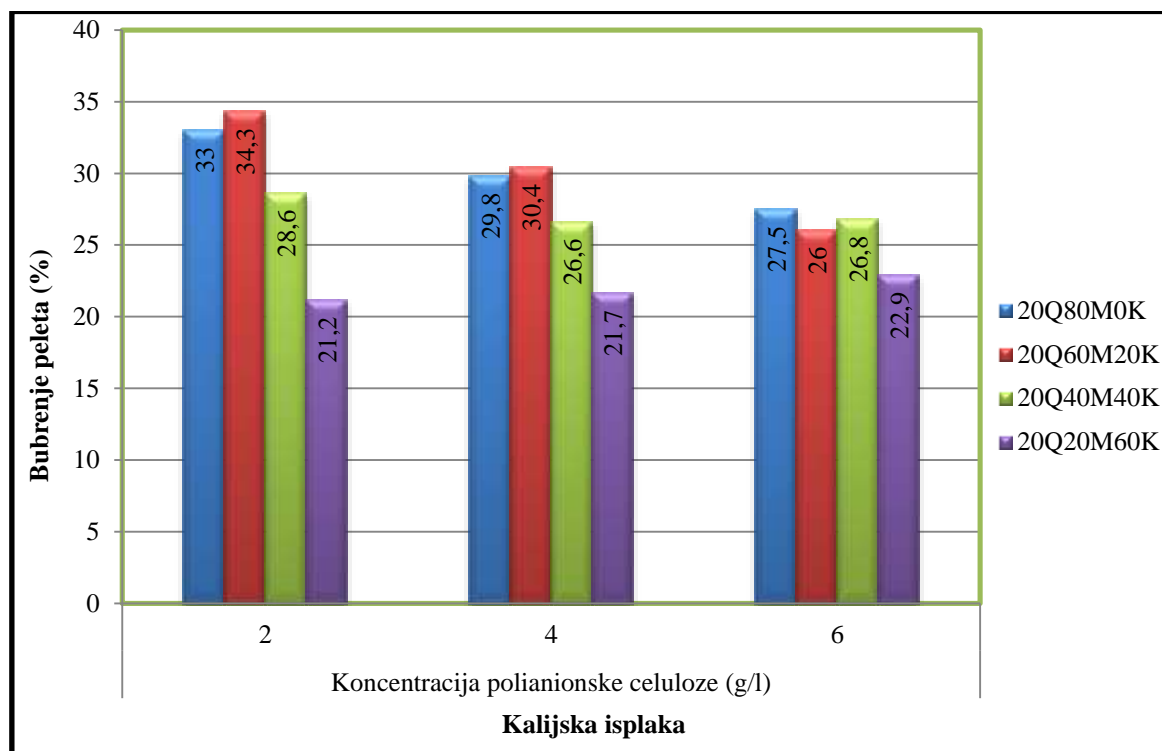


Slika 4-2. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 10%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u kalijskoj isplaci

Iz prikazanih podataka vidljiv je pozitivan utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje bubrenja peleta s jednakim udjelom montmorilonita i kaolinita nakon 24 sata ispitivanja (slično uočenom trendu kod peleta bez kvarca). Odstupanje od navedenog trenda uočeno je kod bubrenja peleta u kalijskoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze, gdje je kod peleta sa 60%-tnim udjelom montmorilonita izmjereno veće bubrenje (32,8%) u odnosu na pelet s jednakim udjelom montmorilonita koji je bubrio u kalijško isplaci s 4 g/l polianionske celuloze (30,2%). Međutim obje vrijednosti bubrenja peleta s udjelom montmorilonita od 60 mas. % i kaolinita od 30 mas. % manje su od izmjerene bubrenja istog peleta u kalijško isplaci s 2 g/l polianionske celuloze koje je iznosilo 34,4%. Ukoliko se usporede peleti koji su bubrili u kalijško isplaci s jednakim udjelom polianionske celuloze može se zaključiti da smanjenje masenog udjela montmorilonita i povećanje udjela kaolinita rezultira smanjenjem bubrenja peleta nakon 24 sata ispitivanja. Odstupanje od

navedenog trenda uočeno je samo tijekom bubrenja peleta 10Q60M30K u kalijskoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze.

Podaci o bubrenju peleta s 20%-tnim masenim udjelom kvarca nakon 24-satnog ispitivanja u kalijskim isplakama s različitim koncentracijama polianionske celuloze, prikazani su na slici 4-3.



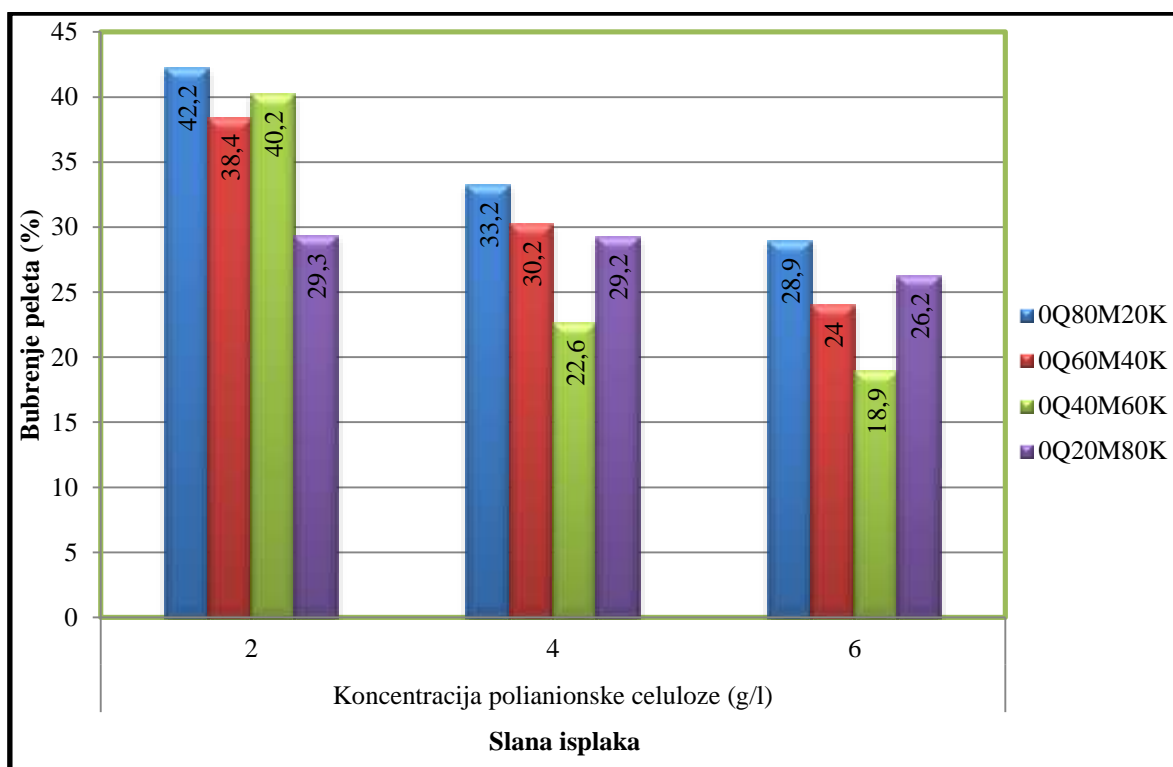
Slika 4-3. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 20%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u kalijskoj isplaci

Usporedbom rezultata bubrenja peleta u kalijskoj isplaci s jednakom koncentracijom polianionske celuloze, uočeno je da se smanjenjem udjela montmorilonita i povećanjem udjela kaolinita smanjuje bubrenje peleta sa 60, 40 i 20% montmorilonita u kalijskim isplakama s 2 i 4 g/l polianionske celuloze. Peleti koji su bubrili u kalijskoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze pokazuju sličan trend s izuzetkom peleta 20Q40M40K kod kojeg je izmjereno veće bubrenje (26,8%) u odnosu na pelet 20Q60M20K. Pozitivan utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje bubrenja peleta s jednakim udjelom montmorilonita vidljiv je kod peleta s 80% i 60% montmorilonita te djelomično kod peleta s 40%-tnim udjelom montmorilonita, dok je kod peleta s 20% montmorilonita uočen suprotan

učinak (dolazi do povećanja bubrenja peleta s povećanjem koncentracije polianionske celuloze) uz neznatno povećanje vrijednosti bubrenja peleta.

4.2. Bubrenje peleta u slanoj isplaci

Rezultati 24-satnog bubrenja pojedinih skupina peleta u slanoj isplaci prikazani su na slikama 4-4 do 4-6. Utjecaj promjene mineraloškog sastava peleta bez kvarca na njegovo bubrenje u slanoj isplaci s jednakom koncentracijom polianionske celuloze prikazan je na slici 4-4.

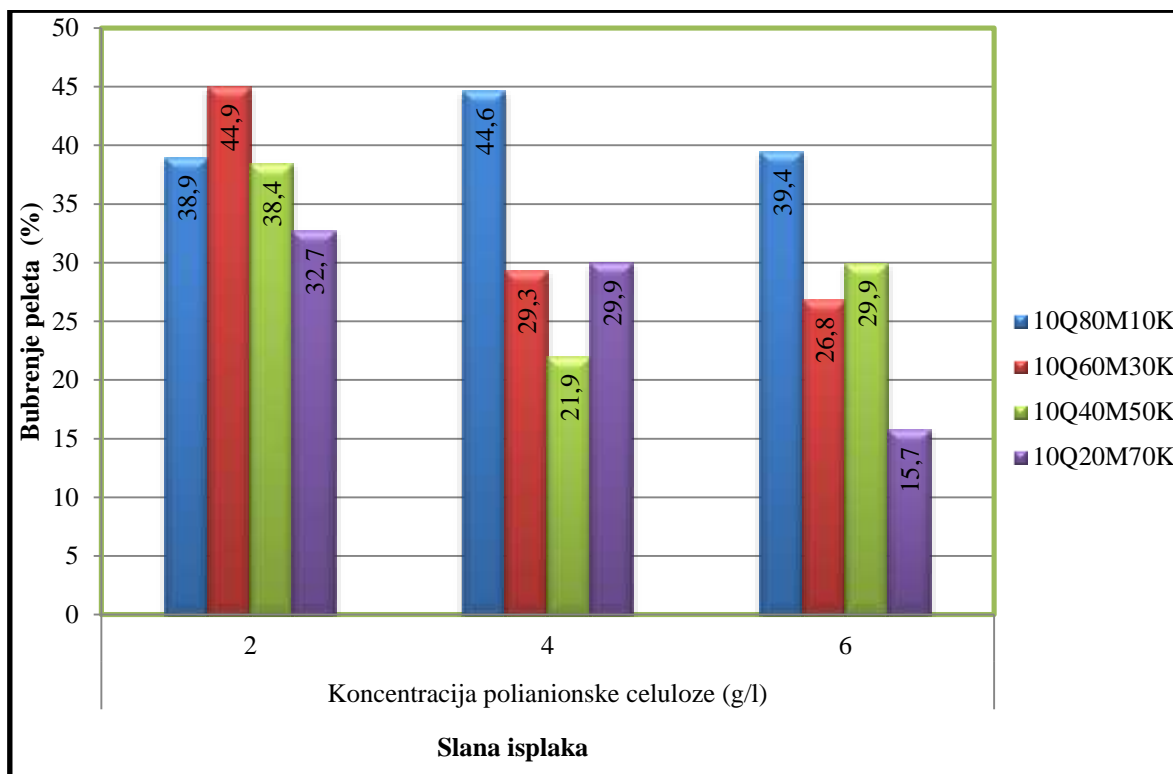


Slika 4-4. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima bez kvarca na bubrenje u slanoj isplaci

Iako nije vidljiv trend smanjenja bubrenja peleta sa smanjenjem udjela montmorilonita i povećanjem udjela kaolinita u isplakama s jednakom koncentracijom polianionske celuloze, može se zaključiti da je maksimalno bubrenje bez obzira na koncentraciju polianionske celuloze dobiveno bubrenjem peleta s 80%-tnim udjelom montmorilonita. Odstupanje od navedenog trenda smanjenja bubrenja sa smanjenjem udjela montmorilonita uočeno je kod peleta 0Q40M60K koji je bubrio u slanoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze, te kod bubrenja peleta 0Q20M80K u slanim isplakama s koncentracijom polianionske celuloze od 4 i 6 g/l. Slično kao i kod kalijske isplake, vidljiv je

trend smanjenja bubrenja peleta s jednakim masenim udjelom montmorilonita s povećanjem koncentracije polianionske celuloze.

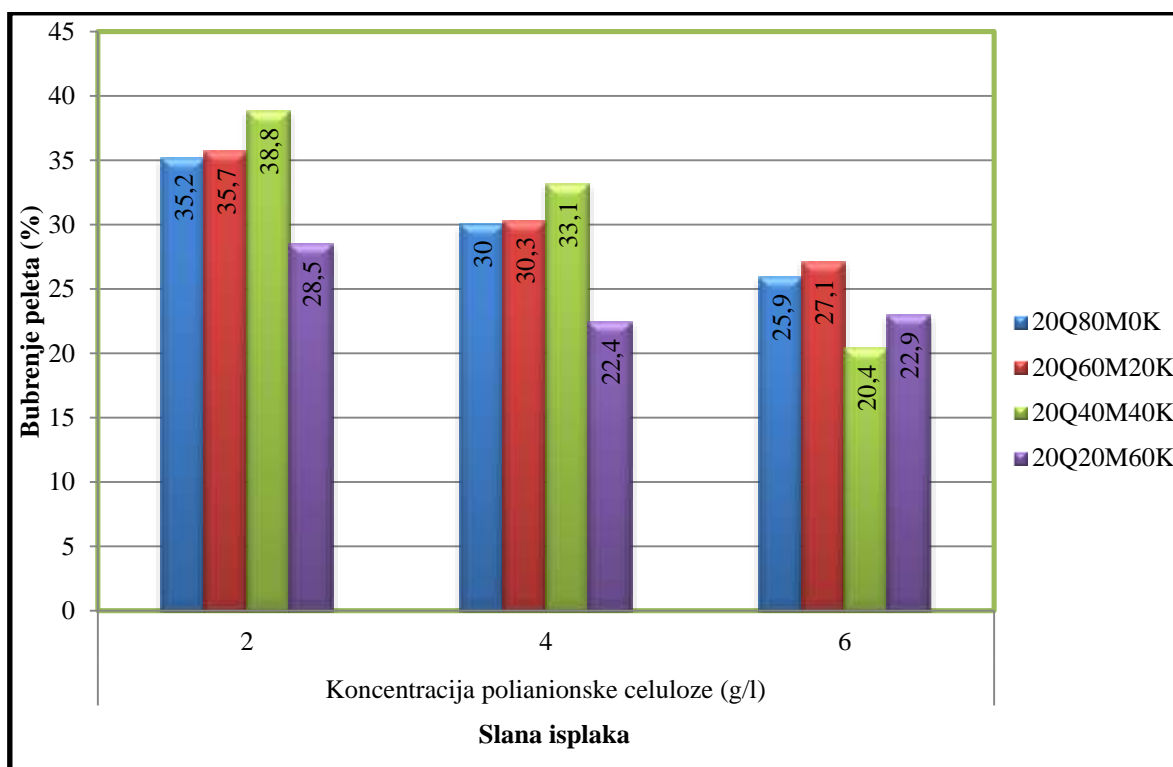
Na slici 4-5 prikazani su rezultati bubrenja peleta s 10%-tnim masenim udjelom kvarca u slanim isplakama.



Slika 4-5. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 10%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u slanoj isplaci

Bubrenje peleta promatrano je na način da su uspoređivani rezultati bubrenja peleta različitog mineraloškog sastava u slanim isplakama s jednakim koncentracijama polianionske celuloze, te bubrenje peleta jednakog mineraloškog sastava u slanim isplakama s različitim koncentracijama polianionske celuloze. Nažalost, kao ni kod bubrenja peleta bez kvarca u slanoj isplaci tako ni kod bubrenja peleta s 10%-tnim udjelom kvarca, ne postoji jasna povezanost između smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita na izmjerene vrijednosti bubrenja peleta, kao što je to bio slučaj kod kalijске isplake. Trend pozitivnog utjecaja povećanja koncentracije polianionske celuloze u slanoj isplaci na smanjenje 24-satnog bubrenja vidljiv je samo kod peleta s 60%-tnim i 20%-tnim udjelom montmorilonita.

Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita na bubrenje peleta s 20%-tnim udjelom kvarca u slanoj isplaci prikazan je na slici 4-6.

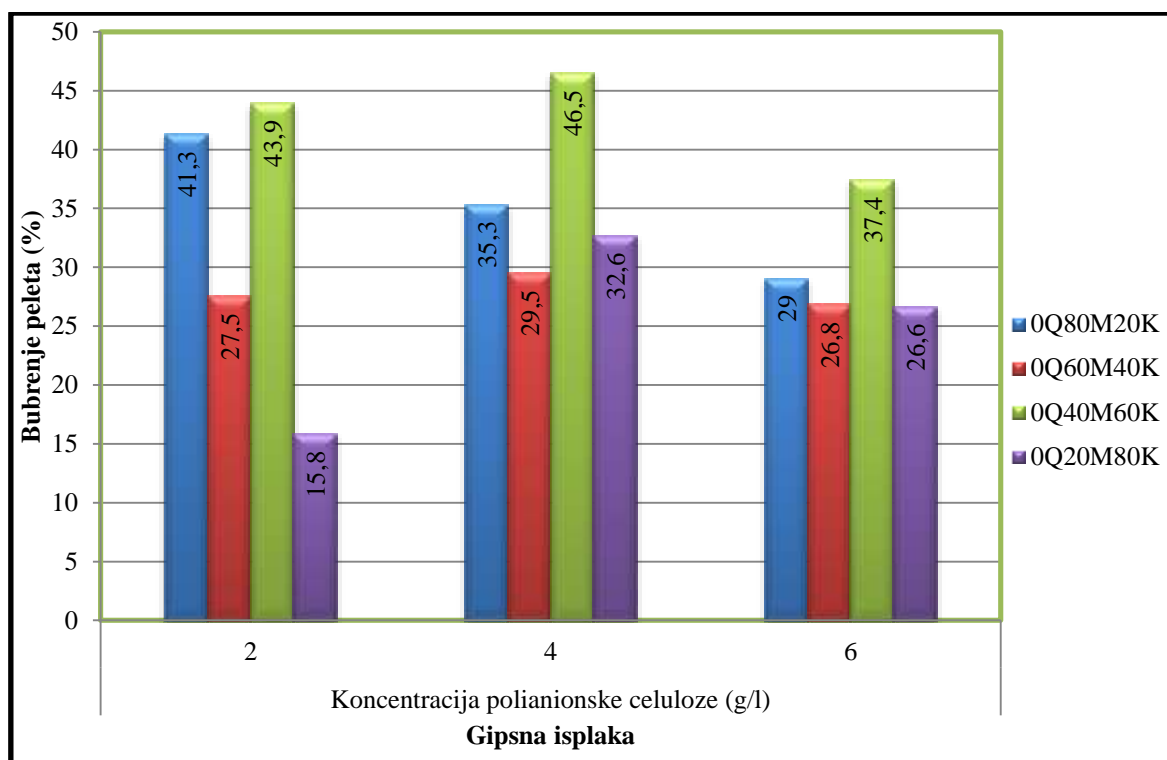


Slika 4-6. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 20%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u slanoj isplaci

Kod bubrenja peleta s 20%-tnim udjelom kvarca u slanoj isplaci uočeni su nešto drugačiji trendovi nego kod njihovog bubrenja u kalijskoj isplaci. Smanjenje udjela montmorilonita i povećanje udjela kaolinita rezultira laganim povećanjem ukupnog bubrenja nakon 24 sata peleta s 80%-tnim i 60%-tnim udjelom montmorilonita, te djelomično kod peleta s 40%-tnim udjelom montmorilonita. Trend pozitivnog utjecaja povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje bubrenja peleta s jednakim masenim udjelom montmorilonita vidljiv je gotovo kod svih peleta s 20%-tnim udjelom kvarca. Odstupanje od navedenog trenda zabilježeno je tijekom bubrenja peleta 20Q20M60K u slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze, gdje je izmjereno 24-satno bubrenje od 22,9% što je neznatno više od bubrenja u slanoj isplaci s 4 g/l polianionske celuloze gdje je ono iznosilo 22,4%.

4.3. Bubrenje peleta u gipsnoj isplaci

Na slikama 4-7 do 4-9 prikazan je utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita na bubrenje peleta s različitim udjelima kvarca u gipsnoj isplaci. Rezultati bubrenja peleta bez kvarca u gipsnoj isplaci s različitim koncentracijama polianionske celuloze, nakon 24-satnog ispitivanja, prikazani su na slici 4-7.

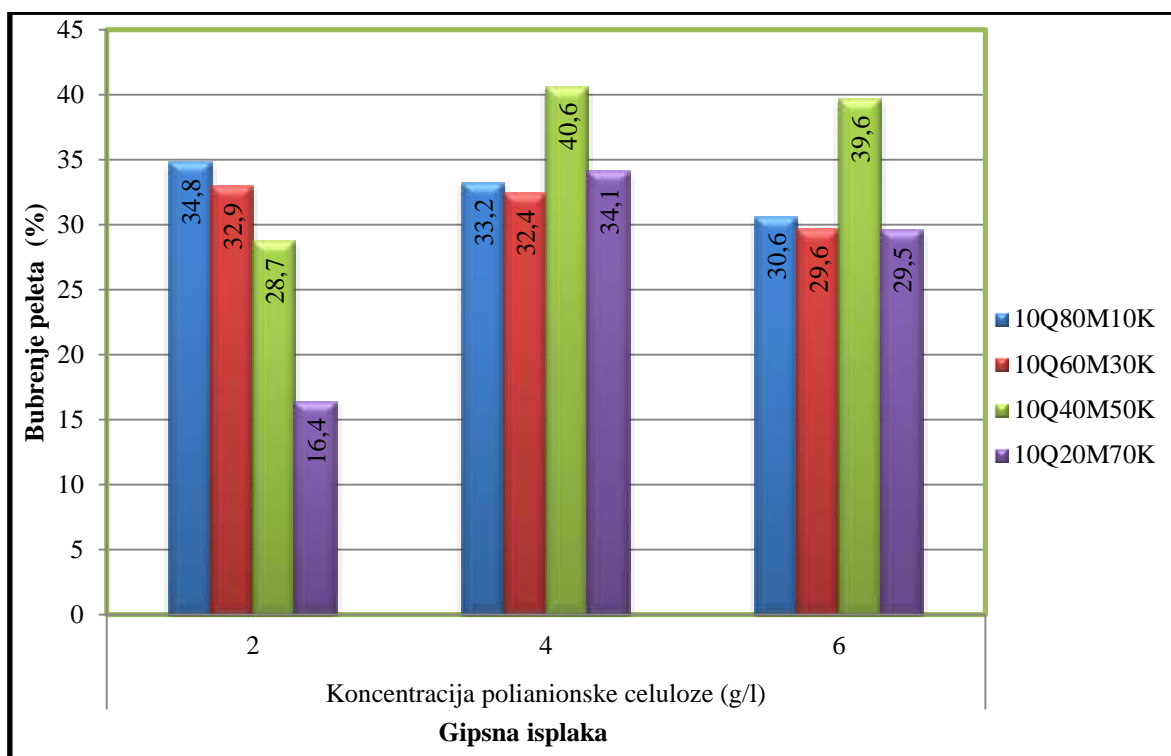


Slika 4-7. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima bez kvarca na bubrenje u gipsnoj isplaci

Iz podataka prikazanih na slici 4-7 vidljivo je da smanjenje udjela montmorilonita u peletu rezultira manjim izmjerenim vrijednostima bubrenja peleta nakon 24 sata ispitivanja samo za pelete s 80%-tnim i 60%-tnim udjelom montmorilonita. Maksimalno bubrenje peleta za sve koncentracije polianionske celuloze u gipsnoj isplaci dobiveno je bubrenjem peleta 0Q40M60K. Usporedbom rezultata bubrenja peleta s jednakim udjelom montmorilonita u gipsnoj isplaci, može se zaključiti da samo kod peleta 0Q80M20K dolazi do smanjenja bubrenja s povećanjem koncentracije polianionske celuloze u isplaci. Kod svih ostalih peleta (0Q60M40K, 0Q40M60K i 0Q20M80K) dolazi prvo do porasta, a potom do smanjenja vrijednosti 24-satnog bubrenja, pri čemu su maksimalne vrijednosti bubrenja peleta (osim za

pelet 0Q80M20K) izmjerene u gipsnoj isplaci s 4 g/l polianionske celuloze. Bubrenje peleta 0Q60M40K i 0Q20M80K najbolje inhibira gipsna isplaka s 2 g/l polianionske celuloze.

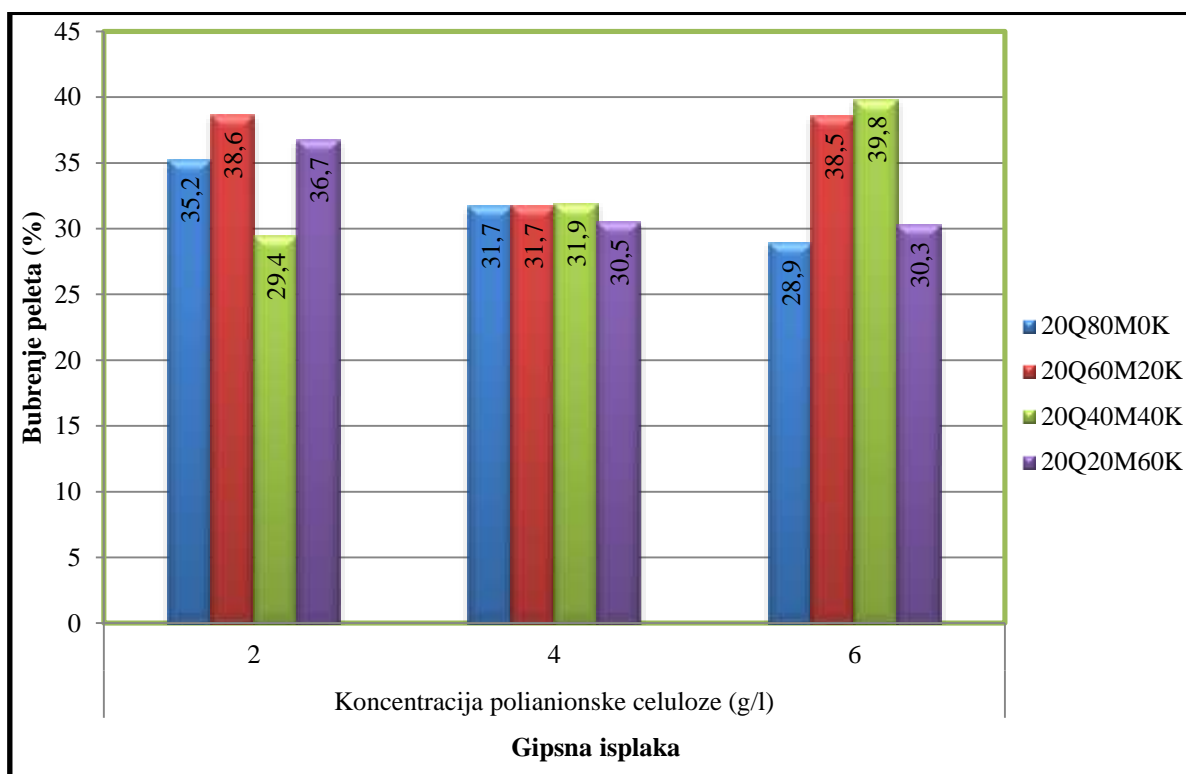
Podaci o bubrenju peleta s 10%-tnim udjelom kvarca u gipsnoj isplaci prikazani su na slici 4-8.



Slika 4-8. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 10%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u gipsnoj isplaci

Iz podataka prikazanih na slici 4-8 može se zaključiti kako je trend smanjenja bubrenja peleta sa smanjenjem udjela montmorilonita i povećanjem udjela kaolinita vidljiv samo u gipsnoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze. Kod ispitivanja bubrenja peleta s 10%-tnim udjelom kvarca u gipsnim isplakama s 4 i 6 g/l polianionske celuloze, uočeno je da su dobivene vrijednosti bubrenja peleta 10Q80M10K, 10Q60M30K i 10Q20M70K približno jednake, odnosno da se nalaze u rasponu od 33,2 do 34,1% za isplake s 4 g/l polianionske celuloze, te od 30,6 do 29,5% za isplake sa 6 g/l polianionske celuloze. Maksimalne vrijednosti bubrenja peleta u gipsnoj isplaci s 4 i 6 g/l polianionske celuloze dobivene su bubrenjem peleta s 40%-tnim udjelom montmorilonita.

Na slici 4-9 prikazan je utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita na bubrenje peleta s 20%-tnim masenim udjelom kvarca u gipsnoj isplaci.



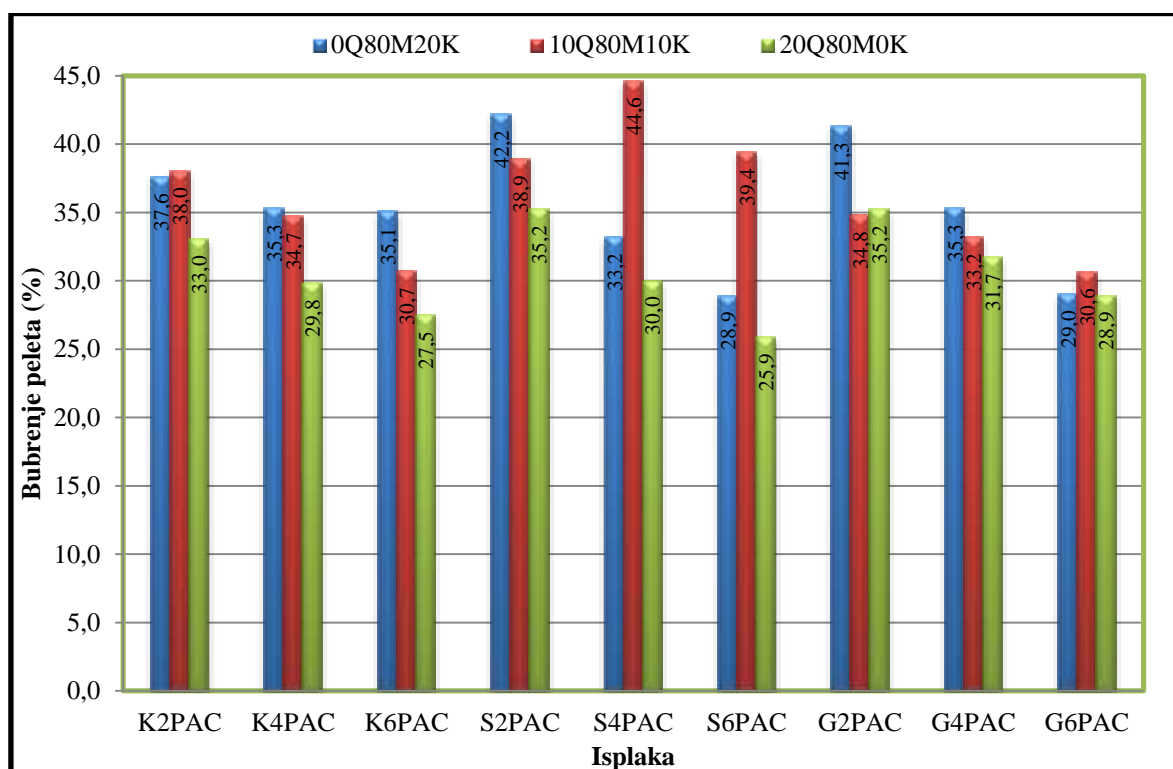
Slika 4-9. Utjecaj smanjenja udjela montmorilonita i povećanja udjela kaolinita u peletima s 20%-tnim udjelom kvarca na bubrenje u gipsnoj isplaci

Na temelju podataka prikazanih na slici 4-9 može se zaključiti da ne postoji jasno izražena zakonitost promjene vrijednosti bubrenja peleta nakon 24 sata ispitivanja s promjenom mineralošskog sastava peleta. Tako naprimjer, dobivene vrijednosti bubrenja peleta u gipsnoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze pokazuju trend povećanja, pa smanjenja te ponovnog povećanja sa smanjenjem udjela montmorilonita. Sličan nepravilan trend uočen je i kod peleta koji su bubrili u gipsnoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze. Bubrenjem peleta s 20%-tnim udjelom kvarca u gipsnoj isplaci s 4 g/l polianionske celuloze dobivene su približno jendake vrijednosti za sva četiri peleta, odnosno vrijednosti su se nalazile u rasponu od 30,5 do 31,9%. Ukoliko se usporede vrijednosti bubrenja peleta s jednakim udjelom montmorilonita u gipsnim isplakama s različitim koncentracijama polianionske celuloze, može se zaključiti da povećanje koncentracije polianionske celuloze uzrokuje smanjenje vrijednosti bubrenja samo kod peleta 20Q80M0K i 20Q20M60K, dok je pri bubrenju peleta 20Q40M40K uočen trend porasta vrijednosti bubrenja s povećanjem koncentracije polianionske celuloze.

4.4. Bubrenje peleta s jednakim udjelom montmorilonita u inhibiranim isplakama

Nakon analize podataka o 24-satnom bubrenju peleta za pojedine skupine peleta s različitim udjelom kvarca, te s obzirom na tip inhibirane isplake, u nastavku je dana usporedna analiza podataka o bubrenju peleta s jednakim udjelom montmorilonita u različitim inhibiranim isplakama (slike 4-10 do 4-13).

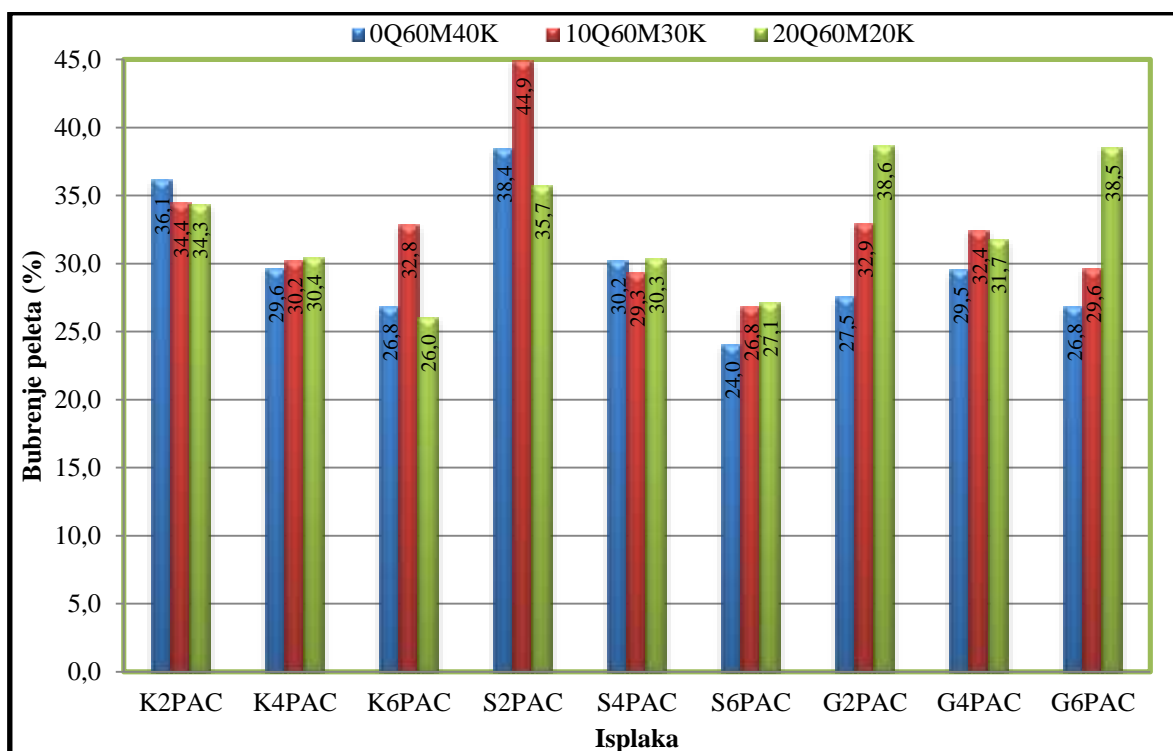
Na slici 4-10 prikazan je utjecaj smanjenja udjela kaolinita na bubrenje peleta s 80%-tnim udjelom montmorilonita u različitim inhibiranim isplakama.



Slika 4-10. Utjecaj smanjenja udjela kaolinita u peletima s 80%-tnim udjelom montmorilonita na njihovo bubrenje u inhibiranim isplakama

Na temelju podataka o bubrenju peleta nakon 24 sata prikazanih na slici 4-10 može se zaključiti kako povećanje koncentracije polianionske celuloze uzrokuje smanjenje bubrenja peleta u gotovo svim inhibiranim isplakama bez obzira na udjel kaolinita. Odstupanje od navedenog trenda uočeno je samo kod peleta 10Q80M10K koji su bubrili u slanim isplakama s 4 i 6 g/l polianionske celuloze. Maksimalna vrijednost bubrenja dobivena je bubrenjem peleta s 20%-tnim i 10%-tnim udjelom kaolinita, dok su najmanje vrijednosti bubrenja dobivene pri bubrenju peleta 20Q80M0K.

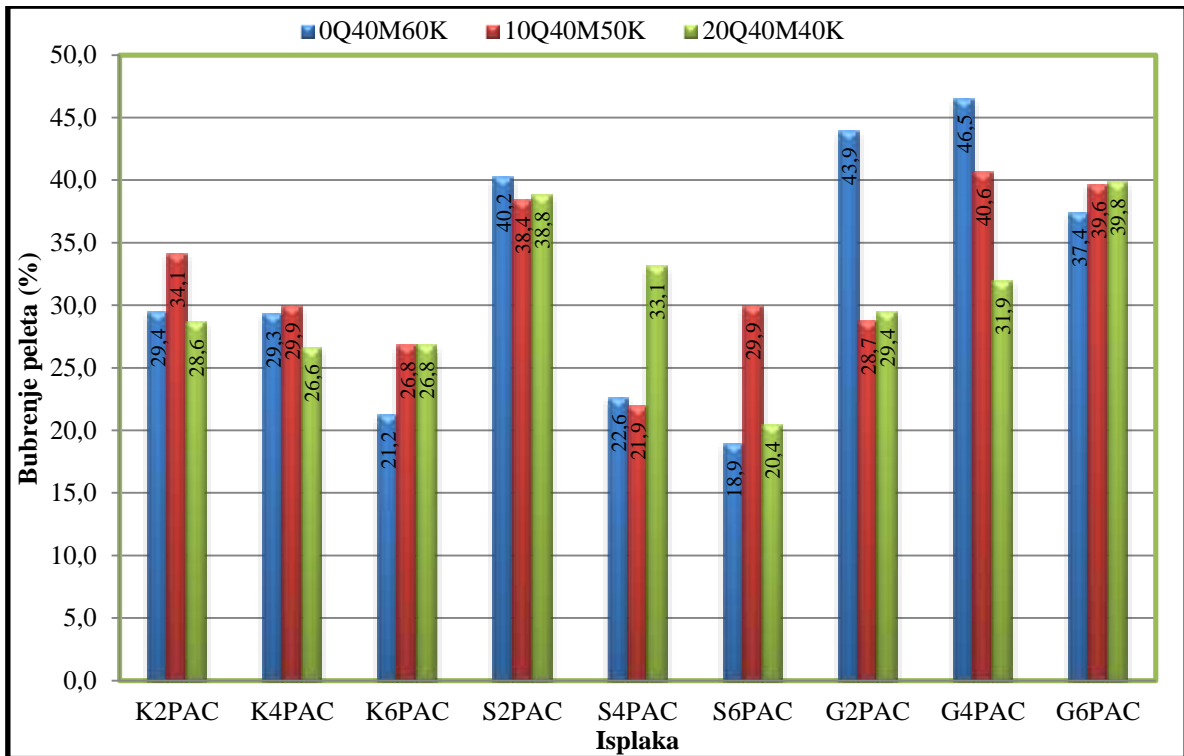
Podaci o utjecaju smanjenja udjela kaolinita na bubrenje peleta sa 60%-tnim udjelom montmorilonita u različitim inhibiranim isplakama prikazani su na slici 4-11.



Slika 4-11. Utjecaj smanjenja udjela kaolinita u peletima sa 60%-tnim udjelom montmorilonita na njihovo bubrenje u inhibiranim isplakama

Usporedbom podataka prikazanih na slici 4-11 može se zaključiti kako ne postoji općenita zakonitost o utjecaju udjela kaolinita u razmatranim peletima na njihovo bubrenje. Tako naprimjer, smanjenje udjela kaolinita u peletu rezultira smanjenjem bubrenja peleta u kalijskoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze te većim bubrenjem peleta u gipsnoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze kao i u gipsnoj i slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze.

Podaci o utjecaju smanjenja udjela kaolinita na bubrenje peleta s 40%-tnim udjelom montmorilonita u različitim inhibiranim isplakama prikazani su na slici 4-12.

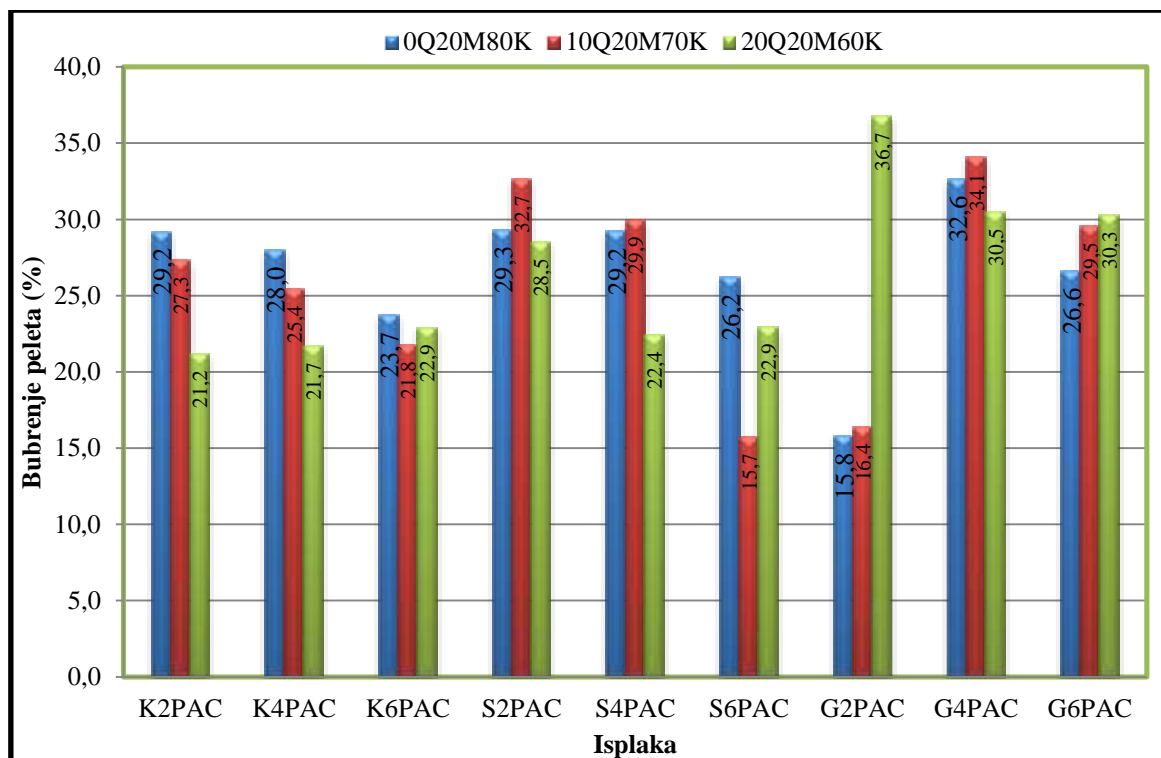


Slika 4-12. Utjecaj smanjenja udjela kaolinita u peletima s 40%-tnim udjelom montmorilonita na njihovo bubrenje u inhibiranim isplakama

Slično kao i kod analize bubrenja peleta sa 60%-tnim udjelom montmorilonita, i kod analize bubrenja peleta s 40%-tnim udjelom montmorilonita u različitim inhibiranim isplakama nije moguće utvrditi opće zakonitosti i trendove (slika 4-12). Smanjenje udjela kaolinita u peletima različito utječe na bubrenje peleta izmjereno nakon 24 sata. Tako naprimjer, smanjenje udjela kaolinita u peletima uzrokuje povećanje bubrenja peleta u kalijskoj i gipsnoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze, ali i istovremeno smanjenje bubrenja u gipsnoj isplaci s 4 g/l polianionske celuloze.

Peleti s 50%-tnim udjelom kaolinita najmanje bubre u isplaci S4PAC, dok peleti sa 60%-tnim i 40%-tnim udjelom kaolinita najmanje bubre u isplaci S6PAC, što pokazuje na bolje inhibiranje svih uzoraka u slanoj isplaci u odnosu na druge razmatrane inhibirane isplake.

Podaci o utjecaju smanjenja udjela kaolinita na bubrenje peleta s udjelom montmorilonita od 20 mas. % u različitim inhibiranim isplakama prikazani su na slici 4-13.



Slika 4-13. Utjecaj smanjenja udjela kaolinita u peletima s 20%-tnim udjelom montmorilonita na njihovo bubrenje u inhibiranim isplakama

Na temelju prikazanih podataka može se zaključiti da ne postoji općenita zakonitost ili trend kojim bi se mogao objasniti utjecaj smanjenja udjela kaolinita u peletima s 20%-tnim udjelom montmorilonita na njihovo bubrenje. Najmanje bubrenje peleta s jednakim udjelom montmorilonita zabilježeno je u isplaci G2PAC za pelete s 80%-tnim udjelom kaolinita, u isplaci S6PAC za pelete sa 70%-tnim udjelom kaolinita te u isplaci K2PAC za pelete sa 60%-tnim udjelom kaolinita. Ukoliko bi se usporedili rezultati prikazani na slikama 4-11, 4-12 i 4-13 može se zaključiti da su najujednačeniji rezultati postignuti bubrenjem peleta u kalijskoj isplaci, dok su najveće oscilacija uočene kod slane isplake te posebno kod gipsne isplake.

4.5. Usporedba bubrenja peleta u različitim inhibiranim isplakama

Temeljem usporednih analiza navedenih u ovom poglavlju, ali i rezultata laboratorijskih ispitivanja koja su detaljno komentirana u prethodnom poglavlju izvršen je odabir isplake u kojoj je izmjereno minimalno bubrenje. Inhibirane isplake su grupirane u tri skupine ovisno o koncentraciji polianionske celuloze (2, 4 i 6 g/l polianionske celuloze), te su za svaki pelet odabrane tri isplake ovisno o koncentraciji polianionske celuloze i izmjerenoj vrijednosti bubrenja. Kako je općenito najveće bubrenje peleta zabilježeno u prvih 120 minuta ispitivanja (početni period), napravljena je analiza na temelju rezultata bubrenja nakon 120 minuta i 24 sata. Odabir najboljih isplaka prema rezultatima bubrenja prikazan je u tablicama 4-1 i 4-2. U tablici 4-1 prikazani su rezultati analize utjecaja inhibiranih isplaka s različitim koncentracijama polianionske celuloze na bubrenje peleta u početnih 120 minuta ispitivanja.

Tablica 4-1. Minimalno bubrenje peleta izmjereno u različitim inhibiranim isplakama nakon 120 minuta ispitivanja

PELET	Minimalno bubrenje peleta u inhibiranim isplakama (%)					
	Koncentracija polianionske celuloze (g/l)					
	2		4		6	
0Q80M20K	13,5	G2PAC	12,6	G4PAC	10,9	G6PAC
0Q60M40K	13,3	G2PAC	12,4	G4PAC	10,9	G6PAC
0Q40M60K	12,7	K2PAC	9,7	S4PAC	8,3	S6PAC
0Q20M80K	7,8	G2PAC	10,2	S4PAC	8,1	K6PAC
10Q80M10K	12,0	G2PAC	11,2	G4PAC	9,7	G6PAC
10Q60M30K	14,1	G2PAC	12,3	G4PAC	11,9	G6PAC
10Q40M50K	12,7	G2PAC	9,3	S4PAC	13,1	S6PAC
10Q20M70K	8,1	G2PAC	12,4	K4PAC	5,3	S6PAC
20Q80M0K	11,0	S2PAC	9,8	G4PAC	8,5	S6PAC
20Q60M20K	15,1	G2PAC/S2PAC	12,0	G4PAC	11,2	S6PAC
20Q40M40K	12,5	G2PAC	12,3	G4PAC	7,7	S6PAC
20Q20M60K	7,0	K2PAC	8,4	S4PAC	8,2	S6PAC

Crvenom bojom označene su minimalne vrijednosti bubrenja peleta nakon 120 minuta ispitivanja i inhibirane isplake u kojima je izmjereno minimalno bubrenje. Ukoliko se usporede prikazane vrijednosti minimalnog bubrenja za pojedine koncentracije polianionske

celuloze u isplaci, može se zaključiti kako su minimalna bubrenja u početnom periodu najviše ostvarena u gipsnoj i slanoj isplaci. Minimalno bubrenje peleta u isplakama s 2 g/l polianionske celuloze izmjereno je najčešće u gipsnoj isplaci. Kod viših koncentracija polianionske celuloze minimalno bubrenje najčešće je zabilježeno tijekom bubrenja peleta u gipsnoj i slanoj isplaci. Ukoliko se uzmu u obzir minimalna bubrenja pojedinih peleta bez obzira na koncentraciju polianionske celuloze, tada se može zaključiti kako se minimalno bubrenje peleta u početnom periodu nalazi u rasponu od 5,3 do 11,9%, te kako je ono ostvareno kod 9 peleta u inhibiranim gipsnim i slanim isplakama sa 6 g/l polianionske celuloze. Podaci prikazani u tablici 4-1 dobro se slažu s podacima o vremenu kapilarnog upijanja (slika 3-23). Naime, kako su kod slane isplake, a posebno kod gipsne isplake izmjerene više vrijednosti kapilarnog upijanja u odnosu na kalijsku isplaku kod svih koncentracija polianionske celuloze, bilo je za očekivati da kalijaska isplaka brže prodire u pelet, što rezultira većim bubrenjem u početnom periodu. Podaci o minimalnom bubrenju peleta nakon 24-satnog ispitivanja prikazani su u tablici 4-2.

Tablica 4-2. Minimalno bubrenje peleta izmjereno u različitim inhibiranim isplakama nakon 24 sata ispitivanja

PELET	Minimalno bubrenje peleta u inhibiranim isplakama (%)					
	Koncentracija polianionske celuloze (g/l)					
	2		4		6	
0Q80M20K	37,6	K2PAC	33,2	S4PAC	28,9	S6PAC
0Q60M40K	27,5	G2PAC	29,5	G4PAC	24,0	S6PAC
0Q40M60K	29,4	K2PAC	22,6	S4PAC	18,9	S6PAC
0Q20M80K	15,8	G2PAC	28,0	K4PAC	23,7	K6PAC
10Q80M10K	34,8	G2PAC	33,2	G4PAC	30,6	G6PAC
10Q60M30K	32,9	G2PAC	29,3	S4PAC	26,8	S6PAC
10Q40M50K	28,7	G2PAC	21,9	S4PAC	26,8	K6PAC
10Q20M70K	16,4	G2PAC	25,4	K4PAC	15,7	S6PAC
20Q80M0K	33,0	K2PAC	29,8	K4PAC	25,9	S6PAC
20Q60M20K	34,3	K2PAC	30,3	S4PAC	26,0	K6PAC
20Q40M40K	28,6	K2PAC	26,6	K4PAC	20,4	S6PAC
20Q20M60K	21,2	K2PAC	21,7	K4PAC	22,9	S6PAC

Podaci navedeni u tablici 4-2 odabrani su po istom principu kao i podaci u tablici 4-1, odnosno za svaki pelet i koncentraciju polianionske celuloze odabrana je isplaka u kojoj je

izmjereno minimalno bubrenje promatranog peleta. Nakon analize svih rezultata, odabrane su isplake u kojima je izmjereno minimalno bubrenje određenog peleta bez obzira na koncentraciju polianionske celuloze (crvenom bojom u tablici označeno je minimalno bubrenje peleta i isplaka u kojoj je zabilježeno minimalno bubrenje peleta). Usporedbom podataka o minimalnom bubrenju nakon 120 minuta i 24 sata ispitivanja može se zaključiti kako su minimalne vrijednosti bubrenja peleta dobivene nakon jednog i drugog perioda kod jednake koncentracije polianionske celuloze najčešće kod istog tipa inhibirane isplake. Nakon 24 sata jednako kao i nakon 120 minuta ispitivanja u pravilu najveće smanjenje bubrenja postignuto je tijekom bubrenja peleta u gipsnoj i slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze.

Međutim kod odabira najpovoljnije isplake potrebno je voditi računa i o maksimalnom potencijalnom bubrenju peleta u određenoj inhibiranoj isplaci. Ukoliko bi se usporedili podaci o bubrenju peleta u različitim inhibiranim isplakama može se zaključiti da samo u slučaju kalijске isplake određeni peleti ostvare maksimalno bubrenje unutar vremena ispitivanja, odnosno 24 sata. Kalijška i gipsna isplaka pozitivno djeluju na smanjenje intenziteta bubrenja peleta, međutim nakon završetka ispitivanja postoji tendencija njegovog daljnjeg bubrenja.

4.6. Utjecaj bubrenja peleta na smanjenje protočne površine i povećanje gradijenta tlaka u prstenastom prostoru

Tijekom bušenja, uslijed međudjelovanja isplake na bazi vode i šejla može doći do bubrenja stijenki kanala bušotine. Bubrenjem stijenki kanala bušotine dolazi do smanjenja protočne površine prstenastog prostora kanala bušotine, ali i promjene gradijenta tlaka koji nastaje uslijed otpora protjecanju isplake kroz već spomenuti prstenasti prostor.

Na temelju podataka o bubrenju peleta različitog mineraloškog sastava u inhibiranim isplakama koji su prikazani u poglavlju 3-4, napravljena je simulacija utjecaja bubrenja peleta na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka. Promjeri kanala bušotine i alatki koji su korišteni prilikom simulacije, korištene jednadžbe kao i točan opis načina na koji je bubrenje peleta povezano s promjenom promjera kanala bušotine prikazani su u već spomenutom poglavlju 3-4. U nastavku su prikazani rezultati simulacije provedene pojedinačno za svaki pelet. Radi olakšanog praćenja prikazanih rezultata i pripadajuće analize u nastavku će se zadržati do sada korišteni termin bubrenje peleta umjesto bubrenje stijenki kanala bušotine.

U tablici 4-3 prikazani su rezultati simulacije utjecaja bubrenja peleta u različitim inhibiranim isplakama na promjenu protočne površine prstenastog prostora kanala bušotine i gradijenta tlaka.

Tablica 4-3. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 0Q80M20K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	862,4	865,5	865,8	857,4	867,2	873,0	857,8	865,5	873,1
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1377,0	1380,	1380,4	1372,0	1381,8	1387,6	1372,4	1380,0	1387,7
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	270,1	272,2	272,5	266,6	273,4	277,4	266,9	272,2	277,5
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	600,5	602,7	602,9	597,1	603,9	607,9	597,4	602,7	608,0
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	112	187	239	115	166	257	89	153	206
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	32	55	69	28	42	67	22	40	50
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	579	906	1207	729	1016	1474	581	877	1307
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	89	149	191	89	130	202	69	120	160

Iz podataka navedenih u tablici 4-3 vidljivo je da s bubrenjem dolazi do suženja kanala bušotine i smanjenja protočne površine prstenastog prostora pri čemu se smanjenje protočne površine nalazi u rasponu od $36,7 \cdot 10^{-4}$ do $52,4 \cdot 10^{-4}$ m² kod kanala bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,4445 m, dok je smanjenje protočne površine kanala bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,3112 m od $25,6 \cdot 10^{-4}$ do $36,6 \cdot 10^{-4}$ m². Najmanja protočna površina nakon bubrenja dobivena je bubrenjem peleta u isplaci S2PAC, a najveća nakon bubrenja peleta 0Q80M20K u isplaci G6PAC. Na temelju izračunatih vrijednosti smanjenja protočne površine prstenastog prostora i reoloških svojstava ispitivanih isplaka napravljena je simulacija promjene gradijenta tlaka, i to za slučaj nominalnog promjera kanala bušotine i promjera kanala bušotine nakon 24-satnog bubrenja peleta u određenoj inhibiranoj isplaci. Ukoliko se usporede rezultati simulacije promjene gradijenta tlaka uslijed bubrenja peleta u određenoj isplaci može se zaključiti da su najmanje promjene gradijenta tlaka od 1 do 3 Pa/m dobivene kod najveće površine prstenastog prostora ($1424,4 \cdot 10^{-4}$ m²), dok su najveće promjene gradijenta tlaka od 105 do 222 Pa/m uočene kod najmanje protočne površine ($303,2 \cdot 10^{-4}$ m²).

Utjecaj bubrenja peleta 0Q60M40K u različitim inhibiranim isplakama na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka koji nastaje kao otpor protjecanju isplake, vidljiv je iz podataka navedenih u tablici 4-4.

Tablica 4-4. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 0Q60M40K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4}$ m²)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	863,4	871,4	875,3	859,2	870,2	878,3	873,8	871,6	874,3
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1378,0	1386,0	1389,9	1373,8	1384,8	1392,9	1388,4	1386,2	1388,9
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	270,8	276,4	279,1	267,8	275,5	281,1	278,0	276,5	278,4
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	601,2	606,8	609,5	598,3	606	611,6	608,5	607,0	608,9
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	112	184	235	114	165	255	86	151	205
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	32	55	68	28	42	67	21	40	50
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	577	882	1154	724	1001	1437	539	851	1298
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	89	148	187	89	129	200	67	119	160

Smanjenje protočnih površina prstenastog prostora koje su definirane odgovarajućim nominalnim promjerom dlijeta i alata nalazi se u rasponu od $31,5 \cdot 10^{-4}$ do $50,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,4445 m, odnosno $22 \cdot 10^{-4}$ do $35,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,3112 m. Važno je napomenuti da su i maksimalna i minimalna vrijednost promjene protočne površine dobivene bubrenjem peleta u slanoj isplaci (najveće smanjenje protočne površine zabilježeno je nakon bubrenja peleta 0Q60M40K u slanoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze, dok je najmanja promjena zabilježena nakon bubrenja peleta u slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze). Na temelju podataka prikazanih u tablici 4-4 može se zaključiti da se promjena gradijenta tlaka nalazi u rasponu od 1 do 2 Pa/m za protočnu površinu od $1424,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, od 4 do 11 Pa/m za protočnu površinu od $633,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, od 6 do 16 Pa/m za protočnu površinu od $909,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ te od 84 do 198 Pa/m za protočnu površinu od $303,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

Rezultati simulacije utjecaja bubrenja peleta 0Q40M60K na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore prikazani su u tablici 4-5.

Tablica 4-5. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 0Q40M60K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	871,1	870,7	881,4	855,9	879,4	884,7	851,9	847,3	859,3
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1385,7	1385,3	1395,9	1370,5	1394,0	1399,3	1366,4	1361,9	1373,9
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	276,1	275,9	283,3	265,6	281,9	285,6	262,8	259,6	268,0
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	606,6	606,3	613,8	596,0	612,4	616,1	593,2	590,0	598,4
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	110	185	232	115	162	251	91	159	212
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	32	55	68	28	41	66	22	41	51
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	556	885	1127	737	958	1395	601	957	1400
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190

Isto kao i kod rezultata simulacije provedene za pelete 0Q80M20K i 0Q60M40K, i kod rezultata simulacije za pelet 0Q40M60K vidljivo je nešto veće smanjenje protočne površine kanala bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,4445 m ($25,1 \cdot 10^{-4}$ do $62,5 \cdot 10^{-4}$

m²) u odnosu na kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom nominalnog promjera 0,3112 m (17,5·10⁻⁴ do 43,6·10⁻⁴ m²). Najmanja vrijednost protočne površine dobivena je bubrenjem peleta 0Q40M60K u gipsnoj isplaci s 4 g/l polianionske celuloze, a najveća bubrenjem peleta u slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze. Promjena gradijenta tlaka uslijed bubrenja peleta u određenoj inhibiranoj isplaci i smanjenja protočne površine nalazi se u rasponu od 1 do 3 Pa/m za površinu prstenastog prostora od 1424,4·10⁻⁴ m², od 7 do 22 Pa/m za površinu prstenastog prostora od 909,8·10⁻⁴ m², od 17 do 49 Pa/m za površinu od 633,6·10⁻⁴ m², dok su najveće promjene gradijenta tlaka od 82 do 300 Pa/m dobivene za najmanju površinu prstenastog prostora (303,2·10⁻⁴ m²).

U tablici 4-6 prikazani su podaci dobiveni simulacijom utjecaja bubrenja peleta 0Q20M80K u različitim inhibiranim isplakama na promjenu protočne površine prstenastog prostora i gradijenta tlaka koji nastaje kao otpor protjecanju isplake kroz spomenuti prostor.

Tablica 4-6. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 0Q20M80K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina (·10 ⁻⁴ m ²)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	869,4	871,9	876,7	869,7	869,5	873,5	888,3	865,3	873,0
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1384,0	1386,4	1391,3	1384,3	1384,1	1388,1	1402,8	1379,9	1387,6
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	275,0	276,7	280,1	275,2	275,0	277,8	288,1	272,1	277,4
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	605,4	607,1	610,5	605,6	605,5	608,3	618,6	602,6	607,9
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	111	184	234	112	165	257	84	153	206
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	32	55	68	28	42	67	21	40	50
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	561	881	1150	686	1006	1471	501	878	1307
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	88	148	187	87	129	202	65	120	160

Na osnovu podataka prikazanih u tablici 4-6 može se zaključiti da je najmanja promjena protočne površine dobivena bubrenjem peleta 0Q20M80K u gipsnoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze dok je najveća promjena dobivena bubrenjem peleta u gipsnoj isplaci s 4 g/l polianionske celuloze. Proračunate vrijednosti smanjenja protočne površine prstenastog prostora nalaze se u rasponu od 21,5·10⁻⁴ do 44,5·10⁻⁴ m² za kanal bušotine nominalnog promjera 0,4445 m te od 15·10⁻⁴ do 31,1·10⁻⁴ m² za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom

nominalnog promjera 0,3112 m. Najmanje promjene gradijenta tlaka (1 do 2 Pa/m) zabilježene su kod površine prstenastog prostora određenog dlijetom nominalnog promjera 0,4445 m i bušačim šipkama vanjskog promjera 0,127 m, dok su najveće promjene gradijenta tlaka (46 do 219 Pa/m) dobivene za prstenasti prostor određen nominalnim promjerom dlijeta 0,3112 m i teškim šipkama vanjskog promjera 0,2413 m.

Rezultati simulacije utjecaja bubrenja peleta 10Q80M10K u različitim inhibiranim isplakama na smanjenje protočne površine prstenastog prostora i promjenu gradijenta tlaka prikazani su u tablici 4-7.

Tablica 4-7. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 10Q80M10K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	863,1	868,0	872,3	861,7	855,6	861,4	867,0	869,4	872,3
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1377,7	1382,6	1386,9	1376,3	1370,2	1376	1381,6	1384	1387
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	270,6	274,0	277,0	269,6	265,3	269,4	273,3	275,0	277,0
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	601,0	604,5	607,4	600,1	595,8	599,8	603,7	605,4	607,4
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	112	186	236	113	170	264	88	152	206
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	32	55	69	28	42	68	21	40	50
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	579	896	1169	712	1079	1561	557	861	1312
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	89	149	188	88	133	207	68	119	160

Smanjenje protočne površine prstenastog prostora kanala bušotine nalazi se u rasponu $37,4 \cdot 10^{-4}$ do $54,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom nominalnog promjera 0,4445 m, dok je smanjenje protočne površine kanala bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,3112 m nešto manje i nalazi se u rasponu od $26,2 \cdot 10^{-4}$ do $37,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Najmanja protočna površina dobivena je nakon bubrenja peleta 10Q80M10K u slanoj isplaci s 4 g/l polianionske celuloze, dok su najveće protočne površine dobivene za bubrenje peleta u gipsnoj i kalijskoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze. Simulirane promjene gradijenta tlaka uslijed bubrenja peleta 10Q80M10K u određenoj inhibiranoj isplaci nalaze se u rasponu od 1 do 3 Pa/m za protočnu površinu prstenastog prostora kanala bušotine od $1424,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, od 5 do 17 Pa/m za protočnu površinu od $633,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, od 8 do 25 Pa/m za protočnu površinu od

$909,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ te za protočnu površinu od $303,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ u rasponu od 102 do 309 Pa/m. Na osnovu navedenih podataka o promjeni gradijenta tlaka može se zaključiti da su te promjene izraženije kod manjih promjera kanala bušotine.

U tablici 4-8 dani su podaci simulacije utjecaja bubrenja peleta 10Q60M30K u različitim inhibiranim isplakama na smanjenje protočne površine i promjenu gradijenta tlaka koji nastaje uslijed otpora protjecanju isplake kroz promatranu površinu prstenastog prostora kanala bušotine.

Tablica 4-8. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 10Q60M30K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	866,3	871,5	869,2	852,9	872,7	876,1	868,6	869,3	873,1
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1380,9	1386,1	1383,8	1367,5	1387,3	1390,7	1383,2	1383,9	1387,7
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	272,8	276,4	274,8	263,5	277,2	279,6	274,4	274,9	277,5
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	603,3	606,9	605,3	593,9	607,7	610,1	604,9	605,3	608,0
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	111	184	238	116	164	256	87	152	206
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	32	55	69	28	41	67	21	40	50
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	570	881	1189	747	988	1455	552	861	1308
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	88	148	189	90	128	201	68	119	160

Na temelju provedene simulacije i rezultata prikazanih u tablici 4-8 može se zaključiti, da je najmanja protočna površina prstenastog prostora nakon bubrenja peleta dobivena bubrenjem peleta u slanoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze, dok je najveća dobivena za slanu isplaku sa 6 g/l polianionske celuloze. Smanjenje protočne površine kanala bušotine promjera 0,4445 m nalazi se u rasponu od $33,7 \cdot 10^{-4}$ do $56,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ te je nešto veće od smanjenja protočne površine za kanal bušotine promjera 0,3112 m, koje se nalazi u rasponu od $23,5 \cdot 10^{-4}$ do $39,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Bubrenje peleta u različitim inhibiranim isplakama uzrokovalo je povećanje gradijenta tlaka koje se nalazilo u rasponu od 1 do 3 Pa/m za površinu prstenastog prostora između dlijeta promjera 0,4445 m i bušačih šipki vanjskog promjera 0,127 m, od 5 do 12 Pa/m za površinu određenu vanjskim promjerom dlijeta 0,4445 m i vanjskim promjerom bušačih šipki 0,127 m, od 7 do 17 Pa/m za površinu određenu

dlijetom promjera 0,4445 m i vanjskim promjerom teških šipki 0,2858 m, dok je najveća promjena gradijenta tlaka (102 do 208 Pa/m) uočena kod protočne površine određene dlijetom promjera 0,3112 m i teškim šipkama vanjskog promjera 0,2413 m.

Utjecaj bubrenja peleta 10Q40M50K u različitim inhibiranim isplakama na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka koji nastaje uslijed otpora protjecanju isplake kroz prstenasti prostor vidljiv je iz podataka navedenih u tablici 4-9.

Tablica 4-9. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 10Q40M50K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	865,8	871,4	874,7	860,0	880,9	871,3	872,3	857,1	858,5
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1380,4	1386,0	1389,3	1374,6	1395,5	1385,9	1386,9	1371,7	1373,1
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	272,5	276,4	278,6	268,4	282,9	276,3	277,0	266,4	267,4
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	602,9	606,8	609,1	598,9	613,4	606,7	607,4	596,9	597,8
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	111	185	235	114	162	258	87	156	212
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	32	55	68	28	41	67	21	41	51
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	571	883	1161	720	952	1489	542	913	1406
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	89	148	188	89	127	203	67	122	165

Iz rezultata simulacije prikazanih u tablici 4-9 može se zaključiti da bubrenje peleta 10Q40M50K u različitim inhibiranim isplakama uzrokuje smanjenje protočne površine prstenastog prostora od $28,9 \cdot 10^{-4}$ do $52,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,4445 m, dok je za kanal bušotine promjera 0,3112 m smanjenje protočne površine prstenastog prostora nešto manje i nalazi se u rasponu od $20,2 \cdot 10^{-4}$ do $36,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Na osnovu rezultata simulacije utjecaja bubrenja peleta na promjenu gradijenta tlaka može se zaključiti da su te promjene najmanje vidljive kod najveće razmatrane površine prstenastog prostora ($1424,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$), a najizraženije kod najmanje protočne površine prstenastog prostora ($303,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$). Simulacijom dobivene promjene gradijenta tlaka s bubrenjem peleta 10Q40M50K nalazile su se u rasponu od 1 do 3 Pa/m za protočnu površinu od $1424,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, od 4 do 16 Pa/m za protočnu površinu od $633,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, od 7 do 12 Pa/m za protočnu

površinu od $909,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, dok se za protočnu površinu prstenastog prostora od $1424,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ promjena gradijenta tlaka nalazila u rasponu od 87 do 306 Pa/m.

U tablici 4-10 prikazani su rezultati simulacije utjecaja bubrenja peleta 10Q20M70K u različitim inhibiranim isplakama na promjenu protočne površine prstenastog prostora kanala bušotine te na promjenu gradijenta tlaka.

Tablica 4-10. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 10Q20M70K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	873,5	875,5	880,5	865,9	869,7	888,9	887,9	865,4	870,4
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1388,1	1390,1	1395,1	1380,5	1384,3	1403,5	1402,5	1380,0	1385,0
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	277,8	279,2	282,7	272,6	275,2	288,6	287,8	272,2	275,7
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	608,2	609,7	613,1	603,0	605,6	619,0	618,3	602,6	606,1
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	110	183	233	113	165	249	84	153	207
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	31	55	68	28	42	66	21	40	50
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	552	867	1129	701	1006	1370	502	878	1325
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	87	147	186	88	129	197	66	120	161

Usporedbom rezultata proračuna smanjenja protočne površine prstenastog prostora kanala bušotine može se zaključiti da bubrenje uzrokuje nešto veće smanjenje protočne površine kanala bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,4445 m (od $20,9 \cdot 10^{-4}$ do $43,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$) u odnosu na kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,3112 m, gdje je dobiveno smanjenje protočne površine u rasponu od $14,6 \cdot 10^{-4}$ do $31 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Iz prikazanih rezultata simulacije utjecaja bubrenja na promjenu gradijenta tlaka može se zaključiti da je suženje kanala uzrokovalo povećanje gradijenta tlaka kod svih razmatranih protočnih površina. Promjena gradijenta tlaka uslijed bubrenja nalazi se u rasponu od 1 do 2 Pa/m za prstenasti prostor između dlijeta promjera 0,4445 m i bušačkih šipki nominalnog promjera 0,127 m, od 3 do 12 Pa/m za prstenasti prostor između dlijeta promjera 0,3112 m i bušačkih šipki nominalnog promjera 0,127 m, od 4 do 17 Pa/m za prstenasti prostor između dlijeta promjera 0,4445 m i teških šipki vanjskog promjera 0,2858 m te od 47 do 225 Pa/m za

prstenasti prostor između dlijeta promjera 0,3112 m i teških šipki vanjskog promjera 0,2413 m.

Utjecaj bubrenja peleta 20Q80M0K u različitim inhibiranim isplakama na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka koji nastaje uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore vidljiv je iz rezultata simulacije prikazanih u tablici 4-11.

Tablica 4-11. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 20Q80M0K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	870,9	873,7	877,3	868,2	874,3	878,8	868,2	872,0	875,4
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1385,5	1388,3	1391,8	1382,8	1388,9	1393,4	1382,8	1386,6	1390,0
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	276,0	278,0	280,4	274,1	278,4	281,5	274,1	276,7	279,1
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	606,5	608,4	610,9	604,6	608,9	612,0	604,6	607,2	609,6
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	110	184	234	112	164	254	87	151	204
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	32	55	68	28	41	67	21	40	50
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	558	872	1145	689	981	1434	553	848	1292
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	88	147	187	87	128	200	68	119	159

Na temelju podataka navedenih u tablici 4-11 može se zaključiti da je do najmanjeg smanjenja protočne površine prstenastog prostora kanala bušotine došlo nakon bubrenja peleta 20Q80M0K u slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze, dok je najveća promjena protočne površine zabilježena nakon bubrenja u slanoj i gipsnoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze. Smanjenje protočne površine nalazi se u rasponu od $31 \cdot 10^{-4}$ do $41,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom nominalnog promjera 0,4445 m te od $21,6 \cdot 10^{-4}$ do $29,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,3112 m. Uslijed bubrenja peleta 20Q80M0K u različitim inhibiranim isplakama dolazi do promjene gradijenta tlaka koja se nalazi u rasponu od 1 do 2 Pa/m za protočnu površinu prstenastog prostora od $1424,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, od 5 do 10 Pa/m za protočnu površinu od $633,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, od 7 do 15 Pa/m za protočnu površinu od $909,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ dok se za protočnu površinu prstenastog presjeka od $1424,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ promjena gradijenta tlaka nalazi u rasponu od 84 do 192 Pa/m.

U tablici 4-12 prikazani su rezultati simulacije utjecaja bubrenja peleta 20Q60M20K na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka koji nastaje kao otpor protjecanju isplake kroz prstenasti prostor kanala bušotine.

Tablica 4-12. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 20Q60M20K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	868,1	871,8	878,1	866,0	872,7	876,9	862,9	870,2	863,1
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1382,7	1386,4	1392,7	1380,6	1387,3	1391,5	1377,5	1384,8	1377,7
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	274,0	276,6	281,0	272,6	277,2	280,2	270,4	275,5	270,6
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	604,5	607,1	611,5	603,0	607,7	610,7	600,9	606,0	601,0
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	111	184	234	113	164	255	88	151	210
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	32	55	68	28	41	67	21	40	50
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	565	881	1143	699	990	1449	568	857	1370
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	88	148	187	88	129	201	69	119	163

Iz podataka prikazanih u tablici 4-12 vidljivo je da se smanjenje protočne površine za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom nominalnog promjera 0,4445 m nalazi u rasponu od $31,7 \cdot 10^{-4}$ do $46,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, dok je smanjenje protočne površine za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,3112 nešto manje i nalazi se u rasponu od $22,1 \cdot 10^{-4}$ do $32,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Najmanja promjena protočne površine zabilježena je nakon bubrenja peleta 20Q60M20K u kalijskoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze, dok je najveća promjena dobivena nakon bubrenja u gipsnoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze. Isto kao i kod već analiziranih rezultata za druge pelete, najmanja promjena gradijenta tlaka uočena je kod najveće protočne površine i obrnuto. Promjene gradijenta tlaka nalaze se u rasponu od 1 do 2 Pa/m za prstenasti prostor između dlijeta promjera 0,4445 m i bušačih šipki nominalnog promjera 0,127 m, od 6 do 14 Pa/m za prstenasti prostor između dlijeta promjera 0,3112 m i bušačih šipki nominalnog promjera 0,127 m, od 8 do 20 Pa/m za prstenasti prostor između dlijeta promjera 0,4445 m i teških šipki vanjskog promjera 0,2858 m te od 91 do 270 Pa/m za prstenasti prostor između kanala bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,3112 m i teških šipki vanjskog promjera 0,2413 m.

Rezultati simulacije utjecaja bubrenja peleta 20Q40M40K u različitim inhibiranim isplakama na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka koji nastaje kao otpor protjecanju isplake kroz prstenasti prostor kanala bušotine prikazani su u tablici 4-13.

Tablica 4-13. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 20Q40M40K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	873,7	876,4	876,2	861,1	868,1	884,1	872,6	869,8	860,5
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1388,3	1391,0	1390,8	1375,7	1382,7	1398,7	1387,2	1384,4	1375,1
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	277,9	279,8	279,7	269,2	274,1	285,2	277,2	275,2	268,8
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	608,4	610,3	610,2	599,6	604,5	615,6	607,7	605,7	599,2
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	110	183	235	114	166	252	87	152	211
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	31	55	68	28	42	66	21	40	51
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	551	865	1154	719	1015	1402	542	858	1391
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	87	147	187	89	130	198	67	119	164

Na temelju podataka prikazanih u tablici 4-13 može se zaključiti da je do najmanjeg smanjenja protočne površine došlo tijekom bubrenja peleta u slanoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze, dok je najveća promjena uočena nakon bubrenja u gipsnoj isplaci sa 6 g/l polianionske celuloze. Simulirano smanjenje protočne površine nakon bubrenja nalazilo se u rasponu od $25,7 \cdot 10^{-4}$ do $49,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom nominalnog promjera 0,4445 m te od $18 \cdot 10^{-4}$ do $34,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,3112 m. Iz podataka navedenih u tablici 4-13 može se zaključiti da bubrenje peleta 20Q40M40K najmanje utječe na promjenu gradijenta tlaka kod najveće površine prstenastog prostora ($1424,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$), a najviše kod najmanje površine prstenastog presjeka od $303,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Povećanje gradijenta tlaka nalazi se u rasponu od 1 do 3 Pa/m za protočnu površinu od $1424,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, od 4 do 15 Pa/m za protočnu površinu od $633,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, od 7 do 21 Pa/m za protočnu površinu $909,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ te od 77 do 291 Pa/m za protočnu površinu od $303,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

U tablici 4-14 prikazani su podaci dobiveni simulacijom utjecaja bubrenja peleta 20Q20M60K u različitim inhibiranim isplakama na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka koji nastaje kao otpor protjecanju isplake kroz spomenuti prostor.

Tablica 4-14. Utjecaj tipa isplake na promjenu protočne površine i gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz različite prstenaste prostore (pelet 20Q20M60K)

Prstenasti presjek		ISPLAKA								
		K2PAC	K4PAC	K6PAC	S2PAC	S4PAC	S6PAC	G2PAC	G4PAC	G6PAC
		Protočna površina ($\cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	909,8								
	Nakon bubrenja	881,5	881,8	880,5	872,5	880,5	880,2	862,8	870,2	870,6
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	1424,4								
	Nakon bubrenja	1396,1	1396,4	1395,1	1387,1	1395,1	1394,8	1377,4	1384,8	1385,2
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	303,2								
	Nakon bubrenja	283,4	283,6	282,7	277,1	282,7	282,5	270,3	275,5	275,8
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	633,6								
	Nakon bubrenja	613,9	614,0	613,2	607,6	613,2	612,9	600,8	606,0	606,2
		Gradijent tlaka (Pa/m)								
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer teških šipki 0,2858 m	Prije bubrenja	103	172	221	103	152	239	80	140	190
	Nakon bubrenja	108	181	233	111	162	254	89	152	207
Promjer dlijeta 0,4445 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	30	53	66	27	40	65	20	38	48
	Nakon bubrenja	31	54	68	28	41	67	22	40	50
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer teških šipki 0,2413 m	Prije bubrenja	474	756	1003	569	835	1252	455	721	1100
	Nakon bubrenja	532	845	1132	673	954	1428	571	858	1324
Promjer dlijeta 0,3112 m; promjer bušačkih šipki 0,127 m	Prije bubrenja	82	139	177	81	120	190	63	111	149
	Nakon bubrenja	86	145	186	87	127	200	69	119	161

Na osnovu podataka prikazanih u tablici 4-14 može se zaključiti da je najmanja promjena protočne površine dobivena bubrenjem peleta 20Q20M60K u kalijskoj isplaci s 4 g/l polianionske celuloze, dok je najveća promjena dobivena bubrenjem peleta u gipsnoj isplaci s 2 g/l polianionske celuloze. Proračunate vrijednosti smanjenja protočne površine prstenastog prostora nalaze se u rasponu od $28 \cdot 10^{-4}$ do $47 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom nominalnog promjera 0,4445 m te od $19,6 \cdot 10^{-4}$ do $32,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ za kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom nominalnog promjera 0,3112 m. Najmanje promjene gradijenta tlaka (1 do 2 Pa/m) zabilježene su kod površine prstenastog prostora određenog dlijetom nominalnog promjera 0,4445 m i bušačim šipkama vanjskog promjera 0,127 m, dok su najveće promjene gradijenta tlaka (58 do 224 Pa/m) dobivene za prstenasti prostor određen promjerom kanala bušotine koji se izrađuje dlijetom nominalnog promjera 0,3112 m i teškim šipkama vanjskog promjera 0,2413 m.

Kako bi se lakše pratilo dobivene rezultate simulacije, u nastavku je za svaku simuliranu protočnu površinu dano maksimalno bubrenje peleta u određenoj inhibiranoj isplaci kao i povećanje gradijenta tlaka u odnosu na gradijent tlaka dobiven za nominalni promjer kanala bušotine.

Tablica 4-15. Utjecaj inhibiranih isplaka na 24-satno bubrenje peleta i povećanje gradijenta tlaka u prstenastom prostoru između kanala bušotine promjera 0,4445 m i teških šipki vanjskog promjera 0,2858 m

PELET	K2PAC		K4PAC		K6PAC		S2PAC		S4PAC		S6PAC		G2PAC		G4PAC		G6PAC	
	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)
0Q80M20K	37,6	9,2	35,3	8,2	35,1	8,4	42,2	11,4	33,2	9,0	28,9	7,5	41,3	11,2	35,3	9,0	29,0	7,9
0Q60M40K	36,1	9,0	29,6	7,0	26,8	6,4	38,4	11,1	30,2	8,3	24,0	6,3	27,5	7,7	29,5	7,6	26,8	7,6
0Q40M60K	29,4	7,3	29,3	7,2	21,2	5,3	40,2	12,0	22,6	6,3	18,9	4,9	43,9	12,9	46,5	13,1	37,4	11,2
0Q20M80K	29,2	7,8	28,0	6,9	23,7	6,2	29,3	8,6	29,2	8,6	26,2	7,4	15,8	4,4	32,6	9,1	26,6	7,9
10Q80M10K	38,0	9,1	34,7	7,8	30,7	7,0	38,9	10,3	44,6	11,9	39,4	10,2	34,8	9,3	33,2	8,1	30,6	8,1
10Q60M30K	34,4	8,5	30,2	7,0	32,8	7,7	44,9	12,6	29,3	7,7	26,8	6,9	32,9	8,6	32,4	8,1	29,6	8,0
10Q40M50K	34,1	8,6	29,9	7,1	26,8	6,6	38,4	10,9	21,9	6,0	29,9	7,9	28,7	8,0	40,6	10,9	39,6	11,4
10Q20M70K	27,3	7,0	25,4	6,3	21,8	5,4	32,7	9,6	29,9	8,6	15,7	4,1	16,4	4,5	34,1	9,1	29,5	8,6
20Q80M0K	33,0	7,5	29,8	6,5	27,5	6,0	35,2	8,8	30,0	7,4	25,9	6,2	35,2	8,9	31,7	7,5	28,9	7,4
20Q60M20K	34,3	8,0	30,4	7,0	26,0	5,9	35,7	9,4	30,3	7,8	27,1	6,7	38,6	10,3	31,7	7,9	38,5	10,1
20Q40M40K	28,6	6,9	26,6	6,1	26,8	6,4	38,8	10,8	33,1	9,0	20,4	5,2	29,4	8,0	31,9	8,0	39,8	10,8
20Q20M60K	21,2	5,2	21,7	5,1	22,9	5,5	28,5	7,7	22,4	6,1	22,9	6,0	36,7	10,4	30,5	8,0	30,3	8,5

Tablica 4-16. Utjecaj inhibiranih isplaka na 24-satno bubrenje peleta i povećanje gradijenta tlaka u prstenastom prostoru između kanala bušotine promjera 0,4445 m i bušaćih šipki vanjskog promjera 0,127 m

PELET	K2PAC		K4PAC		K6PAC		S2PAC		S4PAC		S6PAC		G2PAC		G4PAC		G6PAC	
	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)
0Q80M20K	37,6	4,8	35,3	4,3	35,1	4,4	42,2	6,0	33,2	4,8	28,9	3,9	41,3	5,9	35,3	4,7	29,0	4,2
0Q60M40K	36,1	4,7	29,6	3,7	26,8	3,4	38,4	5,8	30,2	4,4	24,0	3,3	27,5	4,1	29,5	4,0	26,8	4,0
0Q40M60K	29,4	3,8	29,3	3,8	21,2	2,8	40,2	6,2	22,6	3,3	18,9	2,6	43,9	6,7	46,5	6,8	37,4	5,9
0Q20M80K	29,2	4,1	28,0	3,6	23,7	3,3	29,3	4,5	29,2	4,5	26,2	3,9	15,8	2,4	32,6	4,8	26,6	4,2
10Q80M10K	38,0	4,8	34,7	4,1	30,7	3,7	38,9	5,4	44,6	6,2	39,4	5,3	34,8	4,9	33,2	4,3	30,6	4,3
10Q60M30K	34,4	4,4	30,2	3,7	32,8	4,1	44,9	6,6	29,3	4,1	26,8	3,6	32,9	4,7	32,4	4,3	29,6	4,2
10Q40M50K	34,1	4,5	29,9	3,7	26,8	3,5	38,4	5,7	21,9	3,2	29,9	4,2	28,7	4,2	40,6	5,7	39,6	6,0
10Q20M70K	27,3	3,7	25,4	3,3	21,8	2,8	32,7	5,0	29,9	4,5	15,7	2,2	16,4	2,4	34,1	4,8	29,5	4,5
20Q80M0K	33,0	3,9	29,8	3,4	27,5	3,2	35,2	4,6	30,0	3,9	25,9	3,3	35,2	4,7	31,7	3,9	28,9	3,9
20Q60M20K	34,3	4,2	30,4	3,7	26,0	3,1	35,7	5,0	30,3	4,1	27,1	3,5	38,6	5,4	31,7	4,2	38,5	5,3
20Q40M40K	28,6	3,6	26,6	3,2	26,8	3,3	38,8	5,6	33,1	4,7	20,4	2,7	29,4	4,2	31,9	4,2	39,8	5,7
20Q20M60K	21,2	2,8	21,7	2,7	22,9	2,9	28,5	4,1	22,4	3,3	22,9	3,2	36,7	5,5	30,5	4,2	30,3	4,5

Tablica 4-17. Utjecaj inhibiranih isplaka na 24-satno bubrenje peleta i povećanje gradijenta tlaka u prstenastom prostoru između kanala bušotine promjera 0,3112 m i bušaćih šipki vanjskog promjera 0,2413 m

PELET	K2PAC		K4PAC		K6PAC		S2PAC		S4PAC		S6PAC		G2PAC		G4PAC		G6PAC	
	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)
0Q80M20K	37,6	22,4	35,3	19,9	35,1	20,3	42,2	28,1	33,2	21,7	28,9	17,8	41,3	27,6	35,3	21,6	29,0	18,9
0Q60M40K	36,1	21,8	29,6	16,7	26,8	15,0	38,4	27,2	30,2	20,0	24,0	14,8	27,5	18,4	29,5	18,0	26,8	18,1
0Q40M60K	29,4	17,4	29,3	17,1	21,2	12,3	40,2	29,5	22,6	14,8	18,9	11,4	43,9	32,0	46,5	32,7	37,4	27,4
0Q20M80K	29,2	18,5	28,0	16,5	23,7	14,6	29,3	20,5	29,2	20,6	26,2	17,5	15,8	10,1	32,6	21,8	26,6	18,9
10Q80M10K	38,0	22,2	34,7	18,6	30,7	16,6	38,9	25,2	44,6	29,3	39,4	24,7	34,8	22,4	33,2	19,5	30,6	19,3
10Q60M30K	34,4	20,4	30,2	16,6	32,8	18,5	44,9	31,2	29,3	18,4	26,8	16,2	32,9	21,4	32,4	19,4	29,6	18,9
10Q40M50K	34,1	20,7	29,9	16,8	26,8	15,7	38,4	26,6	21,9	14,1	29,9	18,9	28,7	19,0	40,6	26,7	39,6	27,9
10Q20M70K	27,3	16,5	25,4	14,8	21,8	12,6	32,7	23,1	29,9	20,6	15,7	9,4	16,4	10,4	34,1	21,8	29,5	20,5
20Q80M0K	33,0	17,8	29,8	15,4	27,5	14,1	35,2	21,1	30,0	17,5	25,9	14,5	35,2	21,4	31,7	17,7	28,9	17,5
20Q60M20K	34,3	19,3	30,4	16,6	26,0	13,9	35,7	22,8	30,3	18,6	27,1	15,8	38,6	24,9	31,7	18,9	38,5	24,6
20Q40M40K	28,6	16,3	26,6	14,4	26,8	15,0	38,8	26,3	33,1	21,7	20,4	12,0	29,4	19,0	31,9	19,1	39,8	26,5
20Q20M60K	21,2	12,3	21,7	11,8	22,9	12,8	28,5	18,4	22,4	14,3	22,9	14,1	36,7	25,4	30,5	19,1	30,3	20,4

Tablica 4-18. Utjecaj inhibiranih isplaka na 24-satno bubrenje peleta i povećanje gradijenta tlaka u prstenastom prostoru između kanala bušotine promjera 0,3112 m i bušaćih šipki vanjskog promjera 0,127 m

PELET	K2PAC		K4PAC		K6PAC		S2PAC		S4PAC		S6PAC		G2PAC		G4PAC		G6PAC	
	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)	Bubrenje peleta nakon 24 sata (%)	Povećanje gradijenta tlaka (%)
0Q80M20K	37,6	8,2	35,3	7,4	35,1	7,6	42,2	10,3	33,2	8,1	28,9	6,7	41,3	10,1	35,3	8,1	29,0	7,1
0Q60M40K	36,1	8,1	29,6	6,3	26,8	5,7	38,4	10,0	30,2	7,5	24,0	5,7	27,5	7,0	29,5	6,8	26,8	6,9
0Q40M60K	29,4	6,5	29,3	6,4	21,2	4,7	40,2	10,7	22,6	5,7	18,9	4,4	43,9	11,6	46,5	11,7	37,4	10,0
0Q20M80K	29,2	6,9	28,0	6,2	23,7	5,6	29,3	7,7	29,2	7,7	26,2	6,6	15,8	4,0	32,6	8,1	26,6	7,2
10Q80M10K	38,0	8,2	34,7	6,9	30,7	6,3	38,9	9,3	44,6	10,7	39,4	9,1	34,8	8,4	33,2	7,3	30,6	7,3
10Q60M30K	34,4	7,6	30,2	6,2	32,8	6,9	44,9	11,3	29,3	7,0	26,8	6,2	32,9	8,0	32,4	7,3	29,6	7,2
10Q40M50K	34,1	7,7	29,9	6,3	26,8	5,9	38,4	9,8	21,9	5,4	29,9	7,1	28,7	7,2	40,6	9,7	39,6	10,2
10Q20M70K	27,3	6,2	25,4	5,6	21,8	4,8	32,7	8,6	29,9	7,7	15,7	3,7	16,4	4,1	34,1	8,1	29,5	7,7
20Q80M0K	33,0	6,7	29,8	5,8	27,5	5,4	35,2	7,9	30,0	6,7	25,9	5,6	35,2	8,0	31,7	6,7	28,9	6,7
20Q60M20K	34,3	7,2	30,4	6,3	26,0	5,3	35,7	8,5	30,3	7,0	27,1	6,0	38,6	9,2	31,7	7,1	38,5	9,1
20Q40M40K	28,6	6,2	26,6	5,5	26,8	5,7	38,8	9,7	33,1	8,1	20,4	4,7	29,4	7,2	31,9	7,2	39,8	9,7
20Q20M60K	21,2	4,7	21,7	4,5	22,9	4,9	28,5	7,0	22,4	5,5	22,9	5,4	36,7	9,4	30,5	7,2	30,3	7,7

Na temelju prikazanih podataka u tablicama 4-3 do 4-18 može se zaključiti da su promjene protočne površine prstenastog prostora kanala bušotine manje kod kanala bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,4445 m u odnosu na kanal bušotine koji se izrađuje dlijetom promjera 0,3112 m. Također je vidljivo da se s povećanjem razmatrane protočne površine prstenastog prostora smanjuje utjecaj bubrenja na promjenu gradijenta tlaka. Najmanje promjene gradijenta tlaka uočene su kod prstenastog prostora između dlijeta nominalnog promjera 0,4445 m i bušaćih šipki nominalnog promjera 0,127 m, dok su najveće promjene gradijenta tlaka s bubrenjem uočene kod prstenastog prostora definirano nominalnim promjerom dlijeta 0,3112 m i teškim šipkama vanjskog promjera 0,2413 m. Ukoliko se usporede podaci za pojedine inhibirane isplake može se zaključiti da značajan utjecaj na promjenu gradijenta tlaka imaju reološka svojstva određene inhibirane isplaci, odnosno s povećanjem koncentracije polianionske celuloze u određenoj inhibiranoj isplaci dolazi do povećanja vrijednosti smičnih naprezanja, a samim tim i promjene gradijenta tlaka.

5. ZAKLJUČAK

Nestabilnost kanala bušotine ozbiljan je problem koji prati naftnu industriju od njenih početaka pa sve do danas, a najjednostavnije se može definirati kao svaka neželjena promjena promjera kanala bušotine u odnosu na promjer dlijeta kojim se kanal izrađuje. U praksi se svakodnevno javlja čitav niz problema vezanih uz nestabilnost kanala bušotine poput prihvata niza bušaćih alatki, zarušavanja stijenki kanala bušotine, proširenja kanala bušotine, nemogućnosti izvođenja karotažnih mjerenja, problema prilikom cementacije i čišćenja kanala bušotine. Rješavanje posljedica nestabilnosti kanala bušotine najčešće iziskuje vrijeme i dodatna financijska ulaganja. Ponekad problemi vezani uz nestabilnost kanala bušotine mogu biti takvi da čak uzrokuju napuštanje jednog dijela kanala bušotine ili bušotine u cjelini.

Nestabilnost kanala bušotine najčešće se veže uz bušenje kroz šejl, finoizrnatu klastičnu sedimentnu stijenu s različitim udjelom gline. Iako su osnovni uzroci nestabilnosti kanala bušotine poznati već dugi niz godina, iz rastućih troškova za rješavanje nestabilnosti može se zaključiti da problem i dalje postoji. U prilog tome govori i činjenica da se svakodnevno diljem svijeta provode različita laboratorijska ispitivanja s ciljem rješavanja ovog problema, a čiji su rezultati dostupni kroz sve veći broj objavljenih radova. Kako su osnovni uzroci nestabilnosti kanala bušotine već poznati, osnovni cilj laboratorijskih ispitivanja je razvoj novih aditiva i isplaka, koji bi svojim svojstvima spriječili pojavu nestabilnosti kanala bušotine, ali i ispunili ostale tehnološke zahtjeve tijekom bušenja kao što su: osiguravanje potrebnog hidrostatičkog tlaka na dno bušotine, čišćenje dna kanala bušotine, uspješno iznošenje krhotina na površinu i drugo. Za uspjeh laboratorijskog ispitivanja nužna je kvalitetna priprema koja obuhvaća: odabir odgovarajućeg laboratorijskog uređaja na kojem je moguće dobiti željene podatke, odabir isplake i aditiva i najvažnije, nabava dovoljne količine reprezentativnih uzoraka stijene na kojima će se provoditi ispitivanja. U do sada provedenim ispitivanjima korišteni su uzroci šejla iz različitih izvora, poput šejla iz površinskog kopa, šejla dobivenog jezgrovanjem iz bušotine ili pak uzorci krhotina stijena sakupljenih na vibracijskim sitima. Svaki od navedenih izvora uzoraka ima svoje prednosti i nedostatke. Problem svih njih je najčešće dostupnost male količine uzoraka što je nedovoljno za sveobuhvatna laboratorijska ispitivanja, raznolikost mineralošskog sastava i mehaničkih svojstava ili promjena uzoraka šejla zbog neodgovarajućeg skladištenja. Navedeni problemi mogu onemogućiti provođenje ili ponovljivost laboratorijskih ispitivanja. Osim nabavljanja

dovoljne količine uzoraka stijene, za kvalitetu laboratorijskih ispitivanja nužno je nabaviti uzorak koji će svojim karakteristikama (mineraloškim sastavom i mehaničkim svojstvima) odgovarati promatranom tipu šejla čije se ponašanje u kontaktu s isplakom oponaša u laboratorijskim ispitivanjima.

Osim odabira odgovarajućeg uzorka stijene, vrlo je bitan i odabir inhibirane isplake, koja bi trebala biti djelotvorna u sprječavanju hidratacije, odnosno bubrenja i/ili disperzije šejla, a uz to je istovremeno jeftina i ekološki prihvatljiva. U dosadašnjoj se praksi u sprječavanju hidratacije šejla najboljom pokazala uljna isplaka koja uz pravilno definiran sastav može u potpunosti spriječiti proces hidratacije šejla. Međutim osnovni nedostatak uljne isplake je cijena, te štetan utjecaj na okoliš što predstavlja problem u fazi zbrinjavanja isplake nakon njene upotrebe. Osim uljne isplake, u praksi se dosta često koristi kalijaska ili kalijsko-polimerna isplaka koja pozitivno djeluje na smanjenje hidratacije minerala gline. Međutim i ova se isplaka često izbjegava zbog nepovoljnog utjecaja prevelike koncentracije KCl-a na okoliš. Često se problem hidratacije šejla nastoji riješiti istovremenom upotrebom više aditiva koji pozitivno djeluju na stabilizaciju šejla i stijenki kanala bušotine što otežava kvalitetnu interpretaciju rezultata laboratorijskih ispitivanja u kojima su korištene takve isplake, jer nije moguće točno utvrditi stvarni doprinos pojedinog aditiva na sprječavanje bubrenja. Kvalitetnu interpretaciju laboratorijskih ispitivanja ponekad onemogućava i nepoznavanje točnog kemijskog sastava pojedinog aditiva koji ima ulogu inhibitora hidratacije šejla.

S obzirom na mineraloški sastav, osobito udjel glinovite komponente te ponašanje šejla u kontaktu s isplakom na bazi vode, šejlovi se dijele u pet skupina. Prema dostupnim podacima iz literature, trenutna razina razvoja tehnologije bušotinskih fluida omogućava stabilizaciju i sprječavanje hidratacije šejlova II., III. i IV. skupine, dok i dalje postoji problem održavanja stabilnosti kanala bušotine tijekom bušenja kroz šejlove prve skupine. Prva skupina obuhvaća šejl s visokim udjelom minerala gline iz skupine smektita. Odlika ovih šejlova, u literaturi poznatih kao „Gumbo“ šejlovi je ekstremna sklonost prema hidrataciji, a posljedično i prema bubrenju te mala dubina zalijeganja. Kako je vrlo teško nabaviti kvalitetan uzorak šejla I skupine, umjesto originalnog uzorka stijene, laboratorijska ispitivanja provedena su na uzorcima dobivenim komprimiranjem praškastog materijala, odnosno peletima (valjkastim uzorcima promjera 29 mm i visine približno 10 mm). Jedna od osnovnih prednosti korištenja peleta u odnosu na korištenje originalnog uzorka stijene je mogućnost točnog definiranja mineraloškog sastava, čime se osigurava točnija interpretacija i ponovljivost ispitivanja.

U provedenim laboratorijskim ispitivanjima korišteno je dvanaest peleta, koji su podijeljeni u tri skupine ovisno o masenom udjelu kvarca (0, 10 i 20% kvarca). Unutar svake skupine nalazila su se po četiri peleta koja su sadržavala 80, 60, 40 i 20 mas. % montmorilonita (odnosno neobrađenog Wyoming bentonita) dok je ostatak do 100 mas. % peleta činio kaolinit. Navedene komponente odabrane su jer su najzastupljenije i u prirodnim uzorcima šejla. Ovakvim konceptom ispitivanja, željelo se ispitati kako smanjenje masenog udjela montmorilonita i povećanje udjela kaolinita utječe na bubrenje peleta, te kako na bubrenje utječe maseni udjel kvarca u peletima.

U prvoj fazi laboratorijskog ispitivanja utvrđen je utjecaj vodenih otopina sol KCl-a, NaCl-a i CaCl₂, u koncentracijama od 5, 10 i 15%, na bubrenje peleta različitog mineraloškog sastava. Navedene soli odabrane su jer imaju široku komercijalnu primjenu i lako se mogu nabaviti na tržištu te zbog prisutnih kationa pozitivno djeluju na smanjenje hidratacije minerala gline. Referentna vrijednost za sva provedena laboratorijska ispitivanja bila je vrijednost bubrenja peleta u vodovodnoj vodi. Bubrenjem peleta u vodenim otopinama soli dobivene su manje vrijednosti bubrenja peleta u odnosu na bubrenje izmjereno u vodovodnoj vodi. Također je uočeno da je mala razlika između bubrenja peleta u 5%-tnim vodenim otopinama soli i bubrenja peleta u vodenim otopinama s većom koncentracijom soli. Zbog toga je u nastavku ispitivanja korištena 5%-tna koncentracija soli. Odabrana koncentracija soli trebala bi osigurati zadovoljavajuće inhibiranje bubrenja, a istovremeno bi isplaka bila jeftinija i ekološki prihvatljivija.

U drugoj fazi laboratorijskih ispitivanja za ispitivanje bubrenja uzoraka korištene su inhibirane isplake (kalijska, slana i gipsna isplaka). Kalijske i slane isplake pripremljene su s jednakim količinama KCl-a i NaCl-a kao i 5%-tne vodene otopine soli. Kod pripreme gipsne isplake kao izvor kationa Ca²⁺ korišten je gips, a ne CaCl₂. Zbog toga je masa kalcijevog klorida pretvorena u ekvivalentnu masu gipsa koja bi trebala sadržavati jednaku koncentraciju Ca²⁺ kationa. Međutim utvrđeno je kako bi ekvivalentna koncentracija gipsa dvostruko premašivala maksimalno dopuštenu koncentraciju gipsa u gipsnim isplakama, te je u nastavku korištena koncentracija gipsa koja po koncentraciji kationa Ca²⁺ odgovara 2,5%-tnoj vodenoj otopini CaCl₂. Važno je napomenuti da je koncentracija Ca²⁺ kationa u gipsnoj isplaci skoro trostruko manja od koncentracije K⁺ kationa u kalijskoj isplaci te skoro dvostruko manja od koncentracije kationa Na⁺ u slanoj isplaci. Ova razlika u koncentraciji K⁺, Na⁺ i Ca²⁺ inhibirajućih kationa bitna je kod razmatranja utjecaja tipa inhibirane isplake na bubrenje peleta. Svaka od tri navedene inhibirane isplake pripremljena je s tri različiti koncentracije polianionske celuloze male viskoznosti (2, 4 i 6 g/l). Polianionska celuloza je odabrana zbog

njenog pozitivnog utjecaja na smanjenje filtracije i sprječavanje hidratacije šejla uslijed stvaranja zaštitnog sloja na njegovoj površini. Međutim iako je korištena polianionska celuloza tvornički deklarirana kao aditiv s minimalnim utjecajem na reološka svojstva isplake, utvrđeno je da ona ipak na njih značajno utječe osobito ako je prisutna u većim koncentracijama.

Analizom dobivenih rezultata laboratorijskih ispitivanja bubrenja peleta u kalijskoj isplaci s različitim koncentracijama polianionske celuloze uočen je trend smanjenja vrijednosti 24-satnog bubrenja sa smanjenjem masenog udjela montmorilonita u peletu. Ovakav trend samo je djelomično uočen kod bubrenja peleta u slanoj i gipsnoj isplaci. Pozitivan utjecaj povećanja koncentracije polianionske celuloze na smanjenje vrijednosti 24-satnog bubrenja najočitiiji je kod kalijske isplake, dok je ovakav trend samo djelomično vidljiv kod bubrenja peleta s višim masenim udjelima montmorilonita (80% i 60%) koji su bubrili u slanoj i gipsnoj isplaci. Najveća odstupanja, od ova dva gore navedena trenda, uočena su kod uzoraka s dominantnim masenim udjelom kaolinita.

Utjecaj promjene masenog udjela kaolinita u peletima s jednakim masenim udjelom montmorilonita na bubrenje peleta vrlo je teško jednoznačno definirati. Jedino se kod kalijske isplake može definirati opći trenda smanjenja bubrenja peleta s jednakim udjelom montmorilonita sa smanjenjem masenog udjela kaolinita.

Kada se usporede podaci o minimalnom bubrenju peleta različitog mineraloškog sastava u inhibiranim isplakama s različitim koncentracijama polianionske celuloze nakon 120 minuta i 24 sata, može se zaključiti kako su najčešće minimalne vrijednosti bubrenja pojedinog peleta za određenu koncentraciju polianionske celuloze postignute u gipsnoj i slanoj isplaci. Također je uočeno da je kod svih peleta, minimalno bubrenje nakon 24 sata izmjereno kod iste koncentracije polianionske celuloze kod koje je uočeno minimalno bubrenje peleta nakon 120 minuta. Analizom minimalne vrijednosti bubrenja peleta, bez obzira na koncentraciju polianionske celuloze, zaključeno je kako se minimalno bubrenje peleta nalazi u rasponu od 15,7 do 30,6%, a bubrenje kod 9 od 12 ispitivanih peleta najbolje su inhibirale gipsna ili slana isplaka sa 6 g/l polianionske celuloze. Zanimljivo je i da su minimalne vrijednosti bubrenja ostvarene u inhibiranim isplaka (slanoj i gipsnoj) u kojima je koncentracija inhibirajućih kationa manja od koncentracije inhibirajućih kationa K^+ u kalijskoj isplaci.

Ono što je također značajno je mogućnost dosezanja maksimalne vrijednosti bubrenja tijekom 24-satnog ispitivanja. Kod 67% peleta koji su bubrili u kalijskoj isplaci uočeno je postizanje maksimalne vrijednosti bubrenja tijekom 24-satnog ispitivanja. Kod

ostalnih ispitivanih inhibiranih isplaka zabilježen je manji intenzitet bubrenja peleta (što je u skladu s većim vremenom kapilarnog upijanja u odnosu na kalijску isplaku), što rezultira već spomenutim manjim izmjerenim bubrenjem peleta nakon 24-satnog ispitivanja, ali s daljnjom tendencijom porasta debljine peleta nakon isteka odabranog vremena ispitivanja.

Osim utjecaja bubrenja na samo suženje kanala bušotine, bubrenje će preko smanjenja protočne površine direktno utjecati na povećanje gradijenta tlaka koji nastaje kao posljedica otpora protjecanju isplake kroz prstenasti prostor kanala bušotine. Kako bi se utvrdio stvarni utjecaj bubrenja na promjenu gradijenta tlaka, za simulaciju su korišteni promjeri kanala bušotine i sastavi niza bušaćih alatki za izradu kanala bušotine do približno 1500 m, odnosno do očekivane dubine zalijeganja jako reaktivnih šejlova. Na temelju provedene simulacije utvrđeno je da na povećanje gradijenta tlaka uz smanjenje protočne površine, utječu i reološka svojstva inhibiranih isplaka čije se vrijednosti povećavaju s povećanjem udjela polianionske celuloze. Utjecaj bubrenja na promjenu gradijenta tlaka izraženiji je u kanalima manjeg promjera zbog manjeg zazora između stijenki kanala bušotine i niza bušaćih i teških šipki.

Na temelju provedenih laboratorijskih ispitivanja i analize dobivenih rezultata došlo se do sljedećih spoznaja:

- ✓ Temeljem pripreme samih laboratorijskih ispitivanja i kroz provođenje ispitivanja bubrenja peleta u različitim fluidima utvrđeno je da je moguća primjena umjetno stvorenih peleta u laboratorijskim ispitivanjima u području stabilnosti kanala bušotine. Kroz opsežna ispitivanja definiran je prije svega način pripreme peleta, ispitani su utjecaji različitih varijabilnih komponenti (utjecaj vremena ili tlaka komprimiranja peleta na njegovo bubrenje u različitim fluidima), ali i utvrđeni određeni nedostaci koji ograničavaju proširenje ispitivanja. Kao osnovni nedostatak treba istaknuti premalu veličinu uzorka što onemogućuje provođenje ispitivanja na peletu s ciljem određivanja propusnosti ili određivanja dubine prodora ispitnog fluida u uzorak. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti i unapređenju uređaja za bubrenje peleta, osobito u području djelovanja viših temperatura ispitivanja te moguće primjene tlaka na cijeli sustav.
- ✓ Kroz različite mineraloške sastave ispitivanih peleta pokušao se pokazati utjecaj mineraloškog sastava peleta na njegovo bubrenje u različitim fluidima. Iz provedenih ispitivanja može se zaključiti da mineraloški sastav peleta najviše utječe na intenzitet bubrenja peleta (odnosno porast bubrenja u jedinici vremena) kao i na mehaničku tvrdoću peleta nakon bubrenja. Pokazalo se da veći udjel kaolinita u peletu rezultira

manjom tvrdoćom peleta nakon bubrenja. Također treba imati u vidu da su za potrebe ovog ispitivanja uzete maksimalne vrijednosti udjela gline kao i njihove maksimalne čistoće, čime se željelo utvrditi učinkovitost ispitivanih fluida u smanjenju maksimalnog bubrenja. Za očekivati je, da bi u bušotini rezultati utjecaja inhibiranih isplaka na smanjenje hidratacije i bubrenja minerala gline bili bolji zbog slabije reaktivnosti samog šejla.

- ✓ Korištene soli i polimeri kao inhibitori hidratacije šejla igraju značajnu ulogu u smanjenju hidratacije, a posljedično i bubrenju šejla. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da velike količine i mnogobrojni inhibitori hidratacije šejla nisu jamac pozitivnog rezultata u smanjenju bubrenja šejla. Za povećanje djelotvornosti inhibiranih isplaka u sprječavanju hidratacije šejla potrebno je provođenje sustavnih laboratorijskih ispitivanja s variranjem točno određene komponente, dok bi sastav preostalih komponenti trebalo držati konstantnim. Na ovaj način omogućava se točan uvid u djelotvornost pojedinog inhibitora hidratacije šejla, ali i njegov utjecaj na ostala fizikalna i kemijska svojstva isplake. Djelotvornost pojedine soli ili polianionske celuloze ne treba promatrati samo kroz ukupno smanjenje bubrenja kroz 24 sata, već u obzir treba uzeti i intenzitet bubrenja. Samo smanjenje intenziteta bubrenja, osobito u početnom periodu odličan je pokazatelj za daljnja istraživanja jer se ona mogu usmjeriti prema inhibitorima koji će u tom vremenu malog intenziteta bubrenja utjecati na njegovo dodatno smanjenje.
- ✓ Provedene simulacije utjecaja bubrenja na promjenu protočne površine prstenastog prostora i promjenu gradijenta tlaka uslijed otpora protjecanju isplake također su određeni indikator uspješnog djelovanja određene inhibirane isplake. Kroz promjenjivi sastav inhibirane isplake nastojalo se smanjiti bubrenje peleta, odnosno u prenesenom smislu stijena uokolo kanala bušotine. S druge strane kroz praćenje reoloških parametara ispitivanih fluida te proračuna smanjenja tlaka, utvrđen je utjecaj svih spomenutih promjena na proces bušenja. Na temelju toga može se zaključiti da utjecaj bubrenja postaje sve izraženiji sa smanjenjem protočne površine, osobito za prstenaste prostore između manjih promjera dlijeta i većih promjera alatki u kanalu bušotine. Osim utjecaja bubrenja treba voditi računa o utjecaju povećanja koncentracije polianionske celuloze na reološka svojstva isplake, a samim tim i na promjenu tlaka uslijed otpora protjecanju isplake kroz prstenasti prostor kanala bušotine.

✓ Ukoliko se kao referentne vrijednosti razmatraju vrijednosti bubrenja peleta u vodovodnoj vodi nakon 24-satnog ispitivanja, koje se nalaze u rasponu od 83,9 do 120,9% s daljnjom tendencijom rasta, onda se može reći da ispitivane inhibirane isplake bitno smanjuju bubrenje peleta. 24-satno bubrenje peleta u kalijskoj isplaci nalazilo se u rasponu od 21,2 do 38%, u slanoj isplaci od 15,7 do 44,9 % te u gipsnoj isplaci u rasponu od 15,8 do 46,5%. Na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja može se zaključiti da bi za smanjenje bubrenja šejl s većim masenim udjelima montmorilonita (80, 60 i 40%) bilo optimalno tijekom bušenja koristiti slanu isplaku s većom koncentracijom polianionske celuloze (6 g/l). Za smanjenje bubrenja šejlova s manjim udjelom montmorilonita (približno 20%) preporučuje se korištenje kalijске ili gipsne isplake s manjim koncentracijama polianionske celuloze, ili pak slane isplake s većim udjelom polianionske celuloze.

Iz provedenih laboratorijskih ispitivanja i analize dobivenih rezultata proizlazi sljedeći znanstveni doprinos:

- **osmišljen je postupak pripreme peleta (umjetno stvorenih uzoraka šejla) koji svojim sastavom oponašaju prirodne uzorke šejla;**
- **detaljno je osmišljen i razrađen jednostavan postupak dugotrajnijeg ispitivanja međudjelovanja šejla i isplake i kontinuiranog praćenja nastalih promjenama peleta;**
- **povećanje koncentracije ispitivanih soli (KCl-a, NaCl-a i CaCl₂) iznad 5 mas. % ne rezultira značajnijim smanjenjem bubrenja peleta različitog mineraloškog sastava;**
- **koncentracija od 2 do 6 g/l polianionske celuloze u isplaci utječe na smanjenje bubrenja peleta ovisno o vrsti inhibirane isplake i mineraloškom sastavu peleta;**
- **polianionska celuloza u inhibiranim isplakama utječe na intenzitet bubrenja (početnih 120 minuta ispitivanja) i na ukupno bubrenje peleta (24-satno bubrenje);**
- **provedeni proračuni ukazuju da tijekom izrade kanala bušotine za razmatrane promjere alata neće doći do problema uzrokovanih nestabilnošću stijenki kanala bušotine. Međutim o tome treba voditi računa pri izradi bušotina malog promjera i u ostalim slučajevima kada je zazor između alatki i stijenki kanala bušotine manji.**

6. LITERATURA

1. Abass, H., Shebatalhamd, A., Khan, M., Al-Shobaili, Y., Ansari, A., Ali, S. & Mehta, S. (2006): Wellbore Instability of Shale Formation; Zuluf Field, Saudi Arabia. SPE Paper 106345, SPE Technical Symposium of Saudi Arabia Section, May 21-23, pp. 1-9, Dhahran, Saudi Arabia.
2. Al-Awad, M.N.J. & Smart, B.G.D. (1995): Characterization of Shale-Drilling Fluid Interaction Mechanisms Related to Wellbore Instability. Journal of King Saud University – Engineering Science, Volume 8, pp. 187-215.
3. Al-Bazali, T.M., Zhang, J., Chenevert, M.E. & Sharma, M.M. (2006): Factors Controlling the Membrane Efficiency of Shales When Interacting With Water-Based and Oil-Based Muds. Paper SPE 100735, SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition, December 5-7, pp. 1-11, Beijing, China.
4. American Petroleum Institute (1997): APIRP 13B-1 Recommended Practice - Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids. Exploration and Production Department, Second edition, September, 48 pp.
5. Amoco (1994): Drilling fluids Manual. Amoco Production Company, 426 pp.
6. Anderson, R.L., Ratcliffe, I., Greenwell, H.C., Williams, P.A., Cliffe, S. & Coveney, P.V. (2010): Clay Swelling – A Challenge in the Oilfield. Earth-Science Reviews, Volume 98, Issues 3-4, February, pp. 201-216.
7. Awal, M.R., Khan, M.S., Mohiuddin, M.A., Abdulraheem, A. & Azeemuddin, M. (2001): A New Approach to Borehole Trajectory Optimisation for Increased Hole Stability. Paper SPE 68092, SPE Middle East Oil Show, March 17 – 20, pp. 1-11, Bahrain.
8. Baker Hughes (1998): Fluid Facts – Engineering Handbook. Baker Hughes INTEQ, Technical Communications Group, 474 pp., Houston, USA.
9. Baker Hughes (2006): Drilling Fluids - Reference Manual. 768 pp.
10. Ballard, T.J., Beare, S.P. & Lawless, T.A. (1994): Fundamentals of Shale Stabilization: Water Transport Through Shales. SPE Formation Evaluation, June, pp. 129-134.
11. Benayada, B., Habchi, K.N. & Khodja, M. (2003): Stabilisation of Clay Walls During Drilling in Southern Algeria. Applied Energy, Volume 75, Issues 1-2, May-June, pp. 51-59.

12. Berry, S.L., Boles, J.L., Brannon, H.D. & Beall, B.B. (2008): Performance Evaluation of Ionic Liquids as a Clay Stabilizer and Shale Inhibitor. Paper SPE 112540, 2008 SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, February 13-15, pp. 1-14, Lafayette, Louisiana, U.S.A.
13. Bol, G.M., Wong, S-W., Davidson, C.J. & Woodland, D.C. (1994): Borehole Stability in Shales. SPE Drilling & Completion, June, pp. 87-94.
14. Bourgoyne Jr., A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E. & Young Jr., F.S. (2005): Applied Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers, SPE Textbook Series, Vol. 2, 502 pp., Richardson, TX.
15. Chen, M.Y.G., Chenevert, M.E. & Sharma, M.M. (2001): Chemical and Thermal Effects on Wellbore Stability of Shale Formations. Paper SPE 71366, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September - 3 October, pp. 1-11, New Orleans, Louisiana.
16. Chenevert, M.E. & Osisanya, S.O. (1989): Shale/Mud Inhibition Defined With Rig-Site Methods. SPE Drilling Engineering, September, pp. 261-268.
17. Chenevert, M.E. & Pernot, V. (1998): Control of Shale Swelling Pressures Using Inhibitive Water-Base Muds. Paper SPE 49263, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 27-30, pp. 793-803, New Orleans, Louisiana.
18. Chenevert, M.E. & Amanullah, M. (2001): Shale Preservation and Testing Techniques for Borehole-Stability Studies. SPE Drilling & Completion, September, pp. 146-149.
19. Chilingarian, G.V. & Vorabutr (1982): Drilling and Drilling Fluids. Developments in Petroleum Science, 11, Elsevier Scientific Publishing Company, 767 pp., Amsterdam-Oxford-New York.
20. Darley, H.C.H. (1969): A Laboratory Investigation of Borehole Stability. Journal of Petroleum Technology, July, pp. 883-892.
21. Darley, H.C.H. & Gray, G.R. (1988): Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (fifth edition). Gulf Publishing Company, 643 pp., Houston, TX.
22. Gulf Publishing Company (1982): Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual. Gulf Publishing Company, Book Division, 101 pp., Houston, Texas.
23. Ewy, R.T. & Stankovich, R.J. (2002): Shale-Fluid Interactions Measured Under Simulated Downhole Conditions. Paper SPE/ISRM 78160, SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, October 20-23, pp. 1-10, Irving, Texas.
24. Ewy, R.T. & Morton, E.K. (2009): Wellbore-Stability Performance of Water-Based Mud Additives. SPE Drilling & Completion, September, pp. 390-397.

25. Fink, J.K. (2011): Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids. Gulf Professional Publishing, 785 pp., Waltham, U.S.A.
26. Gaurina-Međimurec, N. (1992): Izrada tehnički optimalnih bušotina radi gospodarskog iscrpka ležišta ugljikovodika. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, disertacija, 231 str., Zagreb.
27. Gaurina-Međimurec, N. (1995): Bušotinski fluidi – laboratorijske vježbe. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, interna skripta, 57 str., zagreb
28. Gaurina-Međimurec, N. (2006): Laboratorijska istraživanja inhibiranja šejlova Amanus sand formacije na polju Jihar u Siriji. Studija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, prosinac, 336 str.,Zagreb.
29. Gaurina-Međimurec, N., Šimić, Š., Simon, K., Sorić, T. & Pašić, B. (2007): Utjecaj isplake na stabilnost kanala bušotine. Zbornik radova – 4. Međunarodni znanstveno-stručni skup o naftnom gospodarstvu, knjiga 33/07.
30. Gaurina-Međimurec, N. (2009): Bušotinski fluidi I – isplake. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, interna skripta, 129 str., Zagreb.
31. Gazaniol, D., Forsans, T., Boisson, M.J.F. & Piau, J-M. (1995): Wellbore Failure Mechanisms in Shales: Prediction and Prevention, JPT, July, pp. 589-595.
32. Hale, A.H., Mody, F.K. & Sallsbury, D.P. (1993): The Influence of Chemical Potential on Wellbore Stability. SPE Drilling & Completion, September, pp. 207-216.
33. Heriot-Watt University (...): Drilling Engineering. Department of Petroleum Engineering, 563 pp.
34. Hoff, T., O'Connor, R. & Growcock, F. (2005): Drilling Fluid Selection to Minimize Formation Invasion – A New Test Method. Paper AADE-05-NTCE-73, AADE 2005 National Technical Conference and Exhibition, April 5-7, pp. 1-6, Houston, Texas.
35. Horsrud, P., Bostrom, B., Sonstebo, E.F. & Holt, R.M. (1998): Interaction Between Shale and Water-Based Drilling Fluids: Laboratory Exposure Tests Give New Insight Into Mechanisms and Field Consequences of KCl Contents. Paper 48986, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 27-30, pp. 215-225, New Orleans, Louisiana.
36. <http://www.ofite.com> (29.1.2012.)
37. <http://pheylyonian.com/sacred-geometry-c411.php> (20.2.2012.)
38. <http://www.britannica.com/EBchecked/media/2424/Ideal-hexagonal-tetrahedral-sheet> (20.2.2012.)
39. http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_3/chapt_1/main.htm (20.2.2012.)

40. <http://pubpages.unh.edu/~harter/crystal.htm> (26.2.2012.)
41. <http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/clays/smc.htm> (26.2.2012.)
42. <http://webmineral.com/specimens/picshow.php?id=1285&target=Montmorillonite> (26.2.2012.)
43. <http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/clays/illite.htm> (26.2.2012.)
44. <http://www.evsc.virginia.edu/~alm7d/soils/handouts/grainpics.html> (26.2.2012.)
45. <http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/clays/kaogr.htm> (26.2.2012.)
46. <http://originoflife.net/micrographs/> (26.2.2012.)
47. <http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/clays/chlor.htm> (26.2.2012.)
48. <http://www.museumwales.ac.uk/cy/800/?mineral=190> (26.2.2012.)
49. Institut Francais du Petrole Publications (1999): Drilling Data Handbook. Seventh edition, Editions Technip, 536 pp.
50. Kavedžija, B., Gaurina-Međimurec, N. & Krištafor, Z. (1990): Izrada bušotina - priručnik s primjerima. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 254 str., Zagreb.
51. Khodja, M., Canselier, J.P., Bergaya, F., Fourar, K., Khodja, M., Cohaut, N. & Benmounah, A. (2010): Shale Problems and Water-Based Drilling Fluid Optimisation in the Hassi Messaoud Algerian Oil Field. Applied Clay Science, Volume 49, Issue 4, August, pp. 383-393.
52. Lake, L.W. (2006): Petroleum Engineering Handbook – Drilling Engineering (volume II). Society of Petroleum Engineers, 763 pp., Richardson, U.S.A.
53. Lal, M. (1999): Shale Stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength. Paper SPE 54356, SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, April 21-23, pp. 1-10, Caracas, Venezuela.
54. Labenski, F., Reid, P. & Santos, H. (2003): Drilling Fluids Approaches for Control of Wellbore Instability in Fractured Formations. Paper SPE/IADC 85304, SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition, October 20-22, pp. 1-8, Abu Dhabi, UAE.
55. McLean, M.R. & Addis, M.A. (1990): Wellbore Stability Analysis: A Review of Current Methods of Analysis and Their Field Application. Paper IADC/SPE 19941, IADC/SPE Drilling Conference, February 27 – March 2, pp. 261-274, Houston, Texas.
56. McLellan, P. (1994): Assessing the Risk of Wellbore Instability in Horizontal and Inclined Wells. Paper HWC94-14, SPE/CIM/CANMET International Conference on

- Recent Advances in Horizontal Well Applications, March 20-23, pp. 1-14, Calgary Canada.
57. MI SWACO (1998): Drilling Fluids Manual. 786 pp.
 58. MI SWACO (2007): Poly Pac UL – Product Bulletin. MI SWACO, pp. 1-2, Houston, Texas.
 59. Mohiuddin, M.A., Khan, K., Abdulraheem, A., Al-Majed, A. & Arifullah, V. (2005): Field Based Criteria for the Design of Safe Mud Weight Window. Paper SPE 106327, SPE Technical Symposium of Saudi Arabia Section, May 14-16, pp. 1-6, Dhahran, Saudi Arabia.
 60. Muniz, E.S., da Fontoura, S.A.B. & Lomba, R.F.T. (2005^a): Rock-Drilling Fluid Interaction Studies on the Diffusion Cell. Paper SPE 94768, SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, June 20-23, pp. 1-5, Rio de Janeiro, Brazil.
 61. Muniz, E.S., da Fontoura, S.A.B., Duarte, R.G. & Lomba, R.T.F. (2005^b): Evaluation of the Shale-Drilling Fluid Interaction for Studies of Wellbore Stability. Paper ARMA/USRMS 05-816, Alaska Rocks 2005, The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS): Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions, June 25-29, pp. 1-7, Anchorage, Alaska.
 62. Nguyen, V., Abousleiman, Y. & Hoang, S. (2007): Analyses of Wellbore Instability in Drilling Through Chemically Active Fractured Rock Formations: Nahr Umr Shale. Paper SPE 105383, 15th SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, March 11-14, pp. 1-15, Kingdom of Bahrain.
 63. O'Brien, D.E. & Chenevert, M.E. (1973): Stabilizing Sensitive Shales with Inhibited, Potassium-Based Drilling Fluids. *Journal of Petroleum Technology*, September, pp. 1089-1100.
 64. Ofite (2011): Dynamic Linear Swellmeter with Compactor – Instruction Manual. OFI Testing Equipment, Inc., 28 pp., Houston, Texas, U.S.A.
 65. Ofite (2011): Capillary Suction Timer-Instruction Manual. OFI Testing Equipment, Inc., 7 pp., Houston, Texas, U.S.A.
 66. Oleas, A.M., Osuji, C.E., Chenevert, M.E. & Sharma, M.M. (2010): Entrance Pressure of Oil-Based Mud Into Shale: Effect of Shale, Water Activity, and Mud Properties. *SPE Drilling & Completion*, March, pp. 39-44.
 67. Osuji, C.E., Chenevert, M.E. & Sharma, M.M. (2008): Effect of Porosity and Permeability on the Membrane Efficiency of Shales. Paper SPE 116306, SPE Annual

- Technical Conference and Exhibition, September 21-24, pp. 1-12, Denver, Colorado, USA.
68. Pašić, B., Gaurina-Međimurec, N. & Matanović, D. (2007): Wellbore Instability: Causes and Consequences. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, volumen 19, pp. 87-98, Zagreb.
69. Pašić, B. (2010): Istraživanje utjecaja različitih isplaka na bubrenje uzoraka stijena. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, javni seminar - uvod u temu disertacije, 35 str., Zagreb.
70. Pašić, B. (2011): Utjecaj pripreme i uvjeta ispitivanja na bubrenje bentonitnih peleta. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, javni seminar – prvi rezultati istraživanja, 35 str., Zagreb.
71. Patel, A., Stamatakis, E., Young, S & Friedheim, J. (2007): Advances in Inhibitive Water-Based Drilling Fluids - Can They Replace Oil-Based Muds? SPE Paper 106476, SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, February 28 - March 2, pp. 1-8, Houston, Texas, U.S.A.
72. Popp, N.G. (2004): Acoustic Properties of Shale with Variant Water Activity. Magisterij, University of Texas, 166 pp., Austin.
73. Qu, Y., Lai, X., Zou, L. & Su, Y. (2009): Polyoxyalkylamine as Shale Inhibitor in Water-Based Drilling Fluids. Applied Clay Science, Volume 44, Issues 3-4, May, pp. 265-268.
74. ***, Rock Mechanics - Self Learning Course. Sugar Land Learning Center, 102 pp.
75. Rojas, J.C., Clark, D.E. & Zhang, J. (2006^a): Stressed Shale Drilling Strategy-Water Activity Design Improves Drilling Performance. Paper SPE 102498, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 24-27, pp. 1-11, San Antonio, Texas, U.S.A.
76. Rojas, J.C., Clark, D.E., Greene, B. & Zhang, J. (2006^b): Optimized Salinity Delivers Improved Drilling Performance. Paper AADE-06-DF-HO-11, AADE 2006 Fluids Conference, April 11-12, pp. 1-13, Houston, Texas.
77. Santarelli, F.J. (1995): Do Shales Swell? A Critical Review of Available Evidence. Paper SPE/IADC 29421, SPE/IADC Drilling Conference, February 28 – March 2, pp. 741-756, Amsterdam.
78. Schlemmer, R., Friedheim, J.E., Growcock, F.B., Bloys, J.B., Headley, J.A. & Polnaszek, S.C. (2003): Chemical Osmosis, Shale, and Drilling Fluids. SPE Drilling & Completion, December, pp. 318-331.

79. Sigma-Aldrich (2012): Sigurnosno tehnički list – kaolin pH Eur (Fluca). www.sigmaaldrich.com (11.1.2012.)
80. Simangunsong, R.A., Villatoro, J.J. & Davis, A.K. (2006): Wellbore Stability Assessment for Highly Inclined Wells Using Limited Rock Mechanics Data. Paper SPE 99644, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 24-27, pp. 1-13, San Antonio, Texas, U.S.A.
81. Simpson, J.P., Dearing, H.L. & Sallsbury, D.P. (1989): Downhole Simulation Cell Shows Unexpected Effects of Shale Hydration on Borehole Wall. SPE Drilling Engineering, March, pp. 24-30.
82. Simpson, J.P. & Dearing, H.L. (2000): Diffusion Osmosis-An Unrecognized Cause of Shale Instability. Paper IADC/SPE 59190, IADC/SPE Drilling Conference, February 23-25, pp. 1-14, New Orleans, LA.
83. Steiger, R.P. (1982): Fundamentals and Use of Potassium/Polymer Drilling Fluids to Minimize Drilling and Completion Problems Associated With Hydratable Clays. Journal of Petroleum Technology, August, pp. 1661-1670.
84. Stowe, C., Halliday, W., Xiang, T., Clapper, D., Morton, K. & Hartman, S. (2001): Laboratory Pore Pressure Transmission Testing of Shale. Paper AADE 01-NC-HO-44, AADE 2001 National Drilling Conference “Drilling Technology – The Next 100 years”, March 27-29, pp. 1-10, Houston, Texas.
85. Tan, C.P., Wu, B., Mody, F.K. & Tare, U.A. (2002): Development and Laboratory Verification of High Membrane Efficiency Water-Based Drilling Fluids with Oil-Based Drilling Fluid-Like Performance in Shale Stabilization. Paper SPE/ISRM 78159, SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, October 20-23. pp. 1-12, Irving, Texas.
86. Tare, U.A., Mody, F.K. & Tan, C.P. (2002): New Generation of Membrane Efficient Water-Based Drilling Fluids: Pragmatic and Cost-Effective Solutions to Borehole Stability Problems. Paper 2002-166, Petroleum Society’s Canadian International Petroleum Conference, June 11-13, pp. 1-11, Calgary, Alberta, Canada.
87. van Oort, E., Hale, A.H. & Mody, F.K. (1995): Manipulation of Coupled Osmotic Flows for Stabilisation of Shales Exposed to Water-Based Drilling Fluids. Paper SPE 30499, SPE Annual Technical Conference & Exhibition, October 22-25, pp. 497-509, Dallas, U.S.A.

88. van Oort, E., Hale, A.H., Mody, F.K. & Roy, S. (1996): Transport in Shales and the Design of Improved Water-Based Shale Drilling Fluids. SPE Drilling & Completion, September, pp. 137-146.
89. Zhang, J., Chenevert, M.E., Al-Bazali, T. & Sharma, M.M. (2004): A New Gravimetric-Swelling Test for Evaluating Water and Ion Uptake in Shales. Paper SPE 89831, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 26-29, pp. 1-9, Houston, Texas, U.S.A.
90. Zhang, J., Clark, D.E., Al-Bazali, T.M., Chenevert, M.E., Rojas, J.C. & Ong, S. (2006^a): Ion Movement and Laboratory Technique to Control Wellbore Stability. Paper AADE-06-DF-HO-37, AADE 2006 Fluids Conference, April 11-12, pp. 1-12, Houston, Texas.
91. Zhang, J., Yu, M., Al-Bazali, T.M., Ong, S., Chenevert, M.E., Sharma, M.M. & Clark, D.E. (2006^b): Maintaining the Stability of Deviated and Horizontal Wells: Effects of Mechanical, Chemical, and Thermal Phenomena on Well Designs. Paper SPE 100202, SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition, December 5-7, pp. 1-12, Beijing, China.

ŽIVOTOPIS

Borivoje Pašić rođen je 23. siječnja 1982. godine u Sisku. Nakon završetka osnovne škole upisuje se u Gimnaziju Sisak opći smjer. Gimnaziju završava 2000. godine te se iste godine upisuje na Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, smjer naftno rudarstvo, koji završava 2005. godine i stječe titulu diplomiranog inženjera naftnog rudarstva. Od 2006. godine zaposlen je na mjestu prvo asistenta-znanstvenog novaka, a od 2011. godine na mjestu asistenta na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu, u Zavodu za naftno inženjerstvo. Tijekom svog rada na fakultetu aktivno sudjeluje u izvođenju nastave za studente dodiplomskog i diplomskog studija naftnog inženjerstva, te u znanstvenim projektima i stručnim studijama koje se izrađuju u suradnji s privredom. Član je hrvatskog ogranka svjetskog udruženja naftnih inženjera, te dobitnik nagrade „Young Member Outstanding Service and Contribution to the Industry (South, Central & East Europe Region)“ u 2010 godini od strane spomenute organizacije. Dobitnik je i nagrade za najboljeg znanstvenog novaka u 2007. Godini, koja se dodjeljuje od strane Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta. U dosadašnjoj znanstvenoj i stručnoj karijeri objavio je kao autor ili koautor 24 znanstvena i stručna rada.

Popis objavljenih radova

1. Simon, K., Gaurina-Međimurec, N., Matanović, D., **Pašić, B.** (2005.): *Bušotinski fluidi – sklonost diferencijalnom prihvatu*, Zbornik radova - 3. Međunarodni znanstveno-stručni skup o naftnom gospodarstvu „Suvremene tehnologije osiguravaju energetska dominaciju ugljikovodika i u 21. stoljeću“, knjiga 17/06, 4-7. listopada, 25-34.
2. Simon, K., Gaurina-Međimurec, N., **Pašić, B.** (2005.): *Drilling Fluids Differential Sticking Tendency Determination*, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, volumen 17, 31-35.
3. Gaurina-Međimurec, N., Simon, K., Matanović, D., **Pašić, B.** (2006.): *Offshore Drilling and Environmental Protection*, Međunarodni kongres „Energija i okoliš 2006.“, XX. znanstveni skup o energiji i zaštiti okoliša, volumen 2, Opatija, Hrvatska, 25-27. listopada, 309-318.
4. **Pašić, B.**, Gaurina-Međimurec, N., Simon, K. (2006.): *Tehnološki i ekološki aspekti primjene podmazivača*, Međunarodni kongres „Energija i okoliš 2006.“, XX. znanstveni skup o energiji i zaštiti okoliša, volumen 2, Opatija, Hrvatska, 25-27. listopad, 293-302.

5. Gaurina-Međimurec, N., Simon, K., Matanović, D., **Pašić, B.** (2006.): *Underbalanced Drilling Technology*, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, volumen 18, 81-95.
6. Gaurina-Međimurec, N., Šimić, Š., Simon, K., Sorić, T., **Pašić, B.** (2007.): *Utjecaj isplake na stabilnost kanala bušotine*, Zbornik radova - 4. Međunarodni znanstveno-stručni skup o naftnom gospodarstvu „Energenti koji će omogućiti tehnološki i gospodarski razvoj u 21. stoljeću“, knjiga 33/07, 2-5. listopada, 43-55.
7. **Pašić, B.**, Gaurina-Međimurec, N., Matanović, D. (2007.): *Wellbore Instability: Causes and Consequences*, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, volumen 19, 87-98.
8. Simon, K., Matanović, D., Gaurina-Međimurec, N., **Pašić, B.**, Malnar, M. (2008.): *Rotary Steerable Systems Application in Croatia*, Conference Proceeding – 8th International Scientific Conference „Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection“, volume I, Albena, Bulgaria, 16-20. June, 575-580.
9. Matanović, D., Gaurina-Međimurec, N., Simon, K., **Pašić, B.** (2008.): *Intelligent Completions; Approach and Possibilities*, Conference Proceeding – 8th International Scientific Conference „Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection“, volume I, Albena, Bulgaria, 16-20. June, 559-566.
10. Gaurina-Međimurec, N., Simon, K., Matanović, D., **Pašić, B.** (2008.): *Temperature Effect on Rheological Properties of Formate Based Drill-in Fluid*, The Conference Proceedings – XIV. International Scientific-Technical Conference „New Knowledge in The Area of Drilling, Production, Transport and Storage of Hydrocarbons“, Podbanske, Slovakia, 21-23. October, 36-41.
11. Gaurina-Međimurec, N., Simon, K., Matanović, D., **Pašić, B.** (2008.): *Temperature Effect on Rheological Properties of Formate Based Drill-in Fluid*, The International Journal of Transport & Logistics, 6. special issue, BERG Faculty TU Košice, Logistics Institute of Industry and Transport, Košice, Slovakia, 36-41.
12. Gaurina-Međimurec, N., **Pašić, B.**, Simon, K., Matanović, D., Malnar, M. (2008.): *Formate-Based Fluids: Formulation and Application*, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, volumen 20, 41-49.
13. Simon, K., Matanović, D., Gaurina-Međimurec, N., Krištafor, Z., Malnar, M., **Pašić, B.**, Zelić, I. (2009.): *Geosteering*, Conference Proceedings – 20th International Conference Oil-Gas AGH 2009. „New Methods and Technologies in Petroleum Geology, Drilling, Geoengineering, Reservoir Engineering and Gas Engineering, Krakow, Poland, 27-29. May, 43-46.

14. Gaurina-Međimurec, N., **Pašić, B.**, Matanović, D., Simon, K., Malnar, M., Moslavac, B. (2009.): *Casing Drilling: Advantages and Limitations*, 5. Međunarodni znanstveno-stručni skup o naftnom gospodarstvu „Imaju li nafta i plin energetska zamjenu u ovom stoljeću?“, Šibenik, Hrvatska, 29. rujna – 1. listopada, 1-12.
15. Gaurina-Međimurec, N., **Pašić, B.** (2009.): *Aphron-Based Drilling Fluids: Solution for Low Pressure Reservoirs*, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, volumen 21, 65-72.
16. Matanović, D., Simon, K., Gaurina-Međimurec, N., **Pašić, B.**, Malnar, M. (2009.): *Contribution in Testing Swelling Packers Behaviour*, Drilling Oil Gas, Quarterly, volume 26, No. 1-2, 231-238.
17. Moslavac, B., **Pašić, B.**, Malnar, M. (2010.): *Frac-Pack Well Stimulation*, 21st International Conference Oil-Gas AGH 2010., Krakow, Poland, 27-29. May, 293-306.
18. Moslavac, B., Malnar, M., **Pašić, B.** (2010.): *Multifracturing Well Completions*, The Conference Proceedings – XV. International Scientific-Technical Conference „New Knowledge in The Area of Drilling, Production, Transport and Storage of Hydrocarbons“, Podbanske, Slovakia, 19-21. October, 71-77.
19. Gaurina-Međimurec, N., **Pašić, B.**, Simon, K. (2010.): *CO₂ Underground Storage and Wellbore Integrity*, The Conference Proceedings – XV. International Scientific-Technical Conference „New Knowledge in The Area of Drilling, Production, Transport and Storage of Hydrocarbons“, Podbanske, Slovakia, 19-21. October, 11-17.
20. Moslavac, B., Malnar, M., **Pašić, B.** (2010.): *Multifracturing Well Completions*, The International Journal of Transport & Logistics, 8. special issue, BERG Faculty TU Košice, Logistics Institute of Industry and Transport, Košice, Slovakia, 87-84.
21. Gaurina-Međimurec, N., **Pašić, B.**, Simon, K. (2010.): *CO₂ Underground Storage and Wellbore Integrity*, The International Journal of Transport & Logistics, 8. special issue, BERG Faculty TU Košice, Logistics Institute of Industry and Transport, Košice, Slovakia, 11-17.
22. Matanović, D., Gaurina-Međimurec, N., **Pašić, B.**, Moslavac, B. (2010.): *Lubricants in Drill-in Fluids Help to Reduce Pipe Wearing While Drilling*, BIT's 1st Annual International Congress of Oil Field Chemicals – 2010 Green Chemistry for Petroleum E & P“, Beijing, China, 15-17. November, 56.
23. Gaurina-Međimurec, N., **Pašić, B.**, Matanović, D. (2010.): *Spotting Fluids for Freeing Differentially Stuck Pipe*, BIT's 1st Annual International Congress of Oil Field Chemicals – 2010 Green Chemistry for Petroleum E & P“, Beijing, China, 15-17. November, 57.

24. **Pašić, B.**, Gaurina-Međimurec, N., Moslavac, B. (2010.): *Shale Stabilizers Improve Borehole Stability*, BIT's 1st Annual International Congress of Oil Field Chemicals – 2010 Green Chemistry for Petroleum E & P“, Beijing, China, 15-17. November, 59.