



Bjarnarflagsvirkjun

Prófun á nýtingu skiljuvatns.

Fjölliðun kísils og þynning með þéttivatni fyrir niðurrennslisveitu.

Lykilsíða



Skýrsla LV nr: LV-2014-085

Dags: 26.09.2014

Fjöldi síðna: 23

Upplag: 3

Dreifing:

- Birt á vef LV
 Opin
 Takmörkuð til

Titill: Bjarnarflagsvirkjun - Prófun á nýtingu skiljuvatns. Fjölliðun kísils og þynning með þéttivatni fyrir niðurrennslisveitu.

Höfundar/fyrirtæki: Trausti Hauksson/Kemía

Verkefnisstjóri: Ásgerður K. Sigurðardóttir

Unnið fyrir: Landsvirkjun

Samvinnuaðilar: Kemía

Útdráttur: Skýrslan fjallar um tilraunir með skiljuvatn frá borholu B-13 í Bjarnarflagi og vinnslueinginleika þess fyrir fyrirhugaða virkjun í Bjarnarflagi. Skiljuvatn verður yfirmettað eftir kælingu og því gæti reynst erfitt að losa það frá virkjun í niðurrennslisveitu virkjunar. Þynning með kælivatni getur þætt úr því. Gerðar voru tilraunir þar sem fjölliðunarhraði kísils var mældur. Árið 2013 var gerð tilraun sem átti að sannreyna hvort fjölliðun og þynning sé trygg aðferð til þess að koma í veg fyrir kísilútfellingar í niðurrennslisveitu. Niðurstöður þeirrar tilraunar lofuðu góðu en vegna rekstrartruflana voru þær ekki taldar nægilega áreiðanlegar (Trausti Hauksson, 2013). Ákveðið var að endurtaka tilraunina sem staðfesti að fjölliðun kísilsins og þynning með þéttivatni hægir verulega á eða stöðvar útfellinguna og gerir vökvann hæfan til niðurdælingar.

Lykilorð: Bjarnarflagsvirkjun, skiljuvatn, niðurdæling, B-13, kísilútfellingar

ISBN nr:

Samþykki verkefnisstjóra
Landsvirkjunar

Ásgerður K. Sigurðardóttir

Bjarnarflagsvirkjun

Prófun á nýtingu skiljuvatns.

Fjölliðun kísils og þynning með þéttivatni fyrir
niðurrennslisveitu.

Trausti Hauksson

Ágúst 2014

EFNISYFIRLIT

1 Inngangur	3
2 Framkvæmd tilrauna.....	3
2.1 Tilraunabúnaður	3
3 Niðurstöður tilrauna	6
3.1 Varmaskiptir	6
3.2 Fjölliðunartankar	10
3.3 Þéttivatnsblanda.....	13
4 Helstu niðurstöður	18
4.1 Varmaskiptatilraun	18
4.2 Fjölliðunartankar	18
4.3 Þéttivatnsþynning.....	18
5 Heimildir.....	18

Töflur

Tafla 1 Útfelling á plötur í varmaskipti.....	9
Tafla 2. Útfelling á plötur í taftanki.....	12
Tafla 3 Útfellingarhraði á blendur.....	16

Myndir

Mynd 1 Skiljuvatnstilraun í Bjarnarflagi. Tengimynd tilraunabúnaðar.....	5
Mynd 2 Varmaskiptatilraun. Rennsli skiljuvatns á móti tíma.	6
Mynd 3 Varmaskiptatilraun. Hitastig á móti tíma.	7
Mynd 4 Varmaskiptatilraun. Varmaflutningsstuðull á móti tíma.	8
Mynd 5 Útfellingaplötur í varmaskipti eftir tilraun.....	8
Mynd 6 Útfelling á plötu C1 í varmaskipti.	9
Mynd 7 Útfelling á plötu C4 í varmaskipti.	10
Mynd 8 Hitastig í taftönkum.	11
Mynd 9 Kísilstyrkur í taftönkum og blöndu.	11
Mynd 10 Útfellingaplötur í tönkum . Plötur (Ct5 vantar) Ct6 Ct7.....	12
Mynd 11 Útfellingaplötur í röri út úr tönkum, plötur C5 C6 C7.....	13
Mynd 12 Hitastig skiljuvatns, þéttivatns og blöndu.	13
Mynd 13 Þéttivatnshlutfall	14
Mynd 14 Rennsli skiljuvatns, þéttivatns og blöndu.	14
Mynd 15 Plata C8 í röri strax eftir blöndun	15
Mynd 16 Útfelling á plötu C8 strax eftir blöndun.	15
Mynd 17 Þrýstingur fyrir framan og aftan blenduhlöðu.....	16
Mynd 18 Blendur eftir 91 dag.	17
Mynd 19 Útfelling á blendu B2.	17

1 Inngangur

Í fyrirhugaðri Bjarnarflagsvirkjun verður gufan, sem streymir úr borholum og knýja mun aflvélarnar, skilin frá jarðhitavatni við 184 °C hita. Skiljuvatn virkjunar mun því innihalda mikinn varma sem áætlað er að verði nýtt fyrir raforkuframleiðslu með tvívökvavél (ORC) eða til upphitunar í hitaveitu eða annarrar notkunar.

Árið 2012 var gerð varmaskiptaprófun í skiljustöð Bjarnarflagsvirkjunar (Trausti Hauksson 2012). Tilraunin kom vel út og sýndi fram á að hægt er að nýta varmaorku skiljuvatns frá virkjuninni til upphitunar. Einnig voru gerðar prófanir með fjölliðun og þéttivatnsþynningu með það markmið að stöðva útfellingar kísils og gera vatnið hæft til niðurdælingar. Þær lofuðu einnig góðu.

Árið 2013 var gerð tilraun sem átti að sannreyna hvort fjölliðun og þynning sé trygg aðferð til þess að koma í veg fyrir kísilútfellingar í niðurrennslisveitu. Niðurstöður þeirrar tilraunar lofuðu góðu en vegna rekstrartruflana voru þær ekki taldar nægilega áreiðanlegar (Trausti Hauksson 2013). Ákveðið var að endurtaka tilraunina og eru niðurstöður þeirrar tilraunar teknar saman í þessari skýrslu.

Yfirumsjón þessarra tilrauna var í höndum Árna Gunnarssonar og Ásgerðar K. Sigurðardóttur hjá LV. Hönnun tilraunabúnaðar og eftirlit með framkvæmd tilraunarinnar og úrvinnsla gagna var í höndum Trausta Haukssonar hjá Kemíu. Karl E. Sveinsson hjá LV hafði umsjón með smíði búnaðar. Starfsmenn Kröflustöðvar þau Helgi A. Alfreðsson og Júlía K. Björke höfðu eftirlit með rekstri búnaðar og efnagreindu kísil.

2 Framkvæmd tilrauna

2.1 Tilraunabúnaður

Í tilraunabúnaðinum var skiljuvatn frá tilraunavarmaskipti, eftir kælingu, látið fjölliðast í tanki í um 33 mínútur, áður en það var þynnt með þéttivatni og útfellingarhraðinn mældur.

Varmaskiptinum er lýst í skýrslu um fyrri tilraunir (Skýrsla nr. LV-2012/107). Til viðbótar voru smíðaðir taftankar og blöndunarbúnaður.

Taftankarnir (3 x 100 litrar) voru gerðir úr foreinangruðum DN125 rörum. Þeir voru tengdir saman með DN25 lagnaefni. Í tankana og í lögnina milli þeirra voru settar plötur til þess að mæla útfellingarhraða.

Mynd 1 sýnir teikningu af tilraunabúnaðinum.

Þéttivatn var framleitt á staðnum með gufuþéttingu. Gasi var hleypt úr þéttivatninu við 100 °C og andrúmsloftsþrýsting og því dælt, eftir kælingu niður í 40 °C, inn í tilraunarásina.

Til þess að líkja eftir fyrirstöðu í niðurrennslissholum, þar sem blandan streymir um þröngar bergæðar, var hún látin streyma í gegnum rennslismótstöðu. Hún var gerð úr blenduhlöðu með samtals 8 blendum með 7 mm götum.

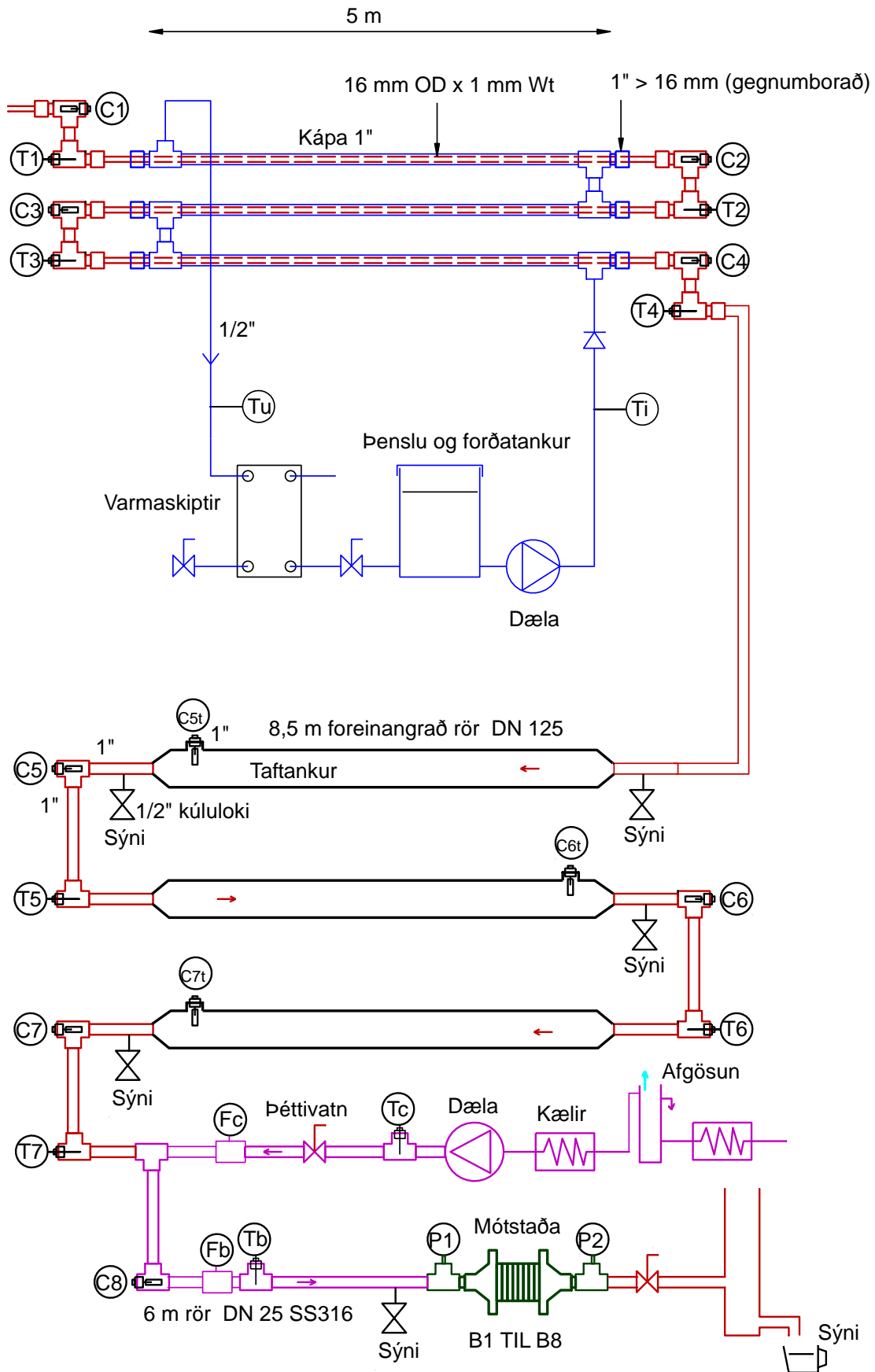
Tilraunin var gerð í skiljustöð 1 í Bjarnarflagi með skiljuvatni frá holu BJ-13.

Vegna rafmagnstruflana varð að hætta tilraun sem gerð var haustið 2013 og var tilraunin endurtekin vorið 2014 eftir endurbætur á búnaði og með breyttum stillingum.

1. Hlutfall þéttvatns í blöndu var haft nær 40%, en það var um 33% í fyrri tilraun.
2. Afgösunarsúla þéttvatns var löguð þannig að vatn skvettist ekki upp úr henni.
3. Tilraunabúnaðnum var komið fyrir í einangruðum gámi til þess að minnka vindkælingu.
4. Eftirlit með rekstri búnaðar var aukið og vaktmenn Kröflustöðvar sinntu því með rannsóknarmönnum LV.

Gámnum var stillt upp við skiljustöð I í Bjarnarflagi þar sem skiljuvatn úr holu BJ-13, skilið frá gufunni við um 186 °C, var tengt inn á tilraunabúnaðinn.

Vatnshiti og þrýstingur var símældur og rennsli mælt handvirkt tvisvar í viku.



Mynd 1. Skiljuvatnstilraun í Bjarnarflagi. Tengimynd tilraunabúnaðar.

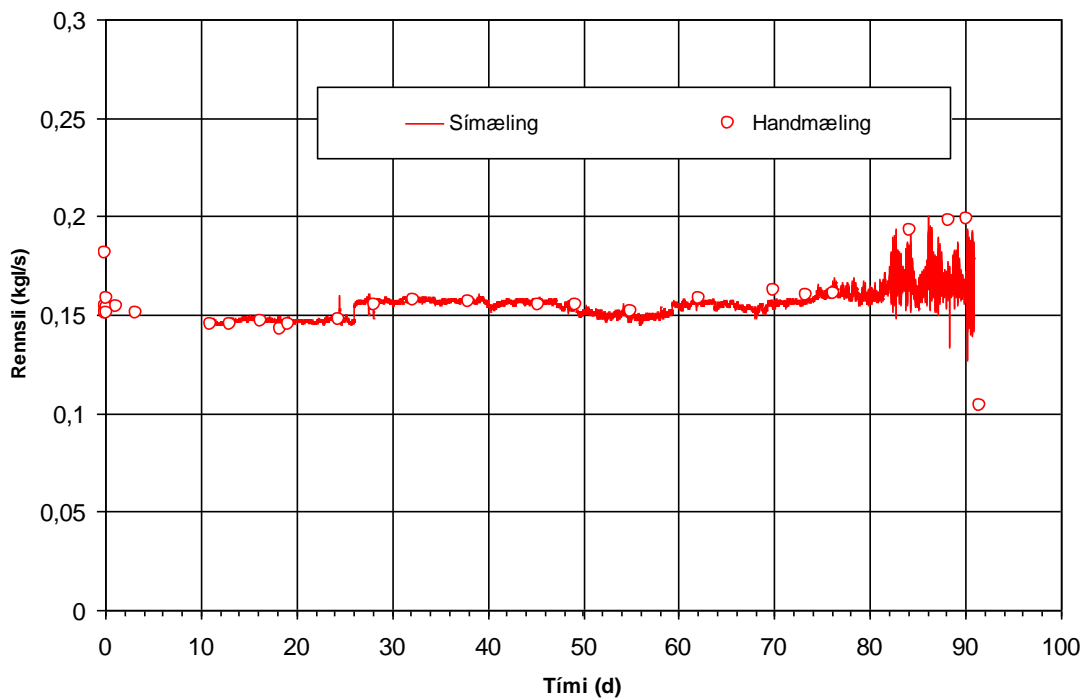
3 Niðurstöður tilrauna

Fyrsta tilraun sem gerð var haustið 2013 mistókst. Lengd tilraunar var áætluð um 91 dagar en henni varð að hætta eftir 54 daga þegar rafmagn fór af búnaðinum. Ókælt skiljuvatn streymdi þá í nokkra daga í gegnum búnaðinn sem hafði áhrif á útfellingar á plötum og blendum. Niðurstöðurnar voru því dæmdar ómarktækar.

Tilraunin var endurtekin vorið 2014 með endurbættum búnaði. Lengd tilraunar varð 91 dagar eins og áætlað var.

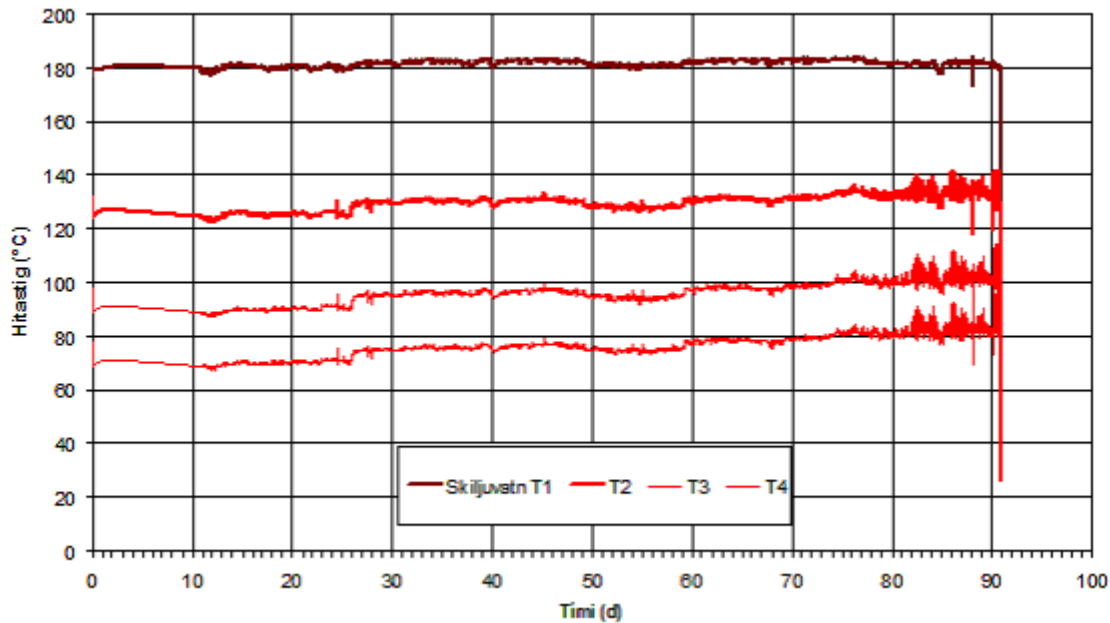
3.1 Varmaskiptir

Rennslið var stillt á um 0,15 kg/s (9 l/min), sjá mynd 2. Hringirnir sýna mælt rennsli en punktalínan sýnir reiknað skiljuvatnsrennsli miðað við stöðugt kælivatnsrennsli. Rennslið var haft mun minna en í fyrri varmaskiptatilaun en þá var það um 0,27 kg/s.



Mynd 2. Varmaskiptatilaun. Rennsli skiljuvatns á móti tíma.

Varmaskiptirinn var þrískiptur og hitastig var mælt á klukkustundar fresti fyrir og eftir hvert rör. Eftirfandi mynd sýnir mælt hitastig á tilraunatímanum. T1 er inntakshiti og T4 úttakshiti.



Mynd 3. Varmaskiptatilaun. Hitastig á móti tíma.

Ef kísill sest á varmaflöt þá lækkar varmaflutningsstuðullinn og varminn sem flyst milli skiljuvatnsins og kælivatnsins minnkar.

$$Q = U * A * \Theta$$

Q: Varmaafli (kW)

U: Varmaflutningsstuðull (kW/m²/K)

A: Varmaflötur (m²) (A = 0,75 m² fyrir 3 rör)

Θ : Meðalhitamunur

Meðalhitamunur á skiljuvatni og sjóðandi vatni utan við rörið:

$$\Theta = (T1 - T2) / \ln((T1 - Tk2) / (T2 - Tk1))$$

Tk1: Hitastig kælivatns inn (°C)

Tk2: Hitastig kælivatns út (°C)

ln: náttúrulegur lógaritmi

Varmaaflið reiknast út frá rennsli og hitamun inn og út úr rörinu:

$$Q = m * Cp * (T2 - T1)$$

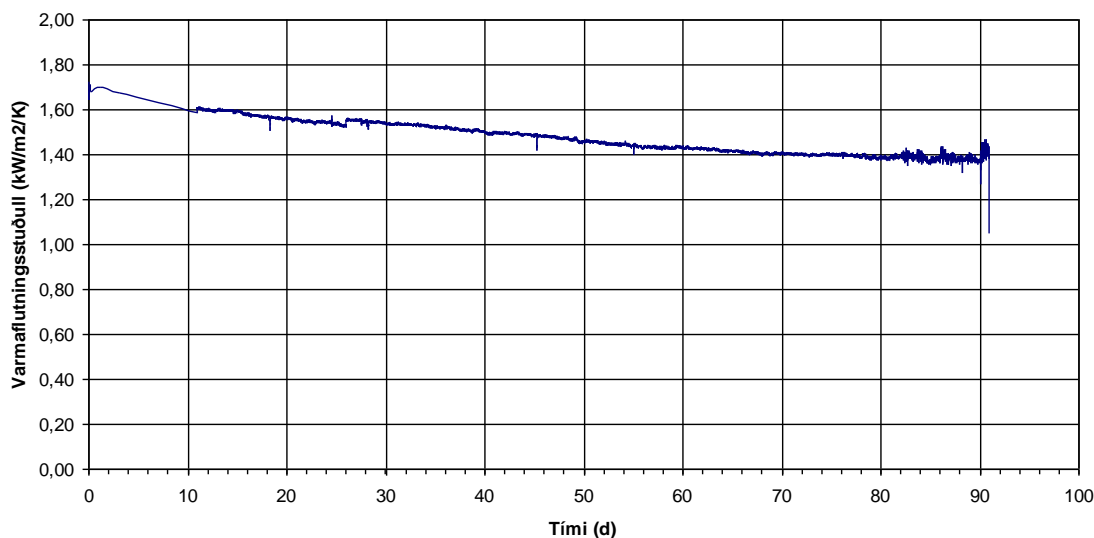
m: Rennsli (kg/s)

Cp: Varmarýmd (4,19 kJ/kg/K)

T1: Hitastig inn (°C)

T2: Hitastig út (°C)

Varmaflutningsstuðullinn reiknaður fyrir varmaskiptatilaunina er sýndur á mynd 6.



Mynd 4. Varmaskiptatilaun. Varmaflutningsstuðull á móti tíma.

Varmaflutningsstuðullinn lækkaði í tilrauninni úr um 1,70 kW/m²/K í 1,40 kW/m²/K á 80 dögum eða um 0,22 % á dag. Það er nokkuð meiri lækkun en fyrri tilraun. Þá var varmaflutningsstuðullinn hærri í byrjun og lækkaði aðeins um 0,14 % á dag.

Settar voru ryðfríar stálplötur inn í varmaskiptarörin til þess að safna sýnum af útfellingum sem kynnu að falla út. Plöturnar voru vigtaðir á undan og eftir og myndaðar. Ljósmyndir af plötunum eftir tilraun eru sýndar á mynd 7. Reiknaður útfellingarhraði er sýndur í töflu 2.



Mynd 5. Útfellingaplötur í varmaskipti eftir tilraun.

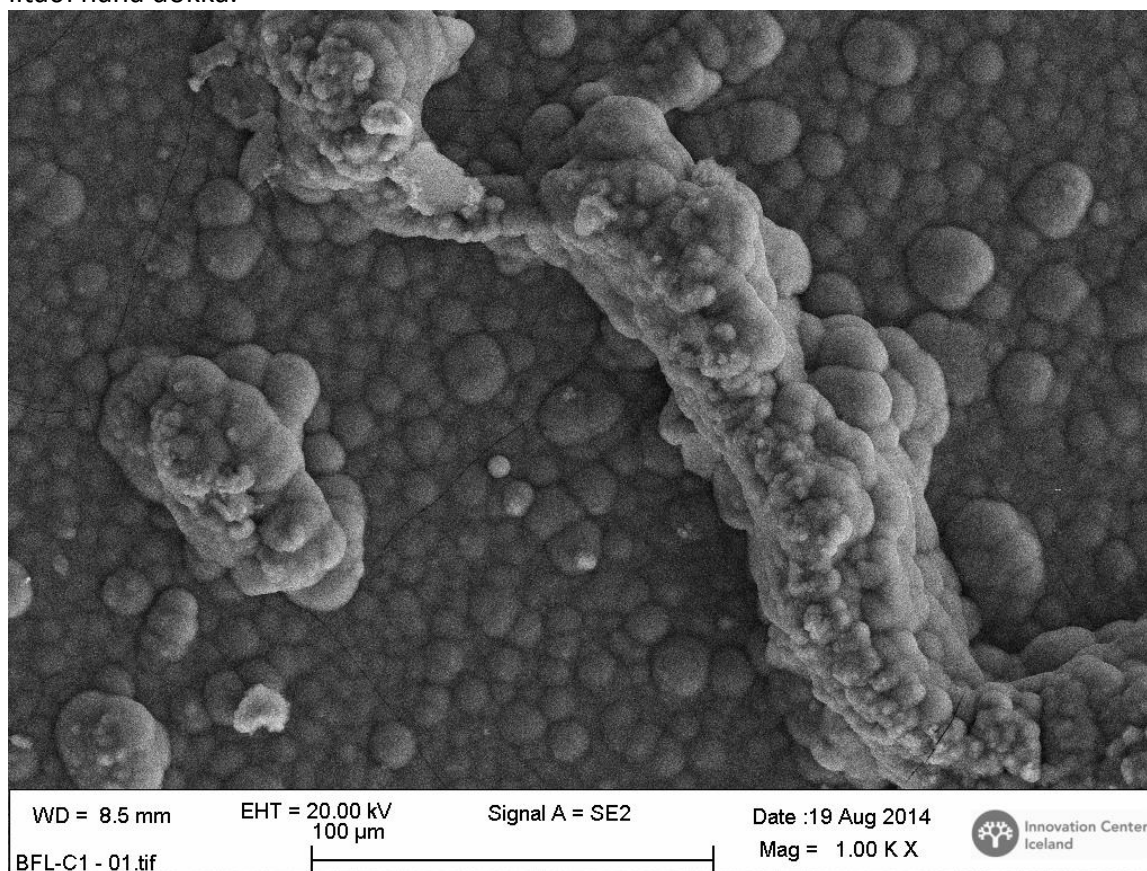
Tafla 1. Útfelling á plötur í varmaskipti

Plata	Skeljun	Skeljun	Athugasemd
nr	kg/m ² /y	mm/y	
C1	1,1	0,5	Punnt lag
C2	3,7	1,8	Grá útfelling
C3	8,6	4,1	Dökk útfelling
C4	11,4	5,4	Dökk útfelling sem flagnað hefur af 50% þekja

Útfellingaplata C1 var í inntakinu við 180 °C hita þar sem yfirmettun er hverfandi og á hana safnaðist lítil útfelling. Útfelling mældist 1,8 mm á ári á plötu C2 sem var í 125 til 135 °C hita. Meiri hraði eða 4,1 mm á ári mældist á plötu C2 sem var í 95 til 100 °C hita og 5,4 mm á plötu C4 sem var í úttaki við um 70 til 80 °C hita.

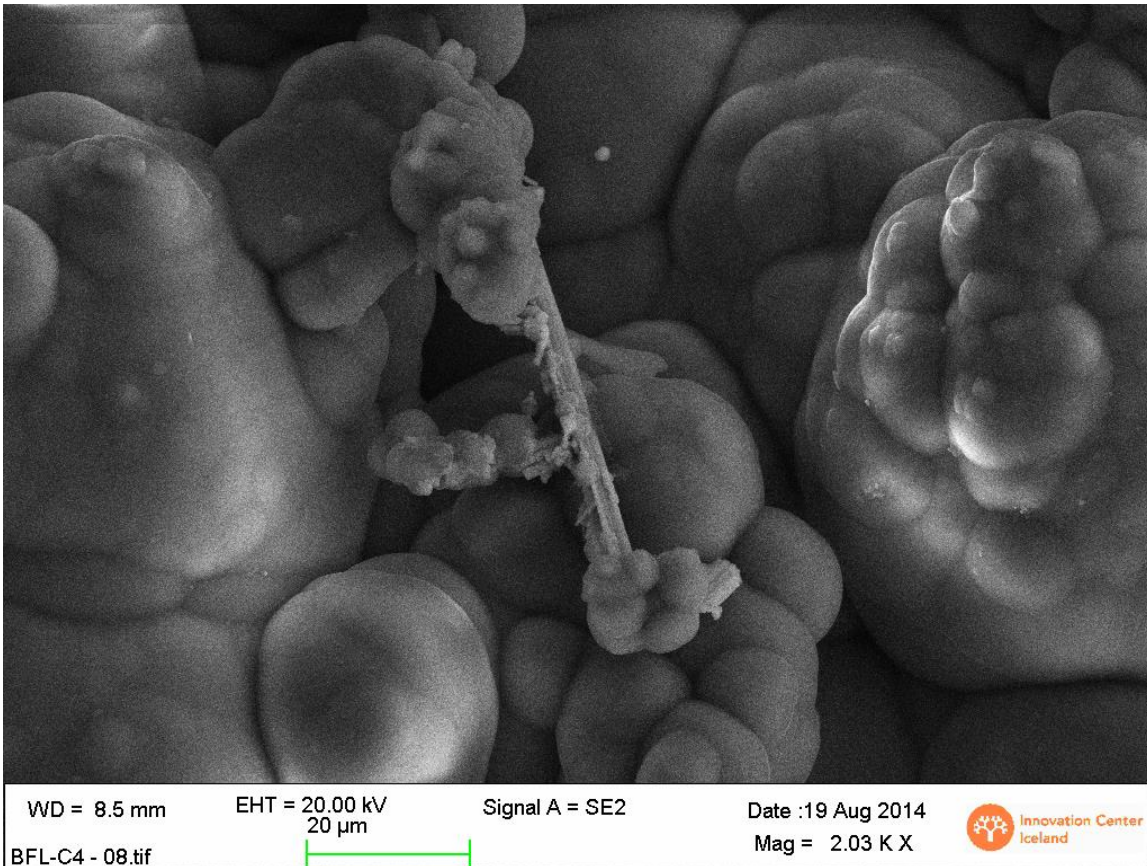
Mun meiri útfellingar mælast á plötum í varmaskipti en í fyrri tilraunum. Ekki er ljóst hvað veldur meiri útfellingu í þessari tilraun en möguleg skýring er hægara rennsli í gegnum varmaskiptinn eða breytt tenging og lengri lagnaleið frá skilju að varmaskipti. Útfellingin er það mikil að hún mun kalla á reglubundna hreinsun ef hún verður viðvarandi. Mælingar á varmaflutningsstuðli benda til þess að útfellingin hafi verið meiri fyrstu vikunar en varmaflutningsstuðullinn var nær óbreyttur 2 síðustu vikur tilraunarinnar.

Útfellingarnar voru skoðaðar í rafeindasmásjá (Mynd 8 og 9) og efnagreindar. Efnagreining sýndi að um var að ræða myndlausan kísil og áloxíð en lítilsháttar af kopar og járnsúlfíði litaði hana dökka.



Mynd 6. Útfelling á plötu C1 í varmaskipti.

Myndlaus kísill og áloxíð (85% SiO₂, 15% Al₂O₃).

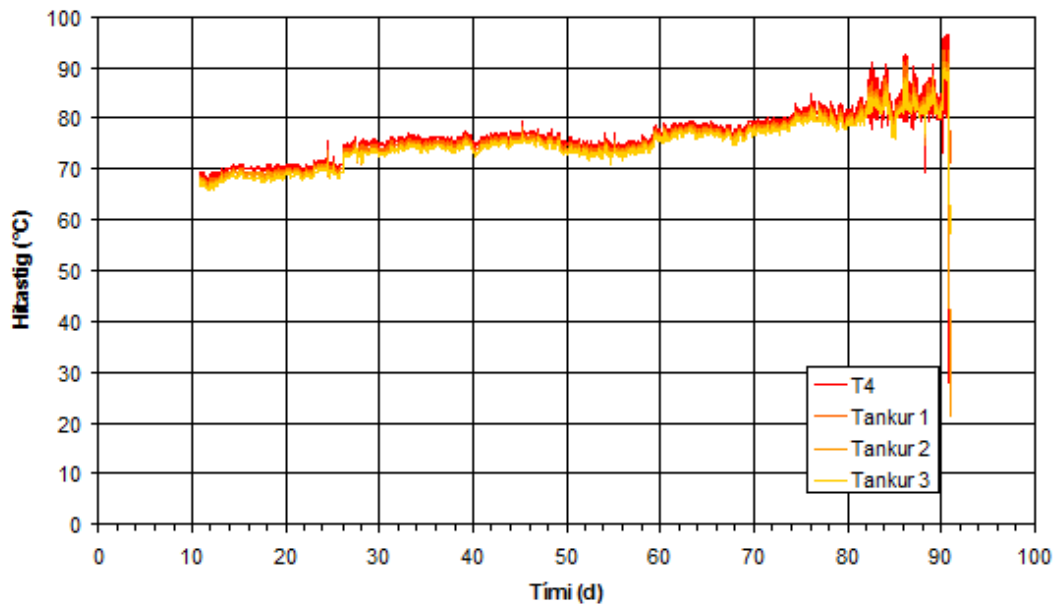


Mynd 7. Útfelling á plötu C4 í varmaskipti.

Kúlulaga útfelling er myndlaus kísill og áloxíð (98% SiO₂, 2% Al₂O₃). Þráðlaga útfelling er koparsúlfíð (Cu₂S).

3.2 Fjölliðunartankar

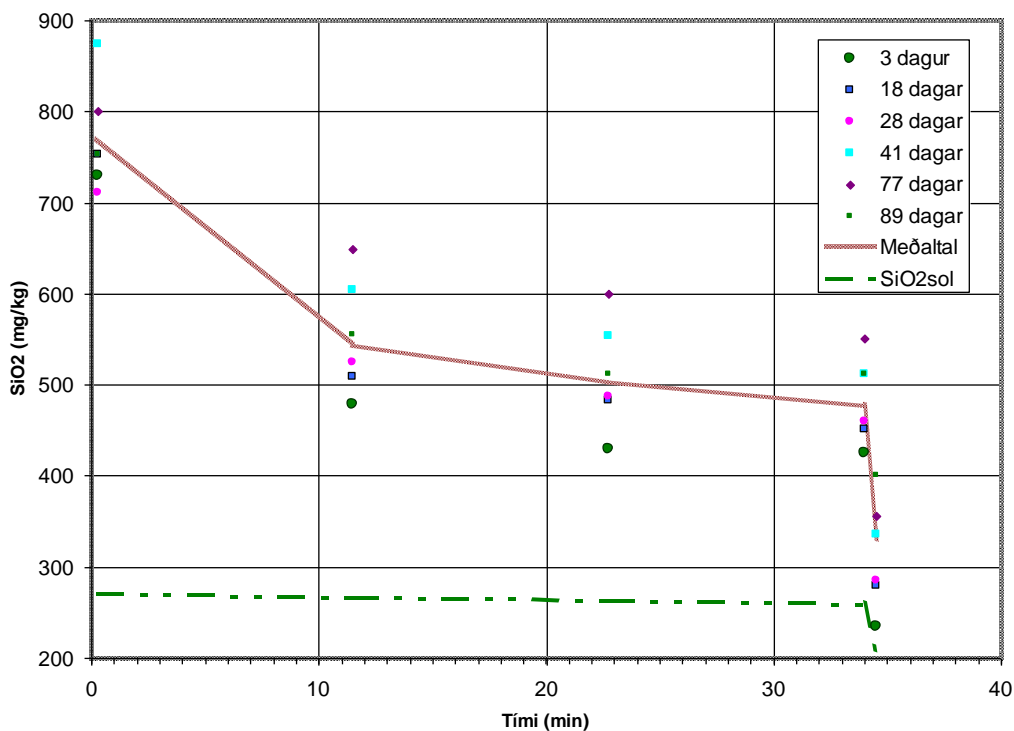
Frá varmaskipti rann kælt skiljuvatn í gegnum þrjá taftanka þar sem uppleystur kísill hvarfast innbyrðis og myndar fjölliður. Dvalartíminn í hverjum tanki var um 11 mínútur eða 33 mínútur samtals. Hitastigið hækkaði þegar leið á tilraunina en breyttist lítið á leiðinni í gegnum þá (Mynd 8).



Mynd 8. Hitastig í taftönkum.

Tekin voru nokkur sýni af vatni fyrir og eftir hvern tank og var sýrustig og styrkur kísils mældur (mynd 9). Nokkrar sveiflur voru á gildum en að meðaltali lækkaði styrkur einliðaðs kísils úr 780 í 480 mg/kg á 33 mínútum. Eftir blöndun við þéttivatn var styrkurinn að meðaltali 330 mg/kg og lítilsháttar yfir útfellingamörkum kísils.

Styrkur kísils í skiljuvatni úr skilju mældist að meðaltali minni en áður hafði mælt í skiljuvatnstilraunum eða um 770 í stað 840 mg/kg. Það var nokkuð breytilegt hve mikill kísill mældist og hversu mikið hann fjölíðaðist í tönkunum.

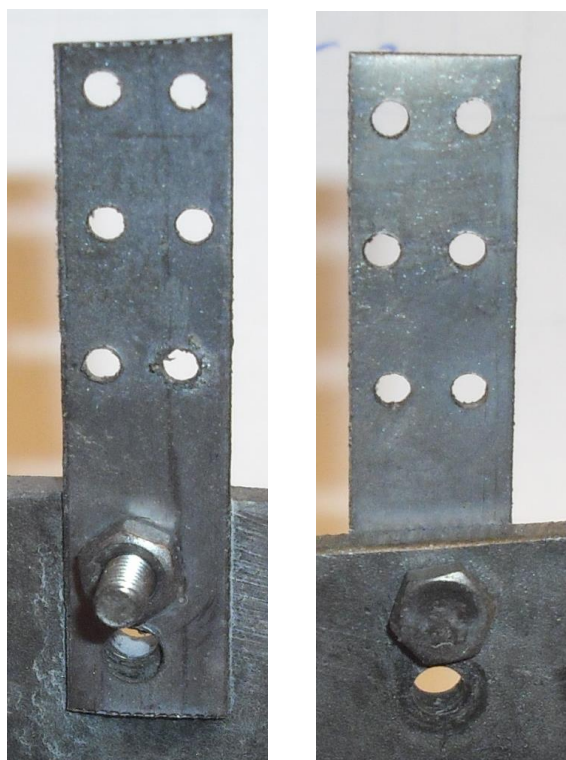


Mynd 9. Kísilstyrkur í taftönkum og blöndu.

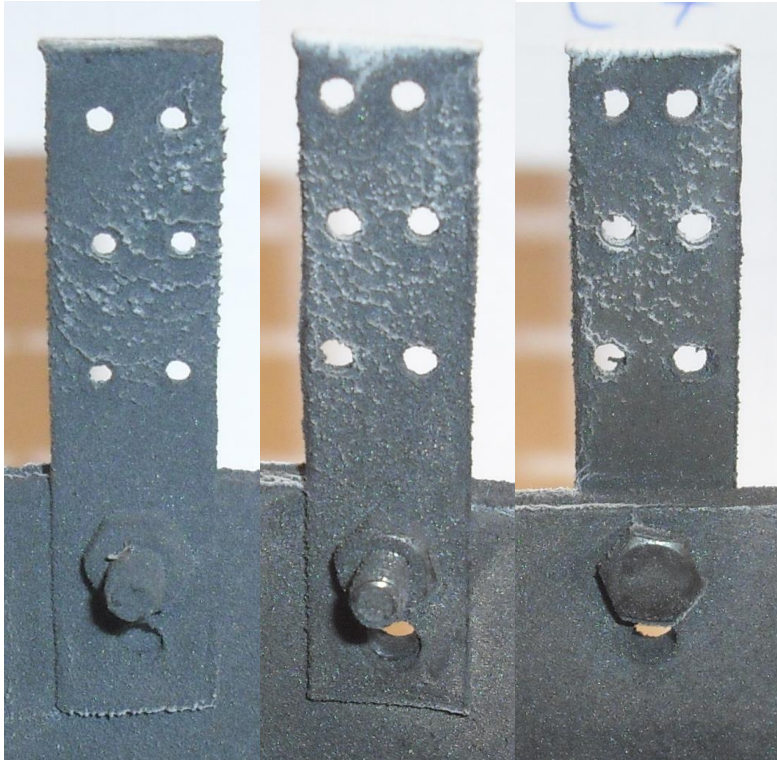
Plötur í tönkum (C6t og C7t) voru nánast hreinar (mynd 10) en nokkur kísill féll á plötur sem voru í hraðara streymi í rörum milli tankanna (C5, C6, C7, mynd 11). Plöturnar voru vigtaðar fyrir og eftir tilraun og útfellingarhraði reiknaður, sjá töflu 2. Útfellingarhraðinn var mestur í röri milli fyrsta og annars tanks en minnkaði eftir að hafa streymt í gegnum tanka 2 og 3.

Tafla 2. Útfelling á plötur í taftanki

Plata	Skeljun	Skeljun	Ath
nr	kg/m ² /y	mm/y	
C5t			Vantar
C5	9,1	4,3	Kísill hleðst á brún sem snýr upp í strauminn
C6t	0,6	0,3	Lítið að sjá
C6	2,7	1,3	Kísill hleðst á brún sem snýr upp í strauminn
C7t	0,3	0,2	Lítið að sjá
C7	1,3	0,6	Kísill hleðst á brún sem snýr upp í strauminn



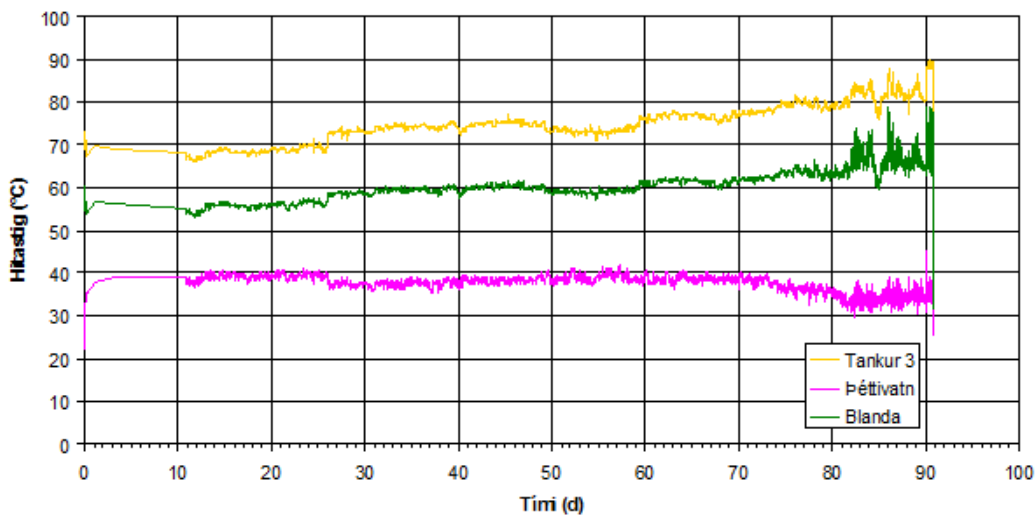
Mynd 10. Útfellingaplötur í tönkum. Plötur (Ct5 vantar) Ct6 Ct7.



Mynd 11. Útfellingaplötur í röri út úr tönkum, plötur C5 C6 C7.

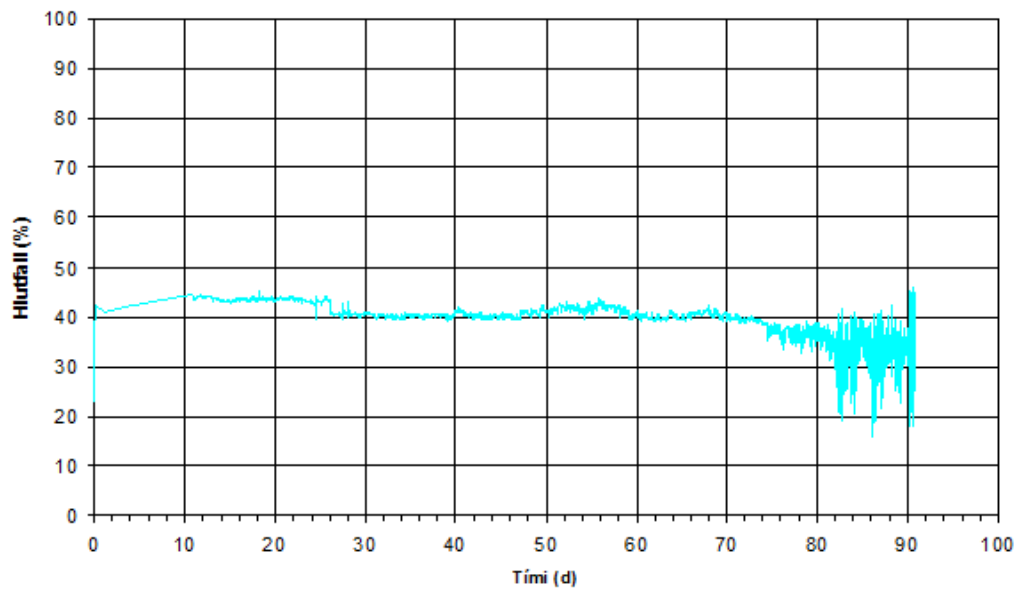
3.3 Þéttivatnsblöndun

Þéttivatni var blandað við skiljuvatnið úr taftönkum og hlutfallið stillt sem næst 40% þéttivatn og 60 % skiljuvatn. Hiti skiljuvatnsins hækkaði á tilraunátímanum og þar með blöndunnar. Hiti þéttvatnsins var um 40 °C og breyttist lítið fyrr en í lokin.



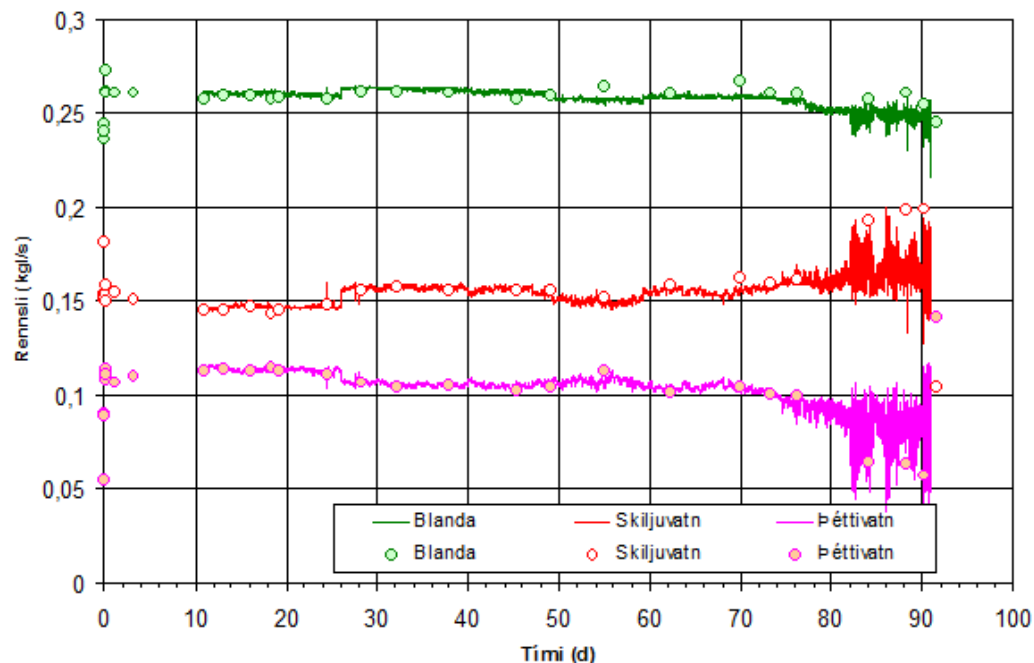
Mynd 12. Hitastig skiljuvatns, þéttivatns og blöndu.

Þéttivatnshlutfallið var um og yfir 40% framan af tilraunátímanum en í lokin fór að bera á kælivatnsskorti og rennslistruflunum sem höfðu áhrif á hlutfallið sem lækkað niður fyrir 40%.



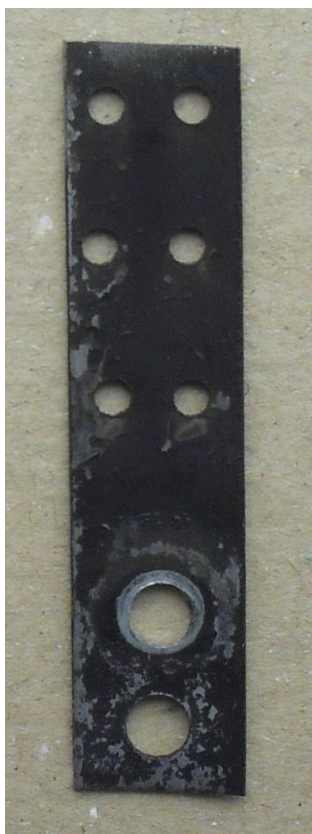
Mynd 13. Þéttivatnshlutfall.

Heildarrennsli blöndunnar var mælt og hlutfallið reiknað út frá hitastigi skiljuvatns, þéttivatns og blöndu. Rennsli blöndunnar var stöðugt allan tíman. Í lokin urðu þó miklar truflanir í þéttivatnsrennsli. Svo virðist sem að kælivatn hafi minnkað, t.d. vegna sumarálags á vatnsveitu.



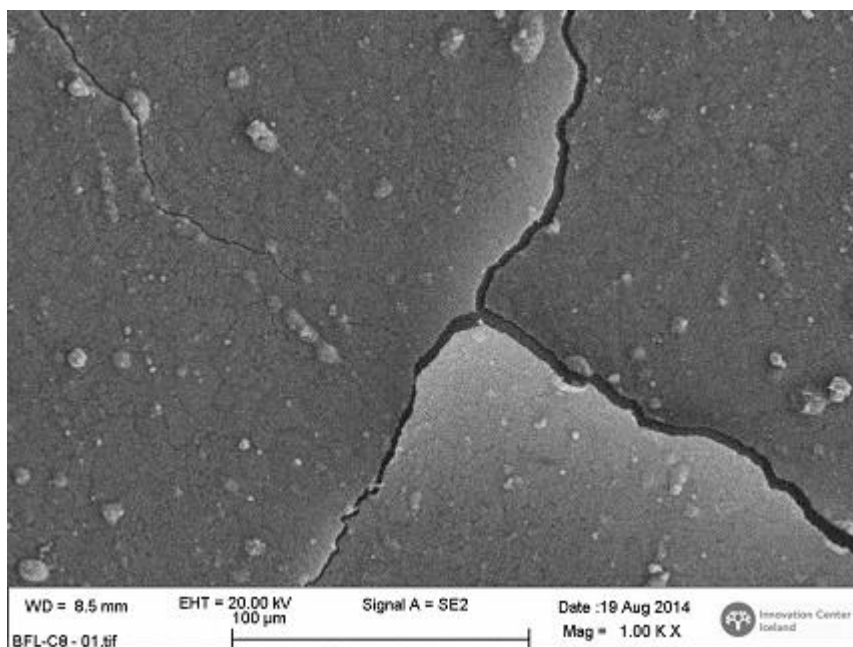
Mynd 14. Rennsli skiljuvatns, þéttivatns og blöndu.

Útfellingaplata í blöndu skiljuvatns og þéttivatns var dökk (Mynd 15). Þyngdaraukning var óveruleg, eða 0,8 mg á 90 dögum.



Mynd 15. Plata C8 í röri strax eftir blöndun.

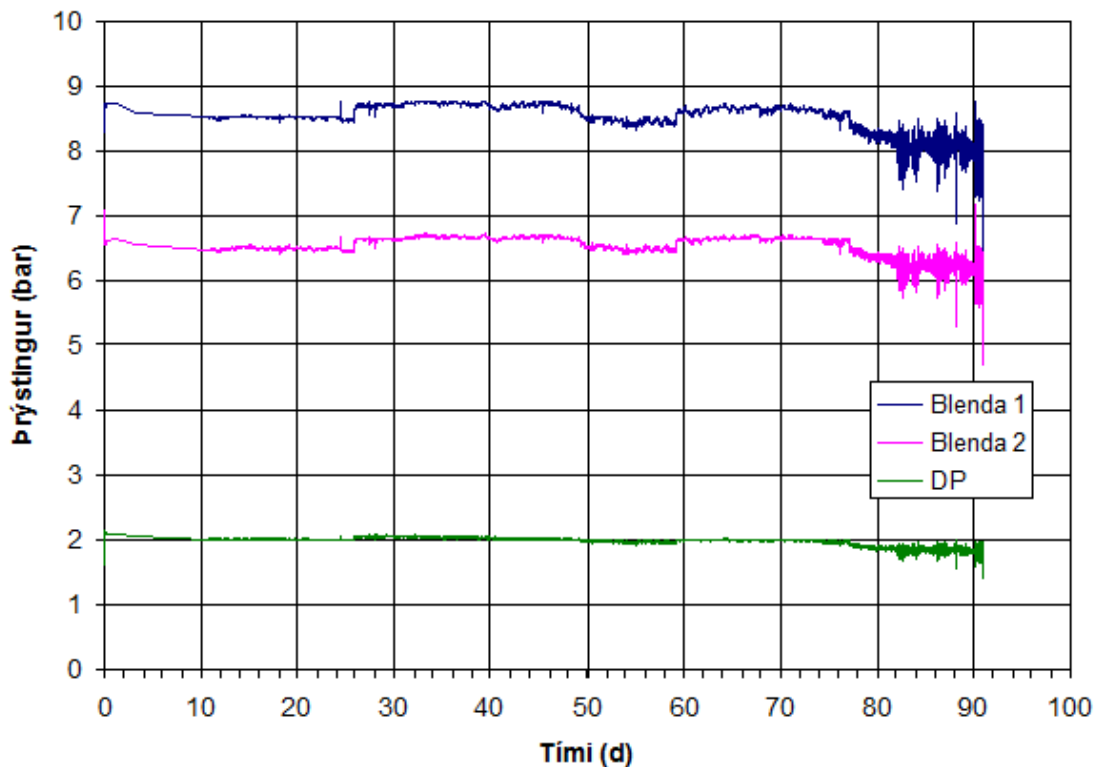
Efnagreining sýndi að þar var um að ræða þunnt lag úr koparsúlfíði, járnsúlfíði og arsensúlfíði (Mynd 16).



Mynd 16. Útfelling á plötu C8 strax eftir blöndun.

Útfellingarlag (45% Cu₂S, 43% FeS, 12% As₂S₃).

Eftir blöndun streymdi vökvinn í gegnum blenduhlöðu með 8 blendum með 7 mm götum. Þrýstifall yfir blendurnar var um 2 bar og lækkaði lítilsháttar á tilraunatímanum (Mynd 17). Þrýstibreyting sýndi því engin merki um útfellingu því útfelling hefði aukið þrýstifallið.

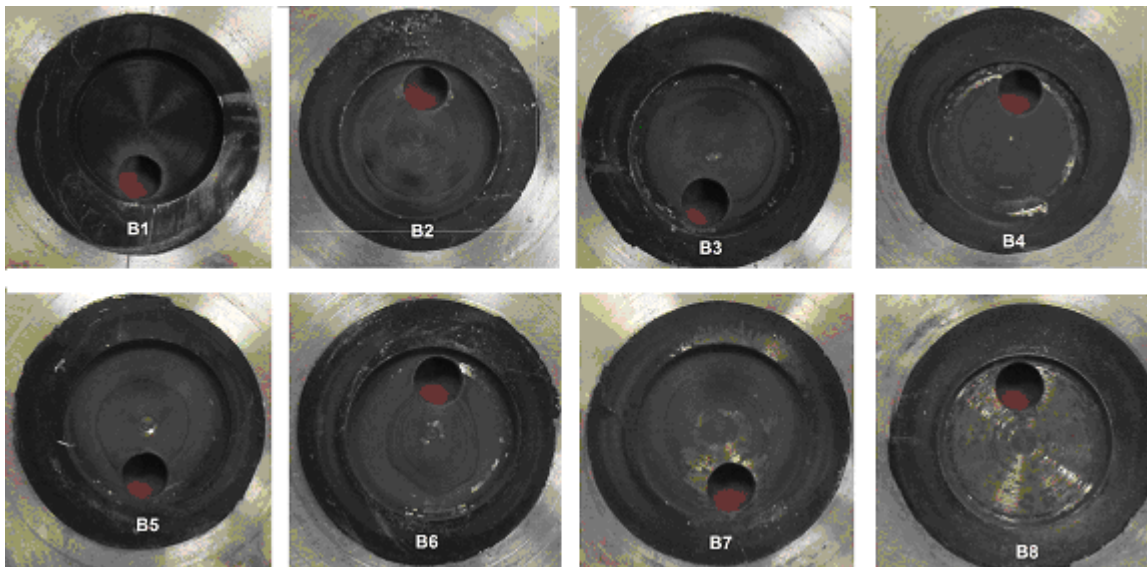


Mynd 17. Þrýstingur fyrir framan og aftan blenduhlöðu.

Blendurnar voru vigtaðar fyrir og eftir tilraun (Tafla 3) og myndaðar (Mynd 18). Merkja mátti lítilsháttar útfellingu við gat á fyrstu og annarri blendu, sem stafar væntanlega af meiri rennslisraða við gatið. Svört þunn skán var á öllum blendum en þyngdaraukning var óveruleg og staðfestir tilraunin að fjölliðun kísilsins og þyning með þéttivatni hægir verulega á eða stöðvar útfellinguna.

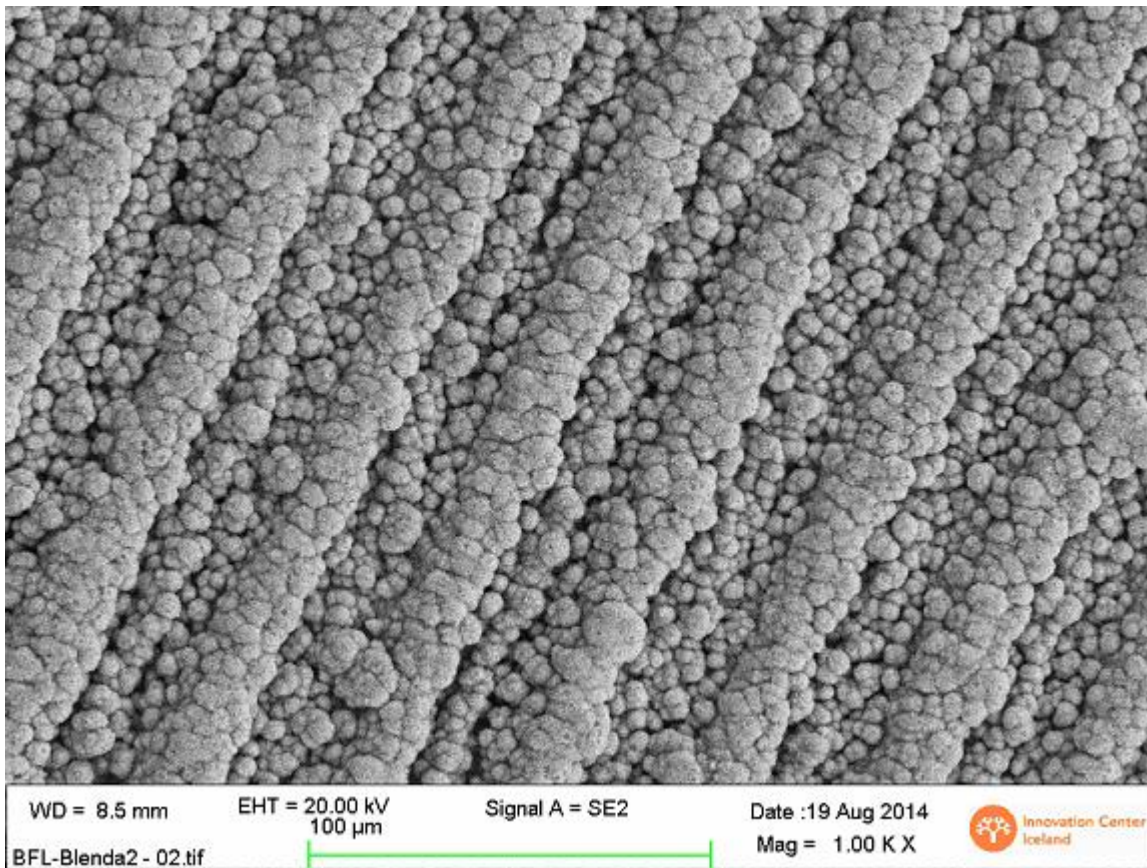
Tafla 3 Útfellingarhraði á blendur.

Blenda nr.	Skeljun kg/m ² /y	Skeljun mm/y	Ath
S1	0,2	0,1	Svört skán á öllu yfirborði.
S2	0,0	0,0	Svört skán á öllu yfirborði.
S3	0,2	0,1	Svört skán á öllu yfirborði
S4	0,2	0,1	Svört skán á öllu yfirborði
S5	0,0	0,0	Svört skán á öllu yfirborði
S6	0,3	0,2	Svört skán á öllu yfirborði
S7	0,2	0,1	Svört skán á öllu yfirborði
S8	0,0	0,0	Svört skán á öllu yfirborði



Mynd 18. Blendur eftir 91 dag.

Dökkt lag á blendunum var úr koparsúlfíði, járnsúlfíði og arsensúlfíði.



Mynd 19. Útfelling á blendu B2.

Útfellingarlag (47% Cu_2S , 43% FeS , 10% As_2S_3).

4 Helstu niðurstöður

4.1 Varmaskiptir

Útfelling í varmaskipti reyndist mun meiri en í fyrri tilraunum. Mögulega vegna minni rennslis hraða eða breyttrar og lengri lagnaleiðar frá skiljustöð að varmaskipti.

Varmaflutningsstuðullinn lækkaði um 0,22 % á dag í tilrauninni en 0,14% þegar rennslið var næstum helmingi hraðara í fyrri tilraun.

4.2 Fjölliðunartankar

Styrkur einliðaðs kísils minnkaði að jafnaði úr 780 í 480 mg/kg á 33 mínútum. Miklar sveiflur mældust á kísilstyrk í skiljuvatni frá skiljustöðinni.

Enginn kísill féll á yfirborð platna í tönkum en nokkur kísill féll á plötur sem voru í hraðara streymi í rörum milli þeirra. Útfellingarhraðinn var mestur í röri milli fyrsta og annars tanks en minnkaði síðan, sem sýnir að fjölliðun ein sér minnkar kísilútfellingarhraðann.

4.3 Þéttivatnsþynning

Útfelling á plötu og blendur eftir um 40% þynningu skiljuvatnsins með þéttivatni var hverfandi. Þunnt lag úr járn og koparsúlfíði ásamt arsensúlfíði myndaðist á plötu og blendum en þykktin var aðeins örfáir μm . Það ætti því ekki að hafa áhrif á niðurdælingarhæfni vökvans. Tilraunin staðfestir að fjölliðun kísilsins og þynning með þéttivatni hægir verulega á eða stöðvar útfellinguna og gerir vökvan hæfan til niðurdælingar.

5 Heimildir

Trausti Hauksson 2013. Minnisblað um prófun skiljuvatns í Bjarnarflagi, 25. september 2013, 15 s.

Trausti Hauksson 2012. Bjarnarflagsvirkjun, Prófun skiljuvatns. Landsvirkjun, skýrsla nr. LV2012/107. Nóvember 2012, 14 s.

Trausti Hauksson 2011. Bjarnarflagsvirkjun. Vinnslueiginleikar gufu og vatns úr borholum. Skýrsla nr. LV-2011/063. April 2011, 27 s.



Landsvirkjun

Háaleitisbraut 68
103 Reykjavík
landsvirkjun.is

landsvirkjun@lv.is
Sími: 515 90 00

