



ORKUSTOFNUN

Um aflmælingar á gufuborholum

Halldór Ármansson, Benedikt Steingrímsson

Greinargerð HÁ-BS-99-01

UM AFLMÆLINGAR Á GUFUBORHOLUM

1. Inngangur

Á fundi um Kröflumál 30. október 1998 kom til tals að eftirlit með afli borholna þyrfti að vera tíðara en nú er. Til þess að slíkt sé raunhæft þarf að finna hentugar mæliaðferðir. Þessi greinargerð segir frá heimildakönnun um aflmælingar gufuborholna.

2. Saga

Sveinbjörn Björnsson og Sigurður Benediktsson (1968) tóku saman ítarlegt yfirlit um aflmælingar á gufuholum og lýstu prófunum á mörgum aðferðum. Til að ákvarða afl gufuborholna þarf að mæla tvær stærðir og töldu þeir eftirfarandi stærðir koma til greina: innstremmishita vökvafasa í holu, heildarrennsli inn í holu, vökvarennslí í útstremmisæð, gufurennslí í útstremmisæð, hlut gufu í heildarrennsli, vermi og krítískan þrýsting í útstremmisopi. Eftir umfjöllun um helstu aðferðir til mælingar þessara stærða mæltu þeir með að við aflmælingar yrðu að jafnaði notaðar mælingar á krítiskum þrýstingi í útstremmisopi (James, 1962), gasaðferð, sem felst í að mæla gasstyrk gufu við mismunandi þrýsting (James, 1964) og vatnsaðferð sem er hliðstæð gasaðferðinni nema mældur er styrkur órokjarns efnis í vökvafasa við mismunandi þrýsting.

Sú hefur orðið raunin á að algengasta aðferð við aflmælingar gufuborholna hér á landi er mæling á krítiskum þrýstingi í útstremmisopi og á vökvarennslí í útstremmisæð, oftast rennsli frá hljóðdeyfi sem notaður er sem skilja við 1 bar a þrýsting. Einnig hefur mælingum á þrýstifalli yfir blendu (James, 1966) tölувart verið beitt.

Einar Gunnlaugsson og Gestur Gíslason (1991) gerðu samanburð á aðferðum til aflmælinga á gufuborholum. Notuðu þeir mælingu á krítiskum stút í útstremmisopi, mælingu á vökvarennslí um hljóðdeyfi, mælingu með hljóðhraðamæli ("sonic meter") á vökvarennslí, mælingu með lúguloksmæli ("trap door meter") á gufurennslí og beinar mælingar á vökvarennslí eftir skiljun og gufurennslí eftir skiljun og þettingu. Niðurstaða þeirra varð sú að mæling vökvarennslis um hljóðdeyfi gefur iðulega of lág gildi og þar með of há gildi fyrir vermi, sérstaklega fyrir aflmiklar holur, en öðrum aðferðum bar þokkalega saman. Niðurstöðum mælinga með lúguloksmælum á Nesjavöllum hefur borið vel saman við niðurstöður annarra mælinga en síðan hefur komið í ljós að lúguloksmælar eru bilanagjarnir og þola illa álag. Er Hitaveita Reykjavíkur að athuga aðra kosti svo sem að nota mælingar á þrýstifalli yfir blendu og mælingu á vökvarennslí með hljóðhraðamæli til aflmælinga gufuborholna (Gestur Gíslason, persónulegar upplýsingar). Rétt er að hafa í huga að verið er að mæla samanlagt rennsli nokkurra holna en ekki einstakra holna þegar rennsismælingar eru gerðar í skiljustöð.

"Annubar" aðferð til mælinga á gufurennslí hefur verið prófuð í Svartsengi og gefið góða raun. Bar niðurstöðum vel saman við niðurstöður mælinga á krítiskum þrýstingi í

útstreymisopi, en veikasti hlekkur aflmælingarinnar reyndist mæling á vatnsrennsli í mælikari vegna sveiflu í vatnsmagni (Grímur Björnsson o. fl. 1998). Í ráði er að taka annubar aðferð til gufumælinga upp við reglulegt eftirlit í Svartsengi og nota segulmælingar til að mæla vatnsrennsli (Sverrir Þórhallsson, persónulegar upplýsingar). Til þess að fá góða nákvæmni við slíkar mælingar þarf að beina rennsli frá veitu og gegnum skilju. Hins vegar er líklegt að viðunandi nákvæmni megi ná með því að mæla gufurennslu með annubar í tvífasa síðan, sem blandan hefur runnið um nokkra vegalengd og vatnsfasinn lagst á botn pípunnar (Sverrir Þórhallsson, persónulegar upplýsingar).

Mæling á þrýstifalli yfir blendu er sennilega hvað nákvæmust þeirra aðferða sem hér hafa verið ræddar en mæling á krítiskum þrýstingi hefur líka gefið góða raun hér á landi. Sá galli er þó á þeim að beina þarf rennsli holna frá gufuveitu á meðan mælingarnar eru gerðar. Rennsli þarf síðan að jafna sig í töluverðan tíma áður en mælingin er gerð. Ef mælingar eru gerðar með löngu millibili ($>1/2$ ár) getur rennsli þurft að vera utan veitu í 1-2 daga en ef oft er mælt geta nokkrar klukkustundir nægt. Þessar mælingar eru því umtalsverðar aðgerðir og einnig tapast gufa sem annars hefði verið notuð við rekstur virkjunar.

Meðal þeirra aðferða sem þeir Sveinbjörn Björnsson og Sigurður Benediktsson (1968) fjalla um eru svonefnar þynningaraðferðir. Er þá þekktu magni af óhvarfgjörnu efni bætt í við holutopp og sýni síðan tekið af renninu í það mikilli fjarlægð að marktæk blöndun hafi átt sér stað. Getur hvort sem er verið um órokgjarni efni að ræða sem þá er mælt í vökvafasa eða rokgjarni efni (gas) sem mælt er í gufufasa. Lýstu þeir tilraunum sem gerðar voru með NaCl sem mælt var í vatnsfasa og Ar sem mælt var í gufufasa. Töldu þeir tilraunirnar hafa gefið góða raun, aðferðin krefðist ekki mikils tækjabúnaðar, en sé hins vegar margbrotin og viðkvæm fyrir truflunum auk þess sem hún krefðist 4 manna í framkvæmd. Þá minntu þeir á að klóríð væri mjög oft aðalefni í jarðhitavökva og því líklegt að notkun NaCl dygði ekki alls staðar vegna hárra grunngilda klóríðs. Þeir geta þess hins vegar að notkun MgSO₄ þar sem styrkur Mg var mældur hafi ekki gengið vel á Nýja Sjálundi. Það er ekki óeðlilegt þar sem súlfat og magnesíum mynda sterkt komplex sem truflar gjarna Mg-mælingar auk þess sem hætta er á Mg-silikatútfellingum. Einig telja Hirtz o.fl. (1993) hættu á MgCO₃ útfellingum. Þá fjalla þeir Sveinbjörn og Sigurður um blöndun og komast að raun um að í meira en 3 m fjarlægð frá innspýtingarstað leggist rennið í lagstreymi en á fyrstu metrum eftir innspýtingu sé vatn og gufa vel blandað. Hins vegar þarf efnið að blandast vel við vatnið og niðurstaða þeirra var að best væri að safna u.h.b. 1.5 m frá innspýtingarstað.

3. Erlend reynsla

Um og eftir 1990 hefur mjög boríð á því að forsvarsmenn virkjana hafi verið óánægðir með að nota til aflmælinga á gufuborholum aðferðir sem fela í sér að taka gufurennslu frá holunum af gufuveitu. Eru einkum greindar tvær ástæður, þ.e. truflun á vinnslu og umhverfisáhrif þar sem gasi (einkum H₂S) er hleypt út í loftið framhjá hreinsitækjum og fer þá óleyfilegt magn þess til andrúmslofts. Til þess að komast hjá slíku hafa verið gerðar töluverðar prófanir á öðrum aðferðum og hefur athyglan einkum beinst að þynningaraðferðum.

Í töflu 1 er yfirlit um helstu þynningaraðferðir sem notaðar hafa verið og kostir þeirra og gallar raktir. Fleiri möguleikar hafa verið nefndir og í raun ætti að vera unnt að nota

öll þau efni sem duga sem ferilefni í jarðhitakerfum og má nefna geislavirk efni, t.d. ^{125}I , ^{131}I og ^{133}Xe , önnur flúrljómunarefni t.d. ródamín, naftalensúlfónöt og amínóstaðgengin naftalensúlfónöt, og stöðug efni t.d KI og R13 (CClF_3), (t.d. Beall o. fl., 1994; Bixley o. fl. 1995; Akin og Okandan, 1997 og Rose og McPherson, 1997) en ekki voru tiltækar í svipinn heimildir um notkun þeirra til aflmælinga.

Varðandi framkvæmd hafa þættir eins og hraði innspýtingar og blöndunar verið kannaðir nokkuð. Í ljós hefur komið að misbrestur vill verða á því að blöndun verði marktæk ef fjarlægð frá innspýtingarstað að söfnunarstað er minni en 20 m en mjög góð blöndun fæst með 140-150 m fjarlægð (Hirtz og Lovekin, 1995). Sato o. fl. (1996) töldu sig hafa fengið marktækur niðurstöður í 12 m fjarlægð frá innspýtingarstað. Telja Hirtz og Lovekin (1995) ekki ástæðu til að hafa áhyggjur af lagstreymi ef safnað er marktækum sýnum af bæði gufu og vökva og niðurstöðum beggja ber saman um rennsli. Er sú niðurstaða mjög ólík niðurstöðu Sveinbjarnar Björnssonar og Sigurðar Benediktssonar (1968) (sjá ofar).

Hirtz o.fl. (1993) hafa rakið sögu aflmælinga á Coso svæðinu og er hún nokkuð dæmigerð. Fyrst voru skiljur við hverja holu og notaðar blendumælingar. Þær þóttu viðamiklar og var horfið að því að nota mælingar á krítiskum þrýstingi að hætti Russel-James ásamt vatnsrennsli um hljóðdeyfi. Þrennt var þeim fundið til foráttu, þ.e. framleiðslutap við að taka holur af veitu, truflun á rennsli annarra holna við þá breytingu, og of mikil losun H_2S til lofts miðað við mengunarreglur þegar rennsli var beint til hljóðdeyfis. Þá var tekin upp gasaðferð og gekk hún vel í fyrstu en eftir nokkurn tíma hafði toppþrýstingur flestra holna dvínað það mikið að ekki var unnt að fella þrýsting nægilega mikið áður en gufa færi til veitu til þess að unnt væri að fá marktækan þrýstimun fyrir gufusýnin. Þá var horfið að krítiskum stút aftur en loks voru gerðar víðtækur prófanir á þynningaraðferðum og hafa þær nú verið teknar upp til almenns eftirlits. Einnig var prófuð þrýstings-hita flæðimæling (Kaspereit, 1990) og þótti hún gefa góða raun ef einfasa vatnsrennsli var inn í holu en síðri ef innrennsli í holu var tvífasa.

4. Hugsanlegar aðgerðir í Kröflu

Sá möguleiki sem virðist einfaldastur í framkvæmd fyrir vökvafasa er notkun magnesíumsalts, t.d. magnesíumklóríðs. Í Kröfluvirkjun er til logaljósmælir sem nýta mætti til magnesíummælinga og magnesíumstyrkur er mjög lágor í Kröfluholum. Hugsanlegum súlfattruflunum má eyða t.d. með íbót lanþansambands. Hins vegar þarf að huga mjög grannt hugsanlegri myndun Mg-silikatútfellinga. Trausti Hauksson og Sverrir Þórhallsson (1993) fundu t.d. að slíkar útfellingar verða firna fljótt við ákveðnar aðstæður. Finnist merki um þær er aðferðin gagnslaus. Þær aðferðir aðrar við vökvafasa sem heppilegar hafa reynst eru viðbót natriúmbrómíðs og natríumbensóats. Sterklega kemur til greina að koma upp jónagreini á staðnum og fylgjast með styrk annars hvors eða beggja þessara efna. E.t.v. mætti nota flúrljómunarefni, t.d. flúorósín, með til að hægt sé að ganga úr skugga um að blöndun hafi farið fram þegar sýni er tekið. Af gasaðferðum er Ar-mæling e.t.v. hentugust þar sem hún er tiltæk, þó að e-a þróunarvinnu væri æskilegt að vinna, en N_2 -mæling hentar sennilega ekki þar sem umtalsverður N_2 -styrkur er í gufu sumra Kröfluholna. Varðandi gufuaðferðir hefur komið fram að öruggstu aðferðir eru þær þar sem viðbótarefnið er vökti sem skilst frá með gufunni, t.d. ísóprópanól. Þá verður fullkomin blöndun (Agamata-Lu 1998). Vel

Tafla 1. Helstu þynningaraðferðir

Viðbótar-efni	Greiningaraðferðir	Fasi	Kostir	Gallar	Heim-ildir
NaCl (Cl ⁻)	Jónaskilja	Vökvi	Þægileg tiltæk aðferð, mætti setja upp á staðnum	Há grunngildi víða	(1)
MgCl ₂ / MgSO ₄ (Mg ⁺²)	Atómísog, logaljósmaeling, spantengt plasma, jónaskilja	Vökvi	Úrval hentugra aðferða, sumar þægilegt að setja upp á staðnum	Mg-SO ₄ komplex, Mg-silikat-eða karbónatútfellingar geta truflað	(1, 2, 4)
KF (F ⁻)	Jónaskilja, valskaut	Vökvi	Þægilegar aðferðir, auðvelt að setja upp á staðnum	Fremur há grunngildi, efni fremur dýrt	(3)
NaBr (Br ⁻)	Jónaskilja	Vökvi	Þægileg tiltæk aðferð, mætti vel setja upp á staðnum	Sums staðar há grunngildi	(3, 4)
Na-bensóat (bensóat)	Jónaskilja, Hágæða vökvaskilja	Vökvi	Önnur aðferðin hentug og má setja upp á staðnum	Aðferð ekki notuð í rútinu hingað til, þarfnað þróunarvinnu	(2, 5)
Na-flúorósín (flúorósín)	Flúrljómunarmælir	Vökvi	Þægileg tiltæk aðferð, auðvelt að setja upp á staðnum	Efni spillist við háan hita og ÚF-geisla	(2)
Íso-própanól	Gasskilja	Vökvi, gufa	Góð, örugg aðferð	EKKI til súlur hér. Tæki ekki verulega hentugt til uppsetningar á staðnum. Eyðist við >240°C	(4, 6))
Ar	Gasskilja	Gufa	Góð örugg, tiltæk aðferð	Tæki ekki verulega hentugt til uppsetningar á staðnum. Einhver þróunarvinna æskileg til einföldunar aðferðar	(1)
N ₂	Gasskilja	Gufa	Góð örugg, tiltæk aðferð	Tæki ekki verulega hentugt til uppsetningar á staðnum. Hætta á háum grunngildum	(4)
SF ₆	Gasskilja með rafeindagleypinema	Gufa	Mjög örugg og næm aðferð	Tæki ekki innan seilingar	(2, 5)
C ₃ H ₈	Gasskilja	Gufa	Góð, örugg aðferð	EKKI til súlur hér. Tæki ekki verulega hentugt til uppsetningar á staðnum	(3)

(1) Sveinbjörn Björnsson og Sigurður Benediktsson 1969, (2) Macambac et al. 1998, (3) Hirtz og Lovekin 1995, (4) Agamata-Lu 1998, (5) Magadoro 1998, (6) Adams 1995

gæti komið til greina að þróa slíka aðferð en setja þyrfti upp gasskilju með heppilegum súlum. Adams (1990) telur ísóprópanól illa fallið til jarðhitankunar þar sem það klofni og eyðist auðveldlega. Telur hann beinkeðjualkóhól mun betur fallin til slíkra nota.

5. Heimildir

Adams, M.C. 1995: Vapor, liquid and two-phase tracers for geothermal systems. World Geothermal Congress (Editors Barbier, E., Frye, G., Iglesias, E. og Pálmasón, G.), Florence, Italy, 1875-1880.

Agamata-Lu, C.S. 1998: Chemical tracer applications at the Broadlands-Ohaaki and Wairakei geothermal fields. Proc. 19th Annual PNOC EDC Geothermal Conference, 137-151.

Akin, S. og Okandan, E. 1997: Geothermal reservoir characteristics by tracer and well testing. Geoth. Res. Counc. Trans., 21, 561-567.

Beall, J.J., Adams, M.C. and Hirtz, P.N. 1994: R-13 tracking of injection in The Geysers. Geoth. Res. Counc. Trans., 18, 151-159.

Bixley, P.F., Glover, R.B., McCabe, W.J., Barry, B.J. og Jordan, J.T. 1995: Tracer calibration tests at Wairakei geothermal field. World Geothermal Congress (Editors Barbier, E., Frye, G., Iglesias, E. og Pálmasón, G.), Florence, Italy, 1887-1891.

Einar Gunnlaugsson og Gestur Gíslason 1991: Nesjavellir. Athugun á afköstum gufuborhola í júní 1991. Hitaveita Reykjavíkur-Efnafræðistofa EG/GG-04, 4s.

Grímur Björnsson, Jón Örn Bjarnason og Sigvaldi Thordarson 1998: Aflmælingar á borholum í Svartsengi og Eldvörpum árin 1996 og 1997. Orkustofnun OS-98008, 68 s.

Hirtz, P. og Lovikin, J. 1995: Tracer dilution measurements for two-phase geothermal production: Comparative testing and operating experience. World Geothermal Congress (Editors Barbier, E., Frye, G., Iglesias, E. og Pálmasón, G.), Florence, Italy, 1881-1886.

Hirtz, P., Lovekin, J., Copp, J., Buck, C. and Adams, M. 1993: Enthalpy and mass flowrate measurements for two-phase geothermal production by tracer dilution techniques. Proc. 18th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford university, Stanford, California, SGP-TR-145, 17-27.

James, R. 1962: Steam-water critical flow through pipes. Proc. Inst. Mech. Eng. London, 176, 741-745.

James, R. 1964: Alternative methods of determining enthalpy and mass flow. Proc. U.N. Conf. on new sources of energy, 2, 265-268.

James, R. 1966: Metering of steam-water two-phase flow by sharp-edged orifices. Proc. Inst. Mech. Eng. London, 180, 549-572.

Magadaro, M.C. 1998: Sodium benzoate analysis for on-line brine flow measurements. Proc. 19th Annual PNOC EDC Geothermal Conference, 169-176.

Macamb, R.V., Salazar, A.T.N., Villa, R.R., Alcober, E.H., Magadaro, M.C., Hirtz, P. og Kunzman, R. 1998: Field-wide application of chemical tracers for mass flow measurements in Philippine geothermal fields. Proc. 19th Annual PNOC EDC Geothermal Conference, 153-159.

Rose, P.E. og McPherson, P.A. 1997: New fluorescent tracers for use in geothermal reservoirs. Geoth. Res. Counc. Trans., 21, 249-253.

Sato, T., Osato, K. Hirtz, P. Kunzman, R. og Futagoishi, M. 1996: Two-phase measurement by chemical tracer technique for Uenotai geothermal field in Japan. Geoth. Res. Counc. Trans., 20, 845-850.

Sveinbjörn Björnsson og Sigurður Benediktsson 1968: Greinargerð um afslmælingar á gufuholum. Orkustofnun, 15 bls.

Trausti Hauksson og Sverrir Þórhallsson 1993: Útfellingar magnesíum-silíkata. Áhrif sýrustigs og hitastigs á útfellingu magnesíum-silíkata úr hitaveituvatni. Orkustofnun OS-93014/JHD-04, 52 s.