

GREINARGERÐ UM AFLMÆLINGAR Á GUFUHOLUM

Eftir

Sveinbjörn Björnsson, jarðhitadeild
og
Sigurð Benediktsson, Vermi s.f.

ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

GREINARGERÐ UM AFLMÆLINGAR Á GUFUHOLUM

Eftir

Sveinbjörn Björnsson, jarðhitadeild

og

Sigurð Benediktsson, Vermi s.f.

Reykjavík, júní 1968

GREINARGERÐ UM AFLMÆLINGAR Á GUFUHOLUM

AGRIP

Til þess að ákvarða afl gufuhola þarf að mæla tvær óháðar stærðir. Í þessari greinargerð er lýst helztu mæliaðferðum, sem til álita koma, og gerð grein fyrir kostum þeirra og göllum. Lagt er til, að við aflmælingar verði að jafnaði notaðar mæling á kritiskum þrýstingi í útstreymisopi (2.7) og mæling á enthalpy með gasaðferð (2.6.1) og vatnsaðferð (2.6.2). Þeim til stuðnings ætti svo að áætla innstreymishita vatns út frá hitamælingu í holu. Ef aðstæður eru hagstæðar ættu þessar mælingar að nægja til að ákvarða afl gufuhola með um 3% nákvæmni. Lagt er til, að allar holur, sem árangur gefa, verði afhentar eigendum með T-stykki á aðalloka, og er gerð þess sýnd á Mynd 10. Yrði þá hægt að staðla útbúnað til aflmælinga eins og sýnt er á Mynd 6.

EFNI

	Bls.
1 INNGANGUR	1
1.1 Streymisgerð	1
2 MÆLIADFERÐIR	2
2.1 Mæling á innstreymishita, T_B	2
2.2 Mæling á heildarrennsli, M	3
2.3 Mæling á vatnsrennsli, M_v	3
2.3.1 Bein mæling á vatnsrennsli	
2.3.2 Þynningaraðferðir	
2.4 Mæling á gufurennsli, M_g	6
2.4.1 Bein mæling á gufurennsli	
2.4.2 Þynningaraðferðir	
2.5 Mæling á þurrstigi, þ.e. hlut gufu í heildarrennsli, $X=M_g/M$	8
2.5.1 Mæling með betageislun	
2.5.2 Mæling með varmamæli	
2.6 Mæling á enthalpy, h	8
2.6.1 Gasaðferð	9
2.6.2 Vatnsaðferð	
2.6.3 Þrýstifall yfir blendu	
2.7 Mæling á kritiskum þrýstingi í útstreymisopi, P_c	11
3 TILLAGA UM STÖÐLUN RENNSLISMÆLINGA	13
4 HEIMILDIR	16

1. INNGANGUR

Í þessari greinargerð er lýst helztu aðferðum, sem beitt hefur verið til aflmælinga í sjóðandi borholum hér á landi og víðar. Erfitt hefur reynzt að finna örugga og hentuga aðferð, en nú virðast þó fram komnar nokkrar mæliaðferðir, sem beita má með nægilegu öryggi (5%) og tiltölulega litlum kostnaði.

1.1 Streymisgerð

Við val aðferðar til aflmælinga þarf nokkra þekkingu á streymisgerð. Inn í holur streymir yfirleitt blanda af gufu og vatni eða vatn eingöngu. Vatnið sýður á upp leið, og eykst gufan á kostnað vatnsins, eftir því sem þrýstingur lækkar og nær dregur útstreymisopi. Hiti blöndunnar og hlutfall vatns og gufu eru fyrst og fremst háð þeim þrýstingi, sem í blöndunni ríkir. Gerð blöndunnar í útstreymisæð fer mjög eftir hlutfalli vatns og gufu, en almennt er talið, að greina megi gerð hennar í eftirfarandi flokka:

- 1) Bólustreymi. Gufan myndar bólur í vatninu.
- 2) Lagstreymi. Í láréttum útstreymisæðum leggst lag af vatni á botn pípunnar en gufa streymir yfir.
- 3) Bylgjustreymi. Vatn kemur í bylgjum og fyllir þversnið pípunnar, en þess á milli streymir gufa.
- 4) Kápastreymi. Vatnið myndar kápu innan á pípu um gufustrauminn, sem flytur nokkuð af vatnsdropum.
- 5) Dropastreymi. Vatn er eingöngu í dropum, sem berast með gufu.

Gerð streymis getur breytzt, ef blandan fer gegnum þrengingar eða beygjur í útstreymisæð. Breytingum á streymisgerð fylgja breytingar á þrýstifalli og þar með snöggar breytingar á hlutfalli vatns og gufu. Í lagstreymi, kápastreymi og dropastreymi er hraði gufu yfirleitt meiri en vatns, og í mjög hröðu streymi er ekki tryggt, að gufa og vatn í sama þversniði séu í varmafræðilegu jafnvægi. Gæti gufan þá verið kaldari en vatnið.

Ef rennsli er mikið miðað við vídd æðar, getur blandan náð hljóðhraða sínum í útstreymisopi. Sé rennslið enn aukið, verður útstreymishraði aldrei meiri en hljóðhraði en þéttleiki blöndunnar vex með vaxandi rennsli. Þrýstingur blöndu við útstreymisop fer einnig vaxandi og verður snögg þrýstifall, þegar blandan kemur út úr æðinni. Myndast þar gufuskúfur (paraboloid) vegna snöggrar þenslu. Ennfremur berast höggbylgjur frá útstreymisopi. Þrýstingur í útstreymisopi, eftir að blandan hefur náð hljóðhraða, er nefndur kritiskur þrýstingur og ræður hann þrýstifalli í útstreymisæð. Þrýstifallið verður mest yfir þrengsli í æðinni og á síðasta metranum við útstreymisop. (Mynd 1, sjá einnig Böðvarsson 1951)

2 MÆLIADFERÐIR

Til þess að unnt sé að ákvarða afl gufuhola, þarf að mæla tvær stærðir. Til greina kæmi að mæla einhverjar tvær af eftirtöldum stærðum:

- T_B : Innstreymishiti vatns í holu, °C
- M : Heildarrennsli inn í holu, kg/s
- M_V : Vatnsrennsli í útstreymisæð, kg/s
- M_g : Gufurennsli í útstreymisæð, kg/s
- $X = M_g/M$: Hlutur gufu í heildarrennsli, kg/kg
- h : Enthalpy (varmi, sem fylgir massaeyningu blöndu), kcal/kg
- P_C : Kritiskur þrýstingur í útstreymisopi, ata

2.1 Mæling á innstreymishita, T_B

Oft er unnt að áætla innstreymishita eftir hitamælingu í holunni, áður en hún gýs, eða stuttu eftir gos. Ef innstreymið er úr mörgum misheitum æðum, gæti verið æskilegt að mæla hitann í vatninu neðan suðu, meðan holan er í gosi. Hitamæling niður eftir gjósandi borholu gæti einnig gefið mikilvægar upplýsingar um þrýstifall og suðu í holunni. Slíkar mælingar eru framkvæmanlegar en stofna hitamæli í nokkra hættu, og hafa því ekki verið gerðar.

2.2 Mæling á heildarrennsli, M

Til greina kæmi að kæla heildarrennsli holunnar niður fyrir suðu og mæla það síðan með venjulegum vatnsrennsli-aðferðum. Mætti t.d. dæla köldu vatni í útstreymisæð. Þessi aðferð gæti gengið, ef heildarrennslið er minna en 20 kg/s en hún verður tæknilega óframkvæmanleg, ef rennslið er orðið um 100 kg/s af 210°C heitu vatni eins og búast má við í Hveragerði.

2.3 Mæling á vatnsrennsli, M_v

2.3.1 Bein mæling á vatnsrennsli

Heildarrennsli er beint í skilju, sem skilur að vatn og gufu við ákveðinn þrýsting. Vatnið kólnar síðan við suðu í 100°C og er mælt í yfirfallsstokk. Tækjabúnaður er sýndur á Mynd 2. Þessari aðferð var beitt í Hveragerði 1961 og gafst hún ágætlega. (Bodvarsson og Ryley 1966; Einarsson 1964; sjá ennfremur teikningar af tækjum (Fnr. 4108, 4134-37, 4142, 4150-52, 4267-70)). Nákvæmni yfirfallsaðferðar er talin um 1-3% (Marks 1951) ef rennslið er jafnt. Meginókostur þessarar mæliaðferðar er hins vegar, að mæliútbúnaður og skiljur eru mikil fyrirferðar og dýr í smíðum og flutningum. Kæmi vart til greina að beita þessari aðferð, nema um langvarandi mælingar sé að ræða, sem réttlæta verulegan stofnkostnað.

2.3.2 Þynningaraðferðir

Unnt er að mæla vatnsrennslið óbeint með því að þrýsta jöfnu rennsli af einhverju efni, sem eingöngu blandast í vatnsfasa, inn í útstreymisæð og mæla magn þessa efnis í vatnssýni, sem tekið er úr útstreymisæð, eftir að efnið hefur blandast vatninu.

Vatnsrennslið er reiknað samkvæmt formúlunni:

$$M_v = m \frac{c_1 - c_2}{c_2 - c_0}$$

Þar tákna:

- M_V : Vatnsrennsli í holu, þar sem vatnssýni er tekið, kg/s
- m : Massi af legi, sem þrýst er inn á tímaeiningu, kg/s
- C_0 : Magn af efninu í eigin vatni holunnar, g/g
- C_1 : Magn af efninu í legi, g/g
- C_2 : Magn af efninu í vatnssýni eftir blöndun, g/g

Tilraunir voru gerðar með þessa mæliaðferð í Hveragerði á árunum 1965-6 og hafa þær gefið allgóða raun.

Mynd 3 sýnir þann útbúnað, sem notaður var á holu G-8, Hveragerði. Mettuðum saltlegi (26% NaCl, $\rho_{20^\circ\text{C}} = 1,197 \text{ g/cm}^3$) var þrýst með jöfnum hraða inn í útstreymisæð rétt ofan við aðaloka holunnar. Á holunni var T-stykki og um 10 m langt, lárétt útstreymisrör. Þessi útbúnaður er notaður við fleiri mæliaðferðir og töku sýna til efnagreininga, og hefur eftirfarandi lýsing á streymisgerð og sýnatöku því almennara gildi. Ofan aðaloka og á fyrstu metrum eftir T-beygju eru vatn og gufa vel blönduð sökum hvirfla (dropastreymi og kápustreymi) en um 2 m frá T-beygju fer vatnið að leggjast á botn æðarinnar og mynda lagstreymi. Nálægt útstreymisopi eykst hraðinn mjög vegna örs þrýstifalls. Blandan nær hljóðhraða sínum, og gerð streymis virðist vera dropa- eða kápustreymi. Þar sem ekki er tryggt, að í lagstreymi séu vatn og gufa í varmafræðilegu jafnvægi, er æskilegt, að sýni af blöndu séu tekin, áður en lagstreymi myndast, þ.e. ekki lengra en 3 m frá T-beygju. Hins vegar er æskilegt að vera sem lengst frá þeim stað, þar sem saltlegi er þrýst inn til að tryggja sem bezta blöndun saltsins við vatnið. Tilraunir hafa sýnt, að beztar aðstæður til sýnatöku eru um 1,5 m frá T-beygju (Mynd 4). Blöndun salts við vatn holunnar er þar orðin nægilega jöfn og blöndun vatns og gufu er enn svo ör, að þau eru í varmafræðilegu jafnvægi við þann hita, sem þar ríkir. Sýni af blöndu eru tekin með einangraðri skilju, sem tengd er við stúta á útstreymisæð (Mynd 4 og Teikning 14382, Landsmiðjan, Reykjavík). Þegar sýni er dregið úr útstreymisæð, verður að gæta þess,

að hlutfall vatns og gufu raskist ekki, áður en þau eru skilin að. Ef þrýstingur fellur við töku sýnis, gufar hluti vatnsins upp, og saltmagn í vatnssýni verður hlutfallslega of mikið. Ef blandan tapar varma vegna kælingar, áður en vatn og gufa eru skilin að, þéttist hluti gufunnar og þynnir saltmagn í vatnssýni. Það er því mikilvægt, að skilja og leiðslur að henni séu vandlega einöngruð og rennsli um skilju sé stillt þannig, að í henni ríki sami þrýstingur og hiti og í útstreymisæð. Sé þessa gætt, skiptir ekki máli, hvort skiljan dregur til sín gufu og vatn í sama hlutfalli og í útstreymisæð eða ekki. Gufan þarf aðeins að vera mettud. Þá skilur skiljan vatn og gufu að, án þess að magn efna í vatni eða gufu breytist. Við töku vatnssýna er bezt að stilla skiljuna svo, að nokkuð af vatnsdropum fari með gufu. Dregur það úr hættu á þynningu vatnssýnis vegna þéttingar gufu.

Vatnið úr skiljunni er kælt niður fyrir 100°C og því safnað á 4 l flösku. Safnað er samfelld á flöskuna í 3 mínútur til þess að draga úr áhrifum sveifla í blöndun salts og vatns í holu.

Samkvæmt tilraunum á holu G-8 er samkvæmni einstakra mælinga á vatnsmagni með þessari aðferð um 3%. Þar sem engin önnur algild (absolut) mæliaðferð var til samanburðar, er ekki vitað, hve mikill munur er á reiknuðum gildum eftir saltaðferð og raunverulegu vatnsrennsli. Samanburður við aðferð Russel James (2.7) bendir þó til þess, að reiknuð gildi víki að jafnaði minna en 5% frá raunverulegu gildi, en frekari samanburðarmælinga með óskyldum aðferðum er þörf.

Þessi aðferð krefst ekki mikils tækjabúnaðar. Flytja mætti öll tæki á einum flutningabíl og samsetning á mælistað tekur tæpan dag. Aðferðin er hins vegar margbrotin og viðkvæm fyrir truflunum og krefst 4 þjálfaðra manna í framkvæmd.

Ef klóridmagn í vatni holunnar, C_o , er meira en 200 ppm getur munur á C_2 og C_o orðið mjög lítill og valdið verulegri ónákvæmni. Á Nýja-Sjálandi er klórid um 1000-3000 ppm og aðferðin alls ekki nothæf. Í stað klóríds má hins vegar nota önnur efni, sem blandast eingöngu í vatnsfasa. Á Nýja-Sjálandi var notað $MgSO_4$ en það gafst illa. Er skekkju í efnagreiningu um kennt. Einnig mætti nota geislavirk efni, ef það þykir henta.

2.4 Mæling á gufurennslí, M_g

2.4.1 Bein mæling á gufurennslí

Heildarrennslí holunnar er beint í skilju, sem skilur að vatn og gufu. Gufan er leidd um langar, víðar útstreymisæðar, þar sem hún þornar við þenslu. Rennslíð er mælt með ákvörðun þrýstifalls yfir blendu. Þessi aðferð var notuð í Hveragerði 1961 (Mynd 2, sjá einnig beina mælingu á vatnsrennslí 2.3.1). Gufurennslí mældist yfirleitt meira en við var búizt samkvæmt mælingu á vatnsrennslí og þekktum innstreymishita vatnsins. Talið er, að skiljan hafi ekki skilið vatnsdropa nægilega vel frá gufunni og hafi þeir valdið skekkju í mælingu á gufu (Bodvarsson og Ryley, 1966). Með endurbótum á tækjum ætti þó að vera unnt að ráða bót á þessu.

En þessi aðferð hefur sömu ókosti og bein mæling á vatnsrennslí (2.3.1). Stofnkostnaður er mikill og erfitt að flytja tækin.

2.4.2 Þynningaraðferðir

Unnt er að mæla gufurennslíð óbeint með því að þrýsta jöfnu rennslí af einhverju gasi, sem eingöngu blandast í gufufasa inn í útstreymisæð og mæla magn þessa gass í sýni af gufu, sem tekin er úr útstreymisæð, eftir að gasið hefur blandast gufunni. Argon virðist mjög vel fallið til þessara nota. Það gengur ekki í efnasambönd og mjög lítið er af því í gufu á jarðhitasvæðum.

Gufurennislið er reiknað samkvæmt formúlunni:

$$M_g = m_2 \frac{\alpha T_2 V_0}{P_2 T k V}$$

Far tákna:

- M_g : Gufurennisli á mælistað, kg/s (við mældan þrýsting og hita)
 m_2 : Massi þéttivatns, sem flytur með sér V ml af gasi, kg
 α : Þrýstifall á argongeymi, ata/s
 P_2 : 1,033 ata
 T_2 : 293^oK
 T : Hiti á argoni í argongeymi, ^oK
 V_0 : Rúmmál argongeymis, ml
 V : Rúmmál gassýnis, ml (við P_2 og T_2)
 k : Hlutfall rúmmáls af argoni og rúmmáls gassýnis.

Tilraunir voru gerðar með þessa aðferð í Hveragerði á árunum 1965-6 og gáfu þær allgóða raun. Mynd 5 sýnir þann útbúnað, sem notaður var á holu G-8 í Hveragerði. Jöfnu rennsli af argoni var þrýst inn í útstreymisæð rétt ofan við aðaloka. Sýni af gasi og gufu voru tekin á sama hátt og lýst er í saltþynningaraðferð (2.3.2). Sýni eru tekin með varmaeinangraðri skilju, sem vinnur á sama þrýstingi og ríkir í útstreymisæð. Gufan er leidd í grannan vatnskældan kæli (ryðfrítt stálrör, 5 mm innanmál). Þéttivatnið er látið reka allt loft úr gasflösku og henni síðan snúið, þannig að gas safnast í hana, en þéttivatn rennur í gegn. Mælt er rúmmál þéttivatns, sem flytur með sér ákveðið magn af argoni. Hlutfallslegt magn af argoni í gasinu er mælt í "gaschromatograph" á Rannsóknastofnun Iðnaðarins. Yfirleitt þarf ekki að taka tillit til þess argons, sem leysist upp í þéttivatni við söfnun. Söfnunartími fer eftir gasmagni, sem fylgir gufu, en er yfirleitt um 3-5 mín. Til þess að tryggja, að gufan sé mettuð, er skiljan stillt svo, að örlítið af vatnsdropum berst með gufu. Er magn þessa vatns mælt með því að ákvarða klórídmagn í þéttivatni og það síðan dregið frá mældu magni þéttivatns.

Tilraunir með þessa aðferð tókust allvel og virðist hún álíka nákvæm og saltþynningaraðferð og gæti jafnvel reynzt betur, þar sem hátt klórídmagn veldur erfiðleikum í saltaðferð. Samanburði við algildar mæliaðferðir varð ekki komið við í tilraunum í Hveragerði 1965-6, en samanburður við aðferð Russel James (2.7) bendir þó til þess að reiknuð gildi á gufurennisli víki að jafnaði minna en 5% frá raunverulegu gildi. Aðferðin krefst ekki meiri tækja en svo, að þau má flytja í einum jeppa, en er, líkt og saltþynningaraðferð, margbrotin í framkvæmd, viðkvæm fyrir truflunum og krefst 4 manna í framkvæmd.

2.5 Mæling á þurrstigi, þ.e. hlut gufu í heildarrennsli, $X=Mg/M$

2.5.1 Mæling með betageislun. (Belin, et al., 1957, James, 1964)

Þessi aðferð hefur verið notuð á Nýja-Sjálandi.

Blanda af vatni og gufu streymir um þröngt útstreymisop. Betageislara og betateljara er komið fyrir gegnt hvor öðrum í útstreymisopi og þéttleiki blöndunnar reiknaður út frá talningu þeirra geisla, sem komast í teljara. Hlutfall vatns og gufu í útstreymisopi er síðan reiknað út frá þéttleika blöndunnar. Aðferðin er talin gefa um 10% nákvæmni, en virðist lítið notuð.

2.5.2 Mæling með varmamæli

Hugsanlegt væri að hleypa hluta af blöndu inn í einangraða skilju líkt og í saltaðferð (2.3.2) og mæla varma, sem blandan flytur í varmamæli. Þessi aðferð hefur þó þann galla, að aldrei er tryggt að skiljan dragi til sín vatn og gufu í sömu hlutföllum og eru í aðalæð. Af sömu ástæðu er lítið treystandi á mælingu hlutfalls vatns og þéttivatns, sem tekið væri með þessu móti.

2.6 Mæling á enthalpy, h

Við gos í holu má gera ráð fyrir, að uppgufun sé innræn (adiabatísk). Enthalpy blöndunnar minnkar vegna aukningar hreyfiorku, en þó verður hreyfiorkan aldrei meiri en

2% af enthalpy innstreymisblöndu, og má því með nægilegri nálgun gera ráð fyrir, að enthalpy blöndunnar breytist ekkert. Mæling á enthalpy holunnar við einhver skilyrði gerir því kleift að reikna hlutfall gufu og vatns við öll önnur skilyrði.

2.6.1 Gasaðferð

(James 1964, Mahon 1962a, 1962b, 1964, 1965)

Flestar holur flytja töluvert af gasi ásamt vatni og gufu. Helztu gastegundir eru CO_2 , H_2S , H_2 og N_2 . Í byrjun suðu losnar nær allt gasið úr vatnsfasa og fylgir síðan gufunni. Eftir því sem þrýstingur lækkar og gufumagn eykst, lækkar hlutfallslegt magn af gasi í hverri rúmmálseiningu gufu. Ef mælt er, hve mörg mól% eru af einhverri gastegund í gufu á tveimur stöðum við mismunandi þrýsting, er unnt að reikna enthalpy blöndunnar út frá því gufumagni, sem bætzt hefur við vegna þrýstifalls milli mælistaða. Mynd 6 sýnir tækjaútbúnað til sýnatöku. Gassýni eru tekin úr útstreymisæð sitt hvorum megin við loka, sem er stilltur þannig, að þrýstifall milli mælistaða sé minnst 4 ata og helzt yfir 7 ata. Þrýstingur er mældur með nákvæmum þrýstimælum, sem fylltir eru glycerini til þess að draga úr örum sveiflum. Notaðar eru einangraðar skiljur og sýni tekin á sama hátt og í argonaðferð (2.4.2). Bezt er að safna gasi og þéttivatni á lofttæmdar glerflöskur, sem þyrftu helzt að vera 2,5-5 l að stærð. Ef ekki er aðstaða til að lofttæma flöskurnar má fylla þær með þéttivatni og láta gasið síðan reka vatnið úr flöskunni. Vatninu er þá safnað á gasþéttar glerflöskur. Nokkur hluti gassins leysist upp í vatninu og þarf að taka tillit til þess, þegar hlutfall gass og þéttivatns er reiknað. Ennfremur geta vatnsdropar borizt með gufu, en unnt er að leiðrétta mælt rúmmál þéttivatns, ef fundið er Cl^- eða SiO_2 magn í vatni holunnar og þéttivatni. Eftir söfnun þarf að gæta þess vel, að gas, sem er í upplausn, rjúki ekki burtu. Ef mæla á CO_2 , er vissara að binda það með NaOH. Minni hættu er, ef H_2 er mælt, en til þess þarf gaschromatograph. Við útreikninga eru notaðar eftirfarandi stærðir:

- h_0 : Heildarenthalpy blöndu, kcal/kg
 h : enthalpy vatns, kcal/kg
 L : Gufunarvarmi, kcal/kg
 X : Þurrstig gufu, þ.e. hlutur gufu í heildar-
rennsli, kg/kg
 m : Mól% af einhverri gastegund í gufu.

Með góðri nálgun (sbr. 2.6) má gera ráð fyrir, að enthalpy blöndunnar breytist ekki. Þá gilda jöfnurnar

$$h_0 = h_1 + x_1 L_1 = h_2 + x_2 L_2$$

og

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{m_1}{m_2}$$

þar sem 1 og 2 tákna mælistaði.

Gildin á h og L eru lesin úr gufutöflum og hlutfallið m_1/m_2 úr mæliniðurstöðum. Úr jöfnunum eru síðan fundin gildin x_1 og x_2 og heildarenthalpy h_0 reiknuð.

Þessi aðferð mun vera mikið notuð á Nýja-Sjálandi og hefur reynt þar vel. Hún var reynd hér í fyrsta sinn á þessu vori á holu G-8, Hveragerði og holu N-3, Námafjalli og reyndist þá ágætlega. Aðferðin er mjög einföld, þarfnast lítils útbúnaðar og aðeins tveggja manna í framkvæmd. Mælingu er unnt að framkvæma á nokkrum klukkustundum og hana má endurtaka að vild. Aðferðin ætti að reynast öruggari en argonaðferð, þar sem framkvæmdaratriði eru mun færri og ekki háð tíma. Helzti galli aðferðarinnar er, að niðurstöður efnagreininga á gasi fást oft ekki fyrr en eftir nokkra daga. Úr því mætti þó bæta, ef mælingamaður er þjálfaður til efnagreininga á mælistað, t.d. til greiningar á CO_2 .

2.6.2 Vatnsaðferð

Á sama hátt og breyting í hlutfalli gass og gufu er notuð í gasaðferð (2.6.1) til þess að ákvarða enthalpy holu, mætti einnig finna enthalpy með því að mæla aukningu á magni órokgjarnra efna í vatni, eftir því sem

vatnið sýður af sér gufu. Yrðu þá tekin vatnssýni samtímis á tveimur stöðum á sama hátt og lýst er í 2.3.2. Til sýnatöku yrðu notuð sömu tæki og í gasaðferð (2.6.1). Þannig mætti t.d. mæla aukningu á Cl^- , SiO_2 , Na og ýmissa málma, sem greina má með minna en 1% óvissu á "atomic absorption spectrometer". Ætti þessi aðferð að geta orðið enn öruggari og einfaldari en gasaðferð, þar sem lítil hætta er á að vatnssýni spillist í meðförum, en sýni af gasi, sem er bæði í gasfasa og í upplausn í þéttivatni, er mjög vandmeðfarið og ákvörðun gassins nákvæmnisverk. Við útreikninga yrðu notuð sömu tákni og í 2.6.1 og gilda jöfnurnar

$$h_0 = h_1 + x_1 L_1 = h_2 + x_2 L_2$$

og

$$\frac{1 - x_2}{1 - x_1} = \frac{m_1}{m_2}$$

þar sem m_1 og m_2 eru magn þess efnis sem greint er í vatninu (ppm) við þrýsting P_1 og P_2 .

2.6.3 Þrýstifall yfir blöndu

Ef þrýstingur í útstreymisæð er kritiskur, er unnt að finna enthalpy blöndu með mælingu á þrýstifalli yfir blöndu og kritiskum þrýstingi í útstreymisopi samkv. aðferð 2.7. Tækjaútbúnaður er sýndur á Mynd 7. Sjá nánar í James (1966)

Hlutfall þvermáls blöndu og æðar skal vera 0.7–0.85 og þvermál æðar um 8". James hefur reynt aðferðina á blöndu með þurrstigi 1–56%, þrýstingur framan blöndu 5–19 ata, þrýstifall yfir blöndu 15–780 mm Hg og heildarrennsli 35–280 kg/s. Staðsetning og gerð stúta fyrir þrýstismælingu er sýnd á Mynd 7. Enthalpy blöndunnar er reiknuð samkvæmt allflókinni formúlu (James 1966) og er rétt gildi á enthalpy fundið með prófunum (iteration).

2.7 Mæling á kritiskum þrýstingi í útstreymisopi, P_c

(James 1962, 1964)

Ef þrýstingur í útstreymisopi verður kritiskur (sbr. 1.1) er unnt að sýna með tilraunum, að heildarrennsli blöndunnar

er eingöngu háð enthalpy blöndunnar h og kritiskum þrýstingi, P_c í útstreymisopi.

Milli þessara stærða gildir jafnan:

$$\frac{G \cdot h^{1.102}}{P_c^{0.96}} = 371700$$

þar sem

G : Heildarflæði, þ.e. heildarrennsli á flatareiningu þversniðsæðar, $\text{kg/m}^2\text{s}$

h : Heildarenthalpy blöndu, kcal/kg

P_c : Kritiskur þrýstingur í útstreymisopi, ata (mældur í gati $1/4$ " ϕ , miðja gats $1/4$ " frá brún ops)

Samkvæmt þessari formúlu er unnt að reikna heildarrennsli M , ef h og P_c eru þekkt. Þessi jafna er niðurstaða úr tilraunum R. James (1962). Hann notaði útstreymisæðar 3", 6" og 8" í þvermál, enthalpy blöndu var á bilinu 130-670 kcal/kg og kritiskur þrýstingur 1-4,5 ata. Mikilvægt er, að þrýstingurinn sé mældur í gati af rétttri stærð og á réttum stað, því að þrýstifall er mjög ört við útstreymisop, og sé gatið ekki staðsett eins og R. James mælir fyrir um, er þess ekki að vænta, að formúla hans gildi. Ef notaðar eru grennri æðar en 3" mælir R. James með því að þvermál mæligats sé um $1/16$ úr þvermáli æðar og staðsett á hlið aðalæðar í fjarlægð frá brún, sem er jöfn þvermáli mæligats. Þrýstingur er mældur með nákvæmum vökvafylltum mæli, sem tengdur er við gatið með grannri leiðslu og er hafður nálarloki í leiðslunni til að draga úr örum sveiflum.

R. James álitur aðferðina gefa heildarrennsli með um $\pm 3\%$ nákvæmni.

Aðferð þessi hefur verið reynd á G-8, Hveragerði og á N-3, Námafjalli og virðist gefa ágæta raun. Hún er einföldust og öruggust þeirra aðferða, sem enn eru þekktar. Í grein um mælingar á borholum (Bodvarsson and Ryley, 1966) er þessi aðferð borin saman við aðrar aðferðir, sem notaðar eru á borholur í Hveragerði, og falla gildi reiknuð eftir aðferð R. James alllangt frá hinu rétta gildi. Ástæðan mun vera sú,

að við reikninga eru notuð gildi á kritiskum þrýstingi, sem mældur er of langt frá brún og þess vegna mun hærri en vera ætti, ef mælt væri eftir fyrirsögn R. James. Þær þrýstimælingar sem notaðar eru í reikningum, voru gerðar árið 1961, þ.e. áður en aðferð R. James varð kunn. (Á G-8 var keilustútur $10 \frac{3}{16}'' \phi$, mæligat $3 \text{ mm } \phi$, 60 mm frá brún. Á G-6 var keilustútur $6 \frac{3}{4}'' \phi$, mæligat $3 \text{ mm } \phi$, 105 mm frá brún). Ef þessar þrýstimælingar eru notaðar til að áætla P_c mældan eftir fyrirsögn R. James og leiðrétt gildi sett inn í jöfnu hans, falla gildi á heildarrennsli mjög nálægt hinu rétta.

Myndir 6 og 7 sýna tækjaútbúnað við mælingu með þessari aðferð. Samskeyti á aðalæð í 1,5 m metrum frá holu eru höfð, til þess að þar megi skjóta inn blendu, ef mæla á enthalpy með aðferð 2.6.3. Á Myndum 8 og 9 eru línurit til þess að lesa beint heildarrennsli og gufurennsli, ef þvermál útstreymisæðar, enthalpy og kritiskur þrýstingur eru þekkt.

3. TILLAGA UM STÖDLUN RENNSLISMÆLINGA

Enda þótt haga verði rennslismælingum eftir aðstæðum á hverjum stað, virðast mæling á kritiskum þrýstingi í útstreymisopi (2.7), gasaðferð og vatnsaðferð til mælinga á enthalpy (2.6.1 og 2.6.2) yfirleitt auðveldastar í framkvæmd og nægilega öruggar. Er því lagt til, að þessar aðferðir verði að jafnaði notaðar og útbúnaður til þeirra staðlaður.

Skila ætti öllum holum, sem árangur gefa, með T-stykki ofan á aðaloka eins og sýnt er á Mynd 10. Ætti þvermál þess að vera jafnt þvermáli fóðurrörs og láréttur armur í um 1 m hæð yfir jörð. Á T-stykki ættu að vera mælistútar og flansar eins og Mynd 10 sýnir.

Þegar framkvæma á rennslismælingu verður notaður tækjabúnaður, sem er sýndur á Mynd 6. Við T-stykki er tengd 1-3 m æð, (6" eða 10" í þvermál) og á enda hennar er loki, sem á að geta

lokað holunni alveg, ef þörf gerist. Við lokann er tengi 3 m löng æð (6" eða 10" ϕ) og eru á henni stútar fyrir þrýstimæli (1/4") og skilju (1/2") í 1,5 m fjarlægð frá loka. Á enda þessarar æðar koma svo stutt mælirör (1,5 m) af mismunandi víddum. Er endi þeirra renndur réttur og um 10 cm breið rönd næst brún rennd nákvæmlega í 3", 4", 6" eða 10" innra þvermál. Á hlið þessara mæliröra eru boruð 1/4" ϕ göt til mælinga á kritiskum þrýstingi. Skal miðja gatsins vera nákvæmlega í 1/4" fjarlægð frá brún.

Þrýstimælar P_0 , P_1 , P_2 og P_C eru fylltir með glyzerini til þess að deyfa örar þrýstisveiflur. Þeir eru tengdir við aðalæð með grannri leiðslu, sem er beygð í hring eða S til þess að þéttivatn í leiðslunni stöðvi gufu, sem annars mundi þéttast í mælinum. Þrýstimæla þarf að bera saman við rétta mæla fyrir og eftir hverja mæliferð, því að titringur við mælingu þreytir þá mjög fljótt. Gassýni og vatnssýni eru tekin með einöngruðum skiljum, sem tengdar eru við 1/2" mælistúta á hlið T-stykkis og útsireymisæðar. Eru skiljurnar smíðaðar úr ryðfríu stáli eftir teikningu Nr. 14382 frá Landsmiðjunni. Á skiljum eru þrýstimælar, en þeir þurfa ekki að vera eins nákvæmir og mælar á aðalæð. Gufan er annaðhvort þétt í gufukælum úr 4 mm ryðfríu stáli eða leidd beint í 2-4 l Pyrex glerflöskur, sem bezt er að lofttæma rétt fyrir gassöfnun. Á flöskunum þarf að vera þrýstimælir til að fylgjast með lofttæmi.

Framkvæmd rennslismælingar

1. Velja þrýstimæla og bera þá saman við rétta mæla
2. Tengja útbúnað samkvæmt Mynd 6 með 3" mælirör á enda. Fullopná loka á æð.
3. Lesa P_0
4. Opna holu smám saman og lesa P_0 við $P_C = 0,5, 1,0, 2,0$ og $3,0$ atg. Bíða í hvert sinn, unz jafnvægisþrýstingi er náð.
5. Loka á æð, setja 4" mælirör á enda. Fullopná loka á æð aftur. Mæla P_0 aftur, opna holu meir og mæla P_0 við $P_C = 0,5, 1,0, 2,0$ og $3,0$ atg.
6. Mæla á sama hátt með 6" og 10" mæliröri, ef þörf gerist, unz náðst hefur mæling á P_0 og P_C ($<3,0$ atg.) með fullopinni holu.

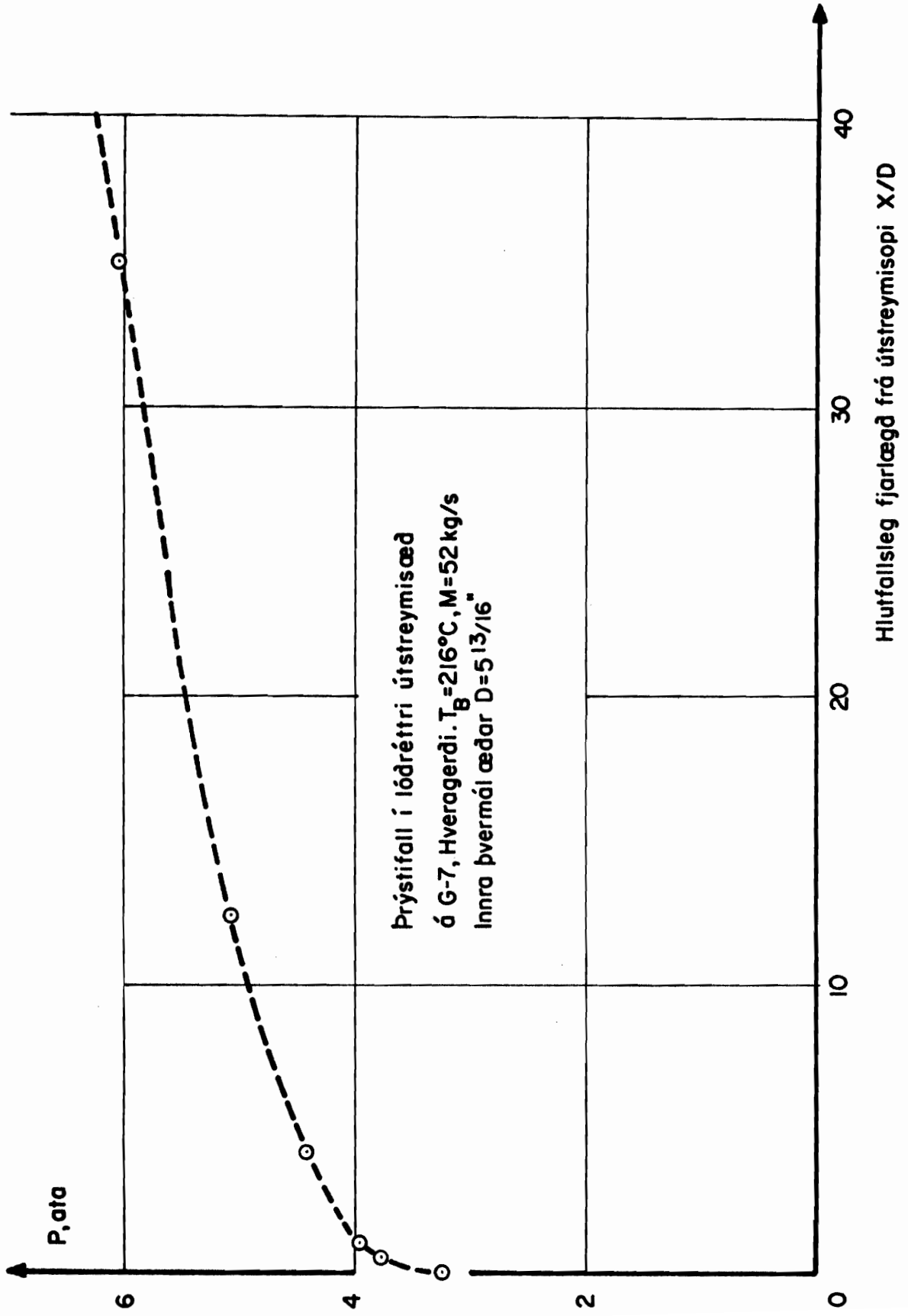
7. Við fullopna holu er lokað á æð, þar til $P_1 - P_2 \geq 7 \text{ atg.}$
Skiljur eru opnaðar og stillt á örlítið raka gufu. Þrýstingur í skilju á að vera jafn og í aðalæð. Tekin eru gassýni úr báðum skiljum og sýni af vatni holunnar, sem einnig verða notuð til að leiðrétta magn þéttivatns vegna vatnsdropa, sem berast með gufu úr skiljum. P_1 og P_2 eru vandlega mældir meðan gassýni og vatnssýni eru tekin. Ef þrýstingar breytast meðan á töku sýna stendur verður að skrá breytinguna, sem fall af tíma.
8. Loki á æð opnaður aftur að fullu. Smám saman lokað á aðal- loka og mæld samtímis gildi á P_0 og P_c . Skipt um mælirör á enda eftir þörfum, eins og áður er lýst.
9. Áður en $P_1 - P_2 < 7 \text{ atg.}$ eru gassýni og vatnssýni aftur tekin úr báðum skiljum og P_1 og P_2 mældir nákvæmlega meðan sýni eru tekin.
10. Mæld gildi á P_0 og P_c þar til hola er fulllokuð á aðalloka.
11. Opna holu fullt og mæla P_0 og P_c .
12. Láta holu blása fullt í hálfan dag og helzt nokkra daga. Fylgjast með P_0 og P_c . Mæla síðan enthalpy með gasaðferð eins og áður.
13. Loka holu smám saman og mæla P_0 og P_c , þegar holan hefur jafnað sig eftir hverja breytingu á aðalloka. Fylgjast þarf með þessum breytingum og geta liðið um 3-5 tímar unz jafnvægi er náð.

4. HEIMILDIR

- Belin, R.E. and A.E. Bainbridge, 1957: Estimation of dryness fraction and mass discharge of geothermal bores.
Proc. I. Mech. E. 171, 967-982. Greinasafn Jhd. no. 314
- Böðvarsson, G., 1951: Skýrsla um rannsóknir á jarðhita í Hengli, Hveragerði og nágrenni, árin 1947-1949. Fyrri hluti.
TVFÍ, 36, 1-48
- Bodvarsson, G. og D.J. Ryley, 1966: The Measurements of the Weight Discharge from Geothermal Steam Wells
Jökull 16, 184-198
- Einarsson, S.S., 1964: Proposed 15-Megawatt Geothermal Power Station at Hveragerdi, Iceland.
Proc. U.N. Conf. on new sources of energy, 3, 354-364.
Greinasafn Jhd. no. 721
- James, R., 1962: Steam-water critical flow through pipes
Proc. Inst. Mech. Eng. London, 176, 741-745
Greinasafn Jhd. nr. 1021
- 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, Greinasafn Jhd. no. 1022
- Mahon, W.A.J., 1962a: The carbon dioxide and hydrogen sulfide content of steam from drillholes at Wairakei, New Zealand
N.Z.J. of Science, 5, 85-98. Greinasafn Jhd. nr. 729

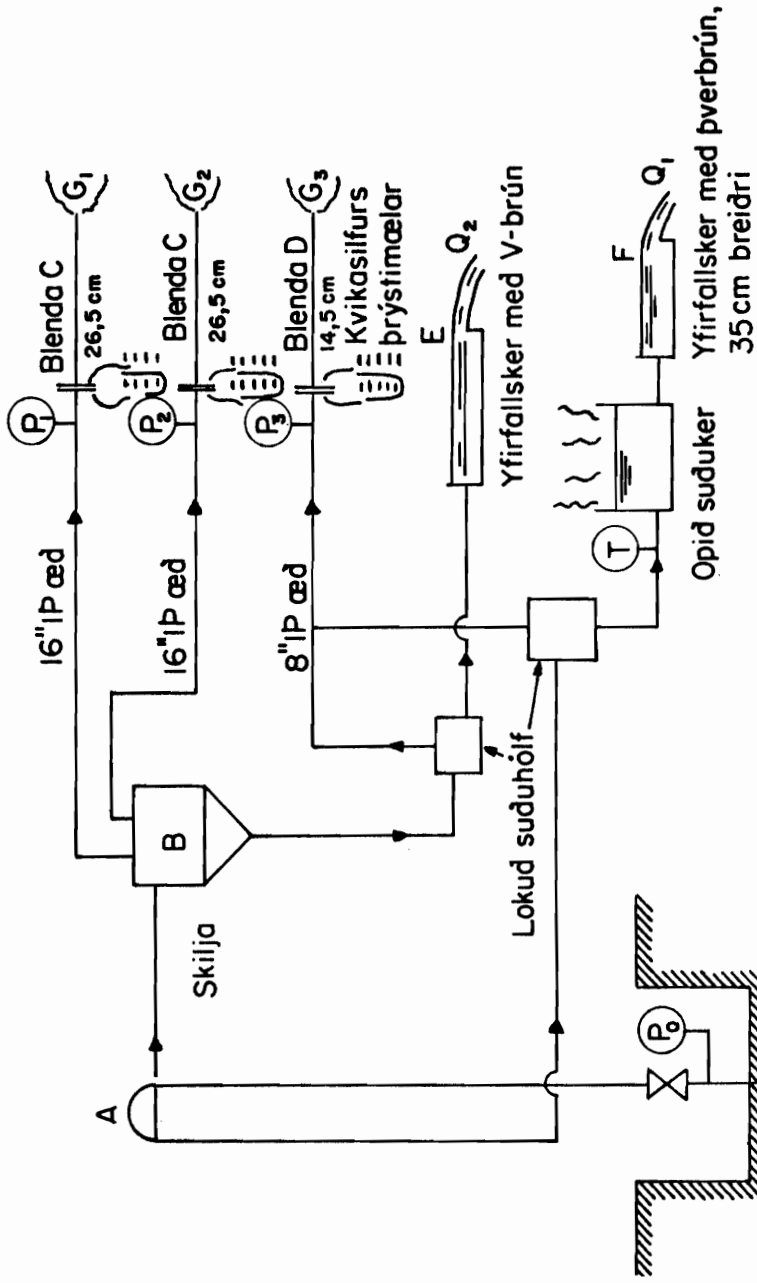
- Mahon, W.A.J., 1962b: A chemical survey of the steam and water discharged from drillholes and hot springs at Kawerau
N.Z.J. of Science 5, 417-433. Greinasafn Jhd. nr. 730
- Mahon, W.A.J., 1964: Sampling of geothermal drillhole discharges
Proc. U.N.Conf. on new sources of energy, 2, 269-273
- Mahon, W.A.J. and R.B.Glover, 1965: The chemistry of geothermal fluids discharged from drillholes at Wairakei,
New Zealand
Eight Commonwealth Mining and Metallurgical Congress
Australia and New Zealand 1965, paper no. 209, 10 pp.
Greinasafn Jhd. nr. 731
- Marks, L.S., 1951: Mechanical Engineering Handbook
McGraw Hill, N.Y. 5. ed., 2236 pp.
- Ryley, D.J., 1964: Two-phase critical flow in geothermal steam wells
Int. J. Mech. Sci., 6, 273-285

Mynd 1



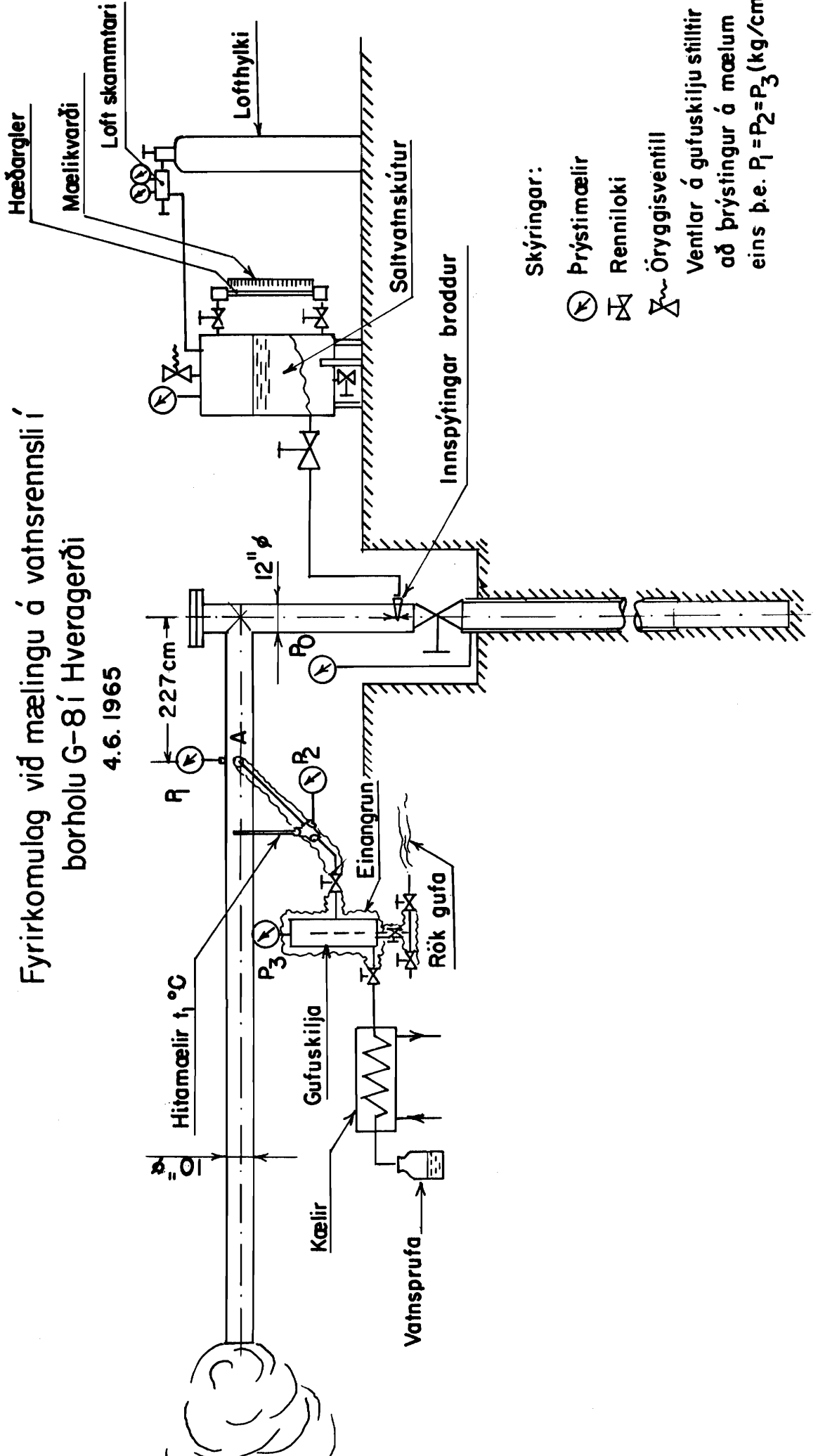
Mynd 2

Útbúnaður til beinnar mælingar á vatns- og gufurennslí í Hveragerði



Fyrirkomulag við mælingu á vatnsrennsli í
borholu G-8 í Hveragerði

4.6.1965



Skýringar:



Prýstimælir



Renniloki



Öryggisventill

Ventlar á gufuskilju stilltir þannig
að þrýstingur á mælum sé
eins þ.e. $P_1 = P_2 = P_3$ (kg/cm^2).

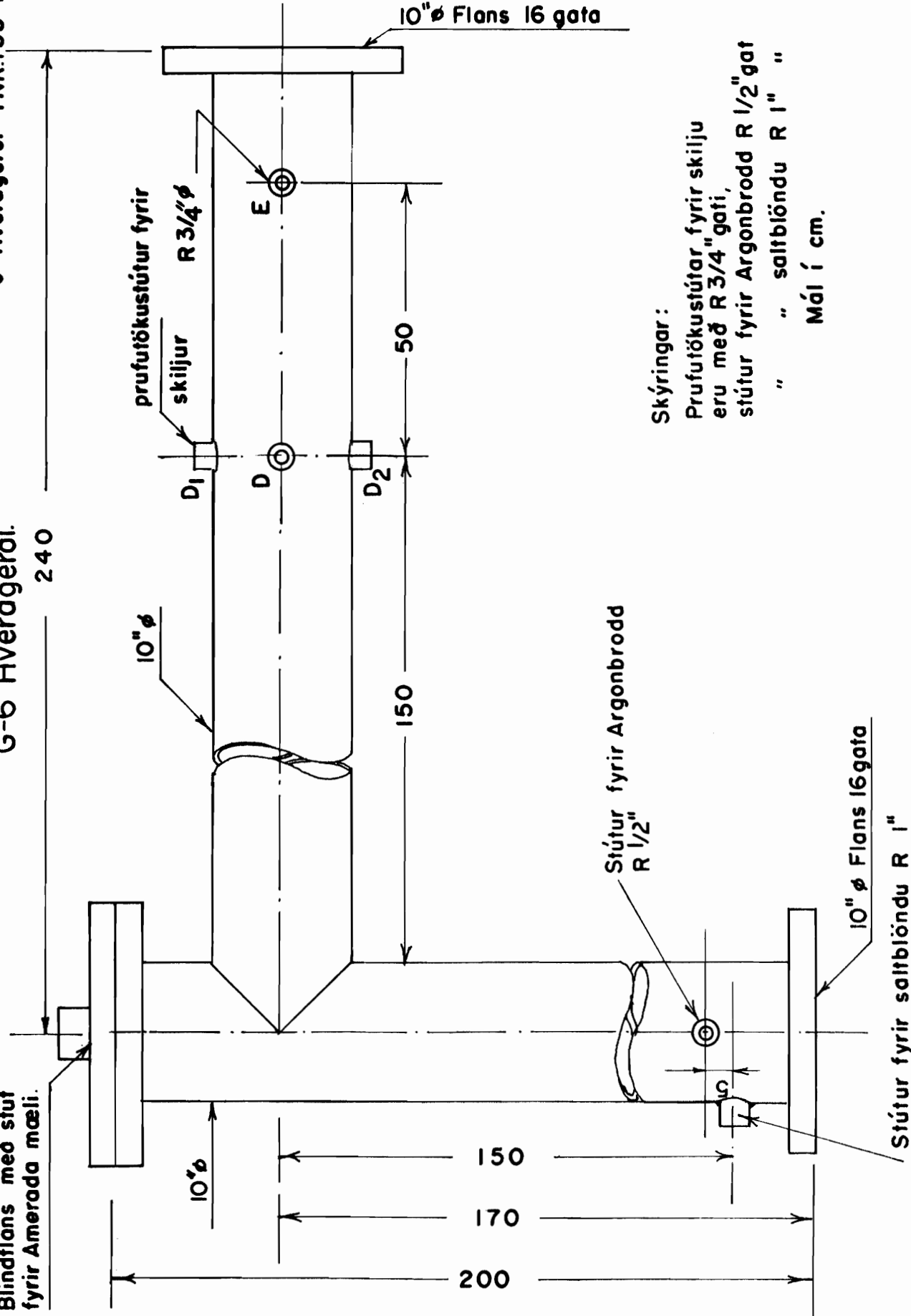
T - Stykki fyrir prufutökur úr borholu

G-6 Hveragerði.

J-Hveragerði TNR.133 FNR.8312

Mynd 4

Blindflans með stút fyrir Ameroda mæli.

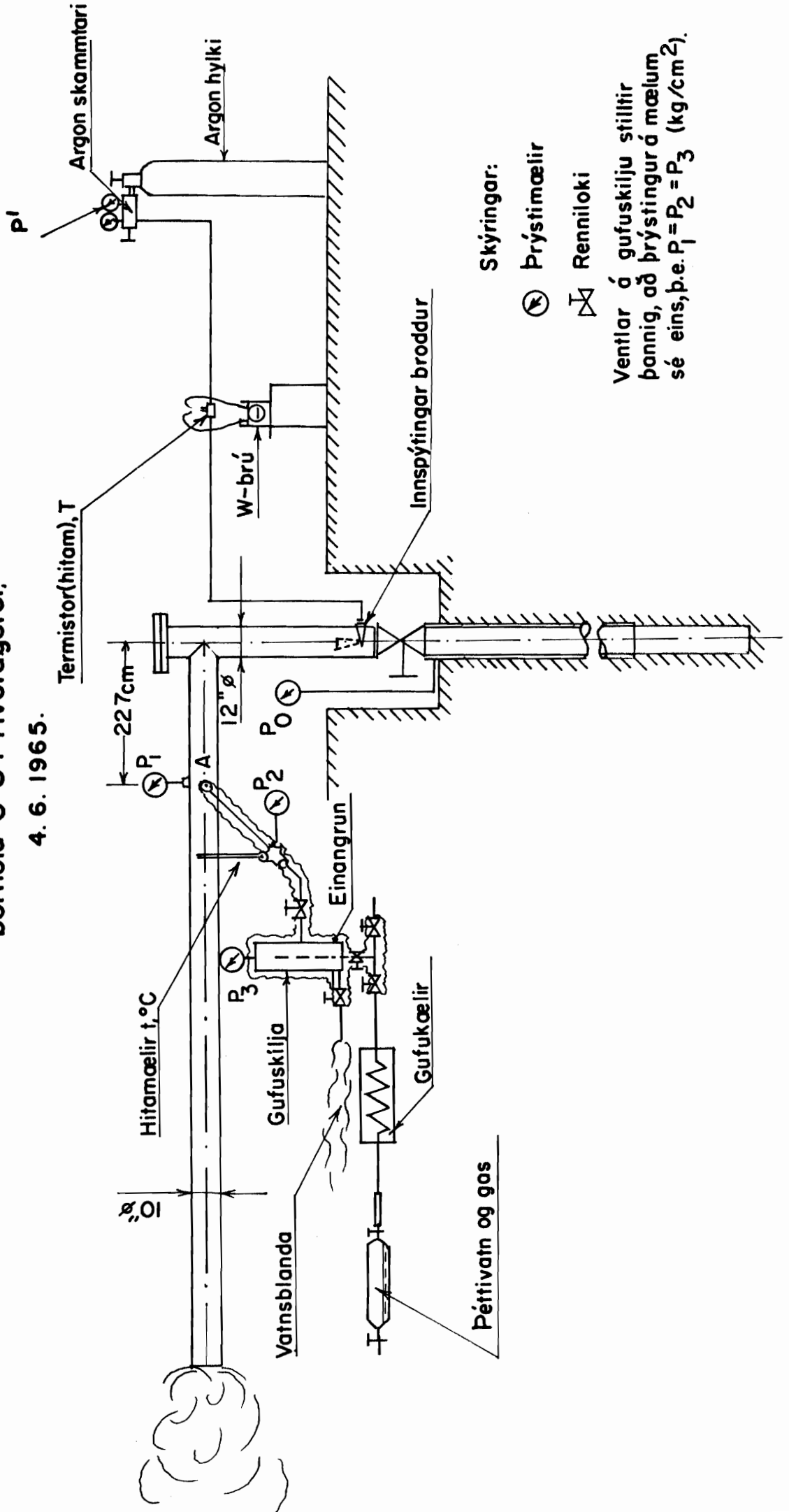


Skýringar:

- Prufutökustútar fyrir skjuru eru með R 3/4" gati,
- stútur fyrir Argonbrodd R 1/2" gat
- " " saltblöndu R 1" "
- Mál í cm.

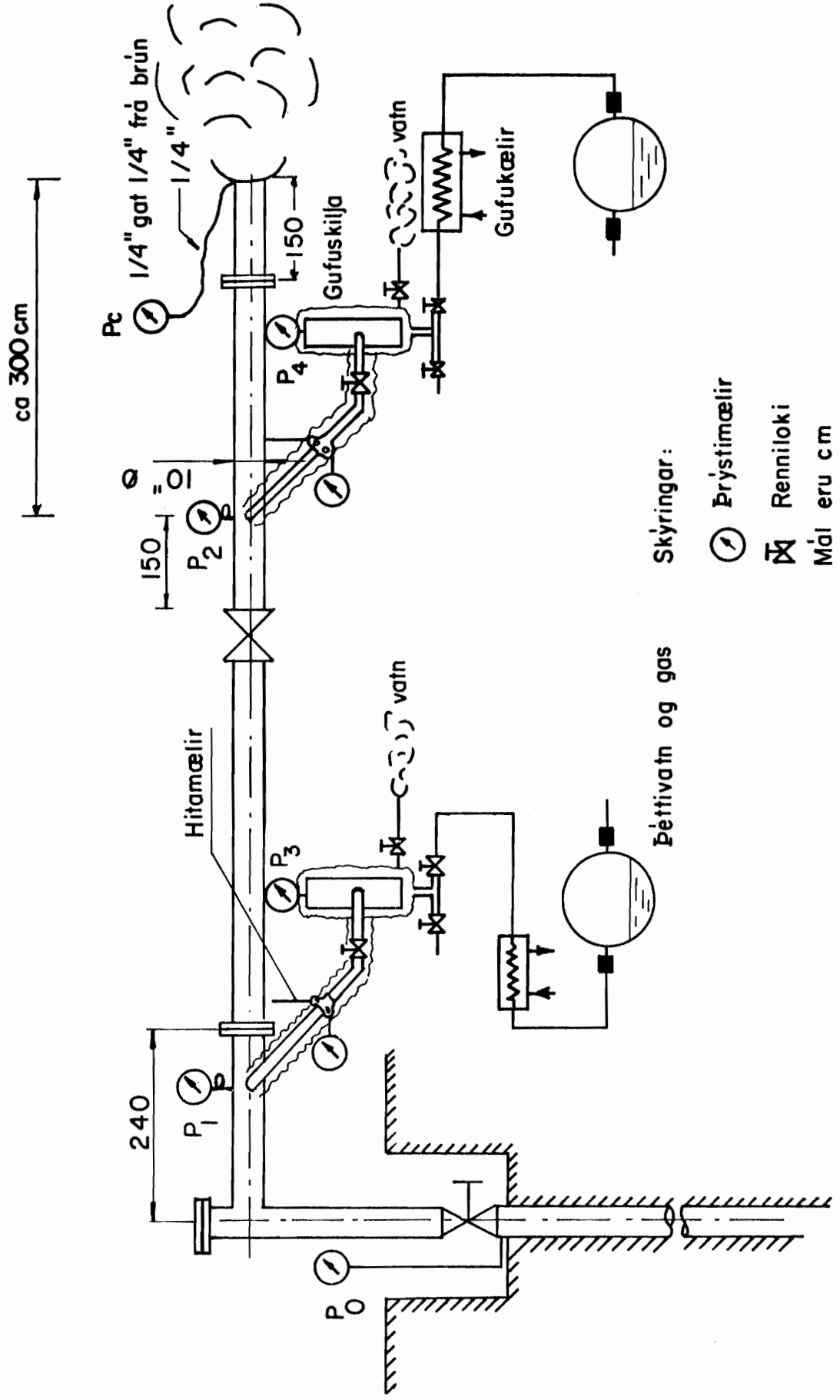
Fyrirkomulag við mælingu á gufurennslí í
borholu G-8 í Hveragerði.

4. 6. 1965.



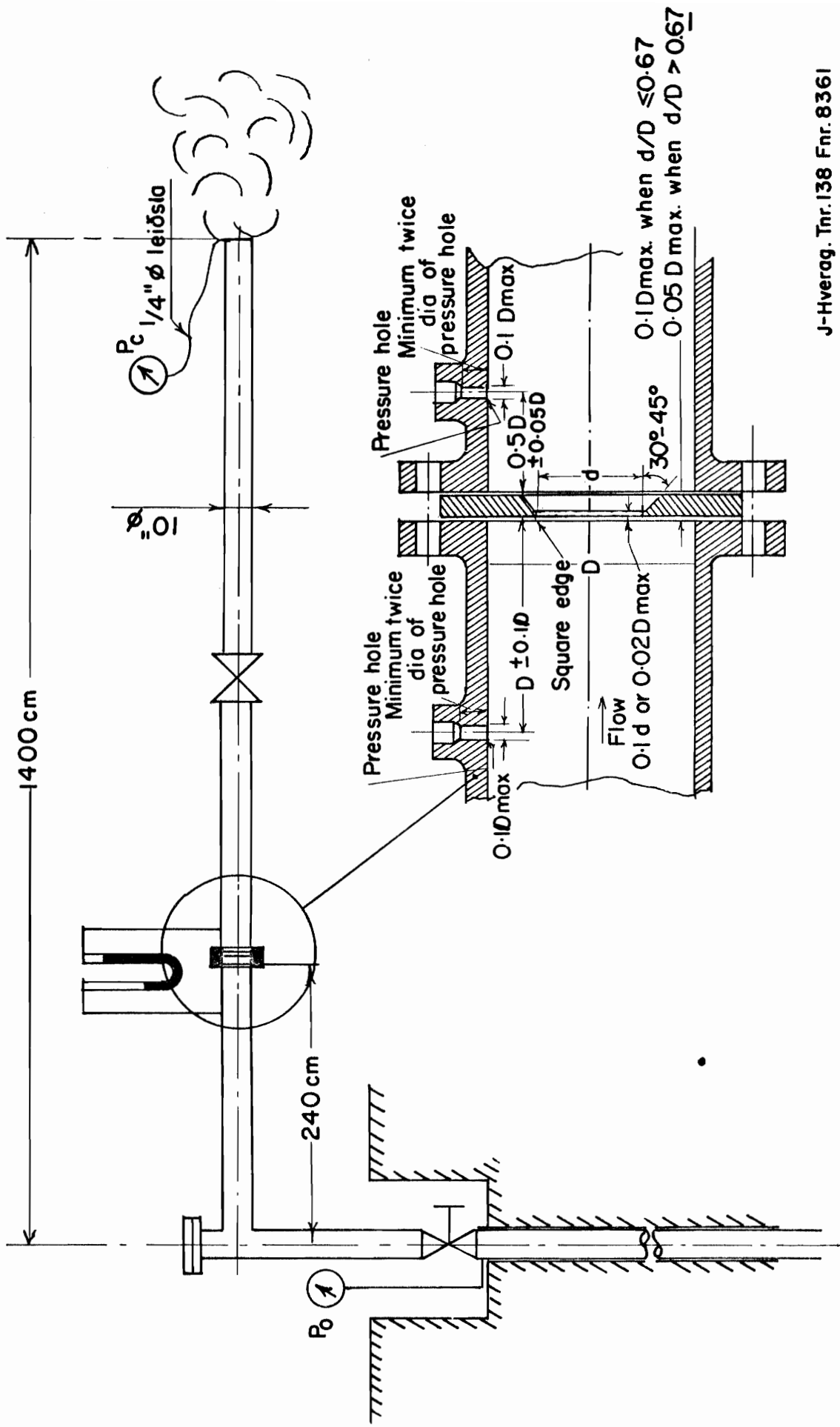
Mynd 6

Tæki til mælinga á enthalpy og heildarrennsli með gasaðferð og mælingu á kritiskum þrýstingi í útstreymisopi



Mynd 7

Tæki til mælinga á enthalpy gufu- vatnsblöndu . Mælt er þrýstifall yfir blendu og kritiskur þrýstingur í útstreymisopi



18.7.68 AK/e

Tnr. 4

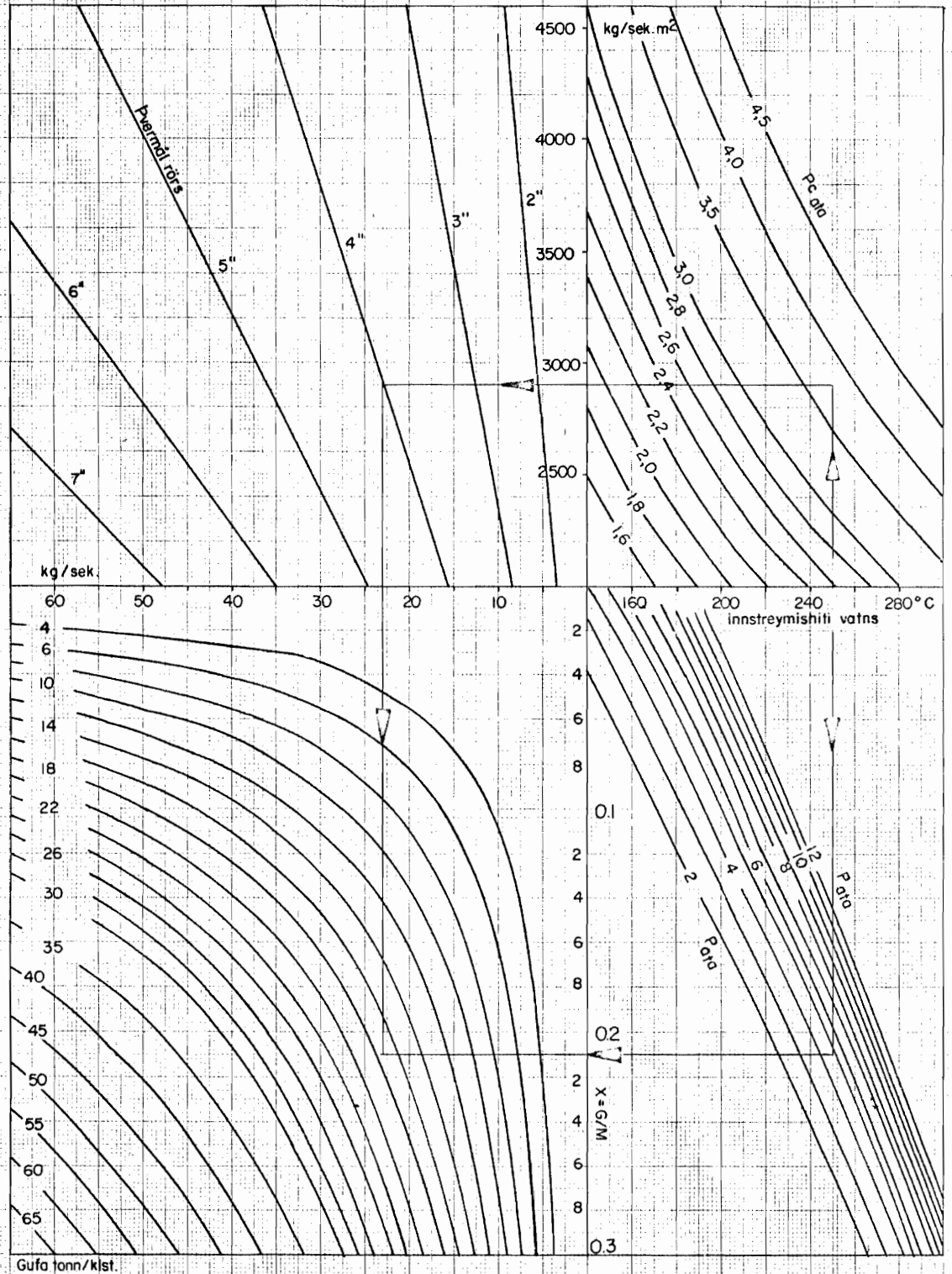
J-Afmæling

Fnr. 8473

ORKUSTOFNUN
Jordhitadeild

Hjálparferlar við afmælingu gufuhölu,

Mynd 8

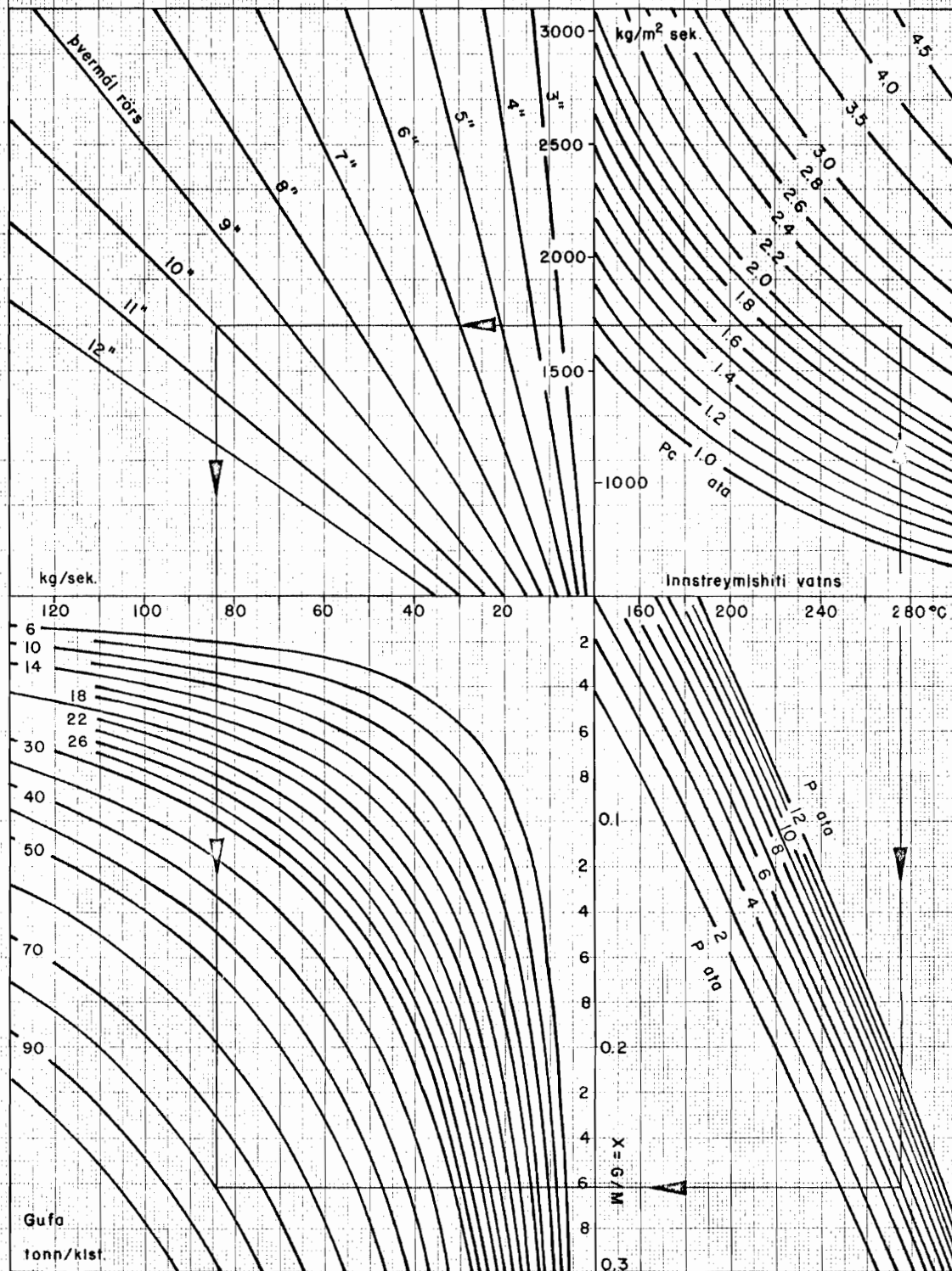


12.7.68 A.K./Gyða
Tnr. 3
J- Afimæling
Fnr. 8472

ORKUSTOFNUN
Jardhitadeild

Hjálparfærta við
afimælingu gufuholu

Mynd 9



Mynd IO

RAFORKUMÁLASTJÓRI
Jarðhitadeild.

Útbúnaður gufuborhola.

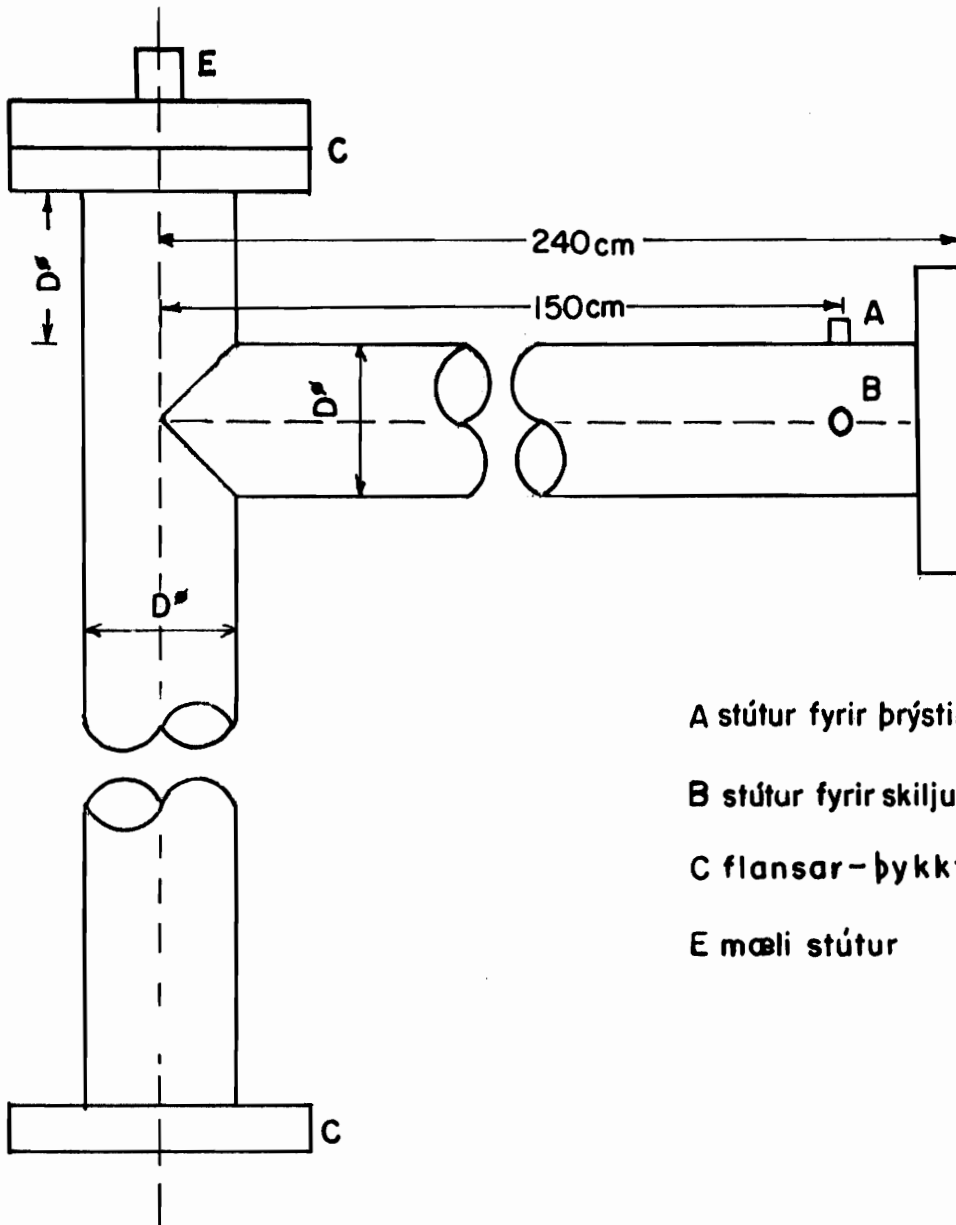
3.4.'67 SGS / P

Tnr. 156

J-Ým.

Fnr. 7882

T-stykki fyrir sýnatökur úr borholum



A stútur fyrir þrýstimæli 1/4"

B stútur fyrir skilju 1/2"

C flansar-þykkt 2"

E mæli stútur 2"