

# Hreinsun útblásturs jarðhitavirkjana

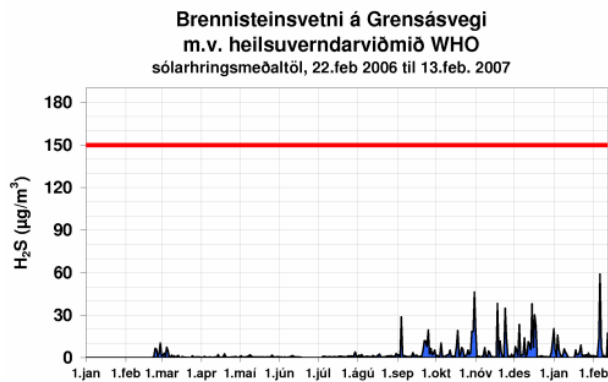
Teitur Gunnarsson, Gunnlaugur Friðbjarnarson og Ásgeir Ívarsson  
VGK-Hönnun hf., Laugavegi 178, Reykjavík og Strandgötu 29, Akureyri

## Samantekt

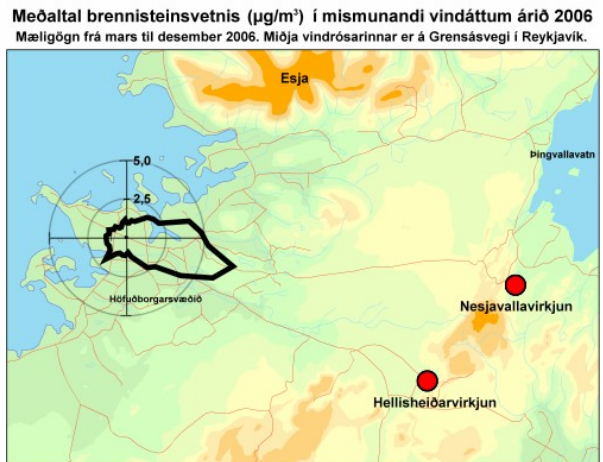
Óþéttanlegt gas fylgir jarðhitagufu og er á bilinu 0,5-2% af massa gufunnar hér á landi. Helstu gastegundirnar eru CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub> og N<sub>2</sub>. Víða um heim er gerð krafa um hreinsun H<sub>2</sub>S áður en gasið fer til loftis vegna lyktarmengunar. Ekki hefur enn komið til þess hér á landi, en vegna vaxandi lyktar á höfuðborgarsvæðinu er slík hreinsun í undirbúningi. Brennistein má vinna úr gasinu með oxunartölurnar -2, 0, +4 eða +6. Margir ferlar hafa verið þróaðir sem byggja á oxun og framleiðslu á hreinum brennisteini eða brennisteinssýru. Í öllum þessum tilvikum eru afurðirnar verðlitar og framleiðsla þeirra kostnaðarsöm. Settar eru fram hugmyndir sem byggja á ísogi H<sub>2</sub>S í vatn og niðurrensli þess í jarðlög. Rök má færa fyrir því að afdrif H<sub>2</sub>S verði þá hin sömu og ef ekki hefði verið virkjað. Fyrir rannsóknarverkefni um bindingu koldíoxíðs í bergi er gerð krafa um hreint CO<sub>2</sub>. Sú krafa um aðskilnað H<sub>2</sub>S og CO<sub>2</sub> flækir málið tæknilega.

## 1. Inngangur

Eftir gangsetningu Hellsheiðarvirkjunar hefur fjölgað þeim dögum sem brennisteinslykt finnst á höfuðborgarsvæðinu. Engar líkur eru taldar á að styrkur brennisteinsvetnis (H<sub>2</sub>S) á höfuðborgarsvæðinu muni nokkurn tíma nálgast mengunarmörk á vinnustöðum sem eru einu mörkin sem í gildi eru á dag á Íslandi. Þó er tekið fram í reglugerð um loftgæði, að forráðamenn fyrirtækja og stofnana skuli sjá til þess að reykur, ryk og lofttegundir, sem eru hættulegar, daunillar eða lyktarmiklar, valdi ekki óþægindum í nánasta umhverfi. Telja verður líklegt að umræða og kröfur um nauðsyn hreinsunar á brennisteinsvetni frá virkjunum Orkuveitu Reykjavíkur muni aukast með aukinni vinnslu á jarðhitasvæðinu umhverfis Hengilinn.



Mynd 1. Styrkur H<sub>2</sub>S frá feb. 2006-feb. 2007 [1]



Mynd 2. Vindrós sem sýnir styrk H<sub>2</sub>S 2006[1]

Samkvæmt mælingum er magn óþéttanlegs gass í jarðhitagufu á Hengilssvæðinu um 0,5% af massa gufunnar, þar af um 1/5 brennisteinsvetni. Á Kröflusvæðinu var gasmagnið yfir 2% á tímum Kröfluelda, en hefur nú lækkað í um 1,5%. Almennt er miðað við að um 1,9 kg/s af gufu þurfi til framleiðslu á 1 MW af rafmagni. Hellsheiðarvirkjun er nú 123 MW<sub>e</sub>, þar af eru 90 MW<sub>e</sub> framleidd með háþrýstigufu og 33 MW<sub>e</sub> með lágþrýstigufu, en hún inniheldur mun minna af gasi.

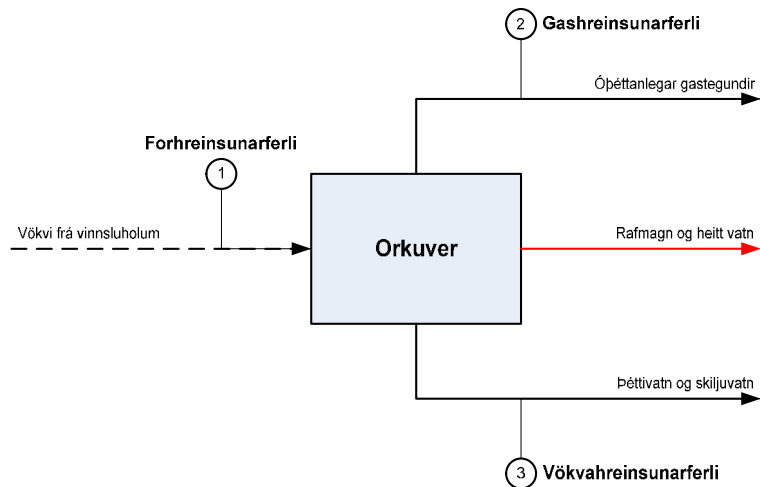
Samkvæmt ofangreindum forsendum er gasmagnið frá virkjuninni um 0,86 kg/s, þar af er um 0,18 kg/s H<sub>2</sub>S. Þetta samsvarar um 5.360 tonnum á ári af H<sub>2</sub>S, en nær 5.700 t/ár ef hæsta mæligildi er notað. Fyrirhugað er að auka framleiðslu með háþrýstigufu í 180 MW<sub>e</sub> árið 2008 og í 270 MW<sub>e</sub> árið 2010. Þá verður losun H<sub>2</sub>S um 16.000 tonn á ári. Samkvæmt reynslu frá Nesjavöllum má þó búast við að gas í gufu minnki með tímanum og verði komið í um helming þess sem nú er eftir um 20 ár.

## 2. Megin hreinsunarleiðir

Við vinnslu jarðhita má almennt hreinsa brennisteinsvetni þannig að það fari ekki út í loftið með þrennum hætti eins og sjá má á meðfylgjandi mynd (*Mynd 3*) [2], [3].

Í fyrsta lagi er mögulegt að hreinsa óþéttanlegar gastegundir úr gufu áður en hún berst til orkuversins. Öll gufan er meðhöndluð til að fjarlægja óþéttanlegar gastegundir sem síðan eru meðhöndlaðar frekar með hentugu ferli. Þessi aðferð hentar einkum ef magn óþéttanlegra gastegunda er verulegt þannig að það valdi truflun í rekstri gufuhverfla. Helsti kosturinn við þessa aðferð er að öllum búnaði eftir gasfjarlægingu er hlíft við tæringu, en helsti ókosturinn er að talsvert af orkunni tapast vegna lækunar á vermi gufunnar til orkuversins.

Í öðru lagi er hægt að hreinsa brennisteinsvetnið úr útblæstri óþéttanlegra gastegunda frá eimsvala. Þessi aðferð hentar best þar sem óþéttanlegu gastegundirnar eru í hóflegu magni, magn ammoníaks er lágt og notaður er lokaður eimsvali eins og í Helligheiðarvirkjun þar sem óþéttanlegu gastegundirnar eru sögaðar frá eimsvalanum og hleypt til lofts. Flestir þessara ferla mynda brennistein úr brennisteinsvetninu, en verða fljótt óhagstæð ef mikið ammoníak er í gufunni en það veldur því að aukinn hluti brennisteinsvetnis fylgir þéttivatninu frekar en óþéttanlega gasinu sem sögað er frá eimsvalanum.



Mynd 3. Hreinsunarferli við jarðhitavinnslu

Í þriðja lagi er hægt að hreinsa brennisteinsvetni úr skiljuvatni og eða þéttivatni. Þessi aðferð hentar einkum þar sem hóflegt eða lítið magn er af óþéttanlegum gastegundum og notaður er opinn eimsvali þannig að gufan er þétt með beinni innspýtingu á kælivatni líkt og gert er í Kröfluvirkjun. Ef umtalsvert ammoníak er í gufunni eykst hlutur brennisteinsvetnis í þéttivatninu og bætir því nýtnina við þessa aðferð.

Þá má einnig flokka hreinsunaraðferðir eftir því hvers eðlis aðferðirnar eru. Þannig eru þekktar líffræðilegar aðferðir, sem byggja á notkun brennisteinsoxandi baktería, efnafræðilegar aðferðir sem byggja á notkun efna til að oxa brennisteinsvetnið og eðlisfræðilegar aðferðir sem byggja á ísogi eða ásogi brennisteinsvetnis. Hér að neðan er lauslega gerð grein fyrir nokkrum þessara aðferða.

### 3. Líffræðilegar aðferðir

Brennisteinsvetnið er þvegið úr gasstraumnum með basískri vatnslausn og brennisteinninn oxaður með brennisteinsbakteríum [4, 5, 6]. Almenn er ferli af þessum toga útfærð þannig að fastur brennisteinn (S) myndist, sem síðan má hreinsa eða farga. Í reynd geta flestar þessara baktería haldið oxun brennisteins áfram og myndað brennisteinssýru. Sum ferlanna eru þannig útbúin að brennisteininum er skilað sem þynntri sýru [7].

Í þeim tilvikum að brennisteinn myndast er hann yfirleitt eitthvað blandaður öðrum efnum og ekki söluvara nema eftir hreinsun. Verð fyrir brennistein hefur lengi verið lágt og almennt hefur brennisteinsframleiðsla ekki verið talin arðbær í þeim mæli sem almennt á við um jarðhitavirkjanir hér á landi. Því er algengast í svona tilfellum að urða brennisteinninn. Á urðunarstaðnum halda brennisteinsoxandi bakteríur áfram að oxa hann yfir í brennisteinssýru [8]. Því virðist nauðsynlegt að ganga vel frá slíkum urðunarstöðum með kalkundirlagi sem nægir til að hlutleysa alla þá brennisteinssýru sem mun myndast.

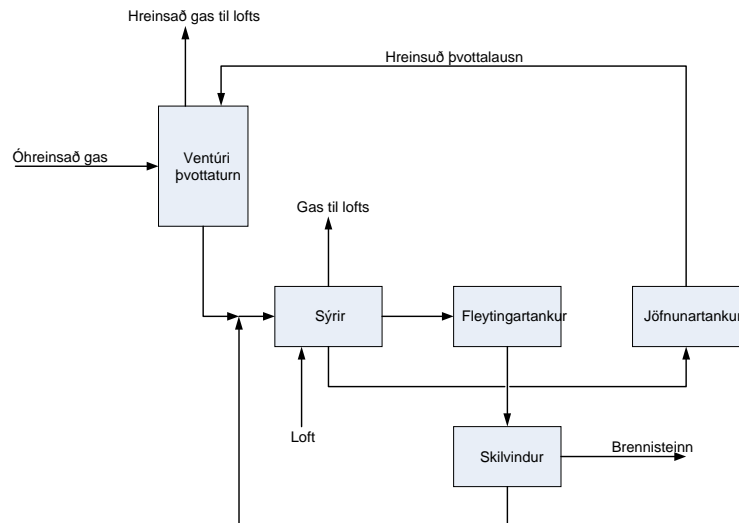
Í þeim tilvikum sem brennisteinssýra myndast þarf annað hvort að hlutleysa hana á staðnum eða farga henni með niðurrennsli í basísk jarðlög, niður fyrir grunnvatnslög. Reynslu skortir fyrir því hvaða langtíma áhrif slíkt niðurrennsli súrrar vatnslausnar mun hafa á bergið. Sambærilegt niðurrennsli hefur þó verið stundað a.m.k. á Ítalíu í nokkur ár [9].

Tillaga hefur verið gerð um að nota ferli, sem kallast Thiopac til hreinsunar á útblæstri  $H_2S$  frá orkuverinu í Svartsengi [10]. Í gasinu frá orkuverinu í Svartsengi er hins vegar innan við 1.000 tonn af  $H_2S$  á ári og kostnaður við urðun brennisteins yrði ekki eins afgerandi eins og á Helligheiðinni. Auk þessa hefur orkulíftæknifyrirtækið Prokatín rekið um nokkurt skeið tilraunaaðstöðu á Nesjavöllum þar sem líffræðilegar hreinsunaraðferðir eru þróaðar sem munu, gangi áætlanir eftir, hafa það fram yfir hefðbundnar líffræðilegar hreinsunaraðferðir að framleitt verður fóðurmjöl sem treysta mun rekstrargrundvöll kerfisins auk þess sem nokkur hluti koldíoxíðs úr gasinu bindst í lífmassann. Í þessu tilfelli yrði því í raun um verksmiðju sem nýtti útblástur jarðvarmavirkjunar að ræða frekar en hreinsikerfi í eiginlegum skilningi þess orðs.

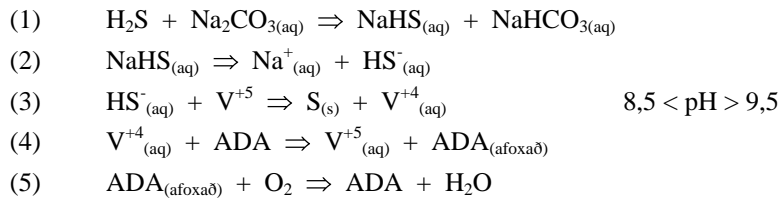
### 4. Efnafræðilegar aðferðir

Í oxunar-afoxunarferlum í vatnsfasa er brennisteinsvetnið þvegið úr gasstraumnum í vatn og oxað í brennistein. Brennisteinninn er hreinsaður frekar til sölu eða fargað. Þetta eru langmest notuðu ferlin til hreinsunar í dag. Hreinsun er góð, vinnslan fer fram við umhverfishita og þrýsting og getur meðhöndlað mismikið streymi og styrk brennisteinsvetnis. Helstu gallar eru rekstrartruflanir vegna brennisteinsútfellinga í lokum og stútum og förgun afurðar einkum vegna eittraðra vanadíumsambanda úr hvatanum. Af þessum ferlum er s.k. Stretford-ferli þekktast. Það hefur verið notað í jarðhitaorkuverum á Geysissvæðinu í Kaliforníu í meira en 30 ár.

Ferlið felst í því að óþéttanlega gasið frá eimsvalanum er leitt til þvottaturns (Mynd 4) þar sem brennisteinsvetnið er látið hvarfast við sérstaka lausn sem inniheldur blöndu natríumkarbónats, natríumammoníummetavanadats og antraquinóndísúlfónsýru (ADA). Þvottalausnin í turninum, sem inniheldur uppleyst  $H_2S$  hvarfast við vanadínjónir ( $V^{5+}$ ) í lausninni og myndar brennistein. Vanadínjónirnar afoxuðust við hvarfið ( $V^{4+}$ ) og eru oxaðar með antraquinóndísúlfónsýrunni sem er svo oxuð aftur með lofti í sírinum til að endurnýja lausnina. Bæta þarf vítisóða í lausnina til að viðhalda pH milli 8,5 og 9,5. Koldíoxíðið í gasinu hvarfast einnig við þvottasóðann og myndar natríumbíkarbónat.

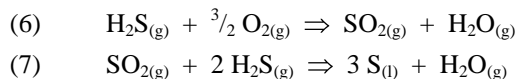


Mynd 4. Stretford ferlið

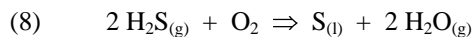


Brennisteinninn flýtur upp í fleytingartanki og er skilinn frá með skilvindu eða í filterpressu. Brennisteininum er fargað (eins og lýst er að framan) eða hann hreinsaður frekar og gerður að söluvöru. Megin kostir ferlisins voru litlar rekstrartruflanir, meira en 99% hreinsun brennisteins og minna en 10 ppm  $H_2S$  í hreinsuðu gasi og ferlið þolir umframmagn  $H_2S$  vel. Eitt helsta vandamálið við þetta ferli er hversu eitruð vanadífumefnasambönd eru og því hversu erfitt er að losna við afurðina. Hreinsun  $H_2S$  úr gasstraumnum er góð, en samkvæmt reynslu á Geysissvæðinu eru 2-20% af  $H_2S$  sem fylgir þéttvatninu til kæliturns og er veitt til lofts þar. Til að eyða þessu  $H_2S$  hefur verið sett upp peroxíð hreinsikerfi fyrir kælivatnið, þar sem  $H_2O_2$  er notað til að oxu  $H_2S$  í brennistein sem svo er síaður frá. Þessar virkjanir eru með opna eimsvala líkt og er í Kröfluvirkjun. Sulfex- og Ferox-ferli byggja á notkun  $Fe^{2+}$  og  $Fe^{3+}$  í stað vanadíns og ADA, en eru að öðru leyti keimlík. Ein heimild segir mikla froðumyndun og vandamál vegna brennisteinsútfellinga það mikil að ekki sé hægt að mæla með ferlum af þessu tagi. Sama heimild telur að Stretford aðferðir henti eingöngu þar sem um lágt hlutfall  $CO_2$  er að ræða.

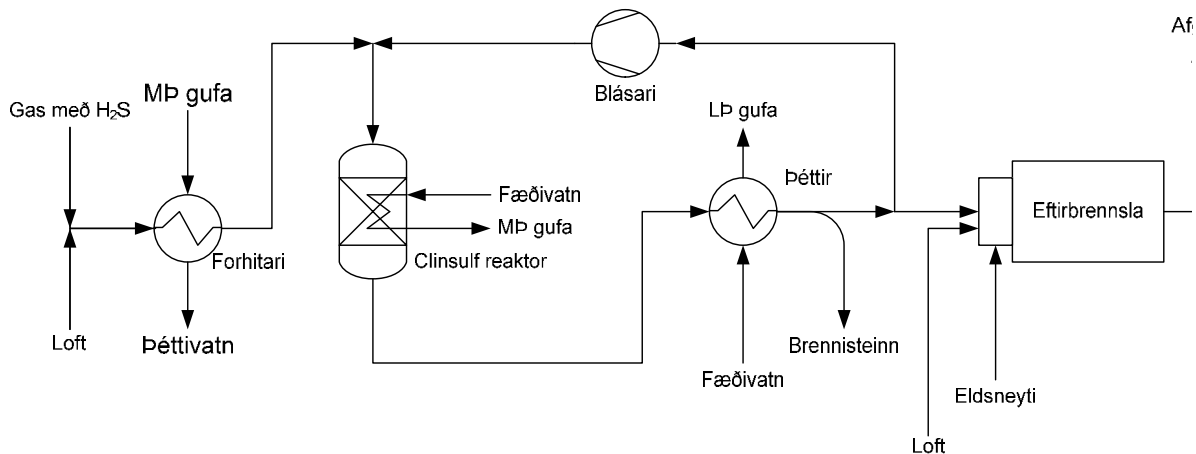
Claus-ferli felast í því að þriðjungur brennisteinsvetnis er brenndur í  $SO_2$  með lofti. Afgangur brennisteinsvetnisins er látinn hvarfast við  $SO_2$  með járnóxiðhvata og myndar þá brennistein, S. Þetta ferli var þróað fyrir kolsýruríkt gas sem dælt er niður í olíuborholur til að auka í þeim þrýsting. Í upprunalegri útfærslu henta þær ekki fyrir jarðhitagas en eftir einfaldanir og endurbætur geta þær gert það. Talsverður varmi losnar í hvörfunum sem nýttur er til framleiðslu á gufu. Ferlið byggir á eftirfarandi efnahvörfum:



Clinsulf útfærslan á Claus-ferli er sambærilegt nema hvað notast er við hvataðan bruna  $H_2S$  sem hefur í för með sér lægri hita og minni líkur á tæringu o.fl. afleiðingum hás brunahita, oxað er beint yfir í brennistein í fyrsta skrefi og mjög lítið  $SO_2$  verður til:

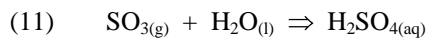
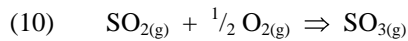
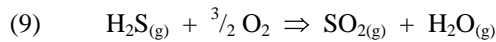


Clinsulf er útfærsla Linda AG á Claus-ferlinu [11] (Mynd 5). Notaður er áloxíðhvati í ferlinu og oftast eru notaðir tveir reaktorar sem skipt er á milli reglulega til að endurnýja hvatann. Efturbrennari tryggir að ekkert  $H_2S$  fari út í loftið, en aftur á móti getur verið um smávegis  $SO_2$  að ræða sem þó á að vera innan marka reglugerðar um loftgæði. Gert er ráð fyrir að óhreinsaða gasið til reaktors innihaldi ákveðið lágmark af  $H_2S$  til að hægt sé að halda uppi hvarfahitanum. Til að hægt sé að nota þessa aðferð þarf því hugsanlega að lækka innihald koldíoxíðs með PSA stöð. Samkvæmt Heisel, sem er einn höfunda þessa ferlis, er Linde hætt að bjóða þessa útfærslu [12].

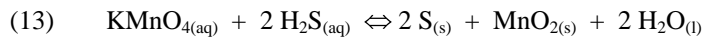
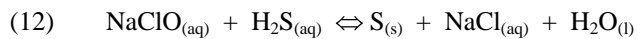


Mynd 5. Clinsulf ferlið

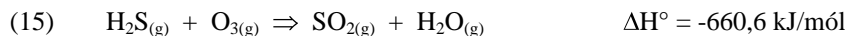
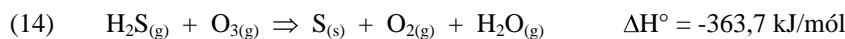
Brennslu-þvottaferli eru tiltölulega nýlega þróaðar aðferðir sem byggjast á að ná  $H_2S$  bæði úr straumi óþéttanlegra gastegunda og úr þéttivatni. Óþéttanlega gasinu er brennt þannig að  $H_2S$  hvarfast og myndar  $SO_2$  en síðan er afgasið þvegið með þéttivatninu.  $H_2S$  úr þéttivatninu hvarfast og myndar á endanum leysanleg þíósúlföt. Þessi aðferð hentar betur ef notaður er beinn eimsvali og best er ef ammoníakinnihald gufunnar er hátt til að viðhalda eðlilegu sýrustigi. Ef ammoníakinnihaldið er lágt þarf að bæta vítissóða í þéttivatnið til að viðhalda sýrustigi sem er nógu hátt til að  $SO_2$  leysist í vatninu [9]. Haldor Topsøe býður ferli þar sem framleidd er brennisteinssýra, s.k. WSA ferli [13, 14], en ferlið er þróað fyrir  $H_2S$  ríkt og brennanlegt afgas:



Til oxunar-afoxunarferla í vatnsfasa teljast t.d. natríumhýpóklórítferli og kalíumpermanganatferli. Þessar aðferðir eiga það sameiginlegt að hráefnakostnaður er hár og erfitt getur orðið að losna við myndefnin.



Ósonferli telst einnig til oxunar-afoxunarferla. Þegar notað er óson til oxunar brennisteinsvetnis myndast samkvæmt einum seljanda búnaðar hreinn myndlaus (amorph) brennisteinn [15]. Myndun brennisteinsdíoxíðs er varmafræðilega umtalsvert hagstæðara en myndun brennisteins og það er í samræmi við efnafraðitexta [16].

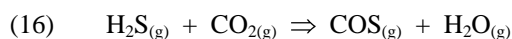


Ósonið má framleiða með rafmagni og fá allt að 5% styrk í lofti. Ekki er hægt að flytja óson þar sem það brotnar hratt niður og verður því að framleiða það á staðnum. Yfir 90% raforkunnar tapast sem varmi og því þarf umtalsvert kælivatn. Rafmagnspörfin er talin um 10 kWh/kg ósons. Til eyðingar á 5.700 t/ár brennisteinsvetnis þarf um 8.050 t/ár af ósoni miðað við efnajöfnu (14). Til framleiðslu á þessu magni ósons þarf því um 80 GWh rafmagns eða að jafnaði 10 MW m.v. 8.000 rekstrarstundir á ári.

## 5. Eðlisfræðilegar aðferðir

Hér er átt við að óþéttanlegar gastegundir eru þjappaðar, þvegnar með skiljuvatni og blöndunni veitt í niðurrennslisholu. Lágur stofnkostnaður, rekstur og viðhald ásamt því að nánast allt brennisteinsvetni næst úr með þessari aðferð, engin vatnshreinsun eða brennsla afgasa, engar brennisteinsútfellingar og enginn brennisteinn til urðunar eru helstu kostir þessarar aðferðar. Langtímaáhrif á jarðhitakerfið er meðal þess sem rannsaka þarf til að óhætt sé að fullyrða að þetta sé besta aðferðin, sem nú er aðgengileg, til langs tíma litið.

Hibara og fleiri [17] frá Mitsubishi birtu á þingi Geothermal Resource Council 1990 hugmyndir sínar um niðurrennsli  $H_2S$ . Aðferðin gengur út á að blása óþéttanlegu gastegundunum sem heimtar eru frá eimsvala inni straum skiljuvatns þegar hann fellur niður niðurrennslisholuna. Stýra þarf gas og vökvahraða niður holuna til að tryggja að gasið leysist upp í skiljuvatninu. Ef innihald koldíoxíðs í óþéttanlega gasinu er umtalsvert getur þurt að fjarlægja hluta þess í PSA stöð með mólíkúlsíum, sem hleypra öðrum gastegundum í gegn. Samkvæmt einni heimild [18] hvata mólíkúlsíur efnahvarfi koldíoxíðs og brennisteinsvetnis samkvæmt jöfnunni:



Þar sem COS mun væntanlega fylgja koldíoxíðinu frá PSA stöðinni og breytast aftur í brennisteinsvetni í bleytu þarf að staðfesta að ekki verði um umtalsverðan útblástur  $H_2S$  þessa leið til lofts. Það er athyglisvert að í

Yanaizu-Nishiyama orkuverinu í Japan sem tekið var í notkun 1995 með búnaði frá Mitsubishi var þessi aðferð ekki valin heldur Claus-ferli [19].

Það er ljóst að mikið skiljuvatn þarf til svona niðurrennsli á Hellisheiði vegna umtalsverðs innihalds vetnis og köfnunarefnis í gasinu, en þær gastegundir leysast illa í vatni, einkum ef hiti þess er jafnhár og raunin er á Hellisheiði. Það var því brýnt að finna aðra útfærslu ef nota ætti svona niðurrennsli hér á landi og var því litið til aðferða sem byggjast á ísogi súru gastegundanna,  $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{S}$  í vatni, en hleypa öðrum gastegundum til loftis (Mynd 6).

Ef tekst að finna niðurrennsli stað þar sem náttúrulegt afrennsli jarðhitasvæðisins er til sjávar má færa rök fyrir því að afdrif  $\text{H}_2\text{S}$  séu þau sömu og ef ekki hefi verið virkjað. Ókostirnir eru einkum þeir að lítil reynsla er af svona niðurrennsli, niðurrennsli vatnið er súrt og getur leyst upp berg, uppleystu gastegundirnar geta leitað aftur inn í jarðhitageyminn og komið að nýju upp með gufunni ef staðsetning niðurrennsli er of nærri jarðhitasvæðinu.

Orkuveita Reykjavíkur tekur þátt í verkefni í samstarfi við Colombia háskólann í New York og háskólann í Toulouse um bindingu koldíoxíðs í basalt. Til að þetta verkefni megi herma við aðstæður sem víðast er það krafa í verkefninu að koldíoxíð sem binda á sé ekki blandað  $\text{H}_2\text{S}$ . Ástæðan er meðal annars sú að  $\text{H}_2\text{S}$  mun keppa við koldíoxíð um virka staði til bindingar og hefur áhrif til lækkunar á sýrustigi (pH). Til að hægt sé að skaffa koldíoxíð til verkefnisins hefur verið skoðað hvort og þá hvernig hægt sé að samtvinnna það hreinsun brennisteinsvetnis. Nokkrar mismunandi leiðir hafa verið skoðaðar. Eins og áður hefur komið fram er hægt að nota mólékúlsíur til að aðskilja  $\text{CO}_2$  frá  $\text{H}_2\text{S}$  og öðrum gastegundum. Gallinn við þá aðferð er myndun COS sem veldur brennisteinstapi með koldíoxíðinu og mengar það.

Önnur leið er að þvo  $\text{H}_2\text{S}$  úr gasstraumnum með metýldíetanólamíni (MDEA). Með þessari aðferð næst  $\text{H}_2\text{S}$  nær alveg úr gasstraumnum en nokkuð koldíoxíð fylgir þó með því. Koldíoxíð má svo þvo með vatni úr því gasi sem afgangur verður. Þriðja leiðin sem hefur verið skoðuð er að aðskilja vetni úr gasblöndunni með himnum, þetta svo og eima gasblönduna sem eftir verður. Tiltölulega auðvelt virðist að ná um 99% hreinu koldíoxíði með þessari aðferð.

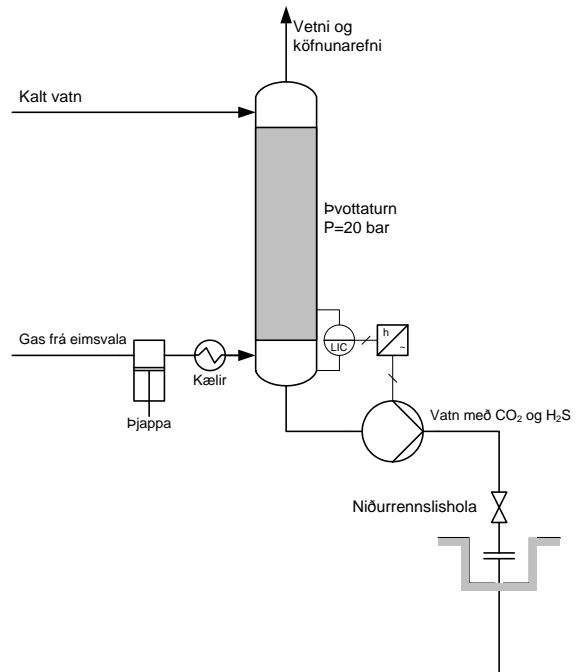
## 6. Umhverfisáhrif

Helstu óþéttanlegu gastegundir í jarðhitagufu eru koldíoxíð og brennisteinsvetni, en einnig er talsvert vetni í gufu á Hellisheiði. Koldíoxíð er gróðurhúsalofttegund, en útblástur hennar við framleiðslu orku úr jarðhita er umtalsvert lægri en ef notaðast er við jarðefnaeldsneyti. Þá eru einnig uppi kenningar um að koldíoxíð sem fer til loftis frá jarðhitavirkjunum hefði hvort sem er farið til loftis um jarðlög og að því breyti engu það magn sem frá þeim fari. Nú er koldíoxíð frá jarðhitavirkjunum ekki talið með í bókhaldi Íslands til IPCC [20].

Almennt er talið að brennisteinsvetni oxist í lofti í brennisteinsdíoxíð og valdi súru regni. Rannsóknir hér á landi hafa ekki staðfest þetta, heldur virðist þessi oxun vera mjög hæg og talið er líklegt að hún gerist fyrst eftir að brennisteinsvetnið hefur leyst upp í vatni, t.d. regni [21, 22, 23]. Brennisteinsvetni er eitruð gastegund með óþægilega stingandi lykt. Ef gasið er í miklum styrk dofna lyktarskynið og getur fólk lent í mikilli hættu þegar viðvörðunarkerfi lyktarinnar bregst. Lyktarmörk í lofti eru talin á bilinu 0,005-0,3 ppm, lyktarskyn minnkar strax við 0,07-0,7 ppm en hámarksstyrkur á vinnustað er 10 ppm fyrir 8 tíma vinnudag. Í Kaliforníu eru kröfur um að styrkur  $\text{H}_2\text{S}$  í andrúmslofti fari ekki yfir 0,03 ppm. Jafnframt eru þar kröfur til virkjana um að heildarútblastur  $\text{H}_2\text{S}$  frá þeim sé minni en 50 g  $\text{H}_2\text{S}$  fyrir hverja brúttó megawattsstund rafmagns (MWh<sub>e</sub>).

Súrefniseyðandi áhrif brennisteinsvetnis í vatni eru vel þekkt á Íslandi. Í grunnvatni má búast við sambærilegum áhrifum þ.e. að brennisteinsvetni hvarfist við uppleyst súrefni og eyði því og myndi um leið brennistein, sem fellur út. Talið er að megin hluti brennisteinsvetnis sem í dag fer til loftis frá jarðhitavirkjunum þvoist úr lofti með regni og oxist í brennistein eða brennisteinsdíoxíð og nýttist gróðri vegna mikillar dreifingar.

Mikið framboð er af brennisteini á heimsmarkaði og er stór hluti þess afurð frá hreinsun á olíu og gasi. Verð er lágt og engar líkur eru á því að hægt sé að afla tekna með sölu brennisteins til útflutnings. Gera verður því ráð fyrir að brennisteinn yrði urðaður. Samkvæmt reynslu af slíkum urðunarstöðum erlendis má búast við talsverðri súrnun grunnvatns og dæmi eru um sýrustig grunnvatns í nágrenni slíkra staða lægri en 0. Þá eru í nokkrum



Mynd 6. Niðurrennsli ferli fyrir  $\text{H}_2\text{S}$

tilfellum aukaefni saman við brennisteininn eins og vanadíum-, mangan og járnsambönd sem geta verið eitruð. Því verður að gæta nokkurrar varúðar við urðun brennisteins og velja urðunarstað af kostgæfni til að forðast mengun grunnvatns sem gæti haft áhrif á vatnstöku annars staðar.

Í aðalatriðum er möguleiki á niðurrennsli í jarðhitageyminn annað hvort með uppleystu brennisteinsvetni eingöngu, brennisteinsvetni blandað koldíoxíði eða með brennisteinssýrlingi, brennisteinssýru eða blöndu þeirra sem annað hvort er hlutleyst eða ekki. Líklegt er að minnst áhrif verði af niðurrennsli vatns með uppleystu brennisteinsvetni og/eða brennisteinsvetni og koldíoxíði þar sem þessi eru þá send óbreytt niður í jarðhitageyminn aftur. Ljóst er þó að þetta niðurrennslisvatn verður mjög súrt jafnvel eftir blöndun við skiljuvatn og getur leyst upp berg. Langtímaáhrif af slíku niðurrennsli er erfitt að sjá fyrir, en gæti til lengri tíma litið haft áhrif á efnasamsetningu borholuvökva.

## 7. Samanburður og kostnaður

Af þeim ferlum sem skoðaðir hafa verið til hreinsunar á brennisteinsvetni hafa nokkrir þegar verið afskrifaðir vegna kostnaðar. Stretford-, Sulferox-, vítissóða-, hýpóklórít-, kalíumpermanganat-, AMIS- og ósonferli hafa verið útilokuð vegna rekstrarkostnaðar. Claus-ferli eru talin erfið vegna byggingakostnaðar, sem og óvissu með förgun brennisteins. Eftir standa þá líffræðilegar hreinsunaraðferðir og niðurrennslisferli með vatni. Niðurrennslisferli krefst lítillar fjárfestingar og er líklegt að næsta skref verði að gera tilraun með niðurrennsli og kanna áhrif þess á jarðhitageyminn og grunnvatnskerfi með ferilprófunum.

## Heimildir

1. Umhverfisstofnun 2007. [www.ust.is/Mengunarvarnir/Loftgaedi/Brennisteinsvetni/](http://www.ust.is/Mengunarvarnir/Loftgaedi/Brennisteinsvetni/) sótt á vefinn í okt. 2007.
2. Sanopoulos og Karabelas 1997. *H<sub>2</sub>S Abatement in Geothermal Plants: Evaluation of Process Alternatives*. Energy Resources, **19**, 63-77.
3. Galeski og Ananth 1978. *Evaluation of H<sub>2</sub>S Control Technology for Geothermal Energy Sources*. Department of Energy, Division of Environmental Control Technology: DOE Contract No. **EE-77-C-02-4255**.
4. Greenhouse Gas Technology Center 2004. *Test and Quality Assurance Plan. Paques THIOPAQ and Shell-Paques Gas Purification Technology*. U.S. Environmental Protection Agency, USEPA-GHG-QAP-32.
5. Benschop A., Ghonim Z., Wolschlag L., & Heeringen G. 2004. *Biological Process Removes Sulfur from Three Refinery Streams*. ERTC 9<sup>th</sup> Annual Meeting, Prague.
6. Guðmundur Gunnarsson 2001. *Hreinsun afgass frá jarðvarmavirkjunum*. Orkuþing 2001.
7. Gabriel og Deshusses 2003. *Retrofitting existing chemical scrubbers to biotrickling filters for H<sub>2</sub>S emission control*. PNAS, vol. 100, no. 11, p. 6308-6312.
8. Stefán Arnórsson 2007. *Munnleg heimild*.
9. Baldacci, A. 2000. *Upplýsingar úr tölvupósti*.
10. Guðmundur Gunnarsson 1999. *Framleiðsla metanóls úr kolsýru frá Svartsengi*, Iðntæknistofnun.
11. Heisel, Kunkel, Nilsson og Eriksson 1999. *Operating Experience of CLINSULF-SDP for up to 99.85% Sulfur Recovery*. Reports on Science and Technology **61/1999**, 12-17.
12. Heisel 2007. *Upplýsingar úr tölvupósti*.
13. Laursen, J.K., 2000. *Budget Estimate covering one Topsøe WSA Plant for Sulphur Recovery from H<sub>2</sub>S Gas at Nesjavellir Thermal Power Plant Iceland*. Haldor Topsøe, Lyngby Denmark.
14. Laursen, J.K. 2007. *Upplýsingar úr tölvupósti*.
15. Þróstur Ottósson, 2007. *Claro E Puro. Kynningartexti um efnafræði ozóns til hreinsunar gastegunda*. Kúbik.
16. Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ozone> sótt á vefinn í október 2007.
17. Hibara, Tazaki og Kuragasaki 1990. *Recent Technology of Geothermal Power Plant*. Geothermal Resources Council TRANSACTIONS, Vol. **14**, Part II, 1015-1024.
18. Dalrymple, Petrinec og Seeger, Otterbeck og Matusc, 2004. *Treating H<sub>2</sub>S at Pressure*. Hydrocarbon Engineering Vol. **9**, July 2004.
19. Takahashi og Kuragaki 2000. *Yanaizu-Nishiyama Geothermal Power Station H<sub>2</sub>S Abatement System*. Proceedings World Geothermal Congress 2000, 719-724.
20. Umhverfisstofnun 2007. [www.ust.is/mengunarvarnir/hnattraenmengun/grodurhusaahrifin/utstreymisbokhald/](http://www.ust.is/mengunarvarnir/hnattraenmengun/grodurhusaahrifin/utstreymisbokhald/) sótt á vefinn í okt. 2007.
21. Grétar Ívarsson, Magnús Á. Sigurgeirsson, Einar Gunnlaugsson, Kristján H. Sigurðsson og Hrefna Kristmannsdóttir 1993. *Mælingar á gasi í andrúmslofti*. Orkustofnun og Hitaveita Reykjavíkur.
22. Hrefna Kristmannsdóttir 1997. *Umhverfisáhrif jarðhitánýtingar*. Orkustofnun, Hitaveita Reykjavíkur, Hitaveita Suðurnesja, Landsvirkjun og Umhverfisráðuneytið.
23. Jón Örn Bjarnason 1991. *Um sýrustig úrkomu í Svartsengi*. Orkustofnun.