



ORKUSTOFNUN

Auðlindadeild

Virkjun jarðhita með háa nýtni að markmiði

Samantekt unnin af KRETE ráðgjöf ehf

Einar Tjörvi Elíasson

Unnið fyrir Orkustofnun

OS-2005/022



Virkjun jarðhita með háa nýtni að markmiði

Samantekt unnin af KRETE ráðgjöf ehf


Einar Tjörvi Elíasson

Unnið fyrir Orkustofnun

OS-2005/022



ISBN 9979-68-170-5

Skýrsla nr.: OS-2005/022	Dags.: Ágúst 2005	Dreifing: Opin X Lokuð <input type="checkbox"/>
		Skilmálar:
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: VirkJun jarðhita með háa nýtni að markmiði. Samantekt unnin af KRETE ráðgjöf ehf.		Upplag: 50
		Fjöldi síðna: 26
Höfundar: Einar Tjörvi Elíasson		Verkefnisstjóri: Hákon Aðalsteinsson
Gerð skýrslu / Verkstig: Samantekt		Verknúmer: 3-034207
Unnið fyrir: Orkustofnun		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: Farið er yfir ýmsar leiðir til að auka nýtni háhita, bæði með hliðsjón af tækni og hagkvæmni. Þetta á einkum við þar sem ekki eru skilyrði til að nýta varmann sérstaklega í öðru skyni en til raforkuframleiðslu. Bent er á nokkrar leiðir til virkjunar í þrepum eftir hitastigi. Ef niðurdæling, þ.e. að skila því sem ekki er nýtt af varma og vökva aftur niður í jarðhita-kerfið, er fýsileg telst það einnig leið til að auka nýtni.		
Lykilorð: Háhiti, raforkuvinnsla, þrepavinnsla, nýtni, niðurdæling, tækni, hagkvæmni, hybrid (blönduð) tækni, binary (tvívökva) tækni		ISBN-númer: 9979-68-170-5
		Undirskrift verkefnisstjóra: 
		Yfirfarið af: HA/VS/FS/PI

SAMANTEKT

Í texta skýrslunnar eru skilgreind ýmis hugtök sem þar eru notuð og varða efni hennar. Það er bæði gert í eins konar sjálfsvörn höfundar, sem er ekki alltaf gjörkunnugur ríkjandi hugtökum, og eins til þess að auðvelda lesturinn.

Sjálfbærni er t.d. hugtak sem kemur við sögu og mjög margir eða jafnvel flestir skilja á mismunandi vegu. Eyðir höfundur því nokkru þúðri í að útlista eigin skilning á því, svo það sem á eftir fer verði síður misskilið.

Helsti áherslupunktur skrifanna er framleiðsla raforku úr jarðhitavökva af mismunandi hitabilum. Orkulindin (auðlindin) er lauslega skilgreind með þessa nýtingu í huga og helsta búnaði og aðferðum, sem tiltækar eru í þessu skyni, gróflega lýst. Í öllum tilvikum njóta íslenskar aðstæður forgangs.

Eitt mikilvægasta atriðið í tengslum við jarðhitanytingu er endurskil vökvans (niðurdæling) að varmanámi loknu. Lýst er með nokkurri nákvæmni þeim aðferðum sem mest eru í notaðar í dag, og farið yfir helstu kosti þeirra og galla. Ýmis vandamál er tengjast niðurdælingu eru dregin fram í dagsljósið og reynt að tilgreina mögulegar lausnir til þess að komast hjá neikvæðum afleiðingum niðurdælingar.

Við beina (stand-alone) framleiðslu raforku með jarðhita koma þrenns konar aðferðir helst til greina, ef litið er til hárrar nýtni bæði orkuvinnslu og tækjabúnaðar.

Þær eru:

- Ein- eða fjölsuðutækni (single or multiflash technology); hitabil 250°C–300°C
- Blönduð tækni (hybrid technology); hitabil 200°C - 300°C
- Tvívökva tækni (binary technology); hitabil 120°C - 200°C

Fyrstnefnda aðferðin er gjarnan kostnaðarminnst og einföldust. Nýtni orkuvinnslu með þessari tækni er alveg viðunandi.

Blönduð tækni gefur einna mestan sveigjanleika í rekstri og hæsta nýtni hvað orkuvinnslu varðar. Hún fellur líka mjög vel að niðurdælingu. Eitthvað er hún þó dýrari í fjarfestingu.

Tvívökvatæknin hefur takmarkað nýtingarsvið er hita varðar. Hún er almennt kostnaðarsöm í samanburði við tvær þær fyrrnefndu. Hún er einnig nokkuð flókin og dýr í rekstri, þegar hún er rekin með niðurdælingu.

Endurskil jarðhitavökvans niður í jarðhitageyminn, sem hann er upprunninn úr, er sú aðferð sem gera má ráð fyrir að verði ofan á í náinni framtíð. Það er að verða mun algengara í heiminum í dag að leyfi til nýtingar jarðhitasvæða séu bundin niðurdælingu. Niðurdæling hefur eftirfarandi kosti í för með sér:

- a) Hún viðheldur þrýstingi jarðhitageymisins og eykur varmanám úr jarðlögum. Hún lengir því nýtingartíma jarðhitasvæðisins (viðheldur sjálfbærni orkulindar)
- b) Hún er góð og virk leið til þess að losa sig við mengandi áhrif frá steinefnum og snefilefnum, sem eru í upplausn í vökvanum. Jafnframt útrýmir hún varmamengun að mestu frá heitum affallsvökvanum (gerir jarðhitavirkjanir umhverfisvænni)
- c) Óbein áhrif niðurdælingar vegna a) er sparnaður í borun og viðhaldsborunum, sem eykur fjárhagslega hagkvæmni.

Í öllum tilvikum á hönnun, skipulag og bygging orkuvera að framkvæmast í hæfilegum þrepum, til þess að tryggja sem allra best samþættingu nýtingar og getu orkulindarinnar.

EFNISYFIRLIT

SAMANTEKT.....	5
1 INNGANGUR.....	7
1.1 Tilurð verkefnisins.....	7
1.2 Skilgreiningar hugtaka.....	7
1.3 Sjónarmið sjálfbærrar nýtingar.....	8
2 GRÓFGREINING AUÐLINDAR MEÐ TILLITI TIL NÝTINGAR.....	8
3 NÝTING TIL FRAMLEIÐSLU RAFORKU EINNAR SÉR.....	9
3.1 Sjálfsuðu- eða raðkerfi (single or multi-flash systems).....	9
3.2 Blönduð kerfi (hybrid systems).....	11
3.3 Tvívökvakerfi (binary systems).....	12
4 SAMÞÆTT (INTEGRATED MULTIPLE) NÝTING, HÁ ORKUNÝTNI.....	14
5 ENDURSKIL VÖKVANS EFTIR VARMANÝTINGU (NIÐURDÆLING).....	16
5.1 Helstu markmið niðurdælingar.....	16
5.2 Tæknivandi tengdur losun á affallsvökva og -gasi.....	17
5.2.1 Losun vatnsfasans.....	17
5.2.2 Losun gashlutans.....	19
6 HAGKVÆMI.....	20
6.1 Forsendur kostnaðarskiptingar.....	20
6.2 Forsendur hagkvæmi.....	21
6.3 Möguleg áhrif hánýtni á hagkvæmi.....	21
7 HELSTU NIÐURSTÖÐUR.....	23
8 HEIMILDASKRÁ.....	24

1 INNGANGUR

1.1 Tilurð verkefnisins

Þann 29. september 2004 kom Hákon Aðalsteinsson, deildarstjóri auðlindaeildar Orkustofnunar að máli við höfund og bað hann að taka að sér að gera úttekt á möguleikum þess að bæta orkunýtni þeirra lausna sem tíðkast við virkjun á jarðhita umfram það sem almennt gerist á Íslandi í dag.

Fyrst og fremst var ákveðið að beina athyglinni að eftirtöldum atriðum:

1. Beinni framleiðslu raforku úr jarðhita með meðalháu og háu varmainnihaldi
2. Samþætta fjölnýtingu jarðhita til framleiðslu raforku og heits vatns til annarra nota
3. Möguleg áhrif þess á nýtni að skila ónýttum varma aftur niður í sama jarðhitakerfi
4. Tæknilegum lausnum í þessu skyni
5. Áhrifum sjálfbærni á það úrval tæknilausna sem tiltækar eru
6. Tæknilegum vandamálum sem tengjast bættri orkunýtni
7. Hagkvæmnisáhrifum og mögulegum kostnaðarauka, sem þeim væri samfara

1.2 Skilgreiningar hugtaka

Áður en lengra er haldið er nauðsynlegt að fjalla lítils háttar um hvað liggur að baki helstu hugtökum, sem notuð verða í þessari úttekt.

Þegar fjallað er um jarðhita á vísindalegum nótum er deiling jarðhitans í lághita, meðalhita eða háhita almennt byggð á hita hans innan vissra dýptarmarka í jarðlögum (oft 2.000 m). Þessi umfjöllun kemur aftur á móti eingöngu til með að beinast að nýtingu jarðhitans, eða réttara sagt varmainnihaldi jarðhitavökvans, til framleiðslu raforku beint eða í tengslum við fjölnýtingu og verða hér því notuð önnur og grófari viðmið.

Með beinni nýtingu jarðhita til raforkuframleiðslu er átt við að hann sé til þess eins notaður að framleiða rafmagn. Affallsvökvannum er fargað á yfirborði eða honum dælt aftur niður í jarðlögin og varminn sem í honum felst því ekki virkjaður á annan hátt. Dæmi um slíkt er Kröfluvirkjun.

Fjölnýting jarðhita felur hinsvegar í sér að jarðhitinn frá sama jarðhitageymi sé ýmist raðnýttur eða samhliða nýttur til margra hluta. Þar má t.d. nefna samnýtingu hans í Svartsengi til að framleiða raforku í tveimur þrepum, og samfara því að nota hann til upphitunar og til baða. Eins má nefna raðnýtingu hans til upphitunar híbýla, gróðurhúsa, þurrkunar o.fl. í Hveragerði.

Samhæfð fjölnýting (multiple integrated use) jarðhita felur í sér að nýta hann með öðrum orkugjöfum eins og t.d. metangasi frá öskuhaugum, brennslu sorps, afgangsvarma frá frystihúsum og öðrum iðnaðarverum eða án annarra orkugjafa til ýmis konar samnýtingar.

Í öllum framangreindum tilfellum er miðað við háþröðun nýtni og fjárhagslegrar arðsemi í sem fyllstri sátt við náttúruna og sjónarmið sjálfbærni.

Hugtakið nýtni í þessum skrifum þýðir hve stór hundraðshluti af hreinni (nettó) varmaorku jarðvökvans er nýttur til orkuframleiðslu. Með hreinu varmainnihaldi er átt við:

- a. Varmainnihald vökvans eins og það er mælt á holutoppi mínus varmainnihald vökvans sem skilað er aftur, ef um niðurdælingu er að ræða;

- b. Varmainnihald vökvans eins og það mælist á holutoppi mínus varmainnihald hans miðað við ársmeðaltal hita á virkjunarstað, ef vökvannum er fargað á yfirborði.

Einkunnarorð orkuframleiðslu nútímans er sjálfbærni. Höfundur telur það ekki innan ramma þessarar umfjöllunar né heldur telur hann sig hæfan til að hætta sér inn á heimspekilega umfjöllun um þetta hugtak, sem er afar víðfeðmt og ekki endanlega skilgreint svo allir séu á eitt sáttir.

Upphaf þessa hugtaks má rekja til hinnar þekktu skýrslu frú Gro Harlem Brundtland frá árinu 1987, en þar segir „...sjálfbær nýting orkulinda er nýtingarmáti, sem mætir þörfum dagsins í dag án þess að stefna í hættu möguleikum komandi kynslóða til að mæta væntanlegum þörfum sínum“.

1.3 Sjónarmið sjálfbærrar nýtingar

Þar sem ekki er fyrir hendi samræmd skilgreining á sjálfbærni, sem áður sagði, mun höfundur láta sér nægja að setja fram hér skilning sinn á sjálfbærni er varðar auðlindina sjálfa, umhverfið og fjárhagslega arðsemi, sérstaklega með jarðhita í huga:

- a) **Sjálfbær nýting auðlindar:** Hún felur það í sér að valinn sé sá nýtingarmáti orkuforða auðlindarinnar sem best samræmist hagkvæmni og löngum endingartíma hennar í góðri sátt við umhverfið. Þetta þýðir einfaldlega að tryggja þarf á hverjum tíma sem allra mesta orkunýtni nýtingarkerfisins og gott samspil milli orkunotkunar og orkutöku.
- b) **Umhverfið:** Sjálfbær nýting jarðhitaauðlindar gerir þær kröfur að hún eigi sér stað á þann hátt að sem allra minnst skaðleg áhrif verði þar af á umhverfið, dýra- og plöntulíf og það annað sem gefur því sérstöðu til langs og skamms tíma lítið.
- c) **Fjárhagsleg hagkvæmni:** Sjálfbærni krefst þess að reynt sé að ná fram þeirri bestu fjárhagslegu arðsemi sem virkjun téðrar auðlindar leyfir innan þeirra marka sem skilyrði a) og b) setja henni.

Fyllilega sjálfbærri orkuframleiðslu telur höfundur aðeins náð séu öll framangreind skilyrði uppfyllt.

2 GRÓFGREINING AUÐLINDAR MEÐ TILLITI TIL NÝTINGAR

Mikilvægasti eiginleiki jarðhitavökvans, hvað nýtingu varðar, er hitastig hans (varmainnihald). Til framleiðslu rafmagns með nútíma tækni er nýtanlegt hitasvið gróflega frá 120°C til 300°C. Efra hitamarkið tekur mið af efnafræðilegum aðstæðum, þar sem efnainnihald vökvans virðist taka afgerandi breytingum til verri vegar í kringum 300°C. Neðra markið 120°C tekur aftur á móti mið af varmataknilegum aðstæðum og hagkvæmni.

Þessu nýtanlega hitasviði má skipta í þrjú nýtingarsvið hvað raforkuframleiðslu varðar:

- Raforkuframleiðsla í sjálfsuðu- eða (single or multi-flash system) raðkerfi, þ.e. 250°C–300°C.
- Raforkuframleiðsla í blönduðu kerfi (hybrid system), þ.e. 200–300°C.
- Raforkuframleiðsla í tvívökvakerfi (binary system), þ.e. 120°C–200°C.

3 NÝTING TIL FRAMLEIÐSLU RAFORKU EINNAR SÉR

Leiðir til slíkrar framleiðslu á raforku má hugsa sér á marga vegu. Við hönnun elstu jarðhitavirkjananna var mjög lítið vægi lagt á nýtni og sjálfbærni auðlindarinnar. Mestrar athygli nutu önnur vandamálu sem tengdust virkjun jarðhitans, enda hafði aldalöng nýting hans verið handahófskennd og mest bundin við lághitanýtingu (50°C–u.þ.b. 100°C) til suðu á mat, til þvotta, í heilsuþöð, við pappírsgerð, framleiðslu brenni-steins og bórs, og að litlu leyti til hitunar á húsnæði.

Þessi reynsla olli því að athygli tæknimanna á þessu sviði beindist fyrst og fremst að efnisvali, lausn bortækni-, tæringar- og úrfellingarvanda, þegar til þess kom að áhugi vaknaði á því að nýta jarðhita með hærra varmainnihaldi.

Hugur jarðvísindamanna beindist á þeim tíma fyrst og fremst að því að leita aðferða til þess að finna jarðhitann í jörðu niðri með ýmsum vísindalegum aðferðum, skilja betur eðlis- og efnafræðilegt eðli jarðlaga og jarðhitavökva og hegðun vökvans.

Á síðasta áratug hafa þessi viðhorf breyst og nú er vaknaður talsverður áhugi á bættri nýtni og leiðum til að geta orðið við háværum kröfum umheimsins um sjálfbærni án þess þó að missa sjónar á eðlilegri arðbærni og viðskiptalegri hagkvæmni.

Hér verða gefin nokkur dæmi um kerfi til framleiðslu á raforku með jarðhita sem gera mögulegt að auka nýtni fram yfir það sem almennt tíðkast í dag.

3.1 Sjálf-suðu- eða raðkerfi (single or multi-flash systems)

Sjálf-suða (flashing) á sér stað þegar þrýstifall verður í yfirhituðu vatni (jarðhitavökva), þ.e. vökvinn umbreytist í blöndu af gufu og vökva, þannig að vergt varmainnihald blöndunnar haldist stöðugt. Þannig eykst hlutfall gufu á kostnað vatns á leiðinni upp holuna.

Við virkjun jarðhita í sjálf-suðu- og/eða raðkerfi er blandan úr holunni leidd í gegnum gufuskiljur, sem hafa það hlutverk að skilja að vökva og gufu áður en nýting fer fram. Í raðkerfi fer þessi suða oftast fram í tveimur eða fleiri þrýstiprepum (multi-flash system), þar sem það eykur almennt virkni (separation efficiency) skiljunnar.

Áður fyrr var gufan frá hverju skiljubrepi (þrýstiprepi) fyrir sig leidd inn á sérstakan gufuhverfil (Wairakei, Nýja Sjálandi), sem reyndist dýrt í fjárfestingu og rekstri, viðkvæmt fyrir breytingum á gufuþrýstingi frá jarðhitasvæðinu og fremur erfitt í stýringu. Þetta er að vísu háð því að varmainnihald vökvans frá borholunum breytist lítið sem ekkert með tíma. Nú á dögum eru framleiddir margþrepa gufuhverflar, sem geta tekið inn á sig fleiri en eitt þrýstiprep (Kröfluvirkjun 2 þrep). Þessi útfærsla reynist ódýrari í fjárfestingu og rekstri, lægri í mannaflapörf til viðhalds og rekstrar, sveigjanlegri gagnvart breytingum í gufuþrýstingi og hæfari í stýringu.

Með stýringu er hér átt við að stilla saman þarfir markaðarins og sjálfbæra getu, og draga þannig úr niðurdrætti í jarðhitageyminum, og stuðla að vörslu auðlindarinnar.

Helstu takmarkanir slíkra virkjana tengjast hita jarðhitakerfisins og efnafræði jarðhita-vökvans. Hiti vökvans er mikill áhrifavaldur við virkjun í jarðhita. Hann hefur bein áhrif á efnasamsetningu vökvans, þrýstieiginleika hans og fastefna- og gasinnihald. Virkjanir af þessum toga eru almennt ekki hagkvæmar nema fyrir vökva á hitasviðinu 250°C til 300°C. Ofan efri markanna verður efnafræðin flókin og erfið viðureignar; neðan þessa bils fer þrýstingurinn að hafa fjárhagsleg áhrif. Fjárfestingarkostnaður gufuhverfla og rafala er í beinu hlutfalli við massa búnaðar/orkugetu, þ.e. tonn/MW orku. Því lægri sem þrýstingurinn er því stærri þarf búnaðurinn að vera fyrir sömu orkugetu, sem stafar af

því að eiginrými gufunnar (sami massi af lágþrýstri gufu þarf meira rými en af háþrýstri gufu) hækkar með lægri þrýstingi.

Helstu tæknilegu takmarkanir á niðurdælingu afgangsvökva frá skiljum eru aðallega efnafræðilegs eðlis. Við ofangreint hitabil er ástæðan í höfuðatriðum útfellingarmörk kísils. Við það að stærsti hluti vatnsfasans í jarðhitavökvanum er soðinn burt sem gufa getur afgangsvökvinn náð yfirmettunarstigi, hvað kísil varðar. Við það myndast umtalsverð hætta á útfellingu kísils við frekari kólnun vökvans á leið hans t.d. niður í jarðhitageyminn. Útfellingin getur átt sér stað í niðurdælingarkerfinu (dælum og pípum) á yfirborði og, það sem verra er, í fóðringum holunnar og jafnvel í jarðlögnum næst holunni. Mörg dæmi eru um slíkt erlendis frá fyrstu árum niðurdælingar.

Ýmsar aðferðir hafa verið reyndar á undanförunum tveimur áratugum eða svo til þess að komast fyrir þetta vandamál. Það sem best hefur reynst er:

- a. Notkun svonefnda fjölliðunartanka (Sjá umfjöllun í kafla 5.1.);
- b. Bein niðurdæling frá skiljum (Sjá umfjöllun í kafla 5.2.);
- c. Draga má úr útfellingu með stýringu sýrustigs (Sjá umfjöllun í kafla 5.3.).

Aðferð a) hefur þá kosti að hægt er að nota stærri hluta varmans frá jarðhitageyminum, en á móti kemur að minna verður eftir til niðurdælingar; og fjármögnun og rekstrar-kostnaður eru hærri.

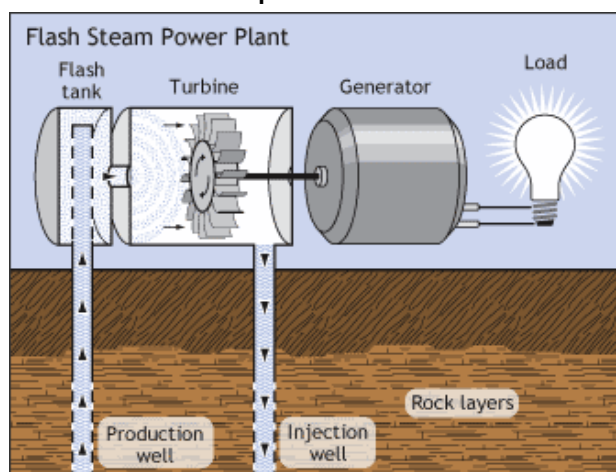
Notkun aðferðar b) hefur í för með sér að dæla verður niður vatninu við háan hita beint frá skilju. Þetta takmarkar mjög varmamagnið sem nýta má frá hverri holu, sem þýðir að fleiri holur þarf að bora til að ná sömu orkuframleiðslu og því verður fjármagns-kostnaður hærri.

Með aðferð c) er almennt ekki þörf á að dæla vatninu til baka með alveg eins háum hita og í tilfelli b). Reynt hefur verið að blanda skiljuvatnið með þéttivatni frá eimsvölum, sem í flestum tilvikum þýðir að nota þarf vatnskælda eimsvala. Til þess að nýta þennan möguleika þarf að hafa aðgang að nógu köldu vatni eða sjó, en það er óvída fyrir hendi. Mun algengara er að háhiti og þurrð kalds vatns fari saman og nota þurfi loftdrifna kælitækni (kæliturna). Algengara er því að nota til þessa aðkeypt tafaefni (hemilefni) en það eykur kostnað og minnkar öryggi við rekstur slíkra virkjana.

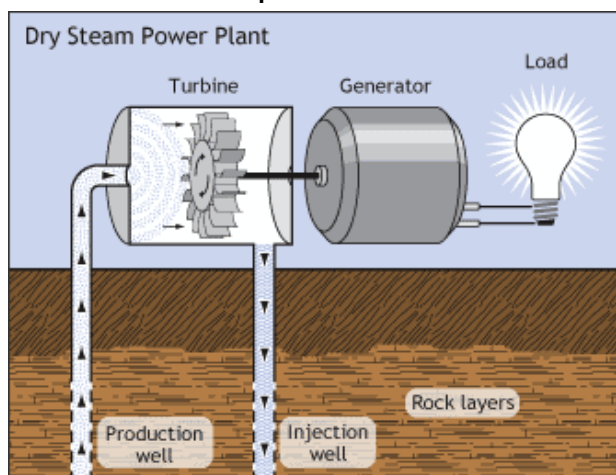
Á stöðum þar sem farga má vatni frá skiljustöð á yfirborði er hægt að ganga mun nær útfellingarmörkum, sem veldur því að kreista má meiri varma úr jarðhitavökvanum frá hverri vinnsluholu.

Hvað varðar fjárhagslega hagkvæmni er mikilvægt að ná sem mestum varma úr vökvanum, þar sem það hefur bein áhrif á holufjölda. Þar sem niðurdæling er með í myndinni, má reikna með því að holukostnaður sé á bilinu 50–70% virkjunarkostnaðar, en við 35–45% sé leyfilegt að farga afgangsvatninu beint á yfirborði.

Einföld mynd af hefðbundnu einsuðukerfi (single flash system)
Eftir: prof. John Lund



Einföld mynd af hefðbundnu þurrugufakerfi (dry steam system)
Eftir: prof. John Lund



3.2 Blönduð kerfi (hybrid systems)

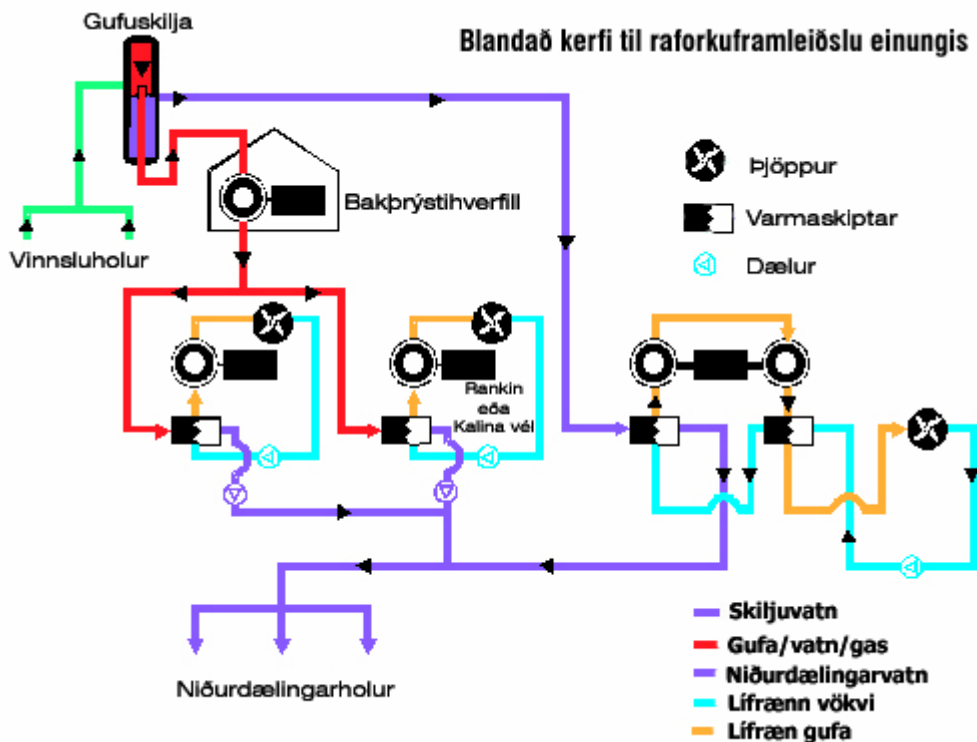
Nokkrar útgáfur eru til af blönduðu kerfi til framleiðslu á raforku. Í flestum tilvikum byggja þær á því að nýta í fyrsta lagi gufu, sem framleidd er með sjálfsuðu einni og í einþrepa skiljustöð, en í öðru lagi á því að nýta varmainnihald affallsökvans frá skiljustöð sér. Gufan er þá nýtt beint í gufuhverfli, sem ýmist er a) bakþrýstihverfill eða b) hefðbundinn hverfill með eimsvala.

Í tilfalli a) er vot gufan frá hverflinum venjulega nýtt áfram í tvívökvakerfi. Aðferð b) þýðir aftur á móti að gufan er fullnýtt í gufuhverflinum. Í báðum tilvikum er varmi affallsökvans nýttur sem aflgjafi tvívökvastæðu.

Hvor leiðin er valin fer mjög eftir staðbundnum aðstæðum er tengjast fjárhag, markaði og eiginleikum auðlindarinnar sem fyrir hendi er á staðnum. Því verður að reikna út í hverju tilviki hver ofangreindra leiða skuli valin.

Óhætt er þó að halda því fram að notkun raðtengds bakþrýsti- og tvívökvakerfis á gufuhlið framleiðslunnar getur mjög oft leitt til aukinnar nýtni og sveigjanleika fram yfir leið b).

Myndin hér að neðan sýnir mögulega útfærslu af þessari tegund, þar sem höfuðáhersla er lögð á háa nýtni.



Í framangreindri útfærslu er öllum affallsvökva frá virkjun dælt til baka niður í jarðhitageyminn. Eins má sjá að hún nýtir sömuleiðis þéttivatnið (frárennsli bakþrýstihverfilsins) frá gufuhlið kerfisins á einstaklega slyngan máta til þess að stilla sýrustig vökvans, sem dælt er niður, og þannig draga úr útfellingu við niðurdælingu.

3.3 Tvívökvakerfi (binary systems)

Útfærslur byggðar á hreinu tvívökva kerfi hafa fram til þessa verið heldur sjaldgæfar sem sjálfstæðar (stand-alone) raforkuvirkjanir í jarðhita. Slíkt er þó að færast í vöxt, sérstaklega í Þýskalandi, sökum hins óheyrilega háa verðs (24 evru cent /kWh) sem þar er greitt fyrir raforku sem framleidd er úr 'grænum' orkugjöfum eins og jarðhita.

Hugmyndin um að nota tvívökvakerfi á sér nokkuð langa sögu, en fyrstur til að viðra hana var Sveinn heitinn Einarsson, verkfræðingur, þegar hann vann á vegum Sameinuðu þjóðanna í El Salvador á sjöunda áratug síðustu aldar. Á þeim tíma var eina þekkt og reynda aðferðin til þess að virkja jarðhita til raforkuframleiðslu, sú sem um er fjallað í kafla 3.1 hér að framan. Hún var fyrst tekin upp í Lardarello á Ítalíu á öðrum til þriðja áratug tuttugustu aldar, sem frægt er orðið. Mikið er af auðugum jarðhitasvæðum víða um heim sem nýtast ekki sem skyldi sökum lágs hitastigs og þrýstings auðlindarinnar og takmarkaðs markaðar fyrir aðra orku en raforku.

Þetta var kveikjan að hugmynd Sveins heitins, sem til allra heilla lenti ekki alveg í gleymskuskjóðunni, þótt hún fengi heldur lítinn hljómgrunn á sínum tíma við nýtingu jarðhita.

Það sem takmarkar framleiðslu á gufu úr jarðhitavökva á hitabilinu 120°C til 200°C er fyrst og fremst hinn lági sjálfsuðubrýstingur og hin háa eiginrýmd sem því fylgir. Hvortveggja hefur það í för með sér að gufuhverflar til þess að nýta slíka gufu þyrftu að vera mjög stórir og sömuleiðis allar gufulagnir. Önnur afleiðing er afar lág nýtni sem

slíkum vélum er eiginleg. Ýmsar aðrar ástæður og ekki síður alvarlegar mætti og nefna, en það verður látið eiga sig í þessum skrifum. Nægjanlegt er að segja að þörf var nýrrar tækni til þess að leysa þetta mál, og með henni rann upp skeið tvívökva kerfanna.

Í höfuðatriðum eru á markaðinum tvenns konar tvívökva kerfi, þ.e. (Organic Rankin Cycle) ORC-ferli og Kalina-ferli. Bæði byggja þau á notkun vökva á hitabilinu 120°C til 180°C, t.d. affallsvatni frá orkuverum eða jarðhitavökva sem frumorkugjafa. Sumir framleiðendur slíks búnaðar halda því fram að jafnvel sé hægt að nýta vökva með lægri hitamörkum en hér eru tilgreind (80°C–90°C) en reynslan sýnir að þetta er alla vega ekki byggt á rökum, sem þola rýni hagkvæmninnar. Framangreint hitabil (120°C–200°C) má líta á sem eins konar hagkvæmnisvið tvívökvavirkjana í jarðhita, og er byggt á reynslu af rekstri slíkra kerfa. Önnur hagkvæmnibil gilda í hita, þegar frumorkugjafinn er ekki jarðhiti, heldur t.d. úrgangsvarmi frá kjarnorkuverum sem þarf að eyða og af þeim sökum lúta öðrum hagkvæmnisjónarmiðum.

Í tvívökvakerfum er varmaorka frumorkugjafans færð yfir í drifvökvann (binary fluid) með varmaskiptum, og drifvökvinn síðan nýttur til að drífa hverfil/rafal samstæðuna. Val drifvökva er mjög mikilvægt til þess að ná sem hæstri nýtni, og valið ræðst mjög af hita þeirrar auðlindar, sem á að virkja. Drifvökvinn, sem notaður er í ORC-kerfinu er kolvetnasambönd, sem hafa hvert sitt kjörhitabil (optimal temperature range) og þarf því að vanda val þeirra vel. Kalína-kerfið notar aftur á móti ammoníakblöndu og þar er það vatns/ammoníum hlutfallið sem þarf að stilla til þess að það falli að hitabilinu og sem hæst nýtni náist.

Höfuðmismunur áðurnefndra teggja kerfa liggur í drifvökvanum, sem notaður er og í þensluferli vélanna:

Kalina-kerfið er betrubætt ORC-kerfi og byggir á ammoníakblöndu sem drifvöka og notkun millihitara (regenerators) til þess að eftirlíkja Carnot-þensluferlinu (the theoretical or Carnot expansion cycle) sem best.

Notkun ammoníaksblöndu sem drifvökva ljær Kalínavélinni meiri sveigjanleika en mögulegur er með kolvetnisblöndum ORC vélanna. Ammoníak veldur ekki gróðurhúsaáhrifum, er ekki eldfimt, og er heldur auðvelt í notkun. Þó verður að gæta þess að það getur valdið eitrun, ef ekki er nægjanlega vel séð fyrir loft-ræstingu lokaðra rýma.

Á hitabilinu 140°C til 290°C gefur Kalínavélin umtalsvert eða allt að 50% hærri nýtni en ORC-vélin. Á móti kemur að vélin er nokkru flóknari í rekstri og eitthvað hærri í verði. Kalína-kerfið er tiltölulega nýtt fyrirbrigði í jarðhita og reynsla af notkun vélarinnar ekki mjög löng.

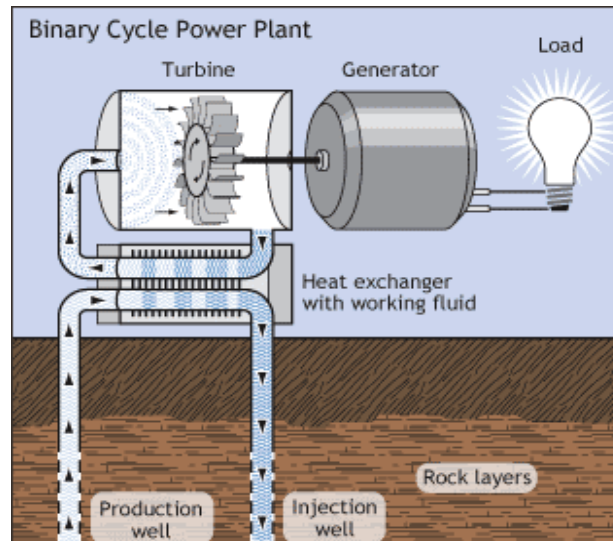
Organic Rankin Cycle eða ORC-kerfið byggist á lífrænum vökvum eins og t.d. ísóbútan, eða ísóprópan o.fl. sem drifvökva og Rankin-þensluferlinu (the isentropic expansion cycle).

Kolvetnissamböndin sem notuð eru sem drifvökvi í ORC-kerfinu eru flest eldfim og sum valda gróðurhúsaáhrifum, þótt segja megi að með tilkomu nýrra sérhannaðra drifvökva sé þessi áhætta að mestu úr sögunni.

Stærsti kostur ORC-vélanna er einfaldleiki, framleiðendur eru fjölmargir (t.d. Ormat, Ísrael; Turboden, Ítalíu; Fuji, Japan o.m.fl.). Reynslan af notkun þeirra er löng og í flestum tilvikum góð. Ormat hóf t.d. að selja ORC-vélar til jarðhitánýtingar á áttunda áratug tuttugustu aldar, og nú er síkar vélar mjög víða að finna um heim allan.

Á næstu síðu er sýnd einföld mynd af vinnsluhluta tvívökva-kerfis.

Einfölduð mynd af tvívökva ORC-kerfi (binary cycles). Eftir: prof. John Lund



4 SAMÞÆTT (INTEGRATED MULTIPLE) NÝTING, HÁ ORKUNÝTNI

Best orkunýting og þar með sjálfbærni frá sjónarmiðum auðlindar, umhverfis og fjárhagslegrar hagkvæmni, fæst þar sem markaður er fyrir hendi fyrir margþætta orkunotkun. Þegar þannig háttar til er grundvöllur fyrir því að þrjóna saman margs konar orkunotkun í eitt samþætt (integrated) kerfi.

Samþætt nýting getur bæði þýtt samþættun fleiri en eins orkugjafa fyrir samskonar nýtingu, eða fleiri en ein tegund nýtingar séu tengdar á einn og sama orkugjafann.

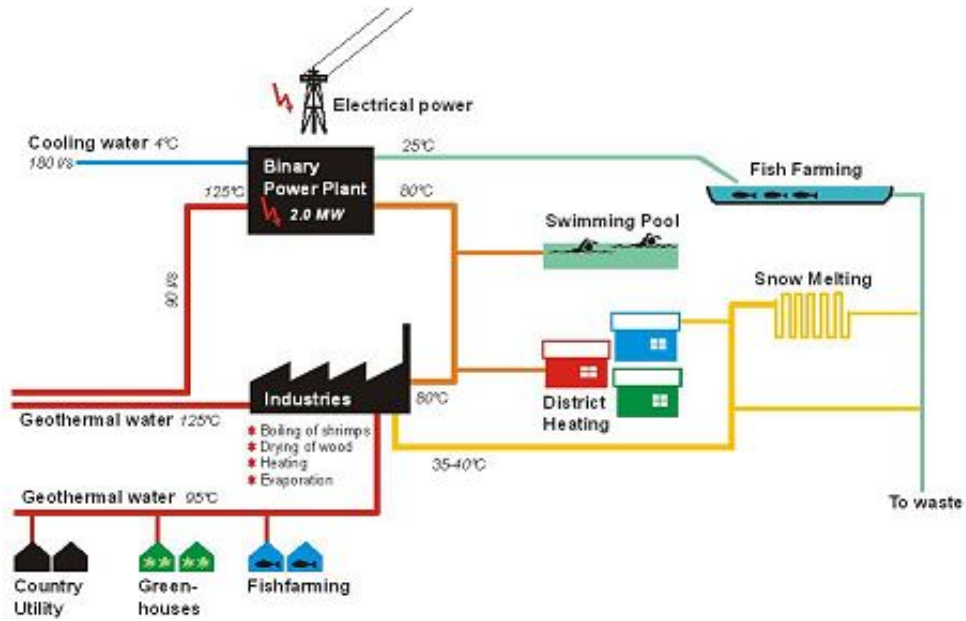
Dæmi um það fyrra er t.d. að samþætta jarðhitanýtingu og jarðgas eða lífmassa til að framleiða raforku.

Dæmi um hið síðarnefnda er Húsavíkur-orkuverið. Þar er 124°C heitt vatn frá Reykjahverfi leitt til Húsavíkur og það notað til þess að framleiða raforku í Kalína-vél. Frárennslið frá henni ca. 72°C heitt er notað í hitaveitu og sundlaug bæjarins, og einnig til þurrkunar. Eitthvað af 100°C vatni er leitt framhjá og það notað við rækjuvinnslu. Ferskvatn er notað til þess að þétta ammoníaksblönduna í vinnslukerfi Kalínavélarinnar og frárennslið frá kælinum notað til þess að verma eldisvatnið í silungseldisstöð utan við bæinn.

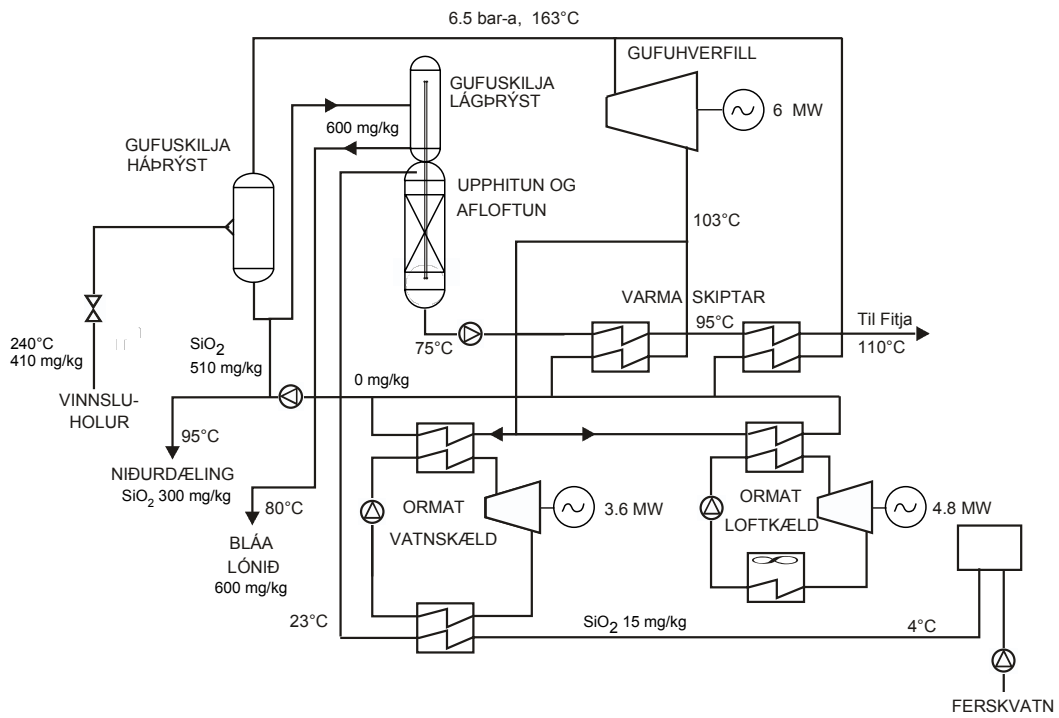
Frárennslið frá raforkuverum á háhitasvæðum er ekki hægt að nýta beint nema í mjög sértækum tilvikum, eins og til dæmis til þurrkunar. Vökvann er samt sem áður hægt að nota beint til upphitunar á ferskvatni, sem síðan má nýta á ótal vegu t.d. til húshitunar (Orkuveita Reykjavíkur (Nesjavellir) og Hitaveita Suðurnesja hf. (Svartsengi) til ræktunar á vatnarækju o.fl. Ástæðan fyrir því að ekki má nota vökvann beint er hið háa steinefna- og gasinnihald hans, en sum þeirra efna eru hættuleg lifandi verum. Kísiloxíð (SiO₂) í frárennsli Svartsengis nemur t.d. um 410 mg/kg.

Samþætt fjölnýting jarðhita er farin að ná fótfestu í orkuskipulagi á heimsvísu og á eftir að aukast er tímar líða fram.

Á næstu síðu eru myndir af vinnslukerfunum á Húsavíkur og í Svartsengi.



Sambætt nýting jarðhita hjá Orkuveitu Húsavíkur



Svartsengisstöðin

5 ENDURSKIL VÖKVANS EFTIR VARMANÝTINGU (NIÐURDÆLING)

Með niðurdælingu er vökva frá skiljustöðvum, þéttivatni jarðhitavirkjana og bakrásarvatni skilað aftur niður í viðkomandi jarðhitakerfi. Þar sem náttúrulegt aðstreymi er tregt, er vatni af öðrum uppruna stundum dælt niður í þau til viðhalds þrýstingi og er niðurdæling nú orðin fastur og oft lykilþáttur í rekstri jarðhitakerfa víða um heim. Endurskil jarðhitavökvans eftir nýtingu með niðurdælingu eru þó enn lítið stunduð á íslenskum jarðhitasvæðum. Á allra síðustu árum hefur þó nokkur breyting orðið þar á til batnaðar.

Einnig þarf að hafa í huga ýmis vandamál tengd niðurdælingu til langs tíma ásamt auknum stofn- og rekstrarkostnaði.

5.1 Helstu markmið niðurdælingar

Höfuðástæða þess að í upphafi var byrjað að dæla niður affalsvökva frá jarðhitavirkjunum, árið 1969 á Ahuachapan-svæðinu í El Salvador, voru vandamál og kostnaður samfara förgun hans á yfirborði. Sem dæmi um vandamál og kostnað sem tengst getur yfirborðsförgun affalsvatns frá jarðhitaverum, má geta þess að í tvo áratugi varð að leiða affallsvökvann frá Ahuachapan-virkjuninni í El Salvador eftir 45 km löngum stokki út í Kyrrahafið með gífurlegum tilkostnaði. Það er gert til þess að forða kaffiekrum í grenndinni frá mengun. Síðar urðu umhverfismál meira og meira ráðandi þar um, þ.e. að forðast efna- og varmamengun sem förgun á yfirborði getur fylgt.

Það kom snemma í ljós með mælingum t.d. í El Salvador, á Filippseyjum og í Japan að niðurdæling hafði einnig í för með sér þrýstiaukningu í jarðhitakerfinu. Það varð til þess að farið var að íhuga niðurdælingu með það einnig í huga að viðhalda þrýstingi í jarðhitakerfum. Líkanreikningar sýndu að niðurdæling viðheldur þrýstingi með því að auka við innstreymi í jarðhitakerfi og bætir upp vatnsskort í kerfum þar sem náttúrulegt innstreymi er takmarkað. Enn einn kostur sem henni fylgir er að hún vinnur varma úr bergi jarðhitakerfa umfram það sem leiðir af hefðbundinni vinnslu og bætir þannig nýtingu jarðhitans og stuðlar að sjálfbærri nýtingu auðlindarinnar.

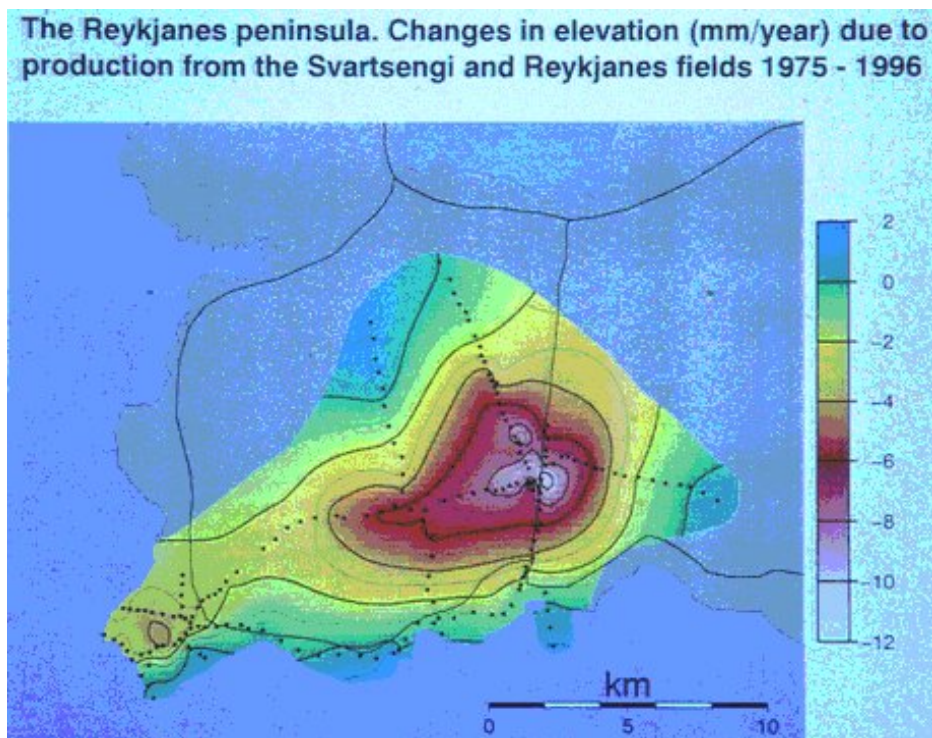
Einn af fylgifyiskum þess að vinna jarðvarma úr jarðlögum er oft á tíðum landsig. Niðurdæling er mjög virk og mikið notuð leið til þess að hamla gegn slíku.

Vökvinn sem dælt er niður getur verið af mismunandi uppruna:

- Affall frá skiljustöðvum og þéttivatn frá orkuveri
- Grunnvatn og/eða yfirborðsvatn
- Bakrásarvatn frá fjölnýtingu og/eða beinni notkun
- Affallsvatn af öðrum uppruna (jafnvel hreinsað skólþ, Geysir-svæðið).

Áður en ákveðið er að leggja út í niðurdælingu er mjög mikilvægt að rannsaka hvar best er að staðsetja slíkar holur svo þær valdi ekki kólnun vinnsluholna virkjunarinnar. Til þess eru í dag notuð hermílíkön og hefur það reynst vel.

Kólnun í vinnsluholum varð til dæmis til þess að niðurdælingu var hætt um langa hríð í Achuachapan og svipað átti sér stað í Hachubaru í Japan í lok áttunda áratugar tuttugustu aldar. Á Geysir-svæðinu í Kaliforníu (1970) og á Lardarello-svæðinu á Ítalíu (1974), sem bæði eru þurrgefufu svæði, var tekin upp niðurdæling til förgunar þéttivatns. Upphaf niðurdælingar á Íslandi má svo telja í Svartsengi 1984.



Landsig á Svartsengis-svæðinu

5.2 Tæknivandi tengdur losun á affallsvökva og -gasi

Losun affallsvökva frá jarðhitaverum og þá helst virkjunum er alls ekki vandalítill eins og greinilega kemur fram hér að ofan. Eitt af vandamálunum er hið mikla magn sem um er að ræða. Gufuhluti jarðhitavökvans er á bilinu 20% til 95% og oft breytilegur frá holu til holu. Á Íslandi mun hlutfallið geta numið gróflega 30%–50% að meðaltali og fer það mjög eftir hitastigi vökvans, leiðni jarðlaga og dýptarbili vinnsluhluta hvers svæðis fyrir sig. Gróflega metið má því segja að ársmagnið af affallsvökva sé á bilinu 125–200 þúsund tonn/MW raforku og er meðalhiti þess um 120°C. Þetta er umtalsvert magn að losa á yfirborði og gæta verður þess að því fylgir umtalsverður gufumökkur.

Langt er líka frá, að eitt og hið sama gildi um losun á vatnsfasa jarðhitavökvans og gasfasa hans. Fjallað verður því um hvort fyrir sig í sérstökum köflum. Stiklað verður á stóru, og aðeins þau atriði sem helst gætu átt við á Íslandi tekin fyrir.

5.2.1 Losun vatnsfasans

Eins og áður hefur að nokkru verið dregið á, er losun vatnsfasans frá virkjunum í höfuðdráttum tvennskonar: 1. Bein losun á yfirborði og 2. Niðurdæling.

1. Bein losun á yfirborði
 - a) Í yfirborðstjarnir (t.d. Svartsengi, Cerro Prieto í Mexíkó, og víðar).
 - b) Beint út í ár, læki eða hraunsvelgi (t.d. Krafla, Nesjavellir, Wairakei) og niður í grunnvatn.
 - c) Í stokka sem leiða hann á brott í stöðuvötn eða á haf út (t.d. Achuachapan í El Salvador).

Hér verður ekki fjallað meira um yfirborðslosun heldur athyglinni frekar beint að niðurdælingu, sem er að verða framtíðarlausn þessa máls.

2. Niðurdæling

- a) Að hluta, aðallega þéttivatn (t.d. Svartsengi, Geysers).
- b) Að fullu, þéttivatn og affallsvökvi frá skiljustöð (tíðkast nú mjög víða á Filippseyjum, á Nýja-Sjálandi, í El Salvador og í Japan).

Niðurdælingu til langs tíma fylgja ýmis tæknileg vandamál, þótt heldur séu þau færri og einfaldari á Íslandi en víða annars staðar í heiminum. Vandinn er í stórum dráttum tvíþættur, það er að segja (i) kólnun í vinnsluholum (eins og áður var nefnt) og (ii) útfellingar (kísils og/eða kalsíts) í niðurdælingarholum og pípulögnum. Víða í heiminum er jarðhiti unninn úr setlögum og langtíma niðurdæling í þau er tíðum illmöguleg. Þetta á þó almennt ekki við um Ísland og aðstæður hér.

(i) Kólnun: Tíðasta áhyggjumál rekstraraðila er kólnun í vinnsluholum vegna niðurdælingar og samfarandi framleiðslutap. Þær áhyggjur eiga fullan rétt á sér, þar sem fjarlægðir milli niðurdælingar- og vinnsluholna eru stuttar og möguleiki er á beintengingu milli þeirra t.d. um leiðandi sprungskara. Hlutfallslega sjaldan hefur þó orðið vart umtalsverðrar kólnunar, sem rekja má til niðurdælingar, þegar mið er tekið af þeim fjölda niðurdælingarholna sem í notkun eru. Dæmi um slíkt eru þó til sem áður sagði.

Rétt hönnun og staðsetning niðurdælingarholna er því lykilatriði. Hér stríðast á tvö sjónarmið: kólnunarhættan minnkar því lengra sem bilið milli niðurdælingarholu og vinnsluholu er, en aftur á móti eykst gagnsemi niðurdælingar (þrýstingshækkun) því nær sem þær eru hvor annarri. Staðsetning fyrir niðurdælingarholur þarf því að tryggja hæfilegt jafnvægi milli þessara tveggja skilyrða. Það kallar á nákvæmar prófanir og rannsóknir sem hluta af undibúningi niðurdælingar. Öflugasta tiltæka aðferðin til þess að meta áhrif niðurdælingar á nálægar vinnsluholur eru ferilprófanir, en í þeim felst að einhvers konar ferilefni er sett í niðurdælingarholu og fylgst með endurheimtu þess í vinnsluholum í kring. Þetta gefur upplýsingar um tengsl holnanna, sem um ræðir, og nota má niðurstöður þeirra til þess að reikna kólnunarspár fyrir vinnsluholur vegna langtímaniðurdælingar.

(ii) Útfellingar: Annað og oft erfiðara vandamál tengt niðurdælingu er útfelling steinefna í pípulögnum og niðurdælingarholum. Helst er um að ræða útfellingu kísils við niðurdælingu affallsvökva af háhitauppruna. Þó er kalsítútfelling ekki óalgeng þegar hitastig holuvökvans er undir 200°C (hola 09 í Kröflu).

Bein niðurdæling: Í sumum tilfellum er affallsökvi leiddur beint í niðurdælingarholur frá gufuskiljum 160–200°C heitur. Hitinn er þá yfir útfellingarmörkum kísils og útfellingar því ólíklegar. Þessi aðferð er að vísu andstæð hugmyndinni um gjörnýtingu varmans úr jarðhitavökvanum, en sökum þess hve hagkvæm hún getur verið, þegar eingöngu er um að ræða framleiðslu á raforku, er hún víða notuð.

Fjölliðun: Felst í því að afgangsvökvi frá gufuskiljum er kældur niður í allt að 15°C–100°C í svonefndu fjölliðunarkerfi. Það samanstendur af opnum raðtengdum tönkum, kerum eða sérstökum útfellibúnaði á yfirborði jarðar. Hraða vatnsins í gegnum fjölliðunarkerfið er stýrt þannig að samanlagður dvalartími vatnsins í því sé á bilinu 12 til 24 stundir. Í kerunum/búnaðinum fjölliðast kísillinn, þ.e. myndar stórar og langar sameindakeðjur, er setjast til sem botnfall. Botnfallið er fjarlægt reglubundið (t.d. mánaðarlega) af botni keranna/búnaðarins og flutt á sérstaka samþykktu förgunarstaði, en vökvanum er jafnt og þétt dælt tilbaka niður í jarðhitageyminn.

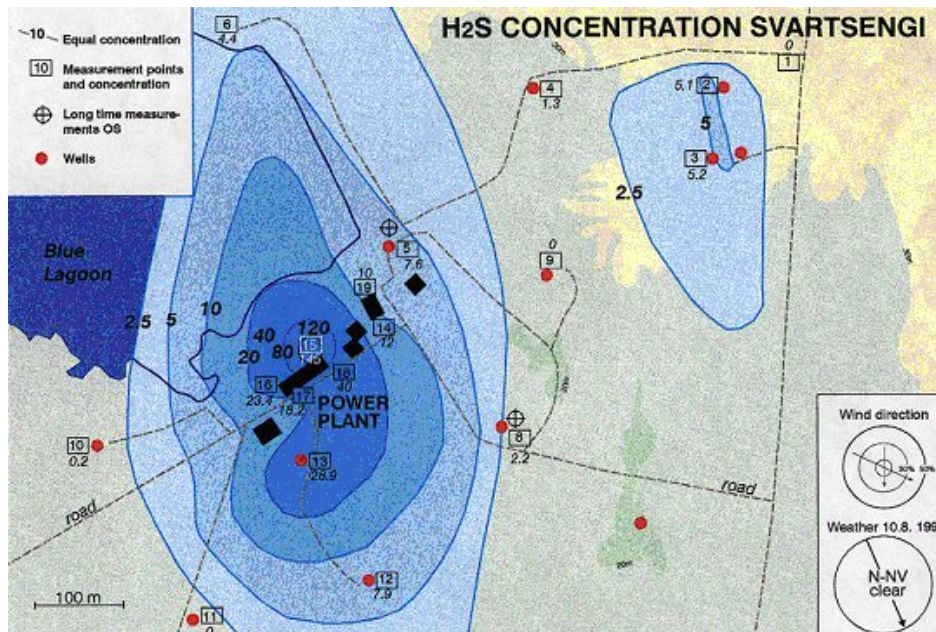
Þessi aðferð er farin að heyra sögunni til, hún krefst mikils landrýmis, er heldur óásjálæg, erfið og dýr í rekstri.

Efnahömlun: Í öðrum tilfellum er affallsvökvinn yfir útfellingamörkum kísils/kalsíts. Útfelling er hömluð áður en vökvannum er dælt niður með því að þynna vökvann og oft er sýrustigi stýrt með íblöndun þéttvatns (sem inniheldur ekki kísil) frá eimsvölum gufuhverfla eða íblöndun sérstakra hemilefna (tafaefna). Þessi aðferð er gjarnan dýr í rekstri og þarfnast góðs rekstrareftirlits.

Jarðhitafélag Íslands fjallaði um niðurdælingu affallsvatns í jarðhitakerfi á málþingi þann 10. nóvember 2004 og komu erindi út í ritröð félagsins (Rit 10/2004).

5.2.2 Losun gashlutans

Gas frá jarðhitaverum er að stærstum hluta samsett af CO_2 (98%-99%) og H_2S (1% – 2%). Gasmagnið sem um er að ræða á ársvísu er mjög lítið, eða að meðaltali u.þ.b. 950 tonn/MW raforku fyrir íslensk raforkuver, og að langmestum hluta CO_2 . Brennisteinsvetnið, sem aðeins nemur um 15–20 tonnum/MW raforku á ári, hefur aftur á móti vakið miklar deilur, og deila þar lærðir sem leikir. Hin sterka og óþægilega lykt, möguleg eituráhrif og gömul trú á skrattann og ára hans sem því hafa fylgt frá örófi alda vekja upp andúð, sem oftast, ef ekki alltaf, er á litlum sem engum rökum reist. Helsta deilumálið meðal lærðra er hvort brennisteinsvetnið (H_2S) umbreytist í brennisteinssýru (H_2SO_4), brennisteins-oxíð (SO_2) eða hreinan brennistein (S_2), þegar það blæs út í andrúmsloftið, en brennisteinsvetnið og –oxíðið eru gastegundir sem valda súru regni. Flest rök samkvæmt reynslu og rannsóknum seinni árin hníga þó að því að hið síðastnefnda (S_2) sé ríkjandi.



Dreyfirós brennisteinsvetnis í Svartsengi

Viðbrögð við skiptum skoðunum meðal vísindamanna í þessu máli hafa leitt til þess að ýmis ráð hafa verið viðhöfð til þess að losna við H_2S gasið. Róttækast var þetta á Geysers-svæðinu enda er þrýstingur almenningsálitsins óvída þyngrri en þar. Aðferðirnar sem reyndar voru, voru allt frá því að leiða gasið í gegnum járnúlfít í það að beita á það svonefndum Heberxx efnaferli. Hvorttveggja er mjög dýrt bæði í byggingu og rekstri,

og hefur í för með sér ýmis önnur mengunarvandamál. Hefur þessu því víðast hvar eða alls staðar verið hætt.

Fyrir um áratug eða tveimur var gerð tilraun á Coso-svæðinu í Nevada til þess að losna við gashlutann með því að blanda gasinu í affallsvökvann og dæla hvoru tveggja til baka niður í jarðhitakerfið. Það kom fljótlega í ljós að gasið fann sér leið inn í vinnsluholur svæðisins og olli talsverðri dölun afkasta. Við þennan losunarmáta var því hætt, og gasið leitt beint út í andrúmsloftið, sem er hin viðurkennda aðferð í dag. Til þess að losna við óþægindin af H₂S gasinu er gasinu víðast hvar hleypt út undir viftum kæliturna orkuversins þannig að það blandist vel loftstraumnum og blásið hátt í loft upp.

6 HAGKVÆMI

Þægilegt getur verið að deila jarðhitaorkuveri í fjórar nokkuð vel aðgreindar virkjunareiningar, þ.e. vinnsluholur; gufuvirki; aflstöð; affallsvirki þar með taldar niðurdælingarholur. Þetta eykur yfirsýn og auðveldar mat á hagkvæmni heildarinnar og áhrifum hinna mismunandi þátta eins og t.d. gufuöflun og/eða affallslosun þar á.

Virkjunareiningar orkuversins má síðan sundurgreina frekar eftir því hvaða þáttur leikur stærst hlutverk í breytileika virkjunarkosta, og hve nákvæm greining kostnaðar og mat á hagkvæmni þarf að vera.

6.1 Forsendur kostnaðarskiptingar

Ekki er síður mikilvægt að skilgreina kostnaðarmörk hverrar einingar fyrir sig, þ.e. hvað tilheyrir hvaða einingu:

Vinnsluholur: Undir þessa einingu fellur allur kostnaður við staðsetningu holna, aðkomuleiðir að þeim, borplön þeirra, frárennsli frá þeim, holutopps-búnað þeirra og gerð þeirra þar með talið borun, fóðringar, mælingar, prófanir, viðgerðir og annað holunum viðkomandi, og síðast en ekki síst holuhljóðdeyfa, loka og lagnir að þeim.

Gufuvirki: Innifelur kostnað við allar safn- og stofnæðar með búnaði frá holutoppum að skiljustöð. Skiljustöð með öllum búnaði, skiljum, lögnum, lokum o.þ.h. Gufulagnir að stöðvarhúsi með rakaskiljum, þrýstijöfnun, útblásturs-búnaði og hljóðdeyfi og öðrum lögnum að stöðvarhúsvegg.

Aflstöð: Til aflstöðvar telst húsakostur, kæliturnar eða annar eimþéttibúnaður, gastæmi-búnaður (fyrir eimsvala), aflspennar og rofavirki, gufuhverflar, rafalar, eimsvalar, allt vöktunar- og stýrikerfi, verkstæði og viðhaldslager. Það er að segja allt sem tengist rafmagns- og gufuhlið orkuversins.

Affallsvirki, þ.m.t. niðurdælingarholur: Sé um niðurdælingu að ræða fellur undir þessa einingu allur kostnaður við val á borstað niðurdælingarholna, aðkomuleiðir að þeim, borplön þeirra, frárennsli frá þeim, holutoppsbúnað þeirra og gerð þeirra þar með talið borun, fóðringar, mælingar, prófanir, viðgerðir og annað holunum viðkomandi. Eins tilheyra henni allar affallsvökvalagnir frá skiljustöð að holutoppum, dælur, íblöndunarbúnaður og annað því viðkomandi, einnig safnæðar og dælur fyrir þéttivatn, ef þörf er á slíku.

Hver sem losunarmátinn er fellur allur nauðsynlegur búnaður hverju nafni sem nefnist undir þessa einingu.

6.2 Forsendur hagkvæmi

Hagkvæmi jarðhitanýtingar er þríþætt, þ.e. fjárhagsleg (economic), umhverfis-leg (sustainability) og þjóðhagsleg (socio-economic) hagkvæmi (viability).

Muna verður að taka tillit til þess að samspil ríkir á milli þessarra þátta, aukin sjálfbærni eykur almennt fjárfestingu, þótt slíkur kostnaðarauki skili sér almennt að mestu leyti tilbaka í betri og oft ódyrari rekstri til lengri tíma lítið. Helsta vandamálið hvað þetta varðar er að erfitt er að meta slíkt til fjár, til þess er sá tími sem liðinn er frá því að almennt var farið að setja slík mál á oddinn svo skammur, að viðhlítandi reynsla hefur enn ekki náð að skila sér í sarpinn.

Þjóðhagsleg hagkvæmi byggir aðallega á því að virkjunin getur leitt til aukinnar hagsældar í næsta nágrenni sínu. Þar má nefna atvinnu til skemmri og lengri tíma lítið, auknar skattatekjur til sveitar og ríkis, meiri möguleika á nýjum atvinnugreinum, betri vegi og þjónustu o.s.frv. Slíkt þarf ekki endilega að leiða til aukinnar fjárfestingar né til aukins rekstrarkostnaðar. Það krefst aftur á móti víðsýni og forsjár, sem skilar sér í bættum almenningstengslum og betra starfs-liði.

Fjárhagsleg hagkvæmni: Forsendur fjárhagslegrar hagkvæmi (arðsemi) virkjunarkosta eru nokkuð hefðbundnar. Þær eru mjög háðar því hvers konar fjármögnun er fyrirhuguð, þ.e. hve stór hluti hennar er eigið fé, hve stór hluti er lán og hve stór á að vera hluti utanaðkomandi fjárfesta í fjármögnun fram-kvæmdanna. Arðsemiskröfur fjárfesta og eigenda, vaxtakjör lánastofnana og endurgreiðslufyrirkomulag leika þar einnig stór hlutverk.

Mat á fjárhagslegri hagkvæmi er venjulega gert á grundvelli innri vaxta (internal rate of return) og/eða núvirði (net present value) virkjunarkostsins. Hið sama gildir um samanburð eins eða fleiri virkjunarkosta.

Umhverfisleg hagkvæmni: Aðgerðir til þess að vægja umhverfinu eru oftast en ekki til kostnaðarauka. Í ljósi vaxandi meðvitundar mannkynsins fyrir mikilvægi umhverfisins og krafna um að allar mannsins framkvæmdir séu í sem bestri sátt við það verður ekki framhjá slíku lítið.

Helstu kröfurnar eru:

- Lágörkun efnamengunar, þ.e. efnamengunar láðs, lagar og andrúms-lofts.
- Að sjálfbærni orkulinda sé gætt í hvívetna.
- Hljóð- og sjónmengun sé haldið í lágmarki.
- Að umróti og landslagsbreytingum sé haldið í skefjum.

Mengunar- og sjálfbærnikröfum er best mætt með endurskilum jarðhitavökvans (niðurdælingu) eftir nýtingu, skipulagðri virkjun orkulindar í hæfilegum þrepum og vali á nýtingarbúnaði og -kerfi, er hefur þá hæstu nýtnigráðu sem möguleg er við ríkjandi aðstæður.

Tvö síðari atriðin eru skipulags- og hönnunarmál sem ekki eiga að vefjast fyrir neinum.

6.3 Möguleg áhrif hánýtni á hagkvæmi

Eins og títt hefur verið tæpt á, fæst hánýtni sjaldan eða aldrei án aukins tilkostnaðar í fjárfestingum. Í mjög mörgum, ef ekki flestum, tilvikum skilar þessi aukni tilkostnaður sér, þegar að rekstri kemur. Hve hratt hann skilar sér er ekki auðvelt að segja fyrir um aðallega sökum þess að nægjanleg reynsla er ekki fyrir hendi í dag eins og áður sagði.

Á þessu stigi mála er þó hægt að fullyrða eftirfarandi:

Framleiðslukerfið:

- Fjárfesting í hánýtni framleiðslukerfum í hreinni tvívökvavirkjun skilar sér til baka á tvo vegu, þ.e.

Sparnaður í viðhaldsborunum er veldur lækkun rekstrarkostnaðar til lengri tíma litið; sparnaðurinn gæti numið verðmæti einnar vinnsluholu á 10–15 ára fresti, allt eftir fjölda holna sem í notkun eru og eðlisbundinni dvínun jarðhitakerfisins.

Færri holum fyrir sömu orkuframleiðslu; hefðbundin nýtni ORC-ferils á kjörhitabili nemur frá 11% til 15%, en Kalína-ferilsins frá 15% til 22%. Þetta getur þýtt að meðaltali um 26% minni gufuförf, sé síðari kosturinn valinn.

- Fjárfesting í blönduðum kerfum er að jafnaði hærri en í samsvarandi raðsuðu og/eða fjölsuðu framleiðslukerfum. Kostir blandaðs kerfis eru aðallega aukinn sveigjanleiki og oftast nær talsvert meiri nýtni.

Erfitt er þó að koma fram með raunhæfar getgátur um hagnýti slíks kerfis umfram einfaldari og hefðbundnari kerfi sem rað- og fjölsuðkerfi. Nefndar hafa verið nýtnitölur allt að 50% hærri en þær hæstu í þeim síðarnefndu. Ef rétt reynist, er þetta nýtniaukning sem gerir meira en að mótvirka umframfjárfestingu þá er að framan getur.

Endurskilakerfið:

- Eins og áður hefur verið fjallað um, er endurskilakerfið þrenns konar, þ.e. yfirborðslosun og/eða niðurdæling vatnsins eftir að varminn hefur verið numinn úr því, og niðurdæling við háan hita.

Yfirborðslosun hefur ávallt í för með sér einhverja lækkun þrýstings (vökvayfirborðs) í jarðhitageyminum. Hve mikil áhrif þessi eru, er háð virkjunarstærð (hve mikill vökví er numinn úr jarðlögunum), hve mikið af vökva skilar sér til baka af yfirborði niður í jarðhitageyminn og hve mikið skilar sér sem náttúrulegt bakrennsli (natural recharge).

Eini kostur hennar er einfaldleiki og lægri kostnaður við losun og þar með lækkun fjárfestingar. Hún getur þó orðið til kostnaðarauka síðar á líftíma virkjunarinnar sökum þarfar á yfirborðslagfæringum ýmis konar. Í ljósi þróunar umhverfismála í heiminum getur hún einnig leitt til losunarsekta, er geta orðið til afgerandi íþyngingar í rekstri.

Niðurdæling við hátt hitastig, þ.e. vökvanum er þrýst 180°C til 200°C heitum beint frá skiljum niður um niðurdælingarholur ofan í jarðhitageyminn. Þetta er einföld lausn sem oft reynist hagkvæm þar sem hún getur leyst efnaútfellingarvanda á fremur afgerandi máta. Helstu ókostirnir við hana eru að hana er aðeins hægt að nota við virkjun háhitasvæða og eins hve mjög hún takmarkar afkastagetu gefins jarðhitasvæðis. Nýtanlegur varmi (temperature difference) frá svæðinu er þá aðeins á bilinu 70°C til 110°C.

Almenn niðurdæling er endurskil jarðhitavökvans niður í jarðhitageyminn eftir að eins mikið af varmanum hefur verið numið úr honum og menn treysta sér til miðað við þær efnafræði- og jarðfræðilegu aðstæður sem ríkja. Útfellingu steinefna er hamlad annað hvort með íblöndun efnafræðihemla, sýrustigsstýringu eða varmafræðilegum aðferðum (thermodynamic methods) eftir því hvers konar útfellingu er um að ræða.

Kostir og ókostir eru hér margir þeir sömu og nefndir voru hér að framan, sérstaklega er varðar kostnað. Umframkostur við almenna niðurdælingu er betri nýting varmagnetu jarðhitasvæðisins og fækkun holna og þar með lægri kostnaður. Á móti kemur hærri rekstrarkostnaður vegna íblöndunar hemilefna og annarra aðgerða til varnar gegn úrfellingum.

Í öllum tilvikum þarf að hanna og velja bæði endurskila- og framleiðslukerfi þannig, að þau í sameiningu hæfi sem best staðbundnum aðstæðum (locality specifics); væntingum um sjálfbærni og umhverfisáhrif (sustainability and environmental objectives); og kröfum fjárfesta um hagkvæmi (investors' viability criteria).

7 HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Við beina (stand-alone) framleiðslu raforku með jarðhita koma þrens konar aðferðir helst til greina, ef litið er til hárrar nýtni bæði orkuvinnslu og tækjabúnaðar.

Þær eru:

- Ein- eða fjölsuðutækni (single or multiflash technology)
- Blönduð tækni (hybrid technology)
- Tvívökva tækni (binary technology)

Fyrstnefnda aðferðin er gjarnan kostnaðarminnst og einföldust. Nýtni orkuvinnslu með þessari tækni er sjaldan eins há og hægt er að ná með blandaðri tækni, þó er hún alveg viðunandi.

Blönduð tækni gefur einna mestan sveigjanleika í rekstri og hæsta nýtni hvað orkuvinnslu varðar. Hún fellur líka mjög vel að niðurdælingu. Eitthvað er hún þó dýrari í fjárfestingu en aðrir kostir.

Tvívökvatæknin hefur takmarkað nýtingarsvið hvað hita varðar. Hún er almennt kostnaðarsöm í samanburði við tvær þær fyrstnefndu. Hún er einnig nokkuð flókin og dýr í rekstri, þegar hún er rekin með niðurdælingu.

Endurskil jarðhitavökvans niður í jarðhitageyminn, sem hann er upprunninn úr, er sú aðferð sem á eftir að verða ofan á í næstu framtíð. Það er að verða mun algengara í heiminum í dag að leyfi til nýtingar jarðhitasvæða séu bundin niðurdælingu. Niðurdæling hefur eftirfarandi kosti í för með sér:

- a) Hún viðheldur þrýstingi jarðhitageymisins og eykur varmanám úr jarðlögum. Hún lengir því nýtingartíma jarðhitasvæðisins (viðheldur sjálfbærni orkulindar).
- b) Hún er góð og virk leið til þess að losa sig við mengandi áhrif frá steinefnum og snefilefnum, sem eru í upplausn í vökvunum. Jafnframt útrýmir hún varma-mengun að mestu frá heitum affallsvökvunum (gerir jarðhitavirkjanir umhverfis-vænni).
- c) Óbein áhrif niðurdælingar samanber a) hér að ofan er sparnaður í nýborunum og viðhaldsborunum, sem bætir fjárhagslega hagkvæmni.

Þegar markaður er fyrir hendi fyrir aðra notkun jarðhitans, t.d. til þurrkunar, hitunar og eða ferðamennsku til viðbótar við framleiðslu rafmagns eykst sjálfbærni og fjárhagsleg hagkvæmni orkuversins margfalt án þess að það hafi umtalsverð viðbótaráhrif á umhverfið.

Í öllum tilvikum á hönnun, skipulag og bygging orkuvera að framkvæmast í hæfilegum þrepum, til þess að tryggja sem allra best samþættun nýtingar og getu orkulindarinnar.

8 HEIMILDASKRÁ

- Bryndís Brandsdóttir, Páll Einarsson, Knútur Árnason og Hrefna Kristmannsdóttir 1994. *Smáskjálfta- og bylgjubrotsmælingar í tengslum við niðurdælingu affallsvatns í jarðhitasvæðið við Svartsengi sumarið 1993*. Orkustofnun, Raunvísindastofnun Háskólans JHD-05, RH-03-94, 28 s.
- Grímur Björnsson 1998. *Tvífasa reiknilíkan og spár þess um afköst suðusvæðisins í Svartsengi*. Orkustofnun - Rannsóknasvið, OS-98012, 40 .
- Guðni Axelsson, 2003. *Essence of geothermal resource management*. In: Lectures on the Sustainable Use and Operating Policy for Geothermal Reservoirs, IGC2003 short course, September 2003, United Nations University, 2003-1, Reykjavík, 129-152.
- Guðni Axelsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Pálmason, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz, Sveinbjörn Björnsson og Valgarður Stefánsson, 2001a. *Um sjálfbæra vinnslu jarðhita*. Erindi flutt á Orkuþingi 2001, Reykjavík, október 2001, 478-484.
- Guðni Axelsson, Grímur Björnsson, Ólafur G. Flóvenz, Hrefna Kristmannsdóttir og Guðrún Sverrisdóttir 1995. *Injection experiments in low-temperature geothermal areas in Iceland*. Proceedings of the World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, May 1995, 1991-1996.
- Guðni Axelsson, Valgarður Stefánsson og Grímur Björnsson, 2004. *Sustainable utilization of geothermal resources for 100-300 years*. Proceedings 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 8 s.
- Hermann Þórðarson 1983. *Kísilefni felld úr jarðsjó í Svartsengi*. Samvinnuverkefni Iðntæknistofnunar og Raunvísindastofnunar Háskólans. Staða rannsókna, skýrsla.
- Hjalti Franzson 1990. *Svartsengi. Jarðfræðilíkan af háhitakerfi og umhverfi þess*. Orkustofnun, OS-90050/JHD-08, 41 s.
- Ingvar Baldursson og Guðni Axelsson 2003. *Niðurdæling í jarðhitakerfið á Laugalandi í Holtum*. Erindi flutt á fagfundi Samorku, Selfossi, maí 2003.
- Jón Steinar Guðmundsson 1978. *Útfellingar og frárennsli orkuversins við Svartsengi: Athuganir sumarið 1978*. Orkustofnun, OS-JHD-7850, 41 s.
- Jón Steinar Guðmundsson 1983. *Niðurdælingartilraun við Svartsengi 1982*. Orkustofnun, OS-83047/JHD-07.
- Malate, R.C.M. 2003. *Management of geothermal resources: PNOG-EDC experience*. In: Lectures on the Sustainable Use and Operating Policy for Geothermal Reservoirs, IGC2003 short course, September 2003, United Nations University, 2003-1, Reykjavík, 153-183.
- Sigurður R. Guðmundsson 1982. *Hegðun kísils í affallsvatni orkuvers Hitaveitu Suðurnesja, Svartsengi*. Orkustofnun, OS82072/JHD17 B, 28 s.
- Stefán Arnórsson 2004. *Útfelling steinefna úr affallsvatni frá háhitavirkjunum*. Erindi flutt á málþingi Jarðhitafélags Íslands, Reykjavík, nóvember 2004.
- Sverrir Þórhallsson og Guðni Axelsson 2002. *Niðurdæling í jarðhitakerfi á Íslandi*. Erindi flutt á vorkfundi Samorku, Akureyri, maí 2002.
- Valgarður Stefánsson, 1997. Geothermal reinjection experience. *Geothermics*, 26, 99-130.

- Sigurður Rúnar Guðmundsson 1983. *Athuganir á kísilfjölliðun í jarðsjó í Svartsengi*. Birt sem viðauki í skýrslu: Trausti Hauksson, 1985. Niðurdælingartilraun í Svartsengi 1984. Orkustofnun OS-85107/JHD-13.
- Trausti Hauksson 1985. *Niðurdælingartilraun í Svartsengi 1984*. Orkustofnun, OS-85107/JHD-13, 109 s.
- Trausti Hauksson 1992. *Svartsengi, Kísiltilraunir á affalsvatni, Íblöndun þéttivatns, sýru og gass*. Orkustofnun, JHD-20 B.
- Trausti Hauksson og Sverrir Þórhallsson 1995. *Kísilútfellingar úr jarðsjó. Áhrif þéttivatnsíblöndunar á magn og hraða kísilútfellinga í iðustreymi*. Skýrsla um niðurstöður tilrauna í Svartsengi 1994. Orkustofnun JHD-01, 44s.
- Verkfræðistofan Vatnaskil sf. 1997. *Svartsengi. Líkanreikningar af jarðhitakerfi vegna framtíðarvinnslu*. Orkustofnun, OS-97010, 20s.