



ORKUSTOFNUN

Hugmyndalíkan að gufupúða í Svartsengi

Grímur Björnsson

Greinargerð GrB-92-03

HUGMYNDALÍKAN AÐ GUFUPÚÐA Í SVARTSENGI

1. Inngangur

Greinargerð þessi er hugsuð sem innlegg í áætlanir sem nú eru uppi um aukna vinnslu úr gufupúðanum úr Svartsengi. Með gufupúða er átt við þann hluta jarðhitakerfis Svartsengis sem holur 2,3 og 10 eru boraðar í. Núverandi suðuborð í Svartsengi er á 670 m dýpi og eru það neðri mörk þúðans. Vinnsla úr þúðanum er mjög hagstæð frá sjónarmiði massatöku. Má segja að hvert kg/s gufu sem unnið er þar sé orkulega á við 4 kg/s úr holum sem vinna 240 °C heitan jarðsjó.

Gufan sem fæst úr gufupúðanum myndast við það að þrýstingur í upphaflega vatnsmetuðu bergi fellur undir suðumarksþrýsting vatnsins í bergporunum. Við það sýður vatnið og kólnar. Bergið umhverfis porurnar er enn heitt og leiðist varmi frá því til sjóðandi vökvans sem eykur enn orkunnihald hans. Mikill hreyfanleiki gufunnar og hátt eðlisrúmmál, samanborið við vatn, getur orðið til þess að einungis smávægileg suða í berginu valdi mikilli vermishækkan á rennsli borholna. Mat á gæfni gufupúðans er því háð fjölmörgum þáttum og engin ein einföld leið til að spá nákvæmlega viðbrögðum hans við aukinni vinnslu. Hér verður einungis kannað hvað mikla gufu má ná úr hverjum rúmmetra bergs sem bætist neðan á gufupúðann eftir því sem þrýstingur lækkar í Svartsengi. Er þá miðað við 5, 10, 15 og 20 % poruhluta bergs og annaðhvort 240 eða 280 °C upphafshita bergsins.

2. Ráðandi jöfnur

Mynd 1 sýnir bergkubb með poruhluta ϕ , upphafshita T_0 , eðlismassa vatns $\rho_v(T_0)$, vermi vatns $h_v(T_0)$, varmarýmd bergs c_b og eðlisþyngd bergs (milli pora) ρ_b . Upphafsprýstingur kubbsins er suðuprýstingur við hitann T_0 og þá er hlutrúmmál gufu, S , í porum kubbsins 0 (vatnsmettun). Vegna vinnslu eða einhverra utanaðkomandi áhrifa, lækkar þrýstingur og þar með hiti kubbsins niður í hitastigið T . Við það hefst suða í kubbnum, aukið gufuinnihald hans hækkar hlutrúmmál gufu í eitthvert óþekkt gildi og massi Δm ýtist úr kubbnum. Ætlunin er að finna hlutrúmmálið S og massafrálagið Δm við eitthvert gefið hitastig T . Til þess eru settar upp varðveislujöfnur massa og orku í kubbnum.

Varðveisla massa:

$$V\phi \rho_v(T_0) = V\phi [S \rho_g(T) + (1-S) \rho_v(T)] + \Delta m \quad (1)$$

þar sem V er rúmmál kubbsins, $\rho_g(T)$ er eðlismassi gufunnar í kubbnum og $\rho_v(T)$ er eðlismassi vatnsins í kubbnum við suðuhitastigið T .

Varðveisla orku:

$$V [(1-\phi) c_b \rho_b T_0 + \phi \rho_v(T_0) h_v(T_0)] = \quad (2)$$

$$V [(1-\phi) c_b \rho_b T + \phi \{ S \rho_g(T) h_g(T) + (1-S) \rho_v(T) h_v(T) \}] + h_g(T) \Delta m$$

þar sem $h_g(T)$ er vermi gufunnar í kubbnum við hitann T og h_v er vermi vatnins. Hér verður notuð sú einföldun að gert er ráð fyrir að einungis gufa sé unnin úr kubbnum. Sú forsenda styðst af snöggri breytingu í vermi holu SG-10 vorið 1984, þegar holan stökk úr vermi 240 °C heits vatns í þurrgufuvermi á örfáum vikum (Jón Ö. Bjarnason, 1988). Hefur holan skilað hreinni gufu síðan.

Jöfnur 1 og 2 eru leystar fyrir Δm . Þá fæst fyrir jöfnu 1:

$$\Delta m = V \phi [\rho_v(T_0) - \{ s \rho_g(T) + (1-s) \rho_v(T) \}] \quad (3)$$

og fyrir jöfnu 2:

$$\Delta m h_g(T) = V \phi \left[\frac{1-\phi}{\phi} c_b \rho_b T_0 + \rho_v(T_0)^* \right] - V \phi \left[\frac{1-\phi}{\phi} c_b \rho_b T + \{ s \rho_g(T) h_g(T) + (1-s) \rho_v(T) h_v(T) \} \right] \quad (4)$$

Jöfnur 3 og 4 eru leystar fyrir s og fæst þá:

$$s = \frac{\frac{1-\phi}{\phi} c_b \rho_b (T_0 - T) + \rho_v(T_0) [h_v(T_0) - h_g(T)]}{\rho_v(T) [h_g(T) - h_v(T)]} + 1. \quad (5)$$

Massafrálagið Δm má síðan fá með jöfnu 1.

3. Útreikningar

Jafna 5 gefur hlutrúmmál gufu fyrir gefna lækkun í hita úr T_0 í T . Fróðlegt er að kanna hvernig hlutrúmmál gufunnar eykst með lækkandi hita. Mynd 2 sýnir hvernig hlutrúmmálið vex og er þá miðað við 240 °C og 280 °C upphafshita. Fjögur gildi poruhluta bergs eru einnig skoðuð, 5, 10, 15 og 20 %. Ekki var reiknað niður í lægra hitastig en 180 °C, en sá hiti jafngildir um 10 bara æðaþrýstingi holu sem ynni úr gufupúða. Varmarýmd bergsins var ætíð höfð 1000 J/kg/°C og eðlismassi 3000 kg/m³.

Mynd 2 sýnir að í flestum tilvikum er næg varmaorka í bergen til að sjóða burt nær allt vatnið sem upphaflega var til staðar í porum þess. Undantekningar eru tilvik 15 og 20 % poruhluta bergs með 240 °C upphafshita. Ef poruhlutinn væri á hinn bóginn einingis 5 % þyrfi að stunda niðurdælingu til að varmavinnslan næði að kæla bergið um meir en 10-20 °C.

Mynd 3 sýnir hve mikla gufu má fá úr 1 m³ jarðhitakerfis sem eingögnu væri keldur með suðu vatnsins í bergen. Er frálagið mest um 120 kg í tilviki bergs með 20 % poruhluta sem upphaflega er 280 °C heitt. Eins og áður var getið vantar vatn í tilviki 5 % poruhluta til að kæling í 180 °C sé möguleg. Því mætti beita niðurdælingu í kubbinn til að ná því kælimarki. Við það hverfa áhrif poruhluta og eftir stendur að rúmmetri bergs, sem keldur er niður í 180 °C, nær að skila mest um 60-70 kg gufu við 240 °C upphafshita, meðan 280 °C bergið skilar mest um 110-120 kg.

4. Rúmmál og flatarmál gufupúðans.

Hægt er að grófmeta rúmmál gufupúðans í Svartsengi með skoðun á hlutfalli CO₂ gass í rennsli holu SG-10. Flestar dýpri holnanna í Svartsengi skila vökva sem inniheldur um 0,4 g af CO₂ í hverju klíói. Kolsýruinnihald holu SG-10 var svipað uns suðuborð í svæðinu fór niður fyrir æðar

hennar. Þá hækkaði CO_2 magnið í um 2,2 g á kfló og hefur haldist á því róli síðan (Jón Ö. Bjarnason, 1988). Ef gert er ráð fyrir að allt CO_2 gasið, sem fellur til við suðu á skilfleti gufupúðans og einsfasa vatnskerfisins, skili sér til holu SG-10, má áætla rúmmál gufupúðans í árslok 1990 á eftirfarandi hátt.

Síðan að hola SG-10 breyttist í þurrgufuholu hafa verið tekin úr henni að jafnaði um 14 kg/s af gufu (Vatnaskil, 1985). Frá vermisbreytingunni eru liðin 7 ár og heildarvinnsla CO_2 úr holunni, m_{CO_2} er þá:

$$m_{\text{CO}_2} = 14 \text{ kg/s} \cdot 7 \text{ ár} \cdot 3.15 \times 10^7 \cdot 22 \times 10^{-4} = 6,6 \times 10^6 \text{ kg} \quad (6)$$

Vatnið sem sauð af sér þesi $6,6 \times 10^6 \text{ kg}$ gass hafði uppleyst í sér um $4 \times 10^{-4} \text{ kg CO}_2$ í hverju kflói. Alls hafa því soðið í gufupúðanum $6,6 \times 10^6 / 4 \times 10^{-4} = 1,65 \times 10^{10} \text{ kg u.p.b. } 240^\circ\text{C}$ vatns. Þetta eru um 16 milljón tonn sem er rúmlega 15 % af heildarvinnslunni í Svartsengi til þessa (Vatnaskil, 1991).

Ef gert er ráð fyrir að enginn vöki berist milli skilflatar gufupúðans og 240°C vatnskerfisins á hverjum tíma, má áætla rúmmálsaukningu þúðans með eftirfarandi sambandi:

$$m_t = \phi \rho_v(240) V_t \quad (7)$$

þar sem m_t eru 16 milljón tonnin sem soðið hafa CO_2 gasinu til holu SG-10, ϕ er poruhluti bergsins, $\rho_v(240)$ er eðlismassi 240°C heits vatns og V_t er bergrúmmálið sem þarf til að geyma 16 milljón tonn af 240°C vatni. Ef gert er ráð fyrir 10 % virkum poruhluta fæst að $V_t \approx 2 \times 10^8 \text{ m}^3$.

Meðalþrýstilækkunin í Svartsengi 1984-1990 er talin samsvara um 15 m/ári (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991). Samtals hefur því gufupúðinn þyknað um 105 m þau 7 ár sem hér eru til skoðunar. Þar með fæst að meðalflatarmál gufupúðans þessi 7 ár er um $2 \times 10^8 / 105 = 1,9 \text{ km}^2$. Það mat fer nokkuð nærrí $1,5 \text{ km}^2$ sem stuðst hefur verið við í hermireikningum (Vatnaskil, 1989).

5. Gufufrálag og vinnsla holu SG-10.

Ef gert er ráð fyrir að $1,9 \text{ km}^2$ flatarmál gufupúðans sé nærrí réttu lagi, og að 15 m/ári þykknunarhraði eigi við í gufupúðanum, fæst að u.p.b. $0,9 \text{ m}^3$ 240°C heits vatnsmettaðs bergs bætist við þúðann á sekúndu. Hola SG-10 vann að jafnaði um 14 kg/s þann tíma sem hér er til skoðunar. Toppþrýstingur hennar var um 26 bör-y. Það jafngildir um 228°C innstreyymishita gufu til holunnar, og væntanlega er hitastig gufupúðans svipað.

Mynd 3 sýnir að hver rúmmetri 240°C vatnsmettaðs bergs sem sýður sig niður um 10°C getur skilar um 14 kg/s af gufu. Það er ámóta og vinnslan úr SG-10 og stemmir vel við áætlaða $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ rúmmálsaukningu gufupúðans. Því má segja að hugmyndalskan gufupúðans, þar sem gert er ráð fyrir að öll gufan sem hola SG-10 skilar myndist við 10°C kólnun eins rúmmetra 240°C bergs á sekúndu, standist.

6. Niðurstöður og umræða

Helstu niðurstöður greinargerðarinnar eru:

- Leitt er út einfalt reiknilíkjan, þar sem gert er ráð fyrir að vatnsmettaður bergkubbur kólni vegna eigin suðu og skili jafnframt eingöngu frá sér gufu.
- Skoðun mismikils upphafshita bergkubbs með rúmmál 1 m^3 sýnir að 240°C heitur kubbur nær að skila mest um $60\text{-}70 \text{ kg/s}$ hreinnar gufu meðan 280°C heitur kubbur nær að skila $110\text{-}120 \text{ kg/s}$, hvoru tveggja við kólnun niður í 180°C . Er þá tilskilið að poruhluti bergsins sé um og yfir 10 %, ella þarf að koma til niðurdæling.
- Ef gert er ráð fyrir að hola SG-10 hirði allt CO_2 gas sem fellur til við árlega nýmyndun suðusvæðis niður úr gufupúðanum, þarf flatarmál púðans að vera um $1,9 \text{ km}^2$.
- Ef jafnframt er gert ráð fyrir að nýmyndunarsvæði gufupúðans kólni um 10°C og að poruhluti þess sé um 10 %, fæst að þeir $0,9 \text{ m}^3$ sem bætast við gufupúðann á sekúndu nægja til að sjóða af sér alla þá gufu sem hola SG-10 hefur unnið. Hugmyndalíkjan gufupúðans, sem gerir ráð fyrir að hann þykki um 15 m/ári en sé að öðru leyti aðskilinn 240°C vatnskerfinu undir, getur því staðist.

Rétt er að minna á að miklar óvissur eru fólgarnar í framangreindum reikningum og ber að fremur að líta á þá sem vangaveltur um innri gerð gufupúðans, fremur en raunverulegt reiknilíkjan. Breytingar í t.d. poruhluta gufupúðans eða gasstyrk geta auðveldlega fært niðurstöður verulega úr skorðum.

Nú virðist sem mjög hafi hægt á niðurdrætti í Svartsengi (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrimsson, 1992). Það þýðir að gufupúðinn þykknar ekki með sama hraða og áður. Aukin vinnsla útheimtir þá að eitt af þrennu gerist:

- Að rúmmál púðans vaxi mun hraðar en sem nemur $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Til þess þarf flatarmál púðans að vaxa verulega frá hinu áætlaða $1,9 \text{ km}^2$ flatarmáli árin 1984-1990. Reyndar eru nú þegar uppi teikn um að gufupúðinn hafi breiðst út neðan 600 m dýpis allt til holu SG-7 (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrimsson, 1992).
- Að meðalkónun púðans verði meiri en 10°C . Aukin kólnun púðans mun óhjákvæmilega lækka toppþrýsting holu SG-10 í framtíðinni.
- Að gufa streymi til gufupúðans frá óþekktu jarðhitakerfi sem gæti legið í hálsunum austan Svartsengis.

Að lokum er rétt að minna á að ofangreindir reikningar geta á engan hátt sagt til um hættuna á yfirhitnum þakbergs gufupúðans og lskur á gufusprengingum í því. Til þess þarf aðrar athuganir.

*Reykjavík, 22. apríl 1992.
Grímur Björnsson.*

7. Heimildir

Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991: *Hiti og þrýstingur í jarðhitakerfinu í Svartsengi. Upphafsstund og breytingar vegna vinnslu.* Orkustofnun, OS-91016/JHD-04, 69 s.

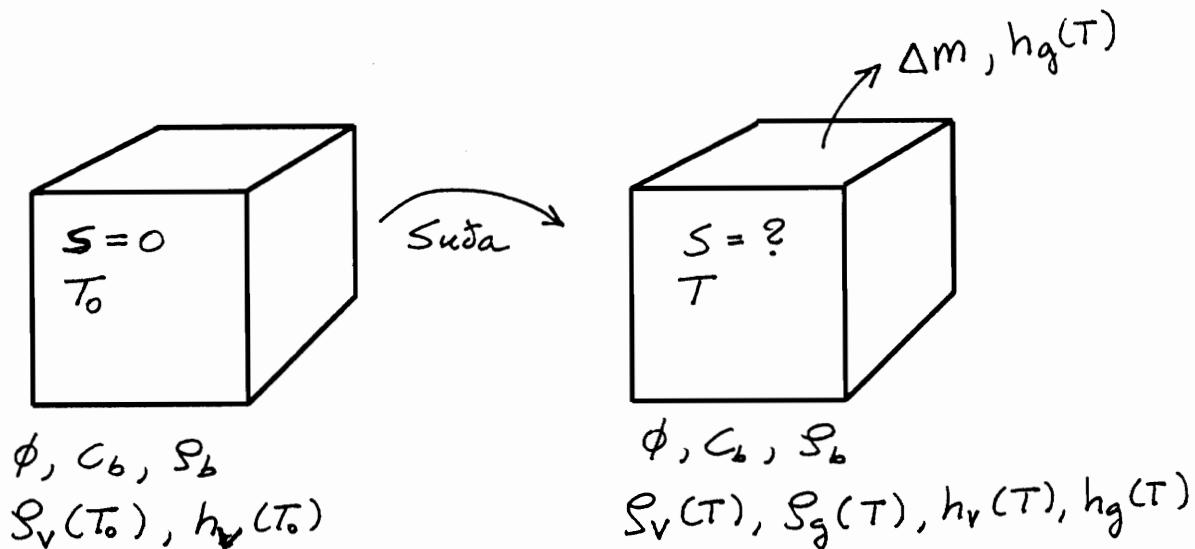
Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1992: *Borholumælingar í Svartsengi og Eldvörpum í mars 1992.* Orkustofnun, greinargerð, GrB/BS-92/02, 9 s.

Jón Örn Bjarnason, 1988: *Svartsengi - Efnaeftirlit 1980-1987.* Orkustofnun, OS-88001/JHD-01.

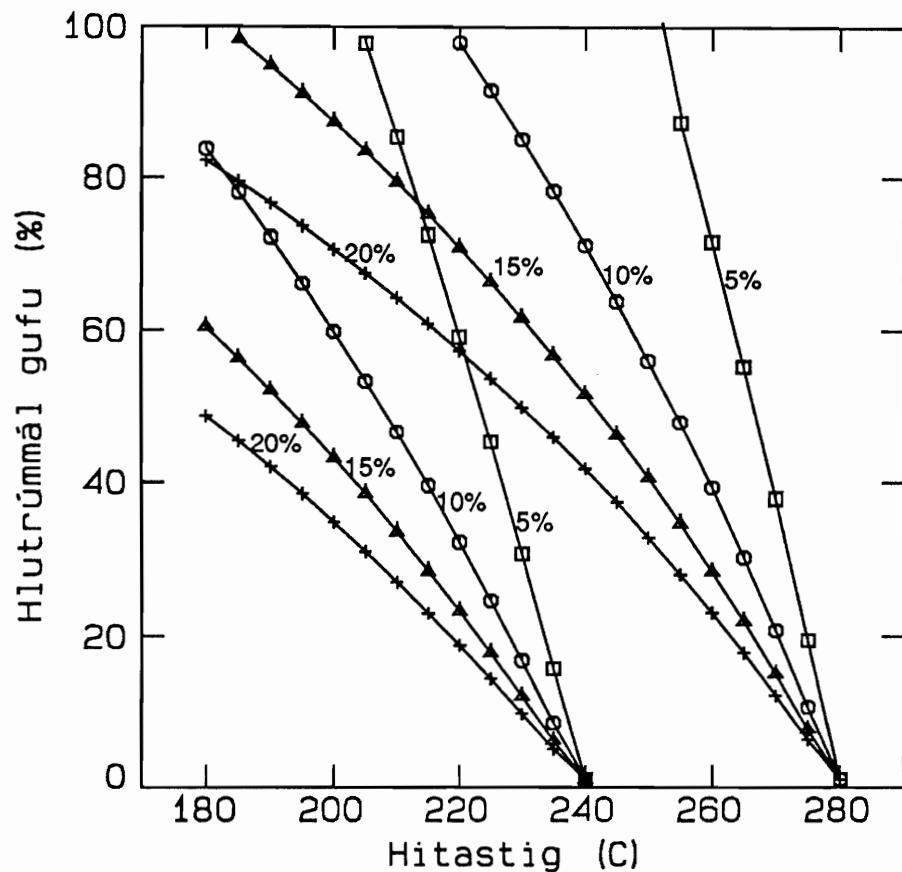
Vatnaskil, 1985: *Svartsengi - Vinnslueftirlit 1976-1985.* Orkustofnun, OS-85097/JHD-12, 99 s.

Vatnaskil, 1989: *Svartsengi - Reiknilíkan af jarðhitakerfinu.* Orkustofnun, OS-89031/JHD-05, 111 s.

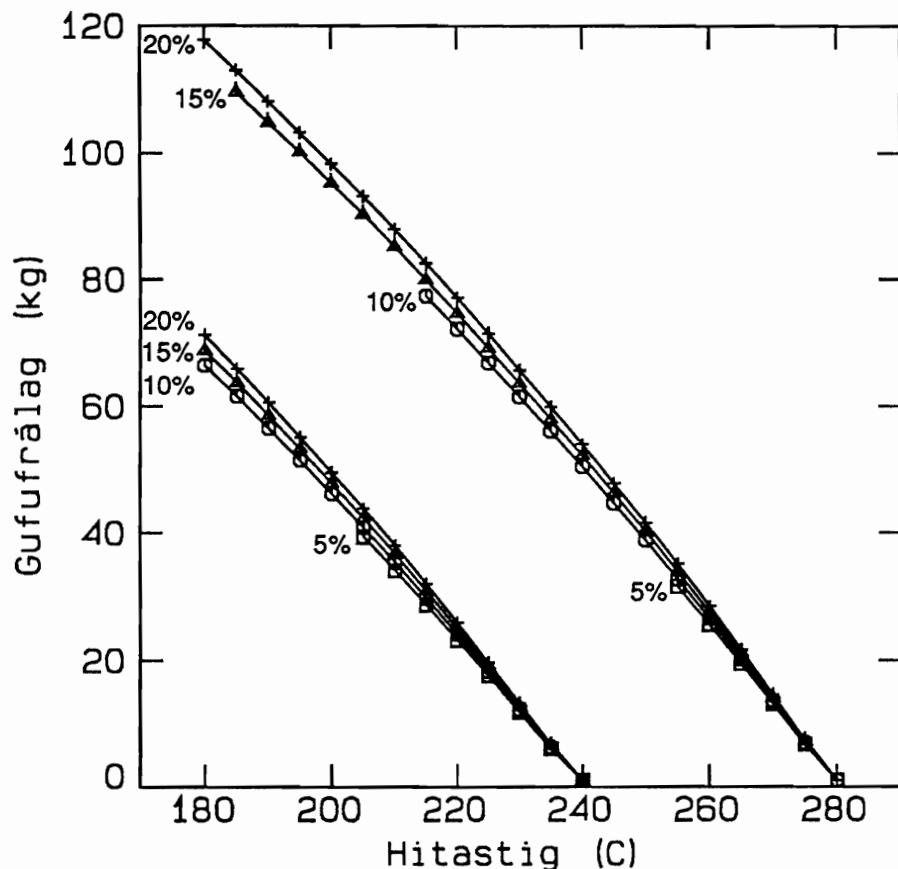
Vatnaskil, 1989: *Svartsengi - Vinnslueftirlit júlí 1990 - júlí 1991.* Orkustofnun, OS-91031/JHD-17 B, 27 s.



Mynd 1: Líkan af kubbi sem kólnar frá hitanum T_0 í T og lætur við það frá sér massann Δm af hreinni gufu.



Mynd 2: Hlutrúmmál gufu í kubbi jarðhitakerfis sem kólnar vegna suðu úr annaðhvort 240 eða 280 °C. Tölur við ferla tákna poruhluta kubbsins í prósentum.



Mynd 3: Gufufrálag 1 m³ kubbs sem kólnar vegna suðu úr annað hvort 240 eða 280 °C.
Tölur við ferla tákna poruhluta kubbsins í prósentum.