

Íslenskar orkulindir og vetnisvæðingin

Bragi Árnason og Þorsteinn I. Sigfússon

Raunvísindastofnun Háskólans

Vefútgáfa: 25. nóvember 2004

Ágrip — Af árlegri frumorkunotkun heimsins eru um 80% jarðefnaeldsneyti. Þar af er olía um 35%, eða rúmlega þriðjungur af allri frumorkunotkuninni. Það er ýmislegt sem bendir til að á allra næstu árum muni olúframléiðslan fara minnkandi. Á sama tíma fer þörfin fyrir orku ört vaxandi. Mannkynið kann því fljótlega að standa frammi fyrir alvarlegri orkukreppu, sem ekki verður leyst á annan hátt en auka umtalsvert virkjun hvers kyns endurnýjanlegra orkulinda. Margir sérfræðingar, sem fást við rannsóknir á virkjun sólarorku, telja að eftir 20–30 ár verði hagkvæmt að breyta henni í raforku. Raforkan verður að sjálfsögðu notuð hvar sem mögulegt er, en þó mun alltaf verða þörf fyrir að geyma hana, t.d. sem eldsneyti. Þá er álitlegasta eldsneytið vetni. Íslendingar, sem eiga mikið af óvirkjaðri vatnsorku og jarðhita, þurfa ekki að bíða eftir að virkjun sólarorku verði hagkvæm. Þeir geta hafið vetnisvæðinguna nú þegar og hafa reyndar stigið fyrstu skrefin. Auk þess að framleiða vetni með hefðbundinni rafgreiningu vatns býður jarðhitinn upp á margvíslega óhefðbundna möguleika til að vinna vetni, sem sumir hverjir kunna að reynast hagkvæmari. Við upphaf landnáms nýttu Íslendingar alfarið endurnýjanlegar orkulindir. Um aldamótin 1900 var mestur hluti orkunotkunar landsmanna innflutt jarðefnaeldsneyti, kol og olía. Ef fer sem horfir er þess að vænta að um miðja þessa öld komi öll orka, sem notuð verður í landinu frá innlendum vistvænum orkulindum líft og á landnámsöld.

1. Núverandi orkunotkun heimsins og framtíðarhorfur

Árleg frumorkunotkun heimsins er nú um 400 exajoule ($\text{exa}=10^{18}$). Af þessari orku eru 79,6% jarðefnaeldsneyti, 13,9% endurnýjanlegar orkulindir og 6,5% kjarnorka. Af þeim 79,6% orkunnar sem koma frá jarðefnaeldsneyti eru 35,3% olía (sjá töflu 1). Olía er því umtalsverður hluti af orkunotkun mannkynsins. Ýmislegt bendir til að fljótlega muni olúframléiðsla heimsins fara að minnka og mannkynið kunni að standa frammi fyrir orkukreppu ef ekkert er að gert. Árið 1956 gerði jarðfræðingurinn M. King Hubbert, sem vann hjá einu af stóru bandarísku olúfélögum, mjög umfangsmikla athugun á hvenær hámarks olúframléiðslu yrði náð í Bandaríkjunum. Niðurstaða hans var að það myndi gerast árið 1972. Þetta gerðist í raun árið 1970 svo spá Hubberts var býsna nærri lagi. Nýlega beitti svo Kenneth S. Deffeyes aðferðafræði Hubberts til að spá fyrir um hvenær hámarki heimsframléiðslu olú yrði náð. Niðurstaða hans er að innan

Tafla 1. Frumorkunotkun heimsins 1998 (Primary Energy) [1].

Orkulindir	Frumorka (Exajoules)	%
Jarðefnaeldsneyti	320	79,6
Olía	142	35,3
Jarðgas	85	21,1
Kol	93	23,1
Endurnýjanlegar	56	13,9
Stór vatnsorkuver	9	2,2
Hefðbundinn lífmassi	38	9,5
Nýjar endurnýjanlegar	9	2,2
Kjarnorka	26	6,5
Alls	402	100

fjögurra ára taki olúframléiðslan að minnka og ekkert geti komið í veg fyrir að svo verði [2].

Reynist spá Deffeyes rétt megu við vænta minnkandi olúframléiðslu fyrir lok áratugarins, samfara ört vaxandi orkuþörf, einkum í þróunarlöndunum. Hvoru tveggja verður þá að mæta með öðrum orkulindum, til

Tafla 2. Birgðir orkulinda í exajoules [3].

Orka hráefnis	Tiltækar lindir	Hugsanleg viðbót	Orkulindir alls
Kol	20136	58620	78756
Olía	3810	8793	12603
Tjörusandur, tjara og fl.	3664	15534	19198
Jarðgas	2931	6448	9379
Jarðefnaeldsneyti, alls	30541	89396	119937
Úranium	1905	2579	4484
Alls	32446	91975	124421

dæmis kolum, kjarnorku eða endurnýjanlegum orkulindum (sjá töflu 2 og töflu 3).

Kolabirgðir heimsins eru geysimiklar. Verði minnkandi olúframleiðsla og vaxandi orkuþörf mætt með aukinni notkun kola gætu afleiðingarnar orðið býsna alvarlegar. Kínverjar eru mikilvægt dæmi um stóra þjóð með vaxandi orkuþörf í næstu framtíð. Þegar þetta er skrifað hafa Kínverjar látið að því liggja að þeir hyggest mæta ört vaxandi raforkuþörf með kolaorkuverum.

Þriggja gljúfra virkjunin í Yangtze fljótinu í Kína mun framleiða 18.000 MW af raforku þegar hún verður fullgerð, sem þó er aðeins lítill hluti þeirrar raforku sem þjóðin þarfnast á næstu 20 árum. Það hefur komið fram að auk 18.000 MW frá Yangtze virkjuninni muni Kína þarfnast 600.000 MW af raforku til viðbótar. Þetta vekur upp þá spurningu hvaða afleiðingar það muni hafa á loftþjúp jarðar ef Kína og önnur þróunarlönd nálgast sömu raforkunotkun á Íbúa og Evrópa eða Bandaríkin og löndin framleiða raforkuna úr kolum.

Með minnkandi olúframleiðslu í heiminum mun mikilvægi endurnýjanlegra orkulinda fara vaxandi. Orkulinda eins og lífmassa, vatnsorku, vindorku, ölduorku, sjávarfallaorku, jarðhita, orku í geislun sólar og sólarorku sem varðveitt er í höfunum sem varmi. Þá eru vistfræðilegar ástæður, eins og nauðsyn þess að draga úr útstreymi gróðurhúsalofttegunda og annarra mengandi efna eins og brennisteinstvíoxíðs og köfnunarefnisoxíða, líklegar til að stuðla að aukinni notkun endurnýjanlegra orkulinda.

Til langs tíma lítið er talið að sólgeislun verði meginorkulind mannkynsins. Orkuinnihald sólgeislunar, sem fellur á yfirborð þurrlandis á jörðinni, hefur verið áætlað 3.000 sinnum núverandi orkunotkun heimsins. Jafnvel þótt aðeins lítill hluti þessarar orku sé virkjan-

Tafla 3. Árlegt magn endurnýjanlegra orkulinda í exajoules á ári [3].

Tegund orku	Fræðilegt magn frumorku	Vinnanleg orka	Hlutfall vinnanlegrar orku og orkunotkunar (secondary energy)
Sólgeislun	791370	586	2,8
Vindorka	8793	94	0,45
Lífmassi	2931	191	0,95
Vatnsafl	158	70	0,35
Jarðhiti	1114	64	0,3
Sjávarfallaorka, ölduorka, sólarvarmi úr hafi	733	32	
Alls		1037	5

legur (sjá töflu 3) verður að telja sólarorku langstærstu orkulind jarðarinnar.

Margir sérfræðingar sem vinna að rannsóknum á virkjun sólarorku halda því fram að eftir 20–30 ár muni verða hagkvæmt að breyta sólgeislun í raforku eða varma. Þegar svo verður komið mun hlutur sólarorku í orkuþúskap heimsins fara ört vaxandi og til langs tíma lítið mun sólarorka verða meginorkulind mannkynsins. Þangað til verður hins vegar að mæta aukinni orkuþörf með virkjun annarra endurnýjanlegra orkulinda og kjarnorku.

Virkjun sólarorku og virkjun annarra endurnýjanlegra orkulinda ásamt kjarnorku, mun langofast felast í því að breyta frumorku í raforku. Að sjálfsögðu verður raforkan notuð beint hvenær sem það er mögulegt. Þó mun alltaf verða þörf fyrir orkugeymslu, til dæmis eldsneyti til að knýja farartæki á láði, legi og í lofti. Þá er álitlegasta eldsneytið vafalítið vetni.

Vetni er einfaldasta eldsneytið og má framleiða það úr vatni með rafgreiningu. Það er algjörlega hreint og umhverfisvænt. Þegar því er brennt myndast einungis vatn, sama magn og fórn í að framleiða vetnið. Mikilvægt er þó einnig að þegar vetni er brennt í efnarafölum er nýtni eldsneytisins tvöföld á við bruna í hefðbundnum brunahreyflum.

Við bruna í brunahreyflum er efnaorku breytt í varma með lágrí nýtni, vegna svonefndra Carnot takmarkana. Fræðilega getur hún vart orðið meiri en 40% og í venjulegri bensínvél er hún um 30% þegar best lætur.

Í efnarafölum er efnaorku eldsneytisins hins vegar breytt í raforku með hárrí nýtni, sem fræðilega getur orðið allt að 100%. Orkunýtni efnarafala í frumgerðum vetnisbíla í dag er um 60%.

2. Íslenskar orkulindir

Ísland er staðsett í braut rakahlaðinna Norður-Atlantshafs-lægðanna sem valda mikilli úrkomu á landinu. Landið er fjöllótt, rís upp í 2.000 metra hæð. Þá eru 10% landsins þakin jökklum sem geyma mikla vatnsorku. Allt þetta skapar kjöraðstæður til að virkja vatnsafl og framleiða raforku.

Þá leiðir staðsetning landsins á svonefndum heitum reit á mörkum Ameríku og Evrasíu platnanna til þess að mikill varmi streymir upp í gegnum bergið og hitar grunnvatn. Þetta leiðir svo aftur til mikillar jarðhitavirkni. Gufu háhitasvæðanna má að sjálf-sögðu virkja eins og nú er gert og framleiða raforku í gufuhverflum, sem aftur má nota til að rafgreina vatn og framleiða vetni. En jarðhitinn opnar að auki ýmsa aðra möguleika tengda vetnisvinnslu sem, ef grannt eru skoðaðir, gætu reynst hagkvæmir. Um nokkra slíka möguleika verður fjallað síðar í þessari grein.

Talið er að vatnsorka, sem hagkvæmt er að virkja á Íslandi, gæti skilað 30 terawattstundum (tera=10¹²) af raforku á ári. Jarðhitinn er miklu stærri orkulind. Hann hefur verið áætlaður um 200 terawattstundir á ári. Úr þessari varmaorku mætti vinna um 20 terawattstundir á ári af raforku með þeirri tækni sem nú er notuð, þ.e. að framleiða raforku í gufuhverflum.

Samkvæmt ofansögðu mætti því á hagkvæman hátt framleiða um 50 terawattstundir á ári af raforku. Þegar hafa verið virkjaðar um 8 terawattstundir á ári eða 16% af áætlaðri virkjanlegu afli. Ef innlend raforka á að koma í stað alls innflutts eldsneytis þarf að virkja 5 terawattstundir á ári til viðbótar. Þá hefðu Íslendingar virkjað 26% af áætluðu virkjanlegu afli.

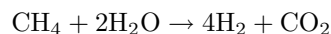
Vatnsorka og jarðhiti munu augljóslega geta fullnægt orkuþörf Íslendinga um langa framtíð. Þá er að auki sá möguleiki fyrir hendi að virkja aðrar tiltækar orkulindir, t.d. vindorku, ölduorku og sjávarfallaorku, þó það verði tæplega gert svo nokkru nemi meðan næg ódýr vatnsorka og jarðhiti er til staðar.

3. Vetnisvæðingin

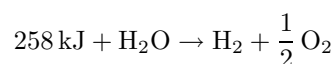
Vetni má í raun framleiða með öllum tiltækum orkulindum heimsins: hvers kyns jarðefnaeldsneyti, kjarnorku, lífmassa, geislun sólar, vatnsorku, vindorku,

ölduorku, sólarorku varðveittri í höfunum sem varmi, sjávarfallaorku og jarðhita.

Langmestur hluti þess vetnis sem nú er framleitt er unnið með því að láta jarðgas hvarfast við gufu við háan hita. Heildarefnahvarfinu má lýsa með jöfnunni:



Á nokkrum stöðum þar sem ódýr vatnsorka er aðgengileg, eins og á Íslandi, er vetni hins vegar unnið með rafgreiningu, þ.e. raforka er notuð til að kljúfa vatn í frumefni sín. Heildarefnahvarfinu má lýsa með jöfnunni:



Á þennan hátt hafa Íslendingar framleitt um 2.000 tonn af vetni á ári í 50 ár. Vegna reynslu við vetnisframleiðslu, gnægðar ódýrrar orku til raforkuframleiðslu og af ýmsum öðrum ástæðum virðist Ísland því kjörrið land til að hefja vetnisvæðinguna og hefur í raun hafið hana.

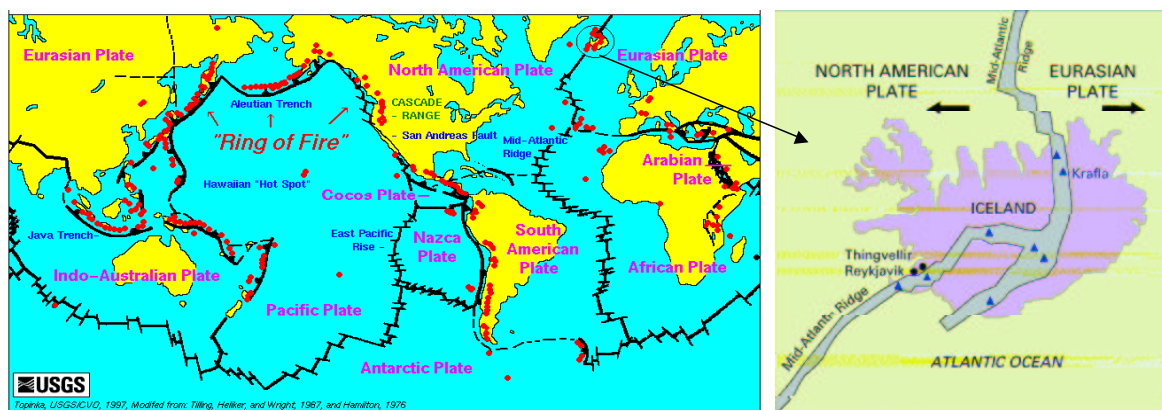
Í apríl árið 2003 var tekin í notkun vetnisstöð fyrir almenning í Reykjavík. Vetnisstöðin er byggð sem hluti af Shell bensínstöð en það er meðal annars gert til að sýna hvernig mætti byggja slíkar stöðvar í áföngum inn í núverandi bensínstöðvakerfi landsins. Þar er vetnið framleitt á staðnum með rafgreiningu vatns. Í október sama ár voru þrjár vetnisstrætisvagnar teknir í notkun í strætisvagnakerfi Reykjavíkur.

Önnur þýðingarmikil ástæða þess að Ísland er kjörrið land til að innleiða vetnisvæðinguna er að hér býr fámenn þjóð í litlu landi. Uppbygging framleiðslu- og dreifikerfis fyrir vetni yrði því tiltölulega einföld og ódýr, miðað við það sem yrði hjá stórbjóðunum.

Fjórir stærstu bílaframleiðendurnir í Japan, General Motors í Bandaríkjunum og fleiri hafa skýrt frá því að þeir hyggist setja á markað vetnisknúna einkabíla fyrir lok þessa áratugar. Vetnið verður geymt í bílunum sem gas undir þrýstingi, í nægilegu magni til að þeir geti ekið 350 km á hverri áfyllingu. Til að slíkir bílar geti ekið hringveginn umhverfis landið þarf aðeins fimm vetnisstöðvar til viðbótar þeirri sem nú er í Reykjavík.

4. Jarðhiti og vetni

Tæknilega vinnanleg orka úr jarðhita í heiminum er talin 64 exajoule á ári. Samanburður við tæknilega vinnanlega orku úr sólgeislun, 586 exajoule á ári, sýnir að jarðhitinn er ein af mikilvægari orkulindum jarðar



Mynd 1. Flekamörk jarðskorpunnar og eldvirk svæði á jörðinni þar sem jarðhiti finnst. Á myndinni má meðal annars sjá legu Íslands á mörkum Norður-Ameríku og Evrasíu flekanna og staðsetningu landsins á svonefndum heitum reit.

(sjá töflu 3). Það er því full ástæða til að kanna á hvern hátt jarðhiti geti reynst hagkvæm orkulind í þeirri vetnisvæðingu sem nú virðist í auglýn.

Mynd 1 sýnir flekamörk jarðskorpunnar og eldvirk svæði á jörðinni þar sem jarðhiti finnst. Á myndinni má meðal annars sjá legu Íslands á mörkum Norður-Ameríku og Evrasíu flekanna og staðsetningu þess á svonefndum heitum reit.

Umtalsverð raforka er nú framleidd á Íslandi á þann hátt að háhitajarðgufa knýr gufuhverfla. Þessa raforku má síðan nota til að framleiða vetni á hefðbundinn hátt með því að rafgreina vatn.

Að auki býður jarðhitinn ýmsa aðra möguleika á vetnisvinnslu, sem við fyrstu athugun virðast áhuga-verðir. Þeir gætu hugsanlega aukið magn vetnis, sem vinna má úr jarðhita, umfram það sem nú er talið, og jafnvel reynst hagkvæmari en núverandi vinnsluaðferðir. Hér á eftir verður fjallað um þessa möguleika.

5. Vetnisgas í útstreymi háhitasvæða

Efnagreining á gasútstreymi frá háhitasvæðum á Íslandi og jarðhitasvæðum víðsvegar um heiminn (sjá mynd 1), sýna að gasið inniheldur víða umtalsvert vetni, sem mögulegt væri að safna og hreinsa. Talið er að þetta vetni myndist þegar tvígildar járnjónir í bráðnu magma afoxa vetnisjónir vatns um leið og járnjónirnar oxast í þrígildar járnjónir, í svonefndum "steam-iron process". Slíkt gas streymir til dæmis upp í Bjarnarflagi á Kröflusvæðinu (sjá mynd 2).

Tafla 4 sýnir efnasamsetningu gass sem streymir upp úr tveim holum í Bjarnarflagi en þetta gas inni-



Mynd 2. Gasútstreymi á Kröflusvæðinu inniheldur umtalsvert vetni. Sumar borholurnar þar gefa af sér um 50 tonn af vetni á ári sem er jafnmikið og vetnisstöðin í Reykjavík framleiðir. Vinnsla vetnis úr brennisteinsvetni gæti tvöfaldað þetta magn.

heldur að vísu óvenju mikið vetni. Samkvæmt töflu 4 gefa þessar tvær holur af sér 99,7 tonn af vetni á ári eða um 273 kg á dag, sem er rúmlega tvöföld framleiðslan í vetnisstöðinni á Grjóthálsi í Reykjavík. Ef unnt væri að hreinsa þetta vetni, en allt bendir til að það sé vel mögulegt, mætti brenna því í efnarafölum.

Ef við gerum ráð fyrir að 5 kg af vetni þurfi til að fylla eldsneytistank einkabíls, sem í framtíðinni verður knúinn vetni, munu þessar holur gefa af sér nægilegt vetni til að fylla eldsneytistanka 55 einkabíla á dag hvern dag ársins.

Tafla 4. Efnasamsetning gass úr tveim holum í Bjarnarflagi á Kröflusvæðinu.**Hola BJ-11**

	CO ₂	H ₂ S	H ₂	CH ₄	N ₂	Alls
mg gas/kg gufu	1587	1465	110	6	24	3192
Massa %	49,7	45,9	3,4	0,2	0,8	100
Rúmmáls %	26,8	31,9	40,4	0,3	0,6	100
Tonn á ári	681	629	47,2	2,6	10,3	1370

Hola BJ-12

	CO ₂	H ₂ S	H ₂	CH ₄	N ₂	Alls
mg gas/kg gufu	3675	1668	157	8	34	5542
Massa %	66,3	30,1	2,8	0,2	0,8	100
Rúmmáls %	39,4	23,1	36,7	0,2	0,6	100
Tonn á ári	1229	558	52,5	2,7	11,4	1854

6. Brennisteinsvetni í útstreymi háhitasvæða, viðbótar vetnislind

Gasútstreymi háhitasvæða inniheldur oft umtalsvert af brennisteinsvetni. Af töflu 4 sést að hvor hola í Bjarnarflagi gefur af sér H₂S sem mætti vinna úr um 40 tonn af vetni á ári eða 203 kg á dag. Samkvæmt því gæti vinnanlegt vetni úr brennisteinsvetni úr þessum holum í Bjarnarflagi nægt til að fylla eldsneytistanka um 40 einkabíla á dag.

Heildarmagn vinnanlegs vetnis úr holunum tveim í Bjarnarflagi, BJ-11 og BJ-12, nægir til að fylla eldsneytistanka um 100 einkabíla á dag hvern dag ársins.

Tengi vetnis við brennistein í H₂S er tiltölulega veikt, miðað við tengi vetnis í ýmsum öðrum efnasamböndum. Staðalmyndunarvarmi H₂O er $\Delta H_f = -286$ kJ/mól en staðalmyndunarvarmi H₂S er aðeins $\Delta H_f = -21$ kJ/mól. Þetta þýðir að orka sem þarf til að kljúfa H₂S er minni en einn tíundi þeirrar orku, sem þarf til að kljúfa H₂O. Að vinna vetni úr H₂S er því augljóslega orkulega mun hagkvæmara en að vinna vetni úr H₂O.

Til að vinna vetni úr brennisteinsvetni eru margir möguleikar fyrir hendi. Að undangengnum talsverðum athugunum hafa rannsóknir við Háskóla Íslands einkum beinst að eftirfarandi: Ef ferríklóríð er leyst upp í saltsýrulausn og hún mettuð með brennisteinsvetni afoxast ferríjónirnar auðveldlega í ferrójónir um leið og súlfíðjónirnar oxast í fastan brennistein, sem má skilja frá lausninni. Með því að rafgreina lausnina eru ferrójónirnar oxaðar til baka í ferríjónir

við forskautið (e. anode) og vetnisjónirnar afoxaðar í vetni við bakskautið (e. cathode). Eftir þurrkun er vetnið sem myndast nægilega hreint til að nota á efnarafala.

Ofangreindu ferli má lýsa með eftirfarandi tveggja þrepa efnahvarfi:

- $\text{H}_2\text{S} + 2\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{S} + 2\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}^+$
- $2\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}^+ \rightarrow 2\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2$ (rafgreining)

Jafnvægisfasti fyrir þrep (1), $K \sim 10^{20}$, er mjög hagstæður. Staðalafoxunarspenna í súrri lausn fyrir ferríjón yfir í ferrójón er 0,77 V. Staðalafoxunarspenna fyrir súrefni yfir í súrefnisjón er 1,23 V og staðalafoxunarspenna fyrir klór yfir í klóríðjón er 1,36 V. Sé spennunni haldið neðan við 1,23 V myndast því ekkert súrefni eða klór við forskautið.

7. Háhitarafgreining

Rafgreiningu vatns er skipt í 3 flokka eftir tegund raflausnar:

Basísk rafgreining (e. Alkaline electrolysis).

Raflausn: KOH lausn.

Orkunýtni: 78%

PEM rafgreining (e. PEM electrolysis)

Raflausn: Himna sem hleypir gegnum sig vetnisjónum.

Orkunýtni: 90%

Háhitarafgreining gufu (e. High temperature steam electrolysis)

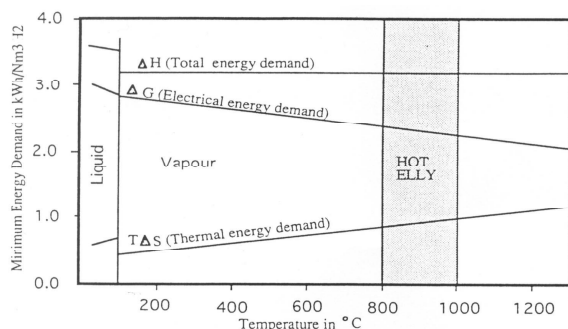
Raflausn: Keramik (ZrO₂, Y₂O₃ og MgO) sem hleypir gegnum sig súrefnisjónum

Orkunýtni: 94%

Til framleiðslu á vetni í miklu magni hefur hingað til hefur verið notuð basísk rafgreining, meðal annars á Íslandi.

PEM rafgreining (e. Proton Exchange Membrane electrolysis) er nú einnig orðin vel þekkt tækni og margt sem bendir til að hún muni á næstunni leysa af hólmi basiska rafgreiningu vegna betri orkunýtni.

Háhitarafgreining (HOT ELLY), sem var fyrst lýst af Dönitz og samstarfsmönnum hans 1990 [4]. Háhitarafgreining fer fram á hitastigsbilinu 800–1000°C. Algengasta raflausnin er ZrO₂ blandað nokkru Y₂O₃ og MgO. Gufan sem á að rafgreina kemur að bakskautinu. Eftir að gufan hefur klofnað í vetni og súrefnisjónir fara súrefnisjónirnar gegnum



Mynd 3. Myndin sýnir hvernig heildarorkuþörf (ΔH), lágmarksraforkuþörf (ΔG) og varmaþörf ($T\Delta S$) við rafgreiningu á vatni eða gufu breytist sem fall af hitastigi. Myndin sýnir meðal annars að ef 100°C gufa er rafgreind í stað vatns við sama hitastig lækkar heildarorkuþörfin sem nemur uppgufunarvarma vatnsins. Með hækkandi hitastigi lækkar raforkuþörfin frekar en varmaþörfin vex að sama skapi.

keramikefnið oxast við forskautið og mynda súrefni. Samhengið milli hitastigs og nauðsynlegrar orku til að kljúfa vatnsgufuna sést best með því að athuga hvernig heildarorkuþörfin, ΔH , skiptist milli ΔG og $T\Delta S$.

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S$$

ΔH : Vermis-breyting eða heildarorkuþörf (e. enthalpy).

ΔG : Lágmarksvinna (e. Gibbs free energy)

T : Kelvin hitastig

ΔS : Óreiðu-breyting (e. entropy)

Mynd 3 sýnir hvernig heildarorkuþörf (ΔH), lágmarksraforkuþörf (ΔG) og varmaþörf ($T\Delta S$) við rafgreiningu á vatni eða gufu breytist sem fall af hitastigi. Myndin sýnir meðal annars að ef 100°C gufa er rafgreind í stað þess að rafgreina vatn við sama hitastig lækkar heildarorkuþörfin sem nemur uppgufunarvarma vatnsins. Með hækkandi hitastigi lækkar raforkuþörf en varmaþörfin vex að sama skapi.

Við hefðbundna rafgreiningu á vatni kemur öll orkuþörfin frá raforku. Háhitarafrgreining opnar hins vegar þann möguleika að minnka raforkuna umtalsvert og þá einnig framleiðslukostnað, ef fyrir hendi er ódýr varmaorka.

Árið 1992 var gerð lausleg hagkvæmnikönnun við Háskóla Íslands á því hver yrði framleiðslukostnaður vetnis, annars vegar ef það væri framleitt með tveim hefðbundnum basískum rafgreiningaraðferðum (Norsk Hydro og Lurgi), og hins vegar ef vetnið væri framleitt með háhitarafrgreiningu og jarðhiti notaður

til að sjá fyrir varmaorkunni eftir því sem unnt væri. Var gert ráð fyrir að úr jarðhita mætti fá 250°C gufu sem síðan yrði hitað frekar í $800\text{--}1000^\circ\text{C}$. Niðurstaða þeirrar athugunar leiddi í ljós að lækka má framleiðslukostnað um allt að 20% frá því sem nú er [5].

Þegar ofangreind athugun var gerð voru rannsóknir á háhitarafrgreiningu á frumstigi. Síðan hefur þessi tækni verði rannsökuð mikið og endurbætt, einkum í tengslum við svonefna “solid oxide” efnarafala, en þeir eru í raun háhitarafrgreinar þar sem efnahvarfinu er snúið við. Miðað við þá þekkingu sem nú liggur fyrir er vissulega fyllsta ástæða til frekari athugana á mögulegri vetnisframleiðslu með háhitarafrgreiningu.

8. Rafgreining með varmarafmagni

Stór hluti jarðvarmans, sem er aðgengilegur í yfirborði landsins, er á hitastigi um og undir suðumarki vatns. Þess vegna er hann ekki nothæfur beint á gufuhverfla og getur að jafnaði ekki nýst til rafmagnsframleiðslu.

Í byrjun níunda áratugar síðustu aldar smíðuðu tæknimenn Raunvísindastofnunar Háskólans, þeir Jón Sveinsson og samstarfsmenn hans, litla rafstöð sem sett var upp í skálanum í Grímsvötnum. Þessi rafstöð byggir á svokölluðum Seebeck hrifum, þar sem hitastigull leiðir til spennunar sem nota má til að reka rafstraum. Rafstöðin sem aðeins var fáein wött að stærð, var notuð sem aflstöð fyrir merkjasendingar frá Vatnajökli til höfuðstöðva Raunvísindastofnunar.

Tuttugu árum síðar var stofnað sprotafyrirtæki til þess að vinna frekar að þróun varmarafmagns, Varmaraf ehf. Nýjungar í efnistöknun og framleiðslutækni voru nýttar til þess að smíða öflugna varmaskipta sem búnir voru raðtengdum Seebeck einingum.

Þegar tækni varmarafmagns er beitt í jarðhita er lykilatriði að nota efni með háan Seebeck stuðul, $\alpha = dV/dT$, stigul íspennunnar með hita. Nýtni slíks kerfis η er lýst með svokölluðum gæðastuðli (e. figure of merit), Z , sem er ritaður

$$Z = \alpha^2 \sigma / \lambda$$

þar sem σ er rafleiðni og λ varmaleiðni varmarafefnisins. Með þessum hætti má beisla hitastigla og umbreyta varmaflæði þeirra í rafstraum.

Nýtni varmarafala er háð gæðastuðlinum og hitastigi heitu og köldu lindanna, T_h og T_c , samkvæmt jöfnunni [6, 7]

$$\eta = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) * \left(M - \frac{1}{M + T_c/T_h}\right)$$



Mynd 4. Varmarafali sem breytir hluta af varma heits vatns í raforku. 90°C heitt vatn og 10°C kælivatn gefur 4% nýtni. (Birt með leyfi Varmarafs ehf)

þar sem

$$M = \sqrt{1 + Z(T_c + T_h)/2}$$

Þróun varmarafmagnstækni hjá Varmarafi hefur leitt til bestu fánlegu nýtni í samspili heits og kalds vatns og er beitt í jarðhitaumhverfi. Þannig næst um 4% nýtni í samspili 90°C heits vatns og 10°C kælivatns. Gufuhverfla er auðvitað ekki hægt að nota við svo lágan hita, nema með notkun annars vinnsluvökva með aðra uppgufunareiginleika en vatn.

Sett var upp rafgreining á Raunvísindastofnun Háskólans þar sem heitt og kalt kranavatn var notað sem heit og köld lind. Með þessu móti var framleitt vetni og það nýtt í efnarafala í sýnitilraun. Hér er í fyrsta skipti í sögunni framleitt vetni með heitu og köldu kranavatni. Varmaraf ehf. hefur markaðssett slíka varmarafala til vetnisframleiðslu á heimsmarkaðnum, einkum sem kennslutæki enn sem komið er (sjá mynd 4).

9. Orkusaga Íslendinga

Mynd 5 sýnir meginvörður í orkusögu Íslendinga. Þegar fyrstu landnámsmennirnir komu til Íslands nýttu þeir eingöngu endurnýjanlegar orkulindir, vind, sól, birkiskóga og rekavið. Fljótlega hafa þó Íslendingar einnig tekið að brenna mó og síðan sauðataði. Vegna kolagerðar mun fljótt hafa gengið á birkiskógana en kolin voru meðal annars nauðsynleg til að framleiða járn úr mýrrauða auk hvers kyns járnsmíði. Á átjándu öld tóku Íslendingar að flytja inn fyrstu kolin og á níttjándu öld fyrstu olíuna. Um 1900 var mestur hluti af orkunotkun Íslendinga innflutt eldsneyti, kol og olía. Þó mun eitthvað af mó, sauðataði, rekavið og surtarbrandi hafa verið brennt á fyrstu áratugum tuttugustu aldar. Á fyrstu áratugum tuttugustu aldar hófst virkj-



Mynd 5. Meginvörður í orkusögu Íslendinga. Sjá skýringar í texta.

un fallvatna til raforkuframleiðslu og um miðja öldina fóru Íslendingar að hita hús sín með jarðhita í stað innflutts eldsneytis. Íslendingar hafa því á síðustu öld, með raforkuvæðingu og jarðhitavæðingu, stigið tvö stór skref í þá átt að nýta innlendir endurnýjanlegar orkulindir í stað innflutts eldsneytis. Það hefur leitt til þess að nú er aðeins um einn þriðji hluti af heildarorkunotkun landsmanna innflutt eldsneyti.

Og nú í byrjun tuttugustu og fyrstu aldar virðist í augsýn þriðja stóra skrefið, sem er vetnisvæðingin. Með því er þess vænst að vetni framleitt úr vatni og endurnýjanlegri innlendri orku geti komið í stað alls eldsneytis sem enn er flutt til landsins.

Þegar þetta þriðja og síðasta skref í að skipta um orkugjafa hefur verið stigið, vonandi um miðja þessa öld, er þess að vænta að öll orka notuð í landinu komi frá innlendum endurnýjanlegum orkulindum, líkt og við upphaf landnáms.

Heimildir

- [1] World Energy Assessment, 1998.
- [2] K.S. Deffeyes, *Hubbert's Peak The Impending World Oil Shortage*, Princeton University Press (2001).
- [3] J. Nitsch, Energy Supply Structures and the Importance of Gaseous Energy Carriers. In: *Hydrogen as Energy Carrier*, Ed. Carl-Jochen Winter and Joachim Nitsch, Springer Verlag pp. 13-29 (1988).
- [4] W. Dönitz, R. Erdle, and R. Streicher, *High Temperature Electrochemical Technology for Hydrogen Production and Power Generation. Electrochemical Hydrogen Technologies. Electrochemical Production and Combustion of Hydrogen*, pp. 213-259, Ed. Hartmut Wendt, Elsevier (1990).
- [5] V.K. Jonsson, R.L. Gunnarsson, B. Arnason, and T.I. Sigfusson, The Feasibility of Using Geothermal Energy in Hydrogen Production, *Geothermics* **21** No. 5/6, pp. 673-681 (1992).
- [6] L.I. Anatyshuk, Physics of Thermoelectricity, Institute of Thermoelectricity, Ukraine (1998).
- [7] T.I. Sigfusson, The Physics of Thermoelectricity. *Proceedings of the Icelandic Physics Society Biennial Meeting*, ed. A. Ólafsson, June 2002, pp. 203-213 (in Icelandic).

Um höfundana: Bragi Árnason er prófessor í efnafræði við Raunvísindadeild Háskóla Íslands.

Þorsteinn I. Sigfússon er prófessor í eðlisfræði við Raunvísindadeild Háskóla Íslands.

Raunvísindastofnun Háskólans
Dunhaga 3, IS-107 Reykjavík
arnason@raunvis.hi.is
this@raunvis.hi.is

Móttekin: 6. júlí 2004

Summary: The paper discusses the foreseen shrinkage in the liquid fossil energy reserves on Earth and the roles of renewable energy sources in bridging the gap. Iceland already fulfils a large proportion of its energy demand by utilizing hydroelectric and geothermal energy. An emerging hydrogen economy in Iceland uses these sources together with water to power a demonstration fleet of busses in Reykjavik. The hydrogen is distributed from a hydrogen refueling station in Reykjavik, the first commercial one to be operated in the world. The paper discusses various possible uses of geothermal energy for hydrogen production, both from electrolysis by the use of renewable electricity as well as high temperature geothermally assisted electrolysis and thermoelectric electrolysis. Finally possible production of hydrogen from geothermal gasses is described. By developing the hydrogen economy it is hoped that Iceland can become totally self sufficient as regards energy around the middle of the present century and thus return to the sustainability situation that characterised the age of settlement in the ninth century.