



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

VETNI OG VETNISSAMBÖND

Framleiðsla og hugsanleg notkun
í stað innflutts eldsneytis

Bragi Árnason
Raunvísindastofnun Háskólans

OS80026/JHD15
Reykjavík, ágúst 1980

Unnið fyrir
vinnuhóp um vetni
og vettissambönd

VETNI OG VETNISSEAMBÖND

**Framleiðsla og hugsanleg notkun
í stað innflutts eldsneytis**

**Bragi Árnason
Raunvísindastofnun Háskólans**

OS80026/JHD15
Reykjavík, ágúst 1980

**Unnið fyrir
vinnuhóp um vетни
og vетнissambönd**

FORMÁLI

Um áramótin 1978/1979 skipaði Jakob Björnsson, orkumálastjóri, vinnuhóp um vetni og vettmissambönd til að kanna möguleika á að framleiða eldsneyti hér á landi. Í vinnuhópnum voru Bragi Árnason (Raunvíständstofnun), Runólfur Þórðarson (Álburðarverksmiðjunni), Gunnlaugur Jónsson (Orkustofnun) og Jón Steinar Guðmundsson (Orkustofnun), sem var jafnframt formaður hópsins. Í skipunarbréfi vinnuhópsins var lögð áhersla á notkunarmöguleika rafgreinds vettis og var Braga Árnasyni því falið að semja skýrslu um núverandi stöðu og líklega þróun aðferða til að framleiða, geyma, dreifa og brenna vettin. Þessi skýrsla hefur nú verið fjölfölduð og birtist hér eins og höfundurinn, Bragi Árnason, lagði hana fram í vinnuhópnum í nóvember 1979. Skýrsluna ber ekki að skoða sem álit vinnuhópsins né Orkustofnunar. Í maí 1980 skilaði vinnuhópurinn hins vegar álitsgerð sinni (Framleiðsla eldsneytis á Íslandi, Orkustofnun, OS-80-016/JHD-08, 61 s.) til orkumálastjóra, en þar er m.a. fjallað um framleiðslu og notkunarmöguleika rafgreinds vettis hér á landi.

J.S.G.

EFNISYFIRLIT

	Bls.
FORMÁLI	3
EFNISYFIRLIT	5
YFIRLIT OG HELSTU NIÐURSTÖÐUR	7
1 INNGANGUR	15
2 VETNISFRAMLEIÐSLA	17
2.1 Úr jarðgasi, olíu og kolum	17
2.2 Rafgreining	19
2.3 Varmaefnafræðilegar aðferðir	25
2.4 Aðrar aðferðir	27
2.5 Framleiðslukostnaður vetrnis	28
3 DÉTTING VETNIS	37
4 GEYMSLA, FLUTNINGUR OG DREIFING VETNIS	41
4.1 Loftkennt ástand	41
4.2 Fljótandi vetrni	49
4.3 Hydrið	54
5 NOTKUN VETNIS	65
5.1 Hráefni í iðnaði	65
5.2 Orkufrek stóriðja	66
5.3 Eldsneyti á farartæki	68
5.3.1 Vetrnisbilar	69
5.3.2 Vetrnisþotur	73
5.3.3 Vetrnisskip	78
6 UMHVERFISMÁL	83
7 ÖRYGGISMÁL	87
8 HREINT VETNI SEM ELDSNEYTI	91
9 FJJÓTANDI ELDSNEYTI ÚR VETNI OG KOLEFNI	97
9.1 Eldsneytistegundir	97
9.2 Kolefnisgjafar	97
9.3 Framleiðsluaðferðir	100

	Bls.
9.3.1 Eldsneyti úr vetni og kolsýru	100
9.3.2 Kolagösun - Mógösun	101
9.3.3 Methanol úr kolum og vetni	103
9.3.4 Hlutoxun kolefnis	104
9.3.5 Kolabréðsla	105
9.4 Framleiðslukostnaður fljótandi eldsneytis	106
9.4.1 Eldsneyti úr vetni og kolsýru eða kolmonoxíði .	107
9.4.2 Eldsneyti úr vetni og kolum	110
HEIMILDASKRÁ	117
VIÐBÆTIR	129

YFIRLIT OG HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Skýrsla þessi fjallar um vetni og nokkur vetnissambönd, framleiðslu þeirra og hugsanlega notkun í stað núverandi eldsneytistegunda.

Fyrri hluti skýrslunnar fjallar einkum um hreint vetni. Í þeim hluta eru kannaðar allar helstu aðferðir, sem nú eru notaðar í heiminum til að framleiða vetni eða kunna að verða notaðar til þess í náinni framtíð. Þá hefur einnig verið athugað, hver sé framleiðslukostnaður vetnis, sem framleitt er með nú tiltækum aðferðum eða aðferðum, sem líklegt er að verði nothæfar innan skamms. Hefur einkum verið lögð áhersla á að að kanna, hvað það muni kosta að framleiða vetni með svonefndum rafgreiningaraðferðum og hvort rafgreining sé samkeppnisfær við aðrar aðferðir. En rafgreining er nánast eina aðferðin, sem kemur til greina, ef framleiða á vetni á Íslandi í stórum stíl í framtíðinni. Loks hefur verið reynt að meta á sem raunhæfastan hátt, hversu líklegt sé að vetni geti á næstu áratugum leyst af hólmi þær eldsneytistegundir, sem nú eru mest notaðar í heiminum.

Síðari hluti skýrslunnar fjallar svo um nokkrar tegundir fljótandi eldsneytis, sem hugsanlegt er að frámleiða á Íslandi, úr vetni og kolefni eða kolefnasamböndum. Athugað hefur verið hvaða kolefnisgjafa kæmi helst til greina að nota í þessu skyni ásamt vetninu, hvaða eldsneytistegundir kæmi helst til greina að framleiða og hvaða framleiðsluaðferðir séu tæknilega aðgengilegastar. Loks er gerð á því lausleg könnun, hver muni verða framleiðslukostnaður nokkura álittlegra fljótandi eldsneytistegunda.

Mestur hluti þess vetnis, sem nú er framleitt í heiminum, er framleitt úr jarðgasi og gufu. Framleiðslukostnaður sliks vetnis í Bandaríkjjunum er um 5-6 \$/GJ. Vetni úr jarðgasi er því nú verulega ódýrara en vetni, sem framleiða mætti úr ódýrustu fáanlegum kolum 7,8-12,5 \$/GJ. Vetni framleitt með rafgreiningu er einungis samkeppnisfært við núverandi vetni úr jarðgasi, ef raforkuverð er 7-11 mill/kWh eða 10-14 mill/kWh, eftir því hvort reiknað er með að notuð sé núverandi rafgreiningartækni eða svonefnd SPE-rafgreiningartækni, sem talið er að verði nothæf til að framleiða

vetni í stórum stíl innan fárra ára.

Þótt vetni framleitt úr jarðgasi sé enn ódýrasta vetnið, sem völ er á í heiminum, nema ef um er að ræða mjög ódýra raforku til framleiðslunnar, virðist allt benda til að svo verði vart lengi enn. Þörfin fyrir jarðgas fer ört vaxandi og jafnframt er talið að jarðgasverð muni hækka verulega á næstu árum, gagnstætt því sem er um kol. Er álitið að jarðgasverð í Bandaríkjunum muni fljótlega hækka það mikið, að framleiðslukostnaður vettis, sem framleitt verður þar úr jarðgasi, verði 9,5 \$/GJ. Verður því vart annað ráðið, en vetni framleitt úr kolum muni í framtíðinni verða álika dýrt og vetni úr jarðgasi. Vetni framleitt með núverandi rafgreiningaraðferðum yrði þá jafndýrt og vetni úr jarðgasi, ef reiknað er með raforkuverði 18 mill/kWh og vetni framleitt með væntanlegri SPE-rafgreiningu gæti þá orðið samkeppnisfært við vetni úr jarðgasi þótt reiknað sé með raforkuverði 21-25 mill/kWh. Verður af þessu vart dregin önnur ályktun en sú, að í náinni framtíð megi framleiða á Íslandi vetni, sem tæpast verður dýrara en það vetni, sem má framleiða ódýrast annars staðar í heiminum.

Með svonefndri Norsk Hydro rafgreiningartækni, en það er sú tækni, sem nú er notuð í Áburðarverksmiðjunni í Gufunesi, mundi framleiðslukostnaður vettislofts vera 4,8-10,1 \$/GJ, ef reiknað er með raforkuverði 5-20 mill/kWh. Með tilkomu SPE-rafgreiningartækni gæti svo framleiðslukostnaðurinn lækkað nokkuð.

Fljótandi vetni er um 40% dýrara en vettisloft, ef miðað er við magn. Fljótandi vetni er hins vegar mun orkuríkara eldsneyti en vettisloft. Og miðað við magn yrði nýtnin talsvert betri, þegar fljótandi vetni er notað sem eldsneyti á hreyfla, heldur en þegar notað er vettisloft.

Vetni má geyma eða flytja í þrenns konar ástandi, sem lofttegund, sem vökva við lágt hitastig eða fast bundið í hydriðum. Sú tækni, sem til þarf, er þekkt og hefur þegar verið notuð til að flytja og geyma vetni í

umtalsverðum mæli. Eru ekki fyrirsjáanlegir neinir óyfirstiganlegir erfiðleikar við að beita sömu tækni til að geyma eða flytja vetni í stórum stíl, ef almennt yrði tekið að nota það sem eldsneyti.

Ef flytja á mikið magn vetnis á landi, er án efa hagkvæmast að flytja það sem lofttegund eftir leiðslum. Á mjög löngum leiðum eða yfir úthöf er þó hagkvæmara að flytja vetni sem vökva.

Vegna þyngdar eru hydrið ekki talin koma til greina til að flytja mikið magn vetnis milli staða. Hydrið eru hins vegar mjög örugg vetnisgeymsla. Eru þau talin álitlegasta leiðin til að geyma vetni í bílum, ef tekið yrði að nota það sem eldsneyti á farartæki. Í skipum yrði að öllum líkindum heppilegra að geyma vetnið fljótandi fremur en í hydriðum. Í flugvélum kæmi einungis fljótandi vetni til greina.

Í orkufrekum iðnaði, þar sem nú er brennt jarðgasi eða olíu, er til-tölulega auðvelt að taka upp notkun vetnis. Sé vetni blandað saman við jarðgas er unnt að brenda blöndunni í núverandi jarðgasbrennurum óbreyttum, ef vetrismagnið er undir 20%. Verði vetrismagnið meira, þarf hins vegar að breyta brennurunum og ef tekið verður að nota hreint vetni, þarf nýja tegund brennara.

Vetni má nota til að knýja flestar gerðir aflvélum sem nú eru notaðar. Það er mjög gott eldsneyti á þotuhreyfla og venjulega bensínþreyfla og með því að gera á dieselvélum nokkrar breytingar er unnt að knýja þær vetni. Þá má einnig nota vetni til að knýja svonefndar efnarafala, en þegar vetni er brennt í efnaraföldum verður nýtni eldsneytisins mun betri, en þegar því er brennt í sprengihreyfum.

Nú þegar hefur nokkrum bensínvílum verið breytt þannig að þeir ganga fyrir vetni. Sumir af þessum bílum geta þó gengið jöfnum höndum fyrir vetni eða bensíni. Í lang flestum vetrismívélum er vetnið geymt í hydriðum.

Sem stendur fara fram í Bandaríkjum allviðtækjar athuganir á því að nota vetni sem eldsneyti á þotur. Er ljóst af þeim niðurstöðum, sem nú liggja fyrir, að vetni hefur ýmsa kosti fram yfir núverandi þotuelsneyti.

Megin kosturinn er þó ef til vill sá, hversu vetni er létt eldsneyti miðað við orkuinnihald, en núverandi þotuelsneyti vegur um þrefalt meira en vetni.

Enda þótt enn hafi lítið verið hugað að þeim möguleika að nota vetni sem eldsneyti í skipum, virðist slikt vel koma til greina. Í skipum er auðvelt að geyma vetni sem vökva, en hugsanlega einnig í hydriðum. Þá er hugsanlegt að nota efnarafala sem aflvélar í skipum, en í efnaraföldum gæti nýtni eldsneytisins orðið allt að 1,6 sinnum betri en í núverandi aflvélum skipa.

Hvað varðar mengun og umhverfisvernd, þá sýnist vetni kjörið framtíðareldsneyti. Mengun er nánast engin samfara notkun þess og náttúruspjöll, líkt og verða við oliuslys, eru hverfandi þegar um er að ræða vetni.

Þótt vetni sé mjög eldfimt eldsneyti, virðist ekkert til fyrirstöðu, að hægt sé að meðhöndla það og nota á jafnöruggan hátt og núverandi eldsneyti.

Margt bendir til þess, að vetni verði í vaxandi mæli notað sem eldsneyti og muni jafnvel í framtíðinni verða ein af helstu eldsneytistegundum mannkynsins. Virðist þar ræða mestu um, minnkandi oliu- og jarðgasbirgðir jarðar og ört vaxandi mengun andrúmsloftsins ef uppfylla á hrað-vaxandi orkuþörf mannkynsins með því að brenna kolum eða öðru eldsneyti, sem inniheldur kolefni. Einnig ræður miklu, að til að framleiða vetni, er hægt að nota næstum hvaða orkulind sem er og eina hráefnið, sem til þarf, er vatn. Hitt er svo aftur óljósara, hvenær tekið verður að nota vetni sem eldsneyti, sem nokkru nemur. Ýmsir telja að svo verði jafnvel á þessari öld, en aðrir vart fyrr en að 50 árum liðnum.

Að vel athuguðu máli er það álit skýrsluhöfundar, að vetni verði tæpast ein af aðal eldsneytistegundum mannkynsins á þessari öld. Þó ber að hafa í huga, að miklar rannsóknir fara nú fram í heiminum á þeim möguleika að nota vetni í stað núverandi eldsneytistegunda. Þessar rannsóknir gætu

leitt til þess áður en varir, að vetni kynni að reynast hagkvæmt eldsneyti. Vetni er að öllum líkendum það eldsneyti, sem hagkvæmast verður að framleiða á Íslandi í framtíðinni. Sé reiknað með raforkuverði 15 mill/kWh er framleiðslukostnaður vetrnis, sem framleiða má með núverandi rafgreiningartækni, um 8,4 \$/GJ. Núverandi innflutningsverð bensíns og dieselolíu er um 9,3 \$/GJ.

Það hlýtur því að vera eðlilegt, að íslendingar fylgist vel með þeim rannsóknum, sem nú fara fram í heiminum, bæði á notkunarmöguleikum og framleiðslaðferðum vetrnis og leggi jafnvel eitthvað af mörkum til þeirra rannsókna.

Í stað þess að nota hreint vetrni sem eldsneyti, er einnig fyrir hendi sá kostur að tengja vetrnið kolefni og framleiða þannig fljótandi eldsneyti. Megin kostur þess að framleiða slikt fljótandi eldsneyti er sá, gagnstætt því sem er með vetrni, að þetta eldsneyti gæti þegar í stað leyst af hólmi innflutt eldsneyti, án þess að gera þurfi verulegar breytingar á núverandi dreifikerfi eða farartækjum landsmanna.

Helstu tiltækir kolefnisgjafar á Íslandi eru kolsýra úr sjó, lofti eða skeljasandi og auk þess mór. Einnig er nokkuð af kolsýru í hveralofti og nokkuð af kolefni í surtarbrandi og lífrænu sorpi. Þá er hugsanlegt að fá megi kolmonoxið sem afgangsefni frá iðnaði. Loks er fyrir hendi sá möguleiki að flytja inn kol. Þær eldsneytistegundir, sem helst kæmi til greina að framleiða úr kolefni þessara kolefnisgjafa ásamt vetrni eru methanol, bensín og hráolía. Tæknipekking til að framleiða allar þessar eldsneytistegundir er þegar fyrir hendi.

Margt bendir til þess, að kol eða mór séu mun heppilegri kolefnisgjafar en kolsýra eða kolmonoxið, nema ef tveir síðast töldu kolefnisgjafarinir kynnu að vera fáanlegir sem ódýrt afgangsefni frá iðnaði. Til að framleiða ákveðið magn einhverra ofangreindra fljótandi eldsneytistegunda þarf fræðilega þrefalt meira vetrni, ef kolefnisgjafinn er kolsýra og tvöfalt meira vetrni ef kolefnisgjafinn er kolmonoxið, heldur en ef hann er

kol eða mór. En framleiðslukostnaður vetrnis er verulegur hluti af heildarkostnaði eldsneytisins.

Eldsneytisgerð úr kolum og vetrni er þegar vel þekkt tækni. Sama er að segja um eldsneytisgerð úr kolsýru eða kolmonoxíði og vetrni. Eldsneytisgerð úr mó hefur hins vegar aðeins farið fram í litilli tilraunaverksmiðju. Niðurstöður þeirra tilrauna benda þó til að mór kunni að vera hagkvæmari kolefnisgjafi en kol.

A árunum 1939-1940 var gerð allvíðtæk athugun á magni og gæðum mós á Íslandi. Af þeim athugunum verður tæpast annað ráðið, en að nægur mór sé til hérlendis til að fullnægja kolefnispörf landsmanna til eldsneytisgerðar um alllanga framtíð.

A undanförrnum árum hafa verið birtar allmargar áætlanir um framleiðslukostnað eldsneytis, sem framleiða mætti úr vetrni og kolefnini. Þessar áætlanir, sem varla geta talist annað en frumkönnun, eru mjög mismunandi enda byggðar á mjög mismunandi forsendum.

Í áætlunum, þar sem gert er ráð fyrir að notuð sé kolsýra, sem ýmist er fengin úr sjó, lofti, skeljasandi eða frá kolakyntum orkuverum, er t.d. framleiðsluverð bensíns á bilinu 220-1030 \$/tonn. Þá er reiknað með raforkuverði á bilinu 6-30 mill/kWh og ýmist að notuð sé núverandi rafgreiningartækni eða væntanleg SPE-rafgreiningartækni til að framleiða vetrnið.

Tvær áætlanir, þar sem reiknað er með að fá kolsýru úr sjó eða lofti, hafa verið gerðar sérstaklega fyrir íslenskar aðstæður.

Önnur áætlunin gerir ráð fyrir að vinna methanol úr vetrni, sem unnið yrði með SPE-rafgreiningu, og kolsýru, sem unnin yrði úr lofti. Methanolinu yrði síðan breytt í bensín með Mobil aðferð. Ef gert er ráð fyrir raforkuverði 8 mill/kWh, jarðgufuverði 25 ¢/tonn og verksmiðju, sem afkastar um 1750 tonnum af bensíni á dag, yrði framleiðslukostnaður bensíns um 250 \$/tonn (5,7 \$/GJ).

Hin áætlunin gerir ráð fyrir að vinna methanol úr vetni, sem unnið yrði með núverandi rafgreiningartækni, og kolsýru, sem unnin yrði úr sjó. Methanolinu yrði síðan eins og áður breytt í bensín með Mobil-aðferð. Ef gert er ráð fyrir raforkuverði 10 mill/kWh og verksmiðju, sem framleiðir 50 tonn á dag af bensíni, yrði framleiðslukostnaður bensíns um 600 \$/tonn (13,6 \$/GJ).

Ef unnt væri að afla kolmonoxiðs í stað kolsýru gæti framleiðslukostnaður methanolsins og þá bensíns lækkað verulega, jafnvel þótt reiknað sé með að kostnaður við öflun kolmonoxiðs og kolsýru sé sá sami, miðað við kolefnismagn. Þannig mundi framleiðslukostnaður bensíns lækka úr 600 \$/tonn (13,6 \$/GJ) í 450 \$/tonn (10,2 \$/GJ), ef kolmonoxið kæmi í stað kolsýru í áætluninni hér á undan, en forsendur væru að öðru leyti þær sömu.

Kolmonoxið mætti hugsanlega fá með því að brenna mó, eða jafnvel lifrænu sorpi, í hreinu súrefni, sem fellur til við rafgreiningu á vatni. Þá er hugsanlegt að fá kolmonoxið frá iðnaði, sem brennir kolum, t.d. járnblendiverksmiðju.

Gerð hefur verið all rækileg könnun á framleiðslukostnaði eldsneytis, bensíns og hráoliú, sem framleiða mætti úr kolum og vetni eða kolum eingöngu. Sé reiknað með kolaverði 70 \$/tonn (2,5 \$/GJ), raforkuverði 12 mill/kWh og verksmiðjum, sem framleiða 5000 tonn af bensíni eða 50000 tonn af hráoliú á dag, er samkvæmt þessari áætlun jafndýrt að framleiða eldsneytið úr vetni og kolum og kolum eingöngu. Framleiðsluverð bensíns yrði þá 419 \$/tonn (9,5 \$/GJ) eða svipað og innflutningsverð bensíns eða dieseloliú í júlí síðastliðnum. Framleiðslukostnaður hráoliú yrði um 22 \$/tunnu eða svipaður og núverandi skráð OPEC-verð á hráoliú.

Athyglisvert er, að íslenskur móður er að öllum líkendum allmiklu ódýrari kolefnisgjafi en innflutt kol. Framleiðslukostnaður bensíns mundi því að öllum líkendum lækka verulega, ef unnt væri að nota mó í stað kola.

Þær áætlanir um framleiðslukostnað fljótandi eldsneytis, sem hér hefur

verið drepið á eru allmismunandi. Er vart við öðru að búast, þar sem þær eru byggðar á mjög mismunandi forsendum. Má þar nefna misstórar verksmiðjur, mismunandi kolefnisgjafa, mismunandi rafgreiningartækni, mishátt raforkuverð og mismunandi viðmiðunarverðlag. Þá eru þessar áætlanir vart meira en lausleg frumkönnum, að minnsta kosti hvað snertir áætlanir um framleiðslukostnað eldsneytis á Íslandi, og nákvæmar tölur vart tiltækar fyrr en að undangenginni miklu rækilegri athugun.

Verður þó vart séð að áætlaður framleiðslukostnaður þess fljótandi eldsneytis, sem til greina kæmi að vinna á Íslandi, sé mjög frábrugðinn því verði, sem landsmenn þurftu að greiða fyrir innflutt eldsneyti, bensín og gasoliú, þegar verðið reis hæst í júlí síðastliðnum (400 \$/tonn). Virðist því fyllsta ástæða til að gerð verði rækileg könnun, af þar til fengnum sérfróðum mönnum, á því, hvaða eldsneytistegundir, aðrar en vetni, kæmi helst til greina að framleiða á Íslandi, með þeirri tækni, sem nú er fyrir hendi, eða verður það fyrirsjáanlega innan tíðar. Jafnframt, eða í beinu framhaldi af því, þarf að gera hagkvæmniskönnun á þeim leiðum, sem virðast álitlegastar og miða þá við íslenskar aðstæður eingöngu. Fyrst þegar slíkar athuganir liggja fyrir, verður hægt að svara því, hvert yrði raunverulegt framleiðsluverð þess eldsneytis, sem unnt er að framleiða og nota á Íslandi í stað núverandi innflutts eldsneytis.

Hvort ráðlegt sé fyrir íslendinga að nota orkulindir sinar til framleiðslu eldsneytis eða í einhvern annan orkufrekan iðnað, það er svo aftur annað mál, miklu umfangsmeira og þarfnað vissulega rækilegrar athugunar.

1 INNGANGUR

Á tímum ört hækkandi oliuverðs hefur allmikið verið rætt um þann möguleika, að íslendingar gætu í framtíðinni, í vaxandi mæli, nýtt innlenda orku, raforku og jarðvarma, í stað þeirrar orku sem þeir nú flytja inn sem eldsneyti. Í mörgum tilfellum er þetta augljóslega hægt, svo sem við hitun húsa. Jafnvel er hugsanlegt að talsverður hluti af bílaflota landsmanna geti í framtíðinni orðið rafmagnsbílar. Í öðrum tilvikum er þó augljóst, að ekki verður hjá því komist að nota áfram eldsneyti, að minnsta kosti um alllanga framtíð. Þar er einkum um að ræða skipaflota landsmanna, flugvélar og nokkurn hluta bílaflotans. En skipaflotinn einn notar nú um fjórðung þess eldsneytis, sem flutt er til landsins. Sú hugmynd hefur því skotið upp kollinum og reyndar verið allmikið til umræðu um skeið, að landsmenn gætu í framtíðinni ef til vill sjálfir framleitt það eldsneyti, sem þeir þurfa nauðsynlega á að halda.

Vitað er að þær orkulindir, sem nú eru aðgengilegar, þ.e. vatnsorka og varmaorka, eru meir en nægar til að fullnægja innlendri orkuþörf um langa framtíð. Orkuskortur ætti því ekki að standa í vegi fyrir því, að landsmenn geti framleitt allt það eldsneyti, sem þeir þurfa á að halda. Málið snýst fyrst og fremst um eftifarandi atriði. Hvaða eldsneytistegundir er hægt að framleiða á Íslandi, úr innlendri orku og innlendum eða jafnvel innflutum hráefnum? Geta þær eldsneytistegundir komið í stað þess eldsneytis, sem nú er flutt til landsins? Kemur slik eldsneytisframleiðsla til með að verða þjóðhagslega hagkvæm í framtíðinni eða jafnvel nauðsynleg. Í þessari skýrslu verður aðeins reynt að leita svara við því, hvaða leiðir eru tæknilega mögulegar til að framleiða eldsneyti á Íslandi, hvort unnt sé, frá tæknilegu sjónarmiði, að nota slikt eldsneyti í stað núverandi innflutts eldsneytis og hvað slikt eldsneyti kunni að kosta. Þeirri spurningu, hvort þjóðhagslega hagkvæmt kunni að vera að taka upp innlenda eldsneytisgerð, verður ekki reynt að svara hér. Slik athugun er miklu um-

fangsmeiri og flóknari en svo, að hægt sé að gera henni nægileg skil í þessari skýrslu.

Reynt verður að kanna á sem fyllstan hátt, hvaða eldsneytis-tegundir komi helst til greina að framleiða og hvaða leiðir séu tæknilega aðgengilegar til að framleiða þær eða verði það að öllum líkindum innan fárra ára. Þá verður einnig kannað, hvort unnt sé að nota þær eldsneytistegundir á aflvélar farartækja og í iðnaði, þar sem nú er notað innflutt eldsneyti. Loks verður reynt, eftir því sem unnt er út frá tiltækum heimildum, að áætla hver kunni að verða framleiðslukostnaður hugsanlegra eldsneytistegunda.

Kaflar 2 - 8 fjalla eingöngu um vetni. Vetni er ef til vill ein álitlegasta eldsneytistegundin, þegar litið er til lengri tíma. Kafli 9 fjallar svo um þær tegundir fljótandi eldsneytis, sem framleiða má úr vetni og kolefni, sem þá yrði fengið úr aðgengilegum kolefnisgjöfum. Megin kosturinn við slikar fljótandi eldsneytis-tegundir er sá, að þær er hægt að nota á núverandi aflvélar, án þess að gera þurfi á aflvélunum miklar breytingar. Þessum eldsneytistegundum má einnig dreifa með núverandi dreifikerfi. Slikar fljótandi eldsneytistegundir gætu því, ef hagkvæmt reynist, leyst af hólmi innflutt eldsneyti með tiltölulega stuttum fyrirvara.

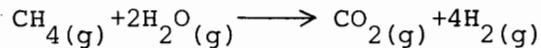
Að mati höfundar eru áætlanir um framleiðslukostnað vetrnis, sem framleiða mætti á Íslandi með rafgreiningu, vel grundvallaðar. Þær áætlanir, sem birtar eru um framleiðslukostnað annarra eldsneytistegunda, eru hins vegar vart meira en lausleg frumkönnun. Nákvæm áætlun um framleiðslukostnað þessara eldsneytistegunda verður tæpast gerð, fyrr en að undangenginni miklu rækilegri athugun, en hér hefur reynst unnt að gera.

2 VETNISFRAMLEIÐSLA

2.1 Úr jarðgasi, oliu og kolum

Mestur hluti þess vetnis, sem framleiddur er í heiminum í dag, er notaður jafnharðan til ammoniak- og methanolframleiðslu og í olíuiðnaði. Lítill hluti þess fer þó í annan iðnað.

Aðal aðferðin til að framleiða vetni hefur verið að láta jarðgas hvarfast við heita gufu (steam reforming of methan). Efna-hvarfinu má lýsa með eftirfarandi efnajöfnu:

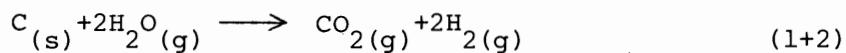
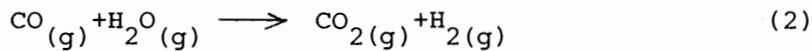
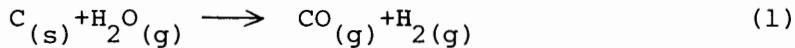


Nauðsynlegur varmi er fenginn með því að brenna hluta jarðgassins.

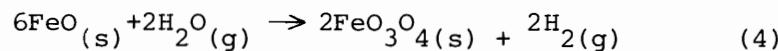
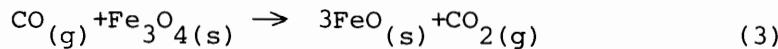
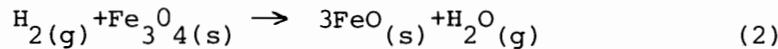
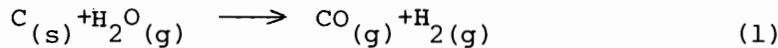
Þá hefur olíuiðnaðurinn framleitt talsvert af því vetni sem hann hefur notað, úr oliu (partial oxydation of oil). Loks hefur vetni einnig verið framleitt í nokkru magni með rafgreiningu og með því að láta heita vatnsgufu hvarfast við kol. Rafgreiningin verður rædd sérstaklega í kafla 2.2.

Með minnkandi oliubirgðum í heiminum er talið að vetni verði tæpast framleitt, í framtíðinni, úr oliu, sem neinu nemur. Svipaða sögu er að segja um jarðgas. Þótt birgðir heimsins af jarðgasi séu að visu enn talsvert miklar, fer þörfin fyrir það sifellt vaxandi og verð þess mjög hækkandi. Er almennt álitið að í stað þess að framleiða vetni úr jarðgasi, þá verði vetni í framtíðinni fremur notað til að blanda saman við jarðgas og drýgja þannig jarðgasbirgðirnar, eða jafnvel til að framleiða jarðgas (Quade 1977, Darrow o.fl. 1977). Framleiðsla vetnis úr kolum er hins vegar talin munu fara vaxandi og í löndum með nægar kolabirgðir er talið að vetni verði í framtíðinni aðallega framleitt úr kolum með svokallaðri kolagösun (gasfication of coal).

Kolagösun getur farið fram eftir ýmsum leiðum. Algengast til þessa hefur verið að láta vatnsgufu hvarfast við kol og skilja síðan vetnið úr gasblöndunni, sem myndast (Koppers-Totzek process, Lurgi process). Einnig er unnt í vissum tilvikum að nota gasblönduna, sem myndast, sem eldsneyti. Öllum þessum aðferðum má lýsa með efnahvörfunum:



Í svonefndri gufu-járn aðferð (steam-iron process) fer kolagösun þannig fram, að kol eru látin hvarfast við vatnsgufu, svipað og gerist í efnajöfnunum að ofan, en auk þess er gufa látin hvarfast við járn-oxyd (FeO), en þá myndast hreint vetni. Efnahvarfinu má lýsa eftirfarandi:



Kostir síðast töldu aðferðarinnar eru einkum þeir, að þep (4) er hægt að framkvæma aðskilið frá hinum, en við það fæst hreint vetni. Í hinum aðferðunum þarf að hreinsa frá lofttegundir eins og CO_2 , CO og H_2S . Þótt gufu-járn aðferðin hafi sem komið er aðeins verið reynd í tilraunaverksmiðjum, er hún af mörgum talin álitlegasta aðferðin til að framleiða vetni úr kolum í framtíðinni (Tsaros o.fl. 1976, Gregory o.fl. 1979).

Í öllum ofantöldum kolagösunaraðferðum nýtist um 57-65% kolaorkunnar.

í járn-gufu aðferðinni nýtist þó aðeins um 44% orkunnar til að framleiða vetni, 18% nýtist til raforkuframleiðslu.

Við kolagösun hefur varmi til að hita vatnsgufuna hingað til verið fenginn þannig, að hluta kolanna hefur verið brennt, annað hvort í súrefni eða lofti. Sé notað súrefni þarf fyrst að vinna það úr lofti, með þéttingu og síðan eimingu. Sé hins vegar notað loft fæst í öllum tilfellum, nema þegar notuð er gufu-járn aðferðin, köfnunarefnisrík gasblanda með lágt varmagildi, sem síðan verður að skilja vetnið úr.

Í stað þess að brenna hluta kolanna og fá þannig nauðsynlega varmaorku til að hita gufuna, er einnig fyrir hendi sá möguleiki að nota til þess varmaorku frá kjarnorkuverum. Hafa þegar farið fram nokkrar rannsóknir í þá átt að nota varmaorku háhita kjarnaofna (high temperature reactors) við gösun á kolum (Shculten 1978, Quade 1977). Á þann hátt sparast nokkuð af kolum og því gæti slik aðferð orðið hagkvæm, þar sem kolabirgðir eru takmarkaðar, t.d. í löndum Vestur-Evrópu. Í löndum með nægar kolabirgðir, t.d. Bandaríkjunum, er þó talið líklegt að nauðsynlegur varmi verði fenginn áfram með því að brenna kolum.

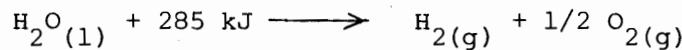
2.2 Rafgreining

Framleiðsla vetrnis með rafgreiningu hefur einkum tvö kosti fram yfir framleiðslu úr jarðgasi eða kolum. Í fyrsta lagi er vetnið mjög hreint (>99,5%). Þar sem þörf er á hreinu vetrni, t.d. í methanol-og í ammoníakframleiðslu eða áefnarafala, þarf því ekki að hreinsa vetrnið sérstaklega, ef það er unnið með rafgreiningu, gangstætt því sem er um vetrni unnið úr kolum eða jarðgasi. Í öðru lagi er vatn eina hráefnið, sem þarf til að framleiða vetrni með rafgreiningu. Í löndum með næga vatnsorku og takmarkaðar eða engar kolabirgðir, er því rafgreining að öllum líkendum álitlegasta aðferðin til að framleiða vetrni, að minnsta kosti í næstu framtíð. Síðar meir, þegar kolabirgðir heimsins fara að minnka eða farið verður að nota kjarnorku eða sólarorku í vaxandi mæli, má búast við að aðalfram-

leiðsluaðferðin verði rafgreining eða einhver önnur aðferð, þar sem eingöngu verði notað vatn og orka. Þó er talið hæpið að kjarnorka eða virkjuð sólarorka geti nokkurn tíma keppt við raforku, sem unnin er úr vatnsorku. Í löndum með næga vatnsorku hlýtur því rafgreining að skipa verulegan sess við vetnisframleiðslu í framtíðinni.

Vatn var fyrst rafgreint um 1800. Það var þó ekki fyrr en um síðustu aldamót, sem farið var að nota rafgreiningu til að framleiða vetni í miklu magni. Þá þegar var það gert með sömu aðferðum og nú eru notaðar. Á núverandi rafgreiningu er því komin löng og góð reynsla. Eru nú í gangi í heiminum fjórar rafgreiningarverksmiðjur af stærðinni 100-165 MW (Christiansen o.fl. 1977). Auk þess eru í gangi fjölmargar minni verksmiðjur, sú stærsta þeirra á Íslandi, 18 MW.

Rafgreining fer þannig fram að raforka er notuð til að kljúfa vatn í frumefni sín, vetni og súrefni.



Tveim rafskautum, kathóðu úr járni og anóðu úr nikkel-húðuðu járni, er komið fyrir í raflausn, sem venjulega er KOH-lausn. Kathóðu- og anóðuhluti rafgreiningarkerins eru aðskilin með asbestosiú, sem hleypir í gegnum sig H^+ og OH^- jónum, en varnar því að vetnið og súrefnið geti blandast. Þegar nægilega há spenna er sett á rafskautin, fer straumur gegnum raflausnina og vetni myndast við kathóðuna og súrefni við anóðuna. Tafla 2.2-1 sýnir þá þætti, sem skipta mestu málí í venjulegu rafgreiningarkeri.

Lægsta spenna, sem fræðilega þarf til að efnabreytingin gangi við 80°C , er 1,48 volt. Í reynd þarf þó spennan að vera talsvert hærri, eða um 2 volt. Mismunurinn fer í að yfirvinna viðnám við rafskautin og í lausninni, meðal annars vegna vetnis- og súrefnisbóla.

Nú eru í gangi tvær gerðir af rafgreinum. Svonefnd einskauts (monopolar) gerð og svonefnd tvískauts (bipolar) gerð. Báðar þessar gerðir

Tafla 2.2-1

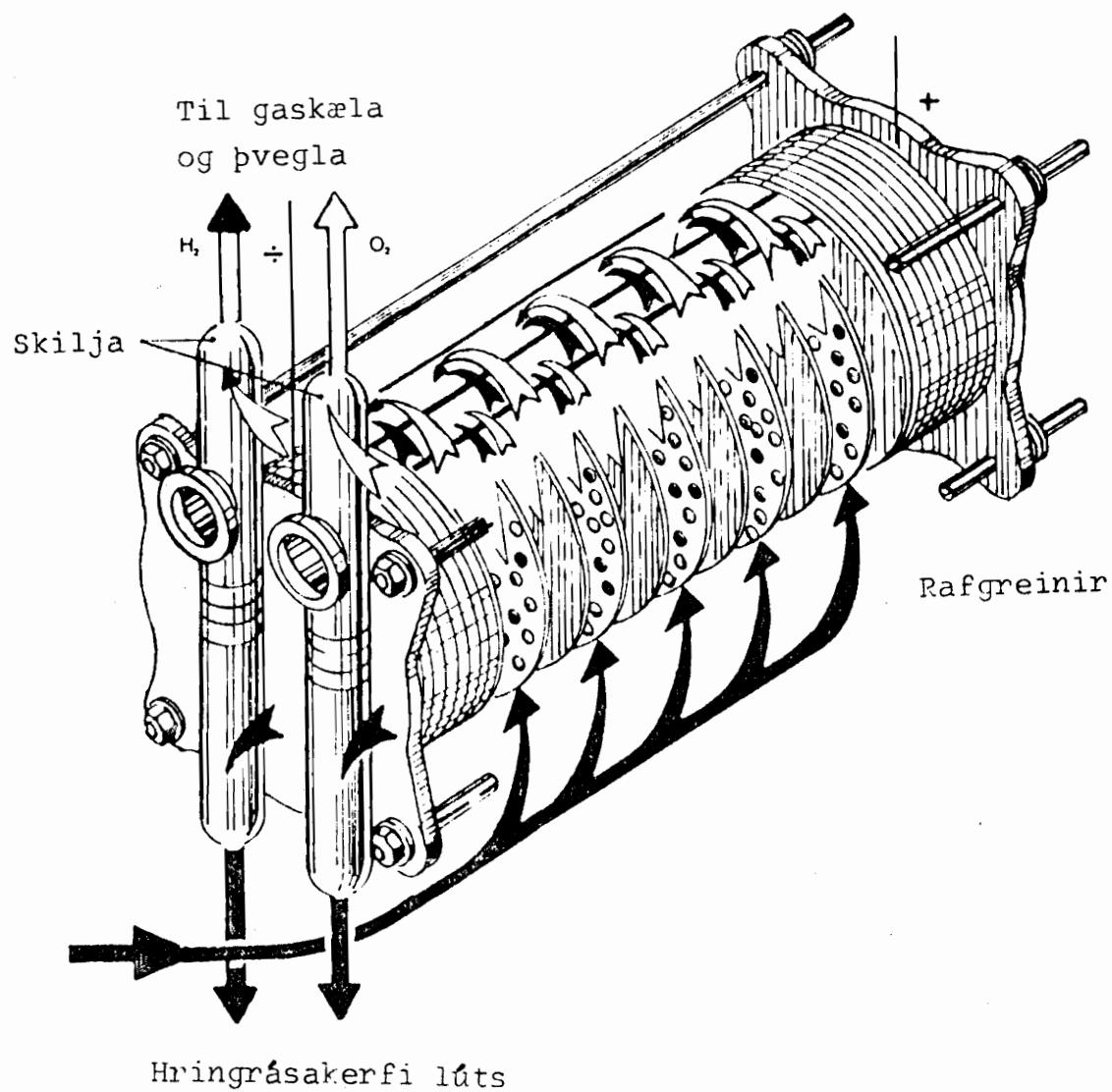
Nokkrar þýðingarmestu stærðirnar í venjulegu rafgreiningarkeri
(Menth o.fl. 1978).

Spenna rafgreiningarkers	1,8 - 2,2 volt
Straumpéttleiki	1,5 - 3,0 kA/m ²
Hitastig	80 °C
Raflausn	25 - 30% KOH
Nýtni orku	65 - 70%
Hreinleiki H ₂	> 99,5%
Hreinleiki O ₂	> 99,5%
Nýtingartími verksmiðju	> 95%

hafa þróast samhliða frá upphafi. Einskauts gerðin hefur þó smám saman verið á undanhaldi og í dag er aðeins ein stór verksmiðja í gangi af þeirri gerð. Er einskauts gerðin nú talin úreilt, þótt stofnkostnaður hennar sé lægri, einkum vegna þess að hún er fyrirferðameiri og nýtir raforkuna verr. Auk þess fellur tvískauts gerðin betur að nútíma tækni við að breyta riðstraum í jafnstraum.

Í tvískauts verksmiðjum er rafgreiningarkerjunum raðað saman hverju á eftir öðru, þannig að fyrir utan endarafskautin eru öll rafskautin sameiginleg fyrir tvö ker. Er önnur hlið skautsins anóða, en hin kathóða. Þannig er mörgum rafgreiningarkerjum raðað saman í einingar, 1 - 2 MW að stærð. Mynd 2.2-1 sýnir slika einingu.

Orkunýtni núverandi rafgreina er um 65-70%. Rannsóknir benda þó til að endurbæta megi núverandi rafgreiningartækni verulega (Christiansen o.fl. 1977, Menth o.fl. 1978). Með endurbótum á rafskautum og með því að nota teflon-bundnar kaliumtitanat himnur eða Naphion-R himnur í stað núverandi asbestosíu, er talið unnt að hækka hita-



Mynd 2.2-1

Rafgreinir byggður af Norsk Hydro

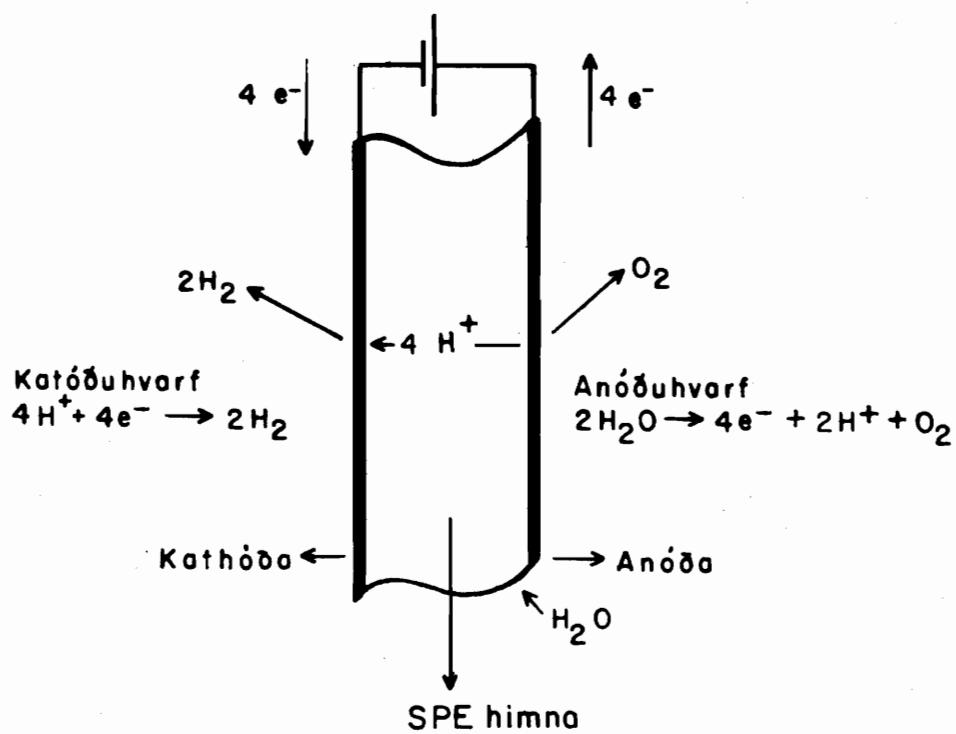
stigið í 120°C og þá jafnframt að framleiða vét ni við hærri þrýsting en nú. Við hærra hitastig og þrýsting verður viðnámið við rafskautin og í lausninni minna en við núverandi aðstæður. Orkunýtnin mundi því aukast, jafnvel upp í 90%. Jafnframt er talið að þá megi auka straumþéttileikann í raflausninni úr 2 kA/m^2 í 10 kA/m^2 , en við það yrðu verksmiðjurnar minni og stofnkostnaður lægri. Loks mundi vetrnið verða framleitt við hærri þrýsting, en við það sparast vinna við að auka þrýsting þess eftir á. Allt virðist því benda til, að með fyrirsjáanlegum endurbótum á núverandi rafgreiningartækni, geti verð vetrnis, sem framleitt er með rafgreiningu, lækkað talsvert frá því sem nú er.

Á undanförfnum árum hefur talsvert verið unnið að rannsóknum á nýrri rafgreiningartækni, sem gæti lækkað verulega verð vetrnis, sem framleitt er með rafgreiningu. Má einkum nefna tvær nýjar aðferðir, SPE-rafgreiningu (solid polymer electrolyzers) (Laskin o.fl. 1976, Nuttall o.fl. 1976, Srinivasan o.fl. 1976, Nuttall 1979) og rafgreiningu við 1000°C (high temperature ceramic electrolyzers) (Menth o.fl. 1978). Virðist fyrrnefnda aðferðin einkum áhugaverð fyrir lönd með næga vatnsorku.

Í SPE-rafgreiningarkeri er vatnsmettuð SPE-himna (perfluorinated polymer) á milli rafskautanna. SPE-himnan hleypir mjög auðveldlega í gegnum sig H^+ og er því mjög vel leiðandi vegna þess hve súr hún er. SPE-himnan virkar því sem súr raflausn, en jafnframt þjónar hún sama tilgangi og asbestosian í núverandi rafgreiningarkerjun, þ.e. að halda aðskildu vetrni og súrefni. Mynd 2.2-2 er skýringarmynd af SPE-rafgreiningarkeri.

SPE-rafgreiningarkerjum má raða saman í tvískauts rafgreina likt og nú er gert með eldri kerin. Í SPE-rafgreinum getur rafgreiningin farið fram við 150°C og þrýstingur vetrnisins, sem myndast getur verið allt að 30 atm. Straumpéttileikinn getur verið allt að 20 kA/m^2 og orkunýtnin >90%. Í stað KOH-lausnar, sem notuð er í eldri aðferðinni, kemur einungis hreint vatn. Vetrni framleitt með SPE-rafgreiningu mun því geta orðið allmiklu ódýrara en vetrni framleitt með núverandi rafgreiningartækni.

Mynd 2.2-2



SPE rafgreinar fyrir stórar verksmiðjur eru enn ekki fáanlegir á almennum markaði, en samkvæmt nýlegum upplýsingum frá General Electric Company, og Institute of Gas Technology, eru miklar likur á að svo verði innan fárra ára. General Electric fjöldaframleiðir, síðan 1973, litla SPE rafgreina, sem geta framleitt um 360 lítra af vetni á dag og eru notaðir til vettisframleiðslu í rannsóknarstofum. Þá hefur verið í gangi, í um það bil eitt ár, 50 kW rafgreinir og nú nýlega hafa þeir sett í gang 200 kW einingu. Þá hafa sérfræðingar General Electric einnig skýrt frá því, að samkvæmt rannsóknaráætlun þeirra, en þær rannsóknir eru fjármagnaðar af U.S. Department of Energy, væri gert ráð fyrir að 500 kW eining yrði komin í gang á árinu 1981. Töldu þeir að 500 kW einingar yrðu fáanlegar á almennum markaði þegar árið 1982, en súlikar einingar eru það sem þarf til að byggja rafgreina í MW stærðum. Er áætlað að 5 MW rafgreinir verði kominn í gagnið á árinu 1983.

Rannsóknir á rafgreiningu við 1000°C eru á frumstigi. Fræðilega gæti slik rafgreining orðið mjög hagkvæm, einkum vegna þess að þá er hægt að nota samtímis raforku og varmaorku kjarnorkuvera. Í raun eru þó enn óleyst mörg vandamál, sem upp koma vegna hins háa hitastigs. Þessi tækni á því án efa enn langt í land til að verða nothæf.

2.3 Varmaefnafræðilegar aðferðir

Allmikið hefur verið gert af því að kanna leiðir til að nota varmaorku kjarnorkuvera til að framleiða vetni, án þess að þurfa fyrst að breyta varmaorkunni í raforku (Knoche o.fl. 1976, 1977, 1978, Funk 1976, Fueki 1976, Conger o.fl. 1976, Soliman o.fl. 1976, Schuetz 1977, Fujii o.fl. 1977, Mason 1977). Á þann hátt er fræðilega hægt að auka nokkuð nýtni varmaorkunnar við vettisframleiðslu.

Aðferðin er í grófum dráttum þannig, að inn í vettisverksmiðjuna fara einungis vatn og orka, en út úr henni koma aðskilið vetni og súrefni. Þetta gerist þrep af þepi í nokkrum efnahvörfum og á þann hátt, að öll efni, sem notuð eru í einstökum þrepum, að undanskildu vatni, myndast aftur í jafnmiklu magni í einhverju öðru þepi. Aðferðin nefnist lokað varmaefnafræðileg hringrás (closed thermochemical cycle), ef öll þrepin eru efnahvörf, en blönduð hringrás (hybrid cycle), ef t.d. eitt þepið er rafgreining en hin efnahvörf.

Dæmi um varmaefnafræðilega hringrás:

	Hvarfhitastig
1) $3\text{FeCl}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{FeO} + 6\text{HCl}$	900°C
2) $3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2$	300°C
3) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{HCl} \longrightarrow 3\text{FeCl}_2 + \text{Cl}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	350°C
4) $\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \longrightarrow 2\text{HCl} + 1/2 \text{O}_2$	1000°C
<hr/>	
$\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$	

Dæmi um blandaða hringrás:

1) $\text{SO}_2 + \text{Br}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{HBr}$	50-100°C
2) $2\text{HBr} \longrightarrow \text{H}_2 + \text{Br}_2$	rafgreining
3) $\text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + 1/2 \text{O}_2$	730-830°C
<hr/>	
$\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$	

Á undanförum árum hafa tugir slíkra hringrása verið kannaðar fræðilega. Nokkrar þeirra, sem þykja líklegastar til að vera hagkvæmar, hafa síðan verið valdar úr og athugaðar nánar. Aðeins ein af þessum hringrásum, blandaða hringrásin, sem sýnd er hér á undan, hefur þó raunverulega verið reynd til fulls í rannsóknarstofu.

Eins og fram kemur hér á undan er 750-1000°C nauðsynlegt hitastig og svo er einnig um aðrar hringrásir, sem hafa verið athugaðar. Þetta er heppilegt hitastig, þegar um er að ræða að nota varmaorku háhita kjarnaofna. Hins vegar virðist vart koma til greina, að unnt verði að nýta varmaorku íslenskra háhitasvæða til að framleiða vetni á þennan hátt.

Varmaefnafræðilegar hringrásir, eða blandaðar hringrásir, kunna að koma til álita við framleiðslu vetrnis í framtíðinni. Þó er almennt álitið að enn muni líða nokkur tími, þar til vitað er, hvort þessar aðferðir

eru í raun nothæfar. Í öllum hringrásum, sem til þessa hafa verið athugaðar, koma fyrir tærandi efni einhvers staðar í framleiðslunni. Vandamál samfara því að meðhöndla slik tærandi efni við mjög hátt hitastið, hafa enn ekki verið levst á viðunandi hátt. Þess vegna, meðal annars, er talið, að varmaefnafræðilegar aðferðir verði ekki nothæfar fyrr en í fyrsta lagi eftir 1990. Jafnframt er ómögulegt að segja nú, hvort vetni framleitt á þennan hátt verði ódýrara, en vetni framleitt með rafgreiningu, þar sem raforkan er fengin úr varmaorku kjarnorkuvera.

2.4 Aðrar aðferðir

Fræðilega er unnt að framleiða vetni með því að hita vatn upp í 3000°C, en þá klofnar það að talsverðu leyti í frumefni sín vetni og súrefni. Er talsvert unnið að því, hvernig megi nota sólarorku í þessu skyni (Otha o.fl. 1976, Bilgen o.fl. 1977, Ihara 1978).

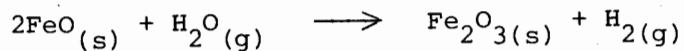
Þá er einnig unnt að kljúfa vatn í frumefni sín með ljósefnafræðilegum (photochemical) aðferðum eða ljós- og rafefnafræðilegum (photoelectrochemical) aðferðum (Hartig o.fl. 1977, Otha o.fl. 1976, Bockris o.fl. 1977, Nozik 1978).

Þótt álitið sé, að ofangreindar aðferðir kunni í framtíðinni að verða hagkvæmar til að framleiða vetni í miklu magni, eru rannsóknir á þeim öllum enn á frumstigi og þess tæpast að vænta að þær geti orðið nothæfar fyrr en einhvern tíma á næstu öld. Þá byggjast allar aðferðirnar á beinni nýtingu sólarorku og því vafasamt að þær verði nokkurn tíma hagkvæmar fyrir Íslendinga.

Þá er unnið að því að rannsaka aðferðir, sem nota orkuríka geisla frá kjarnaofnum til að kljúfa vatn (Solar o.fl. 1977). Loks má nefna lífræðilegar (biological) aðferðir og líf- og ljósfræðilegar (photo-biological) aðferðir (Pescheck 1977, Neil o.fl. 1976). Um þessar síðast töldu aðferðir er svipað að segja og um þær sem getið er að ofan. Til að framleiða vetni í stórum stíl eru þessar aðferðir enn varla annað

en fræðilegur möguleiki.

Ef vatni er sprautað á glóandi hraunkviku er unnt að framleiða vetni á þann hátt, að súrefni vatnsins gengur í samband við járn kvíkunnar (Northrup o.fl. 1978). Efnahvarfið má skrifa á eftirfarandi hátt:



Athuganir á vetrnisframleiðslu með þessari aðferð hafa, enn sem komið er, næstum einungis farið fram í rannsóknarstofu, ef undan eru skildar rannsóknir á vetrnisinnihaldi í gosgufum (Sigvaldason o.fl. 1968). Því er enn ósvarað, hvernig eigi að koma miklu vatnsmagni niður í hraunkviku og beisla vetrnið og gufuna, sem jafnframt myndast. Aðferðin er þó vissulega athyglisverð, einkum fyrir lönd eins og Ísland. Hefur verið reiknað út, að úr hverjum km³ af hraunkviku, sams konar og er undir Íslandi, mætti á þennan hátt fá 2 milljónir tonna af vetrni, ef einungis væri dælt niður í kvíkuna vatni. (Ársframleiðsla heimsins af vetrni árið 1970 var um 17,8 millj.tonn). Með því að blanda í vetrnið lifrænum efnum má auka vetrnismagnið að mun. Telja Northrup o.fl. (1978) að vetrnisframleiðslan geti farið fram þannig, að allmargar holur séu boraðar niður í um 1200°C heita hraunkviku. Niður um holurnar sé dælt vatni, en upp komi síðan vetrni og gufa, sem nota mætti til að knýja gufuaflstöðvar.

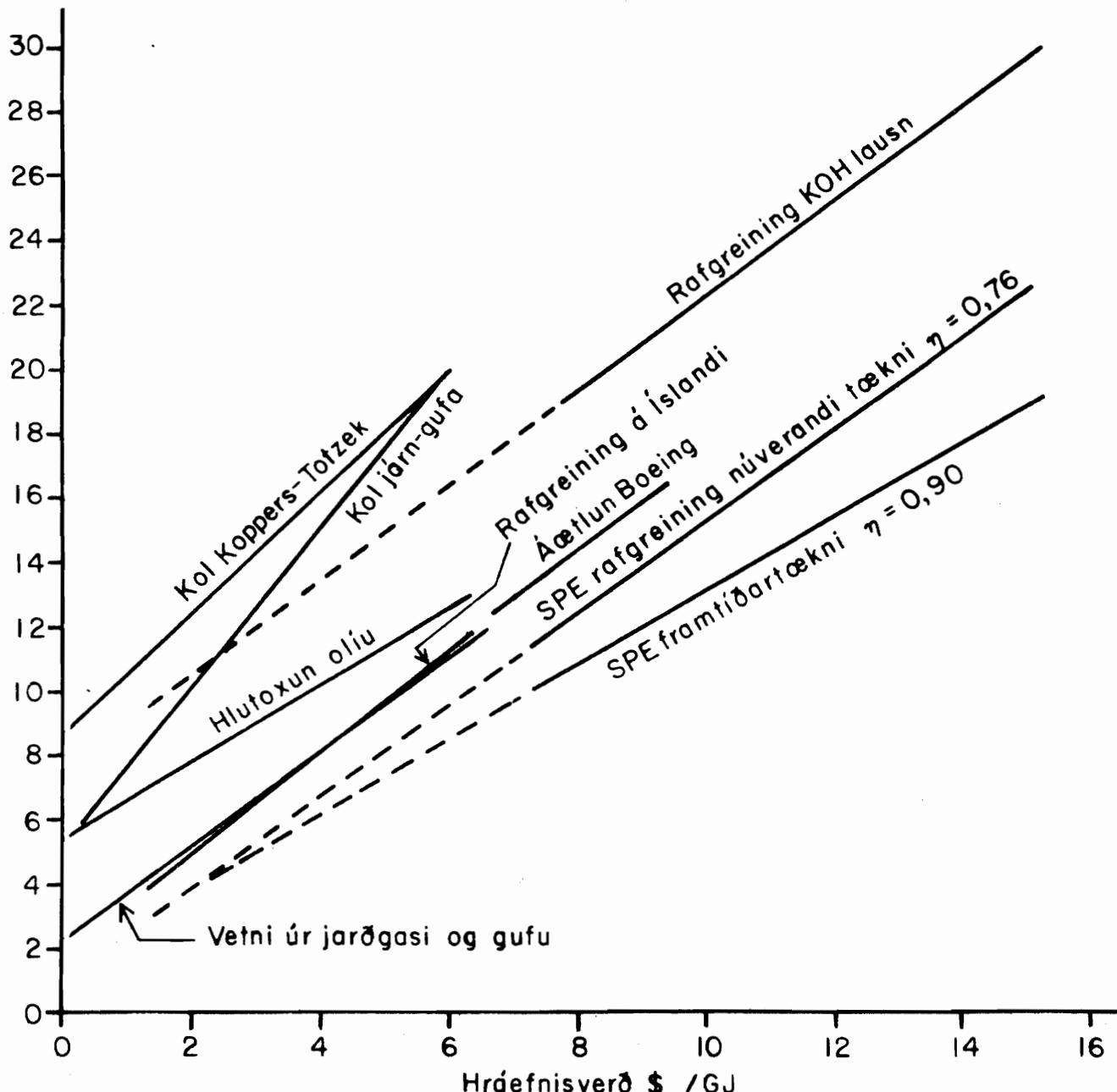
2.5 Framleiðslukostnaður vetrnis

Miklar athuganir hafa farið fram á því á undanförnum árum, hvað það muni kosta að framleiða vetrni í framtíðinni eftir hinum ýmsu leiðum (Tsaros o.fl. 1976, Quade 1977, Darrow o.fl. 1977, Witcofsky 1977, Christiansen o.fl. 1977, Getoff 1977, Kelly 1977, Nuttall 1977 og 1979, Hadden 1978, Hittman Associates, Inc. 1978, Gregory o.fl. 1979 og Hadaller o.fl. 1979). Niðurstöður nokkurra helstu og nýjustu af þessum athugunum, ásamt nýjum athugunum á framleiðslukostnaði vetrnis á Íslandi eru sýndar á mynd 2.5-1.

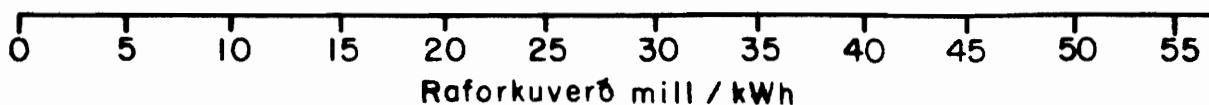


Mynd 2.5-1

H₂-verð \$ /GJ



Hráefnisverð \$ /GJ



Á mynd 2.5-1 er framleiðslukostnaður vetrnis, sem er framleitt, eða má framleiða með nú aðgengilegum aðferðum, sýndur sem fall af hráefniserði eða raforkuverði. Framleiðslukostnaður vetrnis, sem framleitt yrði með varmaefnafræðilegum aðferðum eða þeim aðferðum, sem getið er í kafla 2.4 er ekki sýndar á myndinni. Þessar aðferðir eru allar á frumrannsóknarstigi og kostnaðaráætlanir því óljósar. Allar tölur um framleiðslukostnað, sem sýndu eru á mynd 2.5-1, miðast við gengi Bandaríkjadollars á miðju ári 1979. Að undanskilinni kostnaðaráætluninni, sem merkt er "rafgreining á Íslandi" og er gerð fyrir verksmiðju, sem framleiðir um 90 tonn af vetrni á dag, eru allar kostnaðaráætlanir miðaðar við verksmiðjur, sem framleiða 250 tonn af vetrni á dag.

Línan "hlutoxun oliú" er fengin frá Gregory o.fl. (1979) og sýnir framleiðslukostnað vetrnis, sem nú er framleitt úr oliú. Núverandi skráð heimsmarkaðsverð (OPEC-verð) á hráoliú er um 3,75 \$/GJ, þannig, að vetrni framleitt úr oliú í dag, mun væntanlega kosta um 10 \$/GJ. Með vaxandi oliuskorti er talið næsta óliklegt að vetrni verði í framtíðinni framleitt úr oliú, sem neinu nemur. Verð vetrnis, sem framleitt kann að verða á þann hátt, mun því vart hafa nein áhrif á markaðsverð vetrnis í framtíðinni.

Línan "vetni úr jarðgasi og gufu" sýnir framleiðslukostnað vetrnis, sem framleitt er úr jarðgasi, en það er í dag aðalframleiðsluaðferðin. Núverandi jarðgasverð í Bandaríkjum er um 2 - 3 \$/GJ (Swisher 1979) og samkvæmt því kostar vetrni framleitt úr jarðgasi nú um 5 - 6 \$/GJ.

Þótt jarðgasverð sé nú aðeins 2 - 3 \$/GJ, er það samhljóða álit þeirra, sem mest fjalla um þessi mál í Bandaríkjum, að verðið muni hækka verulega á næstu árum umfram það sem nemur verðbólgu. Í nýlegu viðtali, við aðstoðarforstjóra við U.S. Department of Energy, sagði hann það sitt álit, að jarðgas myndi að öllum líkendum hækka fljótlega í 5 \$/GJ (Swisher 1979). Samkvæmt því ætti verð vetrnis, sem framleitt er úr jarðgasi, fljótlega að komast í 9,5 \$/GJ.

Línurnar "kol Koppers-Totzek" og "kol járn-gufa" sýna framleiðsluverð vetrnis, sem framleiða má með kolagösun eftir þessum tveim aðferðum. Þessar kostnaðaráætlanir eru gerðar af starfsmönnum Institute of Gas Technology, Chicago (Gregory o.fl. 1979). Kolagösun með Koppers-Totzek aðferð er þegar vel þekkt tækni og tæki í slika verksmiðju fáanleg. Kolagösun með járn-gufu aðferðinni hefur enn einungis farið fram í tilraunaverksmiðjum (pilot plants). Í kostnaðaráætluninni, sem gerð er fyrir járn-gufu aðferðina, er reiknað með að raforkan, sem jafnframt er framleidd, verði seld á 20 mill/kWh.

Núverandi kolaverð í Bandaríkjum er á bilinu 1 - 2 \$/GJ (Swisher 1979). Vetni framleitt með kolagösun ætti samkvæmt því að kosta 10,5 - 12,5 \$/GJ, ef notuð er Koppers-Totzek aðferð en 7,8 - 10,2 \$/GJ ef notuð er járn-gufu aðferð. Sérfræðingar í Bandaríkjum telja að visu að kolaverð muni hækka eitthvað á næstu árum, en þó miklu minna en jarðgasverð.

Framleiðslukostnaður vetrnis, sem framleitt er með rafgreiningu er sýndur með alls fimm linum á mynd 2.5-1.

Línan "rafgreining á Íslandi" sýnir nýja athugun, sem gerð hefur verið á því, hver muni vera framleiðslukostnaður vetrnis, sem framleitt yrði á Íslandi með rafgreiningaraðferð Norsk Hydro (Runólfur Þórðarson 1979). Norsk Hydro rafgreiningaraðferðin er nú notuð í Áburðarverksmiðjunni í Gufunesi, og er umrædd kostnaðaráætlun gerð af framkvæmdastjóra hennar. Þessi kostnaðaráætlun verður því að teljast öruggasta vitneskjan, sem nú er fyrir hendi, um framleiðslukostnað vetrnis á Íslandi, ef notuð er þegar þróuð tækni.

Línan "áætlun Boeing" sýnir mjög nýlega áætlun, sem Boeing flugvéla-verksmiðjurnar hafa látið gera á framleiðslukostnaði vetrnis, ef notuð er rafgreining (Hadaller o.fl. 1979). Í skýrslu Boeing er ekki greint frá því hvaða rafgreiningartækni er notuð, heldur einungis sagt að miðað sé við tækni, sem nú sé fáanleg á almennum markaði (commercial available). Athyglisvert er, að þótt áætlun Boeing spanni annað svið raf-

orkuverðs en íslenska áætlunin, þá virðast þessar tvær áætlanir leiða til svo til alveg sömu niðurstöðu, hvað snertir framleiðslukostnað vetrnis, sem fall af raforkuverði.

Línan "rafgreining KOH-lausn" er fengin frá Gregory o.fl. (1979) og sýnir meðalframleiðslukostnað vetrnis, sem framleitt er með þeim rafgreiningaraðferðum, sem notaðar eru í dag. Áætlun Gregorys o.fl., spannar aðeins mjög hátt raforkuverð 27,3 - 54,6 mill/kWh. Slitrótti hlutinn af linunni er framlenging skýrsluhöfundar fyrir raforkuverð 5 - 27,3 mill/kWh. Vegna þess að raforkuverð er megin kostnaðarliðurinn, þegar vetrni er framleitt með rafgreiningu, er slik framlenging nærri sanni, nema ef um er að ræða mjög lágt raforkuverð.

Lína Gregorys o.fl. er fengin þannig, að þeir taka fjölmargar áætlanir og niðurstöður, sem birtar hafa verið á undanförnum árum, um framleiðslukostnað vetrnis, sem framleitt er með þeim rafgreiningaraðferðum, sem nú eru vel þekktar. Kostnaðinn umreikna þeir síðan á gengi Bandaríkjadollars á miðju ári 1979 og finna loks meðal framleiðslukostnað. Þótt framleiðslukostnaðurinn sé talsvert mismunandi eftir því hvaða rafgreiningaraðferð er notuð er það tæpast næg ástæða til að skýra þann mikla mun, sem er á niðurstöðum Gregorys o.fl. og niðurstöðum Boeing, eða íslensku niðurstöðunum. Til dæmis er framleiðslukostnaðurinn um 50% hærri ef notuð er einskauts aðferð, en ef notuð er Norsk Hydro aðferð og miðað er við raforkuverð 20 mill/kWh, en af núverandi tiltækum aðferðum er framleiðslukostnaðurinn lægstur, ef notuð er Norsk Hydro aðferð, en hæstur, ef notuð er einskauts aðferð. Verður að líta svo á, að íslenska áætlunin og þá einnig áætlun Boeing, séu raunhæfari fyrir íslenskar aðstæður heldur en áætlun Gregorys o.fl.

Línan "SPE rafgreining núverandi tækni" sýnir áætlaðan framleiðslukostnað vetrnis, sem framleiða má með SPE rafgreiningaraðferð og ef notuð er tækni, sem þegar hefur verið þróuð. Þá er raforku-nýtnin um 76%. Línan "SPE framtíðartækni" sýnir svo loks fram-

leiðslukostnað vetrnis ef notuð yrði SPE-rafgreiningaraðferð og sú tækni, sem sérfræðingar General Electric telja að muni verða til-tæk um 1985. Þá er reiknað með að raforkunýtnin verði um 90%. Slitrótti hluti línanna er framleiting skýrsluhöfundar á lægra raforkuverð.

Af mynd 2.5-1 má draga þá ályktun, að í verksmiðjum af umræddri stærð (250 tonn H₂ á dag í öllum tilfellum nema í íslensku áætluninni, 90 tonn H₂ á dag) og miðað við núverandi jarðgasverð (2-3 \$/GJ), þá sé vetrni framleitt úr jarðgasi verulega ódýrara en vetrni framleitt úr kolum eða oliu. Vetrni framleitt á Íslandi með núverandi rafgreiningartækni mundi verða álika dýrt og vetrni framleitt úr jarðgasi, ef aðeins er reiknað með raforkuverði 7-11 mill/kWh. Vetrni framleitt með væntalegri SPE rafgreiningu yrði hins vegar samkeppnisfært við vetrni úr jarðgasi, þótt raforkuverð yrði á bilinu 10-14 mill/kWh.

Sé hins vegar tekið tillit til þess, sem talið er líklegt, að jarðgasverð muni fljótlega hækka í um 5 \$/GJ, en kolaverð haldast því sem næst óbreytt (1-2 \$/GJ), verður ekki annað séð, en vetrni framleitt úr kolum muni í framtíðinni verða álika dýrt og vetrni framleitt úr jarðgasi. Vetrni framleitt með núverandi rafgreiningaraðferðum á Íslandi yrði þá jafndýrt ef reiknað er með raforkuverði 18 mill/kWh. Og vetrni framleitt með væntanlegri SPE rafgreiningu gæti þá jafnvel orðið samkeppnisfært við vetrni úr jarðgasi, þótt reiknað sé með raforkuverði 21-25 mill/kWh. Af ofansögðu verður vart dregin önnur ályktun en sú, að í náinni framtíð verði unnt að framleiða á Íslandi, með rafgreiningu, vetrni, sem tæpast verður dýrara, en vetrni framleitt annars staðar í heiminum.

Framleiðslukostnaður vetrnis, sem sýndur er á mynd 2.5-1 er, eins og áður segir, miðaður við að um sé að ræða mjög stórar verksmiðjur. Ef um er að ræða minni verksmiðjur hækkar framleiðslukostnaðurinn verulega, ef framleiða á vetrni með kolagösun, en minna, ef framleiða á það með rafgreiningu eða úr jarðgasi. Mynd 2.5-2 sýnir í grófum dráttum fram-

leiðslukostnað vetnis, sem framleitt er úr kolum, jarðgasi eða með rafgreiningu, sem fall af verksmiðjustærð. Gildin fyrir framleiðslukostnað vetnis úr kolum, jarðgasi, með KOH-rafgreiningu og SPE rafgreiningu eru fengin frá Gregory o.fl. (1979). Gildin fyrir rafgreiningu á Íslandi eru fengin úr íslensku áætluninni (Runólfur Þórðarson 1979). Reiknað er með að raforkuverð sé 15 mill/kWh, jarðgasverð 5 \$/GJ og kolaverð 2 \$/GJ. Þótt mynd 2.5-2 sé ekki mjög nákvæm, eru áhrif verksmiðjustærðar á framleiðslukostnað vetnis augljós.

Ef framleiða á vetni með kolagösun skiptir miklu máli að verksmiðjan sé sem stærst, 250 tonn H₂ á dag eða stærri. Til dæmis myndi, samkvæmt myndinni, vetni, sem framleitt er með Koppers-Totzek aðferð vera um 1,4 sinnum dýrara frá verksmiðju, sem framleiddi 50 tonn H₂ á dag en frá verksmiðju, sem framleiddi 250 tonn á dag. Ef um er að ræða minni verksmiðjur en 50 tonn H₂ á dag, mundi vetnisverð hækka mjög mikið.

Ef framleiða á vetni með rafgreiningu skiptir verksmiðjustærð miklu minna máli en þegar notuð er kolagösunaraðferð, svo framalega sem verksmiðjan er ekki mikið minni en 50 tonn H₂ á dag. Samkvæmt mynd 2.5-2 myndi t.d. aðeins vera um 1,06 sinnum dýrara að framleiða vetni í verksmiðju, sem afkastar 50 tonn H₂ á dag, en í verksmiðju, sem afkastar 250 tonn H₂ á dag.

Ein ástæðan fyrir því, að vetni framleitt með SPE rafgreiningu er talið muni verða ódýrara, en vetni framleitt með núverandi rafgreiningaráðferðum, er betri raforkunýtni, þegar um er að ræða SPE-rafgreiningu. Önnur ástæða er miklu lægri stofnkostnaður SPE verksmiðja. Heildarstofnkostnaður rafgreiningarverksmiðju, sem byggir á núverandi tækni er á bilinu 400-600 \$/kW. Þá eru Norsk Hydro verksmiðjurnar einna ódýrastar, um 400 \$/kW. Heildar stofnkostnaður verksmiðju, sem byggir á nú tiltækri SPE tækni, er hins vegar aðeins talin muni verða um 200 \$/kW og samkvæmt upplýsingum General Electric Company er stefnt að því, með endurbættri tækni, að stofnkostnaðurinn verði aðeins um 100 \$/kW (Nuttall 1979).

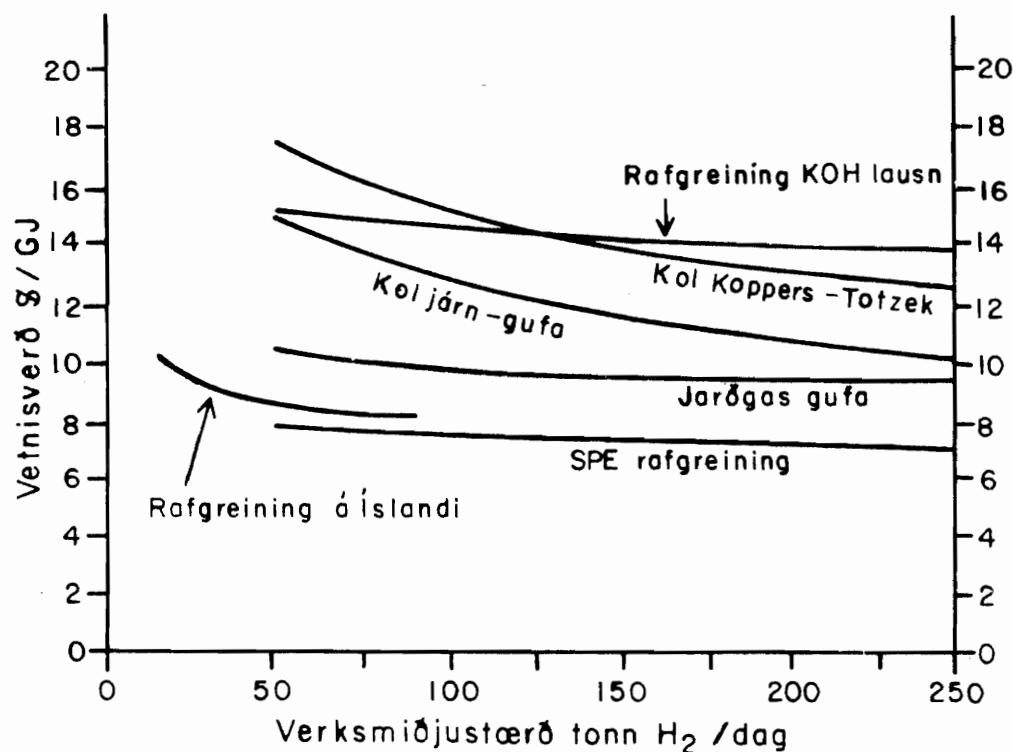
Framleiðslukotnaður vettis sem fall af verksmiðjustærð

Mynd 2.5-2

Raforkuverð 15 mill / kWh

Jarðgasverð 5 \$ / GJ

Kolaverð 2 \$ / GJ



3 PÉTTING VETNIS

Á undaförnum árum hefur fljótandi vetni verið notað í allmiklum mæli, sem eldsneyti á eldflaugar. Sú tækni, sem þarf til að þétta vetni í miklu magni og meðhöndla það fljótandi, er því þegar vel þekkt. Stærsta verksmiðjan, sem nú framleiðir fljótandi vetni er í Sacramento í Californíu og afkastar um 60 tonnum á dag. Með núverandi tækni er hins vegar ekkert talið til fyrirstöðu að byggja verksmiðjur, sem gætu afkastað um 500 tonnum af fljótandi vetni á dag (Thibault 1978), en það magn af fljótandi vetni þyrftu alþjóðaflugvellir að geta afgreitt á dag, ef vetni yrði notað sem eldsneyti á farþegaþotur framtíðarinnar. Stærstu flugvellirnir, eins og t.d. flugvöllurinn í Chicago eða Los Angeles, yrðu þó að geta afgreitt allt að 850 tonnum á dag (Korycinski 1978).

Vetnið er þétt á svipaðan hátt og aðrar lofttegundir, sem hafa lágt suðumark, t.d. köfnunarefni. Aðferðin, svonefnd "Linde aðferð", er í grófum dráttum þannig, að vetrinu er fyrst þjappað saman og það kælt niður í -190°C með fljótandi köfnunarefni. Síðan er það kælt frekar með því að láta það þenjast út, þar til daggarmarki er náð, við -253°C og það þéttist í vökvu. Mynd 3.-1 sýnir einfaldað flæðirit af verksmiðju, sem þéttir vetrni.

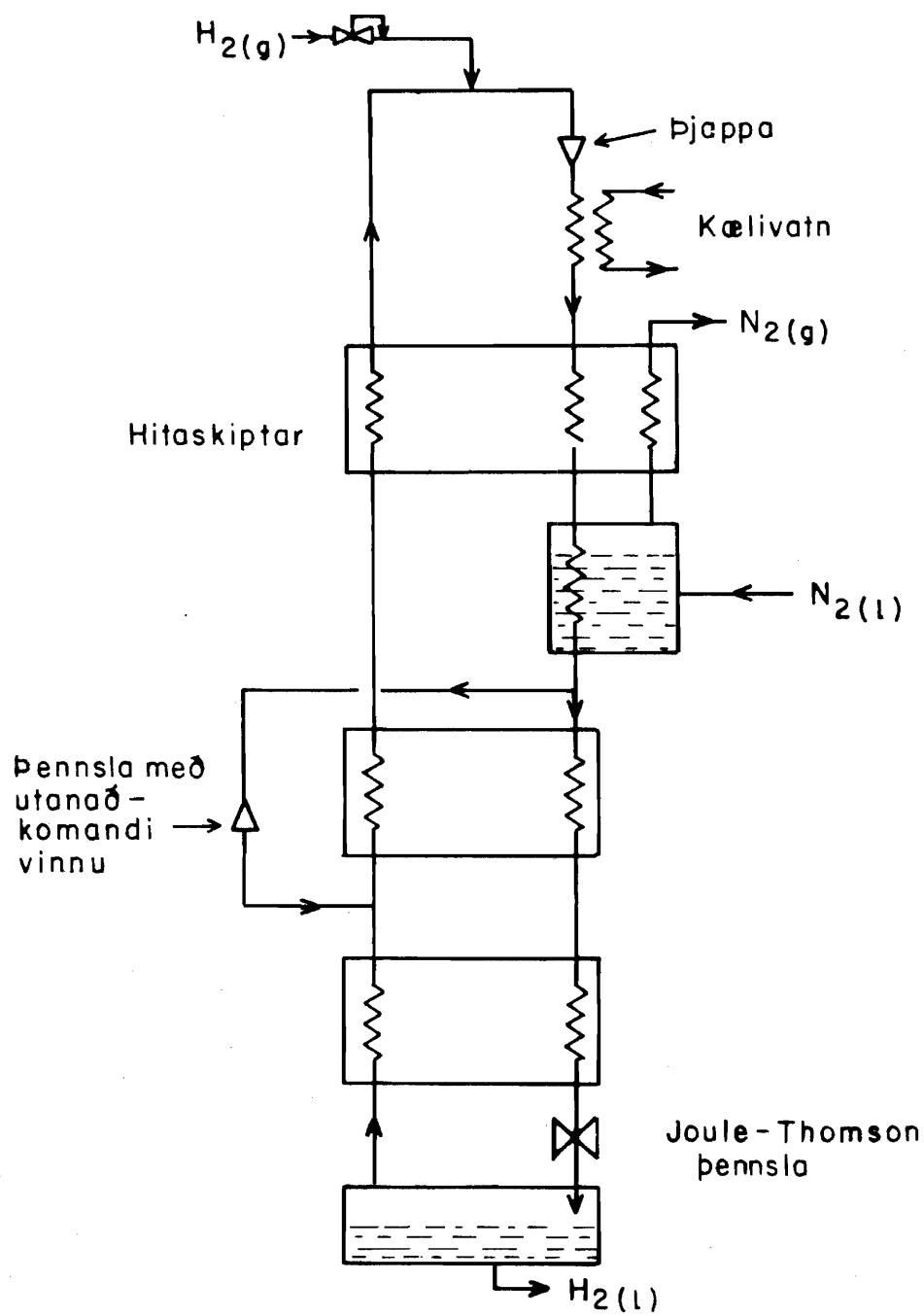
Péttинг vetrnis er all orkufrek. Fræðilega þarf um 3,3 kWh til að þétta hvert kg af vetrni. Í raun þarf þó miklu meiri orku og í stórum verksmiðjum er orkunotkunin um 10 kWh fyrir hvert kg af vetrni (70 kWh/GJ vetrni) (Thibault 1978, Darrow o.fl. 1977).

Alpaugh o.fl. (1978) og Witcofsky (1976 og 1977) hafa birt tölur um kostnað við að þétta vetrni. Tölur þeirra eru byggðar á kostnaðaráætlunum, sem gerðar hafa verið af "Linde Division of Union Carbide" en þeir eru annar stærsti framleiðandi fljótandi vetrnis í Bandaríkjum. Þá hafa Boeing flugvélaverksmiðjurnar nýlega birt tölur um þéttингarkostnað vetrnis (Hadaller o.fl. 1979). Niðurstöður þessara áætlana eru sýndar á mynd 3.-2 og er þéttингarkostnaðurinn sýndur sem fall af raforkuverði.

Einfaldað flœðirit af verksmiðju sem framleiðir
fljótandi vetrni (Eftir Thibault 1978).

BÁ/IS
J-Vinnslut.
F-18771

Mynd 3.-1





ORKUSTOFNUN

Framleiðslukostnaður vetrnislofts, þéttингarkostn.
og heildarframleiðslukostnaður fljótandi vetrnis
sem fall af raforkuverði

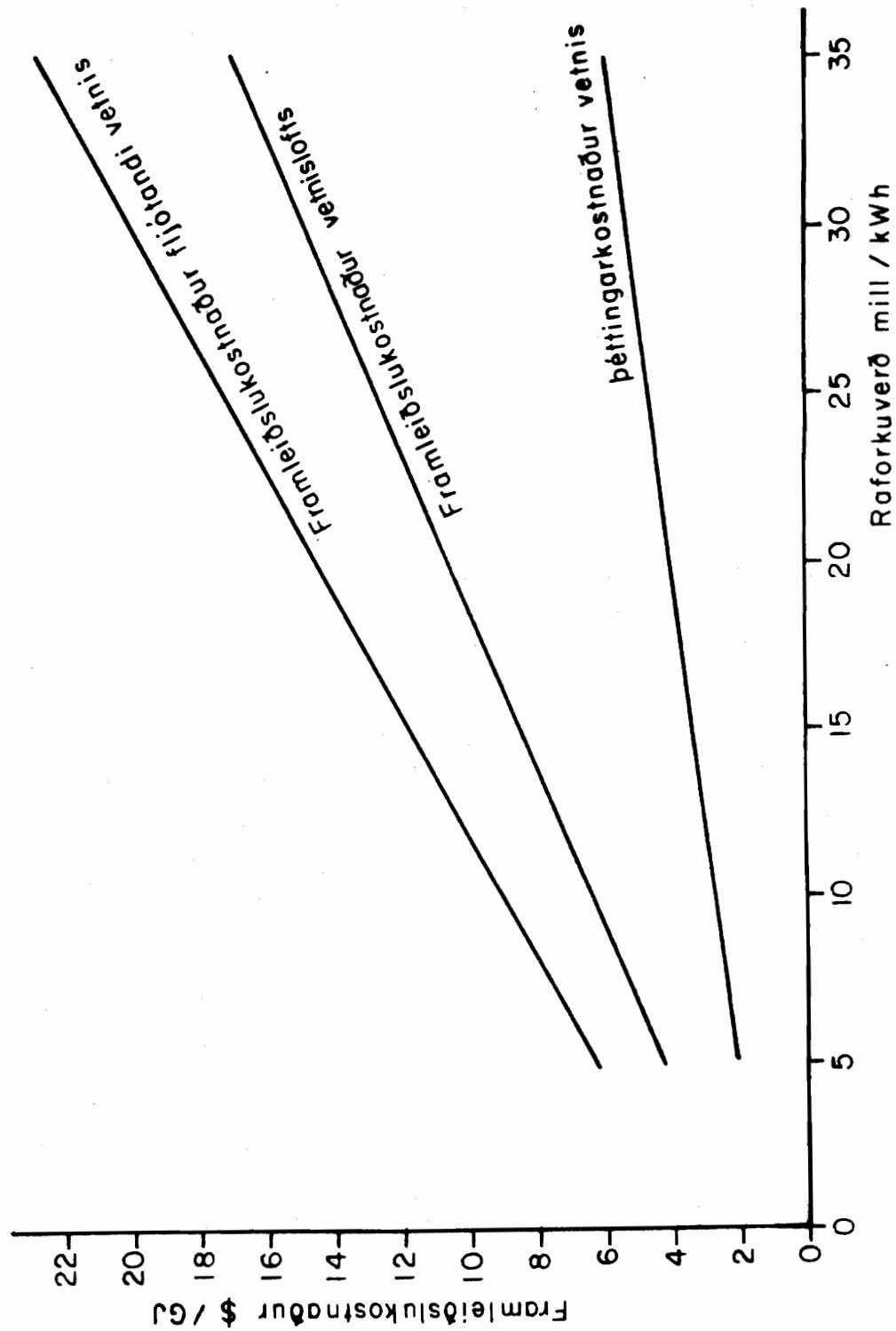
7910 24

BA / IS

J-Vinnslut.

F-18769

Mynd 3.-2



Mynd 3.2 sýnir einnig framleiðslukostnað vetrnislofts sem fall af raforkuverði. Þá er miðað við núverandi rafgreiningartækni, kostnaðaráætlun Boeing (Hadaller o.fl. 1979) og íslensku kostnaðaráætlunina (Runólfur Þórðarson 1979). Loks sýnir myndin heildar framleiðslukostnað fljótandi vetrni sem fall af raforkuverði. Allar áætlanirnar á mynd 3.-2 miðast við gengi Bandaríkjadollars á miðju ári 1979.

Ef fljótandi vetrni yrði notað sem þotuelsneyti má reikna með 8% tapi vegna uppgufunar við áfyllingu á flugvöllum (Mikolowsky o.fl. 1978). Vetrni sem þotuelsneyti yrði því 1,08 sinnum dýrara, en gildin á mynd 3.-2 sýna.

Af mynd 3.-2 má draga þá ályktun að fljótandi vetrni sé allmiklu dýrara eldsneyti en vetrnisloft. Ef t.d. raforka er notuð til að framleiða vetrnið og síðan að þéttu það og aðeins er litið á tölur um framleiðslukostnað, er fljótandi vetrni um 40% dýrara eldsneyti en vetrnisloft, sé reiknað með raforkuverði 15 mill/kWh. Sé eldsneytið notað á t.d. sprengihreyfla, verður verðmunurinn þó í raun eitthvað minni vegna þeirra kosta, sem fljótandi vetrni hefur þá fram yfir vetrnigas. Fljótandi vetrni er hægt að láta gufa upp og fara inn á hreyflana undir þrýstingi. Viðbótarorkan, sem þurfti til að þjappa vetrninu saman og þéttu það, nýtist þannig aftur að hluta í hreyflunum. Nýtni eldsneytisins verður því í raun betri, þegar um er að ræða fljótandi vetrni heldur en vetrnigas. Með öðrum orðum, fljótandi vetrni er orkuriðara eldsneyti en vetrnigas (Lynch 1979).

4 GEYMSLA, FLUTNINGUR OG DREIFING VETNIS

4.1 Loftkennt ástand

Vetni má geyma, flytja og dreifa í þrenns konar ástandi. Sem lofttegund, fljótandi eða fast í hydriðum.

Til skamms tíma hefur mestallt vetni, sem framleitt hefur verið, verið notað jafnharðan til framleiðslu ammoniaks, methanols eða í oliu-iðnaði. Í þessum iðnaði hefur því þurft að geyma tiltölulega lítið magn vetrnis. Hefur það þá yfirleitt verið geymt sem lofttegund við þrýsting nálægt 1 atm. Til dæmis er 11000m^3 ³ vetrnisgeymir við Áburðaverksmiðjuna í Gufunesi, sem getur geymt um 1 tonn (143 GJ) af vetrni við 1 atm þrýsting. Vetni til minni notenda hefur yfirleitt verið afhent á stálfloðskum við ca. 150 atm þrýsting.

Á síðustu árum hefur färst í vöxt að geyma loftkennt vetrni í verulegu magni við háan þrýsting, allt að 1000 atm. "Linde Division of Union Carbide" og "Air Products and Chemicals" geyma hvort um sig um 400 tonn af vetrni viðs vegar um Bandaríkin, ýmist sem lofttegund eða vökva. Og bæði þessi fyrirtæki eru nú að stækka vetrnisgeymslur sínar verulega (Kelly o.fl. 1978).

Kostnaður við að geyma vetrni sem lofttegund er mjög hár, einkum vegna þess hve geymar, sem geyma vetrni við háan þrýsting eru dýrir. Meðalverð slíkra geyma er um 700 \$/GJ (Mathis 1976). Er talið hæpið að sú aðferð að geyma vetrni í miklu magni í stálgeymum, geti nokkurn tíma keppt við aðrar ódýrarí geymslaðferðir. Tafla 4.1-1 sýnir stofnkostnað geyma, sem geyma vetrni sem lofttegund við 160 atm þrýsting. Til samanburðar er sýndur stofnkostnaður geyma fyrir fljótandi vetrni og bensíngeyma. Loks er sýndur gróft áætlaður stofnkostnaður tvennskonar hydriðgeyma.

Á síðustu árum hefur nokkuð verið gert að því að geyma vetrni neðan-

Tafla 4.1-1

Stofnkostnaður vetrnisgeyma, sem geyma vetrni sem lofttegund við 160 atm þrýsting. Til samanburðar er sýndur stofnkostnaður geyma fyrir fljótandi vetrni og bensíngeyma (Eftir Mathis 1976). Þá er sýndur gróflega áætlaður stofnkostnaður $\text{FeTiH}_{1,95}$ og MgH_2 -hydrið geyma (Sjá töflu 4.3-2).

Eldsneyti	Magn geymt GJ	Stofnkostnaður \$/GJ
H_2 lofttegund	2 50	712 683
H_2 fljótandi	2 50 36.000	950 285 25
Bensín	2 50 1.370.000	14 2 0,4
FeTi-hydrið	—	\gtrsim 1964
Mg-hydrið	—	\gtrsim 185

jarðar í gömlum saltnánum, oliulindum eða grunnvatnsæðum. Til dæmis er vetni nú geymt í miklu magni við 50 atm þrýsting í gömlum salt-nánum í Englandi (Kelly o.fl. 1978). Er talið að þar sem slíkri neðan-jarðargeymslu verði við komið, muni það jafnvel verða hagkvæmasta að-ferðin til að geyma vetni í miklu magni.

Þá hefur sú hugmynd verið könnuð lítillega að geyma vetni í miklu magni neðansjávar eða á botni djúpra stöðuvatna. Virðist sem slík geymslu-tækni gæti haft ýmsa kosti fram yfir vetrnisgeymslur á yfirborði eða jafnvel gamlar námur. Og gætu slikar vetrnisgeymslur orðið hagkvæmar í framtíðinni, kynnu þær vel að koma til greina á Íslandi (Tek o.fl. 1966).

Eftir því sem geymsluþrýstingur vetrnis er hærri, þarf meiri orku til að þjappa því saman. Mynd 4.1-1 sýnir þennan þjóppunarkostnað. Ef myndin er athuguð, er einkum eftirtektarvert að verulegur þjóppunar-kostnaður sparast, ef vetrnið er framleitt við þrýsting hærri en 1 atm. Til dæmis þarf um fjórum sinnum meiri orku til að auka þrýsting vetrnis úr 1 atm í 90 atm, en til að auka þrýstinginn úr 30 atm í 90 atm. Algengasti framleiðsluþrýstingur vetrnis, sem framleitt er með nú-verandi rafgreiningartækni er 1 atm. Verði vetrni hins vegar framleitt með SPE-rafgreiningu er framleiðsluþrýstingurinn 30 atm.

Nokkurt magn af vetrni er nú flutt um Bandaríkin, sem lofttegund í stál-geymum á þar til gerðum flutningabílum. Þrýstingur vetrnisins í geymunum er um 115 atm. Slik flutningsaðferð kann að vera hagkvæm, þegar um er að ræða að flytja tiltölulega lítið magn um langan veg. Sé hins vegar um að ræða að flytja mikið magn á landi er án efa hagkvæmast að flytja það sem lofttegund eftir pípum, ef pípum verður við komið. Sé um að ræða mikið magn af vetrni, sem flytja á mjög langan veg, t.d. milli heimsálfa, er þó að öllum líkindum hagkvæmast að flytja það sem vökvá í stórum geymum eða tankskipum.

Lengsta vetrnisleiðsla og jafnframt sú elsta, sem byggð hefur verið til að flytja vetrni, sem lofttegund, er í notkun í Þýskalandi. Leiðslan, sem var byggð 1938, er um 210 km löng og flytur um 18400 tonn (2,6 millj. GJ) af 95% hreinu vetrni á ári. Leiðslan er um 30 cm í þvermál við upp-

OS

ORKUSTOFNUN

Þjöppunarkostnaður vetrnis
(Eftir Mathis 1976)

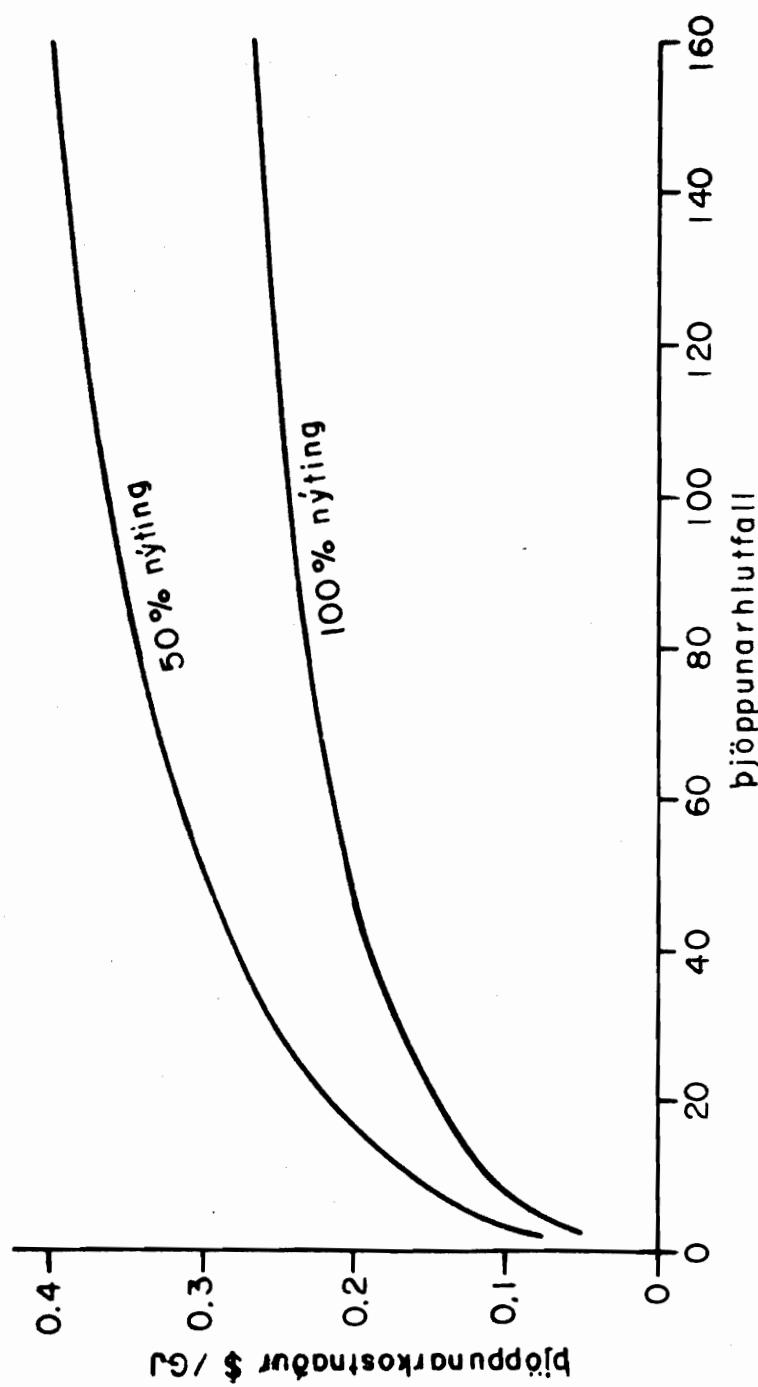
79 10 24

BÁ/18

J-Vinnslut.

F-18766

Mynd 4.1-1



haf og 15 cm við enda. Er vetrinu dælt inn í hana við 15 atm þrýsting og streymir síðan eftir henni, án nokkurrar frekari dælingar á leiðinni. Hefur þessi leiðsla nú verið notuð í 40 ár án nokkurra óhappa eða vandræða (Isting 1974). Í Bandaríkjunum er í notkun 96 km löng vetrnisleiðsla, sem flytur 99,5% hreint vetrni. Upphafsprýstingur leiðslunar er 53 atm og flæðir vetrnið eftir henni án viðbótardælingar. Er nú í ráði að lengja þessa leiðslu um 160 km.

Núverandi jarðgasleiðslur má vel nota til að flytja vetrni. Ef flytja á sama magn af orku eftir leiðslunum sem vetrni og nú er flutt sem jarðgas, þarf þó að dæla í gegnum leiðslurnar um þrefallt meira rúmmáli, ef þrýstingur er sá sami. Megin breytingarnar, sem gera þarf, til að núverandi jarðgasleiðslur gætu flutt sama orkumagn af vetrni, eru því þær, að skipta þarf um þjöppur. Gregory (1972) hefur reiknað út, að vetrni þurfi um fjórum sinnum afkastameiri þjöppur og orkunotkun vegna dælingar yrði um fimm sinnum meiri.

Stórbjóðirnar hafa þegar lagt miklar leiðslur til að flytja jarðgas og dreifa því til notenda. Í Bandaríkjunum einum eru megin flutningsleiðslur fyrir jarðgas um 400 000 km og flytja um 1,5 milljón tonn ($88 \cdot 10^6$ GJ) af jarðgasi á dag. Þessar leiðslur munu að öllum líkendum endast í 50 ár, ef þær verða notaðar til að flytja jarðgas, en eitthvað skemur ef þær eiga að flytja vetrni. Er talið líklegt að með tímanum verði farið að blanda vetrni í jarðgasið. Vetrnismagnið má síðan smá auka, eftir því sem jarðgas minnkar og þörfir fyrir slikt eldsneyti vex og að lokum gæti vetrni leyst jarðgas af hólmi að fullu.

Flutningur vetrnis, sem lofttegund eftir leiðslum, er mjög hagkvæm aðferð til að flytja orku í miklu magni. Vetrnisleiðsla, sem er 1 m í þvermál, getur t.d. flutt um 8000 MW og slik pipa er verulega hagkvæmari en háspennulínur, sem flytja sama magn af raforku.



ORKUSTOFNUN

Flutninguskostnaður orku sem flutt er 100 km veg.
(Eftir Leeth 1976)

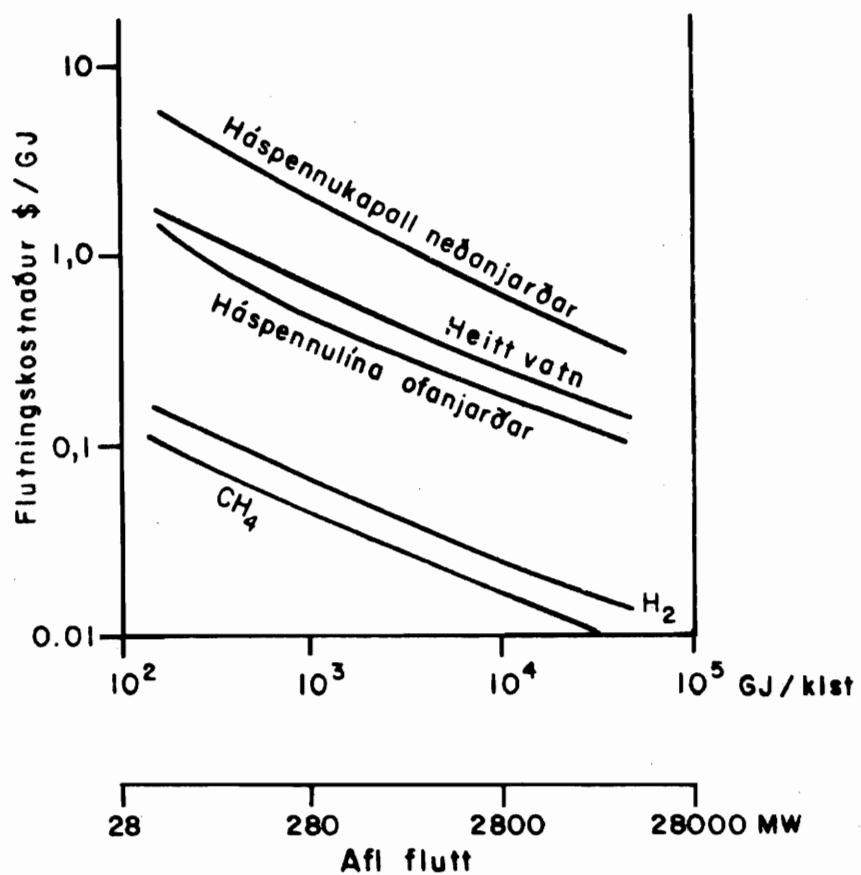
79.10.24

BÁ/IS

J-Vinnslut.

F-18767

Mynd 4.1-2



Mynd 4.1-2 sýnir flutningskostnað orku, sem flutt er 100 km leið með hinum ýmsu aðferðum. Flutningskostnaðurinn er sýndur sem fall af afli. Tafla 4.1-2 sýnir svo heildarflutningskostnað orku frá 2800 MW orkuveri (10^4 GJ/h) og hvernig sá kostnaður skiptist milli orkutaps og stofnkostnaðar. Fyrir H_2 og CH_4 eru sýndar tvær kostnaðartölur. Lægri talan er miðuð við að orkan, sem notuð er til að dæla lofttegundinni, kosti 1,23 \$/GJ, en sú hærri miðast við að orkan kosti 3,16 \$/GJ (11 mill/kWh). Fyrir heitt vatn er aðeins sýnd ein tala, þar sem orkutapið er svo til eingöngu varmatap.

Tafla 4.1-2

Flutningskostnaður orku frá 2800 MW orkuveri
 $(10^4$ GJ/h) (Eftir Leeth 1976).

Orkuform	Orkutap \$/GJ-100km	Stofnkostn. \$/GJ-100km	Heildarkostn. \$/GJ-100km
Háspenna neðanjarðar	5,4	50,0	55,4
Háspenna ofanjarðar	10,7	6,3	17,0
Jarðgas	0,3-0,6	1,4	1,7-2,0
H_2	0,4-1,1	1,9	2,3-3,0
Heitt vatn	11,1	12,8	23,9

Flutningskostnaður orku, sem gefin er í töflu 4.1-2 og á mynd 4.1-2, miðast við að orkan sé flutt í miklu magni frá orkuverum til dreifistöðva. Dreifikostnaður orku til smærri notanda er hins vegar miklu hærri. Tafla 4.1-3 sýnir meðaldreifikostnað orku frá að-veitustöðvum til smærri notenda. Gildin í töflunni eru byggð á núverandi meðaldreifikostnaði á Bretlandseyjum (Hampson o.fl. 1975).

Af ofangreindum upplýsingum virðist ljóst, að ef nota þarf raforku til að framleiða eldsneyti í miklu magni, þá sé heppilegt að framleiða eldsneytið við raforkuverið, fremur en að flytja raforkuna fyrst langan veg áður en henni er breytt í eldsneyti.

Táfla 4.1-3

Meðaldreififikostnaður orku frá dreifistöðvum til smærri notenda á Bretlandi (Eftir Hampson o.fl. 1975).

Orkuform	Dreififikostnaður \$/GJ
Rafmagn	1,6
Jarðgas	0,8
H ₂	1,2
Methanol	0,8

Ef hins vegar notandinn getur, hvort sem er, notað raforku eða eldsneyti, er hæpið að hagkvæmara sé að flytja orkuna sem eldsneyti, ef raforkuflutningum eftir háspennlinum verður við komið. Til þess er orkutapið við eldsneytisframleiðsluna of mikið. Hampson o.fl. (1975) hafa reiknað út að ef raforka sú, sem nú er notuð á Bretlandi, kostaði 10 mill/kWh við orkuver, yrði meðalorkukostnaður til notenda 4,8 \$/GJ, ef orkan væri flutt til notenda sem raforka. Þá er reiknað með að raforkan sé að jafnaði flutt 200 km leið eftir háspennulinum. Ef raforkunni yrði breytt í eldsneyti við orkuverið og það síðan flutt til notenda, yrði orkuverð til notenda 6,3 \$/GJ, ef flutt yrði vetni, en 7,8 \$/GJ ef flutt yrði methanol. Sé eldsneytinu svo aftur breytt í raforku í dreifistöðvum, yrði raforkuverð til notenda 13 \$/GJ, ef flutt er vetni, en 23 \$/GJ ef flutt er methanol. Hampson kemst að þeirri niðurstöðu, að ef neytandi getur, hvort sem er, notað orkuna sem vetni eða raforku, sé fyrst hagkvæmt að flytja orkuna sem vetni, frekar en raforku eftir háspennulinum, þegar vegalengdin sé orðin nokkur þúsund eða jafnvel tugir þúsunda kílómetra. Gregory (1972) kemst hins vegar að þeirri niðurstöðu að hagkvæmara sé að flytja vetni en raforku eftir háspennulinum, sé vegalengdin 300-1000 km.

4.2 Fljótandi vetni

í tenglsum við eldflaugatilraunir stórpjóðanna hefur á undanförnum árum þurft að geyma fljótandi vetni í miklu magni. Stærsti geymirinn, sem byggður hefur verið í þessum tilgangi, er á Canaveralhöfða í Bandaríkjunum og tekur um 3,2 milljónir lítra (224 tonn, $3,2 \cdot 10^4$ GJ) af fljótandi vetni. Þá eru 40 000 og 75 000 lítra geymar algengir bæði í Evrópu og Bandaríkjunum.

Fljótandi vetni hefur á undanförnum árum verið flutt í miklu magni og oft um langan veg. Til dæmis er fljótandi vetni flutt reglulega í 40 000 lítra geymum frá vesturströnd Bandaríkjanna og yfir á austurströndina og fljótandi vetni er einnig flutt í 40 000 lítra geymum frá Frakklandi til Frönsku Guyana, sem er undan strönd Suður Ameríku (Kelly o.fl. 1978, Thibault 1978).

Eitt aðalvandamálið við geymslu og þó einkum flutning fljótandi vetrnis er uppgufunartapið, sem verður við áfyllingu eða umskipun, þegar vetrnið kælir niður leiðslur og geyma. Við fyllingu á núverandi flutningsgeyma við verksmiðju gufa um 10-15% vetrnisins upp (Mathis 1976). Þetta vetrni má þétta aftur í verksmiðjunni, þannig að raunverulegt orkutap er einungis orkunotkunin við endurþéttingu. Við umskipun á endastöð geta svo aftur gufað upp 10-15% vetrnisins, nema geymirinn sé kaldur fyrir. Vetrnið, sem þannig gufar upp, má hugsanlega nota sem orkugjafa eða iðnaðarhráefni.

Vegna þess hve uppgufunartap við umskipun getur orðið mikið, er talið, að verði fljótandi vetrni tekið upp sem þotueldsneyti í framtíðinni, þá verði hagkvæmast að þétta vetrnið fyrst við flugvellina. Til flugvallanna yrði vetrnið flutt sem lofttegund eftir leiðslum. Frá þéttigarverksmiðjunum streymir síðan vetrnisvökvinna í hringrás um flugvallarsvæðið og það vetrni, sem gufar upp, fer aftur í endurþéttingu. Úr hringrásinni verður svo fljótandi vetrni fyllt á þoturnar. Með þessu fyrirkomulagi er talið að vetrnistap vegna uppgufunar muni aðeins verða

um 8% (Mikolowsky o.fl. 1978, Korycinski 1979).

Geymar fyrir fljótandi vetni eru nánast til af öllum stærðum upp í 3,2 milljón lítra. Geymarnir eru tvöfaldir og einangraðir með því að lofttæma rúmið milli veggja. Í stærri geymum er þó rúmið milli veggja fyllt með þöndum perlusteini og síðan einangrað með lofttæmingu. Megin ókosturinn við slika einangrun er einkum sá, að ef leki verður í lofttæmingarkerfinu, jafnvel við smávægilega bilun, er einangrunin úr sögunni og vetnið gufar fljótt upp. Nýjustu rannsóknir á smíði vetnisgeyma beinast því einkum í þá átt að nota einangrun, sem ekki þarf að lofttæma.

Ef flytja á vetni í miklu magni á landi og afhenda það notanda sem lofttegund, er án efa hentugast að flytja það sem lofttegund eftir leiðslum, þegar leiðslum verður við komið. Ef hins vegar á að flytja vetni í miklu magni milli heimsálfa er efalitið heppilegra að flytja það sem vökva, t.d. í tankskipum. Samkvæmt nýlegum upplýsingum, er tæknilega ekkert því til fyrirstöðu að smiða tankskip, sem flytur fljótandi vetni (Kahl 1978, Smith 1979). Þetta á sérstaklega við þegar notandinn þarf á fljótandi vetni að halda. Þurfi notandinn hins vegar loftkennt vetni, má endurvinna hluta af þeirri orku, sem fór í að þétta vetnið, með því að láta vetnið snúa gashverflum um leið og það gufar upp, og framleiða þannig raforku.

Tæknilega er unnt að flytja vetni sem vökva eftir leiðslum. Slik flutningsaðferð er þó mjög kostnaðarsöm og tæpast hagkvæm ef um er að ræða lengri leið en ca. 1 km.

Geymslukostnaður vetnis er einkum háður tveim páttum, stofnkostnaði geyma og tapi vegna uppgufunar. Mynd 4.2-1 sýnir tap vegna uppgufunar fljótandi vetnis úr geymum sem fall af stærð, en uppgufunartapið minnkar eftir því sem geymarnir stækka. Mynd 4.2-2 og tafla 4.1-1 sýna svo stofnkostnað geymannna sem fall af stærð. Gildin eru fengin frá Mathis (1976).

I-
-**ORKUSTOFNUN****Uppgufunartap fljótandi vetrar úr geymum
(Eftir Mathis 1976)**

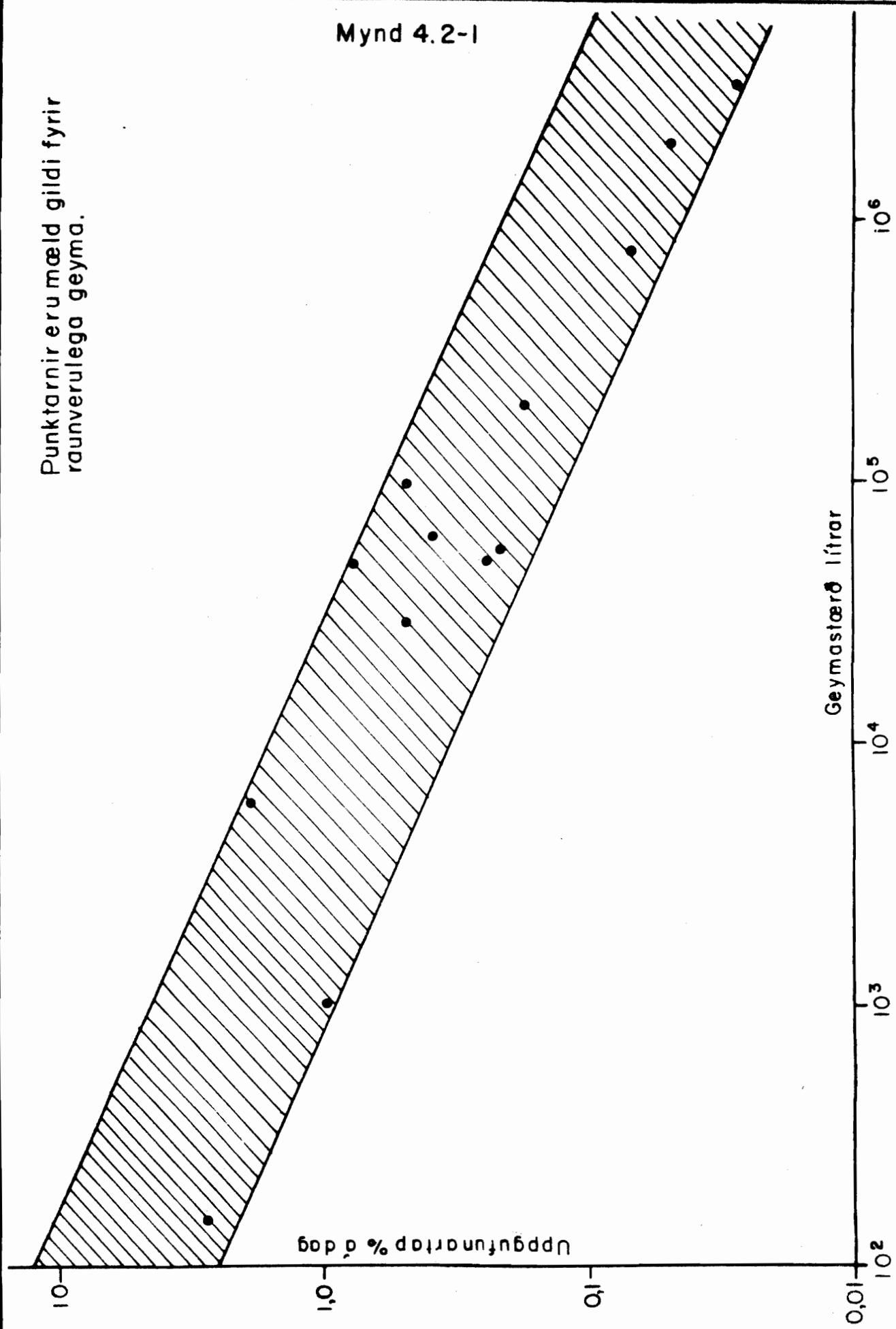
79 10 24

BA/IS

J-Vinnslut.

F-18773

Punktarinn eru mæld gildi fyrir
raunverulega geyma.

Mynd 4.2-1



ORKUSTOFNUN

Stofnkostnaður geyma fyrir fljótandi vetrni.
(Eftir Mathis 1976)

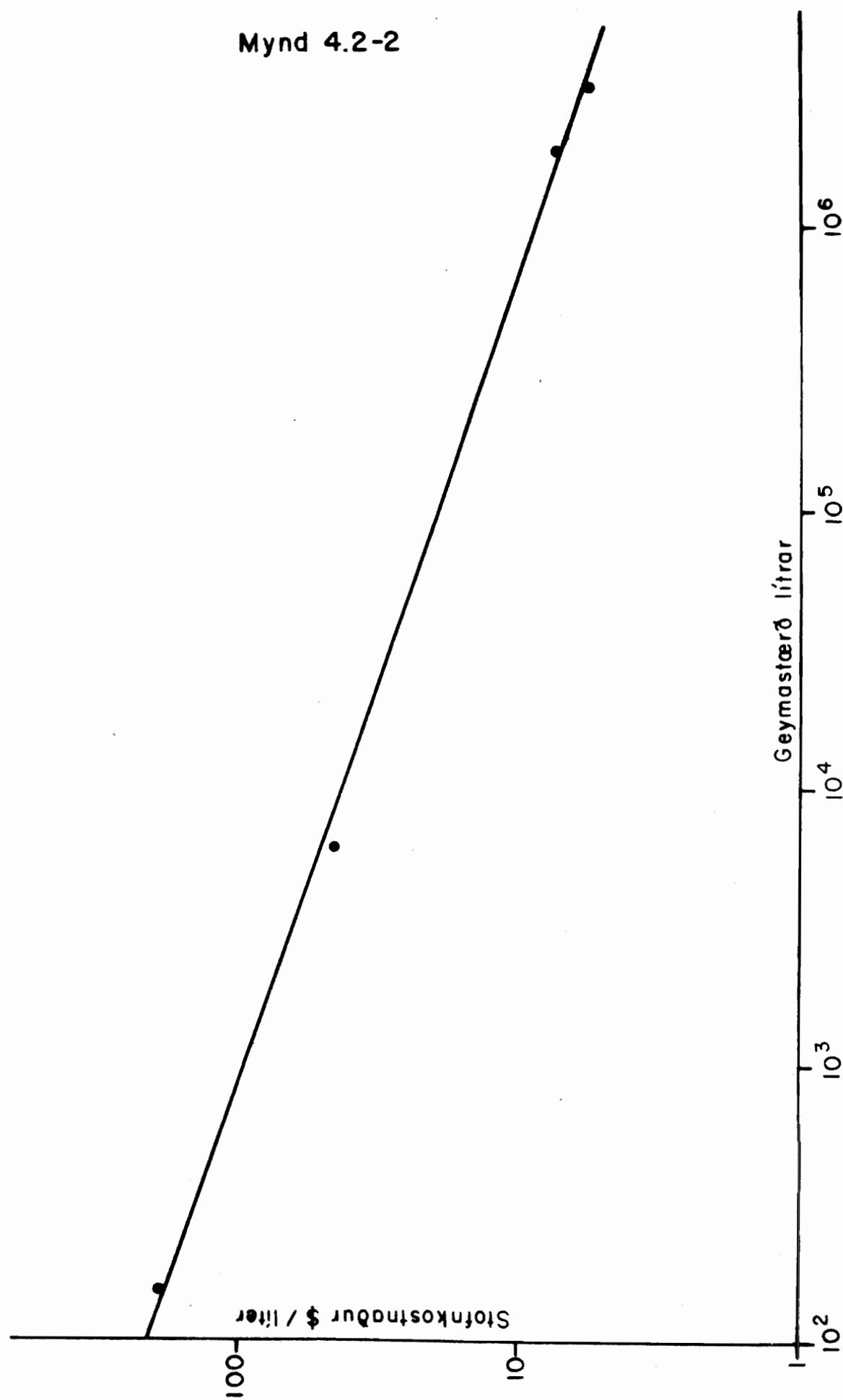
79 10 24

BÁ/IS

J-Vinnslut.

F-18774

Mynd 4.2-2



Þá hefur Mathis einnig birt tölur um flutningskostnað fljótandi vetrnis, sem flutt er annað hvort með flutningabilum eða fljótaprömmum í nágrenni þéttbýlissvæða. Þessar tölur eru sýndar í töflu 4.2-1. Til samanburðar er einnig sýndur flutningskostnaður vetrnislofts eftir pipum og flutningskostnaður nokkurra annarra eldsneytistegunda og raforku eftir háspennulínnum. Fyrir hvert flutningskerfi er kostnaðaráætlunin miðuð við hámarksorkumagn, sem talið er hagkvæmt að flytja á viðkomandi hátt.

Tafla 4.2-1

Flutningskostnaður fljótandi vetrnis í nágrenni þéttbýlissvæða. Til samanburðar er sýndur flutningskostnaður vetrnislofts, flutningskostnaður nokkurra eldsneytistegunda og flutningskostnaður raforku eftir háspennulinum. Kostnaðaráætlunarinnar eru gerðar fyrir það hámarksagn, sem talið er hagkvæmt að flytja á viðkomandi hátt (Eftir Mathis 1976).

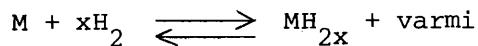
	Magn GJ/h	Teg. og stærð flutningstækis	Stofnkostn. milj. \$ pr. 160 km	Heildar flutn. km. ¢/GJ	
				160 km	km. ¢/GJ
H ₂ vökvi	520	7,6 cm leiðsla	79 ^{c)}		250,0
H ₂ vökvi	1700	4200000 lítra fljótaprammi	2,4		6,9
H ₂ vökvi	60	50000 lítra flutn. bíll	0,15		34,0
H ₂ loftkennt	20.000	91 cm leiðsla	68 ^{a)} b)		5,7 ^{b)}
NH ₃	20.000	91 cm leiðsla	62 ^{a)} b)		5,0 ^{b)}
Methanol	20.000	76 cm leiðsla	52 ^{a)} b)		4,2 ^{b)}
Jarðgas	20.000	91 cm leiðsla	62 ^{a)} b)		5,1 ^{b)}
Rafm. hásp. ofanj.	8000	2500 MW, 750 KV 30			8,3
Rafm. hásp. neðanj.	8000	2500 MW, 345 KV 300		~ 100	

- a) Stofnkostnaður er háður landslagi og getur breytst um faktor 4
 b) Beinar leiðslur á löngum leiðum gætu lækkað kostnaðinn um 50%
 c) Ekki er gert ráð fyrir endurþettingu vetrnis sem gufar upp.

Eftir því sem leiðin, sem flytja á mikið magn af vetni lengist, verður að öllum líkendum hagkvæmara að flytja það fljótandi. Sérfræðingar L'Air Liquide í Frakklandi hafa komist að þeirri niðurstöðu að ef 23 000 GJ/Klst af vetni (4000 tonn/dag) eru flutt 500 km vegalengd, sé orðið álika dýrt að flytja það sem lofttegund eftir leiðslum og sem vökva með tankskipi (Thibault 1978).

4.3 Hydrið

Vissir málmar eða málmblöndur geta drukkið í sig vetni og myndað með því efnasambönd er nefnast hydrið. Við það losnar varmi, sem svarar til bindiorku hydriðsins. Með því að hita hydriðið upp er síðan hægt að losa vetnið úr því aftur. Efnabreytinguna má skrifa eftirfarandi:



Mynd 4.3-1 sýnir eiginleika "ideal" hydriðs við ákveðið hitastig (pressure-composition isotherm). Línan 1-2-3-4 er svonefnd "absorption isotherm". Línan 4-5-6-1 er "desorption isotherm". Í punkti 1 er lítið eða ekkert vetni í málminum. Þegar vetrnisþrýstingurinn er aukinn drekkur málmurinn í sig vetni þar til punkti 2 er náð. Vetrnisloft er þá í jafnvægi við vetrnismettaðan málm við tilsvarandi hitastig og þrýsting. Ef þrýstingurinn er hækkaður enn hefst myndun nýs fasa, hydriðs (MH_{2x}) og bæði vetrnismettaður málmur og hydrið eru í jafnvægi við vetrnisloft. Í punkti 3 hefur allur málmurinn myndað hydrið, sem er í jafnvægi við vetrnisloft við tilsvarandi þrýsting og hitastig. Sé vetrnisþrýstingurinn enn aukinn vex vetrnisinnihaldið eitthvað þar til punkti 4 er náð, en sáralítið úr því. Í punkti 4 er geymirinn fullhlaðinn. Breytingin 1 - 4 er útvermin og því verður að flytja varma burtu, ef hitastigið á að vera óbreytt. Ef kerfið myndar annan hydrið fasa endurtekur sagan sig og punktur 4 mundi þá svara til punkts 1.

Sé vetrnisþrýstingurinn nú aftur lækkaður niður fyrir punkt 4, er jafnvæginu milli hydriðs og vetrnislofts raskað og hydriðið fer að gefa frá



Eiginleikar hydriða

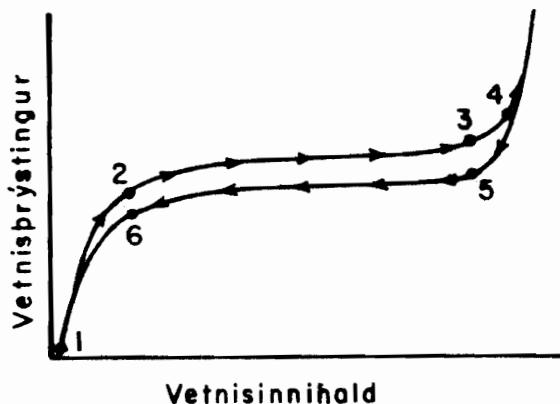
791024

BÁ/IS

J-Vinnslut.

F-18770

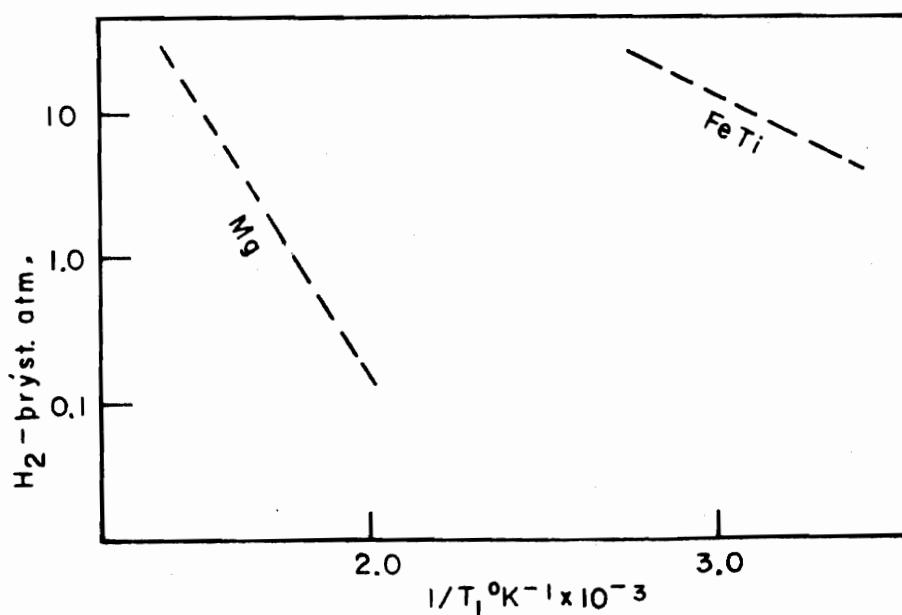
Mynd 4.3-1



Eiginleikar hydriða við ákveðið hitastig.

(Eftir Lynch o.fl. 1978)

Mynd 4.3-2



Jafnvægisþrystingur vetrnis, sem fall af hitastigi, fyrir
 MgH_2 - og $\text{FeTiH}_{1.92}$ -hydrið. (Eftir Matis 1976)

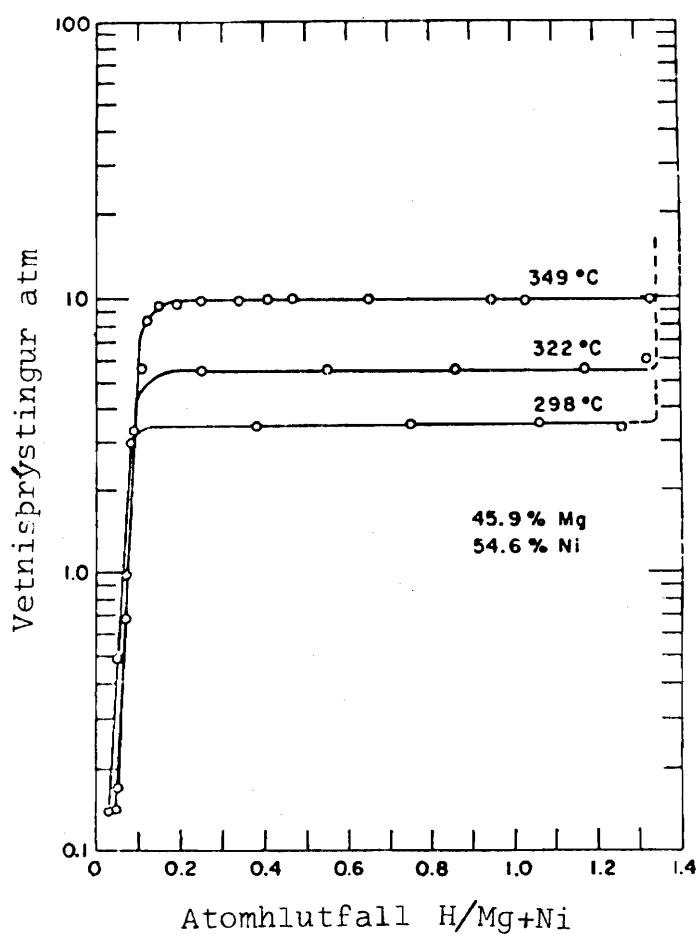
sér vetni, ef næg varmaorka er fyrir hendi. Þetta heldur áfram þar til punkti 1 er náð, þó ekki sömu leið, heldur eftir leið 4-5-6-1. Breytingin er innvermin og því þarf að flytja varma til kerfisins, ef hitastig á að haldast óbreytt.

Bilið milli línanna 1-2-3-4 og 4-5-6-1 (absorption-desorption hysteresis) getur verið mjög misbreytt, frá 0-100 atm, eftir því um hvaða hydrið er að ræða. Heppilegast er að bilið sé sem minnst. Hjá þeim hydriðum sem mest verða rædd hér á eftir, MgH_2 -hydrið og $FeTiH_{1,95}$ -hydrið, er bilið milli línanna lítið og því verður framvegis reiknað með að "absorption" og "desorption" línan sé á sama stað.

Þessi lína, þ.e. jafnvægið milli hydriðs, vetrnis-mettaðs málms og vetrnislofts, er svo háð hitastigi. Mynd 4.3-2 sýnir jafnvægis-brýstinginn, sem fall af hitastigi fyrir MgH_2 - og $FeTiH_{1,95}$ -hydrið. Af myndinni er auðséð, að til þess að hlaða eða afhlaða hýdriðin við hentugan brýsting, 1-20 atm, þarf mjög mishátt hitastig. MgH_2 -hydrið er hlaðið og afhlaðið við ca. 350°C og nefnist háhitahydrið, en $FeTiH_{1,95}$ -hydrið er hlaðið og afhlaðið við ca. 50°C og nefnist lág-hitahydrið. Háhitahydrið hafa hærri myndunarvarma, ΔH_f , en lág-hitahydrið.

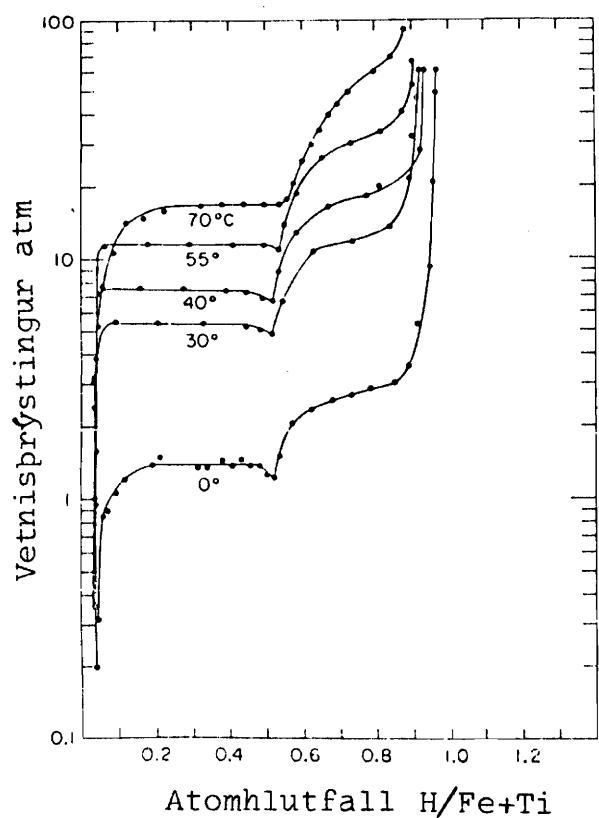
Mynd 4.3-3 og mynd 4.3-4 sýna hleðslu og afhleðslueiginleika Mg_2NiH_2 -hydriðs og $FeTiH_{1,95}$ -hydriðs við nokkur hitastig, en þau eru algengustu hydriðin, sem notuð hafa verið til þessa. Línurnar á mynd 4.3-3 eru í samræmi við það, sem búast má við þegar málmur eða málmblanda myndar einn hydrið fasa. Línurnar á mynd 4.3-4 einkennast hins vegar af því, að um er að ræða myndun tveggja hydrið fasa.

Auk þeirra hydriða, sem að ofan greinir hafa eiginleikar fjölmargra annarra hydriða verið athugaðir og stöðugt eru að finnast nýjar gerðir hydriða með mismunandi eiginleika. Tafla 4.3-1 sýnir geymslueiginleika



Mynd 4.3-3

Hleðslu- og afhleðslueiginleikar Mg_2Ni -hydriðs við mismunandi hitastig (Eftir Mathis 1976).



Mynd 4.3-4

Hleðslu- og afhleðslueiginleikar FeTi-hydriðs við mismunandi hitastig (Eftir Mathis 1976).

Tafla 4.3-1

Nokkrar algengar gerðir hýdriða, geymslurýmd þeirra og myndunarvarmi (ΔH_f). Til samanburðar er sýnt hve mikið vetni má geyma í jafnstórum geymum, sem vökva eða lofttegund. (Eftir Lynch o.fl. 1978 og Mathis 1976).

Hýdrið	Vetnisinnihald % af þunga	Geymslurýmd g vetni pr. pr. ml geymi	ΔH_f kJ/mól
MgH ₂	7,0	0,101	-74,4
Mg ₂ NiH ₄	3,16	0,081	-64,4
VH ₂	2,07		-40,1
FeTiH _{1,95}	1,75	0,096	-31,4
TiFe _{0,7} Mn _{0,2} H _{1,9}	1,72	~ 0,09	
LaNi ₅ H ₇	1,37	0,089	
R.E.Ni ₅ H _{6,5}	1,35	~ 0,09	
Fljótandi vetni	100	0,07	
Loftkennt vetni þrýstingur 100 loftþyngdir	100	0,007	

nokkurra hydriða, sem mest hafa verið rannsókuð til þessa. Til samanburðar er einnig sýnt, hversu mikið vetni er hægt að geyma sem lofttegund undir háum þrýstingi, eða sem vökva í jafnstórum geymum. Taflan sýnir vel hæfileika hydriða til að geyma vetni. Í hydriðum er hægt að geyma vetni við venjulegan hita og lágan þrýsting. Ef vetni er geymt í verulegu magni sem lofttegund verða geymarnir annað hvort óheyrilega stórir eða geymsluprýstingurinn verður mjög hár. Sé vetni geymt sem vöki verður að geyma það við mjög lágt hitastig, -253°C. Bæði hár þrýstingur og lágt hitastig þarfust aukinna öryggisráðstafana. Auk þess kostar það talsvert að þjappa loftinu saman eða þétta það.

Miðað við rúmmál geta hydrið geymt mikið vetni. MgH_2 -hydrið getur t.d. geymt um 50% meira vetni, en hægt er að geyma sem vökva í jafnstóru íláti og til eru hydrið, sem geta geymt allt að 100% meira vetni.

Af töflu 4.3-1 er augljóst að hydrið eru of þung, til að hægt sé að nota þau til að flytja vetni í miklu magni milli staða. Sem eldsneytisgeymar í farartækjum knúnum vetni, öðrum en flugvélum, og sem geymar til að geyma í vetni á ákveðnum stað gætu þau hins vegar komið til greina. Samkvæmt töflu 4.3-1 mundi t.d. MgH_2 -hydrið geymir, sem vegur 170 kg og er um 116 lítrar að stærð, geta flutt með sér jafnmikla orku og hægt er að flytja í 50 lítra bensíngeymi.

Ef bílar geta flutt með sér vetni sem eldsneyti í nægilegu magni í hydriðgeymum, verður ekki annað séð, en hydrið geymar séu einnig not-hæfir sem eldsneytisgeymar í skipum knúnum vetni. Skip þurfa að vísu að flytja með sér hlutfallslega miklu meira eldsneyti en bílar, en í skipum ætti aukið rúmmál eða aukin þyngd eldsneytisgeyma að skipta minna máli.

Þegar geyma á vetni á ákveðnum stað skiptir þyngd hydriða litlu máli. Hydrið eins og $FeTiH_{1,95}$ gætu því vel komið til greina sem vetrnisgeymar í slikum tilvikum. Kostur $FeTiH_{1,95}$ -hydriðs fram yfir MgH_2 -hydrið er einkum sá, að miklu lægri hita (50°C) og þá minni varma þarf til að losa

úr því vetnið. Nærtækt dæmi til að sýna þá breytingu, sem orðið gæti á geymsluháttum ef tekið yrði að nota $\text{FeTiH}_{1,95}$ -hydrið til að geyma vetni, í stað þess að geyma það sem lofttegund, er vetrnisgeymsla Áburðarverksmiðjunnar í Gufunesi. Núverandi geymir verksmiðjunnar er um 11300 m³ stálgeymir, sem getur geymt um 1 tonn af vetrni við 1 atm þrýsting. Ef tekið yrði að nota $\text{FeTiH}_{1,95}$ -hydrið geymi, yrði hann aðeins um 10 m³ að stærð, eða um 1/1000 af stærð núverandi geymis. Þyngd hydriðgeymisins yrði um 60 tonn.

Athuganir með hydrið sem vetrnisgeyma eru enn á tilraunastigi og því erfitt að finna haldbærar upplýsingar um, hvernig muni verða raunverulegur stofnkostnaður hydriðgeyma, ef tekið yrði að nota þá til að geyma vetrni í stórum stíl. MPD Technology Corporation, Inc., hefur sent frá sér verðlista yfir verð nokkurra hydriða. Verð þeirra á $\text{FeTiH}_{1,95}$ - og MgH_2 -hydriði eru sýnd í töflu 4.3-2. Þá sýnir taflan einnig verð þessara hydriða samkvæmt nýlegum upplýsingum Brookhaven National Laboratory (Strickland 1979).

Samkvæmt Strickland (1979) er megin stofnkostnaður hydriðgeyma hydriðin sjálf, aðrir liðir eru óverulegir. Samkvæmt Beaufrere o.fl. (1976) mun hins vegar stofnkostnaður $\text{FeTiH}_{1,95}$ -geymis, sem getur geymt um 1800 GJ (12,6 tonn) af vetrni, skiptast þannig, að 65% af kostnaðinum yrði hydrið fyllingin, en 35% geymir og hitaskiptar.

Athyglisvert er, að samkvæmt töflu 4.3.2 er MgH_2 miklu ódýrari vetrnisgeymsla en $\text{FeTiH}_{1,95}$. Það magn af MgH_2 sem þarf til að geyma ákveðið magn af vetrni kostar aðeins um 1/10 af því, sem nauðsynlegt $\text{FeTiH}_{1,95}$ mundi kosta. Ástæðan er miklu meiri geymslurýmd MgH_2 -hydriðs (sjá töflu 4.3-1). $\text{FeTiH}_{1,95}$ -hydrið hefur þó þá kosti fram yfir MgH_2 -hydrið, að miklu minni varma þarf til að losa aftur úr því vetrnið, en slikt kann að vega upp hærri stofnkostnað $\text{FeTiH}_{1,95}$ -geymisins.

Þótt hydrið virðist margra hluta vegna mjög álitlegar vetrnisgeymslur, bæði til að geyma vetrni sem eldsneyti í farartækjum og eins til að geyma

Tafla 4.3.2

Núverandi verð FeTiH_{1,95}-hydriðs og MgH₂-hydriðs samkvæmt verðlistu MPD Technology Corporation, Inc., og samkvæmt nýlegum upplýsingum Brookhaven National Laboratory (Strickland 1979).

	Samkv. MPD Technology			Samkv. Strickland Verð \$/kg	Lægst uppgefið verð \$/GJ vetrni geymt
	1-10 kg	11-50 kg	51-500 kg		
FeTiH _{1,95}	20,00	15,00	10,00	6,50	5,00-6,00 1964
MgH ₂	20,00	17,25	13,00	-	2,00 185

það í miklu magni á sama stað, eru enn óleyst ýmis tæknileg vandamál samfara almennri notkun þeirra. Helsti kosturinn við hydrið er sá, hve örugg vetnisgeymsla þau eru. Ef eitthvað ber út af, t.d. við slys eða náttúruhamfarir, er hydriðgeymir talin miklu hættuminni eldsneytisgeymir, en bensíngeymir. Helsta vandamálið er hár geymakostnaður og svo þensla, sem verður þegar hydrið eru hlaðin, en þenslan er mismikil eftir því um hvaða hydrið er að ræða.

Þenslan getur valdið bólgnun geymisins og jafnvel rifið hann með tímanum. Það er þó talið, að hvorki bólgnunarvandamálið, né önnur tæknileg vandamál séu óyfirstíganleg. Nú þegar hafa verið smiðaðir allmargir nothæfir geymar og hér virðist ekki um það að ræða að finna nothæfa lausn, heldur fremur að velja heppilegustu lausnina.

Þá er almennt talið að verð hydriðgeyma muni ekki koma í veg fyrir það, að þeir verði í framtíðinni notaðir sem eldsneytisgeymar á faratæki. Samkvæmt töflu 4.3.2 myndi t.d. hydriðfyllingin í MgH_2 -geymi, sem nota ætti í bíl og tæki sama eldsneytismagn og 50 l bensíngeymir, kosta um 340 \$. $FeTiH_{1,95}$ geymir yrði að sjálfsögðu miklu dýrari.

5 NOTKUN VETNIS

5.1 Hráefni í iðnaði

Fram til þessa hefur vetni verið notað sem hráefni í efnaiðnaði, einkum til ammoniak- og methanolframleiðslu og í olíuiðnaði. Auk þess hefur nokkuð vetni verið notað í ýmsan annan iðnað, svo sem fituherslu og járvinnslu og á allra síðustu árum hefur lokt nokkuð af fljótandi vetni verið notað sem eldflaugaeldsneyti.

Tafla 5.1-1 sýnir hvernig notkun vetrnis í heiminum skiptist árið 1970 (Isting 1974) og auk þess áætlaða þörf efnaiðnaðar fyrir vetrni árin 1990 og 2000. Áætluð vetrnisnotkun er fengin með umfangsmikilli könnun, sem gerð var á árunum 1974-1975 (Valette o.fl. 1978)

Tafla 5.1-1

Notkun vetrnis í heiminum í efnaiðnaði árið 1970 og áætluð þörf árin 1990 og 2000. (Eftir Isting 1974 og Valette o.fl. 1978).

	Notkun 1970 millj. tonn	Áætluð þörf 1990, millj. tonn	Áætluð þörf 2000, millj. tonn
Ammoniakframl.	10,5		
Methanolframl.	1,3		
Olíuiðnaður	5,0		
Annað	1,0		
Járn og stáliðn.		7,4-11,0	26-45
Samtals	17,8	51,4-76,0	89-154

Samkvæmt töflu 5.1-1 má búast við að notkun vetrnis í efnaiðnaði eigi eftir að aukast mikið fram til ársins 2000. Einkum er eftirtektarverð aukning vetrnis í járn og stáliðnaði, en þar er talið að vetrni muni í vaxandi mæli koma í stað kola sem „reduserandi“ efni.

5.2 Orkufrek stóriðja

Í stóriðju eða orkuverum, þar sem þörf er á mikilli varmaorku og nú er notuð olía, kol eða jarðgas, er unnt að nota vetni sem eldsneyti.

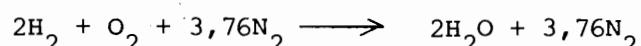
Vetni má t.d. blanda saman við jarðgas og brenna blöndunni í sömu brennurum og nú nota hreint jarðgas, ef vetrismagnið fer ekki yfir 20% (Kelly o.fl. 1978). Er yfirleitt talið, að á þann hátt verði vetni fyrst notað í nokkrum mæli, sem eldsneyti. Því verði blandað saman við jarðgas, fyrst í litlum mæli, en síðan muni vetrismagnið gassins vaxa, eftir því sem þörfin fyrir gas eykst og jarðgas minnkar. Á þann hátt gætu jarðgasnotendur smám saman aðlagað sig því að nota hreint vetni.

Sé vetrismagn í jarðgasi hærra en 20%, verður annað hvort að breyta núverandi brennurum eða smíða nýja og sé brennt hreinu vetni þarf algjörlega nýja brennara. Litlir vetrismagnarar, sem brenna vetni og hreinu súrefni hafa lengi verið í notkun og tæknilega er ekkert til fyrirstöðu að framleiða stóra vetrismagnarar. Hafa slíkir tilraunabrennarar þegar verið byggðir og prófaðir og samkvæmt nýlegum upplýsingum munu þeir nú fáanlegir á almennum markaði (Mathis 1976, Gregory 1979).

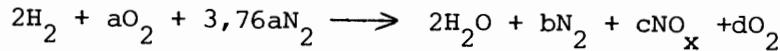
Vetrismagnarar geta notað hvort sem er hreint súrefni eða súrefni andrúmsloftsins til að brenna vetrinu. Ef vetrni er brennt í hreinu súrefni, myndast eingöngu vatnsgufa. Brunahitinn verður um 3080°K . Efnabreytinguna má þá skrifa:



Ef vetrni er brennt í hæfilegu magni af lofti verður efnabreytingin:



Hér tekur köfnunarefni upp hluta varmans og brunahitinn verður aðeins 2400°K . Sé notað umfram magn af lofti lækkar brunahitinn enn og auk þess myndast köfnunarefnisoxid, sem er alvarlegur mengunarvaldur. Efnabreytingin er þá:



Í núverandi olíbrennrum, sem nota súrefni loftsins til brennslunnar er brunahitinn aðeins 1875°K . Í slíkum brennrumum myndast við brennsluna verulegt magn af CO_2 , CO , N_2 og NO_x auk vatns og sóts.

Sérstök gerð vetrnisbrennara eru svonefndir "aphodid" brennarar. Þessir brennarar brenna vetrni með hreinu súrefni, en auk þess má blanda inn á þá vatni í mismiklu magni, sem breytist í gufu við brunann. Vatngufan tekur þá upp hluta varmans og lækkar þannig brunahitann, en þess er t.d. þörf, ef nota á varmaorkuna til að snúa gufuhverflum, sem ekki þola hið háa hitastig, 3080°K .

Vegna þess að brunahitinn frá vetrnisbrennara er hærri en frá olíubrennara, nýtist orka vetrnisins mun betur en orka oliunnar. Fræðileg nýtni eldsneytisins (Carnot cycle efficiency) er gefin með líkingunni:

$$\eta = \frac{T_H - T_L}{T_H} 100$$

þar sem T_H er brunahitastig og T_L er lokahitastig. Ef lokahitastig er $T_L = 294^{\circ}\text{K}$, mundi t.d. fræðileg nýtni eldsneytisins í brennara, sem brennir vetrni og súrefni ($T_H = 3080^{\circ}\text{K}$), vera $\eta = 90\%$. Í olíubrennara mundi fræðilega nýtni eldsneytisins hins vegar vera $\eta = 84\%$. Raunveruleg nýtni er þó alltaf talsvert minni. Í gufuafstöð, sem notar olíubrennara til að framleiða 860°K gufu í hitaskiptum, er raunveruleg nýtni um 44%. Ef þessi sama gufuafstöð notaði vetrnisbrennara, sem gæfi brunahita 2480°K , en væri að öðru leyti óbreytt, mundi nýtni eldsneytisins verða 60% (Hausz o.fl. 1972).

Gufuaflstöð, sem byggð væri frá grunni til að brenna vetni og notaði "aphodid" brennara, mundi hins vegar verða frábrugðin núverandi gufuaflstöðvum að því leyti, að vegna þess að ekkert nema vatn myndast viðbrunnann, er ekki lengur þörf fyrir gufuketil með hitaskiptum. Vatni yrði einfaldlega blandað saman við vetni og súrefni í brennurunum, til að fá æskilegt hitastig og gufan, sem þannig myndast, færi síðan beint inn á gufuhverflana. Auk þess að vetrnisbrennarinn nýtir orku eldsneytisins mun betur en oliubrennarinn þá minnkari "gufuketillinn" verulega eða nánast hverfur. Hefur verið áætlað að stærð "gufuketils" í gufuaflstöð, sem brenndi vetni í "aphodid" brennurum yrði aðeins 1/500 af stærð gufukatla í núverandi aflstöðvum, sem brenna oliu (Rockwell International 1972).

5.3 Eldsneyti á farartæki

Talsvert hefur verið gert af því í tilraunaskyni að nota vetni sem eldsneyti á aflvélar, sem nú nota bensín eða oliu. (Bro 1975, Andersen 1975, Mathis 1976, Wooley o.fl. 1977, Furuhama o.fl. 1977, Furuhama o.fl. 1978, Billings 1978 og Finegold 1978).

Sem háoktan eldsneyti er vetni nothæft á sprengihreyfla, þar sem kveikt er í eldsneytinu með rafneista. Hafa þegar verið gerðar miklar tilraunir með að knýja venjulegar bensínvélar á hreinu vetni, eða jafnvel blöndu af vetni og bensíni. Tilraunirnar benda eindregið til að vetni sé ekki síður heppilegt eldsneyti á "bensínvélar" en bensín. Slit vélanna virðist minnka sé notað vetni og mengun frá útblæstri verður hverfandi, miðað við það sem nú er.

Vegna þess hve oktantala vetrnis er há, springur það ekki við þjöppun í dieselvélum. Þetta vandamál hefur þó verið reynt að leysa með því að nota svonefnda "pilot injection", þ.e. að sprauta nokkru magni af dieseloli inn á vélina samtímis vetrinu og láta dieseloliuna kveikja í eldsneytisblöndunni við þjöppun. Þessar tilraunir hafa þó gefið miður góða raun og aðeins hefur fengist fram skrikkjóttur gangur.

Þá er verið að gera tilraunir með að brenna vetni í venjulegri dieselvél, sem hefur verið breytt þannig, að kerti, sem gefur frá sér rafneista og kveikir þannig í eldsneytinu, er komið fyrir í sprengihólfunum. Hafa þessar tilraunir þegar gefið góða raun og samkvæmt þeim virðist ekkert því til fyrirstöðu að hægt sé að breyta dieselvélum þannig, að þær geti gengið á hreinu vetni í stað dieseloliu (Lynch 1979).

Loks er vetni mjög gott eldsneyti á hvers kyns þotuhreyfla.

Í stað þess að brenna vetni í sprengihreyfum, sem breyta orku þess í varmaorku með ca. 35% nýtni, þá má einnig brenna því í efnarafölum (fuel cells), sem breyta orku eldsneytisins í raforku. Orkunýtni eldsneytisins í efnarafölum er allt að 55% eða um 1,6 sinnum betri en í sprengihreyfum.

5.3.1 Vetnisbilar

Á undanförnum árum hefur allmögum bensín bílum verið breytt þannig, að þeir geti gengið fyrir vetni í stað bensíns. Vélarnar sjálfar hafa verið óbreyttar, en skipt hefur verið um aðfærslukerfi til vélarinnar svo og eldsneytistank. Til dæmis hafa Japanir, Bandaríkjumenn og Þjóðverjar gert tilraunir með vetrnisbíla, sem ýmist hafa flutt vetrnið með sér fljótandi eða í hydriðum (Furuhamra o.fl. 1978, Billings 1978, Buchner 1978, Wooley 1978, Anderson 1978, Finegold o.fl. 1976).

Pótt vel hafi tekist til að aka tilraunabilum á fljótandi vetrni, er nú almennt áliðið að fljótandi vetrni verði tæpast notað sem eldsneyti í einkabílum, vegna þess hve hydriðgeymsla er miklu öruggari eldsneytisgeymsla. Auk þess verður fljótandi vetrni dýrara eldsneyti en loftkennt vetrni. Í járnbrautum og öðrum stórum farartækum, sem aka á langleiðum, er fljótandi vetrni þó vel talið koma til greina sem eldsneyti (Alpaugh o.fl. 1978). Tilraunir með einkabíla og aðra minni bíla hafa því upp á síðkastið nær eingöngu miðast við það, að vetrnið sé geymt í hydriðum.

Helsta vandamálið samfara notkun vetrnis í minni bílum er þyngd og stærð hydriðgeymanna. Þetta er þó ekki talið koma í veg fyrir að vetrnisbilar geti orðið algengir einkabilar í framtíðinni. Tafla

5.3.1-1 sýnir niðurstöður tilrauna, sem Daimler-Benz hafa gert með aksturssvið tilraunabilis, sem flytur með sér vetni sem eldsneyti í hydriðeynum af ýmsum stærðum og gerðum. Bíllinn, sem um er að ræða, er svonefndur "minibus". Þyngd hans er 2,4 tonn, aflvélin er 44kW. Af töflunni sést að ef bíllinn er búinn 200 kg 100 l MgH₂-geymi, en slíkur geymir getur varla talist óhóflega stór eða þungur fyrir bíl af þessari stærð, má aka honum allt að 600 km á einni fyllingu. MgH₂-hydrið er hins vegar háhitahydrið, sem þarf að hita upp í ca. 350°C til að losa úr því vetnið, en það hitastig er ekki fyrir hendi fyrr en bíllinn er orðinn heitur. Í raun þarf því alltaf eitthvað af vettinu að vera geymt í lághitahydriðum, t.d. FeTiH_{1,95}-hydrið, svo auðvelt sé að gangsetja bíllinn og aka honum á meðan hann er kaldur. Er talið heppilegt að hafa bæði MgH₂- og FeTiH_{1,95}-geyma, sem til samans vega 200 kg og eru 50-75 l að stærð. Þannig útbúin mundi ofangreindur bíll komast 400 km á einni hleðslu (Buchner 1978).

Gott dæmi um vettisbil og eiginleika hans er nýjasti bíllinn frá Daimler-Benz verksmiðjunum. Þetta er jafnframt athyglisverðasti bíllinn, sem smiðaður hefur verið til þessa (Buchner 1978). Bíllinn var til sýnir í tengslum við ráðstefnu "2nd World Hydrogen Energy Conference", sem haldin var í Zürich síðastliðið sumar. Hér er um að ræða fólksflutningabil, sem gæti flutt allt að 16 farþega. Vélin er upphaflega bensinvél. Vettisgeymarnir eru alls 4 og vega til samans 270 kg. Vegalengdin, sem billinn er sagður komast á einni hleðslu er um 400 km í utanbæjarakstri í Þýskalandi. Þrír af vettisgeymunum eru FeTiH_{1,95}-hydrið og einn MgH₂-hydrið. Vatn kælikerfisins leikur um einn FeTiH_{1,95}-geyminn, loftið í farþegarýminu um annan og útblásturinn frá vélinni um þann þriðja. Þá leikur útblástursloft vélarinnar um MgH₂-geyminn. Allir geymarnir eru tengdir í aðfærslukerfið til vélarinnar, en auk þess eru þeir tengdir innbyrðis, þannig, að með því að opna ventla getur vettnið hvort sem er, streymt til vélarinnar, eða úr einum geymi í annan. Með þessu móti þjóna vettisgeymarnir margvislegum tilgangi auk þess að vera eldsneytisgeymar.

Þeir sjá um upphitun og kælingu í farþegarýminu, eftir því sem þörf er á hverju sinni. Þeir þétta vatnsgufuna, sem myndast við brunann, en hluti vatnsins fer aftur inn á vélina ásamt vettinu. Við þetta fæst

Tafla 5.3.1-1

Aksturssvið tilraunabíls frá Daimler-Benz, sem knúinn er vetni. Bíllinn er 2,4 tonna "minibus" knúinn 44 kW afhvél og flytur með sér vetnið í hydriðgeymum af ýmsum stærðum og gerðum (Eftir Buchner 1978).

Hydrið	Rúmmál lítrar	Þyngd kg	H ₂ geymt kg	Aksturssvið km
Rúmmál konst.				
TiFeH _{1,95}	50	200	4	150
Mg ₂ Ni	50	100	4	150
MgH ₂	50	100	8	300
Þyngd konst.				
TiFeH _{1,95}	50	200	4	150
Mg ₂ Ni	100	200	8	300
MgH ₂	100	200	16	600
Aksturssvið konst.				
TiFeH _{1,95}	50	200	4	150
Mg ₂ Ni	50	100	4	150
MgH ₂	25	50	4	150

jafnari og betri gangur. Þá vinna hydriðin sem eins konar varma-dælur, til að hægt sé að geyma varmaorku við lágt hitastig, en nota hana síðan til að hækka hitastigið næst þegar setja á bílinn í gang. Með því að nota lághita- og háhitahydrið í réttum hlutföllum tapast nánast enginn varmi úr bílum í akstri og sá varmi, sem er í bílum þegar vélin er stöðvuð, er geymdur í honum, þar til bíllinn er gangsettur næst.

Þá hafa Daimler-Benz verksmiðjurnar einnig smiðað bíl, sem gengur fyrir blöndu af vetni og bensíni, en vetni og bensíni er í raun hægt að blanda saman og brenna í hvaða hlutföllum sem er. Tilgangurinn með þessum bíl er að sýna fram á, að smám saman sé hægt að breyta bílaflota heimsins, sem nú gengur á bensíni, yfir í það að ganga á hreinu vetni. Einnig er þetta hugsað sem leið til að draga verulega úr loftmengun (Buchner 1978).

Í umræddum tilraunabíl eru 50 kg bensíntankur (70 l) og hydrið geymir fyrir 2 kg af vetni. Getur hydriðgeymirinn verið hvort sem er 100 kg geymir með $\text{FeTiH}_{1,95}$ -hydriði eða 25 kg geymir með MgH_2 -hydriði. Í gangsetningu og lausagangi gengur vélin á hreinu vetni, en þegar eldsneytisþörfin vex við álag á vélina, gengur hún á bensíni. Með þessu fyrirkomulagi hefur tekist að minnka heildar eldsneytisnotkun bílsins um 15%. Auk þess minnkar mengun frá útblæstri verulega.

Billings Energy Corporation, Provo, Utah, hefur kosið að fara svipaða leið í smiði vetrnisbíla og Daimler-Benz. Hafa þeir þegar breytt nokkrum bílum þannig, að þeir ganga á hreinu vetni og nú eru þeir að breyta 10 fólksbílum af Dodge-Omni gerð þannig, að þeir geti gengið hvort sem er á vetrni eða bensíni. Verða þessir bílar seldir á almennum markaði (Hydrogen-Progress 1979).

Í Riverside í Californiu var um skeið í reglugeri notkun í umferðarneti borgarinnar 19 farþega strætisvagn, sem að jafnaði gekk fyrir vetrni, en gat þó einnig gengið fyrir propangasi. Þetta er jafnframt

fyrsta opinbera almenningsfarartækið, sem knúið er vetni (Wooley 1978).

Loks má geta þess að Denver Research Institute vinnur nú að rannsóknarverkefni, ásamt Daimler-Benz, sem miðar að því að taka 40 vettisstrætisvagna í notkun í Berlin, á árinu 1981 (Lynch 1979).

5.3.2 Vettisþotur

Farartæki á sjó og landi geta notað margvislegt eldsneyti, jafnvel mismunandi tegundir á mismunandi stöðum í heiminum. Þegar um er að ræða eldsneyti á flugvélar, er hins vegar um að ræða miklu færri valkosti. Þar skiptir orkuinnihald eldsneytisins miðað við þyngd mjög miklu máli. Til dæmis er methanol með öllu ónothæft þotueldsneyti sökum þess hve þungt það er. Ef nota ætti methanol í stað númerandi eldsneytis t.d. "Jet A", yrði þotan að geta borið um 2,5 sinnum meira eldsneyti. Þá eru flugvélar frá upphafi hannaðar fyrir eina ákveðna eldsneytistegund.

Af þeim eldsneytistegundum, sem framleiða má í framtíðinni, eru einkum þrjár taldar koma til greina sem þotueldsneyti, synjet (syntetiskt Jet A), methan og vettini. Allar þessar tegundir má framleiða úr kolum og olíu- eða tjörusandi. Auk þess má framleiða vettini og síðan má breyta vettinu í methan eða synjet með því að láta það hvarfast við kolefni eða kolefnasambönd t.d. CO_2 eða CO. Synjet er nokkurn vegin sama eldsneyti og númerandi Jet A.

Notkun synjet í framtíðinni hefði óneitanlega í för með sér vissa kosti. Númerandi þotur gætu flogið á þessu eldsneyti án nokkurra breytinga og sömuleiðis mætti nota áfram númerandi dreifikerfi og afgreiðslukerfi á flugvöllum. Methan eða vettini myndi hins vegar krefjast nýrra flugvéla og nýs dreifikerfis.

Það sem einkum mælir með því að vettini verði framtíðareldsneyti á far-

þegapotur frekar en synjet eða methan er eftirfarandi:
Mengun frá vetni er hverfandi, miðað við það sem nú er eða yrði, ef methan eða synjet yrði notað. Framleiðsla synjet eða methans úr kolum er ef til vill aðeins hagkvæm hjá þeim þjóðum, sem eiga nægar kolabirgðir til langt tíma. (Um 75% af öllum kolabirgðum heimsins eru í Kína, USSR og USA). Þá er talið óvist hvort þær þjóðir, sem mest eiga af kolum, séu í raun fúsar að nota þau til að framleiða þotuelsneyti fyrir allan heiminum. Vetni er hins vegar hægt að framleiða hvar sem er í heiminum, þar sem orka og vatn eru fyrir hendi. Til vetrnisframleiðslu er hægt að nota hvaða frumorkulind sem er og hráefnið, sem til þarf, er óþrójtandi, því við notkun eldsneytisins myndast aftur jafn mikið vatn og notað er í framleiðsluna. Vetni er orkuríkasta eldsneyti, sem til er, miðað við þyngd, eða um þrefalt orkuríkara en Jet A.

Fljótandi vetni ásamt fljótandi súrefni hefur á undanförnum árum verið notað með góðum árangri sem eldsneyti á eldflaugar. T.d. eru tvö efri þrep Saturn eldflauganna búin hreyflum, sem knúnir eru vetni.

Ein tilraun hefur verið gerð þar sem þotu var flogið á fljótandi vetni með góðum árangri. Þar var um að ræða B-57 sprengjupotu frá Bandaríksflughernum. Var aðeins einum hreyfli þotunnar breytt, þannig að hann gengi fyrir fljótandi vetni (Mathis 1976). Þótt ekki sé vitað um fleiri tilraunir, þar sem þotum hefur raunverulega verið flogið á vetni, þá hafa þegar verið gerðar miklar tilraunir á jörðu niðri, þar sem mismunandi tegundir þotuhreyfla hafa verið knúnar vetni. Niðurstöður þeirra tilrauna hafa sýnt, að vetni er mjög gott eldsneyti á slíka hreyfla.

Stórir flugvélaframleiðendur í Bandaríkjum hafa nú þegar, í samvinnu við Geimferðastofnun Bandaríkjanna (NASA), hafið rækilega könnun á hagkvæmni þess, að knýja stórar þotur vetni í stað númerandi eldsneytis, Jet A. Í töflu 5.3.2-1 er gerður samanburður á helstu eiginleikum stórrar farþegaþotu, sem annars vegar er knúin vetni og hins

Tafla 5.3.2-1

Samanburður á helstu eiginleikum farþegabotu, sem notar Jet A eða fljótandi vetni. Farþegafjöldi 400, flughraði Mach 0,85, flugþol 10190 km. (Eftir Brewer 1978).

	Vetni	Jet A
Heildarþungi hlaðin (kg)	177800	237200
Heildarþungi tóm (kg)	110000	110800
Þyngd eldsneytis (kg)	24000	75000
Flatarmál vængja (m^2)	313	389
Vænghaf (m)	53	59,2
Lengd bols (m)	66,7	60
Lengd flugbrautar (m)	1900	2435
Framleiðsluverð (millj. dollararar)	26,9	26,5
Orkunotkun (kj/sæti km)	1550	1735
Hávaði í flugtaki (EPNdB)	89,2	94,2

Tafla 5.3.2-2

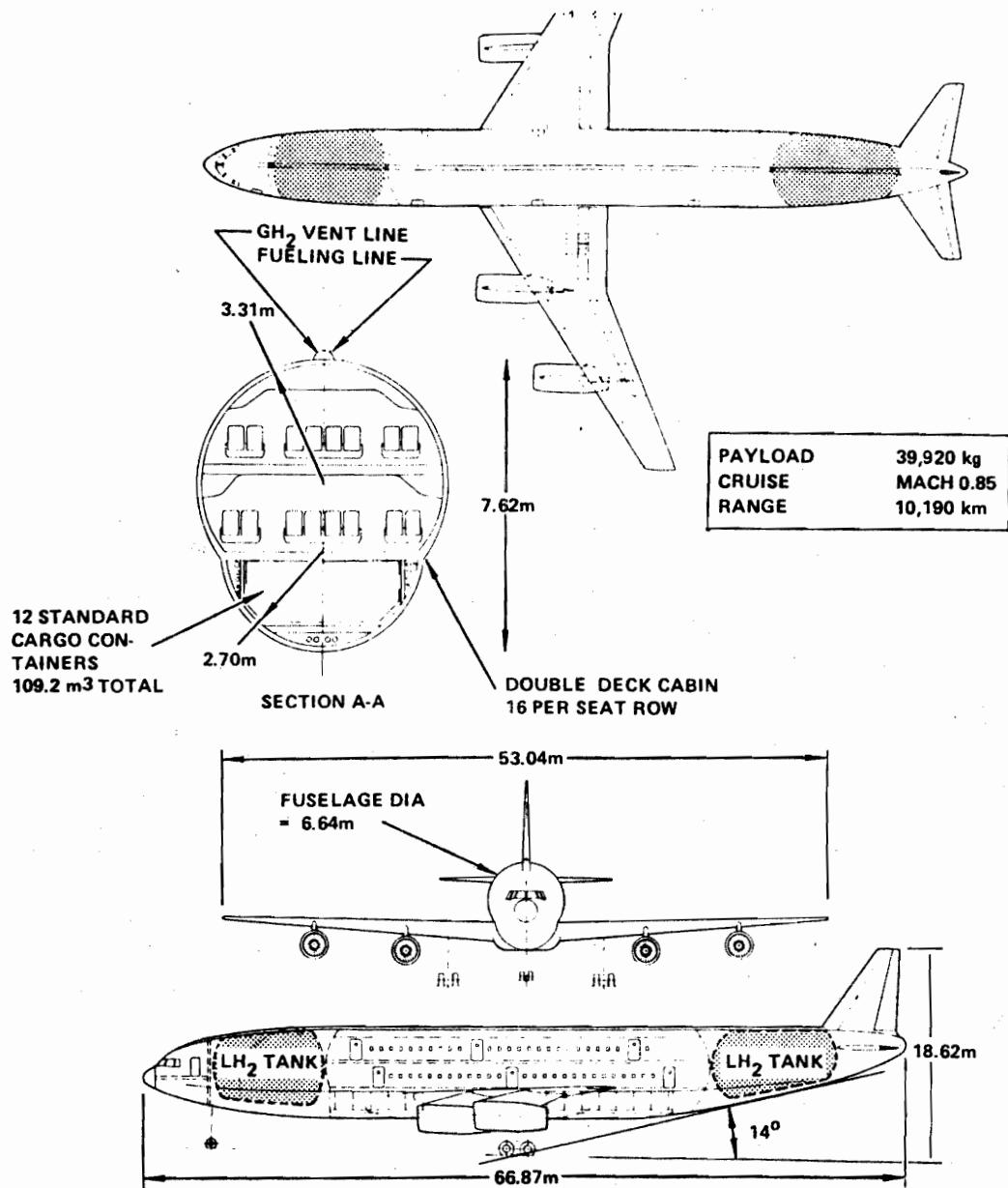
Samanburður á helstu eiginleikum hljóðfrárrar farþegabotu sem notar Jet A eða fljótandi vetni. Farþegafjöldi 234, flughraði Mach 2,7, flugþol 7780 km. (Eftir Brewer 1978).

	Vetni	Jet A
Heildarþungi hlaðin (kg)	179130	345720
Heildarþungi tóm (kg)	111240	143980
Þyngd eldsneytis (kg)	38735	149960
Flatarmál vængja (m^2)	739	1031
Vænghaf (m)	34,4	40,7
Lengd bols (m)	103,7	90,5
Lengd flugbrautar (m)	2377	2893
Framleiðsluverð (millj. dollararar)	45,5	61,5
Orkunotkun (kj/sæti km)	2551	3522
Hávaði í flugtaki (EPNdB)	102,2	108,0

vegar Jet A. Þessar athuganir voru gerðar af sérfræðingum Lockheed flugvélaverksmiðjanna á samvinnu við NASA (Brewer 1978). Í töflu 5.3.2-2 er svo gerður tilsvvarandi samanburður á eiginleikum hljóðfrárrar farþegaþotu. Mynd 5.3.2-1 sýnir teikningu, sem gerð hefur verið hjá Lockheed, af 400 farþega vetnisþotu. Teikningin sýnir vel hvernig sérfræðingar hugsa sér að vetnisgeymunum verði komið fyrir.

Við athugun á töflu 5.3.2-1 sjást vel kostir þess að nota fljótandi vetni í stað Jet A. Vtnisþotan er léttari, þarf minni hreyfla, hefur minna vænghaf, þarf styttri flugbraut og er hljóðlátari í flugtaki. Orkunotkun vtnisþotunnar er minni. Framleiðslukostnaður vélanna er svipaður. Í töflu 5.3.2-2 koma kostir vtnisþotunnar enn betur í ljós. Auk þess er hljóðfráa vtnisþotan mun ódýrari í framleiðslu, en sú, sem notar Jet A.

Verði farið að nota fljótandi vetni sem eldsneyti, eru flutningur vtnisins til flugvalla og afgreiðsla á flugvélar mjög þýðingarmikil atriði. Byggja verður algjörlega nýtt dreifikerfi fyrir vtnið. Tveir af stærstu flugvélaframleiðendum Bandaríkjanna, Lockheed og Boeing, hafa þegar hafist handa um að kanna þessi mál í samráði við Geimferðastofnun Bandaríkjanna (Korycinski 1978). Boeing hefur athugað hvaða breytingar þarf að gera á flugvellinum í Chicago, ef farþegaþotur á lengri leiðum nota fljótandi vetni, og hvað þær breytingar muni kosta. Samtímis hefur Lockheed gert tilsvvarandi áætlun fyrir flugvöllinn í San Francisco. Áætlanirnar eru mjög samhljóða í öllum helstu dráttum. Báðar gera þær ráð fyrir að vtnið verði leitt til flugvallanna sem lofttegund eftir pípum. Þar yrði það þétt í verksmiðjum sem vinna 1000 tonn af fljótandi vetni á sólarhring. Síðan yrði vtnið leitt fljótandi um flugvallarsvæðið til staða, þar sem afgreiðsla flugvélanna fer fram. Heildarkostnaðurinn við breytinguna var áætlaður 468 millj. dollara fyrir flugvöllinn í Chicago og 340 millj. dollara fyrir flugvöllinn í San Francisco.



Mynd 5.3.2-1

400 farþega vetrnisþota (Eftir Brewer 1978).

Tæknilega virðist ekkert því til fyrirstöðu að byggja stórar vetrnisþotur og ef aðeins er litið á þá hlið málsins, virðast vetrnisþotur hafa ýmsa kosti fram yfir þotur, sem nota Jet A. Ef litið er á framleiðslukostnað eldsneytisins sýnist hins vegar sitt hverjum. Brewer (1978) kemst að þeirri niðurstöðu að jafnvel nú þegar væri hagkvæmara að reka farþegapoter eða flutningapoter ef þær notuðu vetrni, heldur en ef þær notuðu Jet A. Mikolowsky o.fl. (1978) telja hins vegar engar líkur á að vetrni geti orðið hagkvæmt eldsneyti á venjulegar farþega- eða flutningapoter á þessari öld. Hins vegar gæti það vel komið til greina sem eldsneyti á hljóðfráar þotur.

Þótt skoðanir séu skiptar um það, hvort hagkvæmt sé að nota vetrni sem eldsneyti á farþega- og flutningapoter, sem fljúga reglubundið flug, virðast sérfræðingar yfirléitt sammála um, að vetrni muni vart koma til greina sem eldsneyti á herþotur stórbjóðanna í næstu framtíð. Virðist meginástæðan sú, að ef vetrnið yrði notað sem eldsneyti í hernaði, yrðu ávallt að vera til af því miklar birgðir og með númerandi geymslautakni yrði geymslukostnaður þess allt of hár.

5.3.3 Vetrnisskip

Til þessa hefur lítið verið kannað, hvernig breyta þurfi skipum, til að þau geti notað vetrni sem eldsneyti, í stað oliu og hvort vetrni sé yfirléitt nothæft eldsneyti á skipastól heimsins. Ástæðan kann að vera sú, að eldsneytisnotkun skipa er tiltölulega lítill hluti af heildar eldsneytisnotkun heimsins. Þó mun bandaríska strandgæslan hafa gert tilraun með að knýja að minnsta kosti eitt af skipum sínum vetrni.

Vetrni ætti ekki síður að vera hentugt eldsneyti fyrir skip, en bíla eða flugvélar. Í skipum ætti rúmmál eða þyngd eldsneytis að skipta minna máli. Skip gætu þess vegna flutt með sér fljótandi vetrni eða jafnvel vetrni í hydriðum. Þá gæti vel reynst hagkvæmt að nota efna-rafala í skipum í stað númerandi aflvéla.

Þyngd efnarafals, eins og hann gerist nú mundi aðeins vera um 60% af þyngd jafnstórrar díselvélar. Ef nota á efnarafal í skip þarf hins vegar einnig þungan rafmótör til að knýja skipsskrúfuna. Því er óvist, hvort vélakostur skipa yrði nokkuð léttari, þótt farið yrði að nota efnarafal sem aflvél. Hins vegar má búast við að nýtni eldsneytisins yrði talsvert betri, þegar því er brennt í efnarafal og skipið þyrfti ekki að flytja með sér eins mikið eldsneyti.

Í töflu 5.3.3-1 er gerð tilraun til að bera saman eldsneytisgeyma í þrem misstórum íslenskum skipum, sem brenna olíu eða brenndu vetni, er geymt væri sem vökti eða í hydriðum. Tölurnar um þyngd og stærð skipanna, svo og stærð aflvéla og núverandi eldsneytisgeyma eru fengnar hjá Siglingamálastofnun ríkisins. Fyrir vetni sem eldsneyti er sýnd stærð eldsneytisgeyma fyrir tvenns konar aflvélar. Annars vegar er reiknað með að aflvélin sé sprengihreyfill svipaður og nú gerist og nýtni eldsneytisins sú sama og ef notuð er olía, ca. 35%. Hins vegar er reiknað með að aflvélin sé efnarafall. Í efnarafal getur nýtni eldsneytisins verið allt að 55%. Raunveruleg nýtni eldsneytisins verður þó aðeins um 41%, þegar vetnið er geymt í MgH₂-hydriðum vegna þess, að þá mun væntanlega þurfa talsvert af orku eldsneytisins til að losa vetnið úr hydriðgeyminum. Ef aflvélin er sprengihreyfill má hins vegar nota afgangsvarma frá vélinni til þeirra hluta.

Augljóst er af töflu 5.3.3-1 að vel kemur til greina að nota vetni sem eldsneyti á skip, ef vetnið er geymt sem vökti. Eldsneytisgeymarnir yrðu um 3,4 sinnum stærri en núverandi geymar, ef aflvélin væri sprengihreyfill, en 2,2 sinnum stærri ef aflvélin væri efnarafall. Skipsskrokkur vetnisskipa, sem notuðu fljótandi vetni yrði því væntanlega að vera eitthvað stærri, en skrokkur núverandi skipa. Þyngd vetnisins yrði hins vegar miklu minni en þyngd núverandi eldsneytis.

Hydriðgeymar eru langþyngstir þeirra eldsneytisgeyma, sem sýndir eru í töflu 5.3.3-1. Ef reiknað er með því að burðargeta skipsins

Tafla 5.3.3-1

Samanburður á eldsneytisgeymum í þrem íslenskum skipum, sem nota olíu eða notuðu vetni. Gerður er samanburður á því að nota fljótandi vetni, eða vetni geymt í MgH_2 -hydriði. Einnig er gerður samanburður á því að nota sprengihreyfil eða efnarafal sem aflvél.

Skip	Lagarfoss	Gyllir	Pórunn VE
Þyngd, tómt skip (tonn)	1060	631	153
Burðargeta (tonn)	3050	429	127
Lestarrými (m^3)	3364	438	130
Stærð aflvélar (kW)	1611	1328	485
Þyngd aflvélar (tonn)	24	23	8
<u>a) Eldsneyti olía</u>			
Aflvél sprengihreyfill			
Eldsneytisgeymir (m^3)	264	104	25
Eldsneyti (tonn)	185	73	18
<u>b) Eldsneyti fljótandi vetni</u>			
Aflvél sprengihreyfill			
Eldsneytisgeymir (m^3)	886	357	86
Eldsneyti (tonn)	62	25	6
Aflvél efnarafall			
Eldsneytisgeymir (m^3)	557	228	57
Eldsneyti (tonn)	39	16	3,8
<u>c) Eldsneyti vetni í MgH_2-hydriði</u>			
Aflvél sprengihreyfill			
Eldsneytisgeymir (m^3)	614	246	59
Eldsneyti + hydrið (tonn)	885	357	86
Aflvél efnarafall			
Eldsneytisgeymir (m^3)	485	197	46
Eldsneyti + hydrið (tonn)	700	285	68

minnki að sama skápi og þyngð eldsneytisgeymanna vex, mundi burðargeta Lagarfoss minnka um 23% ef hydriðgeymar kæmu í stað olíugeyma og aflvélin væri sprengihreyfill, en 17% ef aflvélin væri efnarafall.

Burðargeta Gyllis mundi á sama hátt minnka um 66% og burðargeta Þórunnar um 54% ef aflvélin væri sprengihreyfill, en 49% og 39% ef aflvélin væri efnarafall. Í fljótu bragði virðast því hydriðgeymar nokkuð þungir til að nota þá í skipum. Þó er hæpið að fullyrða nokkuð fyrr en að undangenginni rækilegri athugun. Til dæmis má benda á, að í þeim togurum íslenskum, sem smíðaðir hafa verið í Pólliði, eru allt að 100 tonn af steypu sem kjölfesta. Vel mætti skipta á þessari steypu og hydriðgeymum. Hydriðgeymarnir eru góð kjölfesta vegna þess að þeir eru næstum jafnþungir tómir og fylltir vetni. Viðbótarþyngd eldsneytisgeyma í togara, sem brenndi vetni í efnarafal yrði þannig um 100 tonna, ef vetnið væri geymt í MgH_2 -hydriði.

Enda þótt enn hafi lítið verið hugað að þeim möguleika að nota vetni sem eldsneyti á skip, virðist slikt þó vel koma til greina. Væri fyllsta ástæða til að kanna rækilega, hvort vetni gæti hugsanlega orðið hagkvæmt eldsneyti á íslensk skip í framtíðinni. Loftkennt vetni er að öllum líkindum ódýrasta eldsneytið, sem framleiða má á Íslandi og í fljótu bragði verður ekki séð að það verði öllu dýrara, en hvert það hreinsað eldsneyti, sem flutt er til landsins nú. Þótt ýmislegt virðist benda til að hagkvæmara geti orðið að geyma vetni í skipum fljótandi, heldur en bundið í hydriðum, er á þessu stigi málsins ekki unnt að útiloka hydriðgeyma, sem heppilega lausn. Fljótandi vetni er um 30-40% dýrara eldsneyti en vetrnisloft miðað við orkuinnihald. Á móti kemur svo, að ef vetni er notað sem eldsneyti á sprengihreyfla af svipuðum gerðum og nú tíðkast, verður nýtnin að öllum líkindum eitthvað betri, þegar um er að ræða fljótandi vetni. Og ef unnt reynist að nota vetni til að knýja efnarafala í stað núverandi sprengihreyfla, getur nýtni eldsneytisins orðið allt að 60% betri.

Hvað snertir umhverfisvernd hefur vetni augljósa kosti umfram þær eldsneytistegundir, sem nú eru notaðar. Náttúruspjöll eins og verða þegar olia flæðir út um allt, en slikt er oft afleiðing slysa eða náttúruhamfara, yrðu svo til alveg úr sögunni ef notað yrði vetni í stað oliu. Að vísu gætu myndast kalsvæði þar sem fljótandi vetni færi niður á landi. Slik svæði yrðu þó tiltölulega lítil, vegna þess hve vetni gufar ört upp. Vetrnispökvinn mundi tæplega ná að dreifast mikið.

Einn af megin kostum vetrnis sem eldsneytis er sá, hve auðvelt er að flytja mikið magn orku sem vetrnisloft eftir leiðslum. Auk þess að vera ein ódýrasta leiðin til að flytja mikið orkumagn (sjá mynd 4.1-2), þá veldur þessi orkuflutningsaðferð minnstum landspjöllum. Vetrnisleiðsla, sem er um 1 m í þvermál og má auk þess grafa í jörð, getur t.d. flutt jafnmikla orku og 40 Búrfellsslínur.

Eitt alvarlegasta vandamálið samfara notkun núverandi eldsneytis á farartæki, einkum í þéttbýli, er loftmengun frá útblásturslofti. Helstu efnin í útblásturslofti auk vatnsgufu og köfnunarefnis eru CO og CO₂. Þá er einnig í útblástursloftinu nokkuð af köfnunarefnisoxiðum (NO_x), sóti, óbrunnum kolvetnum og brennisteinsoxiðum.

Ef tekið yrði að nota vetni á sprengihreyfla í stað núverandi eldsneytis, yrði mengun frá útblæstri svo til alveg úr sögunni. Auk vatnsgufu og köfnunarefnis yrði þá aðeins um að ræða NO_x, en það síðast-nefnda yrði þá eina eitraða efnið í útblæstrinum.

Tilraunir, sem þegar hafa verið gerðar með brennslu vetrnis í sprengihreyflum, benda til þess, að NO_x mengun muni verða minni ef notað er vetrni, heldur en þegar notað er bensín eða dieselolía. Gott dæmi um þetta er tilraun, sem gerð var við Californiuháskóla (van Vorst o.fl. 1975).

Mælt var NO_x magn í útblæstri bensínvélar af gerðinni Chevrolet 1973, annars vegar ef hún brenndi bensíni og hins vegar ef hún brenndi vetni. Magn NO_x í útblæstrinum var í öllum tilfellum meira, þegar brennt var bensíni, en þegar brennt var vetni. Við 3000 snúninga á mínútu og ef vélun skilaði 58 hestöflum var t.d. NO_x um 500 ppm, ef brennt var bensíni, en aðeins 20 ppm, ef brennt var vetni.

Loftmengun frá þotum er svipaðs eðlis og frá landfarartækjum og sömuleiðis afleiðingarnar, ef um er að ræða þotur, sem fljúga undir hljóðhraða í veðrahvolfinu. Á hinn bóginn er talið að mengun frá hljóðfráum þotum, sem fljúga í heiðhvolfinu, geti orðið mun alvarlegri. Vegna loftstrauma hreinsast óhreinindi tiltölulega fljótt úr veðrahvolfinu og skolast síðan til jarðar. Óhreinindi, sem komast út í heiðhvolfið, geta hins vegar haldist þar árum saman. Þó eru einkum talin varasöm þau áhrif, sem útblástur frá hljóðfráum þotum kunni að hafa í þá átt að eyða ózonlagi jarðar, en það er einmitt í flughæð þotanna (Brewer 1978a).

Hvað varðar mengun og umhverfisvernd, þá sýnist vetni kjörið framtíðareldsneyti, og virðist ekki annað að sjá, en það hafi alla kosti fram yfir flestar aðrar eldsneytistegundir. Við framleiðslu vetrnis er vatn klofið í frumefni sín vetni og súrefni. Þegar eldsneytinu er brennt sameinast síðan þessar lofttegundir aftur og mynda jafnmikið vatn. Notkun vetrnis sem eldneyspis mundi því hafa hverfandi áhrif á eðlilegt ástand náttúrunnar, gagnstætt því sem nú er, þegar kolum, olíu eða jarðgasi er brennt, og kolsýru og ýmsum hættulegum efnasamböndum á þann hátt dælt út í andrúmsloftið í stöðugt vaxandi mæli.

Á undanförnum árum hafa sérfræðingar reynt að gera sér grein fyrir því, hvaða áhrif áframhaldandi notkun núverandi eldsneytistegunda gæti haft á loftslag og jafnvæli lífsskilyrði á jörðinni. Samkvæmt Häfele o.fl. (1978) er talið að orkuþörf mannkyns muni að minnsta kosti þrefaldast fram til ársins 2025. Ef uppfylla ætti þessa orkuþörf með kolum, olíu eða jarðgasi yrði kolsýruaukning í andrúmsloftinu svo mikil, að enda

þótt deilt sé um það, hversu mikil áhrif slikt gæti haft á loftslag á jörðinni, ber flestum saman um að afleiðingarnar muni verða alvarlegar. Rætt hefur verið um að minnka kolsýrumagn andrúmsloftsins með því að sökkva kolsýrunni í djúpsjó úthafa, án þess þó að menn viti á hvern hátt slikt verði gert eða hvaða afleiðingar það kynni að hafa. Ýmislegt virðist því nú þegar benda í þá átt, að enda þótt kolabirgðir heimsins kunni að endast sem aðalorkulind mannkyns í nokkur hundruð ár enn, þá myndi vaxandi mengun samfara notkun kola verða til þess, að þjóðir heimsins neyðist til þess mjög fljótlega, að fara að nýta í sívaxandi mæli "hreinar" orkulindir og þá mengunarfrítt eldsneyti. Með núverandi þekkingu verður ekki séð, að þá sé um að ræða heppilegra eldsneyti en vetni.

7 ÖRYGGISMÁL

Í tengslum við hugsanlega notkun vetrnis í stað númerandi eldsneytis-tegunda hefur talsvert verið um það fjallað, hversu hættulegt vetrni sé í meðförum og hvort það sé ef til vill ónothæft í almennri notkun, vegna þess hve það sé vandmeðfarið.

Sé rætt um það við hin almenna borgara að nota vetrni sem eldsneyti, eru fyrstu viðbrögð hans að öllum jafnaði þau, að vetrni muni vera allt of hættulegt eldsneyti, vegna þess hve eldfimt það sé. Er þá gjarnan vitnað til þess, þegar loftfarið Hindenburg brann í New Jersey 1937 og 35 fórust af þeim 96, sem voru í loftfarinu.

Í raun virðist lítil skynsemi í því að nota Hindenburg slysið, eina stórslysið, sem leitt hefur af notkun vetrnis, frá upphafi, sem mæli-kvarða á hversu hættulegt eldsneyti vetrni sé. Menn gleyma því gjarnan að allt fram yfir lok síðustu heimsstyrjaldar hafði gas, sem innihélt allt að 50% vetrni, verið notað, í miklu magni og með góðum árangri í áratugi, sem almennt eldsneyti í borgum, bæði austan hafs og vestan. Miðaldrar Reykvíkingar minnast þess enn, þegar slikt gas var leitt í fjölmörg hús í borginni og notað til eldunar. Notkun vetrnis sem eldsneytiser því ekki neitt nýtt. Þá hefur, bæði fljótandi vetrni og vetrnis-loft geymt við háan þrýsting, á undanförnum áratugum verið flutt langar leiðir og notað í miklu magni án nokkurra teljandi óhappa. Reyndar hefur verið skýrt frá því, að einn flutningabill með fljótandi vetrni hafi lent í árekstri og oltið á þjóðvegi í Bandaríkjum. Vetrnið flæddi úr geymunum og brann upp á skammri stundu, án þess að valda slysi eða mannskaða og einu áverkarnir á bílstjóranum voru þeir, sem hann hlaut við sjálfan áreksturinn.

Sé slysasaga vetrnis borin saman við slysasögu annarra eldsneytistegunda verður niðurstaðan tæpast vetrninu í óhag. Miklu fleiri og stórfelldari mannskaðar hafa orðið samfara notkun annarra eldsneytistegunda. Er þar skemmt að minnast flugslyssins, sem varð á Kanaríeyjum, þegar tvær Boeing 747 þotur rákust saman og 581 maður léztust, að því er talið er lang-

flestir í eldsvoðanum, sem fylgdi á eftir og varaði í um 4 klst.

Vetni er að sjálfsögðu mjög eldfimt, líklega eldfimast allra eldsneytistegunda og verður því að meðhöndlask sem slikt. Hins vegar verður ekki annað séð af þeirri reynslu og þekkingu, sem nú er fyrir hendi, en að svo megi búa um hnútana, að unnt sé að meðhöndla vethnið á öruggan hátt. Tækni til að uppgötva vetrnisleka, er nú þegar vel þróuð og sömuleiðis tækni til að fyrirbyggja, að vetrni geti safnast fyrir í hættulegu magni á óeskilegum stöðum.

Hætta samfara meðhöndlun vetrnis er einkum fyrir hendi, ef um er að ræða vetrnisloft eða fljótandi vetrni. Sé vetrnið geymt í þeim hydriðum, sem nú eru mest til umræðu sem vetrnisgeymslur, er það talið mjög öruggt í meðhöndlun, jafnvel miklu öruggara en bensín eða jarðgas. Ef leki kemst að hydriðgeymi og ekki er um það að ræða að hydriðið sé hitað innan frá, hættir það mjög fljótlega að gefa frá sér vetrni sem nokkru nemur. Vetrni, sem streymdi úr sliku hydriði í eldsvoða, mundi tæpast geta haldið eldinum við.

Nýlega var gerð tilraun, þar sem skotið var á þrjá eldsneytisgeyma. Einn geymirinn innihélt hydrið, annar propangas og sá þriðji bensín. Bæði þegar skotið var á propangasgeyminn og bensíngeyminn varð afleiðingin eldsvoði. Þegar skotið var á hydriðgeyminn voru hins vegar ekki sjáanlegar aðrar afleiðingar, en kúlugatið á geyminum.

Viðamesta könnun á þeirri hættu, sem kann að fylgja notkun vetrnis er án efa sú, sem hefur verið gerð af National Bureau of Standards í Bandaríkjunum. Í þeirri könnun er jafnframt reynt að bera saman áhættu þess að nota vetrni, methan eða bensín (Hord 1976 og 1978). Athuganirnar eru í meginatriðum byggðar á eðlisfræðilegum eiginleikum þessara eldsneytistegunda, en auk þess á fenginni reynslu af notkun þeirra. Í grófum dráttum kemst Hord að eftirfarandi niðurstöðum:

Mjög erfitt er að gera almennan samanburð á áhættu þess að nota vetrni, jarðgas eða bensín. Áhættan er að verulegu leyti háð því, undir hvaða

kringumstæðum eldsneytið er notað. Ein eldsneytistegund getur verið öruggari í einu tilfelli, þótt hún sé hættulegri í öðru.

Af ofangreindum þrem eldsneytistegundum er erfiðast að geyma vetni en auðveldast að geyma bensín, ef efnin eru geymd sem vökvi. Ef efnin eru geymd sem lofttegund er hins vegar auðveldast að geyma vetni, en erfiðast að geyma bensín.

Ef eldsneyti fer niður eða lekur óvænt úr geymi og veldur eldsvoða, er tíminn, sem líður þar til eldur kvíknar, skemmstur fyrir vetni og lengstur fyrir bensín. Tíminn, sem eldsvoðinn varir, er svo einnig skemmstur fyrir vetni.

Þótt minnsta orku þurfi til að kveikja í vettinu, mundu allar algengar orsakir íkveikju, rafneisti, glóð i eldspýtu og heitir vélahlutir, ná að kveikja í öllum tegundunum. Jafnvel neisti, sem verður oft, ef mannslikami hleðst upp (10mJ), gæti nægt til að kveikja í öllum eldsneytistegundunum.

Vegna þess að vettislogi inniheldur engar kolefnisagnir er hann ósýnilegur í dagsbirtu. Erfiðara er því að sjá vettiseld, en eld frá bensíni eða methan. Mesta hættan við vettiseld er ef til vill sú, að menn gangi inn í logana, án þess að átta sig á því í tíma. Með núverandi tækni er þó hægt að finna vettiseld á jafn fljótlegan og öruggan hátt og eld frá bensíni og methan.

Hætta vegna reykeitrunar er mest frá bensíni, en engin frá vettini, svo lengi sem aðeins eldsneytið brennur. Vettiselda má slökkva með sömu aðferðum og nú eru notaðar til að slökkva bensín- og methanelda (vatn, froða, duft o.s.frv.). Í öllum tilfellum er ráðlegt, ef unnt er, að lofa eldinum að brenna þar til eldsneytið er gengið til þurrðar, til að forðast hættu á sprengingu.

Verði tekið að nota vettini sem eldsneyti, eru loks að áliti Hords ekki fyrirsjánleg nein óleysanleg vandamál við að geyma það og meðhöndla á öruggan hátt, hvorki í iðnaði né á almennum markaði. Svarið við því

hvort vetni sé nothæft sem eldsneyti af öryggisástaðum einum er því já, að álíti Hords. Í vissum tilfellum kunna aðrar eldsneytistegundir að verða notaðar í framtíðinni, frekar en vetni, vegna þess að þær verða auðveldari og ódýrari í meðhöndlun. Á hinn bóginн telur Hord ekki hægt að útiloka vetni sem framtíðareldsneyti, vegna þess að það sé of hættulegt.

Í vetrnisþotum er gert ráð fyrir að eldsneytistankar verði ekki staðsettir í vængjunum, sem oftast laskast mest, þegar flugvélum hlekkist á, heldur fremst og aftast í bol þotunnar. Líkurnar á að bæði fram og afturtankur í slíkum þotum laskist í slysi, sem annars ein-hverjir lifa af, eru álitnar fremur litlar.

Loks má geta nýlegrar könnunar, sem Boeing verksmiðjurnar hafa látið gera á því, hvort sé hættulegra þotuelsneyti, núverandi Jet A eða vetni. Niðurstöður þeirra könnunar eru eftirfarandi: "Dauði, slys og skemmdir, sem afleiðing flugslysa eða ef bilun verður í eldsneytiskerfi á jörðu niðri, verða ef til vill fátíðari ef notað er fljótandi vetni á þotur í stað núverandi eldsneytis" (Hadaller o.fl. 1979).

Að athuguðu máli virðist einkum tvennt benda til þess, að vetni verði í vaxandi mæli notað í framtíðinni sem eldsneyti. Minnkandi olíu- og jarðgasbirgðir jarðar og ört vaxandi mengun andrúmsloftsins, ef uppfylla á hraðvaxandi orkupörfmannkynsins með því að brenda kolaeldsneyti.

Flestir þeir, sem um þau mál fjalla, virðast á einu máli um það, að ekki síðar en á árunum 1990-2000 muni hámarksframleiðslu olíu náð i heiminum. Eftir það fari framleiðsla olíu hraðminnkandi og fljótlega upp úr aldamótum verði jarðolia tæpast fáanleg lengur sem eldsneyti. Jarðgasbirgðir heimsins eru taldar munu endast nokkuð lengur. Þó er talið að hámarksframleiðslu jarðgass verði náð um 2030, eftir það muni jarðgas smám saman hverfa úr orkusögu mannkynsins (Hubbert 1971, Marchetti 1979, Wilson 1977). Verður því vart annað séð, en að miðað við óbreytt ástand verði fljótlega skortur á þeim fljótandi eldsneytis-tegundum, sem nú eru mest notaðar í heiminum og svo til einu eldsneytis-tegundirnar, sem notaðar eru á farartæki. Síðan mun að öllum líkindum skortur á jarðgasi fylgja eftir. Afleiðingin hlýtur að verða sú, að hvort sem þjóðum heimsins líkar það betur eða verr, þá verða þær að snúa sér að því mjög fljótlega, annað hvort að framleiða eldsneyti á farartæki sín, sams konar og nú tíðkast, eða þá einhverja aðra eldsneytis-tegund.

Þegar hugað er að framtíðareldsneyti ber einkum að hafa í huga eftir-farandi atriði:

1. Til þess að hægt sé að framleiða eldsneytið sem viðast í heiminum, þarf helst að vera hægt að nota til þess hvaða orkulind sem er og hráefni til framleiðslunar þurfa að vera til í nægu magni sem næst orkulindunum.
2. Eldsneytið verður að vera unnt að geyma og flytja í miklu magni á öruggan og hagkvæman hátt.

3. Farartæki svo sem skip, flugvélar og bílar verða að geta flutt eldsneytið í nægu magni án þess að það sé óhóflega þungt eða fyrirferðarmikið.

4. Eldsneytið þarf að vera sem öruggast í almennri meðhöndlun.

5. Hætta á stórfelldum náttúruspjöllum, ef eitthvað fer úrskeiðis, t.d. við slys og náttúruhamfarir, þarf að vera sem minnst.

6. Notkun eldsneytisins þarf að valda sem minnstri mengun.

Séu ofangreind atriði höfð í huga, virðast kostir þess að framleiða áfram bensín, oliur eða jafnvel methanol einkum þeir, að þessar eldsneytistegundir er unnt að nota áfram á núverandi farartæki og dreifa þeim með núverandi dreifikerfi fyrir eldsneyti, án þess að gera þurfi á þeim verulegar breytingar. Alvarlegasti ókosturinn er hins vegar sá, hversu mikilli mengun áframhaldandi notkun þessara eldsneytistegunda veldur.

Séu hins vegar athugaðir eiginleikar og framleiðsluaðferðir vetrnis, virðast kostir þess slíkir, að það verður að teljast eitt líklegasta framtíðareldsneytið. Til að framleiða vetrni er hægt að nota næstum hvaða orkulind sem er og eina hráefnið, sem til þarf, er vatn. Vetrni er hægt að geyma og flytja á öruggan hátt. Miðað við þunga er vetrni orkuríkasta eldsneytið, sem nú er þekkt. Mengun andrúmsloftsins yrði svo til alveg úr sögunni, ef tekið yrði að brenna vetrni í stað oliu og sömuleiðis náttúruspjöll, eins og verða samfara því, ef oliufarmar tapast í sjó eða vatnsból.

Mesti vandinn samfara því að taka upp vetrni sem eldsneyti er án efa sá, að til þess að svo megi verða, þarf að koma upp nýju dreifikerfi í stað þess, sem nú er notað til að dreifa fljótandi eldsneyti. Núverandi jarðgasleiðslur má hins vegar nota að mestu óbreyttar til að flytja vetrni. Í farartækjum þyrfti að skipta um eldsneytisgeyma og aðfærslukerfi til vélarinnar og jafnvel að gera talsverðar breytingar á aflvélunum sjálfum.

Sérfræðingar í eldsneytismálum virðast almennt sammála um, að vegna kosta sinna hljóti vetni að verða eldsneyti framtíðarinnar. Menn deilir einungis á um það, hvenær svo muni verða. Þeir bjartsýnustu telja að vetni verði notað í verulegum mæli sem eldsneyti jafnvel á þessari öld, þeir svartsýnustu telja hins vegar að svo verði tæpast fyrr en að 50 árum liðnum.

Raunhæfustu athuganir sem gerðar hafa verið á notkun vetrnis sem eldsneytis í framtíðinni, er ef til vill könnun, sem gerð var á vegum S.C.I.E.N.C.E. (Société de Consultant Indépendants et Neutres de la Communauté Européenne) á árunum 1974-1975 (Valette o.fl. 1978). Í þessari könnum voru 86 sérfræðingar frá 13 löndum spurðir álits á því, hver þeir teldu að yrði hlutur vetrnis í orkubúskap heimsins fram til ársins 2000. Til að tryggja sem líklegastar og óvilhallastar niðurstöður, voru valdir fulltrúar úr helstu greinum orkufreks iðnaðar, olíu og gasiðnaði, iðnaði, sem framleiðir aflvélar og auk þess fulltrúar frá háskólum og alþjóðastofnunum, sem fást við orku- og eldsneytisrannsóknir. Loks voru valdir fulltrúar þeirra, sem fást við rannsóknir á vetrni og notkun þess.

Við úrvinnslu þessarar könnunar kom margt athyglisvert í ljós. Til dæmis var talið að árið 1990 yrði heildar vetrnisframleiðsla heimsins á bilinu 57-85 millj.tonn á ári (17,8 millj. tonn 1978), en 155-265 millj. tonn árið 2000. Tafla 8-1 sýnir hvernig áætlað er að vetrnisnotkunin skiptist. Þá var einnig sundurliðuð notkun vetrnis á farartæki árið 2000. Tafla 8-2 sýnir þessa sundurliðun. Þótt ofangreind könnun sé orðin nokkurra ára gömul, kemur samt vel fram það álit, að vetrni muni smáum saman ryðja sér til rúms á eldsneytismörkuðum heimsins.

Að vel athuguðu máli er það álit skýrsluhöfundar að vetrni verði tæpast ein af aðal eldsneytistegundum mannkynsins á þessari öld. Þó ber að hafa í huga að miklar rannsóknir fara nú fram í heiminum á þeim möguleika, að nota vetrni í stað númerandi eldsneytistegunda.

Þessar rannsóknir gætu leitt til þess, áður en varir, að vetrni kynni að

Tafla 8 - 1

Áætluð skipting heildar vetrnisnotkunar í heiminum árið 1990 og 2000.

	1990	2000
Efnaiðnaður	77%	41%
Járn og stáliðnaður	13%	17%
Annar iðnaður	8%	12%
Heimili og vinnustaðir	-	12%
Farartæki	2%	12%
Raforkuframleiðsla	-	6%

Tafla 8 - 2

Áætluð vetrnisnotkun á farartæki árið 2000.

Taflan sýnir hve mörg % af heildareldsneytisnotkun hverrar tegundar er vetrni, eða methanol framleitt úr vetrni.

Einkabílar	10%
Almenningsfarartæki (bílar, lestir)	20%
Flugvélar	10%
Skip	2%

reynast hagkvæmasta eldsneytið, í vissum lõndum, eins og t.d. á Íslandi, þar sem næg vatnsorka er fyrir hendi.

Sjálfsgagt er því að íslendingar fylgist vel með þeim rannsóknum, sem nú fara fram í heiminum, bæði á notkunarmöguleikum og framleiðslu-aðferðum vettis og leggi jafnvel eitthvað af mörkum til þeirra rannsókna. Vetni er að öllum líkindum það eldsneyti, sem hagkvæmast verður að framleiða á Íslandi í framtíðinni og ef svo verður, hlýtur það að vera keppikefli íslendinga að nota það í stað annarra eldsneytistegunda, jafnskjótt og slikt reynist mögulegt.

9 FLJÓTANDI ELDSENEYTI ÚR VETNI OG KOLEFNI

9.1 Eldsneytistegundir

Eins og fram kemur í síðasta kafla, virðist flest benda til þess, að hreint vetni verði vart notað sem eldsneyti á Íslandi, sem neinu nemur, á næstu áratugum. En jafnvel þótt svo sé, er tæpast ástæða fyrir íslendinga að fresta því öllu lengur að athuga gaumgæfilega möguleika á framleiðslu eldsneytis, er gæti komið í stað innflutts bensíns og oliú. Tæknilega aðgengilegt er að framleiða vetni úr vatni með rafgreiningu og nota síðan vetnið, ásamt kolefni úr einhverjum kolefnisgjöfum, til að framleiða fljótandi eldsneyti, bensín, gasoliú, methanol eða jafnvel hráoliú (crude oil).

Bensín og oliur eru kolvetasambönd, þ.e. efnasambönd vetrnis og kolefnis. Þessum efnasamböndum má lýsa með almennu sameindalíkingunni $(\text{CH}_2)_n$, þar sem n er einhver heil tala. Bensín er t.d. blanda af slikum sameindum, þar sem n er mismunandi, en þó alltaf nálægt 8. Hver oliutegund er svo einnig blanda slikeinda með mismunandi n, þar sem meðalgildi n í hverri oliutegund fer hækkandi eftir því sem olían þykknar. Til að einfalda það, sem rætt er í kafla 9, verður oft einungis rætt um bensín, enda þótt það sem sagt er, geti einnig átt við um oliur. Þá verður einnig reiknað með að bensín innihaldi eingöngu sameindir þar sem n=8 og sameindalíking bensíns sé því C_8H_{16} . Sameindalíking methanols er CH_3OH .

Lægra hitagildi vetrnis er um 120 kJ/g, lægra hitagildi methanols um 21 kJ/g og lægra hitagildi bensíns um 44 kJ/g. Bensín er því um tvöfalt orkuríkara eldsneyti en methanol, ef miðað er við þunga. Vetni er svo aftur um þrefalt orkuríkara en bensín.

9.2 Kolefnisgjafar

Helstu kolefnisgjafar, sem fyrirfinnast á Íslandi, eru kolsýra (CO_2) úr

sjó, lofti og skeljasandi (CaCO_3) og auk þess mór (C). Auk þess finnst nokkuð af kolsýru í hveralofti og nokkuð af kolefni í surtarbrandi og sorpi. Þá er vel hugsanlegt að flytja inn kol.

Af fjölmögum ritsmiðum (Meisel o.fl. 1976, Steinberg 1977, Steinberg o.fl 1977, Punwani 1978, Duncan o.fl. 1978, Punwani o.fl. 1979, Epperly o.fl. 1979), svo og nýlegum viðræðum við sérfraðinga hjá Institute of Gas Technology, Chicago og Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, er ljóst að tækni til að framleiða bensín, olíu og methanol úr vetni og einhverjum ofangreindra kolefnisgjafa er fyrir hendi.

Kolsýrubirgðir í sjó og lofti eru nánast ótakmarkaðar og auk þess myndast stöðugt kolsýra, sem fer út í andrúmsloftið, þegar eldsneytistegundum, sem innihalda kolefni er brennt. Sem kolsýrunámur ættu því sjór eða loft að geta nægt til eldsneytisframleiðslu um ókomna framtíð. Megin ókosturinn við kolsýruöflun úr þessum nánum er hins vegar sá, að í þeim er kolsýran í mjög þynntu ástandi (0,036% af rúmmáli í lofti og 0,01% af þunga í sjó) þannig að verulega orku þarf til að vinna hreina kolsýru.

Skeljasandslög (CaCO_3) umhverfis landið mætti ef til vill nota til kolsýru-framleiðslu. Um það bil 44% af þunga skeljasands er kolsýra. Megin ókosturinn við skeljasand er hins vegar sá, að í honum er kolsýran mjög fast bundin. Hér þyrfti því einnig verulega orku til kolsýruvinnslunnar.

Gagnstætt sjó og lofti eru kol og mór tiltölulega kolefnisauðug efni. Íslenskur mór inniheldur t.d. allt að 64% kolefni í þurrefni. Og gagnstætt því sem er í skeljasandi, þá er kolefnið í kolum og mó tiltölulega lítið bundið öðrum eftum. Mikillar orku, til að safna kolefninu saman eða losa það frá öðrum eftum, ætti því ekki að vera þörf, þegar kolefnisnáman er kol eða mór.

Ef aðeins er lítið á öflun hugsanlegra kolefnisgjafa er því ýmislegt, sem bendir til að mun hagkvæmara geti verið að afla kola eða móls til eldsneytisgerðar, fremur en kolsýru. Í vissum tilvikum, t.d. ef tiltölulega hrein kolsýra er fáanleg sem ódýrt afgangsefni frá iðnaði, gæti þó kolsýra

komið til greina. Þá gæti kolmónoxið (CO) verið hagkvæmur kolefnisgjafi, ef það félli til sem afgangsefni frá iðnaði.

Á síðustu árum hafa sérfræðingar Institute of Gas Technology, Chicago, gert á því umtalsverðar athuganir að nota mó í stað kola til framleiðslu eldsneytis. Athuganirnar hafa farið fram í tilraunaverksmiðjum, sem nota svonefnda gösunaraðferð (kolagösun, mógösun), en kolagösun er vel þekkt tækni. Þegar niðurstöður móvinnslu- og mógösunartilraunanna eru bornar saman við niðurstöður athugana á kolavinnslu og kolagösun verður samanburðurinn einkar athyglisverður.

Móvinnsla virðist hafa í för með sér minna umhverfisvandamál en kolavinnsla frá yfirborði, en kol unnin frá yfirborði eru mun ódýrari en kol unnin úr djúpum jarðlöögum. Mór virðist ódýrari kolefnisgjafi (0,75 \$/GJ) en ódýrustu fáanleg kol (1-2 \$/GJ). Mór er hvarfgjarnari en kol, sem gæti leitt til þess að stofnkostnaður eldsneytisverksmiðju yrði lægri ef notaður er mór, en ef notuð eru kol. Við mógösun nýtist kolefnið betur en við kolagösun, þannig að meira eldsneyti fæst úr mó en kolum, ef miðað er við sama kolefnismagn. Við kolagösun verður viss hluti eldsneytisins gas og viss hluti fljótandi. Við mógösun má hins vegar stjórna hlutfallslegu magni þessara eldsneytistegunda með hitastiginu og þannig getur miklu meiri hluti eldsneytisins orðið fljótandi (Punwani 1978, Punwani o.fl. 1979).

Af tilraunum Institute of Gas Technology verður því tæpast annað ráðið, en að mór geti jafnvel verið heppilegra hráefni en kol, ef framleiða á eldsneyti með gösunaraðferðum.

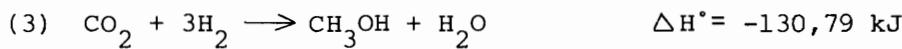
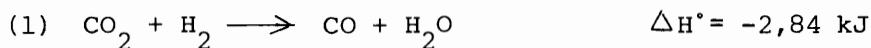
Á árunum 1939-1940 var gerð, að frumkvæði Rannsóknarnefndar ríkisins, allvíðtæk athugun á magni og gæðum mós á Íslandi (Óskar B. Bjarnason 1952 og 1966). Af þeim skýrslum verður tæpast annað séð, en nægilegur mór sé til á Íslandi, til að fullnægja kolefnispörf landsmanna til eldsneytisgerðar um alllanga framtíð.

9.3 Framleiðsluaðferðir

Ef athugaðar eru framleiðsluaðferðir, sem nú sýnast tæknilega að-gengilegar til að framleiða fljótandi eldsneyti úr vetni og kolefni, virðist í fljótu bragði, sem kol eða jafnvel mór hljóti að vera heppilegri kolefnisgjafar en kolsýra. Og séu tiltækir kolefnisgjafar kol eða mór, virðist í fljótu bragði einnig, að hagkvæmara muni vera að framleiða bensín eða olíu, fremur en methanol. Methanolframleiðsla virðist helst koma til álita, ef heppilegasti tiltæki kolefnisgjafinn er kolsýra eða kolmonoxið, en þessar lofttegundir gætu verið fyrir hendi sem ódýrt afgangsefni frá öðrum iðnaði. Methanol er svo aftur unnt að breyta í bensín á tiltölulega einfaldan hátt.

9.3.1 Eldsneyti úr vetni og kolsýru

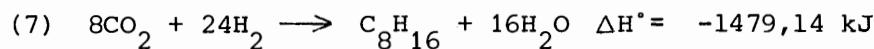
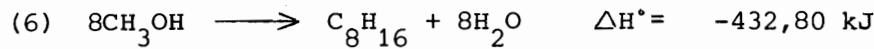
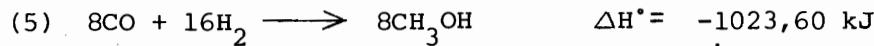
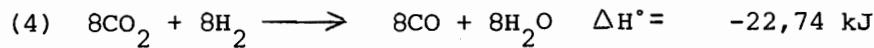
Framleiðslu methanols úr kolsýru og vetni má í grófum dráttum lýsa með eftirfarandi efnahvörfum:



Enthalphy breyting efnahvarfana ΔH° , sem gefin er aftan við þau, er "standard enthalphy" breyting. Hið sama er að segja um allar enthalphy breytingar, sem sýndar eru með efnajöfnum í kafla 9 hér á eftir. Standard enthalphy breytingarnar eru að sjálfsögðu aðrar en raunverulegar enthalphy breytingar við þau skilyrði, sem þarf til að efnahvörfin gangi. Standard enthalphy breytingar gefa þó nokkra vitneksju um þær orku-breytingar sem verða á kerfinu við efnahvörfin.

Samkvæmt efnajöfnunum fer þriðjungur vetrnisins einungis í það að breyta oxunarstigi kolefnisins úr +4 í +2. Þetta vetrnismagn sparast því ef kolefnisgjafinn er kolmónoxíð í stað kolsýru.

í stað þess að nema staðar við methanol er einnig hugsanlegt að ganga einu skrefi lengra og framleiða bensín. Efnahvörfunum mætti þá lýsa með eftirfarandi efnajöfnum:



Efnahvarf (6) er svonefnd "Mobil" aðferð, sem breytir methanol yfir í háoktan bensín með hjálp zeolita sem hvata (Meisel o.fl. 1976). Breytingin úr methanol yfir í bensín hefur í för með sér nokkurn viðbótarkostnað, þannig að bensinið verður um 1,27 sinnum dýrara eldsneyti en methanol, miðað við orkuinnihald. Á hinn bóginн þarf að dreifa um helmingi meira magni eldsneytis ef dreifa á methanol í stað bensíns. Dreifingarkostnaður methanols verður því hærri. Þá þarf einnig að gera nokkrar breytingar á núverandi farartækjum, ef þau eiga að nota methanol í stað bensíns, en slikt hefur í för með sér nokkurn kostnað.

Ef framleiða á eldsneyti úr vetni og kolsýru hlýtur því að vera álitamál, hvort framleiða á bensín eða methanol og endanleg ákvörðun verður tæpast tekin fyrr en að undangenginni athugun á ofangreindum atriðum.

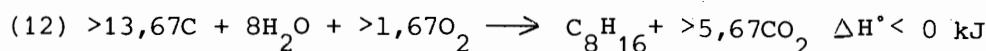
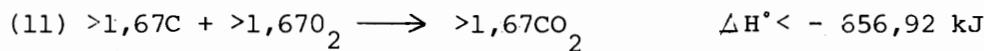
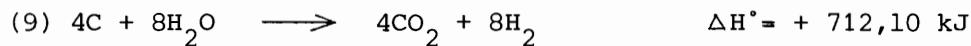
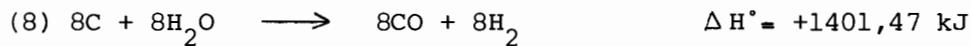
9.3.2 Kolagösun - Mógösun

Þeim aðferðum, sem nú eru tæknilega aðgengilegar til að breyta kolum í fljótandi eldsneyti, má skipta í two meginflokkum. Þessir flokkar eru kolagösun (gasification of coal) og kolabréðsla (liquefaction of coal). Kolagösun er sú aðferð, sem Suður-Afríkubúar nota, til að framleiða í miklu magni fljótandi eldsneyti úr kolum. Kolabréðsla var notuð til að framleiða nokkurt magn af eldsneyti á árunum 1920 - 1944. Siðan hefur lítill áhugi verið á þessari aðferð, þar til á síðustu árum að

stórfyrirtæki í kola- og olíuiðnaði hafa byrjað umfangsmiklar rannsóknir á þessu sviði.

Aðeins í gösunaraðferðinni hefur verið gerð tilraun með að nota mó í stað kola (mógösun). Móbræðsla hefur enn ekki verið reynd svo vitað sé.

Þótt tæknilega sé talsverður munur á hinum ýmsu gösunaraðferðum má almennt lýsa þeim með eftirfarandi efnajöfnum:

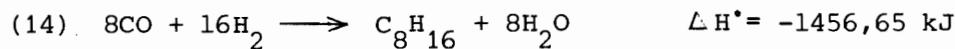
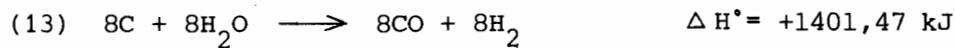


Líking (8) bindur kolefnið súrefni og kemur því þannig í loftkennt form. Líking (9) myndar síðan nauðsynlegt viðbótarvetni, en jafnframta myndast þá kolsýra. Líking (10) er loks hið eiginlega efnahvarf, sem myndar bensín úr CO og H₂. Til þess að líkingar (8), (9) og (10) gangi fyrir sig, þarf að bæta í kerfið orku ($\Delta H^\circ_{(8)} + \Delta H^\circ_{(9)} + \Delta H^\circ_{(10)} = +656,92 \text{ kJ/mól C}_8\text{H}_{16}$) og auk þess þarf varmaorku til að halda við nágilega háu hitastigi (~900°C). Þessi varmaorka fæst með því að brenna hluta kolanna í súrefni samkvæmt líkingu (11), eða svo miklu magni af kolum að $\Delta H^\circ_{(12)} < 0$.

Við klassísku kolagösun þjóna því kolin þrennum tilgangi. Þau eru kol-efnisgjafi, þau eru, ásamt vatnsgufu, notuð til að framleiða vetni og þau eru nauðsynlegur orkugjafi. Hið sama gildir ef mór er notaður sem kol-efnisgjafi í stað kola.

Í stað þess að framleiða nauðsynlegt vetni úr kolum og gufu, er einnig unnt

að framleiða það með rafgreiningu. Fyrir slika kolagösun mætti skrifa efnahvarfið eftirfarandi:



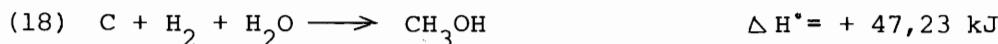
Athyglisvert er, að sé þessi gösunaraðferð notuð, þá er raforka notuð til að kljúfa vatn og framleiða vetni, í stað þess að framleiða það úr kolum eins og í líkingu (9). Heildarhvarfið (15) verður því útvermið og framleiðsla nauðsynlegs hvarfvarma, með því að brenna kolum eins og í líkingu (11), verðu óþörf. Í kolagösun þar sem notað er rafgreint vetni þjóna því kolin, eða mórin, eingöngu hlutverki kolefnisgjafans. Afleiðingin verður sú að með slíkri kolagösun má framleiða um 1,7 sinnum meira bensín úr ákveðnu magni kolefnis, en með klassískri kolagösun.

Ef framleiðsla bensíns úr vetni og kolsýru, líking (7), er borin saman við framleiðslu bensíns með kolagösun eða móögösun, líking (15), er tæpast við því að búast að kolsýra geti keppt við kol eða mó, nema hún sé miklu ódýrari kolefnisgjafi. Til að framleiða ákveðið magn af bensíni þarf þrefalt meira vetni ef kolefnisgjafinn er kolsýra, heldur en ef hann er kol eða mó, en framleiðslukostnaður vetnis er verulegur hluti af heildarframleiðslukostnaði eldsneytisins.

9.3.3 Methanol úr kolum og vetni

Í stað þess að framleiða kolvetni með kolagösun, er einnig fyrir hendi sá möguleiki að framleiða methanol úr vetni og kolum. Vetnið mætti þá eins og áður framleiða, hvort sem er úr kolum og gufu eða með rafgreiningu. Sé notað vetni fengið úr rafgreiningu má skrifa efnahvörfin

eftirfarandi:

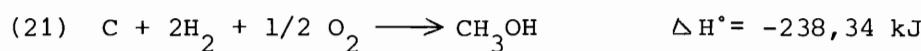
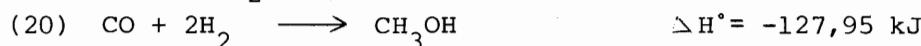


Fyrsta skrefið, líking (16), er það sama og fyrsta skrefið í kolagösun, líking (13). Í líkingu (17) hvarfast síðan kolmonoxið og vetni í návist ákveðins hvata og mynda methanol. Ef borin eru saman í heildarhvörfin fyrir bensíframleiðslu, líking (15) og methanolframleiðslu, líking (18), verður tæpast séð að mikill ávinningur geti verið í því að framleiða methanol í stað bensins. Í stað þess að tengja einungis saman kolefni og vetni og framleiða bensín, þá er tengt saman kolefni, vetni og vatn að auki og framleitt methanol. Úr ákveðnu magni kolefnis fæst í báðum tilfellum eldsneyti, sem inniheldur svipaða orku. Ef eldsneytið er methanol, er það hins vegar um helmingi þyngra og fyrirferðameira og þar af leiðandi dýrara í dreifingu og notkun. Á móti kemur svo aftur að ef framleitt er methanol, fæst efni, sem er mjög hreint (98%), en ef bensín er framleitt með kolagösun eru afurðirnar blanda léttar kolvetna, sem síðan þarf að aðskilja með eimingu.

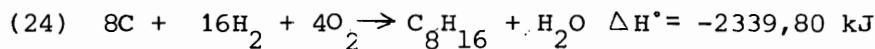
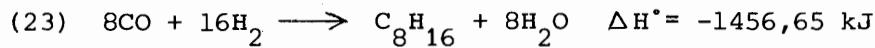
9.3.4 Hlutoxun kolefnis

Hlutoxun kolefnis er þekkt tækni til að vinna kolmonoxið úr lífrænum efnum og mætti hugsanlega einnig nota til að vinnakolmonoxið úr kolum, eða jafnvel sorpi. Við rafgreiningu á vatni fellur, auk vetrnis, einnig til súrefni. Með því að brenda kolum, mó eða sorpi í takmörkuðu hreinu súrefni mætti því framleiða tiltölulega hreint kolmonoxið, sem síðan mætti hvarfa áfram með vetrni og framleiða á þann hátt methanol eða bensín. Efnahvörfunum má lýsa með eftirfarandi jöfnum:

Methanolvinnsla:



Bensínvinnsla:



Ef bornir eru saman þeir kostir að framleiða methanol, líking (21), eða bensín, líking (24), með hlutoxun, verður niðurstaðan svipuð og þegar um er að ræða að framleiða methanol eða bensín með gösun, líkingar (15) og (18). Úr ákveðnu magni kolefnis fæst í báðum tilfellum eldsneyti, sem inniheldur svipaða orku, en methanollið er tvöfald þyngra og fyriferðarmeira en bensinið. Ef framleitt er methanol fæst hins vegar mjög hreint efnasamband, en ef framleitt er bensín fæst blanda efnasambanda, sem væntanlega verður að aðskilja með eimingu.

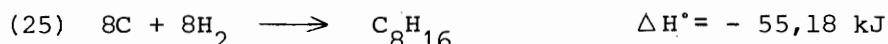
Ef hins vegar eru bornir saman þeir kostir að vinna eldsneyti, methanol eða bensín, úr kolum með kolagösun eða með hlutoxun virðist hlutoxun fremur hæpin aðferð. Til að framleiða ákveðið magn eldsneytis með hlutoxun þarf um tvöfalt meira vetni, en ef notuð er gösun og framleiðslukostnaður vettisins verður því tvöfalt hærri. Sú viðbótar raforka, sem þarf til vettisframleiðslunar ef notuð er hlutoxun, kemur ekki fram í auknu eldsneytismagni, heldur losnar aftur sem varmi í efnahvarfinu.

Pótt hlutoxun sé hæpin, ef kolefnisgjafinn er kol, er samt sem áður rétt að gefa henni nokkurn gaum. Hlutoxun er tiltölulega einföld aðferð til að skilja kolefni frá öðrum efnum, t.d. úr sorpi, rusli eða jafnvel mó. Hlutoxun gæti því vel reynst hagkvæm til að vinna kolefni, sem kolmonoxið, úr sorpi eða jafnvel þurrkuðum mó. Kolmonoxiðið má síðan nota ásamt vetni til að framleiða eldsneyti.

9.3.5 Kolabréðsla (Liquefaction of coal)

Með gösunaraðferðum fer eldsneytisframleiðsla fram á þann hátt, að eftir

að kolefninu hefur verið breytt í loftkennt kolmonoxið, verða öll frekari efnahörf milli lofttegunda. Í kolabréðslu fara hins vegar efnahörfin fram í lausn. Megin munurinn á kolagösun og kolabréðslu er því sá, að í stað þess að breyta kolefninu í lofttegund, er það leyst upp í lífrænum leysi og síðan látið hvarfast við vetni í lausn, í návist hvata, við háan þrýsting (100-400 loftþyngdir) og háan hita (400°C). Eldsneytisframleiðslu með kolabréðslu má því lýsa með efna-jöfnunni:



Vetnið má að sjálfsögðu vinna hvort sem er með rafgreiningu, úr kolum eða á annan hátt. Eftir að hvatinn og leysirinn hafa verið endurunni, er afgangurinn vökví, sem líkist hráoliú og má hreinsa og aðskilja í mismunandi eldsneytistegundir, líkt og gert er í olíuhreinsunarstöðvum í dag.

Tilraunir með kolabréðslu má rekja allt til ársins 1913. Á árunum 1920 - 1944 var svo kolabréðsla notuð til að framleiða nokkurt magn af fljótandi eldsneyti. Síðan 1944 hefur lítill áhugi verið fyrir þessari aðferð, þar til á síðustu árum að stórfyrirtæki í kola- og olíuiðnaði (Saarbergwerke, Ruhrkohle og Exxon) hafa tekið upp miklar rannsóknir á þessu sviði. Virðist nú margt benda til þess að kolabréðsla verði í framtíðinni ef til vill hagkvæmasta leiðin til að breyta kolum í fljótandi eldsneyti í stórum stíl (Brown o.fl. 1977, Epperly o.fl. 1979).

Gagnstætt því sem er með kolagösun, þá er höfundi ekki kunnugt um, að kolabréðsla fari neins staðar fram í dag, nema í tilraunaverksmiðjum. Þá er heldur ekki vitað, að gerðar hafi verið tilraunir með að nota mó í stað kola (móbréðsla), enda þótt slíkt væri vissulega mjög áhugavert, ef hafðar eru í huga þær niðurstöður, sem fengist hafa við tilraunir með mógösun.

9.4 Framleiðslukostnaður fljótandi eldsneytis

Hér verður ekki reynt að gera nákvæma áætlun um framleiðslukostnað

fjótandi eldsneytis, sem hugsanlega mætti framleiða á Íslandi úr vetni og kolefni eftir hinum ýmsu leiðum. Síkt er utan ramma þessarar skýrslu, enda tæpast mögulegt fyrr en að undangenginni rækilegri athugun á þeirri tækni og þeim kolefnisgjöfum, sem best kunna að henta íslenskum aðstæðum. Þó skal hér aðeins drepið á nokkrar áætlanir, sem birst hafa á síðustu árum.

9.4.1 Eldsneyti úr vetni og kolsýru eða kolmonoxíði

Steinberg (1977) birtir áætlun um framleiðslukostnað methanols og bensíns, sem hugsanlega mætti vinna úr vetni og kolmonoxíði eða kolsýru. Í áætluninni gerir Steinberg ráð fyrir að kolmonoxíðið megi fá frá háofnum. Kolsýruna mætti fá annað hvort frá kalkbrennslum, frá kolakyntum orkuverum eða úr andrúmsloftinu. Á þennan hátt telur hann að framleiða mætti í Bandaríkjjunum nægilegt bensín, til að fullnægja bensínþörf þjóðarinnar. Megin kosturinn við þessa hugmynd er sá, að hér eru notuð kolefnasambönd, sem annað hvort eru í andrúmsloftinu, eða fara þangað nú þegar. Notkun bensíns, sem framleitt er á þennan hátt, mundi því í raun ekki auka neitt kolsýrumsagn andrúmsloftsins. Í áætluninni er gert ráð fyrir að fyrst sé framleitt methanol, sem síðan megi breyta í bensín með "Mobil" aðferð.

Tafla 9.4.1-1 sýnir niðurstöður áætlana Steinbergs. Áætlunin miðast við verðlag ársins 1985. Steinberg gerir ráð fyrir, að fyrir hendi sé afgangsraforka frá kjarnorkuverum á 6 mill/kWh. Í nokkrum tilfellum reiknar hann þó með raforkuverði 30 mill/kWh. Þá gerir hann ráð fyrir að vetni verði framleitt með SPE rafgreiningartækni. Súrefnið, sem til fellur við rafgreininguna, er notað í háofnana. Í verksmiðjum, sem nota CO er gert ráð fyrir afkastagetu 7000 tonn methanol/dag eða um 3500 tonn bensín/dag. Í verksmiðjum, sem nota CO₂ er gert ráð fyrir afkastagetu um 2200 tonn methanol/dag eða um 1100 tonn bensín/dag.

Tafla 9.4.1-1

Áætlun Steinbergs (1977) um framleiðslukostnað methanols og bensíns, sem framleiða mætti úr vetni og CO eða CO₂. Afkastageta 7000 tonn methanol/dag eða 3500 tonn bensín/dag, ef notað er CO, en 2200 tonn methanol/dag eða 1100 tonn bensín/dag, ef notað er CO₂. Raforkuverð 6 mill/KWh eða 30 mill/KWh. Miðað er við verðlag 1985.

Kolefnisgjafi	Raforkuverð	Methanol		Bensín	
		\$/GJ	\$/tonn	\$/GJ	\$/tonn
CO frá háofnum	6 mill/kWh	3,66	77	4,42	194
CO ₂ frá kalkbrennslum	6 mill/kWh 30 mill/kWh	4,30 12,22	90 257	5,02 13,53	220 595
CO ₂ frá kolaorkuverum	6 mill/kWh 30 mill/kWh	4,67 12,82	98 269	5,42 14,19	238 624
CO ₂ úr andrúmslofti	6 mill/kWh 30 mill/kWh	5,31 14,01	112 294	6,11 15,46	269 680

McHugh (1978) hefur birt áætlunar um framleiðslukostnað methanols og bensíns úr vetni og CO₂. Gerir hann ráð fyrir að vetnið sé unnið með núverandi rafgreiningartækni, eða með væntanlegri SPE-rafgreiningartækni. Þá gerir hann ráð fyrir að hreint CO₂ sé fyrir hendi á staðnum. Kostnaðurinn við CO₂ öflunina er þannig ekki innifalinn í áætluninni, en samkvæmt öðrum athugunum má gera ráð fyrir, að ef nauðsynlegt CO₂ yrði t.d. unnið úr sjó, þá muni framleiðslukostnaður methanols hækka um faktor ca. 1,15 (Steinberg o.fl. 1977, Finnbogi Jónsson 1978).

Tafla 9.4.1-2 sýnir áætlun McHugs fyrir framleiðslukostnað methanols og bensíns, ef raforkuverð er 10, 15, 20 og 30 mill/kWh. Gert er ráð fyrir að verksmiðjan framleiði um 2000 tonn af methanol eða um 1000 tonn af bensini á dag. Þá er gert ráð fyrir nýtingartíma 95%.

Tafla 9.4.1-2

Áætlun McHugs (1978) um framleiðslukostnað methanols og bensins úr H₂ og CO₂. Gert er ráð fyrir afkastagetu um 2000 tonn/dag af methanol eða um 1000 tonn/dag af bensíni. Kostnaður við öflun CO₂ er ekki reiknaður með. Reiknað er með að vetnið verði unnið með núverandi rafgreiningartækni eða SPE-rafgreiningartækni.

Raforkuverð mill/kWh	Methanol				Bensín			
	Núverandi rafgr. \$/GJ \$/tonn		SPE-rafgr. \$/GJ \$/tonn		Núverandi rafgr. \$/GJ \$/tonn		SPE-rafgr. \$/GJ \$/tonn	
10	9,0	189	5,6	118	11,4	501	7,2	317
15	11,2	235	7,4	155	14,4	634	9,6	422
20	14,0	294	9,6	201	18,0	792	12,0	528
30	19,5	410	13,5	283	23,4	1029	17,2	757

Tvær tilraunir hafa verið gerðar til að meta framleiðslukostnað methanols eða bensíns, sem framleiða mætti á Íslandi úr vetni og kolsýru eða kolmonoxíði.

Ágúst Valfells (1978) notar áætlun Steinbergs (1977), þar sem hann gerir ráð fyrir að vinna methanol úr vetni, sem unnið yrði með SPE-rafgreiningu og kolsýru, sem unnin yrði úr lofti. Methanolinu yrði síðan breytt í bensín eða olíu með Mobil aðferð. Þessa áætlun umreiknar og aðlagar Ágúst Valfells fyrir íslenskar aðstæður. Þá gerir hann ráð fyrir raforkuverði 8 mill/kWh og jarðgufuverði 25 ¢/tonn. Jafnframt gerir hann ráð fyrir að verksmiðjan afkasti um 1750 tonnum af bensíni eða olíu á dag, en slik verksmiðja mundi fullnægja núverandi eldsneytisþörf þjóðarinnar. Miðað við ofangreindar forsendur verður niðurstaða Ágústar Valfells sú, að þannig framleitt bensín (eða olía) mundi kosta um 5,7 \$/GJ eða 250,7 \$/tonn. Í áætluninni er gert ráð fyrir verðlagi í sept. 1978.

Finnbogi Jónsson (1978) hefur áætlað framleiðslukostnað methanols eða bensíns úr vetni og kolsýru. Þá er gert ráð fyrir að kolsýran verði unnin úr sjó, með sömu aðferð og Steinberg (1977) hugsar sér að nota. Miðað við verksmiðjustærð 100 tonn/dag af methanol, raforkuverð 10 mill/kWh, núverandi rafgreiningartækni, nýtingartíma verksmiðju 80% og verðlag ársins 1978, verður niðurstaða Finnboga sú, að framleiðslukostnaður methanols yrði 10 \$/GJ eða 212 \$/tonn. Framleiðslukostnað bensíns, sem vinna mætti úr methanolinu áætlar hann 13,6 \$/GJ eða 600 \$/tonn. Miðað við raforkuverð 4 mill/kWh og 100% nýtingartíma yrði methanolverðið hins vegar 6,4 \$/GJ eða 135 \$/tonn og bensínverðið 9,1 \$/GJ eða 400 \$/tonn.

Eins og fram kemur í líkingu (2) og (3) í kafla 9.3.1 mundi þurfa um þriðjungi minna vetni til að framleiða ákveðið magn methanols, ef unnt væri að nota CO í stað CO₂. Framleiðslukostnaður methanols mundi því lækka verulega, ef unnt er að afla CO í stað CO₂. Þannig mundi t.d. methanolverðið lækka um allt að 27%, ef unnt er að fá CO í stað CO₂, og ef reiknað er með að kostnaður við öflun CO og CO₂ sé sá sami, miðað við kolefnismagn. Bensínverð í áætlun Finnboga Jónssonar yrði þá um 10,2 \$/GJ (450 \$/tonn) í stað 13,6 \$/GJ (600 \$/tonn).

Finnbogi Jónsson (1978) bendir á þann möguleika, að með því að brenda sorpi Stór-Reykjavíkursvæðisins í takmörkuðu súrefni, mætti ef til vill fá verulegt magn af gasblöndu, sem væri að helming CO og að helming CO₂. Þá reiknar hann út að, ef vinnslukostnaður við öflun þessarar gasblöndu yrði sá sami og kostnaður við öflun CO₂ úr sjó, miðað við kolefnisinnihald, þá yrði methanolverðið 8,5 \$/GJ (180 \$/tonn) í stað 10 \$/GJ (210 \$/tonn).

9.4.2 Eldsneyti úr vetni og kolum

Sérfræðingar National Coal Board, Bretlandi (1978) hafa gert all rækilega könnun á þeim möguleika, að framleiða þrjár eldsneytistegundir úr kolum og viðbótar vetni, sem fengið yrði með rafgreiningu eða á annan hátt úr

vatni. Þá hafa þeir jafnframt gert rækilega áætlun um framleiðslukostnað þessara eldsneytistegunda, ef þær yrðu framleiddar með aðferðum, sem að þeirra mati eru nú tæknilega aðgengilegar, eða verða það í næstu framtíð, og borið þær áætlanir saman við framleiðslukostnað, ef notuð yrðu kol eingöngu. Eldsneytistegundirnar eru methan, methanol og hráolia (crude oil). Verður hér eftir eingöngu fjallað um tvær síðast nefndu tegundirnar.

Fyrir methanolframleiðslu var valin sem viðmiðunaraðferð kolagösun eftir Kopper-Totzek aðferð og methanolframleiðsla eftir ICI aðferð. Tæknibúnaður til þessara framleiðslu er nú fáanlegur á almennum markaði. Megin breyting þeirra National Coal Board manna er sú, að i stað þess að framleiða nauðsynlegt viðbótarvetni með kolagösun, er vetnið fengið úr rafgreiningu. Viðmiðunaraðferðinni má því lýsa með efnajöfnum (8), (9), (11), og (5) í kafla 9.3. en aðferðinni eins og hún er eftir breytinguna má lýsa með efnajöfnunum (16) - (18) í kafla 9.3.2.

Fyrir hráoliuframleiðslu var valin sem viðmiðunaraðferð kolabréðsla, svipuð og nú er verið að gera tilraunir með hjá Exxon og H-Coal. Meginbreyting National Coal Board er sú, að nauðsynlegt viðbótarvetni, sem nú er annað hvort framleitt úr methan eða kolum, verði framleitt með rafgreiningu. Þótt kolabréðsla hafi farið fram í nokkru magni á árunum 1920-1944, er höfundum ekki kunnugt um að hún fari fram annars staðar en í tilraunaverksmiðjum (pilot plants) nú. Tæknítbúnaður til þessarar framleiðslu getur því ekki talist fáanlegur á almennum markaði í dag. Þó virðist margt benda til að slikt verði innan fárra ára. Í því sambandi má geta þess, að Exxon er nú að byggja tilraunaverksmiðju, sem verður tilbúin til gangsetningar í lok janúar 1980. Framleiðslugeta þessara verksmiðju verður 250 tonn af hráoliú á dag (Epperly o.fl. 1979).

Niðurstöður kostnaðaráætlana National Coal Board eru sýndar á mynd 9.4.2-1 (methanol) og mynd 9.4.2-2 (hráolia). Reyndar var gerð athugun á tveim möguleikum fyrir framleiðslu hvorar eldsneytistegundar, en þar sem báðar leiðirnar gefa svipaða niðurstöðu, er aðeins önnur þeirra sýnd hér. Í áætlununum er miðað við verksmiðjur, sem afkasta um 10000 tonnum

af methanol eða 50 000 tunnum af hráoliú á dag. Á myndunum er eldsneytis verðið sýnt fyrir ákveðið vetrnis- og kolaverð. Vetrnisverðið er sýnt á lóðréttu ásnum, en kolaverðið á þeim láréttu. Lóðréttu línumnar á efri hluta myndanna sýna framleiðsluverð viðkomandi eldsneytis, ef eingöngu væru notuð kol. Skálínurnar í neðri hluta myndanna sýna hins vegar framleiðsluverðið, ef notuð eru kol og viðbótar vetrni, sem t.d. er fengið með rafgreiningu. Skálínan, þar sem þessir tveir línuhópar skerast sýnir því við hvaða vetrnis- og kolaverð báðar framleiðslu- aðferðir eru jafnhagkvæmar. Á svæðinu fyrir ofan línumna er hagkvæmara að nota kol eingöngu, en á svæðinu fyrir neðan er hagkvæmara að nota kol og viðbótarvetni.

Þótt áætlun þeirra National Coal Board manna sé ekki gerð sérstaklega fyrir íslenskar aðstæður, þá gefur hún vissulega nokkra hugmynd um, hvað það muni kosta að framleiða viðkomandi eldsneyti á Íslandi, ef verð á vetrni og innflutnum kolum er þekkt. Núverandi kolaverð til málmbendi-verksmiðjunnará Grundartanga er um 2,5 \$/GJ (70 \$/tonn). Ef reiknað er með sama kolaverði má ráða, af mynd 9.4.2-1, að jafnhagkvæmt sé að framleiða methanol úr kolum og vetrni, og úr kolum eingöngu, ef vetrnisverðið er 7 \$/GJ. En samkvæmt mynd 2.5.1 má framleiða á Íslandi vetrni á 7 \$/GJ ef raforkuverð er um 12 mill/kWh. Þannig framleitt methanol myndi þá kosta um 7,5 \$/GJ (158 \$/tonn). Þessu methanolli mætti síðan hugsan- lega breyta í háoktan bensín með Mobil aðferð, en framleiðslukostnaður þess bensíns yrði þá um 9,5 \$/GJ (419 \$/tonn). Í þessu sambandi er rétt að hafa í huga, að í júlí síðast liðnum þegar innflutningsverð dieseloliu og bensíns reis hæst, greiddu íslendingar um og yfir 400 \$ fyrir tonnið af þessum eldsneytistegundum (Oliunefnd 1979).

Ef mynd 9.4.2-2 er athuguð sést, að miðað við kolaverð 2,5 \$/GJ er jafnhagkvæmt að framleiða hráoliú úr kolum og vetrni og úr kolum ein- göngu, ef vetrnisverðið er 7,2 \$/GJ (raforkuverð um 12 mill/kWh).

Þannig framleidd hráolia mundi þá kosta um 3,9 \$/GJ eða um 22 \$/tunnu. Hráoliuverð OPEC-ríkjanna er nú um 18-22 \$/tunnu.



ORKUSTOFNUN

Framleiðslukostnaður methanóls ur vetrni og kolum.
Verksmiðjustærð 10.000 tonn methanóls/dag.
(Eftir National Coal Board 1978)

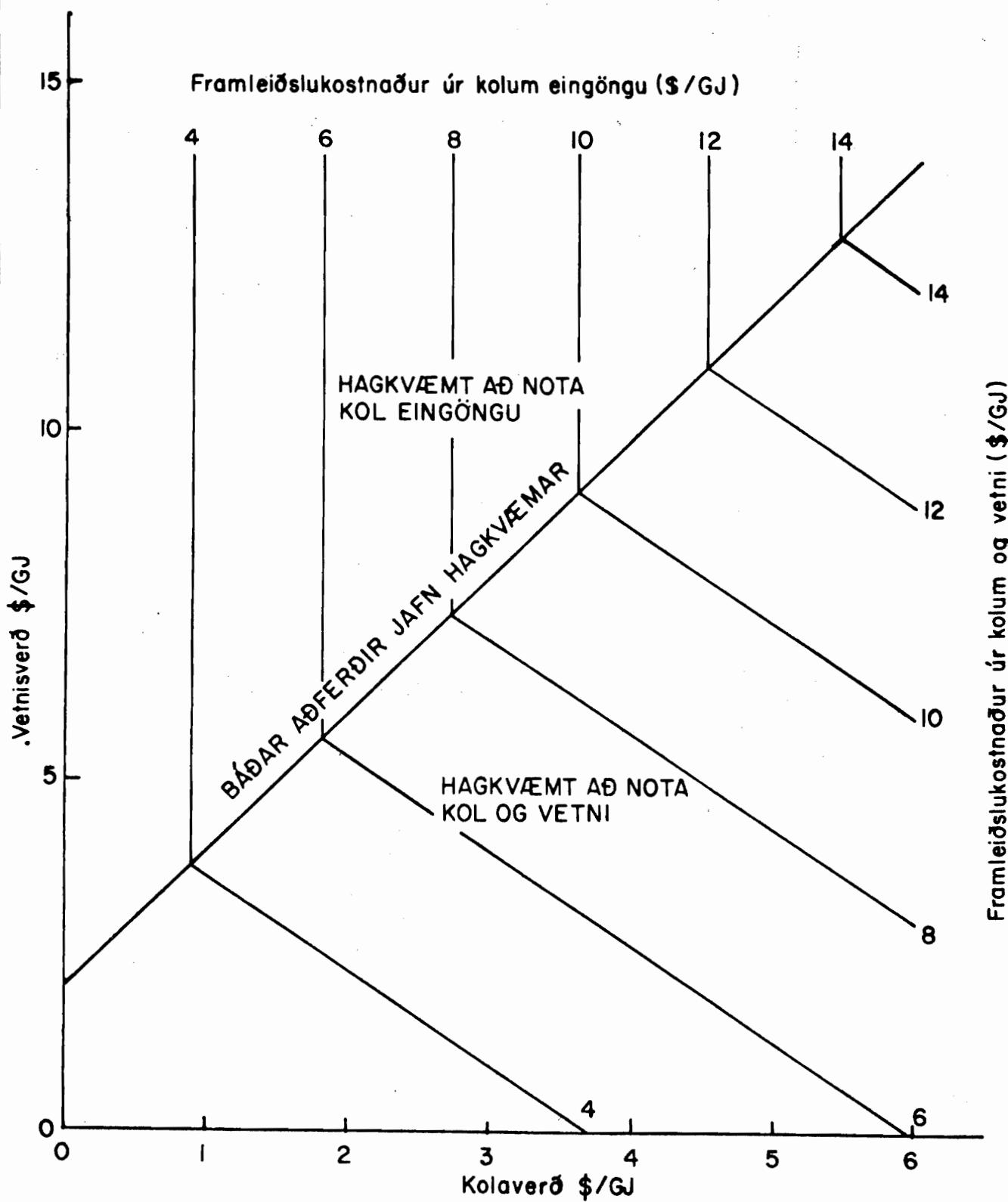
80.01.30.

JSG / H

Vinnslut.

F-19063

Mynd 9.4.2-1



Framleiðslukostnaður hráoliú úr vetrni og kolum.

Verksmiðjustærð 50.000 tunnur/dag

(Eftir National Coal Board 1978)

80.01.30

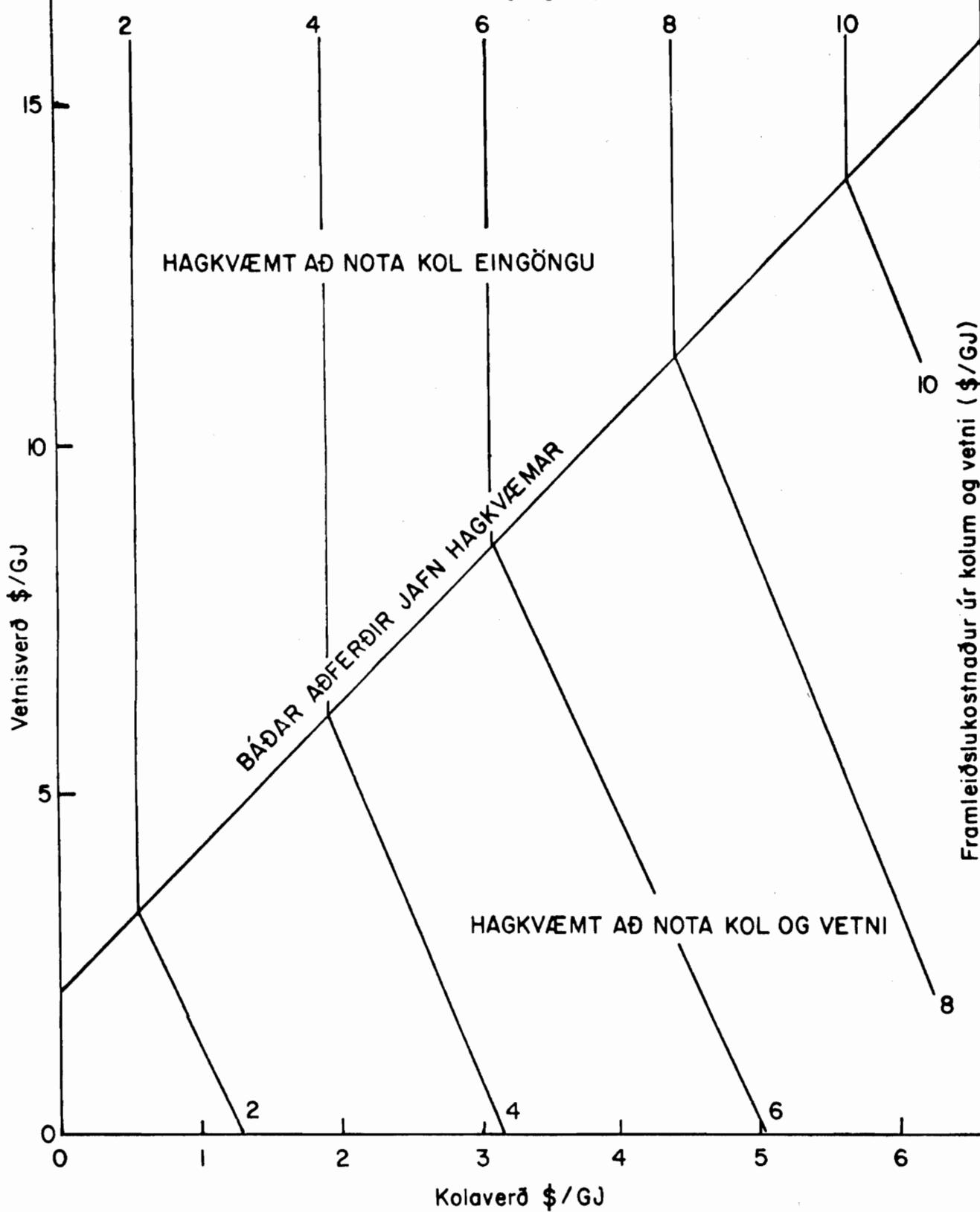
JSG/H

Vinnslut.

F-19064

Mynd 9.4.2-2

Framleiðslukostnaður úr kolum eingöngu (\$/GJ)



Technology, að mór sé jafnvel ódýrari kolefnisgjafi (0,75 \$/GJ) en kol (1-2 \$/GJ), sjá kafla 9.2. Hugsanleg notkun íslensks mós til eldsneytisframleiðslu, með aðferðum svipuðum þeim, sem athugaðar hafa verið af sérfraðingum National Coal Board, gæti því lækkað framleiðslukostnað eldsneytisins verulega frá því sem er, ef notuð eru kol. Sé t.d. gert ráð fyrir að mór gæti komið í stað kola við methanolframleiðslu og mó-verðið væri um 1 \$/GJ, væri þannig, samkvæmt mynd 9.4.2-1, hugsanlegt að framleiða methanol á 4,2 \$/GJ (88 \$/tonn) ef eingöngu væri notaður mór. Því methanolí mætti síðan breyta í bensín, sem þá kostaði 5,3 \$/GJ (235 \$/tonn). Og jafnvel þótt mór reyndist takmarkaður og yrði því sparaður, með því að nota jafnframt vetrni, sem framleitt væri með rafgreiningu á 8,4 \$/GJ (raforkuverð 15 mill/kWh) yrði methanolverðið aðeins um 7,1 \$/GJ (149 \$/tonn) og bensínverðið um 9 \$/GJ (397 \$/tonn). Hér skal þó enn tekið skýrt fram, að mógsun er enn á frumtilraunastigi og móbræðsla hefur enn ekki verið reynd. Á þessu stigi er því allsendis óvist, hvort eldsneytisframleiðsla úr mó getur nokkurn tíma orðið raunveruleiki á Íslandi. Ofangreindar hugmyndir virðast þó réttlæta það, að þessum möguleika sé fyllsti gaumurgefinn og þá ekki aðeins á þann hátt, að landsmenn fylgist eingöngu með því, sem gert er annars staðar, heldur leggi jafnvel eitthvað af mörkum til rannsókna.

Þær áætlanir um framleiðslukostnað fljótandi eldsneytis, sem drepið hefur verið á í kafla 9 eru allmismunandi. Er enda vart við öðru að búast, þar sem þær eru byggðar á mjög mismunandi forsendum. Má þar helst nefna misstórar verksmiðjur, mismunandi viðmiðunarverðlag, mismunandi kolefnisgjafa, mismunandi rafgreiningartækni og mishátt raforkuverð. Gróft á litið er þó vart séð að áætlaður framleiðslukostnaður þess fljótandi eldsneytis, sem til greina kæmi að vinna á Íslandi, sé mjög frábrugðinn því verði, sem landsmenn þurftu að greiða fyrir innflutt eldsneyti, þegar verðið reis hæst í júlí síðastliðnum. Virðist því fyllsta ástæða til að gerð verði rækileg könnun, af þar til fengnum sérfróðum mönnum, á því hvaða eldsneytistegundir aðrar en vetrni kæmi helst til greina að framleiða á Íslandi, með þeirri tækni, sem nú er fyrir hendi, eða verður fyrirsjáanlega fyrir hendi innan tíðar. Jafnframt,

eða í beinu framhaldi af því þarf að gera rækilega hagkvæmniskönnun á þeim leiðum, sem virðast álitlegastar og miða þá við íslenskar aðstæður eingöngu. Fyrst þegar súlikar athuganir liggja fyrir, verður hægt að svara því, hvort yrði raunverulegt verð þess eldsneytis, sem er unnt að framleiða og nota á Íslandi í stað núverandi innflutts eldsneytis.

Hvort ráðlegt sé fyrir íslendinga að nota orkulindir sínar til framleiðslu eldsneytis eða í einhvern annan orkufrekan iðnað, það er svo aftur annað mál, miklu umfangsmeira og þarfnað vissulega rækilegrar athugunar.

HEIMILDASKRÁ

Agust Valfells (1978): Ísland 2000, framleiðsla, fólksfjöldi og lífskjör. Skýrsla saman fyrir Landsvirkjun, nóvember 1978.

Alpaugh R.T., Escher W.J., Foster R.W. and Novil M. (1978): Hydrogen fueled railroad motive power system - a North American view. Proc. 2nd World Hydrogen Energy Conf., Zürich, August 21-24 1978, Vol. 4, bls. 1793-1828.

Andersen H.E.C. (1975): Brændstoffer fra alternative energikilder til nuværende forbrændingsmotorer - Grundlæggende krav og fremstillingsmuligheder. Laboratoriet for Energiteknik, Danmarks Tekniske Højskole, skýrsla RE 75-11.

Anderson V.R. (1978): Hydrogen energy in United States post office delivery system. Proc. 2nd World Hydrogen Energy Conf., Zürich August 21-24, Vol. 4, bls 1879-1902.

Beaufrere A.H., Salzano F.J., Isler R.J. and Yu W.S. (1976): Hydrogen storage via iron-titanium for a 26 MW (e) peaking electric plant. Hydrogen Energy, Vol 1, No. 3, bls 307-320.

Bilgen E., Ducarroir M., Foex M., Sibieude F. and Trombe F. (1977): Use of solar energy for direct and two-step water decomposition cycles. Hydrogen Energy, Vol. 2, No. 3, bls. 251-257.

Billings R.E. (1978): A hydrogen-powered mass transit system. Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 1, bls 49-60.

Bockris J.O.M. and Uosaki K. (1977): Theoretical treatment of photoelectrochemical production of hydrogen. Hydrogen Energy, Vol. 2, No. 2, bls. 123-138.

- Brewer G.D. (1978): Hydrogen usage in air transportation. *Hydrogen Energy*, Vol. 3, No. 2, bls. 217-230.
- Brewer G.D. (1978a): Some environmental and safety aspects of using hydrogen as a fuel. *Hydrogen Energy*, Vol. 3, No. 4, bls. 461-474.
- Bro K. (1975): *Forsøg med methanol, ethanol, methan, brint og ammoniak med pilotinsprøjtning i en forsøgsdieselmotor*. Laboratoriet for Energiteknik, Danmarks Tekniske Højskole, skýrsla RE 75-14.
- Brown W.M., Hudson M. and Kahn H. (1977): Issues relative to the development and commercialization of a coal-derived synthetic liquids industry, economic issues affecting the development of a coal liquefaction industry. Hudson Institute, Inc., HI-2268-RR, May 1977.
- Buchner H. (1978): The hydrogen/hydride energy concept. *Hydrogen Energy*, Vol. 3, No. 4, bls. 385-406.
- Christiansen K. and Grundt T. (1977): Large scale hydrogen production. Technology, experience and application. Skýrsla frá Norsk Hydro, Oslo.
- Conger W.L., Funk J.E., Carty R.H., Soliman M.A. and Cox K.E. (1976): Stage efficiency in the analysis of thermochemical water decomposition process. *Hydrogen Energy*, Vol. 1, No. 3, bls. 245-250.
- Darrow K., Biederman N. and Konopka A. (1977): Commodity hydrogen from off-peak electricity. *Hydrogen Energy*, Vol. 2, No. 2, bls. 175-188.
- Duncan D.A., Beeson J.L. and Oberle R.D. (1978): Coal hydropyrolysis permits product yield variation. Paper presented at A.I.Ch.E. 85th National Meeting, Fuels and Petrochemicals Division, Philadelphia, June 4-8 1978.

Epperly W.R. and Taunton J.W. (1979): Status of Exxon donor solvent coal liquefaction process development. Skýrsla Exxon Research and Engineering Company, New Jersey, July 30, 1979.

Finegold J.G. and van Vorst W.D. (1976): Crash test of liquid hydrogen automobile, Proc. 1st World Hydrogen Energy Conf., Miami, March 1-3 1976, Vol. III, bls. 6c-97 - 6c-111.

Finegold J.G. (1978): Hydrogen: Primary or supplementary fuel for automotive engines. Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 1, bls. 83-104.

Finnbogi Jónsson (1978): Minskat oljeberoende för Island genom metanol-framställning baserad på inhemska energiresurser. Institutionen för Värme- och Kraftteknik, Tekniska Högskolan i Lund, LUTMDM/TMVK-5084/l-40 (1978).

Fueki K. (1976): Efficiency of thermochemical production of hydrogen. Hydrogen Energy, Vol. 1, No. 2, bls. 129-132.

Fujii K., Kondo W., Mizuta W. and Kumagai T. (1977): The calcium iodine cycle for the thermochemical decomposition of water. Hydrogen Energy, Vol. 2, No. 4, bls. 413-422.

Funk J.E. (1976): Thermochemical production of hydrogen via multistage water splitting processes. Hydrogen Energy, Vol. 1, No. 1, bls. 33-44.

Furuhamama S., Yamane K. and Yamaguchi I. (1977): Combustion improvement in a hydrogen fueled engine. Hydrogen Energy, Vol. 2, No. 3, bls. 329-340.

Furuhamama S., Hiruma M. and Enomoto Y. (1978): Development of a liquid hydrogen car. Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 1, bls. 61-82.

Getoff N. (1977): Wasserstoff als Energieträger Springer Verlag 1977.

Gregory D.P. (1972): A new concept in energy transmission. Public Utilities Fortnightly, February 1972.

Gregory D.P. (1972): A hydrogen energy system. Report prepared for The American Gas Association by the Institute of Gas Technology, Chicago, Aug. 1972.

Gregory D.P., Tsaros C.L., Arora J.L. and Neverekar P. (1979): The economics of hydrogen production. Institute of Gas Technology, Chicago, report April 1979.

Gregory D.P., Institute of Gas Technology, Chicago (1979): Munnlegar upplýsingar.

Hadaller O.J. and Momenty A.M. (1979): Alternative fuels for aircraft. Boeing Commercial Airplane Company, report, April 1979.

Hadden L.D. (1978): The economics of producing hydrogen from a small-air blown coal gasifier. Proc. 2nd World Hydrogen Energy Conf., Zürich 21-24 Aug. 1978.

Häfele W. and Sassin W. (1978): Resources and endowments. An outline of future energy systems. Contribution to the NATO Science Committee's Twentieth Anniversary Commemoration Conf., 11-13 April 1978, Brussels.

Hampson P.J., Hart A.B., Jones B, Swift-Hook D.T., Syrett J.J. and Wright J.K. (1975): Can hydrogen transmission replace electricity. CEGB Research, May 1975, bls. 4-11.

Hartig K.J., Kittel G. und Getoff (1977): Wasserstoff als Energieträger. Springer Verlag 1977.

Hauz W., Leeth G. and Meyer C. (1972): Eco-Energy, General Electric TEMPO, report 729206.

Hittman Associatea, Inc. (1978): Economics and market potentials of hydrogen production, report Aug. 1978.

Hord J. (1976): Is hydrogen safe. U.S. National Bureau of Standards. Technical Note TN-690, Oct. 1976.

Hord J. (1978): Is hydrogen a safe fuel. Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 2, bls. 157-176.

Hubbert M.K. (1971): The energy resources of the earth. Scient. Am., Sept. 1971, bls. 61-70.

McHugh G. (1978): The exploitation of wave power by production of energy intensive chemicals. Energy Technology Support Unit, B, 10. 28., A.E.R.E Harwell, Aug. 1978.

Hydrogen Progress (1979): A car with a future: Hydrogen powered Dodge Omni. Jour. Hydrogen Energy Industry Association, Vol. 4, No. 2, bls. 17-21.

Ihara S, (1978): The study of hydrogen production from water using solar thermal energy. Prof. 2nd World Hydrogen Energy Conf., Zürich 21-24 Aug. 1978, Vol. 3, bls. 1121-1234.

Isting C. (1974): Erfahrung mit einem Pipelineverbundnetz für Wasserstoff. 3R International, Heft 6, bls. 2-8.

Kahl H., Linde Aktiengesellschaft (1978): Munnlegar upplýsingar.

Kelly J.H. (1977): Proceedings of the DOE chemical/hydrogen energy systems, contractor review. Skýrsla U.S. Department of Energy, ritstjóri J.H.Kelly, ágúst 1978.

Kelly J.H. and Hagler R. (1978): Storage transmission and distribution of

hydrogen. Proc. 2nd World Hydrogen Energy Conf., Zürich 21-24 Aug. 1978, Vol. 1, bls. 25-54.

Knoche K.F., Cremer H. and Steinborn G. (1976): A thermochemical process for hydrogen production, Hydrogen Energy, Vol. 1, No. 1, bls 23-32.

Knoche K.F., Cremer H. and Steinborn G. (1977): Feasibility studies of chemical reactions for thermochemical water splitting cycle of the iron-chlorine, iron-sulfur and manganese-sulfur families. Hydrogen Energy, Vol. 2, No. 3, bls. 269-290.

Knoche K.F., Cremer H., Breywich D., Hegels S., Steinborn G. and Wüster G. (1978): Experimental and theoretical investigation of thermochemical hydrogen production. Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 2, bls. 209-216.

Korycinski R.F. (1978): Air terminals and liquid hydrogen commercial air transports. Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 2, bls. 231-250.

Laskin J.B. and Feldwick R.D. (1976): Recent developments of large electrolytic hydrogen generators. Proc. 1st World Hydrogen Energy Conf., Miami 1-3 March 1976, Vol. 2, bls. 6B-3 - 6B-20.

Leeth G.G. (1976): Energy transmission systems. Hydrogen Energy, Vol. 1, No. 1, bls. 49-54.

Lynch F.E. and Snabe E. (1978): The role of metal hydrides in hydrogen storage and utilization. Proc. 2nd World Hydrogen Energy Conf., Zürich 21-24 Aug. 1978, Vol. 3, bls. 1475-1524.

Lynch F.E., Denver Research Institute (1979): Munnlegar upplýsingar.

Marchetti C. (1979): Why hydrogen. Hydrogen Energy, Vol. 4, No. 1, bls. 1-6.

Mason C.F.V. (1977): The use of chromium bromide hydrates in the sulfuric acid-hydrogen bromide cycle for the production of hydrogen thermochemically. Estimates of cycle efficiency. *Hydrogen Energy*, Vol. 2, No. 4, bls. 423-430.

Mathis D.A. (1976): Hydrogen technology for energy. Noyes Data Corporation, New Jersey, U.S.A., 285 bls.

Meisel S.L., McCullough J.P., Lechthaler C.H. and Weisz P.B. (1976): Gasoline from methanol in one step. *Chemtech*, February 1976, bls. 86-89.

Menth A. and Stucki S. (1978): Present state and outlook of the electrolytic H₂-production route. *Proc. 2nd World Hydrogen Energy Conf.*, Zürich 21-24 Aug. 1978, Vol. 1,

Mikolowsky W.T. and Noggle L.W. (1978): The potential of liquid hydrogen as a military aircraft fuel. *Hydrogen Energy*, Vol. 3, No. 4, bls. 449-460.

National Coal Board, England (1978): The use of non-fossil derived hydrogen in coal conversion processes. Final report, June 1978, on Research Project XII/797/76 068-76 EHUK, to the Commission of the European Communities, 57 bls.

Neil G., Nicholas D.J.D., Bockris J.O.M. and McCann J.F. (1976): The photosynthetic production of hydrogen. *Hydrogen Energy*, Vol. 1, No. 1, bls. 45-48.

Northrup C.J.M., Gerlach T.M., Modreski P.J. and Galt J.K. (1978): Magma: A potential source of fuel. *Hydrogen Energy*, Vol. 3, No. 1, bls. 1-10.

Nozik A.J. (1978): Hydrogen generation via photoelectrolysis of water. Present advances. *Proc. 2nd Hydrogen Energy Conf.*, Zürich, Vol. 3, bls. 1217-1246.

Nuttall L.J. (1976): Conceptual design of large scale water electrolysis plant by using the solid polymer electrolyte technology. Proc. 1st World Hydrogen Energy Conf., Miami 1-3 March 1976, Vol. 2, bls. 6B-21 - 6B-22.

Nuttall L.J. (1977): Conceptual design of large scale water electrolysis plant using solid polymer electrolyte technology. Hydrogen Energy, Vol. 2, No. 4, bls. 395-404.

Nuttall L.J. (1979): Production and application of electrolytic hydrogen, present and future. General Electric Company, Aircraft Equipment Division, report 6. April 1979.

Oliunefnd (1979): Áfangaskýrsla I til ríkisstjórnar Íslands, júlí 1979.

Óskar B. Bjarnason (1952): Íslenskur mór. Fjöldit Rannsóknarráðs, Nr. 3, 99 bls.

Óskar B. Bjarnason (1966): Íslenskur mór. Rit Iðnaðardeildar Atvinnudeildar Háskólans, 88 bls.

Otha T., Asakura S., Yamaguchi M., Kamiya N., Gotok N. and Ootagawa T. (1976): Photochemical and thermoelectric utilization of solar energy in a hydrid water-splitting system. Hydrogen Energy, Vol. 1, No. 2, bls. 113-116.

Otha T. and Veziroglu T.N. (1976): Hydrogen production using solar radiation. Hydrogen Energy, Vol. 1, No. 3, bls. 255-263.

Pescheck G.A. (1977): Wasserstoff als Energieträger. Springer Verlag 1977.

Punwani D.V. (1978): Status of the peatgas process. Paper presented at the Tenth Synthetic Pipeline Gas Symposium, Chicago, Oct. 30-Nov. 1 1978.

- Punwani D.V., Weil S.A., Paganessi J.E. and Kopstein M.J. (1979):
Synthetic fuels from peat gasification. Paper presented at
the Fourteenth Intersociety Energy Conversion Engineering
Conf., Gasification under Fossil Energy Sources, Boston 5-10
Aug. 1979.
- Quade R.N. (1977): Hydrogen production from coal using nuclear heat
source. *Hydrogen Energy*, Vol. 2, No. 2, bls. 91-99.
- Rockwell International (1972): Rocket power to light the cities. *Skyline Magazine*, Vol. 30, No. 4.
- Runólfur Þórðarson (1979): Framleiðsla vettvis á Íslandi. Skýrsla samin
fyrir Orkustofnun.
- Schuetz G.H. (1977): Hydrogen producing cycles using electricity and
heat - hydrogen halide cycles: electrolysis of HBr. *Hydrogen Energy*, Vol. 1, No. 4, bls. 379-388.
- Schulten R. (1978): Nuclear energy as a primary energy source for hydrogen
production. Prof. 2nd World Hydrogen Energy Conf., Zürich 21-
24 Aug. 1978, Vol. 1, bls. 3-24.
- Sigvaldason G.E. and Elisson G. (1968): Collection and analysis of
volcanic gases at Surtsey, Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta*,
Vol. 32, bls. 797-805.
- Smith N., Air Products and Chemicals (1979): Munnlegar upplýsingar.
- Solar S. und Getoff N. (1977): Wasserstoff als Energieträger. Springer
Verlag 1977.
- Soliman M.A., Conger W.L., Carty R.H., Funk J.E. and Cox K.E. (1976):
Hydrogen production via thermochemical cycles based on sulfur
chemistry. *Hydrogen Energy*, Vol. 1, No. 3, bls. 265-270.

Srinivasan S. and Salzano F.J. (1976): Prospects for hydrogen production by water electrolysis to be competitive with conventional methods. Proc. 1st World Hydrogen Energy Conf., Miami 1-3 March 1976, Vol. 2, bls. 6B-23 - 6B-38.

Steinberg M. (1977): Synthetic carbonaceous fuels and feedstocks from oxides of carbon and nuclear power. Paper presented at the Twelfth Intersociety Energy Conversion Engineering Conf., Washington D.C., 28 Aug - 2 Sept. 1977, 26 bls.

Steinberg M. and Baron S. (1977): Synthetic carbonaceous fuel and feedstock using nuclear power, air and water. Hydrogen Energy, Vol. 2, No. 2, bls. 189-208.

Strickland G., Brookhaven National Laboratory (1979): Munnlegar upplýsingar.

Swisher J.H., U.S. Department of Energy (1979): Munnlegar upplýsingar.

Tek M.R. and Wilkies J.O. (1966): New concepts in underground storage of natural gas. Monograph prepared for The American Gas Association, New York, bls. 258-273.

Thibault J.J. (1978): The cryogenic storage of hydrogen. Proc. 2nd World Hydrogen Energy Conf., Zürich 21-24 Aug. 1978, Vol. 3, bls. 1457-1474.

Tsaros C.L. Arora J.L. and Bunham K.B. (1976): A study of the conversion of coal to hydrogen, methane and liquid fuels for aircraft. Institute of Gas Technology, Chicago, contract NASI-13620.

Valette P., Valette L., Siebker M. and Leclercq J. (1979): Analysis of a Delphy study on hydrogen. Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 2, bls. 251-259.

Wilson C.L. (1977): Energy: Global prospects 1985-2000. Report of the Workshop on Alternative Energy Strategies, project director Caroll L. Wilson, Mc Graw Hill, 291 bls.

Witcofski R.D. (1976): The thermal efficiency and cost of producing hydrogen and other synthetic aircraft fuels from coal. Proc. 1st World Hydrogen Energy Conf., Miami 1-3 March 1976, Vol. 3, bls. 5C-3 - 5C-30.

Witcofski R.D. (1977): The thermal efficiency and cost of producing hydrogen and other synthetic aircraft fuels from coal. Hydrogen Energy, Vol. 1, No. 4, bls. 365-278.

Wooley R.L. and Henriksen D.L.(1977): Water induction in hydrogen-powered IC engines. Hydrogen Energy, Vol. 1, No. 4, bls. 401-412.

Wooley R.L. (1978): Design consideration for the Riverside hydrogen bus. Proc. 2nd World Hydrogen Energy Conf., Zürich 21-24 Aug. 1978, Vol. 4, bls. 1829-1850.

van Vorst W.D. and Finegold J.G. (1975): Hydrogen as an automotive fuel. Paper presented at the U.S. - Japan joint seminar, Key Technologies for the Hydrogen Energy System, July 1975, Tokyo.

VIÐBÆTIR

Properties of hydrogen. Thermophysical properties listed are those of parahydrogen. (Hord 1978).

Molecular weight	2.016
Triple point pressure, atm	0.0695
Triple point temperature, K	13.803
Normal boiling point (NBP) temerature, K	20.268
Critical pressure, atm	12.759
Critical temperature, K	32.976
Density at critical point, g/cm ³	0.0314
Density of liquid at triple point, g/cm ³	0.0770
Density of solid at triple point, g/cm ³	0.0865
Density of vapor at triple point, g/m ³	125.597
Density of liquid at NBP, g/cm ³	0.0708
Density of vapor at NBP, g/cm ³	0.00134
Density of gas at NTP, g/m ³	83.764
Density ratio: NBP liquid-to-NTP gas	845
Heat of fusion, J/g	58.23
Heat of vaporization, J/g	445.59
Heat of sublimation, J/g	507.39
Heat of combustion (low), kJ/g	119.93
Heat of combustion (high), kJ/g	141.86
Specific heat (C _p) of NTP gas, J/g-K	14.89
Specific heat (C _p) of NBP liquid J/g-K	9.69
Specific heat ratio (C _p /C _v) of NTP gas	1.383
Specific heat ratio (C _p /C _v) of NBP liquid	1.688
Viscosity of NTP gas, g/cm-s	0.0000875
Viscosity of NBP liquid, g/cm-s	0.000133
Thermal conductivity of NTP gas, mW/cm-K	1.897
Thermal conductivity of NBP liquid, mW/cm-K	1.00
Surface tension of NBP liquid, N/m	0.00193
Dielectric constant of NTP gas	1.00026
Dielectric constant of NBP liquid	1.233

Index of refraction of NTP gas	1.00012
Index of refraction of NBP liquid	1.110
Adiabatic sound velocity in NTP gas, m/s	1294
Adiabatic sound velocity in NBP liquid, m/s	1093
Compressibility factor (Z) in NTP gas	1.0006
Compressibility factor (Z) in NBP liquid	0.01712
Gas constant (R), $\text{cm}^3\text{-atm/g-K}$	40.7037
Isothermal bulk modulus (α) of NBP liquid MN/m^2	50.13
Volume expansivity (β) of NBP liquid, K^{-1}	0.01658
Limits of flammability in air, vol. %	4.0 to 75.0
Limits of detonability in air, vol. %	18.3 to 59.0
Stoichiometric composition in air, vol. %	29.53
Minimum energy for ignition in air, mJ	0.02
Autoignition temperature, K	858
Hot air-jet ignition temperature, K	943
Flame temperature in air, K	2318
Percentage of thermal energy radiated from flame to surroundings, %	17 to 25
Burning velocity in NTP air, cm/s	265 to 325
Detonation velocity in NTP air, km/s	1.48 to 2.15
Diffusion coefficient in NTP air, cm^2/s	0.61
Diffusion velocity in NTP air, cm/s	≤ 2.00
Buoyant velocity in NTP air, m/s	1.2 to 9
Maximum experimental safe gap in NTP air, cm	0.008
Quenching gap in NTP air, cm	0.064
Detonation induction distance in NTP air	$L/D \approx 100$
Limiting oxygen index, vol. %	5.0
Vaporization rates (steady state) of liquid pools without burning, cm/min	2.5 to 5.0
Burning rates of spilled liquid pools, cm/min	3.0 to 6.6
Flash point, K	gaseous
Toxicity	nontoxic (asphyxiant)
Energy *) of explosion, (g TNT) (g fuel)	~ 24
Energy *) of explosion, (g TNT) (cm^3 NBP liquid fuel)	1.71
Energy *) of explosion (kg TNT)/(m ³ NTP gaseous fuel)	2.02

*) Theoretical explosive yields.