



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

TVÍVÖKVAKERFI
Afköst, nýtni og hagkvæmni

Guðni Ingimarsson
Hjörleifur Jakobsson

OS-85067/JHD-30 B

Ágúst 1985



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknúmer : 370-322

TVÍVÖKVAKERFI
Afköst, nýtni og hagkvæmni

Guðni Ingimarsson
Hjörleifur Jakobsson

OS-85067/JHD-30 B

Ágúst 1985

EFNISYFIRLIT

	bls.
Inngangur.....	3
1. Varmafræðilegir útreikningar.....	4
1.1. Tvívökva kerfið.....	4
1.2. Vinnuvökvar.....	6
1.3. Kælivatn.....	7
1.4. Notkunarmöguleikar.....	8
2. Haqkvæmnisreikningar.....	9
2.1. Forsendur.....	9
2.2. Stofnkostnaður.....	10
2.3. Rekstrarkostnaður.....	10
2.4. Tekjur.....	11
2.5. Núvirði fjárfestinarinnar.....	12
2.6. Endurgreiðslutími.....	14
2.7. Niðurstöður.....	16

INNGANGUR

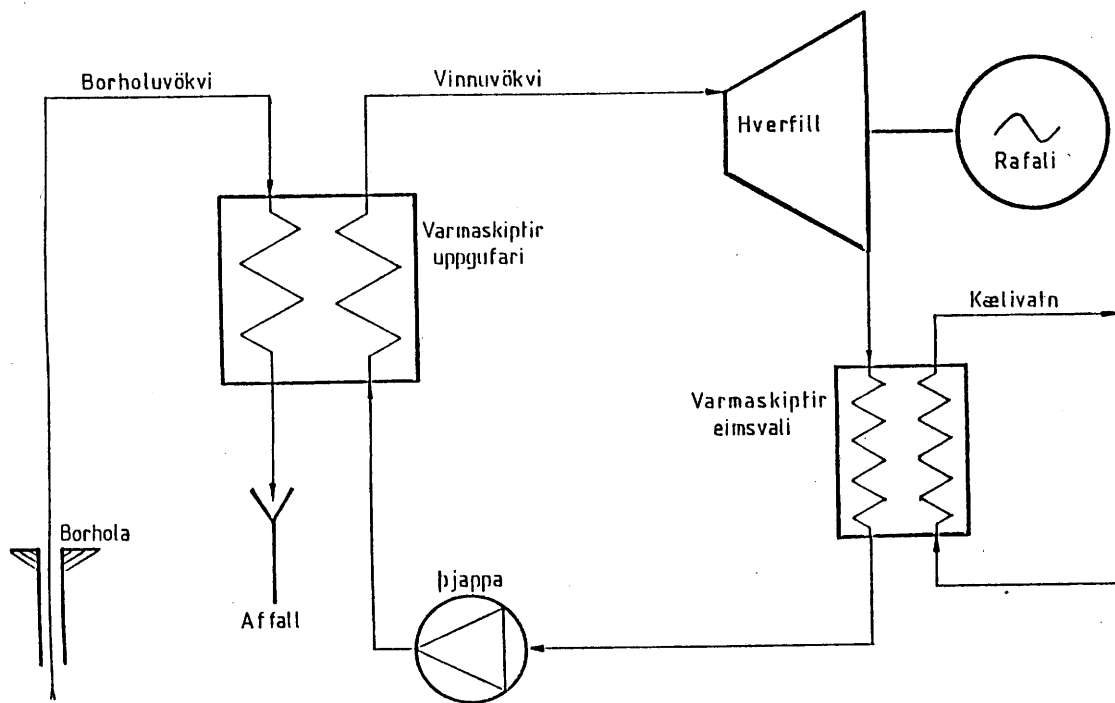
Vegna þess hve hátt verð á raforku og olíu er hér á landi, leita menn sífellt nýrra leiða til orkuvinnslu. Ein slík leið til raforuvinnslu er svokallað tvívökvakerfi. Í meðfylgjandi skýrslu sem unnin var á vegum Orkustofnunar er gerð grein fyrir því hvað tvívökvakerfi er og hvernig það vinnur. Einnig er kostnaður við slíkt kerfi tekinn fyrir. Tvívökvakerfi eru tiltölulega dýr í innkaupum en skv. því sem framleiðendur gefa upp er endingartíminn langur og viðhaldskostnaður lítill. Framleiðendur telja einnig að í raun henti þessi kerfi best þar sem viðhald er erfitt og dýrt, t.d. þar sem um langan veg er að fara. Hagkvæmnisútreikningar eru aðeins gerðir fyrir einn notkunarmöguleika, b.e. samrekstur með fiskeldi. Ástæðan er sú að þessi kostur er mjög fýsilegur og aðilar sem slíka atvinnu stunda hafa sýnt honum mikinn áhuga.

Til afl- og nýtniútreikninga er notað forrit sem unnið var af Guðna Ingimarssyni sem lokaverkefni í vélaverkfræði við H.Í. vorið 1985.

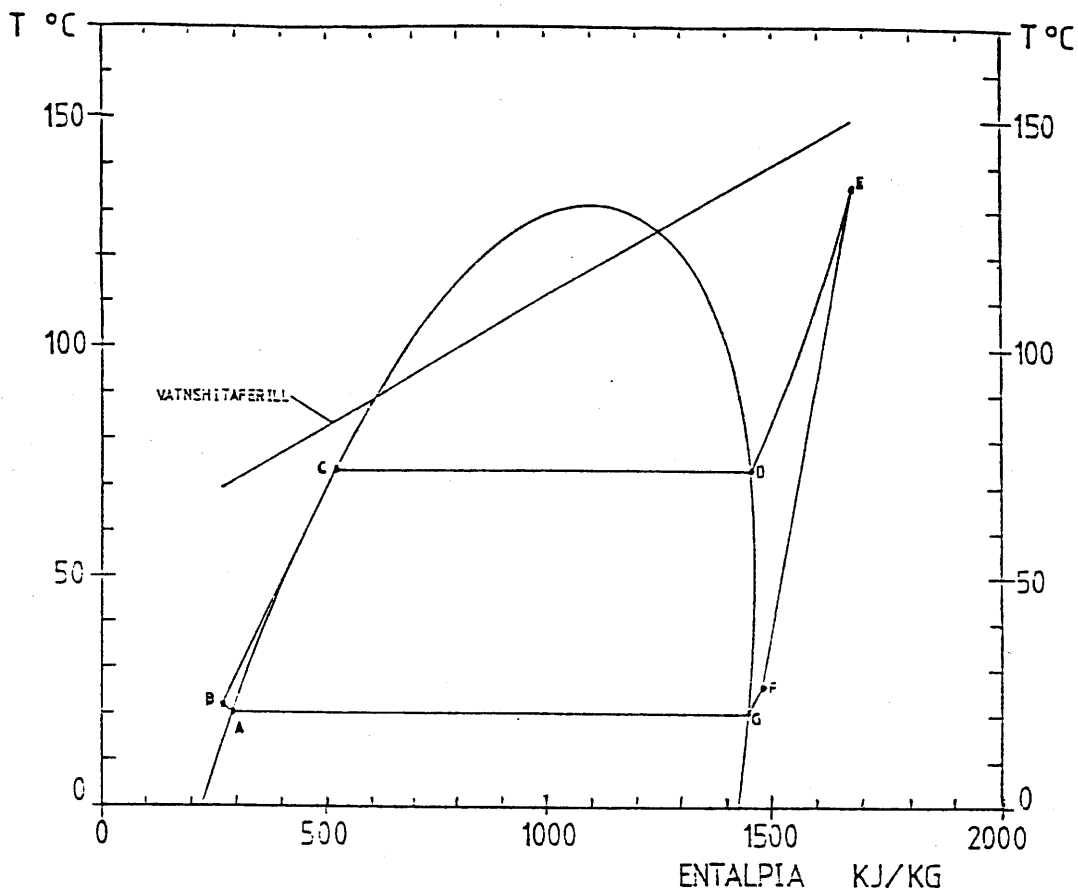
1 VARMAFRÆÐILEGIR EIGINLEIKAR

1.1 Tvívökva kerfið

Tvívökvakerfi er þýðing á enska orðinu Binary cycle. Með því er átt við notkun lokaðs Rankine vinnuhrings til raforkuframleiðslu. Tvívökvakerfið er einkum fýsilegur kostur til vinnslu rafmagns í smáum stíl (20 til 300 kW) og þá aðallega á lághitasvæðum (90 til 150°C). Lágt suðumark og hár mólþungi gerir það að verkum að þetta lága hitastigi er nýtílegt og hverflar og annað verður fyrirferðalítið. Dæmigerð stærð eins kerfis er 3x2x7 metrar. Mynd 1 sýnir tvívökvakerfi skematískt og vinnuhringurinn er teiknaður á mynd 2.



Mynd 1. Skematísk mynd af tvívökvakerfi



Vinnuhringur R717 með borholuhitastig 150 gr C og kalivatnshitastig 15 gr C. Sýndur er hagkvæmasti þrýstimunur með hæsta þrýsting 36.98 bar en lægsta þrýsting 8.88 bar. Nýtni vinnuhringisins er 13.9 % en yfirfærslunýtnin er 50.2 %.

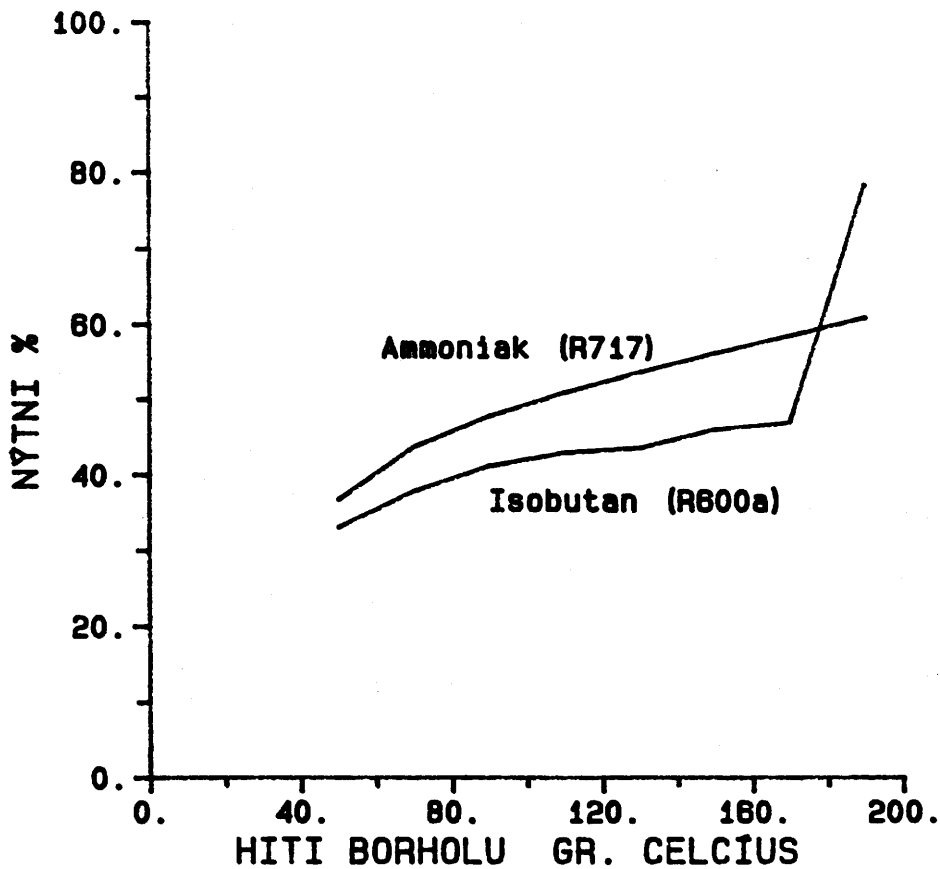
Þjappa tekur vinnuvökvann við lægsta þrýsting í A og dælir honum við hæsta þrýsting inni varmaskipti í B. Þar tekur við hitun að C þar sem uppgufun við fast hitastig hefst. Í D verður vinnuvökvinn yfirhituð gufa og er hituð upp í E. Þar fer gufan gegnum hverfil og þenst niður í lægsta þrýsting í F. Frá F til G er yfirhitaða gufan kæld niður í mettnarhtastig og að lokum þétt við fast hitastig.

Mynd 2. Vinnuhringur tvívökvakerfis ásamt skýringum

1.2 Vinnuvökvar.

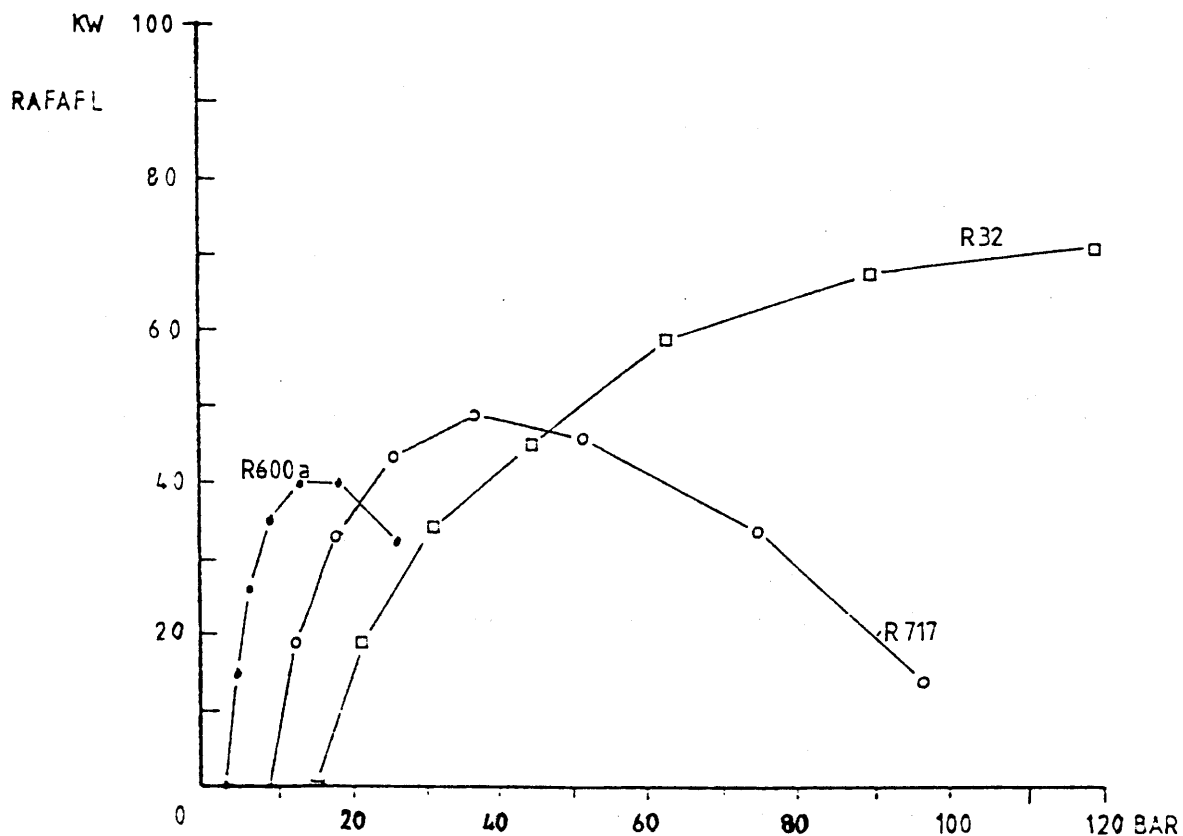
Yfirleitt eru notaðir sömu vinnuvökvar á tvívökvakerfi og á kælikerfi. Það eru flúorkolefnasambönd og kolvetnasambönd, oft blöndur tveggja eða fleyrri efna.

Hitastigi orkulindar ræður mestu um það hvaða vinnuvökvi er valinn. Á mynd 3 sést hvernig nýtnin er mismunandi fyrir ammoníak og isobutan sem fall af hitastigi borholu. Þessi nýtni er reiknuð sem hlutfall af Carnotnýtni. Reiknað er það afl sem Carnot vél getur unnið úr borholunni miðað við að hitastigið sé fellt niður í lágsta hitastigi í vinnuhringum. Þá er reiknað það rafafli sem tvívökvakerfið getur unnið. Hlutfallið bar á milli er kallað nýtni (sjá mynd 3).



Mynd 3. Nýtni sem fall af hitastigi

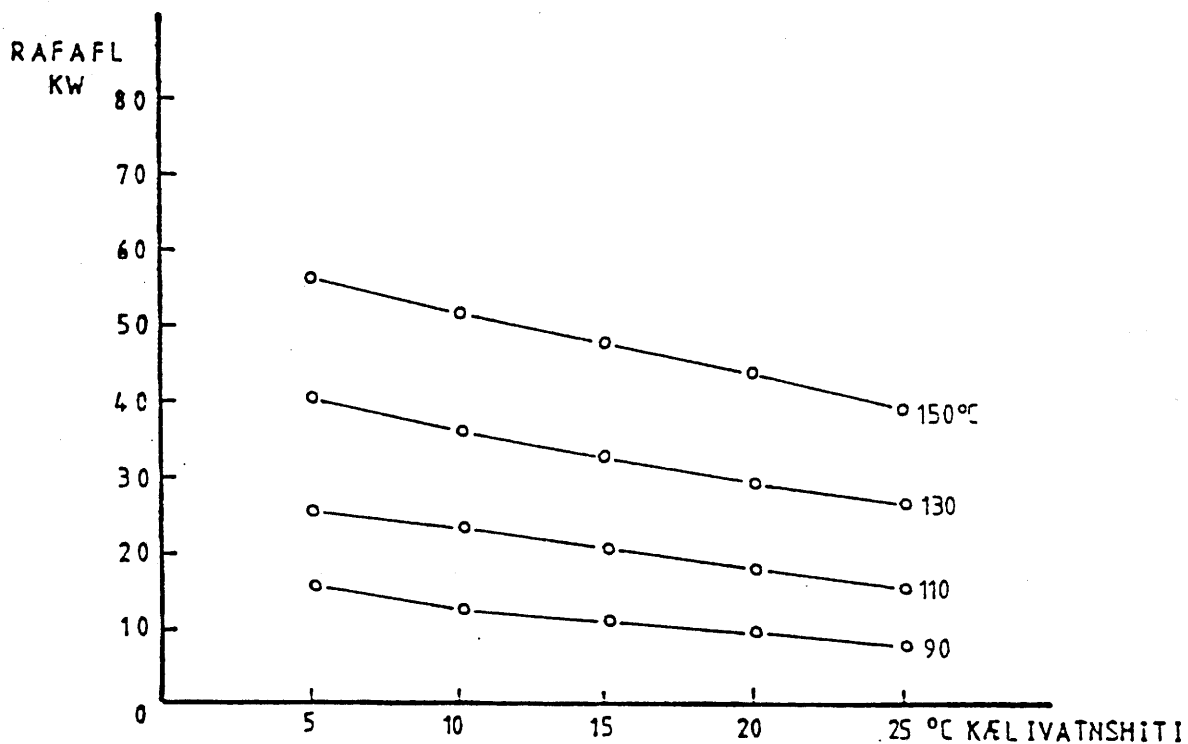
Hagkvæmasti brýstingur inn á hverfil er einnig mismunandi eftir vinnuvökvum. Mynd 4 sýnir hvernig þessu er háttað en þar er rafafli sem vinna má úr 150°C heitri borholu og 15°C heitu kælivatni teiknað fyrir 3 mismunandi vinnuvökva. Aflið er sýnt sem fall af brýstingi inn á hverfil.



Mynd 4. Rafafli sem fall af brýstingi inn á hverfil

1.3 Kælivatn

Tvívökvakerfi notar mikið magn af kælivatni til þéttingar á vinnuvökva eftir benslu í hverfli. Kælivatnið hitnar tiltölulega lítið eða aðeins um 10 til 15°C. Hitastig kælivatnsins hefur mikil áhrif á afkastagetu kerfisins og er æskilegt að hafa það sem kaldast. Á mynd 5 er sýnt hvernig afköstin breytast með kælivatnshitanum. Sýndir eru ferlar fyrir nokkur borholuhitastig. Ammoniak (R717) var notað í þessu tilfelli.



Mynd 5. R717. Rafafli sem fall af kælivatnshita fyrir mismunandi borholuhita. Miðað er við að 1 kg/s renni úr borholunni og því er eining rafaflsins kW/kg/s

1.4 Notkunarmöguleikar

Möguleiki á vinnslu raforku með tvívökvakerfi er víða fyrir hendi. Hitastig frá 90 til 200°C er heppilegast, þó misjafnt eftir því hvaða efni er notað sem orkugjafi. Lægsta hitastig sem nýtt er nú er 57°C og er það í Kína. Það er bó ekki hagkvæmt vegna lélegrar nýtingar og stórra varmaskipta.

Orkulindir á hitastigsbilinu 90 til 200°C er mjög víða að finna hér á landi, þ.e. hitaveituvatn og einnig afgangsvarmi frá verksmiðjum. Frystihús og önnur fiskvinnslufyrirtæki gætu hugsanlega notað tvívökvavél sem nýtir afgangsvarma til að lækka afltoppa raforkunotkunar.

Ef gas er notað sem orkugjafi er heppilegasta hitastigsbilið frá 180 til 400°C. Því hafa verið kynntar hugmyndir um nýtingu afgass frá

skipavélum og öðrum diesel vélum til raforkuframleiðslu en þær hugmyndir eru enn lítið bróaðar.

Samrekstur með fiskirækt er mjög fýsilegur kostur, þar sem nota má kælivatnið til fiskeldis ásamt því að nýta borholuvatnið enn frekar til hitunar ferskvatns. Fiskeldi krefs mikils afls til dælingar á sjó og ferskvatni og því er eigin raforkuframleiðsla heppileg. Hagkvæmnisútrikningar fyrir þennan möguleika er gerðir í kafla tvö í þessari skýrslu.

Síðastliðin ár hefur það færst í vöxt að bændur og sveitarfélög taki sig saman og bori eftir heitu vatni. Það vatn sem fæst er oft á tíðum heitara en svo að hægt sé að veita því beint inná ofnakerfi eða til neyslu. Í stað uppblöndunar með köldu vatni er það fýsilegur kostur að kæla heita vatnið niður í nothæft hitastig (80°C) með því að nota tvívökvakerfi til raforkuvinnslu úr því. Raforkan er síðan notuð til dælingar úr borholu og inná veitukerfi.

2 HAGKVÆMNISREIKNINGAR

2.1 Forsendur

Borhola sú sem fyrirhugað er að virkja er í Ölfusi í Árnessýslu. Hún er 118°C heit og rennslið er 13 l/s. Áætlað er að með tvívökva raforkuaflvél megi framleiða allt að 255 kW. Ekki er alveg ljóst hver aflþörfin er en raforkuframleiðsla þessi yrði í samrekstri með fiskirækt. Gert er ráð fyrir að raforkan yrði notuð til að dæla vatni úr borholu og til dælingar á vatni til fiskeldisins ásamt annari einkanotkun. Í þessum hagkvæmnireikningum er gert ráð fyrir að holan sé fullvirkjuð og allt umframrafmagn selt til RARIK. Skýrt skal tekið fram að hagkvæmnireikningar sem hér fara á eftir eru allir miðaðir við eina ákveðna aflvél og skulu þeir teknir með þeim fyrirvara. Útreikningarnir miðast við gengi og verðlag 1. áqúst 1985.

2.2 Stofnkostnaður

Hjá framleiðanda fékkst uppgæfið að verð aflvélar er \$450.000 og er flutningskostnaður til Reykjavíkur innifalinn. Þá er miðað við 300 kW aflvél sem er sú stærð sem næst er 255 kW. Flutningur frá Reykjavík og austur í Ölfus er um 6500 kr. skv GG taxta. Aflvélin þarf að standa í um það bil 60 m skýli og er kostnaður við það metinn sem helmingur af kostnaði við jafnstórt iðnaðarhús. Upplýsingar um slíkt hús fengust hjá Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins. Uppsetning er metin 10 % og annað og ófyrirséð 10 %. Skýrt skal tekið fram að ekki er gert ráð fyrir neinum gjöldum við innflutning aflvélarinnar.

Stofnkostnaður verður því:

Aflvél	\$450.000 á 41 kr/\$	18.450.000 kr.
Hús	60 m ² á 8000 kr/m ²	480.000 -
Flutn. austur		6.500 -

		18.936.500 kr.
Uppsetning	10 %	1.893.650 -
Annað	10 %	1.893.650 -

Samtals		22.723.800 kr.
		=====

2.3 Rekstrarkostnaður

Framleiðendur gera ráð fyrir því að \$1000 fari í árlegan efniskostnað og 150 manntímar í vinnu.

Rekstrarkostnaður verður því:

Efni	\$1000 á 41 kr/\$	41.000 kr.
Vinna	150 klst á 300 kr/klst	45.000 -

Samtals		86.000 kr.
		=====

2.4 Tekjur

Tekjur eru metnar í tvennu lagi, annars vegar eigin notkun sem ella væri keypt skv. taxta RARIK og hins vegar bein sala til RARIK á heildsölutaxta Landsvirkjunar. Til greina koma tveir taxtar hjá RARIK. Annar taxtinn er marktaxti (A.5) sem gildir að jafnaði fyrir bændur en miðast við aflnotkun að 20 kW. Hinn er afltaxti (B.1) sem miðast við aflnotkun yfir 15 kW.

A.5 taxti RARIK er:

Orkugjald	1,04 kr/kWh
Orkugj.-niðurgr.	0,59 kr/kWh
Aflgj. lág. 4 kW	22660,00 kr/ár
Aflgj. 5-20 kW	3777,00 kr/kWh/ár
Orkugj. af yfirn.	4,61 kr/kWh

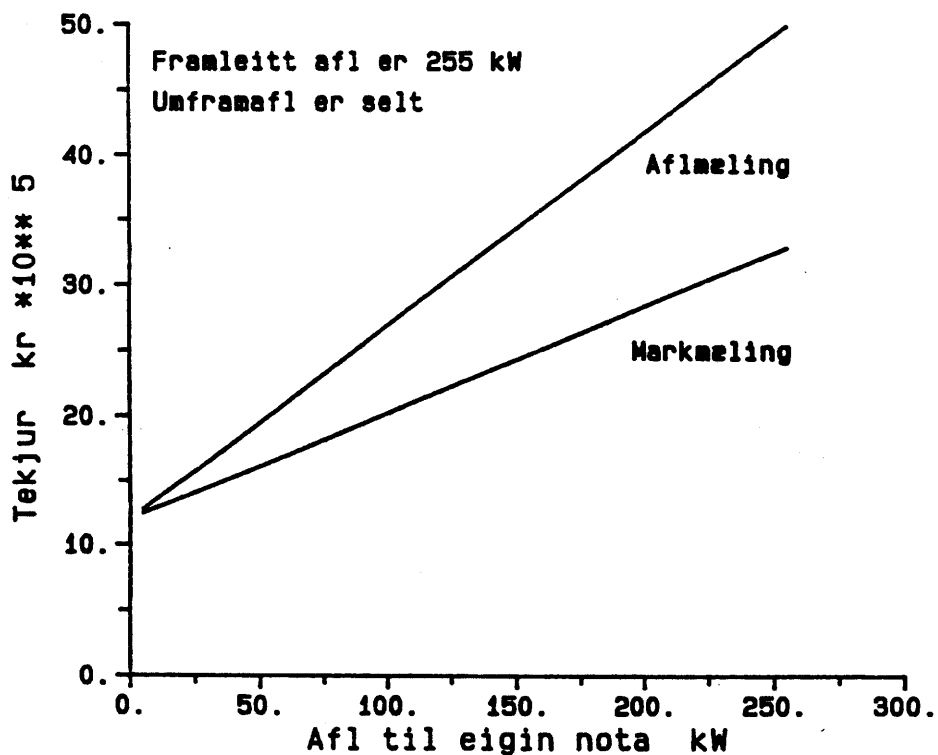
B.1 taxti RARIK er:

Orkugjald	1,47 kr/kWh
Aflgj. lág. 15 kW	100170,00 kr/ári
Aflgjald	6678,00 kr/kWh/ári

Heildsölutaxti Landsvirkjunar er:

Aflgjald	3469 kr/kWh/ári
Orkugjald 0-2500 nýt.st.	1,105 kr/kWh
Orkugjald 2500-4000 nýt.st.	0,649 kr/kWh
Orkugjald yfir 4000 nýt.st.	0,228 kr/kWh

Heildartekjur velta síðan mikið á því hversu mikið er selt og hve mikið er notað til eigin reksturs. Mynd 6 sýnir hvernig tekjurnar breytast eftir notkun og sölu. Sýndar eru tekjur bæði ef reiknað er eftir markmælingu og aflmælingu. Reiknað er með að eigin notkun sé allan sólarhringinn og seld orka hafi 5500 nýtingarstundir á ári.



Mynd 6. Tekjur sem fall af eigin notkun

Greinilegt er að að hagkvæmast er að nýta aflvélina sem mest til eigin nota. Í báðum tilvikum er borholan fullnýtt til raforkuframleiðsu og umframorka seld.

2.5 Núvirði fjárfestingar

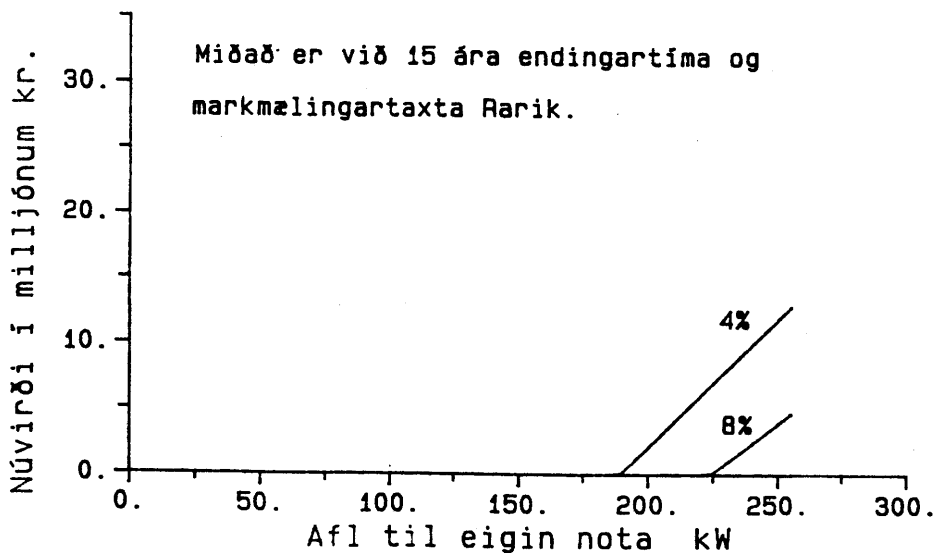
Núvirði fjárfestingarinnar reiknast með formúlunni:

$$P = (A-R) * \left(\frac{1-(1+I)^{-N}}{I} \right) - S$$

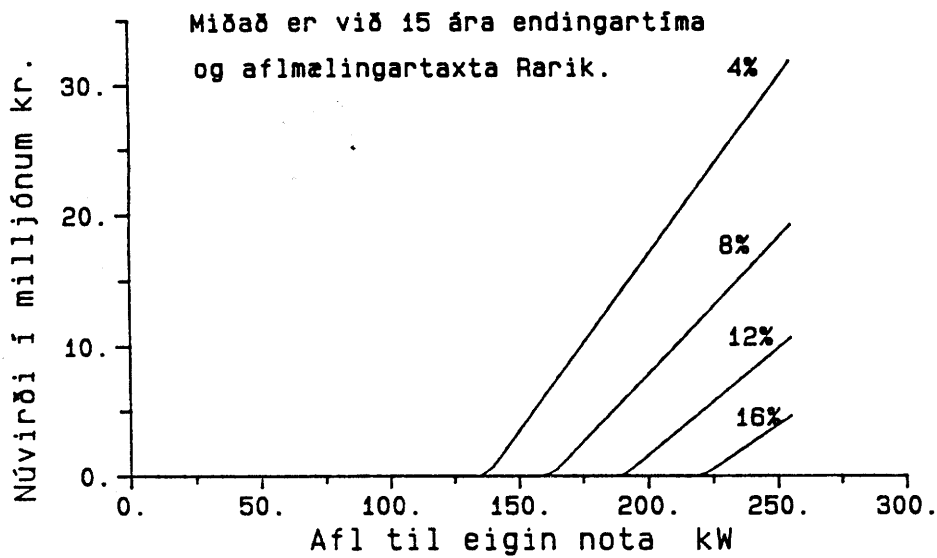
þar sem:

- P = Núvirði
- A = Árlegar tekjur
- R = Árlegur kostnaður
- I = Vextir
- N = Endignartími
- S = Stofnkostnaður

Myndir 7 og 8 sýna hvernig núvirði fjárfestingarinnar breytist eftir því hvernig tekjur eða afl til eigin nota breytist. Gert er ráð fyrir 15 ára endingartíma og sýndir eru ferlar fyrir 4, 8, 12 og 16 % vaxtakröfu fjárfestingar. Mynd 7 sýnir niðurstöður ef reiknað er með markmælingu en mynd 8 ef reiknað er með aflmælingu. Ef núvirðið er minna en 0 er það ekki teiknað. Á myndum 7 og 8 sést að eigin aflþörf þarf að vera töluvert mikil til þess að það borgi sig að fullvirkja holuna, eða a.m.k. 130 kW. Þá er reiknað með að kaupa hefði þurft orkuna á afltaxta og 4% vexti. Ef orkan hefði verið keypt á marktaxta og miðað við 4% vexti þá hefði eigin aflþörf þurft að vera a.m.k. 180 kW. En algeng vaxtakrafa er milli 8 og 12% þannig að í raun þarf eigin aflþörf að vera 200 til 250 kW.



Mynd 7. Núvirði fjárfestingar ef reiknað er með markmælingu og 15 ára endingu. Sýndir eru ferlar fyrir mismunandi vexti



Mynd 8. Núvirði fjárfestingar ef reikmað er með aflmælingu og 15 ára endingu. Sýndir eru ferlar fyrir mismunandi vexti

2.6 Endurgreiðslutími

Einnig má meta hagkvæmnina með því að reikna endurgreiðslutíma fjárfestingarinnar. Endurgreiðslutímamán má reikna skv:

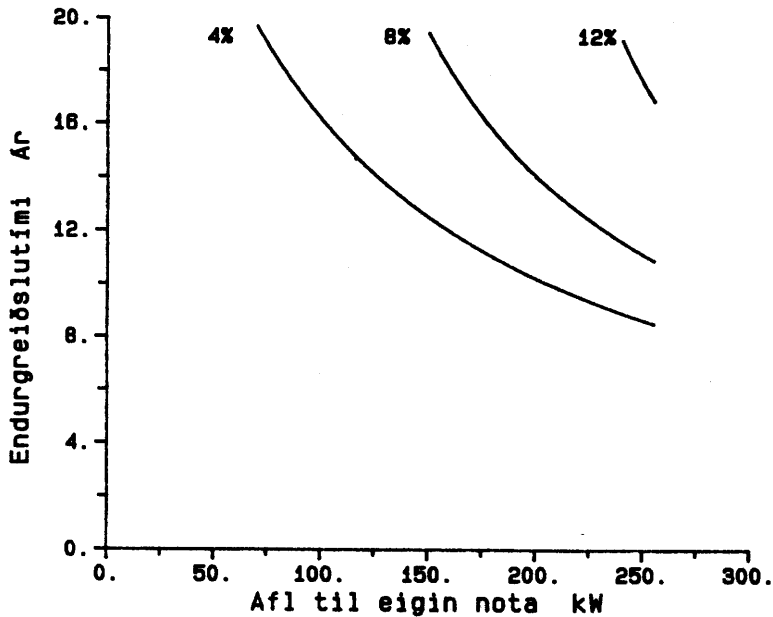
$$E = -1 * \left(\frac{\ln (1-I*S/(A-R))}{\ln (1+I)} \right)$$

þar sem:

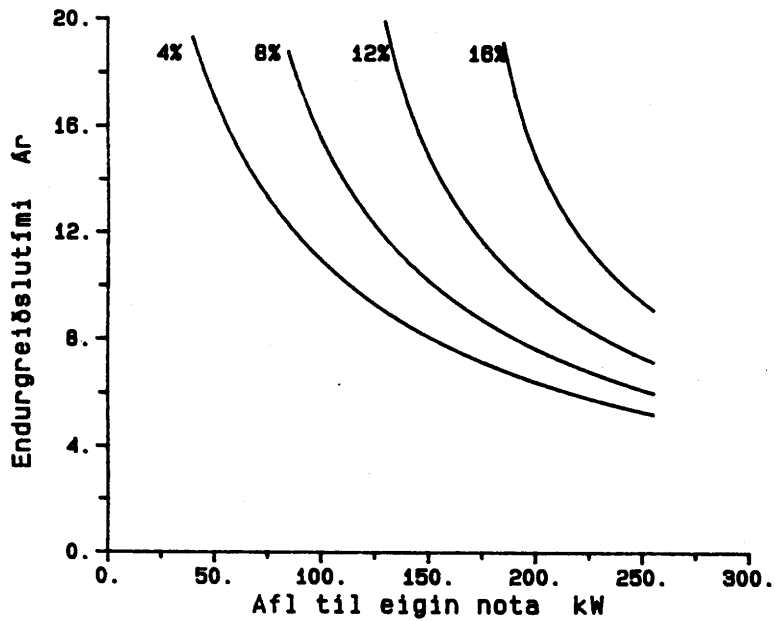
- E = Endurgreiðslutími.
- I = Vextir
- A = Árlegar tekjur
- R = Árlegur kostnaður
- S = Stofnkostnaður

Myndir 9 og 10 sýna hvernig endurgreiðslutímamán breytist með eigin

aflnotkun og mismunandi vöxtum. Mynd 9 sýnir niðurstöður ef reiknað er skv. markmælingu en mynd 10 ef reiknað er skv. aflmælingu. Sýndir eru ferlar fyrir mismunandi vexti. Hæsti endurgreiðslutími sem teiknaður er, er um 20 ár sem er í raun allt of langur endurgreiðslutími. Þar sem tekjurnar aukast með aukinni eiginnotkun þá er eðlilegt að endurgreiðslutíminn styttest einnig. Endurgreiðslutími yfir 20 árum er ekki teiknaður. Á myndunum má sjá að stysti endurgreiðslutími er miðað við 4% vexti og aflmælingu og er um 5 ár. 255 kW eru þá notuð til eigin reksturs. Þó að miðað sé við 15 ára endingartíma er æskilegt að fjárfestingin skili sér fyrr, t.d. er 5 til 8 ár algengt. Þá verður bessi kostur einungis hagkvæmur ef kaupa hefði þurft orkuna á afltaxta og eigin notkun yfir 150 kW. Þetta er þó breytilegt eftir vöxtum.



Mynd 9. Endurgreiðslutími sem fall af eigin aflnotkun og eru ferlar fyrir mismunandi vexti. Reiknað er með markmælingu



Mynd 10. Endurgreiðslutími sem fall af eigin aflnotkun og eru ferlar fyrir mismunandi vexti. Reiknað er með aflmælingu

2.7 Niðurstöður

Niðurstöður eru í stuttu máli þær að vegna þess hve stofnkostnaður er qífurlega hár, þá verður erfitt að fá fjárfestinguna til að borga sig. Endurgreiðslutíminn er á bilinu 8 til 20 ár miðað við 100 til 200 kW aflnotkun. Trúlega væri hagkvæmara að virkja aðeins hluta af holunni og miða ekki við að selja orku. Hagkvæmnisútreikninga fyrir bann möguleika yrði að gera þegar verð á minni vél lægi fyrir.