



# **Úrgangur til orku**

## **Leiðir til að nýta skólp til eldsneytisframleiðslu**

Þórður Ingi Guðmundsson



**Iðnaðarverkfræði-, vélaverkfræði-  
og tölvunarfræðideild  
Háskóli Íslands  
2012**



# Úrgangur til orku

Þórður Ingi Guðmundsson

60 eininga ritgerð sem er hluti af  
*Magister Scientiarum* gráðu í umhverfis- og auðlindafræðum

Leiðbeinendur  
Rúnar Unnþórsson  
Páll Jensson

Prófdómari / Fulltrúi deildar  
Hrund Ólöf Andradóttir

Iðnaðarverkfræði-, vélaverkfræði- og tölvunarfræðideild  
Verkfræði- og náttúruvísindasvið  
Háskóli Íslands  
Reykjavík, október 2012

Úrgangur til orku  
Leiðir til að nýta skólp til eldsneytisframleiðslu  
60 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í umhverfis- og auðlindafræðum.

Höfundarréttur © 2012 Þórður Ingi Guðmundsson.  
Öll réttindi áskilin.

Iðnaðarverkfræði-, vélaverkfræði- og tölvunarfræðideild  
Verkfræði- og náttúruvísindasvið  
Háskóli Íslands  
VR II, Hjarðarhagi 2 – 6  
107 Reykjavík

Sími: 525 4700

Skráningarupplýsingar:  
Þórður Ingi Guðmundsson, 2012, *Úrgangur til orku*, meistararitgerð, Iðnaðarverkfræði-, vélaverkfræði og tölvunarfræðideild, Háskóli Íslands, 120 bls.

Prentun: Háskólaprent  
Reykjavík, október 2012

# Útdráttur

Lögum samkvæmt er skylt að nýta skólþ á Íslandi sé þess einhver kostur en eins og sakir standa er það ekki gert og rennur skólþ frá höfuðborgarsvæðinu í gegnum tvær hreinsistöðvar Orkuveitu Reykjavíkur og þaðan til sjávar. Í þessari ritgerð verður leitað leiða til að nýta skólþ á höfuðborgarsvæðinu og kannað hvað slíkt myndi kosta. Nokkrar leiðir eru færar í nýtingu skólþs en hér verður fyrst og fremst horft til metanframleiðslu með súrefnissnaudu niðurbroti og framleiðslu vetnis með gösun. Hér verður tekið saman magn nýtanlegra efna í skólþi, hve mikið metan eða vetni væri hægt að framleiða úr þeim og kostnaður við nýtingu þeirra ásamt endurgreiðslutíma og arðsemi. Þá verður flæði um fráveitukerfi Orkuveitu Reykjavíkur greint með aðhvarfsgreiningu í hitaveituvatn, vatn til almennra nota og úrkomu. Út frá þeim niðurstöðum er sett saman líkan sem spáir fyrir um fráveiturennslu í þéttbýli með hitaveitu út frá veðurfari. Miðað við magn lífrænna efna í skólþi er hægt að framleiða um 1.200.000 Nm<sup>3</sup> metans úr seyru eingöngu og um 3.000.000 Nm<sup>3</sup> metans sé notast við íblöndunarefni, nánar tiltekið fitu úr fituskiljum fráveitustöðva og lífrænan heimilisúrgang á höfuðborgarsvæðinu. Fjárfestingarkostnaður í slíku lífgasveri er á bilinu 0,8 – 2 milljarðar króna eftir því hvort notast er við íblöndun eða ekki og borgar sig upp á 12 – 40 árum miðað við 6% vexti. Fræðilega mætti ná um 730 tonnum af vetni árlega úr skólþi á höfuðborgarsvæðinu með gösun. Hafa skal í huga að hér er um frumathugun að ræða og nokkur óvissa því til staðar í útreikningum, ekki síst við mat á gösun skólþs.

## Abstract

By law, sewage in Iceland must be utilized if there is a feasible way to do that but it is not done at the moment. Sewage from the greater Reykjavík area flows through two treatment plants and from there to the ocean. In this study, ways to utilize sewage sludge will be investigated and cost and benefits of sewage sludge usage calculated. Number of ways are possible to use sludge but this study focuses on two of them, namely methane production through anaerobic digestion and hydrogen production through gasification. This study will compile data on usable materials in sewage in greater Reykjavík area and how much can be produced from them. From those analysis a model is constructed that predicts sewage flow from an urban area with central heating from weather data. From sewage sludge in greater Reykjavík area it is possible to produce 1.200.000 Nm<sup>3</sup> of methane and 3.000.000 Nm<sup>3</sup> if grease trap removal sludge and organic waste from greater Reykjavík area is added. Investment cost is approximately 0,8 – 2 billion ISK and repayment is in 12 – 40 years given 6% interest. It is theoretically possible to produce 730 tonnes of hydrogen of sludge through gasification. Sewage water is analyzed through regression analysis into hot water for central heating and regular use, that is showers, washing etc. and cold water and rain water. This is a preliminary study and therefore some uncertainties are present in the calculations.



# Efnisyfirlit

Efnisyfirlit .....	iii
Myndayfirlit .....	vi
Töfluyfirlit.....	viii
Skammstafanir .....	x
Pakkir .....	xi
<b>1 Inngangur .....</b>	<b>1</b>
1.1 Markmið ritgerðar .....	5
1.2 Skipulag ritgerðar .....	6
<b>2 Súrefnissnautt niðurbrot og gösun, staða þekkingar.....</b>	<b>7</b>
2.1 Lífeldsneyti.....	7
2.2 Lífgas úr gerjun í súrefnissnauðu umhverfi.....	8
2.2.1 Framleiðsla lífgass.....	11
2.2.2 Hreinsun lífgass.....	15
2.2.3 Orkuinnihald mismunandi kolvetnissambanda og vetnis .....	19
2.3 Efnasmíðagas úr gösun.....	20
2.3.1 Útbúnaður til gösunar og gösunarferlið .....	20
2.3.2 Uppfærsla og nýting efna- og efnasmíðagass .....	25
2.4 Samantekt .....	28
<b>3 Niðurbrot seyru í súrefnissnauðu umhverfi (gerjun) .....</b>	<b>31</b>
3.1 Samsetning og flokkun skólps.....	31
3.2 Metanmyndunarmöguleikar seyru .....	33
3.3 Hagkvæmni metanvinnslu úr seyru .....	35
3.4 Dæmi um metanframleiðslu úr seyru, Bern og Luzern .....	36
3.4.1 Tæknileg lýsing stöðvarinnar í Bern .....	36
3.4.2 Kostnaður og arðsemi vinnslunnar í Bern .....	38
3.4.3 Verksmiðjan í Luzern, samanburður .....	39
3.5 Íblöndun annarra efna til aukinnar gasframleiðslu .....	41
3.5.1 Heimilissorp .....	41
3.5.2 Íblöndun fitu úr skiljum og frá veitingastöðum og verksmiðjum.....	45
3.6 Samantekt .....	47
<b>4 Gösun seyru .....</b>	<b>49</b>
4.1 Gösun.....	49
4.1.1 Flotbotnsgösun .....	49
4.1.2 Gufugösun .....	51

4.1.3	<i>Vatnsgösun við yfirmarkshitastig</i> .....	52
4.2	Hitasundrun .....	53
4.3	Plasmagösun .....	54
4.4	Samantekt .....	56
<b>5</b>	<b>Fráveitukerfi Orkuveitu Reykjavíkur og lífrænt sorp frá heimilum á höfuðborgarsvæðinu</b> .....	<b>57</b>
5.1	Tæknileg lýsing á fráveitukerfi OR .....	58
5.1.1	<i>Magn efna í skólpi og rennsli</i> .....	59
5.1.2	<i>Hitastig og pH gildi frárennslisvatns</i> .....	63
5.2	Notkun á heitu og köldu vatni, hitastig, úrkoma og flæði um fráveitustöðvar OR .....	65
5.2.1	<i>Flæði vatns og frárennsli</i> .....	65
5.2.2	<i>Áhrif vatnsnotkunar og úrkomu á fráveiturennsli, aðhvarfsgreiningar</i> .....	72
5.2.3	<i>Samsetning fráveituvatns og sveiflur í notkun á heitu vatni út frá hitastigi, líkön</i> .....	79
5.3	Lífrænn heimilisúrgangur á höfuðborgarsvæðinu .....	85
5.4	Samantekt .....	85
<b>6</b>	<b>Framleiðslumöguleikar</b> .....	<b>87</b>
6.1	Framleiðslumöguleikar við súrefnisfirrta gerjun .....	87
6.1.1	<i>Framleiðslumöguleikar úr seyru á höfuðborgarsvæðinu</i> .....	87
6.1.2	<i>Framleiðslumöguleikar við íblöndun fitu úr fituskiljum við seyru</i> .....	89
6.1.3	<i>Framleiðslumöguleikar með íblöndun lífræns heimilissorps</i> .....	89
6.2	Framleiðslumöguleikar við gösun .....	90
6.2.1	<i>Gufugösun</i> .....	91
6.2.2	<i>Vatnsgösun við yfirmarkshitastig</i> .....	91
6.3	Samanburður á orkuframleiðslu .....	92
6.4	Samantekt .....	93
<b>7</b>	<b>Kostnaður og nýtingarmöguleikar</b> .....	<b>95</b>
7.1	Bakgrunnur, aðferðir og jöfnur fyrir fjármagnsútreikninga .....	95
7.2	Fjárfestingar- og rekstrarkostnaður, metanframleiðsla .....	96
7.2.1	<i>Fjárfestingarkostnaður</i> .....	96
7.2.2	<i>Rekstrarkostnaður</i> .....	97
7.2.3	<i>Eingöngu unnið úr seyru</i> .....	98
7.2.4	<i>Íblöndun annarra efna</i> .....	103
7.3	Endurgreiðslutími og arðsemi af metanframleiðslu .....	104
7.3.1	<i>Eingöngu unnið úr seyru</i> .....	104
7.3.2	<i>Íblöndun annarra efna</i> .....	106
7.4	Nýtingarmöguleikar metans .....	108
7.5	Fjárfestingar- og rekstrarkostnaður, gösun .....	109
7.5.1	<i>Vatnsgösun við yfirmarkshitastig</i> .....	110
7.5.2	<i>Plasmagösun</i> .....	112
7.6	Endurgreiðslutími og arðsemi af gösun seyru .....	112



7.7 Nýtingarmöguleikar.....	113
7.8 Samantekt .....	114
<b>8 Umræða.....</b>	<b>117</b>
<b>Heimildaskrá.....</b>	<b>121</b>
<b>Viðauki A .....</b>	<b>127</b>
<b>Viðauki B.....</b>	<b>128</b>
<b>Viðauki C .....</b>	<b>129</b>
<b>Viðauki D .....</b>	<b>130</b>
<b>Viðauki E.....</b>	<b>131</b>

# Myndayfirlit

Mynd 1-1: Mögulegar leiðir til nýtingar skólps .....	1
Mynd 1-2: Meðalverð á ársgrundvelli fyrir hverja tunnu af hráolíu til Bandaríkjanna í bandaríkjadollurum frá 1986 – 2010, bæði á nafnvirði og einnig leiðrétt fyrir verðbólgu í Bandaríkjunum (raunvirði).....	3
Mynd 1-3: Innflutningur jarðolíu og afurða sem hlutfall heildarinnflutnings til Íslands 1999 – 2010.....	4
Mynd 1-4: Olíunotkun mismunandi notenda á Íslandi 1983 – 2009, kílótonn.....	4
Mynd 2-1: Hringrás koltvísýrings úr jarðeldsneyti annars vegar og lífheldsneytis hins vegar .....	11
Mynd 2-2: Lífefnafræðilegt ferli niðurbrots lífrænna efna í súrefnissnauðu umhverfi .....	13
Mynd 2-3: Vaxtarhraði mismunandi örvera eftir hitastigi .....	14
Mynd 2-4: Yfirlit yfir mismunandi hreinsitækni lífgass .....	16
Mynd 2-5: Yfirlit yfir vatnshreinsun lífgass.....	18
Mynd 2-6: Munur á efnagasi og efnasmíðagasi og hefðbundinni nýtingu þeirra.....	23
Mynd 2-7: Dæmi um útbúnað til gegnumflæðisgösunar.....	24
Mynd 2-8: Mögulegar eldsneytisafurðir úr efnasmíðagasi .....	25
Mynd 2-9: Nýting á efnasmíðagasi á heimsmarkaði árið 2005 .....	27
Mynd 2-10: Spá um nýtingu á efnasmíðagasi á heimsmarkaði árið 2040.....	28
Mynd 3-1: Tveggja þrepa gerjunarkerfi til lífgasframleiðslu .....	42
Mynd 3-2: Uppsöfnuð lífgasframleiðsla yfir 35 daga úr seyru annars vegar (experiment I) og blöndu af seyru og lífrænum heimilisúrgangi hins vegar (experiment II) .....	43
Mynd 3-3: Hlutfall metans og koltvísýrings í lífgasi framleiddu með gerjun á blöndu af seyru og lífrænum úrgangi.....	44
Mynd 3-4: Lífgasmyndun úr lífrænum heimilisúrgangi (III), seyru (IV) og blöndu af lífrænum heimilisúrgangi og seyru (V). Gerjunin var framkvæmd í tveggja þrepa kerfi .....	44
Mynd 3-5: Lífgasmyndun úr seyru eingöngu (I) og blöndu af 25% lífrænum heimilisúrgangi og 75% seyru (II). Gerjunin fór fram í eins þreps kerfi .....	45
Mynd 3-6: Uppsöfnuð metanmyndun fyrstu 200 klst. niðurbrots eftir mismunandi hlutföllum fitu og seyru .....	46
Mynd 3-7: Uppsöfnuð metanmyndun yfir tíma úr seyru annars vegar og fitu hins vegar .....	47
Mynd 4-1: Flæðirit gösunar skólps .....	50
Mynd 4-2: Yfirlit yfir vatnsgösun við yfirmarkshitastig, flæðirit .....	52
Mynd 4-3: Plasmagösun seyru til vetnisframleiðslu .....	55
Mynd 5-1: Skipting fráveitukerfisins í Reykjavík í blandkerfi og tvöfalt kerfi.....	58
Mynd 5-2: Yfirlit yfir fráveitukerfi höfuðborgarsvæðisins .....	59
Mynd 5-3: Dagrennsli um stöðvarnar við Klettagarða og Ánanaust árið 2010, l/s .....	61
Mynd 5-4: Lofthitastig á höfuðborgarsvæðinu (vinstri ás) og sólarhringsmeðaltalsrennsli um fráveitustöðvar OR á höfuðborgarsvæðinu í lítrum á sekúndu (hægri ás). Tímabilið 22/2/2009 – 18/2/2012.....	61
Mynd 5-5: Niðurstöður mælinga á svifögnum og lífrænu efni (COD) í Klettagörðum og Ánanaustum fyrir árið 2010.....	62
Mynd 5-6: Magn af föstum úrgangi fönguðum í Klettagörðum og Ánanaustum 2010 .....	63
Mynd 5-7: Dagmeðaltal hitastigs og pH gildi fráveituvatns í Klettagörðum (t.v.) og Ánanaustum (t.h.) fyrir árið 2007.....	64
Mynd 5-8: Frárennsli og notkun á heitu vatni (vinstri ás) og notkun á köldu vatni (hægri ás) frá 22.2.2009 – 18.2.2009. Sólarhringsmeðaltal í lítrum á sekúndu um veitusvæði Orkuveitu Reykjavíkur .....	65

Mynd 5-9: Logaritmi af notkun á heitu og köldu vatni og flæði um fráveitustöðvar OR frá 22.2.2009 – 18.2.2012. Logaritmi af sólarhringsmeðaltölum í lítrum á sekúndu.....	66
Mynd 5-10: Sólarhringsmeðaltal frárennslis í lítrum á sekúndu (hægri ás) og sólarhringsúrcoma mælt í millimetrum frá 1.5.2009 – 22.2.2012.....	67
Mynd 5-11: Logaritmi af flæði um fráveitustöðvar OR að frádregnum logaritma af notkun á heitu vatni (vinstri ás) og logaritmi af notkun á köldu vatni (hægri ás) frá 1.5.2009 – 22.2.2012. Logaritmi af sólarhringsmeðaltölum í lítrum á sekúndu .....	67
Mynd 5-12: Logaritmi af flæði um fráveitustöðvar OR, logaritmi af notkun á heitu og köldu vatni. Logaritmi af lítrum á sekúndu yfir 1 mánaðar tímabil (des. 2011).....	68
Mynd 5-13: Notkun á heitu vatni og rennsli um fráveitustöðvar OR í lítrum á sekúndu (vinstri ás) ásamt hitastigi í desember 2011 (hægri ás).....	69
Mynd 5-14: Flæði um fráveitustöðvar OR í júlí 2011. Klukkustundarmeðaltal í lítrum á sekúndu.....	70
Mynd 5-15: Flæði um fráveitustöðvar OR í janúar 2011. Klukkustundarmeðaltal í lítrum á sekúndu .....	71
Mynd 5-16: Munur á hámarks- og lágmarksflæði yfir einn sólarhring í fráveitukerfi OR í janúar og júlí 2011. Munur á klukkustundarmeðaltali í lítrum á sekúndu .....	71
Mynd 5-17: Meðalnotkun á sólarhring á heitu vatni í lítrum á sekúndu og meðallofthiti. Tímabil 1/7/2008 – 12/2/2012.....	77
Mynd 5-18: Afgangslíðir úr aðhvarfsgreiningu á notkun á heitu vatni með hitastig ásamt einni töf af hitastigi sem skýristærðir. Tímabilið 2/7/2008 – 12/2/2012.....	79
Mynd 5-19: Samanburður á útkomu úr líkani fyrir sólarhringsrennsli um fráveitukerfi OR miðað við notkun á heitu og köldu vatni og úrkomu annars vegar og raunrennsli um fráveitukerfi OR hins vegar í lítrum á sekúndu. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012.....	80
Mynd 5-20: Munur á frárennsli um fráveitukerfi OR og útkomu úr líkani sem spáir fyrir um frárennsli miðað við notkun á heitu og köldu vatni og úrkomu í lítrum á sekúndu. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012.....	80
Mynd 5-21: Samanburður á útkomu úr líkani fyrir notkun á heitu vatni út frá hitastigi og raunverulegri notkun á heitu vatni á höfuðborgarsvæðinu. Sólarhringsmeðaltal í lítrum á sekúndu. Tímabilið 8/7/2005 – 12/2/2012 .....	82
Mynd 5-22: Munur á notkun á heitu vatni á höfuðborgarsvæðinu og útkomu úr líkani sem spáir fyrir um notkun á heitu vatni miðað við hitastig. Munur á sólarhringsmeðaltali í lítrum á sekúndu. Tímabilið 8/7/2005 – 12/2/2012 .....	83
Mynd 5-23: Breyting á notkun á heitu vatni miðað við breytingar á hitastigi.....	84
Mynd 5-24: Samanburður á frárennsli með og án hitaveituvatns og úrkomu. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012.....	84
Mynd 7-1: Yfirlitsmynd yfir fráveituvatnsstöð og lífgasvinnslu í Luzern .....	100
Mynd 7-2: Næmnigreining sem sýnir áhrif breytinga á afurðaverði og fjárfestingar- og rekstrarkostnaði á núvirði fjárfestingar .....	102
Mynd 7-3: Uppsafnað núvirði fjárfestingar í lífgasvinnslu þar sem eingöngu er unnin seyra. Verð til framleiðanda er 100 ISK Nm <sup>3</sup> og vaxtastig 6% .....	105
Mynd 7-4: Uppsafnað núvirði miðað við meðalfjárfestingar- og rekstrarkostnað þegar eingöngu er unnið metan úr seyru. Verð til framleiðanda er 70 – 150 ISK og vaxtastig 6% .....	106
Mynd 7-5: Uppsafnað núvirði fjárfestingar í lífgasvinnslu þar sem unnin er seyra ásamt fitu úr fitugildrum og matarúrgangi. Verð til framleiðanda er 100 ISK Nm <sup>3</sup> og vaxtastig 6% .....	107
Mynd 7-6: Uppsafnað núvirði miðað við meðal fjárfestingar- og rekstrarkostnað þegar unnið er metan úr seyru, fitu úr fitugildrum og matarúrgangi. Verð til framleiðanda er 70 – 150 ISK og vaxtastig 6% .....	107
Mynd 7-7: Uppsafnað núvirði fjárfestingar í vatnsgösunarveru miðað við framleiðslu upp á 735 tonn á ári, verð 1.435 ISK/kg til framleiðanda og 6% vaxtastig.....	113

# Töfluyfirlit

Tafla 2-1: Fyrsta og önnur kynslóð lífheldsneytis. Helstu tegundir og framleiðsluáðferðir .....	8
Tafla 2-2: Rúmmál, hæð og landsvæði gerjunartanka miðað við lífmassa til gerjunar .....	12
Tafla 2-3: Bestu pH gildi fyrir mismunandi örveruhópa og niðurbrotsferlið í heild .....	14
Tafla 2-4: Orkuinnihald nokkurra kolvetnissambanda og vetnis, efra brunagildi .....	19
Tafla 2-5: Flokkun útbúnaðar til gösunar .....	21
Tafla 2-6: Afurðir, hitastig, þrýstingur og umbreytingarhlutfall við lág- og háhita Fischer Tropsch ferli .....	26
Tafla 3-1: Styrkleikaflokkun skólps eftir BOD5 og COD gildum .....	33
Tafla 3-2: Hlutfall íbúafjölda, skólpmagns í rúmmetrum á dag og heildarrúmmáls gerjunartanka í rúmmetrum .....	35
Tafla 3-3: Kostnaður við framleiðslu 1 Nm <sup>3</sup> metangass úr mismunandi hráefni .....	35
Tafla 3-4: Skipting hráefnis sem fór til lífgasvinnslu verksmiðjunnar í Bern 2009 og 2010 .....	37
Tafla 3-5: Framleiðslan í Bern, helstu tölur fyrir árið 2009 .....	37
Tafla 3-6: Áætlaður fjárfestingarkostnaður lífgasverksmiðjunnar í Bern .....	38
Tafla 3-7: Uppskiptur framleiðslukostnaður fyrir rúmmetra af lífgasi í Bern .....	39
Tafla 3-8: Áætlaður fjárfestingarkostnaður lífgasverksmiðjunnar í Luzern .....	40
Tafla 3-9: Metanmyndun á kg af lífrænu þurrefni í gerjunartanki. Samanburður á Bern og Luzern .....	41
Tafla 4-1: Dæmigerð samsetning gass úr gösun seyru við flotbotnsgösun .....	51
Tafla 4-2: Hlutföll gastegunda í efnasmíðagasi eftir plasmagösun seyru .....	55
Tafla 5-1: Meðaldagrennsli árið 2010 um hreinsistöðvar OR ásamt heildarpersónueiningum .....	60
Tafla 5-2: Meðaltöl mælinga á blandsýnum á hreinsuðu fráveituvatni 2010. Svifagnir, fita, COD, TP og TN. Gildi í mg/l .....	60
Tafla 5-3: Árs-gildi skráðra mælinga í Klettagörðum og Ánanaustum fyrir árið 2007 .....	64
Tafla 5-5: Venjuleg aðhvarfsgreining á flæði um fráveitustöðvar OR. Skýristærðir eru notkun á heitu og köldu vatni í lítrum á sekúndu og úrkoma í millimetrum á sólarhring. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012 .....	73
Tafla 5-6: Venjuleg aðhvarfsgreining á flæði um fráveitustöðvar OR. Skýristærðir eru notkun á heitu vatni í lítrum á sekúndu og úrkoma í millimetrum á sólarhring. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012 .....	74
Tafla 5-7: Venjuleg aðhvarfsgreining á frárennsli að fráreginni notkun á köldu vatni í lítrum á sekúndu. Skýristærðir eru notkun á heitu vatni og úrkoma. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012 .....	75
Tafla 5-8: Venjuleg aðhvarfsgreining á frárennsli að fráreginni notkun á heitu vatni í lítrum á sekúndu. Skýristærðir eru notkun á köldu vatni og úrkoma. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012 .....	75
Tafla 5-9: Venjuleg aðhvarfsgreining á meðalnotkun á heitu vatni í lítrum á sekúndu. Skýristærð er hitastig ásamt 1 tóf af hitastigi. Tímabilið 2/7/2008 – 12/2/2012 .....	78
Tafla 6-1: Samanburður á orku sem fæst úr metanframleiðslu með gerjun seyru annars vegar og vetnisframleiðslu með gösun á seyru hins vegar í MJ og MWst. Framleitt úr seyru sem til fellur á höfuðborgarsvæðinu .....	92
Tafla 7-1: Kostnaður fyrir hvern rúmmetra af gerjunarrými skólphreinsistöðvar og gerjunaraðstöðu miðað við mismunandi fjölda persónueininga .....	97
Tafla 7-2: Áætlaður fjárfestingarkostnaður í gerjunarbúnaði fyrir lífgasvinnslu úr seyru á höfuðborgarsvæðinu .....	99
Tafla 7-3: Áætlaður framleiðslukostnaður metans úr seyru á höfuðborgarsvæðinu .....	102
Tafla 7-4: Áætlaður fjárfestingarkostnaður í gerjunarbúnaði fyrir lífgasvinnslu úr seyru og íblöndun fitu og matarúrgangs á höfuðborgarsvæðinu .....	103
Tafla 7-5: Áætlaður framleiðslukostnaður metans úr seyru ásamt matarsorpi og fitu til íblöndunar .....	104

Tafla 7-6: Innri vextir fjárfestingar til 25 ára miðað við að metan sé eingöngu unnið úr seyru fyrir verðbilið 70 – 150 krónur fyrir hvern rúmmetra af metani.....	105
Tafla 7-9: Innri vextir fjárfestingar til 25 ára miðað við að metan sé unnið úr seyru, fitu úr fitugildrum og matarúrgangi af höfuðborgarsvæðinu fyrir verðbilið 70 – 150 krónur fyrir hvern rúmmetra af metani .....	106
Tafla 7-8: Fjöldi bensín- og dísellíttra sem 1.200.000 Nm <sup>3</sup> og 3.000.000 Nm <sup>3</sup> metans jafngilda .....	108
Tafla 7-9: Söluverðmæti 1.200.000 Nm <sup>3</sup> og 3.000.000 Nm <sup>3</sup> metans og lítrafjölda bensíns og díselolíu sem gefa jafnmikla orku og það metanmagn sem hér er skoðað. Söluverðmæti með virðisaukaskatti og öðrum gjöldum, ISK.....	108
Tafla 7-10: Fjöldi fólksbíla annars vegar og strætisvagna hins vegar sem hægt væri að knýja á 1.200.000 Nm <sup>3</sup> og 3.000.000 Nm <sup>3</sup> af metani á ári hverju .....	109
Tafla 7-11: Áætlaður fjárfestingarkostnaður útbúnaðar til vatnsgösunar skólps við yfirmarkshitastig .....	111

# Skammstafanir

Bar:	mælieining fyrir þrýsting (100kPa)
CHP:	„combined heat and power“, lífgasver sem nýtir metan til hitunar og raforkuframleiðslu
CH <sub>4</sub> :	metan
CO <sub>2</sub> :	koltvíoxíð
EUR:	Evra
gr:	gramm
gWst:	gígavattstund
HRT:	viðverutími (e. hydrolic retention time) hráefnis til lífgasmyndunar við súrefnissnaðar aðstæður
H <sub>2</sub> O:	vatn
H <sub>2</sub> S:	brennisteinsvetni
IRR:	innri vextir (e. internal rate of return)
ISK:	íslensk króna
Kg:	kílógramm
KJ:	kílójoule
klst:	klukkustund
Km:	kílómetri
kW:	kílóvatt
kWst:	kílóvattstund
l:	lítri/lítrar
LPE:	lífrænt þurrefni
MJ:	megajoule
MPa:	megapascal, mælieining fyrir þrýsting. 1MPa = 10 bör
M <sup>2</sup> :	fermetri
M <sup>3</sup> :	rúmmetri
MWst:	Megavattstund
NaOH:	natríumhýdroxíð
N:	köfnunarefni (nitur)
Nm <sup>3</sup> :	normalrúmmetri (rúmmetri lofts við 0°C og 1 bar)
NPV:	núvirði (e. net present value)
O <sub>2</sub> :	súrefni
S:	brennisteinn
P:	fosfór
PJ:	petajoule, orkueining.
pH:	sýrustig
USD:	bandaríkjadollari
V:	rúmmál hleðslu hráefnis pr. tíma (m <sup>3</sup> /d)
PE:	þurrefni
°C:	gráður á Celsius

# Þakkir

Þakkir fá Metan hf. og Orkuveita Reykjavíkur fyrir fjárhagslegan stuðning við vinnslu verkefnisins. Þá fá sérstakar þakkir Björn H. Halldórsson hjá Sorpu og Guðrún Pétursdóttir hjá Stofnun Sæmundar fróða fyrir að koma á samstarfsverkefni á milli Metans hf. og Stofnunar Sæmundar fróða sem gerði þetta verkefni mögulegt. Orkuveita Reykjavíkur, Veðurstofa Íslands og verkfræðistofan Verkís fá auk þess miklar þakkir fyrir gagnaöflun og góðan samstarfsvilja. Rúnar Unnþórsson leiðbeinandi fær einnig innilegar þakkir fyrir góða samvinnu og fyrir að taka verkefnið að sér á miðri leið. Þá vil ég að lokum þakka foreldrum mínum, þeim Ingu Rósu Þórðardóttur og Guðmundi Steingrímssyni, sérstaklega fyrir yfirlestur, góð ráð og mikla hjálpsemi við vinnslu þessa verkefnis.

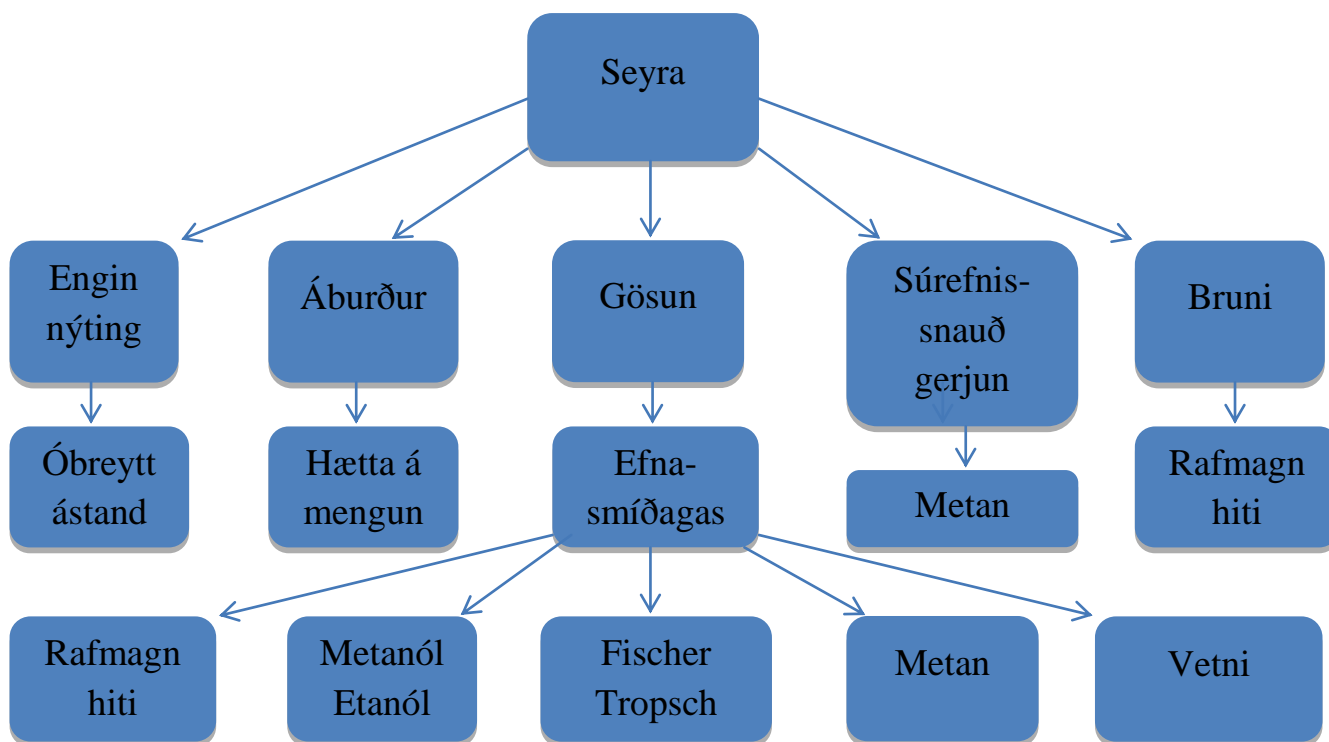




# 1 Inngangur

Losun skólps frá þéttbýli er víða um heim að verða vaxandi vandamál. Aðferðir til þess að hreinsa og losa skólps eru í stöðugri þróun og á síðari tímum hefur aukinn áhugi beinst að því að nýta skólpið á einhvern hátt. Sem stendur eru fjórar megin aðferðir notaðar við förgun skólps. Nýting til áburðar, landfylling, losun til sjávar og bruni. Engin þessara aðferða miðar þó að því að nýta skólpið til beinnar orkuvinnslu (Nipattummakul, N. et. al., september 2010). Á höfuðborgarsvæðinu er skólpinu veitt út í Faxaflóa eftir eins þreps hreinsun í hreinsistöðvum við Klettagarða og Ánanaust (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. (ii)).

Samkvæmt reglugerð frá Alþingi skal hreinsað skólps endurnýtt ef kostur er (reglugerð um fráveitur og skólps nr. 798/1999) og eru nokkrar leiðir færar í nýtingu skólps sem hægt er að skipta upp eftir ferli og nýtingu. Skólps er fyrst hreinsað með botnfellingu, síun eða fleytingu án síu- eða ristarúrgangs og stendur þá eftir seyra (reglugerð um fráveitur og skólps nr. 798/1999). Seyra hefur verið notuð sem áburður í landbúnaði, látin gerjast í súrefnissnauðu umhverfi til metanframleiðslu, brennd til hitaframleiðslu og í seinni tíð er mikið horft til gösunar og hitasundrunar seyru til framleiðslu efna- og efna-smíðagass (e. product gas og syngas) en frá þeim gastegundum opnast margar leiðir til eldsneytis og efnaframleiðslu.



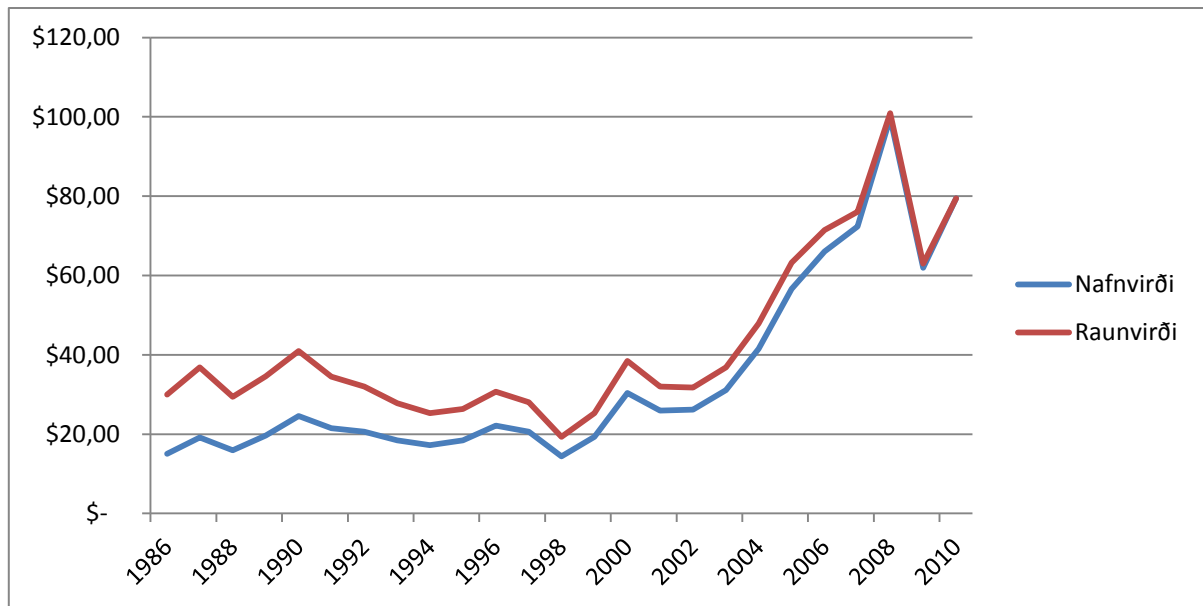
Mynd 1-1: Mögulegar leiðir til nýtingar skólps (Fytli, D. og Zabaniotou, A., 2006)

Mynd 1-1 lýsir helstu leiðum til nýtingar eða nýtingarleysis seyru. Nýting seyru til áburðar er þó á undanhaldi í heiminum þar sem fyrir því eru bæði félagslegar og tæknilegar hindranir. Erfitt gæti reynt að sannfæra fólk um ágæti þess að nýta seyru til matvælaframleiðslu og

einnig leynast þungmálmur og önnur eiturefni í skólpi sem geta mengað jarðveg og matvæli. Þá er streymi skólps stöðugt allt árið en þörf á áburði árstíðabundin sem flækir málið enn frekar. Bruni seyru þykir álitleg aðferð til meðferðar á skólpi en er mun frekar skilvirk aðferð til eyðingar en hagkvæm leið til nýtingar seyru þó að mögulegt sé að framleiða rafmagn og nýta hitann sem fæst af bruna seyrunnar. En auk þess situr eftir mikil aska að loknum hefðbundnum bruna á seyru, þessi aska er yfirleitt nýtt til landfyllingar en sama gildir í því tilfelli og við nýtingu skólps sem áburðar að í öskunni geta leynst þungmálmur og eiturefni sem geta mengað jarðveg og þá geta leynst í reyk frá bruna skólps eiturefni svo sem díoxín. Sömu vandamál fylgja einnig því að nýta seyru eða ösku úr brunninni seyru sem íblöndunareldsneyti við sementsframleiðslu en slíkt hefur verið skoðað til þess að draga úr notkun á kolum og olíu við sementsframleiðslu (Fytilli, D. og Zabanioutu, A., 2006).

Undanfarin ár hefur verið horft til eldsneytisframleiðslu úr seyru, bæði með gerjun í súrefnissnauðu umhverfi (e. anaerobic digestion) og með gösun (e. gasification). Raunar er metan nú þegar framleitt úr seyru með gerjun í súrefnissnauðu umhverfi víða um heim s.s. í Svíþjóð og Sviss en seyra hefur ekki verið notuð sem hráefni til gösunar til þessa öðru vísi en í tilraunaskyni. Gösun er þó þekkt aðferð til gasframleiðslu og eru þá lífmassar eins og viðarkurl og hálmur notaðir við ferlið og einnig jarðgas og kol. Afurð gösunar nefnist á íslensku efnasmíðagas (e. syngas) og er byggt upp af vetni og kolmónoxíði/kolsýringi (CO) í mismunandi hlutföllum. Úr efnasmíðagasi er síðan hægt að fá margar afurðir s.s. díselolíu með Fischer Tropsch aðferð, ammóníak, metan og metanól. Þá hafa farið fram auknar rannsóknir á hagkvæmni vetnisframleiðslu úr seyru með gösun. Það þykir álitlegur kostur og hefur jafnvel verið talið að seyra verði í framtíðinni helsta hráefnið til vetnisframleiðslu en vetni er í dag aðallega unnið með gufubætingu (e. steam reforming) á jarðgasi (Fytilli, D. og Zabanioutu, A., 2006). Sú aðferð telst ekki umhverfisvæn né heldur sjálfbær þar sem jarðgasauðlindir eru takmarkaðar og munu þverra séu þær nýttar áfram á þann hátt sem þær eru nýttar í dag. Sé framleiðsla vetnis úr seyru hagkvæm verður það að teljast aðlaðandi aðferð. Einnig verður til þess að líta að horft hefur verið á vetni sem framtíðarorkugjafa Íslendinga á ökutæki og stundum talað um vetnisvæðingu landsins í þeirri umræðu. Framleiðsla vetnis með gösun frekar en annarra afurða, svo sem metans eða Fischer Tropsch afurða, verður að teljast hagkvæmari þegar seyra er notuð sem hráefni sökum þess hve hátt vökvainnihald er í skólpi og þar af leiðandi er hlutfall kolefna á móti vetni í hráefni mjög lágt, mun lægra en í öðru hráefni sem notað er til gösunar.

Samfara hækkandi hráolíuverði og versnandi aðgengi að olíuauðlindum hefur verið leitað annarra leiða í orkumálum á ýmsum sviðum. Verð á hráolíu hækkaði gríðarlega eftir aldamótin 2000 og er útlit fyrir að sú hækkun haldi áfram.

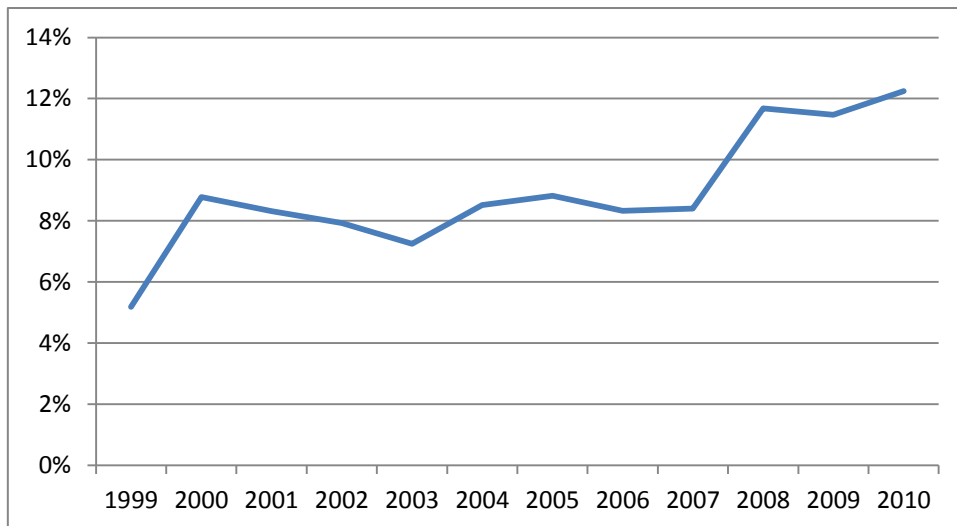


Mynd 1-2: Meðalverð á ársgrundvelli fyrir hverja tunnu af hráolíu til Bandaríkjanna í bandaríkjadollurum frá 1986 – 2010, bæði á nafnvirði og einnig leiðrétt fyrir verðbólgu í Bandaríkjunum (raunvirði) (Bureau of Labor Statistics, e.d. (2011) og U.S. Energy Information Administration, e.d. (2011))

Eins og mynd 1-2 sýnir hélst verð á hráolíu nokkuð stöðugt fram til aldamótanna 2000 og var raunar á niðurleið allt frá 1990 – 2000 miðað við raunvirði. Á mynd 1-2 er miðað við verðlag í Bandaríkjunum í lok árs 2010. Verð á hráolíu hefur sveiflast mikið síðan 2008, allt frá því að fara upp í 140 USD á tunnuna niður í rúmlega 30 USD fyrir tunnuna. Árin 2010 og 2011 hélst verð þó að mestu fyrir ofan 80 USD og verður að teljast ólíklegt að verð fari aftur niður í það sem þekktist á árunum 1990 – 2000 sé miðað við spár um minnkandi olíuframleiðslu og kenningar um að hámarksolíuframleiðslu hafi þegar verið náð (e. peak oil).

Hér á landi er nær allt rafmagn framleitt á „sjálfbæran og umhverfisvænan“ hátt. Einnig eru hús á Íslandi nær öll hituð með jarðhita og er Ísland einna lengst komið í því að hita hús og framleiða rafmagn með sjálfbærum og umhverfisvænum hætti. Íslendingar standa sérstaklega framarlega á sviði jarðhitaorku. Það skal þó tekið fram að umdeilt er hversu umhverfisvæn raforkuframleiðsla er hér á landi þar sem gróðursvæðum hefur verið sökkt undir uppistöðulón, brennisteinsmengun fylgir jarðhitaverum og einnig getur nýting jarðhita verið ósjálfbær ef of hart er gengið að svæðinu sem verið er að nýta (Hulda Guðmunda Óskarsdóttir, 2009).

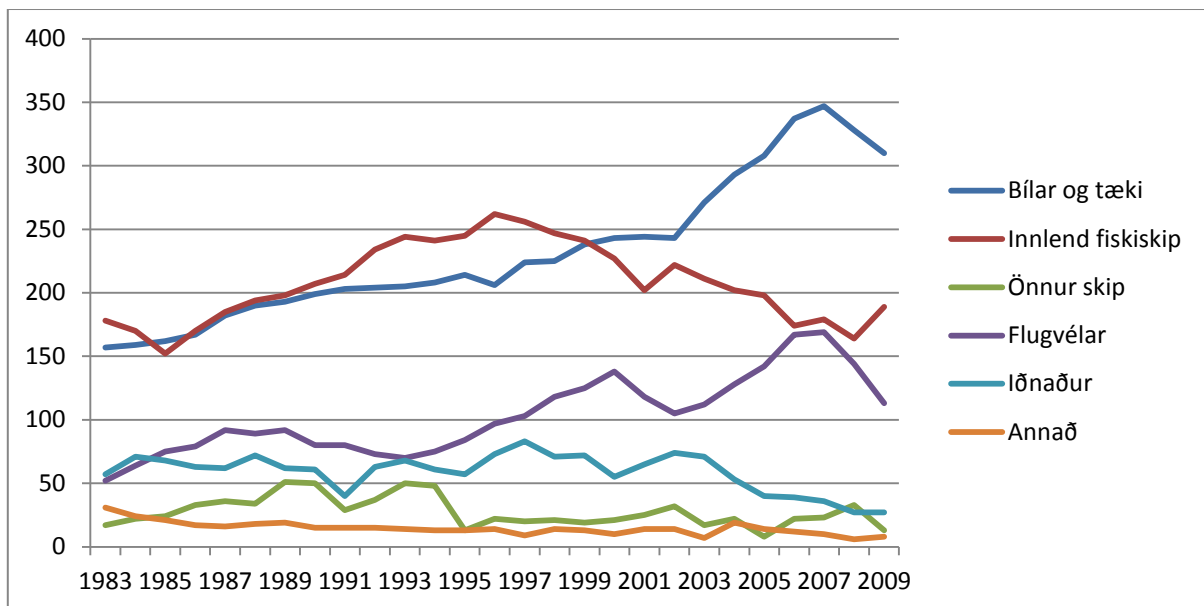
Íslendingar eru þó enn háðir innfluttu eldsneyti þegar kemur að samgöngum. Hlutdeild eldsneytis í innflutningi hefur aukist jafnt og þétt síðustu árin og er nú komin í um 12% af heildarinnflutningi þjóðarbúsins. Nam innflutningur olíu til samgangna um 55 milljörðum króna árið 2010 (Hagstofa Íslands, e.d. (i)).



Mynd 1-3: Innflutningur jarðolíu og afurða sem hlutfall heildarinnflutnings til Íslands 1999 – 2010 (Hagstofa Íslands, e.d. (i), 2011)

Eins og mynd 1-3 sýnir er hlutfall jarðolíu og afurða af heildarinnflutningi sífellt að hækka. Þrátt fyrir að hlutfallið lækki tímabundið er leitnin til lengri tíma upp á við. Það má því ljóst vera að svigrúm er til mikils gjaldeyrissparnaðar ef hægt væri að finna hagkvæma orkugjafa sem hægt væri að framleiða hér á landi.

Samkvæmt gögnum frá Hagstofu Íslands notuðu fiskiskip meiri hluta þeirrar olíu sem flutt var til landsins en um aldamótin síðustu varð viðsnúningur þar á þegar bílar og tæki fóru að nota meira af olíu en fiskiskip eins og greina má á mynd 1-4.



Mynd 1-4: Olíunotkun mismunandi notenda á Íslandi 1983 – 2009, kílótonn (Hagstofa Íslands, e.d. (ii), 2011)

Bílar og tæki nota meiri olíu hér á landi en skipaflotinn sem tekinn er til viðmiðunar. Árið 2009 notuðu bílar og tæki um 47% þeirrar olíu sem notuð var hér á landi það ár.

Því er ljóst að verulegt svigrúm er til þess að draga úr útblæstri gróðurhúsalofttegunda og minnka kostnað við innflutning með því að skipta yfir í innlenda, umhverfisvæna orkugjafa á ökutækjum, s.s. rafmagn, vetni, lífolíu úr repju og metangas.

## 1.1 Markmið ritgerðar

Markmið þessarar ritsmíðar er að kanna tæknilegan og fjárhagslegan fýsileika þess að nýta seyru sem til fellur úr skólpi að lokinni frárennslisreinsun á höfuðborgarsvæðinu til framleiðslu eldsneytis, hve mikið væri hægt að framleiða, kostnað og ávinning. Stuðst verður við sambærilegar erlendar rannsóknir en erlendis hefur metan töluvert verið framleitt með súrefnisfirrtu niðurbroti skólps og mikið er til af upplýsingum um kostnað og hagkvæmni slíkrar framleiðslu. Framleiðsla eldsneytis með gösun skólps er styttra á veg komin en einhverjar rannsóknir eru þó til um það efni.

Rannsóknarspurningar og markmið eru því eftirfarandi:

1. Hve mikið væri hægt að framleiða af eldsneyti úr skólpi hér á landi og hvað myndi slík framleiðsla kosta?
2. Samsetning líkans með aðhvarfsgreiningu sem greinir skólpi í heitt og kalt vatni ásamt úrkomu og einnig samsetning líkans sem spáir fyrir um notkun á heitu vatni út frá hitastigi.
3. Hve mikið væri hægt að minnka umfang fráveituvatns ef úrkoma og hitaveituvatni yrði leitt í annað kerfi og þar með ekki í gegnum skólphreinsistöðvar?

Verkefnið var unnið í samvinnu við Stofnun Sæmundar fróða og hluti þess styrktur af Orkuveitu Reykjavíkur og Metan hf. Styrkurinn var veittur til að kanna eftirfarandi:

1. Samantekt á lífrænt niðurbrotanlegu magni í skólpi á höfuðborgarsvæðinu sem í dag er dælt í hafið.
2. Könnun á hugsanlegri blöndun annarra efna í skólpi til að auka hagkvæmni og auka metanframleiðslu.
3. Yfirlit yfir hreina framleiðslutækni og bestu fánlegu tækni við framleiðslu þar sem til fellur lífrænt niðurbrotanlegur úrgangur.
4. Könnun á kostnaði við að „ná“ hentugu efni úr skólpinu til framleiðslu metans.
5. Könnun á kostnaði við hreinsun metans úr lífgasi er myndast við gerjun skólps.

Því verður ákveðin áhersla lögð á framleiðslu lífgass úr seyru og helstu tæknileg atriði súrefnissnauðrar gerjunnar kynnt.

Þá eru möguleikar á vetnisframleiðslu úr skólpi með gösun kannaðir. Gösun seyru hefur nýlega fengið aukna athygli sem leið til þess að hreinsa og nýta skólpi en er ekki jafn þekkt og reynd leið og gerjun í súrefnissnauðu umhverfi. Ástæða þess að vetnisframleiðsla, frekar en framleiðsla efnasmíðagass, er skoðuð er sú að vegna hás vökvainnihalds skólps er hlutfall vetnis á móti kolefnum hátt í efnasmíðagasi úr seyru og því hafa rannsóknir á gösun seyru fyrst og fremst miðast við vetnisframleiðslu. Þar að auki er hagkvæmara að hafa vökvainnihaldið hærra þar sem það kallar á minni þurrkun fyrir gösun og þar af leiðandi minna af tækjabúnaði til þurrkunar skólps.

Þar sem meirihluti fráveituvatns er hreint vatn verður reynt að smíða líkan sem greinir í sundur uppruna fráveituvatns í úrkomu, kalt vatn og heitt vatn. Enn fremur verður heitt vatn greint eftir því hvort það er nýtt til hitaveitu eða aðra neyslu, svo sem sturtuferðir og uppvask. Það ætti að vera tæknilega einfalt að veita bæði úrkomuvatni og hitaveituvatni í aðskilið kerfi frá því sem tekur við skólpi og væri það gert þyrfti að hreinsa sem því nemur minna af hreinu vatni en slíkt getur skipt sköpum eigi að vinna metan eða vetni úr skólpi með gerjun eða gösun.

Rétt er að taka fram að hér er um frumathugun að ræða og þyrftu að fara fram ítarlegri rannsóknir á samsetningu skólps á höfuðborgarsvæðinu áður en ákveðið yrði endanlega að ráðast í framleiðslu metans eða vetnis úr því. Nákvæmari greiningar á magni lífræns efnis skortir til þess að hægt sé að finna út með vissu hve mikið metan væri hægt að framleiða og þarf að efnagreina skólpið betur. Mat á magni lífræns efnis í skólpi er byggt á skýrslum frá Línuhönnun frá árinu 2008 annars vegar og hins vegar Verkís frá árinu 2011. Í skýrslum Línuhönnunar eru rennsli, hitastig og pH gildi fráveituvatns mæld ásamt COD gildum. Einnig er tekið saman magn fitu í fitugildrum og sands sem fangaður var í síum. Í skýrslu Verkís eru hitastig og pH gildi ekki mæld en rennsli, COD gildi og fitumagn er mælt ásamt öðrum snefilefnum.

Greining á vatni sem flæðir um fráveitukerfi Orkuveitu Reykjavíkur er byggð á tölum um sölu á heitu og köldu vatni ásamt hita og úrkomutölum frá Veðurstofu Íslands.

## 1.2 Skipulag ritgerðar

Í köflum 2, 3 og 4 er grunntækni súrefnissnauðs niðurbrots og gösunar kynnt ásamt útfærslum á þeirri tækni sem hentar best til nýtingar skólps en skólpi er sérstakt hráefni að því leyti að meirihluti þess er hreint vatn. Í þriðja kafla eru jafnframt tekin dæmi um starfandi lífgasver sem nota skólpi til metanframleiðslu með súrefnissnauðu niðurbroti. Í kafla 5 er fráveitukerfi Orkuveitu Reykjavíkur fyrir höfuðborgarsvæðið lýst, bæði tæknilega og því magni sem um það flæðir. Þá er sett fram líkan sem lýsir samhengi veðurfars og flæði um fráveitukerfið, bæði vegna úrkomu og vegna sveiflna í hitastigi og áhrifa þeirra á notkun á heitu vatni og þar með flæði um fráveitukerfið. Notast er við aðhvarfsgreiningar, nánar tiltekið venjulega aðferð minnstu kvaðrata (VAMK) (e. ordinary least squares, OLS) til að greina frárennsli í seyru, úrkomuvatn, kalt vatn, heitt vatn til venjulegra nota svo sem sturtuferða og uppvasks og svo heitt vatn til hitaveitu. Höfundur er ekki kunnugt um að samband veðurfars og fráveitu hafi verið sett fram með þessum aðferðum áður.

Í kafla 6 er tekið saman hve mikið væri hægt að framleiða af eldsneyti, bæði með gerjun og gösun, úr skólpi á höfuðborgarsvæðinu ásamt mögulegum íblöndunarefnum, þ.e. fitu úr fituskiljum í skólphreinsistöðvum og lífrænum úrgangi af heimilum á höfuðborgarsvæðinu. Í 7. kafla er kostnaðargreining þar sem notast er við algengar aðferðir fjármálaútreikninga og endurgreiðslutími og arðsemi eldsneytisframleiðslu úr skólpi á höfuðborgarsvæðinu reiknuð.

Þessi ritsmíð er byggð á bestu upplýsingum sem voru höfundur aðgengilegar en ljóst er að eigi að skoða nýtingu skólps til eldsneytisframleiðslu þarf að fara fram ítarlegri rannsókn á magni efna í skólpi sem hægt væri að nýta til framleiðslunnar. Mat á kostnaði er byggt á alþjóðlegum viðmiðum og reyngu annarra þjóða af byggingu slíkra skólphreinsistöðva.

## 2 Súrefnissnautt niðurbrot og gösun, staða þekkingar

Metan er nú þegar þekkt sem eldsneyti víða um heim og er notkun þess hér á landi í sífelldum vexti. Nýting efnasmíðagass (e. syngas) er hins vegar ekki þekkt hérlendis né heldur vetnisframleiðsla með gösun. Í þessum kafla verður farið yfir framleiðslu lífgass, hreinsun metans frá lífgasi og litið verður yfir hvaða tækni er í boði til hreinsunar metans frá lífgasi. Þá verður farið yfir skilyrði þess að lífgas myndist í súrefnissnauðu umhverfi og orkuinnihald metans skoðað í samanburði við aðrar eldsneytistegundir. Þá verður farið yfir gösunarferlið í meginatriðum, tækni og aðferðir, ásamt því að skoða helstu afurðir úr efnasmíðagasi sem fást við gösun.

Ýmsar tilraunir eru í gangi með aðra orkugjafa en olú og bensín á ökutæki. Rafbílar eru í notkun, vetnisbílar og vetnisstrætisvagnar hafa verið í tilraunakeyrslu hér á landi og lífdísill er unninn úr notaðri matarolíu frá veitingastöðum og er m.a. notaður til að knýja strætisvagna á Akureyri með íblöndun lífolúu að einum fimmta á móti venjulegri olú (Verkstjórnin, 2011). Allar þessar tilraunir miða að því að finna hentuga orkugjafa sem eru í senn umhverfisvænir og bjóða upp á sjálfbæra nýtingu.

### 2.1 Lífeldsneyti

Framleiðsla á eldsneyti úr lífmassa eykst stöðugt og þróun er hröð í þeim málum. Markaður með lífeldsneyti á bíla er nú þegar til staðar víða og stefnir í að sá markaður stækki hratt á næstu árum. Þannig hefur Evrópusambandið sett sér það markmið að hlutur lífeldsneytis á ökutækjamarkaði verði orðinn 10% árið 2020 (Zhang, W. 2009).

Allt það eldsneyti sem framleitt er úr lífmassa er kallað lífeldsneyti til aðgreiningar frá eldsneyti sem framleitt er úr olú úr iðrum jarðar. Undir skilgreiningu lífeldsneytis getur t.d. fallið repjuolía, etanol unnið úr plöntum og lífgas, framleitt annaðhvort með niðurbroti lífmassa í súrefnissnauðu umhverfi eða með niðurbroti lífmassa með gösun. Lífgas er þannig aðgreint frá jarðgasi sem finnst í olúlindum.

Mikið af því lífeldsneyti sem nú er á markaði er unnið úr sömu plöntum og matvæli eru unnin úr. Verði slíkar plöntur notaðar í miklum mæli til eldsneytisframleiðslu er hætta á að það skili sér í herra matvælaverði, því hefur áherslan snúist meira í átt að plöntum og lífmassa sem hægt er að nýta án þess að það komi niður á matvælaframleiðslu, s.s. ónýtanlegu timbri, afgangi frá landbúnaði, heimilisúrgangi og skólpi.

Út frá þeirri þróun sem hefur orðið í framleiðslu og nýtingu lífeldsneytis á undanförunum árum og áratugum má skipta lífeldsneyti upp í 1. og 2. kynslóðar lífeldsneyti. Tafla 2-1 sýnir skiptingu helstu tegunda lífeldsneytis upp í fyrstu og aðra kynslóð, lífmassa og framleiðsluferli lífeldsneytisins.

Tafla 2-1: Fyrsta og önnur kynslóð lífeldsneytis. Helstu tegundir og framleiðsluaðferðir (Zhang, W., 2009)

Fyrsta kynslóð lífeldsneytis			
Eldsneytistegund	Nafn	Lífmassi	Framleiðsluferli
Lífetanól	Venjulegt lífetanól	Sykkurrófur, grjón	Vatnsrof og gerjun
Grænmetisolía	Hrein plöntuolía	Olíuplöntur, t.d. repja	Kaldpressun
Lífdísill	Lífdísill úr orkuplöntum	Olíuplöntur, t.d. repja	Kaldpressun/vinnsla
Lífdísill	Lífdísill úr úrgangi	Djúpsteikingarolía, dýrafita o.s.frv.	Vinnsla
Lífgas	Metan	Votur lífmassi	Súrefnissnauð gerjun
Lífetanól	-	Lífetanól	Efnamyndun
Önnur kynslóð lífeldsneytis			
Eldsneytistegund	Nafn	Lífmassi	Framleiðsluferli
Lífetanól	Sellulósa lífetanól	Lignín sellulósi <sup>1</sup>	Þróað vatnsrof og gerjun
Tilbúið <sup>2</sup> lífeldsneyti	Fischer – Tropsch aðferð, lífmetanól, etanól, dymethyl eter (DME) o.s.frv.	Lignín sellulósi	Gösun
Lífdísill	Vatnsunninn lífdísill	Grænmetisolía og dýrafita	Vatnsvinnsla
Lífgas	SNG (Synthetic natural gas)	Lignín sellulósi	Gösun
Lífvetni	-	Lignín sellulósi	Gösun eða lífefnafræðilegir ferlar

Út frá töflu 2-1 má greina að þróun frá 1. yfir í 2. kynslóð lífeldsneytis felst í tækniþróun við framleiðsluferli. Lífeldsneyti af annarri kynslóð er unnið fyrst og fremst með gösun eða vatnsrofi og gerjun en þessar aðferðir eru ræddar nánar hér aftar.

Þegar kemur að nýtingu á skólpi eru aðeins tvær leiðir færar til eldsneytisframleiðslu, þ.e. gerjun í súrefnissnauðu umhverfi og gösun.

## 2.2 Lífgas úr gerjun í súrefnissnauðu umhverfi

Einn orkugjafinn, sem hefur reynst afar vel og er nú þegar í töluverðri notkun, er metangas, unnið úr lífrænum úrgangi á Álfsnesi við Reykjavík af Sorpu hf.

Metan er meginuppistaða lífgass sem verður til þegar lífmassi brotnar niður í súrefnissnauðu umhverfi og hefur sameindaformúluna CH<sub>4</sub>. Lífgasið er samsett úr 50 – 75% metani, 30 – 45% koltvísýringi (CO<sub>2</sub>) og síðan ögnum af öðrum gastegundum. Þær helstu eru:

<sup>1</sup> Átt er við efni sem innihalda lignín sellulósa, getur t.d. verið timburafgangar eða úrgangur frá landbúnaði

<sup>2</sup> E. synthetic



### *Brennisteinsgös*

Í lífgasi, og þá sérstaklega því sem unnið er úr landfyllingum, má finna ýmis brennisteinsgös. Þau þarf að hreinsa burt því hætta er á ryði í tönkum og vélbúnaði en brennisteinsgös geta valdið ryði ef vatn er til staðar. Algengast af brennisteinsgösunum er vetnisbrennisteinn (0 – 0,5%).

### *Halógen sambönd*

Halógen sambönd er oft hægt að finna í lífgasi úr landfyllingum en sjaldan í lífgasi úr skólpi eða lífrænum úrgangi. Halógen sambönd oxast við bruna í vél. Þau geta verið mjög ætandi, sérstaklega ef vatn er til staðar.

### *Kísill*

Kísilagnir má finna í lífgasi úr landfyllingu og skólpi, (0 – 50 mg/m<sup>3</sup>). Kísillinn kemur úr alls konar efnum sem finnast í úrgangi og skólpi svo sem snyrtivörum og hreinsiefnum. Ef kísilagnirnar eru ekki hreinsaðar burt geta þær virkað sem eins konar svarfefni og skaðað vélbúnað. Notkun hreinsi- og snyrtiefna sem innihalda kísil hefur aukist mikið og vegna skaðlegra áhrifa kísils á vélbúnað þarf að leggja meiri áherslu á að vakta kísilmagn en áður hefur verið gert. Það er ekki til nein stöðluð aðferð við eftirlit með kísilmagni og deildar meiningar eru uppi um ágæti mismunandi aðferða.

### *Ryk og agnir*

Nauðsynlegt er að lífgasvinnslur séu útbúnar með einhvers konar síum til að ná burt ögnum. Síurnar ná einnig að fjarlægja vatns- og/eða olíudropa sem kunna að leynast í gasinu. Almenn er talað um að síur með möskvastærðinni 2 – 5 míkrometrar (10<sup>-6</sup> m) séu fullnægjandi (Persson, M 2006).

Notkun metans sem ökutækjaeldsneytis hefur aukist hratt hér á landi á undanförunum árum með hækkandi olúverði og tækniframförum á sviði framleiðslu og nýtingu metans. Þrjú verkstæði vinna í því að breyta bílum á þann hátt að þeir geti gengið á metani. Samkvæmt upplýsingum frá þessum verkstæðum; Vélamiðstöðinni, Einum Grænum og MeGasi, er biðlisti hjá þeim öllum eftir því að breyta bílum á þennan hátt og eru þau því öll að fullnýta afkastagetuna. Því má áætla að notuðum bílum, sem geta gengið fyrir metani, fjölgi um 8 – 10 á viku eins og staðan er í dag og reikna verkstæðin með því að fjölga starfsfólki og bæta aðstöðu til að auka afköstin. Einnig er Reykjavíkurborg að festa kaup á 49 fólksbílum sem verður breytt þannig að þeir geti gengið á metani. (Metan, e.d. (i) ) Þá á eftir að gera ráð fyrir fjölgun nýrra bíla sem koma til landsins sem metanbílar en bílaumboðin Askja og Hekla bjóða nýja bíla sem koma til landsins útbúnir til að ganga á metani. Þá hafa önnur bílaumboð hafið samstarf við breytingaverkstæði sem gengur út á að nýjum bílum er breytt hér á landi til þess að geta gengið bæði fyrir bensíni og metani.

Volkswagen framleiðir metan-/bensínbíla og Audi tilkynnti nýlega að þeir myndu hefja framleiðslu slíkra bíla árið 2013. Einnig er unnið markvisst að uppbyggingu nokkurs konar lífgass hraðbrautar (e. Gas Highway) en það er hluti af aukinni nýtingu á umhverfisvænum

orkugjöfum innan Evrópusambandsins og snýst um uppbyggingu gasáfyllingastöðva þvert yfir Evrópu til að auðvelda almenna notkun metans (gashighway, e.d. (i)). Þá er hreyfing á þessum málum utan Evrópu og má nefna að íranski bílaframleiðandinn IKCO stefnir að stóraukinni framleiðslu á metanbílum (metan, e.d. (ii)). Það má því ljóst vera að eftirspurn eftir metani sem ökutækjaeldsneyti er að stóraukast, bæði héraðs og erlendis, og því er óhjákvæmilegt að auka framboðið með einum eða öðrum hætti.

Ein aðferð, sem notuð er erlendis, t.a.m. mikið í Svíþjóð, er að framleiða metan úr lífrænum hluta skólps. Umhverfisávinningurinn af því er í raun tvíþættur þar sem skólpið er hreinsað áður en því er sleppt út í náttúruna og úr því fæst umhverfisvænt eldsneyti. Einnig er metan skilgreint sem gróðurhúsalofttegund. Hver sameind af metani (CH<sub>4</sub>) veldur um 21x meiri gróðurhúsaáhrifum en ein sameind af koltvísýringi (CO<sub>2</sub>) (Metan, e.d. (iii)). Það er því mikill ávinningur af því að safna lífrænum úrgangi saman og koma í veg fyrir að metan sleppi út í andrúmsloftið. Staðreyndin er raunar sú að það veldur minni gróðurhúsaáhrifum að brenna það metan sem myndast við gerjun lífræns úrgangs í súrefnissnauðu umhverfi heldur en að sleppa því út í andrúmsloftið.

Hreinsun skólps með niðurbroti í súrefnissnauðu umhverfi (e. anaerobic digestion) er ekki ný af nálinni og hefur sú tækni verið notuð við hreinsun frávatns í meira en öld (Hahn, H. og Hoffstede, U. 2010). Þar til nýlega var hlutverk hreinsunar einungis að minnka umfang úrgangs og var það lífgas sem myndaðist einungis brennt eða því sleppt út í umhverfið.

Á undanförunum árum hefur sá möguleiki að nýta lífgasið sem endurnýjanlegan og umhverfisvænan orkugjafa notið síaukinna vinsælda. Hreinsistöðvar eru gjarnan knúnar rafmagni sem framleitt er á staðnum með bruna metangass sem til fellur og metan er í sífellt meira mæli nýtt til húshitunar, rafmagnsframleiðslu eða jafnvel selt inn á gasdreifikerfi.

Þá færast það í vöxt víða erlendis að ökutæki séu knúin metangasi, þá sérstaklega almenningsamgöngur og atvinnutæki hvers konar s.s. sorphirðuvagnar, götusópar o.s.frv. en einnig venjulegir fólksbílar.

Erlendis er mikið horft til þess að nýta metan, sem framleitt er úr margs konar úrgangi, til rafmagnsframleiðslu og húshitunar. Þannig er markmiðið að auka vægi endurnýtanlegra og umhverfisvænna orkugjafa í raforkuframleiðslu og hitun húsa.

Evrópusambandið stendur á bak við verkefni sem kallast „Biogasmax“ og snýst það um rannsóknir og þróun á framleiðslu á lífgasi til að auka sjálfbæra þróun innan Evrópu. Gríðarlegt magn upplýsinga liggur inni á síðu Biogasmax verkefnisins. Á heimasíðu verkefnisins er því lýst þannig:

„Markmið BIOGASMAX verkefnisins er að takast á við þær áskoranir sem fylgja loft- og vatnsmengun á þéttbýlissvæðum sem og förgun úrgangs.

Til þess er notuð stöðug hringrás þar sem lífgas er framleitt úr margs konar úrgangi sem til fellur í þéttbýli og þarf að meðhöndla rétt. BIOGASMAX einbeitir sér að eftirliti með hagrænum og umhverfislegum áhrifum þess að framleiða umhverfisvænt eldsneyti til flutninga.

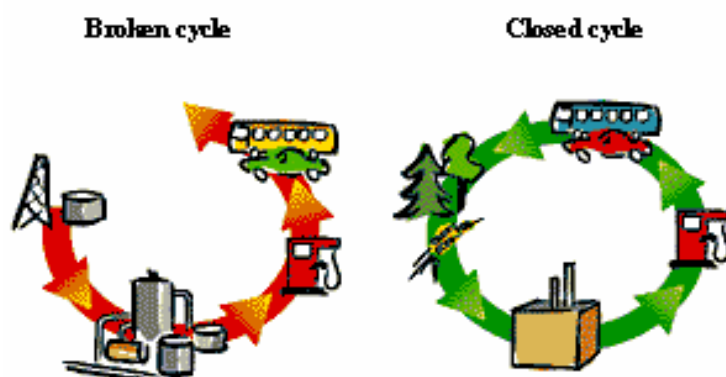
Rannsóknir og þróun í tengslum við BIOGASMAX eru unnar í tengslum við eftirfarandi fjögur aðalsvið:

- Framleiðsla á lífgasi úr margs konar úrgangi.
- Heinsun (e. upgrading) lífgass í hágæðaðsneyti.
- Dreifing til samgangna og inn á gasdreifikerfi.
- Notkun í farartækjum til að auka fjölda metanknúinna bifreiða.“ (Biogasmax, e.d.).

Þar sem nær öll raforka er framleidd á umhverfisvænan hátt hér á landi er meiri möguleiki en víða erlendis á að nýta metanið sem ökutækjaeldsneyti. Því er ekki þörf á að skipta út aðferðum við rafmagnsframleiðslu eða húshitun. Einnig er rafmagnsverð á Íslandi það lágt að ekki svarar kostnaði að framleiða metan til rafmagnsframleiðslu. Metan er því álitlegur orkugjafi fyrir ökutæki hér á landi í stað ósjálfbærra orkugjafa sem skaðlegir eru umhverfinu og hækka sífellt í verði.

### 2.2.1 Framleiðsla lífgass

Lífgas myndast þegar lífrænt efni gerjast í súrefnisfirrtu umhverfi. Það metan, sem unnið er úr því lífgasi (hauggasi) sem framleitt er hér á landi, er gjarnan nefnt nútíma – metan og er þá verið að aðgreina það frá fyrri tíma – metani, svonefndu jarðgasi sem unnið er úr gasi í olíulindum. Efnæfræðilega er enginn munur á þessu tvennu en umhverfislegur munur er mikill og felst í því að við bruna á jarðgasi er verið að bæta við magn koltvísýrings í umhverfinu en við bruna á nútíma – metani eykst ekki magn koltvísýrings heldur er bruninn einfaldlega hluti af hringrás koltvísýrings í náttúrunni til skamms tíma (Metan, e.d. (iii)). Sá koltvísýringur sem sleppur út í andrúmsloftið við brunann er þannig hluti af vistkerfinu ef um nútíma – metan er að ræða á meðan koltvísýringi er dælt í vistkerfið til viðbótar við þann sem fyrir er sé jarðeldsneyti brennt. Mynd 2-1 sýnir hvernig hringrás koltvísýrings er heil (e. closed cycle) í tilfalli lífeldsneytis og brotin (e. broken cycle) í tilfalli jarðeldsneytis.



Mynd 2-1: Hringrás koltvísýrings úr jarðeldsneyti annars vegar og lífeldsneytis hins vegar (Mårtensson, E., 2007)

Metan er nú þegar vel þekkt sem ökutækjaeldsneyti og er mun lengra á veg komið sem slíkt heldur en aðrir umhverfisvænir orkugjafar. Einn kostur metans umfram t.d. lífdísil er sá að hægt er að vinna metan úr lífrænum úrgangi, þ.e. rusli, og því hefur efniviðurinn til

framleiðslunnar verið nýttur áður í stað þess að rækta plöntur sérstaklega til eldsneytisframleiðslunnar og ganga þannig hugsanlega á land til matvælaræktunar en það er að verða vandamál víða um heim. Þó er vissulega hægt að rækta plöntur sérstaklega til metanframleiðslu. Í Västerås í Svíþjóð taka bændur þátt í metanframleiðslu og eiga hluta í fyrirtækinu sem framleiðir og hreinsar lífgas. Fyrir utan að skila lífrænum úrgangi til framleiðslunnar rækta þeir hey til gerjunar á ökrum sem teknir eru til hliðar. Einnig fá þeir þurrefni sem nýtt hafa verið til metanframleiðslu og nota sem áburð. (Mårtensson, E., 2007).

Við framleiðslu lífgass með gerjun í súrefnissnauðu umhverfi er notast við tanka sem eru einangraðir svo ekki sleppi súrefni úr andrúmsloftinu inn í þá. Þessir tankar eru kallaðir gerjunartankar (e. digester tanks).

Lífmassi er látinn brotna niður í gerjunartönkunum og veltur stærð og umfang þeirra á því hve mikinn lífmassa á að vinna.

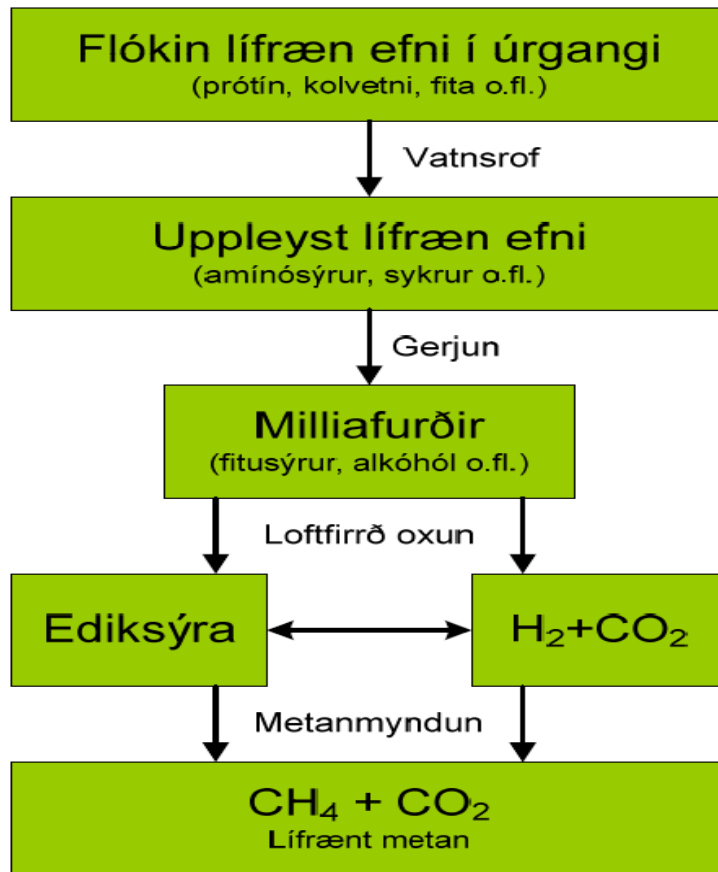
Tafla 2-2: Rúmmál, hæð og landsvæði gerjunartanka miðað við lífmassa til gerjunar (Monnet, F., 2003)

Hráefni til gerjunar (tonn á dag)	Rúmmál tanka (m <sup>2</sup> )	Hæð tanka (m)	Landsvæði (m <sup>2</sup> )
<b>50</b>	800 – 1.500	8 – 10	75 – 150
<b>150</b>	2.200 – 3.500	10 – 12	180 – 360
<b>350</b>	4.700	10	470
<b>450</b>	7.700	15	513

Tafla 2-2 sýnir samband á milli magns lífmassa sem notaður er til gerjunar og þess rúmmáls gerjunartanka sem nauðsynlegt er til að framleiða lífgas úr því magni ásamt hæð tanka og fjölda fermetra sem þarf af landsvæði undir þá. Það skal þó haft hugfast að annað gildir um gerjun á seyru vegna hins háa vatnshlutfalls en nánar verður farið yfir það í kafla 3.

Það ferli sem notað er við niðurbrot lífræns efnis til framleiðslu lífgass er lífrænt ferli sem skiptist í nokkur þrep. Þá er mismunandi hve lengi lífmassinn er látinn gerjast í súrefnissnauðu umhverfi (e. long and short hydraulic retention time HRT), þ.e. viðverutími hráefnisins við loftfirrtar aðstæður. Viðverutími er skilgreindur sem *rúmmál gerjunartanka/flæði hráefnis* og segir þannig til um hve lengi hráefnið stoppar í gerjunartönkum. Algengast er að notast sé við styttri viðverutíma við gerjun fráveituvatns en lengri viðverutíma við gerjun þurrari lífmassa (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010).

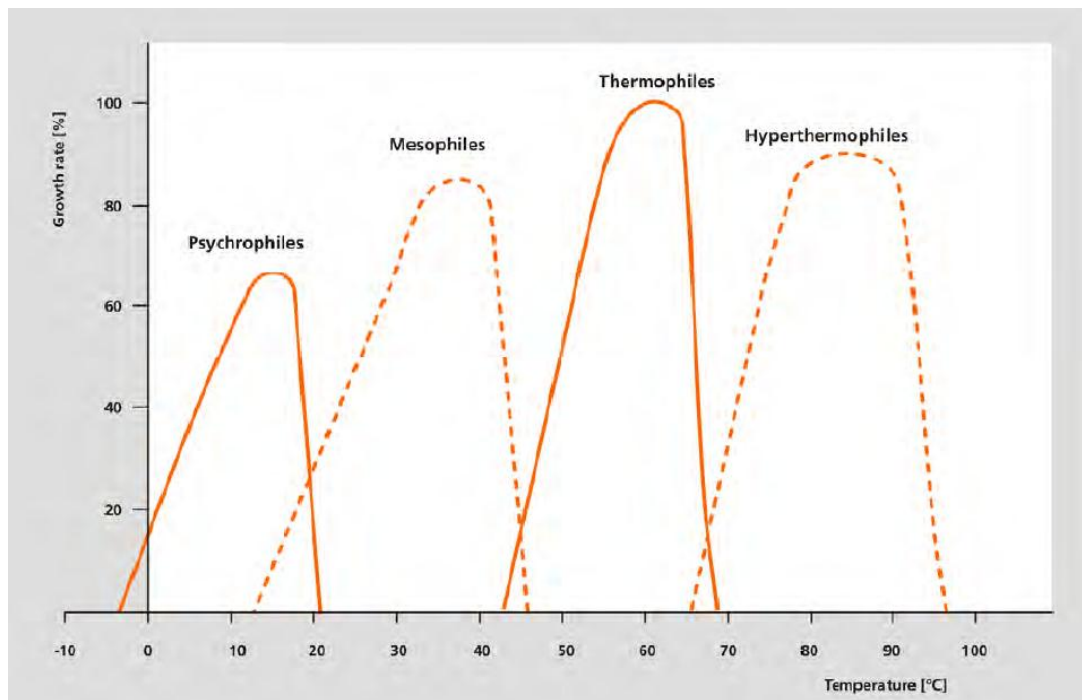
Niðurbrotið er samspil örvera sem saman geta brotið niður lífmassann en geta það ekki einar. Hægt er að skipta ferlinu upp í fjögur þrep; vatnsrof (e. hydrolysis), gerjun (e. fermentation, acidification), loftfirrða oxun (e. acetogenesis) og metanmyndun (e. methanogenesis) og er það sýnt á mynd 2-2:



Mynd 2-2: Lífefnafræðilegt ferli niðurbrots lífrænna efna í súrefnissnaudu umhverfi (Björn H. Halldórsson et al., 2006)

Mynd 2-2 lýsir í grófum dráttum því lífefnafræðilega ferli sem á sér stað við niðurbrot lífmassa í súrefnissnaudu umhverfi.

Við framleiðslu lífgass er jafnframt mikilvægt að huga að hitastiginu á lífmassanum á meðan á niðurbrotinu stendur. Örverur leika stórt hlutverk í niðurbroti lífmassans eins og fram hefur komið og þarf hitastigið að henta þeim sem og aðrar aðstæður. Þær þurfa sem sagt að hafa nægt hráefni til að nærast á, hitastigið þarf að vera stöðugt, pH gildi hentugt og umhverfið þarf að vera súrefnissnautt (Leggett, J et al., 2011). Algengast er að lífgas sé framleitt við hitastig sem hentar „meðalhitakærum“ (e. mesophilic) örverum (20° – 40° C) og hitakærum (e. thermophilic) örverum (50° – 65° C) (Hahn, H. og Hoffstede, U. 2010).



Mynd 2-3: Vaxtarhraði mismunandi örvera eftir hitastigi (Hahn, H. og Hoffstede, U.,J (2010)

Eins og sjá má á mynd 2-3 fjölga hitakærar örverur sér meira en þær sem dafna í meðalhita en þær eru þó viðkvæmari fyrir sveiflum í hitastigi. Hinar örverurnar, sem skilgreindar eru á myndinni, þykja ekki henta til lífgasframleiðslu.

Mesophilic örverur þurfa lengri viðverutíma en thermophilic og ná ekki að drepa lifandi smitefni í lífmassanum. Til þess að leysa það er gjarnan notast við thermophilic aðstæður við niðurbrot á lífrænum iðnaðarúrgangi, úrgangi frá landbúnaði og skólpi (Monnet, F. 2003). Verði notast við þær aðstæður við niðurbrot skólps hér á landi þyrfti að hafa í huga hve viðkvæmar örverurnar eru fyrir sveiflum í hitastigi.

Annað sem skiptir máli er pH gildi þess lífmassa sem notaður er í framleiðslu lífgass og er það forgangsverkefni í lífgasframleiðslu að halda hentugu og stöðugu pH gildi við gerjunina. Örverurnar sem vinna á lífmassanum þrífast við ákveðið pH gildi og er ferlið því háð því gildi. Metanmyndandi örverur (e. methanogenic) eru sérstaklega viðkvæmar fyrir öfgum í pH gildum (Mara, D. og Horan, N., 2003).

Tafla 2-3: Bestu pH gildi fyrir mismunandi örveruhópa og niðurbrotsferlið í heild (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010)

Örverur	Besta pH gildi
<b>Hydrolytic og acidogenic</b>	5,2 – 6,3
<b>Methanogenic</b>	6,8 – 7,4
<b>Allt ferlið</b>	6,8 – 7,8

Eins og ráða má af töflu 2-3 er hentugast að pH gildi sé nokkurn veginn hlutlaust eða í kringum sjö. Við niðurbrot seyru er pH gildi yfirleitt við hentugasta stig því til staðar eru

basar sem myndast við niðurbrot próteina og aínósýra. Fjögur efna- og lífefnafræðileg ferli geta helst haft áhrif á pH gildi í gerjunartönkum:

1. Ammoníak upptaka og losun.
2. Myndun og upptaka rokgjarnra fitusýra.
3. Brennisteinsmyndun vegna mismunandi minnkunar á súlfati eða súlfíði.
4. Ummyndun á hlutlausu, lífrænu kolefni yfir í metan og koltvísýring.

Við skilvirkar niðurbrotsaðstæður næst lækun pH gildis við náttúrulegar aðstæður s.s. upptöku metanmyndandi örvera á rokgjörnum fitusýrum. Það er þó háð jafnvægi á milli loftfirrðrar oxunar og metanmyndunar sem getur auðveldlega raskast vegna ytri aðstæðna. Raskist þetta jafnvægi eru tvær leiðir færar. Í fyrsta lagi að stöðva innstreymi til gerjunartanka og gefa þannig metanmyndandi sýrum tíma til þess að brjóta niður umfram fitusýrur og hækka þannig pH stigið. Í öðru lagi er mögulegt að bæta við basa, s.s. NaOH eða Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> þar til viðunandi pH stigi er náð (Mara, D. og Horan, N., 2003).

Sökum þess að hentugustu pH gildi eru ólík fyrir þessi tvö meginstig niðurbrotsins er gerjunarferlinu stundum skipt upp í tvö eða fleiri þrep. Meirihluti lífgasframleiðslu í dag fer þó fram í einu þrepi en fáeinir aðilar hafa tekið upp fjölþrepa gerjunarkerfi og þá helst í frárennslisgerjun þar sem frárennslis hefur lágt þurrefnainnihald (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2011).

### 2.2.2 Hreinsun lífgass

Til að unnt sé að nýta lífgasið sem ökutækjaeldsneyti þarf að hreinsa koltvísýring og önnur efni úr gasinu til að eftir standi því sem næst hreint metan. Hér á landi er hreinleikinn allt að 98% (Metan, e.d. (iii)).

Það er þó enn mikilvægara að það metan sem er á markaðnum sé jafnhreint, hvaðan sem það er keypt, frekar en að það nái sem næst 100% hreinleika þó að það sé bónus þar sem drægni ökutækisins eykst pr. rúmmetra eftir því sem hreinleikinn eykst. Ástæða þess að metanið þarf að vera jafnhreint er sú að vélbúnaðurinn er miðaður við ákveðið hreinleikastig og ef gasið sem er notað er ekki við það stig er hætta á að vélbúnaðurinn virki ekki eins vel og hann ætti að gera. Því þarf að hafa í huga, þegar fram líða stundir og jafnvel fleiri fara út í framleiðslu metans hér á landi, að ákveðnir staðlar þyrftu að gilda um hreinleika metans. Raunar leggja Michael Beil og Uwe Hoffstede hjá Biogasmax verkefninu til í skýrslu sinni „Guidelines for the implementation and operation of biogas upgrading systems“ að það sé alveg skýrt hve stórt hlutfall af hverri gastegund eigi/megi vera í því metani sem selt er til neytenda. Þeir leggja jafnframt til að reglugerðir um dreifingu bæði lífgass og metans séu metnar í hverju landi (Beil, M. og Hoffstede, U., 2010).

### Hreinsun koltvísýrings og annarra efna úr lífgasi

Þegar lífgas er hreinsað er gjarnan talað um uppfærslu (e. upgrading) og eru margar mismunandi aðferðir í boði. Hér verður farið yfir nokkrar af þeim aðferðum sem þekktar eru. Upplýsingar eru sóttar í „Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection“

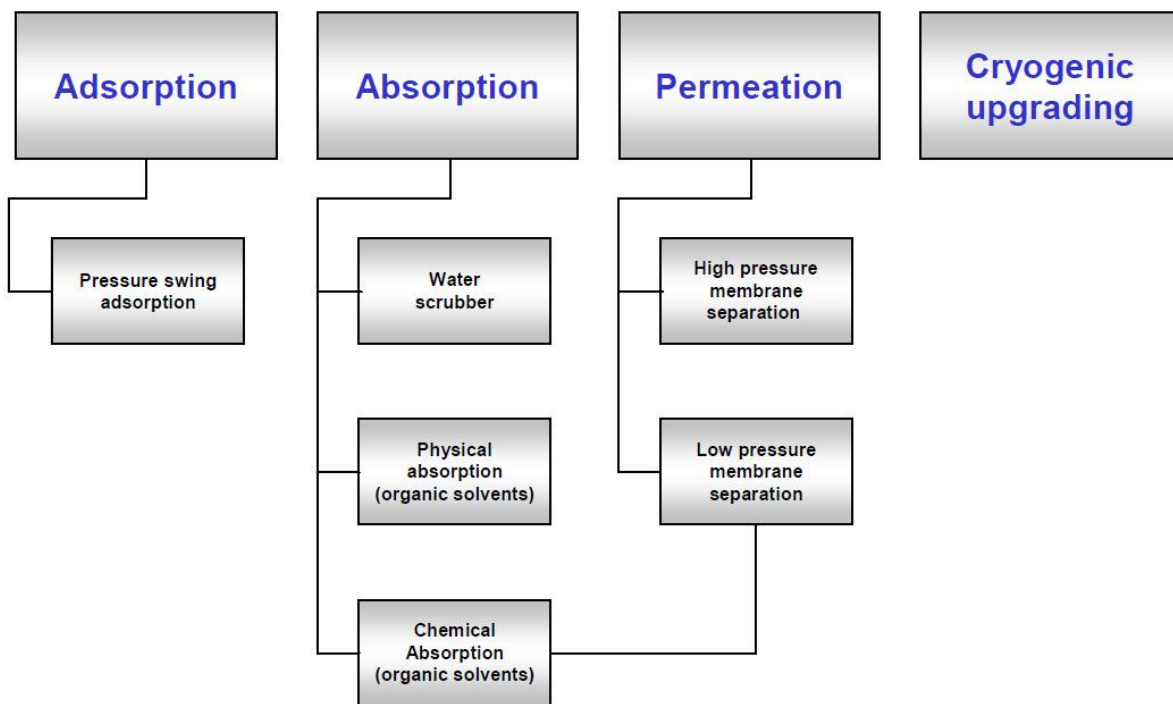
skýrsluna frá IEA Bioenergy sem kom út 2006 og „Guidelines for the implementation and operation of biogas upgrading systems“ frá Biogasmax verkefninu.

Þrjár meginástæður liggja að baki því að hreinsa lífgas:

- Uppfylla þær kröfur sem vélbúnaðurinn gerir til eldsneytisins.
- Auka hitagildi gassins.
- Stöðlun gass (eins og nefnt var hér að framan).

Tæknilega séð væri hægt að keyra vél á lífgasi án þess að hreinsa koltvísýringinn burt en nokkrar ástæður liggja að baki því að hagkvæmt er að fjarlægja koltvísýring úr lífgasi. Í fyrsta lagi fer það verr með vélbúnaðinn að keyra hann á óhreinsuðu lífgasi þar sem ýmsar sýrur stytta endingartíma hans. Í öðru lagi eykst orkuinnihald gassins við það að fjarlægja koltvísýring sem aftur eykur drægni miðað við rúmmál. Þá er hreinsun koltvísýrings liður í stöðlun gassins sem rætt var um hér að ofan (Persson, M et al., 2006).

Nokkrar aðferðir eru þekktar við að hreinsa lífgas og eru upptöku- (absorption) og aðsogs- (adsorption) aðferðir algengastar.



Mynd 2-4: Yfirlit yfir mismunandi hreinsitækni lífgass (Beil, M. og Hoffstede, U., 2010)

Mynd 2-4 sýnir helstu flokka hreinsunar lífgass og tækni í hverjum flokki. Undir aðsog fellur ísog undir þrýstingi (e. pressure swing adsorption). Aðsog (e. adsorption) virkar þannig að lífgasi er þrýst í gegnum kolefnissameindasigti (e. carbon molecular sieves) sem skilur koltvísýring frá lífgasinu og einnig vatn, brennisteinsgas, nitur og súrefni. Hreinleiki metans sem út kemur er >96%. Þessi aðferð skilar ekki jafnhreinu metani og vatnshreinsun. Eitthvað af metani sleppur út í andrúmsloftið með þessari aðferð og þarf því að bæta við öðru hreinsistigi á útblástur frá hreinsuninni til að koma í veg fyrir að það sleppi út í andrúmsloftið.



Það metan sem sleppur er >1% miðað við hluta metans í lífgasinu. Það sem þessi tækni hefur umfram vatnshreinsun er að hún skilar þurrara metani, þ.e. metanið er ekki jafnríkt af vatni og það sem önnur tækni gefur frá sér en á móti kemur að útbúnaður og umsjón er meiri og skilar það sér í hærri rekstrarkostnaði.

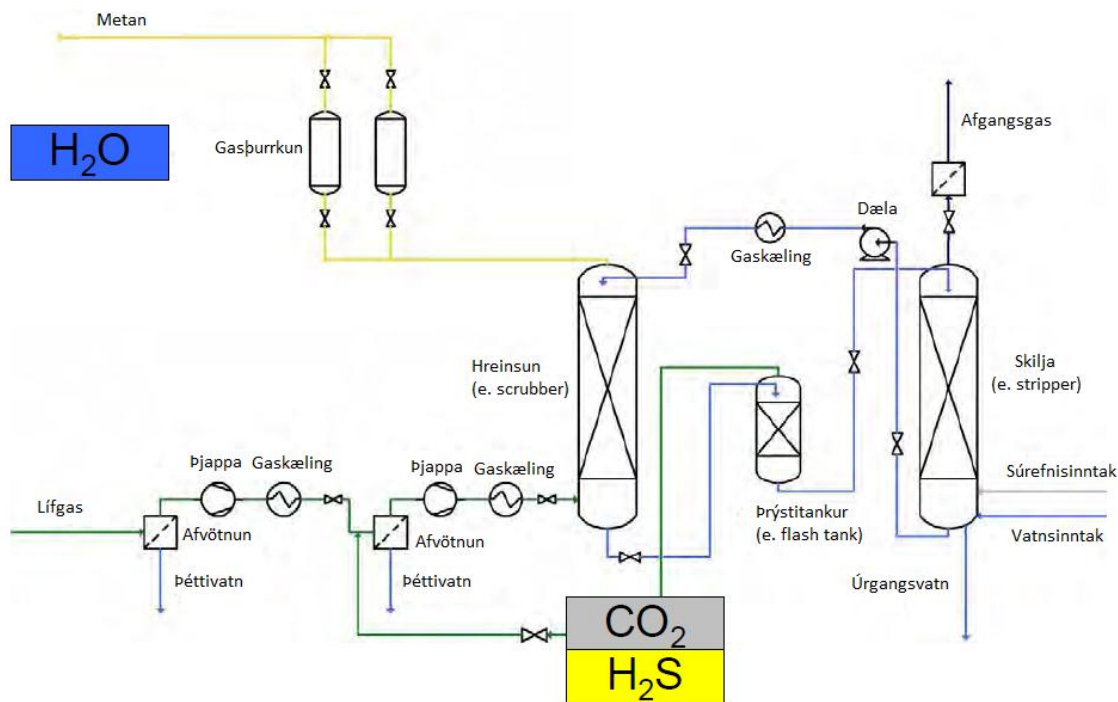
Hreinsun með himnum (e. membrane separation) fellur undir undir svokallaða stöðlun (e. permeation) á mynd 2-4 en er þá átt við stöðlun lífgass. Hreinsun með himnum virkar þannig að lífgasinu er veitt í gegnum himnur sem hleypa koltvísýringi og öðrum mengunarefnum ( $H_2O$ ,  $H_2S$  og  $NH_3$ ) í gegnum sig en ekki metani. Hreinsun með himnum er ódýrasti kosturinn sem í boði er, bæði í fjárfestingu og rekstri, en skilar lægra metanhlutfalli en hinar aðferðirnar eða að hámarki 89,5% og ekki munar svo miklu á fjárfestingar- og rekstrarkostnaði himnuhreinsunar og vatnshreinsunar að það borgi sig þegar tekið er tillit til hins lága metanhlutfalls. Lághitahreinsun (e. cryogenic upgrading) nýtir mismunandi hitastig sem gös þéttast við. Metan þéttist við um  $-162^\circ C$  en koltvísýringur við  $-78^\circ C$  og er þannig hægt að skilja gasið frá vökvanum við lægra hitastig en  $-78^\circ C$ . Þá er möguleiki að hækka þrýstinginn upp í 40 – 80 bör, við þann þrýsting er hægt að skilja metanið frá fljótandi koltvísýringnum við um  $-50^\circ C$ . Báðar þessar aðferðir eru sjaldgæfari en þær sem á undan var lýst og einnig krefst lághitahreinsun flókins búnaðar og er dýrust allra þessara aðferða, bæði í fjárfestingu og rekstri (Hullu, J. de et al., 2008).

Upptökuaðferðir virka á koltvísýring og vetnisbrennistein og ganga út á að nýta missterka krafta þessara efna annars vegar og metans hins vegar til að bindast öðrum efnum. Eins og mynd 2-4 sýnir eru upptökuaðferðirnar í grunninn tvenns konar, vatnshreinsun (e. water scrubbing) og hreinsun með lífrænum leysum (e. organic solvents).

Vatn er algengasti leysirinn sem notaður er við uppfærslu lífgass. Lífgasinu er þá þjappað saman og þrýst í gegnum botn á víðu röri þar sem það mætir vatnsstraumi sem kemur úr gagnstæðri átt. Þrýstingurinn í rörinu er á bilinu 7 – 10 bör og hreinleiki metans sem út kemur er um 97% (Beil, M. og Hoffstede, U., 2010).

Bæði koltvísýringur og vetnisbrennisteinn leysast betur upp í vatni en metan og því er það gas sem upp úr rörinu kemur ríkt af metani og vatni og er því þurrkað til að skilja metanið frá. Þessi aðferð er ein sú algengasta við uppfærslu lífgass og er notuð hérlendis (Metan, e.d. (iii)). Það er því komin reynsla á vatnshreinsun lífgass hér á landi.

Mynd 2-5 sýnir algenga útfærslu af vatnshreinsunarútbúnaði en slíkur búnaður er til í nokkrum útfærslum. Á mynd 2-5 er lífgasi dælt inn í afvötnunarbúnað þaðan sem því er dælt í gegnum þjöppur og kælingu áður en það fer í gegnum sjálf hreinsunarrörin (e. scrubber).



Mynd 2-5: Yfirlit yfir vatnshreinsun lífgass (Beil, M. og Hoffstede, U., 2010)

Svolítið af metangasi sleppur út í andrúmsloftið eða >1% miðað við metanflæði í lífgasinu. Það þarf að koma upp hreinsun á því gasi sem sleppt er út í andrúmsloftið til að koma í veg fyrir að þetta metan sleppi. Það er hægt að gera með endurnýttri varmaoxun (e. regenerative thermal oxidation) eða ólogandi oxun (e. flameless oxidation). Eins og áður segir er komin reynsla á vatnshreinsun hér á landi en þegar lífgas úr seyru er hreinsað þarf að hafa í huga að mögulega geta komið toppar af lífrænum leysum (e. organic solvent peaks) og þarf að gera ráð fyrir þeim í uppsetningu hreinsibúnaðar og bæta við auka hreinsunarþrepi (Beil, M. og Hoffstede, U., 2010).

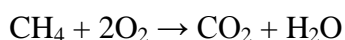
Uptaka með lífrænum leysum virkar í tæknilegum atriðum alveg eins og með vatni. Helsti munurinn er sá að koltvísýringur og brennisteinsvetni leysast betur upp í lífrænum leysum en vatni og því þarf minni yfirbyggingu utan um slíka hreinsistöð (Persson, M., 2006). Hins vegar sleppur meira metan út í andrúmsloftið heldur en við vatnshreinsun eða >2% og hlutfall metans í því lífgasi sem kemur hreinsað út er á bilinu 93 – 98% en einnig allt upp í 99% eftir því hvaða tækni er notuð. Efnisleg upptaka (e. physical absorption) nær um 93 – 98% metanhlutfalli en efnafræðileg upptaka (e. chemical absorption) nær um 99% metanhlutfalli. Sífelld þarf að endurnýja leysana sem draga í sig koltvísýringinn og önnur eitrefni með eimingu og kallar það á aukinn tækjabúnað og orkunotkun umfram það sem vatnshreinsun krefst. Það væri því rökréttara að notast við þessa upp færsluáferð í löndum þar sem hreint vatn er af skornum skammti eins og svo víða er orðin raunin í hinum vestræna heimi en ekki hér á landi. Það skal þó haft í huga að þó að vatn sé ekki af skornum skammti hér á landi nú um stundir gæti það breyst í framtíðinni. Þar að auki þarf að hafa hugfast að sóa ekki ferskvatni að óþörfu þar sem vatnsskortur er að verða sífelld stærra vandamál í heiminum og gætu Íslendingar allt eins horft fram á það vandamál þegar fram líða stundir.

Endurnýjanlegar ferskvatnsauðlindir Íslendinga eru um 666.667 rúmmetrar á mann á ári en til samanburðar má geta þess að í mörgum ríkjum Afríku eru vatnslauðlindir minna en 1.000 rúmmetrar á mann (Ingibjörg E. Björnsdóttir, 2004). Með það í huga og það að vatnshreinsun er þekkt og þrautreynd aðferð við uppfærslu lífgass hérlendis sem erlendis, ódýr í rekstri og afkastamikil má reikna með að áfram yrði notast við þá aðferð hér á landi verði farið út í aukna framleiðslu á metani.

Á heildina litið kemur vatnshreinsun best út þegar borinn er saman fjárfestingar- og rekstrarkostnaður uppfærslustöðva. Í viðauka A má sjá samanburð á fjárfestingar- og rekstrarkostnaði þessara aðferða sem og hámarks metanhreinleika ásamt helstu kostum og göllum við hverja aðferð.

### 2.2.3 Orkuinnihald mismunandi kolvetnissambanda og vetnis

Þegar hreint metan er brennt fæst koltvísýringur og vatn:



Orkan sem losnar við þennan bruna er 891 KJ/mol miðað við efra brunagildi og virðist það vera nokkuð lágt miðað við t.d. bensín sem losar 5.463 KJ/mol og díselolíu sem losar 10.698 KJ/mol en þó þarf að hafa fleira í huga. Bensín og díselólíusameindir eru flóknari og stærri um sig og auk þess er gott að bera saman KJ/gr, þ.e. orkuna sem losnar við bruna ákveðinnar þyngdar af efninu.

Tafla 2-4: Orkuinnihald nokkurra kolvetnissambanda og vetnis, efra brunagildi (Demirbaş, A., 2000/Metan e.d., (iv))

Eldsneyti	KJ/g	Þéttleiki, kWst/lít.	Sameind	CO <sub>2</sub> Kg/lít.
Própan	50,4	7,08	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,56
Etanól	29,7	6,53	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	1,56
Bensín	46,5	9,67	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	2,40
Díselolía	45,8	10,73	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	2,64
Lífolía	39,6	9,25	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	2,28
Metan	55,8	7,13	CH <sub>4</sub>	0,36
Olía	47,9	10,7	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	2,40
Viður	14,9	2,99	-	1,08
Kol	30,2	6,05	-	2,28
Vetni	141,9	2,67	H <sub>2</sub>	0

Eins og glögg má sjá á töflu 2-4 er metan orkuríkasta kolefnissamsætan sé miðað við KJ/g og losar einnig minnst af koltvísýringi á hvern lítra.

Þegar metan er selt á ökutæki er það selt í normalrúmmetrum (Nm<sup>3</sup>) og til einföldunar er gjarnan miðað við að einn rúmmetri af metani jafngildi einum lítra af bensíni. Því metani, sem selt er á ökutæki, er þjappað á metangeyma upp í 220 bara þrýsting sem minnkar umfang þess verulega, almenna reglan er þó sú að miðað við sömu akstursvegalengd tekur metangeymir um 4,5x meira pláss en bensíngymir (Metan, e.d. (iv)). Þegar bílum er breytt eftir á til þess

að ganga fyrir metani er algengast að metangeymum sé komið fyrir í farangursgeymslu bílsins og taka þeir þá rými sem ekki er lengur hægt að nýta undir farangur. Leigubílstjórar, sem hafa farið út í slíkar breytingar, hafa þó ekki lent í vandræðum af þessum sökum og almennt virðist þetta ekki vera mikið vandamál (Hannes Arnórsson, 2011). Bílar, sem koma hingað til lands útbúnir til þess að ganga á metani, ná þó lengra á metanbirgðum og má nefna sem dæmi að VW Passat fer um 440 km á metanbirgðum og annað eins á bensínbirgðum án þess að farangursrými sé fórnað undir metan- eða bensíngeyma (Hekla, e.d.).

Einnig er mögulegt að kæla metan niður í  $-162^{\circ}\text{C}$  þannig að það verði fljótandi. Það inniheldur þá mun meiri orku á rúmmálseiningu en sem gas. Metan í vökvaformi er notað í dag í stærri farartæki og báta og er einnig kælt niður í fljótandi form þegar það er flutt með skipum á milli landa. Metan í vökvaformi er ekki afgreitt á Íslandi í dag en þó er gert ráð fyrir framboði á slíku þegar fram líða stundir (Metan, e.d. (iv)).

## 2.3 Efnasmíðagas úr gösun

Gösun er aðferð sem nær aftur til 19. aldar. Framleiðsla efnasmíðagass (e. syngas) með gösun var mikið skoðuð í kringum seinni heimstyrjöldina en eftir að átökum lauk og framboð af fljótandi eldsneyti jókst á ný datt áhuginn á efnasmíðagasi niður þar sem fljótandi jarðeldsneyti var bæði ódýrara og einfaldara í vinnslu. En eftir miklar hráolíuverðshækkanir upp úr aldamótunum 2000, síminnkandi olíuauðlindir og loftslagsbreytingar af mannavöldum hefur áhuginn aukist verulega á ný og þá sérstaklega á gösun á lífmassa (Boerrigter, H. og Rauch, R., 2005).

Gösun er nú þegar notuð til gasframleiðslu. Kol og mór er nú þegar nýtt sem hráefni til gösunar. Þetta eru þó ekki sjálfbærir orkugjafar og hefur áhugi beinst í auknum mæli að lífmassa hvers konar sem hægt væri að nýta með sjálfbærum hætti sem hráefni til gösunar. Er þá helst horft til viðarkurls sem ekki væri nýtt annars, landbúnaðarúrgangs og sorps og er slíkt hráefni notað víða við gösun.

Við gösun er kolefnaríkt hráefni hitað upp með aðstoð einhvers eldsneytis (hvarfefnis) en þó ekki brennt heldur brotið niður í kolsýrings ( $\text{CO}$ ), koltvísýring ( $\text{CO}_2$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ) og vetni ( $\text{H}_2$ ) ásamt óvirkum gösum og snefilefnum og er mikilvægt að rugla ekki saman gösun og bruna. Þannig er gösun umbreyting á hráefni í gastegundir og í raun niðurbrot líkt og gerjun nema í stað þess að nýta gerlavirkni til niðurbrotsins líkt og við gerjun í súrefnissnaudu umhverfi er notast við hátt hitastig. Hágæða efnasmíðagas samanstendur fyrst og fremst af kolsýrings og vetni og er hægt að nýta það á margvíslegan hátt (Göransson, K. et. al., 2010).

### 2.3.1 Útbúnaður til gösunar og gösunarferlið

Hægt er að flokka tækni til gösunar eftir tæknilegum útfærslum. Flokkað er eftir því hvað er notað sem hvarfefni en gösun getur þannig verið loftblásin, súrefnisblásin eða gufublásin (e. air-, oxygen-, steam – blown). Einnig er hægt að miða við hvort gösunin fer fram við aukinn loftþrýsting eða ekki, hitastig, þ.e. hvort ferlið skilur eftir sig gjall eða ekki, hreyflæði ferilsins (e. fluid dynamic) og það hvaðan hitanum er veitt, þ.e. bein eða óbein hitun (e. direct or indirect heat supply/autothermal or allothermal gasification) (Göransson, K. et. al. 2010).

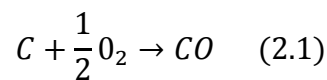
Tafla 2-5: Flokkun útbúnaðar til gösunar (Knoef, H.A.M., 2008)

Flokkur	
<b>Hvarfefni</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Loftblásin gösun</li> <li>• Súrefnisblásin gösun</li> <li>• Gufublásin gösun</li> </ul>
<b>Hiti til gösunar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bein hitun (e. autothermal): Hiti kemur að hluta til frá bruna lífmassans</li> <li>• Óbein hitun (e. allothermal): Hiti kemur frá ytri orkugjafa í gegnum hitaskipti eða óbeint ferli, t.d. aðskilnað á gösunar- og brunasvæði</li> </ul>
<b>Þrýstingur við gösun</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Þrýstingur andrúmslofts</li> <li>• Gösun undir auknum þrýstingi</li> </ul>
<b>Hönnun gösunarofns</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fastur botn (e. fixed bed)</li> <li>• Flotbotn (e. fluidized bed)</li> <li>• Gegnumflæði (e. entrained flow)</li> <li>• Tvöfaldur botn (e. twin bed)</li> </ul>

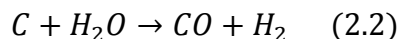
Tafla 2-5 sýnir almenna flokkun útbúnaðar til gösunar eftir hvarfefnum, hitastigi og þrýstingi við gösun og hönnun á gösunarofni en misjafnt er hvað hentar best eftir eðli hráefnisins.

Gösunarferlinu er hægt að lýsa í grófum dráttum eftir því hvað er notað sem hvarfefni.

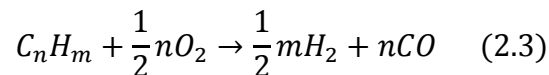
Súrefnisblásin gösun:



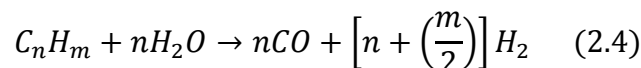
Gufublásin gösun:



Almenn jafna sem lýsir niðurbroti kolvetna með gösun þar sem súrefni er notað sem hvarfefni er þá þannig:



Ef notast er við gufugösun er jafnan þannig:



Hlutfall vetnis og kolsýrings veltur þannig á kolefna/vetnishlutfallinu í því hráefni sem notað er til gösunarinnar ásamt fleiri þáttum svo sem því hvarfefni sem notað er (Nipattummakul, N. et. al., september 2010).

Þó að nýting efnasmíðagass gefi frá sér koltvísýring er ekki um losun gróðurhúsalofttegunda að ræða hafi efnasmíðagasið verið myndað úr lífmassa, svo sem plöntum eða skólpi, enda er

sá koltvísýringur hluti af hringrás koltvísýrings í náttúrunni, rétt eins og þegar metangas úr lífmassa er brennt.

Í seinni tíð hafa orðið miklar framfarir á tækni til plasmagösunar. Plasmagösun fer fram við gríðarhátt hitastig og í súrefnissnaudu umhverfi. Þannig er ekki notast við hvarfefni eins og súrefni eða gufu heldur er hráefnið brotið niður í „plasma ástand“ en við plasma ástand hafa atóm tapað rafeindum sínum. Við 2000°C brotna gassameindir niður í atóm og við 3000°C glata gasatómin rafeindum sínum og eru þar með jónaðar (e. ionized) og þar með við plasmastig (Kalinci, Y. et. al., 2011). Til þess er notuð orka, getur verið hita-, rafmagns- eða rafsegulorka, sem leidd er á milli tveggja póla og óvirku gasi hleypt um straumbogann (e. electrical arc) (Minutillo, M. et. al., 2009). Plasmagösun er mun skilvirkari en aðrar tegundir gösunar, þ.e. nær öllu kolefni í því hráefni sem notað er til gösunarinnar er breytt í gas og því situr lítið sem ekkert eftir sem aska.

Kosturinn við gufugösun, vatnsgösun við yfirmarkshitastig og plasmagösun umfram aðra hitavinnslu (e. thermal treatment) á skólpi er að ekki þarf að þurrka skólpið jafnmikið. Nettó orkuframleiðsla verður fyrir vikið meiri þar sem ekki þarf að eyða mikilli orku í að þurrka skólpið (Mountouris, A., et. al., 2008). Af þeim sökum verða þessar aðferðir að teljast meira aðlaðandi ef haft er í huga hve lágt þurfnainnihald er í skólpi.

Afurð gösunar er hægt að skipta upp í tvennt eftir því hvaða hitastig er notað. Annars vegar efnagas (e. product gas) sem myndast við lághitagösun (<1000°C) og hins vegar efnasmíðagas (e. syngas) sem myndast við háhitagösun (>1200°C) eða hvatagösun (e. catalytic gasification). Munurinn á þessu tvennu liggur fyrst og fremst í hreinleika, þ.e. efnasmíðagas er því sem næst eingöngu kolsýringur og vetni en aðrar kolefnasamsætur leynast í efnagasi svo sem metan. Eftir því sem herra hlutfall er kolsýringur og vetni þeim mun hreinna er efnasmíðagasið og þar af leiðandi er um hreinni gösun að ræða.

## Efnagas

Hægt er að nýta margvísleg gösunarferli til gösunar á efnagasi. Hitastigið við gösunina er undir 1000°C og getur verið bæði um beina og óbeina hitun að ræða.

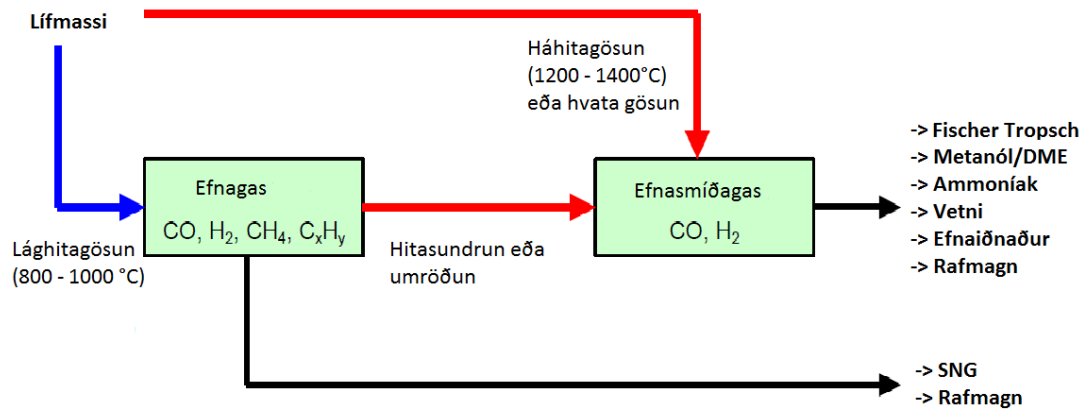
Helstu gösunarferlarnir eru:

- Uppsog (e. updraft) og fastur botn.
- Niðursog (e. downdraft) og fastur botn.
- Flotbotn.
- Óbeinn, flotbotn.

Þegar hefðbundinn lífmassi er nýttur til gösunar, svo sem viðarkurl og hálmur, er oftast notast við loft sem hvarfefni en þá er afurðin gjarnan menguð af nitri. Til þess að minnka niturmagn í efnagasinu er hægt að notast við hreint súrefni sem hvarfefni eða óbeina hitun. Óbein hitun er einnig aðlaðandi kostur vegna þess að umbreyting hráefnisins yfir í gas er meiri en við beina hitun, þ.e. minna af ösku situr eftir. Hitanum er veitt í hráefnið, annaðhvort með óvirkum efnem sem fylgja hráefninu eða notast er við hitaskipta. Helsta nýting efnagass er bein nýting til rafmagnsframleiðslu með bruna.

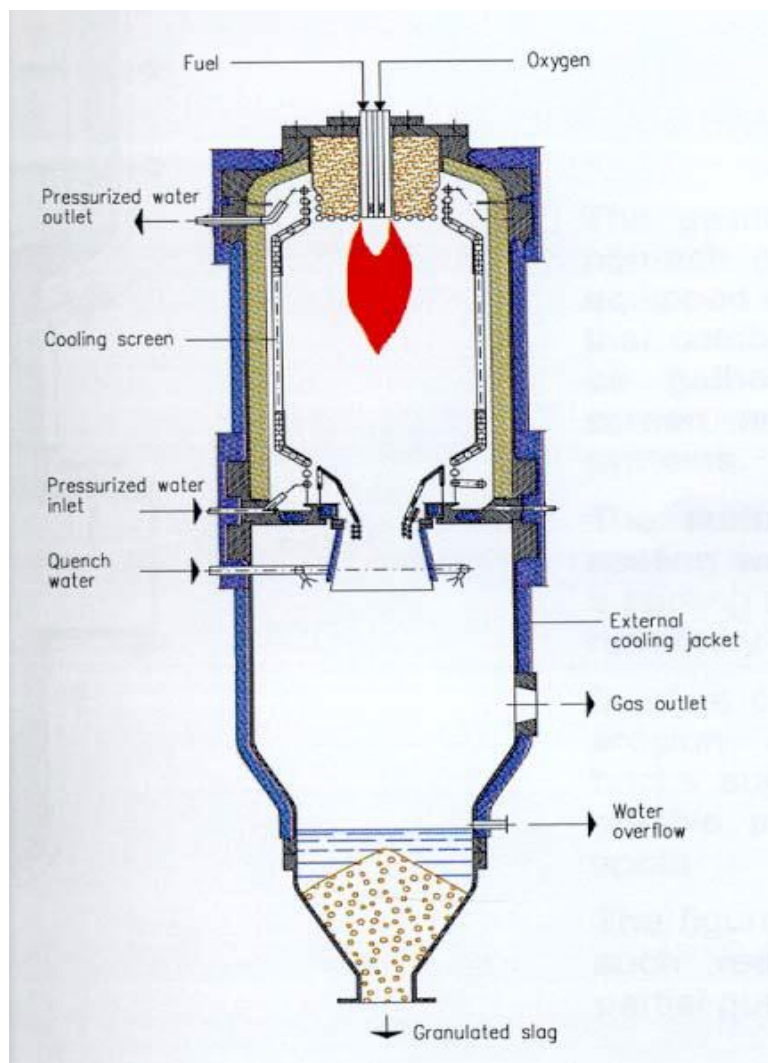
## Efnasmíðagas

Efnasmíðagas er myndað með gösun við hærra hitastig en efnagas eða  $>1200^{\circ}\text{C}$ . Hentugustu gösunaraðferðir til þessa eru niðursogs súrefnisblásin gösun og gegnumflæðisgösun. Hentugast þykir þó að nota gegnumflæðisgösun við svo hátt hitastig en niðursogsgösun með föstum botni takmarkast af stærð og hráefnið þarf að vera hreint. Markaður fyrir efnasmíðagas er fjölbreyttari en fyrir efnagas en nánar er fjallað um nýtingu efnasmíðagass í kafla 2.3.2.



Mynd 2-6: Munur á efnagasi og efnasmíðagasi og hefðbundinni nýtingu þeirra (Boerrigter, H. og Rauch, R., 2005)

Á mynd 2-6 má sjá að efnagasi er hægt að umbreyta í efnasmíðagas með hitasundrun (e. thermal cracking) eða umröðun (e. reforming). Við hvatagösun er notast við hvata sem eru hluti af gösunarferlinu en eru ekki nýttir sem hráefni en nýting þeirra er algeng við kolagösun.



Mynd 2-7: Dæmi um útbúnað til gegnumflæðisgösunar (Boerrigter, H. og Rauch, R., 2005)

Á mynd 2-7 má sjá dæmi um útbúnað til gegnumflæðisgösunar. Hráefnið (lífmassinn) kemur inn að ofanverðu ásamt súrefni og efnasmíðagas kemur út að neðanverðu (gas outlet) en öskunni sem eftir situr er veitt niður í gegnum botn búnaðarins.

Gegnumflæðisgösun er skipt upp eftir því hvort eftir situr aska eða ekki en það veltur á hráefninu sem notað er við gösunina (e. slagging or non – slagging gasification). Lífmassi er skilgreindur sem hráefni sem skilur eftir sig ösku (e. ash containing feedstock).

Í flestum tilfellum er gegnumflæðisgösun keyrð undir þrýstingi á bilinu 20 – 50 bör og notast er við hreint súrefni. Framleiðsla efnasmíðagass úr lífmassa með gegnumflæðisgösun hefur nokkra tæknilega kosti:

- Skilvirk efnagasframleiðsla í stórum verksmiðjum.
- Hægt að nota fjölbreytt hráefni. Gegnumflæðisgösun er hægt að nota til að umbreyta hvaða lífmassa sem er í efnasmíðagas og ösku.
- Einföld gasuppfærsla. Vegna þessa háa hitastigs er gasið laust við lífræn óhreinindi eins og tjöru og auðvelt er að hreinsa ólífræn óhreinindi úr gasinu.

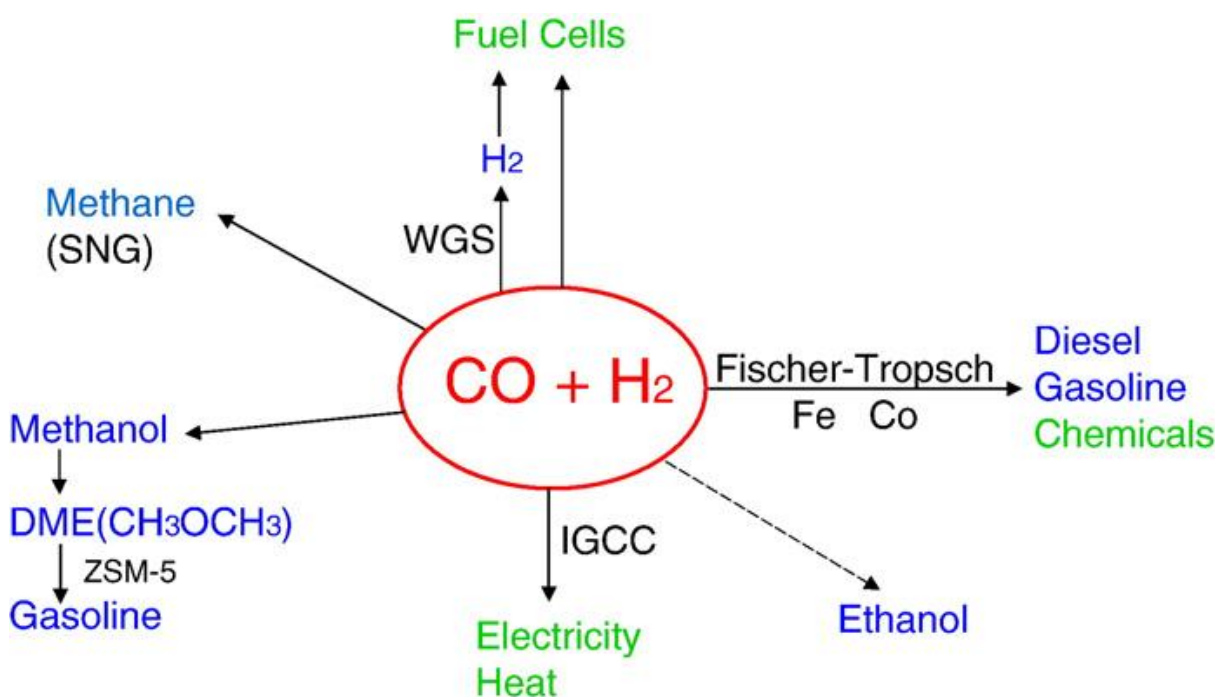


- Lágmarks úrgangur. Ólíkt lághitagösun er ekki um að ræða ösku sem inniheldur kolefni og því þarf ekki að farga öskunni sem efnaúrgangi líkt og þarf að gera við ösku sem myndast við lághitagösun. Hægt er að nýta öskuna sem myndast við háhitagösun í endurvinnslu og sem áburð (Boerrigter, H. og Rauch, R., 2005).

Þá er einnig hægt að nota vatn sem hvarfefni, bæði við gufugösun og svo vatnsgösun við yfirmarkshitastig en slík gösun fer fram við um 600°C. Vatn nær yfirmarksástandi (e. critical point) við 374°C og þrýsting upp á 22,1 Mpa (Gasafi, E. et. al., 2008).

### 2.3.2 Uppfærsla og nýting efna- og efnasmíðagass

Vegna þess hve samsetning efnagass er oftast flókin eru helstu notkunarmöguleikar þess rafmagnsframleiðsla ásamt hitaframleiðslu með beinum eða óbeinum bruna, nýting í eldsneytissellum (e. fuel cells) og framleiðsla á tilbúnu lífgasi (e. synthetic natural gas). Slík framleiðsla verður hagkvæmari eftir því sem efna- eða efnasmíðagasið er ríkara af vetni en efnahvarfið er  $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ . Fleiri möguleikar standa opnir við nýtingu á efnasmíðagasi þar sem ekki þarf að hreinsa jafnmikið af gastegundum frá áður en hægt er að fara í áframhaldandi nýtingu á gasinu (Boerrigter, H. og Rauch, R., 2005).



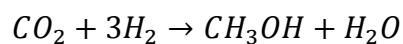
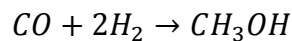
Mynd 2-8: Mögulegar eldsneytisafurðir úr efnasmíðagasi (Zhang, W., 2009)

Mynd 2-8 sýnir helstu leiðir sem hægt er að fara í orkunýtingu út frá hágæða efnasmíðagasi. Hægt er að nýta efnasmíðagass beint til orkuframleiðslu með bruna eða nýtingu vetnis í gegnum eldsneytissellur (e. fuel cells). Metanól er hægt að framleiða með hvataferli (e. catalytic reaction) kolmónoxíðs og einhverra koltvíoxíða við vetni úr efnasmíðagasi. Annað nýtingarferli á efnasmíðagasi er síðan Fischer Tropsch aðferðin sem opnar leiðir að fleiri afurðum. Með Fischer Tropsch aðferðinni er kolsýringur látin bindast vetni til þess að mynda keðju kolvetna ( $C_xH_{2x}$ ). Úr kolvetnakeðjum má síðan vinna bensín, díselolíu og kemísk efni

en framleiðsla díselolíu þykir álitlegri kostur en framleiðsla bensíns (Boerrigter, H. og Rauch, R., 2005).

Hægt er að skipta Fischer Tropsch (FT) aðferðinni upp í tvennt eftir hitastigi, þ.e. háhita FT annars vegar sem fer fram við 300 – 350°C og notast við járn sem hvataefni, og lághita FT hins vegar sem fer fram við 200 – 240°C og notast við járn eða kóbalt sem hvataefni (Dry, M.E., 2002).

Metanól er hægt að framleiða úr efnasmíðagasi með hvataefnahvörfum kolsýrings eða koltvísýrings við vetni.



Metanól er eingöngu framleitt með hvataefnahvörfum efnasmíðagass og er ferlinu skipt upp eftir því undir hve miklum þrýstingi það fer fram.

1. Háþrýstingsferli: 250 – 300 bör.
2. Miðþrýstingsferli: 100 – 250 bör.
3. Lágþrýstingsferli: 50 – 100 bör.

Lágþrýstingsaðferðin er ríkjandi þar sem henni fylgir lægri fjárfestingar- og framleiðslukostnaður, meiri áreiðanleiki og meiri sveigjanleiki en hinum aðferðunum.

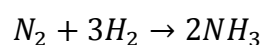
Afurðir úr FT ferlinu skiptast upp eftir lághita og háhita FT og er þessi skipting sýnd í töflu 2-6:

Tafla 2-6: Afurðir, hitastig, þrýstingur og umbreytingarhlutfall við lág- og háhita Fischer Tropsch ferli (Boerrigter, H. og Rauch, R., 2005)

	Lághita FT	Háhita FT
<b>Afurðir</b>	Vöx og/eða díselolíur	Bensín, létt ólefin
<b>Hitastig (°C)</b>	220 – 250	330 – 350
<b>Þrýstingur</b>	25 – 60	25
<b>CO + H<sub>2</sub> umbreyting (%)</b>	60 – 93	85

Tafla 2-6 greinir afurðir FT ferlisins eftir hitastigi og í sinni einföldustu mynd má segja að við lægra hitastig verði afurðin þykkari eða seigari en léttari við herra hitastig.

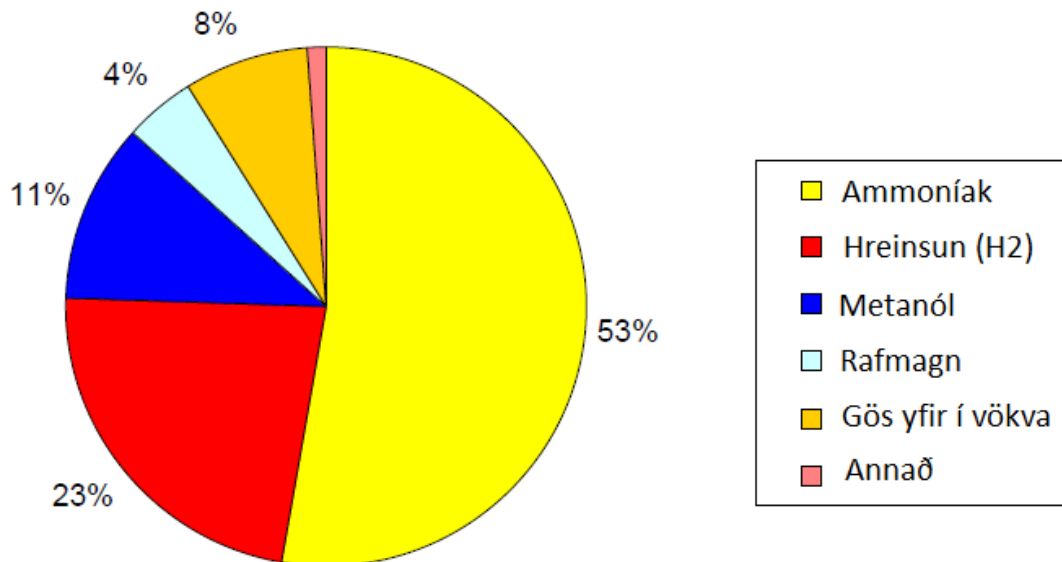
Helstu efnaferlar úr efnasmíðagasi eru framleiðsla ammoníaks sem fer fyrst og fremst í framleiðslu á áburði en um 85% af ammoníaki heimsins fara í áburðarframleiðslu á meðan 15% fara í margs konar aðra nýtingu. Ammóníak er unnið úr köfnunarefni og vetni:



Bæði köfnunarefni og vetni fást við gösun og gösun skólps gefur af sér meira vetni en gösun á öðru hráefni sökum þess hve hátt vökvainnihald er í skólpi.

Þá eru fleiri nýtingarmöguleikar til staðar á efnasmíðagasi en eru óalgengari vegna þess hve markaðurinn fyrir þær afurðir er lítill eða þá að ferlið er enn í þróun. Dæmi um slíkt er framleiðsla á blönduðu alkóhóli til eldsneytisframleiðslu og framleiðsla á kolsýringi (Boerrigter, H. og Rauch, R., 2005).

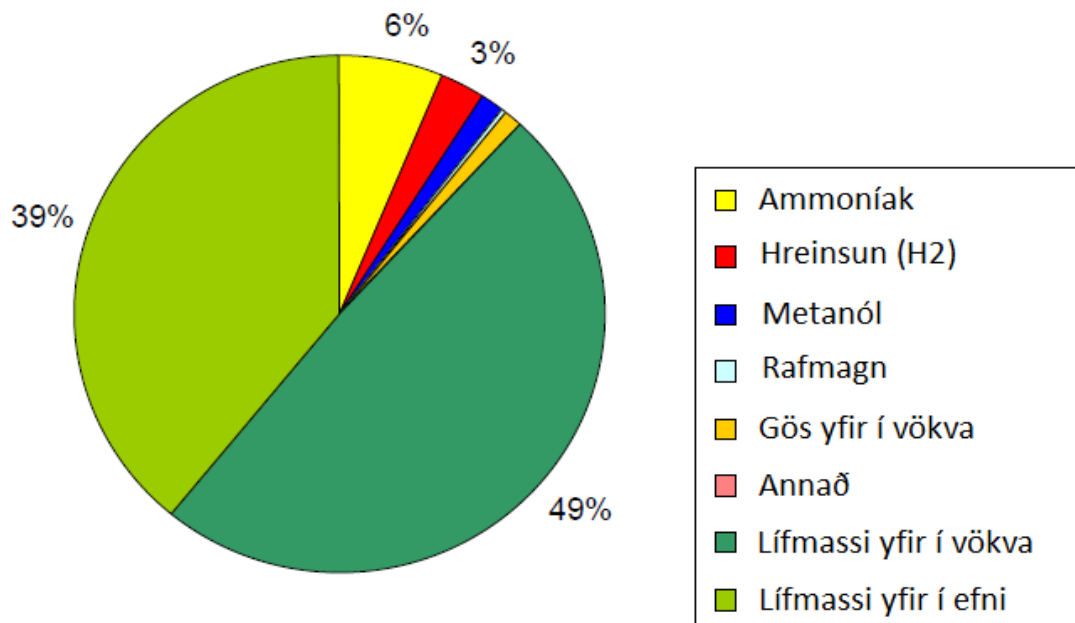
Markaður fyrir efnasmíðagas er í hraðri þróun og örum vexti. Í dag er meginhluti þess efnasmíðagass, sem framleitt er, nýtt til ammóníakframleiðslu eða um 53%. Næstmesta nýtingin, 24%, er notkun á vetni í olíuhreinsistöðvum.



Mynd 2-9: Nýting á efnasmíðagasi á heimsmarkaði árið 2005 (Boerrigter, H. og Rauch, R., 2005)

Mynd 2-9 sýnir hvernig markaður fyrir efnasmíðagas skiptist eftir nýtingu árið 2005 en einnig skal tekið fram að heildarframleiðsla efnasmíðagass árið 2005 jafngildi 6000 PJ á ári sem voru um 2% af orkuneyslu heimsins.

Til framtíðar virðist efnasmíðagas verða mikilvægt til framleiðslu á hreinu eldsneyti á farartæki, fyrst og fremst í gegnum Fischer Tropsch (FT) dísel og metanól/dímetyl eter (DME). Einnig er horft til etanól- og metanframleiðslu sem og vetnisframleiðslu en vetni er oft nefnt sem framtíðareldsneyti á ökutæki þó að tæknin í dag sé ekki nógu langt komin til að það geti talist fýsilegur kostur. Þá er horft til þess að nota lífmassa í auknum mæli við gösun en ekki kol eða jarðgas eins og algengast er í dag og vinna annaðhvort vökva, svo sem díselolíu eða metanól, eða kemísk efni úr efnasmíðagasi úr lífmassa.



Mynd 2-10: Spá um nýtingu á efnasmíðagasi á heimsmarkaði árið 2040 (Boerrigter, H. og Rauch, R., 2005)

Þessi spá, sem sýnd er á mynd 2-10, gerir ráð fyrir efnasmíðagasframleiðslu upp á 50.000 PJ af orku á ári sem samkvæmt spám eru um 10% orkuneyslu heimsins árið 2040. Vöxt á framleiðslu efnasmíðagass er hægt að rekja til gösunar lífmassa eins og greina má af mynd 2-10 en þar hefur verið gert ráð fyrir óbreyttum markaði frá mynd 2-9 að öðru leyti en því að gösun lífmassa yfir í vökva og efni hefur bæst við markaðinn og telur sú framleiðsla 88% af efnasmíðagasmarkaðnum gangi þessi spá eftir.

## 2.4 Samantekt

Framleiðsla metans með niðurbroti lífrænna efna í súrefnissnauðu umhverfi er þekkt og þaulreynd aðferð. Nýting metans verður sífellt álitlegri með hækkandi olúverði og með tilliti til þess að svokallað seinnitíma metan er umhverfisvænn orkugjafi. Erlendis er mikið horft til þess að nýta metan til rafmagnsframleiðslu og húshitunar en einnig sem eldsneyti og þá helst fyrir almenningsamgöngur.

Metan er meginuppistaða lífgass sem myndast við niðurbrot lífrænna efna í súrefnissnauðu umhverfi. Önnur efni eru helst koltvísýringur en einnig brennisteinsgös, halógen sambönd, kísill og ryk og agnir. Þessi efni eru hreinsuð frá þannig að eftir standi því sem næst hreint metan.

Niðurbrot lífrænna efna veltur á hitastigi, viðverutíma hráefnisins við gerjun og pH gildum. Hentugast er að pH gildi séu u.þ.b. hlutlaus eða í kringum 7 og algengast er að gerjunin fari fram við mesophilic hitastig eða um 35°C.

Nokkrar aðferðir eru mögulegar við hreinsun lífgass og eru þær helstu aðsog, upptaka, lághitaskiljun og himnuskiljun. Upptaka með vatni eða vatnshreinsun er langalgengust, er nú

Þegar notuð hér á landi og er langlíklegast að notast verði við þá aðferð verði farið út í framleiðslu metans úr seyru hér á landi.

Ef miðað er við orkuinnihald á hverja þyngdareiningu er metan orkuríkasta kolvetnissamsætan og losar minnst af koltvísýringi á hvern lítra sem er brenndur.

Gösun er aðferð sem gengur út á að brjóta kolefnaríkt hráefni niður í kolsýring, koltvísýring, metan og vetni ásamt óvirkum gösum og snefilefnum og er meginafurð gösunar kölluð efnasmíðagass og er að mestum hluta samsett úr kolsýringi og vetni. Úr efnasmíðagasi er hægt að vinna margvíslegar afurðir svo sem metanól, etanól, díselolíu, ammóníak, vetni með hreinsun eða rafmagn með bruna. Tækni og aðferðir til gösunar eru flokkuð eftir hvarfefni, hitastigi, gösunarþrýstingi og hönnun gösunarofns.

Nú þegar er efnasmíðagass framleitt með gösun á kolum, jarðgasi og mó svo eitthvað sé nefnt en aukin áhersla er á rannsóknir á gösun lífmassa og úrgangs þar sem slíkt eykur ekki á útblástur koltvísýrings og telst einnig sjálfbær framleiðsla eldsneytis sé hráefnið nýtt þannig að það nái að endurnýja sig.

Gert er ráð fyrir mikilli aukningu á framleiðslu efnasmíðagass með gösun og kemur þá fyrst og fremst til aukning vegna gösunar lífmassa og úrgangs með sjálfbærum hætti.

Þar sem horft er til nýtingar lífmassa til eldsneytisframleiðslu með gerjun eða gösun í framtíðinni er eðlilegt að kanna hvort hægt sé að nýta skólp til slíkrar framleiðslu þar sem því er víða, og þar á meðal hér á landi, dælt til sjávar með tilheyrandi kostnaði. Í raun er eðlilegt að leita leiða til að nýta allan þann lífmassa, sem til fellur án frekari nýtingar, með einhverjum hætti til verðmætasköpunar. Þess utan er það skylt samkvæmt lögum að nýta skólp sé þess einhver kostur eins og fram hefur komið og því verður það kannað frekar hvort gerjun eða gösun séu fýsilegir kostir til nýtingar skólps hér á landi.



## 3 Niðurbrot seyru í súrefnissnauðu umhverfi (gerjun)

Seyra er á margan hátt heillandi hráefni til metanframleiðslu. Framboð hráefnis til niðurbrots er stöðugt, rennur um afmarkað svæði og framleiðsluferlið hreinsar fráveituvatnið. Í þessum kafla verður farið yfir helstu efnisþætti skólps, hreinsunarferli og flokkun eftir styrkleika. Þá verður farið yfir aðferðir til að reikna út fræðilega metanmyndunarmöguleika seyru og fjárhagslega hagkvæmni metanframleiðslu úr seyru. Einnig verða skoðaðir möguleikar til íblöndunar efna við niðurbrot seyru, þá helst fitu úr fitugildrum skólphreinsistöðva og lífræns hluta heimilísúrgangs, mest matarafganga. Einnig verður hönnun vélbúnaðar til aukinnar metanmyndunar skoðuð. Að endingu verða tvö dæmi um lífgasver sem nýta seyru til metanframleiðslu skoðuð, bæði tæknilega og fjárhagslega.

Framleiðsla lífgass úr seyru hefur reynst vel og er að mörgu leyti hagkvæm leið til metanframleiðslu. Framboð hráefnisins til framleiðslunnar er stöðugt og er í raun lítil viðbót við það ferli sem fer fram við fráveitu úrgangs á þéttbýlissvæðum þar sem því er safnað saman í fráveitukerfi og flæðir um það til hreinsunar í þar til gerðum stöðvum en þar getur verið ákjósanlegt að koma upp metanvinnslu. Nánar er fjallað um fráveitukerfið á höfuðborgarsvæðinu í kafla 5. Seyra er hráefni sem auðvelt er að komast í til nýtingar og búist er við aukinni framleiðslu á metangasi úr seyru vegna tækniframfara sem eru að verða við framleiðsluferlið. Eitt af helstu vandamálum, sem hafa verið nefnd við metanframleiðslu úr seyru, er að ná því að eftir standi hágæðahráefni sem nota má til áburðar í landbúnaði. Þó búa sumar metanverksmiðjur yfir búnaði sem skilar af sér efni sem má nota til landbúnaðar og má nefna verksmiðjuna í Bromma í Svíþjóð í því samhengi (Mårtensson, E., 2007).

Gerjun í súrefnissnauðu umhverfi hefur verið mikið notuð sem viðbót við hreinsunarferli á skólpi. Gerjunin gerir úrganginn stöðugri og dregur úr umfangi. Rannsóknir í Svíþjóð sýna að umfang þurrefna (e. dry matter) í skólpi minnkar um 40% við gerjun (Palm, R., 2010). Fyrir gerjun er nauðsynlegt að leysa seyruna upp til að fá betra hráefni sem brotnar betur niður í súrefnissnauðu umhverfi. Einnig hafa nýlega farið fram rannsóknir þar sem reynt hefur verið að hámarka lífgasframleiðslu úr seyru með þróun tækni sem brýtur upp seyru. Við það að blanda efnið vel næst betri tenging örvera, sem brjóta niður efnið, og sjálfs efnisins. Þá kemur það í veg fyrir að skán myndist og hjálpar til við að halda stöðugu hitastigi á efninu.

### 3.1 Samsetning og flokkun skólps

Skólp er almennt að 99,9% hluta vatn og 0,1% föst efni. Af föstu efnunum eru síðan um 70% lífræn s.s. prótein, kolvetni og fita og 30% ólífræn s.s. járn og sandur (Mara, D., 2003).

Efnasamsetning seyru úr skólpi er misjöfn, jafnvel þótt umhverfi og tæknilegt vinnsluferli sé það sama. Þó má segja að mismunandi stig á hreinsun skólps gefi af sér mismunandi tegundir seyru sem eru eftirfarandi:

- Grunnseyra (e. primary sludge): Föst efni sem sitja eftir þegar vélrænni hreinsun á skólpi er lokið. Grunnseyra frá íbúðahverfum samanstendur af saur, klósettpappír, matarafgöngum o.s.frv. og brotnar hratt niður.
- Umfram seyra (e. excess sludge): Myndast við lífræna meðferð á fráveituvatninu og samanstendur af örverum sem finnast í skólpi. Umfram seyra er almennt einsleitari en grunnseyra og brotnar hratt niður.
- Þriðja – stigs seyra (e. tertiary sludge): Er mjög lítil hluti skólpsins. Seyran verður til við þriðja stigs hreinsun og samanstendur af broti af umfram seyru sem situr eftir í frárennslinu eftir annars stigs hreinsun og er fjarlæggt með þriðja stigs síum. Þriðja – stigs seyra er sjaldnast meira en 1% þurrefni (e. dry solids).
- Óunnin seyra (e. raw sludge): Samanstendur af öllum tegundum seyru fyrir nokkra meðferð (Beil, M. og Hoffstede, U., 2010).

Þessi þrjú fyrstu stig lýsa þremur skrefum í hreinsun skólps sem er það ferli sem víðast hvar er notað í fráveitukerfum. Á höfuðborgarsvæðinu hins vegar er einungis fyrsta stigs hreinsun á skólpi, þ.e. vélræn hreinsun og seyranni síðan dælt langa leið út í sjó. Orkuveitan rekur síðan tveggja þrepa hreinsistöðvar á fjórum stöðum í Borgarfirði; á Bifröst, Hvanneyri, í Reykholti og á Varmalandi (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. (i)).

Þegar skólp er hreinsað í súrefnisríku umhverfi nýta súrefnisháðar bakteríur sér seyrana sem fæðu. Það magn af súrefni sem þessar bakteríur nýta sér er notað sem mælikvarði á styrkleika lífrænna efna í skólpi. Þannig er talað um súrefnisþörf (e. oxygen demand) sem það magn súrefnis sem bakteríurnar taka til sín til við oxun seyrunnar. Taki þær til sín 500 milligrömm af súrefni við oxun eins lítra af skólpi er talað um súrefnisþörf upp á 500 mg/l.

Súrefnisþörf er hægt að skipta í þrennt:

1. Fræðileg súrefnisþörf (e. theoretical oxygen demand): Það súrefni sem þarf til þess að brjóta lífrænan hluta skólpsins algerlega niður í koltvísýring og vatn.
2. Efnafræðileg súrefnisþörf (e. chemical oxygen demand, COD): Þetta hlutfall er fengið með því að oxa skólpið í sýrulausn. Þetta ferli oxar nær öll lífræn efni niður í koltvísýring og vatn. Kosturinn við þessa aðferð er að hún skilar niðurstöðum innan þriggja tíma en ókosturinn er hins vegar sá að niðurstöðurnar gefa ekki upplýsingar um það hve hátt hlutfall oxast af bakteríum. COD prófið gerir þannig ekki greinarmun á efni sem brotnar niður af líffræðilegum völdum og efni sem gerir það ekki.
3. Lífefnafræðileg súrefnisþörf (e. biochemical oxygen demand, BOD): Súrefni sem þarf í oxun skólpsins með bakteríum. BOD gildi eru oftast skráð eftir 5 daga við 20°C hita (BOD<sub>5</sub>). BOD prófið greinir þannig aðeins efni sem brotnar líffræðilega niður og því eru BOD gildi alltaf lægri en COD gildi fyrir sams konar skólp.

Skólp er flokkað í styrkleikaflokka eftir BOD og COD hlutföllum og er flokkunin sýnd í töflu 3-1.



Tafla 3-1: Styrkleikaflokkun skólps eftir BOD<sub>5</sub> og COD gildum (Mara, D., 2003)

Styrkleiki	BOD <sub>5</sub> (mg/l)	COD (mg/l)
<b>Veikur</b>	<200	<400
<b>Miðlungs</b>	350	700
<b>Mikill</b>	500	1.000
<b>Mjög mikill</b>	>750	1.500

Ekki er um algilt hlutfall á milli BOD og COD að ræða en fyrir óhreinsað skólps hefur fjöldi mælinga gefið hlutfallið  $BOD_5/COD = 0,5$  sem góða nálgun (Mara, D., 2003). Ákveðin viðmið gilda um BOD/COD hlutföll hér á landi og er farið yfir þau í kafla 5.2.1

## 3.2 Metanmyndunarmöguleikar seyru

Ef magn lífrænna efna í skólpi er þekkt er möguleiki að reikna út hve mikið metan ákveðið magn skólps gefur af sér. Alþjóðleg samtök um loftslagsbreytingar (Intergovernmental panel on climate change, IPCC) gáfu út árið 2006 leiðarvísi að skráningu á losun gróðurhúsalofttegunda. Í 5. bindi er tekinn fyrir úrgangur og þar með talið fráveituvatn.

Í því bindi var gefin jafna til þess að reikna út losun CH<sub>4</sub> út frá íbúafjölda sem fráveitukerfi þjónar, uppbyggingu fráveitukerfisins, tekjum notenda fráveitukerfisins og fleiri þátta.

Almenn jafna til að meta hve mikið metan fráveitukerfi losar er:

$$CH_4 \text{ losun} = \left[ \sum_{i,j} (U_i * T_{i,j} * EF_j) \right] (TOW - S) - R \quad (3.1)$$

Þar sem:

$CH_4 \text{ losun}$  = Losun metans á skráðu ári, kg CH<sub>4</sub>/ár.

$TOW$  = Heildarmagn lífrænna efna í frávatni á skráðu ári (e. total organics in wastewater), kg BOD/ár.

$S$  = Lífrænn hluti fjarlægður sem seyra á skráðu ári, kg BOD/ár.

$U_i$  = Hlutfall íbúa í tekjuhópi  $i$  á skráðu ári, sjá töflu í viðauka.

$T_{i,j}$  = Hlutfall þeirra sem nýta sér hreinsun/fráveitufurli eða kerfi  $j$  fyrir hvern tekjuhóp  $i$  á skráðu ári, sjá töflu í viðauka.

$i$  = Tekjuhópur: Dreifbýli, þéttbýli hátekjuhópur og þéttbýli lágtekjuhópur.

$j$  = Flokkun í hreinsun/fráveitufurli eða kerfi. T.d. fyrsta þreps hreinsun, opið fráveitukerfi, súrefnisblönduð hreinsun (e. aerated treatment) o.s.frv.

$EF_j$  = Losunarstuðull,  $kg CH_4/kg BOD$ .

$R$  = Magn metans sem er endurheimt á skráðu ári,  $kg CH_4/ár$ .

Losunarstuðull er fall af mögulegri hámarksmetanmyndun ( $B_0$ ) og leiðréttingarstuðli ( $MCF_j$ ) en hann segir til um að hve miklu leyti mögulegri hámarks metanmyndun er náð miðað við hverja gerð hreinsunar/fráveitukerfis og er því stuðull á bilinu 0 – 1. Hann er þannig mælikvarði á það að hve miklu leyti kerfið er súrefnissnautt. Losunarstuðull kerfisins sem er til skoðunar á hverjum tíma er því reiknaður þannig:

$$EF_j = B_0 * MCF_j \quad (3.2)$$

Þar sem:

$EF_j$  = losunarstuðull,  $kg CH_4/kg BOD$ .

$j$  = hreinsun/fráveitukerfi eða ferli.

$B_0$  = hámarks möguleg metanmyndun,  $kg \frac{CH_4}{kg} BOD$ .

$MCF_j$  = metan leiðréttingarstuðull, sjá viðauka.

Almennt eru það taldir góðir starfshættir að notast við gildi á  $B_0$  sem mæld eru í hverju landi fyrir sig en séu slíkar mælingar ekki fyrir hendi eru sjálfgefin gildi á  $B_0$  eftirfarandi:

0,6  $kg CH_4/kg BOD$

0,25  $kg CH_4/kg COD$

Heildarmagn lífrænna efna í fráveituvatni ( $TOW$ ) er fall af fjölda og BOD losun á mann. Það er skráð í lífefnafræðilegri súrefnisþörf í kílóum,  $kg BOD/ár$ .

$$TOW = P * BOD * 0,001 * I * 365 \quad (3.3)$$

Þar sem:

$TOW$  = heildarmagn lífrænna efna í fráveituvatni á skráðu ári,  $kg BOD/ár$ .

$P$  = fjöldi íbúa á svæði á skráðu ári.

$BOD$  =  $BOD$  á mann á skráðu ári í grömmum, gildi skráð eftir löndum (sjá viðauka).

0,001 = umbreytingaþáttur úr grömmum af BOD yfir í kg af BOD.

$I$  = leiðréttingaþáttur fyrir iðnaðar - BOD sem leitt er í skólp. Sjálfgefið gildi fyrir safnað iðnaðarskólp er 1,25 og fyrir ósafnað 1,00. Með öðrum orðum, ef iðnaðarskólp er leitt út í

fráveitukerfið hækkar það heildarmagn lífrænna efna í fráveituvatni um 25%. Þessi leiðréttingaþáttur er fenginn samkvæmt sérfræðiáliti og innifelur BOD í fráveituvatni frá iðnaði og stofnunum s.s. veitingahúsum, sláturhúsum og verslunum (R. J. Doorn, M. et al., 2006).

### 3.3 Hagkvæmni metanvinnslu úr seyru

Almennt er sagt að seyra sem fæst úr skólphreinsun með lífefnafræðilegri (2. stigs) hreinsun henti til niðurbrots í súrefnissnauðu umhverfi (Monnet, F., 2003). Af fenginni reynslu í Evrópu hefur verið fundið almennt hlutfall íbúafjölda, skólpmagns á dag og heildarrúmmáls gerjunartanka.

Tafla 3-2: Hlutfall íbúafjölda, skólpmagns í rúmmetrum á dag og heildarrúmmáls gerjunartanka í rúmmetrum (Monnet, F., 2003)

Íbúafjöldi	Skólpmagn á dag (m <sup>3</sup> á dag)	Heildarrúmmál gerjunartanka (m <sup>3</sup> )
7.000	1.000	180
21.000	3.000	380
30.000	4.500	800
60.000	9.000	1.350
200.000	30.000	3.400

Í töflu 3-2 eru þó einungis sýnd viðmið um hlutföll á milli íbúafjölda, skólpmagns á dag og heildarrúmmáls gerjunartanka og, eins og farið er nánar yfir í kafla fimm, þá er rennsli um fráveitukerfi Reykjavíkurborgar töluvert, m.a. vegna mikillar notkunar Íslendinga á köldu vatni og kyndingar húsa með heitu vatni.

Í meistaraprófsritgerð Ellenar Mártensson frá árinu 2007 frá KTH Royal Institute of Technology var borinn saman kostnaður við framleiðslu metangass úr mismunandi hráefnum. Tekinn var saman kostnaður á rúmmetra af gasi sem uppfært er til notkunar á ökutækjum úr skólpi, lífrænum úrgangi, orkuplöntum og mykju frá sveitabæjum og reyndist áberandi ódýrast að vinna metangas úr skólpi. Tafla 3-3 sýnir verð á rúmmetra af uppfærðu lífgasi miðað við mismunandi framleiðsluhráefni og er færð til neysluverðsvísitölu ársins 2010 í Svíþjóð og miðað við miðgengi Seðlabanka Íslands í mars 2011.

Tafla 3-3: Kostnaður við framleiðslu 1 Nm<sup>3</sup> metangass úr mismunandi hráefni (Mårtensson, E., 2007/Kristján Hlynur Ingólfsson, 2011)

	Skólpi	Lífrænn úrgangur	Orkuplöntur	Mykja
ISK/Nm <sup>3</sup>	35 - 80	95 - 110	90 - 145	80 - 160

Flutningskostnaður er sá þáttur sem helst útskýrir hve miklu ódýrara er að framleiða metan úr skólpi samanborið við önnur hráefni, þ.e. flytja þarf önnur hráefni á framleiðslustaðinn á meðan skólpi rennur til framleiðslustöðvarinnar í gegnum fráveitukerfi borganna. Hér er þó ekki um fjárfestingarkostnað að ræða heldur rekstrarkostnað framleiðslunnar en það helgast af

Því að þegar þessir útreikningar voru gerðir voru gerjunartankar til staðar. Farið verður betur yfir fjárfestingarkostnað í gerjunartönkum og öðrum útbúnaði hér á eftir.

## 3.4 Dæmi um metanframleiðslu úr seyru, Bern og Luzern

Þegar metan er unnið úr seyru fer það í grunninn í gegnum sama ferlið, hvar sem það er framleitt. Hér verður farið í gegnum ferlið í hreinsistöðinni og framleiðslunni í Bern í Sviss en þar er skólp hreinsað frá 250.000 íbúum og tæknistig hátt. Með fólksfjölda og tæknistig í huga mætti líta á stöðina í Bern sem nokkurs konar viðmið fyrir hugsanlega stöð hér á landi.

Lýsingin er byggð á skýrslu Biogasmax, „Assessment report on operational experience“ sem rituð var af Henning Hahn og Uwe Hoffstede í nóvember 2010.

### 3.4.1 Tæknileg lýsing stöðvarinnar í Bern

Skólp flæðir frá fráveitukerfi borgarinnar til vinnslustöðvarinnar. Möl og grjót eru skilin frá með grófum síum (e. grit chamber) og sandur er skilinn frá í loftblandaðri síu (e. aerated grit separator). Þau efni sem sleppa í gegnum grófu síurnar eru síðan fjarlægð úr skólpinu með fínni síum. Þau efni sem eftir sitja í síum eru annars vegar flutt í brennslustöð og hins vegar er mól og annar jarðvegur fluttur í landfyllingar sem óvirk efni.

Fosfór er hreinsaður úr skólpi með því að bæta járnnoxíðs klórsúlfati (e. ferric chloride sulphate) út í fyrsta söfnunartank (e. primary settlement tank) en í þeim tanki safnast einnig föst efni fyrir á botninum og er síðan dælt áfram til frekari meðhöndlunar.

Eftir það tekur við lífrænt ferli. Lífræn frávatnsmeðhöndlun felur í sér starfsemi örvera sem eru í lífsíum (e. biofilter). Seyran flæðir þar í gegn, hluti af því loftblandað, sem leiðir af sér umbreytingu á lífrænum hluta fráveituvatnsins og næringarefnum í því. Sá hluti brotnar niður á þessu stigi hreinsunar. Þeim hluta er því næst dælt úr fráveituvatninu og hann þykktur með miðflóttaafli (e. centrifuge) þaðan sem honum er dælt til frekari vinnslu. Það sem ekki brotnar niður er sigtað út (undissolved, fine matter) og hreinsuðu fráveituvatni er dælt út í náttúruna.

Til íblöndunar er notuð fita frá matvælaíðnaði og er hún hituð upp og haldið á hreyfingu til að hún hlaupi ekki í kekki. Eftir það er henni blandað saman við seyrana frá hreinsuninni og þaðan er blöndunni veitt í gerjunartanka. Efnið er hitað upp í 37°C áður en því er dælt í gerjunartankana en þar fer í gang hið eiginlega gerjunarferli þar sem lífgasið myndast.

Til að auka gasframleiðsluna eru notuð íblöndunarefni. Notuð er fita frá matvælaíðnaði eins og kom fram hér á undan en einnig lífrænn úrgangur frá veitingastöðum og etanol. Við það að bæta íblöndunarefnum út í jókst gasframleiðsla umtalsvert og má rekja 75% gasmyndunar til íblöndunarefna sem brotna auðveldlega niður (e. high digestible co – substrates).

Sú seyra sem fer til metanframleiðslu í Bern er að stærstum hluta vatn en þau þurrefni (P.E.) sem seyran inniheldur eru að stærstum hluta lífræn. Önnur efni sem fara til gerjunar eru að

stærstum hluta þurrefni. Þetta kemur betur fram í töflu 3-4 sem sýnir hvernig það hráefni sem fór til gerjunar í lífgasvinnslu í Bern árið 2009 var samsett.

Tafla 3-4: Skipting hráefnis sem fór til lífgasvinnslu verksmiðjunnar í Bern 2009 og 2010 (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010)

	Flæði (t/ári)	Hlutfall (%)	Meðal Þ.E. (%)	Meðal lífræn Þ.E. (% af Þ.E.)
<b>Seyra</b>	244.807	95,70	3,95	70,54
<b>Fita úr fitusíum</b>	2.738	1,07	10,00	70,00
<b>Flotseyra</b>	1.828	0,71	25,00	85,00
<b>Þykkt fita</b>	254	0,10	90,00	100,00
<b>Veitingahúsa-úrgangur</b>	5.597	2,19	16,70	94,10
<b>Etanól</b>	595	0,23	0,00	100,00
<b>Samtals hráefni</b>	255.819	100	4,25	71,02

Seyran er langstærsti hluti þess hráefnis sem fer til lífgasframleiðslu en seyran sjálf er að stærstum hluta vatn eða 95,7%. Etanól er þurrefnalaust hráefni en hefur þó mikla metanmyndunarmöguleika. Það er þó ekki tekið fram hve mikil metanmyndun etanóls er.

Gerjunartankarnir eru þrír, hver um sig 6.000 m<sup>3</sup> að rúmmáli. Dælt er stöðugt í tvo tanka sem vinna samhliða hvor öðrum en sá þriðji vinnur raðtengt við fyrstu tvo og fer seyran í hringrás úr tanki þrjú í fyrstu tvo til þess að dreifa virkum örverum. Gerjunin fer fram við mesophilic aðstæður (35 – 37°C) og er viðverutími (HRT) um 27 dagar. Hrært er í seyrinni nokkrum sinnum á dag til að tryggja að hún sé einsleit og til að koma í veg fyrir myndun sets á botni gerjunartanka. Lífgasframleiðslan er um 14.400 Nm<sup>3</sup>/d (600 Nm<sup>3</sup>/klst.) og er hlutfall metans um 65%. Þetta gerir metanframleiðslu upp á u.þ.b. 3.416.400 Nm<sup>3</sup> á ári.

Tafla 3-5: Framleiðslan í Bern, helstu tölur fyrir árið 2009 (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010)

Hráefni		
<b>Seyra úr skólpi</b>	(tonn/ári)	244.807,00
<b>Önnur seyra og fita</b>	(tonn/ári)	4.820,20
<b>Eldhúsúrgangur</b>	(tonn/ári)	5.597,30
<b>Etanól</b>	(tonn/ári)	754,80
Töluleg lýsing á verksmiðju		
<b>Meðal þurrefnainnihald hráefnis</b>	(%)	2,53
<b>Rúmmál gerjunartanka</b>	(m <sup>3</sup> )	18.000
<b>Meðalviðverutími (HRT)</b>	(dagar)	26,60
<b>Lífrænt hlutfall</b>	(kg lífr.Þ.E./m <sup>3</sup> *d) <sup>3</sup>	1,35

<sup>3</sup> Kílógrömm af lífrænu þurrefni pr. rúmmetra af hráefni í gerjunartanki

Tafla 3-5 tekur saman helstu tölur yfir hráefni og vinnslu metanframleiðslunnar í Bern en eins og greina má er þurrefnainnihald að meðaltali einungis 2,53% sem sýnir að yfirgnæfandi meirihluti þess sem fer í gerjunartankana er vatn. Stærsti hluti metanmyndandi hráefnis er síðan seyra úr skólpi en einnig er notuð önnur seyra, eldhúsúrgangur og fita úr fitugildrum í fráveitukerfinu.

Meðalviðverutími massans við niðurbrot var 26,6 dagar og meðal pH gildi í tönkunum var 8. Metanmyndun pr. rúmmetra af gerjunarrými á dag var að meðaltali 0,52 Nm<sup>3</sup> og 0,43 Nm<sup>3</sup> af metani á hvert kg af þurrefni.

### 3.4.2 Kostnaður og arðsemi vinnslunnar í Bern

Lífgasverksmiðjan í Bern hefur starfað frá árinu 1967 og hefur verið uppfærð reglulega. Þegar fjárfestingarkostnaður var reiknaður miðuðu skýrsluhöfundar við kostnað upp á 81.905 ISK pr. rúmmetra gerjunartanka eða 500 evrur. Miðað er við miðgengi Seðlabanka Íslands þann 23. ágúst 2011 sem var 163,8 ISK fyrir hverja evru. Tafla 3-6 greinir í sundur þætti í fjárfestingarkostnaði og í töflu 3-7 eru þættir í rekstrarkostnaði sundurgreindir.

Tafla 3-6: Áætlaður fjárfestingarkostnaður lífgasverksmiðjunnar í Bern (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010)

Eining		
Gerjunartankar og önnur aðstaða	ISK	1.253.146.500
Vélbúnaður	ISK	221.143.500
Kostnaður verksmiðjubúnaðar, samtals	ISK	1.474.290.000
Kostnaður v. skipulags og annarra þátta (10% af fjárfestingarkostnaði verksm.búnaðar)	ISK	147.429.000
Samtals fjárfestingarkostnaður	ISK	1.621.719.000

Áætluðum fjárfestingarkostnaði var skipt upp þannig að 85% eru kostnaður fyrir aðbúnað s.s. tanka, lagnir og annað sem hækkar í hlutfalli við það magn sem verið er að vinna og 15% kostnaðar eru vegna vélbúnaðar. Af heildarkostnaði við alla aðstöðu og búnað var síðan gert ráð fyrir 10% fyrir skipulagningu, hönnun, lögfræðilega vinnu og þess háttar eins og sjá má nánar í töflu 3-7.

Tafla 3-7: Uppskiptur framleiðslukostnaður fyrir rúmmetra af lífgasi í Bern (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010)

Frammistaða		
<b>Framleiðsla lífgass</b>	Nm <sup>3</sup> /ár	5.222.223,72
<b>Tekjur af íblöndunarefnum</b>	ISK/t	16.877
<b>Heildartekjur af íblöndunarefnum</b>	ISK/ár	188.560.444
Breytilegur kostnaður		
<b>Heildarrafnotkun</b>	kWst/ár	5.404.481,97
<b>Rafmagnskostnaður (26 ISK/kWst)</b>	ISK/ár	97.811.593
<b>Hítanotkun</b>	kWst/ár	872.615
<b>Heildarhitakostnaður (7 ISK/kWst)</b>	ISK/ár	6.003.609
<b>Viðhald (1% af fjárfestingarkostnaði)</b>	ISK/ár	14.742.900
<b>Rannsóknarvinna</b>	ISK/ár	4.914.300
<b>Vinnuafli</b>	Klst/ár	1.254
<b>Vinnuafllskostnaður (nálgun 7.781 ISK/klst)</b>	ISK/ár	9.757.343
Heildarbreytilegur kostnaður		
<b>Fastur kostnaður</b>		
<b>Afskriftir</b>	ISK/ár	84.771.675
<b>Vaxtakostnaður (vaxtastig = 6%)</b>	ISK/ár	48.651.570
<b>Tryggingar (0,5% af fjárfestingu)</b>	ISK/ár	8.108.595
Heildar fastur kostnaður		
<b>Óbeinn kostnaður (20% af föstum og breytilegum)</b>	ISK/ár	54.952.317
<b>Heildarframleiðslukostnaður</b>	ISK/ár	329.713.901
<b>Framleiðslukostnaður lífgass</b>	ISK/Nm <sup>3</sup>	64
<b>Ávinningur lífgasframleiðslu<sup>4</sup></b>	ISK/ár	141.153.457
<b>Núllpunktsframleiðsla (e. break – even point)</b>	ISK/Nm <sup>3</sup>	28

### 3.4.3 Verksmiðjan í Luzern, samanburður

Til að átta sig á hverju munar um íblöndunarefnin í gasframleiðslu er fróðlegt að líta á verksmiðjuna í Luzern í Sviss en fráveitustöðin þar tekur við skólpi frá 230.000 íbúum og er lífgasið einungis unnið úr seyru úr skólpi, þ.e. grunnseyru (e. primary sludge) og flotseyru (e. flotate sludge) og er markmið slíkrar vinnslu að draga úr umfangi skólpsins frekar en að hámarka gasframleiðslu. Um stöðina í Luzern renna um 36,5 milljónir rúmmetra á ári (REAL Recycling Entsorgung Abwasser Luzern, 2011) en miðað við meðaltalsrennsli á sekúndu um stöðvar OR er árlegt rennsli nálægt því tvöfalt meira eða rúmlega 66,3 milljón rúmmetrar á ári (Birgir Tómas Arnar og Snorri Þórisson, 2011). Skýrist það af gríðarlega mikilli vatnsnotkun, bæði af félagslegum ástæðum og einnig því að hús eru kynt upp með heitu vatni og um helmingur fráveitukerfisins er svokallað „einfalt kerfi“, þ.e. ofanvatn rennur ásamt skólpinu í gegnum fráveitukerfi og hreinsistöð fráveitukerfisins (Reynir Sævarsson, 2004). Nánar er farið yfir það í kafla 5.

<sup>4</sup> Kemur til af því að unnið er skólp frá fleiri fráveitum sem borga fyrir vinnsluna

Það sem safnast í fituskiljur er brennt en ekki nýtt til gasframleiðslu. Stöðin býr yfir tveimur gerjunartönkum, hvor um sig er 2.750m<sup>3</sup> að rúmmáli og fer gerjunin fram í einu þrepi, þ.e. tankarnir vinna hvor um sig en eru ekki tengdir eins og í Bern. Gerjunin fer fram við mesophilic aðstæður og er stöðug hreyfing á hráefninu. Viðverutími hráefnisins (HRT) er mun skemmri í Luzern en annars staðar eða um 12,8 dagar að meðaltali. Styttri viðverutími þýðir minni umbúnað, þ.e. hægt er að notast við minni gerjunartanka og annan búnað ásamt því sem orkunotkun verður minni og er viðverutími þannig stór þáttur í hagkvæmni framleiðslunnar. Almenna reglan er sú að sé notast við íblöndunarefni við gerjun seyru þarf lengri viðverutíma en sé seyran látin gerjast ein og sér.

Hlutfall vatns, lífrænna þurrefna og ólífrænna þurrefna er svipað í seyrunni í Luzern og í Bern. Í Luzern eru um 95,5% þess sem fer til niðurbrots í gerjunartönkum vatn en lífræn þurrefni eru um 2,8%.

Meðallífgasframleiðsla er 267,45 Nm<sup>3</sup> á klukkustund en þar af fara 140 Nm<sup>3</sup> á klukkustund til uppfærslu í metan sem síðan er selt inn á dreifikerfið og notað sem eldsneyti. Það sem ekki fer til uppfærslu er notað til framleiðslu á rafmagni og hita á staðnum til að knýja stöðina.

Þetta þýðir lífgasframleiðslu upp á 2.343.014,71 Nm<sup>3</sup> yfir árið og meðalmetan hlutfall lífgassins var 60,96% sem gerir metanmyndun upp á 1.428.301,8 Nm<sup>3</sup> á ári.

Metanmyndun miðað við rými gerjunartanka er meiri en í Bern eða 0,74 Nm<sup>3</sup> af metani á hvern rúmmetra af gerjunarrými á dag.

Gert var ráð fyrir töluvert dýrari búnaði pr. rúmmetra af gerjunarplássi en í Bern eða 122.858 kr. (750 evrur) fyrir hvern rúmmetra.

Tafla 3-8: Áætlaður fjárfestingarkostnaður lífgasverksmiðjunnar í Luzern (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010)

Eining	
Gerjunartankar og önnur aðstaða	ISK 884.574.000
Vélbúnaður	ISK 98.286.000
Kostnaður verksmiðjubúnaðar, samtals	ISK 982.860.000
Kostnaður v. skipulags og annarra þátta (10% af fjárfestingarkostnaði verksm.búnaðar)	ISK 98.286.000
Samtals fjárfestingarkostnaður	ISK 1.081.164.000

Tafla 3-8 sýnir áætlaðan fjárfestingakostnað í lífgasverksmiðjunni í Luzern þar sem eingöngu er unnið úr seyru og má greina að langstærsti þáttur kostnaðar er í gerjunartönkum og tengdri aðstöðu.

Rekstrarkostnaður vinnslunnar í Luzern er einnig öðru vísi uppbyggður, sérstaklega þar sem ekki er neinu öðru hráefni blandað út í til gerjunar og því fást engar tekjur af því að eyða úrgangi fyrir aðra. Lífgasframleiðslan er mun ódýrari í Luzern en í Bern og er núllpunktsframleiðslan (break – even point) tæplega 15 krónur pr. rúmmetra af lífgasi eða 0,09 evrur.



Það sem er einnig athyglisvert í samanburði þessara tveggja stöðva er munurinn á framlegð hráefnisins, þ.e. hve mikið metan myndast af hverjum rúmmetra af hráefni.

Tafla 3-9: Metanmyndun á kg af lífrænu þurrefni í gerjunartanki. Samanburður á Bern og Luzern (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010)

Metanmyndun	Bern	Luzern
$\text{Nm}^3/\text{kg}_{\text{ODM}}*\text{d}$	0,43	0,16

Munurinn á metanmyndun á hvert kg þurrefnis í töflu 3-9 skýrist fyrst og fremst af íblöndun annarra efna. Metanmyndunarmöguleikar fitu eru þeir hæstu sem þekkjast og skýrist munurinn á metanmyndun á þessum tveim stöðum fyrst og fremst af því en einnig lengri viðverutíma. Samanburður við fleiri verksmiðjur staðfestir þennan mun en í Henriksdal í Svíþjóð er hreinsun á skólpi með svipuðum hætti og í Luzern og seyrana að mestum hluta vatn, eða um 96%, en þar er eldhúsúrgangi blandað saman við seyrana og fyrir vikið er metanmyndun á kg af lífrænu þurrefni í gerjunartanki  $0,34 \text{ Nm}^3$ .

Helsti óvissuþáttur vinnslunnar í Luzern er niðurbrot lífrænna efna, þ.e. hve hátt hlutfall þeirra brotnar niður. Þrátt fyrir stöðugan viðverutíma sveiflast niðurbrot lífrænna efna frá 13,32 – 95,34% yfir árið 2007 og var að meðaltali 61,66% yfir árið. Það sem þessu veldur eru sveiflur í vatnsstreymi í fráveitukerfið. Ef meira vatn flæðir um kerfið veldur það því að meira magn af fyrsta stigs seyrna fer í gerjunartankana sem aftur veldur því að hlutfall lífrænna efna lækkar í tönkunum (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010).

## 3.5 Íblöndun annarra efna til aukinnar gasframleiðslu

Til að auka metanframleiðslu úr seyrna er fleiri lífrænum efnum gjarnan blandað út í og vélbúnaður sem brýtur niður seyrana hannaður með það í huga að framleiðslan verði sem mest.

### 3.5.1 Heimilissorp

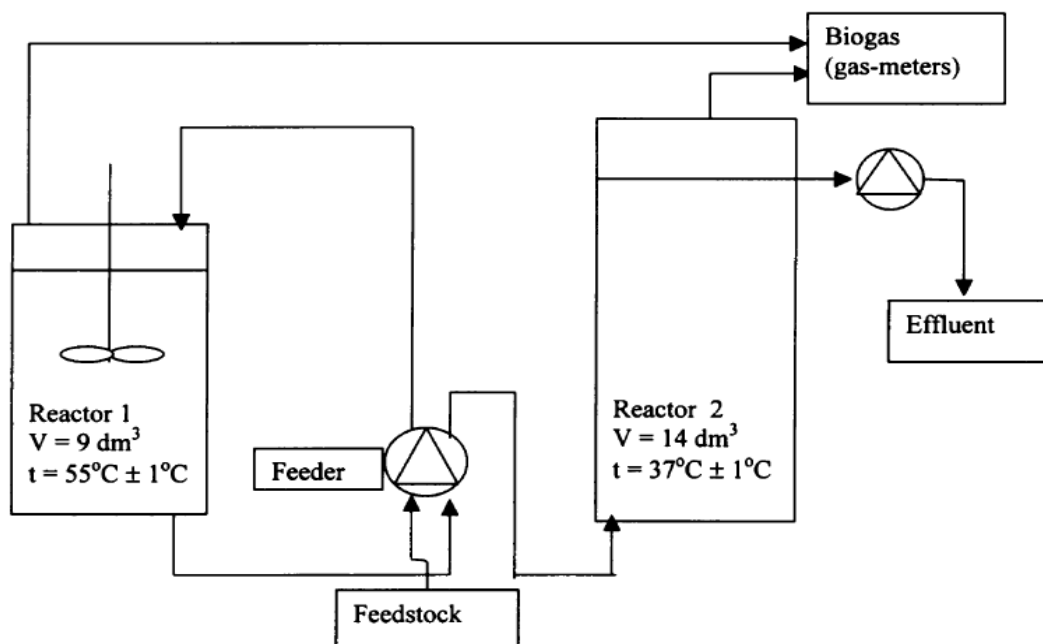
Víða erlendis tíðkast að blanda lífrænum hluta heimilissorps út í seyrna til metanframleiðslu. Það kallar á flokkun sorps á heimilum en slíkt er ekki gert í neinum mæli á höfuðborgarsvæðinu í dag. Eitthvað er um flokkun hjá fyrirtækjum og einstaka heimili taka upp flokkun að eigin frumkvæði en lífrænum úrgangi er ekki safnað sérstaklega frá heimilum. Hins vegar er það gert úti á landsbyggðinni, t.a.m. á Akureyri, og fer þá lífrænn hluti heimilissorps, s.s. matarafgangar, í poka sem brotna niður í náttúrunni (þ.e.a.s. ekki hefðbundna plastpoka) og er safnað saman sérstaklega.

Sá hluti heimilissorps sem flokkast sem lífrænn og brotnar auðveldlega niður getur verið allt upp í 40% af öllu sorpi sem til fellur á meðalstóru heimili (Sosnowski, P. et al., 2003). Það er því eftir miklum lífmassa að slægjast með því að fá heimilin til að flokka sorp.

Í Västerås í Svíþjóð er hagrænum hvötum beitt til þess að fá fólk til að flokka sorp á heimilum. Það er að nafninu til valkvætt hvort fólk flokkar sorp á heimilinu, þ.e. það getur valið um hvort það flokkar sorp og þá er lífrænt sótt einn daginn og ólífrænt annan eða fólk getur valið um að láta sækja til sín óflokkað heimilissorp. Aftur á móti er verðlag með þeim hætti að valið er nokkuð augljóst, þ.e.a.s. það er umtalsvert dýrara að láta sækja til sín blandað sorp og er gengið frá samkomulagi milli heimila og sveitarfélags um það hvor leiðin er farin. Einnig er skólakerfið nýtt til upplýsingar en tveir fulltrúar eru í fullri vinnu við að heimsækja skólabörn á aldrinum 9 – 11 ára og fræða þau um sorpflokkun og tengd málefni. Þeim er síðan ætlað að bera boðskapinn heim. Þetta hefur leitt til þess að 90% heimila láta sækja til sín flokkað sorp, 7% nýta lífrænan hluta til moltugerðar og 3% láta sækja til sín blandað sorp. Þessi flokkun skilar 14.000 tonnum af lífrænum úrgangi frá heimilum og stórum eldhúsum með þurrefnainnihald (e. dry matter content) upp á 30% og íbúafjöldi er um 140.000 manns (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010) en til samanburðar má nefna að fráveitukerfi Orkuveitu Reykjavíkur þjónar um 160.000 manns.

Tilraunir hafa verið gerðar til að kanna áhrif þess að blanda lífrænum hluta heimilissorps út í seyru til metanframleiðslu. Í einni slíkri rannsókn voru gerðar 5 tilraunir:

1. Seyra frá hreinsistöð í Lodz í Póllandi látin gerjast við thermophilic aðstæður í 35 daga eða þar til lífgas myndaðist ekki lengur. Gerjunin fór fram í einum tanki.
2. Seyru og lífrænum hluta heimilissorps blandað saman í hluföllunum seyra 75% og sorp 25% og látið gerjast við sömu aðstæður og í fyrstu tilrauninni.
3. Lífrænn hluti heimilissorps látinn gerjast einn og sér til samanburðar við aðra lífmassa. Samsetning sorpsins var þannig: Kartöflur 55%, ávextir og grænmeti 28%, brauð 5%, pappír 2% og hrísgrjón og spaghattí 10%. Gerjunin fór fram í tveggja þrepa kerfi eins og sýnt er á mynd 3-1:

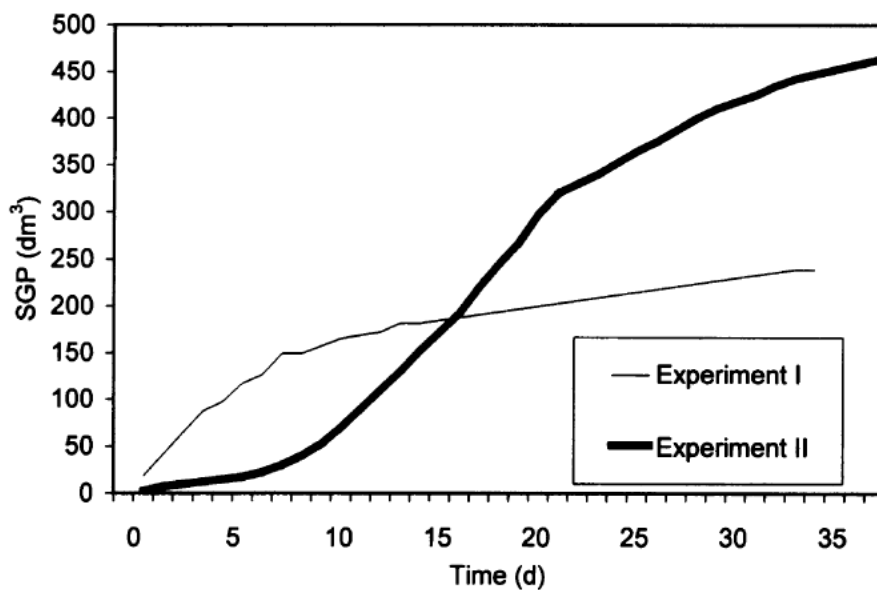


Mynd 3-1: Tveggja þrepa gerjunarkerfi til lífgasframleiðslu (Sosnowski, P. et al., 2003)

4. Einungis skólþ frá Lodz í tveggja þrepa kerfinu.
5. Sama blanda af seyru og sorpi og í tilraun 2 en gerjun framkvæmd í tveggja þrepa kerfinu.

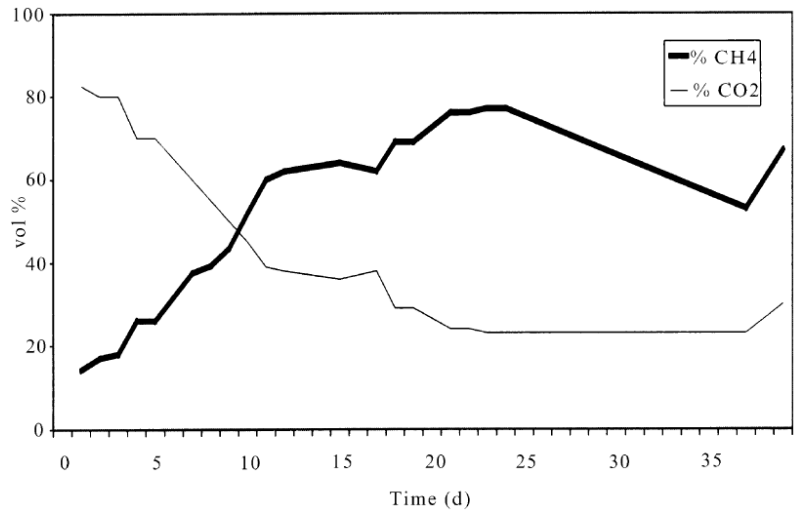
Í tveggja þrepa kerfinu sem sýnt er á mynd 3-1 var dælt í gerjunartankana í hálf – samfelldu ferli (e. quasi – continuous mode) sem þýðir að í þá var dælt einu sinni á dag í tveimur aðskildum stigum. Annars vegar í tank eitt (e. reactor 1) við loftfirrða oxun (e. acidogenic digestion) við hitakærar (e. thermophilic) aðstæður, þ.e. 56°C og hins vegar í tank 2 (e. reactor 2) við metanmyndandi aðstæður (e. methane fermentation) og meðalhitakærar aðstæður (e. mesophilic), þ.e. 36°C.

Munurinn á því að láta seyru gerjast eina og sér annars vegar og blanda lífrænu heimilissorpi saman við hins vegar er augljós.



Mynd 3-2: Uppsöfnuð lífgasframleiðsla yfir 35 daga úr seyru annars vegar (experiment I) og blöndu af seyru og lífrænum heimilisúrgangi hins vegar (experiment II) (Sosnowski, P. et al., 2003)

Mynd 3-2 sýnir hvernig lífgas myndast hraðar til að byrja með þegar seyran er látin brotna niður ein og sér en aftur á móti tekur blandaða efnið við sér eftir u.þ.b. viku og myndast þá lífgas af meiri krafti. Eftir 2 vikna gerjunartíma var uppsöfnuð gasframleiðsla jafnmikil og að lokum var gasframleiðsla úr blandaða efninu tvöfalt meiri en gasframleiðsla eintómrar seyru. Það kom einnig í ljós að í upphafi gerjunar myndast meira af koltvísýringi en metani en eftir um 10 daga er metanmyndun orðin meiri en myndun koltvísýrings.

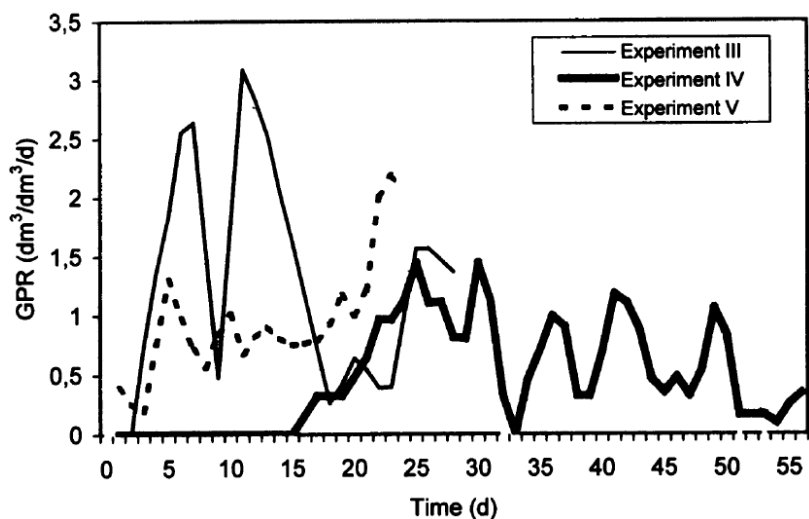


Mynd 3-3: Hlutfall metans og koltvísýrings í lífgasi framleiddu með gerjun á blöndu af seyru og lífrænum úrgangi (Sosnowski, P. et al., 2003)

Mynd 3-3 sýnir hvernig lífgas er að mestu koltvísýringur í upphafi lífgasmyndunar en eftir um tvær vikur er metan meginuppistaða lífgassins.

Á mynd 3-2, sem sýnir uppsafnaða lífgasframleiðslu úr tilraunum 1 og 2, má greinilega sjá hverju munar í gasmyndun við það að notast við íblöndunarefni úr venjulegu lífrænu heimilissorpi.

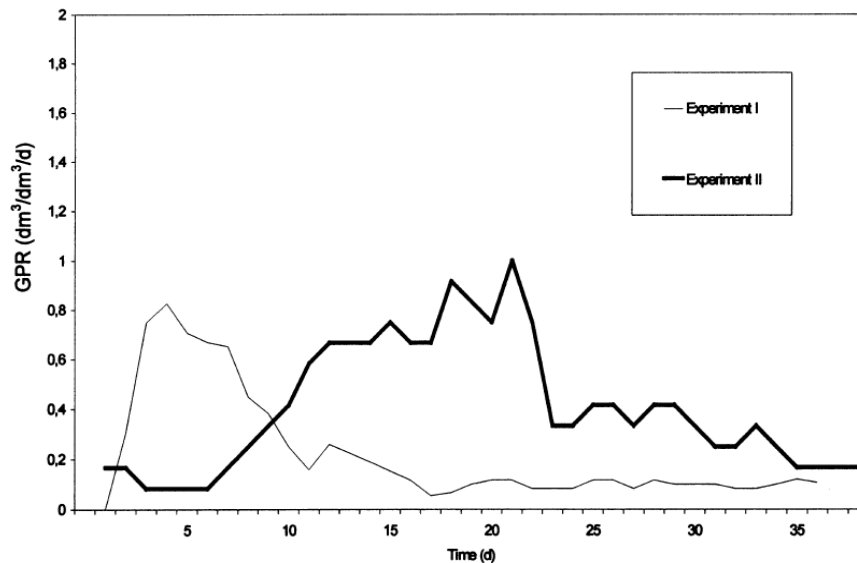
Niðurstöður úr tilraunum 3, 4 og 5 voru örlítið óljósari.



Mynd 3-4: Lífgasmyndun úr lífrænum heimilisúrgangi (III), seyru (IV) og blöndu af lífrænum heimilisúrgangi og seyru (V). Gerjunin var framkvæmd í tveggja þrepa kerfi (Sosnowski, P. et al., 2003)

Það skal haft í huga að á mynd 3-4 er sýnd lífgasmyndun á hverjum tímapunkti en ekki uppsöfnuð lífgasmyndun eins og á mynd 3-2. Á y – ás er lífgasmyndun í  $\text{dm}^3$  af hverjum  $\text{dm}^3$  af lífmassa. Það má þó lesa út úr þessu að lífrænt heimilissorp nær mikilli metanmyndun við niðurbrot eða allt upp í  $3 \text{ dm}^3/\text{dm}^3/\text{d}$  og tekur fljótt við sér á meðan blanda af seyru og

heimilissorpi tekur lengri tíma í að hefja lífgasmyndun. Sambærileg mynd af tilraunum 1 og 2 sýnir muninn á seyru annars vegar og blöndu af seyru og lífrænu heimilissorpi hins vegar.



Mynd 3-5: Lífgasmyndun úr seyru eingöngu (I) og blöndu af 25% lífrænum heimilísúrgangi og 75% seyru (II). Gerjunin fór fram í eins þreps kerfi (Sosnowski, P. et al., 2003)

Muninn á tilraunum 1 og 2 annars vegar og síðan 3, 4 og 5 hins vegar má skýra með mismunandi gerjunaraðstæðum. Mynd 3-5 segir í raun sömu sögu og mynd 3-2 en með sömu uppsetningu og mynd 3-4. Niðurstaða tilraunarinnar var helst sú að uppsöfnuð lífgasmyndun jókst eftir því sem hlutfall lífræns heimilísúrgangs jókst. Aftur á móti tók myndunin lengri tíma en úr seyrunni einni og sér (Sosnowski, P. et al., 2003).

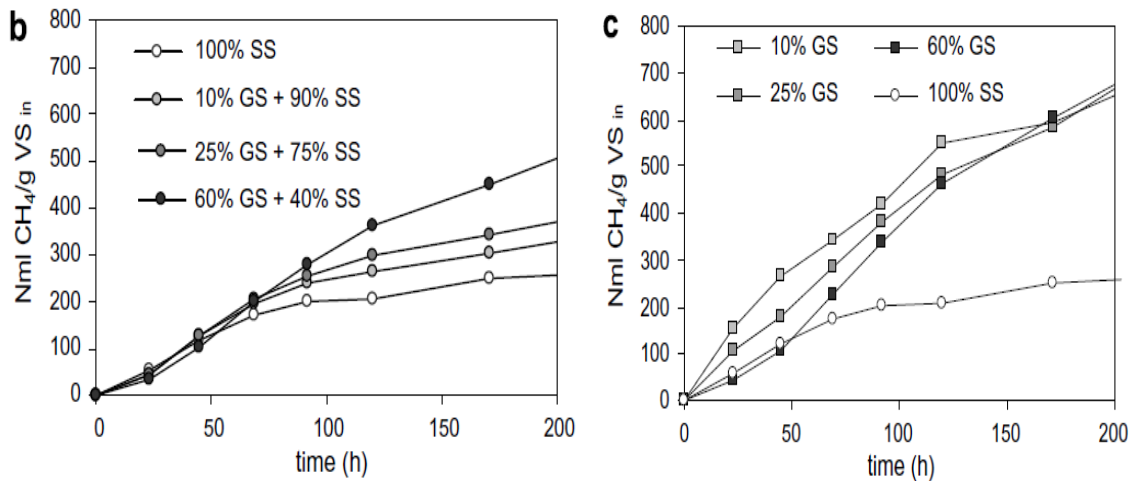
### 3.5.2 Íblöndun fitu úr skiljum og frá veitingastöðum og verksmiðjum

Við tilraunaaðstæður hefur metanmyndun fitu úr fituskiljum í skólphreinsistöðvum náð 845 – 928 Nml CH<sub>4</sub>/g VS (normal millilítrar af metani á gramm af rokgyörnum föstum efnum) en það er nálægt fræðilegum metanmyndunargildum fitu (Davidsson, Á. et al., 2007). Þetta þýðir 0,845 – 0,928 Nm<sup>3</sup> af metani sem hvert kg af fitu úr fitugildrum skólphreinsistöðva myndar.

Allt þar til fyrir skemmstu var fitu úr skiljum í skólphreinsistöðvum fargað. Þó að lípiðrík hráefni eins og fita búi yfir miklum möguleikum á metanmyndun þá geta langar fitusýrur (e. long chain fatty acids), sem myndast við vatnsrof fitusameinda, komið í veg fyrir metanmyndun. Þar til nýlega var talið að ekki væri hægt að koma í veg fyrir þessa fyrirstöðu við metanmyndun langra fitusýra en nú er komið í ljós að það er hægt. Loftfirrt niðurbrot á fitu einni og sér er þó ekki fýsilegt en íblöndun við seyru er aðlaðandi kostur, bæði til að auka lífgasframleiðslu seyrunnar og til að nýta mikla metanmyndunarmöguleika fitu (Luostarinen, S. et al., 2008).

Í tilraun, þar sem prófaðar voru mismunandi samsetningar skólpsseyru (e. sewage sludge, S.S.) og fitu úr seyru (e. grease trap sludge, G.S.), kom í ljós beint samband á milli herra hlutfalls G.S. í hráefni til niðurbrots og aukinnar metanmyndunar pr. einingu af hráefni. Þá var einnig

lagt mat á metanmyndunarmöguleika fitu með því að láta hana brotna niður sér sem mismunandi hlutfall við rokgjörn föst efni (e. volatile solids). Einnig var blandað saman við tilraunahráefnin seyru sem hafði verið brotin niður til dreifingar á virkum niðurbrotsörverum (e. inoculum). Gerjunarhitastig var 35°.

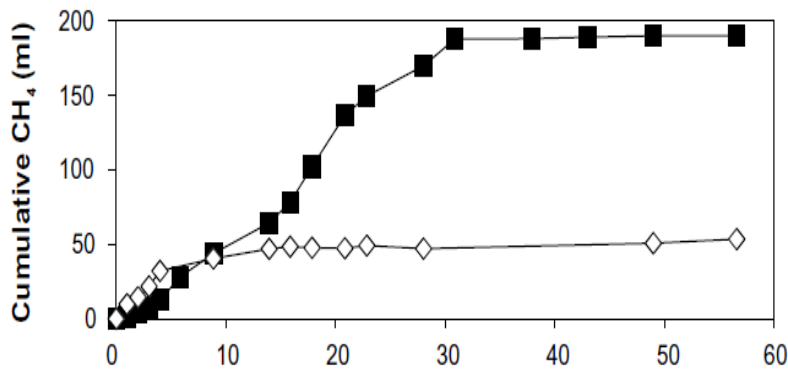


Mynd 3-6: Uppsöfnun metanmyndun fyrstu 200 klst. niðurbrots eftir mismunandi hlutföllum fitu og seyru (Davidsson, Å. et al., 2007)

Á mynd 3-6 er metanmyndun sýnd sem normal ml af CH<sub>4</sub> á hvert gramm rokgjarna hrárra efna (Volatile Solids). Ávinningur þess að blanda fitu út í seyruna fer að sjást eftir u.þ.b. 70 klst. gerjun og er metanmyndun tæplega tvöföld við hlutföllin 60% GS + 40% SS miðað við seyru eingöngu.

Það bendir þó til þess að eitthvað af möguleikum fitu til metanmyndunar tapist við íblöndun við seyru og reynist blöndun 10 – 30% af GS út í VS vera 9 – 27% aukning í metanmyndun. Það er því ekki línuleg aukning metanmyndunar sem fylgir því að blanda fitu úr fituskiljum út í seyru til niðurbrots (Davidsson, Å. et al., 2007).

Einkenni þess að notast við íblöndunarefni er áframhaldandi gerjun eftir u.þ.b. 12 daga á meðan gerjun úr seyru er að mestu lokið eftir þann tíma. Þetta sást greinilega þegar tilraunir voru gerðar með íblöndun fitu frá kjötvinnslustöð við seyru til metanframleiðslu.



Mynd 3-7: Uppsöfnun metanmyndun yfir tíma úr seyru annars vegar og fitu hins vegar (Luostarinen, S. et al., 2008)

Á mynd 3-7 táknar línan með tíglunum myndun úr seyru og sú með dökku ferningunum sýnir metanmyndun úr fitu. Á lóðrétta ásnum er viðverutími mældur í dagafjölda. Greinilegt er hvernig metanmyndun úr skólpi er að mestu lokið eftir um tvær vikur en á þeim tíma er metanmyndun úr fitu að hefjast. Við prófanir á mismunandi hlutföllum íblöndunarefna kom í ljós að metanmyndun jókst eftir því sem hlutfall fitu hækkaði, allt upp að 46% fitu hlutfalli, en eftir það fór óstöðugleiki að aukast og metanmyndun tók að dragast saman. Einnig voru metanmyndunarmöguleikar hráefnisins ekki fullnýttir ef hlutfall fitu var of hátt. Íblöndun fitu jók þannig metanmyndun á hverja rúmmálseiningu af hráefni en að sama skapi tvöfaldaðist viðverutíma hráefnisins til gerjunar. Slík lenging á viðverutíma hefur vissulega áhrif á hagkvæmni framleiðslunnar.

COD (chemical oxygen demand) hlutfall seyrunnar, sem mælir hlutfall lífrænna efna, var um 770 mg/l þegar gerjun hófst en það er töluvert herra COD hlutfall en sést í skólpi hér á landi. Nánar er fjallað um þá þætti í fimmta kafla.

Íblöndun fitu í seyru er því augljóslega fýsilegur kostur sé markmiðið að hámarka metanframleiðslu frekar en að draga sem mest úr umfangi fráveituvatns.

### 3.6 Samantekt

Skólpi er að 99,9% hluta vatn. Fyrir hreinsun kemur það inn sem óunnið skólpi en við hreinsun er því skipt upp í þrjá hluta, þ.e. fyrsta stigs seyru, umfram seyru og þriðja stigs seyru. Á höfuðborgarsvæðinu er einungis eins þreps hreinsun á fráveituvatni og því aðeins fyrsta stigs seyra sem rennur út í sjó. Skólpi er flokkað í styrkleikaflokka eftir COD og BOD hlutföllum, COD er efnafræðileg súrefnisþörf og BOD er líffræðileg súrefnisþörf og segja þessi hlutföll til um styrkleika efna í skólpi.

Hægt er að reikna út fræðilega metanmyndunarmöguleika fráveituvatns eftir ákveðnum formúlum en slíkir útreikningar koma þó ekki í stað mælinga. Miðað við lífrænan úrgang, orkuþörf og mykju er skólpi hagkvæmasti kosturinn til metanvinnslu út frá fjárhagslegum sjónarmiðum.

Hægt er að auka metanmyndun úr seyru með íblöndun fitu úr fitugildrum í fráveitukerfum og einnig með lífrænum hluta heimilisúrgangs. Það kallar þó á lengri viðverutíma hráefnisins í gerjunartönkum og þar af leiðandi þarf stærri gerjunartanka. Möguleikar fitu til metanmyndunar eru miklir en þó er tæknilega flókið að láta fitu brotna niður eina og sér og gasmyndun hefst seinna en við niðurbrot seyru.

Hægt er að auka gasmyndun seyru með því að brjóta hana niður með sérstökum vélbúnaði áður en henni er dælt í tanka til gerjunar og þannig auka hagkvæmni metanframleiðslunnar.

Lífgasverin í Bern og Luzern í Sviss hafa reynst vel. Í Bern er notuð fita úr fitugildrum og veitingahúsaúrgangur til íblöndunar við seyru og má rekja um 75% gasmyndunarinnar til íblöndunarefna þó að seyra sé 95,7% þess sem dælt er í gerjunartanka.

Það má því ætla að framleiðsla metans með loftfirrtu niðurbroti seyru væri tæknilega raunhæfur möguleiki hér á landi þar sem þó nokkur reynsla er komin á slíka framleiðslu víða um heim. Tæknilega er því ekkert því til fyrirstöðu að ráðast í slíka framleiðslu hér á landi en aðrir þættir en staða þekkingar geta þó sett strik í reikninginn, svo sem styrkleiki skólps hér á landi og verður gerð frekari grein fyrir því í köflum 5, 6 og 7.



## 4 Gösun seyru

Hér verða helstu aðferðir til gösunar seyru skoðaðar og farið nánar yfir tækni og ferli. Farið verður yfir hvaða aðferðir þykja henta best til gösunar seyru en seyra er öðru vísi hráefni en annað sem nýtt hefur verið til gösunar fram að þessu að því leyti að vökvainnihald er mun meira en þekkist og því henta ákveðnar gösunaraðferðir betur en aðrar. Vegna þessa háa vökvainnihalds eru hlutföll gastegunda í efnasmíðagasi önnur en þegar önnur hráefni eru nýtt og vegna hins háa vökvainnihalds er vetnishlutfall hátt þegar seyra er nýtt sem hráefni til gösunar.

Nýlega hefur aukinn kraftur verið settur í rannsóknir á fýsileika þess að gasa seyru í þeirri viðleitni að nýta úrgang til orkuframleiðslu. Seyra hefur fyrst og fremst verið nýtt sem áburður, látin gerjast til metanmyndunar eða verið brennd til hitaframleiðslu. Annars hefur hún verið losuð út í sjó eða notuð til landfyllingar. Samkvæmt rannsóknum er hægt að nýta seyru til orkuframleiðslu með hitasundrun (e. pyrolysis) og gösun. Við það að nýta seyru til orkuframleiðslu með þessari tækni er einnig verið að binda mengandi þungmálma í seyru í föstum efnum sem sitja eftir þegar gösun er lokið í meira mæli en þekkist við hefðbundinn bruna á seyru. Þá er gufugösun á seyru aðferð sem lofar góðu vegna hins háa vetnishlutfalls í því efnasmíðagasi sem fæst úr þess háttar gösun á seyru (Nipattummakul, N. et. al., september 2010) en mikið er horft til gösunar á seyru til framleiðslu á vetni og miða margar rannsóknir að því að finna leiðir sem auka vetnishlutfall þess gass sem fæst úr gösun á seyru.

Mikið hefur dregið úr nýtingu seyru til áburðar þar sem hlutfall mengandi efna s.s. þungmálma, veira og lyfja hefur aukist með árunum og er slík notkun sums staðar bönnuð með öllu (Groß, B. et. al., 2007).

Ekki henta allar aðferðir gösunar fyrir seyru vegna þess að hve miklum hluta seyra er vatn en einmitt þess vegna er hlutfall vetnis á móti kolefni hærra í seyru en öðru hráefni sem hefur verið notað til gösunar til þessa. Því verður farið yfir þær aðferðir sem hafa verið mest rannsakaðar og henta best við seyrugösun.

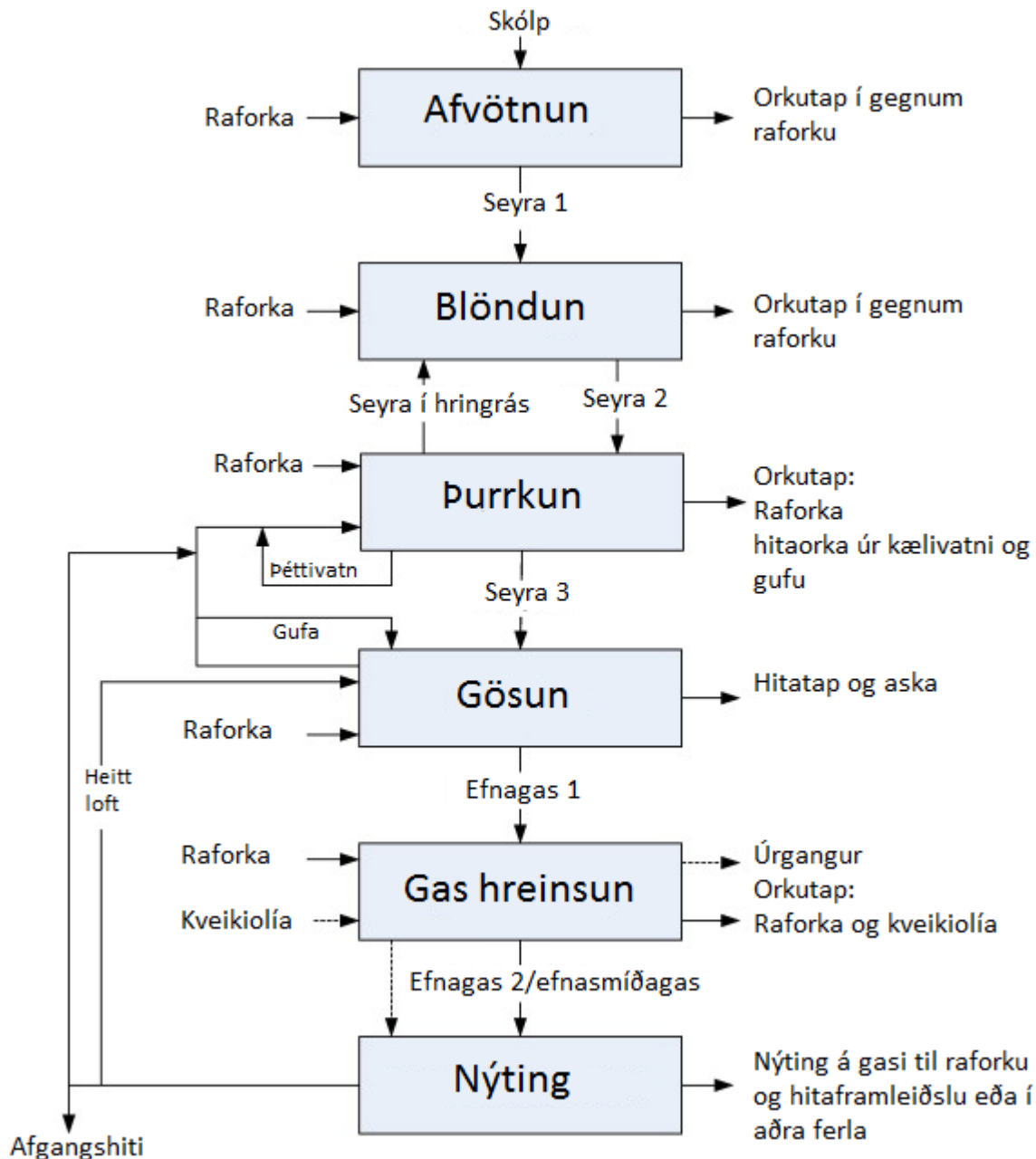
### 4.1 Gösun

Nokkrar útfærslur hefðbundinnar gösunar þykja henta við gösun seyru. Þær helstu eru flotbotnsgösun (e. fluidized bed), háhita gufugösun og vatnsgösun við yfirmarkshitastig (e. supercritical water gasification).

#### 4.1.1 Flotbotnsgösun

Flotbotnsöfnar eru nú þegar notaðir við bruna á þurrkaðri seyru til hita- og rafmagnsframleiðslu vegna sveigjanleika þeirra í eldsneytisnýtingu og vegna góðrar blöndunar í ofninum (Petersen, I. og Werther, J., 2004).

Einnig hefur flotbotnsgösun á seyru verið könnuð út frá hlutfalli vetnis í efnasmíðagasi og þá með niðursogsgösun en nýlegri rannsóknir hafa einblínt meira á flotbotnsgösun sem og aðrar aðferðir.



Mynd 4-1: Flæðirit gösunar skólps (Groß, B. et. al., 2007)

Mynd 4-1 lýsir því ferli sem á sér stað við gösun seyru við gösun í flotbotnsöfnun og sýnir orkuflæðið við það ferli.

Hreinsað skólp (seyra), sem er um 2,5% þurefni, er afvatnað undir 50 bara þrýstingi en með því að nýta háþrýsting til afvötnunar er hreinsunarferli fráveitustöðvarinnar einfaldað frá því sem þekkist við niðurbrot í súrefnissnaudu umhverfi, ekki þarf að gera seyruna jafn einsleita og í því ferli þar sem ferlið sjálft er ekki háð tengingum örvera í hráefninu eins og við súrefnissnautt niðurbrot. Þaðan er seyru 1 veitt áfram en hún er um 30% þurefni. Næsta stig

er lághitaþurrkun. Þurrkaðri seyru, um 90% þurrefni, er veitt í hringrás úr þurrkunarstigi í blöndun og úr blöndun kemur seyra 2 sem er um 60% þurrefni. Eftir það er seyran þurrkuð við lághita þaðan sem út kemur seyra 3 sem er um 85 – 90% þurrefni.

Úr þurrkun er seyru 3 veitt í gösun. Gösunin fer fram við venjulegan loftþrýsting, við um 870°C, og við loftblásna gösun. Hitastig og loftflæði veltur þó á umfangi gösunarútbúnaðar, þ.e. rúmmáli og vinnslugetu. Samsetning gassins veltur á samsetningu seyrunnar sem notuð er til gösunarinnar og er gasið kælt niður til að hægt sé að hreinsa það. Hiti frá gasinu er endurnýttur í ferlinu með því að láta það hita upp loft sem dregið er inn í kerfið til gösunar (Groß, B. et. al. 2007).

Eins og kom fram hér að ofan er samsetning þess gass sem út úr þessu ferli kemur mismunandi eftir hráefni, almenn hlutföll efna í slíku gasi eru sýnd í töflu 4-1:

Tafla 4-1: Dæmigerð samsetning gass úr gösun seyru við flotbotnsgösun (Groß, B. et. al., 2007)

Efni	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
<b>Hlutfall %</b>	24	11	2	9	46	0,7	0,3	7

Á töflu 4-1 má greina hvernig nær helmingur efnasmíðagass úr seyru er niturgas (46%) en afgangur efnasmíðagass er settur saman úr kolsýringi (24%), vetni (11%), koltvísýringi (9%) og vatni (7%). Helst er horft til nýtingar á vetni og kolsýringi við nýtingu efnasmíðagass.

Svipað hlutfall vetnis var að finna í efnasmíðagasi úr gösun með föstum botni en umbreyting hráefnis yfir í gas var ekki jafnmikil og við flotbotnsgösun (Midilli, A., et. al., 2002). Í grunninn var þó niðurstaðan sú sama, hvort sem notast var við fastan botn eða flotbotn.

Einnig hefur verið kannað að nýta sólarorku til þurrkunar á seyru en vegna norðlægrar breiddargráðu Íslands og þar með takmarkaðrar sólarorku, í það minnsta á vetrarmánuðum, verður að teljast öruggt að það þurfi að beita öðrum aðferðum við þurrkun seyru en sólarorku. Einnig er nauðsynlegt að gera seyruna „stöðuga“ (e. stabilize) áður en hún er þurrkuð með sólarorku en slíkt er ekki nauðsynlegt við lághitaþurrkun undir þrýstingi eins og var notast við í dæminu hér á undan (Groß, B. et. al., 2007).

#### 4.1.2 Gufugösun

Gufugösun þykir álitleg leið þar sem hún skilar hærra vetnishlutfalli en loft- eða súrefnisgösun.

Gufugösun er í grunninn sama ferli og önnur gösun nema að gufa er notuð sem hvarfefni en ekki súrefni eða loft. Hægt er að nota sömu aðferðir og við aðra gösun, svo sem fasta eða flotbotnsgösun, mismunandi hitastig o.s.frv. en við gufugösun þarf eftir sem áður að þurrka seyruna líkt og við súrefnisblásna gösun.

Rannsóknir á gufugösun seyru hafa fyrst og fremst miðað að því að ná fram sem mestri vetnisframleiðslu og ráðandi þáttur þar um er hlutfall kolefna á móti gufu (steam/carbon ratio,

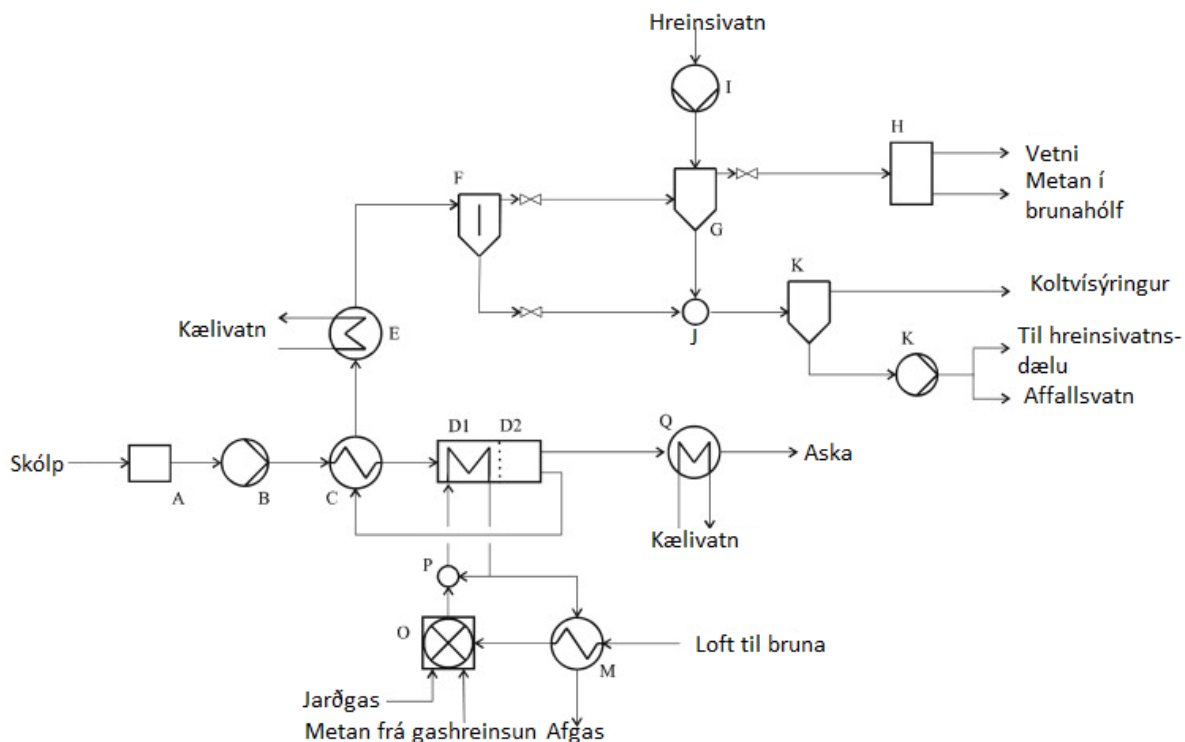
S/C) sem og hitastig gösunar. Til þess að geta metið hlutfall kolefna á móti gufu þarf magn kolefna í skólpi að vera þekkt.

Í þeim rannsóknum sem hér liggja til grundvallar hefur hráefnið verið þurrkað niður í 1,74% vökvainnihald fyrir gufugösun. Kolefnainnihald þurrefnis mældist vera 45,79% af þurrefnum og það hlutfall gufu á móti kolefni sem gaf af sér hámarks vetnisframleiðslu var 5,62 við 1000°C en það gaf af sér 0,073 grömm af vetni fyrir hvert gramm af þurrefni sem veitt var til gösunar. Hlutfall vetnis og kolsýrings á móti metani og koltvísýringi hækkaði einnig eftir því sem hitastig gösunarinnar var hærra en hlutfall vetnis náði hámarki við um 50% af efnasmíðagasi, kolsýringur og koltvísýringur um 20% hvort og metan og önnur kolvetni um 10%. (Nipattummakul, N. et. al., september 2010).

#### 4.1.3 Vatnsgösun við yfirmarkshitastig

Vatnsgösun við yfirmarkshitastig er sú tegund hefðbundinnar gösunar sem þykir lofa hvað bestu varðandi gösun seyru.

Vatnsgösun við yfirmarkshitastig hefur einnig þann kost umfram aðrar aðferðir að ekki þarf að þurrka hráefnið jafnmikið og raunar er vatnið nauðsynlegt fyrir efnahvörfin. Gösunin gefur af sér mjög hátt vetnishlutfall og mjög lágt kolsýringshlutfall og minna situr eftir af efnunum eins og tjöru og koxi. Rannsóknir á vatnsgösun á seyru hafa ekki einungis beinst að vetnisframleiðslu heldur einnig framleiðslu metans og lífolú við lægra gösunarhitastig.



Mynd 4-2: Yfirlit yfir vatnsgösun við yfirmarkshitastig, flæðirit (Gasafi, E. et. al., 2008)

Mynd 4-2 lýsir skematískt vatnsgösun við yfirmarkshitastig. Helstu tæki eru merkt með bókstöfum og stendur A fyrir „conditioning unit“ sem er tæki sem blandar seyruna í einsleita blöndu með um 15 – 20% þurrefnainnihald, B er háþrýstidæla þar sem þrýstingurinn er

keyrður upp í 280 MPa og C er hitaskiptir þar sem skólpið er hitað í um 435°C en til þess að hita seyruna á þessu stigi er notaður hiti úr gasinu sem streymir úr sjálfri gösuninni. Þaðan er skólpinu veitt í annan hitaskipti (D1) þar sem það er hitað upp í 600°C. Í ofninum (D2) brotnar hráefnið niður í vetni, metan og koltvísýring að stærstum hluta. Sá hiti, sem þarf til að ná þessari umbreytingu fram, fæst með bruna á metani og jarðgasi í brunahólfi (O) en metanið er fengið frá aðsogshreinsun (e. pressure swing adsorption, PSA) á efnagasinu, hreinsunin fer fram í hreinsieiningu sem táknuð er með H en þar er vetnið einnig skilið frá og út úr aðsogshreinsun næst allt að 99,999% hreint vetni. Þau þurrefni sem eftir sitja eftir gösun eru kæld niður með kælivatni (Q) og þeim dælt út.

Gasið úr gösuninni er leitt í gegnum hitaskipti (C) og þaðan upp í kælingu (E) þar sem það er kælt niður í 40°C eða þannig að vökvi þéttist og þaðan er því veitt í skilju (F) sem skilur að gas og vökva.

Úr skilju (F) er vökva annars vegar veitt í blandara (J) þaðan sem vökvanum er annaðhvort dælt út til sjávar eða í einhvern annan viðtaka og einnig endurnýttur til vatnshreinsunar á gasinu. Hins vegar er gasi, sem ríkt er af koltvísýringi, veitt í vatnshreinsun (G) og koltvísýringsríku vatni er veitt í blandarann (J) og áfram í sama farveg og vökva úr skilju. Vetnisríku gasi er síðan veitt áfram í aðsogshreinsun (H).

Hagkvæmni gösunar seyru við yfirmarkshitastig hefur verið könnuð og greind með vetnisframleiðslu sem markmið. Miðað var við flæði seyru til gösunar upp á 5 tonn á klukkustund, vatnshlutfall upp á 80% og hlutfall lífrænna efna í þurrefni upp á 75% á mótí 25% ólífrænna efna. Þetta lætur nokkuð nærri því að vera sama magn og flæðir um fráveitukerfi Orkuveitu Reykjavíkur á höfuðborgarsvæðinu en nánar verður farið yfir þann samanburð og kostnaðarútreikninga í kafla 6 og 7.

Gert er ráð fyrir að gösunin fari fram við 600°C og miðað við fullkomna umbreytingu hráefnisins við gösun þýðir þetta 83,9 kg af vetni á klukkustund úr 5 tonnum af skólpi (Gasafi, E. et. al., 2008).

Sé horft til þess hve mikið vetni fæst fyrir hvert gramm þurrefnis sem notað er til gösunar eru það 0,084 grömm af vetni fyrir hvert gramm af þurrefni úr skólpinu samanborið við 0,073 grömm af vetni á hvert þurrefni við gufugösun.

## 4.2 Hitasundrun

Hitasundrun (e. pyrolysis) fer fram í súrefnissnaudu umhverfi við 300 – 900°C hita. Hún er í raun hitaknúið niðurbrot fremur en gerlaknúið niðurbrot líkt og fjallað var um hér að framan í kafla 3 um metanframleiðslu. Við hitasundrun brotnar lífmassinn niður í þrjá þætti, þ.e. gös, vökva og föst efni:

1. Gös: Fyrst og fremst vetni, metan, kolsýringur, koltvísýringur og svo lítið magn annarra gastegunda.
2. Vökvar: Tjara og/eða olía sem innihalda efni svo sem sýru, asetón og metanól.
3. Föst efni: Oftast nær hreint kolefni með litlu magni óvirkra efna.

Hlutföll og samsetning þessara efna veltur á hitastigi, þrýstingi við hitasundrunina, samsetningu þess efnis sem notað er o.s.frv. Hægt er síðan að nota þessi efni, hvort sem það eru gös eða vökvar, en það kostar þó töluverða hreinsun (Fytli, D. og Zabaniotou, A., 2006).

Hitasundrun seyru hefur sáralítið verið könnuð miðað við aðrar aðferðir og fátt sem bendir til þess að sú aðferð sé samkeppnishæf við aðrar tegundir gösunar. Þó hefur rannsókn farið fram á hitasundrun seyru með hefðbundinni hitun og örbylgjuhitun þar sem seyra með 71% vökvainnihald var notuð sem hráefni. Um var að ræða tilraunir á litlum sýnum af seyru, um 15 grömm, þar sem aðeins voru skoðuð hlutföll gastegunda og vökva eftir hitasundrun. Því er ekki ljóst hvernig örbylgjuhitasundrun á seyru myndi koma út við raunverulegar aðstæður með fullum afköstum. Efnasmíðagas ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) var 62,3% þess gass sem myndaðist við hitasundrun og voru hlutföll vetnis og kolsýrings nokkuð jöfn. Einnig mynduðust tjara og olía sem meðal annars bundu vetni, kolsýrings og aðrar gastegundir (Domínguez, A. et. al., 2006), hitasundrun er því ekki jafn skilvirk aðferð til framleiðslu vetnis eða efnasmíðagass og gösun.

Flæði efnasmíðagass úr gösunarferlinu er, samkvæmt rannsóknnum, greinilega minna við hitasundrun heldur en hefðbundna gösun miðað við sama magn hráefnis (Nipattummakul, N., et. al., júlí 2010). Því er óhætt að draga þá ályktun að nýting hráefnisins sé ekki jafngóð við hitasundrun og því væri hagkvæmara að nota aðrar aðferðir við nýtingu skólps heldur en hitasundrun.

### 4.3 Plasmagösun

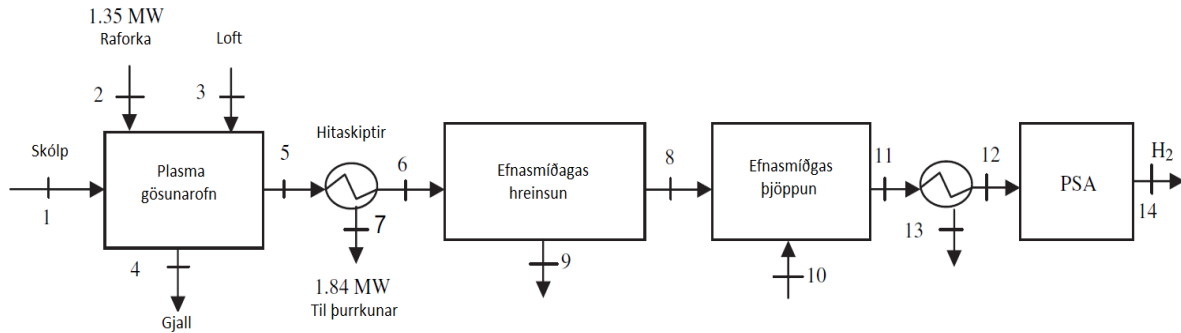
Plasmagösun er nýjasta tæknin við umbreytingu úrgangs í orku. Nú þegar er sorp meðhöndlað með plasmagösun bæði í Japan og Bandaríkjunum og er umræða um byggingu slíkrar aðstöðu í gangi víða um heim.

Plasmagösun fer fram við mun hærra hitastig en hefðbundin gösun og notar alfarið utanaðkomandi orku í stað þess að nýta hita úr gösunarferlinu við ferlið nema við þurrkun á skólpi fyrir gösun en við hana er nýttur hiti úr gösunarferlinu. Því verður enginn bruni í kerfinu eins og í hefðbundinni gösun og næstum allt hráefnið er nýtt sem þýðir að nær ekkert situr eftir af tjöru, gjalli og öðrum efnum. Plasmagösun er þannig sú tækni sem kemst hvað næst því að vera hrein gösun.

Gösun seyru er enn á tilraunastigi og hefur ekki verið rannsökuð mikið. Þó hefur verið gerð tilraun með plasmagösun seyru í Aþenu í Grikklandi. Tilraunin þar er sérstaklega athyglisverð í ljósi þess að skoðuð var gösun seyru, bæði fyrir og eftir súrefnisfirrt niðurbrot.

Eins og við mátti búast innihélt seyra meiri orku fyrir súrefnisfirrt niðurbrot sem lýsti sér í því að hærra hitagildi seyrunnar var hærra fyrir niðurbrot. Það stafar af hærra hlutfalli vetnis og kolefna í seyrunni fyrir niðurbrot (Mountouris, A. et. al., 2008).

Það kerfi sem sett var upp í Grikklandi gat unnið 250 tonn af seyru á degi hverjum með 68% vökvainnihaldi.



Mynd 4-3: Plasmagösun seyru til vetnisframleiðslu (Kalinci, Y. et. al., 2011)

Mynd 4-3 lýsir í grófum dráttum ferlinu við plasmagösun seyru og lýsa númerin á myndinni röð atvika í ferlinu. Unnið skólpi (seyra) flæðir inn í plasmagösunarofn eftir þurrkun en hiti frá hitaskipti er m.a. notaður við þurrkun á seyrunni (7). Forunnin seyra er leidd inn í plasmagösunarofn (1) þar sem hún mætir rafboga sem leiddur er á milli tveggja grafít rafskauta (2) og loft er notað sem orkuleiðari (3). Þar fer sjálf gösunin fram og er efnasmíðagasið leitt í hitaskipti (5) en gjall og ösku er veitt í burtu og fargað (4). Úr hitaskiptinum er hitaorka leidd til þurrkunar seyru (7) en sjálft efnasmíðagasið er veitt í hreinsun (6) þar sem súr gös, svifagnir, þungmálmur og raki er hreinsað frá og leitt í burtu (9). Þaðan er uppfærðu efnasmíðagasinu veitt í þjöppu (8) þar sem það er þjappað í 1.013,25 kPa þrýsting. Þaðan er efnasmíðagasinu veitt undir þrýstingi í hitaskipti (11) þaðan sem náð er 0,8 MW af hitaorku úr efnasmíðagasinu (13) en efnasmíðagasið fer áfram í PSA hreinsun (12) þar sem vetnið er hreinsað frá. Nettó raforkuframleiðsla úr þessu kerfi, miðað við vinnslu á 250 tonnum af skólpi á dag eða um 10,4 tonn á klukkustund, er 2,85MW. Hlutföll gastegunda eftir gösun áður en vetni var hreinsað frá var:

Tafla 4-2: Hlutföll gastegunda í efnasmíðagasi eftir plasmagösun seyru (Kalinci, Y. et. al., 2011)

H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
20,23%	17,12%	9,77%	52,88%

Sjá má af töflu 4-2 að samsetning efnasmíðagassins er einfaldari en í töflu 4-1 en það kemur til af því að gösunin er hreinni, þ.e. öllu hráefninu er umbreytt í vetni, kolsýring, koltvísýring og niturgas en vatn, brennisteinn, metan og fleiri efni sitja ekki eftir í efnasmíðagasinu líkt og greina mátti í töflu 4-1. Niturgas er eftir sem áður meginuppistaða efnasmíðagassins. Það skal tekið fram hér að í rannsókn Kalinci, Y. et. al. hafði sú seyra, sem nýtt var til gösunar, farið í gegnum súrefnisfirrt niðurbrot og var því ekki jafn rík af kolefnum og fyrir niðurbrot. Hún hafði einnig verið keyrð í gegnum afvötnun eftir niðurbrot og var vatnsinnihald hennar 26,7% (Kalinci, Y. et. al., 2011).

Plasmagösun seyru er „hreinasta“ aðferðin sem völ er á við hreinsun og nýtingu á seyru, þ.e. nýtingin á hráefninu er betri en við aðrar aðferðir og útblástur og eiturefni í gjalli (e. slag) eru mun minni en við t.a.m. bruna og gösunaraðferðir sem ekki ná jafn góðri nýtingu.

Plasmagösun seyru er enn á rannsóknarstigi og ekki tilbúin til notkunar. Niðurstöður rannsókna sem hafa farið fram lofa samt góðu og er vert að fylgjast nánar með þróun þessarar tækni eftir því sem fram líða stundir.

## 4.4 Samantekt

Seyra er í auknum mæli rannsökuð sem hráefni til gösunar. Sökum hás vökvainnihalds seyru henta ekki allar gösunaraðferðir en þær sem þykja efnilegastar eru flotbotnsgösun, gufugösun, vatnsgösun við yfirmarkshitastig og plasmagösun. Þá hefur hitasundrun seyru einnig verið rannsökuð en það er hitaknúið niðurbrot í súrefnissnauðu umhverfi, ólíkt gerlagnúnu niðurbroti sem fjallað var um í kafla 3.

Meðferð og hreinsun skólps fyrir gösun er einfaldari en fyrir gerjun þar sem ekki þarf að gera hráefnið jafn einsleitt og ekki þarf að koma af stað gerlavirkni.

Bæði gufugösun og vatnsgösun við yfirmarkshitastig þykja lofa góðu til gösunar seyru þar sem ekki þarf að þurrka hráefnið jafnmikið og við aðrar gösunaraðferðir og þykir vatnsgösun sérstaklega efnileg. Horft er sérstaklega til þessara aðferða fyrir gösun seyru þar sem svo hátt hlutfall vökva í hráefni skilar hærra hlutfalli vetnis í efnasmíðagasi en þegar annað hráefni er notað og því er horft á gösun seyru sérstaklega til þess að framleiða vetni. Þessar aðferðir eru í grunninn eins og venjuleg gösun en í stað þess að súrefni eða eitthvert óvirkt gas sé notað sem hvarfefni er notuð gufa eða vatn við yfirmarkshitastig.

Plasmagösun er nýjasta tæknin við umbreytingu úrgangs í orku og er nú þegar í notkun við gösun sorps. Plasmagösun á seyru er þó enn á tilraunastigi og er „hreinasta“ gösunaraðferðin sem völ er á, þ.e. nýting hráefnisins er betri og lítið sem ekkert situr eftir af ösku. Þessi aðferð er þó ekki tilbúin til notkunar en áframhaldandi rannsóknir eru áætlaðar.

Þar sem gösun seyru er í raun enn á tilraunastigi og ekki komin nein reynsla á slíka vinnslu er ljóst að ekki verður ráðist í slíkar framkvæmdir hér á landi í allra nánustu framtíð. Aftur á móti er vert að fylgjast náið með þróun mála næstu árin verði ekki farið í metanframleiðslu með loftfirrtu niðurbroti á höfuðborgarsvæðinu.

Það er því ljóst að gösun seyru getur orðið raunverulegur valmöguleiki í fyrirsjáanlegri framtíð þó að ekki sé raunhæft að fara út í slíkar framkvæmdir á allra næstu misserum. Hins vegar liggja nægilega miklar upplýsingar fyrir um þessa tækni til þess að áætla megi hve miklu gösun seyru hér á landi myndi skila og gróflega áætla hvað slíkt myndi kosta. Þó skal haft í huga að á þessu stigi málsins eru slíkir útreikningar mikilli óvissu háðir.



## 5 Fráveitukerfi Orkuveitu Reykjavíkur og lífrænt sorp frá heimilum á höfuðborgarsvæðinu

Hér verður fjallað um fráveitukerfi höfuðborgarsvæðisins. Farið verður yfir uppbyggingu og tæknilega lýsingu á því. Einnig verður gerð samantekt á magni lífrænna efna í því fráveituvatni sem rennur í gegnum kerfið og tekin saman þau einkenni sem mælingar eru til yfir, þ.e. pH gildi, hitastig, magn fitu í fitugildrum o.s.frv. Samsetning skólps verður greind eftir því hve sterk fylgni er á milli sölu á heitu og köldu vatni, úrkomu og frárennslis með aðhvarfsgreiningu þar sem stuðst er við venjulega aðferð minnstu kvaðrata og gerð tilraun til þess að setja upp líkan út frá þeim gögnum sem segir til um samhengi veðurfars og flæðis um fráveitukerfi OR. Við þær greiningar og líkanasmíð er notast við óunnin gögn frá Veðurstofu Íslands og Orkuveitu Reykjavíkur en þau voru unnin og greind við vinnu þessarar ritgerðar. Þá verður metið það magn sem til fellur af lífrænum heimilisúrgangi sem hægt væri að safna saman og nýta til metanframleiðslu væri flokkun tekin upp á heimilum á höfuðborgarsvæðinu.

Lögum samkvæmt ber að hreinsa allt skólp á Íslandi áður en því er sleppt út í náttúruna. Það svæði sem tekur við seyrinni eftir hreinsun skólps er nefnt viðtaki en það er svæði sem tekur við mengun og þynnir hana og eyðir. Viðtaka er skipt niður í viðkvæm svæði og síður viðkvæm svæði. Frá höfuðborgarsvæðinu er seyrinni veitt í síður viðkvæmt svæði eftir hreinsun og því er 1. stigs hreinsun fullnægjandi samkvæmt lögum. Sem viðkvæma viðtaka má nefna yfirborðsvatn sem nýta á til neyslu eða svæði sem orðið hefur fyrir næringarefnaauðgun. Síður viðkvæm svæði eru t.d. sjór eða hafsvæði þar sem losun seyru hefur ekki skaðleg umhverfisáhrif og á þetta sérstaklega við um opna flóa og ármynni þar sem endurnýjun vatns er mikil og ekki hætta á ofnæringu eða súrefnisþurrð. Engir viðtakar, sem í notkun eru á Íslandi, hafa verið skilgreindir sem viðkvæmir (Umhverfisstofnun, 2003).

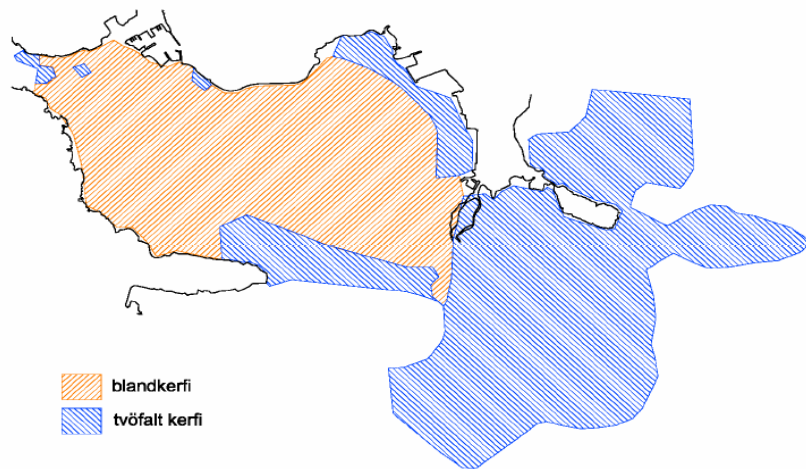
Fráveitukerfum er hægt að skipta upp í einföld kerfi eða tvöföld kerfi. Einföld kerfi eru stundum nefnd blandkerfi og er þá öllu vatni veitt saman í eina lögn sem þýðir að ofanvatn blandast skólpinu og þarf því skólphreinsistöðin að meðhöndla mun meira magn af vatni en upphaflega var mengað. Þetta á við um flestöll kerfi sem eru eldri en 40 ára en nýrri kerfi eru byggð upp sem tvöföld kerfi. Skólp er þá leitt í eitt kerfi og ofanvatn í annað. Ofanvatninu er síðan sleppt við fyrsta tækifæri út í náttúruna aftur, gjarnan í settjarnir þar sem aðskotaefni falla til botns og olfur og önnur slík efni fljóta upp. Einnig er hægt að loka fyrir frárennslis úr settjörnum verði mengunarslys. Þetta fyrirkomulag þýðir að mun minna vatn fer í fráveituna og þó að stofnkostnaðurinn sé hærri er rekstrarkostnaður mun minni þar sem ekki þarf að hreinsa jafnmikið magn fráveituvatns og þvermál fráveitupípa getur verið minna vegna minna rennslis og einnig vegna þess að rennslid verður stöðugra þar sem skólplæði er mun stöðugra en flæði ofanvatns og leysinga (Reynir Sævarsson, 2004).

## 5.1 Tæknileg lýsing á fráveitukerfi OR

Öllu regnvatni og frárennsli heimila og fyrirtækja frá Reykjavík, Kópavogi, Garðabæ, Seltjarnarnesi og Mosfellsbæ er safnað saman í tvö aðskilin kerfi og rennur það í gegnum tvær fráveitustöðvar sem eru staðsettar á Klettagörðum og við Ánanaust. Þar er því veitt í gegnum hreinsistöðvar á leið út í Faxaflóa, um 4 km leið til sjávar frá hreinsistöðvunum en þær standa við strönd.

Orkuveita Reykjavíkur á og rekur jafnframt vatns- rafmagns- og hitaveitu og er höfuðborgarsvæðið þungamiðja starfsemi Orkuveitunnar (Ásdís Gísladóttir, 2012). Veitukerfið þjónar þannig sama svæði og um fráveitukerfið rennur, fyrir utan úrkomuvatn, iðnaðarskólþ frá fyrirtækjum, vatn frá daglegri heimilisnotkun s.s. þvotti og sturtuferðum, hitaveituvatn af ofnum og hitakerfum og vatn sem lekur inn í sjálft veitukerfið úr jarðvegi umhverfis lagnir (Orkuveita Reykjavíkur e.d., ii). Í hve miklum mæli það neyslu- og hitaveituvatn sem OR selur skilar sér út í fráveitukerfið er nánar greint með tölfræðilegum aðferðum í kafla 5.2.

Fráveitukerfi Reykjavíkur skiptist nokkurn veginn við Elliðaárnar í einfalt og tvöfalt kerfi. Á mynd 5-1 er skipting fráveitukerfisins sýnd í Reykjavík eftir blandkerfi og tvöföldu kerfi og má þar greina hvernig allt svæðið austan Elliðaáa er tvöfalt kerfi en að mestu blandkerfi að vestanverðu.

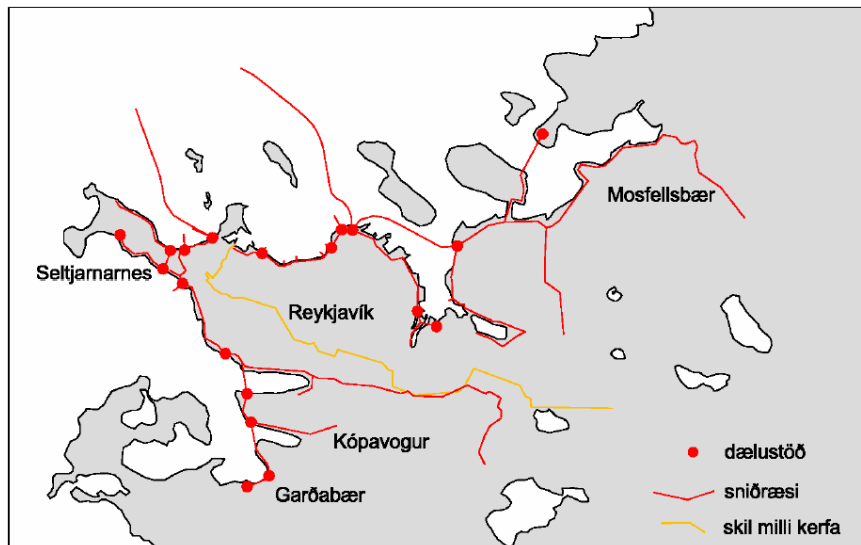


Mynd 5-1: Skipting fráveitukerfisins í Reykjavík í blandkerfi og tvöfalt kerfi (Reynir Sævarsson, 2004)

Í tvöfalda hlutanum rennur ofanvatnið yfirleitt stystu leið til sjávar eða út í læki og ár en einnig hefur verið komið upp nokkrum settjörnum. Í einfalda kerfinu rennur ofanvatnið aftur á móti beint í fráveitukerfið með skólpinu.

Hreinsistöðin við Ánanaust þjónar Sundaveitu sem tekur við frárennsli frá suðurhluta Reykjavíkur, Garðabæ, Kópavogi og Seltjarnarnesi og afkastar 4.000 lítrum á sekúndu en stöðin við Klettagarða tekur við frárennsli frá norðurhluta Reykjavíkur og Mosfellsbæ og afkastar 5.000 lítrum á sekúndu. Gert er ráð fyrir að þessar stöðvar geti annað íbúafjölgun á höfuðborgarsvæðinu að minnsta kosti til ársins 2050 (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. (ii)).

Stöðvarnar tvær þjónusta um 160.000 manns, eða um 55% þjóðarinnar, og fyrirtæki á svæðinu (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. (iii)).



Mynd 5-2: Yfirlit yfir fráveitukerfi höfuðborgarsvæðisins (Reynir Sævarsson, 2004)

Þær línur sem liggja til norðurs á mynd 5-2 og enda úti í sjó eru fráveitulagnirnar frá hreinsistöðvunum við Ánanaust og Klettagarða. Komi til þess að metan eða vetni verði framleitt úr skólpi væri eflaust hagkvæmara að reisa gerjunartanka og uppfærslustöð eða gösunarver á öðrum staðnum þannig að hreinsuðu skólpi verði dælt frá annarri hreinsistöðinni til þeirrar sem stendur við gerjunartanka eða gösunarstöð og uppfærslustöð.

Í hreinsistöðvunum við Ánanaust og Klettagarða er fastur úrgangur hreinsaður úr fráveituvatni og fer föngun úrgangs fram í hreinsikerfum sem er í meginatriðum:

- 1) Grjótgildra.
- 2) Aðliggjandi síugangar.
- 3) Síur.
- 4) Fráliggjandi síugangar.
- 5) Sand- og fituskilja.

Sandur, sem fangaður er í hreinsistöð frá grjótagildru og síugöngum, er fluttur úr hreinsistöð með dælubílum. Fitu frá sand- og fituskilju er safnað í fituþró og hún flutt með dælubíl í móttökustöð (Línuhönnun hf., 2008). Víða erlendis er þessari fitu blandað við þá seyru sem notuð er til metanframleiðslu til að auka framleiðsluna. Eins og fram hefur komið er þetta einungis fyrsta stigs hreinsun á skólpi, þ.e. einungis vélræn hreinsun, ekki lífræn. Annars stigs hreinsun kallar á mikla orku, vinnu og landrymi en gert hefur verið ráð fyrir því við hönnun hreinsimannvirkja að síðar megi bæta við annars stigs hreinsun (Reynir Sævarsson, 2004).

### 5.1.1 Magn efna í skólpi og rennsli

Stöðvarnar eru langt frá því að vera komnar að þolmörkum en eins og kemur fram í kafla 5.1 geta þær afkastað samtals 9.000 lítrum á sekúndu og eiga að geta annað íbúafjölgun til 2050. Verkís sér um eftirlit með skólphreinsistöðvum OR og fylgist m.a. með rennsli um þær.

Tafla 5-1: Meðaldagrennsli árið 2010 um hreinsistöðvar OR ásamt heildarpersónueiningum (Birgir Tómas Arnar og Snorri Þórisson, 2011)

Stöð	Dagmeðalrennsli l/sek	Heildarpersónueiningar PE
<b>Klettagarðar</b>	1.113	234.851
<b>Ánanaust</b>	992	232.231

Heildarpersónueiningar í töflu 5-1 eru persónueiningar af lífrænu efni (Birgir Tómas Arnar og Snorri Þórisson, 2011). Ein persónueining er það magn af lífrænu efni sem að jafnaði kemur frá einum manni á sólarhring (Reynir Sævarsson, 2004). Miðað er við BOD/COD stuðul 0,425 sem er fenginn úr yfirliti mælinga í hreinsistöðinni í Klettagörðum yfir árið 2009 og að magn lífrænna efna sem hver einstaklingur losar frá sér sé 60 g BOD/d sbr. reglugerð 798/1999 (Birgir Tómas Arnar og Snorri Þórisson, 2011). COD er efnafræðileg súrefnisþörf (e. chemical oxygen demand) og er próf sem notað er til þess að meta magn lífrænna efna í vatni. BOD kallast á íslensku líffræðileg súrefnisþörf (e. biochemical oxygen demand) og er mælikvarði á þynningarhlutfall skólps en það segir einnig til um hve sterkt skólpið er, þ.e. hvert hlutfallið er á milli skólps og hreins vatns (Reynir Sævarsson, 2004).

Eitt helsta einkenni skólps á höfuðborgarsvæðinu er hið gríðarlega vatnsmagn. Íslendingar nota mikið af fersku vatni, kaldavatnsnotkun hér er svipuð eða ögn meiri en á hinum Norðurlöndunum (Ingibjörg E. Björnsdóttir, 2004) og hús eru hituð með heitu vatni sem síðan fer í fráveitukerfið en víðast hvar erlendis eru hús hituð með rafmagni (Reynir Sævarsson, 2004). Í Reykjavík notar hver íbúi um 155.000 lítra af köldu vatni á ári sem gerir um 425 lítra á dag (Ingibjörg E. Björnsdóttir, 2004) en hér er þó um alla vatnsnotkun að ræða og því má rekja hluta þessarar notkunar til iðnaðar, notkun á köldu vatni er greind nánar í kafla 5.2. Kaldavatnsnotkun þykir mikil í Bandaríkjunum en þó er hún minni þar en á Íslandi. Í Bandaríkjunum er vatnsnotkun um 350 – 400 lítrar á dag sem skilar sér í BOD gildum upp á 200 – 250 mg/l (Mara, D., 2003).

Samkvæmt mælingum á blandsýnum úr hreinsuðu fráveituvatni árið 2010 telst fráveituvatnið á höfuðborgarsvæðinu til veiks fráveituvatns ef horft er til gilda sem gefin voru í töflu 3.1.

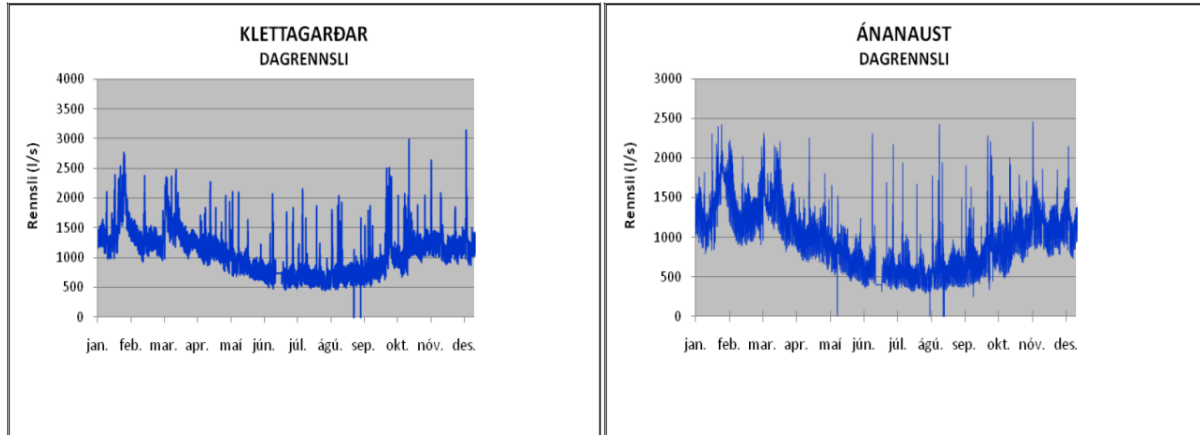
Tafla 5-2: Meðaltöl mælinga á blandsýnum á hreinsuðu fráveituvatni 2010. Svifagnir, fita, COD, TP og TN. Gildi í mg/l (Birgir Tómas Arnar og Snorri Þórisson, 2011)

Stöð	Svifagnir mg/l	Fita mg/l	COD mg/l	TP mg/l	TN mg/l
<b>Klettagarðar</b>	112,3 (22,8)	15,7 (8,8)	387 (114,6)	2,3 (0,3)	13,6 (4,3)
<b>Ánanaust</b>	123,9 (49,0)	15,5 (7,1)	383 (159,3)	3,2 (1,1)	17,7 (4,7)

Í töflu 5-2 er TP er heildarfosfór og TN heildarköfnunarefni. Miðað við mæld COD gildi í töflu 5-2 og áðurgefið BOD/COD hlutfall gefur þetta BOD gildi upp á 164,5 mg/l í Klettagörðum og 162,8 mg/l í Ánanaustum eftir fyrsta stigs hreinsun. Rétt er að vekja athygli á því að þessi COD gildi eru rúmlega tvöfalt hærri en þau meðaltalsgildi sem mældust árið

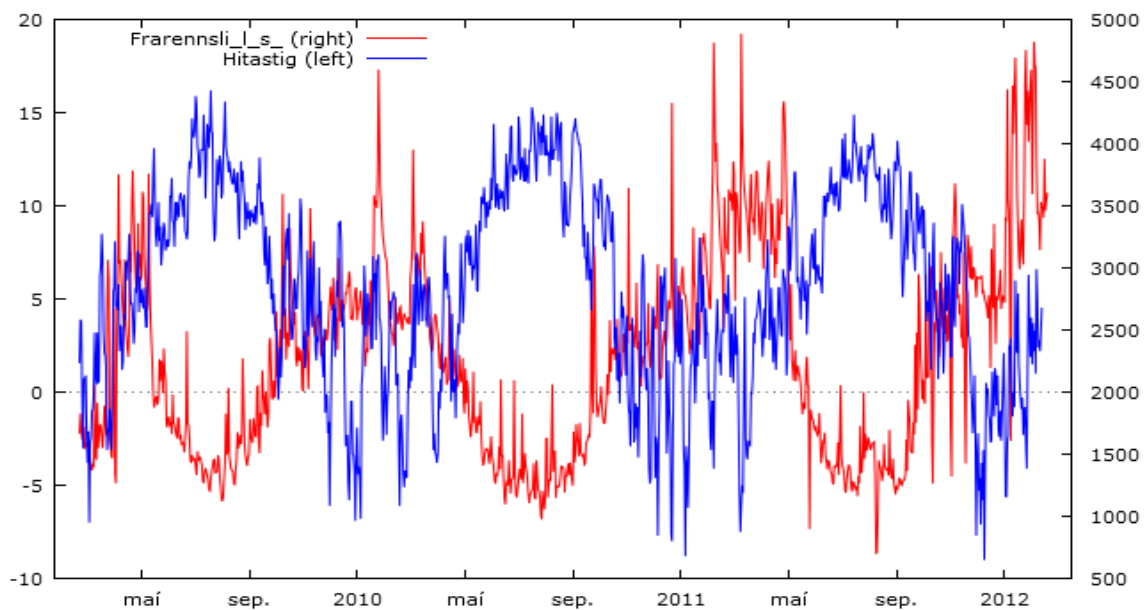
2007 og að sama skapi var meðalrennsli um hreinsistöðvarnar meira þá en 2010 (sjá töflu 5-3).

Bæði verður vart við árstíðarbundnar sveiflur á magni sem rennur um stöðvarnar og dægursveiflur.



Mynd 5-3: Dagrennsli um stöðvarnar við Klettagarða og Ánanaust árið 2010, l/s (Birgir Tómas Arnar og Snorri Þórisson, 2011)

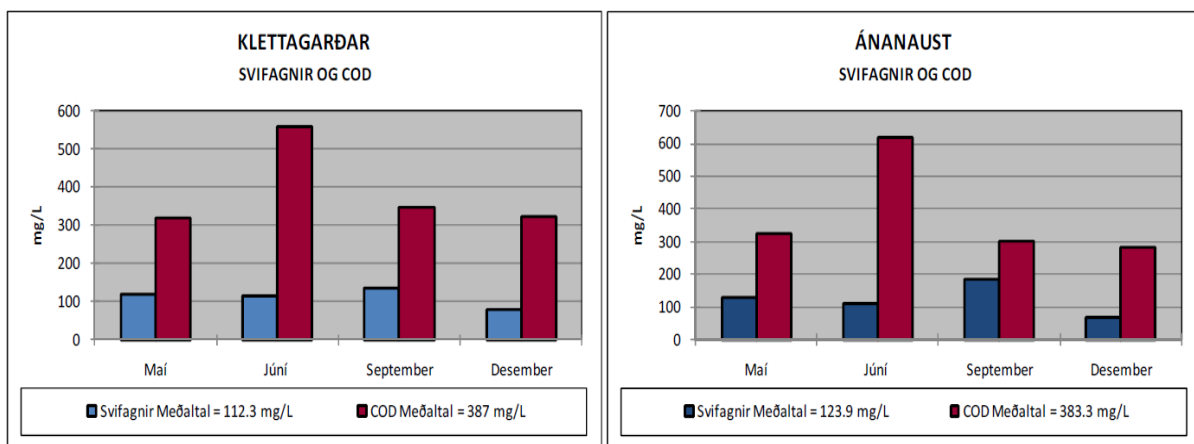
Árstíðarsveiflur ráðast að einhverju leyti af úrkomu og snjóbráð en sveiflur í fráveiturennsli ráðast þó fyrst og fremst af sveiflum í hitastigi sem aftur veldur sveiflum á notkun á heitu vatni. Magn lífræns efnis sem hentar til metanframleiðslu ætti því að vera nokkuð stöðugt yfir árið en er þó mishátt hlutfall þess skólps sem rennur um hreinsistöðvar OR. Raunar má glögg sjá hvernig sveiflur í hitastigi og fráveiturennsli sveiflast árstíðabundið í öfugum takti hvort við annað.



Mynd 5-4: Lofthitastig á höfuðborgarsvæðinu (vinstri ás) og sólarhringsmeðaltalsrennsli um fráveitustöðvar OR á höfuðborgarsvæðinu í lítrum á sekúndu (hægri ás). Tímabilið 22/2/2009 – 18/2/2012

Mynd 5-4 er unnin í Gretl forritinu úr gögnum frá Orkuveitu Reykjavíkur og Veðurstofu Íslands og sýnir sama rennsli og mynd 5-3 nema hér hefur rennsli um stöðvarnar tvær verið lagt saman en ekki aðgreint um Ánanaust annars vegar og Klettagarða hins vegar eins og á mynd 5-3. Á mynd 5-4 sést greinilega að hitastig og rennsli um fráveitukerfi höfuðborgarsvæðisins sveiflast í öfugum takti hvort við annað yfir árið en nánar verður rýnt í notkun á heitu og köldu vatni og samhengi þess við rennsli um fráveitustöðvar og sveiflur í hitastigi og úrkomu í kafla 5.2.

COD gildin sveiflast í öfugu hlutfalli við rennsli um stöðvarnar, þ.e. COD gildin hækka þegar rennsli um stöðvarnar minnkar. Það veitir vísbendingar um að magn lífrænna efna í skólpi sé nokkuð stöðugt en sveiflur í rennsli ráðast af úrkomu og notkun á hitaveitu sem eykst með lægra hitastigi að vetrum sem aftur veldur auknu vatnsstreymi um fráveitukerfið. Mynd 5-5 gefur vísbendingar um þessar sveiflur í styrkleika COD gilda eftir árstíðum.



Mynd 5-5: Niðurstöður mælinga á svifögnum og lífrænu efni (COD) í Klettagörðum og Ánanaustum fyrir árið 2010 (Birgir Tómas Arnar og Snorri Þórisson, 2011)

Styrkleiki efna í skólpi nær þó aldrei að fara hærra en í miðlungs flokk.

BOD gildi eru ekki gefin upp í yfirlitsskýrslum yfir sýnatöku og mælingar í skólphreinsistöðvunum á höfuðborgarsvæðinu en notast er við stuðulinn 0,425 sem þýðir að hægt er að margfalda COD gildin með þeim stuðli til að fá áætluð BOD gildi.

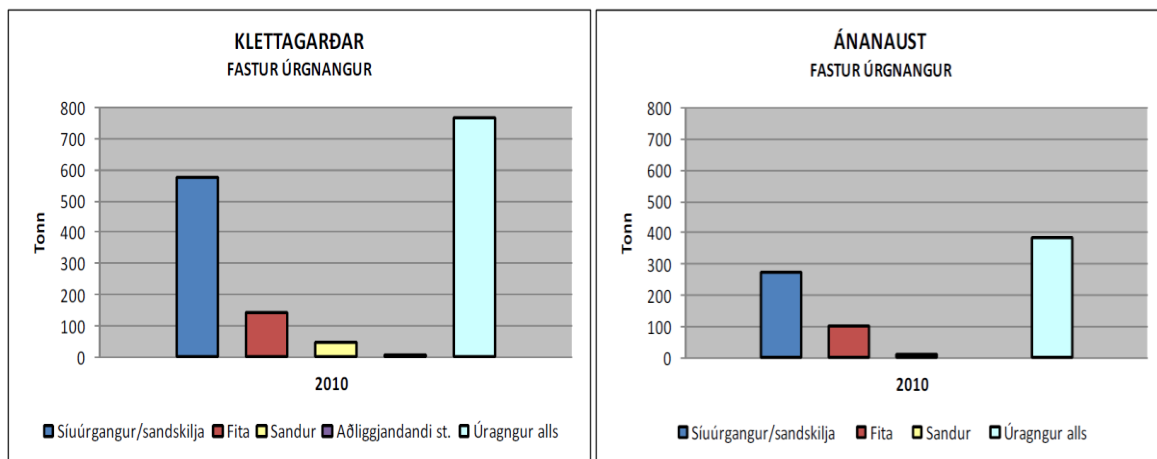
Út frá gildum sem gefin eru í töflu 5.2 er hægt að áætla hve mikið af þurrefnum hægt væri að ná til gerjunar úr skólpi á höfuðborgarsvæðinu. Við útreikninga á magni þurrefna í seyru (e. sludge solids) er horft bæði til svifagna og BOD gilda sem fást með margföldun á COD gildum. Bæði svifagnir og COD gildi eru gefin í töflu 5.2 og verður stuðst við þau gildi í þessum útreikningum.

Magn þurrefna í seyru er reiknað samkvæmt eftirfarandi aðferð (Hammer, M.J. og Hammer Jr., M.J., 2007). Þurrefni úr fyrsta stigs hreinsun er reiknað sem  $W_p = f * SS$  þar sem  $W_p$  eru þurrefni,  $f$  er hlutfall þurrefna sem nást úr fyrsta stigs hreinsun, 50%, og  $SS$  eru þurrefni í óunnu skólpi (e. suspended solids in unsettled wastewater). Þurrefni úr annars stigs hreinsun eru reiknuð sem  $W_s = K * BOD$  þar sem  $W_s$  eru þurrefni,  $K$  er hlutfall þurrefna úr

hreinsuninni og liggur á bilinu 0,3 – 0,5, hér 0,4, og *BOD* eru *BOD* gildi úr fyrsta stigs hreinsun

Tafla 5.2 gefur flæði um stöðvarnar við Klettagarða og Ánanaust upp á samtals 2.105 lítra á sekúndu og magn svifefna upp á samtals 236 mg/l. Það gefur  $W_p = 3.900$  tonn á ári. *BOD* gildi eru ekki mæld en þau eru áætluð sem  $0,425 \cdot \text{COD}$  samkvæmt áður gefnum stuðli í töflu 5-1 þar sem *COD* gildin eru einnig gefin og voru samtals 770 mg/l árið 2010. Því er  $W_s = 4.400$  á ári. Magn þurrefna í skólpi á höfuðborgarsvæðinu er því reiknað með  $W_{ps} = W_p + W_s$  og var í heildina um 8.400 tonn árið 2010. Miðað við að tveggja þrepa hreinsun nái um 90% þurrefna úr skólpi má áætla að magn þurrefna sem hægt væri að nýta til súrefnisfirtrar gerjunar hafi verið 7.500 tonn árið 2010.

Fita var fönnguð í fitugildrum og síum ásamt öðrum úrgangi eins og áður segir. Mynd 5-6 sýnir magn af föstum úrgangi sem fangaður var úr hreinsistöðvum OR árið 2010 og er fita þar á meðal

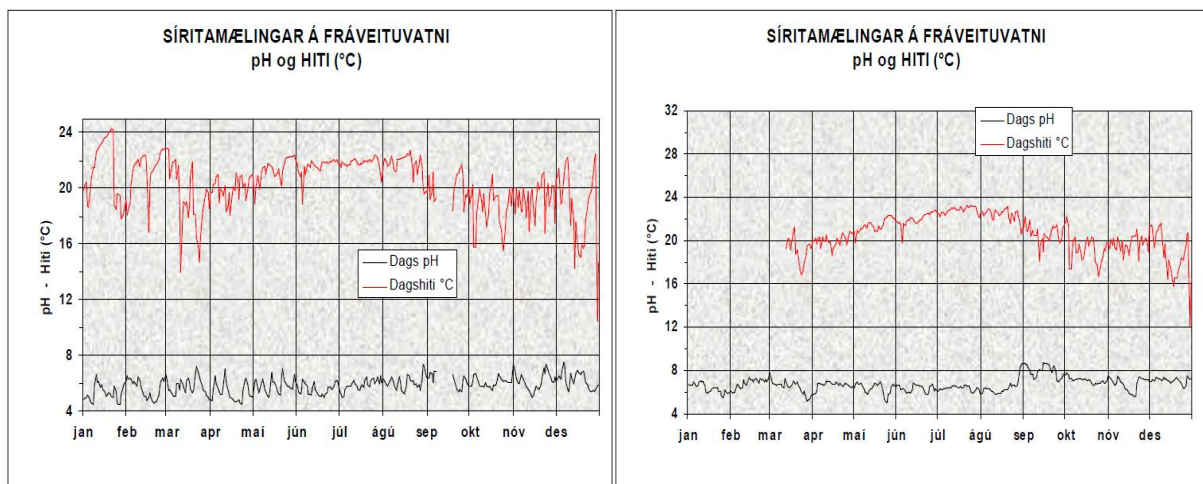


Mynd 5-6: Magn af föstum úrgangi fönnguðum í Klettagörðum og Ánanaustum 2010 (Birgir Tómas Arnar og Snorri Þórisson, 2011)

Af mynd 5-6 má greina að fangað magn fitu úr fitugildrum árið 2010 var 145 tonn frá Klettagörðum og 100,8 tonn frá Ánanaustum eða samtals 245,8 tonn yfir árið.

### 5.1.2 Hitastig og pH gildi frárennslisvatns

Hitastig á frárennslis hefur ekki verið mælt síðan 2007 en það var þó nokkuð stöðugt það ár fyrir utan sveiflur sem fylgja sveiflum í rennslis. Þá var um að ræða kólnun á skólpi samfara mikilli úrkomu og leysingum. Dagmeðaltal hitastigs fráveituvatns ásamt pH gildum í bæði Klettagörðum og Ánanaustum er sýnt fyrir árið 2007 á mynd 5-7.



Mynd 5-7: Dagmeðaltal hitastigs og pH gildi fráveituvatns í Klettagörðum (t.v.) og Ánanaustum (t.h.) fyrir árið 2007 (Línuhönnun hf., 2008)

Ástæða þess að það vantar upplýsingar um hita frá fyrri hluta árs 2007 í Ánanaustum er sú að það kom í ljós við kvörðun að hitanemi gaf ekki rétt gildi frá byrjun árs fram í byrjun mars. Þá liggja ekki heldur fyrir rennslismælingar frá þessari stöð fyrir árið 2007 nema fyrir janúar og febrúar en rennslismælir bilaði í byrjun mars vegna flóða og bilunar í stöð vegna eldingar. Þó er hægt að sjá lauslega áætluð meðaltalsgildi á hitastigi, pH gildi og rennsli fyrir þessa stöð árið 2007 og allar tölur liggja fyrir frá Klettagörðum.

Tafla 5-3: Ársgildi skráðra mælinga í Klettagörðum og Ánanaustum fyrir árið 2007 (Línuhönnun hf., 2008)

	Meðalgildi	(staðalfrávik)	Lágmark – hámark	Athugasemd
<b>Klettagörðar</b>				
Dagrennsli (L/sek)	1.338	(443)	666 – 2.773	-
Dags pH	5,8	(0,6)	4,5 – 7,5	-
Dagshiti (°C)	20,4	(1,9)	10,5 – 24,3	-
<b>Ánanaust</b>				
Dagrennsli (L/sek)	1.239	(73)	1.036 – 1.417	jan – feb
Dags pH	6,7	(0,7)	5,1 – 8,7	-
Dagshiti (°C)	20,6	(1,7)	12,1 – 23,3	mars – des

Eins og tafla 5-3 sýnir er rennsli ársins 2007 meira en ársins 2010 en verulega dró úr rennsli um stöðvarnar í kjölfar kreppunnar. Rennsli eykst þó lítillega ár frá ári nú. Ástæðulaust er að ætla annað en að hitastig sé svipað nú og árið 2007.

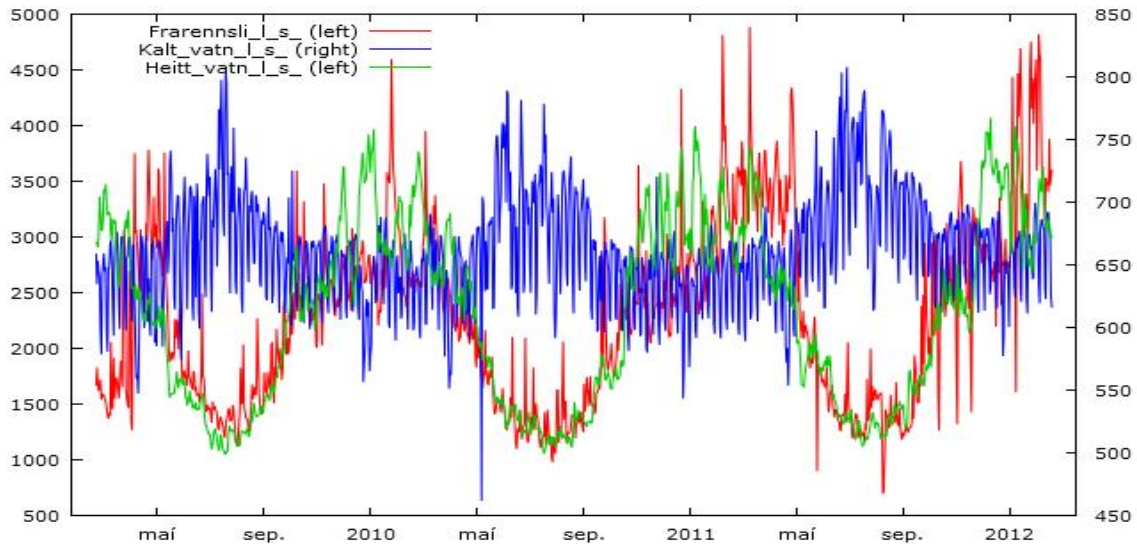
Einnig eru pH gildi við þau mörk sem best henta til lífgasframleiðslu og hitastig er nálægt kjörhitastigi meðal hitakærra örvera (e. mesophilic) en frávikin eru nokkuð víð.



## 5.2 Notkun á heitu og köldu vatni, hitastig, úrkoma og flæði um fráveitustöðvar OR

### 5.2.1 Flæði vatns og frárennsli

Til þess að greina í hvaða hlutföllum fráveituvatn samanstendur af heitu og köldu vatni og úrkomu er gott að byrja á því að teikna upp gröf sem sýna flæði vatns og frárennslis.

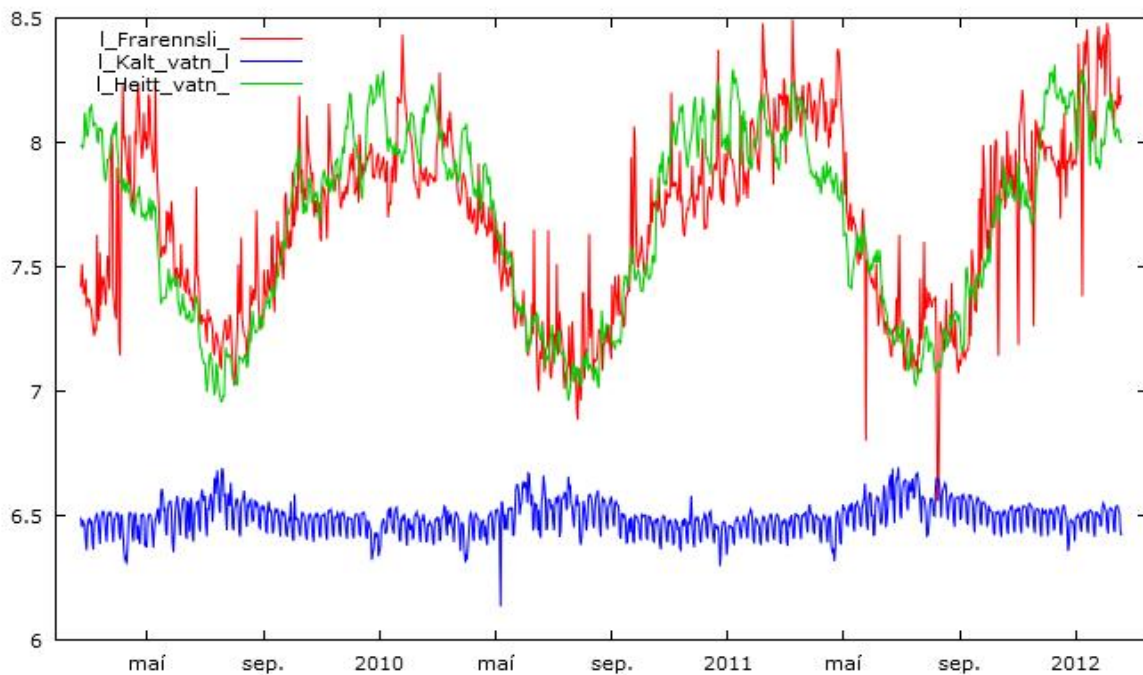


Mynd 5-8: Frárennsli og notkun á heitu vatni (vinstri ás) og notkun á köldu vatni (hægri ás) frá 22.2.2009 – 18.2.2009. Sólarhringsmeðaltal í lítrum á sekúndu um veitusvæði Orkuveitu Reykjavíkur

Mynd 5-8 er unnin í Gretl forritinu úr rennslisgögnum frá Orkuveitu Reykjavíkur. Gildin á hægri ás gilda fyrir kalda vatnið (bláu línuna) og eru mun lægri en þau á vinstri ás þar sem mun minna er notað af köldu vatni en heitu. Gildin á vinstri ás gilda fyrir heitt vatn og rennsli um fráveitukerfi. Einnig má greina nokkuð sterkar og tíðar sveiflur í notkun á köldu vatni en það eru vikusveiflur. Notkun á köldu vatni dettur niður um 10% um helgar og má geta sér þess til að það stafi af því að notendur á borð við átöppunarverksmiðjur og annan iðnað starfi lítt um helgar. Þessar sveiflur skila sér þó ekki beint út í fráveitukerfið að því er virðist. Annað sem þarf einnig að hafa í huga á mynd 5-8 og mynd 5-4 er að frárennsli virðist vera nokkuð lágt í febrúar 2009 og aukast síðan skyndilega í mars en þetta stafar af því að mælingar vantar frá Ánanaustum fyrstu tvo mánuði þeirra mælinga sem hér eru til skoðunar.

Ljóst er að ekki rennur allt það vatn, sem selt er í gegnum veitukerfi OR, í fráveitukerfi OR þar sem samanlögð notkun á heitu og köldu vatni er meiri en það sem flæðir um fráveitukerfi OR. Þó er hægt, út frá þeim tölum sem hér liggja til grundvallar, að finna út um það bil hve stór hluti af því skólpi sem flæðir um fráveitustöðvar OR er kalt vatn, hve stór er heitt vatn til „hefðbundinnar“ neyslu, þ.e. sturtuferða, uppvaskis og annars slíks og síðan hve stór hluti er vegna hitaveitu en sá hluti verður að teljast áhugaverður fyrir þær sakir að tæknilega væri auðvelt að aðskilja það vatn frá skólpi og þyrfti því ekki að „hreinsa“ þann hluta. Það gæti haft mikil áhrif á fjárfestingarkostnað og þar með arðsemi eldsneytisvinnslu úr skólpi en nánar verður farið yfir þá þætti í kafla 7.

Sé tekinn logaritmi af þeim röðum sem hér hafa verið skoðaðar sést betur hve lítið notkun á köldu vatni breytist hlutfallslega yfir árið og hve samrýmdar sveiflur í notkun á heitu vatni og flæði um fráveitukerfi eru.



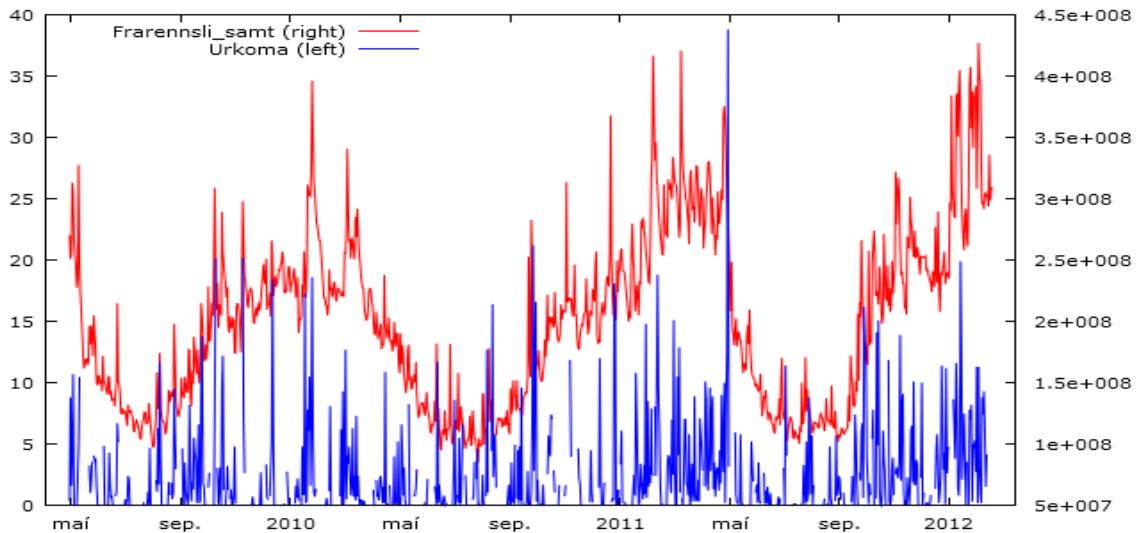
Mynd 5-9: Logaritmi af notkun á heitu og köldu vatni og flæði um fráveitustöðvar OR frá 22.2.2009 – 18.2.2012. Logaritmi af sólarhringsmeðaltölum í lítrum á sekúndu

Mynd 5-9 sýnir greinilega hversu ríkjandi notkun á heitu vatni er í flæði um fráveitustöðvar OR. Enn fremur sést á mynd 5-9 hve notkun á köldu vatni er hlutfallslega stöðug yfir árið.

Vegna þess að árstíðasveiflur í notkun á köldu vatni eru öfugar miðað við sveiflur á rennsli um fráveitustöðvar er ekki hægt að framkvæma hefðbundna aðhvarfsgreiningu til þess að finna út hve mikill hluti af fráveituvatni er kalt vatn en væri slíkt gert kæmi út að aukin notkun á köldu vatni minnkaði rennsli um fráveitustöðvarnar en slíkt er vitaskuld fráleitt. Ástæðan fyrir þessu liggur í því að allt það vatn sem OR selur skilar sér ekki út í fráveitukerfið og verður gerð nánari greining á því í kafla 5.2.2.

Því þarf að finna út að hve miklu leyti sveiflur í rennsli um fráveitustöðvar eru vegna vatnsnotkunar í heild og þar með reikna út hve stór hluti frárennslis er heitt og kalt vatn og hve stór hluti er vegna úrkomu. Það hlutfall er þó breytilegt, bæði eftir árstíðum og öðrum þáttum, því verða þessir útreikningar óvissu háðir.

Ekki reyndist unnt að teikna upp alla þætti á eina mynd, þ.e. hitastig, úrkomu, frárennsli og vatnsneyslu sökum margra mismunandi mælieininga en óljósa fylgni má þó greina ef frárennsli og úrkoma eru skoðuð saman.

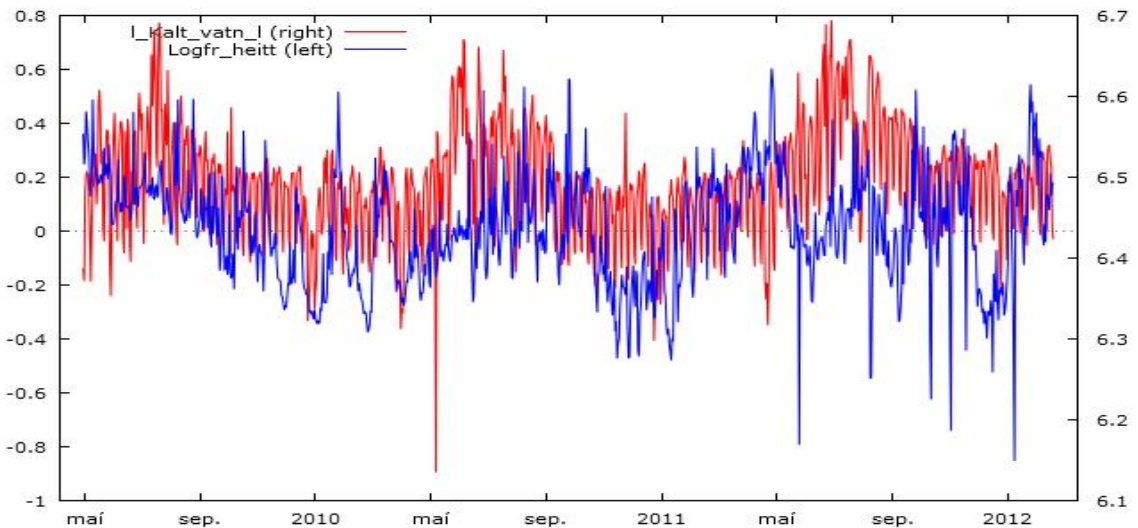


Mynd 5-10: Sólarhringsmeðaltal frárennslis í lítrum á sekúndu (hægri ás) og sólarhringsúrcoma mælt í millimetrum frá 1.5.2009 – 22.2.2012

Af mynd 5-10 má ógreinilega sjá toppa í frárennslis fylgja toppum í úrkomu en nánar verður rýnt í þetta samhengi með aðhvarfsgreiningum í kafla 5.2.2.

Ljóst er að sveiflur í frárennslis ráðast að stærstum hluta af sveiflum í notkun á heitu vatni. Auk þess sýna myndir 5-9 og 5-8 að meðalsólarhringsflæði af heitu vatni í lítrum á sekúndu er á stundum meira en rennslis um fráveitustöðvarnar.

Sé heita vatnið dregið frá frárennslinu, þ.e. talnarunan fyrir heitt vatn dregin frá þeirri fyrir frárennslis er þó hægt að greina að fyrri árstíðasveiflur í frárennslis hverfa og má sjá örla á þeim árstíðasveiflum sem til staðar eru í notkun á köldu vatni, þ.e. flæði eykst yfir sumartímann.



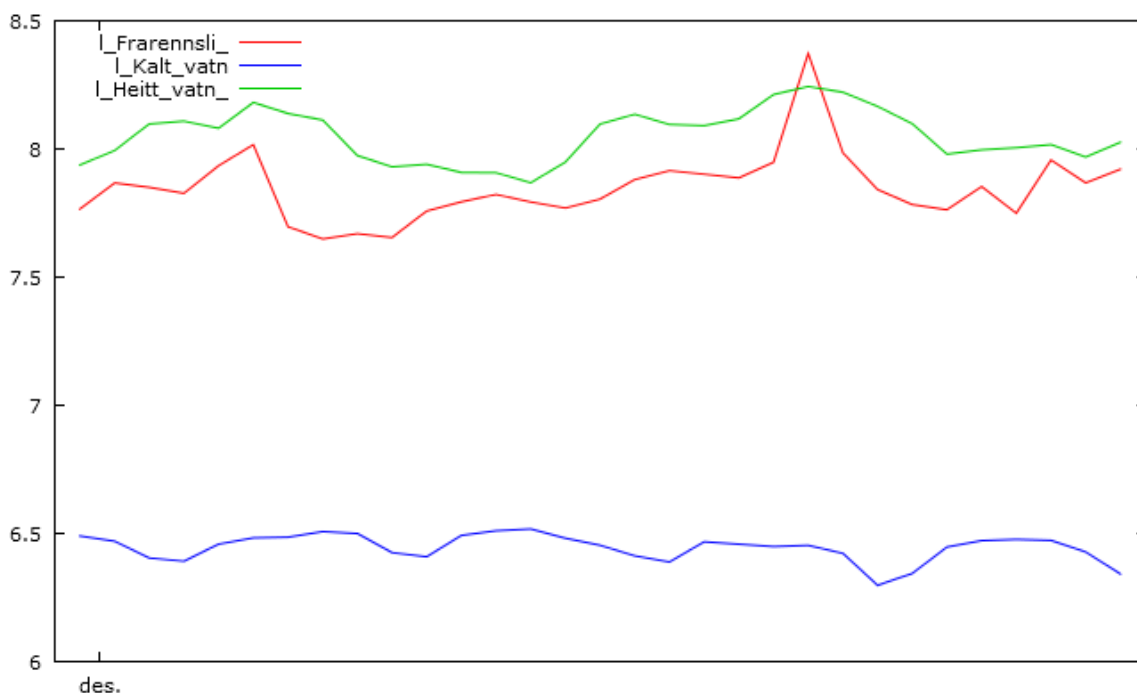
Mynd 5-11: Logaritmi af flæði um fráveitustöðvar OR að frádregnum logaritma af notkun á heitu vatni (vinstri ás) og logaritmi af notkun á köldu vatni (hægri ás) frá 1.5.2009 – 22.2.2012. Logaritmi af sólarhringsmeðaltölum í lítrum á sekúndu

Þar sem meira er selt af heitu vatni á veitusvæði OR en flæðir um fráveitukerfi hennar fást neikvæð gildi í frárennsli á mynd 5-11. Myndin er því á vissan hátt óljós og einungis sett fram til að skýra árstíðarsveiflur í vatnsnotkun og frárennsli.

Það má því draga þá ályktun af mynd 5-11 að sveiflur í fráveiturennsli skýrist að einhverju leyti af sveiflum í notkun á köldu vatni en þó frekar litlu. Hér er tímabilið 1. maí 2009 til 22. febrúar 2012 skoðað en gildi fyrir febrúar, mars og apríl 2009 voru tekin út vegna þess að mælingar frá Ánanaustum vantaði og skekkti það þar með niðurstöður útreikninga.

Þó að greinileg fylgni sé á milli árstíðasveiflna á notkun á vatni og fráveiturennsli er ekki jafnskýr fylgni á milli dægursveiflna.

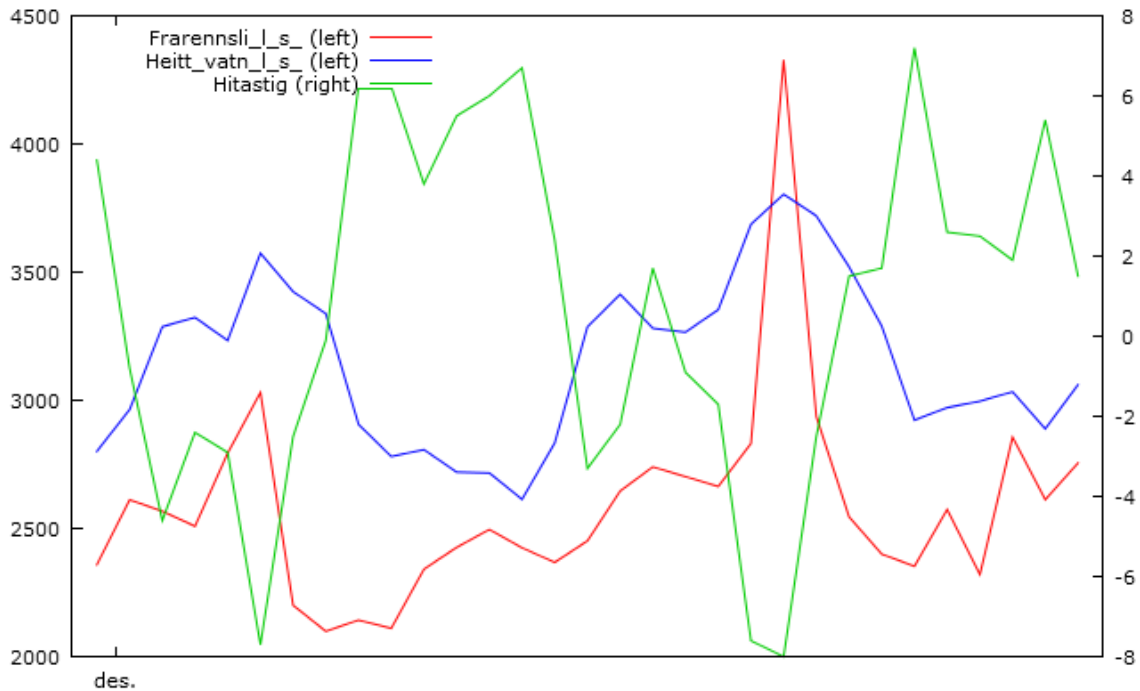
Sé einn mánuður skoðaður sést þetta betur.



Mynd 5-12: Logaritmi af flæði um fráveitustöðvar OR, logaritmi af notkun á heitu og köldu vatni. Logaritmi af lítrum á sekúndu yfir 1 mánaðar tímabil (des. 2011)

Mynd 5-12 sýnir einn mánuð af vatnsnotkun og rennsli um fráveitustöðvar OR. Ekki verður vart við sterkt sambengi á milli sveiflna í notkun milli sólarhringa en þó er sjáanleg fylgni á milli notkunar á heitu vatni og frárennslis.

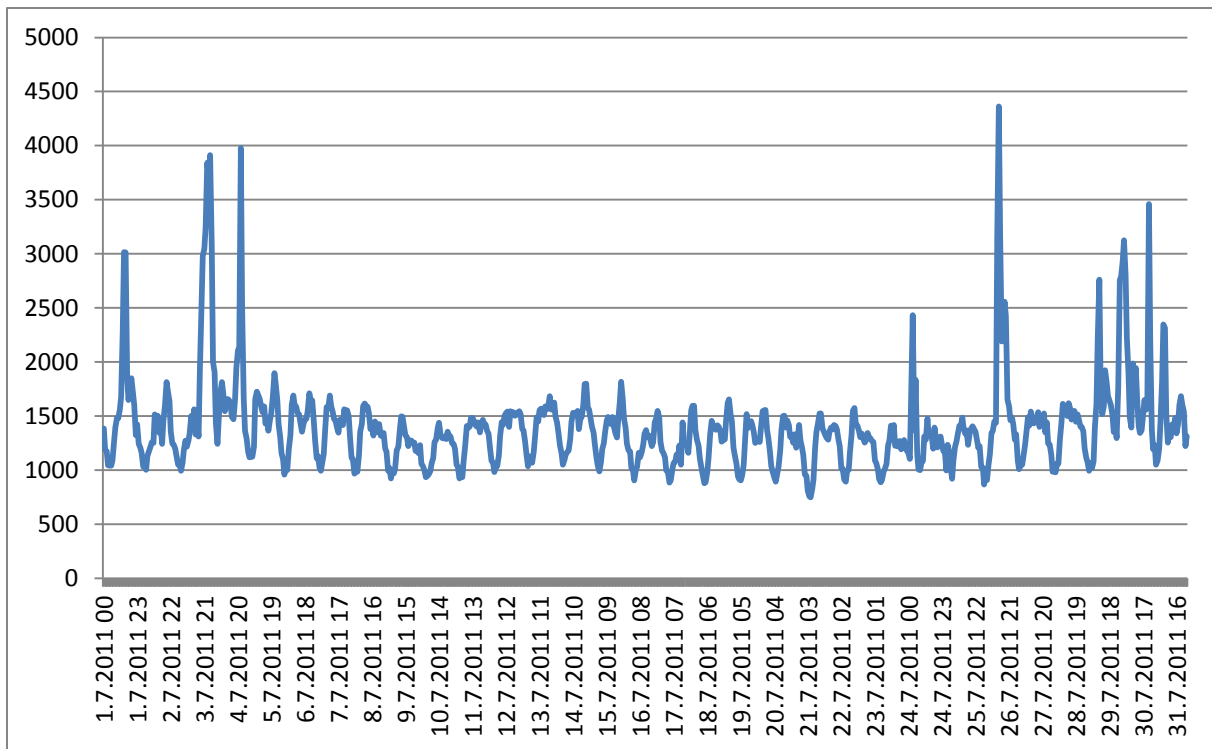
Skýring á því að veikari fylgni virðist vera á milli árstíðasveiflna heldur en sveiflna á milli sólarhringa á vatnsnotkun og flæði um fráveitustöðvarnar gæti legið í eðli gagnanna. Hér er stuðst við meðaltalsflæði á sólarhring í lítrum á sekúndu en ekki uppsafnað flæði og getur munað um hve títt mælingar eru teknar og á hvaða tíma. Á mynd 5-12 má þó greina topp í flæði um fráveitustöðvar og notkun á heitu vatni í seinni hluta mánaðarins og virðist þessi toppur stafa af miklu frosti dagana 21. og 22. desember.



Mynd 5-13: Notkun á heitu vatni og rennsli um fráveitustöðvar OR í lítrum á sekúndu (vinstri ás) ásamt hitastigi í desember 2011 (hægri ás)

Á mynd 5-13 má greina hvernig lækkandi hitastig skilar sér í aukinni notkun á heitu vatni og auknu frárennsli. Auk þess ber til þess að líta að yfir vetrarmánuðina er heitt vatn mun herra hlutfall af því vatni sem rennur um kerfi Orkuveitunnar en kalt. Yfir kaldasta tímamann er heitt vatn um og yfir 80% þess vatns sem Orkuveitan selur en dettur niður í 60% yfir sumarmánuðina. Að meðaltali yfir árið er kalt vatn tæp 25% af vatnssölu OR og heitt vatn rúm 75%.

Til viðbótar er gagnlegt að greina frekar sveiflur í fráveiturennsli yfir sólarhringinn, dægursveiflur. Í þeim gögnum, sem fengust við vinnu þessarar ritsmíðar, var meðaltalsflæði skráð í lítrum á sekúndu um fráveitukerfi OR á klukkutíma fresti. Ekki lágu fyrir nákvæmari gögn yfir framrennsli af köldu og heitu vatni en sólarhringsmeðaltal í lítrum á sekúndu. En út frá slíkum gögnum má þó greina stöðugt rennsli um fráveitukerfið frá því sem kemur til vegna hefðbundinna athafna yfir daginn svo sem sturtuferða og annarrar vatnsnotkunar.

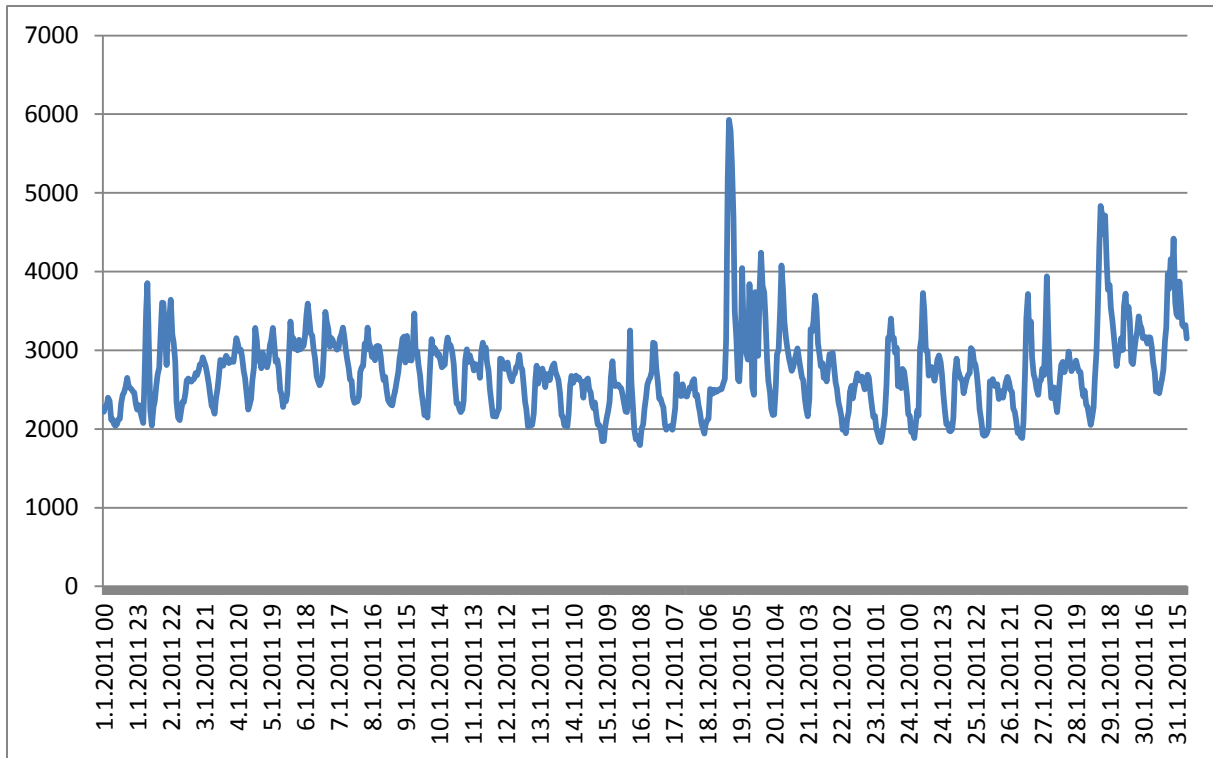


Mynd 5-14: Flæði um fráveitustöðvar OR í júlí 2011. Klukkustundarmeðaltal í litrum á sekúndu

Á mynd 5-14 má greina sveiflur á einum sólarhring í flæði um fráveitustöðvar OR. Sýndar eru sveiflur á einum sólarhring yfir mánaðartímabil, nánar tiltekið í júlí 2011. Gildi á láréttum ás sýna tíma og dagsetningu og sýna tvær síðustu tölurnar tíma sólarhrings. Flæði um þær dettur niður upp úr miðnætti og er í lágmarki til um kl. 6 á morgnana þegar það eykst nokkuð skyndilega. Þeir toppar, sem koma fram á mynd 5-14, virðast að einhverju leyti eiga sér skýringar í úrkomu en venjuleg aðhvarfsgreining gat þó ekki staðfest það. Sólarhringsmeðaltal vatnsnotkunar er ekki áberandi meira þessa daga en aðra daga júlímánaðar og því ekki unnt að greina með vissu hér hvað útskýrir þá. Í raun og veru er venjuleg aðhvarfsgreining með venjulegri aðferð minnstu kvaðrata, VAMK (e. ordinary least squares, OLS), marklaus fyrir svo stutt tímabil með jafn ónákvæmum gögnum og hér er notast við.

Annað, sem vekur eftirtekt í mynd 5-14, er að ekki er að sjá að vikusveiflur í notkun á köldu vatni komi fram í frárennsli um kerfi OR og getur það að einhverju leyti útskýrt ónákvæmar niðurstöður aðhvarfsgreiningar.

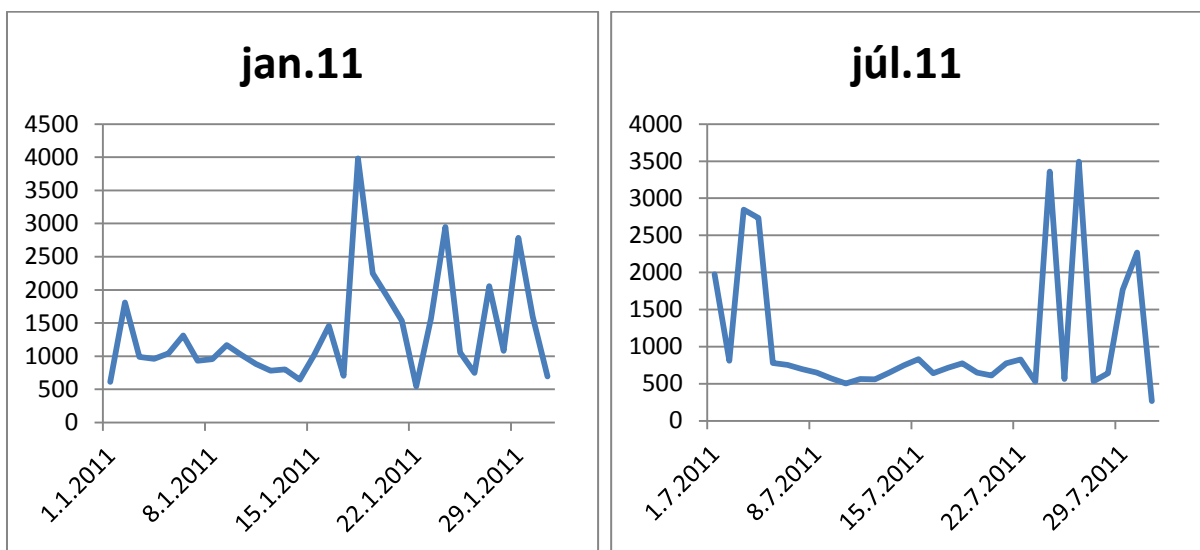
Í júlímánuði er flæði um fráveitukerfi OR með minnsta móti yfir árið en sé janúar skoðaður með sama hætti kemur í ljós hve mikið meira flæði er um fráveitukerfi OR allan sólarhringinn þar sem mun meira er kynt með hitaveituvatni yfir köldustu mánuðina.



Mynd 5-15: Flæði um fráveitustöðvar OR í janúar 2011. Klukkustundarmeðaltal í lítrum á sekúndu

Sé mynd 5-15 borin saman við mynd 5-14 má greina að grunnflæðið um fráveitukerfið er nálægt því tvöfalt meira í janúar en í júlí en aukning frá grunnflæði í hámarksflæði yfir daginn nokkuð svipuð, þó meiri í janúar.

Í janúarmánuði var meðalhámarksflæði 3.486 lítrar á sekúndu og meðallágmarksflæði 2.136 lítrar og meðalmunur á hámarks- og lágmarksflæði um fráveitukerfið því 1.350 lítrar á sekúndu. Í júlímánuði sama ár var meðalhámarksflæði 2.067 lítrar á sekúndu og meðallágmarksflæði 968 lítrar á sekúndu og munurinn því 1.099 lítrar á sekúndu.



Mynd 5-16: Munur á hámarks- og lágmarksflæði yfir einn sólarhring í fráveitukerfi OR í janúar og júlí 2011. Munur á klukkustundarmeðtali í lítrum á sekúndu

Þessi munur á fráveiturennslí yfir sólarhringinn er nokkuð stöðugur yfir árið en þó koma toppar af og til eins og sjá má á mynd 5-16 og verða þeir ekki útskýrðir með þeim gögnum sem hér liggja til grundvallar.

Að meðaltali eykst bæði flæði um fráveitukerfi OR og notkun á heitu vatni um 2.000 lítra á sekúndu yfir kaldasta tímanna og er því ljóst að tæplega 2.000 lítrum á sekúndu meira að meðaltali af hreinu vatni rennur í gegnum fráveitukerfið í janúar en í júlí. Í því ljósi er áhugavert að horfa á aukningu á sölu á heitu vatni frá hlýjasta árstímanum til þess kaldasta en í júlí 2010 var meðalsala á heitu vatni 1.890 lítrar á sekúndu en í desember sama ár var salan komin í 3.834 lítra á sekúndu og hafði því aukist um 1.953 lítra á sekúndu sem er nálægt því tvöföldun. Þar sem sala á köldu vatni dregst saman yfir vetrarmánuðina má ljóst vera að alla aukningu á flæði um fráveitukerfið er hægt að rekja til aukinnar sölu á heitu vatni.

### **5.2.2 Áhrif vatnsnotkunar og úrkomu á fráveiturennslí, aðhvarfsgreiningar**

Það má ætla af myndum 5-8 og 5-9 að raðirnar sem hér um ræðir séu ekki sístæðar (e. stationary) þar sem meðaltal breytist árstíðabundið en út frá þessum myndum má áætla að þær séu samþættar (e. cointegrated) þar sem jafnvægi virðist vera á milli flæðis um fráveitukerfi OR og vatns- og hitaveitukerfi OR. Ef raðirnar eru allar sístæðar er óhætt að notast við venjulega aðferð minnstu kvaðrata við aðhvarfsgreiningu en séu þær ekki sístæðar en samþættar er einnig óhætt að nota VAMK. Til að kanna hvort sú sé raunin er framkvæmt Engle – Granger próf á frárennslí og notkun á heitu og köldu vatni.

Í Engle – Granger prófi eru framkvæmd sístæðniþróf á hverri röð fyrir sig en einnig er keyrð VAMK aðhvarfsgreining og sístæðniþróf keyrt á afgangslíði úr greiningunni. Séu afgangslíðir sístæðir er það vísbending um að raðirnar séu samþættar. Prófið var framkvæmt í Gretl forritinu og má sjá útprentanir úr prófinu í viðauka E.

$H_0$  tilgátan í Engle – Granger prófinu er sú að hver röð um sig sé ekki sístæð og einnig að afgangslíðir af venjulegri aðhvarfsgreiningu séu ekki sístæðir. Séu þeir sístæðir er það vísbending um að raðirnar séu samþættar. Tafir (e. lag) í prófinu eru 7.

Í Engle – Granger prófinu eru framkvæmd 4 einingarrótarþróf og ein aðhvarfsgreining. Þrjú fyrstu einingarrótarþrófin eru próf á raðirnar fyrir frárennslí og heitt og kalt vatn og sé P-gildí hærra en 0,05 er ekki hægt að hafna tilgátunni við 95% og röðin því líklega ósístæð. P-gildin fyrir frárennslí og heitt vatn reyndust hærri en 0,05 og þær raðir því að öllum líkindum ósístæðar. Hins vegar var p-gildi fyrir kalt vatn lægra en 0,05 og því hægt að hafna tilgátunni og þar með álykta að röðin sé sístæð.

Í skrefi fjögur í Engle – Granger prófinu (Step 4) er venjuleg aðhvarfsgreining (VAMK) á frárennslí þar sem heitt og kalt vatn eru skýristærðir. Þar stingur í augu að stuðullinn fyrir kalt vatn skuli vera neikvæð stærð sem gefur til kynna að aukin vatnsnotkun dragi úr flæði um fráveitukerfið en slíkt er fráleitt. P-gildi þess stuðuls er hins vegar hærra en 0,05 og hann því ekki marktækur við 95% öryggismörk. Fleiri aðhvarfsgreiningar verða gerðar síðar.



Síðasta einingarrótarprófið, sem framkvæmt er í Engle – Granger prófinu, er einingarrótarpróf á afgangslíði (uhat) úr aðhvarfsgreiningunni í skrefi fjögur. P-gildið úr því prófi er lægra en 0,05 sem segir okkur að afgangslíðir séu sístæðir, þ.e. við höfnum tilgátunni. Það er vísbending um að raðirnar frárennsli og heitt og kalt vatn séu samþættar ásamt því að raðirnar, bæði fyrir frárennsli og heitt vatn, virðast ósístæðar. Því er hægt notast við VAMK aðhvarfsgreiningu án þess að delluadhvörf (e. spurious regression) séu vandamál en delluadhvörf koma upp þegar óskyldar raðir virðast hafa áhrif hver á aðra samkvæmt tölfræðiprófunum.

Til að aðgreina kalt vatn, heitt vatn og úrkomu í frárennsli með aðhvarfsgreiningu þarf að framkvæma nokkrar slíkar. Í þeirri fyrstu er búið að leggja saman notkun á heitu og köldu vatni og er sú röð notuð sem skýristærð ásamt úrkomu.

*Tafla 5-4: Venjuleg aðhvarfsgreining á flæði um fráveitustöðvar OR. Skýristærðir eru notkun á heitu og köldu vatni í lítrum á sekúndu og úrkoma í millimetrum á sólarhring. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012*

Model: OLS, using observations 2009/05/01-2012/02/18 (T = 720)

Missing or incomplete observations dropped: 304

Dependent variable: Frarennsl\_1\_s\_

	<i>Coefficient</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t-ratio</i>	<i>p-value</i>	
const	-116.627	76.9766	-1.5151	0.13019	
Vatn_samtals_1_	0.808141	0.0251736	32.1027	<0.00001	***
Úrkoma	37.4508	4.66774	8.0233	<0.00001	***
Mean dependent var	2404.580	S.D. dependent var		822.9666	
Sum squared resid	1.84e+08	S.E. of regression		506.6365	
R-squared	0.622064	Adjusted R-squared		0.621009	
F(2, 717)	590.0721	P-value(F)		3.2e-152	
Log-likelihood	-5504.144	Akaike criterion		11014.29	
Schwarz criterion	11028.03	Hannan-Quinn		11019.59	

Það fyrsta sem stingur í augu í töflu 5-5 er að fastinn (const) skuli vera neikvæð stærð en það gefur til kynna að sé engin notkun á vatni og engin úrkoma sé neikvætt rennsli um fráveitukerfið. Auk þess er fastinn ekki tölfræðilega marktækur við 95% öryggismörk þar sem p-gildið er hærra en 0,05. Það útskýrist þó af því að meira er neytt af vatni en skilar sér út í fráveitukerfið eins og áður hefur komið fram. Það sem þessi aðhvarfsgreining sýnir enn fremur er að úrkoma upp á 1 millimetra á sólarhring skili sér út í fráveitukerfið sem aukning upp á 37,4 lítra á sekúndu og að aukning á vatnsnotkun upp á 1 lítra á sekúndu auki flæði um fráveitukerfið um 0,8 lítra á sekúndu. Mjög lág p-gildi við skýristærðirnar sýna að stuðlarnir eru marktækir við 95% öryggismörk og útskýringarmáttur (R-squared) upp á 62,2% gefur vísbendingar um gæði aðhvarfsgreiningarinnar. Varast ber þó að taka útskýringarmátt of alvarlega í þess háttar greiningum en hann, ásamt öðrum stærðum, gefur þó vissa vísbendingu um gæði greiningarinnar. Grunsamlega hár útskýringarmáttur þykir gefa vísbendingu um

delluaðhvörf (Wooldridge, 2009) en þar sem flæði um fráveitukerfi er bein afleiðing vatnsnotkunar má búast við háum útskýringarmætti.

Samkvæmt töflu 5-5 rennur ekki allt það vatn, bæði heitt og kalt, sem selt er út í gegnum fráveitukerfið en við þessu má búast þar sem vatnsnotkun er meiri í þeim gögnum sem hér eru til grundvallar en flæði um fráveitukerfið. Þessi niðurstaða þýðir m.ö.o. ekki að rúm 80% fráveituvatns eigi rætur sínar að rekja til vatnssölu heldur flæðir meira fram af vatni en um fráveitukerfið þar sem hluti vatnsins fer eitthvað annað. Því má túlka þessa niðurstöðu þannig að fyrir hvern vatnslítra sem seldur er á sekúndu fara 0,8 lítrar í fráveitukerfið og 0,2 lítrar eitthvað annað þar sem aukning í vatnsnotkun um 1 lítra á sekúndu þýðir aukningu í flæði um fráveitukerfið um 0,8 lítra á sekúndu.

Eins og áður hefur komið fram eru sveiflur í notkun á köldu vatni öfugar við sveiflur á frárennsli og notkun á heitu vatni. Það gerir það að verkum að venjuleg aðhvarfsgreining á frárennsli með kalt vatn sem skýristærð er marklaus en til glöggvunar er þó fróðlegt að gera aðhvarfsgreiningu á frárennsli með heitt vatn og úrkoma sem skýristærðir og bera þá aðhvarfsgreiningu saman við þá sem sýnd er í töflu 5-5.

Tafla 5-5: Venjuleg aðhvarfsgreining á flæði um fráveitustöðvar OR. Skýristærðir eru notkun á heitu vatni í lítrum á sekúndu og úrkoma í millimetrum á sólarhring. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012

Model: OLS, using observations 2009/05/01-2012/02/18 (T = 720)

Missing or incomplete observations dropped: 304

Dependent variable: Frarensli\_1\_s\_

	<i>Coefficient</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t-ratio</i>	<i>p-value</i>	
const	450.272	60.0868	7.4937	<0.00001	***
Heitt_vatn_1_s_	0.793909	0.0246048	32.2664	<0.00001	***
Úrkoma	37.0929	4.655	7.9684	<0.00001	***
Mean dependent var	2404.580	S.D. dependent var		822.9666	
Sum squared resid	1.83e+08	S.E. of regression		505.1160	
R-squared	0.624329	Adjusted R-squared		0.623281	
F(2, 717)	595.7913	P-value(F)		3.7e-153	
Log-likelihood	-5501.980	Akaike criterion		11009.96	
Schwarz criterion	11023.70	Hannan-Quinn		11015.26	

Aðhvarfsgreiningin í töflu 5-6 er í raun sú sama og í töflu 5-5 nema nú er kalt vatn ekki lengur inni sem hluti af skýristærð. Athygli vekur að fastinn er nú orðinn jákvæð stærð og gefur til kynna flæði upp á 450,3 lítra á sekúndu þegar ekkert heitt vatn rennur um fráveitukerfið og engin úrkoma er til staðar. Auk þess hafa gæði fastans aukist, þ.e. p-gildi hefur lækkað, t-gildi hækkað að tölugildi og staðalfrávik lækkað.

Til nánari aðgreiningar var gerð tilraun með að draga notkun á bæði heitu og köldu vatni frá frárennsli og keyra aðhvarfsgreiningu á þær tvær raðir.

Fyrri aðhvarfsgreiningin var keyrð á frárennsli að frádreginni notkun á köldu vatni og voru notkun á heitu vatni ásamt úrkomu skýristærðir.

Tafla 5-6: Venjuleg aðhvarfsgreining á frárennsli að frádreginni notkun á köldu vatni í lítrum á sekúndu. Skýristærðir eru notkun á heitu vatni og úrkoma. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012

Model: OLS, using observations 2009/05/01-2012/02/18 (T = 720)  
Missing or incomplete observations dropped: 304  
Dependent variable: Fra\_kalt

	<i>Coefficient</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t-ratio</i>	<i>p-value</i>	
const	-258.294	60.3385	-4.2807	0.00002	***
Úrkoma	37.4585	4.6745	8.0134	<0.00001	***
Heitt_vatn_1_s_	0.814661	0.0247079	32.9717	<0.00001	***
Mean dependent var	1745.339	S.D. dependent var		837.0435	
Sum squared resid	1.84e+08	S.E. of regression		507.2318	
R-squared	0.633809	Adjusted R-squared		0.632788	
F(2, 717)	620.4985	P-value(F)		3.9e-157	
Log-likelihood	-5504.990	Akaike criterion		11015.98	
Schwarz criterion	11029.72	Hannan-Quinn		11021.28	

Niðurstaða aðhvarfsgreiningar í töflu 5-7 er keimlík þeirri í töflu 5-5 nema fastinn er mun hærri stærð. Gæði greiningarinnar eru í öllum meginatriðum þau sömu og þau í töflu 5-5 og stuðull við bæði úrkomu og vatnsnotkun eins ásamt p-gildum og útskýringarmætti greiningarinnar. Eftir að kalt vatn hafði verið dregið frá frárennsli og sama aðhvarfsgreining keyrð og í töflu 5-6 jukust gæði greiningarinnar eins og sjá má á hærri t-gildum við stuðla fyrir úrkomu og heitt vatn í töflu 5-5 sem og útskýringarmætti. Sé hins vegar notkun á heitu vatni dregin frá frárennsli og aðhvarfsgreining keyrð á þá röð með úrkomu og notkun á köldu vatni sem skýristærðir verður niðurstaðan ekki jafn skýr.

Tafla 5-7: Venjuleg aðhvarfsgreining á frárennsli að frádreginni notkun á heitu vatni í lítrum á sekúndu. Skýristærðir eru notkun á köldu vatni og úrkoma. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012

Model: OLS, using observations 2009/05/01-2012/02/18 (T = 720)  
Missing or incomplete observations dropped: 304  
Dependent variable: Fra\_heitt

	<i>Coefficient</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t-ratio</i>	<i>p-value</i>	
const	-918.222	334.666	-2.7437	0.00623	***
Kalt_vatn_1_s_	1.36601	0.50438	2.7083	0.00692	***
Úrkoma	33.2216	4.83175	6.8757	<0.00001	***
Mean dependent var	79.15282	S.D. dependent var		544.4381	
Sum squared resid	1.99e+08	S.E. of regression		526.5656	
R-squared	0.067179	Adjusted R-squared		0.064577	
F(2, 717)	25.81818	P-value(F)		1.49e-11	

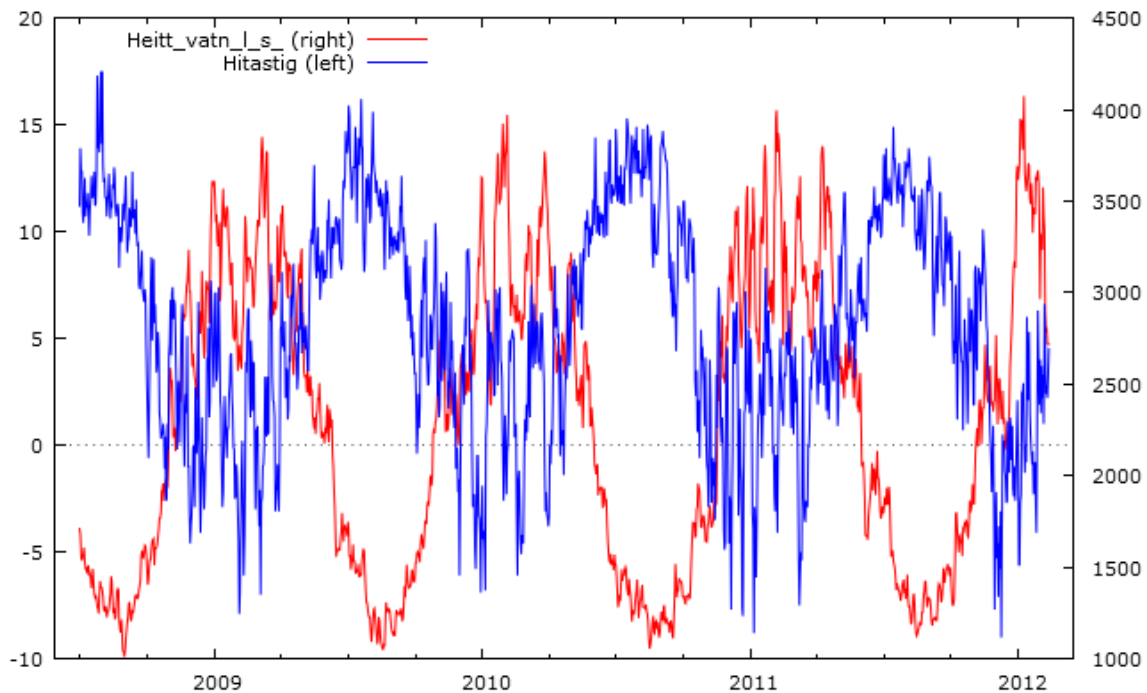
Hér kveður við annan tón frá fyrri aðhvarfsgreiningum. Tafla 5-8 sýnir að stuðullinn fyrir úrkomu hefur ekki breyst mikið, gefur nú að úrkoma upp á 1 millimetra á sólarhring auki sólarhringsmeðaltalsflæði um fráveitukerfið um 33,2 lítra á sekúndu en stuðullinn fyrir kalt vatn gefur til kynna að aukning notkunar á köldu vatni um 1 lítra á sekúndu auki flæði um fráveitukerfið um 1,37 lítra á sekúndu en auk þess hefur t-gildi lækkað og p-gildi hækkað og stuðullinn því minna marktækur en þeir stuðlar sem fengust í fyrri aðhvarfsgreiningum þó að allir stuðlarnir úr aðhvarfsgreiningunni séu marktækir við 95% öryggismörk. Einnig hefur útskýringarmáttur lækkað mikið frá fyrri aðhvarfsgreiningum en hann er kominn niður í 6,7%. Þetta gerir það að verkum að erfitt er að greina frá hve hátt hlutfall rennslis um fráveitukerfið er kalt vatn.

Það eru hins vegar nokkuð fastar stærðir út úr þessum aðhvarfsgreiningum. Þannig má ráða úr þeim að við það að úrkoma aukist um 1 millimetra á sólarhring aukist meðalflæði um fráveitukerfið um 33 – 37,5 lítra á sekúndu. Þar að auki má sjá að við það að notkun á heitu vatni aukist um 1 lítra á sekúndu aukist flæði um fráveitukerfið um 0,8 lítra á sekúndu.

Erfiðara er að ráða í samhengi notkunar á köldu vatni og flæði um fráveitukerfið. Minni notkun á köldu vatni um helgar virðist þó ekki greinileg í frárennslis.

Einna marktækust virðist aðhvarfsgreiningin í töflu 5-6. Ef horft er til fastans í þeirri aðhvarfsgreiningu sem vísbendingu um hvernig kalt vatn skilar sér út í fráveitukerfið ásamt því að helgarsveiflur í notkun á köldu vatni virðast ekki skila sér út í fráveitukerfið má áætla að við það að notkun á köldu vatni aukist um 1 lítra á sekúndu aukist flæði um fráveitukerfið um 0,7 lítra á sekúndu. Það fæst með því að horfa á fastann í töflu 5-6 og meðalnotkun á köldu vatni yfir það tímabil sem hér er til skoðunar en eins og fram kom í Engle – Granger prófinu, sem skoða má í viðauka E, er röðin fyrir kalt vatn sístæð og því með stöðugt meðaltal.

Til að greina það vatn sem fer til hitaveitu frá því sem fer til daglegrar notkunar þarf að horfa til samhengis á notkun á heitu vatni og hitastigs.



Mynd 5-17: Meðalnotkun á sólarhring á heitu vatni í lítrum á sekúndu og meðallofthiti. Tímabil 1/7/2008 – 12/2/2012

Á mynd 5-17 er sólarhringsmeðaltal af notkun á heitu vatni auðkennd með rauðri línu og gildir hægri ás en hitastig á Celsius kvarða er auðkennd með blárrí línu og gildir vinstri ás. Greina má sterkt, öfugt samhengi á milli þessara þátta, þ.e. notkun á heitu vatni eykst við lækkandi hitastig eins og við er að búast þegar heitt vatn er notað til húshitunar.

Í fyrstu er ráð að kanna hvort raðirnar fyrir heitt vatn og hitastig séu samþættar. Til þess er framkvæmt annað Engle – Granger próf.

Líkt og í fyrra Engle – Granger prófinu var  $H_0$  tilgátan sú að hver röð fyrir sig væri sístæð, sem og afgangslíðir úr aðhvarfsgreiningu sem í þetta skiptið var keyrð á notkun á heitu vatni með hitastig sem skýristærð. Auk þess voru tafirnar 7 í prófinu. Útþrentun úr prófinu má sjá í viðauka E en helstu niðurstöður voru þessar.

Í fyrsta og öðru skrefi prófsins var kannað hvort raðirnar heitt vatn og hitastig væru sístæðar. Röðin heitt vatn reyndist ósístæð rétt eins og í fyrra Engle – Granger prófinu en röðin fyrir hitastig reyndist að öllum líkindum ósístæð. Þá var einnig keyrð aðhvarfsgreining á heitt vatn með hitastig sem skýristærð og samkvæmt þeirri greiningu eykst notkun á heitu vatni um rúmlega 102 lítra á sekúndu við það að hitastig lækkar um  $1^\circ\text{C}$ . Auk þess má lesa úr greiningunni að við frostmark er notkun á heitu vatni rúmlega 2.817 lítrar á sekúndu. Samkvæmt t- og p-gildum ásamt útskýringarmætti er greiningin góð en önnur greining verður keyrð síðar þar sem tekin verða tafin gildi af hitastigi til að kanna áhrif hitastigsbreytinga í gær á notkun á heitu vatni í dag.

Að endingu er framkvæmt sístæðniþróf á afgangslíði úr aðhvarfsgreiningunni í prófinu og samkæmt því prófi eru afgangslíðirnir sístæðir og allar líkur á að raðirnar heitt vatn og hitastig séu samþættar.

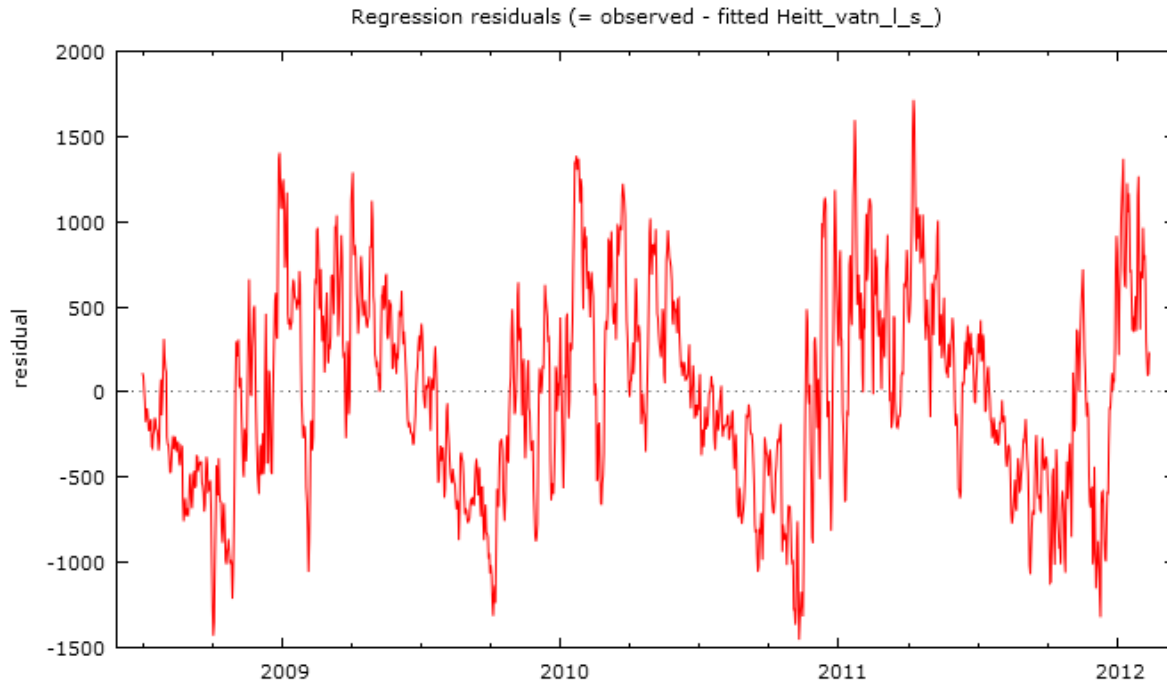
Í framhaldinu er framkvæmd VAMK greining á notkun á heitu vatni með hitastig sem skýristærð. Ólíkt aðhvarfsgreiningunni í Engle – Granger prófinu hér að framan eru teknar tafir af röðinni fyrir hitastig en ætla má að áhrif á notkun á heitu vatni komi fram með töf, þ.e. kólnun í gær eykur notkun á hitaveituvatni í dag. Til að velja hve margar tafir yrðu teknar af hitastigi voru nokkrar aðhvarfsgreiningar keyrðar með mismörgum töfum. Eftir nokkrar tilraunir virðist heppilegast að taka 1 töf af hitastigi, þ.e. notkun á heitu vatni í dag ræðst af hitastigi í dag og í gær. Ef teknar eru fleiri tafir fara gæði stuðlanna að minnka og þeir hætta að vera marktækir við 95% öryggismörk.

Tafla 5-8: Venjuleg aðhvarfsgreining á meðalnotkun á heitu vatni í lítrum á sekúndu. Skýristærð er hitastig ásamt 1 töf af hitastigi. Tímabilið 2/7/2008 – 12/2/2012

Model: OLS, using observations 2008/07/02-2012/02/12 (T = 1321)  
 Dependent variable: Heitt\_vatn\_1\_s\_

	<i>Coefficient</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t-ratio</i>	<i>p-value</i>	
const	2896.49	23.6752	122.3430	<0.00001	***
Hitastig	-45.597	8.11325	-5.6201	<0.00001	***
Hitastig_1	-61.5413	8.10999	-7.5883	<0.00001	***
Mean dependent var	2293.384	S.D. dependent var		806.1548	
Sum squared resid	4.49e+08	S.E. of regression		583.4438	
R-squared	0.476999	Adjusted R-squared		0.476205	
F(2, 1318)	601.0352	P-value(F)		3.1e-186	
Log-likelihood	-10286.30	Akaike criterion		20578.59	
Schwarz criterion	20594.15	Hannan-Quinn		20584.43	
rho	0.946624	Durbin-Watson		0.106830	

Greiningin í töflu 5-9 sýnir að breytingar á hitastigi hafa meiri áhrif á notkun á heitu vatni daginn eftir, þ.e. hækki hitastig um eina gráðu í dag minnkar það notkun á heitu vatni um 61,5 lítra á sekúndu á morgun. Allir stuðlarnir eru marktækir við 95% öryggismörk en útskýringarmáttur greiningarinnar er lægri en sést hefur í öðrum aðhvarfsgreiningum. Ástæða þess sést betur séu afgangslíðir greiningarinnar skoðaðir á grafi.



Mynd 5-18: Afgangslíðir úr aðhvarfsgreiningu á notkun á heitu vatni með hitastig ásamt einni töf af hitastigi sem skýristærðir. Tímabilið 2/7/2008 – 12/2/2012

Mynd 5-18 sýnir hvernig afgangslíðir í greiningunni sveiflast árstíðabundið. Þannig vanmetur greiningin vatnsnotkun að vetrum en ofmetur hana á sumrin. Þegar kemur að því að setja saman líkan sem spáir fyrir um notkun á heitu vatni út frá sveiflum í hitastigi þarf að gera ráð fyrir þessum vanköntum í greiningunni og er unnt að gera það með notkun gervibreyta (e. dummy variables) sem taka tillit til árstíða (e. seasonal dummies).

### 5.2.3 Samsetning fráveituvatns og sveiflur í notkun á heitu vatni út frá hitastigi, líkön

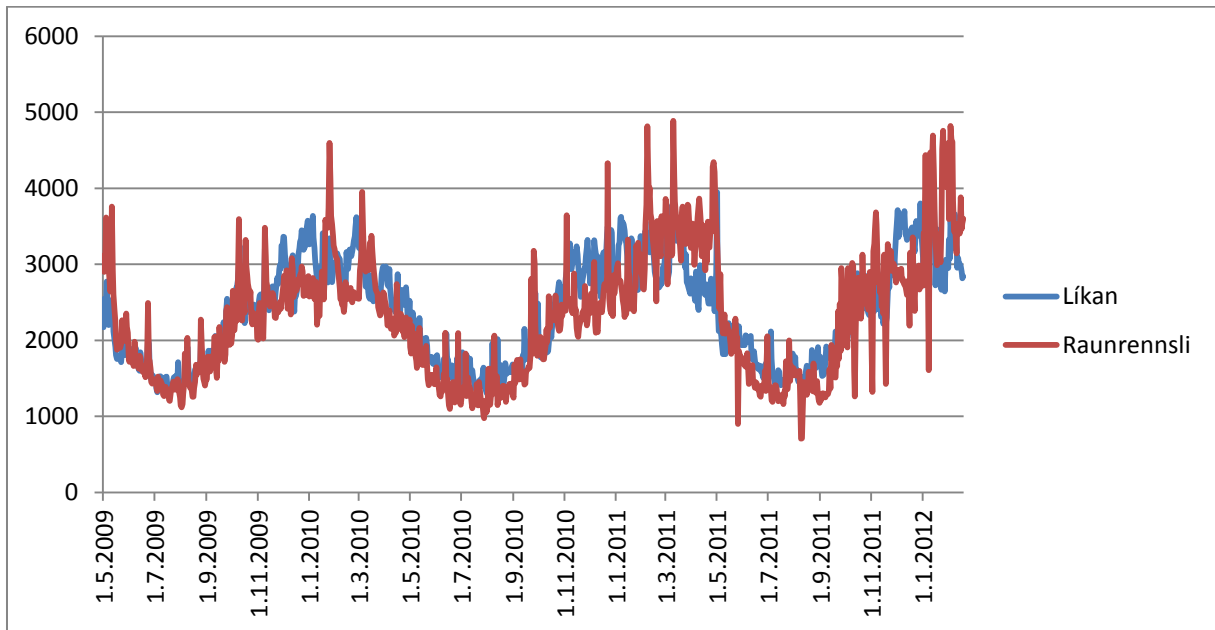
Út frá niðurstöðum í köflum 5.2.1 og 5.2.2 er hægt að setja saman líkan sem segir til um hvernig rennsli um fráveitukerfið eykst ef notkun á heitu eða köldu vatni eykst og ef skellur á með úrkomu. Í framhaldinu er síðan unnt að spá fyrir um hvernig flæði um fráveitukerfið eykst eða minnkar með sveiflum í hitastigi. Við það að finna út þann hluta fráveituvatns sem rekja má til hitaveitu er unnt að segja til um hve mikið væri hægt að minnka rennsli um fráveitukerfið væri hitaveituvatni veitt í annað fráveitukerfi.

Í sinni einföldustu mynd er hægt að segja að frárennsli sé fall af úrkomu og notkun á heitu og köldu vatni. Ef horft er til stuðlanna sem fengust úr þeim aðhvarfsgreiningum sem framkvæmdar voru í kafla 5.2.2 gæti lýsing á flæði um fráveitukerfi OR litið svona út:

$$\text{Frárennsli}_t = 0,7KV_t + 0,8HV_t + 37Ú_t \quad (5.1)$$

Hér stendur KV fyrir kalt vatn og HV fyrir heitt vatn og tölurnar sýna notkun í lítrum á sekúndu. Ú stendur fyrir úrkomu í millimetrum á sólarhring.

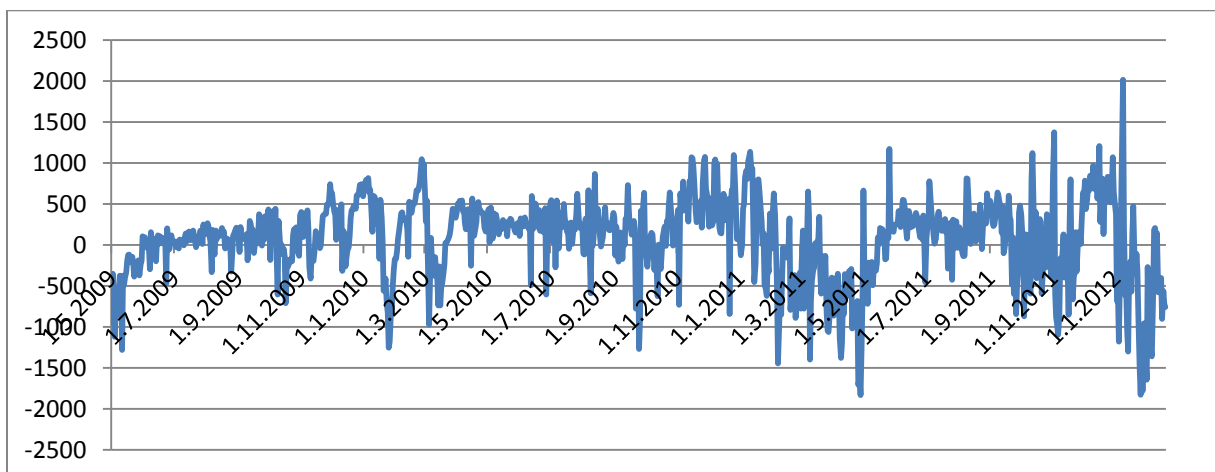
Til að reyna á þetta líkan var prófað að keyra það á gögnin sem fyrir liggja. Það er, notkun á köldu og heitu vatni var margfölduð með stuðlunum sem og úrkoma og niðurstaðan úr líkaninu borin saman við raunverulegt rennsli um fráveitukerfi OR.



Mynd 5-19: Samanburður á útkomu úr líkani fyrir sólarhringsrennsli um fráveitukerfi OR miðað við notkun á heitu og köldu vatni og úrkomu annars vegar og raunrennsli um fráveitukerfi OR hins vegar í lítrum á sekúndu. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012

Af mynd 5-19 má greina að útkoman úr líkaninu fellur nokkuð vel að árstíðasveiflum í frárennsli en á erfiðara með að segja til um stórar sveiflur í frárennsli milli daga. Erfitt er að segja til um hvað nákvæmlega veldur því.

Til að gera betur grein fyrir nákvæmni líkansins er gagnlegt að draga raunverulegt frárennsli frá því sem úr líkaninu kemur til að kanna muninn á þessum röðum.



Mynd 5-20: Munur á frárennsli um fráveitukerfi OR og útkomu úr líkani sem spáir fyrir um frárennsli miðað við notkun á heitu og köldu vatni og úrkomu í lítrum á sekúndu. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012



Á mynd 5-20 má greina nokkrar sveiflur þar sem líkanið bæði að vanmetur og ofmetur rennsli um fráveitukerfið. Séu tölurnar skoðaðar kemur þó í ljós að að meðaltali er líkanið að ofmeta frárennsli um 74,7 lítra á sekúndu sem er um 3,2% af meðalrennsli um fráveitukerfi OR yfir árið.

Eins og fyrr greinir er erfitt að spá fyrir um stórar sveiflur í frárennsli. Þannig liggur munurinn á því sem líkanið spáir og því sem raunverulega rennur um fráveitukerfið á bilinu -1.831 – 2.015 lítrum á sekúndu þegar mest lætur en slíkt kemur til af stórum frávikum í meðalrennsli um fráveitukerfið sem líkanið nær ekki að spá fyrir um. Sem fyrr segir er erfitt að segja til um ástæður þess en líklegt verður þó að teljast að það komi til vegna misræmis í gögnum. Það er að segja, tölur um fráveiturennsli sem notaðar voru við þessa ritgerðarsmíð eru nákvæmari en þær yfir notkun á vatni og því líklegra að stuttir toppar og botnar í frárennsli komi fram en að slíkir toppar komi fram í tölum yfir notkun á heitu og köldu vatni.

Í tilraunaskyni var sett saman líkan sem spáir fyrir um notkun á heitu vatni út frá sveiflum í hitastigi eingöngu. Vegna þess að hitastig sveiflast mikið yfir vetrartímann og þá sérstaklega í kringum frostmark koma fram miklar sveiflur í líkaninu sem ekki koma fram í notkun á heitu vatni sem er mun stöðugri.

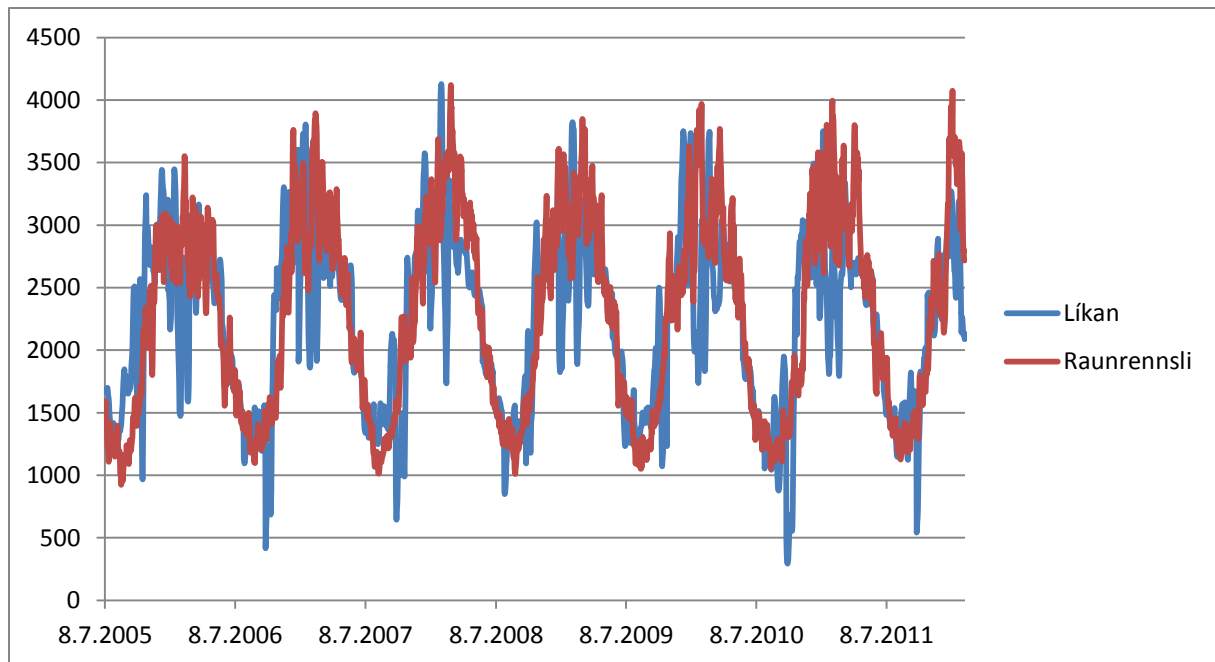
Út frá aðhvarfsgreiningu í töflu 5-9 og eftir mati á árstíðasveiflum í afgangslíðum sem sýndir voru á mynd 5-20 var sett saman líkan fyrir notkun á heitu vatni.

$$Heitt\ vatn_t = 2891,5 + G.B.Mán.*((-61,5)H_{t-1} + (-45,6)H_t) \quad (5.2)$$

Útkoman er notkun á heitu vatni í lítrum á sekúndu. Fastinn er notkun á heitu vatni þegar hitastig er við 0°C. Breytan  $G.B.Mán.$  er gervibreyta fyrir hvern mánuð fyrir sig sem þýðir að hver mánuður notast við sér margföldunarbreytu til þess að minnka árstíðasveiflur í afgangslíðum sem komu fram á mynd 5-17. Stuðlarnir innan sviga tákna síðan um hve marga lítra á sekúndu notkun á heitu vatni minnkar ef hitastig í gær og í dag hækkar um 1°C en  $H_t$  stendur fyrir hitastig á tíma t og  $H_{t-1}$  stendur fyrir hitastig daginn fyrir tíma t. Sé stærðin innan sviga táknuð með  $\beta$  lítur líkanið þannig út eftir að gervibreyturnar hafa verið settar inn.

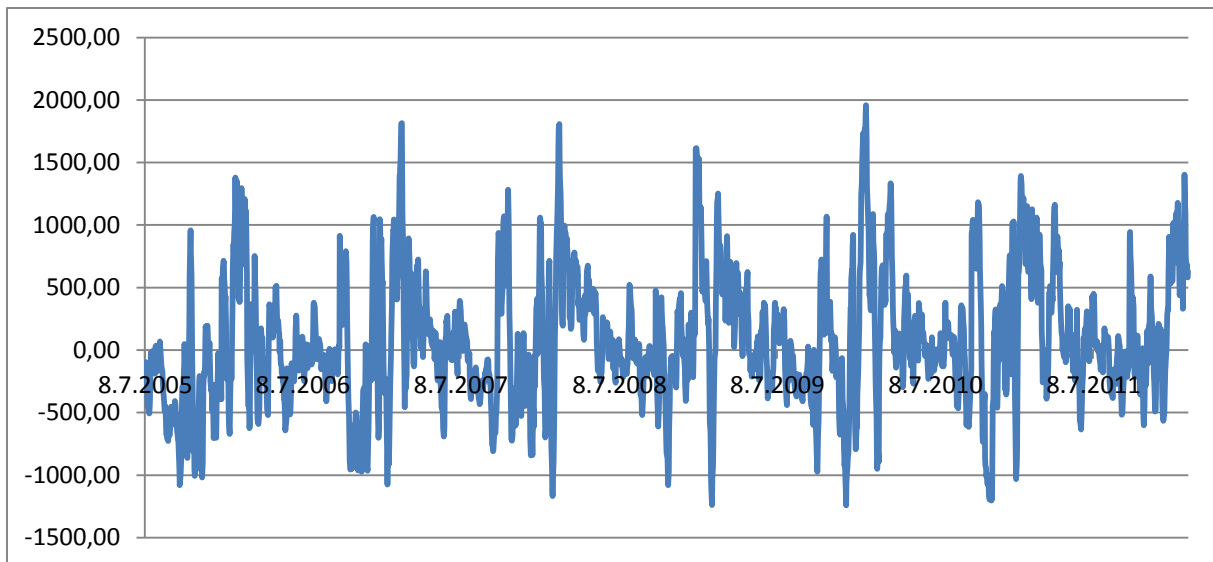
$$\begin{aligned} Heitt\ vatn_t = & 2891,5 + 1,8_{jan}\beta + 2,13_{feb}\beta + 1_{mar}\beta + 0,5_{ap}\beta + 0,5_{maí}\beta + 0,91_{jún}\beta \\ & + 1,08_{júl}\beta + 1,24_{ág}\beta + 1,34_{sep}\beta + 2,3_{okt}\beta + 0,87_{nóv}\beta \\ & + (-1,11)_{des}\beta \end{aligned} \quad (5.3)$$

Hver gervibreyta fyrir sig er notuð í viðeigandi mánuði og allir hinar eru á sama tíma núll, þannig er aðeins ein breyta notuð í einu. Nóvember og desember reyndust erfiðir viðureignar þegar kom að því að finna út gervibreytur fyrir þá mánuði enda sveiflur miklar í hitastigi og er þá sérstaklega mikið um sveiflur í kringum frostmark. Það er ástæða þess að neikvæður stuðull er fyrir desembermánuð en hann reyndist best í ítrekuðum prófunum á gervibreytunum.



Mynd 5-21: Samanburður á útkomu úr líkani fyrir notkun á heitu vatni út frá hitastigi og raunverulegri notkun á heitu vatni á höfuðborgarsvæðinu. Sólarhringsmeðaltal í lítrum á sekúndu. Tímabilið 8/7/2005 – 12/2/2012

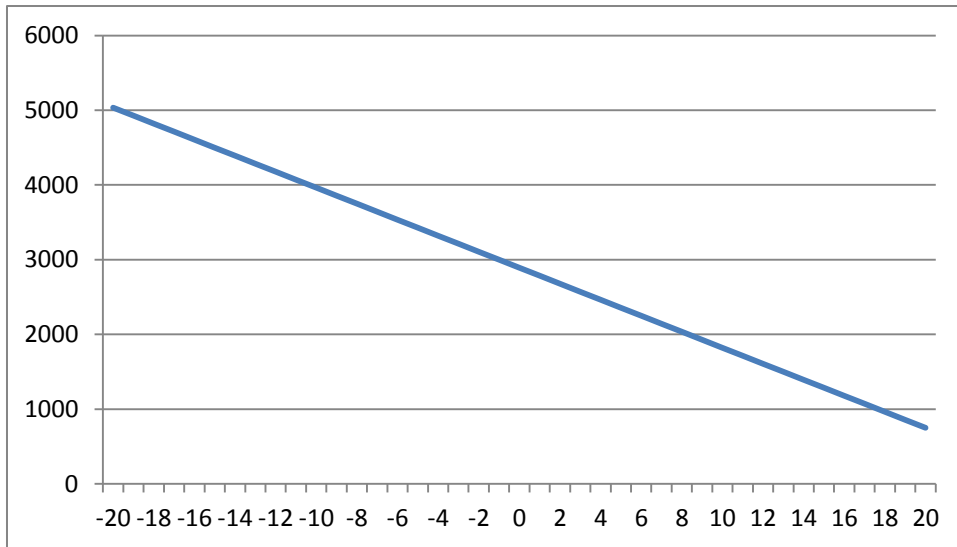
Af mynd 5-21 má greina að líkanið skilar mun sveiflukenndari niðurstöðum á milli daga heldur en raunveruleikinn segir til um en árstíðasveiflan er nokkuð nærri lagi. Á mynd 5-21 var einnig stuðst við gögn sem ná lengra aftur í tímann en önnur sem hafa verið notuð til þessa. Ástæður þess eru þær að ekki lágu fyrir gögn um frárennsli lengra aftur en til febrúar 2009. Auk þess eru tölur yfir notkun á heitu vatni sem eru eldri en júlí 2008 ónákvæmari sökum þess að mælingar skorti frá einhverjum af stöðvum OR en vatn til höfuðborgarsvæðisins rennur um nokkuð margar dælustöðvar og ekki lágu fyrir nákvæmar mælingar frá þeim öllum svo langt aftur og því voru ekki notaðar eldri tölur en frá 2008 við aðhvarfsgreiningar. Til þess að draga úr öfgakenndum sveiflum í líkaninu var hlaupandi meðaltal (e. moving average) tekið af hitastigi og því eru stuðlarnir í líkaninu margfaldaðir með 7 daga meðalhita, það er að segja (-61,5) er margfaldað með meðalhitastigi yfir 7 daga fyrir tíma  $t-1$  og (-45,6) er margfaldað með meðalhitastigi síðustu 7 daga fyrir tíma  $t$ . Engu að síður koma fram sterkar sveiflur, sérstaklega yfir vetrartímann, en þó minni en ef ekki væri tekið hlaupandi meðaltal af hitastigi. Sé líkanið dregið frá raunrennsli koma þessar sveiflur greinilega fram.



Mynd 5-22: Munur á notkun á heitu vatni á höfuðborgarsvæðinu og útkomu úr líkani sem spáir fyrir um notkun á heitu vatni miðað við hitastig. Munur á sólarhringsmeðaltali í lítrum á sekúndu. Tímabilið 8/7/2005 – 12/2/2012

Greina má af mynd 5-22 að sveiflurnar eru sterkastar yfir vetrartímann enda eru sveiflur í hitastigi hvað sterkastar á þeim árstíma og líkanið fyrir vikið stöðugra yfir sumartímann.

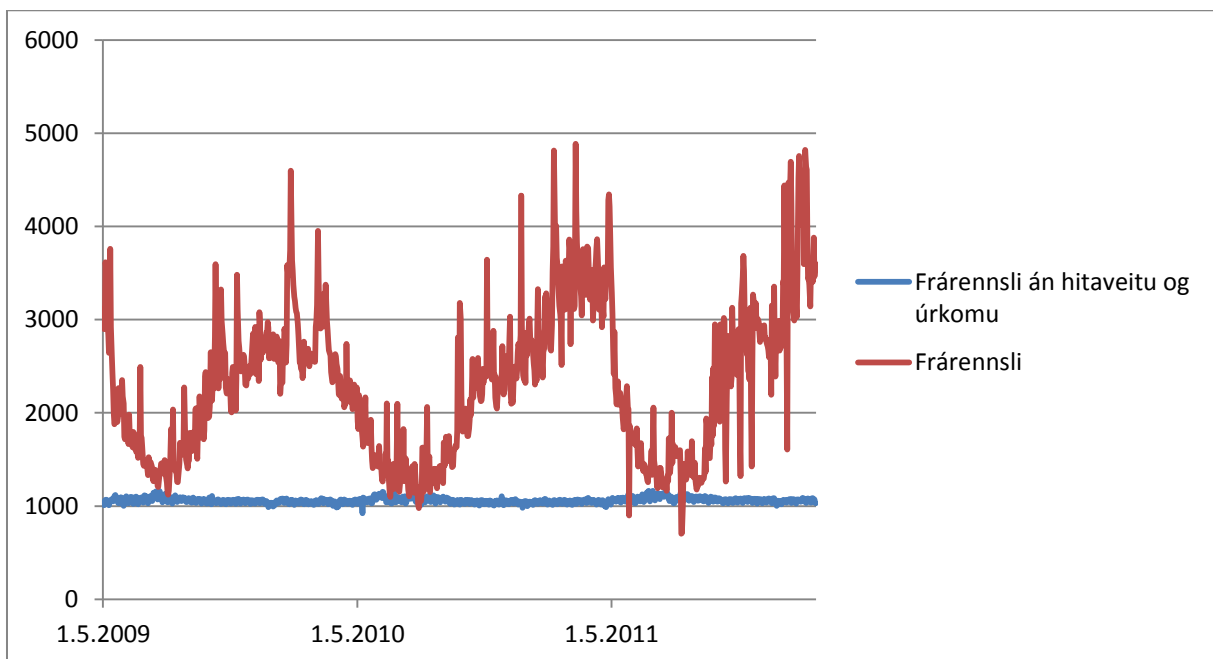
Niðurstöður úr þessum tveimur líkönum og greiningum sem á undan hafa farið er síðan að endingu hægt að nota til þess að átta sig á hve mikið væri hægt að draga úr umfangi frárennslis á höfuðborgarsvæðinu ef bæði úrkoma og hitaveituvatn væri leitt í annað fráveitukerfi. Til viðmiðunar er horft til meðalhita fráveituvatns sem kom fram á töflu 5-3 en þar kemur fram að meðalhiti á fráveituvatni var 20,3 og 20,6 gráður á Celsius í stöðvunum tveim árið 2007. Jafnframt mátti greina á mynd 5-7 að meðalhiti á fráveituvatni var nokkuð stöðugur yfir sumartímann en þó hærri en meðallofthiti. Með tilliti til þess og miðað við dægursveiflur í frárennslis, sem komu fram í myndum 5-14 og 5-15, er miðað við það að húshitun hætti fari lofthiti upp fyrir 20°C. Ekki er stuðst við árstíðabreytur heldur niðurstaðan úr aðhvarfsgreiningunni í töflu 5-11 notuð til að reikna út notkun á heitu vatni við 20°C. Sé notast við greininguna væri notkun á heitu vatni við 20°C lofthita 750 lítrar á sekúndu en til samanburðar má nefna að meðalnotkun á köldu vatni er 663,4 lítrar á sekúndu yfir árið. Það má vel hugsa sér að hér sé um ofmat að ræða, þ.e. minna sé notað af heitu vatni til almennrar notkunar en til öryggis er notast við 750 lítra á sekúndu sem almenna notkun á heitu vatni. Falli hitastig um eina gráðu í 2 daga í röð eykst notkun á heitu vatni um 107 lítra á sekúndu.



Mynd 5-23: Breyting á notkun á heitu vatni miðað við breytingar á hitastigi

Mynd 5-23 sýnir hvernig notkun á heitu vatni fellur við hækkandi hitastig en á lóðréttum ás er notkun á vatni í lítrum á sekúndu en á láréttum ás er hitastig á Celsius kvarða.

Út frá þessu má áætla að rennsli um fráveitustöðvar OR væri nokkuð stöðugt yfir árið ef bæði regnvatn og hitaveituvatn væri leitt um annað kerfi. Hér þarf vissulega að einfalda hlutina töluvert og gera ráð fyrir mjög stöðugri notkun á heitu vatni yfir árið en miðað við notkun á köldu vatni má áætla að notkun á heitu vatni utan hitaveitu sé nokkuð stöðug árið um kring.



Mynd 5-24: Samanburður á frárennsli með og án hitaveituvatns og úrkomu. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012

Á mynd 5-24 er frárennsli samkvæmt mælingum (rauða línan) borið saman við fræðilegt flæði samkvæmt líkani (bláa línan) væri heitu vatni og úrkomu beint í annað kerfi. Fræðilegt flæði er samansett af raunverulegri notkun á köldu vatni og meðalnotkun af heitu vatni upp á 750

lítra á sekúndu. Sú notkun er síðan margfölduð með stuðlunum 0,7 fyrir kalt vatn og 0,8 fyrir heitt vatn samanber líkan fyrir flæði um fráveitukerfi sem sett var fram hér að framan.

Eins og greina má af mynd 5-24 væri hægt að draga verulega úr flæði um fráveitukerfi og gera það stöðugra ef úrkomuvatni og hitaveituvatni væri veitt til viðtaka um önnur kerfi og þar með ekki í gegnum skólphreinsun. Miklu getur munað um þetta flæði þegar kemur að fjárfestingarkostnaði í útbúnaði til nýtingar á skólpi eins og kemur fram í kafla 7.

### **5.3 Lífrænn heimilisúrgangur á höfuðborgarsvæðinu**

Árið 2008 kom síðast út sameiginleg svæðisáætlun um meðhöndlun úrgangs til ársins 2020 fyrir svæðið allt frá Gilsfirði austur að Markarfljóti. Var þá meðal annars tekið saman magn og tegund úrgangs á svæðinu og var höfuðborgarsvæðið þar meðtalið.

Samkvæmt svæðisáætluninni voru um 55% þess úrgangs sem féll til á höfuðborgarsvæðinu lífræn. Þá er meðtalið til dæmis timbur og lífrænn umbúðaúrgangur (pappi o.s.frv.) og lífrænn iðnaðarúrgangur s.s. sláturúrgangur. Lífrænn úrgangur úr blönduðum heimilisúrgangi var talinn vera 34 þúsund tonn á svæðinu öllu og gera það tæplega 26 þúsund tonn af lífrænum heimilisúrgangi á höfuðborgarsvæðinu, miðað við íbúafjölda, sem væri auðveldlega hægt að nýta til metangasframleiðslu ef flokkun væri tekin upp á heimilum. Samkvæmt svæðisáætluninni eru nú þegar uppi áform um aukna flokkun sorps á heimilum með það markmið að auka lífmassa til metanvinnslu (Mannvit, 2008).

Erlendis hefur verið kannað hve miklum mat er hent á heimilum. Í breskri rannsókn, sem gerð var árið 2008, var kannað hve miklum mat bresk heimili henda sem hefði verið hægt að nýta. Kom í ljós í þeirri rannsókn að meðalheimili hendir um 150 kg af mat á ári hverju (Neytendablaðið, 2008).

Árið 2010 voru heimili á höfuðborgarsvæðinu, sem Sorpa þjónustaði, 79.504 talsins (Sorpa, e.d. (i)). Sé matarsóunin úr bresku rannsókninni heimfærð upp á íslensk heimili þýðir þetta að íslensk heimili á höfuðborgarsvæðinu henda um 11.926 tonnum af mat á ári sem mætti safna til metanframleiðslu væri flokkun á heimilum tekin upp á höfuðborgarsvæðinu líkt og tíðkast t.a.m. á Akureyri.

### **5.4 Samantekt**

Þar sem fráveitukerfi höfuðborgarsvæðisins er að stórum hluta svokallað einfalt kerfi flæðir ofanvatn með skólpi í hreinsistöðvar Orkuveitunnar. Það, ásamt því að hús eru kynt upp með heitu vatni sem rennur um skólperfið og mikil vatnsnotkun Íslendinga, veldur því að fráveituvatn á höfuðborgarsvæðinu er skilgreint sem veikt skólp. Hlutfall lífrænna efna er s.s. lágt í fráveituvatninu. Hitastig fráveituvatns á höfuðborgarsvæðinu er nokkuð stöðugt, í kringum 20°C, og pH gildi er á milli 6 og 7. Þetta pH gildi er nokkuð hentugt til loftfirrts niðurbrots en hræfnið þyrfti að hita um 15°C, upp í 35°C, til þess að kjöraðstæðum metanmyndandi örvera væri náð.

Sveiflum í flæði um fráveitukerfi OR er hægt að skipta upp í árstíðasveiflur og dægursveiflur. Árstíðasveiflur fylgja hitastigi þannig að við lækkandi hitastig eykst flæði um fráveitukerfið vegna aukningar á notkun hitaveituvatns en árstíðasveiflur í notkun á heitu vatni og flæði um fráveitukerfið fylgjast algerlega að. Greina má öfuga árstíðasveiflu í notkun á köldu vatni, þ.e. notkunin eykst yfir sumartímenn en það er þó lítil aukning og verður hennar ekki vart í flæði um fráveitukerfið. Hitaveituvatn er þannig ríkjandi hluti af því sem flæðir um fráveitukerfi OR. Dægursveiflur lýsa sér þannig að flæði um fráveitukerfi eykst að meðaltali um rúmlega 1.000 lítra á sekúndu eftir klukkan 6 á morgnana og dettur aftur niður um miðnætti.

Samkvæmt greiningu fer ekki allt það vatn, sem Orkuveita Reykjavíkur selur, út í fráveitukerfið. Má t.d. greina vikusveiflur í notkun á heitu vatni sem ekki verður vart í fráveiturennisli og má lýsa flæði um fráveitukerfið út frá notkun á heitu og köldu vatni og úrkomu með líkaninu  $Frárennsli_t = 0,7KV_t + 0,8HV_t + 37U_t$  þar sem KV og HV stendur fyrir kalt og heitt vatn í lítrum á sekúndu og  $U$  stendur fyrir úrkomu í millimetrum á sólarhring. Við það að hitastig lækki um  $1^\circ\text{C}$  tvo daga í röð eykst notkun á heitu vatni um 107 lítra á sekúndu.

Ef hitaveituvatn og úrkoma myndu flæða um aðskilið fráveitukerfi og væri þar með ekki hreinsað með skólpi væri varlega áætlað hægt að draga úr flæði um hreinsistöðvar OR um alla vega helming, þ.e. úr rúmum 66 milljónum rúmmetra á ári niður í rúmlega 33 milljónir rúmmetra á ári, án þess að minnka magn lífrænna efna í skólpi. Einnig yrði flæði um hreinsistöðvar OR stöðuga yfir árið en hitastig sveiflukennara en nú er. Miklu getur munað um það magn í fjárfestingarkostnaði vinnslu sem nýtir seyru, hvort sem er með gösun eða gerjun.

Magn þurrefna í seyru, sem hægt væri að ná með tveggja þrepa hreinsun skólps, er áætlað um 7.500 tonn á ári, magn fitu sem fangað er úr fitugildrum er 245,8 tonn yfir árið 2010 og magn eldhúsúrgangs sem safna mætti saman á höfuðborgarsvæðinu er áætlað um 12.000 tonn árlega væri aukin flokkun tekin upp á heimilum.

Það eru því miklir möguleikar til að minnka magn af hreinu vatni sem rennur í gegnum skólphreinsistöðvar OR og verður reynt í þessari ritsmíð að slá á hve miklu munar í fjárfestingarkostnaði ef hitaveituvatn og úrkoma rynnu um aðskilið fráveitukerfi.

## 6 Framleiðslumöguleikar

Í þessum kafla verður reynt að taka saman hve mikið eldsneyti væri hægt að framleiða úr því skólpi sem rennur um dælustöðvar Orkuveitu Reykjavíkur á hverju ári. Reiknað verður hve mikið metan væri hægt að framleiða úr skólpi eingöngu annars vegar og með íblöndun lífræns heimilissorps hins vegar. Þá verður reynt að reikna, eins og kostur er, hve mikið væri hægt að framleiða af vetni úr skólpi með gufugösun, vatnsgösun við yfirmarkshitastig og plasmagösun.

### 6.1 Framleiðslumöguleikar við súrefnisfirrta gerjun

Við útreikninga á því metanmagni sem hægt væri að framleiða við súrefnisfirrta gerjun verður stuðst við jöfnur úr kafla þrjú og einnig reynslu annarra þjóða af metanframleiðslu með þessum hætti.

#### 6.1.1 Framleiðslumöguleikar úr seyru á höfuðborgarsvæðinu

Til að reikna út hve mikið metan væri hægt að vinna úr seyru á höfuðborgarsvæðinu verða notaðar jöfnur 3.1, 3.2 og 3.3 hér að framan.

Fyrsta skref er að finna út heildarmagn lífrænna efna í fráveituvatni miðað við íbúafjölda skv. jöfnu 3.3. Magnið er fundið út fyrir eitt ár og verður magnið reiknað út fyrir árið 2010.

$$TOW = P * BOD * 0,001 * I * 365$$

$P = 160.000$ , fjöldi íbúa sem fráveitukerfið þjónar.

$BOD = BOD$  gildi sem hver einstaklingur losar frá sér, hér á landi 60 g samkvæmt reglugerð.

$I = 1,25$  en kerfið þjónar bæði heimilum og fyrirtækjum

$$\Rightarrow TOW = \underline{4.380.000} \text{ kg BOD/ár}$$

Næst er að finna losunarstuðul skv. jöfnu 3.2

$$EF_j = B_0 * MCF_j$$

$B_0 = 0,6$ . Stuðst er við sjálfgefinn stuðull fyrir hámarks metanmyndun,  $\text{kg} \frac{CH_4}{\text{kg}} BOD$ .

$MCF_j = 0,8$ . Hér er verið að reikna fræðilega metanframleiðslu í súrefnissnauðum gerjunartönkum og því er þessi leiðréttingarstuðull valinn. Þetta eru lægri mörk fyrir þennan stuðul en hann liggur á bilinu 0,8 – 1 við þessar aðstæður

$$\Rightarrow EF_j = \underline{0,48} \text{ kg } CH_4/\text{kg BOD}$$

Þá er hægt að finna út mögulega metanlosun samkvæmt jöfnu 3.1

$$CH_4 \text{ losun} = \left[ \sum_{i,j} (U_i * T_{i,j} * EF_j) \right] (TOW - S) - R$$

$U_j$  = Hér er um að ræða íbúa þéttbýlis með meðaltekjur eða háar tekjur. Ísland var, árið 2006, í 14. sæti í evrópskum samanburði á launum miðað við kaupmáttarjafnvægi, með svipuð meðaltalslaun og í Bretlandi (Hagstofa Íslands, e.d. (iii)). Þar sem Ísland hefur nú færst niður á þessum lista eftir hrun verður stuðst við örlítið lægri gildi á  $U_i$  heldur en gert er í Bretlandi þar sem rannsóknir hafa sýnt að með hærri tekjum skilar fólk af sér hærri BOD (Mara, D., 2003). Til einföldunar verður notast við 0,85 sem nokkurs konar grunnviðmið þar sem þetta gildi er ekki til útreiknað fyrir Ísland.

$T_{i,j}$  = Hér er óhætt að nota gildið 1 þar sem allir íbúar á því svæði sem er til skoðunar notfæra sér þjónustuna. Ef um væri að ræða einhverja notkun tanka þyrfti að gera ráð fyrir því hér en þar sem svo er ekki verður  $T_{i,j} = 1$ .

$EF_j = 0,48 \text{ kg } CH_4/\text{kg } BOD$  samkvæmt útreikningum.

$TOW = 4.380.000 \text{ kg } BOD/\text{ár}$  samkvæmt útreikningum.

$S$  = Ekki er um að ræða að seyra sé fjarlægð heldur rennur allt skólp um það kerfi sem er til skoðunar, því er þetta gildi 0.

$R$  = Ekkert metan er endurheimt úr kerfinu, því er þetta gildi 0

$$\Rightarrow CH_4 \text{ losun} = \underline{1.787.040} \text{ kg } CH_4/\text{ár}$$

Hver rúmmetri af metani vegur um 0,717 kg (Metan, e.d. (iv)). Því er hægt að umreikna þetta gildi yfir í rúmmetra af metani á ári

$$= 1.787.040 * 0,717 = \underline{1.218.308} \text{ Nm}^3/\text{ár}$$

Fræðilega væri því hægt að framleiða 1.218.308 rúmmetra af hreinu metani á ári úr þeirri seyru sem hægt væri að fá úr skólpinu á höfuðborgarsvæðinu.

Þetta er svipað magn og útreikningar í kafla 5.1 gefa til kynna ef reiknað er með svipaðri metanmyndun á hvert kg þurrefnis og í lífgasverksmiðjunni í Luzern.

Í kafla 5.1 kom fram að magn þurrefna sem hægt væri að nýta í gerjun væri um 7.500 tonn á ársgrundvelli eftir 2. stigs hreinsun. Ef miðað er við metanmyndun upp á 0.16  $\text{Nm}^3$  á hvert kg þurrefnis líkt og reynslan er í Luzern þar sem metan er unnið eingöngu úr seyru er magn metans sem hægt er að framleiða á ári því:

$$0,16 * 7.500.000 = \underline{1.200.000} \text{ Nm}^3/\text{ár}$$

Þessi metanmyndun miðast við um 13 daga viðverutíma hráefnis en fræðilega er hægt að ná hærri metanmyndunarstuðli með lengri viðverutíma.



Í þessari ritsmíð verður þó horft til metanframleiðslu upp á 1.200.000 Nm<sup>3</sup> ári út frá bæði reynslu af metanframleiðslu úr seyru í Luzern og fræðilega metanframleiðslu sem reiknuð var út frá jöfnum 3.1 – 3.2.

Miðað við söluverð þann 10. september 2011 upp á 126 krónur á rúmmetra með virðisaukaskatti upp á 25,5% (Metan, e.d. (v)) þýðir það verð til seljanda upp á 100,4 krónur fyrir rúmmetra af metani. Það gerir söluverðmæti til seljanda upp á um 120.500.000 ISK á ári.

### **6.1.2 Framleiðslumöguleikar við íblöndun fitu úr fituskiljum við seyru**

Árið 2010 var fangað magn fitu úr hreinsistöðvum Orkuveitu Reykjavíkur samtals 245,8 tonn. Þessa fitu er vel hægt að nýta til aukinnar lífgasframleiðslu eins og gert er í lífgasverum sem framleiða lífgas úr skólpi erlendis. Miðað við metanmyndun upp á 0,845 – 0,928 Nm<sup>3</sup> fyrir hvert kg af fitu úr fitugildrum skólphreinsistöðva, eins og getið var um í kafla 3.4.2, þýðir þetta metanmyndunarmöguleika upp á 207.701 Nm<sup>3</sup> miðað við það magn fitu sem var fangað úr hreinsistöðvum OR árið 2010.

Þegar fita er notuð sem íblöndunarefni í seyru til lífgasvinnslu í lágu hlutfalli við seyruna má gera ráð fyrir að metanmyndunarmöguleikar fitunnar verði fullnýttir eftir 25 daga viðverutíma (Davidsson, Á. et al., 2007).

Undir bestu mögulegu kringumstæðum þýðir þetta mögulega metanframleiðslu upp á samtals 1.408.000 Nm<sup>3</sup> á ári eða 17% aukningu frá metanframleiðslu eingöngu úr seyru sé miðað við fræðilega framleiðslumöguleika á metani.

Þetta þýðir þó tvöföldun á viðverutíma sem kallar á stærri gerjunartanka og það gerir fjárfestinguna töluvert dýrari. Það fer því að skipta verulegu máli hve mikil viðbót við metanframleiðsluna fæst við nýtingu þeirrar fitu sem fönnguð er í fitugildrum.

Það skal þó einnig haft í huga að lengri viðverutími þýðir aukna metanmyndun úr seyru því þó að hámarksmyndun sé náð eftir um 10 daga heldur myndun áfram eftir þann tíma. Uppsöfnuð metanmyndun úr seyru eykst því við það að lengja viðverutíma en hún eykst mun hægar eftir 10 daga.

### **6.1.3 Framleiðslumöguleikar með íblöndun lífræns heimilissorps**

Eins og fram kom í kafla 4.2 voru heimili, sem Sorpa þjónaði árið 2010, 79.504 talsins og miðað við sóun á hverju heimili upp á 150 kg á ári þýðir það lífmassa upp um 12.000 tonn á ári sem hentar vel til metanframleiðslu væri tekin upp flokkun á heimilum á höfuðborgarsvæðinu.

Innihald fastra efna (e. total solids) í matarafgöngum er 26,2% og þar af eru rökgjörn föst efni (e. volatile solids) 90 – 97%. Það gefur af sér 0,48 Nm<sup>3</sup> af lífgasi á hvert kg af rokkgjörnum föstum efnum (Steffen, R. et al., 1998).

Þetta þýðir föst efni upp á

$$0,262 * 12.000.000 = 3.144.000 \text{ kg}$$

Þar af eru rokgjörn efni á bilinu 90 – 97% eða 2.830.000 – 3.050.000 kg.

Þessi efni geta því gefið af sér um 1.360.000 – 1.460.000 Nm<sup>3</sup> af lífgasi á ári. Metanhlutfall lífgass sem myndað er úr matarafgöngum er nokkuð hátt eða um 70 – 80% (Steffen, R. et al., 1998). Meðalmetanhlutfall er um 73% en lækkar örlítið eftir því sem hlutfall rokgjarnra efna hækkar í þeim massa sem fer til gerjunar en er þó enn mjög nálægt 73% (Zhang, R. et al., 2006).

Miðað við meðalmetanhlutfall upp á 73% er möguleiki á að vinna 1.000.000 – 1.100.000 Nm<sup>3</sup> af metani á ári hverju úr matarafgöngum heimila á höfuðborgarsvæðinu.

Þegar haft er í huga að metanmyndun á hvert kg þurrefna í Henriksdal í Svíþjóð er að meðaltali 0,34 Nm<sup>3</sup> / kg af lífrænum þurrefnum en ekki 0,16 Nm<sup>3</sup> / kg eins og í Luzern reynist heildarmetanmyndun á ári vera um 3.400.000 – 3.600.000 Nm<sup>3</sup>. Hér er gert ráð fyrir metanmyndun upp á 0,34 Nm<sup>3</sup> af hverju kg af þurrefni en það er ennþá þó nokkuð undir fræðilega mögulegri metanmyndun þessara efna. Til varúðar og viðmiðunar verður reiknað með framleiðslu upp á 3.000.000 Nm<sup>3</sup> miðað við íblöndun fitu og lífræns heimilisúrgans við seyru.

## 6.2 Framleiðslumöguleikar við gösun

Erfiðara er að reikna út hve mikið væri hægt að framleiða úr þeirri seyru sem til fellur á höfuðborgarsvæðinu við gösun heldur en við súrefnisfirrt niðurbrot. Vísindin eru styttra á veg komin og ekki sama reynsla til staðar og af niðurbroti.

Hér verða skoðaðar þær gösunaraðferðir sem hafa lofað hvað bestu og eru hvað raunhæfastar við nýtingu seyru sem hráefnis og þá helst til vetnisframleiðslu en einnig efnasmíðagasframleiðslu. Þær aðferðir eru gufugösun og vatnsgösun við yfirmarkshitastig.

Ástæðan fyrir því að horft er til vetnisframleiðslu frekar en efnasmíðagasframleiðslu til áframhaldandi vinnslu úr gösun á seyru er sú að niðurstöður rannsókna hafa sýnt að gösun seyru gefur af sér hærra vetnishlutfall en gösun annarra lífmassa svo sem landbúnaðarúrgangs og viðarkurls. Því er frekar horft til þess að framleiða vetni með gösun seyru og efnasmíðagas til áframhaldandi vinnslu úr annars konar hráefni með hærra kolsýringshlutfall (Nipattummakul, N., et. al., september 2010).

Til að slá á það vetnismagn sem hægt væri að framleiða úr þeirri seyru sem til fellur á höfuðborgarsvæðinu með hverri aðferð fyrir sig verður byggt á fyrirliggjandi rannsóknum en hafa skal í huga að hér er um gróft áætlaða nálgun að ræða miðað við fyrirliggjandi upplýsingar.

### **6.2.1 Gufugösun**

Þegar gufa er notuð sem hvarfefni við gufugösun seyru gefur það af sér þrisvar sinnum meira magn vetnis heldur en sé súrefni notað sem hvarfefni (Nipattummakul, N., et. al., september 2010).

Þær rannsóknir Nipattummakul, N. et. al. frá árinu 2010, sem hér liggja til grundvallar á gufugösun seyru, gera ráð fyrir mikilli þurrkun á hráefninu áður en því er veitt til gösunar en þar var vökvainnihald einungis 1,74%. Miðað við það þurrefnainnihald var magn vetnis á hvert gramm þurrefnis 0,076 grömm. Það þýðir að úr 8.760 tonnum af þurrefni, sem til falla árlega í því skólpi sem rennur í gegnum hreinsistöðvar Orkuveitu Reykjavíkur, mætti vinna 666 tonn af vetni á hverju ári.

Ekki kom fram í þessum skýrslum hvort nauðsynlegt væri að þurrka seyruna svo mikið fyrir gufugösun en miðað við vökvainnihald seyru við vatnsgösun við yfirmarkshitastig má leiða að því líkum að óhætt væri að nota seyru með hærra vökvainnihald sem hráefni við gufugösun. Það myndi leiða af sér meira vetnismagn á hvert gramm þurrefnis sem færi til gösunar.

### **6.2.2 Vatnsgösun við yfirmarkshitastig**

Vatnsgösun við yfirmarkshitastig er sú aðferð sem virkar við hæsta vökvainnihald seyru, þ.e. ekki þarf jafn mikla þurrkun á hráefninu og við aðrar aðferðir. Því er sú aðferð álitleg hér á landi þar sem vökvainnihald skólps er mjög hátt í samanburði við önnur lönd eins og áður hefur verið rakið.

Sé miðað við þurrefnaflæði upp á 10.950 tonn á ári þýðir það 24 tonn á dag og þ.a.l. 1 tonn á klukkustund.

Til viðmiðunar er reiknað með vökvainnihaldi upp á 80% eins og gert var ráð fyrir í rannsókn Gasafi, E. et. al. frá árinu 2008. Það þýðir að hráfnisflæði til gösunar er 5 tonn á klukkustund.

Niðurstaða Gasafi, E. et. al. var að 83,9 kg af vetni næðust úr 5 tonnum af seyru við vatnsgösun, það gerir 16,78 kg á hvert tonn. Miðað við flæði upp á 5 tonn á klukkustund væri vetnisframleiðsla hér á landi 83,9 kg á klukkustund. Það er framleiðsla upp á 735 tonn af vetni á hverju ári.

Hlutfall kolsýrings í efnasmíðagasinu úr þessu ferli er mjög lágt eða undir 1%.

Ef borin er saman nýting á þurrefnum við gufugösun annars vegar og vatnsgösun hins vegar kemur í ljós að nýtingin er betri við vatnsgösun burtséð frá vökvainnihaldi hráefnisins. Fyrir hvert gramm þurrefnis sem nýtt var til gösunar var því hægt að framleiða 0,0839 grömm af vetni á móti 0,0773 grömmum við gufugösun. Sá munur, sem er á því magni sem hægt væri að framleiða af vetni á ári hverju úr skólpi á höfuðborgarsvæðinu eftir því hvort notast væri við gufugösun eða vatnsgösun, skýrist því af mismunandi vökvainnihaldi en eins og áður hefur komið fram er óvíst hve hátt vökvainnihald seyru væri hagkvæmt við gufugösun. Út frá

þeim upplýsingum sem tiltækar eru verður vatnsgösun þó að teljast hagkvæmari kostur en gufugösun.

### 6.3 Samanburður á orkuframleiðslu

Til að fá gleggri samanburð á ávinningi þess að vinna orku úr skólpi með annaðhvort framleiðslu metans með gerjun eða framleiðslu vetnis með gösun er gagnlegt að skoða hve mikil orka fæst með hvorri aðferð fyrir sig. Gefur það vísbendingu um hve mikilli orku er hægt að ná úr skólpi og er vísbending um hvaða leið er hagkvæmust í nýtingu skólps.

Eins og áður hefur komið fram er orkuinnihald metans 55,8 kílójoule á hvert gramm metans og orkuinnihald vetnis er 141,9 kílójoule á hvert gramm. Út frá þeim stærðum og þeirri staðreynd að hver rúmmetri metans vegur 0,717 kg er hægt að reikna árlega orkuframleiðslu út frá því magni metans og vetnis sem hægt er að framleiða á ári miðað við framangreinda útreikninga. Út frá því verður skoðuð árleg orkuframleiðsla í megajouleum (MJ) og megavattstundum (MWst.).

*Tafla 6-1: Samanburður á orku sem fæst úr metanframleiðslu með gerjun seyru annars vegar og vetnisframleiðslu með gösun á seyru hins vegar í MJ og MWst. Framleitt úr seyru sem til fellur á höfuðborgarsvæðinu*

Eldsneytisframleiðsla	MJ	MWst
<b>Metan</b>		
<b>1.401.600 Nm<sup>3</sup></b>	48.000.000	13.336
<b>3.000.000 Nm<sup>3</sup></b>	120.025.800	33.340
<b>Vetni</b>		
<b>666 tonn</b>	94.505.400	26.252
<b>735 tonn</b>	104.296.500	28.971

Eins og tafla 6-1 sýnir fæst mesta orkuframleiðslan með metanframleiðslu með íblöndun eða 33.340 MWst. árlega en næstmesta framleiðslan næst með vetnisframleiðslu með gösun við yfirmarkshitastig en úr slíkri framleiðslu fást 28.971 MWst. á ári.

Það veltur því á mögulegu vökvainnihaldi þess hráefnis sem leitt er til gösunar hvort vetnisframleiðsla er samkeppnishæf við metanframleiðslu út frá þeirri orku sem fæst úr skólpinu á hverju ári.

Eins og áður hefur komið fram er mun óljósara um það magn vetnis sem hægt er að framleiða með gösun skólps á höfuðborgarsvæðinu en eins og samanburður á orkuframleiðslu gefur til kynna getur vetnisframleiðsla með gösun aðeins orðið samkeppnishæf við bestu hugsanlegu skilyrði, þ.e. að vökvainnihald hráefnisins megi vera frekar hátt. Nánar verður farið yfir það í kafla 7 hve margar bifreiðar væri hægt að knýja með þeirri orku sem fæst úr þessari framleiðslu.

## 6.4 Samantekt

Varlega áætlað má reikna með metanframleiðslu upp á 1.200.000 Nm<sup>3</sup> væri framleitt úr seyrunni einni saman miðað við metanmyndun upp á 0,16 Nm<sup>3</sup> á hvert kg af þurrefni. Úr fitunni mætti síðan framleiða 207.701 Nm<sup>3</sup> og úr matarafgöngum mætti vinna 1.000.000 – 1.100.000 Nm<sup>3</sup> af metani á ári hverju. Með íblöndun ætti því að nást framleiðsla upp á hið minnsta 3.000.000 Nm<sup>3</sup> metans miðað við hærri metanmyndun seyru eftir íblöndun vegna lengri viðverutíma og verður notast við það viðmið hér þrátt fyrir að metanmyndunarmöguleikar séu meiri.

Möguleg vetnisframleiðsla með gösun á skólpi á höfuðborgarsvæðinu er mjög misjöfn eftir gösunaraðferðum. Vatnsgösun við yfirmarkshitastig gefur af sér mesta vetnismagn eða 735 tonn af vetni á ári samanborið við 666 tonn á ári með gufugösun. Munur á framleiddu magni á ári skýrist af mismunandi vökvainnihaldi hráefnisins. Nýting þurrefnis er þó mismunandi á milli gösunaraðferða. Fyrir hvert gramm af þurrefnum í skólpi fást, 0,0773 grömm með gufugösun og 0,0839 grömm með vatnsgösun við yfirmarkshitastig. Vatnsgösun kemur því best út miðað við nýtingu og framleiðslumöguleika af þeim gösunaraðferðum sem hér voru til skoðunar.

Mest af orku fæst úr metanframleiðslu með íblöndun, eða 33.340 MWst. en litlu minna fæst úr vatnsgösun við yfirmarkshitastig eða 28.971 MWst. samanborið við 26.252 MWst. með gufugösun. Vetnisframleiðsla verður ekki samkeppnishæf við metanframleiðslu ef horft er til MWst. nema vökvainnihald geti verið fremur hátt.

Þessum tölum ber þó að taka með fyrirvara. Óvíst er hver metanmyndun á hvert kg þurrefnis yrði við gerjun á skólpi í súrefnissnaudu umhverfi hér á landi en væri hún í líkingu við það sem þekkist erlendis eru þær tölur, sem fram koma í þessum kafla, það magn sem gera mætti ráð fyrir að hægt væri að framleiða af metani úr skólpi hér á landi. Enn meiri er óvissan síðan um framleiðslumöguleika úr gösun sökum þess hve stutt á veg sú tækni er komin og þær tölur sem hér koma fram eru einungis hugsáðar sem vísbending um framleiðslumöguleika. Það má þó lesa úr þessu að það búa verðmæti í skólpinu.



## 7 Kostnaður og nýtingarmöguleikar

Í þessum kafla verður tekinn saman kostnaður, bæði í fjárfestingu útbúnaðar til niðurbrots í súrefnissnaudu umhverfi og kostnaður við rekstur búnaðarins. Metinn verður kostnaður, bæði við nýtingu seyru eingöngu til metanframleiðslu og einnig við íblöndun fitu og matarúrgangs við seyruna. Stuðst verður við kostnaðarviðmið í öðrum löndum.

Þá verður einnig farið yfir uppsafnað núvirði fjárfestingarinnar yfir 25 ára tímabil, innri vextir fjárfestingarinnar reiknaðir sem og endurgreiðslutími fjárfestingarinnar fyrir mismunandi verð fyrir hvern metanrúmmetra til framleiðanda.

Þá verður í stuttu máli farið yfir hvað framleitt magn metans þýðir í nýtingu, þ.e. hve marga bíla væri hægt að knýja á framleiddu magni metans.

Sömu útreikningum verður, eins og hægt er, beitt á fjárfestingar í gösunarverum til skólpgösunar en þó verður að hafa í huga að mun meiri óvissu gætir um kostnað við fjárfestingu og rekstur í slíku gösunarveri þar sem ekki er til staðar reynsla af slíkum rekstri. Þá verður einnig tekið saman hve stóran bílaflota væri hægt að knýja á því vetni sem hægt er að framleiða úr skólpi á höfuðborgarsvæðinu.

### 7.1 Bakgrunnur, aðferðir og jöfnur fyrir fjármagnsútreikninga

Við útreikninga á arðsemi þessara framkvæmda, sem hér eru til skoðunar, er notast við þekktar aðferðir úr fjármálaútreikningum. Ekki er fullnægjandi að telja einungis krónur og aura með endurgreiðsluáferð (e. payback method) við útreikninga á endurgreiðslu og arðsemi framkvæmda sem þessara en með endurgreiðsluáferð er greiðsluflæði stillt upp yfir tíma án tillits til vaxta eða fjármögnunarkostnaðar. Við venjulega fjárfestingu er því um að ræða mikil útgjöld á ári 0 og síðan greiðsluflæði að nafnvirði fram í tímann, þ.e. hve miklar tekjur fást inn af sölu afurðarinnar.

Til þess að bæta mat á arðsemi verkefna er gjarnan notast við núvirðisútreikninga (e. net present value) en í slíkum útreikningum er gert ráð fyrir fjármögnunarkostnaði og er fjárstreymið núvirt með ákveðnu vaxtastigi. Jafna núvirðis er eftirfarandi:

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+k)^1} + \frac{CF_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+k)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} \quad (7.1)$$

NPV er núvirði, CF er tekjustreymi (e. cash flow) á hverjum tíma  $t$ ,  $n$  er líftími verkefnisins og  $k$  er vaxtastig. Tekjustreymi er vanalega neikvætt á ári 0 enda lagt út í fjárfestinguna á þeim tíma en eftir það ætti tekjustreymi að vera jákvætt. Við núvirðisútreikninga er notast við nettó tekjustreymi, þ.e. tekjur að frádregnum rekstrarkostnaði.

Út frá núvirðisútreikningum er síðan hægt að reikna endurgreiðslutíma verkefnisins, þ.e. hvenær fjárfestingin hefur borgað sig til baka en það gerist á þeim tíma þegar uppsafnað núvirði er orðið núll.

Þessar tvær stærðir gefa ágæta hugmynd um arðsemi verkefnis en önnur aðferð, sem gefur dýpri innsýn í ávöxtun fjárfestingarinnar og er góð til að bera saman mismunandi verkefni, er að skoða innri vexti fjárfestingarinnar (e. internal rate of return, IRR). Það er það vaxtastig sem gefur núvirði upp á 0 í lok líftíma fjárfestingarinnar, þ.e. það vaxtastig sem gefur núvirði framtíðar fjárstreymis jafnt núvirði fjárfestingarinnar, núvirði tekjustreymis = núvirði fjárfestingar. Jafna (7.1) væri þá:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} = 0 \quad (7.2)$$

Af því má sjá að því hærri innri vextir þeim mun arðbærara er verkefnið og getur staðið undir stærri fjárfestingu.

Til þess að gera betur grein fyrir hvaða þættir í fjárfestingunni hafa áhrif á arðsemi verkefnisins er framkvæmd næmnigreining (e. sensitivity analysis). Næmnigreining segir til um hve mikið núvirði fjárfestingarinnar breytist við hlutfallslegar breytingar á einni stærð, t.d. verði eða fjárfestingarkostnaði, á meðan öllum öðrum stærðum er haldið föstum. Næmnigreining er sýnd með beinum línunum þar sem meiri halli táknar meiri áhrif af hlutfallslegri breytingu á viðkomandi kostnaðarlið á núvirði fjárfestingarinnar (Brigham og Houston, 2004).

Í þessari ritsmíð verður notast við núvirði og innri vexti ásamt því að endurgreiðslutími verður fundinn standi verkefnið á annað borð undir sér.

## 7.2 Fjárfestingar- og rekstrarkostnaður, metanframleiðsla

### 7.2.1 Fjárfestingarkostnaður

Við útreikninga á kostnaði við fjárfestingu í lífgasverksmiðju þarf að gera ráð fyrir mörgum ólíkum þáttum. Þar má nefna mismunandi viðverutíma en verði metan einungis unnið úr seyru án íblöndunarefna er óhætt að miða við stuttan viðverutíma eða um 12 daga líkt og í Luzern í Sviss. Sé hins vegar notast við íblöndunarefni þarf að gera ráð fyrir lengri viðverutíma sem kallar á meira gerjunarrými en gefur meiri metanframleiðslu.

Kostnaði við lífgasver má gróflega skipta í tvennt, byggingarkostnað annars vegar og rekstrarkostnað hins vegar. Lífgasver verður hagkvæmara eftir því sem það verður stærra, þ.e. hver rúmmetri í afköstum verður ódýrari. Verði metan unnið úr seyru hér á landi er um að ræða viðbót við núverandi skólphreinsun og þarf því ekki að gera ráð fyrir grunnfjárfestingu í skólphreinsun.



Tafla 7-1: Kostnaður fyrir hvern rúmmetra af gerjunarrými skólphreinsistöðvar og gerjunaraðstöðu miðað við mismunandi fjölda persónueininga (van Haandel, A.C. og van der Lubbe, J.G.M., 2007)

Útbúnaður	25.000 P.E.	50.000 P.E.	100.000 P.E.	200.000 P.E.
<b>Kostnaður á rúmmetra af vinnslugetu í ISK</b>				
<b>Fyrsta stigs settankur<sup>5</sup></b>	68.000 – 102.000	45.000 – 74.000	33.000 – 51.000	23.000 – 40.000
<b>UASB<sup>6</sup></b>	68.000 – 113.000	57.000 – 79.000	40.000 – 57.000	28.000 – 45.000
<b>Loftunartankur<sup>7</sup></b>	25.000 – 34.000	20.000 – 28.000	17.000 – 23.000	14.000 – 19.000
<b>Lokastigs settankur<sup>8</sup></b>	36.000 – 62.000	34.000 – 45.000	28.000 – 37.000	23.000 – 29.000
<b>Seyruþykkjari<sup>9</sup></b>	79.000 – 113.000	57.000 – 90.000	34.000 – 57.000	28.000 – 45.000
<b>Gerjunartankur<sup>10</sup></b>	68.000 – 113.000	51.000 – 79.000	34.000 – 45.000	28.000 – 40.000

Tölur í töflu 7-1 eru uppfærðar til núvirðis til haustsins 2011 og miðast við miðgengi Seðlabanka Íslands þann 23. ágúst 2011 sem var 163,8 ISK fyrir hverja evru. Tölurnar eru námundaðar að næstu 1.000 ISK.

Heildarpersónueiningar (e. personal equivalent) hér á landi eru samtals 467.082 frá bæði Ánanaustum og Klettagörðum miðað við töflu 5-1 og því er horft til hæsta gildis á töflu 7-1.

Hér á landi er nú þegar fyrsta stigs hreinsun á fráveituvatni eins og áður hefur komið fram. Því eru þeir þættir, sem þyrfti að fjárfesta í, loftunartankur, lokastigs settankur, seyruþykkjari og gerjunartankur. UASB er annars konar tækni til gerjunar en hér er gengið út frá því að gerjun fari fram í gerjunartönkum og því er ekki gert ráð fyrir fjárfestingu í UASB útbúnaði hér. Þetta gefur fjárfestingarkostnað á bilinu 93.000 – 133.000 ISK fyrir hvern rúmmetra af vinnslugetu sem er á því bili sem fjárfestingarkostnaður við hreinsunina í Luzern reyndist vera en þar var fjárfestingarkostnaður á hvern rúmmetra um 123.000 ISK.

Hér á þó eftir að gera ráð fyrir fjárfestingu í uppfærslubúnaði. Fjárfestingarkostnaður fyrir búnað sem getur hreinsað 200 – 400 Nm<sup>3</sup>/klst. liggur á svipuðu róli. Fyrir uppfærslubúnað sem afkastar 250 Nm<sup>3</sup> af lífgasi á klukkustund er fjárfestingarkostnaður á bilinu 81.900.000 – 131.040.000 ISK (Beil, M., 2008) og verður stuðst við það viðmið hér.

## 7.2.2 Rekstrarkostnaður

Rekstrarkostnaði er í megindráttum hægt að skipta upp í:

<sup>5</sup> E. primary settler.

<sup>6</sup> UASB stendur fyrir „upflow anaerobic sludge bed reactor“ og er önnur tækni við niðurbrot lífmassa í súrefnissnaudu umhverfi.

<sup>7</sup> E. aeration tank.

<sup>8</sup> E. final settler.

<sup>9</sup> E. sludge thickener.

<sup>10</sup> E. anaerobic digester.

- mannahald og viðhaldskostnað
- almennan rekstrarkostnað (búnað, rekstur skrifstofu, efnagreiningar o.s.frv.)
- tryggingar
- kostnað við loftun og hitun lífmassa við niðurbrot (rafmagn/heitt vatn)
- kostnað við losun úrgangs eftir gerjun

Skólphreinsistöðvar sem vinna lífgas úr seyru eru nokkuð sjálfvirkar og eru því alls ekki mannaflsfræk starfsemi. Sem dæmi um það má nefna að við hreinsistöðina í Luzern voru reiknaðar vinnustundir á dag 0,14 og 3,44 við hreinsistöðina í Bern (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010).

Sex starfsmenn starfa við fráveitu Reykjavíkur. Hafa þeir aðstöðu í hreinsistöðinni í Klettagörðum og sjá um viðhald og sinna bilunartilfellum. Helsti viðhaldspáttur í þeirra starfi er viðhald dælubúnaðar en mikið er um reglubundið viðhald á dælubúnaði (Reynir Sævarsson, 2004).

Kostnaður við hitun kemur til af því að lífmassann þarf að hita upp í viðunandi hitastig til að örverurnar sem vinna á lífmassanum geti þrífist, hvort sem notast er við mesophilic eða thermophilic aðstæður. Orkuþörfin byggir á mörgum þáttum svo sem hitastigi lífmassans þegar hann kemur inn, einangrun í gerjunartönkum o.s.frv. Þó er hægt að styðjast við þau orkuvíðmið sem þekkjast í Bern en það eru 3,4 MWst. á hvert tonn hráefnis (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010) og verður það gert hér.

Viðmið um tryggingu er að hún sé 0,5% af heildarfjárfestingu og þá skal gera ráð fyrir almennum kostnaði við yfirbyggingu rekstrarins upp á 20% af heildarframleiðslukostnaði (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010).

### 7.2.3 Eingöngu unnið úr seyru

#### Fjárfestingarkostnaður

Nærtækast er að horfa til hreinsistöðvarinnar í Luzern til að leggja mat á kostnað og uppsetningu stöðvar sem eingöngu ynni metan úr seyru á höfuðborgarsvæðinu. Til að áætla þörf gerjunarrýmis er horft bæði til stöðvarinnar í Luzern og almennrar jöfnu til útreikninga á gerjunarrými.

Í Luzern var magn þurrefna á rúmmetra af gerjunarrými á dag (e. organic load) 2,9 kg Þ.E./( $m^3 \cdot d$ ) en sveiflast þó frá 1 kg upp í 6 kg. Þ.E./( $m^3 \cdot d$ ) er skilgreining á magni lífrænna þurrefna á hverja einingu gerjunarrýmis yfir tíma, hér kg á hvern rúmmetra á dag en lífræni hluti þurrefna er um 70 – 80% af þurrefnum í seyru (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010) og verður miðað við 80% hér.

Ein leið til að meta stærð gerjunarrýmis er að styðjast við gögnin frá Luzern og nota sama hlutfall gerjunarrýmis og magn þurrefnis. Með því að gera ráð fyrir 7.500 tonn af þurrefnum á dag (sjá kafla 5.1), 3 kg Þ.E./( $m^3 \cdot d$ ), 13 daga viðverutíma og að hlutfall lífrænna þurrefna sé 80% fæst að þörf er á 6.000  $m^3$  gerjunarrými.

Stærð gerjunarrýmis má einnig meta út frá öðrum aðferðum. Þörf er á gerjunarrými sem getur unnið úr hráefni af tegund B en það hráefni getur innihaldið einhverjar sjúkdómsvaldandi bakteríur öfugt við hráefni af tegund A sem er alveg laust við slíka sýkla. Almenn jafna til að reikna út stærð gerjunarrýmis af tegund B er (Hammer, M.J. og Hammer Jr., M.J., 2007):

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2)T_1 + V_2T_2 \quad (7.3)$$

Þar sem  $V$  stendur fyrir heildar gerjunarrými,  $V_1$  fyrir rúmmál seyru til gerjunar á dag,  $V_2$  fyrir uppsafnað rúmmál hráefnis,  $T_1$  fyrir gerjunartíma og  $T_2$  fyrir geymslutíma að gerjun lokinni

Gerjunarrýmið  $V_1$  og  $V_2$  er reiknað út frá magni þurrefna sem reiknað var í kafla 5.1 samkvæmt:

$$V_1 = \frac{p.E.}{1/100} * \frac{1m^3}{10^6g} \quad (7.4)$$

$$V_1 = \left(1 - \frac{SR}{100}\right) \frac{p.E.}{1/100} * \frac{1m^3}{10^6g} \quad (7.5)$$

Þar sem  $SR$  stendur fyrir minnkun þurrefna við gerjun og er almennt viðmið 40% (Hammer, M.J. og Hammer Jr., M.J., 2007).

Ef miðað er við áður reiknað magn þurrefna upp á 7.500 tonn og gert ráð fyrir viðverutíma upp á 15 daga sem viðmið bæði við gerjun og eftirgeymslu en viðverutími í Luzern var 12,8 dagar. Miðað við þessar forsendur er þörf á gerjunarrými upp á tæplega 10.000 m<sup>3</sup>. Hér verður því miðað við að þörf gerjunarrýmis sé 8.000 m<sup>3</sup> eða mitt á milli þessara tveggja aðferða.

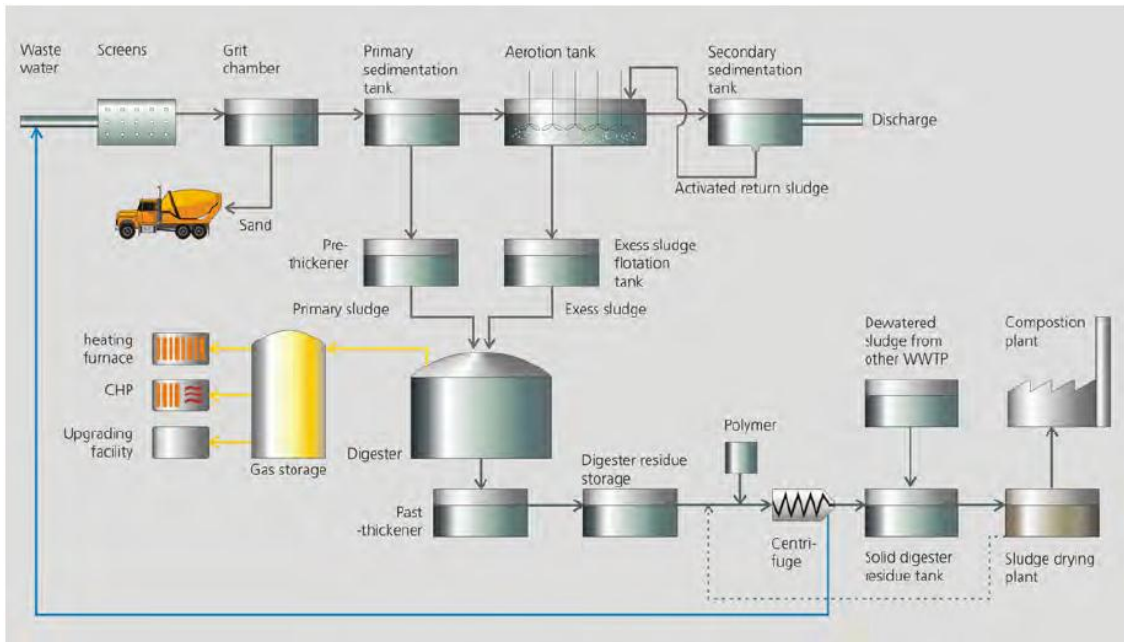
Hér er stuðst við að þörf sé á loftunartanki, lokastigs settanki og gerjunartönkum og notast er við kostnaðarviðmið úr töflu 7-1 sem fengin eru úr skýrslu van Haandel, A.C. og van der Lubbe, J.G.M. frá árinu 2007. Út frá þeim forsendum er fjárfestingarkostnaður í lífgasveri til framleiðslu úr seyru þannig samansettur:

Tafla 7-2: Áætlaður fjárfestingarkostnaður í gerjunarbúnaði fyrir lífgasvinnslu úr seyru á höfuðborgarsvæðinu

Útbúnaður	Kostnaður í milljónum ISK
<b>Loftunartankur</b>	100 – 150
<b>Lokastigs settankur</b>	180 – 240
<b>Seyruþykkjari</b>	230 - 360
<b>Gerjunartankar</b>	230 - 320
<b>Uppfærslubúnaður lífgass</b>	80 – 130
<b>Samtals</b>	820 – 1.200

Í töflu 7-2 má sjá helstu kostnaðarliði í fjárfestingarkostnaði í gerjunarbúnaði fyrir lífgasvinnslu úr seyru og má greina að stærstu kostnaðarliðir eru seyruþykkjari og gerjunartankar en stærð þeirra ræðst af hinu mikla umfangi frárennslis á höfuðborgarsvæðinu.

Ef lítið er á stöðina í Luzern til samanburðar sést glöggjt hver viðbótin við núverandi tækjabúnað í hreinsistöðvum Orkuveitu Reykjavíkur væri miðað við þessa fjárfestingu.



Mynd 7-1: Yfirlitsmynd yfir fráveituvatnsstöð og lífgasvinnslu í Luzern (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010)

Sú fjárfesting sem hér er búið að gera ráð fyrir er ferlið fyrir aftan það sem á mynd 7-1 heitir „Primary sedimentation tank“. Þá er uppfærslubúnaður til hreinsunar lífgass ekki sýndur á mynd en kostnaður við hann er tiltekinn í töflu 7-2 miðað við myndun lífgass upp á 250 – 300 Nm<sup>3</sup> á klukkustund.

Fjárfestingarkostnaður í lífgasverksmiðju og uppfærslubúnaði til vinnslu lífgass úr seyru eingöngu frá höfuðborgarsvæðinu er því 800.000.000 – 1.200.000.000 ISK.

### Rekstrarkostnaður

Stærsti hluti rekstrarkostnaðar kemur til vegna orku til upphitunar á lífmassanum og keyrslu vélbúnaðar. Hér er gert ráð fyrir thermophilic aðstæðum sem þýðir að hita þarf lífmassann upp í um 35°C, það þýðir hitun um 15°C miðað við meðalhitastig fráveituvatns árið 2007. Skólphreinsistöðin í Henriksdal í Svíþjóð vinnur metan úr skólpi og yfir árið reyndist orkunotkun þar vera 2,442 kWst. fyrir hvern rúmmetra af metani og 24,602 kWst. fyrir hvern rúmmetra af hráefni til gerjunar. Það gerir um 90% af orkukostnaði til hitunar (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010).

Miðað við þurefnamagn upp á 7.500 tonn á ári og að vatnshlutfall þess sem leitt er til gerjunar sé 96% þarf að hita 219.000 rúmmetra á ári upp um 15°C, úr 20°C upp í 35°C. Ef reiknað er með orkuþörf til hitunar upp á 3,4 MWst. á hvert tonn eins og í Bern er orkuþörfin

á ári 744.600 MWst. Ef gert er ráð fyrir því að hráefnið verði hitað upp með vatni þarf að reikna út hver vatnsþörfin er. Orkuþörfin er 744.600 MWst. Þá er gert ráð fyrir því að vatnið til framleiðslunnar sé 80°C en það er u.þ.b. hitastigið á heitu vatni til höfuðborgarsvæðisins. Sú orka, sem einn lítri af heitu vatni skilar við það að kólna úr 80°C niður í 35°C, er 189.000 joule eða 53 kWst. Það þýðir að orkuþörf upp á 744.600 MWst. kallar á ríflega 14.000 m<sup>3</sup> af 80°C heitu vatni á ári. Þess má geta að hámarksframleiðslugeta Orkuveitu Reykjavíkur á heitu vatni er 18.380 m<sup>3</sup> á klukkustund og hámarksálag árið 2009 fór í 16.877 m<sup>3</sup> á klukkustund (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. (iii)). Það þýðir að afgangsfra­mleiðslugeta, ef allt árið hefði verið hámarksálag, var 13.166.280 m<sup>3</sup> yfir allt árið. Það er því ljóst að Orkuveita Reykjavíkur býr yfir framleiðslugetu til að svara aukinni eftirspurn eftir heitu vatni verði farið út í lífgasframleiðslu úr seyru.

Miðað við fyrirtækjaverðskrá Orkuveitu Reykjavíkur er verð á rúmmetra af heitu vatni, fyrir árið 2011, 113,88 kr. m.vsk. í þéttbýli (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. (iv)). Það þýðir hitunarkostnað á ári upp á rúmlega 1.600.000 ISK.

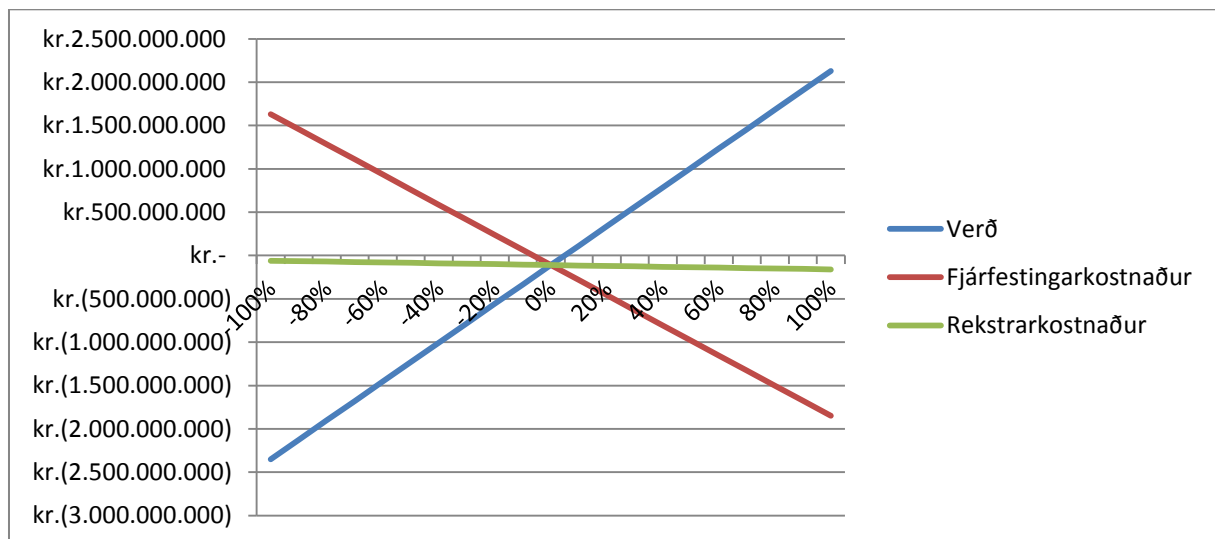
Raforkuþörf er erfiðara að meta. Raforkunotkun lífgasversins í Bern, fyrir utan hitun á hráefni, var 5.404.481,97 kWst. Sá gerjunarbúnaður sem þar er notaður er 18.000 m<sup>3</sup> en sá sem hér er til skoðunar er 8.000 m<sup>3</sup>. Til viðmiðunar er því gert ráð fyrir rafmagnsnotkun upp á 3.500.000 kWst. á ári. Samkvæmt fyrirtækjaverðskrá Orkuveitu Reykjavíkur er verð á kWst. til fyrirtækja fyrir árið 2011 6,1 ISK með virðisaukaskatti (Orkuveita Reykjavíkur, e.d. (v)). Það þýðir raforkukostnað upp á 21.350.000 ISK á ári.

Samkvæmt útreikningum við lífgasvinnsluna í Luzern var annar kostnaður s.s. viðhald og launakostnaður tæplega 7.400.000 ISK en hluti af launakostnaði felst í viðhaldi og yfirbyggingu. Þá skal það einnig tekið fram að hér er um viðbót við rekstur Orkuveitu Reykjavíkur að ræða en rekstrarkostnaður fráveitukerfisins á höfuðborgarsvæðinu var t.a.m. áætlaður 415.000.000 krónur árið 2005 en um áramótin 2005/2006 fluttist starfsemi Fráveitu Reykjavíkur yfir til Orkuveitu Reykjavíkur (Fráveita Reykjavíkur, 2005). Það má ætla að rekstrarkostnaður hafi ekki breyst mikið á þessum tíma þar sem eðli starfseminnar hefur lítið breyst og stendur fráveitugjald undir rekstri núverandi kerfis. Verður því notast við 7.400.000 ISK sem viðunandi nálgun á viðbótarrekstrarkostnaði hér. Breytilegur rekstrarkostnaður er þá námundaður við 30.000.000 ISK. Miðað er við að tryggingar séu 0,5% af heildarfjárfestingu, það gerir tryggingar á ári á bilinu 4.100.000 – 6.000.000 ISK. Þá er að lokum gert ráð fyrir kostnaði við stjórnun og aðra yfirbyggingu og er viðmiðið 20% af heildarrekstrarkostnaði eða 20% af 34.100.000 – 36.000.000 ISK sem gerir 6.820.000 – 7.200.000 ISK á ári. Heildarrekstrarkostnaður á ári er þá á bilinu 41.920.000 – 43.200.000 ISK. Miðað við árlega metanframleiðslu upp á 1.401.600 Nm<sup>3</sup>, eins og hefur verið notað sem viðmið hér, þýðir það framleiðslukostnað upp á 29 - 31 ISK á hvern normal rúmmetra af metani sem unninn er úr seyru.

Tafla 7-3: Áætlaður framleiðslukostnaður metans úr seyru á höfuðborgarsvæðinu

<b>Metanframleiðsla, Nm<sup>3</sup> á ári</b>	<b>1.401.600</b>
<b>Breytilegur kostnaður ISK</b>	
<b>Hítun hráefnis með heitu vatni</b>	1.600.000
<b>Raforkunotkun</b>	21.350.000
<b>Viðhald, efnagreiningar og launakostnaður</b>	7.400.000
<b>Fastur kostnaður ISK</b>	
<b>Tryggingar (0,5% af fjárfestingu)</b>	4.100.000 – 6.000.000
<b>Stjórnun og yfirbygging (20% af rekstrark.)</b>	6.820.000 – 7.200.000
<b>Kostnaður samtals á ári</b>	40.920.000 – 43.200.000
<b>Kostnaður á hvern Nm<sup>3</sup> af metani</b>	29 – 31

Endurgreiðslutími og ávöxtun þessarar fjárfestingar veltur vitaskuld á verði á rúmmetra metans til seljanda sem og vaxtastigi við núvirðisútreikninga. Ef hitaveituvatni og úrkomu yrði veitt í annað aðskilið kerfi flækjast útreikningarnir. Erfitt yrði að segja til um hitastigið á skólpinu þegar það kæmi inn til hreinsunar og frekari vinnslu en hér hefur verið gert ráð fyrir 20°C en það var meðalhiti á skólpi yfir árið samkvæmt mælingum Verkís.



Mynd 7-2: Næmnigreining sem sýnir áhrif breytinga á afurðaverði og fjárfestingar- og rekstrarkostnaði á núvirði fjárfestingar

Mynd 7-2 sýnir hvernig breytingar í ákveðnum þáttum hafa áhrif á núvirði fjárfestingar og eftir því sem línan er brattari þeim mun meiri áhrif á núvirði verkefnisins hefur verðbreyting á þeim þætti. Þannig eru línur fyrir verð og fjárfestingarkostnað mjög brattar sem gefur til kynna sterk áhrif ef þeir þættir breytast. Þannig myndi t.d. 20% hækkun á verði hækka núvirði verkefnisins upp í um hálfan milljarð en miðað var við verð upp á 100 ISK til framleiðanda fyrir hvern rúmmetra metans, 6% vaxtastig og 25 ára líftíma. Nánar er farið í gegnum núvirðisútreikninga í kafla 7.3.

En sökum þess að óvíst er um orkuþörf við metanframleiðslu ef hitaveitu- og regnvatn færu í annað fráveitukerfi og einnig vegna lítilla áhrifa rekstrarkostnaðar á núvirði fjárfestingar

verður ekki reynt að reikna út hver rekstrarkostnaður yrði ef byggt yrði annað fráveitukerfi fyrir hitaveitu- og regnvatn.

#### 7.2.4 Íblöndun annarra efna

Til þess að geta bætt við íblöndun annarra efna þarf fyrst og fremst að stækka gerjunartanka. Ekki þarf að bæta við skólphreinsunina sjálfa en þó þarf að bæta við búnaði sem brýtur niður hráefnið. Þá þarf einnig að gera ráð fyrir lægra hlutfalli lífræns efnis í hvern rúmmetra af gerjunarrými á dag þar sem viðverutími hráfnisins er lengri heldur en þegar eingöngu seyra er látin brotna niður. Í lífgasverksmiðjunni í Bern eru fita og eldhúsúrgangur notuð til íblöndunar. Viðverutími hráfnisins er að meðaltali 27 dagar og hlutfall lífræns efnis á hvern rúmmetra gerjunarrýmis á dag er 1,3 kg. Til samanburðar er það 1,7 í Henriksdal þar sem eldhúsúrgangur er notaður til íblöndunar (Hahn, H. og Hoffstede, U., 2010). Til viðmiðunar verður því stefnt á hlutfall lífrænna efna upp á 1,5 kg á hvern rúmmetra gerjunarrýmis. Lægra hlutfall þeirra verksmiðja sem nýta sér önnur efni til íblöndunar skýrist af lengri viðverutíma. Það þýðir að hvert kg af lífrænu efni er lengur í gerjunartönkum og því lækkar magn lífrænna efna til gerjunar í hverjum rúmmetra gerjunarpláss á dag.

Til þess að ná þessu hlutfalli lífrænna efna niður í 1,5 kg P.E./( $m^3 \cdot d$ ) með seyrinni einni saman þyrfti að auka gerjunarrými upp í 20.000  $m^3$ . Til þess að vinna úr 208.000 kg af fitu og 3.125.000 kg af matarsorpi til viðbótar þarf að stækka gerjunarrými upp í 26.000  $m^3$ .

#### Fjárfestingarkostnaður

Gert er ráð fyrir því að allir þættir fyrir utan stærð gerjunartanka séu óbreyttir frá þeim forsendum sem var reiknað með í tilfelli seyr eingöngu þar sem magn seyr er það sama og áður. Þá er einnig gert ráð fyrir tækjabúnaði til vinnslu á matarafgöngum sem koma til gerjunar, reiknað er með því að kostnaður við hann sé 15% af kostnaði gerjunartanka eins og gert var í skýrslu Hahn, H. og Hoffstede, U.

Tafla 7-4: Áætlaður fjárfestingarkostnaður í gerjunarbúnaði fyrir lífgasvinnslu úr seyr og íblöndun fitu og matarúrgangs á höfuðborgarsvæðinu

Útbúnaður	Kostnaður í milljónum ISK
Loftunartankur	100 – 150
Lokastigs settankur	180 – 240
Seyruþykkjari	230 - 360
Gerjunartankar	740 – 1.000
Vélbúnaður	110 – 150
Uppfærslubúnaður lífgass	80 – 130
Samtals	1.440 – 2.030

Í töflu 7-4 hefur fjárfestingarkostnaður hækkað um ríflega 40% frá því að vinna seyr eingöngu en sú hækkun er eingöngu komin til vegna herra verðs á gerjunarbúnaði og af því að vélbúnaður hefur bæst við til vinnslu á lífrænu hráefni sem bætist við seyrna. Heildarfjárfestingarkostnaður liggur því á bilinu 1.440.000.000 – 2.030.000.000 ISK.

## Rekstrarkostnaður

Til viðmiðunar verður notast við gildi frá lífgasvinnslunni í Bern en þar er meira af íblöndunarefnum notað en hér er til skoðunar. Heitavatsþörf er metin í samræmi við aukið hráefni til gerjunar en orkuþörf til hitunar í Bern var 3,4 MWst. á hvert tonn. Var það haft til viðmiðunar þegar orkuþörf til hitunar var metin. Einnig var raforkuþörf endurmetin með tilliti til aukins hráefnis. Kostnaði vegna viðhalds, efnagreininga og launa var haldið óbreyttum þar sem hann var fenginn úr tölum um verksmiðjuna í Bern. Þar sem þar er um að ræða viðameiri vinnslu en hér er til skoðunar er þeim kostnaði haldið óbreyttum.

Rekstrarkostnaður er þá þannig samsettur.

Tafla 7-5: Áætlaður framleiðslukostnaður metans úr seyru ásamt matarsorpi og fitu til íblöndunar

<b>Metanframleiðsla, Nm<sup>3</sup> á ári</b>	<b>3.000.000</b>
<b>Breytilegur kostnaður ISK</b>	
<b>Hítun hráefnis með heitu vatni</b>	2.600.000
<b>Raforkunotkun</b>	36.600.000
<b>Viðhald, efnagreiningar og launakostnaður</b>	7.400.000
<b>Fastur kostnaður ISK</b>	
<b>Tryggingar (0,5% af fjárfestingu)</b>	7.200.000 – 10.150.000
<b>Stjórnun og yfirbygging (20% af rekstrark.)</b>	10.800.000 – 11.400.000
<b>Kostnaður samtals á ári</b>	64.600.000 – 68.100.000
<b>Kostnaður á hvern Nm<sup>3</sup> af metani</b>	22 - 23

Hér er miðað við metanmyndun upp á 0,28 Nm<sup>3</sup> á hvert kg af lífrænu, niðurbrjótanlegu efni. Það gefur metanframleiðslu á ári upp á 3.000.000 Nm<sup>3</sup> og er það notað sem viðmið í útreikningum en vissulega er fræðileg metanmyndun meiri.

Rekstrarkostnaður reynist því gefa af sér framleiðslukostnað á hvern rúmmetra metans upp á 22 – 24 ISK og er miðað við sama rekstrarkostnað, jafnvel þótt hitaveitu- og úrkomuvatn renni um annað fráveitukerfi, líkt og gert var hér að framan.

## 7.3 Endurgreiðslutími og arðsemi af metanframleiðslu

Taka þarf tillit til nokkurra þátta þegar endurgreiðslutími og arðsemi eru skoðuð. Í fyrsta lagi eru hæsti og lægsti fjárfestingar- og rekstrarkostnaður samkvæmt útreikningum skoðaðir. Einnig er skoðað verð á metani til seljanda og vaxtastig. Nokkrar forsendur voru skoðaðar, bæði fyrir framleiðslu eingöngu úr seyru og einnig fyrir framleiðslu úr seyru, fitu og matarsorpi. Skoðað var 25 ára tímabil.

### 7.3.1 Eingöngu unnið úr seyru

Innri vextir gefa upplýsingar um nafnávöxtun tekjustreymisins, þ.e.a.s. þeir eru sú nafnávöxtun sem gefur núvirði greiðsluflæðis upp á núll. Miðað við þá útreikninga, sem koma fram í kafla 7.2.3, reyndust innri vextir þessarar fjárfestingar vera á bilinu 2,9 – 7,4%. Þá var



miðað við söluverð upp á 100 krónur fyrir hvern rúmmetra af metani. Skoðaðir voru innri vextir fyrir verðbilið 70 – 150 krónur.

Tafla 7-6: Innri vextir fjárfestingar til 25 ára miðað við að metan sé eingöngu unnið úr seyru fyrir verðbilið 70 – 150 krónur fyrir hvern rúmmetra af metani

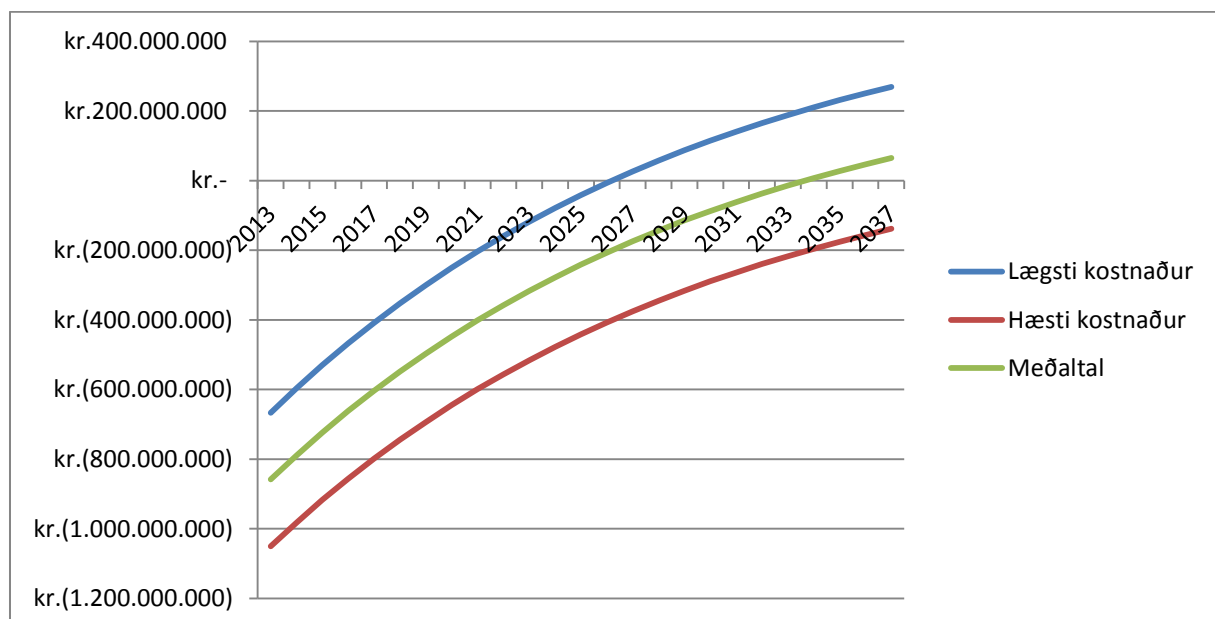
Söluverð fyrir hvern Nm <sup>3</sup> af metani ISK	Innri vextir %
<b>70</b>	-0,9 – 2,7
<b>100</b>	4,7 – 9,6
<b>125</b>	8,5 – 14,8
<b>150</b>	12,2 – 20,2

Eins og tafla 7-6 sýnir geta innri vextir fjárfestingar farið niður í allt að því að vera neikvæðir um 0,9% miðað við að 70 krónur fáið fyrir hvern rúmmetra. Það skal þó haft í huga að verð á metani er lágt hér á landi og á nokkuð örugglega eftir að hækka þegar fram líða stundir.

Við núvirðisútreikninga var miðað við að ár fjárfestingar væri 2013 og tímabilið til 2037 skoðað eða 25 ár eins og kom fram hér að framan. Miðað var við vaxtastig upp á 6% eins og gert er í skýrslu Hahn, H. og Hoffstede, U.

Ef horft er til uppsafnaðs núvirðis miðað við að 100 ISK fáið fyrir hvern rúmmetra af metani kemur í ljós að fjárfestingin er á mörkum þess að borga sig á þeim tíma sem hér er til skoðunar og miðað við efri kostnaðarmörk er endurgreiðslutíminn lengri en 25 ár en tæp 13 miðað við neðri kostnaðarmörk.

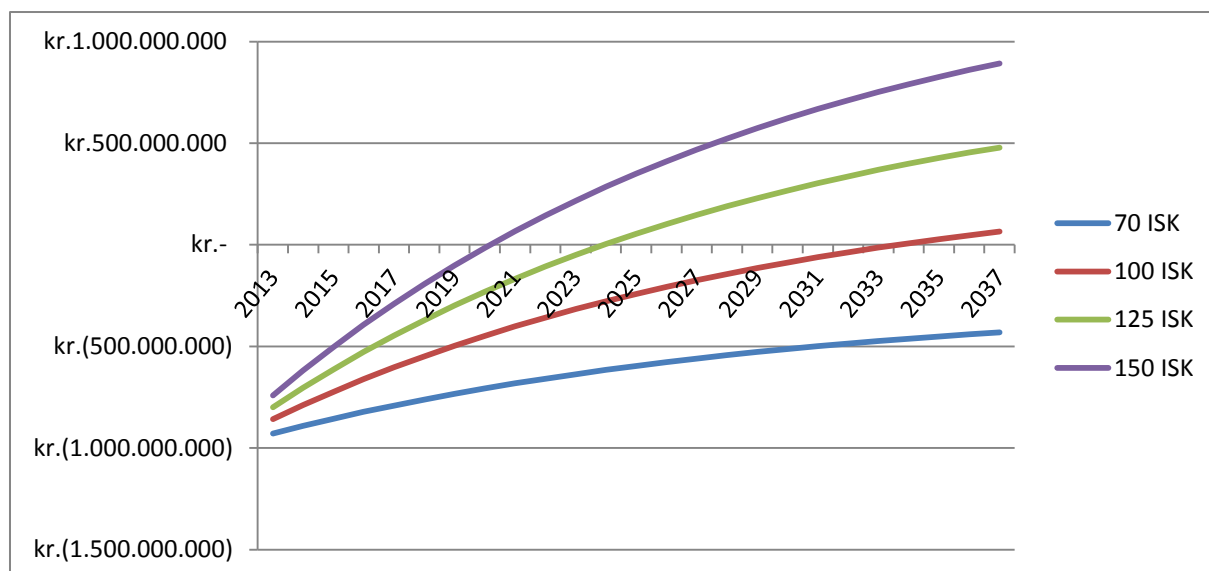
Á mynd 7-3 má greina að uppsafnað núvirði eftir 25 ár er allt frá því að vera neikvætt um 140 milljónir upp í að vera jákvætt um 270 milljónir ISK og innri vextir eru á bilinu 4,7 – 9,6% líkt og fram kemur í töflu 7-8.



Mynd 7-3: Uppsafnað núvirði fjárfestingar í lífgasvinnslu þar sem eingöngu er unnin seyra. Verð til framleiðanda er 100 ISK Nm<sup>3</sup> og vaxtastig 6%

Þá má ennfremur greina af mynd 7-3 að endurgreiðslutími verkefnisins er á bilinu 12 - 30 ár.

Til viðmiðunar er skoðað uppsafnað núvirði fyrir sömu verðgildi og voru til skoðunar í IRR útreikningum. Meðaltöl af efri og neðri kostnaðarmörkum eru til skoðunar miðað við sama verð fyrir hvern rúmmetra af metani til framleiðanda og skoðað var við útreikninga innri vaxta.



Mynd 7-4: Uppsafnað núvirði miðað við meðalfjárfestingar- og rekstrarkostnað þegar eingöngu er unnið metan úr seyru. Verð til framleiðanda er 70 – 150 ISK og vaxtastig 6%

Ljóst er af mynd 7-4 að verð til framleiðanda þarf að fara hátt í 100 ISK fyrir hvern rúmmetra eigi framleiðsla einungis úr seyru að borga sig fjárhagslega. Það skal þó tekið fram að hér er ekki gert ráð fyrir gjaldtöku Orkuveitu Reykjavíkur af rekstri fráveitukerfisins né heldur rekstrarkostnaði sjálfs kerfisins. Hér er einungis til skoðunar lífgasver, starfsemi og arðsemi þess.

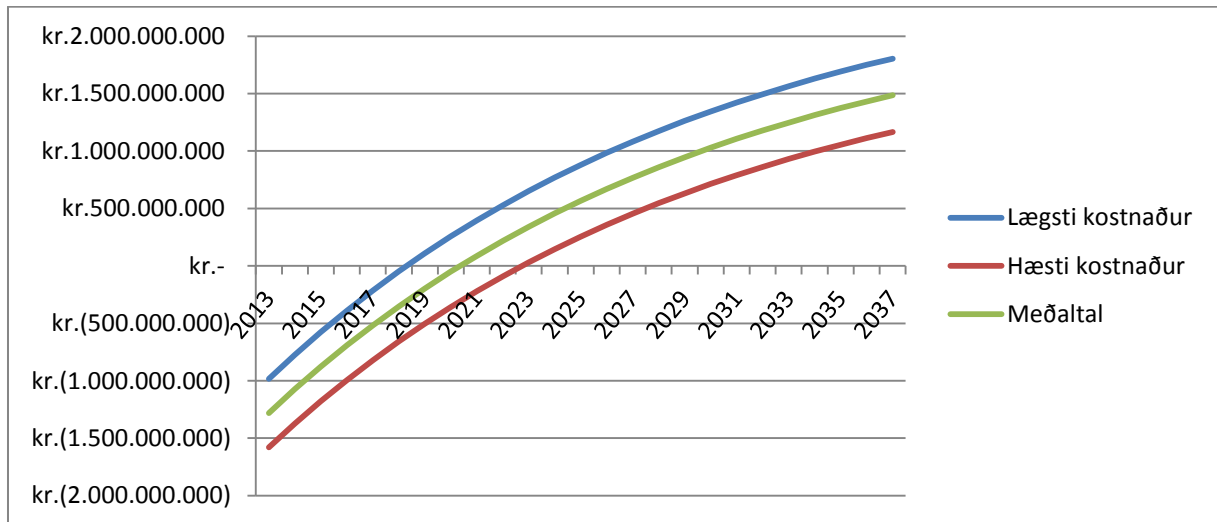
### 7.3.2 Íblöndun annarra efna

Arðsemi af fjárfestingu í lífgasveri sem unnið getur metan úr seyru sem og íblöndunarefnum lítur öllu betur út. Enn er miðað við að framleiddir séu 3.000.000 rúmmetrar af metani úr hráefninu en eins og rakið var að framan er fræðilega möguleg metanmyndun meiri.

Tafla 7-7: Innri vextir fjárfestingar til 25 ára miðað við að metan sé unnið úr seyru, fitu úr fitugildrum og matarúrgangi af höfuðborgarsvæðinu fyrir verðbilið 70 – 150 krónur fyrir hvern rúmmetra af metani

Söluverð fyrir hvern Nm <sup>3</sup> af metani ISK	Innri vextir %
70	5,6 – 10,3
100	12,2 – 19,3
125	17,5 – 27,4
150	23,0 – 36,5

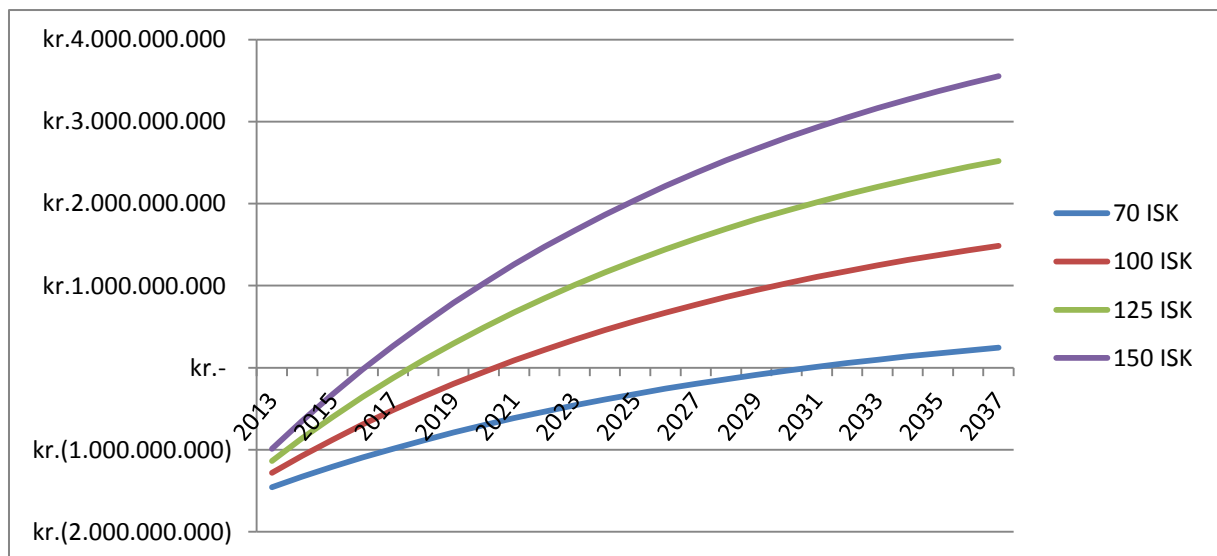
Tafla 7-9 sýnir að hér fást allt upp í 36,5% innri vextir miðað við bestu hugsanlegu aðstæður. Endurgreiðslutími verkefnisins miðað við að framleiðandi fái 100 ISK fyrir hvern rúmmetra af metani er 7 - 11 ár og uppsafnað núvirði á bilinu 1,1 – 1,8 milljarðar ISK .



Mynd 7-5: Uppsafnað núvirði fjárfestingar í lífgasvinnslu þar sem unnin er seyra ásamt fitu úr fitugildrum og matarúrgangi. Verð til framleiðanda er 100 ISK Nm<sup>3</sup> og vaxtastig 6%

Eins og sjá má á mynd 7-5 er uppsafnað núvirði eftir 25 ár og 100 ISK fyrir hvern seldan rúmmetra metans jákvætt fyrir allt kostnaðarbilið og er á bilinu 1,1 – 1,8 milljarðar ISK. Innri vextir eru, eins og greina má af töflu 7-9, á bilinu 12,2 – 19,3%.

Ef skoðað er meðaltal fjárfestingar- og rekstrarkostnaðar fyrir sama verðbil og hér á undan í mynd 7-4 má glöggjt sjá hve miklu arðvænlegri fjárfesting það er að nýta efni til íblöndunar fremur en að vinna metan úr seyru eingöngu, jafnvel þótt meira gerjunarrými þurfi fyrir hvern rúmmetra af hráefni sökum lengri viðverutíma.



Mynd 7-6: Uppsafnað núvirði miðað við meðal fjárfestingar- og rekstrarkostnað þegar unnið er metan úr seyru, fitu úr fitugildrum og matarúrgangi. Verð til framleiðanda er 70 – 150 ISK og vaxtastig 6%

Samanburður á mynd 7-6 og 7-4 annars vegar og mynd 7-3 og 7-5 hins vegar sýnir glögg tve miklu arðbærari fjárfesting íblöndunarverksmiðja er, sömu sögu segja innri vextir. Endurgreiðslutími fjárfestingar lífgasvers sem nýtir ekki íblöndunarefni er allt frá því að vera >30 ár fyrir 70 ISK fyrir Nm<sup>3</sup>, 6% vaxtastig og hæsta fjárfestingarkostnað, niður í að vera rétt rúm 4 ár fyrir 150 ISK fyrir Nm<sup>3</sup> metans, 6% vaxtastig og lægsta fjárfestingarkostnað. Jafnvel þótt aðeins fáist 70 ISK fyrir hvern Nm<sup>3</sup> metans er endurgreiðslutími lífgasvers af þeirri tegund sem nýtir tæp 14 ár við lægsta fjárfestingarkostnað.

Að öllu samanlögðu má ljóst vera að fjárhagslega er það öllu arðbærari fjárfesting að því gefnu að markaður sé fyrir það metan sem framleitt er.

## 7.4 Nýtingarmöguleikar metans

Miðað við metanframleiðslu upp á 1.401.600 Nm<sup>3</sup> annars vegar og 3.000.000 Nm<sup>3</sup> hins vegar er hægt að skoða hvað það er ígildi margra lítra af bensíni og díselolíu og hvað það myndi spara í útblæstri koltvísýrings ef metan yrði brennt í stað bensíns eða díselolíu.

Út frá töflu 2-4 er hægt að reikna þá orku sem losnar við bruna metansins í MWst. Séu 1.401.600 Nm<sup>3</sup> metans brennd losar það 15.577 MWst. en séu 3.000.000 Nm<sup>3</sup> metans brennd losar það 33.341 MWst. Sé þetta umreiknað yfir í jafngildi lítra af bensíni og díselolíu þýðir þetta:

Tafla 7-8: Fjöldi bensín- og dísellítra sem 1.200.000 Nm<sup>3</sup> og 3.000.000 Nm<sup>3</sup> metans jafngilda

Rúmmetrar metans	1.200.000 Nm <sup>3</sup>	3.000.000 Nm <sup>3</sup>
Orkugjafi	Lítrar	
<b>Bensín</b>	1.379.131	3.447.828
<b>Dísel</b>	1.242.889	3.107.223

Í töflu 7-8 er miðað við bruna hreins metans og efra brunagildi allra orkugjafanna.

Samkvæmt verðskrá N1 er verð á einum lítra þann 26. september 2011, bæði af bensíni og díselolíu, 233,9 ISK og verð fyrir hvern rúmmetra metans er 126 ISK með virðisaukaskatti og öðrum gjöldum (N1, e.d.). Ef horft er til þess verðs á þessum orkugjöfum er hægt að umreikna söliverðmæti þess metanmagns sem hér er til skoðunar. Það er, söliverðmæti orkunnar sem fæst úr þessu metanmagni ef þessi orka yrði sótt í bensín eða díselolíu.

Tafla 7-9: Söliverðmæti 1.200.000 Nm<sup>3</sup> og 3.000.000 Nm<sup>3</sup> metans og lítrafjölda bensíns og díselolíu sem gefa jafnmikla orku og það metanmagn sem hér er skoðað. Söliverðmæti með virðisaukaskatti og öðrum gjöldum, ISK

Rúmmetrar metans	1.200.000 Nm <sup>3</sup>	3.000.000 Nm <sup>3</sup>
Orkugjafi	Söliverðmæti ISK	
<b>Bensín</b>	322.600.000	806.447.000
<b>Dísel</b>	290.700.000	726.779.400
<b>Metan</b>	151.200.000	378.000.000

Tafla 7-9 sýnir söluverðmæti orkunnar úr 1.401.600 Nm<sup>3</sup> og 3.000.000 Nm<sup>3</sup> af metani miðað við verð á bensíni, dísel og metani og kemur í ljós að dýrast er að sækja þessa orku í bensín en ódýrast í metan.

Þegar horft er til orkuskipta yfir í vistvænni orkugjafa er gjarnan horft til almenningssamgangna. Í borginni Dehli í Indlandi eru t.a.m. uppi áform um að knýja strætisvagnakerfið með metani sem framleitt verði úr seyru úr fráveitukerfi borgarinnar (Sobhana, K., 2011).

Þegar horft er til þess hve marga bíla hægt væri að knýja með því metani sem framleitt er þarf að taka tillit til þess að t.a.m. strætisvagnar nota mun meira eldsneyti en fólksbílar. Miðað er við að fólksbíl noti 1 kWst./km og að strætisvagn noti 3 kWst./km. Í hverjum rúmmetra metans eru 10,4 kWst. (Luostarinen, S. et al., 2009). Miðað við það er hægt að aka 10,4 km á hverjum rúmmetra metans á venjulegum fólksbíl en 3,5 km á strætisvagni.

Ef miðað er við metanframleiðslu upp á 1.200.000 Nm<sup>3</sup> þýðir þetta akstur fólksbifreiða upp á 12.500.000 km og 4.160.000 km akstur strætisvagna. Fyrir 3.000.000 Nm<sup>3</sup> metanframleiðslu, eins og reiknað var með í tilviki íblöndunar þýðir þetta fólksbílaakstur upp á 31.200.000 km og strætisvagnaakstur upp á 10.400.000 km. Í tilfelli strætisvagna þýðir þetta akstur upp á 6.074.000 km annars vegar og 10.400.000 hins vegar ef framleiddir eru 3.000.000 Nm<sup>3</sup> metans.

Samkvæmt upplýsingum frá Umferðarstofu var meðalakstur bensínknúinnar bifreiðar 12.393 kílómetrar árið 2010 (Umferðarstofa, 2011). Miðað við þann meðalakstur væri hægt að knýja 1.007 bíla á metani sem eingöngu væri framleitt úr seyru og 2.518 bíla ef framleitt væri úr seyru og íblöndunarefnum.

Alengt viðmið á árlegum meðalakstri strætisvagna eru 100.000 km á ári (Luostarinen, S. et al., 2009). Ef miðað er við þann meðalakstur þýðir það að hægt væri að knýja 42 strætisvagna á metani sem eingöngu væri framleitt úr seyru en ef notast væri við íblöndunarefni þýðir það að hægt væri að knýja 104 strætisvagna.

Tafla 7-10: Fjöldi fólksbíla annars vegar og strætisvagna hins vegar sem hægt væri að knýja á 1.200.000 Nm<sup>3</sup> og 3.000.000 Nm<sup>3</sup> af metani á ári hverju

	1.200.000 Nm <sup>3</sup>	3.000.000 Nm <sup>3</sup>
<b>Fólksbílar</b>	1.007	2.518
<b>Strætisvagnar</b>	42	104

## 7.5 Fjárfestingar- og rekstrarkostnaður, gösun

Mun erfiðara er að reikna út kostnaðarliði við gösun skólps þar sem engin raunveruleg reynsla er af slíkum rekstri og því engar skýrslur til líkt og í tilfelli metanframleiðslu úr skólpi. Því verður reynt að slá á kostnað út frá þeim rannsóknum á gösun skólps sem fyrir liggja.

Þó hefur verið slegið mat á fjárfestingar- og rekstrarkostnað bæði vatnsgösunar og plasmagösunar í erlendum fræðigreinum og verður notast við þær forsendur til þess að meta fjárfestingar- og rekstrarkostnað af slíkri starfsemi á höfuðborgarsvæðinu.

Nákvæmari gögn liggja fyrir um kostnað við fjárfestingu og rekstur vatnsgösunarvers heldur en gufugösunarvers. Þar sem tækjabúnaður er svipaður í báðum tilfellum en samkvæmt skýrslum næst mun meira vetni við vatnsgösun vegna hærra vökvainnihalds hráefnisins verða vatnsgösun og plasmagösun skoðuð í þessum útreikningum en þessar tvær aðferðir virðast raunhæfastar til gösunar skólps og gefa af sér mesta vetnismagn af þeim gösunaraðferðum sem til eru.

Það skal þó tekið fram að þær tölur sem hér eru dregnar fram eru mjög gróft mat og eingöngu ætlaðar til þess að fá einhverja mynd á kostnað og arðsemi af gösun skólps. Ef ræða ætti slíkar hugmyndir af einhverri alvöru þyrfti að ráðast í mun víðtækari rannsókn en hér hefur verið gert en eins og áður hefur komið fram er seyrugösunartækni tiltölulega stutt á veg komin og enn á rannsóknarstigi. Auk þess þarf að hafa í huga að gösun krefst meiri þurrkunar á hráefninu en gerjun og því er erfiðara að meta hve mikla afkastagetu þarf til að ná hentugu vökvahlutfalli í hráefninu

### **7.5.1 Vatnsgösun við yfirmarkshitastig**

#### **Fjárfestingarkostnaður**

Í skýrslu Gasafi, E. et. al. frá árinu 2008 var farið yfir þann búnað sem þarf að fjárfesta í til gösunar á svipuðu magni seyru og hér er til athugunar. Þar var þó ekki gert ráð fyrir fjárfestingum í fyrsta stigs settönkum, loftunartönkum og seyruþykkjara eins og var reiknað með í fjárfestingarkostnaði til gerjunar hér að framan, því verður þeim kostnaði bætt við í þeim útreikningum sem hér koma fram.

Þá var kostnaður í skýrslu Gasafi, E. et. al. á verðlagi ársins 2007 í evrum og því hefur verðlag verið fært til nóvember 2011 með verðbólgutölum frá Eurostat (Eurostat, e.d., 2012) og var kostnaður færður yfir í íslenskar krónur á miðgengi evru í nóvember 2011 miðað við skráð gengi á síðu Seðlabanka Íslands sem var 159,55 ISK fyrir hverja evru (Seðlabanki Íslands, e.d. (ii), 2012).

Tafla 7-11: Áætlaður fjárfestingarkostnaður útbúnaðar til vatnsgösunar seyru við yfirmarkshitastig

Útbúnaður	Kostnaður í milljónum ISK
<b>Loftunartankur</b>	100 – 150
<b>Lokastigs settankur</b>	180 – 240
<b>Seyruþykkjari</b>	230 - 360
<b>Gerjunartankar</b>	740 – 1.000
<b>Fæðidæla</b>	18
<b>Háprýstidæla</b>	14,5
<b>Forhitari</b>	140
<b>Ofnforhitari</b>	53
<b>Brennari</b>	105
<b>Loftforhitari</b>	3,6
<b>Gaskæling</b>	26,6
<b>Öskukæling</b>	49
<b>Ofn</b>	9
<b>Vökva/gas skilja</b>	11,7
<b>Gashreinsun (Scrubber)</b>	14,3
<b>Hreinsun (PSA)</b>	64
<b>Affallsdæla</b>	2
<b>Vatnsdæla (f. Scrubber)</b>	5,3
<b>Samtals</b>	1.766 – 2.266

Af töflu 7-11 má ráða að sem fyrr er stærsti kostnaðarliður fjárfestingar í búnaði til hreinsunar og þykkingar á skólpi áður en það er leitt til gösunar en fjárfestingarkostnaður í gösunarbúnaðinum sjálfum er rúmur hálfur milljarður og því er kostnaður í öðru en gösunarbúnaði á bilinu 72 – 78% af heildarfjárfestingarkostnaði. Kostnaðartölur yfir gösunarbúnað hafa verið framreiknaðar miðað við verðbólgu og umreiknaðar yfir í ISK úr EUR og eru námundaðar að næsta 1.000 ISK. Hafa skal í huga að hér er um gróft mat á kostnaði að ræða og var gert ráð fyrir ónákvæmni upp á 20 – 30% í skýrslu Gasafi, E. et. al. og því gildir það sama hér.

Þó er ekki víst að allur þessi búnaður til hreinsunar og þykkingar væri nauðsynlegur ef það skólpi, sem kæmi til meðhöndlunar, væri ekki svo „veikt“, þ.e. ef ekki færi svo mikið af hreinu vatni í fráveitukerfið. Enn fremur þarf hráefnið ekki jafnmikinn undirbúning fyrir gösun og fyrir gerjun, þ.e. það þarf ekki að vera einsleitt og ekki þarf að halda því á stöðugri hreyfingu eins og í tilfelli gerjunar, því má áætla að þessum kostnaði mætti ná verulega niður ef ekki færi svo mikið af hreinu vatni í fráveitukerfið.

Enn fremur skal þó haft í huga að hér er um beinan fjárfestingarkostnað að ræða. Í skýrslu Gasafi, E. et. al. er reiknað með að þegar allt er talið sé fjárfestingarkostnaður um 2,4 milljarðar ISK á verðlagi ársins 2011 en þá er gert ráð fyrir tíma í skipulag og undirbúning og annan tilfallandi kostnað.

## Rekstrarkostnaður

Rekstrarkostnaður er fyrst og fremst vegna „geymslukostnaðar“ (e. carrying charges) sem kemur til vegna hráefnis og afurðageymslu, trygginga, vaxta og annarra slíkra þátta. Annar rekstrarkostnaður kemur til vegna reksturs og viðhalds á búnaði sem og orku sem þarf í ferlið en orka er til þess að gera lítill hluti rekstrarkostnaðar. Rekstrarkostnaður er ástæða þess að gösun skólps hefur ekki þótt samkeppnishæf til vetnisframleiðslu þar sem mun ódýrara er að framleiða vetni með gufubætingu (e. steam reforming) jarðgass (Kalinci, Y. et. al., 2011).

Í skýrslu Gasafi, E. et. al. var gert ráð fyrir rekstrarkostnaði upp á 35,2 EUR fyrir hvert GJ af vetnisorku á verðlagi ársins 2007. Í þeirri tölu er ekki gert ráð fyrir neinum tekjum af hreinsun skólps. Fært yfir á verðlag ársloka 2011 eru það 879 ISK fyrir hvert kílógramm af vetni og verður sú upphæð notuð til viðmiðunar hér.

### 7.5.2 Plasmagösun

Fjárfestingar- og rekstrarkostnað plasmagösunar er enn erfiðara að reikna út heldur en vatnsgösunar þar sem tæknin er mun skemmra á veg komin og minni reynsla til staðar af henni. Því er á litlu öðru að byggja en skýrslu Kalinci, Y. et. al. frá árinu 2011.

Raunar er plasmagösun ekki samkeppnishæf miðað við niðurstöður Kalinci, Y. et. al. vegna þess hve gríðarlega hár rekstrarkostnaður er af plasmagösun en þeirra niðurstaða er að hvert GJ af vetnisorku kosti 208,6 USD en það gera 3.556 ISK miðað við miðgengi USD í lok nóvember 2011 (Seðlabanki Íslands, e.d. (ii), 2012). Því er rannsókn þeirra einungis upphaf frekari rannsókna á þessu sviði og plasmagösun ekki enn raunhæfur möguleiki í meðferð seyru. Þó ætti að fylgjast með framvindu mála á því sviði á næstu árum þar sem stefnan virðist vera á að setja meiri orku í rannsóknir á plasmagösun.

## 7.6 Endurgreiðslutími og arðsemi af gösun seyru

Endurgreiðslutími og arðsemi veltur vitaskuld á því verði sem fæst fyrir vöruna. Verðmyndun á vetni sem ökutækjaeldsneyti hér á landi verður ekki á opnum markaði þar sem einungis er um rannsóknar- og þróunarstarf að ræða. Því er ekki hægt að tala um markaðsverð á vetni.

Því verður horft til verðs á bensíni hér á landi og miðað við að komast sömu vegalengd fyrir sömu upphæð, þ.e. að bensín fyrir 5.000 ISK komi ökutækinu jafnlangt og vetni fyrir 5.000 ISK.

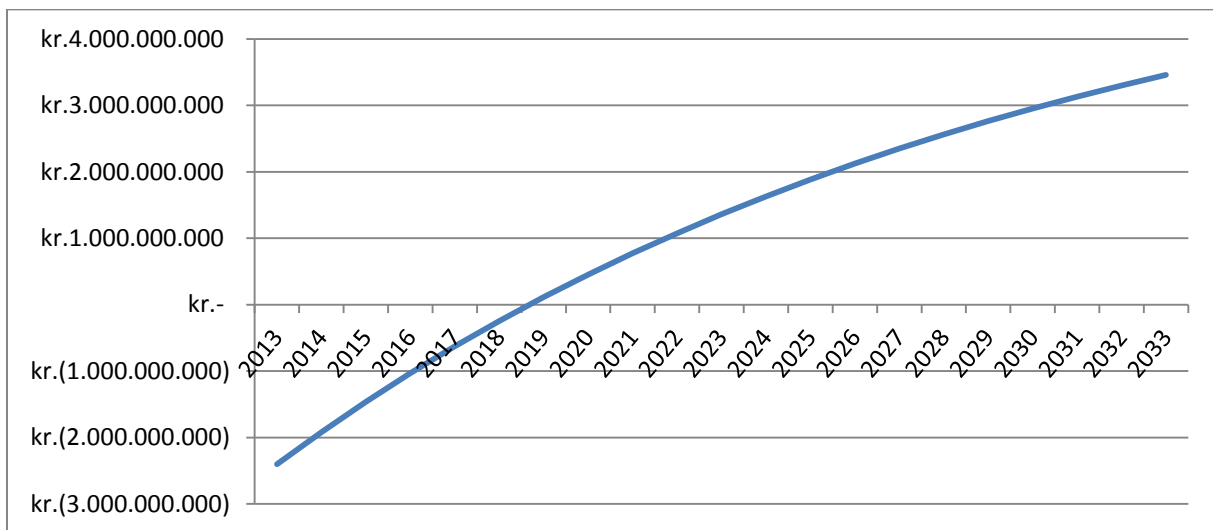
Fram kom í töflu 6-1 að 734 tonn af vetni skila 28.971 MWst. á ári. Það jafngildir 2.988.438 lítrum af bensíni. Söluverðmæti þess bensíns, miðað við 233,9 ISK með skatti fyrir hvern lítra eins og miðað var við hér að framan, er 698.995.592 ISK.

Bensíneyðsla venjulegra bensínbíla er nokkuð breytileg eftir vélstærð, þyngd og aksturslagi. Hér verður miðað við 7 lítra á hverja 100 km sem nálgun en sem dæmi má nefna að vishæfir bílar teljast þeir sem eyða 5 lítrum eða minna á hverja 100 ekna kílómetra (Bílgreinasambandið e.d., 2012) og er þó nokkurt úrval smábíla sem uppfyllir þann flokk, bæði bensín- og díselknúnir. Miðað við það meðaltal væri hægt að aka 42.700.000 km á 2.988.438 lítrum af bensíni. Miðað við slíka eyðslu kostar hver ekinn kílómetri 16,4 ISK í



bensíni. Eigi ekinn kílómetri að kosta það sama á vetnisknúnum bíl er kílóverðið á vetni 1.801 ISK með virðisaukaskatti. Miðað við 25,5% virðisaukaskatt, líkt og getið var um áður, eru þetta 1.435 ISK til framleiðanda fyrir hvert selt kílógramm af vetni. Rekstrarkostnaður er metinn á 879 ISK fyrir hvert vetniskílógramm og því verða eftir 556 ISK til endurgreiðslu á fjárfestingu.

Miðað við 20 ára líftíma vatnsgösunarvers, líkt og gert var ráð fyrir í skýrslu Gasafi, E. et. al. og 6% vaxtastig eins og miðað var við í tilfelli metanframleiðslu, er uppsafnað núvirði af fjárfestingu upp á 2.400.000.000 ISK og sölu á 735 tonnum af vetni, 3.500.000.000 ISK í lok tímabilsins.



Mynd 7-7: Uppsafnað núvirði fjárfestingar í vatnsgösunarverri miðað við framleiðslu upp á 735 tonn á ári, verð 1.435 ISK/kg til framleiðanda og 6% vaxtastig

Á mynd 7-9 hefur verið gengið út frá því að hægt sé að selja allt það vetni sem framleitt yrði en það er engan veginn staðan þegar þetta er ritað og getur heilmargt breyst í þeim forsendum sem hér eru notaðar þegar staðan verður orðin þannig að hægt verði að selja allt það vetni sem framleitt yrði með gösun skólps. En miðað við þessar forsendur má ljóst vera að væri hægt að selja allt það vetni sem væri framleitt úr skólpi gæti slík framkvæmd staðið undir sér og, samkvæmt þessum útreikningum, borgað sig upp á tæpum 6 árum. Miðað við framfarir í gösunartækni má gera ráð fyrir að þessar forsendur batni þegar fram líða stundir.

## 7.7 Nýtingarmöguleikar

Þar sem hér er til skoðunar fyrst og fremst möguleiki til eldsneytisframleiðslu á ökutæki verður kannað hve margar bifreiðar væri hægt að knýja með vetni framleiddu úr skólpi líkt og í tilfelli metans hér að framan.

Sé miðað við blandaðan akstur, 45% þjóðvegi og 55% borgarakstur, er áætluð orkunotkun bifreiðar sem knúin er vetni 129,5 MJ á hverja 100 km (Granovskii, M. et. al., 2006). Það þýðir að á 1 kílógrammi vetnis, sem inniheldur 141,9 MJ, er hægt að aka tæplega 110 km.

Eins og fram kom í kafla 7.4 er meðalakstur fólksbifreiðar 12.393 km á hverju ári. Miðað við þann meðalakstur væri hægt að knýja um 6.500 bifreiðar með því vetni sem hægt væri að framleiða með vatnsgösun seyru á höfuðborgarsvæðinu.

Ef vatnsgösun við yfirmarkshitastig er raunhæfur kostur hér á landi er mögulegt að knýja mun fleiri bifreiðar en með metanframleiðslu..

## 7.8 Samantekt

Sem viðmið er gert ráð fyrir að hver rúmmetri af hráefni í vinnslugetu kosti 93.000 – 133.000 ISK í fjárfestingu. Fjárfestingarkostnaður uppfærslubúnaðar er metinn á bilinu 89.900.000 – 131.040.000 ISK.

Það þýðir að væri einungis unnið úr seyru þyrfti að fjárfesta fyrir 820.000.000 – 1.200.000.000 ISK og væri árlegur kostnaður við rekstur slíkrar stöðvar á bilinu 40.920.000 – 43.200.000 ISK. Miðað við árlega metanframleiðslu upp á 1.200.000 Nm<sup>3</sup> kostar hver rúmmetri 29 – 31 ISK í framleiðslu.

Væri unnið úr seyru, fitu úr fitugildrum og matarúrgangi af höfuðborgarsvæðinu væri fjárfestingarkostnaður 1.400.000.000 – 2.030.000.000 ISK og rekstrarkostnaður 64.600.000 – 68.100.000 ISK. Það gerir framleiðslukostnað á hvern rúmmetra metans upp á 22 - 23 ISK.

Endurgreiðslutími fjárfestingar í lífgasverksmiðju sem eingöngu ynni úr seyru er á bilinu 11 - 20 ár miðað við að framleiðandi fái 100 ISK fyrir hvern rúmmetra metans og 6% vaxtastig. Innri vextir fjárfestingarinnar eru á bilinu 1,5 – 25,9% miðað við 25 ár og verðbilið 70 – 150 ISK fyrir hvern rúmmetra metans.

Ef unnið yrði úr íblöndunarefnum með seyru er endurgreiðslutíminn 7 – 11 ár miðað við 100 ISK fyrir hvern rúmmetra metans til framleiðanda og 6% vaxtastig. Innri vextir fjárfestingar til 25 ára liggja á bilinu 5,6 – 36,5% fyrir verðbilið 70 – 150 ISK á hvern rúmmetra metans til framleiðanda. Fjárfesting í búnaði sem gæti unnið bæði seyru og íblöndunarefni við lengri viðverutíma er því álitlegri fjárfesting en báðir kostir bjóða upp á lágan framleiðslukostnað metans en fjárfesting er dýr.

Sé miðað við meðalakstur fólksbifreiða upp á 12.393 km á ári og meðalakstur strætisvagna upp á 100.000 km á ári þýðir það að það metan sem hægt væri að framleiða úr seyru gæti knúið 1.007 fólksbíla á ári hverju og 42 strætisvagna en væri framleitt bæði úr seyru og íblöndunarefnum væri hægt að knýja 2.518 fólksbíla og 104 strætisvagna á hverju ári.

Erfiðara er að reikna út kostnað við fjárfestingu og rekstur í gösunarveri þar sem engin reynsla er af gösun skólps og rannsóknir til þess að gera stutt á veg komnar. Þó benda útreikningar til að fjárfesting í vatnsgösunarveri myndi vera um 2,4 milljarðar og að rekstrarkostnaður yrði um 879 ISK fyrir hvert kílógramm vetnis sem framleitt yrði. Rekstrarkostnaður plasmagösunarvers yrði, samkvæmt rannsóknnum, um 3.556 ISK fyrir hvert kílógramm vetnis og er það langt frá því að borga sig. Vatnsgösun gæti þó staðið undir sér miðað við að verð fyrir hvert kílógramm vetnis væri um 1.435 ISK til framleiðanda en með virðisaukaskatti væri verð á kg 1.801 ISK og miðað við það verð er hægt að aka jafnlangt fyrir sömu upphæð, hvort

sem bifreiðin er knúin bensíni eða vetni, miðað við að verð á hverjum bensínlítra sé 233,9 ISK eins og miðað hefur verið við í þessari ritgerð. Það þýðir endurgreiðslutíma vatnsgösunarvers upp á tæp 6 ár miðað við 6% vaxtastig og uppsafnað núvirði upp á 3.500.000.000 ISK miðað við 20 ára líftíma. Það skal þó haft í huga að það miðast við að hægt sé að selja allt vetnið á eldsneytismarkaði.

Miðað við meðalakstur fólksbifreiða up á 12.393 km á ári væri hægt að knýja um 6.500 bifreiðar með því vetni sem hægt væri að framleiða með vatnsgösun seyru á höfuðborgarsvæðinu..

Fjárfesting í lífgasveri sem vinnur metan úr seyru er því á mörkum þess að borga sig miðað við núverandi fráveitukerfi og verður að teljast líklegt að aðrir framleiðslukostir séu fýsilegri í nánustu framtíð, standi til að auka metanframleiðslu..

Vetnisframleiðsla úr skólpi með gösun lofar góðu en tæknin er þó ekki nógu langt á veg komin til þess að hægt sé að taka ákvörðun um slíka vinnslu á þessu stigi málsins. Það er þó kostur sem vert er að fylgjast með í framtíðinni.



## 8 Umræða

Af þessari samantekt má ráða að framleiðsla metans úr skólpi getur verið fýsilegur kostur ef miðað er við að verð til framleiðanda fari ekki undir 100 ISK, þ.e.a.s. sé horft til þess magns sem fræðilega væri hægt að vinna úr lífrænum hluta skólps. Það verður þó að teljast fremur lítil arðsemi af slíku verkefni. Sem stendur er metan töluvert ódýrara en venjulegt eldsneyti á bíla en það verður þó að teljast nær öruggt að metan muni hækka í verði þegar fram líða stundir. Standi vilji til þess að skipta yfir í innlenda, umhverfisvæna orkugjafa á samgöngutæki er metan álitlegur kostur sem einn af nýjum orkugjöfum, ásamt rafmagni, vetni og lífdísil. Til þess að hinn almenni neytandi sjái hag sinn í því að skipta um orkugjafa þarf að vera skýr stefna til framtíðar í orkumálum.

Gösun seyru til vetnisframleiðslu getur verið aðlaðandi kostur til nýtingar skólps. Tæknin er til staðar en ekki er komin reynsla á að nota seyru sem hráefni til gösunar og þróun enn á tilraunastigi. Framleiðsla vetnis með vatnsgösun við yfirmarkshitastig er vænlegasta gösunaraðferð seyru miðað við rekstrarkostnað og nýtingu hráefnis. Verðlag á vetni miðaðist við að það yrði notað sem ökutækjaeldsneyti og væri þannig samkeppnishæft við bensín í verði. Eigi að fara út í slíka framleiðslu þarf fyrst að vera markaður til staðar fyrir vetnið sem ökutækjaeldsneyti en slíkt er ekki raunin þegar þetta er ritað.

Það skal haft í huga að hér var ekki tekið fyrir landrými sem þarf til þeirra framkvæmda sem hér voru til skoðunar. Vinnsla sem þessi þarf þó nokkurt landrými en það er af skornum skammti í kringum dælustöðvar Orkuveitu Reykjavíkur. Einnig eru dælustöðvarnar tvær og tæpir 4 km á milli þeirra í beinni loftlínu en í þessu ritverki var gert ráð fyrir því að vinnsla og hreinsun færi öll fram á einum stað.

Nokkrir óvissuþættir eru í þeim útreikningum sem hefur verið farið í gegnum hér og er rétt að slá nokkra varnagla. Heitavatnspörf við metanframleiðslu er metin eftir viðmiðunarorkuþörf þess að hita einn rúmmetra hráefnis um eina gráðu og þeirri varmaorku sem vatn skilar. Þá er óvíst hve mikil metanmyndun yrði í raun á hvert kg þurrefnis. Hér var stuðst við reynslu erlendis frá til þess að reikna út hver metanmyndunin yrði en líklega þyrfti að gera tilraunir með það skólpi sem fer í gegnum hreinsistöðvar Orkuveitu Reykjavíkur til að rannsaka betur metanmyndunarmöguleika skólps hér á landi. Þörf fyrir gerjunarrými var reiknuð út með tveimur aðferðum og var stuðst við miðgildi úr þeim aðferðum en frávikið er um 20%. Enn meiri óvissa er á bak við útreikninga á framleiðslumöguleikum vetnis með gösun enda er engin reynsla komin á gösun seyru og hún enn á rannsóknarstigi. Þó lofar sú tækni góðu, sérstaklega ef stefnan hér á landi er að nýta vetni sem eldsneyti á bifreiðar eða í annan efnaiðnað en líkt og fram kemur í mynd 2-8 eru margar leiðir færar í nýtingu efnasmíðagass.

Auk þess er mjög sterk árstíðasveifla í flæði um fráveitukerfið og þrefaldast rennsli yfir vetrarmánuðina. Sú aukning er komin til vegna aukinnar notkunar á heitu vatni til húshitunar og því eingöngu um að ræða hreint vatn sem bætist við. Það gerir framkvæmdina ekki aðeins

dýrari heldur eykst einnig óvissa um hve mikið metan hægt yrði að framleiða úr hráefninu eftir því sem skólpið er veikara, þ.e. hlutfall vatns er hærra.

Í útreikningum við fjárfestingarkostnað var stuðst við alþjóðleg viðmið og verðlag leiðrétt fyrir gengi og verðbólgu þar sem þess gerðist þörf. Þó má gera ráð fyrir einhverjum tilkostnaði til viðbótar við þann sem hér er talinn vegna flutninga og annarra þátta sem hækka oft fjárfestingarkostnað á Íslandi. Þá er einnig vert að hafa í huga óvissu vegna gengisþróunar hér á landi.

Sé borin saman orkuframleiðsla með gerjun annars vegar og gösun hins vegar kemur í ljós að mun meiri orka fæst úr því metani sem unnt er að framleiða úr seyru og íblöndunarefnum en vetni nema með vatnsgösun við yfirmarkshitastig. Eftir sem áður er hægt að knýja mun fleiri bifreiðar með því vetni sem hægt væri að framleiða með vatnsgösun heldur en metani.

Einkenni þess að ráðast í þessar framkvæmdir er hár fjárfestingarkostnaður en lágur rekstrarkostnaður. Til þess að það borgi sig að fara út í þessar framkvæmdir þarf því að vera skýr stefna til lengri tíma um orkumál hér á landi. Eftirspurn eftir metani má ekki vera of háð óvissu. Hér hefur þó einungis verið skoðaður beinn fjárhagslegur ávinningur af því að nýta seyru á höfuðborgarsvæðinu til framleiðslu metans, efnasmíðagass eða vetnis. Hvorki er hér fjallað með beinum hætti um umhverfisávinning þess að nýta hreint eldsneyti á farartæki né heldur gjaldeyrissparnað sem næst með því að nýta innlent eldsneyti. Þetta eru eigi að síður veigamiklir þættir sem skipta máli þegar orkustefna til framtíðar er rædd.

Það hve veikt skólpið er sökum gríðarlegrar ferskvatnsnotkunar gerir þessa framkvæmd dýrari í fjárfestingu en sambærilegar lífgasverksmiðjur erlendis. Hér þarf meira gerjunarrými fyrir sama magn lífrænna efna og sama viðverutíma sökum veikleika skólpsins sem aftur dregur úr fýsileika þessarar aðferðar hér á landi.

Það er mat höfundar að heppilegt væri að minnka það magn af hreinu vatni sem rennur í fráveitukerfi höfuðborgarsvæðisins áður en farið er í framkvæmdir til þess að nýta skólpið. Fyrsta skrefið í þá átt gæti verið að tvöfalda allt fráveitukerfið þannig að ekkert regnvatn renni um skólphreinsistöðvarnar. Við það myndu toppar í flæði um hreinsistöðvarnar minnka og meðaltalsrennsli einnig. Við það að minnka meðaltalsrennsli um hreinsistöðvar Orkuveitunnar myndi fjárfestingarkostnaður í þeim verkefnum sem hér voru til skoðunar lækka til muna en stór hluti fjárfestingarkostnaðar kemur til vegna tanka og þykkjara sem þurfa að vera færir um að vinna úr öllu þessu flæði. Annað skref gæti síðan verið það að ganga þannig frá málum að hitaveituvatn renni ekki í gegnum hreinsistöðvar.

Betri hreinsun skólps er umhverfislegur ávinningur sem ekki hefur verið tekinn sérstaklega fyrir hér í þessari ritgerð. Víða erlendis er það lífgas, sem myndast við niðurbrot á seyru, notað til þess að knýja skólphreinsistöðvar og tilgangurinn með niðurbrotinu frekar að minnka umfang og hreinsa skólps. Það er því ljóst að um meiri ávinning er að ræða en bara fjárhagslegan ávinning af sölu metaneldsneytis og þarf að vega og meta þá þætti þegar ákvörðun verður tekin um hvort eigi að nýta skólps til metanframleiðslu eða ekki.

Verði tekin ákvörðun um það að framleiða metan úr seyru standa eftir fleiri þættir sem vert er að skoða. Ekki var horft til þess í þessari ritgerð að nýta seyru sem áburð en þó er verið að skoða erlendis hvort nýta mætti það sem eftir situr eftir gerjun sem áburð. Til þess þarf þó að kanna frekar þungmálmáinnihald og efnasamsetningu til þess að kanna hvort hráefnið henti sem áburður. Horfa þarf til félagslegra þátta ef nota á seyru sem áburð en það mætti hugsa sér að hægt væri að nýta seyru sem áburð á orkuþlöntur, s.s. repju, sem ekki eru ætlaðar til manneldis heldur til eldsneytisframleiðslu. Einnig mætti rannsaka fýsileika þess að metanvæða strætisvagnaflokkann á höfuðborgarsvæðinu, hvort sem metanið yrði framleitt úr seyru eða ekki.

Það er ljóst að um gríðarlega fjárfestingar er að ræða komi til þess að eldsneyti verði unnið úr seyru. Til að réttlæta slíka fjárfestingu þarf að vera ljóst hvert markaðurinn hér á landi stefnir á næstu árum og áratugum. Er það mat höfundar að ekki sé ráðlegt að ráðast í þessar framkvæmdir fyrr en markaðsaðstæður og framtíðarstefna verða skýrari, fráveitukerfi hefur verið tvöfaldað þannig að regnvatn, snjóleysingar og jafnvel hitaveituvatn renni ekki um hreinsistöðvar og gösunartækni er lengra á veg komin. Það er því vert að fylgjast með framþróun á tækni við gösun seyru á næstu árum.

Raunhæfast er að horfa til eldsneytisframleiðslu úr seyru. Annaðhvort framleiðslu metans með súrefnissnauðu niðurbroti eða framleiðslu vetnis eða efnasmíðagass með gösun. Notkun seyru sem áburðar er á undanhaldi í heiminum sökum þungmálmáinnihalds og félagslegra hindrana. Bruni seyru til framleiðslu rafmagns og hita er óraunhæf aðferð hér á landi þar sem framleiðsla bæði rafmagns og hita telst umhverfisvæn og ódýr með nýtingu fallvatna og jarðvarma.

Í inngangi voru settar fram þrjár rannsóknarspurningar og markmið.

- 1. Hve mikið væri hægt að framleiða af eldsneyti úr seyru hér á landi og hvað myndi slík framleiðsla kosta?*

Í tilfelli metanframleiðslu með súrefnissnauðu niðurbroti er hægt að framleiða um 1.200.000 Nm<sup>3</sup> á ári ef eingöngu er framleitt úr lífrænum hluta skólps en sé tekin upp flokkun á lífrænum úrgangi á höfuðborgarsvæðinu og fita úr fituskiljum í fráveitukerfinu einnig nýtt til metanframleiðslu væri hægt að framleiða um 3.000.000 Nm<sup>3</sup> metans á ári. Kostnaður við slíka framleiðslu, sé eingöngu unnið úr seyru, er á bilinu 820 – 1.200 milljónir ISK og borgar sig upp á 12 – 40 árum miðað við 6% vaxtastig og söluverð til framleiðanda upp á 100 ISK fyrir hvern Nm<sup>3</sup> metans. Með möguleika á íblöndun er fjárfestingarkostnaður á bilinu 1.400 – 2.030 milljónir króna en sökum aukinnar framleiðslu er endurgreiðslutíminn í kringum 10 ár miðað við 6% vaxtastig og söluverð til framleiðanda upp á 100 ISK á rúmmetrann.

Eitt einkenni metanframleiðslu með gerjun er lágur rekstrarkostnaður en hann er á bilinu 22 – 31 ISK fyrir hvern rúmmetra metans eftir því hvort framleitt er með íblöndun eða ekki.

Framleiðslumöguleikar með gösun seyru eru aftur á móti mun óljósari sökum þess hve stutt á veg sú tækni er komin. Þó má ráða, út frá þeim rannsóknum sem nú þegar liggja fyrir, að hægt væri að framleiða allt að 735 tonn af vetni árlega úr seyru með vatnsgösun við

yfirmarkshitastig. Ef markaður er fyrir vetni hins vegar getur slík framleiðsla borgað sig upp á um 5 árum ef verð á vetni er svipað og fyrir bensín, þ.e. ef hver ekinn kílómetri kostar svipað hvort sem bensín eða vetni er nýtt sem orkugjafi. Allir slíkir útreikningar, þ.e. hve mikið er hægt að framleiða með gösun og hvað slíkt myndi kosta, eru þó gríðarlega mikilli óvissu háðir og þyrfti að fara í mun ítarlegri rannsóknir en hér var kostur til þess að reikna út framleiðslumöguleika og kostnað með meiri nákvæmni. Það er þó full ástæða til að fylgjast með tæknipróun í gösun seyru þar sem mikil þróun virðist vera í slíkri tækni.

2. *Samsetning líkans með aðhvarfsgreiningu sem greinir skólþ í heitt og kalt vatn ásamt úrkomu og einnig samsetning líkans sem spáir fyrir um notkun á heitu vatni út frá hitastigi.*

Heitt vatn er meirihluti þess sem flæðir um fráveitukerfi höfuðborgarsvæðisins samkvæmt greiningum. Flæði um fráveitukerfið sveiflast í takt við sveiflur í notkun á heitu vatni en notkun á köldu vatni er nokkuð stöðug árið um kring. Heitt vatn er á bilinu 60 – 80% þess vatns sem OR selur á höfuðborgarsvæðinu en kalt vatn er um 20 – 40%, allt eftir hitastigi. Ekki skilar allt vatn sér út í fráveitukerfið og má lýsa flæði um fráveitukerfið með jöfnunni:

$$\text{Frárennsli}_t = 0,7KV_t + 0,8HV_t + 37Ú_t$$

Frárennsli er í lítrum á sekúndu, sem og kalt vatn (KV) og heitt vatn (HV), en úrkoma (Ú) er mæld í millimetrum á sólarhring. Þannig eykur notkun á köldu vatni um 1 lítra á sekúndu frárennslið um 0,7 lítra á sekúndu og á heitu vatni um 0,8 lítra á sekúndu. Notkun á heitu vatni eykst síðan um 107 lítra á sekúndu ef hitastig fellur um 1°C.

3. *Hve mikið væri hægt að minnka umfang fráveituvatns ef úrkoma og hitaveituvatn yrði leitt í annað kerfi og þar með ekki í gegnum skólphreinsistöðvar ásamt áhrifum þess á kostnað við nýtingu skólps?*

Miðað við varlegt mat og útkomur úr aðhvarfsgreiningum yrði meðalnotkun yfir sólarhringinn á heitu vatni við 20°C lofthita um 750 lítrar á sekúndu en þá er gert ráð fyrir því að ekkert sé selt til hitaveitu. Ef hitaveitu- og úrkomuvatn myndi þannig renna um aðskilið fráveitukerfi yrði rennsli um hreinsistöðvar OR rétt rúmlega 1.000 lítrar á sekúndu árið um kring og heildarrennsli yfir árið um 33,5 milljón rúmmetrar í stað þess að vera 66 milljón rúmmetrar eins og staðan er nú. Auk þess yrði rennslið stöðugt, sama hver árstíðin er, í stað þess að ríflega þrefaldast yfir köldustu mánuðina líkt og gerist nú.

Nýting skólps til eldsneytisframleiðslu er, að öllu samanlögðu, kostur sem ætti að halda opnum þótt ekki verði ráðist í slíka vinnslu á allra næstu misserum.



# Heimildaskrá

Ásdís Gísladóttir (2012). *Ársskýrsla Orkuveitu Reykjavíkur*. Reykjavík: Orkuveita Reykjavíkur

Beil, M. (2008). *Biogas upgrading to biomethane: Biogasaufbereitung – eine Einführung*. Þýskaland: Institut für Solare Energieversorgungstechnik.

Beil, M. og Hoffstede, U. (september 2010). *Guidelines for the implementation and operation of biogas upgrading systems*. Berlín, Þýskaland: Fraunhofer.

Bílgreinasambandið, (e.d.). *Visthæfir bílar*. Sótt 25. janúar 2012 af: [http://www.bgs.is/visthaefir\\_bilar/](http://www.bgs.is/visthaefir_bilar/)

Biogasmax, (e.d.). *The project; A European project for sustainable development*. Sótt 12. júlí 2011 af: <http://biogasmax.eu/biogasmax-project-biogas-and-biofuel/biogas-and-biofuel-for-sustainable-developpement.html>.

Birgir Tómas Arnar og Snorri Þórisson (febrúar 2011). *Skólphreinsistöðvar: Sýnataka og mælingar, árleg yfirlitsskýrsla 2010 Reykjavík*. Reykjavík: Verkís/Orkuveita Reykjavíkur.

Björn H. Halldórsson, Guðmundur Ólafsson, Gunnar Herbertsson og Teitur Gunnarsson (2006). *Orkuþing 2006: Framleiðsla metans – innlend orka, aukin tækifæri*. Reykjavík: Samorka.

Boerrigter, H. og Rauch, R. (2005). *Review of applications of gases from biomass gasification*. Holland: Biomass Technology Group (BTG).

Brigham, E.F. og Houston, J.F. (2004). *Fundamental of financial management*. Bandaríkin: South – Western.

Bureau of Labor Statistics (e.d.) (2011). *Table containing history of CPI – U U.S. All items indexes and annual percent changes from 1913 to present*. Sótt 4. október 2011 af: <ftp://ftp.bls.gov/pub/special.requests/cpi/cpiiai.txt>.

Carrère, H., Rafrafi, Y., Battimelli, A., Torrijos, M., Delgenès, J.P. og Ruyschaert, G. (2010). *Methane potential of waste activated sludge and fatty residues: Impact of codigestion and alkaline pretreatments*. Frakkland: Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement.

Davidsson, Å., Gruvberger, C., Christensen, T.H., Hansen, T.L., Jansen, J.C. (2006). *Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste*. Lyngby, Danmörk: Technical University of Denmark.

Davidsson, Å., Löstedt, C., la Cour Jansen, C., Gruvberger, C., og Aspegren, H. (2008). *Codigestion of grease trap sludge and sewage sludge*. Lund, Svíþjóð: Lund University.

Demirbaş, A. (2000). *A direct rout to the calculation of heating values of liquid fuels by using their density and viscosity measures*. Tyrkland: Karadeniz Technical University.

Domínguez, A., Menéndez, J.A., Inguanzo, M. og Pís, J.J. (2006). *Production of bio – fuels by high temperature pyrolysis of sewage sludge using conventional and microwave heating*. Spánn: Instituto Nacional del Carbón (INCAR).

Doorn, M.R.J., Towprayoon, S., Vieira, S.M.M., Irving, W., Palmer, C., Pipatti, R. og Wang, C. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wastewater treatment and discharge (volume 5, chapter 6)*. Japan: Institute for Global Environmental Strategies.

Dry, M.E. (2002). *The Fischer – Tropsh process: 1950 – 2000*. Suður Afríka: University of Cape town.

Eurostat, e.d. (2012). *Measuring inflation: The harmonised index of consumer prices (HICP) – annual percentage changes*. Sótt 23. janúar 2012 af:  
[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/inflation\\_dashboard/](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/inflation_dashboard/)

Fráveita Reykjavíkur (2005). *Starfsáætlun 2005*. Reykjavík: Reykjavíkurborg.

Fytili, D. og Zabaniotou, A. (2006). *Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review*. Grikkland: Aristotle University of Thessaloniki.

Gasafi, E., Reinecke, M.Y., Kruse, A. og Schebek, L. (2008). *Economic analysis of sewage sludge gasification in supercritical water for hydrogen production*. Þýskaland: Institute for Technical Chemistry.

Gashighway, (e.d. (i)). *Gashighway*. sótt 12. júlí 2011 af  
<http://www.gashighway.net/default.asp?SivuID=25922>.

Gísli Sverrisson (2011). *Breytingar á bensínbílum í metan/bensínbíla*. Viðtal tekið í Reykjavík, 13. maí 2011.

Granovskii, M., Dincer, I. og Rosen, M.A. (2006). *Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles*. Bandaríkin: University of Ontario Institute of Technology.

Groß, B., Eder, C., Grziwa, P., Horst, J. og Kimmerle, K. (2007). *Energy recovery from sewage sludge by means of fluidised bed gasification*. England: Elsevier.

Göransson, Kristina., Söderlind, Ulf., He, Jie og Zhang, Wennan (2010). *Review of syngas production via biomass DFBGs*. Svíþjóð: Mid Sweden University.

Hagstofa Íslands (e.d. (i)) (2011). *Innflutningur nokkurra vörutegunda eftir mánuðum 1999 – 2011*. Sótt 2. ágúst 2011 af:  
[http://hagstofa.is/?PageID=2601&src=/temp/Dialog/varval.asp?ma=UTA03201%26ti=Innflutningur+nokkurra+v%F6rutegunda+eftir+m%E1nu%F0um+1999%2D2011%26path=../Database/utanrikisverslun/Innflutningur/%26lang=3%26units=Einingar/Tonn/CIF milljónir króna](http://hagstofa.is/?PageID=2601&src=/temp/Dialog/varval.asp?ma=UTA03201%26ti=Innflutningur+nokkurra+v%F6rutegunda+eftir+m%E1nu%F0um+1999%2D2011%26path=../Database/utanrikisverslun/Innflutningur/%26lang=3%26units=Einingar/Tonn/CIF+milljónir+króna).

Hagstofa Íslands (e.d. (ii)) (2011). *Orkumál*. Sótt 4. ágúst 2011 af:  
<http://hagstofa.is/?PageID=672&src=/temp/Dialog/varval.asp?ma=IDN02105%26ti=OI%EDu notkun+1983%2D2009+%26path=../Database/idnadur/orkumal/%26lang=3%26units=kiloton n.>

Hagstofa Íslands (e.d. (iii)) (2011). *Evrópskur samanburður á launum eftir aldri og kyni 2006*. Sótt 9. september 2011 af:  
<http://hagstofa.is/?PageID=2594&src=/temp/Dialog/varval.asp?ma=VIN02202%26ti=Evr%F3pskur+samanbur%F0ur+%E1+launum+eftir+aldri+og+kyni+2002+og+2006+++++%26path=../Database/vinumarkadur/althjodlegur/%26lang=3%26units=Evrur/jafnvirðisgildi.>

Hahn, H. og Hoffstede, U. (nóvember 2010). *Assessment report on operational experience*. Berlín, Þýskaland: Fraunhofer.

Hammer, M.J. og Hammer Jr. M.J. (Júní 2007). *Water and Wastewater Technology*. Bandaríkin: Prentice Hall.

Hannes Arnórsson. (2011). *A feasibility study of using biomethane as an alternative fuel for taxis in the Reykjavík capital area*. Akureyri: RES, The school for renewable energy science.

Hekla, e.d. (2011). *Passat TSI EcoFuel*. Sótt 30. maí 2011 af:  
[http://www.volkswagen.is/vwcms/master\\_public/virtualmaster/is\\_is/models/passat/passat/trim\\_lines/EcoFuel.html](http://www.volkswagen.is/vwcms/master_public/virtualmaster/is_is/models/passat/passat/trim_lines/EcoFuel.html).

Hulda Guðmunda Óskarsdóttir (maí 2009). *Samkeppnishæfi Íslands í jarðvarma*. Reykjavík: Háskóli Íslands.

Hullu, J. D., Maassen, J.I.W., van Meel, P.A., Shazad, S. og Vaessen, J.M.P. (2008). *Comparing different biogas upgrading techniques*. Eindhoven, Þýskaland: Eindhoven University of Technology.

Ingibjörg E. Björnsdóttir (2004). *Hversu mikið vatn notar hver Íslendingur á ári að meðaltali?* Sótt 8. september 2011 af <http://visindavefur.is/?id=4505>.

Kalinci, Y., Hepbasli, A. og Dincer, I. (2011). *Exergoeconomic analysis of hydrogen production from plasma gasification of sewage sludge using specific exergy cost method*. England: Elsevier.

Knoef, H.A.M. (2008). *BTG Biomass Gasification*. Holland: Biomass Technology Group

Kristján Hlynur Ingólfsson (ágúst 2011). *Búorka*. Reykjavík: Háskóli Íslands.

Legget, J., Graves, R.E. og Lanyon, L.E. (2011). *Anaerobic digestion: Biogas production and odor reduction from manure*. Bandaríkin: Pennstate, College of Agricultural Sciences.

Línuhönnun, (mars 2008). *Skolpa Ánanaustum: Yfirlit mælinga 2007*. Reykjavík: Fráveita Orkuveitu Reykjavíkur.

Línuhönnun, (mars 2008). *Skolpa Klettagörðum: Yfirlit mælinga 2007*. Reykjavík: Fráveita Orkuveitu Reykjavíkur.

Luostarinen, S., Luste, S. og Sillanpää (2008). *Increased biogas production at wastewater treatment plants through co – digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant*. Finnland: University of Kuopio.

Mannvit (2008). *Sameiginleg svæðisáætlun um meðhöndlun úrgangs 2009 – 2020*. Reykjavík: Sorpa, Sorpstöð Suðurlands, Kalka og Sorpurðun Vesturlands.

Mara, Duncan (2003). *Domestic wastewater treatment in developing countries*. London, England: Earthscan.

Mara, Duncan og Horan, Nigel (2003). *The handbook of water and wastewater microbiology*. London, England: Academic Press.

Martensson, Ellen. (2007). *Biogas as vehicle fuel in the Stockholm region – scenario 2020*. Stokkhólmur, Svíþjóð: KTH Kungliga tekniska högskolen.

Metan (e.d. (i)). *Reykjavíkurborg opnaði tímamótatilboð frá bílaumboðum – tilboð í 49 metan/bensínbíla*. Sótt 18. ágúst 2011 af <http://metan.is/Frettir/837/Reykjavikurborg-opnadi-timamotatilbod-fra-bilaumbodunum---tilbod-i-49-metan/bensinbila/default.aspx>.

Metan (e.d. (ii)) *Íranski bílaframleiðandinn IKCO stefnir að stóraukinni framleiðslu á metanbílum - yfir tvær milljónir ökutækja ganga fyrir metaneldsneyti í Íran í dag*. Sótt 18. ágúst 2011 af <http://metan.is/Frettir/835/Íranski-bilaframleidandinn-IKCO-stefnir-ad-storaukinni-framleidslu-a-metanbilum--yfir-tvaer-milljonir-okutaekja-ganga-fyrir-metaneldsneyti-i-Iran-i-dag-/default.aspx>.

Metan (e.d. (iii)) *Hvað er metan?* Sótt 12. júlí 2011 af <http://metan.is/Metan-eldsneyti/Hvad-er-metan/>.

Metan (e.d. (iv)) *Orkugildi metans*. Sótt 16. júlí 2011 af: <http://www.metan.is/Metan-eldsneyti/Hvad-er-metan/Orkugildi-metans/>.

Metan, (e.d. (v)) *verð á íslensku metani = 126 kr / Nm<sup>3</sup>*. Sótt 10. september af: <http://metan.is/metanverd/>.

Midilli, A., Dogru, M., Akay, G. og Howarth, C.H. (2002). *Hydrogen production from sewage sludge via a fixed bed gasification product gas*. England: University of Newcastle.

Minutillo, M., Perna, A. og Bona, D. D. (2009). *Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combined cycle (IPGCC) power plant*. Ítalía: University of Cassino.

Monnet, Fabien (nóvember 2003). *An introduction to anaerobic digestion of organic wastes*. Skotland: Remade.

Mountouris, A., Voutsas, E. og Tassios, D. (2008). *Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization*. Grikkland: National Technical University of Athens.

N1, e.d. (2011). *Eldsneytisverð*. Sótt 26. september 2011 af:  
<http://www.n1.is/n1/fyrirtaekid/eldsneytisverd/>

Nipattummakul, Nimit, Ahmed, Islam I., Kerdsuwan, Somrat og Gupta, Ashwani K (júli 2010). *High temperature steam gasification of wastewater sludge*. Bandaríkin: Applied Energy, volume 87.

Nipattummakul, Nimit, Ahmed, Islam I., Kerdsuwan, Somrat og Gupta, Ashwani K (september 2010). *Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification*. Bandaríkin: International Journal of Hydrogen energy, volume 35, issue 21.

Orkuveita Reykjavíkur (e.d. (i)) *Fráveita*. Sótt 12. ágúst 2011 af:  
<http://www.or.is/UmOR/Veiturogveitusvaedi/Fraveita/>.

Orkuveita Reykjavíkur (e.d. (ii)) *Fráveitukerfið* Sótt 20. ágúst 2011 af:  
<http://www.or.is/UmOR/Veiturogveitusvaedi/Fraveita/Fraveitukerfid/>.

Orkuveita Reykjavíkur (e.d. (iii)) *Þjónusta undir yfirborðinu* Sótt 20. ágúst 2011 af:  
<http://www.or.is/UmOR/Veiturogveitusvaedi/Fraveita/Thjonustaundiryfirbordinu/>.

Orkuveita Reykjavíkur (e.d. (iv)). *Hitaveita Reykjavíkur 80 ára*. Sótt 12. september 2011 af:  
<http://www.or.is/UmOR/Fjolmidlators/Frettir/Lesafrett/2114>.

Orkuveita Reykjavíkur (e.d. (v)). *Verðskrá*. Sótt 12. september 2011 af:  
<http://www.or.is/Fyrirtaeki/Heittvatn/Verdskra/>.

Orkuveita Reykjavíkur (e.d. (vi)). *Verðskrá*. Sótt 12. september 2011 af:  
<http://www.or.is/Fyrirtaeki/Rafmagn/Verdskra/>.

Palm, Rasmus (2010). *The economical potential for production of upgraded biogas used as vehicle fuel in Sweden*. Göteborg, Svíþjóð: Chalmers University of Technology.

Persson, Margareta, Jonsson, Owe og Wellinger, Arthur. (2006). *Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection*. Stokkhólmur, Svíþjóð: IEA Bioenergy.

Petersen, I. og Werther, J. (2004). *Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed*. Hamborg, Þýskaland: Technical University of Hamburg.

Verkstjórnin, 60. árgangur, desember 2010. *Orkey ehf. Akureyri. Útgefandi*,  
Verkstjórasamband Íslands.

REAL Recycling Entsorgung Abwasser Luzern (2011). *Die wichtigsten rechnerischen daten*. Sótt 15. ágúst 2011 af: <http://www.ara-luzern.ch/index.php?id=25>.

Reynir Sævarsson (maí 2004). *Greining á Skerjafjarðarveitu*. Reykjavík: Háskóli Íslands.

Reglugerð um fráveitur og skólp nr. 798/1999.

Seðlabanki Íslands, (e.d. (i)) (ágúst 2011). *Gengisskráning (ágúst 2011)*. Sótt 23. ágúst 2011 af: <http://www.sedlabanki.is/?PageID=7>.

Seðlabanki Íslands, (e.d. (ii)) (janúar 2012). *Gengisskráning (nóvember 2011)*. Sótt 23. janúar 2012 af: <http://sedlabanki.is/default.aspx?PageID=7>.

Sobhana, K. (2011). *CNG from biogas will fuel DTC buses*. Sótt 15. ágúst 2011 af: <http://www.indianexpress.com/news/cng-from-biogas-will-fuel-dtc-buses/791804>.

Sorpa, (e.d. (i)) Skilvirk úrgangsstjórnun (30. apríl 2010). Sótt 20. ágúst 2011 af: <http://www.sorpa.is/fjolmidlarasin/frettir/331/Skilvirk-urgangsstjornun/default.aspx>.

Sosnowski, P., Wiczorek, A. og Ledakowicz, S. (2003). *Anaerobic co – digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes*. Lodz, Pólland: Technical University of Lodz.

Sundin, A.M. (2008). *Disintegration of sludge – a way of optimizing anaerobic digestion*. Lidingö, Svíþjóð: Käppala Association.

Steffen, R., Szolar, O. og Braun, R. (september 1998). *Feedstocks for Anaerobic Digestion*. Vienna, Austurríki: University of Agricultural Sciences.

U.S. Energy Information Administration, e.d. (2011). *Annual cushioning. OK WTI spot price FOB*. Sótt 4. október 2011 af: <http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet&s=rwtc&f=a>.

Umhverfisstofnun (2003). *Staða mála hvað varðar hreinsun skólps á Íslandi*. Reykjavík: Umhverfisstofnun.

Umferðarstofa (2011). *Upplýsingatorg: Meðalakstur bifreiða*. Sótt 15. september 2011 af: <http://www.us.is/Apps/WebObjects/US.woa/wa/dp?id=1000910>.

van Haandel, A.C. og van der Lubbe, J.G.M. (2007). *Handbook, biological wastewater treatment: design and optimisation of activated sludge systems*. Holland: Quist publishing.

Wooldridge, Jeffrey M. (2009). *Introductory econometrics, a modern approach*. Kanada: South – Western.

Zhang, Wennan (2009). *Automotive fuels from biogas via gasification*. Svíþjóð: Mid Sweden University.

Zhang, R., El-Mashad, H.M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., og Gamble, P. (2006). *Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion*. Bandaríkin: University of California.

# Viðauki A

Fjárfestingar- og rekstrarkostnaður uppfærslubúnaðar með afköst upp á 250 Nm<sup>3</sup>/klst af lífgasi, mögulegur hreinleiki metans, kostir og gallar.

Uppfærslu- tækni	Fjárfestingar- kostnaður ISK	Rekstrar- kostnaður ISK	Kostnaðar-verð uppfærðs lífgass (ISK/Nm <sup>3</sup> lífgass)	Hámarks mögulegur hreinleiki metans %	Kostir	Gallar
<b>Efna- fræðileg upptaka</b>	57.821.400	22.031.100	27,8 kr.	98	H <sub>2</sub> S nánast fjarlægð alveg.	Einungis einn þáttur fjarlægður í hverri súlu. Dýrir hvatar.
<b>Vatns- hreinsun</b>	43.407.000	18.018.000	21,3 kr.	98	Fjarlægir gös og snefilefni. Mikill hreinleiki. Einföld tækni.	Mikil vatnsþörf. Takmarkað fjarlægð af H <sub>2</sub> S.
<b>Þrýstings- aðsog</b>	111.384.000	30.671.550	41,0 kr.	98	Mikill hreinleiki. Lítill orkuþörf. Tekur upp N <sub>2</sub> og O <sub>2</sub>	Viðbótar þrep þarf til hreinunar H <sub>2</sub> S. Flókið.
<b>Lághita- skiljun</b>	148.812.300	65.110.500	72,1 kr.	91	Getur framleitt mikið af hreinu metani. Engin efni notuð í ferlinu.	Mikinn búnað þarf.
<b>Himnu- skiljun</b>	38.165.400	13.390.650	19,7 kr.	89,5	Lítill búnaður, lítið viðhald og lítill orkuþörf. Auðvelt ferli.	Frekar lítill hreinleiki metans. Himnur geta verið dýrar

Heimild: Hullu, J.D. et al. (2008)

# Viðauki B

Gildi fyrir tekjuhópa og hlutfall þeirra sem nýta sér hreinsun/fráveitukerfi í útreikningum fyrir fræðilega metanlosun seyru.

**TABLE 6.5**  
**SUGGESTED VALUES FOR URBANISATION (U) AND DEGREE OF UTILISATION OF TREATMENT, DISCHARGE PATHWAY OR METHOD (T<sub>ij</sub>) FOR EACH INCOME GROUP FOR SELECTED COUNTRIES**

Country	Urbanization(U)		Degree of utilisation of treatment or discharge pathway or method for each income group (T <sub>ij</sub> ) <sup>2</sup>																	
	Fraction of Population		U=rural						U=urban high income						U=urban low income					
	Rural	urban-high <sup>1</sup>	urban-low <sup>3</sup>	Septic Tank	Latrine	Other	Sewer <sup>4</sup>	None	Septic Tank	Latrine	Other	Sewer <sup>4</sup>	None	Septic Tank	Latrine	Other	Sewer <sup>4</sup>	None		
<b>Africa</b>																				
Nigeria	0.52	0.10	0.38	0.02	0.28	0.04	0.10	0.56	0.32	0.31	0.00	0.37	0.00	0.17	0.24	0.05	0.34	0.20	0.20	
Egypt	0.57	0.09	0.34	0.02	0.28	0.04	0.10	0.56	0.15	0.05	0.10	0.70	0.00	0.17	0.24	0.05	0.34	0.20	0.20	
Kenya	0.62	0.08	0.30	0.02	0.28	0.04	0.10	0.56	0.32	0.31	0.00	0.37	0.00	0.17	0.24	0.05	0.34	0.20	0.20	
South Africa	0.39	0.12	0.49	0.10	0.28	0.04	0.10	0.48	0.15	0.15	0.00	0.70	0.00	0.17	0.24	0.05	0.34	0.20	0.20	
<b>Asia</b>																				
China	0.59	0.12	0.29	0.00	0.47	0.50	0.00	0.3	0.18	0.08	0.07	0.67	0.00	0.14	0.10	0.03	0.68	0.05	0.05	
India	0.71	0.06	0.23	0.00	0.47	0.10	0.10	0.33	0.18	0.08	0.07	0.67	0.00	0.14	0.10	0.03	0.53	0.20	0.20	
Indonesia	0.54	0.12	0.34	0.00	0.47	0.00	0.10	0.43	0.18	0.08	0.00	0.74	0.00	0.14	0.10	0.03	0.53	0.20	0.20	
Pakistan	0.65	0.07	0.28	0.00	0.47	0.00	0.10	0.43	0.18	0.08	0.00	0.74	0.00	0.14	0.10	0.03	0.53	0.20	0.20	
Bangladesh	0.72	0.06	0.22	0.00	0.47	0.00	0.10	0.43	0.18	0.08	0.00	0.74	0.00	0.14	0.10	0.03	0.53	0.20	0.20	
Japan	0.20	0.80	0.00	0.20	0.00	0.50	0.30	0.00	0.00	0.00	0.10	0.90	0.00	0.10	0	0	0.90	0	0	
<b>Europe</b>																				
Russia	0.27	0.73	0.00	0.30	0.10	0.00	0.60	0.00	0.10	0.00	0.00	0.90	0.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Germany <sup>5</sup>	0.06	0.94	0.00	0.20	0.00	0.00	0.80	0.00	0.05	0.00	0.00	0.95	0.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
United Kingdom	0.10	0.90	0.00	0.11	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
France	0.24	0.76	0.00	0.37	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Italy	0.32	0.68	0.00	0.42	0.00	0.00	0.58	0.00	0.04	0.00	0.00	0.96	0.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
<b>North America</b>																				
United States	0.22	0.78	0.00	0.90	0.02	0.00	0.08	0.00	0.05	0.00	0.00	0.95	0.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Canada	0.20	0.80	0.00	0.90	0.02	0.00	0.08	0.00	0.05	0.00	0.00	0.95	0.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
<b>Latin America and Caribbean</b>																				
Brazil	0.16	0.25	0.59	0.00	0.45	0.00	0.10	0.45	0.00	0.20	0.00	0.80	0.00	0.00	0.40	0.00	0.40	0.40	0.20	
Mexico	0.25	0.19	0.56	0.00	0.45	0.00	0.10	0.45	0.00	0.20	0.00	0.80	0.00	0.00	0.40	0.00	0.40	0.40	0.20	
<b>Oceania</b>																				
Australia and New Zealand	0.08	0.92	0.00	0.90	0.02	0.00	0.08	0.00	0.05	0.00	0.00	0.95	0.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	

Notes:

1. Urbanization projections for 2005 (United Nations, 2002).
2. Suggested urban-high income and urban low income division. Countries are encouraged to use their own data or best judgment.
3. T<sub>ij</sub> values based on expert judgment. (Doorn and Liles, 1999).
4. Sewers may be open or closed, which will govern the choice of MCF, see Table 3.3
5. Destatis, 2001.

Note: These values are from the literature or based on expert judgment. Please use national values, if available.

Heimild: R.J. Doorn, M. et al. (2006)



## Viðauki C

Gildi fyrir MCF leiðréttingastuðul miðað við meðferð fráveituvatns

Meðferð og losun fráveituvatns	Athugasemdir	MCF	Bil MCF gilda
<b>Óunnið skólp</b>			
Leitt út í sjó, ár og vötn	Hátt BOD gildi í ám getur valdið metanmyndun.	0,1	0 – 0,2
Staðnað skólp	Opð og heitt.	0,5	0,4 – 0,8
Flæðandi skólp (opið eða lokað kerfi)	Mikið flæði, hreint. (Lítið magn CH <sub>4</sub> frá dælustöðvum o.s.frv.).	0	0
<b>Unnið skólp</b>			
Miðlæg, súrefnisrík hreinsun	Þarf að vera vel stjórnað. Eitthvað CH <sub>4</sub> getur myndast .	0	0 – 0,1
Miðlæg, súrefnisrík hreinsun	Ekki vel stjórnað, yfirhlaðið.	0,3	0,2 – 0,4
Gerjun seyru í súrefnissnauðum tanki	CH <sub>4</sub> endurheimta ekki til staðar.	0,8	0,8 – 1
Súrefnissnauð gerjun (reactor)	CH <sub>4</sub> endurheimta ekki til staðar.	0,8	0,8 – 1
Grunnt lón (súrefnissnautt)	Grynnra en 2 metrar.	0,2	0 – 0,3
Djúpt lón (súrefnissnautt)	Dýpra en 2 metrar.	0,8	0,8 – 1
Rotnunarkerfi (e. septic system)	Helmingur BOD sest fyrir á botni gerjunartanks.	0,5	0,5

Heimild: R.J. Doorn, M. et al. (2006)

# Viðauki D

Metin BOD gildi fráveituvatns í íbúðahverfum

Land/svæði	BOD <sub>5</sub> (g/mann/dag)	BOD <sub>5</sub> bil
<b>Afríka</b>	37	35 – 45
<b>Egyptaland</b>	34	37 – 41
<b>Asía, Miðausturlönd, Suður-Ameríka</b>	40	35 – 45
<b>Indland</b>	34	27 – 41
<b>Palestína</b>	50	32 – 68
<b>Japan</b>	42	40 – 45
<b>Brasilía</b>	50	45 – 55
<b>Kanada, Evrópa, Rússland</b>	60	50 – 70
<b>Danmörk</b>	62	55 – 68
<b>Þýskaland</b>	62	55 – 68
<b>Grikkland</b>	57	55 – 60
<b>Ítalía</b>	60	49 – 60
<b>Svíþjóð</b>	75	68 – 82
<b>Tyrkland</b>	38	27 – 50
<b>Bandaríkin</b>	85	50 – 120

Heimild: R.J. Doorn, M. et al. (2006)

# Viðauki E

Engle – Granger próf til að kanna hvort raðir séu sístæðar og/eða samþættar.

Engle – Granger próf til að kanna hvort frárennsli og notkun á heitu og köldu vatni séu séu sístæðar og/eða samþættar raðir. Tímabilið 1/5/2009 – 18/2/2012.

Step 1: testing for a unit root in Frarennisli\_l\_s\_

Augmented Dickey-Fuller test for Frarennisli\_l\_s\_  
including 7 lags of (1-L)Frarennisli\_l\_s\_  
sample size 1016  
unit-root null hypothesis: a = 1

test with constant  
model:  $(1-L)y = b_0 + (a-1)y(-1) + \dots + e$   
1st-order autocorrelation coeff. for e: -0.005  
lagged differences:  $F(7, 1007) = 14.741$  [0.0000]  
estimated value of (a - 1): -0.0326224  
test statistic:  $\tau_c(1) = -2.6337$   
asymptotic p-value 0.08614

Step 2: testing for a unit root in Heitt\_vatn\_l\_s\_

Augmented Dickey-Fuller test for Heitt\_vatn\_l\_s\_  
including 7 lags of (1-L)Heitt\_vatn\_l\_s\_  
sample size 1016  
unit-root null hypothesis: a = 1

test with constant  
model:  $(1-L)y = b_0 + (a-1)y(-1) + \dots + e$   
1st-order autocorrelation coeff. for e: 0.000  
lagged differences:  $F(7, 1007) = 9.296$  [0.0000]  
estimated value of (a - 1): -0.0103246  
test statistic:  $\tau_c(1) = -2.31223$   
asymptotic p-value 0.1681

Step 3: testing for a unit root in Kalt\_vatn\_l\_s\_

Augmented Dickey-Fuller test for Kalt\_vatn\_l\_s\_  
including 7 lags of (1-L)Kalt\_vatn\_l\_s\_  
sample size 1016  
unit-root null hypothesis: a = 1

test with constant  
model:  $(1-L)y = b_0 + (a-1)y(-1) + \dots + e$   
1st-order autocorrelation coeff. for e: -0.042  
lagged differences:  $F(7, 1007) = 146.280$  [0.0000]  
estimated value of (a - 1): -0.0982155  
test statistic:  $\tau_c(1) = -4.0814$   
asymptotic p-value 0.001038

Step 4: cointegrating regression

Cointegrating regression -  
OLS, using observations 2009/05/01-2012/02/18 (T = 1024)  
Dependent variable: Frarennisli\_l\_s\_

	coefficient	std. error	t-ratio	p-value	
const	992.293	305.255	3.251	0.0012	***
Heitt_vatn_l_s_	0.749992	0.0222779	33.67	9.68e-168	***
Kalt_vatn_l_s_	-0.620896	0.416388	-1.491	0.1362	

Mean dependent var 2302.862 S.D. dependent var 805.3283

Sum squared resid	2.61e+08	S.E. of regression	505.9539
R-squared	0.606064	Adjusted R-squared	0.605292
Log-likelihood	-7827.371	Akaike criterion	15660.74
Schwarz criterion	15675.54	Hannan-Quinn	15666.36
rho	0.796475	Durbin-Watson	0.405424

Step 5: testing for a unit root in uhat

Augmented Dickey-Fuller test for uhat  
including 7 lags of (1-L)uhat  
sample size 1016  
unit-root null hypothesis:  $a = 1$

model:  $(1-L)y = b_0 + (a-1)y(-1) + \dots + e$   
1st-order autocorrelation coeff. for e: -0.003  
lagged differences:  $F(7, 1008) = 5.900$  [0.0000]  
estimated value of  $(a - 1)$ : -0.125958  
test statistic:  $\tau_c(3) = -5.4481$   
asymptotic p-value 0.0001111

There is evidence for a cointegrating relationship if:

- (a) The unit-root hypothesis is not rejected for the individual variables.
- (b) The unit-root hypothesis is rejected for the residuals (uhat) from the cointegrating regression.

## Engle – Granger próf til að kanna hvort notkun á heitu vatni og hitastig séu sístæðar og/eða samþættar raðir. Tímabilið 1/7/2008 – 12/2/2012

Step 1: testing for a unit root in Heitt\_vatn\_l\_s\_

Augmented Dickey-Fuller test for Heitt\_vatn\_l\_s\_  
including 7 lags of (1-L)Heitt\_vatn\_l\_s\_  
sample size 1314  
unit-root null hypothesis:  $a = 1$

test with constant  
model:  $(1-L)y = b_0 + (a-1)y(-1) + \dots + e$   
1st-order autocorrelation coeff. for e: 0.000  
lagged differences:  $F(7, 1305) = 12.154$  [0.0000]  
estimated value of  $(a - 1)$ : -0.0105552  
test statistic:  $\tau_c(1) = -2.78168$   
asymptotic p-value 0.06089

Step 2: testing for a unit root in Hitastig

Augmented Dickey-Fuller test for Hitastig  
including 7 lags of (1-L)Hitastig  
sample size 1314  
unit-root null hypothesis:  $a = 1$

test with constant  
model:  $(1-L)y = b_0 + (a-1)y(-1) + \dots + e$   
1st-order autocorrelation coeff. for e: -0.000  
lagged differences:  $F(7, 1305) = 6.466$  [0.0000]  
estimated value of  $(a - 1)$ : -0.0512583  
test statistic:  $\tau_c(1) = -4.62364$   
asymptotic p-value 0.0001127

Step 3: cointegrating regression

Cointegrating regression -  
OLS, using observations 2008/07/01-2012/02/12 (T = 1322)  
Dependent variable: Heitt\_vatn\_l\_s\_

	coefficient	std. error	t-ratio	p-value	
const	2871.16	23.9270	120.0	0.0000	***
Hitastig	-102.693	3.09745	-33.15	7.37e-176	***
Mean dependent var	2292.943	S.D. dependent var	806.0094		
Sum squared resid	4.68e+08	S.E. of regression	595.6011		
R-squared	0.454365	Adjusted R-squared	0.453952		
Log-likelihood	-10321.85	Akaike criterion	20647.70		
Schwarz criterion	20658.07	Hannan-Quinn	20651.59		
rho	0.918789	Durbin-Watson	0.162591		

Step 4: testing for a unit root in uhat

Augmented Dickey-Fuller test for uhat  
including 7 lags of (1-L)uhat  
sample size 1314  
unit-root null hypothesis:  $a = 1$

model:  $(1-L)y = b_0 + (a-1)*y(-1) + \dots + e$   
1st-order autocorrelation coeff. for e: 0.000  
lagged differences:  $F(7, 1306) = 4.740$  [0.0000]  
estimated value of  $(a - 1)$ : -0.0664527  
test statistic:  $\tau_c(2) = -5.51694$   
asymptotic p-value  $\bar{1}.312e-005$

There is evidence for a cointegrating relationship if:

- (a) The unit-root hypothesis is not rejected for the individual variables.
- (b) The unit-root hypothesis is rejected for the residuals (uhat) from the cointegrating regression.