

Lokaskýrsla
Fyrir Orkusjóð

Tvöföldun metanframleiðslu með rafþólsum

Verkefni: 8UI13020

Magnús Guðmundsson
Nýsköpunarmiðstöð Íslands
og
Bjarni Hjarðar og Nicolas Proietti
SORPA

apríl 2015



Nýsköpunarmiðstöð
Íslands

Innhald

1 Inngangur	2
2 Efni og aðferðir	4
2.1 Lífrænt hráefni fyrir tilraunir	4
2.2 Mæliaðferðir	5
2.3. Tilraunauppsetning og tæki	6
<i>Rafpúlsatækið</i>	6
<i>brýstivökvakerfið (Percolation kerfið)</i>	7
<i>Metanframleiðsla í smáskalakerfi (eins rúmmetrakerfi)</i>	8
<i>Metanframleiðsla á tilraunastofu (eins lítra kerfið)</i>	9
3 Niðurstöður	10
3.1. Eiginleikar hráefna	10
3.2. Metan framleiðsla í smáskala	17
<i>Metanframleiðsla úr svínaskít</i>	18
3.3 Metanframleiðsla í rannsóknarstofu	19
<i>Metanframleiðsla úr svínaskít og sigvatni frá Álfsnesi.</i>	19
<i>Metan frá hreinsaðri mykju, sigvatni og blönduðum matarúrgangi</i>	21
<i>Ályktanir</i>	24
4 Hagkvæmni	25
Heimildir	32

1 Inngangur

Lokaskýrslan fjallar um heildarniðurstöður verkefnisins sem var til tveggja ára. Reynt var að standa við verkáætlun eins og hún var í upphaflegri umsókn að fremsta megni þrátt fyrir að styrkur var lækkaður fyrir seinna árið. Í meginatriðum hefur það gengið eftir.

Verkefnið fjallar um notkun á orkumiklum rafpúlsum til að meðhöndla lífræn hráefni í þeim tilgangi að auka magn metans við gasvinnslu. Nægilega sterkir rafpúlsar geta sundrað frumum hvort sem það eru örverur eða jurta-og dýrafrumur. Þessi sundrunaráhrif gera það að verkum að lífræn efni verða aðgengilegri fyrir metanmyndandi bakteríur. Í dag framleiðir Sorpa metan úr hauggasi en það er ekki góð aðferð til að nýta vel hráefnið til metanframleiðslu, þar sem það tekur mörg ár að brjóta það niður í haugunum og nýtist ekki nema að hluta. Gerjun í hvarftönkum er betri leið til að framleiða metan og mun hraðvirkari leið til að framleiða metan. Sú aðferð nýtir ekki heldur hráefnið til fullnustu við metanframleiðslu. Þess vegna hafa margar forvinnsluaðferðir verið reyndar til að auka enn frekar nýtingu hráefnisins t.d. meðhöndlun með úthljóði, háþrýstingi, ensímum og sýru eða basa en engin þeirra hefur reynt nægilega hagkvæm eða árangursrík. Hins vegar virðist beiting rafpúlsa vera mjög árangursrík leið til að auka metanvinnslu fyrir a.m.k. sumt hráefni (Salerno et.al. 2009, Baneszak 2011).

SORPA framleiðir um 2 milljónir Nm^3 af metani úr hauggasi sem mun ná hámarki innan 10 til 15 ára og fara síðan minnkandi þar sem bannað verður að urða lífrænan úrgang eftir 2020 á Stór-Reykjavíkursvæðinu og reyndar landinu öllu. Þetta bann byggir á ESB reglugerðum sem íslensku reglugerðirnar taka mið af. Reglugerðirnar innihalda ákvæði sem krefjast lausna á meðhöndlun lífræns úrgangs sem m.a. má leysa með metan framleiðslu í gerjunartönkum.

Sorpa hefur byggt upp góða og einstaka aðstöðu til að gera tilraunir í smáskalaframleiðslu á metani sem byggir á gerjun lífræns hráefnis í tönkum við stýrðar aðstæður. Hver tankur er einn rúmmetri og voru fyrstu tilraunirnar gerðar í þessari aðstöðu. Einnig er búið að koma upp aðstöðu til rannsóknar á sigvatni frá s.k. þrýstivökvunarkerfi (percolation kerfi) sem verður hluti af þeirri lausn sem Sorpa ætlar að nota til að meðhöndla lífrænan úrgang. En hægt er að nýta sigvatnið til metanframleiðslu.

Rafpúlsaþækið reyndist frekar afkastalítið miðað við smáskalaaðstöðu SORPU og var í framhaldinu ákveðið að gera einnig tilraunir á tilraunastofu hjá NMÍ í flöskum sem eru eins lítra til að nýta betur rafpúlsaþækið og til að púlsgefjafinn (spark gap) entist betur.

Nokkrar tafir urðu í upphafi einmitt vegna þess að púlsgefjafinn gaf sig og þurfti að panta og kaupa nýja sem tók lengri tíma en áætlað var. Einnig var nauðsynlegt að setja upp aðstöðu á rannsóknarstofu og tafði það einnig fyrir framhaldstilraunum sem byrjað var á á seinni helming 2013, en eftir það gengu tilraunir vel.

Gerðar hafa verið tilraunir á mykju, svínaskít, sigvatni frá Álfsnesi, auðguðu vatni frá þrýstivökvunartilraunakerfinu og á blönduðum matarúrgangi aðallega ávaxtaúrgangi.

Þar að auki hefur verið gerð greining á hagkvæmni þess að nota rafpúlsa við vinnslu og á þeim forsendum sem liggja þarf til grundvallar mögulegri notkun.

Þess ber einnig að geta að haldnar voru ráðstefnur sem heita Nordic Biogas Conference sem haldnar voru í Kaupmannahöfn apríl 2012 og einnig á Hilton Hótel Nordica á Íslandi í lok ágúst 2014 og hélt Magnús Guðmundsson erindi um rafpúlsa um formeðhöndlun á lífrænu hráefni í bæði skiptin og einnig var Sorpa með veggspjald um tengt efni á á ráðstefnunni 2014 auk þess að vera aðalgestgjafi ráðstefnunnar.

2 Efni og aðferðir

Fyrstu tilraunir voru gerðar í aðstöðunni á Álfsnesi hjá Sorpu þar sem smáskalaframleiðsla fór fram í eins rúmmetra tönkum. Þessi aðstaða var byggð upp m.a. vegna þessa verkefnis. Einnig var sett upp aðstaða á rannsóknarstofu Nýsköpunarmiðstöðvar þar sem notaðir eru 1 lítra hvarftankar og eru þeir tólf að tölu. Rafpúlsatækið reyndist of afkastalítið fyrir eins rúmmetra tanka til að hægt væri að framkvæma nægilega margar tilraunir þar sem púlsgjafinn (spark gap) eyddist hratt við meðhöndlun á miklu magni hráefnis. Við tilraunir á rannsóknarstofu endist hann mun lengur og þ.a.l. hægt að framkvæma fleiri tilraunir. Þetta kom ekki að sök varðandi mat á tækninni því að aðstæður eru að öðru leyti eins hvað hitastýringu og gasmælingar varðar.

Það var einnig ákveðið að setja upp tilraunabúnað fyrir þrýstivökvunarkerfi (percolation tilraunakerfi) fyrir lífrænan úrgang því að Sorpa ætlar að setja upp s.k. Aikan lausn fyrir söfnun á lífrænum úrgangi og er slíkt kerfi hluti af þeirri lausn. Heitu vatni er úðað yfir lífrænan úrgang sem seytlar í gegnum hann og er því safnað í söfnunartank. Það inniheldur töluvert af lífrænum ögnum sem síðan er hægt að gerja til að framleiða metan. Tilraunabúnaðurinn er staðsettur í Álfsnesi til að prófa mismunandi úðun og hitastig á vatni og síðan gerðar mælingar á hve mikið af efni fer í vatnið.

Einnig var ákveðið að bæta við verkþætti um mat á hagkvæmni útfrá stofn-og rekstrarkostnaði og niðurstöðum verkefnisins.

2.1 Lífræn hráefni

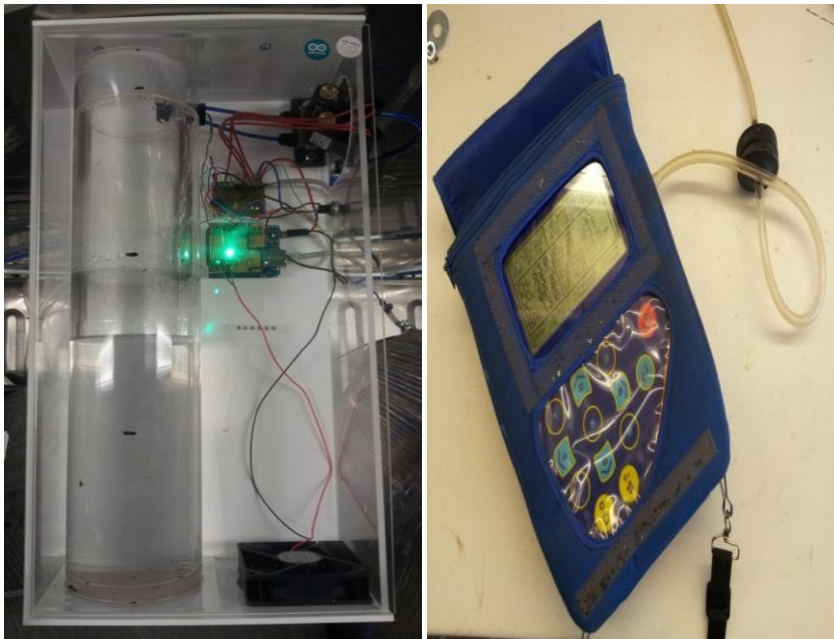
Í smáskala tilraunum var búin til blanda af lífrænu hráefni og vatni sem mögulegt var að dæla í tankanna. Til að byrja með var kúamykja og svínaskítur valin. Þurrefnisinnihald skítsins sem var 7% og mykjunnar sem var 25% var blandað í 1-3% lausn. Hluti blöndunnar var meðhöndlaður með rafpúlsun en hinn ekki. Fasta efnið var fyrst hakkað og mulið áður en það var blandað út í vatnið. Samt reyndist erfitt að meðhöndla mykju þar sem hún settist hratt í tönkunum og stíflaði dælubúnað svo að aðeins eru til efnamælingar fyrir mykju fyrir þessar smáskalatilraunir.

Rannsóknarstofutilraunir með minni hvarftönkum (1 L) voru gerðar á svínaskít til samanburðar við fyrri tilraunir. Einnig voru gerðar tilraunir á síaðri og hreinsaðri mykju sem ekki stíflaði dæluna sem notuð var við tilraunir eins og raunin var í smáskalatilraunum.

Þar að auki voru gerðar tilraunir á sigvatni frá Álfsnesi og á auðguðu sigvatni frá þrýstivökvunarkerfinu (percolation) á Álfsnesi. Einnig voru gerðar tilraunir á matarleifum aðallega ávaxtaúrgangi.

2.2 Mæliaðferðir

Metan framleiðslan er mæld með gasmæli frá GeoTec sem heitir GA 2000 plus og hliðrunar-rúmmálmæli fyrir gas sem smíðaður var eftir hugmyndum Angelidaki o.fl (Angelidaki, Ellegaard, & Ahring, 1991) sem sést á mynd 1.



Mynd 1 Rúmmálmælir og gasmælir GA 2000 plus frá Geotech

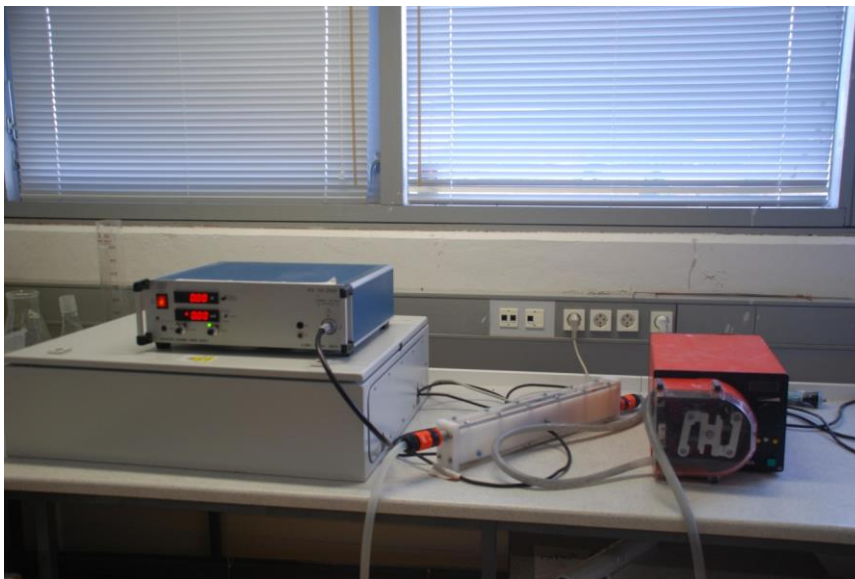
Gasmælirinn GA2000 Plus mælir metan (CH_4), súrefni (O_2), kolsýru (CO_2) og kolmónoxíð (CO). Einnig getur tækið mælt allt að 5000ppm vetnissúlfíð (H_2S). Aðrar efnamælingar voru gerðar á hráefninu fyrir og eftir meðhöndlun. Þetta voru mælingar á heildar þurrefni, fleygu þurrefni (Total solids (TS) og volatile solids (VS)), mælingar á efnunum í lausn (total suspended solids (TSS), volatile suspended solids (VSS), total and volatile dissolved solids (TDS, VDS) auk mælinga á s.k. súrefnisnotkun lífræns efnis í lausn sem er mælikvarði á heildarmagni lífrænna

efna og uppleystra lífræna efna (Chemical oxygen demand (COD) og soluble chemical oxygen demand (SCOD)).

2.3. Tilraunauppsetning og tæki

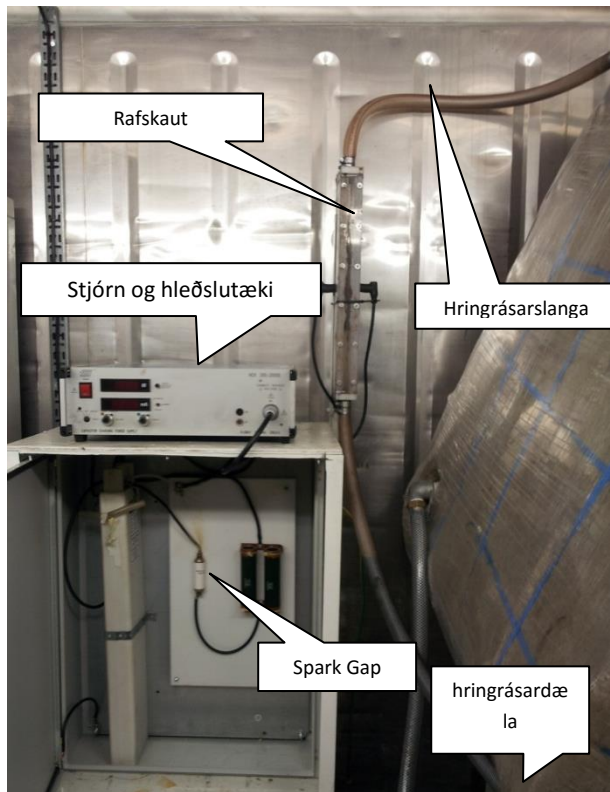
Rafpúlsatækið

Rafpúlsatækið var sett saman hjá Nýsköpunarmiðstöð Íslands. Það samanstendur af þétti sem er 20kV og 1 microfarad í rýmd ásamt stjórn og hleðslutæki (HK 200-20000) sem hleður þéttinn með 20 mA straumi við 220-240 V og hefur mögulega púlsatíðni 1,2- 1,7Hz. Tækið er frá F.u.G. Elektronik GmbH (Rosenheim – Germany). Púlsgjafinn (spark gap) er frá Perkin Elmer Optoelectronics týpa OGP75 og hleypir púlsum á rafskautin við 18,5 kV. Tækið sést á mynd 2 á rannsóknarstofu.



Mynd 2. Rafpúlsatækið; stjórnstöð , þéttir, rafskaut og dæla

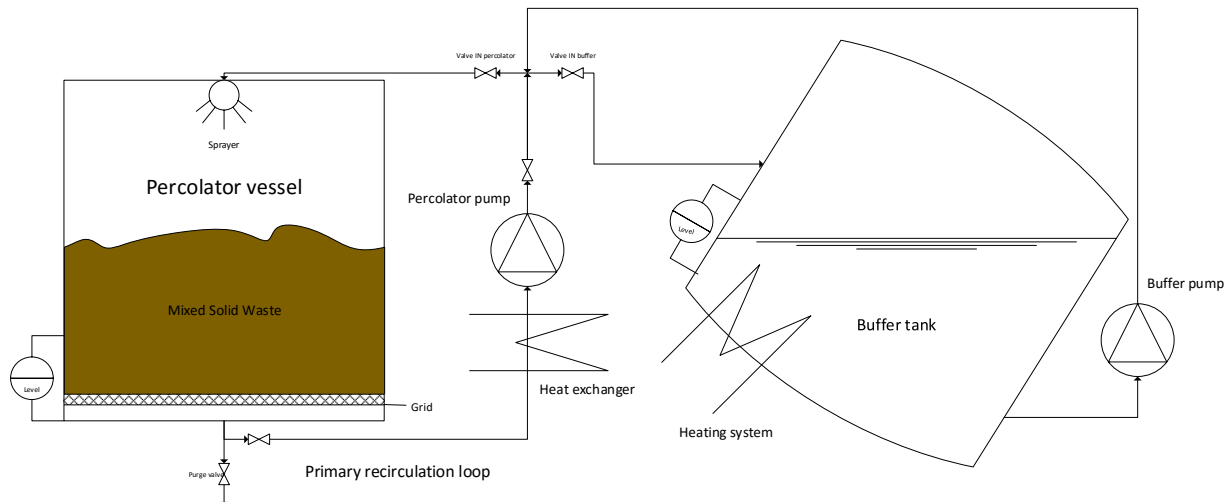
Rafskautin eru í lokuðu hulstri og er um 1 cm á milli rafskauta en þau eru 7 cm á hæð og 20 cm á lengd en sjálft hulstrið er um 50 cm. Vökva eða blöndu er dælt á milli rafskautanna við rafpúlsameðhöndlun. Mynd 3 sýnir hvernig rafpúlsatækið var uppsett í smáskalaáðstöðunni hjá Sorpu þar sem allt að 700 lítrar voru meðhöndlaðir í einu en oft ekki meira en 200 til 300 lítrar. Í tilraunastofukerfinu voru allt að 20 lítrar meðhöndlaðir í einu. Hámarksmeðhöndlun hvað orkunotkun varðar (energy intensity) var um 30 kWh/m³ (108000 kJ/m³) í smáskalatilraunum en allt að 50 kWh/m³ við tilraunir í eins lítra kerfinu hjá NMÍ. Hitastig hækkar aðeins við rafpúlsameðhöndlun allt að 20°C við mestu orkunotkun.



Mynd 3. Uppsett rafpúlsatækið hjá Sorpu.

Þrýstivökvakerfið (Percolation kerfið)

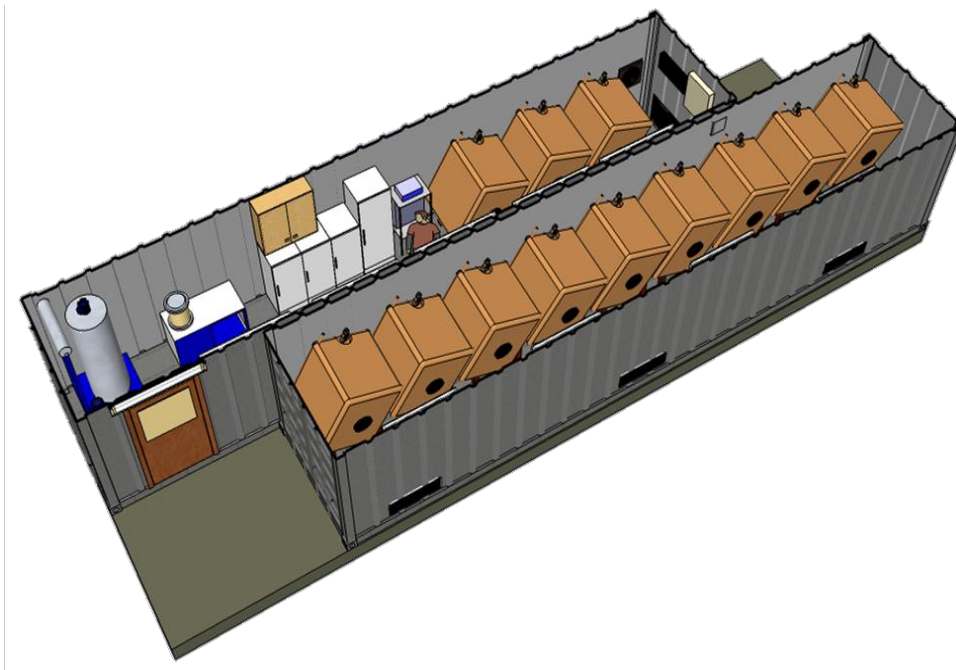
Þrýstivökvunarkerfi (Percolation kerfið) er uppsett hjá Sorpu sjá skematíska mynd 4. Í tilraunum var notað við 35-37°C vatn sem úðað var yfir lífrænan úrgang og auðguðu sigvatni safnað sem innihélt agnir og uppleyst lífræn efni. Þetta kerfi hefur verið í þróun þ.e.a.s. hvernig best sé að úða lífrænan úrgang og fá fram vatn sem inniheldur hæfilega mikið af uppleystu efni og lífrænum ögnum sem eru hæfilega stórar. Prófaðar hafa verið mismunandi síur í því sambandi. Miðað var við að agnir væru ekki stærri en 2 mm svo að öruggt væri að auðgaða vatnið stíflaði ekki dælur eða rafskautin við meðhöndlun. Auðgaða vatnið er annars konar en sigvatnið frá haugunum því það inniheldur meira af lífrænum efnum og minna af ólífrænu efni.



Mynd 4. Heitt vatn (35-37°C) er látið síga í gegnum lífrænt úrgangsefni og því safnað í buffer tank. Hluti af þessu auðgaða sigvatni er síðan notað til tilrauna.

Metanframleiðsla í smáskálakerfi (eins rúmmetrakerfi)

Smáskálakerfið var sett upp hjá Sorpu í Álfsnesi og samanstendur af tveimur gámum þar sem annar þeirra er ætlaður til forvinnslu og fyrir mælitæki og hinn er fyrir metanframleiðslu sjálfa í níu eins rúmmetra tönkum. Teikning af aðstöðunni sést á mynd 5. Þessir tankar eru hita og pH stýrðir og með dælu sem heldur hráefninu á hreyfingu. Það er mögulegt að gera tilraunir við mesophile (35-37°C) og thermophile (55-70°C) aðstæður. Gasið sem myndast var tekið úr toppi tankanna og magnið mælt og samsetning þess.



Mynd 5. Aðstaðan á Álfsnesi eru tveir gámar sem innihalda metangerjunartanka ásamt mælitækjum (hiti, pH, gasmælingar).

Metanframleiðsla á tilraunastofu (eins lítra kerfið)

Sett var upp metanframleiðslukerfi á tilraunastofu sem samanstendur af tólf eins lítra flöskum í stýrðu hitabaði eins og sést á mynd 6. Búnaðurinn er staðsettur í húsnæði Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands þar sem rafpúlsatækið er einnig staðsett. Gasúttak er á flöskunum sem leiðir gasið í rúmmálmæli sem er kvarðaður og hægt að lesa beint það rúmmál sem myndast. Á meðan á tilraunum stóð þá var magn helstu gastegunda (CH_4 , CO_2 og O_2) mælt tvisvar í viku. Mælingar á heildargasmagni voru gerðar með rúmmálmælunum og lesið af á hverjum degi. Þegar rúmmálmælar voru að verða fullir voru þeir tæmdir og mælingar byrjuðu aftur á núllpunkti. Niðurstöður mælinga eru sýndar sem uppsafnað magn metans sem myndast yfir gerjunartímann. Einnig voru gerðar mælingar á sama hátt og áður á hráefninu, fyrir og eftir rafpúlsa-meðhöndlun. Fylgst var einnig með sýrustigi sem yfirleitt hækkaði um eitt sýrustig við gerjunina.



Mynd 6. Tilraunaútbúnaður fyrir metanvinnslu. Tilraun í gangi. Rúmmálmælar eru fyrir aftan gerjunarbúnaðinn.

3 Niðurstöður

3.1. Eiginleikar hráefna

Niðurstöður úr smáskala tilrauninum á hráefnunum var borin saman við hráefni sem ekki var meðhöndlað með rafpúlsum. Niðurstöður eru sýndar í töflu eitt fyrir mykju á TS, VS, TSS, VSS, TDS, VDS, COD og SCOD. Breytingar voru normaliseraðar miðað við TS gildi á viðmiðunar sýni. Rafpúlsameðhöndlun A var 10 kwh/m³ og B var 26 kwh/m³.

	Ómeðhöndlað	Meðhöndlun A	Meðhöndlun B	Max. breyting
Orkunotkun (kwh/m ³)	0	10	26	
TS (g/L)	26.8	27	27.2	
VS (g/L)	21.2	21.5	21.7	2.5%
TSS (g/L)	17.6	18.2	19	8%
VSS (g/L)	15	16.3	17	13.5%
TDS (g/L)	7.4	8.8	9.2	24%
VDS (g/L)	4.3	4.7	5.4	25.6%
COD (g/L)	36.9	39.7	37.8	5%
SCOD (mg/L)	2750	3256	3326	21%

Eins og sést í töflunni þá er töluverð aukning á SCOD gildum auk annarra gilda sérstaklega meðhöndlun B í samanburði við viðmiðunargildið sem bendir til að rafpúlsar séu að sundra lífræna hráefninu þar sem meira var af ögnum og uppleystu efni í lausn. Mykjan í þessum fyrstu tilraunum var töluvert meira sundruð í upphafi gerjunar miðað við heimildir um virka seyru geta um. Engu að

síður er mælanlegur munur á uppleystum efnunum. Í töflu 2 eru niðurstöður fyrir svínaskít en orkunotkun var lægri eða 8 og 15 kWh/m³.

Tafla 2. Svínaskítur var meðhöndlaður með tvenns konar orkunotkun og borin saman við viðmiðunargildi.				
	Ómeðhöndlað	Meðhöndlun A	Meðhöndlun B	Max. breyting
Orkunotkun (kWh/m ³)	0	8	15	
TS (g/L)	9.2	8.8	9.0	
VS (g/L)	5.2	5.1	5.2	0%
TSS (g/L)	4.1	3.7	4.0	-3-7%
VSS (g/L)	3.6	3.7	3.9	5%
TDS (g/L)	5.2	5	4.9	-6%
VDS (g/L)	1.5	1.5	1.2	-0-20%
COD (g/L)	10.165	9.980	9.880	-3%
SCOD (mg/L)	4100	4400	4940	20%

Heildarorkunotkun var lægri en fyrir mykjuna í þessum tilraunum en engu að síður þá var 20% aukning í SCOD við 15 kWh/m³ orkunotkun. Aðrar mælingar sýndu minni mun. Mögulega gæti aukin meðhöndlun aukið niðurbrotið enn frekar.

Gerðar voru tilraunir á sigvatni og svínaskít í tilraunstofu NMÍ. Niðurstöður meðhöndlunar á hráefnunum voru borar saman við hráefni sem ekki var meðhöndlað með rafpúlsum eins og áður. Rafpúlsameðhöndlun var 30 kWh/m³. Sigvatnið inniheldur um 0.7 til 0.8% þurrefni sem er blanda af örverum, lífrænum efnunum og ólífrænum uppleystum efnunum.

Tafla 3. Sigvatn frá Álftanesi meðhöndlað með rafpúlsum og borið saman við ómeðhöndlað sýni			
	Ómeðhöndlað	Meðhöndlað	Breyting (%)
Orkunotkun (kWh/m ³)	0	30	
TS (g/L)	7.6	7.7	
VS (g/L)	2.9	3.2	10.5%
TSS (g/L)	1.4	1.05	-25%
VSS (g/L)	0.58	1.05	81%
TDS (g/L)	6.4	6.3	-1%
VDS (g/L)	2.1	2.1	0%
COD (mg/L)	4890	4350	-13%
SCOD (mg/L)	2394	3210	34%

Eins og sést í töflunni þá er töluverð aukning á SCOD og VSS í samanburði við viðmiðunargildið sem bendir til að rafpúlсар séu að sundra lífræna hráefninu þó að önnur gildi sýni ekki mikla breytingu s.s. TDS, VDS eða COD.

Tilraunir á svínaskít voru endurteknaar á tilraunastofu til að fá samanburð við smáskalakerfið þ.e.a.s. hvort breyting milli kerfa sé sjáanleg við að taka upp eins lítra kerfið í stað rúmmetra tanka. Reynt var að hafa skítinn sambærilegan og í fyrri tilraunum. Í töflu 4 eru niðurstöður fyrir svínaskít en orkunotkun var höfð sú sama og í fyrri tilraunum en reiknuð á rúmmetra var hún 8 og 15 kWh/m³.

Tafla 4. Svínaskítur meðhöndlaður með rafpúlsum og borinn saman við viðmiðunargildi.				
	Ómeðhöndlað	Meðhöndlun	Meðhöndlun	Breyting (%)
Orkunotkun (kWh/m ³)	0	8	15	
TS (g/L)	9.4	9.0	9.3	
VS (g/L)	5.2	5.2	5.2	0%
TSS (g/L)	4.3	4	3.9	9%
VSS (g/L)	3.7	3.8	4.0	8%
TDS (g/L)	5.3	5.0	4.8	-10%
VDS (g/L)	1.6	1.5	1.1	-32%
COD (g/L)	9.765	9.830	9.740	2%
SCOD (mg/L)	4020	4300	5330	25%

Þessar niðurstöður fyrir svínaskít eru nokkuð sambærilegar og fékkst úr fyrri tilraunum í rúmmetra-skala, jafnvel örlítið meira niðurbrot mælt sem SCOD ef eitthvað er. Þannig að rafpúlarnir eru að hafa sambærileg áhrif og áður.

Einnig voru gerðar tilraunir á sigvatni, auðguðu vatni, hreinsaðri mykju og matarúrgangi og meðhöndlað með rafpúlsum og borið saman við hráefni sem ekki var meðhöndlað. Niðurstöður efnamælinga eru sýndar hér fyrir neðan.

Tilraunir voru gerðar á sigvatni frá Álfsnesi við mismunandi orkunotkun (fjölda rafpúlsa) við 15, 25 og 50 kWh/m³ sem ekki hafði verið gert áður. Niðurstöður eru sýndar fyrir TS, VS, TSS, VSS, TDS, VDS, COD og SCOD. Tilraunir þessar voru gerðar til að staðfesta fyrri niðurstöður við fleiri aðstæður og eru niðurstöður sýndar í töflu 5.

Tafla 5. Sigvatn frá Álfnesi meðhöndlað með rafpúlsum (orkunotkun 15, 25 og 50 kWh/m³) og borið saman við ómeðhöndlað sýni

	Ómeðhöndlað	Meðhöndlað			Max breyting (%)
Orkunotkun (kWh/m ³)	0	15	25	50	
TS (g/L)	8.6	8.7	8.7	8.8	2%
VS (g/L)	3.1	3.2	3.3	3.5	12.9%
TSS (g/L)	1.7	1.6	1.2	1.2	-30%
VSS (g/L)	0.7	0.9	1.0	1.1	62%
TDS (g/L)	6.9	6.8	6.7	6.7	-2.9%
VDS (g/L)	2.3	2.3	2.2	2.0	-13.1%
COD (mg/L)	5290	5150	5050	4900	-7.4%
SCOD (mg/L)	2590	2820	3030	3210	24%

Niðurstöður sýna að meira er af uppleystu efni eftir því sem meðhöndlun er meiri og einnig fleiri agnir af vissri stærð (VSS) en TDS og VDS lækkar sem bendir til að ögnum af ákveðinni stærð hafi fækkað.

Niðurstöður eru sýndar í töflu sex fyrir sigvatn úr þrýstivökvunarkerfinu sem var fengið við 37°C. Rafpúlsameðhöndlun var 15, 25 og 50 kWh/m³. Auðgaða sigvatnið inniheldur um 0.95% þurrefni sem er blanda af örverum, lífrænum efnum og ólífrænum uppleystum efnum.

Tafla 6. Auðgað sigvatn (percolation) meðhöndlað með rafpúlsum 15, 25 og 50 kwh/m ³ og borið saman við ómeðhöndlað sýni					
	Ómeðhöndlað	Meðhöndlað			Max breyting (%)
		15	25	50	
Orkunotkun (kWh/m ³)	0				
Rafsvið (kV/cm)	0	20	20	20	
TS (g/L)	9.5	9.4	9.3	9.4	1%
VS (g/L)	4.9	5	5.1	5.2	6.1%
TSS (g/L)	4.3	4.2	4.1	4.0	-7%
VSS (g/L)	3.5	3.8	4.0	4.1	17.1%
TDS (g/L)	6.2	6.8	6.7	6.7	8.1%
VDS (g/L)	3.1	3.1	3.2	3.2	3.2%
COD (mg/L)	6350	6240	6125	5950	-6.2%
SCOD (mg/L)	3730	3820	4560	4673	25.3%

Eins og sést í töflunni þá er töluverð aukning á SCOD gildum og VSS í samanburði við viðmiðunargildið sem bendir til að rafpúlssar séu að sundra lífræna hráefninu í auðgaða vatninu.

Mælingar á þynntri og síaðri mykju voru gerðar. Sambærilegrar mælingar höfðu áður verið gert á óhreinsaðri mykju. Í töflu 7 eru niðurstöður fyrir mykju við rafpúlsméðhöndlun við 15 og 30 kwh/m³ orkunotkun.

Tafla 7. Hreinsuð mykja meðhöndluð með rafpúlsum og borinn saman við viðmiðunargildi.				
	Ómeðhöndlað	Meðhöndlun		max breyting (%)
Orkunotkun (kWh/m³)	0	15	30	
TS (g/L)	14	14.1	14.1	
VS (g/L)	11.2	11.2	11.1	0%
TSS (g/L)	9.3	9.4	9.6	4%
VSS (g/L)	7.2	7.8	8.2	13.8%
TDS (g/L)	4.0	4.1	4.5	12.5%
VDS (g/L)	2.2	2.5	2.7	22%
COD (g/L)	12.9	12.8	12.7	1.5%
SCOD (mg/L)	2020	2300	2830	40%

Þessar niðurstöður fyrir hreinsaða mykju eru nokkuð sambærilegar og fékkst úr fyrri tilraunum á mykju en hér er styrkur lægri og minna af föstum efnum sem stífluðu dælu og rafskautin í fyrri tilraunum. Að öðru leyti er niðurbrot á lífrænum efnum líkt og áður nema nú er það meira miðað við SCOD gildi þar sem meðhöndlun var meiri. Þannig að rafpúlarnir hafa niðurbrotsáhrif líkt og áður.

Mælingar á niðurbroti blandaðs matarúrgangs sem aðallega voru ávextir sjást í töflu 8. Ávextirnir voru hakkaðir og stærri agnir sigtaðar frá áður en rafpúlsameðhöndlun fór fram. Þurrefnisinnihald í blöndunni var tæp 4%.

Tafla 8. Blandaður matarúrgangur (ávextir og grænmeti) meðhöndlaður með rafpólsum og borinn saman við viðmiðunargildi					
	Ómeðhöndlað	Meðhöndlað			Max breyting (%)
Orkunotkun (kWh/m³)	0	15	25	50	
TS (g/L)	3.96	3.9	3.92	3.92	0%
VS (g/L)	3.54	3.67	3.7	3.7	4.5%
TSS (g/L)	2.0	2	2.1	1.9	±5.2%
VSS (g/L)	1.8	1.8	1.8	1.7	-5.5%
TDS (g/L)	1.2	1.2	1.6	1.6	7.6%
VDS (g/L)	1.1	1.1	1.2	1.4	33.3%
COD (mg/L)	11682	11635	11652	11456	-2.1%
SCOD (mg/L)	6468	6830	6528	6890	6.5%

Breytingar á blönduðum matarúrgangi (ávöxtum) er ekki mikill eftir meðhöndlun sem bendir til þess að ávaxtaúrgangur sé tiltölulega auðleystur án hjálpar rafpólusa og þ.a.l. ekki nauðsynlegt að nota rafpólusa á slíkan úrgang.

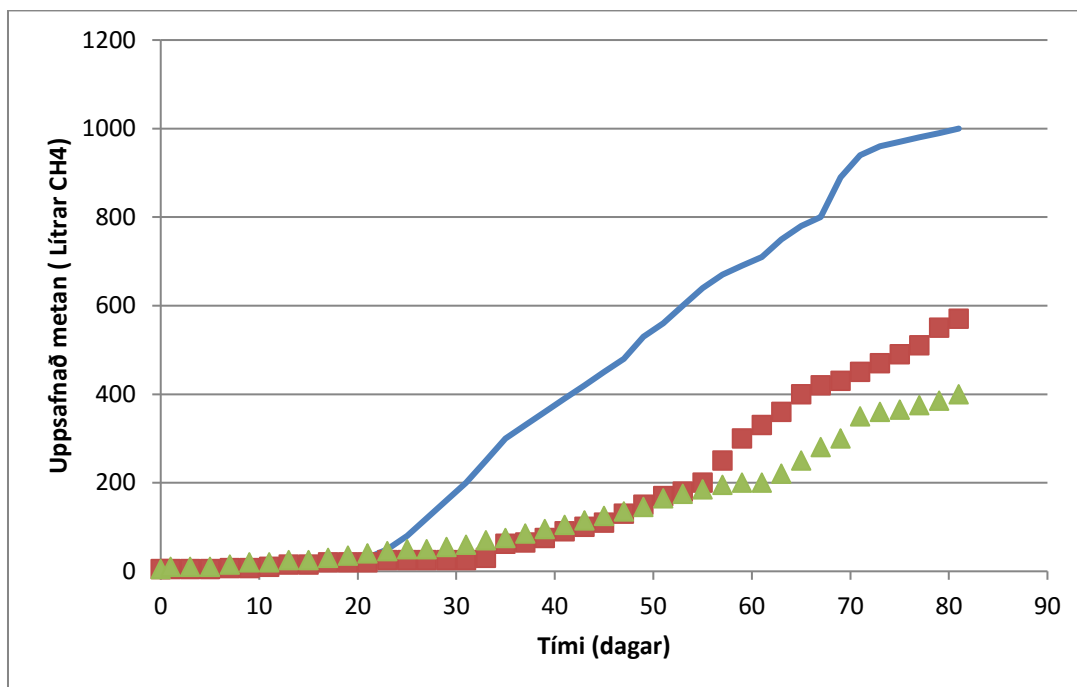
3.2. Metan framleiðsla í smáskala

Metangerjun var prófuð á svínaskít í smáskalaprófun. Á meðan á tilraunum stóð þá var magn helstu gastegunda (CH₄, CO₂ og O₂) mælt tvisvar í viku. Mælingar á heildargasmagni voru gerðar með rúmmálmælinum og fylgst með því í rauntíma (online) með Google tæki sem kallast Nimbits. Niðurstöður eru sýndar sem styrkur metans (%) og heildarmagni metans.

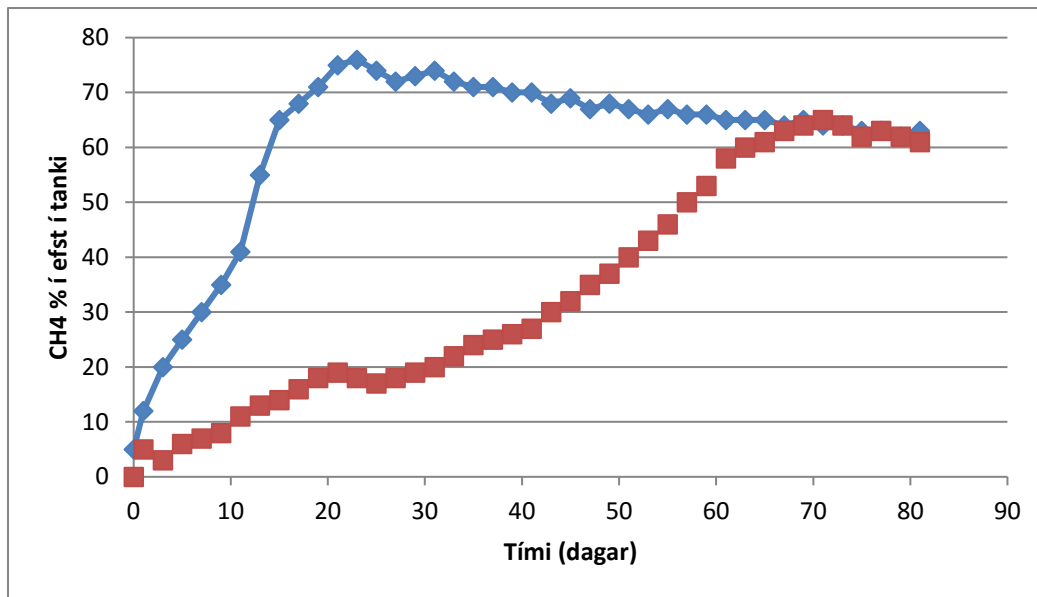
Metanframleiðsla úr svínaskít

Allt að 700 L af svínaskít voru meðhöndlaðir og síðan var um 250 L sett í metangerjun en ómeðhöndlaður skítur var einnig settur í 2 tanka. Uppsöfnuð framleiðsla á metani er sýnd í mynd 7 fyrir svínaskít sem meðhöndlaður var með 15 kWh/m³ og styrkur metans í efri hluta tanks (head space) var mældur og er sýndur í mynd 8 einnig fyrir sömu meðhöndlun. Mælanlegt metanmagn byrjaði á degi 14 fyrir meðhöndlaðan svínaskít en um 27±3 daga fyrir ómeðhöndlaðan skít. Uppsöfnuð framleiðsla samsvarar um 80 dögum í AD (anaerobic digestion) hvarftönkum.

Myndun metans var mælanlega meira fyrir meðhöndlað hráefni eða allt að tvöfalt meira miðað við ómeðhöndlað hráefni. Myndun metans byrjaði líka mun seinna fyrir ómeðhöndlað hráefni og mælingar á samsetningu gassins sýndi að metanmyndun byrjaði seinna og náði ekki jafnmiklum styrk og meðhöndlaða hráefnið.



Mynd 7. Uppsöfnuð metanframleiðsla á svínaskít á meðhöndluðu (blátt) og ómeðhöndluðu hráefni (rautt og grænt). (Úr 250 lítrum hráefnis sem er u.þ.b. 1% að styrk).



Mynd 8. Metan styrkur (% CH₄) í toppi tanks á meðan á gerjun standur. Blátt er rafpúlsameðhöndlaður svínaskítur en rautt er ómeðhöndlaður svínaskítur

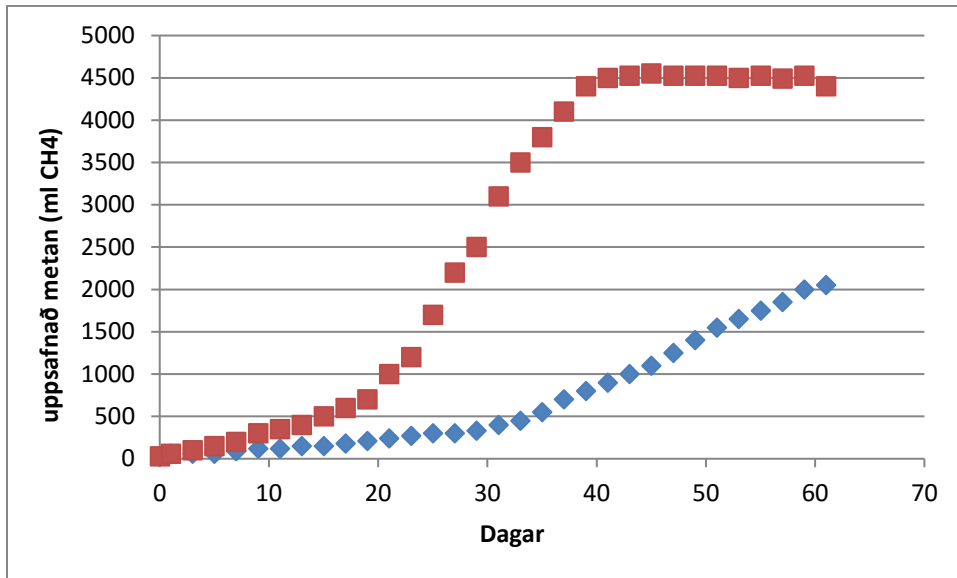
3.3 Metanframleiðsla í rannsóknarstofu

Metanframleiðsla úr svínaskít og sigvatni frá Álfsnesi.

Um 10 lítrar af svínaskít í lausn (tæp 1%) var meðhöndlað og síðan sett á sex eins lítra flöskur en ómeðhöndlaður skítur var einnig settur á fjórar flöskur. Uppsöfnuð framleiðsla á metani er sýnd í mynd 9 fyrir skít sem meðhöndlaður var með 15 kWh/m³.

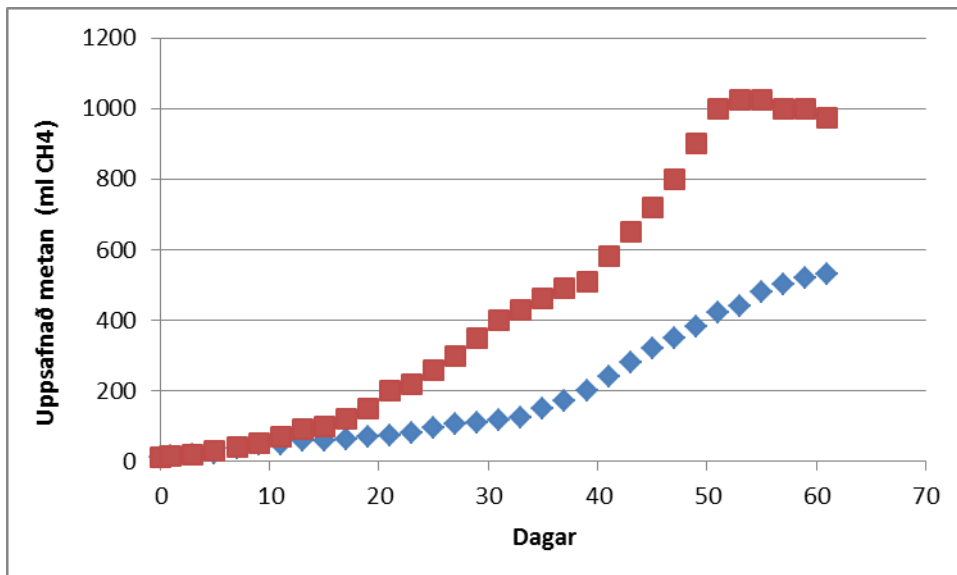
Metanmyndun var í heildina mælanlega meiri fyrir meðhöndlaðan svínaskít en ómeðhöndlað skít. Metanmyndun byrjaði líka seinna á ferlinu og jókst hægar fyrir ómeðhöndlað hráefni en hjá meðhöndlaða skítum. Að jafnaði mældist vera um 70 til 77% metan í því gasi sem myndaðist sem er hærra hlutfall en í venjulegri gerjun. Hlutfall metans og koldíoxíðs var nokkuð sambærilegt í meðhöndluðum og ómeðhöndluðum sýnum. Þetta háa gildi fyrir metan stafar líklega af því hvernig mælitækið er, þar sem rúmmálmælirinn er í vatni og líklegt að koltvísýringurinn leysist upp í vatninu að hluta. Þetta kemur ekki að sök fyrir magnmælingu á metani. Niðurstöður fyrir metanframleiðslu úr svínaskít í lítra kerfinu sýna

aðeins meiri framleiðslu miðað við þurrefnisinnihald eða um 400 L/kg CH₄ á móti um 450L/kg fyrir smærra kerfið.



Mynd 9. Uppsafnað metan hjá meðhöndluðum (rautt) og ómeðhöndluðum svínaskít í 1L kerfinu (blátt)

Myndun metans fyrir sigvatnið frá Álfsnesi sést í mynd 10 og var meðhöndlað með allt að 30 kWh/m³.

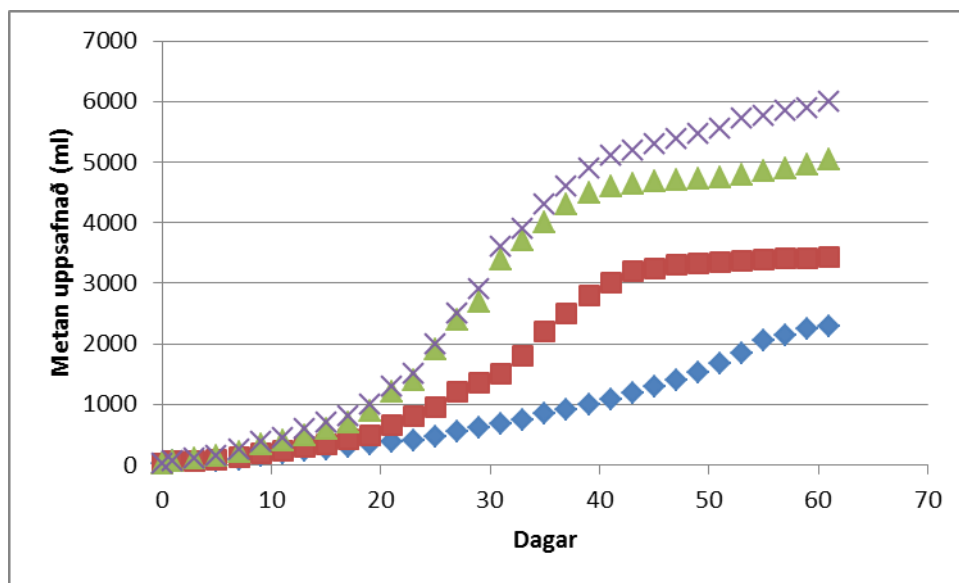


Mynd 10. Uppsafnað metan hjá meðhöndluðu (rautt) og ómeðhöndluðu sigvatni (blátt) í eins lítra kerfinu.

Minna myndaðist af metani og gasi við gerjun sigvatnsins en svínaskít enda innihélt það minna af þurrefni. Minni munur var á metanmyndun á meðhöndluðu og ómeðhöndluðu sigvatni en fyrir svínaskít líklega vegna þess að hluti uppleysta efnisins í sigvatninu er ekki lífrænn og mögulega tekur það lengri tíma að gerjast. Engu að síður var um 70% munur á meðhöndluðu og ómeðhöndluðu sigvatni.

Metan frá hreinsaðri mykju, sigvatni og blönduðum matarúrgangi

Hreinsuð og síuð mykja var meðhöndluð og sett í metanframleiðslu. Um 10 litrar af vatnsblandaðri mykju var síuð og meðhöndluð í mislangan tíma (mismunandi orkunotkun). Sett var á 3 flöskur fyrir hverja meðhöndlun og svo ómeðhöndluð blanda í 3 flöskur. Uppsöfnuð framleiðsla á metani er sýnd í mynd 11 fyrir þynnta og hreinsaða mykju.

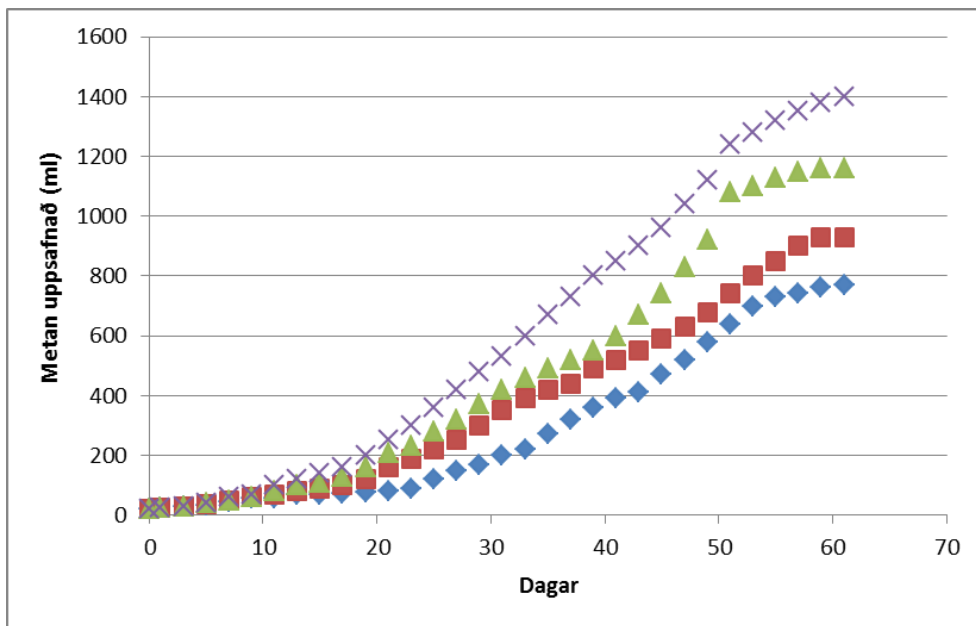


Mynd 11. Uppsafnað metan frá gerjun á hreinsaðri mykju. Ómeðhöndlað (blár tígull), 15 kWh/m³ (rauður ferningur), 25 kWh/m³ (grænn þríhyrningur) og 50 kWh/m³ (blátt X)

Myndin sýnir glögglega að metanframleiðslan eykst við aukna meðhöndlun á hreinsaðri mykju og er tæplega þreföld við 50 kWh/m³ og um 50% við 15 kWh/m³. Hins vegar eykst metanframleiðslan ekki mikið frá 25 til 50 kWh/m³ orkunotkun sem bendir til að

hagkvæmara sé að nota minni orku við framleiðsluna en 50 kWh/m^3 enda skiptir máli í framleiðslunni að orkujafnvægið sé jákvætt.

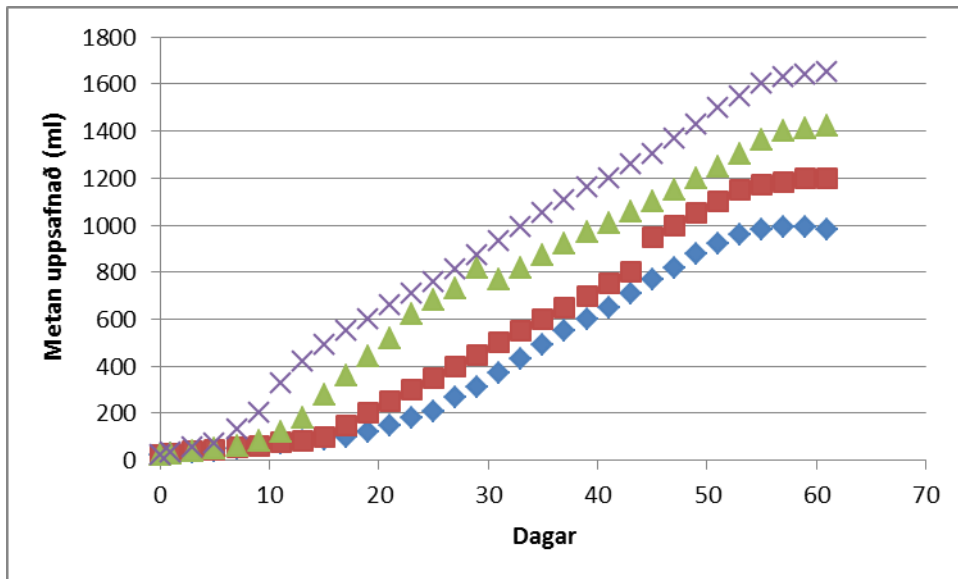
Fleiri mælingar voru gerðar á metanframleiðslu á sigvatni frá haugunum á Álfsnesi við mismunandi mikla meðhöndlun eins og sést á mynd 12 til viðbótar þeim tilraunum sem gerðar voru fyrr og sýndar eru í mynd 10 hér fyrir ofan.



Mynd 12. Uppsafnað metan við gerjun á sigvatni. Ómeðhöndlað (blár tígull), 15 kWh/m^3 (rauður ferningur), 25 kWh/m^3 (grænn þríhyrningur) og 50 kWh/m^3 (blátt X)

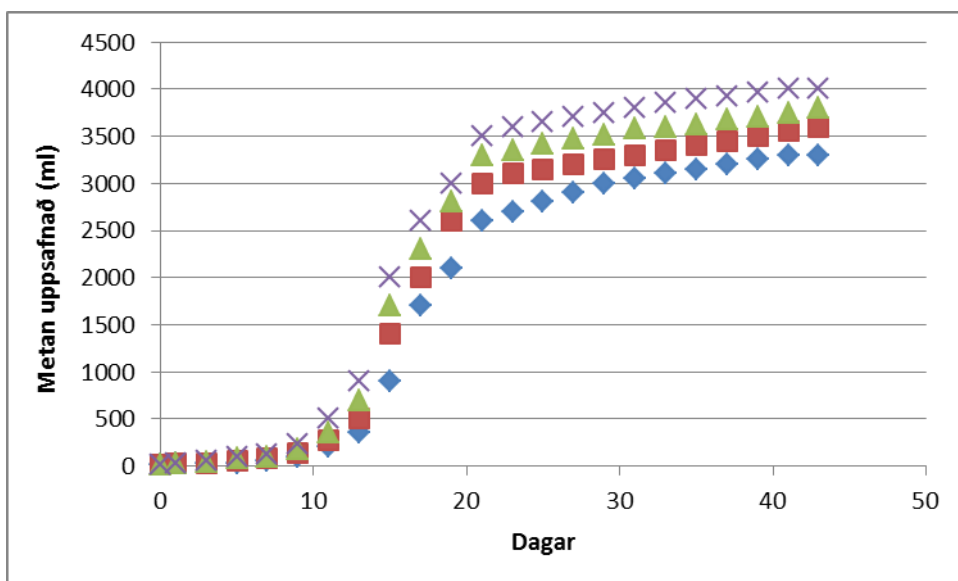
Niðurstöður fyrir sigvatnið sýndu sömu tilhneigingu og fyrir mykju og svínaskít að metan framleiðsla jókst með aukinni rafpúlsameðhöndlun, en myndun metans var mun minni. Metanmyndun var aðeins meiri miðað við fyrri niðurstöðu við 30 kWh/m^3 , en þurrefnisinnihald var hins vegar aðeins meira sem skýrir muninn. Metan jókst tvöfald við 50 kWh/m^3 miðað við ómeðhöndlað en mun minna fyrir minni meðhöndlun.

Niðurstöður fyrir auðgað sigvatn frá þrýstivökvunarkerfinu eru sýndar í mynd 13.



Mynd 13. Uppsafnað metan frá gerjun á auðguðu sigvatni frá vökvunarkerfi (Percolation). Ómeðhöndlað (blár tígull), 15 kWh/m³ (rauður ferningur), 25 kWh/m³ (grænn þríhyrningur) og 50 kWh/m³ (blátt X)

Niðurstöður sýna að auðgað sigvatn myndar meira metan en sigvatnið frá Álfsnesi því það inniheldur meira af uppleystum efnum og hlutfall af ólífrænum efnum er lægra. Metan aukningin er um 60% fyrir mestu orkunotkun en um 20% við 15 kWh/m³. Niðurstöður metanmælinga fyrir blandaðan matarúrgang sem er aðallega ávextir og grænmeti eru sýndar í mynd 14.



Mynd 14. Uppsafnað metan frá gerjun á blönduðum matarúrgangi. Ómeðhöndlað (blár tígull), 15 kWh/m³ (rauður ferningur), 25 kWh/m³ (grænn þríhyrningur) og 50 kWh/m³ (blátt X)

Niðurstöður fyrir blandaðan matarúrgang sýna að meira myndast af metan en fyrir sigvatn eða auðgað sigvatn m.a. vegna þess að heildarmagn af lífrænu efni er meira og hlutfall ólífræns efnis er minna. Það sést einnig að metan myndun eykst mjög hratt eftir 10 daga gerjun sem bendir einnig í þessa átt að blandaði úrgangurinn sé aðgengilegri fyrir metanmyndandi bakteríur en flest annað hráefni. Niðurstöður sýna einnig að lítil munur er á meðhöndluðum úrgangi og ómeðhöndluðum eða um 18%. Þetta bendir til þess að blandaður matarúrgangur sem samanstendur af ávöxtum er það auðmeltanlegur að rafpúlsameðhöndlun er ekki að skila miklu.

Ályktanir

Ályktanir sem má draga af öllum niðurstöðum sýna að rafpúlsameðhöndlun er að sundra lífrænu efni og gerir það leysanlegra og aðgengilegra fyrir metanmyndandi bakteríur. Það er einnig ljóst að rafpúlsameðhöndlun eykur metanframleiðslu, en áhrifin eru tengt því hve kröftug meðhöndlunin er sem ræðst af þeirri heildarorku sem lögð er í meðhöndlunina. Líklega hefur meðhöndlunin mismunandi áhrif á mismunandi hráefni eftir því hve auðvelt er að brjóta það niður og hve mikið af lífrænum efnum eru til staðar. Mykja og svínaskítur virðast henta fyrir rafpúlsameðhöndlun en auðleyst lífræn efni eins og ávaxtaúrgangur síður. Sigvatn frá Álfsnesi inniheldur hlutfallslega meira af ólífrænum uppleystum efnum en t.d. svínaskítur og minna magn metans myndast við gerjun þess. Rafpúlsar henta því líklega best fyrir hráefni sem ekki er auðleysanlegt, hefur hátt hlutfall af lífrænum efnum og inniheldur mikið af örverum en þá má búast við mestum árangri. Stærra kerfið virðist hægverkara en minna lítrakerfið þar sem gerjunin fer hægar í gang og myndar aðeins minna gas á sama tíma. Hafa verður þetta í huga við uppskölun á aðferðinni og einnig hvernig best er að blanda saman hráefnum fyrir rafpúlsameðhöndlun til að ná sem bestum árangri.

4 Hagkvæmni

Hagkvæmni rafpúlsameðhöndlunar á lífrænum úrgangi fyrir metanvinnslu veltur á ýmsu. Stærðarhagkvæmni er ein forsendan, svo og stofn og rekstrarkostnaður. Einnig skipta máli ýmsar vinnsluforsendur svo sem magn fastra efna í efnablöndunni sem getur verið allt að 8-10% og fer eftir því hve auðvelt er að dæla blöndunni.

Í þessari skýrslu er gengið útfrá magnforsendum Sorpu á lífrænum efnum því líklegast er að tæknin yrði notuð þar í nánustu framtíð. Sorpa gerir ráð fyrir að hægt sé að safna um 30.000 tonnum af lífrænu hráefni með u.þ.b. 25% þurrefnisinnihaldi. Þetta magn samsvarar um 7500 tonnum af þurrefni og má þá gera ráð fyrir um 250-300 Nm³/tonn af metani að jafnaði á þurrefnistonn án nokkurrar rafpúlsameðhöndlunar. Möguleg metanaukning er allt frá 0% og yfir 100% með rafpúlsameðhöndlun. Gert er ráð fyrir að heildsöluverð á metani frá verksmiðju sé 70 kr/Nm³ í þessum útreikningum. Smásöluverð var 149 kr/Nm³ í september 2014.

Gert er ráð fyrir að þurrefnisinnihald sé frá tveimur og upp í fimm prósent í úrgangsblöndum og eru kostnaðarútreikningar miðaðir við það. Þetta þýðir að þynna þyrfti út lífræna úrganginn og magnið sem þyrfti að dæla væri á bilinu 150 til 375 þúsund rúmmetrar. Það er þó mögulegt með öflugri dælum að fara upp í 8 til 9% styrk og myndi þá hagkvæmni aðferðarinnar aukast enn frekar.

Ýmis tæki eru á markaði sem líklega mætti aðlaga að þörfum Sorpu. Þau tæki eru gerð fyrir seyrumeðhöndlun svo að bæta þarf við tæki sem hakkar lífræna efnið í smáar einingar fyrir blandaðan lífrænan úrgang. Tæki frá Diversified Technologies kosta um 500.000 \$ og er kostnaður því um 60 milljónir fyrir tækið sem annar 10t/klst (Gaudreu o.fl. 2006). Miðað við að tækið sé keyrt 24 tíma á sólarhring og a.m.k. 320 daga ári þá annar það um 77.000 tonnum á ári. Kostnaður við tæki væri því á bilinu 113 milljónir til 280 milljónir eftir því hve mikil þurrefnisprósenta er hægt að meðhöndla án þess að lenda í vandræðum með að dæla því. Viðhald tækis er áætlað um 2 milljón króna og hreinsunarkostnaður um 1 milljón króna á ári. Töepfl (2006) gerir ráð fyrir að smíði á tæki sem afkasti 10t/klst kosti um 150.000 evrur sem gerir um 23 til 120 milljónir eftir því hvað tækið ræður við hátt þurrefnisinnihaldið. Einnig eru til ýmsir framleiðendur á rafpúlsatækjum fyrir lyfja og tækniðnað sem má nýta við

sundrun á lífrænu efni og er t.d. ScandiNova stór aðili á þessum markaði ásamt franska fyrirtækinu Thomson CSF. En gera má því ráð fyrir að stofnkostnaður vegna tækja sé frá 120 til 300 milljónir miðað við þau tæki sem eru á markaði frá Diversified Technologies. Líklega er möguleiki að smíða tæki sambærilegt og Töepfl (2006) lýsir sem hentaði þörfum Sorpu, en kostnaður við það er ekki hægt að staðfesta nema fara í ítarlega greiningu á því. Eingöngu er gert ráð fyrir kostnaði vegna rafpúlsatækis þar sem ætlað er að metanframleiðsla færi fram óháð rafpúlsameðhöndlun og tækið því eingöngu hugsað sem viðbót við ferlið. Gert er ráð fyrir að öll upphæðin sé tekin að láni og vextir séu 8% í 15 ár.

Ef gert er ráð fyrir raforkunotkun sé að meðaltali um 22 kwh á m³ á sem er með um 5% styrk þá þarf að meðhöndla 150.000 tonn. Miðað við þær forsendur þá væri rafmagnsnotkun um 3.3 milljón kwh. Ef gert er ráð fyrir að einhver afsláttur fái af raforkukostnaði svo að kostnaður sé um 8 kr/kwh þá gerir þetta um 26.4 milljón krónur. Meðhöndlunin gæti þó verið allt frá 15 kwh/m³ í um 40 kwh/m³ og er gert ráð fyrir því í útreikningunum. Einnig er möguleiki að meðhöndla hráefnið í mismunandi styrk allt að 8-9% og þynna það eftirá ef með þarf og væri þá kostnaður töluvert minni við meðhöndlun.

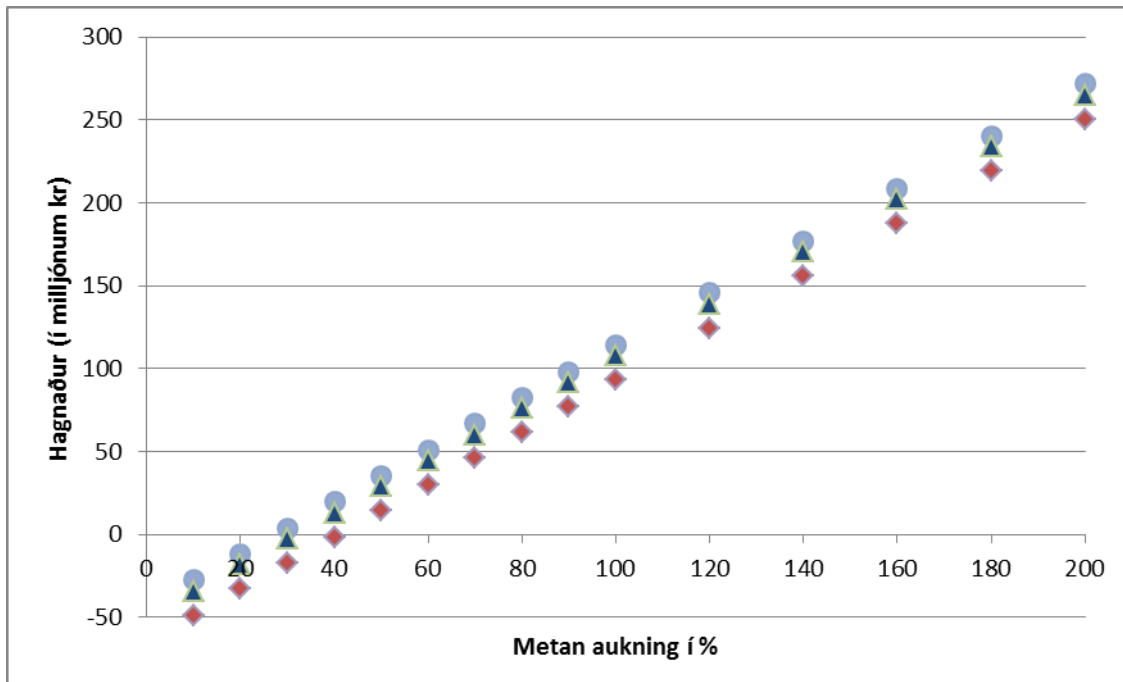
Heildar rekstarkostnaður gæti því verið á bilinu 45 til 60 milljónir á ári miðað við meðhöndlun á 7500 þurrefnistonnum og 5% styrk í lífrænna efna í blöndu.

Í töflu 9 sést mismunandi hagkvæmni fyrir rafpúlsameðhöndlun miðað við að stofnkostnaður sé frá 120 til 300 milljóna og metanaukning frá 10% til 200% . Ef miðað er við dýrasta kostinn þá næst ekki hagkvæmni í framleiðsluna fyrr en metan aukningin er komin yfir 30%.

Tafla 9. Hagkvæmni rafpúlsa miðað við þrenns konar fjárfestingarkostnað og vinnslu á 7500 tonn af þurrefni og unnið sé með 5% þurrefni í efnalausn. Hagnaður (tap) í milljónum króna

Aukning metans (%)	Aukning metans (Nm ³)	Hagnaður (tap) metanframleiðslu með rafpúlsum við mismunandi fjárfestingu		
		120 m. fjárfesting	175m. fjárfesting	300m. fjárfesting
10	225.000	-27.7	-34.1	-48.7
20	450.000	-11.9	-18.3	-32.9
30	675.000	3.8	-2.6	-17.2
40	900.000	19.6	13.2	-1.5
50	1.125.000	35.3	28.9	14.3
60	1.350.000	51.1	44.7	30.1
70	1.575.000	66.8	60.4	45.8
80	1.800.000	82.6	76.2	61.6
90	2.025.000	98.3	91.9	77.3
100	2.250.000	114.1	107.7	93.1
120	2.700.000	145.6	139.2	124.6
140	3.150.000	177.1	170.7	156.1
160	3.600.000	208.6	202.2	187.6
180	4.050.000	240.1	233.7	219.1
200	4.500.000	271.6	265.2	250.6

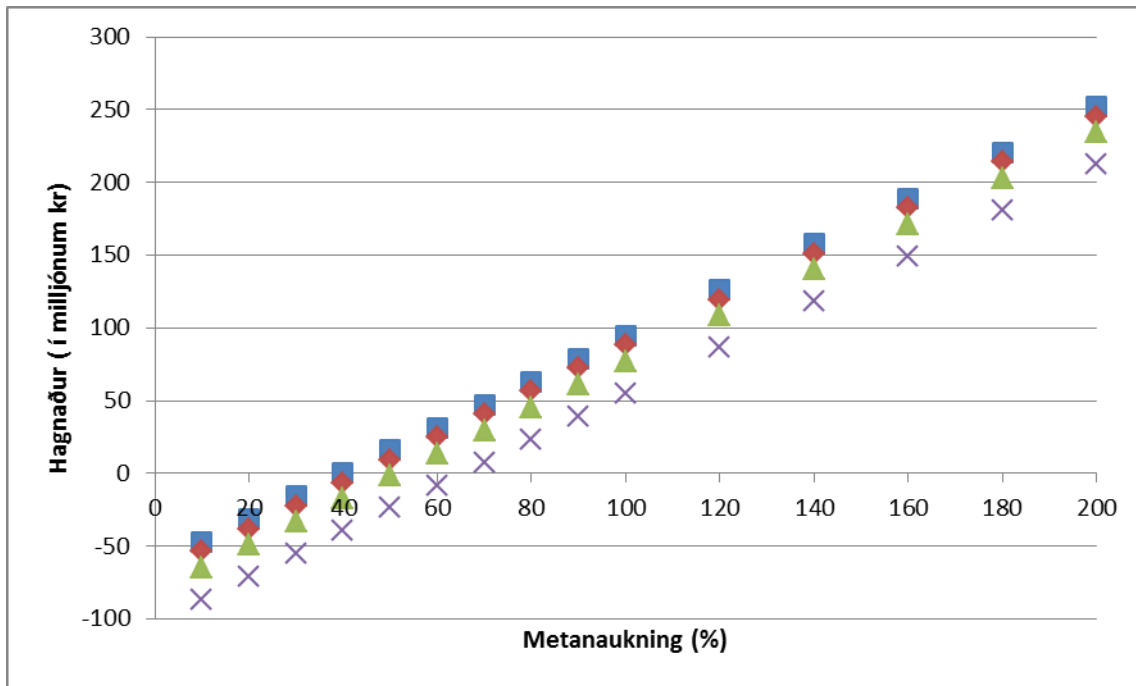
Það er einnig hægt að sjá þetta myndrænt í mynd 15 fyrir 120, 175 og 300 milljón króna fjárfestingu. Lítil munur er á fjárfestingarkostnaði þar sem aðrir kostnaðarliðir eins og rafmagn og viðhald vega þungt. Það er ekki meir en 20 milljónir sem munurinn er á fjármagnskostnaði miðað við hæsta og lágsta stofnkostnað.



Mynd 15. Hagnaðaraukning með rafpúlsameðhöndlun á 5% efnalausn og miðað við 120, 175 eða 300 milljón króna fjárfestingu og mismunandi framleiðsluaukningu á metani. Rauður tígull (300 milljón kr), blár þríhyrnur (175 milljón) og ljósblár hringur (120 milljón kr).

Ef miðað er við dýrasta fjárfestingarkostinn þá þyrfti yfir 30% aukningu á metanframleiðslu til að fjárfestingin borgi sig en yfir 20% aukningu ef fjárfestingin væri 120 milljónir. Tvöföldun metanframleiðslunnar (100% aukning) borgar sig upp á einu til tveimur árum eftir því hver stofnkostnaður er. Miðað við þær mælingar sem hafa verið gerðar í þessu verkefni þá hefur aukningin verið á bilinu 60% til 200% eftir því hvaða hráefni er um að ræða. Í öllum tilvikum væri það hagstætt að nota rafpúlsa til að meðhöndla lífrænan úrgang miðað við sömu forsendur.

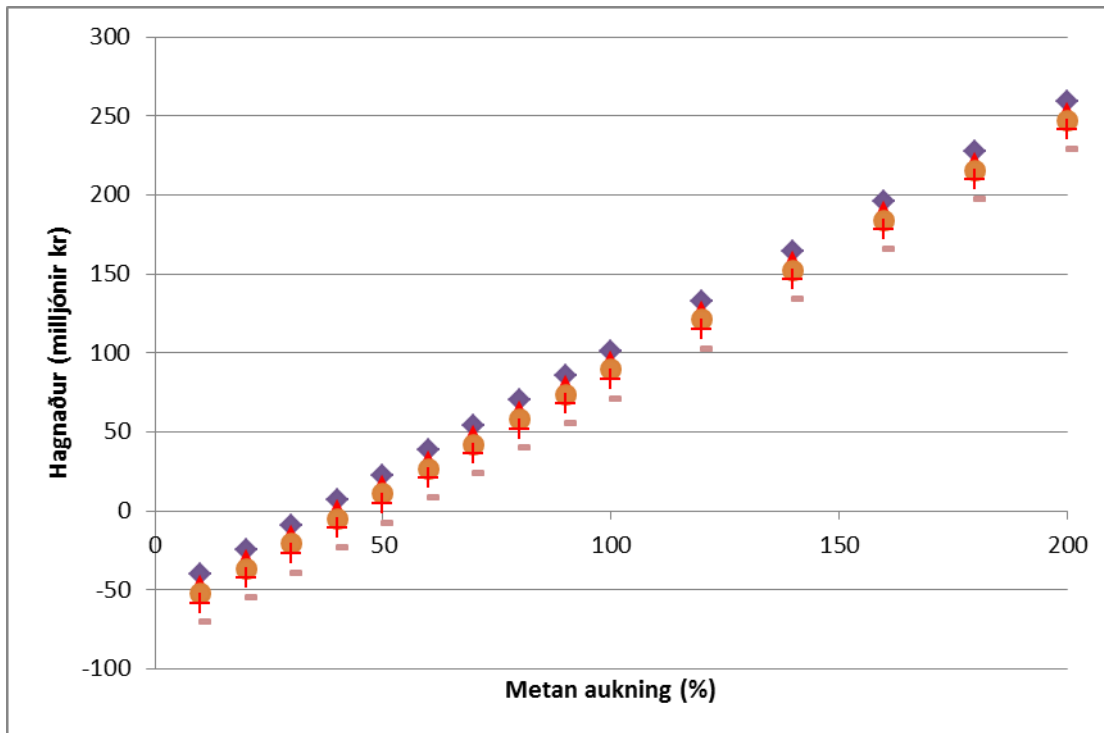
Mynd 16 sýnir mismunandi hagnað eftir því hve mikill styrkur er í efnalausninni sem meðhöndlaður er og mismunandi metan framleiðsluaukningu.



Mynd 16. Hagnaðaraukning með rafpúlsameðhöndlun miðuð við mismunandi styrk í efnalausninni frá 2 og í 5% og miðuð við mismunandi metan framleiðsluaukningu. 2% (fjólublár kross), 3% (grænn þríhyrningur), 4% (rauður tígull) og 5% (blár ferhyrningur)

Það skiptir greinilega máli hver styrkurinn er í blöndunni þar sem framleiðslan verður jákvæð um og við 40% aukningu við 5% styrk en það þarf 60% aukningu í metani við 2% efnastyrk. Ef hægt væri að dæla allt að 9% efnastyrk í gegnum rafpúlsakerfið þá væri hagkvæmnin enn meiri og sparnaður fyrst og fremst í rafmagnskostnaði eða allt að 15 milljónum til viðbótar miðuð við meðalnotkun um 22 kWh/m³.

Rafmagnsnotkun skiptir einnig máli hvað varðar rekstur á rafpúlsatækinu og getur munað töluverðu. Í mynd 17 sést hvernig rekstur breytist eftir því hve mikil rafmagnsnotkunin er frá 15 kWh/m³ í 40 kWh/m³.

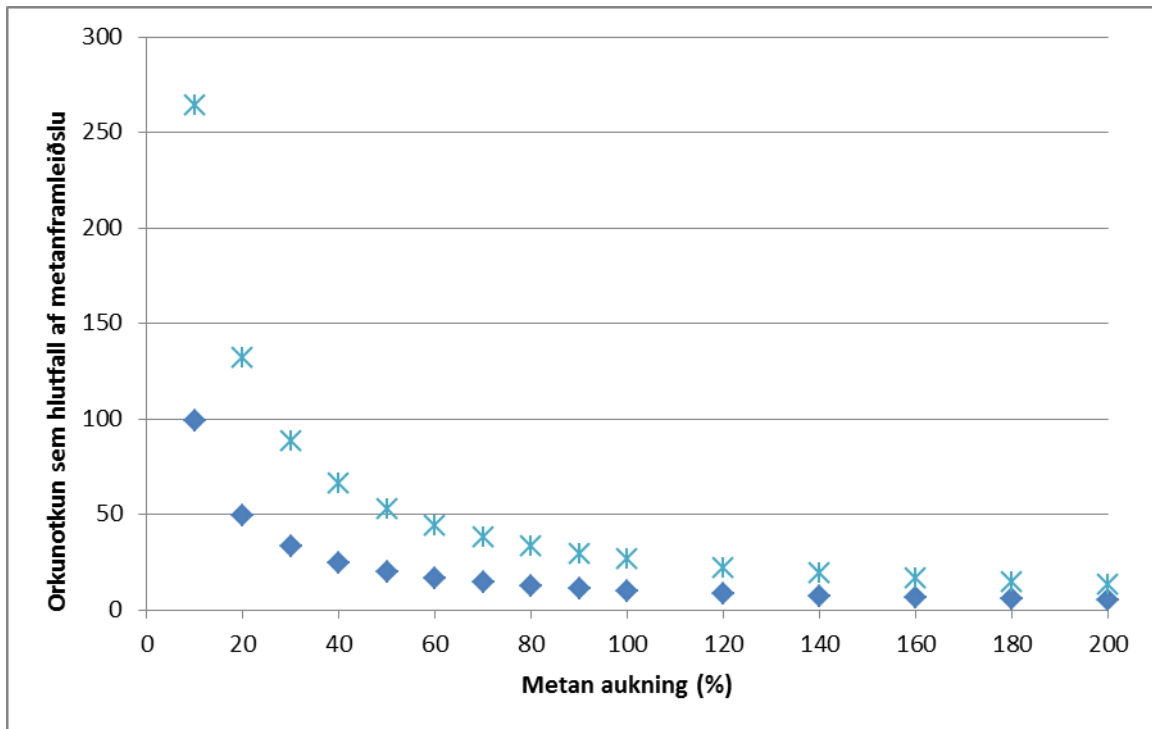


Mynd 17. Hagkvæmni á rekstri rafpúlsameðhöndlunar miðað við mismunandi rafmagnsnotkun og aukningu í magni metans. Miðað er við 300 milljón króna fjárfestingu og 5% styrk úrgangs. 15 kWh/m³ (blár tígull), 20 kWh/m³ (rauður þríhyrningur), 25 kWh/m³ (gulur hringur), 30 kWh/m³ (rauður kross) og 40 kWh/m³ (ljósrautt strik).

Eins og sést vel á myndinni þá væri meðhöndlunin hagstæð rétt yfir 30% metanaukningu við 15 kWh/m³ notkun en aukningin þyrfti að fara yfir 50% til að 40 kWh/m³ yrði hagstæð.

Ljóst er að því hærri styrkur sem er í blöndu sem hægt er að nota og lægri orkunotkun í meðhöndluninni þá gæti rafpúlsameðhöndlun verið hagstæð með innan við 20% aukningu í metanframleiðslu sem öruggt er að ætti að nást við allar kringumstæður og mismunandi hráefnisnotkun.

Ef reiknað er orkunotkun rafpúlsameðhöndlunar sem hlutfall af metanaukningunni miðað við að efnastyrkur sé 5%, þá fæst myndin 18 fyrir orkunotkunina 15 og 40 kWh/m³.



Mynd 18. Orkunotkun við rafpúlsameðhöndlun sem hlutfall af orkugildi metans sem fæst til viðbótar. Hlutfallið er sýnt fyrir annars vegar 15 kWh/m³ (blár tígull) og 40 kWh/m³ (ljósblár kross).

Eins og sést á mynd þá er orkunotkun komin undir 20% af metanaukningunni þegar hún eykst um 50% af upprunalegri framleiðslu við 15 kWh/m³ notkun, en við 40 kWh/m³ notkun þarf aukningin í metanframleiðslu að vera meiri en 120% til að orkunotkunin sé undir 20% af aukningunni.

Heimildir

Angelidaki, I., Ellegaard, L., & Ahring, B. (1991). Compact automated displacement gas metering system for measurement of low gas rates from laboratory fermentors.

Baneszak, J.E., Burrowes, P., and Lopez, R. 2009. Focused-pulsed Treatment of Waste Activated Sludge: A Year review. Lecture in the 5th Canadian Residuals and Bio-solids Conference, Ontario Canada.

Diversified Technologies 2012. Pulsed Electric field applications. Upplýsingabæklingur

Gaudreau M., Hawkey T., Petry J., Kempkes M. 2006. Scaleup of PEF Systems for Food and Waste Streams. Fundið á www.divtech.com

Geotech.(2012).GA2000Datashet. Retrieved from <http://www.keison.co.uk/products/geotechnical/GA2000.pdf>

Gudmundsson, M. and Proietti, N. 2012. Pretreatment of common bio-waste with pulsed electric field at semi-scale for improved anaerobic digestion. Proceedings for Nordic Biogas Conference, Copenhagen Denmark, 23-25 April.

Gudmundsson, M., Proietti N. and Savefi S.M. 2014 Pulsed electric field as pretreatment of organic waste for enhanced biogas production. Proceedings for Nordic Biogas Conference, Reykjavik, 26-29 August.

Salerno, M.B, Lee H.-S, Parameswaran P., and Rittman B.F. 2009. Using a pulsed electric field as a pretreatment for improved biosolids digestion and methanogenesis. Water Environment Research, August 81, 8, 831-839

Töpfl .S. 2006. Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of Cell Membranes in Food and Bioprocessing – Applications, Process and Equipment Design and Cost Analysis. Ph.D. thesis Technical University of Berlin