



Kennsluefni í vatnsfræði

Ragnar Jóhannsson

Hólum í Hjaltadal 20 Apríl 2006

Formáli:

Þetta efni var setti saman og staðfært fyrir námskeið í vatnsfræði 2006. Ekki var til neitt námsefni á íslensku og því var þetta efni sett saman í skyndi. Við gerð þessa efnis studdist ég mikið við bók M.B. Timmons og J.M Ebeling, Recirculating Aquaculture og er í raun oft um beinar þýðingar að ræða.

Efnisyfirlit

1 Loftun og flutningur lofttegunda	3
1.1 Inngangur	3
1.2 Lofttegundir í vatni - Grunnþættir	4
1.2.1 Leysni lofttegunda	4
1.3 Áhrif loftþrýstings	5
1.3.1 Áhrif hæðar frá sjávarmáli	8
1.3.2 Gufuprýstingur vatns	8
1.3.3 Yfirmettun lofttegunda	8
1.3.4 Heildargasprýstingur	9
1.4 Flutningur lofttegunda	9
1.4.1 Grunnur flutnings	10
1.4.2 Leiðir til að auka flutning	11
1.4.3 Virkni súrefnisflutnings	11
1.5 Loftun vatns með andrúmslofti:	13
1.5.1 Loftunarsteinar.	15
1.6 Súrefnibæti- og loftskiptabúnaður.	15
1.6.1 Súrefnisbúnaður	15
1.6.2 U-rör	16
1.6.3 Loftarar með fyllingu	16
1.6.4 Lágprýsti súrefnismettarar	17
1.6.5 Súrefniskeilur	19
1.7 Súrefnisbæting með loftsteinum	20
1.8 Súrefnisinngöf í rör	21
1.9 Dæmi um tilraun þar sem virkni búnaðar er mæld: 21	
1.10 Afloftun kolsýru	24
1.10.1 Áhrif koltvísýrings	25
1.10.2 Fjarlæging kolsýru	26
2 Ammóníak og lífhreinsar	32
2.1 Ammoníak	32
2.1.1 Ferill nítrunar	35
2.2 Lífhreinsar	36

2.2.1	Hönnunarstærðir	37
2.2.2	Kaflífhreinsar (Submerged biofilters) . . .	38
2.2.3	Hríplífhreinsar	39
2.2.4	Hverfihreinsar (Rotating biological contact- ors)	40
2.2.5	Smákorna lífsíur	42
2.2.6	Smákorna svifbeðshreinsir (Fluidized-bed biofilters)	43
3	Fjarlæging á gruggögnum	46
3.1	Inngangur	46
3.1.1	Heildargrugg og gruggmælingar	47
3.2	Massajafnvægi	47
3.2.1	Allmenn hönnunarskilyrði fyrir hringlaga ker	48
3.3	Myndun gruggs	49
3.3.1	Eðliseiginleikar gruggs	49
3.4	Aðferðir til grugghreinsunar	50
3.4.1	Felling	51
3.4.2	Skjásíun með tromlu- og hjólsíum	55

Kafli 1

Loftun og flutningur lofttegunda

1.1 Inngangur

Aðgengi fisks að uppleystu súrefni er vanalega fyrsti þröskuldurinn sem takmarkar vatnsnýtingu og svokallaða burðargetu, það er hve mörg kílógrömm fisks er hægt að hafa í hverjum rúmmetar vatns. Ef eingöngu er notuð loftun til að sjá fiski fyrir súrefni er erfitt á ná burðagetu yfir 40 kg/m^3 . Ef notast er við súrefnisbætingu er mun auðveldara að koma súrefni til fisks og því er hærri þéttni möguleg má auðveldlega fara upp í 120 kg/m^3 ef aðrir þættir eru ekki takmarkandi.

Sem dæmi má nefna að ef uppleyst súrefni í innstreymi er aukið úr 10 mg/L í 18 mg/L með því að nota hreint súrefni og gera ráð fyrir að súrefnisstyrkur í frárennsli sé 7 mg/L má minnka innrennsli nær þrefalt. Því er auðsætt að minnka má gegnstreymi um ker umtalsvert með súrefnisbætingu.

Í eldiskeri þar sem þéttni fisks er umtalsverð og vatnsskiptahraði er lágur eru þó aðrir þættir sem verður að taka tillit til. Líkur eru á að styrkur koltvísýrings (CO_2) aukist vegna öndunar fisksins og geti skapað hættuástand fyrir fiskinn. Aðrar lofttegundir skipta líka máli svo sem köfnunarefni, argon og vetnissúlfíð og ammoníak.

Pegar hugað er að meðhöndlun vatns, til að stýra styrk súrefnis sem dæmi, þarf að hafa í huga hvernig styrkur annarra lofttegunda breytist í vatninu. Því þarf að huga að hegðun þessara uppleystu lofttegunda og einnig öðrum vatnsgæðabáttum við loftun eða súrefnisbætingu vatns.

Loftegund	Rúmmál %	Massi %	Mólþyngd
Köfnunarefni	78,082	75,6	28
Súrefni	20,946	23,2	32
CO ₂	0,032	0,048	44
Argon	0,934	1,3	39,9

Tafla 1.1: Styrkur loftteguna í þurru andrúmslofti

Í þessum kafla verður fjallað um eðlis- og efnafræði loftunar og súrefnisbætingar og nauðsyn þessa. Einnig verður ýmsum búnaði lýst.

1.2 Lofttegundir í vatni - Grunnþættir

Andrúmsloftið er samsett af 20,94% súrefni (O₂) 78,08% köfnunarefni (N₂), 0,93% argoni (Ar), 0,032% koltvísýringi (CO₂) auk snefillofttegunda (sjá töflu 1.1).

Heildarloftþrýstingur andrúmsloftsins er summa hlutþrýstings þeirra lofttegunda sem það er samsett úr. Hlutþrýstingur er í réttu hlutfalli við mólhlutfall hennar í loftinu og því samkvæmt gaslögmálinu einnig hlutrúmmáli hennar. Súrefni sem er við staðalhita og þrýsting 760 mmHg hefur því hlutþrýsing sem er $760 \text{ mmHg} \times 0,20294$ eða um 160 mmHg. Aflesinn þrýstingur er heildarþrýsingur mínus loftþrýstingur.

Heildarþrýstingur lofttegunda í vatni er því summa hlutþrýstinga eins og fyrr segir sem getur verið hærri, jafn eða lægri en loftþrýstingur. Ef hann er hærri er vatnið yfirmettað.

1.2.1 Leysni lofttegunda

Hlutfall lofttegunda í vatni er annað en það er í lofti vegna mismunandi leysanleika þeirra í vatni. Sem dæmi má nefna að hlutfallið O₂:N₂ er um 1:4 í lofti en er 1:2 í vatni, þannig að súrefni leysist mun betur en köfnunarefni í vatni.

Leysni lofttegunda, oftast mælt í mg/L, er háð hita, seltu, samsetningu lofttegunda og heildarþrýsting í vatninu. Leysnin eykst í réttu hlutfalli við mólhlutfall (og þar með rúmmál) en minnkar nokkuð með aukinni seltu og hækkandi hita. Samband leysni sem fall af hita er sýnt í töflu 1.2.1.

Eins og fyrr segir er leysni í réttu hlutfalli við samsetningu lofttegunda sem vatnið er í jafnvægi við. Ef við aukum mólhluta súrefnis úr 0,20946 eins og það er í lofti í 1,0 sem er þá jafn-

Loftegund	Hitastig							
	5°C		10°C		15°C		20°C	
	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%
Köfnunarefni (N ₂)	20,33	58,5	18,14	58,5	16,36	58,8	14,88	59,1
Súrefni (O ₂)	12,76	36,7	11,28	36,6	10,07	36,4	9,08	36,2
Argon (Ar)	0,78	2,2	0,69	2,2	0,62	2,2	0,56	2,2
Kolsýringur (CO ₂)	0,89	2,6	0,75	2,4	0,63	2,3	0,54	2,2

Tafla 1.2: Leysni lofttegunda í ósöltu vatni við mismunandi hitastig (mg/L) í jafnvægi við andrúmsloft við 760 mmHg

vægi við hreint súrefni mun styrkur aukast úr 10,07 mg/L við 15°C í 48 mg/L.

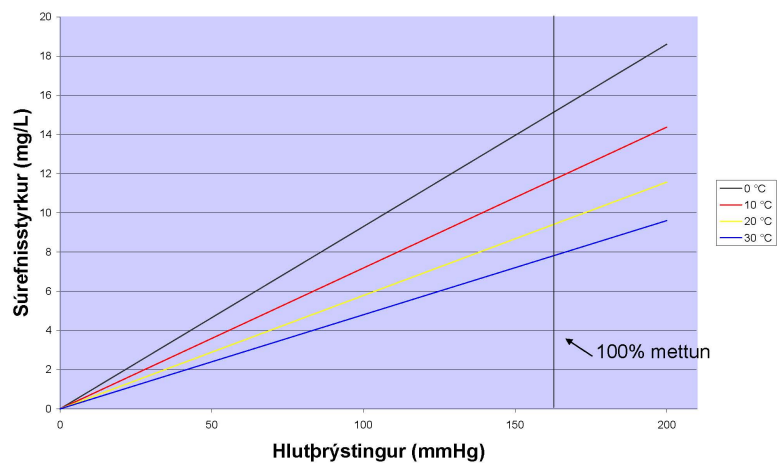
Leysni lofttegunda er einnig í réttu hlutfalli við þrýsting. Með því að auka þrýsting um helming mun leysni aukast að sama skapi. Aukinn gasþrýstingur myndast þegar loftegund er sprautað inn undir þrýstingi og einnig þegar vatn er sótt af einhverju dýpi. Eitt vandamál sem upp kemur því þegar súrefnisbætt er með lofti undir auknum þrýsting er að aukinn þrýstingur mun einnig auka leysni köfnunarefnis og argons fram yfir mettnarþrýsting.

Heildar gasþrýstingi ætti ætíð að halda undir 105% sem er þó breytilegt eftir tegund og vaxtaskeiði. Takið eftir að prósentulega breytist ekki hlutur lofttegunda með hæð (upp að 90 km hæð), en heildarþrýstingur breytist og þar með leysni hverrar loftegundar fyrir sig. Einnig mun rakastig lofts hafa áhif þar sem vatn hefur hlutþrýsting í lofti sem er á bilinu 10 - 15 mmHg háð hitastigi.

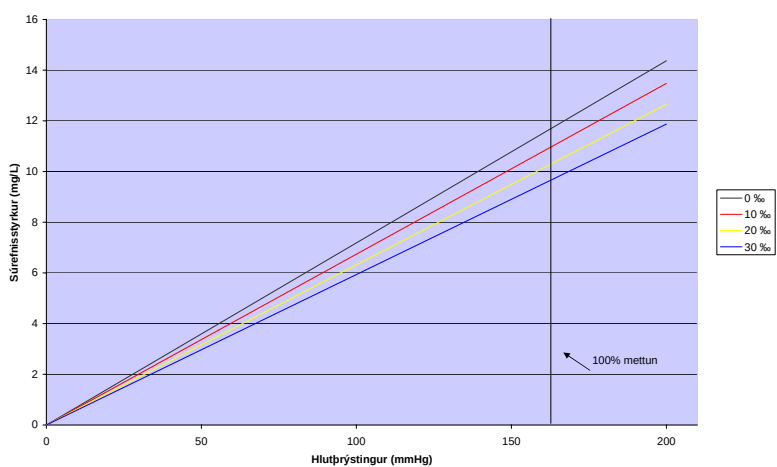
1.3 Áhrif loftþrýstings

Eins og fyrr segir hefur heildarloftþrýstingur áhrif á magn uppleystra lofttegunda þar sem styrkur þeirra er í réttu hlutfalli við hlutþrýsting þeirra sinnum leysnistuðul þeirra sem kallast Henrys stuðull sem er mismundandi fyrir lofttegundirnar, og breytist með hita og seltu.

Myndirnar hér á eftir sýna hver áhrif hiti og selta hefur á leysni súrefnis. Eins og fyrr er nefnt hefur heildarloftþrýstingur áhrif á mettnun. Þegar loftþrýstingur er lágur lækkar styrkur uppleystra lofttegunda.



Mynd 1.1: Styrkur súrefnis sem fall af hlutþrýstingi yfir fersku vatni. Beina línan sýnir hlutþrýsting við 760 mmHg



Mynd 1.2: Styrkur súrefnis sem fall af hlutþrýstingi yfir söltu vatni vatni við 10 °C. Beina línan sýnir hlutþrýsting við 760 mm-Hg

**SOLUBILITY OF DISSOLVED OXYGEN (mg/L) AS A FUNCTION OF
TEMPERATURE AND SALINITY FOR MOIST AIR AT SEA LEVEL**

TEMPERATURE		SALINITY- in parts per thousand (ppt)								
deg C	deg F	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0	32	14.6	14.11	13.64	13.18	12.74	12.31	11.9	11.5	11.11
1	33.8	14.2	13.73	13.27	12.83	12.4	11.98	11.58	11.2	10.83
2	35.6	13.81	13.36	12.91	12.49	12.07	11.67	11.29	10.91	10.55
3	37.4	13.45	13	12.58	12.16	11.76	11.38	11	10.64	10.29
4	39.2	13.09	12.67	12.25	11.85	11.47	11.09	10.73	10.38	10.04
5	41	12.76	12.34	11.94	11.56	11.18	10.82	10.47	10.13	9.8
6	42.8	12.44	12.04	11.65	11.27	10.91	10.56	10.22	9.89	9.57
7	44.6	12.13	11.74	11.37	11	10.65	10.31	9.98	9.66	9.35
8	46.4	11.83	11.46	11.09	10.74	10.4	10.07	9.75	9.44	9.14
9	48.2	11.55	11.19	10.83	10.49	10.16	9.84	9.53	9.23	8.94
10	50	11.28	10.92	10.58	10.25	9.93	9.62	9.32	9.03	8.75
11	51.8	11.02	10.67	10.34	10.02	9.71	9.41	9.12	8.83	8.56
12	53.6	10.77	10.43	10.11	9.8	9.5	9.21	8.92	8.55	8.3
13	55.4	10.53	10.2	9.89	9.59	9.3	9.01	8.74	8.47	8.21
14	57.2	10.29	9.98	9.68	9.38	9.1	8.82	8.55	8.3	8.04
15	59	10.07	9.77	9.47	9.19	8.91	8.64	8.38	8.13	7.88
16	60.8	9.86	9.56	9.28	9	8.73	8.47	8.21	7.97	7.73
17	62.6	9.65	9.36	9.09	8.82	8.55	8.3	8.05	7.81	7.58
18	64.4	9.45	9.17	8.9	8.64	8.39	8.14	7.9	7.66	7.44
19	66.2	9.26	8.99	8.73	8.47	8.22	7.98	7.75	7.52	7.3
20	68	9.08	8.81	8.56	8.31	8.07	7.83	7.6	7.38	7.17
21	69.8	8.9	8.64	8.39	8.15	7.91	7.69	7.46	7.25	7.04
22	71.6	8.73	8.48	8.23	8	7.77	7.54	7.33	7.12	6.91
23	73.4	8.56	8.32	8.08	7.85	7.63	7.41	7.2	6.99	6.79
24	75.2	8.4	8.16	7.93	7.71	7.49	7.28	7.07	6.87	6.68
25	77	8.24	8.01	7.79	7.57	7.36	7.15	6.95	6.75	6.56
26	78.8	8.09	7.87	7.65	7.44	7.23	7.03	6.83	6.64	6.46
27	80.6	7.95	7.73	7.51	7.31	7.1	6.91	6.72	6.53	6.35
28	82.4	7.81	7.59	7.38	7.18	6.98	6.79	6.61	6.42	6.25
29	84.2	7.67	7.46	7.26	7.06	6.87	6.68	6.5	6.32	6.15
30	86	7.54	7.33	7.14	6.94	6.75	6.57	6.39	6.22	6.05
31	87.8	7.41	7.21	7.02	6.83	6.65	6.47	6.29	6.12	5.96
32	89.6	7.29	7.09	6.9	6.72	6.54	6.36	6.19	6.03	5.87
33	91.4	7.17	6.98	6.79	6.61	6.44	6.26	6.1	5.94	5.78
34	93.2	7.05	6.86	6.68	6.51	6.33	6.17	6.01	5.85	5.69
35	95	6.93	6.75	6.58	6.4	6.24	6.07	5.92	5.76	5.61
36	96.8	6.82	6.65	6.47	6.31	6.14	5.98	5.83	5.68	5.53
37	98.6	6.72	6.54	6.37	6.21	6.05	5.89	5.74	5.59	5.45
38	100.4	6.61	6.44	6.28	6.12	5.96	5.81	5.66	5.51	5.37
39	102.2	6.51	6.34	6.18	6.03	5.87	5.72	5.58	5.44	5.3
40	104	6.41	6.25	6.09	5.94	5.79	5.64	5.5	5.36	5.22

1.3.1 Áhrif hæðar frá sjávarmáli

Lofþrýstinur fellur einnig með hæð. Hægt er að reikna lofþrýsing sem fall af hæð með jöfnunni:

$$P_{BP} = 10^a \quad (1.1)$$

Par sem $a = 1,880814 - \frac{h}{19,748}$ og h er hæð yfir sjávarmáli. Þrýstingurinn fæst í cm Hg og því þarf að margfalda með 10 til að fá mmHg

Hver heldur þú að breyting á styrk súrefnis verði ef lofþrýstingur fellur frá 1010 hPa í 980 hPa?

1.3.2 Gufuþrýstingur vatns

Hægt er að nálgast gufuþrýsting vatns mill 10-30 °C með jöfnunni:

$$P_{wv} = A_0 e^{0,0645T} \quad (1.2)$$

Par sem A_0 er $1,65 \times 10^{-7}$ þegar hitinn er í mældur í Kelvin gráðum. Þrýstingur fæst í mmHg.

Sem dæmi er gufuþrýstingur vatns við 0, 10 og 30 °C þá 4,7, 9,1 og 33 mmHg ef jafnan er notuð.

1.3.3 Yfirmettun lofttegunda

Hlutþrýstingur lofttegundar er í réttu hlutfalli við mólhlutfall hennar eins og fyrr er getið:

$$P_i^g = X_i(P_{BP} - P_{wv}) \quad (1.3)$$

Mjög oft er talað um styrk uppleystrar lofttegundar sem % af metnun:

$$S_{\%} = \left[\frac{P^l}{P^g} \right] \times 100 \quad (1.4)$$

Yfirmettum köfnunarefnis

Gæta þarf að því að skilyrði fyrir yfirmettun köfnunarefnis séu ekki til staðar. Yfirmettun köfnunarefnis og argons veldur loftbólueiki sem er í raun kafaraveiki. Seiði eru sérstaklega viðkvæm fyrir yfirmettun köfnunarefnis.

Eins og sjá má af fyrrnefndu eru margir þættir sem hafa áhrif á köfnunarefnisyfirmettun. Gæta þarf sérstaklega að eftirfarandi atriðum:

- Minni leysanleika við hærra hitastig. Eins og sjá má á Mynd 1 minnkar leysanleiki þegar hiti hækkar. Þetta veldur því að þegar vatn sem hefur verið í jafnvægi hitnar verður það yfirmettað. Gæta þarf sérstaklega að því að lofta vatn vel eftir upphitun þess
- Ef lofti er bætt inn undir þrýstingi, til dæmis með loftunarsteinum af einhverju dýpi (meira en 1 metri sem dæmi) er hætta á því að yfirmettun myndist.
- Einnig getur loft sem sogast inn í lagnir gegnum örsmá göt eða óþétt samskeyti valdið því að vatnið yfirmettist ef vatnið er undir meiri þrýstingi einhverstaðar á leiðinni.

1.3.4 Heildargasþrýstingur

Heildargasþrýstingur er mjög mikilvægur og er yfirleitt táknaður sem P_{TG} þar sem Þrýstingur er táknaður með P (samanber enska heitið pressure) og TG stendur fyrir heildargas eða Total Gas á ensku.

Jafna heildargasþrýstins í vatni er:

$$P_{TG} = P_{\text{súrefni}}^l + P_{\text{köfnunarefni}}^l + P_{\text{argon}}^l + P_{CO_2}^l + P_{\text{wv}}^l \quad (1.5)$$

Oft eru ráðlagt að heildarþrýstingur sé innan vissra prósentumarka frá loftþrýstingi, jafna þess er því:

$$P_{TG}(\%) = \frac{P_{TG}}{P_{BP}} \times 100 \quad (1.6)$$

1.4 Flutningur lofttegunda

Hlutþrýstingur lofttegunda í vökva og lofti leitar jafnvægis þannig að hann sé sá sami í báðum fösum. Flutningshraði er í réttu hlutfalli við þrýstingsmuninn fyrir hverja lofttegund milli lofts og vökvafasa. Flutningur lofttegunda stjórnast því af þrýstingsmun.

Sem dæmi má nefna að ef súrefni vatns er undir loftþrýstingi og köfnurefni yfir loftþrýstingi mun súrefni loftast inn og köfnunarefni loftast út.

1.4.1 Grunnur flutnings

Þeir þættir sem hafa áhrif á hve mikið magn af lofttegund skiptir um fasa á tímaeiningu eru:

1. Stærð flatar milli lofts og vatns
2. Mismunur hlutþrýstings milli vatns og loftfasa
3. Stærð flæðihraðastuðuls.

Þessu er lýst með eftirfarandi jöfnu

$$\frac{dC}{dt} = k_L \frac{A}{V} (C_s - C) \quad (1.7)$$

Þar sem dC/dt er breyting á styrk lofttegundar á tímaeiningu ($mgL^{-1}sek^{-1}$), k_L er flæðistuðull, A flötur yfirborðs milli vatns og loftfasa, V rúmmál vatns, C_s er mettunarmörk lofttegundar og C styrkur lofttegundar í vökva á hverjum tíma.

Flæðistuðull, k_L

Í kyrru vatni flytjast lofttegundir með svokölluð sveimi (diffusion). Ef vatnsmassinn er á hreyfingu berast lofttegundirnar mun hraðar upp að yfirborði en síðasta spölinn, sem eru síðustu nanómetrarnir að yfirborði, hefur hræsla ekki áhrif, því er það á endanum sveimið síðasta spölinn sem ákvarðar hraðann og flæðistuðulinn. Ef engin hreyfing er á vatninu berast lofttegundirnar mun hægar að yfirborði þar sem vegalengdin sem þær þurfa að berst með sveimi verður lengri. Flæðistuðullinn er háður yfirborðsspennu milli vatns og lofts. Yfirborðsspenna lækkar með hækkandi hitastigi og hraði sveimis eykst einnig með veldisvísisfalli þannig að flæðistuðull eykst með hækkandi hitastigi. Seltustig og óhreinindi hafa áhrif á yfirborðsspennu og þykktina á óhræðu lagi sem hefur áhrif á flæðistuðulinn.

Yfirborð/rúmmálsstuðull, A/V

Hlutfallsleg stærð snertiflatar milli vökva og lofts hefur að sjálf-sögðu mikið að segja um hve hratt styrkur breytist með tíma. Því er mikilvægt að sjá til þess að yfirborðsflötur milli þessara fasa sé ávalt sem mestur.

Mettunarhlutfall ($C_s - C$)

Mettunarhlutfall hefur áhrif á hve mikið magn lofttegundar berst á milli fasa. Því minni sem styrkfallandinn er (minni munur á milli styrk í loftfasa og vökvafasa) því minni verður styrkbreyting á tímaeiningu.

1.4.2 Leiðir til að auka flutning

Þessi jafna gefur hugmynd um hvaða leiðir er hægt að fara til að auka styrkbreytinguna dC/dt . Sem dæmi má minnka eins mikið og mögulegt er vökvaflumþykkt með iðuflæði (turbulence) eða blöndun

Auka vökva-loft yfirborð með minni loftbólum þegar loftbóluloftun er notuð eða nota loftarahringi með mikið yfirborð í loftara. Þessar aðferðir snúast um að stækka flatarmálið A og þar með stuðulinn A/V .

Einnig er hægt að auka flutning á tíma með því að auka styrkfallanda. Þá verður munur C_s og C meiri og því $(C_s - C)$ stærri tala. Þetta segir okkur til dæmis að ef styrkur er mun lægri en mettnarstyrkur mun dC/dt verða stærri tala og þar með flæðið hraðara.

Það er hinsvegar ekki mjög æskilegt að súrefnisstyrkur hafi farið mjög lágt svo betra er að hækka C_s með einhverjum hætti til dæmis með því að nota hreint súrefni. Það mundi maður þó ekki gera í hefðbundnum loftara eins og komið verður inn á síðar.

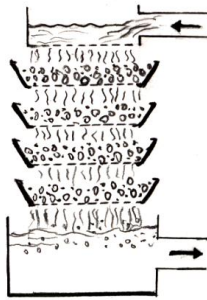
1.4.3 Virkni súrefnisflutnings

Til að magnsetja flutning lofttegunda og þá sérstaklega með flutning súrefnis í huga og til að bera saman mismunandi búnað, hafa verið tekin fram staðalaðstæður og aðferðir til að auðvelda samamburð.

Heildar gasflutning í ýmsum gerðum búnaðar er hægt að setja fram sem svokallað G gildi sem skilgreint var af Colt og Bouck [Colt and Bouck, 1984] sem jöfnu til að meta gasflutning í svokölluðum pökkuðum súlum:

$$G_{20} = \ln \left[\frac{C_s - C_{in}}{C_s - C_{ut}} \right] \quad (1.8)$$

Þetta G gildi kemur að góðum notum þegar gerður er sam-



Mynd 1.3: Prepaloftari

anburður á búnaði til gasflutnings. Þegar G gildið hefur verið ákvarðað er hægt að meta hve mikið má búast við að flytjist af lofttegund, til dæmis súrefni, þegar við erum með einhver ákveðin gildi af C_{in} sem er þá styrkur í innstreymi og C_s , mettnarstyrk. G gildi er háð hitastigi en hægt er að nota eftirfarandi jöfnu til finna G_{20} gildið þó mælingar séu framkvæmdar við annað hitastig:

$$G_{20} = \frac{G_T}{\alpha(1,024)^{T-20}} \quad (1.9)$$

þar sem α þátturinn í jöfnu 1.9 er vegna aukningar í gasvökva yfirborðsviðnámi vegna yfirborðsvirkra efna. Gildi α er 1 fyrir hreint vatn en er eitthvað lægra í raun, er sem dæmi 0,92 fyrir yfirborðsvatn í einni heimild (Ahmad og Boyd 1988).

G gildi eru svo einning breytileg efir efnum og fer það eftir stærð gassameinda. Með því að nota Stoke - Einstein sveimislögmál hefur verið reiknað að hraði köfnunarefnisflutnings er 94% af flutninghraða súrefnis og koltvísýrings 90%.

Ef svo styrkur í innstreymi er þekkt ásamt mettnarstyrk má reikna styrk í útstreymi með eftirfarandi jöfnu:

$$C_{ut} = C_s + (C_{in} - C_s)e^{-G_T} \quad (1.10)$$

Virkni gasflutnings þarf að ákvarða en hún ákvarðast af styrkbreytingu í uppleystu súrefni fyrir og eftir búnað og er yfirleitt metið í prósentum.

$$E = \left[\frac{DO_{ut} - DO_{in}}{C_s - DO_{ut}} \right] \times 100 \quad (1.11)$$

Á milli stærðanna G og E er að sjáfsögðu samband og eru

Tafla 1.3: Virkni loftunar með mismunandi búnaði

Gas flutnings- búnaður	Fall hæð cm	Loftunar virkni (E) %
Einföld renna	23	6,2
	30	9,3
	67	12,4
Hallandi báruþlata	30	25
	61	43
Slettisþjald	23	14
	30	24
	67	38
Þrepaplötur	25	23
	50	33
	100	52

þær að skýra sama hlut en með nokkuð ólíkum hætti. Sambandið milli þessa tveggja stærða er eftirfarandi.

$$\ln \left[\frac{DO_{ut} - DO_{in}}{C_s - DO_{ut}} \right] \frac{1}{E} = G \quad (1.12)$$

Virkni súrefninsupptöku er reiknuð sem sá hlutur súrefnis sem er tekinn upp í ákveðnum búnaði á móti viðbættu súrefni og gefið í prósentum.

1.5 Loftun vatns með andrúmslofti:

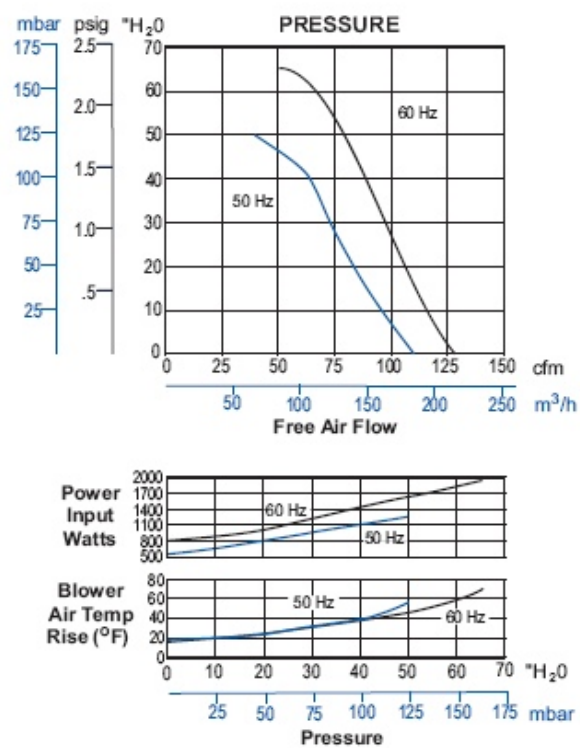
Vanalega eru loftræstiblásarar, hrútshornablásarar eða loftþjöppur notaðir sem loftgjafar í fiskeldi. Aðalmunurinn á þessu þrennu er þrýstingsmunur og loftmagn. Eins og gefur að skilja gefa loftræstiblásarar minnstan þrýsting en langmest loftmagn og taka þar að auki mjög litla orku. Hrútshornablásar eru með minna loftmagn en gefa frá sér loft undir meiri þrýsting. Þá má nota á dýpi frá 10cm allt að um 80cm dýpi.

Á mynd 1.5 má sjá hvernig virkni hrútshornablásrar minnkar með dýpi þar má einnig sjá hvernig loftmagn fellur eftir því sem dýpið (þrýstingurinn eykst.)

Loftþjöppur gefa svo enn meiri þrýsting og taka enn meiri orku á hvern blásinn rúmmetra.



Mynd 1.4: Hrúthornablásari frá GAST



Mynd 1.5: Virkni hrúthornablásara frá GAST. Sá blásari sem hér um ræðir er 0,75 kW að stærð.

1.5.1 Loftunarsteinar.

Loftunarsteinar hafa að jafnaði frekar lágan virknistuðul (milli 3-7%). Þeir eru hinsvegar ódýrir í innkaupum og rekstri. Við lágan þéttleika og mikil vatnsskipti eru þeir vel nýtanlegir til að halda réttu súrefnisstigi. Gæta þarf að því þeir geta þéttst og stíflast og þarf að hreinsa þá reglulega.

Þess ber að geta að loftsteinar geta verið hagkvæmir í kerjum með mikið dýpi (5m). Hreint súrefni er að sjálfsögðu notað og hið mikla dýpi og það að vegna hringhreyfingar vatns er leið loftbólanna mun lengri en bara dýpið gefur til kynna og tryggir það að viðstöðutími þeirra verður langur og súrefnið í þeim er nálægt jafnvægi við vatnið áður en bólur ná yfirborði. Því virðist súrefnisnýtni vera allgóð þó ekki hafi verið gerðar nógu vísindalegar mælingar á því.

1.6 Súrefnibæti- og loftskiptabúnaður.

1.6.1 Súrefnisbúnaður

Fyrir fiskeldismenn er hægt er að nálgast hreint súrefni með þrennum hætti. Hægt er að fá súrefni á þrýstiflöskum og þá gjarna í búntum sem innihald annaðhvort 10 eða 12 flöskur af súrefnisgasi undir þrýstingi. Þetta er oftast gert þegar um litla notkun er að ræða eða til að nota í öryggiskerfi þegar kerfið sem á á fæða fisk á súrefnisríku vatni bregst.

Önnur lausn er að nota fljótandi súrefni á kæligeymi. Kæligeymir er eign súrefnisbyrgja og greiða þarf leigu fyrir hann. Minnstu tankar taka um 2,6 m³ af súrefni og þeir stæðstu 64 m³. Mikil orka fer í að kæla súrefnið niður en suðumark þess er -183 °C og sérstaka tankbíla þarf í flutning.

Kostnaður getur verið allhár en er hlutfallega lægri eftir því sem meira er notað. Á móti kemur að þetta er mjög öruggt kerfi virkar jafnvel þó rafmagn fari af og hægt er að halda lífi í fiskum og komast af án rafmagns í nokkra daga.

Súrefni er einnig hægt að framleiða á staðnum með svokallaðri þrýstingssveiflu ísogi (pressure swing adsorption, (PSA)) eða vakúm sveiflu ísogi (vacuum swing adsorption (VSA)) Í báðum tilfellum er súrefnið síað úr loftinu með mólíkúlar síum eða köfnuarefni síað frá sem framleiðir á súrefnisríkt gas sem hefur hreinleika milli 85-95%.



Mynd 1.6: VSA - súrefnisgenerator frá Air Products

Kostnaðarlega getur þetta verið mjög hagkvæmur kostur.

1.6.2 U-rör

U-rör súrefnisbætar virka þannig að með því að auka þrýsting eykst leysni súrefnis og því flutningshraði dC/dt . Búnaðurinn samanstendur annað hvort af tveimur samhliða rörum sem samtengd eru á botni eða mjórri rör inn í breiðara. Dýpt búnaðar er á 9 – 45 metrar. Súrefni er bætt inn í efri enda þess leggs þar sem vatnið er á niðurleið og því næst mun vatnþrýstingur sjá til að auka flutningshraða þess í vatnið. Hægt er að ná 20 -40 mg/l metnun en flutningsnýtni er aðeins milli 30-50%. Hægt er að endurnýta afgasið og ná þá 55-80% nýtni.

Kostir eru að ekki þarf viðbótaorku ef vatn er sjálfrennandi. Helstu ókostir eru að ekki loftast út köfnunarefni með þessari aðferð.

Vatnshraði er hafður milli 1,8-3 m/sek á niðurleiðinni. Ef of mikið súrefni er bætt í er hætta á lofttöppum sem minnka vatnsstreymið. Það getur gerst ef gas/vatn hlutfallið fer yfir 25%.

1.6.3 Loftarar með fyllingu

Loftarar hafa jafnan fyllingu með mikið yfirborðsflatarmál. Vatni er dreift jafn yfir efsta hluta loftara, alla jafna með gataplötu eða sérstökum dreifispísum. Hægt er að bæta inn súrefni þá verður að gæta að það tapist ekki út með öðru lofti. Loftarar, ef rétt hannaðir, lofta vel út köfnunarefni en hátt hlutfall lofts/vatns er þörf ef lofta á út koltvísýring. Loftarar eru

Fylling	yfirborðs flötur m^2/m^3	Stuðull a	Stuðull b
2,54 cm TriPack	279		
HL=32		0,327	1,655
HL=61		0,277	1,589
3,81 cm Nor-Pac	144		
HL=32		0,324	1,555
HL=32		0,398	1,428
3,81 cm ACTIFIL	139		
HL=34-75		0,357	1,349
5,08 cm Nor-Pac	102		
HL=32		0,243	1,285
HL=32		0,162	1,855

HL er hydrolic loading eða hleðsla vatns í loftara

Tafla 1.4: Stuðlar til að ákvarða virkni loftara

einfaldir í smíði og auðvelt að koma fyrir. Nýtni þeirra ræðst af þáttum eins og hve góð dreifing vatns er yfir hann, hve mikið vatnsrennsli er á fermetra, loft/vatn hlutfallið, hæð og hita og þrýstingi.

Helsti ókostur er að lífrænt grugg getur safnast á fyllingu með tíma og því þarf að gæta að hreinsun reglulega.

Loftarar geta virkað sem lífhreinsar fyrir kerfi með lítið álag og því verið allt-í-eitt tæki í því tilfelli.

Loftarar hafa þá kosti að:

- Lofta út köfnunarefni
- Lofta út CO_2 ef nóg er af loftflæði.

Gæta þarf að því að ekki sé of mikið vatn á hvern fermetra loftara til að forða því að hann verði kafkeyrður (flooded).

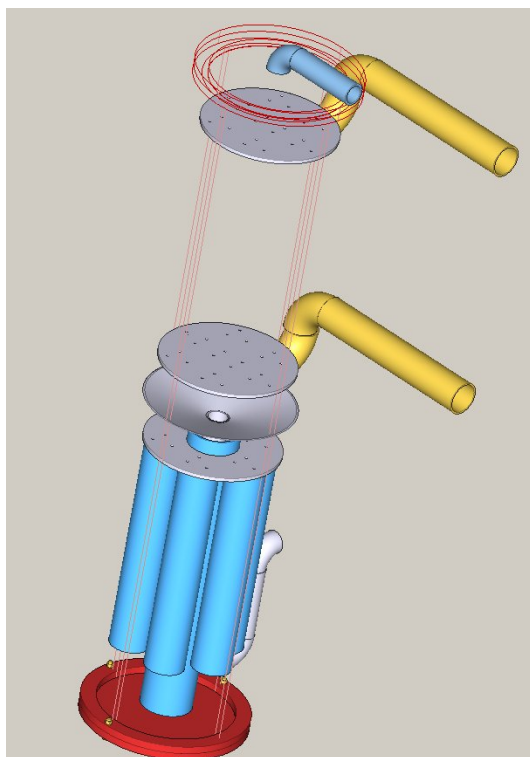
Flutningsgeta loftara er hægt að áætla út frá jöfnunni:

$$G_{20} = a + b \cdot Z \quad (1.13)$$

þar sem stuðlarnir eru gefnir í töflu 1.4

1.6.4 Lágþrýsti súrefnismettarar

Lágþrýsti súrefnismettarar eða svokallaðir „Low head Oxygenators (LHO)” hafa náð allnokkrum vinsældum sérstaklega



Mynd 1.7: small Sambyggður loftari og lágþrýsti súrefnismettari

vegna hversu auðveldir þeir eru í notkun og eru afkastamiklir. Þessi tækni er vernduð einkaleyfi þó það sé ekki gilt á Íslandi (Watten 1989).

Til eru LHO í mörgum mismunandi útgáfum en meginþættir eru þeir sömu. Vatn er látið renna yfir gataplötu og þess er gætt að vatnsyfirborð fyrir ofan plötuna sé á milli 4-12 cm. Þess þarf að gæta að loftbólur fari ekki niður með vatninu eða iðusteymi sem dregur með sér loft myndist. Undir plötu er rýminu skipt niður í allnokkur hólf og er súrefnið látið leika um hólfina eitt á eftir öðru og með þeim hætti jafnviktast vatnið við súrefnigasið. Að síðustu yfirgefur gasið síðasta hólfnið og fer út. Nýtni LHO súrefnisbæta getur verið allt að 95%, algengar tölur eru frá 70-90%.

Timmons o.fl. hafa búið til módel til að reikna út virkni LHO. Þar er hægt að slá inn mismunandi hönnunarstærðir og fá fram nýtni búnaðarins.

Þeir þættir sem aðal áhrif hafa á virkni búnaðar eru vatns-hæð yfir plötu, gatastærð á plötu, dýpt móttökubrunns og fall-hæð.

Gatastærð

Smærri göt virðast hafa betri virkni en stór. Væntanlega er það vegna þess að skriðþungi vatnsins er minni og bólur sem myndast fara ekki eins langt niður og fara burtu með frárennsli frá tækinu.

Það þarf hins vegar að gæta að því að of smá göt geta stíflast af skít, fóðurögnum eða hreystri. Því virðist best að fara ekki undir 9mm í holstærð eða þá stærð sem reynslan gefur að er ekki til vandræða.

Þrýsihæð

Vatnsborð yfir plötu skiptir miklu máli, ef það er of lágt geta myndast hvirflar niður götin sem draga með sér loft sem minnk-
ar nýtni súrefnisins. Best er að hafa dýptina yfir 6 cm helst á bilinu 8-12 cm.

Fjöldi hólfa

Nýtni eykst eftir því sem hólfum fjölgar en batnar lítið eftir að þau eru orðin fleiri en sex.

Hlutfall O_2 / H_2O

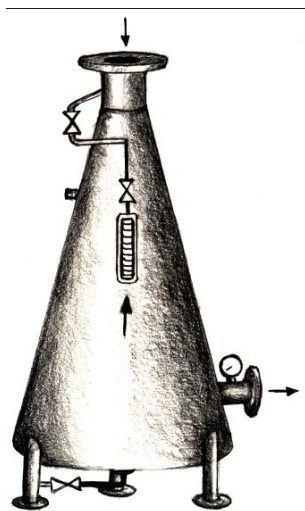
Hlutfall O_2 / H_2O hefur mikið að segja fyrir bæði styrk súr-
efnis í frárennsli og nýtni þess. Því hærra sem þetta hlutfall er, því hærri er styrkur í frárennsli en það mun koma niður á nýtni þess. Algengt nokkunarhlutfall er á bilinu 0,3-1,5 % fyrir gas/vatn hlutfallið.

1.6.5 Súrefniskeilur

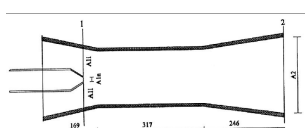
*Súrefnisbæting með keil-
um*

Virkni þessara keilna er sú að 10-20 prósent af innstreymis-
vatni er dælt inn í keilulaga kút þar sem það kemst í snertingu við súrefni undir háum þrýstingi. Þrýstingur er hafður á milli 1,5-2,5 bör (jafngildir 15-25 metrum af vatnssúlu). Viðverutím-
inn er um 6-12 sekúndur með vatnshraða um 3,5-4,5 m/s í inn-
og útstreymisrörum keilunnar.

Vatnið sem kemur frá keilunni inniheldur um 25 mg/L af uppleystu súrefni eða jafnvel meira. Það skýrir hversvegna ein-
ungis er þörf á að súrefnisbæta 10-20 prósent vatnsins. Vatn-
ið er því næst sett aftur inn á innstreymislögn eða beint í ker



Mynd 1.8: Súrefniskeila



Mynd 1.9: Vatnspeysir grunnteikning. Öll mál eru í mm, þessi þeysir spýtir út 20-30 l/sek gegnum nosslu og dregur 100 l/sek meðfram nosslu.

með þeysi (ejector). Vatninu úr keilunni er þá spýtt út um mjóan miðjustút þeysisins og dregur með sér um fjórfalt magn af vatni úr kerinu sem sér til þess að það þynnist út. Með þessari aðferð má tryggja að vatnið þynnist hratt og ekki verði of mikil yfirmettun og vatnskrafturinn getur hjálpað hringstraumsmýndun í stærri kerjum og hjálpað þannig til við sjálfhreinsun kerja. Nýtni keila er yfir 90%.

Ókostur keila er mikill orkukostnaður sem stafar af því að tiltölulega mikla orku þarf til að ná þeim þrýstingi sem þarf. Sá kostnaður kemur til viðbótar beinum kostnaði við fjótandi súrefni.

1.7 Súrefnisbæting með loftsteinum

Eins og áður er minnst á er hægt að nota loftunarsteina við súrefnisbætingu. Yfirleitt er um að ræða neyðarsúrefni en þó geta nýjar gerðir af fínúða steinum (loftbólustærð 100 - 500 μm) virkað vel á miklu dýpi og verið með góða nýtni. Þeir þurfa allmikinn þrýsting á súrefni eða milli 1,5-3 bör.



Mynd 1.10: microdiffuser

1.8 Súrefnisinngöf í rör

Einnig ber að geta þeirrar aðferðar að bæta súrefni beint í lögn eftir dælingu og nýta sér hækkaðan þrýsting eftir dælu. Notað er svokölluð venturi-nossla. Þrýstingur vatns er á bilin 2-22 bör og nýtni á bilin 15-70% og súrefni í útstreymi um 30-50 mg/L. Gæta þarf sérstaklega að ekki myndist lofttappar!

1.9 Dæmi um tilraun þar sem virkni búnaðar er mæld:

Gerð er tilraun þar sem borin eru saman tvær aðferðir loftunar annars vegar með þyrllu og hinsvegar með loftara. Köfnunarefni bubblað í vatnið til að lækka súrefnismettun og síðan er búnaðurinn látinn ganga og mælt auking súrefnis sem fall af tíma. Rúmmál vatns sem var loftað var 3 m^3 . Hiti vatns var $3,3^\circ\text{C}$

Þeir þættir sem hafa áhrif á hve mikið magn af lofttegund skiptir um fasa á tímaeiningu eru:

1. Stærð flatar milli lofts of vatns
2. Mismunur hlutþrýstings milli vatns og loftfasa
3. Stærð flæðihraðastuðuls.

Þessu er lýst með eftirfarandi jöfnu

$$\frac{dC}{dt} = k_L \frac{A}{V} (C_s - C) \quad (1.14)$$

Henni er hægt að umræða með eftirfarandi hætti:

$$\frac{dC}{(C_s - C)} = k_L \frac{A}{V} dt \quad (1.15)$$

Því næst er hægt að heilda báðum megin við jafnarmerki:

$$\int \frac{dC}{(C_s - C)} = k_L \frac{A}{V} \int dt \quad (1.16)$$

Úr því fæst:

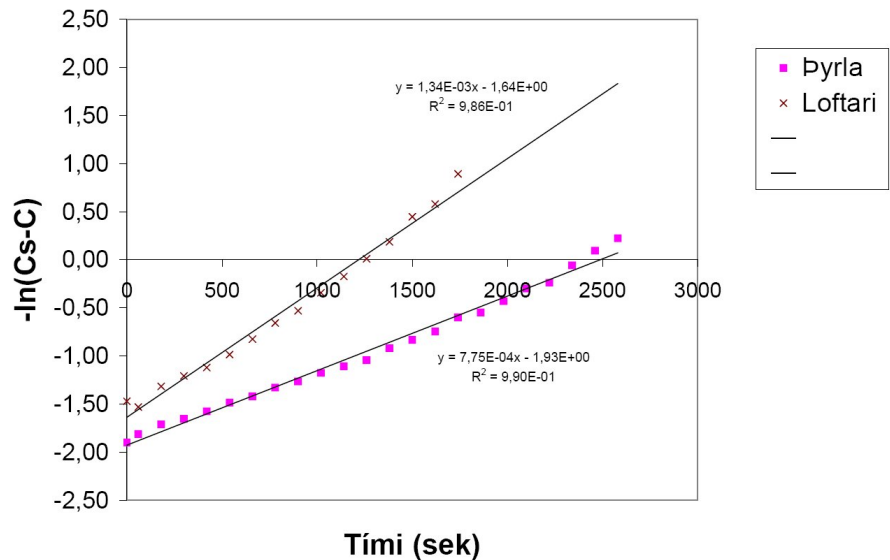
$$-\ln(C_s - C) = k_L \frac{A}{V} t \quad (1.17)$$

Það þýðir að ef við drögum upp graf með $-\ln(C_s - C)$ á Y -ás og tíma t á X -ás fæst bein lína sem er með hallatöluna $k_L \frac{A}{V}$. Eins og fyrr segir k_L er flæðistuðull, A flötur yfirborðs milli vatns og loftfasa, V rúmmál vatns, C_s er metnunarmörk lofttegundar og C styrkur lofttegundar í vökva á hverjum tíma. Þar sem k_L er ekki háð búnaðinum sem við erum að nota er það það sama í báðum tilfellum en hinsvegar er $\frac{A}{V}$ mismunandi milli þessara tveggja tækja. Mismunur hallatölu milli mælinga á þessum tveimur tækum gefur því hlutfallsmun á yfirborðsflatarmáli sem þau skapa fyrir hvert rúmmál vatns.

Eftirfarandi niðurstöður fengust. Úr töflu fæst að C_s fyrir 3,3 °C í ósöltu vatni er um 13,5 mg/L og er það notað við að reikna $-\ln(C_s - C)$.

Þyrta			Loftari	
Tími (sek)	Súrefnismagn mg/L	$\ln(C_s - C)$	Súrefnismagn mg/L	$\ln(C_s - C)$
0	6,81	-1,90	9,15	-1,47
60	7,38	-1,81	8,88	-1,53
180	7,96	-1,71	9,77	-1,32
300	8,27	-1,65	10,15	-1,21
420	8,66	-1,58	10,43	-1,12
540	9,08	-1,49	10,82	-0,99
660	9,36	-1,42	11,22	-0,82
780	9,72	-1,33	11,57	-0,66
900	9,95	-1,27	11,80	-0,53
1020	10,26	-1,18	12,09	-0,34
1140	10,47	-1,11	12,31	-0,17
1260	10,66	-1,04	12,51	0,01
1380	10,99	-0,92	12,67	0,19
1500	11,20	-0,83	12,86	0,45
1620	11,39	-0,75	12,94	0,58
1740	11,68	-0,60	13,09	0,89
1860	11,77	-0,55		
1980	11,96	-0,43		
2100	12,15	-0,30		
2220	12,23	-0,24		
2340	12,44	-0,06		
2460	12,59	0,09		
2580	12,70	0,22		

Því næst er niðurstöður birtar í töflu og jafna bestu línu fundin gegnum punktastafn.



Mynd 1.11: Samanburður á loftara og þyrli

Samanburður sýnir að hlutfall A/V á milli þessara tækja er Loftari/þyrli = 1,72 sem segir okkur að loftari skapar mun meira yfirborð. Nú er hægt nota þessar jöfnur til að reikna út hve langan tíma tekur til dæmis að lofta inn súrefni úr 75% mettun í 95% mettun fyrir hvort tækið fyrir sig.

Súrenfisstyrkur við 75% mettun er því $13,5 \cdot 0,75 = 10,2$ og $-\ln(C_s - C)$ því -1,22 og við 95% mettun er súrefnisstyrkur $13,5 \cdot 0,95 = 12,82$ og $-\ln(C_s - C)$ því 0,39. Breyting er því $(0,39 - (-)1,22) = 1,61$

Nú höfum við að hallatala er

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = k$$

Nú er $\Delta y = 1,61$ eins og fyrr segir og k , hallatalan fyrir þyrli $0,77 \times 10^{-3}$ og k hallatalan fyrir loftara $1,34 \times 10^{-3}$ Því fáum við að tíminn sem tekur að lofta inn 3,3 mg/L frá 75% mettun að 95% mettun inn í allan vatnsmassan með þyrli er því

$$\frac{1,61}{0,77 \times 10^{-3}} = 2094 \text{ sek}$$

og fyrir loftara því:

$$\frac{1,61}{1,34 \times 10^{-3}} = 1203 \text{ sek}$$

Ef rúmmál vatnsins var 3m^3 eða 3000 lítrar í 3,3 mg bætt-ust í hvern lítra hefur bæst í um það bil 10 grömm súrefnis á

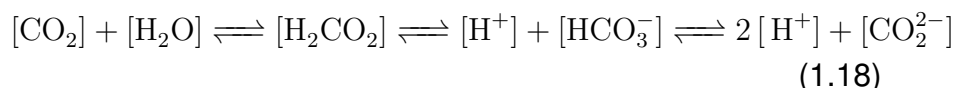
þessum tíma.

1.10 Afloftun kolsýru

Koltvísýringur kemur í vatnið vegna öndunar fisks og einnig vegna starfssemi örvera. Þegar þétti fisks er aukin og vatns-skipti minnka verður styrkur CO_2 takmarkandi í framleiðslu fisks.

Þegar þéttni er milli 30– 60 kg/m^3 getur venjulegir loftarar séð vatninu fyrir súrefni og útloftun CO_2 . Þetta á við þegar viðstöðutími vatns er ekki hafður mjög langur. Í stórum kerjum þar sem viðstöðutími er lengdur með súrefnisbætingu og straumsetningu með þeysum getur styrkur CO_2 orðið takmarkandi. Þegar vatn er súrefnisbætt og þéttinn er aukin og fer að nálgast 100 kg/m^3 þarf að gera sérstakar ráðstafanir til að lofta út CO_2 – annars mun styrkur þess hamla viðgangi fisksins.

Fyrir hvert mól af súrefni sem er notað myndast 1 mól af CO_2 . Miðað við mólmassa þessara efna myndast því um 1,38 grömm af CO_2 fyrir hvert gramm O_2 sem er brennt. Hins vegar er útreikningur á styrk CO_2 nokkuð flókinn því það er hluti af karbonatjafnvægi sem er:



Þar sem $[\text{CO}_2]$ er styrkur CO_2 á gasformi í vatni $[\text{H}_2\text{CO}_2]$ er hin eiginlega kolsýra en sökum þess að hún er í jafnvægi við uppleysta formið af CO_2 og við jafnvægi er megnið á forminu CO_2 gas.

$[\text{HCO}_3^-]$ er svokallað bíkarbonat og að lokum er $[\text{CO}_2^{2-}]$ styrkur hinnar tvígildu karbonatjónar. Heildarkarbonatstyrkur er að lokum samanlagður styrkur allra karbonata þ.e.

$$C_{\text{tot}} = [\text{CO}_2] + [\text{H}_2\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_2^{2-}] \quad (1.19)$$

Styrkur CO_2 er því háður bæði pH, hitastigi og seltu og heildarstyrk karbonata.

Réttast er að rita H_2CO_3^* sem kolsýru þar sem

$$[\text{H}_2\text{CO}_3^*] = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{CO}_{2(\text{aq})}] \quad (1.20)$$

Kolsýra skilur sig frá súrefni, köfnunarefni og öðrum lofttegundum því styrkurinn ákvarðast bæði af jafnvægi milli vatns og

lofts en einnig með sýru basahvörfum. Jafnvægi milli vatns og lofts ákvarðar hraða flutning CO_2 í eða úr vatni en sýru basa jafnvægið á hvaða formi uppleyst ólífrænt kolefni er til staðar í vatninu.

Uppleyst CO_2 er því háð bæði pH stigi vatnsins og heildarstyrk karbonata í vatninu.

Mælingar á koltvísýringstyrk í sjó:

Koltvísýring er einfaldast að mæla óbeint út frá pH mælingu auk mælingu á heildarkarbónatstyrk vatnsins. Til að svo megi verða, verða einnig pK_{a1} og pK_{a2} fyrir karbónat að vera þekkt við það hita- og seltustig sem um er að ræða. Í raun nægir að þekkja pK_{a1} þar sem pK_{a2} veldur mjög litlum breytingum á því sýrustigsbili sem um ræðir. Til að reikna út pK_{a1} má nota jöfnuna:

$$\text{pK}_1 = \frac{3404,7}{T} + 0,03278 \times T - 0,1917(S/1,806)^{1/3} - 14,712 \quad (1.21)$$

þar sem T er hitastig í °K og S er selta í prómill (‰).

Kolsýru í vatni má síðan reikna út frá:

$$[\text{H}_2\text{CO}_3^*] = C_{tot} \times 10^{(\text{pK}_1 - \text{pH})} \quad (1.22)$$

þar sem C_{tot} er heildarstyrkur karbónats á öllum formum eins of fyrr greinir.

1.10.1 Áhrif koltvísýrings

CO_2 er eitrad fiski af því að það minnkar burðargetu blóðs á súrefni þar sem við lágt sýrustig blóðsins eykst hlutfall hemoglobin H^+ sem ber ekki súrefni. Þetta kallast Bohr eða Root hrif.

Öryggismörk CO_2 fara mjög eftir fisktegundum og þroskastigi þeirra. Fyrir tilapiu (beitarfisk) og „Striped Bass” er jafnvel hægt að hafa styrkinn 60 mg/L án þess að það virðist hafa áhrif.

Fyrir regnbogasilung hafa gildi á bilinu 9 - 30 mg/L verið gefið upp.

Það sýndi sig í tilraunum í Íslandslax að gildi máttu ekki fara yfir 10-12 mg/L án þess að vandamál sköpuðust. Í því tilfelli er súrefnisnot og þar af leiðandi styrkur CO_2 mjög breytilegur eftir

tíma dags. Svo virðist sem hin mikla dagsveila í meltingarstarfsemi og þar með súrefnisnotum hafi haft mikil áhrif á þol fiska gegn CO_2 styrk.

Gerðar voru rannsóknir á CO_2 þoli lúðu og kom þar fram að styrkur allt að 12 mg/L höfðu engin áhrif á vöxt hennar.

1.10.2 Fjarlægging kolsýru

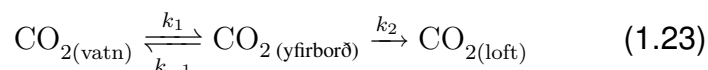
Hægt er að fjarlægja kolsýru með loftun – það getur hins vegar verið erfitt að ákvarða hve mikið fer út. Styrkur CO_2 (og því hlutþrýstingur) getur verið 20 til 100 sinnum hærri en í andrúmslofti sem þýðir að loft sem er látið leika um vatnið getur verið fjótt að mettast.

Því þarf að lofta með miklu magni af lofti hverja einingu vatns til að aflofta kolsýru. Sem dæmi um hefðbunda loftun þegar lofta á út N_2 og inn O_2 er hlutfall gass á móti vökva (G/L hlutfall) að jafnaði undir 3. Þegar lofta á út kolsýru verður G/L hlutfallið að vera á milli 5:1 til 10:1.

Koltvísýringur er vanalega ekki vandamál í kerfum með litla þéttni þar sem hægt er að nota loftun til súrefnisbætingar. Hins vegar þegar þéttni eykst og súrefnisbæting er notuð má gera ráð fyrir að vandamál komi upp ef útloftun kolsýru er ekki beitt eða öðrun aðferðum við fjarlægingu kolsýru.

Að öllu jöfnu er notuð fylling sem tryggir góða dreifingu vatns og mikið yfirborsflatamál milli vatns og lofts en einning litla mótstöðu fyrir hið mikla loftmagn sem þarf að streyma á móti vatninu.

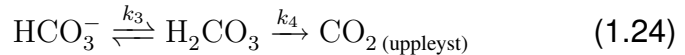
Fjarlægging CO_2 úr vatni með loftara er háð hraða flutnings úr vatni í gasfasa, yfirborði vatns og lofts og styrks CO_2 í lofti auk fleiri þátta. Leitumst við nú við að skýra meginþætti. Þegar vatnið streymir um fyllinguna myndast þunn vatnsfilma með mikið yfirborð. Hraði gasflutnings stjórnast af eftirfarandi skrefum:



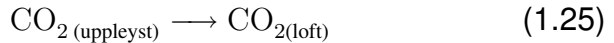
Flutningur CO_2 að yfirborði (k_1) er hraður þar sem vatnið er á stöðugri hreyfingu og í þunnri filmu er hraðatakmarkandi skrefið að CO_2 sleppi af yfirborði vatnsfilmunnar yfir í gasfasann en blandist ekki aftur í vatnsmassann. Líkindi þess eru háð eðli vatnsfilmunnar en ekki gerð eða tegund fyllingar í loft-

ara.

Pegar CO₂ er fjarlægt breytist pH vatnsins og þar að leiðandi hluti karbónats á formi H₂CO₃*. Afloftun á bikarbónati í CO₂ gerist í eftirfarandi skrefum



Þetta hvort tekur mun lengri tíma en skrefið



Það tekur í raun lengri tíma en sem nemur viðverutíma vatnsins í loftara svo lítið af bikarbonati afloftast sem CO₂.

Hraðalíking fyrir afloftun stjórnast því af hægasta skrefi loftunar sem er flutningur CO₂ frá yfirborði vatnsfílmunnar og yfir í loftfasa

$$-\frac{d\text{CO}_2}{dt} = k_2[\text{CO}_2] \quad (1.26)$$

þar af leiðir

$$\int \frac{d\text{CO}_2}{\text{CO}_2} = -k \int dt \quad (1.27)$$

Og því fæst á endanum:

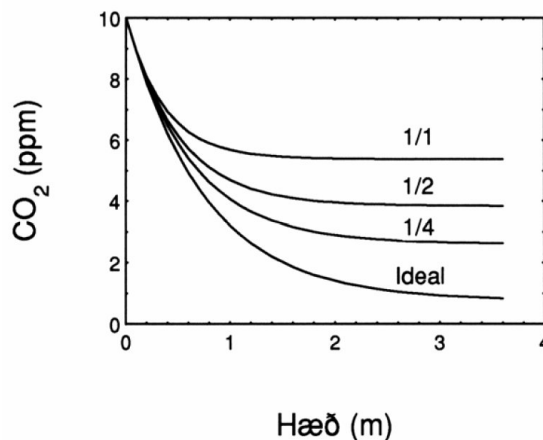
$$\text{CO}_2(t) = e^{-kt} \quad (1.28)$$

Hraðafastinn k er því fyrstu gráðu hraðafasti með eininguna sek⁻¹.

Þar sem vatnsstreymi (m/sek) er að öllu jöfn mestu óháð fyllingu, (tími því í réttu hlutfalli við vegalengd) má túlka er hraðafastann í eininguni m⁻¹. Ef við höfum; C_u sem upphafsstyrk af koltvísýring í vatni C_z sem styrkur í hæð z í loftara C_m sem mettnarstyrkur koltvísýrings og k hraðafasta í einingunni m⁻¹ verður massaflutningur í loftara túlkaður sem

$$\ln((C_m - C_u)/(C_m - C_z)) = kz \quad (1.29)$$

Hraðafastinn k er háður hitastigi og hvarfið gengur hægar við lægra hitastig. Þessi breyting með hitastigi er háð virkjunarorku við hvarfið. Samkvæmt [Colt and Bouck, 1984] sem nota reynslujöfnu fyrir hraðabreytingu með hitastigi virðist hraðabreytingin vera nokkuð mismunandi eftir heimildum, allt frá 20-60% hraðalækkun á hitastigsbilinu 7-20 °C



Mynd 1.12: Loftun í meðstreymisloftara sem fall af hæð í loftara. Miðað er við að upphafsstyrkur sé 10mg/L. Áhrif mismunandi hlutfalls lofts og vatns eru sýnd.

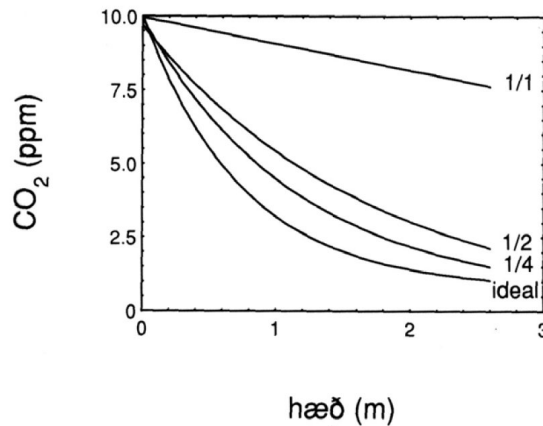
Eftir því sem styrkur koltvísýrings lækkar í vatninu hækkar mólhlutfall þess í lofti uns jafnvægi næst. Til að virkni haldist verður því að tryggja nægjanlegt loftstreymi. Þetta á bæði við um súrefni og koltvísýring. Tryggja verður að hlutfall lofts og vatns sé viðunandi en við koltvísýringsafloftun þarf loft/vatn (L/V) hlutfallið að vera fjórir að minnsta kosti

Hér að neðan eru reiknuð gröf fyrir meðstreymisloftun (bæði loft og vatn koma að ofan) og mótstreymisloftun (loft kemur að neðan og upp) fyrir mismunandi hlutföll L/V. Gert er ráð fyrir svokölluðu „plug flow“ þar sem vatn neðar í loftara á ekki kost á að blandast vatni nema því sem næst liggur. Því getur vatn sem er afloftað ekki blandast óloftuðu vatni sem liggur hærra í loftaranum.

Í meðstreymisloftara er munur styrks CO_2 mjög hár í byrjun en minnkar hröðum skrefum er neðar dregur í loftaranum. Ef rúmmál lofts er ekki nægjanlegt dettur virkni alveg niður við vissa hæð og er engin eftir það. Í mótstreymi helst þessi munur alla leið en er mismunandi eftir rúmmáli lofts. Því má í raun nota hvort heldur sem er með- eða mótsreymi, en yfirleitt er tæknilega einfaldara að velja mótsreymi.

Bygging kolsýruloftara

Loftarar eru yfirleitt ekki hafðir hærri en 1,0-1,5 m á hæð því virkni minnkar með hæð þ.e. minna og minna næst úr af CO_2 á hverja lengdareiningu. Vatnshleðsla er á bilinu 0,6 - 2,5



Mynd 1.13: Loftun í mótstraum sem fall af hæð í loftara. Áhrif mismunandi hlutfalls lofts og vatns eru sýnd.

$Lmin^{-1}m^{-2}$ Gæta þarf að því að mótþrýstingur sé sem lægstur fyrir loftið sem streymir á móti því er betra að hafa hleðsluna minni en meiri.

Vanalega eru notaðir lágþrýstir blásarar til að tryggja nægilegt loftflæði á móti en það þarf að vera á bilinu 500 - 2000%.

Mjög oft eru notaðar fastar fyllingar sem tryggja að sem minnst af óhreindum geti safnast í loftaran. Tvær gerðir af slíkum fyllingum eru sýndar á mynd 1.10.2

Mikilvægt er að vatni sé vel dreift yfir fyllingu eða ef engin fylling er notuð, að vatnið dreifist vel yfir allan flötinn (Það er stundum gert þegar mikið er af lífrænu efni í vatninu). Til þess að tryggja dreifinu er annaðhvort notuð gataplata með heppilegum gatafjölda og stærð til að dreifing sé góð en gæta þarf þess að göt séu nógu stór svo þau stíflist ekki.

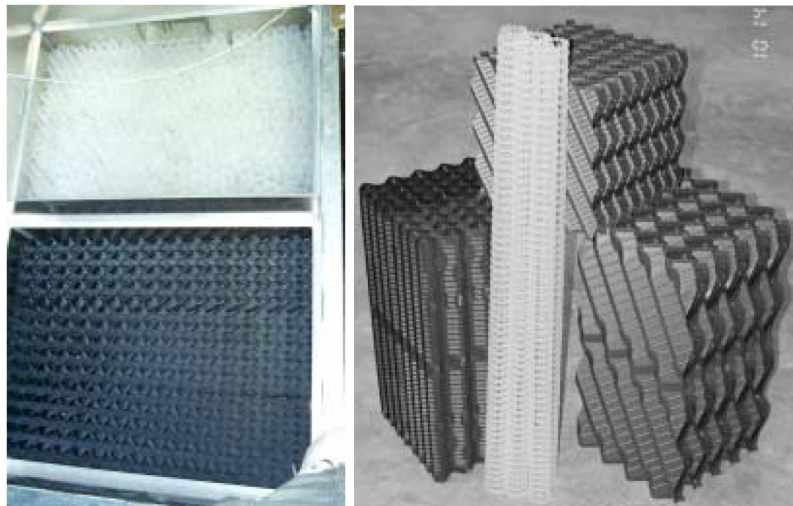
Einnig er hægt að nota sértílbúnaðar nosslur til að dreifa vatninu. Dæmi um slíkar nosslur má sjá á mynd 1.10.2

Fjarlæging með basaviðbót

Í þessari aðferð er kolsýran rekin á bíkarbonatform:



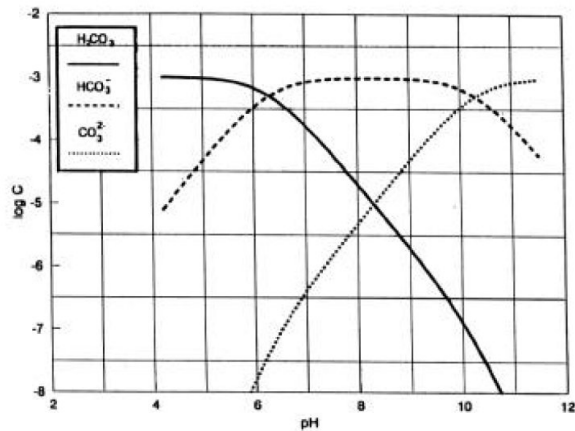
Ef skoðað er pH - logC rit hér að neðan sést að við að breyta pH frá 7 til 8 minnkar styrkur kolsýru um eina stærðargráðu. Við teljum æskilegt að halda koltvísýring í um 5 - 6 mg/L og því verður pH um 7,5 ef um fullsaltan sjó er að ræða. Ekki er æskilegt að láta pH vera hærra því að við það eykst styrkur



Mynd 1.14: Tvær gerðir pakkinga annars vegar 1-m hár klasi af 2" túbulaga NORPAC pakkingu (NSW, Roanoke, Virginia) og hins vegar 0.9-m hárrí stæðu af blokk frá L.S. Enterprises (Ft. Myers, Florida). Myndin er fengin frá Steve Summerfelt



Mynd 1.15: Hægra megin er mynd af kórónu-nosslu frá LS Enterprises (Ft. Myers, Florida) Myndin við hliðina á er á stærð við krónu. Nosslurnar eru settar í gataplötu eins og sýnt er hægra megin. Hver nossla getur dreift um 40 L/min þegar vatnshæð yfir þeim er um 10 sm. Myndin er fengin frá Steve Summerfelt.



Mynd 1.16: pH-log C rit fyrir karbónat. Undir pK_1 er öll karbónöt á formi kolsýru, er nær dregur pK_1 byrjar hún að klofna í bíkARBÓNAT. Við pK_2 fer síðan bíkARBÓNAT yfir á karbónatform.

óJónaðs ammóníaks með veldisvísisfalli, en það er eitrad fyrir fiskinn í of háum styrk.

Til að þessi aðferð sé hagkvæm verður að finna basa sem er nógu ódýr en um leið má hann ekki innihalda nein óæskileg snefilefni. Notað hefur verið kalsíumhydroxíð sem unnin úr brenndum kalkstein eða skeljasandi og er innihald óæskilegra efna mjög lágt. Einnig er hægt að nota vítissóta eða NaOH.

Kafli 2

Ammóníak og lífhreinsar

2.1 Ammoníak

Þau ólífrænu nitursambönd sem mestu máli skipta í fiskeldi eru ammóníak (NH_3), ammóníum (NH_4^+), nítrat (NO_3^-) og nítrít (NO_2^-).

Útskilnaður nitursambanda hjá beinfiskum er 60%-90% á formi NH_3 og NH_4^+ , en einnig eru nitursamböndum skilin út á formi þvagefna og sem önnur lífræn nitursambönd [Wood, 1997]. Hlutfall þvagefnis í heildar niturútskilnaði er nokkuð hærri hjá sjávarfiskum (30-40%) en hjá ferskvatnsfiskum [Jobling, 1994]. Útskilnaður NH_3 og NH_4^+ á sér stað í gegnum tálknin en önnur nitursamböndin eru skilin út með þvagi og í gegnum húð [Knepper et al., 1989, Wilson et al., 1994].

Fóðurgerð ræður miklu um hversu mikið er skilið út af nitursamböndum en einnig hlutfall einstakra amínósýra. Gera má ráð fyrir að 16% af þyngd próteina sé nitur. Af þessu má ráða að próteininnihald fódurs ræður miklu um útskilnað niturs. Hámarks niturútskilnaður verður 1 – 4 klukkustundum eftir fóðurgjöf [Timmons and Losordo, 1990]. Sveiflur geta orðið miklar í magni niturútskilnaðar yfir sólahring og á milli daga. Þar ræður fóðurgjöf mestu og tímabil á milli fóðrunar [Jobling,].

Niturútskilnaður er mismunandi á milli fisktegunda. Í þorski, sem er alinn við 14°C, er niturútskilnaður 150 mg N kg fisk⁻¹ [Jobling, 1988] en hjá regnbogasilungi 220 mg N Kg fisk⁻¹ klst⁻¹ [Lehtinen et al., 1998]. Milli 52% og 95% af nitursamböndum í fóðri losnar út í umhverfið [Wu, 1995].

Tölur frá skosku laxeldi á landi benda til að reikna megi með 30 - 35 g. ammóníaks á kg fódurs [Kelly et al., 1996]. Ójónað

ammoníak (NH_3) er basískt og myndar ammóníum (NH_4^+) þegar það hvarfast við vatn.

Hægt er að nota einfalda þumalfingursreglu til að ákvaða hve mikið ammóníum myndast sem byggist á hve mikið er fóðrað:

$$P_{TAN} = \frac{F \cdot PC \cdot 0,092}{t = 1 \text{ dagur}} \quad (2.1)$$

Þar sem P_{TAN} er magn TAN sem er myndað, F er fóðurmagn og PC er % prótein í fóðri.

Fastinn 0,092 sem notaðir eru í þessari jöfnu eru byggðir á nokkum nálgunum sem eru efirfarandi:

$$0,092 = 0,16 \cdot 0,80 \cdot 0,80 \cdot 0,9$$

- 16% af próteinum er köfnunarefni
- 80% af köfnunarefninu er tekið upp af fiskinum
- 80% af uppteknu köfnunarefni er skilað út
- 90% köfnunarefnis er skilað út sem TAN og 10% sem þvagefni (urea) (Gildir fyrir ferskvatnsfiska)
- allt TAN er skilað út á tímanum „t“
- allt köfnunarefni sem ekki er tekið upp er fjarlæggt fjótt.

Samanlagður styrkur köfnunarefnis á báðum formum er nefndur heildarstyrkur ammóníaks. Heildarstyrkur ammóníaks táknast sem $\text{NH}_4\text{--N}$ skammstafað á ensku sem TAN (Total Ammonium Nitrogen).

Það hlutfall af heildarstyrk ammóníaks sem er á formunum NH_4^+ og NH_3 ræðst af pH, hita og seltu.

Það er NH_3 sem er sérlega hættuleg fiski, það er fituleysanlegt og getur því auðveldlega farið í gegnum frumuhimnu.

Hár styrkur af ammóníaki getur dregið úr vexti fiska og aukið næmni þeirra fyrir sjúkdómum. Óf hár styrkur af ammóníaki getur leitt til dauða. „European Inland Fisheries Advisory Commission“ [EIFAC, 1970] hafa sett viðmiðunarmörk um að styrkur NH_3 skuli ekki fara yfir $0,02 \text{ mg L}^{-1}$. Almennt er talið að ef styrkur NH_3 sé hærri en sem nemur $0,83$ til $1,1 \text{ mg L}^{-1}$ í fjóra daga sé það banvænnt fyrir laxfiska (salmonids). Fyrir

pH	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
7	0,19	0,27	0,4	0,55
7,1	0,23	0,34	0,5	0,7
7,2	0,29	0,43	0,63	0,88
7,3	0,37	0,54	0,79	1,1
7,4	0,47	0,68	0,99	1,38
7,5	0,59	0,85	1,24	1,73
7,6	0,74	1,07	1,56	2,17
7,7	0,92	1,35	1,96	2,72
7,8	1,16	1,69	2,45	3,39
7,9	1,46	2,12	3,06	4,24
8	1,83	2,65	3,83	5,28
8,1	2,29	3,32	4,77	6,55
8,2	2,86	4,14	5,94	8,11
8,3	3,58	5,16	7,36	10
8,4	4,46	6,41	9,09	12,27
8,5	5,55	7,98	11,18	14,97

Tafla 2.1: Prósentá ójónaðs ammóníaks (sem NH_3) í fersku vatni við mismunandi pH og hita [Spotte, 1979]

aðra beinfiska (nonsalmonids) er þesssi styrkur er 0,83 til 1,1 mg L^{-1} [Flis, 1968, Chiba, 1980].

Sé styrknum haldið á milli 0,05 til 0,15 mg L^{-1} í eina viku til þrjá mánuði leiðir það til minnkun í áti og vexti hjá fiskinum [Robinette, 1976, Burkhalter and Kaya, 1977]. Sé styrk NH_3 haldið á milli 0,06 til 0,4 mg L^{-1} leiðir það til minnkunar í rauðum blóðkornum, óafturkræfra skemmda í blóði og skemmdir á tálknum (hyperplasia) [Flis, 1968, Smith and Piper, 1975]. Sár í tálknum og breytingar í nýrnavef eru dæmigerð einkenni af of háum styrk af ammóníaki [Burrows and Combs, 1964, Flis, 1968, Smith and Piper, 1975]. Afleiðing af þessum sárum eru minnkun í súrefnisupptöku og aukin hætta á sýkingum.

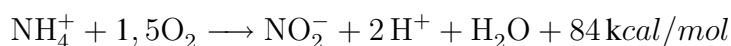
Hækku á pH eða hita eykur hlutfall ójónaðs ammóníaks (NH_3) Eins og sýnt er í töflu 2.1. Sem dæmi þá er við 20 °C og pH 7.0, mólhlutfall ójónaðs ammóníaks aðeins 0.4%, en vex í 80% við pH 10.

2.1.1 Ferill nítrunar

Þegar ammoníak er brotið niður (oxað) myndast nítrít sem milliafurð í nítrunarferlinu þegar ammoníaki er breitt í nítrat. Þó það sé að jafnaði breitt nítrat jafnharðan getur skortur á líf-efnafræðilegri oxun í nítrat valdið hækkun á styrk nítríts sem getur verið eitrað fyrir fisk. Nítrít er í raun stöðugt framleitt sem milliefni í oxun ammoníaks í nítrat eins og síðar verður skýrt. Nítrat er endaafurð oxunarinnar og minnst eitrað af þessum þrem efnum. Í venjulegu endurnýtingarkefi er styrk nítrats haldið niðri með vatnsskiptum.

Nítrun er tveggja skrefa ferill þar sem amóníak er fyrst oxað í nítrít sem síðan er oxað í nítrat. Þar sem fyrra hvarfið er hraðara en það síðara er að öllu jöfnu ekki mikið af nítríti til staðar og flöskuháls hraða umbreytingar því hraði oxunar ammóní-um í nítrít sem er framkvæmd af *Nitrosomas* og *Nitrobacter*. Jöfnur hér að neðan sýna efnabreytingar sem verða við þessi skref.

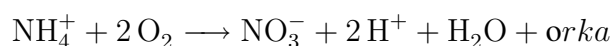
Nitrosomas



Nitrobacter



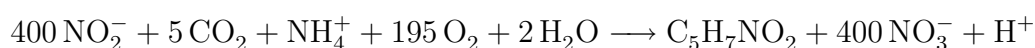
Heildarhvarf



Heildarhvarfið fyrir nítrun og myndun lífmassa er einnig hægt að rita sem [Haug and McCarty, 1972]: *Nitrosomas*



Nitrobacter



Af þessu sést að 4,57 g af O_2 og um það bil 7,14 g af basa sem CaCO_3 til að fulla oxun á einu grammi af ammóníum-N.

Ákjósanlegast er að halda alkanítí á milli 50 og 100 mg/L CaCO_3 . Með því að bæta inn efnum sem innihalda hydroíð jónir, karbonat eða bikarbonat.

Líffræðileg meðhöndlun felur í sér að överur eru látnar vaxa á yfirborði eða sem svíflægar agnir í vatninu. Nær öll kerfi nýta yfirborð sem burðarflöt fyrir örverurnar. Annaðhvort eru örverurnar látnar vaxa á vættum fleti (sem vatn drýpur eftir) á fleti undir yfirborði vatnsins (niðurdýft).

Virgni þeirra er mjög háð hve mikið yfirborðið er aðgengilegt fyrir nítrandi örverur. Stilla þarf samam mikið yfirborðsflatarmál, opin strúktur sem vatn getur leikið auðveldlega um og að burðarefnið brotni ekki niður.

Algeng efni sem notuð eru sem burðarefni fyrir örverur í fiskeldi er sem dæmi stærðarflokkuð möl, ýmis-s form úr plasti eða keramíki og þá oft sem smáar einingar en með miklu yfirborði, gjarna hring- eða söðullaga.

Lífhreinsa þarf að vanda mjög við hönnun til að fyrirbyggja að súrefnispurð verði nokkurn staðar í þeim, upp safnist lífræn óhreinindi sem krefjast mikils súrefnis við niðurbrot (svokallað lífræn súrefnispörf eða „Biological Oxygen Demand, BOD“) eða í þeim geti myndast ammoníak – en það getur einmitt gerst við ranga hönnun.

2.2 Lífhreinsar

Hinn fullkomi lífhreinsir mundi fjarlægja 100% af því ammoníaki sem í hann berst, í honum myndi ekkert nítrít myndast og hann tæki lítið flatarmál, notaði ódýrt efni sem burðarefni fyrir örverur, þyrfti litla þrýstihæð vatns, væri einfaldur í rekstri og safnaði ekki upp lífrænum óhreinindum.

Svona lífhreinsir er ekki til, allir gerðir lífhreinsa hafa sína kosti og galla sem þarf að vega og meta í hverju tilfelli fyrir sig.

Stærri matfiskstöðvar sem eru með endurnýtingu nota núorðið flestar svokallaða kornhreinsa „granular filters“. Það eru hins vegar til margar gerðir sem eru notaðar í endurnýtingarkerfi. Notaðir eru svokallaðar kaflífhreinsar „submerged biofilters“, hrýslsírur „trickling biofilters“, snúningssírur „rotating biological contactors (RBC)“ flotbeðmissírur „floating bead biofilters“ hreyfibeðmissírur „dynamic bead biofilters“ og flotbeðssírur „fluidized-bed biofilters“.

Burðarefni	TAN fjarlæging	TAN	TAN
	byggir á	Fjarlægingarhraði (15 to 20 °C)	Fjarlægingarhraði (25 to 30 °C)
Hrýsl eða snúnings (100-300 m ² /m ³)	Líffleti	0.2 to 1.0 g/m ² á dag	1.0 to 2.0 g/m ² á dag
Kornsía (korn/sandur) (>500 m ² /m ³)	Rúmtak burðarefnis	0.6 to 0.7 kg/m ³ á dag	1.0 to 1.5 kg/m ³ á dag

2.2.1 Hönnunarstærðir

Eftirfarandi skilgreiningar eru notaðar við hönnun og mælingar á lífhreinsum.

Holrými sem er það rými í hreinsinum sem ekki er upptekið að burðarefni örvera. Hlutfall þess er rúmtak lausrýmis deild með heildarrými lífhreinsins. Því meira sem lausrýmið er því minnni hætta er á stíflunum og því greiðari leið á vatnið og grugg í gegn um hann.

Þverflötur er flatarmál lífhreinsis er mælt þvert á vatnsstefnu.

Vatnshleðsla „Hydraulic loading rate“ er það rúmtak vatns sem fer um þverflöt á tímaeiningu. Venjulega gefið í m³/m² dag. Vanalega hafa lífhreinsa hámarks og lágmarks vatnshleðslu.

Lífflötur „Specific surface area“ er það flatarmál á rúmtakseiningu fyrir burðarefni örvera. Því meiri sem lífflötur er því fleiri örverur geta vaxið á hvera rúmalseiningu og þar með meira ammoníak fjarlægt. Stærð burðarefnis, lausrými og lífflötur eru tengdar stærðir, því minni sem burðarefniseiningar eru því meiri verður lífflötur og því minna verður lausrými.

Algengar stærðir sem eru notaðar til að meta virkni lífhreinsa og lýsa virkni þeirra vísa annaðhvort til rúmmáls burðarefnis eða yfirborðsflatarmál þess.

Jafnvel þótt hvarfhraðastuðull nítrunar sé háður yfirborðsflatarmáli er auðveldara að lýsa TAN fjarlægingu á tímaeiningu sem fall af rúmmáli fyllingar frekar en yfirborðsflatarmáli fyrir sand- eða kornfyllingar þar sem það getur verið erfitt að

meta raunfyrirborð þeirra. Tafla 2.2.1 sýnir yfirlit yfir hönnunarforsendur fyrir slíka lífhreinsa.

2.2.2 Kaflífhreinsar (Submerged biofilters)

Í kaflífhreinsi er burðarefnið þar sem örverur vaxa á kafi í vatni. Straumstefna vatns er annaðhvort upp í gegnum fyllingu í svokölluðum uppstreymishreinsum eða niður í niðurstreymi-hreinsum. Viðstöðutíma vatns er hægt að stjórna með straumhraða. Hætta er á að grugg úr eldiskefinu safnist upp í kafsí-um til viðbótar við þeim lífmassa af frumbjarga nitrúnaörver-um (sem breyta NH_3 í NO_2 og NO_3) sem þar á að vera og þar myndist einning ófrumbjarga örverum sem gjarna mynda ammoníak og CO_2 .

Þetta er til óþurftar og getur valdið stíflum í lífhreinsinum, því þarf að vera til staðar búnaður til að hreinsa hann út með reglulegum hætti til að hann sé virkur í einhvern lengri tíma.

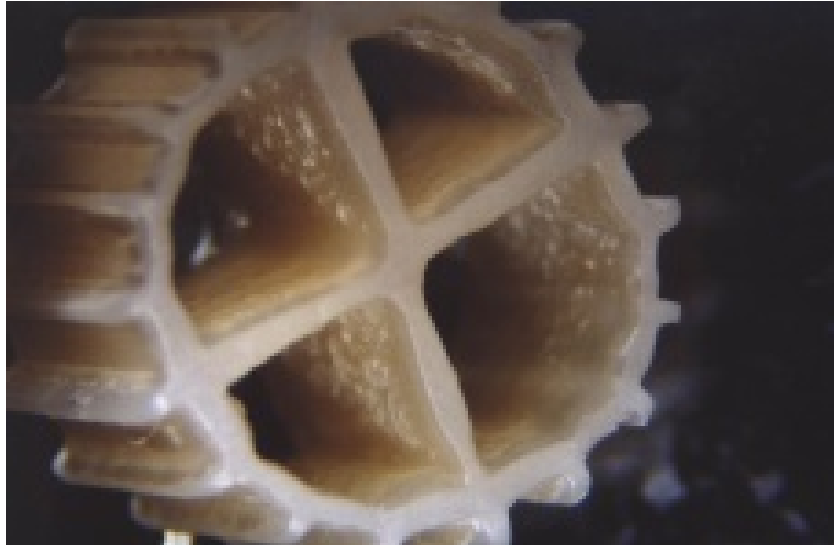
Til að varna því að stíflur myndist hefur verið notast við nógu gróft fyllingarefni eins og harpaða mól sem er yfir 50mm að stærð eða plastfylligar yfir 25mm. Þess ber að gæta að 50mm mól mun einungis hafa lágt yfirborðsflatarmál eða um $75 \text{ m}^2/\text{m}^3$ og holrými er eingöngu 40–50%.

Slambifyllingar eins og loftunarhringir eða loftunarsöðlar munu einnig hafa frekar lágt yfirborðsflatarmál eða um $100\text{--}200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ en hisn vegar mun meira holrými eða um 95%.

Helsta vandamál við þessa gerð lífhreinsa er að súrefnisstyrkur getur orðið mjög lágur í þeim og í hann getur safnast lífrænn skítur sem erfitt getur verið að spúla út. Slíkir lífhreinsar voru gjarna notaðir í fiskeldi á árum áður en hefur í flestum tilfellum verið skipt út fyrir aðrar gerðir. Er það vega þess að þeir eru bæði með háan stofnkostnað og ekki síst vegna erfiðleika við bakspúlun.

Nýleg gerð kaflífhreinsa er hreyfibeðshreinsir með yfirborðsmiklum polyetylen hólkum sem eru um 7 mm langir og 10 mm í þvermál. Þessir hólkar ganga undir nafninu Kaldnes hringir. Þeir líta út eins og tannhjól op standa tennru bæði út og inn að miðju hringjanna. Hringjunum er haldið á stöðugri hreyfingu með kröfugu loftstreymi sem heldur súrefnsstigi nálægt mettu-um og minnkar einning hættu á uppsöfnun á lífrænu gruggi

Framleiðendur gefa upp að orkunotkun sé lítil og nitrunarharði sé mikill. Virkt yfirborðsflatarmál fyrir örveruvöxt er um



Mynd 2.1: Kaldnes hringir frá fyrirtækinu AnoxKaldnes

365 m_2/m_3 og nítrunavirkni er gefin 560 gr/m^3 . Helstu kostir þessarar gerðar er lítil lyftihæð vatns og loftun en ókostur er að mikið loft þarf til að halda hringjum á stöðurgri hreyfingu. Þessir hringir eru líka nokkuð dýrir.

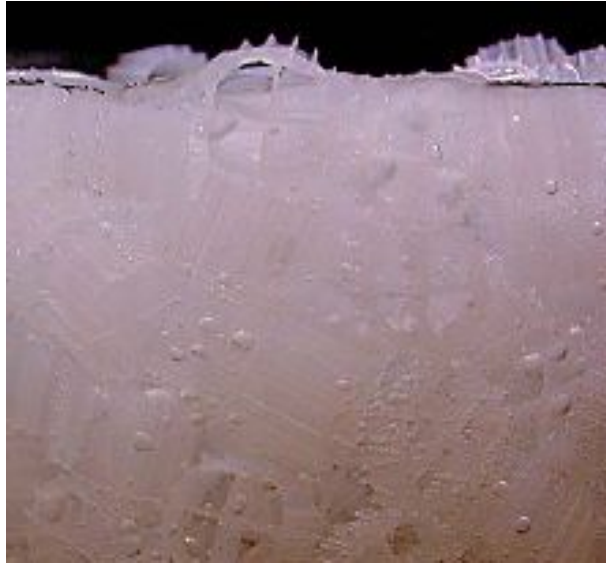
2.2.3 Hriplífhreinsar

Hriplífhreinsar vinna með svipuðum hætti og kaflífhreinsar nema hvað vatnið rennur niður eftir burðarefni örvera og heldur því röku en ekki í kafi. Því er holrýmið ekki vatnsfyllt heldur loftfyllt og því er er mun auðveldara að halda góðri mettun súrefnis.

Hriplífhreinsar hafa mikið verið notaðir í fiskeldi því þá er auðvelt að smíða og reka, þeir eru auðloftaðir og geta vel nýst til að fjarlægja koltvísýring í leiðinni auk þess að vera ekki allt of dýrir. Í skolphreinsistöðvum var gjarnan notaðar hriplífhreinsar með stærðarflokkuðu grjóti en nú á dögum er yfirleitt notað platefni sem burðarefni fyrir örverur. Það vegur mun minna, hefur mun hærra sértækt yfirborðsflatarmál (lífflöt) ($100\text{-}300 \text{ m}^2/\text{m}^3$) auk þess að holrými er mun meira eða allt að 90%.

Til eru ýmsar gerðir af hriplífhreinsum. Algengt er fyrir heitvatnskerfi að hafa vatnshleðslu á milli $100\text{-}250 \text{ m}^3/\text{m}^2$ á dag og hafa hæð burðarefnis örvera milli 1-5 m. Notað er burðarefni sem hefur lífflöt um á milli $100\text{-}300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ og vænta má að hraði TAN fjarlægingar séu á bilinu 0,1 til 0,9 g/m^2 á dag.

Hriplífhreinsar hafa ekki verið notaðir í stórum kaldvatns-



Mynd 2.2: Kaldnes hringir í lífhreinsi

kerfum þar sem nítrun er hæg og þeir verða því plássfrekir og háir ef þeir eiga að ná tilætluðum afköstum. Hins vegar má nota þá í smærri kerfum eins og í klakstöðvum þar sem álag er lítið og breytilegt.

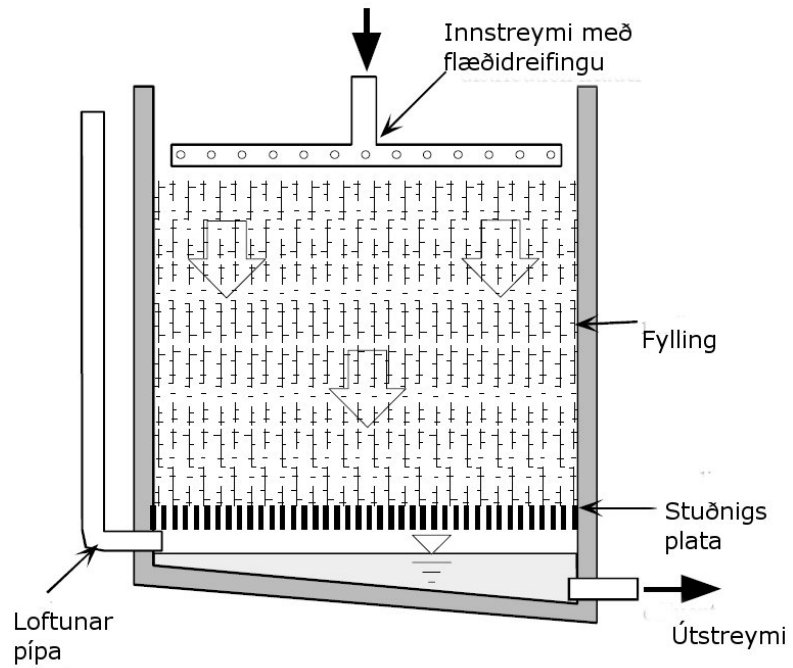
2.2.4 Hverfihreinsar (Rotating biological contactors)

Virkni hverfihreinsa er með þeim hætti að burðarefnið fyrir örverur er á diskum eða tromlum sem snúast hægt á öxli og ganga því gegnum vatnið eins og sýnt er á mynd 2.2.4. Því eru örverunar annaðhvort á kafi í því vatni sem amoníakið er í eða þá í andrúmslofti sem sér örverufilmunni fyrir súrefni.

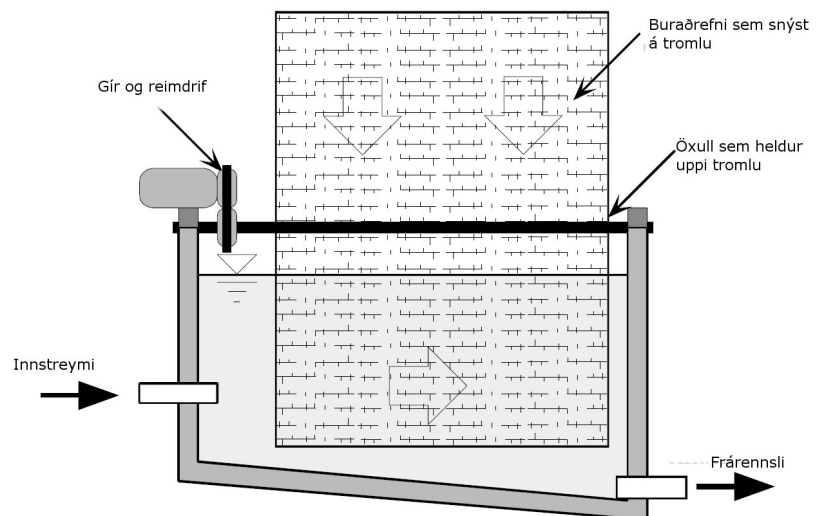
Að öllu jöfnu er um 40% af yfirborði diskja eða tromla undir yfirborði vatns á hverjum tíma og hraði snúnings um 1,5-2 snúningar á mínútu. Í árdögum voru diskar hafðir úr báruplast en nú er yfirleitt notað efni með meira yfirborðsflatarmál til að auka virkni.

Hverfihreinsar eru eitthvað notaðir í endurnýtingarkerfum vegna þess að lítillar lyftihæðar er þörf og rekstarkostnaður er ekki mikill, auk þess sem þeir hafa reynst betur sjálfhreinsandi en lífreinsar sem ekki eru með hreyfanlegum hluta eins og til dæmis hriphreinsar.

Helstu ókostir eru að þeir þurfa að vera vel hannaðir sértaklega þarf allt gangverk og legur að vera vel gert. Stofnkostnaður á hvert fjarlægt gramm ammoníaks er einnig nokkuð hátt.



Mynd 2.3: Hripsía með hreyfanlegum dreifiarmi fyrir innstreymi Frá Summerfelt 1999



Mynd 2.4: Skematísk mynd af hverfihreinsi. Myndir er frá Summerfelt 1999

2.2.5 Smákorna lífsíur

Á mynd 2.2.5 má sjá smákorna flotlífhreinsi. Þessi gerð lífhreinsa hefur náð vinsældum í minni kerfum þar sem gegnumstreymið gegnum meðhöndlunarbúnað er almennt minna en 2000 L/min. Þessir hreinsar voru hannaðir af prófessor Ron Malone við LST (Louisiana State University) í Bandaríkjunum. Nánari lýsingar má sjá á heima síðunni www.beadfilters.com.

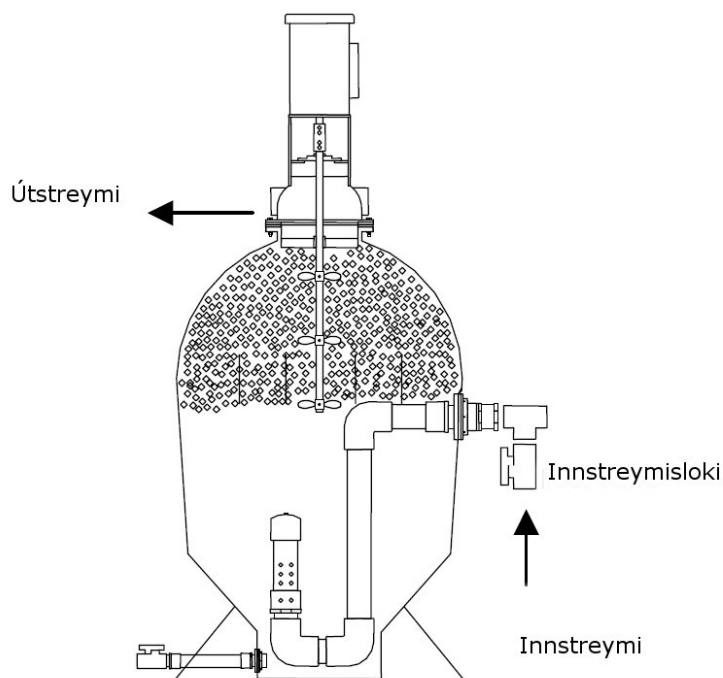
Virkni þeirra er tvíþætt, annarsvegar grugghreinsun þar sem gugg ázogast á smákornin í hreinsinum auk nítrunar á ammoníaki. Einnig skapast góð skilyrði fyrir rétta gerð örvera. Þessir hreinsar safna ekki upp lífrænu gruggi ef þeim er rétt stýrt og ekki þarf að bakspúla þá mjög oft.

Virknin er með þeim hætti að vatnið er látið streyma upp í gegnum fljótandi smákorn sem gerð eru úr polyethylen plasti og er stærð plastagna á bilinu 3-5 mm og eðlisþyngd um 0,91 kg/L. Virkur yfirborðsflötur þeirra er um 1.150-1.400 m²/m³. Á þessum plastögnum vaxa nítrandi örverur, en á þær sogast einnig gruggagnir sem eiga leið hjá. Til að halda gruggi og þar með lífrænu efni í lámarki í hreinsinum er gegnumstreymi stöðvað og búnaður settur í gang sem kemur smákornunum á hreynfingu, annaðhvort með loftflæði eða með vélrænni hræringu. Að hræringu lokinni er gruggi hleypt niður úr hreinsinum og að því loknu er hann settur í gang aftur. Þessi bakspúlun tekur einungis nokkrar mínútur.

Helsti kostur þessarar gerðar er sú að þeir eru afkastamiklir miðað við stærð auk þess að þeir hafa þá tvívirkni að vera bæði grugghreinsir og lífhreinsir.

Pumalfingurregla er að um 1,5 l/sek af hringstreymi þarf fyrir hvert kg fóðri sem gefið er á dag. Fyrir það flæði þarf um 0,130 m³ af fyllingu.

Stæðstu gerðir þeirra eru með 2,8 m² fyllingu og geta annað allt að 50-70 L/sek. Helsti ókostur er að í þeim verður nokkuð þrýstifall og þeir eru nokkuð dýrir. Flestir lífhreinsar fyrir smærri kerfi eru hreinsaðir með loftblæstir og rúmtak fyllingar er minna en 0,28 m².



Mynd 2.5: Mynda af smákorna lífhreinsi. Myndir er frá www.beadfilters.com

2.2.6 Smákorna svifbeðshreinsir (Fluidized-bed biofilters)

Svifbeðshreinsar hafa verið notaðir í allnokkrar stærri fisk-eldisstöðvar sem eru með hringsteymi á bilinu 250-2,500 L/sek. Helsti kostur þeirra er mjög mikið virkt yfirborðsflatarmál burðarefnis sem oftast er stærðarflokkaður sandur eða mjög smáar plastagnir. Yfirborðsflötur er á bilinu 4.000 til 45.000 m²/m³ fyrir sand en er vanalegar 100-800 m²/m³ í hriphreinsum með fasta fyllingu og um 1.050 fyrir smákornahreinsum.

Kostur er að tiltölulega auðvelt er að skala upp í stórar einingar þessa hreinsa og stofnkostnaður þeir eru tiltölulega lágur ef miðað er við fjærlægð grömm NH₃ á tímaeiningu. Þar sem stofnkostnaður er nokkurnveginn í réttu hlutfalli við grunnflöt lífhreinsa eru svifbeðshreinsar vel samkeppnisfærir, þar sem hin mikli lífflötur skapar mikla virkni á hverja flatarmálseiningu.

Smákorna svifbeðshreinsar eru því afkastamiklir miðað við margar aðrar gerðir og fjarlægja jafnan um 50 – 90% af ammóníaki í hverjum hring í kaldavatnskerfum [Summerfelt et al., 2001]. Hraði nítrunar í kaldavatnskerfum eru á bilinu 0,2 til 0,4 kg TAN á dag á hvern rúmmeter svifbeðs [Timmons and Summerfelt, 1998].

Í hlívatnskerfum er virknin hærri eða á milli 0,6 til 1,0 kg á rúmmetra á dag.

Helsti ókostur svifbeðshreinsa er hár rekstrarkosnaður því þó nokkra orku þarf til að halda sandi á stöðugri hreyfingu. Engin loftun er eins og í hriphreinsum eða hverfihreinsum. Það getur einnig verið vandaverk að halda þeim við og gæta að því að ekki myndist of mikill lífmassi í þeim. Flæði vatnsins fer eftir eðlismassa burðarefnis ef notaður er sandur sem er þyngri en vatn þá er uppstreymi notað en niðurstreymi fyrir burðarefni sem eru léttara en vatn eins og plastefni.

Svifbeð myndast þegar hraði vatnsins er nógur til að dreifa burðarefninu (sand eða plastögnum) í straumstefnu sem veldur því að hún lyftist upp og svífur um en ekki næginlega hátt til að berast út úr lífhreinsinum. Iðuflæði smákornanna tryggir dreifingu súrefnis og næringarefna til örveranna sem eru föst við kornin og sér einnig til þess að halda bíofilmu í réttri þykkt. Því verður hraði nítrunar mikill á hverja rúmmálseiningu en á móti kemur að þó nokkra orku þarf til að halda ögnum í svifbeðsformi.

Hönnun þarf að vera mjög vel útfærð til að þessi gerð hreinsa verki rétt. Mismunandi úrfærslur hafa verið notaðar til að vatnsinntak í botni hárra svifbeðshreinsa. Vanalega er notast við röralagnir sem ná frá yfirborð og niður að botni. Þó nokkurn þrýsting þarf til að yfirvinna þá mótstöðu sem myndast og er það vanalega á bilinu 1/3 til 1/2 loftþyngdir.

Helsti kostur er að þá er auðvelt að skala upp. Hins vegar munu aðrir þættir geta haft mikil áhrif þá sérstaklega ef eitthað kemur upp því ef maður missir svifbeðið niður og nær því ekki upp innan ákveðins tíma geta alvarleg rekstrarvandamál komið upp.



Mynd 2.6: Mynd af svifbeðshreinsi. Myndin er frá <http://www.aquaneering.com>

Kafli 3

Fjarlæging á gruggögnum

3.1 Inngangur

Grugg er sá þáttur sem eftir súrefni og koltvísýring sem hefur hvað mest áhrif á vatnsgæði og þar með möguleika á því að endurnýta vatn. Því er það mjög mikilvægt að hafa hönnunina þannig úr garði gerða að grugg safnist hvergi fyrir og sé auðhreinsalegt úr kerfinu.

Grugg eða „suspended solids“ eins og það nefnist á enskri tungu, á uppruna sinn í saur fiska, í uppleystu fóðri og getur einnig innihaldið örverukekki „bioflocks“ sem eru dauðar og lifandi örverur eins og nafnið gefur til kynna. Þessar gruggagnir eru misstórar eða allt frá því að vera af stærðargráðunni sentimeter niður í míkronskala (μm). Hegðun og eðliseiginleikar gruggagna er mjög háð stærð þeirra. Þegar magn gruggagna er mælt er oft stórar agnir, þær sem eru stærri en $200 \mu m$, forsiðar frá og tilgreindar sérstaklega í grugggreiningu.

Í kerfi þar sem grugg er fjarlægt og vatn er endurnýtt, brotna þær gruggagnir niður sem eftir verða og fylgja með í næsta hring og verða því smærri. Því verður sífellt torveldara að fjarlægja þær eftir sem þær hafa verið lengur að velkjast í kerfinu.

Stórar agnir, eða þær sem eru stærri en $100 \mu m$ geta sest til en agnir á bilinu $1 - 100 \mu m$ setjast afar hægt eða ekki til og er það stærðabil sem agnirnar flestar eru á þegar tekið er tillit til vegins meðalmassa.

Ef agnir eru minni en $30 \mu m$ er ekki hægt að sía þær burt með mekanískum síum eins og tromlusíum, þó geta smákorna flotlífhreinsar náð ögnum allt að $20 \mu m$ að stærð. Aðferðir við fjarlægingu á gruggi verða rædd nánar í þessum kafla.

3.1.1 Heildargrugg og gruggmælingar

Heildargruggmagn eða „Total Suspended Solids (TSS)“ er skilgreint sem massi agna yfir 1 μm sem eru á svifi í lausn. Þau eru bæði af ólífrænu og lífrænum toga og hægt er að greina þar á milli.

Við grugggreiningu er tiltekið magn vatns síað gegn um sérstakar kísilsíur. Síurnar eru þvínæst þurrkaðar við 105°C og viktaðar. Það fæst heildarmagn gruggfna eða TSS á hvern lítra vatns. Þvínæst eru síurnar hitaðar við 500°C en síurnar eru gerðar úr efni sem þolir þann hita. Við það brennur burt lífrænt efni og mismunur milli þessara massa og fyrri mælingar gefur því magn lífræns gruggs.

Fínt grugg, og þá sértaklega af lífrænum toga, er slæmt fyrir þrif fiska [Chapman et al., 1987, Magor, 1988] [Alabaster and Lloyd, 1984]. Hinsvegar fara mörk þess gruggs sem er í vatninu eftir tegund og stærð fisks auk þess sem menn hafa ekki almennt komið sér niður á viðmiðunarmörk en mörk frá 15 - 40 mg/L hafa verið nefnd [FIF, 1980, Muir, 1982]. Almennt gildir þó að því hreinna sem vatnið er því betra.

Það er ekki hægt að brýna nógu vel hve það er mikilvægt að fjarlægja gruggagnir með sem skjótustum hætti og forðast alla uppsöfnun á gruggi. Gæta þarf að því að hvergi séu dauðir punktar í lögnum og rennslisraðinn sjái til þess að grugg setjist hvergi til. Uppsöfnun á gruggi er ávísun á vandræði.

Það er brýnt að athuga hagkvæm mörk gruggs í landeldi fyrir bleikju á Íslandi.

3.2 Massajafnvægi

Ávalt skal reynt að nýta þann möguleika að láta gruggagnir safnast saman á staði þar sem hægt er að skola þeim burtu með litlum hluta vatnsins. Það er þægilegast að gera í kerunum sjálfum með því að láta hringhreyfinguna safna gruggi að miðjubotni eins og telaufum í bolla sem hrært er í.

Því er hægt að vera með tvö frárennsli annað í miðju sem tekur 10-20% af vatnsstraumi og ber með sér meginhluta gruggsins og svo annað frárennsli sem staðsett er ofarlega nálægt útkannti kers sem tekur megnið af vatnsstraum sem síðan má endurnýta, hugsanlega eftir frekari hreinsun, Með slíku kerfi

má þykkja grugg við botn allt að tífalt. Mælingar á slíkum kerfum með regnbogasilung hafa sýnt að grugg í hliðarfrárennsli er um 1-2 mg/L á meðan það er 25 mg/L í botnfrárennsli [Summerfelt,].

Þessi virkni veður meiri eftir því sem stærð kera (radíus) er meiri þar sem krafturinn, sem sér um fjarlæginguna það er miðsóknarkraftur sem veldur því að agnirnar eru á hringhreyfingu (oft er talað um miðflóttakraft en hann er í raun gerfíkraftur).

Jafna fyrir miðsóknarkrafti er:

$$\begin{aligned} F_{\text{miðsóknar}} &= -ma_{\text{miðsóknar}} \\ &= m\omega^2 r_{\perp} \end{aligned} \quad (3.1)$$

þar sem m er massi agnarinnar og ω er tíðni hringhreyfingar í SI einunginni radíanar/sek (Einn hringur er 2π og ögn sem fer einn hring á sekúndu hefur því tíðnina 2π og eininguna sek^{-1}). Krafturinn eykst því í réttu hlutfalli við radíus kers og í öðru veldi við hringhraða agnanna.

Nú er:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = v/r \quad (3.2)$$

Þar sem f er tíðni (í Hertz) T er tími (sekúndum) og v er hornhraði í m/sek . Svo við fáum á endanum að krafurinn er:

$$F_{\text{miðsóknar}} = m \frac{v^2}{r} \quad (3.3)$$

3.2.1 Allmenn hönnunarskilyrði fyrir hringlaga ker

Stór kostur við hringlaga ker eins og áður er nefnt er að þau virka sem gruggsöfnunarbúnaður sem safnar gruggi að botnmiðju líkt og gerist þegar telaufer eru hrærð í bolla. Eftirfarandi atrið ber að hafa í huga við hönnun kera:

- Notið ker með þvermál – dýptarhlutfall á milli 3 til 10 – helst milli 3 og 6. Því ætti ker sem er 10 m breitt að hafa dýptina á bilinu 2 - 3 metrar.
- Notið tvö frárennsli þar sem annað er við botnmiðju til að safna gruggi en það frárennsli sem er fyrir endurnýtanlegt vatn skal staðsett á efri helmingi á hlið kers -

helst nokkru innan við brún. Þar skal taka 80-95 % af vatnsmassa en afgangin sem inniheldur megnið af gruggi er á að taka út um miðjurör.

- Haldið hraða hringsnúnings í kerum að minnsta kosti 15-30 cm/sek. Meiri hornhraði eykur miðsóknakraft í öðru veldi því hefur hraðinn mikið að segja. Ef hraði er of mikill hins vegar mun vatnsmassn drífa með sér agnir upp frá botni í miðju kersins.

Pegar stærri agnir hafa verið fjarlægðar með þessari aðferð má nota aðrar aðferðir við að hreinsa hliðarsteymisvatnið áður en það er notað aftur á hringrásinni. Þær aðferðir verða ræddar frekar.

3.3 Myndun gruggs

Grugg er upprunið úr fóðri. Það er myndast með eftirfarandi hætti:

- Óétið fóður sem lostnar upp
- Saur fiska sem brotnar í smærri agnir

Af því fóðri sem er étið fer 80-90% út aftur á einhverju formi. Sem þumalfingurregla er oft notað að 25% af fóðri endi sem grugg reiknað á massa þurrefnis.

3.3.1 Eðliseiginleikar gruggs

Frá sjónamiði grugghreinsunar eru það þrír þættir sem skipta hvað mestu varðandi eðliseiginleika gruggs. Þeir eru:

- Eðlismassi þeirra
- Stærðardreifing agna
- Samloðun agna

Eðlismassinn ákvarðast af því hvaðan þær eru upprunnar, sama má segja um samloðun þeirra. Hegðun þeirra í vatni ákvarðast mikið af eðlismassamun þeirra miðað við vatnið. Mun-
ið að eðlismassi saltvatns er hærri en eðlismassi ferskvatns þannig að grugg sest hægar í söltu vatni. Mælingar á gruggi teknu úr endurnýtingarkefi sýndu að meðal eðlismassi þess

eru um $1,19 \text{ gr/cm}^3$ [Chen et al., 1994] en aðrar niðurstöður, til dæmis úr eldi beitarfisks sýndu nokkuð lægri tölur eða um $1,05 \text{ gr/cm}^3$. Almennt viðist gilda að fiskasaur virðist hafa eðlis-massa sem er nokkuð nálægt eðlismassa vatns og er því ekki auðfelldur úr vatninu.

Þó fiskasaur sé að öllu jöfnu aðaluppspretta grugganga er uppleyst fóður einnig nokkuð stór þáttur. Fóðrið hefur samt mun meiri samloðun og jafnvel eftir nokkrar klukkustundir og ferðalög um dælur er stærð 95 % agna að jafnaði meiri en $60 \mu\text{m}$ og 70% stærri en $500 \mu\text{m}$. Því er hegðun og stærðar-dreifing agna af þessum tveimur gerðum ólík og mun auðveldar að losna við óétið fóður en sauragnir.

Eftir því sem endurnýting er meiri minnar meðalstærð agna. Í fullum endurnýtingarkerfum sem eru einnig með lífhreinsi og endurnýta stóran part af vatnsmassa yfir sólarhringin (>70%) má vænta þess að meðalstærð gruggagna sé komin að $30 \mu\text{m}$. Því mun ekki duga að nota tromlusíur með $60 \mu\text{m}$ dúk og í raun ekki heldur með fínna dúk því komið er að mörkum þess sem hægt er að ná út með síutækni. Ekki mun heldur stoða að nota fellingaraðferðir þar sem jafnvel klukkustundir þarf til að fá svo smáar agnir til að falla um hálfan metra.

3.4 Aðferðir til grugghreinsunar

Það eru í grunnin þrjár aðferðir notaðar til að fjarlægja grugg:

1. Þyndaraflsaðferðir
2. Síutækni
3. Fleyting

Þessar aðferðir eiga við mismunandi stærðarflokka gruggs. Stórar agnir, það er agnir stærri en $100 \mu\text{m}$ er hægt að fjarlægja með því að láta þær falla á botn fellikers eða með síuaðferðum eins og tromlusíum. Fínna agnir er ekki hægt með góðum hætti að ná burt með síutækni þó er hægt að ná gruggögnum að $20 \mu\text{m}$ stærð með smákorna lífsíu. Við fleytingu ásogast agnir loftbólum og berast með þeim úr vatnsmassanum.

Af þessum aðferðum er felling eða síun helst notuð enda hagkvæmustu aðferðirnar. Sú aðferð að nota fleytingu á yfir-leitt einungis við ef þörf er á að hafa vatnsmassan mjög hrein-an eins og þarf að vera við í sýningarkerfum fiskasafna eða við

Aðferð	Stærð agna sem fjarlægast (μm)	Prýstifall (m)	Hleðsla vatns m^3/d á m^2	TSS fjarlæggt %	Heimild
Felling - tjörn	>100		24-94	40-60	EPA 1975
Grófur sandur	>20		94-350	70-90	EPA 1975
Sandsía - þýsting	>20	2-20	115-700	50-90	Muir 1982
Smákorna flotsía	>20	0,8-6	1.935		Wimberly 1990
Tromlusía	>75	lítið	100-2.200		
Froðu fleyting	<30		190-280		Chen 1991

framleiðslu viðkvæmra lirfa eins og raunin er við eldi lúðulirfa. Í töflu 3.4 má sjá samantekt af kostum á síutækni.

Við val á aðferðum á grgghreinsum eru eftirfarandi þættir hafðir til hliðsjónar:

- Vatnshleðsla - afköst á flatareiningu
- Geta til að ná fínu gruggi
- Prýstifall
- Vatnstap ví bakspúun búnaðar
- sjálfhreinsun búnaðar

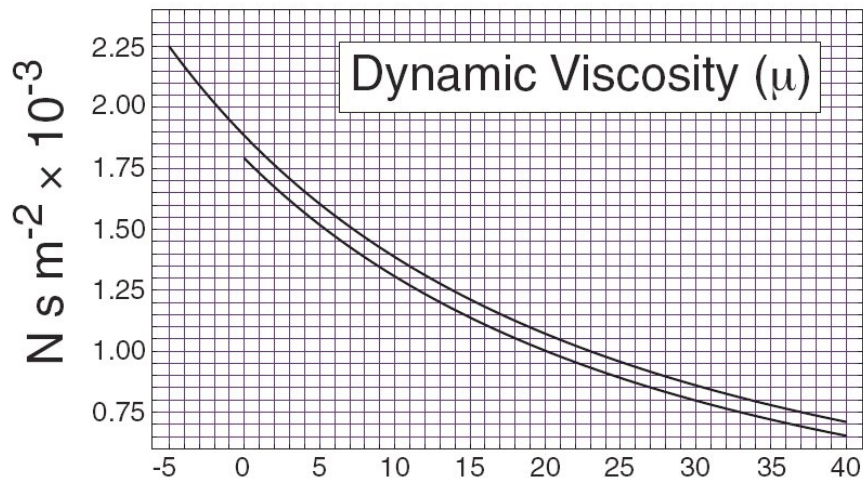
3.4.1 Felling

Fellitjarnir byggja virkni sína á fellingu gruggagna vegna verkunar þyngdarkrafts á agninar. Eins og gefur að skilja er stærð kraftar háður eðlismassamum milli gruggagnar og vatnsins. Ef við gerum ráð fyrir að agnirnar séu eðlisþyngri en vatn munu þær falla með vaxandi hrað uns jafnvægi er náð við viðnámskrafta og falla þær með jöfnum hraða eftir það. Hægt er að reikna út þenna jafnvægishraða útfellignar, ef gert er ráð fyrir því að agnirnar séu hringlaga samkvæmt jöfnunni:

$$v_{\text{felling}} = \frac{2(\rho_p - \rho_f)gr^2}{9\mu} \quad (3.4)$$

Þar sem, v_{felling} er fellihraði, ρ_p eðlismassi agna, ρ_f eðlismassi vökvans g þyngdarhröðun jarðar, r radíus agna og μ segja vökvans sem er um $1,3 \times 10^{-3}$ Pa sec fyrir ferskvatn við 10 °C.

Segja á sjó er ívið hærri eins og sjá má á meðfylgjandi grafi.



Mynd 3.1: Mynd er frá Jumars, P.A., J.W. Deming, P.S. Hill, L. Karp-Boss, P.L. Yager and W.B. Dade. 1993. Mar. Microbial Food Webs 7: 121-159. Hún sýnir segju (dynamic viscosity) fyrir sjó við 35 % (efri lína) og í fersku vatni (neðri lína) sem fall af hitastigi í °C

Algengir fellihraðar

Hraði á gruggfellingu á fisksaur hefur verið mældur og er á bilinu 1,7-4,3 cm/s. Eðlismassi saurs fer mikið eftir fisktegundum og væntanlega einning eftir fódurgerð en sem dæmi hefur eðlismassi tilapiusaurs verið mældur 1,05 kg/L [Warrer-Hansen,] og fellihraði 3,8 cm/s en er oft lægri hjá öðrum tegundum svo sem regnbogasilungu þar se eðlismasssin hefur verið mældur 1,005 kg/L [Robertson, 1992]. Því fellur hann mun hægar eins og Wong og Piedrahita [Wong and R.H., 2000] greina frá eða 1,7 cm/s. Gera má ráð fyrir að fallhraði bleikjusaurs sé á því bili.

Settjarnir

Settjarnir eru góð leið til að fjarlægja grugg ef rétt hannaðar og reknar. Þær eru tæknilega einfaldar og nær engar orku er þörf til að reka þær og eru ódýrar í smíði.

Helsti ókostur þeirra er að þær taka við frekar litlu vatni á flatareiningu og hreinsa ekki út agnir sem eru smáar ($< 100\mu\text{m}$). Þær eru einnig plássfrekar og tromlusíur oft betri kostur.

Annar augljós ókostur er að grugg situr í kerfinu uns það er hreinsað út. Það skapar hættu á enduruppleysinug og jafn-

vel myndun á óæskilegnum niðurbrotsefnum. Grugg þarf að öllu jöfnu að vera hærra en 10 mg/L í innstreymisvatni til að settjarnir gagnist og styrkur í frárennsi fer alla jafna ekki niður fyrir 6 mg/L. Gera má ráð fyrir að þörf sé á viðbótubúnaði til að uppfylla strangari frárennisliskröfur.

Öllum settjörnum er skipt í fjögur svæði, innstreymissvæði þar sem flæði er jafndreift yfir þvermál settjarnar. Vatnið rennur þvínæst á fellisvæði settjarnar en undir því safnast grugg á seyrubotni hennar. Þvínæst rennur vatnið á frárennissvæði hennar og út úr henni.

Við kjörskilyrði, þegar engir yðustraumar (turbulence) er til staðar, þarf viðstöðutími að vera jafn falltíma agnar sem byrjar fallið við yfirborð vatnis við innstreymisenda fellihluta og endar við botn við frárennislisenda fellihlutans. Sú hönnunarstærð sem skiptir því miklu máli er því flæðihraði v_0 sem er:

$$v_0 = Q/A_{sz} \quad (3.5)$$

Þar sem Q er flæðið (m^3/s) og A_{sz} þversniðsflatarmál settjarnarinnar. Allar agnir með sethraða v_{felling} hærri en flæðihraða v_0 munu falla út.

Þegar fellitjarnir eru hannaðar er nauðsynlegt að gera prófnanir með því gruggi sem á að fella út áður en ráðist er í hönnun. Taka þarf sýni af vatninu með því gruggi sem á að fella og setja í gagnsæjan hólk sem er með þvermál stærra en 13 cm og skrá fellihraðann. Ef ekki er völ á gruggi þá má notast við jöfnu 3.4.

Fellitjarnir voru upphaflega hannaðar fyrir skólphreinsistöðvar og venjulegar hönnunarforsendur sem notaðar eru fyrir síkar stöðvar er ekki hægt að yfirfæra á fiskeldisvatn. Tillögur eru um að viðstöðutími vatns á fellisvæði sé á milli 15 – 30 mínútur og hlutfall milli lengdar og breiddar þá milli 4:1 til 8:1. Dýpi skal vera yfir 1 metri. Annarri forsendu sem einnig er beitt er að úr eldi laxfiska sé gegnsteymishraði um 40-80 m^3/m^2 á dag. Það mun fjarlægja agnir sem hefur fellihraða meiri en 0,046-0,092 cm/s. Hægt er að fjarlægja yfir 90% af setjanlegu gruggi með fellitjörnum en þess ber að geta að setjanlegt grugg er oftast einungis 10% af uppleystu gruggi (TSS).

Settjarnir eru gjarna notaðar til að þykkja skolvatn frá tromlusíum enn frekar. Það hefur verið gert í rannsóknarstöð Freshwater Institute í Shepherdstown WV í Bandaríkunum með góð-

	TSS mg/L	TAN mg/L	NO ₂ - N mg/L	NO ₃ - N mg/L
Skolvatn frá tromlusíu	5,10 ± 1,5	1,7 ± 0,1	0,19 ± 0,03	1,5 ± 0,1
Efja úr hringlaga setsíu	151 ± 24	1905 ± 2,5	0,04 ± 0,01	0,7 ± 0,2

um árangri en þeir nota hringlaga felliker til að þykkja afskol tromlusía.

Í meðfylgjandi töflu má sjá niðurstöður mælinga um þykkingu gruggs í skolvatni í þeirri stöð.

Um 10% af grugginu safnast upp með þessum hætti og inniheldur það um 1000 mg/L af NH₃-N.

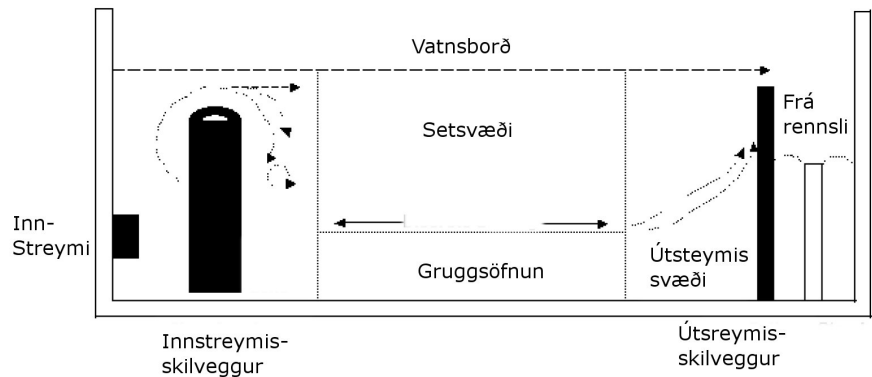
Innstreymi og útstreymi úr settjörnum

Flutningur vatns inn og út úr settjörnum verður að vera með þeim hætti að engir iðustraumar myndist á fellisvæði hennar og þum-alfingursreglan er að ef yður eða straumur sést í settjörnum er vikni hennar mjög lítil.

Oftast er eingöngu notað eitt innstreymis- frárennslisrör og raun eru innstreymis- og frárennslissvæði ekki fráskilin frá eiginlegu fellisvæði. Þetta er í raun vesta gerð af hönnun og bíður upp á að vatnis steimi beina leið yfir fellisvæði með tiltölulega miklum hraða að frárennslisli. Því vill stór hluti vatnsins fara með mun meiri hraða en fræðilegir útreikningar segja til um. Til að hönnun sé markviss þarf að aðskilja þessi þrjú svæði. Þegar innsteymissvæði er hannað þarf að hafa eftirfarandi í huga:

- Deila þarf innsteyminu jafnt yfir allt þvermál fellitjarnar.
- flæðið inn í fellisvæði þarf að byrja í jöfnu lárétu streymi
- Innsteymishraði þarf að vera það lágur að ekki myndist yðustraumar eða blöndun eigi sér stað.

Að öllu jöfnu er komið fyrir skilvegg milli innsteymissvæðis og fellisvæðis með brún um 15 cm undir yfirborði. Á mynd 3.4.1 má sjá skematíska hönnun á settjörnum þar sem skilveggir milli innstreymis- set- og útsteymsisvæða eru sýndir.



Mynd 3.2: Innsteymisskilveggur þarf að vera nokkuð breiður eða um 20-30 cm og með afrúnuðum brúnum. Hann þarf að ná um 85% af vatnshæð þ.e. vatnsborð er 15% yfri honum. Myndin er frá Western Regional Aquaculture Center í BNA.

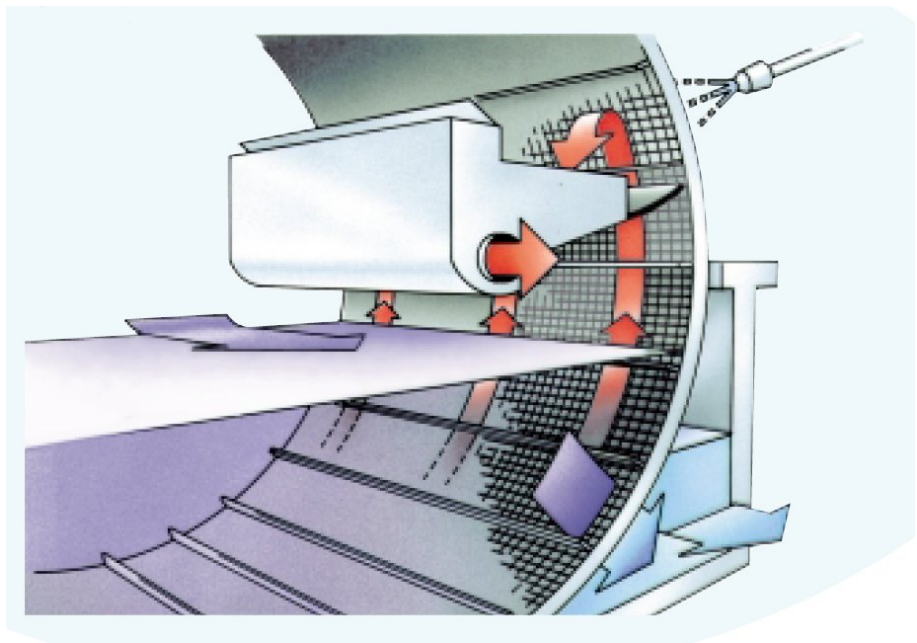
3.4.2 Skjásíun með tromlu- og hjólsíum

Tromlu- og hjólsíur njóta mikilla vinsælda vegna þessa að þær eru viðhaldslitlar, krefjast lítillar umsjónar, taka lítið pláss og í þeim er afar lítið þrýstifall. Skjásíur fjarlægja agnir með beinni síum, það er sía frá agnir sem eru stærri en götin á dúknum og í raun jafnvel agnir sem eru nokkuð minnni en götin. Algengustu gerðir eru svokallar trommlusíur og disksíur og svo eru einnig til beltasíur sem eru minna notaðar. Á mynd 3.4.2 má sjá mynd af tromlusíu og á mynd 3.4.2 má sjá skematýska mynd af diskasíu.

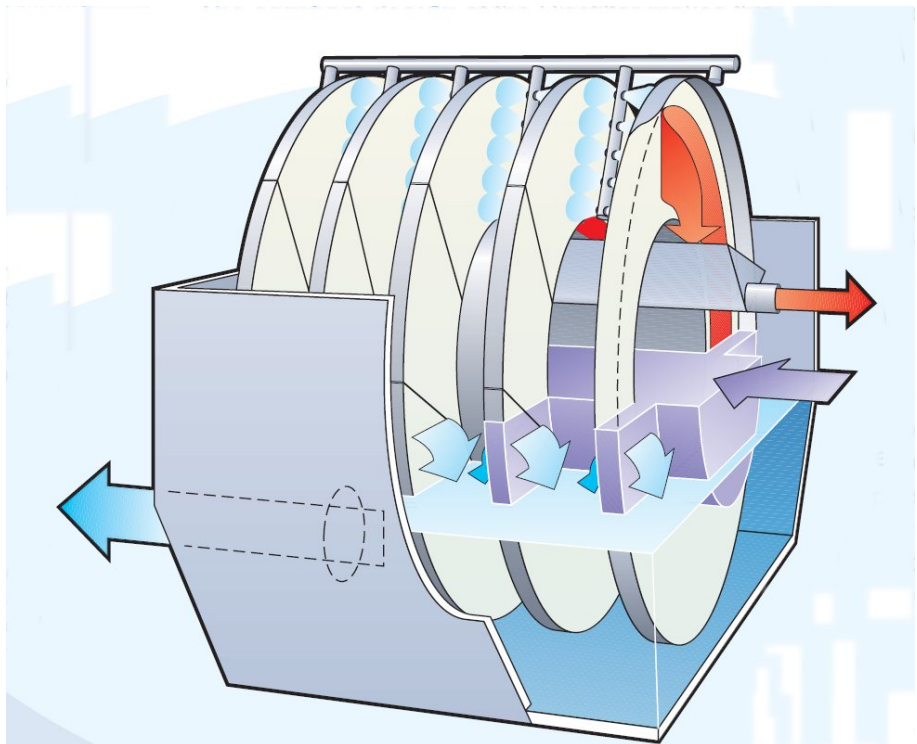
Frá skjásíum kemur skolvatn sem þarf að meðhöndla frekar til að hægt sé að safna seyrinni og uppfylla umhverfiskröfur. Það er hægt að gera með settjörnum eins og fyrr er lýst eða í þeim tilfellum sem vatnsmagn er mjög lítið, með því að nýta rotþró sem söfnunarbúnað fyrir seyrna.

Skolvatnið er vanalega á bilinu 0,2–1,5% af því vatni sem meðhöndlað er í skjásíunni. Virkni skjásía er fer eins og áður segir eftir gatastærð á dúk en af fræðilegum ástæðum er ekki hægt að ná mikið minni ögnum en sem nemur um 40 μm og er að jafnaði notaður dúkur með gatastærðir á bilinu 40-100 μm . Á þessu bili næst um 30-80% af TSS úr vatninu. Eftir því sem grugg er meira í innsteymi er virkni betri, það er, því skítugra sem vatnið er því hærra hlutfalli nær sían að hreinsa.

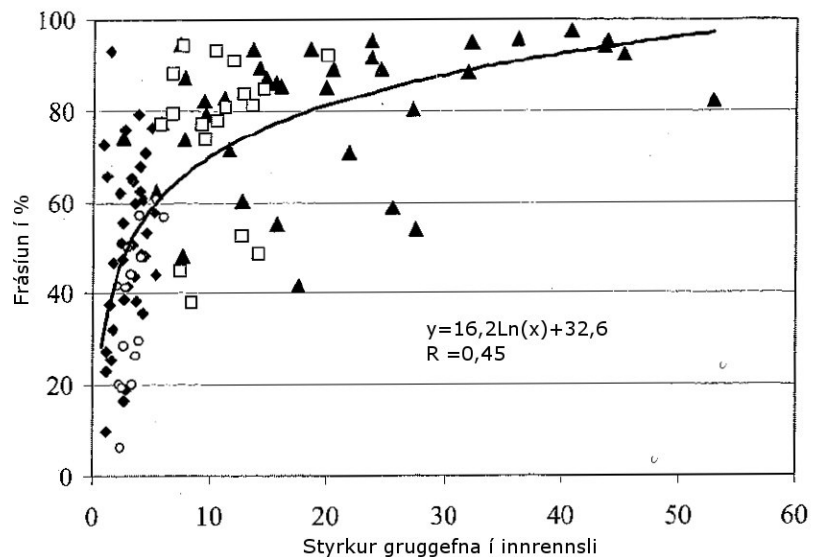
Steve Summerfelt hjá Freshwater Institue í BNA gerði at-hugun á virkni tromlusía [Summerfelt et al., 2001] og eru niður-



Mynd 3.3: Virkni tromlusíu skýrð. Myndin er fengin frá Hydrotech AB í Svíþjóð.



Mynd 3.4: Virkni diskasíu skýrð. Myndin er fengin frá Hydrotech AB í Svíþjóð.



Mynd 3.5: Mælingar á virkni síunar í tromlum sem fall af styrk gruggfna (TSS) í frárennsli (Frá Summerfelt 2001.)

stöður birtar á mynd 3.4.2. Eins og sjá má er virknin meiri eftir því sem gruggstykur er meiri í innstreymisvatni, og er alveg frá um 10% til 90%. Fundin var lógaritmisk kurfa sem nota má til að giska á virkni tromusía út frá þessum niðurstöðum og er jafna hennar:

$$TSS_{\text{síunarprósenta}} = 16 \ln(TSS_{\text{inn}}) + 33 \quad (3.6)$$

Minni gatastærð eykur hreinsigetu upp að vissu marki. Hinsvegar eru mörk á því hve mikið virkni eykst með minnkandi gatastærð. Svo virðist sem ekki gagnist að nota gatastærð undir 60 – 100 μm því komið er að mörkum aðferðar [Cripps, 1995, Kelly et al., 1996].

Heimildir

- [FIF, 1980] (1980). *Symposium on new developments in the utilization of heated effluent and recirculation systems for intensive aquaculture.*, 11th session Stavanger Norway May 28-30. EIFAC.
- [Alabaster and Lloyd, 1984] Alabaster, J. and Lloyd, R. (1984). *Water Quality Criteria For Freshwater Fish*. Butterworths, London, 2 edition.
- [Burkhalter and Kaya, 1977] Burkhalter, D. and Kaya, C. (1977). Effects of prolonged exposure ammonia on fertilized eggs and sac fry of rainbow trout (*salmon gaidneri*). *Trans. Am. Fish. Soc*, 106:470–475.
- [Burrows and Combs, 1964] Burrows, R. and Combs, B. (1964). Effects of accumulated excretory products on hatchery reared salmonids. Research report 66, U.S. Dept. of Interior. Bureau of Sport. Fisheries and Wildlife.
- [Chapman et al., 1987] Chapman, P., Popham, J., Griffin, J., and Michaelson, J. (1987). Differentiation of physical from chemical toxicity in solid waste fish bioassay. *Water Air and Soil Pollution*, 33:295–308.
- [Chen et al., 1994] Chen, S., Timmons, M., Bisogni, J., and D.J., A. (1994). Modeling surfactant removal in foam fractionation ii: Experimental investigations. *Aquacultural Engineering*, 13:121–138.
- [Chiba, 1980] Chiba, K. (1980). Present state of recirculation and flow through system and their problems in Japan. In *Symposium on New Developments in the Utilisation of Heated Effluents and Recirculation for Intensive Aquaculture*, page EIFAC/80/Symp:R/16., Stavanger Norway. EIFAC.

- [Colt and Bouck, 1984] Colt, J. and Bouck, G. (1984). Design of packed column for degassing. *Aquacultural Engineering*, 10:1–29.
- [Cripps, 1995] Cripps, S. (1995). Serial particle size fractionation and characterization of an aquacultural effluent. *Aquaculture*, 133:323–339.
- [EIFAC, 1970] EIFAC (1970). Waterquality criteria for european freshwaterfish. report on ammonia and inland fisheries. Technical papers 11, EIFAC.
- [Flis, 1968] Flis, J. (1968). Anatomico-histopathological changes induced in carp (*cyprinus carpio*) by ammonia water. *Acta Hydro.*, (10):205 – 238.
- [Haug and McCarty, 1972] Haug, R. and McCarty, P. (1972). Nitrification with submerged filters. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 44:2086.
- [Jobling,] Jobling, M. *Fiskens Fysiologi*, chapter 6.
- [Jobling, 1988] Jobling, M. (1988). A review of the physiological and nutritional energetics of cod *gadus morhua* with particular reference to growth under farmed conditions. *Aquaculture*, 70:1–19.
- [Jobling, 1994] Jobling, M. (1994). *Fish Bioenergetic*, volume Vol. XIV. Chapman & Hall, London.
- [Kelly et al., 1996] Kelly, L., Bergheim, A., and Stellwagen, J. (1996). Particle size distribution of wastes from freshwater fish farms. *Aquaculture International*, 5:65–87.
- [Knepper et al., 1989] Knepper, M., Packer, R., and Good, D. (1989). Ammonium transport in the kidney. *Physiol. Rev*, 69:179–249.
- [Lehtinen et al., 1998] Lehtinen, K. J., Mattsson, K., Tana, J., Grotell, C., and Engström, C. (1998). Effects on ecosystem structure and function of fish farming as simulated in littoral brackish water mesocosms. *Aquaculture*, 165:179–202.
- [Magor, 1988] Magor, B. (1988). Gill histopathology of juvenile *oncorhynchus kisutch* exposed to suspended wood debris. *Can. J. Zool*, pages 2164–2169.

- [Muir, 1982] Muir, J. (1982). *Recent Advantages in Aquaculture*, volume 1, chapter Recirculated systems in aquaculture, page 453p. Croom Helm and Westview Press, London.
- [Robertson, 1992] Robertson, W. (1992). Assessment of filtration and sedimentation systems for total phosphorus removal at the lake utopia fish culture station. Technical report, Canadian Fish Culture Operations, Aquaculture Division, Connors Bros., Limited, Blacks Harbor, New Brunswick, Canada.
- [Robinette, 1976] Robinette, H. (1976). Effect of selected sublethal levels of ammonia on growth of channel catfish (*ictalurus punctatus*). *Prog. Fish-Cult.*, 11:26–29.
- [Smith and Piper, 1975] Smith, C. and Piper, R. (1975). *Pathology of Fishes*, chapter Lesions associated with chronic exposure to ammonia, pages 497–514. University of Wisconsin Press. Madison.
- [Spotte, 1979] Spotte, S. (1979). *Fish and Invertebrate Culture*. Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons NY, NY.
- [Summerfelt,] Summerfelt, S.
- [Summerfelt et al., 2001] Summerfelt, S., Bebak-Williams, J., and Tsukuda, S. (2001). *Fish Hatchery Management*, chapter Controlled systems: Water Reuse and Recirculation, pages 285–395. American Fisheries Society, 2 edition.
- [Timmons and Losordo, 1990] Timmons, M. and Losordo, T. (1990). *Aquaculture water reuse systems: Engineering design and management.*, volume 27 of *Developments in Aquaculture and Fisheries Science*.
- [Timmons and Summerfelt, 1998] Timmons, M. and Summerfelt, S. (1998). Application of fluidized-sand biofilters to aquaculture. In *Proceedings Second International Conference on Recirculating Aquaculture*, pages 342–355. NRA-ES, Publication VA-1.
- [Warrer-Hansen,] Warrer-Hansen. *Report of the E1FAC Workshops on fish farming effluents*, volume Technical paper

no4, chapter Evaluation of matter discharged from trout farming in Denmark.

[Wilson et al., 1994] Wilson, R., Wright, P., Munger, S., and Wood, C. (1994). Ammonia excretion in freshwater rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and the importance of gill boundary layer acidification: lack of evidence for $\text{Na}^+/\text{NH}_4^+$ exchange. *J Exp Biol.*, 191:37–58.

[Wong and R.H., 2000] Wong, K. and R.H., P. (2000). Settling velocity characterization of aquacultural solids. *Aquacultural Engineering*, 21:233–246.

[Wood, 1997] Wood, M. (1997). Mechanisms of ammonia excretion across fish gills. *Comp. Biochem. Physiol.*, 118A:39–50.

[Wu, 1995] Wu, R. (1995). The environment impact of marine fish culture. towards sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31:159–166.