



STUÐULL
Verkfræði- og jarðfræðipjónusta

VIÐAUKI A

LOFTHÁÐ OG LOFTFIRRT NIÐURBROT LÍFRÆNNA EFNA

*Pýtt og endursagt úr:
„Biologisk behandling av hushållsavfall i slutna anläggningar i Europa - Huvudrapport. RVF Rapport 98:7“*

EFNISYFIRLIT

A	LÍFRÆNT NIÐURBROT EFNA.....	5
A.1	ALMENNT.....	5
A.1.1	Niðurbrot og hringrás efna	5
A.1.2	Örverur sem taka þátt í niðurbrotinu	5
A.1.3	Mismunandi stig niðurbrots	5
A.1.4	Mismunandi gerðir niðurbrots	5
A.1.5	Niðurbrotsefni (afurðir).....	6
A.1.6	Ummyndun kolefnis og köfnunarefnis	6
A.2	LOFTHÁÐ FERLI.....	8
A.2.1	Bakteríur.....	8
A.2.2	Sveppir.....	8
A.2.3	Hitastigsvirkni	8
A.2.4	Vinnsluaðstæður.....	8
A.3	LOFTFIRRT FERLI.....	11
A.3.1	Vatnsrof.....	11
A.3.2	Sýrumyndun.....	11
A.3.3	Metanmyndun	11
A.3.4	Hitastigsvirkni	12
A.3.5	Vinnsluaðstæður.....	12

A Lífrænt niðurbrot efna

A.1 Almenn

A.1.1 Niðurbrot og hringrás efna

Í náttúrulegri hringrás efnahvarfa eru orkuríkar, stórar lífrænar sameindir brotnar niður af örverum í einfaldari og orkuminni einingar og að síðustu í vatn og koltvísýrling. Hluti þeirrar orku sem losnar er notaður af örverunum sjálfum, en það sem eftir er losnar sem varmi. Við niðurbrotið minnkar bæði þyngd og rúmmál þess efnis sem brotnar niður. Þau efni sem verða til við niðurbrotið eru síðan notuð í náttúrunni við ljóstillífun til að búa til nýjan lífmassa. Koltvísýrlingur og vatn eru notuð af plöntum við ljóstillífun. Með ljóstillífun er koltvísýrlingi og vatni, umbreytt í orkuríkar kolefniseiningar eins og kolvetni, prótein, fitur o.fl. en súrefni losnar og berst út í andrúmsloftið.

Lífrænt efni sem myndast í jurtaríkinu er annað hvort notað beint eða óbeint sem orku- eða næringaruppspretta í dýraríkinu þar sem það brotnar smám saman niður aftur í einfaldari einingar og verður að næringu fyrir gróanda og hringrásin lokast þannig. Drifkraftur þessarar hringrásar er ljóstillífun og sólin er orkugjafinn.

Fyrir utan kolefni og súrefni eru önnur efni sem fara í svipaða hringrás, t.d. nitur, brennisteinn, fosfór, kalíum, magnesíum o.fl.

A.1.2 Örverur sem taka þátt í niðurbrotinu

Þær örverur sem taka þátt í ofanefndu niðurbrotsferli eru aðallega bakteríur og sveppir. Sundrun sameinda í einfaldari einingar gerist með hjálp lífhvata (ensíma) sem örverurnar sjálfar mynda. Afurðir sundrunarinnar eru venjulega vatnsleysanlegar og eru notaðar sem grunnefni við uppbyggingu nýrra frumna. Þekking á því hvernig hin flóknu örverufræðilegu niðurbrotsferli fara fram, þar sem fjöldi örvera hefur áhrif og grípa inn í efnaskipta hverrar annarar er mjög takmörkuð.

A.1.3 Mismunandi stig niðurbrots

Hið lífræna upphafsefni, úrgangurinn, er gerður úr ólíkum lífefnafræðilegum einingum með mismunandi niðurbrotseiginleika og eru misaðgengilegar fyrir örverurnar. Kolvetni eins og sykrur, sterkja, beðmi, hálfbeðmi („*bemicellulosa*“), pektín o.fl. efni brotna auðveldlega niður. Sama gildir um prótein og próteinafleiður. Fitur eru einnig auðveldar í niðurbroti en eru oft ekki aðgengilegar þar sem þær leysast ekki upp í vatni. Mörg kvoduefni og vöx brotna hægt og erfiðlega niður. Sama gildir um tréni (s. „*lignin*“) sem brotnar mjög hægt niður.

A.1.4 Mismunandi gerðir niðurbrots

Einn meginmunur niðurbrotsaðferða liggur í notkun og aðgengi súrefnis þ.e. loftháðra og loftfirrtra niðurbrotsaðferða. Loftháð efnaskipti í náttúrunni er venjulega kölluð morknun (s. „*förmulting*“) og í tæknilegu samhengi mylting (s. „*komposting*“). Loftfirrt efnaskipti eru venjulega kölluð fjölbreytt rotnun (s. „*omväxlande förruttelse*“), gerjun (s. „*jäsning*“, „*fermentering*“), eða lífræn gasmyndun (s. „*biologisk förgasning*“) og í tæknilegu samhengi oftast melting (*rotnun*). Bæði þessi ferli eru náttúruleg og koma fyrir sem

náttúruleg ferli. Talið er að u.þ.b. 90% af því kolefni sem er í hringrásarferli í náttúrunni fari gegnum loftháð niðurbrot og u.þ.b. 10 % með loftfirrtu.

Örverufræðilegur munur þessara aðferða liggur í að þær örverur sem taka þátt í niðurbrotinu tilheyra tveim mismunandi flokkum örvera. Loftháðar örverur nota súrefni úr loftinu í sín efnaskipti. Fyrir ákveðnar gerðir af loftfirtum örverum er súrefni hins vegar banvænt.

Loftháð niðurbrot með hjálp súrefnis er í raun lífrænt brennsluferli sem gerist við lágt hitastig. Við niðurbrotið verður til koltvísýrlingur, vatn, köfnunarefni, sulfat, fosfat o.fl. Þetta gerist við snögga hitastigsbreytingu. Þann varma sem myndast er hins vegar erfitt að nýta þar sem hitastigið verður ekki meira en 60 - 70 °C. Verði hitastigið hærra stöðvast niðurbrotið.

Loftfirt niðurbrot í súrefnislausu umhverfi gefur af sér metangas, koltvísýrling, vatnsgufu, ammoníak, brennisteinsvetni, sulföt o.fl. Niðurbrotið hefur í för með sér litlar breytingar á hitastigi. Varminn sem myndast er ekki nægjanlegur til að hitastigið nái kjörhitastigi fyrir þær bakteríur sem taka þátt í niðurbrotsferlinu (30 - 60 °C). Haugagasið sem myndast er hins vegar mjög orkuríkt þar sem það inniheldur venjulega um 50-70 % metangas. Sé þetta gas brennt losnar mun meiri orka en þarf til að hita efnið upp í kjörhitastig og er þá afgangsgasið notað til annarra hluta.

Við sorpförgun er auðvelt að nota lífrænt niðurbrot í formi myltingar eða meltunar við auðniðurbriótanleg efni eins og eldhúsúrgang, grænmetisafganga, garðaúrgang, sláturhúsaúrgang og seyru sem vegna rakainnihalds eru ekki hentug til annarar vinnslu.

A.1.5 Niðurbrotsefni (afurðir)

Loftháð og loftfirt niðurbrot í náttúrulegri hringrás leiðir fyrr eða síðar til fullkominnar ummyndunar efnisins. Niðurbrotshraðinn er að hluta háður samsetningu og uppbyggingu efnisins, en ræðst einnig af aðstæðum við niðurbrotið s.s. hitastigi, rakamagni, súrefnisaðgengi o.fl. Niðurbrot erfiðra efna eins og trénis getur tekið mörg ár í náttúrunni.

Þegar lífrænt niðurbrot er notað í tæknilegum lausnum, brotna auðveld efni niður en erfiðari efni verða eftir í formi fasts efnis sem líkist moldarefni (húmus-lífrænn hluti modar). Afgangsefnið sem verður eftir, við bæði loftháð og loftfirt niðurbrot, er aðallega gert úr tréni ásamt vaxtarefnum sem hafa myndast við niðurbrotið. Samsetning afgangsefnanna er þó mismunandi þar sem mismunandi örverur taka þátt í niðurbrotinu. Við vel þróaða loftháða vinnslu verður eftir nokkuð stöðugt moldarefni (húmus). Við loftfirta verða hins vegar eftir minna niðurbrotin efni. Þetta er vegna þess að loftfirtar örverur geta ekki brotið niður öll þau efni sem loftháðar örverur ráða við. T.d. ráða loftfirtar örverur illa við tréni.

Sé lofti hleypt að afgangsefni úr loftfirtri vinnslu verður hins vegar mjög hratt niðurbrot og hitastigið vex mjög hratt.

A.1.6 Ummyndun kolefnis og köfnunarefnis

Við loftháða vinnslu flokkaðs lífræns heimilísúrgangs, sem venjulega gerist með því að kolefnisríkum efnum er blandað saman við úrganginn, brotnar mestur hluti kolefnisins (50-70% af þyngd) niður og losnar sem koltvísýrlingur, en afgangurinn verður eftir í efninu. Af því kolefni sem eftir verður, þá er um helmingur óniðurbriótanlegt lífrænt efni

og hinn hlutinn sem nýmyndað frumuefni. Nýmyndun frumuefnis eru um 10 sinnum meiri við loftháða vinnslu en við loftfirtra.

Mestur hlutinn af köfnunarefninu er enn í afgangsefninu, en minni hlutinn (5 -20%) losnar í formi ammóníaks. Af köfnunarefninu í afganginum er meiri hlutinn (> 90%) bundið nitur í efni sem ekki brotnar niður og sem nýmyndað frumuefni en lítill hluti er laust, ólífrænt vatnleysanlegt nitur, aðalega í formi nítrats og að litlum hluta ammóníak.

Við loftfirtra vinnslu lífræns heimilisúrgangs losnar mesti hluti kolefnisins (ca 70%) sem haugagas (metan og koltvísýrlingur) en minni hlutinn (ca 30%) er enn í afgangsefninu.

Af kolefninu í afgangsefninu er u.þ.b. tveir þriðju hlutar bundnir í efni sem ekki brotnar niður en afgangurinn er í formi nýmyndaðs frumuefnis.

Nánast allt nitur er enn í afgangsefninu (fyrir þurrkun efnisins). U.þ.b. helmingur er bundið nitur í lífrænu efni sem ekki brotnar niður og nýmynduðu frumuefni og hinn helmingurinn er laust ammóníak í vatnsfasa.

Við notkun afgangsefna úr loftfirtri og loftháðri vinnslu sem jarðvegsbætis losna kolefni og nitur smám saman með hjálp örvera og þjóna sem langtíma uppspretta kolefnis og niturs fyrir gróður.

Gróður getur nýtt laust nitur í formi ammóníaks í afgangsefni beint. Í jarðvegi með góðan aðgang að súrefni oxast ammóníak með hjálp baktería, fyrst í nítrít en síðan í nítrat. Þessi umbreyting köfnunarefnis (s. „*nitrifíkation*“) hefur lykil hlutverki að gegna í vistfræði þar sem nitur á þann hátt breytist úr frekar óhreyfanlegri jón, ammóníaki, í meira hreyfanlegri jón, nítrat, sem berst frekar með vatni. (Ekki má rugla umbreytingu köfnunarefnis „*nitrifíkation*“ við „*denitrifíkation*“ sem er bakteríuferli þar sem nítrati er breytt í niturgas við súrefnissskort).

Nitur í formi ammóníaks sem losnar í andrúmsloftið við loftháða vinnslu oxast í niturform eins og t.d. saltpéturssýru og getur þannig aukið hættu á súru regni. Til að koma í veg fyrir þetta er venjulega frálofti frá slíkri vinnslu safnað saman og það sett í gegnum svokallaða lífræna síu. Lífræn sía inniheldur kolefnisríkt efni sem bindur nitrið með umbreytingu köfnunarefnis (s. „*nitrifíkation*“) og uppbyggingu frumuefnis á sama hátt og við myltingu. (Lífræn sía losar einnig fráloftið við lyktarefni sem er venjulega höfuð ástæðan fyrir því að settar eru upp slíkar síur).

A.2 Loftháð ferli

Örverur sem starfa við loftháðar aðstæður eru að mestum hluta bakteríur og sveppir. Eitt gramm af myltingarefni inniheldur fleiri milljarða af örverum. Lífrænn úrgangur inniheldur að öllu jöfnu nægjanlegt magn örvera þannig að ekki þarf að blanda slíkum örverum saman við. Örverurnar eru ekki allar virkar á sama tíma heldur starfa þegar aðstæður eru réttar og henta þeirra lífsskilyrðum

A.2.1 Bakteríur

Í eldri fagritum er álitid að bakteríur sjái um 80-90% af niðurbrotsferlinu. Bakteríurnar vaxa hraðast, en geta eingöngu lifað í vatnsfilmu sem umlykur agnir í efninu. Hluti lifir mest á smáum lífrænum og aðgengilegum sameindum, s.s sykrum, próteinum og lífrænum sýrum. Sumar geta myndað dvalargró og lifa af upphitun og þornun án þess þó að vera virkar allan tímann. Bakteríur eru einu örverurnar sem eru virkar allt ferlið.

Ígulgerlar („*Aktinomyces*“) er stór hópur af jarðvegsbakteríum sem vaxa á svipaðan hátt og sveppir með því að mynda þal (mýsli, s. „*mycel*“) og líkjast þannig sveppum og eru oft kallaðar geislasveppir (s. „*strálsvampar*“) (þal er samheiti á greinóttu kerfi sveppaþráða, þaðan sem brumknappar vaxa). Á yfirborði afgangsefnisins er þetta oft sem gráhvít slykja og lyktar eins og mold. Ígulgerlar geta vaxið í þurrara umhverfi en aðrar bakteríur en þá er vaxtarhraðinn minni. Þessi gerð baktería á auðveldara með að brjóta niður efni sem brotna ekki auðveldlega niður eins og t.d. hálfbeðmi.

A.2.2 Sveppir

Sveppir geta lifað á svo til hvaða gerð kolefnis sem er og þurfa ekki mikið af köfnunarefni og fosfór. Þessi eiginleiki gefur þeim ákveðið forskot í næringarsnaudu umhverfi. Í afgangsefninu koma fyrir margar gerðir af sveppum, t.d. gersveppir, myglusveppir og stórsveppir eins og ullarblekill (s. „*bläcksvamp*“). Sveppirnir eru þær örverur sem best þola þurrk. Þegar þelið vex, flyst frumefnið frameftir sveppaþráðunum og eftir verður einungis tóm tómt rör. Á þennan hátt flytjast sveppirnir um hráefnið. Sveppir hætta að starfa við hitastig milli 55-60 °C, en geta lifað sem spor. Ein gerð af sveppum, s.k. stórsveppir, lifa á illniðurbriótanlegum einingum eins og tréni en niðurbrotsferlið er mjög hægvirkt.

A.2.3 Hitastigsvirkni

Lífhvatakerfi örveranna verkar venjulega á ákveðnu hitastigsbili, oftast á um 30 °C bili milli hæsta og lægsta hitastigs sem þær þola. Svokallaðar kuldakærar (s. „*psykrofila*“) örverur virka á bilinu 0 - 25 °C, millihitakærar (s. „*mesofila*“) örverur á bilinu 15-45 °C og hitakærar (s. „*termofila*“) örverur á bilinu 35 -70 °C.

A.2.4 Vinnsluáðstæður

Þeir þættir sem hafa hvað mesta þýðingu fyrir virkni örveranna við loftháð niðurbrot er hlutfall næringarefna, þ.e.a.s. aðgengi að kolefni, köfnunarefni, næringarsöltum og sýrum, og einnig efna- og eðlisfræðilegir þættir s.s. vatnsmagn, bygging, holrúmmál, súrefnisaðgengi, blöndun, hlutfall kolefnis og niturs, sýrustig og þróun hitastigs. Þessir þættir ákvarða hve öflugt ferlið er og þroska þess efnis sem verður til við vinnsluna.

Vatnsinnihald þarf að vera milli 40 -50 % af þyngd. Ef vatnsinnihaldið fellur niður í 30 - 35 % minnkar virkni örveranna og stöðvast alveg við um 20% vatnsinnihald. Þetta

helgast af því að efnaskipti bakteríanna byggja undantekningalaust á vatnsuppleysanlegum efnum sem geta smogið um frumuveggina. Til að bakteríurnar séu umluktar vatnsfilmu við niðurbrotsferlið á hlutfallslegur raki í efninu að vera um 95%.

Ef vatnsmagnið nær 60% eða meiru minnkar örveru virkni vegna þessa að súrefnisaðgengi minkar. Holrúm í efninu fyllast af vatni og hætta er á að ferlið færast yfir í loftfirrtar aðstæður.

Við alla loftháða vinnslu losnar vatn í formi vatnsgufu m.a. vegna þess að varmaskipti hækka hitastigið. Þó svo vatn geti myndast við sjálft ferlið þarf venjulega að vökva efnið.

Bygging efnisins hefur áhrif á vinnsluna á fleiri en einn hátt. Mikil sundrun efnisins er æskileg því þá fá örverurnar stærra flatarmál að vinna á. Hins vegar verður aðgengi að súrefni erfiðara eftir því sem efnið er finna þar sem efnið þakast þá meira og hleypir ekki í gegnum sig jafn miklu af súrefni.

Holrými á að vera um 25 - 35 %. Meira holrými vinnur á móti eiginleikum efnisins til að halda í sér vatni og minna holrými veldur minna aðgengi að súrefni. Byggingarform efnisins breytist einnig í takt við líffræðilegt niðurbrot efnanna. Sé holrými of lítið má blanda efnið með stoðefnum eins og t.d. trjáflís.

Súrefnisaðgengi er m.a. háð vatnsmagni, byggingu og sérstaklega holrými þar sem súrefnisupptakan fer sjálvvirkt fram í náttúrulegum ferlum. Við vinnslu er hægt að auka súrefnisflæðið með því að blása lofti um efnið. Hvort sem er má soga loft gegnum efnið eða blása því um efnið.

Blöndun (s. „*agitering*“) efnisins léttir undir með ferlinu og viðheldur súrefnisaðgengi byggingu, holrúmmáli og einsleitni efnisins.

Hlutfall kolefnis og niturs (C/N) á að liggja milli 20-30 þ.e.a.s. magn kolefnis á að vera 20 - 30 sinnum meira en niturs. Örverur þurfa ákveðið magn niturs til að umbreyta kolefni. Við hærri hlutfall C/N minnkar virknin. Við lægra C/N hlutfall losnar nitur í formi ammóníaks. C/N hlutfallið á forflokkuðum lífrænum heimilísúrgangi liggur milli 15 og 20. Með því að blanda kolefnisríkum stoðefnum saman við (trjáflís, borkur, torf, sagspænil, pappír) má breyta hlutfallinu á sama hátt og hægt er að hafa áhrif á vatnsmagn og byggingarform. Hins vegar er þetta hlutfall ekki einhlýtur mælikvarði þar sem kolefni og nitur getur verið meira eða minna aðgengilegt í efninu.

Sýrustig (pH gildi) á að vera um 7 til að efnaskipti örveranna sé nýtt sem best.

Hitastigsþróun er sá þáttur sem mest einkennir loftháð niðurbrot. Varminn sem myndast í loftháðri vinnslu veldur því að hitastig efnisins hækkar og sá varmi leitar út í umhverfið fyrst og fremst í formi vatnsgufu.

Hitastigshækkun er mest í byrjun ferlisins þegar örverurnar brjóta niður auðveld efni. Á fyrstu dögum ferlisins vex hitastigið og nær 40 - 45 °C á nokkrum dögum. Á þessu tímabili eru millihitakærar bakteríur og s.k. sykursveppi virkastar.

Á hinu millihitakæra stigi vinnslunnar vaxa hitakærar bakteríur og þegar millihitakærar bakteríur hætta að verka taka hinar hitakæru við og hitastigið vex upp í 55-60 °C og jafnvel hærri. Við hæsta hitastigið eru það aðallega grómyndandi bakteríur og ígulgerlar sem sjá um niðurbrotið. Við vinnslu úrgangs er æskilegt að hitastigið nái 60 °C og haldist þar í nokkra daga, því þá drepast sjúkdómavaldandi (s. „*patogener*,,) bakteríur sem gætu verið í úrganginum.

Þegar aðgengilegt efni og orka minnka fellur hitastigið og síðari hluti ferlisins hefst. Þá eru eftir torrniðurbriótanleg efni og örverurnar eru að mestu leiti sveppir sem geta brotið niður lignín. Breytingin er mjög hæg-virk borið saman við fyrri hluta ferlisins.

Við vinnslu á lífrænum úrgangi frá heimilum er venjulega skilið á milli fyrsta hluta vinnslunnar svokallað (e. „*primary composting*“) og hins vegar eftirvinnsla (e. „*secondary composting or curing composting*“.)

Fyrsti hluti vinnslunnar er sá hluti sem er öflugastur og setur mestar kröfur á vinnsluferlið. Þá brotna niður á frekar stuttum tíma (nokkrir dagar til nokkrar vikur) þau efni sem léttast brotna niður með kröftugri varmamyndun, súrefnisnotkun og losun vatnsgufu. Það er einnig í þessum hluta sem mest hætta er á vandamálum vegna lyktar, sigvatns og í vinnuumhverfi starfsmanna. Seinni hlutinn, eftirvinnslan, þegar torrniðurbriótanleg efni brotna niður tekur lengri tíma (frá nokkrum vikum til nokkurra mánaða) en er einfaldari í framkvæmd. Varmamyndun er minni og hitastigið minnkar smám saman. Þar sem lofti er blásið um efnið stjórnað hitastigið af breytingum í loftmagninu.

Þroski (s. „*mognadsgrad*“) er mat á hve langt niðurbrotsferlið hefur náð. Lítil þroski bendir til þess að einungis efni sem brotna auðveldlega hafa náð að brotna niður. Mikill þroski bendir hins vegar til að niðurbrotið hafi nánast stoppað og að efnið hafi breyst í nokkuð stöðugt moldarefni. Þroskamæling er nokkurs konar mat á gæðum og notkunarmöguleikum efnisins. Hægt er m.a. að meta þroskan út frá hitastigi. Hátt hitastig bendir til lítils þroska en lágt hitastig bendir til mikils þroska.

Jarðvegsbætir með lítinn þroska (e. „*raw compost*“) er hægt að nota sem áburð eða jarðbætiefni á akra (eða til uppgræðslu, innskot þýðanda). Vel þroskaðan jarðvegsbætir (e. „*cured compost*“) má nota við gerð ræktarlands (e. „*odlingsjord*“) sem áburðarefni við gróðursetningu (eða græn svæði í þéttbýli, innskot þýðanda) o.s.frv.

A.3 Loftfirrt ferli

Þær bakteríur sem brjóta niður lífræn efni við loftfirrt skilyrði tilheyra mismunandi bakteríuhópum og sem eru misvirkar á mismunandi stigum vinnslunnar. Lífrænn úrgangur inniheldur venjulega þær bakteríur sem þarf við loftfirrt niðurbrot. Til að ná hröðu niðurbroti þarf þó ákveðið magn þessara baktería, sérstaklega þeirra sem framleiða metan. Því er venjulega blandað saman við efnið tilbúnu efni úr vinnslunni með ágræðslu (s. „*ymþning*“). Önnur aðferð er að nota fast burðarefni þar sem bakteríur eru í klösum og eru í snertingu við efnið.

Hinu loftfirta niðurbroti er venjulega skipt upp í þrjú stig, *vatnsrof*, *sýrumyndun* og *metanmyndun*. Í sumum vinnsluferlum eru þessi stig aðskilin, venjulega þannig að vatnsrof og sýrumyndun gerist í einu og sama hólfinu en metanmyndunin gerist á öðrum aðskildum stað. Þá er venjulega talað um tveggja þrepa vinnslu. Ef þessi stig gerast að auki í mismunandi fösum, vatnsrof og sýrumyndun í sviflausn (“*suspension*”) og metanmyndun í vatnsfasa er talað um tveggja fasa vinnslu.

A.3.1 Vatnsrof

Fyrsta þrepið í þessu ferli er vatnsrof þar sem óvatnsleysanlegar og torleysanlegar smáar sameindir s.s. kolvetni, fitur, prótein ofl. brotna niður við upptöku vatns (s. „*hydrolysis*“) í minni einingar s.s. sykrur, fitusýrur, ammínósýrur o.s.frv. Svokallaðar vatnsrofs bakteríur sjá um þetta þrep vinnslunnar með hjálp lífhvata sem þær sjálfar framleiða.

Ef lífræna efnið inniheldur mikið af óuppleystu beðmi, t.d. í formi vaxtaefna getur vatnsrofið verið sá þáttur vinnslunnar sem er hamlandi, þar sem tréni umlykur beðmið og veldur því að bakteríurnar eiga erfitt með að komast að efninu. Tréni verður nánast ekki fyrir neinum áhrifum við loftfirrt ferli.

A.3.2 Sýrumyndun

Í öðru þrepi vinnslunnar brotna hinar litlu sameindir sem urðu til í fyrsta þrepinu (vatnsrofinu) niður í einfaldari einingar s.s. alkohól, aldehyð, fitusýrur, mjólkursýrur, koltvísýrling, vetnigass, ammoníak o.fl. Þetta gerist með hjálp sýrumyndandi baktería (s. „*acidogena*“). Fitusýrur brotna niður í ediksýru með hjálp sýrumyndandi eða edikmyndandi baktería. Þetta ferli hægist ef þrýstingur vetnigass verður of mikill ($>10^{-4}$ atm), en það gerist venjulega ekki þar sem vetnigasið ummyndast í síðasta þrepi vinnslunnar, metanmynduninni.

A.3.3 Metanmyndun

Í þriðja þrepinu er ediksýru, vetnigasi og koltvísýrlingi breytt í vatn og svokallað haugagas (s. „*biogas*“) sem er að mestum hluta samsett úr metani og koltvísýrlingi en getur einnig innihaldið önnur gös eins og brennisteinsvetni, vetni, niturgas o.fl. Í sumum ferlum myndast vatn en í öðrum er vatn tekið upp í ferlinu. Ferlið stjórnast af bakteríum sem eingöngu geta unnið við loftfirtar aðstæður og kallast metanmyndandi bakteríur eða fornbakteríur (s. „*anaerob*“). Metanmyndandi bakteríur geta í höfuðatriðum unnið á tvo vegu. Svo kallaðar sýrukærar (s. „*acetotrofa*“) metanmyndandi bakteríur kljúfa ediksýru í metan og koltvísýrling. Svokallaðar vatnskærar (s. „*hydrogenotrofa*“) metanmyndandi bakteríur breyta vetnigasi og koltvísýrlingi í metan og vatn. Margar vatnskærar metanmyndandi bakteríur geta umbreytt öðrum kolefnissamböndum eins og metanóli og maurasýru.

Metanmyndandi bakteríur hafa langan líftíma/kynslóðatíma (s. „*generationstider*“) og lágan vaxtarhraða, geta bara breytt ákveðnum efnum og eru viðkvæmar fyrir breytingum í nánasta umhverfi eins og t.d. pH gildi sem á að liggja milli 7 og 8. Ef t.d. of mikið er af létt niðurbrotanlegum efnum geta fyrsta og annað þrepið tekið langtum styttri tíma en metanmyndunin í þriðja þrepi vinslunnar. Þá safnast upp hinar lífrænu sýrur, pH gildið fellur og metanmyndunin stoppar. Slíkt er kallað að ferlið hafi súrnað og við því þarf að bregðast t.d. með því að blanda við efnið alkaliefnum eða hægja á tilfærslu hráefna.

Hinar metanmyndandi bakteríur geta einungis verkað við algjörlega súrefnissnautt umhverfi, þ.e. ekkert súrefni má komast að efninu. Aðrar bakteríur þola súrefni og nota það við sín efnaskipti, kallaðar skilyrðisbundnar bakteríur („*fakulativar*“). Þessar bakteríur nota súrefnið sem kemur með efninu inn í ferlið þar til loftfirrtum aðstæðum er náð. Komist súrefni að efninu hægist meira á metanmynduninni en vatnsrofinu og sýrumynduninni og ferlið getur súrnað.

Einn eiginleiki baktería er að þær festa sig við og búa til klasa á föstum hlutum, t.d. á unnu efni eða óvirku efni. Hægt er að nota þennan eiginleika við tveggja fasa vinnslu með því að metanmyndunin gerist sér í turni eða sívalningi sem útbúin er með yfirborðstruflandi (s. „*ytjörstörandé*“) óvirku efni s.k. loftfirrti síu (s. „*anaerobfilter*“).

Vegna þess hve metanmyndandi bakteríur vaxa hægt getur tekið langan tíma að fá í gang ferlið hafið það á annað borð verið truflað. Metanmyndunin er venjulega sá þáttur sem er hamlandi í ferlinu. Því er reynt að besta ferlið með réttu sýrustigi, hitastigi, næringarefnum o.s.frv.

A.3.4 Hitastigsvirkni

Metanmyndandi bakteríur eru viðkvæmari (s. „*termolabilá*“) fyrir hitastigi en aðrar loftfirrtar bakteríur. Eins og við loftháð ferli er skilið á milli millihitakærra baktería sem hafa kjörhitastig 30-40 °C og hitakærra baktería sem hafa kjörhitastig 50-60 °C. Millihitakærar bakteríur eru algengari og fjölbreyttari en hitakærar bakteríur og eru því ekki jafn viðkvæmar fyrir truflunum. Hitakær metanmyndun gerist hins vegar langtum hraðar en millihitakær.

A.3.5 Vinnsluáðstæður

Þeir þættir sem mest áhrif hafa á virkni baktería við loftfirrt niðurbrotsferli eru t.d. súrefnisaðgengi, sýrustig, hitastig og blöndun. Hér á eftir er upptalning á nokkrum þeirra þátta sem skipta máli, svipað og gert var við loftháð ferli.

Vatnsmagn er ekki jafn mikilvægt og við loftháð ferli, en getur verið langtum meira, venjulega milli 60-95 % af þyngd. Hluti vatnsins losnar sem vatnsgufa með haugagasinu en er samt langtum minna en það sem losnar við loftháð ferli. Afgangsefnið inniheldur því mikið vatn að loknu niðurbrotsferli (með mikið af uppleystum efnum og næringarefnum) sem verður að sjá um eða nota á einhvern hátt.

Bygging og bolrymi hafa nánast enga þýðingu í loftfirrtu ferli. Hægt er að vinna blautt, þétt efni án þess að til þurfi að koma stöðefni. Viðarefni eru hins vegar ekki hentug fyrir loftfirrtu vinnslu því þau innihalda mikið af tréni.

Súrefnissnauð er nauðsynlegt loftfirrtum ferlum, sérstaklega ef metanmyndandi bakteríur eiga að lifa af. Því verður að byggja öll mannvirki þannig að súrefni komist ekki að efninu.

Blöndun efnisins við vinnsluna flýtir ferlinu, að hluta til við að ný yfirborð myndast milli örvera og efnis og að hluta til vegna þess að haugagas á auðveldara með að losna. Hægt er að framkvæma þessa blöndun á mismunandi hátt t.d. með því að hræra, hringdælinga, eða blása haugagasi í gegnum efnið o.s.frv. Þar sem metanmyndandi bakteríur eru viðkvæmar fyrir vélrænni truflun verður slíkt að gerast með gát.

Hlutfall kolefnis og niturs (C/N) hefur ekki sömu þýðingu við loftfirrt skilyrði eins og við loftháð og getur verið á mjög breiðu bili. Hátt gildi, um 30, er betra fyrir efnaskipti bakteríanna. Við lágt gildi, 10-15, getur magnið af ammóníaki hamlað frumuvexti og eitrad ferlið. Hitakær ferli eru viðkvæmari fyrir þessu en hálfhitakær. Til að veða á móti þessu er oft blandað við efnið áburði (s. „*göðset*“) sem með útþynningu minnkar magnið af ammóníaki. Eins og við loftháð ferli er C/N hlutfallið ekki einhlýtur mælikvarði þar sem kolefnið og nitrið er misaðgengilegt fyrir bakteríurnar.

Sýrustig sem hámarkar vatnsrof og sýrumyndun liggur venjulega á bilinu pH 5-7, en metanmyndun á bilinu 7-8. Ef allt ferlið gerist í sama umhverfi, þ.e.a.s. eins þrepa vinnsla, á sýrustigið að vera lítilllega basískt þar sem metanmyndunarstigið er venjulega hægvir kara og viðkvæmara fyrir breytingum í pH gildi en vatnsrof og sýrumyndun. Ef ferlið gerist í fleiri en einu þrepi er hægt að ná hagstæðustu sýrustigi fyrir hvert þrep.

Hitastigið á annað hvort að vera um 35 °C fyrir millihitakæra vinnslu eða um 55 °C við hitakæra vinnslu. Þar sem varmamyndun er mjög lítil miðað við loftháð ferli verður að færa varma inn í ferlið til að bestu hitastigi sé náð. Við millihitakæra vinnslu næst ekki að drepa sjúkdóms valdandi bakteríur sem gætu verið í úrganginum (s. „*hygenisering*“). Það næst hins vegar við hitakæra vinnslu, ef hitastiginu er haldið við 55 °C í ákveðin tíma (8 tíma skv. dönskum reglum).

Þroski efnisins við loftfirrt vinnslu er lægri en við loftháða (aðalvinnsla + eftirvinnsla). Þetta byggir m.a. á því að hinar loftfirrtu bakteríur ná ekki að brjóta niður jafn vel lífrænt efni eins og t.d. tréni. Hægt er að nota hinn vatnsríka jarðvegsbæti sem áburðar og jarðbætiefni á akra eða dreifa því sem votseyru eða sem föstu efni eftir þurrkun. Ef nota á efnið á ræktað land verður að eftirvinna efnið.