

1 LEVERANCE TIL DET BIOBASEREDE SAMFUND. KVALITETSMÆSSIGE ÆNDRINGER UNDER LAGRING AF AFGRØDER MED FOKUS PÅ LAGERTAB OG EMISSIONER FRA VÅD BIOMASSE.....	1
1.1 TAB AF BIOMASSE UNDER HØST OG LAGRING	2
TAB UNDER HØST OG TRANSPORT.....	2
ENSILERING ER VELEGNET TIL LAGRING AF VÅD BIOMASSE	2
1.2 EMISSIONER UNDER LAGRING AF VÅD BIOMASSE	5

1 LEVERANCE TIL DET BIOBASEREDE SAMFUND. KVALITETSMÆSSIGE ÆNDRINGER UNDER LAGRING AF AFGRØDER MED FOKUS PÅ LAGERTAB OG EMISSIONER FRA VÅD BIOMASSE

Interessen for biogasproduktion og bioraffinering har været stigende særligt det sidste årti. Biogassektoren har været under massiv udbygning og er i øjeblikket den eneste fulde etablerede teknologi, der både kan producere varme, strøm, gas og gødningsprodukter. Gassen kan tilmed lagres, hvilket er den store udfordring for konkurrerende teknologier. Ved udbygningen af biogassektoren er der blevet større konkurrence om den tilgængelige biomasse og optimering af den anaerobe proces for at øge gasudbyttet. Men optimering ligger ikke kun i selve den anaerobe proces, optimering af systemerne før og efter den anaerobe proces vil også kunne øge det økonomiske udbytte fra bioforgasningen og kvaliteten af råvarerne til bioraffineringen.

Tab af biomasse under høst og lagring af biomasse sænker det faktiske biomasseudbytte ved porten til et bioraffineringsanlæg eller et biogasanlæg i forhold til det høstede udbytte på marken. Tabet øger både de miljømæssige og økonomiske udgifter ved anskaffelse af biomassen. En vurdering af tabet gør det lettere at forudsige, hvor meget biomasse der er til rådighed for anlægget, når anlægget er klar til at anvende og omsætte biomassen.

For at vurdere omfanget af tabet skal erfaringerne fra landbrugets lagring af foder inddrages. Dog med det forbehold at for nogle former for bioraffinering/bioenergiproduktion kan den rette form for nedbrydning lette den senere anvendelse af biomassen. Dette ses eksempelvis ved ensilering af våd biomasse til biogasproduktionen. Her tabes der totalt set tørstof under ensileringen, men energiudbyttet per vægtenhed og omsætningshastigheden i anlægget øges.

Den potentielt største risiko for tab skyldes mikrobiel nedbrydning eller spontan forbrænding. Derfor bør afgrøderne enten tørres til en fugtighed på under 20% (hvis de lagres tørt) eller til en fugtighed på 50-75%, hvis det lagres anaerobt som ensilage.

Valg af den rette høstmaskine og høstteknik er i reglen det første trin til at undgå tab af biomasse under lagringen. Skal græsset anvendes tørt og presses i baller, er det en fordel, hvis høstmaskinen tromler og bryder stråene, så fugtigheden lettere kan trænge ud af strået, når det tørres på marken de følgende dage. En kombination af tilstrækkelig indstråling og temperatur kombineret med spredning og sammenrivning af græsset sikrer, at græsset hurtigst muligt tørrer, så mikrobiel nedbrydning undgås. Hvis græsset derimod skal lagres fugtigt som ensilage, er det vigtigt, at græsset finsnittes, så græssaften er mere tilgængelig for

mikroorganismene. Efter finsnitningen skal græsset hurtigst muligt ensileres, så der skabes iltfrie forhold, og den mikrobielle nedbrydning af græsset standses netop, når græsensilagen har den højst mulige værdi. Endelig, hvis værdien ligger i græssets saft, er det nødvendigt, at græsset høstes så skånsomt som muligt og straks transporteres til en skruepresse, der kan separere saften fra pressekagen. Dernæst skal saften konserveres eller viderebehandles. I BioValue Spir projektet hvor der udtrækkes protein fra græssaften, skal græsset viderebehandles indenfor omtrent 6 timer for at undgå at proteinerne denatureres. Det er derfor nødvendigt at kende til den videre anvendelse af græsset, før den rette høst- og lagringsteknik kan bestemmes, og for at lagringstabet kan estimeres.

1.1 Tab af biomasse under høst og lagring

Tab under høst og transport

Allerede under høsten af biomassen sker der et tab. Skærebordet skal have en vis højde over jorden for at undgå jord i biomassen, roer aftoppes ligeledes for at undgå jord i biomassen, og tørt græs risikerer et væsentligt bladtab under håndteringen.

For tør biomasse vil marktabet også være vejrafhængigt, da byger kan udvaske næringsstoffer og øge respirationen fra biomassen. Halm til afbrænding kan derimod have en fordel ved at blive udvasket med cirka 50 mm regn efter mejetærskningen, da regnen udvasker kalium og dermed forbedrer forbrændingen af halmen (Videncenter for halm).

Rødder, stubbe og fragmenteret biomasse nedpløjes i jorden og tildeler jorden næringsstoffer og humus. Høstteknik, maskineri og vejrf forhold kan derfor have en indflydelse på, hvor meget biomasse der videreføres fra marken, om end noget af marktabet kan tilbageføres til jorden. Høst af biomasse til ensilage fremfor høst som tør biomasse kan reducere marktabet, i det al biomassen høstes ved en gennemkørsel af marken, og tabet ved spredning og samling af biomassen undgås. Endelig vil der være et mindre tab, da våd biomasse taber mindre ved håndteringen end tør, sprød biomasse.

Det største tab ved håndtering af tør biomasse sker grundet dårlig presning eller mangelfuld indpakning af ballerne. Under transport er tør biomasse mere udsat for tab, idet vådt, tungt og mere sammenpresset materiale er mindre udsat for transporttab end let og tørt materiale. For våd biomasse øges håndteringstabet, jo mere iltet biomassen bliver. Derfor vil håndteringstabet være størst hvis biomassen er løst pakket, hvis den omlæsses, eller hvis der rodes op i biomassen.

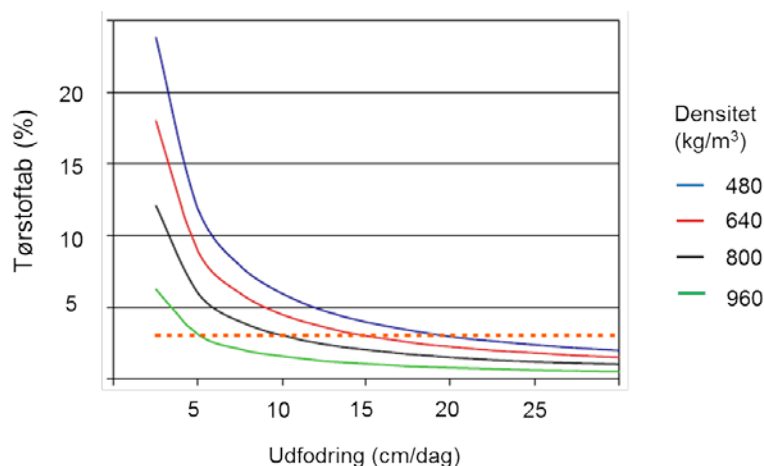
Ensilering er velegnet til lagring af våd biomasse

Ensilering er meget velegnet til langtidslagring af energiafgrøder. Under ensileringen dannes der fermenteringsprodukter, således at den færdigensilerede biomasse opnår et højere metanudbytte per ton biomasse. Ensilerings teknikker til at opnå en perfekt ensilage til fodring af dyr er velbeskrevet. Der er dog forskelle mellem ensilering af foder, hvor fokus er fordøjelighed af organisk stof, proteinkvalitet, tørstofindtag og ædelyst, mens fokus for biogasproduktion er tilgængeligheden af kulstof til metanproduktion eller bioraffinering, hvor proteiner eller kulstof skal bevares i en bestemt kvalitet for at kunne anvendes videre.

Når biomassen skal ensileres, lagres den fugtigt. Så længe der er ilt tilstede, er der basis for en meget hurtig nedbrydning af biomassen med tab til følge. Biomassen skal derfor hurtigst muligt efter snitning køres sammen i en stak og komprimeres for at undgå tab. Det er dog vist at pakning 3 timer efter høst (ofte svarende til den tid det tager at transportere og pakke biomassen) giver mindre proteolyse og mindre tørstofstab, end hvis stakken pakkes umiddelbart efter snitning [1]. Hvis stakken først pakkes 10 timer eller mere efter høsten, er der stor risiko for tørstofstab, proteolyse og pH-stigning (refereret i [1]).

Når biomassen gennemgår en ensilering, går den gennem et helt klassisk forløb, hvor iltten først forbruges, og pH dernæst falder. Når iltten er forbrugt, og pH er faldet til omkring 4, vil de forskellige mikrobielle processer gå næsten i stå, og lagertabet vil dernæst ligge på et minimum. Hvis biomassen igen får ilt, starter forløbet igen. Biologien bag ensileringen og ensileringens faser er uddybet her [2]. De mikrobielle processer under ensileringen resulterer i et lagertab. Det er derfor vigtigt at få skabt de forhold, der sikrer mindst mulig ilt i ensilagestakken, de bedste vækstforhold for de mikroorganismer, der skaber pH-faldet og at undgå i videst muligt omfang, at der genintroduceres ilt til ensilagen.

Pakningen af biomassen under ensileringen er vigtig. Jo mere sammenpakket biomassen er, jo mindre ilt er der fanget i lommer i ensilagen, og jo mindre ilt kan der trænge ind i ensilagen. Det sidste er særlig vigtigt ved udtagning af biomasse fra ensilagen, da en ny overflade derved eksponeres for ilt. Under udtagning af ensilage kan iltten trænge op mod 1 meter eller dybere ind i stakken [3]. Tabet ved udfodring bør ikke være højere end 3 %, se figur 1. Hvis snitfladen er ujævn må der påregnes et yderligere tab på 1-3 % [4]



Tabet ved udfodring/tømning bør ikke være højere end ca. 3 %. Tabet afhænger blandt andet af densiteten og hvor meget der fjernes per dag [4]

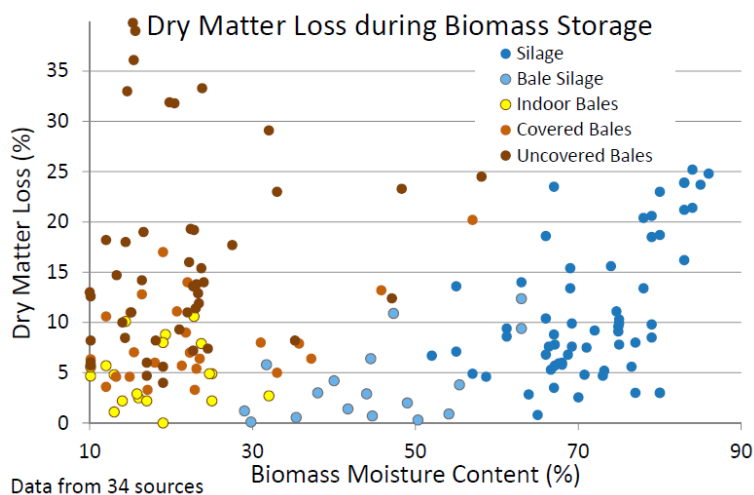
Pakningen af biomassen sker ved sammenpresning af ensilagestakken ved kørsel ovenpå stakken og er dermed afhængig af, hvorledes arbejdet udføres. Derudover afhænger evnen til sammenpakning af biomassens vandindhold, stakkens højde og fiberindholdet af materialet. Partikelstørrelsen kan også have en mindre indflydelse. Når partikelstørrelsen mindskes, bliver pakningen af partiklerne bedre, og der kan dermed være mindre ilt tilgængeligt. Dette forkorter den aerobe fase af ensileringen, hvilket medfører mindre nedbrydning af det organiske stof og mindre tab af kulstof ved den aerobe nedbrydning. En tættere pakning kan også betyde at mindre ilt trænger ind i ensilagen ved udtagning [4, 5].

Nedbrydningshastigheden af partikler øges, jo mindre partiklerne er, da overfladearealet i forhold til volumen stiger, og krystaliseringsgraden mindskes [6]. Dermed er der et større tilgængeligt areal for mikroorganismerne. Under ensilering betyder dette, at mælkesyreforgæringen forløber hurtigere, og ensileringsforholdene bliver bedre [5]. Når mælkesyreforgæringen er mere effektiv, vil pH hurtigere falde. Når pH er lav,

mindskes risikoen for sekundær forgæring, hvor clostridier nedbryder glucose, mælkesyrer og aminosyrer til kuldioxid, brint og ammoniak, hvilket vil give et uønsket tab af kulstof og kvælstof [7].

Partikelstørrelsen kan kontrolleres ved at justere den normale snitlængde på snitteren og er dermed ikke nødvendigvis en omkostningstung efterbehandling. Effekten af snitningen er forskellig mellem afgrødetyper [5], og det er også væsentligt at lave en individuel vurdering af, hvor fintsnittet materiale skal være, før der er en effekt [6]. Derfor skal omkostninger ved snitningen såvel som fordele under lagring og efterfølgende anvendelse af biomassen vurderes, før øget snitning implementeres generelt.

Tørstofindholdet i biomassen skal være optimalt for at opnå det lavest mulige tab under ensileringen. I figur 2 ses tørstoffabet i forhold til biomassens fugtighed. Som det ses på figuren er der en lang række andre forhold end biomassens tørstofindhold, der påvirker tørstoffabet. Det ses dog af figuren, at jo fugtigere ensilagen er, jo større er tørstoffabet. Det optimale tørstofindhold for ensilage ligger indenfor intervallet 30-35% [8], hvilket også fremgår af figur 2.



Figur 2: Forhold mellem tørstoffab og tørstofindhold fra 34 publicerede studier af biomasse lagring. Figuren er videreudviklet af Emery fra en allerede publiceret figur i [9]

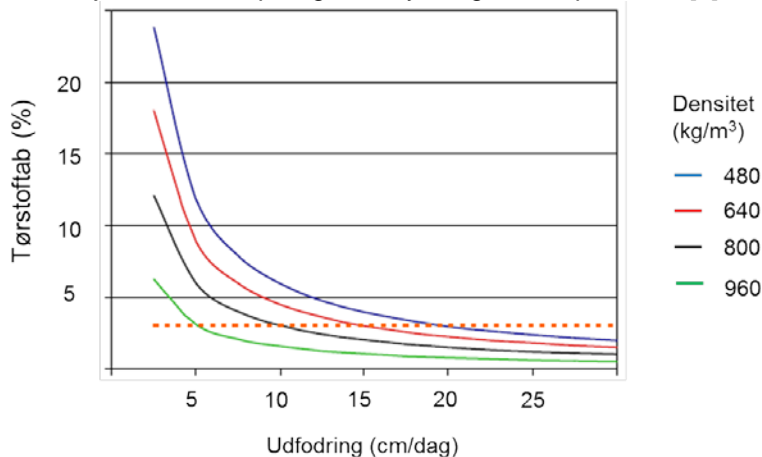
Vejret umiddelbart før ensileringen har også effekt på ensilagen. I et forsøg med simuleret regnvejr (4 mm) umiddelbart inden forsegling af majsensilage steg koncentrationen af NH₃-N, etanol og eddikesyre i ensilagen [1]. Årsagen kan være, at de meget vandopløselige dele af planten vaskes ud og tabes umiddelbart før ensileringen. Dermed er forringes mulighederne for en hurtig mikrobiel ensilering umiddelbart efter, at stakken er pakket. Ved ensilering af roer, kan regnvejr umiddelbart før optagningen også være problematisk. Jordvedhæftningen til roen øges i vådt vejr, og dermed er der større risiko for, at ensilagen forurenes af clostridier fra jordpartiklerne.

General konklusion

Der findes mange teknikker og tilsætninger, der kan øge lagerstabiliteten af våde biomasser. For enhver teknik er det dog nødvendigt at balancere udbyttet ved den ekstra behandling mod behandlingsomkostninger, arbejdstid, energiforbrug og udledninger. Tørstoffabet kan, selv når praksis for god ensilering overholdes, variere. I en undersøgelse af tørstoffabet i 48 siloer i landbruget, hvor praksis for god ensilering var overholdt, havde majsensilage et gennemsnitligt tab på 10 % DM (varierende over -4-19 %), græs 9 % (varierende over -2-26 %) og lucerne 12 % (6-15 %) [10] (De negative værdier skyldes måleusikkerheder).

Halvdelen af ensilagestakkene havde dog et tørstofstab under 8 %. Tallene bekræftes af figur 2, hvor tørstoftabet i de fleste tilfælde ligger mellem 5 og 10 % for ensilage med 30-35 % tørstof. Denne værdi kan derfor give et fingerpeg om hvor meget biomasse, der nedbrydes under lagringen.

Foruden tabet under ensileringen sker der yderligere et tab, når der tages ensilage ud af stakken. Tabet afhænger særligt af, hvor tæt pakket ensilagen er, om snitfladen er ensartet, hvor hyppigt stakken åbnes og hvor meget der tages ud [4, 8]. Tabet ved udfodring bør ikke være højere end 3 % (figur 3). Hvis snitfladen er ujævn, må der påregnes et yderligere tab på 1-3 % [4].



Figur 3: Tabet ved udfodring/tømning bør ikke være højere end ca. 3%. Tabet afhænger blandt andet af densiteten og hvor meget der fjernes per dag. Eksempel fra [4]

1.2 Emissioner under lagring af våd biomasse

Huller i ozonlaget og drivhuseffekten har de seneste år betydet mere fokus på dannelsen af flygtige organiske stoffer, VOC. Der findes mange forskellige kilder til VOC, og VOC fra ensilage er en af kilderne. For at kunne nedbringe VOC er det vigtigt at have fokus på alle potentielle kilder. VOC er en betegnelse for mange forskellige flygtige stoffer såsom alkoholer, ketoner, organiske syrer, aminer med mere. VOC'er kan danne forbindelser med nitrogen oxider og danne ozon. Nitrogenoxider findes i rigt mål og dannes ved kombinationen af ilt og kvælstof fra gødningsprodukter, mikrobiel omsætning og afbrænding af fossilt brændstof. Derfor er det dannelsen af VOC'er, der er den begrænsende faktor for ozondannelsen. Hovedparten af VOC'erne fra landbrugets afgrødeproduktion produceres af mikroorganismer (bakterier og gær) under ensilering af afgrøderne. Levende og nyligt høstede planter danner dog også VOC'er, og dannelsen er størst, når planten skades. Under høst af græs og kløver er der målt VOC'er i niveauet 300-700 mg/kg tørstof (refereret i Hafner et al, 2013 [11]). VOC'er kan altså dannes i alle faser af ensilageproduktion, herunder høst, transport, indkøring i stak/pakning, i selve ensileringsfasen, under åbning af ensileringsstakken og ved fodring med ensilagen. De største mængder af VOC'er dannes under selve ensileringen, men da stakken her er indpakket er det mest sandsynligt at frigivelsen af de producerede VOC'er først sker når stakken åbnes og ikke under selve lagringen.

Der er blevet målt 46 forskellige VOC'er i 35 forskellige studier af ensilage. De fleste er syrer, alkoholer, estre og aldehyder. Eddikesyre er den dominerende VOC med gennemsnitlige koncentrationer på 18 g/kg. Dernæst kommer etanol med koncentrationer på 8 g/kg [11]. Der er dog stor variation i VOC koncentrationerne mellem ensilagerne med 120 gange forskel i etanolkoncentrationer og 2800 gange forskel i propanol-koncentrationer [11]. Det kan derfor være vanskeligt at forudsige og kontrollere niveauet for VOC udledning-

ger fra ensilagestakke. Eddikesyre produceres primært af mælkesyrebakterier, enterobakterier og clostridier, mens etanol kommer fra sukkerforgæring, som er en almindelig nedbrydningsvej for mange forskellige bakterier og for gær. Enterobakterier, clostridier og gær er ikke ønskede i ensilagen, mens mælkesyrebakterierne er nødvendige for ensileringsprocessen.

Dannelsen af VOC'er fra de uønskede bakterier kan reduceres på samme måde, som når ensilagelagertabet skal mindskes. Derfor vil management strategien også her være at pakke ensilagen hurtigst muligt og at pakke den tæt. Det vil være at sikre så lidt muligt ilt i stakken ved at afgrøden pakkes ensartet uden luftlommer. Derfor er kort snitlængde og jævn fordeling af afgrøden i stakken også vigtigt. Endelig skal iltindtrængning i stakken skal formindskes ved tildækning af stakken med plastik/folie af en tilstrækkelig kvalitet. Der skal være fokus på at mindske overflade/volumen forholdet ved udtagning af ensilage fra stakken og dermed også at sikre at den flade hvorfra der udtages ensilage er så jævn og glat som muligt og at spild af løs ensilage foran udtagingsstedet kan fjernes.

Det er muligt at produktionen af enkelte VOC'er kan forskydes ved at påvirke bakteriesammensætningen i ensilagen ved brug af ensileringsmidler. Generelt mælkesyrebakterierne (*Lactobacillus* sp.) fremmes og enterobakterier, clostridier og gær bør hæmmes. Laboratorieforsøg har vist, at brugen af visse *Lactobacillus* stammer frem for andre (*L. buchneri*) kan reducere etanol produktionen i majsensilage med omkring 30%, men til gengæld øges eddikesyre produktionen [12, 13]. Effekten af ensileringsmidler, hvor der tilsættes ekstra *Lactobacillus*, er generelt ikke konsistent [14]. Effekten af tilsætning af *Lactobacillus* kan også påvirkes af den type biomasse, der ensileres, hvor hyppigt og hvor meget *Lactobacillus*, der tilsættes og andre forhold omkring ensileringen. Kemiske ensileringsmidler, der indeholder kaliumsorbat, nitrit, hexamin og benzoate kan også være en mulighed til at reducere dannelsen af estre og etanol [13, 15, 16]. Særligt kaliumsorbat har været i fokus, da gær og enterobakterier er følsomme overfor kaliumsorbat, mens *Lactobacillus* ikke hæmmes. I syv forskellige studier med kaliumsorbat som primært ensileringsmiddel er produktionen af etanol blevet hæmmet med mindst 45% og ofte op til 70-80% (refereret i [16]). For at opnå tilstrækkelig effekt er det sandsynligt at der bør tilsættes en relativ høj koncentration af kaliumsorbat på op til 0,1 % af friskvægten af den biomasse, der skal ensileres.

Generel konklusion

Majs og græs er de afgrøder, der traditionelt ensileres til dyrefoder. Ensilage til bioenergi har tidligere typisk også været majs og græs men på grund af ønsket om at nedbringe anvendelsen af afgrøder, der kan anvendes til fødevarer og foder til energiformål, er anvendelsen af majs- og græsensilage til bioenergi faldet. Til gengæld er der stigende fokus på ensilering af restprodukter såsom halm og efterafgrøder, roer sammen med halm og ensilering af våd halm eller våd frøgræshalm. De fleste analyser af dannelsen af VOC er lavet på majs eller græs, da de nye ensilage typer ikke er særligt udbredte endnu. For at få overblik over dannelsen af VOC'er fra restprodukter, der anvendes til biogasproduktion, bør de måles direkte. Der kan dog godt opsættes sandsynlige scenarier for VOC mængderne ud fra eksisterende studier af ensilage.

1. Kim, S.C. and A.T. Adesogan, *Influence of Ensiling Temperature, Simulated Rainfall, and Delayed Sealing on Fermentation Characteristics and Aerobic Stability of Corn Silage*. Journal of Dairy Science, 2006. **89**(8): p. 3122-3132.
2. Abildgaard, L. *Lagring af biomasse til bioenergi og bioraffinering*. 2015.
3. Muck, E.R. and L.R. Huhnke, *Oxygen Infiltration from Horizontal Silo Unloading Practices*. Transactions of the ASAE, 1995. **38**(1): p. 23.
4. Clark, J., B. Holmes, and R.E. Muck, *Feedout losses from forage storage systems*. Focus on Forage, 2008. **4**(7): p. 1-3.
5. Herrmann, C., et al., *Particle Size Reduction during Harvesting of Crop Feedstock for Biogas Production I: Effects on Ensiling Process and Methane Yields*. BioEnergy Research, 2012. **5**(4): p. 926-936.
6. Antognoni, S., et al., *Potential Effects of Mechanical Pre-treatments on Methane Yield from Solid Waste Anaerobically Digested*. International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation, 2013. **1**(1): p. 20-25.
7. Kung, L. and R. Shaver, Focus on Forage, 2001. **3**(13): p. 1-5.
8. Bjergmark, E.H., et al., *Dyrkning af grovfoder*. 2015, Aarhus, Denmark: SEGES Forlaget (Landbrugsforlaget).
9. Emery, I.R. and N.S. Mosier, *The impact of dry matter loss during herbaceous biomass storage on net greenhouse gas emissions from biofuels production*. Biomass and Bioenergy, 2012. **39**(0): p. 237-246.
10. Köhler, B. and e. al, *Dry matter losses of grass, lucerne and maize silages in bunker silos*. Agricultural and Food Science, 2015. **22**: p. 145-150.
11. Hafner, S.D., et al., *Emission of volatile organic compounds from silage: Compounds, sources, and implications*. Atmospheric Environment, 2013. **77**: p. 827-839.
12. Filya, I. and E. Sucu, *The effects of lactic acid bacteria on the fermentation, aerobic stability and nutritive value of maize silage*. Vol. 65. 2010.
13. Tabacco, E., et al., *Clostridia spore formation during aerobic deterioration of maize and sorghum silages as influenced by Lactobacillus buchneri and Lactobacillus plantarum inoculants*. J Appl Microbiol, 2009. **107**(5): p. 1632-41.
14. Contreras-Govea, F.E., et al., *Microbial inoculant effects on silage and in vitro ruminal fermentation, and microbial biomass estimation for alfalfa, bmr corn, and corn silages*. Animal Feed Science and Technology, 2011. **163**(1): p. 2-10.
15. Weiss, K. and K. C., *Effect of Wilting and Silage Additives on Silage Quality of Lucerne, Red Clover and Legume-Grass Mixtures*. Dairy and Vet Sci J, 2017. **1**(5): p. 555574.
16. Hafner, S.D., et al., *Potassium sorbate reduces production of ethanol and 2 esters in corn silage*. Journal of Dairy Science, 2014. **97**(12): p. 7870-7878.