



Methaanproductie van dikke mestfracties: met en zonder voorbehandeling

M. Timmerman en F.E. de Buissonjé



LIVESTOCK RESEARCH
WAGENINGEN **UR**

Methaanproductie van dikke mestfracties: met en zonder voorbehandeling

M. Timmerman en F.E. de Buissonjé

Wageningen UR Livestock Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen UR Livestock Research, in opdracht van en gefinancierd door het Ministerie van Economische Zaken, in het kader van het Kennisbasis onderzoeksprogramma Groene Grondstoffen, thema 'Biorefinery en bio-energie' (projectnummer KB-13-003-012)

Wageningen UR Livestock Research
Wageningen, februari 2015

Livestock Research Rapport 838

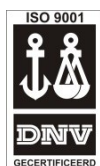
Samenvatting NL Dit rapport presenteert de internationale kennis over de methaanproducties van dikke mestfracties en over de mogelijkheden om via voorbehandelingstechnieken de methaanproductie te verhogen. De methaanproductie van dikke mestfracties in batchtesten lag globaal tussen de 40 en 60 m³ methaan per ton. Perspectievolle technieken om de methaanproductie te verhogen zijn: thermische behandeling, voorverzuring, stoomexplosie en thermochemische behandeling. Bij de beoordeling van voorbehandelingstechnieken is vaak alleen gekeken naar de verhoging van de methaanproductie, maar niet naar het daaraan gerelateerd extra energiegebruik, chemicaliëngebruik en het economisch rendement.

Summary UK This report presents the international knowledge about the methane yields of solid manure fractions and the possibilities to increase the methane yields by pre-treatment. The methane yields of solids fractions in batch tests were globally in the range of 40 to 60 m³ per tonne. Promising pre-treatment technologies to increase the methane yield are: thermal treatment, two-stage digestion, steam explosion and thermochemical pre-treatment. Most research of pre-treatment technologies only looked at the increase in methane yield, but not at the increased consumption of electricity and chemicals nor at the economic return.

© 2015 Wageningen UR Livestock Research, Postbus 338, 6700 AH Wageningen, T 0317 48 39 53, E info.livestockresearch@wur.nl, www.wageningenUR.nl/livestockresearch. Livestock Research is onderdeel van Wageningen UR (University & Research centre).

Livestock Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van de uitgever of auteur.



De certificering volgens ISO 9001 door DNV onderstreept ons kwaliteitsniveau. Op als onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponneerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Inhoud

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
2 Biogasopbrengsten	8
2.1 Algemeen	8
2.2 Onderzoekresultaten	8
2.3 Overzicht van de biogasopbrengsten	12
3 Voorbehandelingstechnieken	14
3.1 Algemeen	14
3.2 Fysische voorbehandeling	14
3.3 Chemische ontsluiting	18
3.4 Biologische voorbehandeling	22
3.5 Combinaties van ontsluitingstechnieken	24
4 Procesvoering	29
4.1 Algemeen	29
4.2 Onderzoekresultaten naar procesvoering	29
5 Discussie	30
6 Conclusies en aanbevelingen	31
6.1 Conclusies	31
6.2 Aanbeveling	31

Literatuur

Samenvatting

De grootste organische reststroom in de landbouw, namelijk dierlijke mest, wordt nog maar zeer beperkt ingezet in biogasinstallaties. Volgens gegevens van het CBS werd in 2011 in totaal 1,35 miljoen ton mest vergist wat slechts 2% van de totale dierlijke mestproductie bedraagt (CBS, 2012). Belangrijke oorzaken van de geringe benutting van drijfmest als grondstof voor biogasproductie zijn het lage methaanpotentieel en de hoge transportkosten van drijfmest, dat voor 90% of meer bestaat uit water. Dikke mestfracties uit mestscheiding bevatten daarentegen minder water en meer organische stof en hebben daardoor een hogere biogasproductiepotentieel dan drijfmest (biogas bevat circa 60% methaan). Dit biedt kansen om dikke mestfracties op grotere schaal in te zetten bij biogasinstallaties. Dikke fracties kunnen, in geval van covergisting, dure coproducten vervangen. Het doel van deze rapportage is om een overzicht te geven van de internationale kennis over covergisting van dikke mestfracties en aan te geven welke voorbehandelingstechnieken van dikke mestfracties perspectiefvol zijn.

Uit literatuuronderzoek komen de volgende zaken naar voren:

- Er is vooral onderzoek gedaan naar de biogasopbrengsten van dikke fracties afkomstig van varkensmest waarbij de centrifuge en vijzelpers de meest onderzochte scheidingstechnieken zijn. Echter het aantal onderzoeksresultaten per techniek en per mestsoort is beperkt.
- Op basis van de onderzoeksresultaten uit batchtesten lagen de methaanproducties van onbehandelde dikke mestfracties globaal in de range van 40 tot 60 m³ methaan per ton. De methaanproducties van dikke fracties van (co)vergiste mest waren in het algemeen lager.
- Bij fysische voorbehandelingen is versnijden een weinig perspectiefvolle techniek voor dikke mestfracties. Thermische voorbehandelingen bieden wel perspectief voor onvergiste dikke mestfracties, waarbij de juiste combinatie van temperatuur en behandelduur verhogingen van de methaanproductie met 25% à 30% te zien gaven in batchtesten, maar bij dikke fracties van (co)vergiste mest was het effect zeer wisselend.
- Bij chemische voorbehandelingen zijn vaak relatief grote doseringen noodzakelijk wat het perspectief vermindert. Van de onderzochte basen gaf ammoniumhydroxide (NH₄OH) de grootste verhoging in methaanproductie te zien, maar door het hoge verbruik van NH₄OH en de noodzakelijke terugwinning van ammonium is deze voorbehandelingsmethode weinig perspectiefvol.
- Naar biologische voorbehandeling is maar weinig onderzoek gedaan, waarbij voorverzuring als anaerobe microbiologische voorbehandelingsmethode als enige perspectief lijkt te bieden op verhoging van de methaanproductie.
- Bij de gecombineerde voorbehandeling is bijna alleen onderzoek gedaan naar stoomexplosies en thermochemische methoden om de methaanproducties van dikke mestfracties te verhogen. Beide methoden lijken perspectief te bieden aangezien het merendeel van de onderzoeksresultaten een verhoging van meer dan 50% in methaanproductie lieten zien.
- Bij veel onderzoeken naar voorbehandelingsmethoden is alleen gekeken naar de verhoging van methaanproductie, maar werd niet het extra energie- en chemicaliëngebruik van de voorbehandelingsmethode in ogenschouw genomen. Tevens werd het economisch rendement van een voorbehandelingsmethode ook niet behandeld.

1 Inleiding

Achtergrond

De rijksoverheid en de primaire sector (akkerbouw, tuinbouw en veehouderij) hebben in het Convenant Schone en Zuinige Agrosectoren afgesproken om te streven naar een biogasproductie van 1.500 miljoen m³ biogas in 2020 en circa 25-30% emissiereductie van overige broeikasgassen ten opzichte van 1990 (Anonymous, 2008). Ook in de Topsector Energie is het streven om een hogere productie van duurzame energie te bewerkstelligen. Daarnaast wordt in de Topsector Agro & Food binnen het thema 'Valorisatie van grondstoffen, zijstromen en dierlijke mest' gestreefd naar een optimaler benutting van deze stromen. Dit wijst erop dat er kansen liggen voor (co)vergisting van mest. Echter, in de praktijk blijkt dat (co)vergistingsinstallaties het moeilijk hebben. Door de groei van het aantal biogasinstallaties in de periode tot 2010, zowel in de agrarische als in de industriële sector, is de vraag naar organische coproducten gestegen. Dit heeft gezorgd voor een verhoging van de prijs die betaald moet worden voor organische restproducten. Door de stijgende kosten van de coproducten is de kostprijs van biogas ook gestegen wat tot slechte/verliesgevendende rendementen bij agrarische biogasinstallaties heeft geleid. Hierdoor is de verwachting dat onder de huidige omstandigheden maar een beperkt aantal nieuwe installaties kan worden gerealiseerd. Sinds 2010 is er dan ook sprake van stagnatie in de covergistingssector (Van den Boom en Van der Elst, 2013; Van den Boom, 2014).

Hoewel de vraag naar organische restproducten flink is toegenomen wordt de grootste organische reststroom in de landbouw, namelijk dierlijke mest, nog maar zeer beperkt ingezet in biogasinstallaties. Volgens gegevens van het CBS werd in 2011 in totaal 1,35 miljoen ton mest vergist. De totale jaarlijkse mestproductie is ongeveer 70 miljoen ton wat betekent dat slechts 2% van de mestproductie wordt vergist (CBS, 2012). Belangrijke oorzaken van de geringe benutting van drijfmest als grondstof voor biogasproductie zijn het lage methaanpotentieel en de hoge transportkosten van drijfmest, dat voor 90% of meer bestaat uit water. De laatste jaren wordt er, vanwege de aangescherpte fosfaatnormen en de verplichte export van een deel van het fosfaatoverschot, steeds meer mest gescheiden. De dikke fractie heeft een hoger biogaspotentieel dan drijfmest waardoor de transportkosten dalen per kuub biogas. Daarnaast is per 1 januari 2014 verplichte mestverwerking opgelegd aan veehouderijbedrijven met een mestoverschot (i.c. fosfaatoverschot). In de praktijk betekent dit dat een deel van de mest exportwaardig gemaakt dient te worden, zodat het buiten Nederland afgezet kan worden. Deze verplichte mestverwerking biedt kansen aan covergistinstallaties om mest voor derden exportwaardig te maken d.m.v. een pasteurisatie-installatie en/of drooginstallatie met de overschotwarmte van de WKK-installatie. De dure coproducten, de verplichte mestverwerking, grotere beschikbaarheid van dikke mestfracties en de hogere biogasproductie van dikke mestfracties t.o.v. drijfmest bieden daardoor een kans om dikke mestfracties op grotere schaal in te zetten bij biogasinstallaties. Echter er zijn in Nederland amper onafhankelijke onderzoeksresultaten bekend van de (on)mogelijkheden van covergisting van dikke mestfracties.

Doelstelling

Het doel van deze rapportage is om een overzicht te geven van de internationale kennis over covergisting van dikke mestfracties en aan te geven welke voorbehandelingstechnieken van dikke mestfracties perspectiefvol zijn.

Afbakening

In 2012 werd Nederland in totaal 71,3 miljoen ton mest geproduceerd waarvan 68,2 miljoen ton drijfmest. Rundvee (excl. vleeskalveren) was met 76% de grootste producent van drijfmest gevolgd door varkens met 22% (CBS, 2013). Omdat circa 98% van de drijfmest in Nederland wordt geproduceerd door de rundvee- en varkenssector is dit onderzoek beperkt tot deze twee mestsoorten.

2 Biogasopbrengsten

2.1 Algemeen

De biogasproductie van dikke mestfracties wordt beïnvloed door verschillende factoren waaronder:

- Diersoort, ras en levensfase van de dieren,
- Voersamenstelling,
- Hoeveelheid en type strooisel,
- Ouderdom van de gebruikte drijfmest,
- Afbraakprocessen in de mest tijdens opslag in de stal en tijdens eventuele vooropslag van dikke mestfracties,
- Drinkwatersysteem en reinigingssysteem (toegevoegd water),
- Scheidingstechniek (incl. gebruik van hulpstoffen zoals vlokmiddelen).

Er zijn verschillende methoden om de biogasopbrengsten van organische producten te bepalen, zoals berekeningen o.b.v. chemische analyses, batch vergistingstesten en continue vergistingstesten. Berekeningen op basis van chemische analyses zijn snel en geven een grove inschatting van de biogasproductie van een product wat tevens betekent dat de vertaling naar praktijkwaarde beperkt is. Batch vergistingstesten worden ingezet om de maximale biogas- en methaanproductie en afbraaksnelheid van organische producten te bepalen. De maximale methaanproductie wordt meestal uitgedrukt als de zogenaamde specifieke methaanproductie, uitgedrukt als ml CH₄ per gram organische stof. Het voordeel van batch vergistingstesten is de grote herhaalbaarheid, mogelijkheid om veel testen tegelijk in te zetten en gunstige prijs. Het nadeel is echter de beperkte vertaling naar praktijkinstallaties doordat o.a. geen rekening wordt gehouden met invloedsfactoren zoals organische belasting en verblijftijd. Continue vergistingstesten in een laboratorium kunnen beter de proces technische parameters zoals organische belasting, verblijftijd en voedingsfrequentie van een praktijkinstallatie nabootsen. Nadelen zijn o.a. dat een uitgebreide laboratoriumopzet nodig is, herhalingen lastig zijn en het dure proeven zijn (KTBL, 2005; Montgomery en Bochmann, 2014).

2.2 Onderzoeksresultaten

Dikke fractie varkensmest: scheiding met vijzelpers

De maximale methaanproductie en hydrolyseconstante van een dikke fractie varkensmest (32,1% DS) afkomstig van een vijzelpers is bepaald in een batchtest bij 30°C. De hydrolyseconstante is een maat voor de snelheid waarmee organisch materiaal wordt afgebroken en omgezet in methaan. Hoe hoger de hydrolyseconstante des te sneller wordt het organisch materiaal omgezet in methaan. De maximale methaanproductie van de dikke fractie was 213 l CH₄/kg OS (60,7 m³ CH₄/ton dikke fractie) en de hydrolyseconstante was 0,07 d⁻¹. Met behulp van de maximale methaanproductie en de hydrolyseconstante kan berekend worden wat de methaanopbrengst is van de dikke fractie bij een bepaalde verblijftijd in een volledige gemengde vergistingsreactor (CSTR). De berekende methaanopbrengst voor de dikke fractie in een volledig geroerde reactor bedraagt bij een verblijftijd van 20 dagen 35,4 m³ CH₄/ton en 30 dagen 41,1 m³ CH₄/ton, wat overeenkomt met 58% en 68% van de maximale methaanproductie (Timmerman et al., 2009).

Dikke fractie rundveemest: scheiding verse mest

Het methaanpotentieel van een dikke en dunne fractie van uur vers gescheiden rundveemest afkomstig van een vijzelpers is bepaald in batchtesten. De specifieke methaanproductie van de dikke fractie (ca. 38% drogestof) was 221 l CH₄/kg OS en van de dunne fractie 259 l CH₄/kg OS. Dit kwam neer op een maximale methaanproductie van 78 m³ CH₄ per ton voor de dikke fractie en 14 m³ CH₄ per ton voor de dunne fractie (Anonymous, 2013).

Dikke fractie varkensmest: invloed type scheider

Onderzoek naar de methaanproductie van drie dikke fracties varkensmest gaf in batchtesten bij 35°C wisselende resultaten te zien (tabel 1). Worden de methaanproducties per ton vergeleken met vleesvarkensmest dan werd een 2,6 tot 3,5 keer hogere methaanproductie gerealiseerd en vergeleken met zeugenmest een 5,0 tot 6,6 hogere methaanproductie (Møller et al., 2004).

Tabel 1

Methaanproducties van drie dikke fracties varkensmest (Møller et al., 2004)

Scheidingsmethode	DS (%)	OS (g/kg DS)	Methaan (l CH ₄ /kg OS)	Methaan (m ³ CH ₄ /ton)
Centrifuge 1	29%	703	261	53,2
Centrifuge 2	31%	807	159	39,8
Flocculatie en zeefbandpers	29%	812	247	58,2

Dikke fractie rundvee- en varkensmest: invloed type scheider

De methaanproductie van twee typen dikke fracties van zowel varkens- als rundveedrijfmest is bepaald in batchtesten bij 35°C. Als de drijfmest werd gescheiden m.b.v. een centrifuge dan was de specifieke methaanproductie na 60 dagen vergisten voor de dikke fractie varkensmest 161 tot 186 l CH₄/kg OS terwijl dit voor de dikke fractie rundveemest 253 l CH₄/kg OS was, maar doordat het organische stof gehalte van de dikke fractie varkensmest aanzienlijk hoger was dan van de dikke fractie rundveemest was de methaanproductie van de dikke fractie varkensmest met 45,6 tot 46,7 m³ CH₄/ton hoger dan de 40,5 m³ CH₄/ton van de dikke fractie rundveemest. De aanzienlijk hogere specifieke methaanproductie per kg OS van de dikke fractie rundveemest duidt er volgens de onderzoekers op dat bij het scheiden van de varkensmest met een centrifuge de kleinere makkelijk vergistbare deeltjes in de dunne fractie zijn achtergebleven terwijl bij de rundveemest zowel de goede als slechte afbreekbare organische stof in de dikke fractie terecht zijn gekomen, maar kan er ook op duiden dat de organische stof in de rundveemest een betere afbreekbaarheid en daardoor een hogere specifieke methaanproductie had. Na scheiding van varkensdrijfmest m.b.v. flocculatie en zeefbandpers werd een specifieke methaanproductie van 392 tot 404 l CH₄/kg OS gerealiseerd wat neerkwam op 45,2 tot 48,6 m³ CH₄/ton. De methaanproductie lag daarmee op een vergelijkbaar niveau als bij de scheiding met de centrifuge, wat een gevolg is van de aanzienlijk hoger organische drogestofgehalte van de dikke fractie uit de centrifuge dan het organische drogestofgehalte van de dikke fractie uit de flocculatie met zeefbandpers (Møller et al., 2007a).

Dikke fractie varkensmest: invloed van vlokmiddelen

De invloed van de dosering van een coagulant in de vorm van een polyacrylamide polymeer (PAM) op de anaerobe vergisting van een dikke fractie varkensmest uit een combinatie scheiding van een trommelzeef met filterpers is onderzocht. Uit toxiciteitstesten werd geconcludeerd dat bij gebruikelijke doseringen (10 tot 19 g PAM/kg DS) er geen toxiciteitsverschijnselen op de anaerobe micro-organismen optraden en dat bij de afbraak van het polyacrylamide polymeer er geen stoffen ontstonden die een remmende werking hadden op het vergistingsproces. Echter, bij vergisting van de dikke fractie varkensmest in batchtesten bij 35°C werd uit het verloop van de methaanproducties tijdens de test duidelijk dat er een effect was van de hoogte van de PAM dosering op het vergistingsproces. Hoe hoger de PAM dosering hoe hoger het droge stof gehalte van dikke fractie was en hoe lager de specifieke methaanproductie was van de dikke fractie. Als verklaring hiervoor wordt gegeven dat er een remming was van de hydrolyse als gevolg van de sterke colloïdale aggregatie bij een toenemend drogestofgehalte en tevens een remmende werking op de methanogenen als gevolg van een toenemend ammoniumgehalte bij hogere droge stof gehalten (Campos et al., 2008).

Dikke fractie varkensmest: invloed type scheiding

De methaanproductie van dikke fracties varkensmest na scheiding met een filterpers en na chemische scheiding met een polymeer en een coagulant (ijzerchloride (FeCl₃)) is bepaald in vergelijking tot ongescheiden varkensmest. De dikke fractie van de filterpers was afkomstig van een commerciële biogasinstallatie, terwijl de chemische scheiding was uitgevoerd in het laboratorium. De specifieke methaanproductie van de organische stof uit de filterpers was het laagst (161±19 l CH₄/kg OS), gevolgd door de chemische scheiding (230±51 l CH₄/kg OS) en was het hoogst voor de organische

stof in de ongescheiden varkensmest (330 ± 49 l CH₄/kg OS). Echter het omgekeerde was het geval voor de methaanproducties per ton dikke fractie met de hoogste productie voor de dikke fractie uit de filterpers (54.5 ± 6.4 m³ CH₄/ton), gevolgd door de dikke fractie uit de chemische scheiding (12.3 ± 2.7 m³ CH₄/ton) en was het laagst voor de ongescheiden varkensmest (10.4 ± 1.5 m³ CH₄/ton), wat een gevolg is van de onderscheidenlijke organische stof gehalten in de verschillende fracties van respectievelijk 33,8%, 5,3% en 3,1% (Asam et al., 2011).

Dikke fracties varkensmest: invloed scheidingstechnieken

De methaanproducties van dikke fracties varkensmest afkomstig van 17 commerciële scheiders die operationeel waren op de Deense varkensbedrijven is bepaald in batchtesten bij mesofiele vergisting (37°C). Zes van de zeven installaties die scheiden via een zeefbandpers met vijzelpers maakten gebruik van polyacrylamide polymeren. De resultaten staan in tabel 2 weergegeven (Thygesen et al., 2014).

Tabel 2

Methaanproductie van dikke fracties varkensmest en varkensmest bij mesofiele vergisting op 37°C (aantal installaties en standaard deviatie tussen haakjes) (Thygesen et al., 2014)

Methode	Methaanproductie na 60 dagen (l CH ₄ /kg OS)	Methaanproductie na 365 dagen (l CH ₄ /kg OS)	Methaanproductie na 60 dagen (m ³ CH ₄ /ton)	Methaanproductie na 365 dagen (m ³ CH ₄ /ton)
Zeefbandpers met vijzelpers (7)	167 (28)	223 (48)	39 (6)	47 (14)
Vijzelpers (4)	158 (76)	212 (95)	40 (19)	61 (26)
Schudfilter met vijzelpers (3)	218 (51)	332 (54)	42 (18)	66 (34)
Decanter centrifuge (3)	216 (15)	334 (52)	54 (7)	78 (17)
Gemiddelde dikke fracties	183 (50)	259 (80)	42 (13)	59 (23)
Varkensdrijfmest (7)	300 (79)	-	13 (11)	-

Dikke fractie varkensmest: invloed van vlokmiddelen

De invloed van FeCl₃-coagulant en een polyacrylamide polymeer op de methaanproductie van dikke fractie varkensmest is onderzocht in batchtesten bij 35°C. Er werd een negatief effect op de methaanproductie geconstateerd bij een hoge FeCl₃-dosering (25 mmol FeCl₃/liter mest), maar bij een lage dosering (6,25 mmol FeCl₃/liter mest) werd geen effect waargenomen. Er werd geen effect van het polyacrylamide polymeer op de methaanproductie waargenomen (Hjorth et al., 2009).

Dikke fractie rundveemest: invloed aanzuren

Er is onderzoek gedaan naar het effect van aanzuren op de methaanproductie van melkveemest in batchtesten bij thermofiele vergisting op 50°C. De aangezuurde organische stof in de melkveemest had een lagere methaanproductie (203 l CH₄/kg OS; 13,6 m³ CH₄/ton) dan de organische stof in de niet aangezuurde melkveemest (281 l CH₄/kg OS; 17,7 m³ CH₄/ton). Scheiding van de aangezuurde melkveemest met een vijzelpers resulteerde in een dikke fractie melkveemest die een hogere methaanproductie (264 l CH₄/kg OS; 78,7 m³ CH₄/ton) had dan de dunne fractie (138 l CH₄/kg OS; 5,2 m³ CH₄/ton). De lagere specifieke methaanproductie van de aangezuurde melkveemest en de dunne fractie is volgens de auteurs een gevolg van de remmende werking van sulfaat aangezien de hoogste sulfaatconcentraties in de aangezuurde melkveemest en de dunne fractie werden gemeten (Sutaryo et al., 2012).

Dikke fractie varkens- en rundveemest: invloed aanzuren i.c.m. scheidingstechniek

Het effect van aanzuren i.c.m. scheiding op de methaanproductie van dikke mestfracties is onderzocht in batchtesten bij 35°C gedurende 90 dagen bij zeugenmest, vleesvarkensmest en melkveemest (Sutaryo et al., 2013):

- Scheiding van aangezuurde zeugenmest met een vijzelpers werd onderzocht bij 4 maaswijdten (0,25; 0,35; 0,50 en 0,75 mm) en twee tegendrukken van de uitvoeropening. Een grotere maaswijdte gaf een hogere specifieke methaanproductie van de aangezuurde dikke fractie: 0,75 mm gaf de hoogste specifieke methaanproductie (288 l CH₄/kg OS) en 0,25 mm de laagste (266 l

CH₄/kg OS), maar dit was omgekeerd bij de methaanproductie per ton dikke fractie (88 vs. 93 m³ CH₄/ton) wat werd veroorzaakt door een verschil in organische stof gehalte van de dikke fracties. Het effect van de uitgeoefende tegendruk in de mestscheider was dat de hoogste druk leidde tot de hoogste methaanproductie bij zowel een maaswijdte van 0,35 als 0,50 mm, welke beide lagen in de range van 266-288 l CH₄/kg OS. De specifieke methaanproductie van de aangezuurde dikke fracties was hoger dan van zowel de ongescheiden aangezuurde zeugenmest als de aangezuurde dunne fractie, terwijl dit net andersom was bij de niet-aangezuurde mest. Volgens de auteurs duidt dit op een remmende werking op het vergistingsproces door een te hoog zwavelgehalte.

- Scheiding van aangezuurde vleesvarkensmest met een trommelzeef gaf bij de aangezuurde dikke fractie na 90 dagen vergisting een specifieke methaanproductie van 319 l CH₄/kg OS (31 m³ CH₄/ton) wat lager was dan van de ongescheiden aangezuurde vleesvarkensmest (398 l CH₄/kg OS; 12 m³ CH₄/ton) en de aangezuurde dunne fractie (392 l CH₄/kg OS; 8 m³ CH₄/ton).
- Scheiding van aangezuurde melkveemest met een zeefbandpers gaf bij de aangezuurde dikke fractie een specifieke methaanproductie van 278 l CH₄/kg OS (59 m³ CH₄/ton) wat hoger was dan van de ongescheiden aangezuurde melkveemest (257 l CH₄/kg OS; 12 m³ CH₄/ton) en de aangezuurde dunne fractie (223 l CH₄/kg OS; 6 m³ CH₄/ton). De methaanproductie van aangezuurde fracties was lager dan de methaanproducties van de mestfracties die niet aangezuurd waren wat volgens de auteurs waarschijnlijk veroorzaakt wordt door een remmende werking van sulfide.

Dikke fractie vleesvarkensmest: invloed aanzuren i.c.m. scheidingstechniek

Het effect van het aanzuren van vleesvarkensmest op de methaanproductie van dikke en dunne fracties is onderzocht bij drie verschillende scheidingstechnieken (vijzelpers, flocculatie i.c.m. zeefbandpers en decanter centrifuge) in batchtesten bij 37°C. De methaanproducties van de niet-aangezuurde ongescheiden vleesvarkensmest en dunne fractie waren bij alle drie de scheidingstechnieken hoger dan de aangezuurde mest respectievelijk de aangezuurde dunne fracties. Bij de dikke fractie was er geen verschil in methaanproductie tussen wel/niet aanzuren bij zowel de vijzelpers als de decanter centrifuge, maar de aangezuurde dikke fractie van de zeefbandpers i.c.m. flocculatie was wel lager dan de niet-aangezuurde dikke fractie. Aangezien de dikke fractie uit de zeefbandpers i.c.m. flocculatie een lager drogestofgehalte had en dus meer vloeistof bevatte dan de andere twee dikke fracties, duidt er volgens de auteurs op dat deze fractie net zoals de ongescheiden mest en de dunne fracties een te hoog zwavelgehalte hadden wat zorgde voor een remmende werking van het vergistingsproces (Sommer et al., 2014).

Dikke fractie digestaat

Er is onderzoek gedaan naar de methaanproductie van mechanisch gescheiden dikke fractie digestaat van drie commerciële biogasinstallaties (A = 70% rundveemest + 30% energiegewassen; B = 80% varkensmest + 20% energiegewassen; C = 60% melkveemest + 30% energiegewassen + 10% industriële coproducten) en onvergiste dikke fractie varkensmest (Tabel 3). Alle dikke fracties waren afkomstig van een vijzelpers, met uitzondering van het winter-monster van biogasinstallatie B welke afkomstig was van een trommelscheider (Balsari et al., 2010).

Tabel 3

Methaanproducties dikke fracties digestaat (A, B en C) en dikke fractie varkensmest (D) bij mesofiele vergisting op 40°C (standaard deviatie tussen haakjes) (Balsari et al., 2010)

Biogasinstallatie	Org. belasting (kg OS/m ³)	Verblijftijd (dagen)	DS (%)	Methaanproductie (l CH ₄ /kg OS)	Methaanproductie (m ³ CH ₄ /ton)
A, in winter	1,09	100	21,6%	59,3	10,7
A, in voorjaar	1,17	100	28,8%	156,9	39,9
B, in winter	1,95	60	18,4%	60,3	9,8
B, in zomer	2,47	60	22,1%	203,8	38,6
C, in voorjaar	1,48	100	21,6%	116,9	21,2
Onvergiste df varkensmest	n.v.t.	n.v.t.	25,8%	81,0	14,7

Uit de resultaten in tabel 3 blijkt dat er een grote variatie was in de methaanproductie van de dikke fracties digestaat.

2.3 Overzicht van de biogasopbrengsten

In de tabellen 4, 5 en 6 zijn de gerapporteerde resultaten uit de batchtesten van de specifieke methaanproductie van de organische stof van respectievelijk dikke mestfracties, aangezuurde dikke mestfracties en dikke fracties digestaat weergegeven. De methaanproducties per ton waren gegeven of vermeld in de referentie of berekend op basis de specifieke methaanproductie en het organisch stof gehalte van de mest(fractie).

Tabel 4

Onderzoeksresultaten van de methaanproducties van dikke mestfracties

Scheidingstechniek	Mestsoort	Methaanproductie (l CH ₄ /kg OS)	Methaanproductie (m ³ CH ₄ /ton)	Referentie
Centrifuge	Varkensmest	261	53	Møller et al., 2004
Centrifuge	Varkensmest	159	40	Møller et al., 2004
Centrifuge	Varkensmest	161-186	46-47	Møller et al., 2007a
Centrifuge	Varkensmest	216	54	Thygesen et al., 2014
Centrifuge	Rundveemest	253	41	Møller et al., 2007a
Chemische scheiding	Varkensmest	230	12	Asam et al., 2011
Filterpers	Varkensmest	161	55	Asam et al., 2011
Flocculatie en zeefbandpers	Varkensmest	247	58	Møller et al., 2004
Flocculatie en zeefbandpers	Varkensmest	392-404	45-49	Møller et al., 2007a
Schudfilter met vijzelpers	Varkensmest	218	42	Thygesen et al., 2014
Vijzelpers	Varkensmest	213	61	Timmerman et al., 2009
Vijzelpers	Varkensmest	158	40	Thygesen et al., 2014
Vijzelpers – verse mest	Rundveemest	221	78	Anonymous, 2013
Zeefbandpers en vijzelpers	Varkensmest	167	39	Thygesen et al., 2014

Tabel 5

Onderzoeksresultaten van de methaanproducties van aangezuurde dikke mestfracties

Scheidingstechniek	Mestsoort	Methaanproductie (l CH ₄ /kg OS)	Methaanproductie (m ³ CH ₄ /ton)	Referentie
Trommelzeef	Vleesvarkensmest	319	31	Sutaryo et al., 2013
Vijzelpers	Melkveemest	281	79	Sutaryo et al., 2012
Vijzelpers	Zeugenmest	266-288	88-93	Sutaryo et al., 2013
Zeefbandpers	Melkveemest	278	59	Sutaryo et al., 2013

Tabel 6

Onderzoeksresultaten van de methaanproducties van dikke fracties digestaat na covergisting

Scheidingstechniek	Mestsoort	Methaanproductie (l CH ₄ /kg OS)	Methaanproductie (m ³ CH ₄ /ton)	Referentie
Trommelscheider	Digestaat	60	10	Balsari et al., 2010
Vijzelpers	Digestaat	59	11	Balsari et al., 2010
Vijzelpers	Digestaat	157	40	Balsari et al., 2010
Vijzelpers	Digestaat	204	39	Balsari et al., 2010
Vijzelpers	Digestaat	117	21	Balsari et al., 2010

Uit de resultaten blijkt dat vooral onderzoek is gedaan naar dikke fracties afkomstig van varkensmest waarbij de centrifuge en vijzelpers de meest onderzochte scheidingstechnieken zijn. Echter het aantal onderzoeksresultaten per techniek en per mestsoort zijn beperkt. De gerealiseerde methaanproducties van de dikke mestfractie in de batchtesten liggen globaal in de range van 40 tot 60 m³ CH₄ per ton dikke fractie. Hoewel het maar enkele testresultaten betreft, valt wel op dat de specifieke methaanproducties van de aangezuurde dikke mestfracties hoger liggen dan van de meeste niet-aangezuurde dikke mestfracties. Ook is de methaanproductie van de vers gescheiden rundveemest aanzienlijk hoger dan van de meeste dikke mestfractie wat erop duidt dat versheid van de mest een invloedsfactor op de methaanproductie is. Verder is de methaanproductie van dikke fractie digestaat in het algemeen lager dan van niet-vergiste dikke mestfracties wat conform de verwachting is.

3 Voorbehandelingstechnieken

3.1 Algemeen

De organische stof in dikke mestfracties wordt in het anaerobe vergistingsproces maar deels afgebroken. Vergroting van de afbreekbaarheid van de organische stof kan het economisch rendement van de inzet van dikke mestfracties in biogasinstallaties verbeteren. Bij voorbehandeling wordt de moeilijk afbreekbare stof verkleind en/of opengebroken met als doel om de organische stof beter beschikbaar te maken voor de micro-organismen in de vergister zodat de micro-organismen een groter deel van de organische stof kunnen afbreken en omzetten in biogas. In de loop der jaren zijn verschillende voorbehandelingstechnieken ontwikkeld. Deze voorbehandelingstechnieken hebben als doel om (Montgomery en Bochmann, 2014):

- Het vergistingsproces te versnellen,
- De biogasopbrengst te verhogen,
- Verminderen van procesproblemen zoals het ontstaan van drijfslagen,
- Verminderen van het energiegebruik voor mixen.

Er zijn veel verschillende typen van voorbehandelingen en ze kunnen worden ingedeeld naar het werkingsprincipe (Tabel 7).

Tabel 7

Overzicht van verschillende voorbehandelingsprincipes en technieken (Montgomery en Bochmann, 2014)

Principe	Techniek
Fysisch	Mechanisch Thermisch Ultrasoon
Chemisch	Basen Zuren Oxidatie
Biologisch	Microbiologisch Enzymatisch
Combinatie processen	Stoomexplosie Extruderen Thermochemisch

Er zijn verschillende mogelijkheden om de hoeveelheid biogas uit dikke mestfracties te vergroten middels voorbehandeling zoals door;

- voorbehandeling van de dikke mestfractie voordat deze vergist wordt,
- behandeling van dikke fractie digestaat en deze toe te voegen aan de verse inputstroom naar de vergister toe, resp. deze toe te voegen aan een navergister.

De behandeling van de dikke fractie digestaat is specifiek gericht op het vergisten van die fractie deeltjes die in een eerste vergistingstap niet/weinig hebben bijgedragen aan de biogasproductie. Hoewel dit strikt genomen niet onder de noemer van voorbehandeling valt, kan door scheiding van digestaat en de dikke fractie terugvoeren aan de verse inputstroom naar de vergister ook de biogasproductie uit dikke mestfracties worden verhoogd doordat op deze wijze de verblijftijd van de dikke fractie in de vergister wordt verhoogd. In hoofdstuk 2 staat de informatie m.b.t. de methaanproductie van dikke fracties digestaat weergegeven.

3.2 Fysische voorbehandeling

Mechanisch

Mechanische voorbehandeling wordt uitgevoerd via versnijders, hamermolens en/of kogelmolens. Deze technieken maken de biomassa kleiner en/of kneuzen en persen de biomassa om zo de celstructuur open te breken, zodat het specifieke oppervlak van de biomassa wordt vergroot. Het

vergrote oppervlak zorgt ervoor dat de biomassa beter toegankelijk is voor enzymen waardoor de enzymatische afbraak toeneemt. Daarnaast kan het voor een verlaging van de viscositeit van het digestaat in de vergisters zorgen waardoor het mixen makkelijker gaat en kan het de aanwezigheid van het drijfzand verminderen (Montgomery en Bochmann, 2014).

De volgende onderzoeken zijn verricht naar de mechanische voorbehandeling van dikke fracties:

- **Dikke fractie covergiste mest:** Er is onderzocht wat het effect van versnijden tot circa 1 mm was op de dikke fractie van digestaat van covergiste mest. Het digestaat uit een commerciële covergistinginstallatie in Denemarken werd eerst gescheiden over een zeef (5 mm maaswijdte) gevolgd door een vijzelpers. Per 1.000 kg ingaande digestaat (met 41.3 kg OS/ton) kwam maar 17.4 kg terecht in de dikke fractie (met 5.5 kg OS) en bevatte 13.4% van de totale organische stof uit het digestaat. De batchtest bij thermofiele vergisting (55°C) van de versneden dikke fractie gaf een specifieke methaanproductie van 172 ml CH₄/g OS te zien, wat een toename van 6% in methaan potentieel betekent als gevolg van het versnijden. Het scheiden van het digestaat en vervolgens versnijden van de dikke fractie was nogal inefficiënt t.a.v. het vergroten van het biogas potentieel van de vezels in de digestaat, omdat de meeste vezels bij deze scheidingsmethode in de dunne fractie terechtkwamen (Hartmann et al., 2000).
- **Dikke fractie vergiste rundveemest:** Versnijden tot < 1 mm van dikke fractie vergiste rundveemest leidde bij navergisting op zowel 35°C als 55°C tot lagere methaanopbrengsten in vergelijking met navergisting van de onbehandelde dikke fractie. De hoogste specifieke methaanproductie van de behandelde fractie werd gemeten bij 55°C: na 30 dagen 56 ml/g OS en na 340 dagen 124 ml/g OS, wat een verlaging van 32% respectievelijk 42% is t.o.v. de niet-versneden dikke fractie (Kaparaju en Rintala, 2005).
- **Dikke fractie covergiste mest:** Het digestaat van covergiste mest was afkomstig van een commerciële biogasinstallatie (rundvee- en varkensmest, mais en industriële coproducten) wat werd gezeefd over een 2 mm zeef. De voorbehandeling bestond uit versnijden van de dikke fractie tot gemiddeld 2 mm. In batchtesten met thermofiele vergisting bij 52°C leidde het versnijden tot een toename in methaanproductie van 8% t.o.v. onbehandelde monster (Bruni et al., 2010a).

In de tabel 8 staan de gerapporteerde resultaten van de hiervoor besproken mechanische voorbehandelingen met de hoogste toename in methaanproducties van dikke mestfracties per referentie weergegeven.

Tabel 8

Overzicht van de mechanisch voorbehandelingen met de grootste toename in methaanproductie van de dikke mestfractie per referentie.

Behandeling	Mestsoort	Temp. (°C)	Methaanproductie (l CH ₄ /kg OS)	Toename	Referentie
Versnijden ~ 1 mm	Covergiste mest	55°C	172	6%	Hartmann et al., 2000
Versnijden < 1 mm	Vergiste rundveemest	55°C	56	-32%	Kaparaju en Rintala, 2005
Versnijden ~ 2 mm	Covergiste mest	52°C	- ¹⁾	8%	Bruni et al., 2010a

1) Methaanproductie is niet vermeld in referentie.

Uit het beperkte aantal resultaten naar het versnijden van dikke fracties van (co)vergiste mest blijkt het effect negatief tot licht positief is. Het versnijden van dikke fracties van (co)vergiste mest lijkt dus weinig perspectiefvol. Er zijn geen onderzoeksresultaten gevonden van het versnijden van dikke fracties van onvergiste mest.

Thermisch

Bij thermische voorbehandeling ondergaat de biomassa een hittebehandeling (125 tot 190°C) onder druk voor periodes tot één uur. De aanwezigheid van warmte en water verbreekt de waterstofverbindingen die de kristallijne cellulose en lignocellulose verbindt, wat ervoor zorgt dat de biomassa begint te zwellen. Thermische voorbehandeling is alleen effectief tot een bepaalde temperatuur, omdat boven een bepaalde temperatuur zich toxische stoffen beginnen te vormen die

het vergistingsproces negatief beïnvloeden. De hoogte van maximale temperatuur hangt af van het type biomassa en de tijdsduur van de behandeling (Montgomery en Bochmann, 2014).

De volgende onderzoeken zijn verricht naar de thermische voorbehandeling van dikke mestfracties:

- Dikke fractie varkensmest: Er is onderzoek gedaan naar hogedruk koken gedurende een half uur of één uur bij 127°C, 147°C en 167°C van een dikke fractie varkensmest. In de batchtesten in het laboratorium leverde de onbehandelde fractie een specifieke methaanopbrengst op van 162 l CH₄/kg OS, terwijl de gedurende een uur gekookte fracties een specifieke methaanopbrengst van circa 245 l CH₄/kg OS opleverden, een verhoging van circa 50%. Ook in een praktijktest werden hogere methaanopbrengsten gerealiseerd. De onbehandelde dikke fractie had een specifieke methaanopbrengst van 236 l CH₄/kg OS, terwijl de gedurende een half uur bij 147°C hogedruk gekookte fractie een specifieke methaanopbrengst had van 297 l CH₄/kg OS, een verhoging van 26%. De oorzaak van de verschillen tussen de laboratoriumtesten en praktijktesten was niet duidelijk, maar er waren indicaties dat de bacteriecultuur in de laboratoriumtesten geremd was bij het begin van de test. Verder was het ammoniumgehalte in de praktijktesten lager als gevolg van afdalen van stoom gedurende het kookproces (Møller en Raju, 2005).
- Dikke fractie varkensmest: Het effect van thermische voorbehandeling bij zeven verschillende temperaturen (25, 50, 70, 100, 110, 130 en 150°C) gedurende 1 uur werd onderzocht op de methaanproductie van de dikke fractie. De specifieke methaanproductie was hoger in het temperatuurbereik van 25-100°C, met de hoogste specifieke methaanproductie bij 100°C (circa 170 l CH₄/kg OS) wat een toename was van 28% t.o.v. het onbehandelde monster bij 25°C. Een temperatuur boven de 100°C gaf lagere specifieke methaanproducties dan de referentietemperatuur van 25°C wat duidt op vorming van complexe organische stoffen boven de 100°C die moeilijk af te breken zijn (Rafique et al., 2010).
- Dikke fractie varkensmest: Het effect van thermische voorbehandeling bij vier verschillende temperaturen (65, 70, 75, 80°C) gedurende 20 uur op de methaanproductie van dikke fractie varkensmest werd onderzocht in batchtesten. Er werd een significante toename in methaanproductie van de dikke fractie vleesvarkensmest geconstateerd, welke lineair toenam met toename in de temperatuur van de behandeling (Sutaryo, 2012).
- Dikke fractie varkensmest: Het effect van thermische voorbehandeling bij zes verschillende temperaturen (100, 125, 150, 175, 200 en 225°C) gedurende 15 minuten op de methaanproductie van dikke fractie varkensmest werd onderzocht in batchtesten bij 35°C. De dikke fractie (30% DS) was geproduceerd door varkensmest te scheiden m.b.v. een decanter centrifuge. In het temperatuurbereik van 125 – 225°C werd een toename in de methaanproductie waargenomen, maar bij 100°C werd geen toename geconstateerd. De hoogste methaanproductie werd gerealiseerd bij 200°C, wat een toename van 29% was na 27 dagen vergisten t.o.v. de onbehandelde fractie. Bij 200°C was de specifieke methaanproductie 277, 325 en 344 l/kg OS na respectievelijk 27, 60 en 90 dagen. Voor de onbehandelde fractie was de specifieke methaanproductie 215, 266 en 294 l/kg OS na respectievelijk 27, 60 en 90 dagen. De resultaten lijken in tegenspraak te zijn met het onderzoek van o.m. Rafique et al. (2010) waar na thermische behandeling de hoogste methaanproductie werd geconstateerd bij 100°C, maar in dat onderzoek werd een behandelduur van 1 uur gehanteerd terwijl in dit onderzoek een behandelduur van 15 minuten werd gehanteerd. Dit kan erop duiden dat zowel de temperatuur als de behandelduur belangrijke invloedsfactoren op de methaanproductie zijn (Raju et al., 2013).
- Dikke fractie van een mengsel van varkens- en rundveemest (50/50): Er is onderzoek gedaan naar de hittebehandeling van de dikke fractie van een 50/50-mengsel van varkens- en rundveemest. De dikke fractie werd verhit tot 100°C, 120°C en 140°C voor perioden van 20 en 40 minuten. De methaanproductie werd vervolgens gemeten in batchtesten bij 55°C gedurende een periode van 80 dagen. De behandelde dikke fracties hadden met 254 tot 289 ml CH₄/g OS een duidelijk hogere specifieke methaanproductie dan de onbehandelde controle fractie met 233 ml CH₄/g OS. Dit komt neer op een verhoging van 9 tot 24% als gevolg van de hittebehandeling, waarbij de grootste toename werd gerealiseerd bij een voorbehandeling van 100°C gedurende 20 minuten. Tevens werd een continue vergistingsexperiment gedaan met twee CSTR's reactoren

(controle en hittebehandeling van 140°C gedurende 40 minuten) bij een temperatuur van 55°C, een verblijftijd van 18 dagen en een organische belasting van 2,5 g OS/liter per dag. Ook hier was de specifieke methaanopbrengst van de test reactor hoger met 255 ml/g OS per dag dan de 238 ml/g OS per dag van de controle reactor wat neer komt op een verhoging van 7%. De gehalten aan vluchtige vetzuren waren vergelijkbaar in beide reactoren (Mladenovska et al., 2006).

- Dikke fractie vergiste rundveemest: Een hittebehandeling (80°C gedurende drie uur) of bevriezen (-20°C gedurende 24 uur) i.c.m. ontdooien (bij 20°C gedurende 4 uur) van dikke fractie vergiste rundveemest (> 2mm) leidde bij navergisting op zowel 35°C als 55°C tot lagere methaanopbrengsten in vergelijking met navergisting van de onbehandelde dikke fractie. De hoogste specifieke methaanproductie na 30 dagen werd gemeten bij 55°C (49 ml CH₄/g OS) en na 340 dagen bij 35°C (172 ml CH₄/g OS), wat een verlaging van 40% respectievelijk 4% is t.o.v. onbehandelde dikke fractie (Kaparaju en Rintala, 2005).
- Dikke fractie covergiste mest: Er is onderzoek gedaan naar het effect van thermische ontsluiting (30 min op 120°C) op drie verschillende dikke fracties digestaat uit covergistinginstallaties (A, B, C) en één dikke fractie varkensmest van een varkensbedrijf (D). De dikke fracties A en D zijn verkregen door een vijzelpers en de dikke fracties B en C door een trommelscheider. Tevens werd gekeken naar het effect van opslag. Het verse monster van de dikke fractie is genomen direct na de scheiding en het monster van de dikke fractie na opslag was voor A na 28 dagen opslag, B na 15 dagen opslag, C na 30 dagen opslag en D na 40 dagen opslag. De methaanproductie werd bepaald in batchtesten bij mesofiele vergisting (40°C). In tabel 9 staan de resultaten van het onderzoek weergegeven (Menardo et al., 2011).

Tabel 9

Specifieke methaanproducties (l_N/kg OS) van verse en opgeslagen monsters van onbehandelde en thermisch behandelde dikke fracties (DF) op 120°C voor 30 minuten (standaard deviatie tussen haakjes) bij mesofiele vergisting op 40°C (Menardo et al., 2011).

Monster	Onbehandeld vers	Onbehandeld na opslag	Thermisch vers	Thermisch na opslag
DF digestaat A	156.9 (7.4)	109.1 (7.6)	175.7 (4.6)	115.7 (8.3)
DF digestaat B	116.9 (11.3)	86.7 (2.0)	98.1 (4.9)	89.8 (1.1)
DF digestaat C	71.4 (5.3)	75.6 (1.0)	153.7 (20.6)	102.3 (10.7)
DF varkensmest (D)	78.7 (5.1)	105.4 (1.6)	213.4 (23.7)	142.6 (5.1)

Alle opgeslagen monsters hadden een lagere of vergelijkbare methaanproductie dan de verse monsters, met uitzondering van monster D. Er werden geen significante verschillen gevonden voor de thermische behandelde monsters A en B. Dit werd mogelijk veroorzaakt de lange verblijftijd (>100 dagen) van de input bij de biogasinstallaties A en B. Bij monsters C en D werden wel significante verhoging gevonden in de methaanproductie als gevolg van de thermisch behandeling. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de korte verblijftijd van 40 dagen bij biogasinstallatie C en doordat D onvergiste dikke mestfractie betrof (Menardo et al., 2011).

In de tabel 10 staan de gerapporteerde resultaten van de hiervoor besproken thermische behandelingen met de hoogste toename in methaanproductie van de dikke mestfractie per referentie weergegeven.

Tabel 10

Overzicht van de thermische voorbehandelingen met de grootste toename in methaanproductie van de dikke mestfractie per referentie.

Behandeling	Mestsoort	Temp. (°C)	Methaanproductie (l CH ₄ /kg OS)	Toename	Referentie
147°C, 1 uur	Varkensmest	n.g.	245	50%	Møller en Raju, 2005
147°C, ½ uur (praktijk)	Varkensmest	n.g.	297	26%	Møller en Raju, 2005
100°C, 1 uur	Varkensmest	n.g.	±170	28%	Rafique et al., 2010
200°C, 15 min.	Varkensmest	35°C	277	29%	Raju et al., 2013
100°C, 20 min.	Varkens/rundveemest	55°C	289	24%	Mladenovska et al., 2006
80°C, 3 uur	Vergiste rundveemest	55°C	49	-40%	Kaparaju en Rintala, 2005
120°C, 30 min.	Covergiste mest	40°C	154	115%	Menardo et al., 2011

n.g. = niet gegeven.

Er is vooral onderzoek gedaan naar de thermische voorbehandeling van dikke fracties varkensmest, waarbij de behandeling met het beste resultaat een toename van 25 à 30% laten zien ondanks de verschillen in beste behandelwijze van een referentie. Met een afgestemde combinatie van temperatuur en behandelduur lijkt thermische voorbehandeling perspectief te bieden voor dikke mestfracties. Het effect op (co)vergiste dikke fractie blijkt zeer wisselend te zijn en lijkt af te hangen van welke organische producten worden vergist en of een korte of lange verblijftijd wordt toegepast.

Ultrasoon

Ultrasone voorbehandeling kan alleen vloeibare stromen behandelen. Ultrasone frequenties (> 20 kHz) zorgen ervoor dat holtes worden gevormd die vervolgens imploderen waardoor schokgolven worden geproduceerd. Deze krachten zorgen voor destructie van de microbiële celwanden. Door de destructie van de celwanden komen enzymen vrij die helpen om de hydrolysesnelheid van de biomassa te verhogen (Montgomery en Bochmann, 2014). Aangezien de techniek gericht is op vloeibare stromen zijn er geen onderzoeken gevonden waarin ultrasone voorbehandeling werd toegepast op dikke mestfracties.

3.3 Chemische ontsluiting

Chemische voorbehandeling van biomassa is vooral onderzocht met basen en zuren van verschillende sterkten onder verschillende condities (Montgomery en Bochmann, 2014).

Basen

Het lignocellulose gedeelte van biomassa is bestand tegen hydrolyse vanwege de structuur en samenstelling. Toevoeging van basen zorgt voor zwelling van de lignocellulose en gedeeltelijk oplosbaarheid van lignine. De voorbehandeling met base kan uitgevoerd worden met verschillende basen. Veelvuldig onderzochte basen zijn ongebluste kalk (CaO) en bijtende soda (NaOH). Een belangrijk aandachtspunt bij de voorbehandeling met basen is de hoge pH van de biomassa na de voorbehandeling. Bij continu vergisting kan toevoeging met basen zorgen voor een opbouw van zouten in de reactor en een toename in pH. Een hoge zoutconcentratie en de verschuiving van de ammonium-ammoniak balans naar ammoniak door de verhoogde pH zorgt voor een remmende werking van methanogenen. De toename in pH kan voordelig zijn voor biomassa met lage pH of een hoog vetgehalte. In het algemeen is de voorbehandeling met basen meestal niet aantrekkelijk vanwege de hoge kosten van basen (Montgomery en Bochmann, 2014).

De volgende onderzoeken zijn verricht naar de voorbehandeling met basen van dikke mestfracties:

- Dikke fractie rundveemest: Een chemische behandeling van de dikke fractie rundveemest met NaOH, NH₄OH of een combinatie van de basen NaOH:KOH:Ca(OH)₂ voor een periode van 24 tot 48 uur in batchtesten met thermofiele vergisting (55°C) gaf een duidelijke verhoging in de potentiële methaanproductie. Hiervoor moesten de basen wel met minimaal 20 g base/kg OS

worden toegevoegd. Echter, voor NH_4OH was een minimale hoeveelheid van 40 g base/kg OS nodig. In tabel 11 staat de gemeten toename in de methaanproductie in de batchtesten weergegeven (Angelidaki en Ahring, 2000).

Tabel 11

Toename in methaanproducties bij chemische ontsluiting met verschillende basen en verschillende doseringen (Angelidaki en Ahring, 2000).

Base	Dosering	Toename methaanproductie
NaOH	20 g /kg OS	13%
NaOH	20 g /kg OS	23%
NH_4OH	<20 g /kg OS	0%
NH_4OH	40 g /kg OS	23%
$\text{NaOH}:\text{KOH}:\text{Ca}(\text{OH})_2$	40 g /kg OS	20%

- Dikke fractie varkensmest: Het effect van voorbehandeling van dikke fractie varkensmest met een ammonium oplossing (32%) is onderzocht in batchtesten bij 37°C. De dikke fractie was afkomstig van het scheiden van varkensmest door middel van een decanter centrifuge. De voorbehandeling werd uitgevoerd in afgesloten flessen waarin per gram DS 10 ml ammoniumoplossing werd toegevoegd wat vervolgens gedurende 3 dagen bij 22°C kon inweken op de dikke fractie. Er werden vier verschillende organische belastingen onderzocht: 0.16, 0.25, 0.5 and 1 g DS per 10 ml inoculum. De resultaten gaven een duidelijke invloed te zien van organische belasting op de uiteindelijke methaanproductie. De specifieke methaanproductie van de behandelde dikke fractie digestaat was met 320 ml CH_4 /g OS het hoogst bij de laagste organische belasting, een toename van 178% t.o.v. het controle monster. Met toenemende organische belasting nam de methaanproductie sterk af wat duidt op een sterke remming in het vergistingsproces. De auteurs verwachten dat deze remming in een continu proces weer ongedaan kan worden gemaakt door aanpassing van de microbiële organismen in het vergistingsproces aan de veranderde omstandigheden (Jurado et al., 2013).
- Dikke fractie varkensmest: Het effect van toevoeging van 5% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ op droge stof basis van de mest bij kamertemperatuur (25°C) op de methaanproductie van de dikke fractie is onderzocht in batchtesten. De voorbehandeling leidde tot een lagere methaanproductie t.o.v. het onbehandelde monster (Rafique et al., 2010).
- Dikke fractie vergiste rundveemest: Chemische behandeling met NaOH van de dikke fractie vergiste rundveemest leidde bij navergisting op 35°C en 55°C tot dezelfde respectievelijke lagere methaanproductie in vergelijking tot navergisting van de onbehandelde dikke fractie na 30 dagen vergisten, maar na 340 dagen tot lagere methaanproducties. De hoogste specifieke methaanproductie werd gemeten bij 55°C: na 30 dagen 78 ml/g OS en na 340 dagen 171 ml/g OS, wat een verlaging van 5% respectievelijk 20% is t.o.v. onbehandelde dikke fractie (Kaparaju en Rintala, 2005).
- Dikke fractie vergiste mest: Het effect van voorbehandeling van dikke fractie vergiste mest met een ammonium-oplossing (32%) is onderzocht in batchtesten bij 37°C. De dikke fractie was afkomstig van het scheiden van vergiste mest van een commerciële biogasinstallatie (input mest en dikke fractie) door middel van een decanter centrifuge. De voorbehandeling werd uitgevoerd in afgesloten flessen waarin 10 ml ammonium oplossing per gram droge stof werd toegevoegd. Na de behandelperiode werd 10 ml water per gram droge stof toegevoegd om zo het ammonium uit het monster te kunnen destilleren. Er werden drie verschillende behandelperiodes (1, 3 en 5 dagen) en twee temperaturen (22 en 55°C) onderzocht. Alleen de behandeling van één dag bij 22°C gaf een kleine afname in methaanproductie, maar de overige behandeling gaven toenames van 17 tot 80% te zien. De hoogste specifieke methaanproductie was 139 ml CH_4 /g OS bij drie dagen op 22°C, terwijl het controlemonster een specifieke methaanproductie had van 77 ml CH_4 /g OS. De toename in temperatuur van 22°C naar 55°C leidde niet tot betere methaanproductie. Door de voorbehandeling was niet alleen de methaanproductie hoger, maar de methaan werd ook sneller geproduceerd waardoor de maximale methaanproductie eerder werd bereikt. Aanvullende batchtesten met vier verschillende organische belastingen gaf geen invloed te zien van organische

belasting op de uiteindelijke methaanproductie. De gemiddelde specifieke methaanproductie van behandelde dikke fracties vergiste mest was 117 ml CH₄/g OS terwijl de specifieke methaanproductie van de onbehandelde dikke fracties vergiste mest 90 ml CH₄/g OS was. De behandeling leidde toe een gemiddelde toename van 30% (Jurado et al., 2013).

- Dikke fractie vergiste mest: Het effect van voorbehandeling van dikke fractie digestaat met verschillende concentraties ammonium-oplossing (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 32%) op de methaanproductie is onderzocht in batchtesten bij 37°C. De dikke fractie was afkomstig van een commerciële biogasinstallatie (input mest en dikke fractie). De voorbehandeling werd voor een periode van 3 dagen uitgevoerd bij 22°C in afgesloten flessen waarin per gram DS 10 ml ammoniumoplossing werd toegevoegd. Alle behandelingen gaven een specifieke methaanproductie van circa 165 ml CH₄/g DS, met uitzondering van de 32% oplossing die een lagere specifieke methaanproductie had. De 5% ammoniumoplossing gaf een bijna net zo hoge toename als de 25% ammonium-oplossing, 98% respectievelijk 104% toename. In een tweede test is onderzoek gedaan naar de duur van behandeling (1, 3 of 5 dagen) bij zowel de 5% als de 25% oplossing. De 5% oplossing gaf een toename van 64 ml CH₄/g DS naar 192 tot 199 CH₄/g DS. De 25% oplossing gaf een vergelijkbare toename naar 162 tot 215 ml CH₄/g DS. Een periode van drie dagen wordt beschouwd als de optimale duur van de behandeling van zowel de 5% als de 25% oplossing (Mirtsou-Xanthopoulou et al., 2014).
- Dikke fractie covergiste mest: De covergiste mest was afkomstig van een commerciële biogasinstallatie (rundvee- en varkensmest, mais en industriële coproducten) wat werd gezeefd over een 2 mm zeef. De voorbehandeling bestond uit een CaO-toevoeging van 6, 8 of 10% op w/w basis bij 15°C voor een duur van 0 tot 25 dagen, waarbij elke 5 dagen opnieuw werd gemixt en monsters werden genomen. In batchtesten met thermofiele vergisting bij 52°C werden de beste resultaten werden gehaald bij een behandelduur van 10 dagen bij CaO-toevoegingen van 6 en 8% met een specifieke methaanproductie van 239 respectievelijk 234 ml CH₄/g OS, wat een toename van 59% betekent t.o.v. het onbehandelde monster (Bruni et al., 2010a).
- Dikke fractie varkensmest: Het effect van voorbehandeling van een dikke fractie varkensmest (DS 9,3%) met een base (NaOH) is onderzocht. De voorbehandeling werd gedurende 24 uur bij een constante temperatuur van 24°C uitgevoerd. Bij de behandeling met de base nam het aandeel opgeloste chemisch zuurstofverbruik (CZV) toe met 57%. Het chemisch zuurstofverbruik is een indirecte maat van het organische stofgehalte. Het onbehandelde referentiemonster had in batchtesten bij mesofiele vergisting op 32°C een methaanproductie van 220 ml CH₄/g CZV en de NaOH-toevoeging een specifieke methaanproductie van 249 ml CH₄/g CZV, wat een verhoging van 13% betekent (González-Fernández et al., 2008).

In de tabel 12 staan de gerapporteerde resultaten van de hiervoor besproken chemische voorbehandelingen met basen met de hoogste toename in methaanproductie van de dikke mestfractie per referentie weergegeven.

Tabel 12

Overzicht van de chemische voorbehandelingen met de grootste toename in methaanproductie van de dikke mestfractie per referentie.

Behandeling	Mestsoort	Temp. (°C)	Methaanprod. (l CH ₄ /kg OS)	Toename	Referentie
40 g NaOH/kg OS	Rundveemest	55°C	- ¹⁾	23%	Angelidaki en Ahring, 2000
NaOH ²⁾	Varkensmest	32°C	- ¹⁾	13%	González-Fernández et al., 2008
40 g NaOH/kg OS	Vergiste rundveemest	55°C	78	-5%	Kaparaju en Rintala, 2005
40 g NH ₄ OH/kg OS	Rundveemest		- ¹⁾	23%	Angelidaki en Ahring, 2000
10 ml NH ₄ OH (32%)/g DS	Varkensmest	37°C	320	178%	Jurado et al., 2013
10 ml NH ₄ OH (32%)/g DS	Vergiste mest – test 1	37°C	139	80%	Jurado et al., 2013
10 ml NH ₄ OH (32%)/g DS	Vergiste mest – test 2	37°C	117	30%	Jurado et al., 2013
10 ml NH ₄ OH (25%)/g DS	Vergiste mest – test 1	37°C	±165	104%	Mirtsou-Xanthopoulou et al., 2014
10 ml NH ₄ OH (25%)/g DS	Vergiste mest – test 2	37°C	215	236%	Mirtsou-Xanthopoulou et al., 2014
5% Ca(OH) ₂ /g DS	Varkensmest	n.g.	- ¹⁾	negatief	Rafique et al., 2010
6% CaO 10 dgn	Covergiste mest	52°C	239	59%	Bruni et al., 2010

n.g. = niet gegeven.

1) Methaanproductie (in ml CH₄/kg OS) is niet vermeld in de referentie.

2) Hoeveelheid niet vermeld in referentie.

Van de onderzochte basen blijkt dat NH₄OH in alle gevallen een verhoging in methaanproductie gaf, terwijl NaOH alleen een verhoging gaf bij de onvergiste dikke mestfracties en de Ca-basen wisselende resultaten gaf. Echter een voorbehandeling met 10 ml base per gram drogestof betekent dat een aanzienlijke hoeveelheid base per ton wordt gebruikt. Bij gebruik van een ammoniumoplossing zal na de voorbehandeling van de dikke fractie de ammonium teruggewonnen dienen te worden, omdat anders het ammoniumgehalte te hoog kan worden waardoor remming van het vergistingsproces kan optreden.

Zuren

In tegenstelling tot de voorbehandeling met basen zorgt de voorbehandeling met zuren niet voor het openbreken van lignine, maar er wordt verondersteld dat hemicellulose en de esterverbindingen tussen lignine en hemicellulose wordt afgebroken. De voorbehandeling met zuren wordt meestal toegepast i.c.m. een hittebehandeling (Montgomery en Bochmann, 2014).

Het volgende onderzoek is verricht naar de voorbehandeling met zuren van dikke mestfracties:

- Dikke fractie varkensmest: Het effect van voorbehandeling van een dikke fractie varkensmest (DS 9,3%) met een zuur (HCl) is bepaald in batchtesten bij mesofiele vergisting op 32°C. De voorbehandeling werd gedurende 24 uur bij een constante temperatuur van 24°C uitgevoerd. Het onbehandelde referentiemonster had een methaanproductie van 220 ml CH₄/g CVZ_{ing}aand en de HCl-toevoeging gaf een specifieke methaanproductie van 212 ml CH₄/g CZV_{ing}aand, wat neerkomt op een verlaging van 4%. De lagere methaanproductie is mogelijk veroorzaakt doordat bij de behandeling met de HCl het aandeel opgeloste CZV afnam met 30% wat waarschijnlijk een gevolg is van chemische oxidatie van de organische stof (González-Fernández et al., 2008).

Het uitgevoerde onderzoek geeft een indicatie dat aanzuren van dikke mestfracties geen perspectievolle methode lijkt te zijn.

Oxidatie

Oxiderende voorbehandeling met waterstofperoxide (H_2O_2) of ozon heeft een vergelijkbare invloed op lignocellulose als de voorbehandeling met basen. Een mogelijk nadeel is dat meer zuurstof in het vergistingsproces komt wat het CO_2 aandeel in het biogas kan vergroten (Montgomery en Bochmann, 2014).

Het volgende onderzoek is verricht naar oxiderende voorbehandeling van dikke mestfracties:

- Dikke fractie rundveemest: Natte oxidatie (170°C , 12 bar, toevoeging van 150 ml H_2O_2 per liter dikke fractie, flash bij 15 bar) van dikke fractie rundveemest is onderzocht bij thermofiele vergisting (55°C) in batchtesten. Na 15 dagen vergisten had de behandelde fractie een 98% hogere methaanproductie, maar na 42 dagen was de verhoging nog maar 40%. Na 42 dagen was de specifieke methaanproductie van de behandelde fractie circa 175 l CH_4 /kg OS en circa 125 ml CH_4 /kg OS voor de onbehandelde fractie (Hartmann et al., 2005).

Uit de uitgevoerde studie kwam weliswaar een verhogende werking van 40% naar voren, maar de methode is vrij complex en tevens is een aanzienlijke dosering van waterstofperoxide nodig wat een indicatie vormt dat deze methode weinig perspectiefvol lijkt te zijn.

3.4 Biologische voorbehandeling

Een algemeen voordeel van biologische voorbehandeling t.o.v. chemische of thermische voorbehandeling is dat biologische voorbehandeling kan plaatsvinden bij lage temperatuur zonder gebruik van chemicaliën. Een nadeel is dat het proces langzamer is dan niet-biologische processen (Montgomery en Bochmann, 2014).

Microbiologisch - anaeroob

Anaerobe microbiologische voorbehandeling, ook bekend als voorverzuring of tweetraps vergisting, is een manier van voorbehandeling waarin de eerste stappen van anaerobe vergisting (hydrolyse en verzuring) gescheiden worden van de methaanproductie. In de eerste vergister moet de pH tussen 4 en 6 liggen. De voorbehandeling kan de afbraaksnelheid van de biomassa verhogen. In het algemeen werken enzymen die cellulose, hemicellulose en zetmeel afbreken het best bij een pH tussen 4 en 6 bij een temperatuur van 30 tot 50°C . De voorverzuring zorgt voor optimale condities voor werking van de enzymen waardoor de afbraaksnelheid toeneemt. Een ander voordeel van voorverzuring is dat de micro-organismen in de voorzuring minder gevoelig zijn voor veel stoffen (zoals fenolen en ammonium) dan de micro-organismen in de methaanvorming en veel remmende stoffen afgebroken kunnen worden in de voorverzuring (Montgomery en Bochmann, 2014).

Het volgende onderzoek is verricht naar anaerobe microbiologische voorbehandeling van dikke mestfracties:

- Dikke fractie (vergiste) rundveemest: Er is onderzoek gedaan naar tweetraps vergisting van rundveemest. De tweetraps vergisting bestond uit een voorverzuring bij 68°C gevolgd door thermofiele vergisting bij 55°C . Onderzocht is wat het effect van de duur van de voorverzuring (36, 108 en 168 uur) op de methaanproductie was in batchtesten bij 55°C . Bij de dikke fractie rundveemest nam de specifieke methaanproductie toe met 28 tot 32%, van 165 l/kg OS naar 211-217 l/kg OS waarbij de hoogste methaanproductie werd gerealiseerd bij een behandelduur van 108 uur. Bij de vergiste dikke fractie rundveemest nam de methaanproductie toe met 26 tot 56%, van 108 l/kg OS naar 136-167 l/kg OS waarbij de hoogste methaanproductie werd gerealiseerd bij een behandelduur van 168 uur (Nielsen et al., 2004).

Uit de uitgevoerde studie kwam een verhogende werking van tot 56% wat een indicatie geeft dat deze methode perspectiefvol kan zijn.

Microbiologisch - aeroob

Aerobe microbiologische voorbehandeling wordt uitgevoerd met natuurlijk voorkomende mixculturen. Sommige aerobe organismen produceren snel en in grote hoeveelheden enzymen die cellulose, hemicellulose en/of lignine afbreken. Net zoals bij de anaerobe voorbehandeling kunnen de aerobe organismen stoffen afbreken die voor een remmende werking zorgen in de methaanvorming. Een algemeen voordeel van een aeroob proces is dat het sneller verloopt dan een anaeroob proces, maar het nadeel is dat tijdens de aerobe voorbehandeling een deel van organische stof wordt omgezet in koolstofdioxide i.p.v. biogas ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) (Montgomery en Bochmann, 2014).

Het volgende onderzoek is verricht naar aerobe microbiologische voorbehandeling van dikke mestfracties:

- Dikke fractie covergiste mest: De covergiste mest was afkomstig van een commerciële biogasinstallatie (rundvee- en varkensmest, mais en industriële coproducten) wat werd gezeefd over een 2 mm zeef. De voorbehandeling bestond uit een partiële aerobe voorbehandeling van aerobe ent van tuinafval-compost gecombineerd met schimmels afkomstig van een stro en maïskuil. De aerobe ent werd met de dikke fractie gemixt op 2% en 10% op w/w basis. De behandeling werd uitgevoerd op 27°C gedurende een periode van 20 dagen, waarbij om de dag werd gemixt en monsters werden genomen. Er werd geen effect van de voorbehandeling waargenomen op de methaanproductie in batchtesten met thermofiele vergisting bij 52°C (Bruni et al., 2010a).

Het uitgevoerde onderzoek geeft een indicatie dat aerobe microbiologische voorbehandeling van dikke mestfracties geen perspectievolle methode lijkt te zijn.

Schimmels (fungi)

Veel schimmels zijn bekend om hun vermogen om milieuverontreinigende stoffen te verwijderen van vaste en vloeibaar afval. In de context van anaerobe vergisting kunnen deze stoffen een remmende werking hebben op het vergistingsproces of voor problemen zorgen bij het gebruik van het digestaat. Het is niet duidelijk wat het effect van een voorbehandeling met schimmels op de biogasopbrengst is. Naast dat schimmels lignine van biomassa kunnen afbreken gebruiken ze ook een deel van de organische stof wat omgezet kan worden in biogas (Montgomery en Bochmann, 2014). Voor zover bekend is er geen onderzoek uitgevoerd naar het effect van een voorbehandeling met alleen schimmels bij dikke mestfracties.

Enzymen

Enzymen die zorgen voor de afbraak van biomassa zijn al aanwezig in anaerobe vergisters omdat ze geproduceerd worden door de micro-organismen in het vergistingsproces. Om deze afbraak te bevorderen kan een mengsel van enzymen worden toegevoegd met enzymen die cellulose, hemicellulose, pectine en zetmeel afbreken. Enzymen kunnen op drie manieren worden toegevoegd (Montgomery en Bochmann, 2014):

- 1) Direct toevoeging aan de vergister,
- 2) Toevoeging aan een voorverzuring reactor,
- 3) Toevoeging aan speciale enzymatische voorbehandelingsreactor.

De volgende onderzoeken zijn verricht naar voorbehandeling met enzymen van dikke mestfracties:

- Dikke fractie rundveemest: Onderzoek naar een biologische behandeling met de hemicellulose afbrekende bacterie B4 gaf in batchtesten met thermofiele vergisting (55°C) een specifieke methaanproductie van circa 300 l CH_4 /kg OS wat neerkomt op een verhoging van circa 30% van de methaanproductie uit dikke fractie rundveemest (Angelidaki en Ahring, 2000).
- Dikke fractie mest: Er is onderzoek gedaan naar het vloeibaar maken van dikke mestfracties m.b.v. enzymen zodat de dikke fractie als een vloeibare stroom naar regionale biogasinstallaties vervoerd kan worden (Anonymous, 2008b), maar de resultaten van dit onderzoek konden niet achterhaald worden.

- **Dikke fractie covergiste mest:** Het covergiste digestaat was afkomstig van een commerciële biogasinstallatie (rundvee- en varkensmest, mais en industriële coproducten) wat werd gezeefd over een 2 mm zeef. De voorbehandeling met enzymen bestond uit behandelingen met het enzym laccase en een mengsel van cellulase en hemicellulase. De behandelingen werden uitgevoerd bij een temperatuur van 37°C gedurende 20 uur. Er werd geen effect van de voorbehandelingen waargenomen op de methaanproductie in batchtesten met thermofiele vergisting bij 52°C (Bruni et al., 2010a).

In tabel 13 staan de gerapporteerde resultaten van de hiervoor besproken enzymatische voorbehandelingen met de hoogste toename in methaanproductie van de dikke mestfractie per referentie weergegeven.

Tabel 13

Overzicht van de enzymatische voorbehandelingen met de grootste toename in methaanproductie van de dikke mestfractie per referentie.

Behandeling	Mestsoort	Temp. (°C)	Methaanproductie (l CH ₄ /kg OS)	Toename	Referentie
Hemicellulose afbrekende bacterie B4	Rundveemest	55°C	±300	30%	Angelidaki en Ahring, 2000
Laccase	Covergiste mest	52°C	- ¹⁾	Geen effect	Bruni et al., 2010a
Cellulase/hemicellulase	Covergiste mest	52°C	- ¹⁾	Geen effect	Bruni et al., 2010a

¹⁾ Methaanproductie (in ml CH₄/kg OS) is niet vermeld in de referentie.

In het beperkte aantal uitgevoerde onderzoeken zijn verschillende enzymen gebruikt en op verschillende uitgangsmaterialen waardoor geen duidelijk beeld ontstaat of het gebruik van enzymen op dikke mestfracties perspectiefvol kan zijn. Dit zal mede afhangen van het voer en diersoort. Zo kan men verwachten dat melkvee met veel ruwvoer en weinig krachtvoer in het rantsoen een relatief vezelrijke mest zal produceren terwijl melkvee dat veel krachtvoer heeft gegeten duidelijk minder vezels in de mest zal hebben. Het effect van een enzymatische voorbehandeling zal dan ook voor beide typen mest verschillend zijn.

3.5 Combinaties van ontsluitingstechnieken

Gecombineerde voorbehandelingstechnieken zijn een combinatie van verschillende technieken. Ze zijn in het algemeen effectiever dan een enkele voorbehandeling, maar zijn ook vaak complexer (Montgomery en Bochmann, 2014).

Stoomexplosie

Stoomexplosie zorgt voor een betere afbreekbaarheid van biomassa door een combinatie van verwarming met een abrupte afname van de druk. De biomassa wordt in een gesloten systeem in de range 160 tot 220°C opgewarmd, wat zorgt voor toename in de druk. Na een verblijftijd in de range van 5 tot 60 minuten wordt de druk abrupt afgelaten. Deze abrupte drukval zorgt ervoor dat het intracellulaire water zeer snel verdampt wat zorgt voor de stoomexplosie. Door de stoomexplosie worden cellen en de omringende vezels opengebroken. Een nadeel van stoomexplosie is dat net zoals bij thermische voorbehandeling te hoge temperaturen en/of te lange verblijftijden kunnen leiden tot een afname in de biogasopbrengst (Montgomery en Bochmann, 2014).

De volgende onderzoeken zijn verricht naar stoomexplosie van dikke mestfracties:

- **Dikke fractie varkensmest:** Er is onderzoek gedaan naar stoomexplosie van dikke fractie varkensmest. De dikke fractie werd verkregen door het centrifugeren van varkensmest. De stoomexplosie behandeling bestond uit een temperatuurbehandeling (120, 150, 170 of 180°C) gedurende een bepaalde periode (5, 15, 30 of 60 min) bij een druk van 10 bar, waarna de druk in één keer direct werd teruggebracht tot atmosferische druk. De specifieke methaanproductie werd bepaald onder mesofiele condities (35°C) in batchtesten. De resultaten lieten zien dat alle

behandelingen leidden tot een verhoging van de methaanproductie met minimaal 26%. De onbehandelde dikke fractie had een specifieke methaanproductie van 159 ml CH₄/g OS. De specifieke methaanproductie van de behandelde dikke fracties varieerde van 200 tot 329 ml CH₄/g OS. De hoogste methaanproductie werd behaald met een behandeling van 170°C gedurende 30 min en leverde een verhoging op van 107%. Uit de statistische analyse bleek dat de temperatuur de belangrijkste invloedsfactor was op de methaanproductie. Bij hoge temperaturen bleek dat er zich bij langere behandeltd (>30 min bij 170°C en > 5 min 180°C) stoffen worden gevormd die een remmende werking hebben op de methaanproductie (Ferreira et al., 2014).

- Dikke fractie covergiste mest: Er is onderzoek gedaan naar 'natte explosie' (wet explosion) van dikke fractie covergiste mest (input >90% mest). Natte explosie is een stoomexplosie-proces met of zonder de toevoeging van zuurstof om de lignocellulose-structuur van biomassa af te breken. Een vijftal verschillende condities werden gehanteerd die varieerden in temperatuur (145, 165 of 180°C), behandeltd (10 of 20 min), druk (2,2 tot 12,4) en wel/geen zuurstoftoevoeging. Het digestaat was afkomstig van commerciële biogasinstallatie die werd bedreven onder mesofiele condities (38°C) en een verblijftijd had van 20 dagen. Het digestaat uit de biogasinstallatie werd met een industriële decanter gescheiden in een dunne en dikke fractie digestaat. Uit de batchtesten bij 38°C met verschillende configuraties van de natte explosie kwam naar voren dat als er geen zuurstof werd toegevoegd dat de hoogste specifieke methaanproductie (ca. 210 ml CH₄/g OS) werd bereikt bij een temperatuur van 180°C gedurende 10 minuten wat tot een toename van 136% in methaanproductie leidde in vergelijking met de onbehandelde dikke fractie digestaat. Uit de continue vergistingsproef in reactoren met een mesofiele temperatuur (38°C), een verblijftijd van 20 dagen en een organische belasting van 3,5 kg OS/m³/dag werd een gemiddelde specifieke methaanproductie van 194 l CH₄/kg OS behaald. Dit betekent dat door de dikke fractie covergiste mest te ontsluiten bij 180°C gedurende 10 minuten de gemiddelde toename in methaanproductie 75% was (Biswas et al., 2012).

In tabel 14 staan de gerapporteerde resultaten van de hiervoor besproken voorbehandelingen met stoomexplosie met het grootste toename in methaanproductie van de dikke mestfractie per referentie weergegeven.

Tabel 14

Overzicht van de voorbehandelingen met stoomexplosie met de grootste toename in methaanproductie van de dikke mestfractie per referentie.

Behandeling	Dikke fractie	Temp. (°C)	Methaanproductie (l CH ₄ /kg OS)	Toename	Referentie
10 bar, 170°C, 30 min	Varkensmest	35°C	329	107%	Ferreira et al., 2014
9.9 bar, 180°C, 10 min	Covergiste mest – batch	38°C	±210	136%	Biswas et al., 2012
9.9 bar, 180°C, 10 min	Covergiste mest – continu	38°C	±194	75%	Biswas et al., 2012

De twee uitgevoerde onderzoeken gaven een hoge toenames in methaanproductie te zien wat een indicatie geeft dat de methode perspectiefvol kan zijn.

Extruderen

Extruderen is een proces waarbij de biomassa wordt onderworpen aan hoge schuifkrachten, temperatuur en druk. Het materiaal in een extruder wordt via een schroef door een pijp voortbewogen waar de biomassa wordt blootgesteld aan hoge druk, temperatuur, schuifkrachten en bij het verlaten van de extruder aan een abrupte drukval. Dit zorgt ervoor dat de vezels en cellen worden opengebroken en zo zorgt voor een betere en snellere afbraak in het vergistingsproces waardoor de organische belasting van de reactor omhoog kan. Nadelen van het proces zijn het hoge elektriciteitsgebruik en de grote slijtage van de schroef waardoor om de paar maanden de schroef vervangen moet worden (Montgomery en Bochmann, 2014).

Het volgende onderzoek is verricht naar het extruderen van dikke mestfracties:

- Dikke fracties mest: Er is onderzoek gedaan naar het extruderen van dikke fracties rundvee- en varkensmest. De dikke fracties werden geproduceerd d.m.v. een vijzelpers en door flocculatie met

een polyacrylamide oplossing gevolgd door filtratie. Na 28 dagen vergisten in een batchtest bij 35°C was de toename in methaanproductie 27% voor de dikke fractie afkomstig van de vijzelpers en 18% voor de dikke fractie afkomstig van de flocculatie en filtratie en na 90 dagen was de toename respectievelijk 18% en 9%. Echter de absolute toename van de specifieke methaanproductie (in liter/kg OS) was gelijk voor zowel 28 als 90 dagen vergisten. De oorzaak in de lagere toename van de behandelde geflocculeerde dikke fractie ligt in het feit dat meer kleinere deeltjes in de geflocculeerde dikke fractie terechtkomen die ook zonder behandeling tot methaanproductie leiden. De specifieke methaanproductie van de geflocculeerde dikke fractie lag dan ook hoger dan van de dikke fractie afkomstig van de vijzelpers. Dit was zowel het geval na 28 (± 230 vs. ± 180 l/kg OS) als na 90 dagen vergisten (± 345 vs. ± 270 l/kg OS). Het energiegebruik van het extruderen in het onderzoek lag tussen de 4-10 kWh/ton bij een gedraaide capaciteit van 1,5 ton product/uur voor de onderzochte dikke fracties en andere biomassa. De netto toename in elektriciteitsproductie was na extruderen voor de geflocculeerde dikke fractie 15% na 28 dagen vergisten en 7% na 90 dagen vergisten en voor de dikke fractie uit de vijzelpers 24% na 28 dagen vergisten en 16% na 90 dagen vergisten (Hjorth et al., 2011).

Het uitgevoerde onderzoek geeft een indicatie dat extruderen van dikke mestfracties een perspectiefvolle methode kan zijn.

Mechanische i.c.m. thermische voorbehandeling

Het volgende onderzoek is verricht naar mechanische i.c.m. thermische voorbehandeling van dikke mestfracties:

- Dikke fractie rundveemest: Onderzoek naar een gecombineerde behandeling van versnijden en decompressie explosie van de dikke fractie van rundveemest gaf een toename van 17% in methaanproductie bij thermofiele vergisting (55°C) in een batchtest. De toename werd verklaard door de fysische destructie van de lignocellulose-structuur en toename van het relatieve oppervlak van de lignocellulose-deeltjes waardoor bacteriën een grotere toegankelijkheid tot het materiaal hebben (Angelidaki en Ahring, 2000).

Het uitgevoerde onderzoek geeft een indicatie dat versnijden i.c.m. decompressie explosie van dikke mestfracties een perspectiefvolle methode kan zijn.

Thermochemisch

Verschillen typen basen en zuren kunnen worden gebruikt in een thermochemische voorbehandeling. Net zoals bij andere voorbehandelingen met temperatuur kunnen te hoge temperaturen en/of te lange verblijftijden leiden tot een afname in de biogasopbrengst. Thermochemische voorbehandelingen met zuren bij temperaturen onder de 160°C kunnen geschikt zijn voor moeilijk afbreekbare lignocellulose-rijke biomassa. Thermochemische voorbehandelingen met basen bij temperaturen van de rond de 50°C kunnen geschikt zijn voor lignine- of fenol-rijke biomassa (Montgomery en Bochmann, 2014).

De volgende onderzoeken zijn verricht naar thermochemische voorbehandeling van dikke mestfracties:

- Dikke fractie vergiste rundveemest: Chemische behandeling met NaOH van de dikke fractie vergiste rundveemest (> 2mm) i.c.m. een hittebehandeling (80°C gedurende 3 uur) leidde bij navergisting op zowel 35°C als 55°C tot licht hogere methaanproducties (7%) in vergelijking tot navergisting van de onbehandelde dikke fractie. De hoogste specifieke methaanproductie werd gemeten bij 55°C: na 30 dagen 88 ml/g OS en na 340 dagen 181 ml/g OS (Kaparaju en Rintala, 2005).
- Dikke fractie varkensmest: Onderzoek naar hogedruk koken bij 147°C i.c.m. toevoeging van 7% ongebluste kalk aan een dikke fractie varkensmest leverde een duidelijke verhoging van de methaanproductie op. In de batchtesten in het laboratorium leverde de onbehandelde fractie een specifieke methaanproductie op van 162 l CH₄/kg OS, terwijl de behandelde fractie een specifieke methaanproductie van circa 265 l CH₄/kg OS opleverde, een verhoging van 64%. In een

praktijktest werden hogere methaanproducties gerealiseerd. De onbehandelde dikke fractie had een specifieke methaanproductie van 236 l CH₄/kg OS, terwijl de behandelde fractie een specifieke methaanproductie had van 342 l CH₄/kg OS, een verhoging van 45%. De oorzaak van de verschillen tussen de laboratoriumtesten en praktijktesten was niet duidelijk, maar er waren indicaties dat de bacteriecultuur in de laboratoriumtesten geremd was bij het begin van de test. Verder was het ammoniumgehalte in de praktijktesten lager als gevolg van aflopen van stoom gedurende het kookproces. De kosten van de ongebluste kalk zijn dermate hoog dat ze een beperkende factor vormen voor de toepassingen van deze methode van ontsluiting in de praktijk (Møller en Raju, 2005).

- Dikke fractie covergiste mest: De covergiste mest was afkomstig van een commerciële biogasinstallatie (rundvee- en varkensmest, mais en industriële coproducten) wat werd gezeefd over een 2 mm zeef. De thermochemische voorbehandeling bestond uit temperatuur (155, 160, 170 of 180°C), verschillende doseringen van zwavelzuur (tot 7.0%) en wel/niet inweken voor 24 uur. De grootste toename in methaanopbrengst werd bereikt bij een voorbehandeling van 155°C, 2.1% toevoeging van zwavelzuur zonder inweken. De methaanopbrengst nam in batchtesten bij thermofiele vergisting (52°C) toe van 18.6 naar 30.7 m³ CH₄ per ton wat een toename is van 67%. Bij een voorbehandeling van 160°C, 2.3% zuur zonder inweken werd een toename geconstateerd van 43%. In dit onderzoek was de belangrijkste invloedsfactor op het ontstaan van remmende stoffen tijdens de voorbehandeling de lange duur van inweken (Bruni et al., 2010b).
- Dikke fractie varkensmest: Het effect van thermochemische voorbehandeling op de methaanproductie van de dikke fractie werd onderzocht bij zeven verschillende temperaturen (25, 50, 70, 100, 110, 130 en 150°C) met toevoeging van 5% Ca(OH)₂ op drogestofbasis van de mest. De thermochemische voorbehandeling had een sterke invloed op de methaanproductie van de dikke fractie. In alle behandelingen was de methaanproductie hoger, behalve van toevoeging van Ca(OH)₂ bij 25°C. De hoogste specifieke methaanproductie (ca. 230 l CH₄/kg OS) werd gerealiseerd bij een temperatuur van 70°C, wat een toename van 72% is t.o.v. de referentietemperatuur van 25°C zonder de toevoeging van Ca(OH)₂ (Rafique et al., 2010).
- Dikke fractie covergiste digestaat: Het covergiste digestaat was afkomstig van een commerciële biogasinstallatie (rundvee- en varkensmest, mais en industriële coproducten) wat werd gezeefd over een 2 mm zeef. De thermochemische behandeling bestond uit een temperatuurbehandeling van 160°C gedurende 15 minuten, toevoeging van fosforzuur (H₃PO₄) of natriumhydroxide (NaOH) (4% op droge stof basis) en wel/geen toevoeging van het enzym laccase. Van de behandeling zonder enzymtoevoeging had de thermochemische behandeling met NaOH de grootste specifieke methaanproductie (ca. 175 l CH₄/kg OS; 38% toename) in batchtesten bij thermofiele vergisting (52°C) en had ook de hoogste afbraaksnelheid. De thermochemische behandeling met fosforzuur gaf een specifieke methaanproductie van ca. 132 l CH₄/kg OS (toename 6%). Als bij de voorbehandeling gebruik werd gemaakt van het enzym laccase dan werd zowel bij de voorbehandeling met natriumhydroxide als met fosforzuur een grotere toename in methaanproductie gemeten dan zonder gebruik van laccase. De voorbehandeling met natriumhydroxide en laccase gaf een toename in methaanproductie van 69% en de voorbehandeling van fosforzuur en laccase gaf een toename in methaanproductie van 24% (Bruni et al., 2010a).

In tabel 15 staan de gerapporteerde resultaten van de hiervoor besproken thermochemische voorbehandelingen met de grootste toename in methaanproductie van de dikke mestfractie per referentie weergegeven.

Tabel 15

Overzicht van de thermochemische voorbehandelingen met de grootste toename in methaanproductie van de dikke fractie per referentie.

Behandeling	Mestsoort	Temp. (°C)	Methaanprod. (l CH ₄ /kg OS)	Toename	Referentie
1 uur 80°C met NaOH	Vergiste rundveemest	55°C	88	7%	Kaparaju en Rintala, 2005
1 uur 147°C met 7% CaO	Varkensmest - lab	n.g.	±265	64%	Møller en Raju, 2005
30 min. 147°C met 7% CaO	Varkensmest - praktijk	n.g.	342	45%	Møller en Raju, 2005
1 uur 70°C met 5% Ca(OH) ₂	Varkensmest	n.g.	±230	72%	Rafique et al., 2010
15 min. 155°C met 2.1% H ₂ SO ₄	Covergiste mest	52°C	- ¹⁾	67%	Bruni et al., 2010b
15 min 160°C met 4% NaOH	Covergiste mest	52°C	±175	38%	Bruni et al., 2010a
15 min 160°C met 4% H ₃ PO ₄	Covergiste mest	52°C	±132	6%	Bruni et al., 2010a
15 min 160°C met 4% NaOH en laccase	Covergiste mest	52°C	±175	69%	Bruni et al., 2010a
15 min 160°C met 4% H ₃ PO ₄ en laccase	Covergiste mest	52°C	±132	24%	Bruni et al., 2010a

n.g. = niet gegeven. 1) Methaanproductie (in $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg OS}$) is niet vermeld in de referentie.

Uit alle onderzoeksresultaten blijkt dat met een thermochemische voorbehandeling een toename in methaanproductie haalbaar is. Echter de toenames variëren sterk van 6% tot 72% en tevens zijn de behandelwijzen ook sterk verschillend.

4 Procesvoering

4.1 Algemeen

Bij de beoordeling van het gebruik van dikke mestfracties als coproduct in een biogasinstallatie zijn naast de methaanproducties van de dikke mestfracties ook van belang welke percentages covergist kunnen worden (i.c. het percentage dikke fractie t.o.v. de hoeveelheid drijfmest in de vergister). Het aandeel wat covergist kan worden wordt bepaald door o.a.:

- Drogestofgehalte: het drogestofgehalte in de vergister mag niet te ver oplopen om het geheel nog goed te kunnen mixen zonder een te grote toename in het energieverbruik. Een algemene richtlijn is maximaal 10-12% drogestof in de reactor (KTBL, 2005).
- Stikstofgehalte: dikke mestfracties hebben een hoog stikstofgehalte waardoor het ammoniumgehalte in de vergister te hoog kan worden en dit een remmende werking heeft op het vergistingsproces,
- Biogasopbrengst per reactorvolume: door coproducten te vervangen door dikke mestfractie kan de biogasopbrengst per reactorvolume afnemen.

4.2 Onderzoeksresultaten naar procesvoering

Inzet van dikke fractie vleesvarkensmest (21-32%DS) als coproduct in een continu geroerde thermofiele mestvergister waarin vleesvarkensmest (4,0-6,6% DS) werd vergist is onderzocht in twee onderzoeks-mestvergisters van 120 liter. Een reactor diende als referentie en in de andere reactor werd een deel van de vleesvarkensmest vervangen door dikke fractie vleesvarkensmest tot een vervangingspercentage van 60%. Het methaanpercentage in het biogas was in de onderzoeks-vergister (65% CH₄) lager dan in de referentie-vergister (71% CH₄). Bij een vervangingspercentage van 60% was de biogasproductie per m³ reactor bijna twee keer zo hoog in de onderzoeks-vergister als in de referentie-vergister. Echter de specifieke methaanproductie bedroeg in de onderzoeks-vergister ruim 200 l CH₄/kg OS tegenover 320 l CH₄/kg OS in de referentie-vergister. Deze lagere specifieke methaanproductie werd veroorzaakt deels doordat de organische stof dikke mestfractie een slechtere afbreekbaarheid heeft dan de organische stof in drijfmest waardoor de specifieke methaanproductie (in l CH₄/kg OS) van dikke mestfracties lager ligt. Het nadeel van de lagere specifieke methaanproductie kon grotendeels gecompenseerd worden door het digestaat van de onderzoeks-vergister na te vergisten in een na-vergister wat een extra methaanproductie opleverde van 106 l CH₄/kg OS (Møller et al., 2007b).

Uit verschillende onderzoeken bleek dat het aanzuren van dikke mestfracties kan leiden tot een gereduceerde methaanproductie als gevolg van een remmende werking van sulfide op het vergistingsproces (Sutaryo et al., 2012; Sutaryo et al., 2013; Sommer et al., 2014). In het onderzoek van Sutaryo et al. (2012) is ook gekeken naar covergisting van aangezuurde dikke fractie melkveemest met niet-aangezuurde ongescheiden melkveedrijfmest. In vier continue vergistingsreactoren bij een temperatuur van 50°C en een verblijftijd van 14 dagen werd onderzoek gedaan naar de vervanging (10, 20 en 30%) van melkveemest door aangezuurde dikke mestfractie. De toevoeging van de dikke fractie leidde tot een significante lagere specifieke methaanproductie wat werd verklaard door de lagere afbreekbaarheid van de dikke fractie en mogelijk als gevolg van een remmende werking van sulfide op het vergistingsproces. Door de covergisting van de dikke fractie nam de methaanproductie per m³ reactor aanzienlijk toe wat bij 30% vervanging resulteerde in een bijna 50% hogere methaanproductie per m³ reactor dan in de controle-vergister zonder covergisting van de dikke fractie. Echter het methaanpercentage daalde wel met toenemende vervangingspercentage, van 63% naar 57%.

5 Discussie

De onderzoeksresultaten zijn over het algemeen onderling lastig te vergelijken vanwege verschillen in uitgangsmateriaal, onderzoeksopzet en behandelingen. Voorbeelden van deze verschillen zijn o.a.:

- Mesofiele versus thermofiele vergisting, waarbij ook de gebruikte temperatuur in de range van mesofiel of thermofiel verschillen,
- De duur van de batchtesten verschillen, variërend in de range van 25 tot 60 dagen of nog langer,
- Versheid van de gebruikte mest (vaak onbekend),
- Instellingen van mestscheiders die wisselend zijn en variatie in type flocculanten,
- Instellingen en duur van voorbehandeling die wisselend zijn.

Door alle verschillen in de uitgevoerde onderzoeken en omdat er veelal maar beperkte onderzoeksresultaten beschikbaar zijn van een bepaalde scheidingstechniek of voorbehandeling kunnen geen algemene uitspraken worden gedaan.

Bij het scheiden van drijfmest met als doel om een dikke mestfractie te produceren die naar een biogasinstallatie gaat, zit er een tegenstrijdigheid in de keuze van mestscheidingstechniek en de instellingen daarvan. Enerzijds wil men een zo hoog mogelijk drogestofgehalte om zo min mogelijk water te hoeven transporten en tevens een zo hoog mogelijk biogasproductie per ton behalen, maar hierdoor zullen de kleinere organische deeltjes achterblijven in de dunne fractie welke relatief makkelijker en sneller te vergisten. Anderzijds wil men zoveel mogelijk organische stof van de drijfmest in de dikke mestfractie zien te krijgen, maar dit zal het drogestofgehalte van de dikke fractie weer doen verlagen wat een lagere biogasopbrengst per ton tot gevolg heeft. Hier zal naar een optimum gezocht moeten worden. Een alternatieve methode voor een mestscheider kan zijn om mest in te dampen waardoor zowel zoveel mogelijk organische stof beschikbaar blijft voor de biogasinstallatie, maar tevens minder transportvolume overblijft. Zo geeft mest indikken van 4% naar 8% droge stof al een 50% reductie in transportvolume. Een bijkomend voordeel kan zijn als de mest niet te ver wordt ingedikt dat het nog verpompbaar blijft waardoor je de mest vanuit een silo naar de vergister kan verpompen. Een andere optie kan zijn de dunne fractie op het herkomstbedrijf te vergisten en dikke fractie naar een covergistinginstallatie af te voeren die de mogelijkheid heeft om de dikke fractie voor te behandelen waardoor een hogere biogasproductie eruit behaald kan worden. Onderzoek van Liao et al. (1984) laat zien dat bij dunne fracties vergisten kortere verblijftijden mogelijk zijn waardoor de vergistingsinstallatie kleiner gebouwd kan worden. Nadeel is echter dat de totale biogasproductie op het herkomstbedrijf wel lager is dan als de volledige drijfmest op het herkomstbedrijf wordt vergist.

Het bepalen van de optimale hoeveelheid van een dikke mestfractie als coproduct in een covergistingsinstallatie zal in de praktijk een lastige zaak zijn vanwege de mogelijke stikstofremming als gevolg van een te hoog ammoniumgehalte in de vergister en doordat de procesomstandigheden (o.a. andere input, vergistingstemperatuur, mixregime) per biogasinstallatie verschillen. Onderzoeksresultaten bij mestvergisting (Riel en Timmerman, 2009) heeft laten zien dat dynamische lineaire modellen als optimalisatietool ingezet kunnen worden om de optimale hoeveelheid van een coproduct te kunnen bepalen voor een specifieke biogasinstallatie. Met deze tool zou ook de optimale hoeveelheid van een dikke mestfractie in een covergistingsinstallatie bepaald kunnen worden.

Voor een efficiënte voorbehandeling is het essentieel dat er een positieve energiebalans en een positief economisch rendement is. Dit is echter maar in een beperkt aantal studies beschouwd. Grote negatieve invloedsfactoren zijn, behalve de mestscheiding zelf, voorbehandelingen die een hoog gebruik van chemicaliën en/of een hoog energiegebruik vergen (Hjorth et al., 2011). Ook wordt het extra energiegebruik voor het roeren van een meer viskeuze vergisterinhoud niet meegerekend. Het bepalen van zowel het milieuperspectief als het economische perspectief van bepaalde scheidingstechnieken en voorbehandelingsmethoden is hierdoor lastig.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Uit de resultaten van de uitgevoerde internationaal onderzoeken komt de volgende zaken naar voren:

- Er is vooral onderzoek gedaan naar de biogasopbrengsten van dikke fracties afkomstig van varkensmest waarbij de centrifuge en vijzelpers de meest onderzochte scheidingstechnieken zijn. Echter het aantal onderzoeksresultaten per techniek en per mestsoort is beperkt.
- Op basis van de resultaten uit batchtesten lagen de methaanproducties van onbehandelde dikke mestfracties globaal in de range van 40 tot 60 m³ methaan per ton. De methaanproducties van dikke fracties van (co)vergiste mest waren in het algemeen lager.
- Bij fysische voorbehandelingen is versnijden een weinig perspectiefvolle techniek voor dikke mestfracties. Thermische voorbehandelingen bieden wel perspectief voor onvergiste dikke mestfracties, waarbij de juiste combinatie van temperatuur en behandelduur verhogingen van de methaanproductie met 25% à 30% te zien gaven in batchtesten, maar bij dikke fracties van (co)vergiste mest was het effect zeer wisselend.
- Bij chemische voorbehandelingen zijn vaak relatief grote doseringen noodzakelijk wat het perspectief vermindert. Van de onderzochte basen gaf ammoniumhydroxide (NH₄OH) de grootste verhoging in methaanproductie te zien, maar door het hoge verbruik van NH₄OH en de noodzakelijke terugwinning van ammonium is deze voorbehandelingsmethode weinig perspectiefvol.
- Naar biologische voorbehandeling is maar weinig onderzoek gedaan, waarbij voorverzuring als anaerobe microbiologische voorbehandelingsmethode als enige perspectief lijkt te bieden op verhoging van de methaanproductie.
- Bij de gecombineerde voorbehandeling is bijna alleen onderzoek gedaan naar stoomexplosies en thermochemische methoden om de methaanproducties van dikke mestfracties te verhogen. Beide methoden lijken perspectief te bieden aangezien het merendeel van de onderzoeksresultaten een verhoging van meer dan 50% in methaanproductie lieten zien.
- Bij veel onderzoeken naar voorbehandelingsmethoden is alleen gekeken naar de verhoging van methaanproductie, maar werd niet het extra energie- en chemicaliëngebruik van de voorbehandelingsmethode in ogenschouw genomen. Tevens werd het economisch rendement van een voorbehandelingsmethode niet behandeld.

6.2 Aanbeveling

Uit deze studie is naar voren gekomen dat bijna al de gerapporteerde resultaten betrekking hebben op laboratoriumonderzoeken en nog maar weinig onderzoek heeft plaatsgevonden naar wat de methaanproducties van dikke mestfracties in praktijkinstallaties zijn en wat het effect is van voorbehandelingsmethoden op de verhoging van de methaanproducties van dikke mestfracties in praktijkinstallaties zijn. Het vergroten van de informatie over covergisting van de dikke mestfracties en het effect van perspectiefvolle voorbehandelingsmethoden (thermisch, voorverzuring, stoomexplosie en thermochemisch) onder praktijkomstandigheden verdient dan ook aanbeveling. Hierbij dienen dan tevens het energiegebruik, het verbruik van hulpstoffen en het economisch rendement in ogenschouw te worden genomen.

5 Discussie

De onderzoeksresultaten zijn over het algemeen onderling lastig te vergelijken vanwege verschillen in uitgangsmateriaal, onderzoeksopzet en behandelingen. Voorbeelden van deze verschillen zijn o.a.:

- Mesofiele versus thermofiele vergisting, waarbij ook de gebruikte temperatuur in de range van mesofiel of thermofiel verschillen,
- De duur van de batchtesten verschillen, variërend in de range van 25 tot 60 dagen of nog langer,
- Versheid van de gebruikte mest (vaak onbekend),
- Instellingen van mestscheiders die wisselend zijn en variatie in type flocculanten,
- Instellingen en duur van voorbehandeling die wisselend zijn.

Door alle verschillen in de uitgevoerde onderzoeken en omdat er veelal maar beperkte onderzoeksresultaten beschikbaar zijn van een bepaalde scheidingstechniek of voorbehandeling kunnen geen algemene uitspraken worden gedaan.

Bij het scheiden van drijfmest met als doel om een dikke mestfractie te produceren die naar een biogasinstallatie gaat, zit er een tegenstrijdigheid in de keuze van mestscheidingstechniek en de instellingen daarvan. Enerzijds wil men een zo hoog mogelijk drogestofgehalte om zo min mogelijk water te hoeven transporten en tevens een zo hoog mogelijk biogasproductie per ton behalen, maar hierdoor zullen de kleinere organische deeltjes achterblijven in de dunne fractie welke relatief makkelijker en sneller te vergisten. Anderzijds wil men zoveel mogelijk organische stof van de drijfmest in de dikke mestfractie zien te krijgen, maar dit zal het drogestofgehalte van de dikke fractie weer doen verlagen wat een lagere biogasopbrengst per ton tot gevolg heeft. Hier zal naar een optimum gezocht moeten worden. Een alternatieve methode voor een mestscheider kan zijn om mest in te dampen waardoor zowel zoveel mogelijk organische stof beschikbaar blijft voor de biogasinstallatie, maar tevens minder transportvolume overblijft. Zo geeft mest indikken van 4% naar 8% droge stof al een 50% reductie in transportvolume. Een bijkomend voordeel kan zijn als de mest niet te ver wordt ingedikt dat het nog verpompbaar blijft waardoor je de mest vanuit een silo naar de vergister kan verpompen. Een andere optie kan zijn de dunne fractie op het herkomstbedrijf te vergisten en dikke fractie naar een covergistinginstallatie af te voeren die de mogelijkheid heeft om de dikke fractie voor te behandelen waardoor een hogere biogasproductie eruit behaald kan worden. Onderzoek van Liao et al. (1984) laat zien dat bij dunne fracties vergisten kortere verblijftijden mogelijk zijn waardoor de vergistingsinstallatie kleiner gebouwd kan worden. Nadeel is echter dat de totale biogasproductie op het herkomstbedrijf wel lager is dan als de volledige drijfmest op het herkomstbedrijf wordt vergist.

Het bepalen van de optimale hoeveelheid van een dikke mestfractie als coproduct in een covergistingsinstallatie zal in de praktijk een lastige zaak zijn vanwege de mogelijke stikstofremming als gevolg van een te hoog ammoniumgehalte in de vergister en doordat de procesomstandigheden (o.a. andere input, vergistingstemperatuur, mixregime) per biogasinstallatie verschillen. Onderzoeksresultaten bij mestvergisting (Riel en Timmerman, 2009) heeft laten zien dat dynamische lineaire modellen als optimalisatietool ingezet kunnen worden om de optimale hoeveelheid van een coproduct te kunnen bepalen voor een specifieke biogasinstallatie. Met deze tool zou ook de optimale hoeveelheid van een dikke mestfractie in een covergistingsinstallatie bepaald kunnen worden.

Voor een efficiënte voorbehandeling is het essentieel dat er een positieve energiebalans en een positief economisch rendement is. Dit is echter maar in een beperkt aantal studies beschouwd. Grote negatieve invloedsfactoren zijn, behalve de mestscheiding zelf, voorbehandelingen die een hoog gebruik van chemicaliën en/of een hoog energiegebruik vergen (Hjorth et al., 2011). Ook wordt het extra energiegebruik voor het roeren van een meer viskeuze vergisterinhoud niet meegerekend. Het bepalen van zowel het milieuperspectief als het economische perspectief van bepaalde scheidingstechnieken en voorbehandelingsmethoden is hierdoor lastig.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Uit de resultaten van de uitgevoerde internationaal onderzoeken komt de volgende zaken naar voren:

- Er is vooral onderzoek gedaan naar de biogasopbrengsten van dikke fracties afkomstig van varkensmest waarbij de centrifuge en vijzelpers de meest onderzochte scheidingstechnieken zijn. Echter het aantal onderzoeksresultaten per techniek en per mestsoort is beperkt.
- Op basis van de resultaten uit batchtesten lagen de methaanproducties van onbehandelde dikke mestfracties globaal in de range van 40 tot 60 m³ methaan per ton. De methaanproducties van dikke fracties van (co)vergiste mest waren in het algemeen lager.
- Bij fysische voorbehandelingen is versnijden een weinig perspectiefvolle techniek voor dikke mestfracties. Thermische voorbehandelingen bieden wel perspectief voor onvergiste dikke mestfracties, waarbij de juiste combinatie van temperatuur en behandelduur verhogingen van de methaanproductie met 25% à 30% te zien gaven in batchtesten, maar bij dikke fracties van (co)vergiste mest was het effect zeer wisselend.
- Bij chemische voorbehandelingen zijn vaak relatief grote doseringen noodzakelijk wat het perspectief vermindert. Van de onderzochte basen gaf ammoniumhydroxide (NH₄OH) de grootste verhoging in methaanproductie te zien, maar door het hoge verbruik van NH₄OH en de noodzakelijke terugwinning van ammonium is deze voorbehandelingsmethode weinig perspectiefvol.
- Naar biologische voorbehandeling is maar weinig onderzoek gedaan, waarbij voorverzuring als anaerobe microbiologische voorbehandelingsmethode als enige perspectief lijkt te bieden op verhoging van de methaanproductie.
- Bij de gecombineerde voorbehandeling is bijna alleen onderzoek gedaan naar stoomexplosies en thermochemische methoden om de methaanproducties van dikke mestfracties te verhogen. Beide methoden lijken perspectief te bieden aangezien het merendeel van de onderzoeksresultaten een verhoging van meer dan 50% in methaanproductie lieten zien.
- Bij veel onderzoeken naar voorbehandelingsmethoden is alleen gekeken naar de verhoging van methaanproductie, maar werd niet het extra energie- en chemicaliëngebruik van de voorbehandelingsmethode in ogenschouw genomen. Tevens werd het economisch rendement van een voorbehandelingsmethode niet behandeld.

6.2 Aanbeveling

Uit deze studie is naar voren gekomen dat bijna al de gerapporteerde resultaten betrekking hebben op laboratoriumonderzoeken en nog maar weinig onderzoek heeft plaatsgevonden naar wat de methaanproducties van dikke mestfracties in praktijkinstallaties zijn en wat het effect is van voorbehandelingsmethoden op de verhoging van de methaanproducties van dikke mestfracties in praktijkinstallaties zijn. Het vergroten van de informatie over covergisting van de dikke mestfracties en het effect van perspectiefvolle voorbehandelingsmethoden (thermisch, voorverzuring, stoomexplosie en thermochemisch) onder praktijkomstandigheden verdient dan ook aanbeveling. Hierbij dienen dan tevens het energiegebruik, het verbruik van hulpstoffen en het economisch rendement in ogenschouw te worden genomen.

Literatuur

- Angelidaki, I and B.K. Ahring. 2000. Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure. *Water Science and Technology* 41 (3): 189-194.
- Anonymous. 2008a. *Convenant Schone en Zuinige Agrosectoren (versie 1.0)*. Ministerie van EL&I.
- Anonymous. 2008b. DKK 8 million form EUDP for biogas. *BioEnergy Research* 5 (26): 3.
- Anonymous, 2013. Toetsing van de vergistbaarheid van afvalstromen door middel van vergistingsproeven. Dairy Campus, niet gepubliceerde data.
- Asam, Z.U.Z., T.G. Poulsen, A.S. Nizami, R. Rafique, G. Kiely and J.D. Murphy. 2011. How can we improve biomethan production per unit of feedstock in biogas plants? *Applied Energy* 88:2013-2018.
- Balsari, P., F. Gioelli, S. Menardo and E. Paschetta. 2010. The (re)use of mechanical separated solid fraction of digested or not digested slurry in anaerobic digestion plants. Ramiran 2010, 14th International Conference of the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture, Lisboa, Portugal, 13 - 15th September 2010.
- Bruni, E., A.P. Jensen and I. Angelidaki. 2010a. Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production. *Bioresource Technology* 101: 8713-8717.
- Bruni, E., A.P. Jensen and I. Angelidaki. 2010b. Steam treatment of digested biofibers for increasing biogas production. *Bioresource Technology* 101: 7668-7671.
- Biswas, R., B.K. Ahring and H. Uellendahl. 2012. Improving biogas yields using an innovative concept for conversion of the fiber fraction of manure. *Water Science & Technology* 66 (8): 1751-1758.
- Campos, E., M. Almirall, J. Mtnéz-Almela, J. Palatsi and X. Flotats. 2008. Feasibility study of the anaerobic digestion of dewatered pig slurry by means of polyacrylamide. *Bioresource Technology* 99: 387-395.
- CBS. 2012. Co-vergisting van dierlijke mest 2006-2011. Den Haag/Heerlen: Centraal Bureau voor de Statistiek.
- CBS. 2013. Dierlijke mest en mineralen 2012. Den Haag/Heerlen: Centraal Bureau voor de Statistiek.
- Ferreira, L.C., T.S.O. Souza, F. Fdz-Polanco and S.I. Pérez-Elvira. 2014. Thermal steam explosion pretreatment to enhance anaerobic biodegradability of the solid fraction of pig manure. *Bioresource Technology* 152: 393-398.
- González-Fernández, C., C. León-Cofreces and P.A. García-Encina. 2008. Different pretreatments for increasing the anaerobic biodegradability in swine manure. *Bioresource Technology* 99 (18): 8710-8714.
- Hartmann, H., I. Angelidaki and B.K. Ahring. 2000. Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. *Water Science and Technology* 41 (3): 145-153.
- Hartmann, H, H.B. Møller and B.K. Ahring. 2005. Optimized treatment concepts for the anaerobic digestion process of manure using solid-liquid separation. *Proceedings 4th International Symposium ADSW 2005, Copenhagen, Denmark*. Pp. 351-354.
- Hjorth, M., A.M. Nielsen, T. Nyord, M.N. Hansen, P. Nissen and S.G. Sommer. 2009. Nutrient value, odour emission and energy production of manure as influenced by anaerobic digestion and separation. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 329-338.
- Hjorth, M., K. Gränitz, A.P.S. Adamsen and H.B. Møller. 2011. Extrusion as a pretreatment to increase biogas production. *Bioresource Technology* 102: 4989-4994.
- Jurado, E., I.V. Skiadas and H.N. Gavala. 2013. Enhanced methane productivity from manure fibers by aqueous ammonia soaking pretreatment. *Applied Energy* 109: 104-111.
- Kaparaçu, P.L.N. and J.A. Rintala. 2005. The effects of post-treatments and temperature on recovering the methane potential of >2 mm solid fraction of digested cow manure. *Environmental Technology* 26 (6): 625-631.
- KTBL. 2005. *Gasaube in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Darmstadt, Germany: KTBL-Arbeitsgruppe "Biogaserträge".

-
- Liao, P.H., K.V. Lo and S.T. Chieng. 1984. Effect of liquid-solids separation on biogas production from dairy manure. *Energy in Agriculture* 3: 61-69.
- Menardo, S., P. Balsari, E. Dinuccio and F. Gioelli. 2011. Thermal pre-treatment of solid fraction from mechanically-separated raw and digested slurry to increase methane yield. *Bioresource Technology* 102 (2): 2026-2032.
- Mirtsou-Xanthopoulou, C., E. Jurado, I.V. Skiadas and H.N. Gavala. 2014. Effect of aqueous ammonia soaking on the methane yield and composition of digested manure fibers applying different ammonia concentrations and treatment durations. *Energies* 2014 (7): 4157-4168.
- Mladenovska, Z., H. Hartmann, T. Kvist, M. Sales-Cruz, R. Gani and B.K. Ahring. 2006. Thermal pretreatment of the solid fraction of manure: impact on the biogas reactor performance and microbial community. *Water Science and Technology* 53 (8): 59-67.
- Møller, H.B., S.G. Sommer and B.K. Ahring. 2004. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy* 26: 485-495.
- Møller, H.B. and C.S. Raju. 2005. Pre-treatment of manure fibres can yield up to 60 per cent more biogas. *Bioenergy Research* 2 (9): 5-7.
- Møller, H.B., J.D. Hansen and C.A.G. Sørensen. 2007a. Nutrient recovery by solid-liquid separation and methane productivity of solids. *Transactions of the ASABE* 50(1): 193-200.
- Møller, H.B., A.M. Nielsen, R. Nakakubo and H.J. Olsen. 2007b. Process performance of biogas digesters incorporating pre-separated manure. *Livestock Science* 112: 217-223.
- Montgomery, L.F.R. and G. Bochmann. 2014. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. Technical Brochure. IEA Bioenergy.
- Nielsen, H.B., Z. Mladenovska, P. Westermann and B.K. Ahring. 2004. Comparison of two-stage thermophilic (69°C/55°C) anaerobic digestion with one-stage thermophilic (55°C) digestion of cattle manure. *Biotechnology and bioengineering* 86(3): 291-300.
- Rafique, R., T.G. Poulsen, A. Nizami, Z. Asam, J.D. Murphy and G. Kiely. 2010. Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production. *Energy* 35: 4556-4561.
- Raju, C.S., S. Sataryo, A.J. Ward and H.B. Møller. 2013. Effects of high-temperature isochoric pre-treatment on the methane yields of cattle, pig and chicken manure. *Environmental Technology* 34(2): 239-244.
- Sommer, S.G., M. Hjorth, J.J. Leahy, K. Zhu, W. Christel, C.G. Sørensen and S. Sutarto. 2014. Pig slurry characteristics, nutrient balance and biogas production as affected by separation and acidification. *Journal of Agricultural Science* (in press).
- Sutaryo, S. 2012. Optimisation and inhibition of anaerobic digestion of livestock manure. PhD-thesis. Aarhus University, Tjele, Denmark.
- Sutaryo, S., A.J. Ward and H.B. Møller. 2012. Thermophilic anaerobic co-digestion of separated solids from acidified dairy cow manure. *Bioresource Technology* 114: 195-200.
- Sutaryo, S., A.J. Ward and H.B. Møller. 2013. Anaerobic digestion of acidified slurry fractions derived from different solid-liquid separation methods. *Bioresource Technology* 130: 495-501.
- Thygesen, O., J.M. Triolo and S.G. Sommer. 2014. Anaerobic digestion of pig manure fibres from commercial pig slurry separation units. *Biosystems Engineering* 123:91-96.
- Timmerman, M., J.W. van Riel, I. Bisschops en M. van Eekert. 2009. Optimalisering van mestvergisting. Rapport 243. Lelystad: Animal Sciences Group van Wageningen UR.
- Van den Boom, H. en C. van der Elst. 2013. Toekomst Biogas: Van laagwaardige input naar hoogwaardige output. Utrecht: Rabobank.
- Van den Boom, H. 2014. Welke duurzame energie win(d)t? - Een doorkijk naar de ontwikkelingen in Nederland tot 2020. Utrecht: Rabobank.
- van Riel, J. W. and M. Timmerman. 2009. Increasing profit of a co-digestion plant utilizing real time process data. Joint International Agricultural Conference, Wageningen, Wageningen Academic Publishers.



To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life

Wageningen UR Livestock Research
Postbus 338
6700 AH Wageningen
T 0317 480 10 77
E info.livestockresearch@wur.nl
www.wageningenUR.nl/livestockresearch

Livestock Research Rapport 838



Wageningen UR Livestock Research ontwikkelt kennis voor een zorgvuldige en renderende veehouderij, vertaalt deze naar praktijkgerichte oplossingen en innovaties, en zorgt voor doorstroming van deze kennis. Onze wetenschappelijke kennis op het gebied van veehouderijsystemen en van voeding, genetica, welzijn en milieu-impact van landbouwhuisdieren integreren we, samen met onze klanten, tot veehouderijconcepten voor de 21e eeuw.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.
