

MONITERINGS REVIEW OG GUIDE

til optimering af anaerob udrådning og biometan producerende anlæg

SAMMENDRAG



Forfattere:

Sandra Esteves, Sustainable Environment Research Centre, University of Glamorgan (Wales, UK)

Martin Miltner, Vienna University of Technology (Austria)

Sascha Fletch, Landes Energie Verein (LEV) Steiermark (Austria)



THE WALES
CENTRE OF EXCELLENCE
FOR ANAEROBIC DIGESTION

UNIVERSITY OF • PRIFYSGOL
Glamorgan
Morgannwg
CARDIFF • PONTYPRIDD • CAERDYDD



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY



As Part Delivery of:



Promotion of bio-methane and its market development through local and regional partnerships

A project under the Intelligent Energy – Europe programme

Contract Number: IEE/10/130; Deliverable Reference: Task 5.2; Delivery Date: October 2012



Indhold

1. Rapportens formål	3
2. Behov for at monitere udrådningsprocessens effektivitet, substrater og produkt karakteristika.....	5
3. Guide til monitoring af parametre og metoder	10
4. Generelle Anlægsparameters (design, drift og ydeevne)	21
5. Måleprincipper og teknikker benyttet til monitoring af rådnetanke og bio-metan anlæg	23
6. Konklusion.....	26
7. Referencer.....	28

Ansvarsfraskrivelse:

Alene forfatterne er ansvarlige for indholdet i denne rapport. Indholdet giver ikke nødvendigvis et billede af holdningerne i den Europæiske Union. Hverken Executive Agency for Competitiveness and Innovation eller European Commission er ansvarlig for udnyttelse af information, der er indeholdt i rapporten.

Indholdet i denne rapport er fremført i god tillid og til et bredt publikum, og med indholdets natur, den store variation af teknologier, substrater, behandlingsmetoder og afsætningsmarkeder er mange forhold generaliserede. Forfatterne er ikke ansvarlige, så længe lov tillader det, for nogen omkostninger eller tab inklusive specielle, tilfældige, følgeskader eller tilsvarende skader, der direkte eller indirekte måtte opstå i forbindelse med udnyttelse af rapporten eller dens indhold. Rapportens beskrivelser af kommercielle produkter eller teknikker, kilderne hertil eller deres brug i forbindelse med det rapporterede her skal ikke udlægges som aktuel eller underforstået anerkendelse af teknologi, produkter eller serviceydelser.

Copyright:

Denne rapport må hverken helt eller delvist kopieres uden forfatterens godkendelse. Sammendrag rapporten (pakke 5.2) er oversat til 8 andre europæiske sprog. Den komplette rapport er kun tilgængelig på engelsk.

University of Glamorgan, 2012 Copyrights for alle fotos i denne rapport.

1. Rapportens formål

Denne rapport forklarer vigtigheden og virkningen af implementering af passende monitoring på Anaerob Digestion (AD - anaerob udrådning) / rådnetankanlæg og bio-metan anlæg. Den indeholder et review af talrige parameter samt analyse teknikker og monitorings muligheder, der er relevante for selve den anaerobe udrådningsproces, substratet der skal behandles samt for de resulterende produkter, fermentat og biogas. Rapporten indeholder også monitoringsinformation vedrørende rensning af biogas og biogas opgradering proces teknologier. Det ligger udenfor formålet med rapporten at gennemgå styringsmetoder, systemer eller forhold i øvrigt, der kan udnyttes på rådnetankanlæg og bio-metan anlæg.

Nærværende review og guide giver general information om nøgleparametre, der kan monitoreres således, at et rådnetankanlæg kan kontrolleres med følgende formål:

- a) At tillade en hvis fleksibilitet som varierende hydraulisk opholdstid og organisk belastning med substrat
- b) At tillade nogen variation i typer af substrat tilført
- c) At behandle affald effektivt (når substrat er klassificeret som affald)
- d) At maksimere omsætning af organisk stof til biogas / bio-metan
- e) At bibringe en god kvalitet fermentat og biogas / bio-metan
- f) At opnå adgang til mere specifik og / eller krævende fermentat anvendelse
- g) At opnå adgang til andre markeder for produceret bio-metan (herunder til kørekøjer og gas net)
- h) At reducere udetid for anlæg
- i) At reducere anlægsstørrelse og driftsomkostninger, herunder behov for tilsats af kemiske stoffer og opvarmning
- j) At forøge de miljømæssige fordele med biogasanlæg samt reducere påvirkninger.

Ultimativt vil disse fordele medvirke til forbedring af økonomien for rådnetank- og bio-metan anlæg og legitimere teknologierne ved:

- a) At være teknologisk duelige i tid
- b) At bibringe operationel fleksibilitet
- c) At medvirke til, at sådanne anlæg betragtes som godt naboskab
- d) At bibringe fordele i miljømæssig og økonomisk forstand
- e) At modsvare forventninger fra regering og offentlighed

Dette vil også medvirke til, at oplæg til nye biogasproducerende anlæg og bio-metan anlæg lettere opnår forståelse fra offentlighed og planlæggere og opnår videregående eller fortsat støtte fra regeringsside og finansielle parter.

2. Behov for at monitorere udrådningens effektivitet, substrater og produkt karakteristika

Anaerob udrådning er en biokemisk proces, der finder sted i lukkede systemer, hvor organisk stof bliver mineraliseret til hovedsagelig metan og kulstofdioxid ved en række reaktioner, der udføres af forskellige grupper af bakterier (figur 1). Processens forskellige trin kan finde sted i ét lukket system eller tankanlæg (ofte kaldet en reaktor eller rådnetank) eller i separate tankanlæg. Produktet af den anaerobe proces er metan, der kan benyttes til produktion af vedvarende energi, herunder el og / eller varme eller kan benyttes som drivmiddel til køretøjer. Desuden produceres et fermentat, der skulle have et lavt indhold af let omsætteligt organisk stof samt indeholde værdifulde næringsstoffer. Udrådning af affald med produktion af biogas er en miljøvenlig teknologi. De miljømæssige fordele inkluderer affaldsbehandling, reduktion af forurening, produktion af vedvarende energi og forbedrede landbrugsmæssige forhold ved genbrug af næringsstoffer. Udvidet brug af og fordele opnået med fermentatet og dets indhold af næringsstoffer er nu emne for videregående undersøgelser og udvikling. Der er registreret over 8.000 rådnetanksanlæg i verden (når der ses bort fra mikroanlæg). Europa har nu den største installerede kapacitet og udviklingen fortsætter i nogle regioner med specielt fokus på affaldsbehandling og ofte også bioenergi produktion. Ifølge IEA er der verden over etableret mere end 170 bio-metan anlæg, der på en række forskellige substrater producerer brændstof til køretøjer eller gas til gasnet.

Hydrolyse / de-polymerisering

Komplekst organisk stof, polymerer (kulhydrater, proteiner and fedtstoffer) nedbrydes til mindre molekyler

Acidogenese / fermentering / forsyning

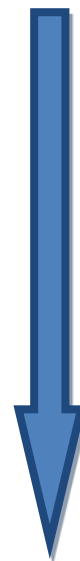
Produktion af brint, CO₂ and flygtige fede syrer (VFA'er)

Acetogenese / eddikesyre produktion

Alkoholer og VFA'er (>C₂) konverteres til eddikesyre, brint and CO₂; brint og CO₂ kan også blive konverteret til eddikesyre

Metanogenese / metan produktion

Eddikesyre, brint og CO₂ konverteres til metan



Figur 1 – Forsimpleret diagram visende de enkelte trin i den anaerobe nedbrydningsproces

Anaerob udrådning er en alsidig proces, der kan medvirke til nedbrydning af en lang række substrater, rækkende fra affald og spildevand med kommunal, industriel og landbrugsmæssig side til husdyrgødning og energiafgrøder. Denne alsidighed bibringer imidlertid nogle udfordringer. Ofte skal processen / anlæg kunne håndtere og behandle substrater med meget forskellige fysiske og kemiske karakteristika, der endog kan variere på døgn eller ugebasis og som også kan rumme komponenter, der er hæmmende for processen.

Ud over muligheden for at udnytte en bred vifte af substrater (biomasse) er anaerob udrådning kendetegnet ved at være komplekse og dynamiske systemer, hvor mekaniske, mikrobiologiske og fysisk-kemiske forhold er tæt sammenkoblede og i sidste ende påvirker processens effektivitet. Forskning, der involverer mikrobiologer, kemikere, ingeniører og matematikere har over de seneste 4 årtier resulteret i en opdatering af de fundamentale forhold, der kendetegner den anaerobe proces samt en højere grad af påskønnelse af den kompleksitet og diversitet af processen, der i sidste ende leveres af konkurrencedygtige bakterier og ærkebakterier. Imidlertid er der endnu ikke opnået fuld forståelse af de komplekse reaktioner og de aktionsreaktions forhold, der kendetegner de overordnede forhold i processen. Proces stabilitet afhænger af kritiske balancer mellem bakteriegrupper med symbiotisk vækst for de metaboliske bakteriegrupper, hvilket vil sige bakterier og ærkebakterier, syredannende bakterier, eddikesyredannende bakterier og de metanproducerende bakterier, methanogener.

Selv om den anaerobe proces i sin nature er stabil, kan der fås ustabilitet i forbindelse med forskellige former for afvigelser, eksempelvis:

- a) Hydraulisk eller organisk overbelastning
- b) Tilstedeværelse af toksiske eller hæmmende stoffer, der kan påvirke udrådningen på grund af påvirkning på aktive mikroorganismer eller en reduktion af enzymaktiviteten
- c) Mangel på næringsstoffer eller sporstoffer, der er nødvendige for mikroorganismernes vækst og vedligeholdelse
- d) Afvigelser fra optimale temperaturforhold.

Det er vigtigt at forstå, at hvert af de mikrobielle trin har deres egne særlige karakteristika, hvor hydrolysen og metandannelsen typisk er de, der giver de største udfordringer. Hydrolysen er vist at være et rate-begrænsende trin for udrådning af partikelholdige substrater samt visse fedtstoffer. Den overordnede hydrolyse-rate er afhængig af partikelstørrelse og -form, overflade areal, koncentration af mikroorganismer, enzym produktion og adsorption. Metandannelsen er typisk det rate-begrænsende trin for let-omsættelige stoffer, hvor korte hydrauliske opholdstider potentielt medvirker til et netto tab af mikrober fra rådnetanke idet de metandannende bakterier

har en langsom vækst. En rådnetank lider ikke nødvendigvis under begrænsninger af én gruppe mikrober. Faktisk er det gældende for mange systemer, at begrænsningerne kan hidrøre fra mere end én gruppe mikrober og derfor være påvirkede på mere end ét nedbrydningsstrin.

Spanjers og van Lier (2006) gennemgik omkring 400 fuld-skala udrådningstanke, hovedsagelig til spildevandsbehandling og fandt, at på 95% af anlæggene var in-line instrumenteringen begrænset til registrering af pH, temperatur, væske-flow, biogas-flow, niveau og tryk. Madsen *et al.* (2011) har også rapporteret, at driften af mange anlæg er baseret på ex-situ analyser og kun in-line sensorer som pH, redox potentiale og gas produktionsrater. Indtil videre er det også den opfattelse, forfatterne til denne rapport har. Imidlertid synes industrien at udvise mere motivation til at opnå en forbedret forståelse for proces og monitere mere i dybden, og selv teknikker til fjernovervågning implementeres og er kendt i denne type sammenhænge.

I mange tilfælde undgås proces ubalance ved at anlæg drives ved belastning langt under maksimum kapaciteten, eksempelvis ved lav substrat tilførsel. Dette medvirker imidlertid til, at anlæggene er større end nødvendigt, hvorved også kapital- og driftsomkostninger forøges, så at sige med indbygget ineffektivitet. Det er vigtigt i stedet for at se processen som en mikrobielt tildannet proces, der behøver organisk stof for at virke og hvor mikroberne kun eller bedst vokser under passende forhold. Således behøver underbelastning og lang behandlingstid i rådnetanke ikke nødvendigvis at give et forbedret behandlingsresultat og højere omsætning af organisk stof til biogas, idet den mikrobielle kultur også vil være begrænset af begrænsede substratmængder. Mikrobiologien for udrådningprocessen er endnu mere kompleks end forholdet mellem substrat og mikroorganismer, idet mikrober med højere effektivitet og omsætningsrater for substrat kun vil blive opformeret, hvis systemets belastning er forholdsvis høj eller hvis rådnetanken lider under visse begrænsninger. Dette gælder eksempelvis metanbakterier af *Methanosarcina sp.* (e.g. De Vrieze *et al.*, 2012). Til trods for høj omsætningsrate vil rådnetanke, der alene er domineret af disse bakteriearter producere et fermentat med reduceret kvalitet, og der kan være behov for et efterpoleringstrin (anaerobt eller anden type), idet fermentatet kan indeholde relativt høje koncentrationer af flygtige fedtsyrer og lugtstoffer, der kan forårsage phyto-toksicitet i forbindelse med udnyttelse på landbrugsjord.

Også forbehandling giver betydelige påvirkninger (eksempelvis forlænger forhold eller mere komplekse forbehandling) der udføres for at forøge hydrolyse-rater for substrater, og disse kan have direkte indvirkning på eksempelvis pH, ammonium og niveauet af flygtige fede syrer, når substratet tilføres rådnetank. Der ud over er der en række andre faktorer, der påvirker valg af driftsform for rådnetanke, og valg af procestype er i særlig grad en vigtig faktor. For eksempel er high-rate rådnetanke såsom Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) anlæg normalt designet til substrater med et lavt niveau af partikler og fedt, og kan normalt fungere ved højere organiske belastninger og reducerede hydrauliske opholdstider end de mere konventionelle

Continuously Stirred Tank Reactors (CSTRs), rådnetanke, hvor indholdet hele tiden opblandes. Dette skyldes deres evne til at tilbageholde mikroorganismer i rådnetanken som slam / granuler, der i helt betydeligt omfang reducerer udvaskningen af mikroberne. Desuden giver den granulære struktur en hvis beskyttelse af de følsomme metanbakterier, idet de her normalt forefindes i granulernes midte.

En betragtelig mængde litteratur omhandler kendte hæmmende forhold for rådnetankssystemer, herunder metoder til at optimere systemernes effektivitet (for eksempel Chen *et al.*, 2008; Fricke *et al.*, 2006). Desuden er det således, at udover substratvariationer og en meget kompliceret biokemisk proces, kan en række reaktioner bibringe såvel antagonistiske som synergistiske effekter. På denne måde kan disse mange faktorer gøre systemernes ydeevne vanskelige at forudsige. Sådanne komplekse effekter kan eksempelvis opstå under tilstedeværelse af forskellige metaller eller ammoniak, der tilsammen gør det vanskeligt at vurdere de aktuelle størrelser for hvilke elementer, der er til stede i for høje koncentrationer og hvilke, der er behov for. Andre vigtige faktorer kan være biotilgængelighed af visse komponenter, eksempelvis essentielle spor mineraler, der ved analyse kan ses at være til stede. Imidlertid er det vanskeligt at definere biotilgængeligheden for mikroberne af sådanne sporstoffer, når deres tilgængelighed kan være påvirket af stoffer i substratet tilført (for eksempel kontrol af alkalinitet eller svovl / svovlbrinte ved tilførsel af kemikalier) der kan ændre sådanne essentielle elementers tilgængelighed, eksempelvis ved udfældning.

Alle sådanne komplekse forhold og afvigelser taget i betragtning er der imidlertid alternativer til at søge at reducere deres indvirkning ved overdimensionering af det anaerobe procesanlæg. Disse alternativer inkluderer blandt andet aktiv og løbende monitoring af substrat, udrådningssproces og produkter. Forståelse af den anaerobe proces, effektivitet, kapacitet og trends er nøgleforhold, der er nødvendige for at operatører kan foretage passende kontrol tiltag. Sådanne tiltag kan relatere til varierende substrater, tilførsel af pH buffer, næringssalte eller sporstoffer, ændring af organisk eller hydraulisk belastning, introduktion af substrat forbehandling eller fermentat efter-behandling eller midlertidig sidestillet proces til reduktion af ammoniak indhold blandt andet.

Det er vigtigt, at det videnskabelige arbejde fortsættes, således at der opbygges videregående forståelse af den anaerobe proces samt at teknikker til monitoring og styring af rådnetanke optimeres og omkostningerne hertil reduceres. Det er ligeledes vigtigt, at videre forståelse ikke kun opnås under laboratorieforhold, men også under forhold som i industrien og fuld skala i øvrigt, hvor variationer i driftsforholdene generelt er større og hvor monitoring og styringsmetoder er underlagt mere stress og derfor gør det muligt i højere udstrækning at forstå aktuelle reaktions komplekser.

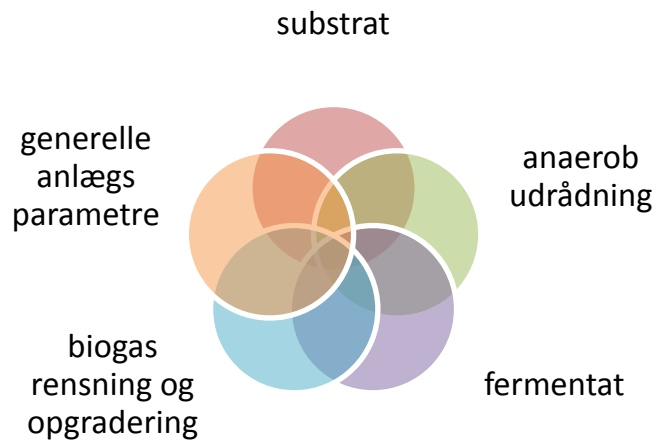
Monitering og styringsfunktioner har også deres begrænsninger. Det er vigtigt at forstå, at anlæg ikke i alle sammenhænge kan drives på forskellige substrater eller drives under forhold, der afviger fra de specificerede med mindre der foretages betydelige designændringer. Sådanne ændringer tager tid, kan medvirke til påvirkning af de normale procesforhold ud over at måtte kræve betydelige investeringer.

Ud over at udføre monitering og styring, der medvirker til forbedret rådnetanksfunktion og effektivitet, kan det også være fordelagtigt at monitere fermentat kvalitet for at imødekomme eksempelvis udledningskrav eller andre slutbruger krav eller behov.

På same måde må biogas og bio-metan kvaliteten monitoreres kontinuerligt eller i det mindste tit. Det er klart, at bio-metan kvaliteten til enhver tid skal garanteres, og således er det nødvendigt at lagre relevante data for kvalitet og kvantitet, afhængigt af hvor og hvortil forbruget af bio-metan finder sted. Det må forventes, at de mest restriktive krav ligger i forbindelse med bio-metan til naturgasnet. Ligeledes er der behov for monitering ved højtrykslagring af bio-metan i forbindelse med udnyttelse til køretøjer. Ud over de lovgivne krav, skal der monitoreres og lagres data for biogas opgradering, således at de senere kan kontrolleres og fortolkes. Kravene her vil afhænge af den givne opgraderingsmetode. Monitering er ikke kun et ønske i forbindelse med idriftsættelse af anlæg, men også i forbindelse med den fortløbende drift. Moniteringsdata er nyttige og vil vise afvigelser i ydeevne for anlægget såvel i øjeblikket som over anlæggets levetid. Sådanne data kan også medvirke til forståelse af anlægs ydeevne, optimering, afhjælpninger og kortlægning af begrænsninger, herunder afhjælpning af flaskehalse. Sluttelig vil et passende sæt driftsdata kunne forudsige behov for vedligehold og fastlægge hensigtsmæssige servicerings programmer (for eksempel servicering af maskinkomponenter, hjælpematerialer, tilførsel af forbrugsstoffer og kemikalier), og således medvirke til at maksimere den fortsatte effektive drift.

3. Guide til monitorering af parametre og metoder

I hvert enkelt trin i den anaerobe proces, i rådnetanksanlæg og bio-metan opgraderingsanlæg er der en række parametre, der kan monitoreres (figur 2). Forfatterne til dette review har erfaring fra litteratur og praktisk drift inklusive forskning i rådnetanksystemer og bio-metan anlæg dækkende hele Europa.



Figur 2 – Interaktion mellem de forskellige trin i rådnetanksanlæg og bio-metan anlæg

Der bør skelnes mellem parametrene i forhold til procesmatrix og de enkelte trin i rådnetanke og bio-metan anlæg, hvor de kan monitoreres (figur 3). Hovedrapporten i forbindelse med denne opgave 5.2 inkluderer en mere fyldestgørende forklaring til de enkelte parametre. Kombinationen af et antal af de givne parameter vil bibringe en god forståelse for driften af anlæg og vil give et antal fordele inklusive mulig optimering af biogas og bio-metan produktionen. Ingen anlæg behøver monitorere alle parametre. Imidlertid kan der være behov for monitorering af yderligere parameter, hvilket naturligvis vil afhænge af særlige forhold.

Når der ses specielt på rådnetanksanlæg, substrater og fermentat er der ikke opsat et standard monitoringsprogram ved forskningsgruppen eller operatørerne i denne sammenhæng. Det vil sige, at der ikke er anerkendt et bedste valg af parametre til monitorering, og kun for få anlæg er givne parametres optimale niveau og koncentrationer blevet defineret. Ligeledes er der ikke defineret optimum eller minimum frekvens for analyser og bestemmelser. Alt andet lige vil det være fordelagtigt at foretage analyser og bestemmelser ofte, men dette bør også ses overfor forøgede omkostninger til og belastning på ansatte, eksterne analyse laboratorier, investering i sensorer til in-line eller ex-situ analyser, sikkerhed for kalibrering samt vedligehold. Når et monitorings program er implementeret, skal driftspersonalet også kunne fortolke resultater og /

eller biokemiske analyseresultater, korrelere dem til den aktuelle drift samt identificere mulig interferens for at kunne konkludere vedrørende anlæggets procesmæssige status, således at videregående kontrol og / eller afhjælpende handlinger kan iværksættes. Endelig skal sådanne udfordringer kunne løses hurtigt for at undgå eventuelle procesmæssige nedbrud.

Moniteringsprogrammer for bio-metan produktion er delvist blevet installeret og har vist sig operationelle. Imidlertid varierer kravene betydeligt de enkelte lande imellem. Typisk er bio-metan kvalitetskrav veldefinerede, herunder krav til uønskede stoffer såsom kultveilde, svovlbrinte, total svovl, ammoniak, ilt og fugtighed. Metan nævnes typisk ikke direkte, og gas kvalitet specificeres gerne som brændværdi, wobbe indeks, densitet eller relative densitet. Moniteringsfrekvens og krav til data opsamling kan variere, og parameter behøver ikke altid monitoreres løbende (intervaller på 15 minutter er ofte tilstrækkeligt). Under alle omstændigheder er det normalt, at monitoring skal finde sted i henhold til gældende lovgivning og krav fra driftsherren for naturgasnettet.

Rådnetankes processtatus og funktion kan monitoreres ved at bestemme substratomsætning (Chemical Oxygen Demand (COD), tørstof (TS), eller organisk tørstof (VS) nedbrydning), akkumulering af mellemprodukter (flygtige fede syrer (VFA), pH, alkalinitet, H₂, CO), og produktion af slutprodukter (gas produktionshastighed, CH₄, CO₂). I korthed har de enkelte VFA'er været vurderet at være værdifulde som monitoringsparametre for rådnetanksanlæg. pH har vist sig at give et forsinket respons og ekstrem variation i partialtrykket for H₂ giver i mange sammenhænge fortolkningsproblemer. Andre parametre, der er relateret til bakteriemassen, (tæthed og diversitet af bakteriepopulationen) og mikrobiel aktivitet kan monitoreres. På det seneste har sådanne mikrobielle analyser opnået skærpet interesse. Figur 4 illustrerer mulige monitoringsaspekter, der kan benyttes til at vurdere funktionen af rådnetanke og mange af disse parameter er yderligere beskrevet i den komplette rapport til denne opgave 5.2.



Figure 3 – Monitoringsparametre for hvert trin i procesmatrix, der er relevante for drift af rådnetanksanlæg

Figure 4 – Tests der karakteriserer de 3 faser i rådnetanksanlæg

Figur 5 introducerer terminologien, der typisk benyttes til at definere, hvorledes monitoring og data opsamling kan finde sted, i denne sammenhæng eksemplificeret som en monitorings matrix for en rådnetank.

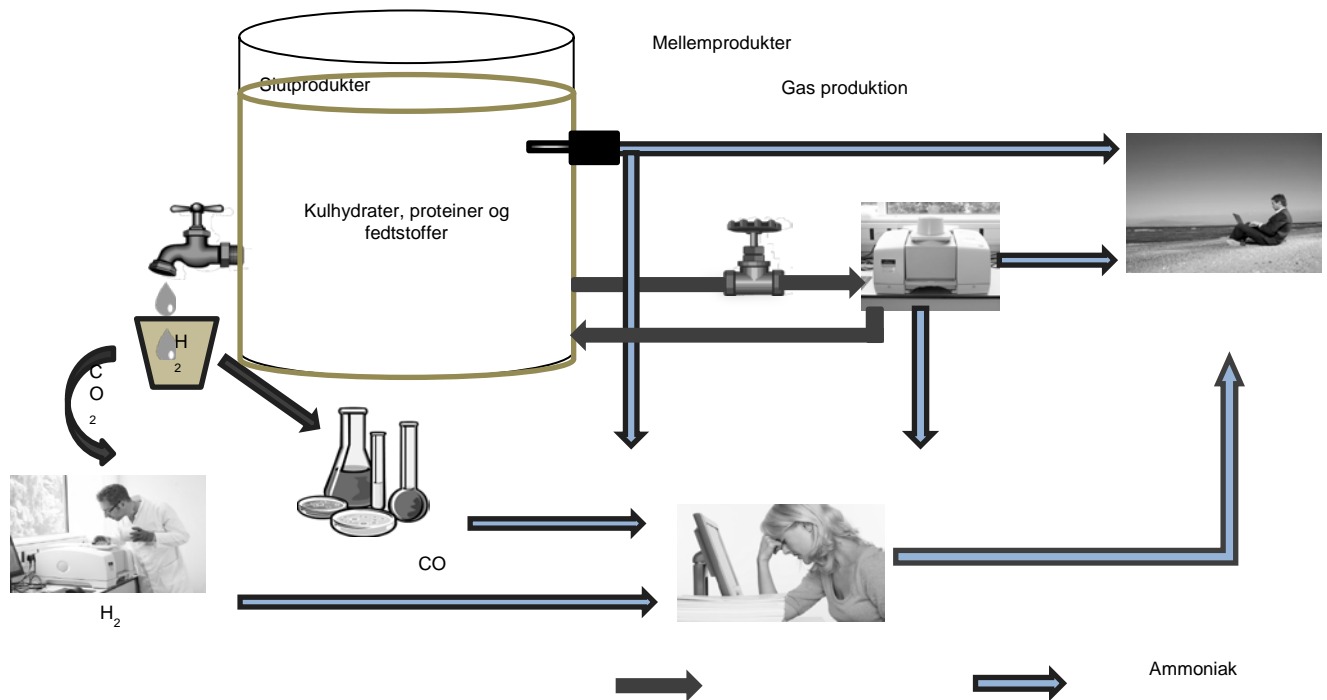


Figure 5 – Koncept og terminologi til definering af monitoring og data opsamlings metoder

Succes med proces monitoring afhænger også af passende placering af sensorer og passende dataopsamling. Dette vil være tilfældet for ethvert trin i rådnetanksanlæg, der udpræget udviser uensartet funktion samt for prøver, hvor mellemlagring kan påvirke prøvens karakteristika, hvilket generelt er tilfældet for rådnetanke. Med in-situ monitoring og til trods for at sensorer og sonder her er mindst følsomme overfor variation ved prøveudtagning / ikke repræsentative prøver (når rådnetanksindholdet er effektivt opblandet), lider resultaterne ofte under problemer med fouling, i særlig grad for sensorer og sonder i kontakt med væske / faststof blandinger. Et andet vigtigt aspekt er placering af sensor eller placering, hvorfra prøve udtages. Fouling finder normalt sted på sensorer, der er placeret in-situ eller in-line i kontakt med væske / faststof

blandinger, hvorfor rensnings- og vedligeholdelses procedurer er nødvendige med mindre enheden er selvrensende. Sensorer og sonder kan være placerede på steder, hvor rådnetanksindholdet er utilstrækkeligt opblandet, eller hvor der kan ske aflejring af aske eller ved væskefasen, hvor skum eller udkrystallisering kan interferere med aflæsninger, selvfølgelig med mindre sensorens eller sondens funktion netop er at angive sådanne forhold. Af disse grunde behøver placering af prøveudtag, sonder og sensorer at være nøje vurderet på forhånd, herunder indgå som et element allerede i designfasen. Netop alle sådanne forhold gør prøveudtag fra flere steder på rådnetanke, multi-parameter og hyppig monitoring til en god strategi at følge, der i sidste ende kan kompensere for variation i prøver udtaget, sensor og sonde fouling og andre kilder til interferens.

Ideelt monitoreres in-situ eller in-line, automatisk og udført kontinuerligt og som giver real-time data. Dette skulle resultere i minimal interferens og give tidlige indikationer af ubalance og af betydningsfulde ændringer af den mikrobielle status og ydeevne for systemet. Dette tillader også umiddelbar afhjælpning endog på afstand. Endnu desværre, er det således, at ikke alle vigtige parametre automatisk kan monitoreres kontinuerligt in-situ eller in-line på real-time niveau med data til rådighed on-line. Tekniske vanskeligheder samt omkostninger gør dette uhensigtsmæssigt; i nogle tilfælde vil anskaffelse og drift af sensorer, sonder eller analyser være relativt dyrt og i nogle sammenhænge er der behov for forbehandling af en prøve for at undgå eksempelvis fouling, i særlig grad for væsker med partikelindhold.

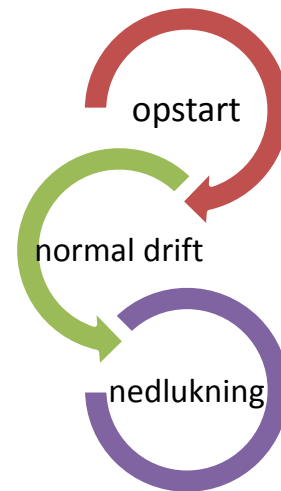
Ved valg af metode til bestemmelse af en parameter er det vigtigt at være opmærksom på behovet for nøjagtighed ved bestemmelsen samt instrumentets kvalitet. Instrumenter, der benyttes i sådanne sammenhænge behøver ofte regelmæssigt vedligehold og kalibrering. Målemetode og mulige interferenser er vigtige forhold at vurdere på forhånd, og instrumenter, sensorer eller sonder bør kun anvendes i miljøer, de er designet til.

Prøveudtagnings metode påvirker mest ex-situ analyser såvel som in-line monitoring (mest ved intermitterende monitoring) da repræsentativitet og prøvens alder og / eller konservering kan være svær at kontrollere / garantere. Desuden vil intermitterende tilførsel af substrat over døgnet eller over ugen afstedkomme variation i monitoring af rådnetank indhold, biogas produktion og sammensætning over perioden. Hvis en rådnetank eksempelvis ikke tilføres substrat over en weekend, eller tilførslen er reduceret vil rådnetankens indhold, biogas produktion og sammensætning variere dagene imellem på grund af forskel i belastning med substrat.

Intermitterende eller ineffektiv opblanding af rådnetanksindhold kan også bibringe uens forhold i rådnetank. Dette kan således indvirke på homogeniteten af prøver. Udtagne prøver kan afgive

gasser som CO₂, hvilket påvirker pH og alkalinitet. Plast beholdere kan absorbere små mængder af VFA'er og andre komponenter.

For at opsummere skal baggrunden for ikke standardmæssig monitoring, med hensyn til valg af parameter og analysefrekvens overvejende ses i lyset af kompleksiteten af den anaerobe proces og den store variation i substrater benyttet, forskellige typer rådnetanke, driftsforhold og mål med anlæg. Forskellige monitoringsforhold er nødvendige ved forskellige driftsforhold for et anlæg. Monitoringsgrundlaget for et rådnetanksanlæg kan opdeles i 3 faser: 1) opstart, 2) normal drift, hvilket inkluderer 'quasi eller næsten steady state' ligesom midlertidige driftsforhold samt 3) nedlukning.

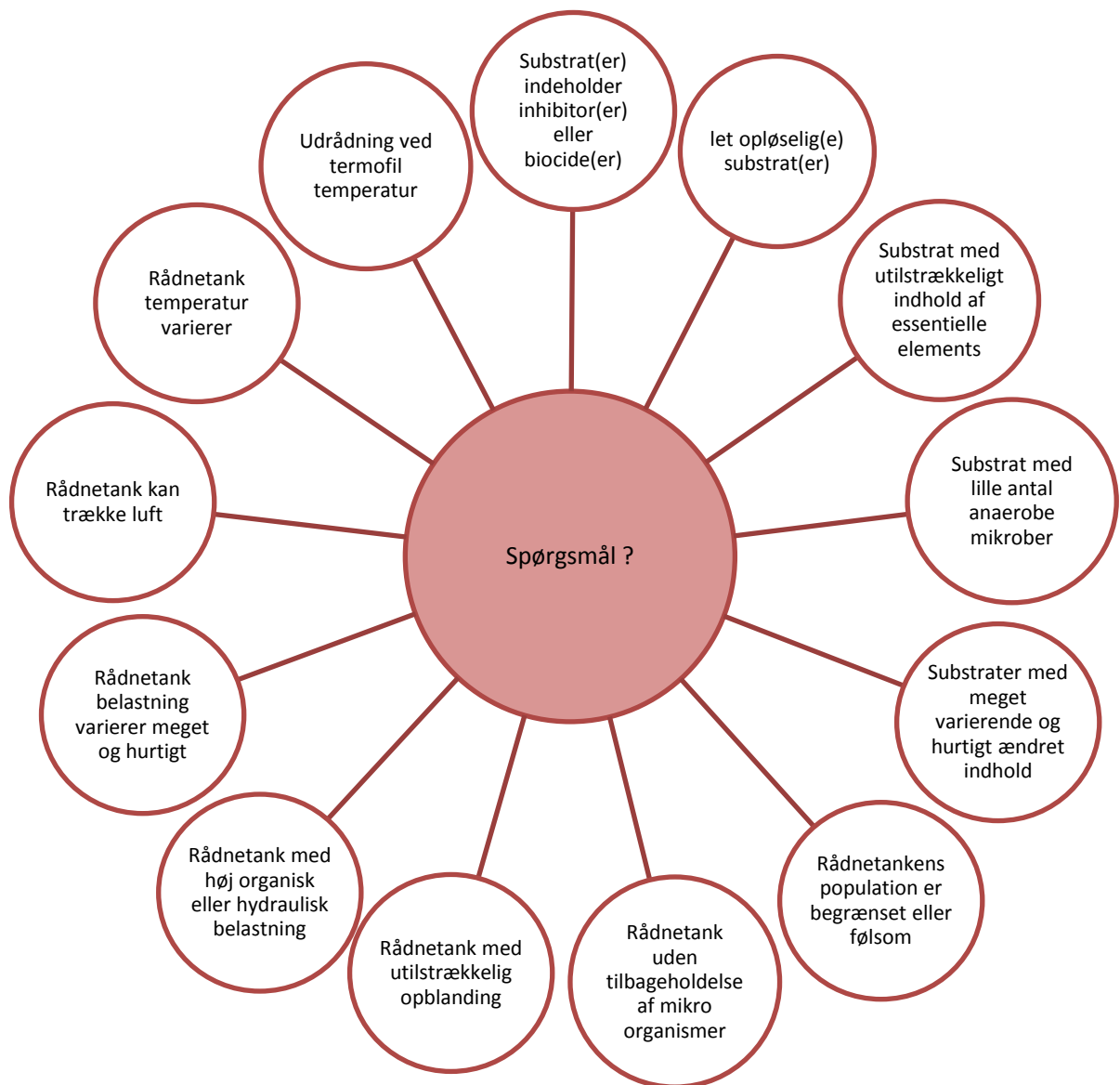


Hver fase i denne sammenhæng stiller specifikke krav til monitoring. Monitoringsfrekvensen kan være reduceret under normal drift ved 'næsten steady state forhold' eksempelvis for et antal biogas anlæg der drives ensartet på energiafgrøder. Dog er monitoringsbehovet større og med et bredere krav til antallet af parametre, der monitoreres i forbindelse med opstart (i særlig grad når podemateriale er fra rådnetanke, der drives på anden vis), og i forbindelse med midlertidige eller varierende driftsforhold såsom for rådnetanke, der tilføres bioaffald, hvor variation i affaldets sammensætning over tid er reglen.

Det er ligeledes vigtigt at forstå, at det kræver tid for rådnetanke at tilpasse sig ændringer i medfør af substrat eller ændringer i driftsforhold. Tilpasning af rådnetanke kan tage op til 2 til 3 hydrauliske opholdstider (HRT'er), hvilket for nogle typer rådnetanke svarer til måneder. Under sådanne forhold bør monitoring ske ret tit (eksempelvis bør en række parameter monitoreres et par gange ugentligt). Her vil parameter trends blive vigtigere end begrænsninger, der er afstedkommet af ændringerne. Der kan opstå forsinkelser i udvikling / produktion af de komponenter, der er resultatet af sub-optimal rådnetanksfunktion, idet baggrunden for komponentens dannelse og stigning i koncentration kan være kompleks. Dette kan være tilfældet for eksempel ved opbygning af hæmmende koncentrationer af let metal ioner såsom natrium, kalcium, kalium, eller ammonium, der først efter nogen tid måtte nå koncentrationer, der er inhiberende. Her er trends i forøgelsen af koncentrationen nødvendige for at godtgøre, at der kan opstå problemer på et tidspunkt. Desuden er det ikke nødvendigvis således, at der kommer et nedbrud med tiden. Faktisk vil nogle komponenter indledningsvist kunne initiere hæmmende forhold og hæmning, men efterfølgende reduceret komponenttilførsel og / eller reduceret belastning i øvrigt kan der opnås mikrobiel tilvænnning, således at rådnetanksanlæg

kan drives med belastning med visse koncentrationer af sådanne komponenter under de givne driftsforhold.

Det er vanskeligt at generalisere hvilke parametre og passende monitoringsfrekvenser, der sikrer stabil rådnetanksdrift netop på baggrund af de meget forskelligartede faktorer, der er angivet ovenfor. Operatører bør vurdere et antal driftsdata jævnligt. Figur 5 er resultatet af et antal spørgsmål, operatører jævnligt bør besvare. Jo oftere svaret vil være 'ja' jo mere omfattende bør et monitoringsprogram være for at sikre stabil drift af et rådnetanksanlæg.



Figur 5 – Nogle spørgsmål operatører jævnligt bør besvare

Her ud over er der i denne sammenhæng ydet en indsats for at specificere tre brede klassificeringer for rådnetanks drift, der hver for sig angiver risikoniveauer og for hvilke der foreslås monitorings indikatorer. I alle tilfælde bør temperaturen monitoreres og holdes indenfor et givet optimalt niveau (enten mesofilt eller thermofilt) og luft indtrængning bør undgås. Podning af en rådnetank bør finde sted med masse fra velfungerende rådnetank(e) ideelt underlagt tilsvarende driftsforhold for at sikre velfungerende drift og en god mikrobiel diversitet. I nogle tilfælde kan mere end en type podemasse blandes for at sikre den mikrobielle diversitet. Inert materiale bør i størst mulig udstrækning udskilles før tilførsel til rådnetank eller kunne fjernes på passende vis. I modsat fald vil rådnetanken med tiden akkumulere sand og udfældninger, der reducerer det aktive volumen og dermed ændrer opholdstid og opblanding.

Klasse A – Optimerede rådnetanke, der drives under steady state forhold – Lav Risiko

Monitoringskravet kan være lavt hvad angår antallet af parameter og med reduceret frekvens, når rådnetanksanlæg:

- er i optimal drift og ikke påvirket ved maksimal eller højere organisk eller hydraulisk belastning for netop den pågældende type rådnetank og substrat,
- drives under tilnærmelsesvis steady state forhold igennem lange perioder, altså drives med tilnærmelsesvist uændrede substrater og belastninger, og
- når driften er uden inhiberende forhold (eksempelvis næringssalte og metaller er til stede i tilstrækkelige koncentrationer men ikke i overskud, der ikke tilføres biocider og buffer kapaciteten er tilstrækkelig).

Under sådanne forhold kan biogasproduktion og biogassammensætning bestemmes kontinuerligt eller regelmæssigt og støttes af pH (den fulde rapport beskriver begrænsningerne for denne parameter), bikarbonat alkalinitet og i det mindste den totale koncentration af VFA'er. Dette vil være tilstrækkeligt til vurdering af rådnetank funktionen. Der ud over kan også substrat karakteriseres på ugebasis ved tørstof og glødetab (TS og VS) for at kontrollere belastning på rådnetanken. Andre parameter kan bestemmes med længere intervaller imellem, eksempelvis fermentat indholdsstoffer / kvalitet. Der kan kræves yderligere analyser, hvis funktionen ændrer sig indikeret ved VFA og alkalinitet niveauer, ændring i biogasproduktionen eller dens sammensætning eller ændringer i substrat eller fermentat sammensætningen. Sådant et monitoringsprogram forventes at kunne forhindre alvorlige driftsproblemer.

Klasse B – Rådnetanksanlæg der drives med varierende driftsforhold – Medium Risiko

Følgende monitoringskrav findes at være passende når rådnetanke ikke belastes ud over den organiske eller hydrauliske maksimale belastning for netop denne type rådnetanke og substrat tilført, men drives med perioder med midlertidigt belastende forhold såsom variation i typen af substrat samt organisk og hydraulisk belastning. For at optimere driften ved belastning og potentielle inhibitorer, bør substratet analyseres som minimum en gang ugentligt for tørstof og glødetab (TS og VS) og oftere ved andre betydelige ændringer af substratet. Ved hver betydelig ændring af substratet bør følgende analyser foretages:

- C:N:P:S forhold
- metaller inklusive calcium, natrium og kalium afhængigt af substrat type.

Monitoring af biogas flowrate og gas sammensætning bør finde sted løbende og rådnetanksindholdet monitoreret cirka 3 gange per uge for parametre såsom alkalinitet, individuelle VFA'er (her eddikesyre, propionsyre, smørsyre, iso-smørsyre, valerianesyre og iso-valerianesyre), pH. Visse andre parametre i rådnetanken sådan som spormineraler, ammoniak og nogle alkali (jord) metaller bør bestemmes afhængigt af substratet, og med passende frekvens. Hvis effektiviteten viser sig at være sub-optimal, kan der være behov for yderligere analyser og hyppigere kontrol, således at nødvendige tiltag kan finde sted på en mere effektiv basis.

Klasse C – rådnetanksanlæg der drives ved maksimal belastning (inklusive "high rate" rådnetanke med lav hydraulisk opholdstid) med betydeligt varierende driftsforhold – Høj Risiko

Andre rådnetanksanlæg kræver mere stringent monitoring, eksempelvis rådnetanke, hvor en kombination af følgende driftsforhold finder sted:

- drives tæt ved den maksimale organiske belastning eller ved den minimale hydrauliske opholdstid i forhold til design specifikationer,
- forhold betinger, at under visse forhold kan der være mangel på essentielle næringsstoffer eller sporstoffer,
- der er potentiale for dannelse af inhiberende komponenter i substrat eller i rådnetank ved eksempelvis høje niveauer af alkali (jord) metaller, langkædede fedtsyrer, ammoniak eller visse biocider eksempelvis fra rengøringsmidler,
- når betydelige ændringer i substrat sammensætningen finder sted meget hurtigt.

I sådanne sammenhænge vil monitoring af en kombination af parametre, der relaterer til biogas, substrat(er) og fermentat være helt fundamental og det vil være fordelagtigt, hvis disse bestemmes løbende, kontinuerligt eller semi-kontinuerligt med høj frekvens, in-situ eller in-line med data til behandling næsten på real-time basis. Hvis ex-situ analyser eller hvis manuelle biokemiske analyser er nødvendige, bør de udføres med hurtig rapportering, således at kontrollerende tiltag kan foretages hurtigt. Ud over on-line monitoring af biogas flowrate, metan og H₂S indhold (afhængigt af substrat type), bør der som minimum foretages daglige analyser for parametre såsom organisk nedbrydningseffektivitet, alkalinitet, individuelle VFA'er, ammoniak og nogle alkali (jord) metaller (afhængigt af substrat). Hyppige bestemmelser af spormineraler behøves også. Desuden kan analyser af bakteriel enzym aktivitet og mikrobiel profil være fordelagtig, især hvis det ikke med andre metoder er muligt at klarlægge baggrunden for en reduktion af rådnetankens effektivitet. Flere typer "high rate" rådnetanke, der drives ved lav hydraulisk opholdstid (altså under 4 dage) med substrat med lavt indhold af partikler og med immobiliserede mikroorganismer vil normalt også være underlagt sådanne monitoringskrav, da der endog indenfor samme uge kan ske betydelig indvirkning på biokemi i rådnetanken. En mere afslappet holdning til monitoring i relation til hurtigt ændrede driftsforhold vil vise sig at begrænse sikker identifikation af baggrunden for sub-optimal drift eller nedbrud.

Aske

I sammenhænge, hvor anlæg ikke monitoreres og kontrolleres effektivt, må rådnetank effektiviteten forventes at være sub-optimal og, i værste fald, kan de biokemiske processer bryde ned. Behov for gen-podning og / eller genstart af rådnetanke vil forsinke effektiv drift i måneder. Eksempelvis vil en utilstrækkelig omsætning af organisk stof til biogas ikke kun reducere produktionen af energi. Der vil også fremkomme en forøget potentiel emission af gas

til omgivelserne fra efterfølgende lagring, hvilket bør undgås. Det er derfor af højeste vigtighed at have god forståelse for proces-status på driftsniveau.

Ud over multi-parameter og løbende monitoring er lagring af data og erfaringer i lang tid af høj værdi. Sådant information bør katalogiseres i en form, der let kan hentes og forstås af forskellige operatører. Normalt registreres ændringer i substrat, type og belastning såvel som driftsformer ikke nødvendigvis, hvorfor fortolkning af procesændringer og ydelsesdata kan blive vanskelig. Det kan være praktisk løbende at dybfryse prøver af substrat med videre på anlæg, hvor der ikke er løbende monitoring og erfaringsopsamling for at kunne forstå, hvorfor givne ændringer i anlæggets funktion finder sted.

En række forskere har gennemgået monitoringsparametre og sammenhænge for rådnetanksanlæg (e.g. Madsen *et al.*, 2011; Boe *et al.*, 2010, Monson *et al.*, 2007). Området udbygges stadig både hvad angår forståelse, proces biokemi og parameter respons samt hvad angår nye monitorings teknikker, forbedre robustheden og reducere prisen for forskellige monitorings teknikker. Det er derfor værdifuldt at følge den akademiske litteratur og firmaudgivelser samt søge nye monitorings teknikker / sensorer / analysatorer, der vil komme på markedet i fremtiden, der er mindre følsomme for interferens, fouling, fungere automatisk og angive data på real-time niveau.

4. Generelle Anlægsparameters (design, drift og ydeevne)

Rådnetkanksanlæg er normalt beskrevet ved en række parameter, der er oplyste nedenfor. Disse inkluderer design parametre, typisk drift og ydeevne samt årlig produktion og energiforbrug. Disse informationer opsummerer anlæggets profil, tillader sammenligning af forskellige anlæg og processer samt medvirker til at kortlægge energiforhold på overordnet niveau. Disse værdier fastlægges gerne i designfasen baseret på forventet ydeevne men kan også genvurderes, hvis substrat, ydeevne, procesfunktion og respons ændrer sig. Sådanne revisioner bør lagres med operatørens dokumentation. Informationen bibringer typisk et generelt overblik over ydeevne af rådnetanke og bio-metan anlæg. Informationen bør inkludere:

Endelig gassammensætning

Final gases

Gas sammensætning

In-situ monitor

Ex-situ analyse

Opsamling og logning af sådan information bør ses som god adfærd / god praksis, og en del af denne information er nødvendig for rapportering af miljø- og tilskudsforhold på lokalt eller statsligt niveau.

5. Måleprincipper og teknikker benyttet til monitorering af rådnetanke og bio-metan anlæg

Monitorering af rådnetanke og biogas behandlingsanlæg baseres på et antal analysemetoder og teknikker, der er udviklet til og som også benyttes i mange andre biokemiske, kemiske og ingeniørmæssige sammenhænge. Der er også udviklet særlige metoder og / eller metodologier, der specielt er rettet mod biogassystemer. Eksempelvis er prøve forberedelse nødvendig på grund af bio-fouling og det høje partikelindhold i prøver fra rådnetanke.

Måleprincipperne baserer sig på et begrænset antal fysiske, kemiske eller biologiske teknikker, eller kombinationer af sådanne. Nogle måleprincipper kan benyttes til mere end en parameter mens nogle parametre kan bestemmes med forskellige principper. Valget af måleprincip til monitorering kan baseres på pris, nøjagtighed, tidsforbrug, interferens samt behov for prøve forberedelse. Nedenfor er angivet nogle af de mest anvendte metoder til monitorering:

1. Gravimetri
 - Simpel metode til kvantificering af masse (i nogle sammenhænge kombineret med forbehandling, eksempelvis til fordampning af væske som ved TS analyse)
2. Kromatografi
 - separation af substanser ved deres affinitet overfor en fast og en flydende fase (baseret på relativ opløselighed, adsorption, størrelse eller ladning)
 - kan benyttes til væsker eller gasser og kan eksempelvis benyttes til at bestemme individuelle VFA'er og gas sammensætning
 - Teknikkerne er opdelt i gas kromatografi (GC), headspace gas kromatografi (HS-GC) og højtryks væske kromatografi (HP-LC)
3. Elektrokemi
 - Baseret på bestemmelse af elektrisk potentiale, strøm eller modstandsmålende elektroder
 - kan benyttes til væskeprøver for at bestemme pH, redox, konduktivitet samt et antal ioner såsom ammonium, calcium, forskellige tungmetaller, karbonat og sulfid. Er også benyttet til at bestemme opløst brint
4. Titrimetri
 - Bestemmelse af mængden af reagent der reagerer med den komponent, der skal bestemmes
 - kan benyttes til bestemmelse af alkalinitet og til indirekte måling af total VFA'er
5. Bio-sensorer
 - Kombinerer selektiviteten af biologiske substanser med mikro-elektronik og opto-elektronik
 - kan benyttes til bestemmelse af BOD, samt på det seneste også ammoniak og total VFA'er

6. Elektroniske næser til gas bestemmelse

- Brugen af elektroniske gas sensorer, de såkaldte "elektroniske næser" til indirekte bestemmelse af metabolisk aktivitet.
- Denne type sensorer forventes at have et lovende potentiale i forbindelse med biogasanlæg, da de er specifikke for givne stoffer. Imidlertid er væske-gas ligevægte i biogassammenhæng langsomme og begrænset i sin natur, hvorfor metoderne behøver yderligere udvikling.

7. Mikrobiologi og molekulære værktøjer

- Teknikker der kan benyttes til optælling af mikrober eller til DNA/RNA relaterede analyser; disse inkluderer mikroskopi, fluorescens, in-situ hybridisering (FISH), Denaturerings Gradient Gel Elektroforese (DGGE), real-time polymerase kæde reaktion (qPCR) og DNA sekvensering
- Disse teknikker er undergået signifikant udvikling i de seneste få år, og applikation synes at blive mere udbredt i biogas systemer i fremtiden

8. Spektrometri

- Bestemmelse af absorbans, transmission, diffusion, eller fluorescens af stråling / lys i det ultraviolette (UV), synlige (VIS) and infrarøde (IR) område
- molekulær spektroskopi bestemmer fedtstoffer, mens atom spektroskopi bestemmer komponenter i gas fase
- Fotometriske bestemmelser som COD, NH₄-N og VFA'er kan påvirkes af interferens fra partikler og prøvens naturlige farve
- Metodens anvendelighed til biogassystemer har været underlagt betydelig indsats i det seneste årti



Nogle af målemetoderne har eller kan principielt fremover teoretisk set blive benyttet til at konstruere instrumenter, der kan udføre in-line parameter bestemmelser i biogassystemer. Et antal benyttes allerede på laboratorier, men i nogle sammenhænge er de ikke udviklet til kommercielt brug (eksempelvis online HS-GC baserede sensorer til VFA bestemmelse (Boe *et al.*, 2007) og intermitterent bikarbonat alkalinitets bestemmelse som rapporteret af Esteves *et al.*, (2000)).



Ligeledes er der udvikling i monitoring med Infra-Rød (IR) spektroskopi og multi-variant analyse teknikker til bestemmelse af et antal biogassystem relaterede parametre. IR spektroskopi er benyttet eksempelvis til monitoring af VFA'er, alkalinitet (partial og total), COD, total organisk kulstof (TOC), TS og VS, identifikation af primærslam set overfor sekundær slam / biologisk overskudsslam på renseanlæg, bio-metan potentiale i sammenhænge med forskellige substrater samt rådnetank funktion på videnskabeligt niveau, som af Steyer *et al.* (2002), Lomborg *et al.* (2009), Jacobi *et al.* (2009), Reed *et al.* (2011) og Lesteur *et al.* (2011). Herunder

er der udviklet en multi-parameter analysator med lavt vedligeholdelsesbehov, der kan levere rimeligt pålidelige resultater. Nogle instrumenter kræver imidlertid preparation som filtrering eller tørring, hvilket gør den uanvendelige til in-situ eller in-line til on-line data indhentning. Sådanne forhold er imidlertid ikke altid gældende. Med instrumenterne skal følge data-modeller, der skal kalibreres overfor de udvalgte korrelationer. Dette kan kræve et ganske betydeligt tidsforbrug, og da forskellige substrater kan medvirke til behov for tilpasning af modeller, er sådanne instrumenter ikke umiddelbart anvendelige til løbende monitoring i biogassammenhæng. Når en model er kalibreret, kan bestemmelse foretages med kort cyklostid, indenfor minutter. Der forskes og udvikles løbende på sådanne modeller, hvoraf nogle allerede er kommercialiserede, og en gruppe af forskellige modeller er allerede produceret af et antal akademiske institutioner og firmaer. Raman spektrometri er så småt ved at finde indpas. Akustisk kemometri vurderes at have potentiale i biogas-systemer (for eksempel Lomborg *et al.*, 2009 og Lhunegbo *et al.*, 2012).

6. Konklusion

Der er mange parametre for biogasanlæg og bio-metan anlæg, der kan bestemmes. Dog er der stadig et antal parametre, der ikke kan bestemmes in-situ og i real-time. Baggrunden herfor er eksempelvis analytiske problemer, signifikante vedligeholdelses- og omkostningskrav. I denne monitorings guide er der valgt og beskrevet mange parametre, der vil medvirke til en sikker tilgang til monitoring. Disse nøgleparametre for monitoring er udvalgt af eksperter baseret på forskning og udvikling og praktisk erfaring fra arbejde med biogas systemer og bio-metan anlæg fra hele Europa. Forskellige monitorings parameter kan benyttes afhængigt af målet med biogas- og opgraderingsanlæg, i hvilken udstrækning der skal foretages kontrol, type og karakteristik af substrat benyttet, rådnetanksteknologi og marked for produceret fermentat og bio-metan.

Substrat type og karakteristik, forbehandling og lagring samt rådnetank design har signifikant betydning for ydeevnen af biogas anlægget. Her ud over kan det multi-bakterielle konsortium, der er i rådnetanken være unikt (i diversitet og kvantitet) og de kemiske reaktioner er komplekse. Derfor, og til trods for, at der er ligheder i funktion, er rådnetanke ikke identiske og reagerer ikke altid på same måde. Der er generelle guidelines for drift af rådnetanke, men det er ikke muligt eksakt at definere et optimum for en rådnetank, da en række biokemiske komponenter, deres koncentration med videre ikke kan defineres med sikkerhed. I almindelighed vil løbende karakterisering af substrater (TS og VS, bionedbrydelighed, nærings- og sporstoffer samt mulige hæmmende komponenter) der fører til et passende rådnetanks- og driftsdesign sammen med registrering af rådnetank ydeevne, eksempelvis metan flowrate, så vel som restkoncentration af individuelle VFA'er og alkalinitet, være ideelle monitorings parametre. Disse parametre tilsammen er i de fleste tilfælde tilstrækkeligt til at udstikke passende og ganske hurtige kontrolforanstaltninger for at sikre og optimere rådnetanksdrift og ydeevne. Imidlertid kan det stadig være nødvendigt at foretage mere grundig kontrol af processen ved yderligere analyser for at forstå utilstrækkelig eller ringe ydeevne, samt evaluere aktiviteten, diversiteten og kvantiteten af de forskellige mikrobielle populationer. Ud over, at monitoring og kontrol er til fordel for rådnetanksdriften og ydelsen, kan der være andre årsager til at monitere, for eksempel for at imødekomme kvalitetskrav for udløb fra rådnetanken eller slutbruger krav og behov.

På same må er det vist, at monitoring af bio-metan kvalitet og kvantitet foruden flere driftsparametre giver signifikant input til effektiv, sikker og pålidelig drift af opgraderingsanlæg. Monitoring og lagring af data for en række bio-metan kvalitetsparametre er påkrævet før injektion i naturgasnet eller ved brug til drivmiddel til køretøjer, og de eksakte krav kan variere landene imellem. Uanset dette er der behov for en komplet og sporbar dokumentation for produceret bio-metan, hvilket også bør ses som et aktiv for anlæggets drift. Afhængigt af

anlægsteknologi vil monitoring og lagring af givne parametre give umiddelbar adgang til identifikation af utilstrækkelig anlægsdrift samt danne basis for optimering. Her ud over bibringer det en grundig basis for fastlæggelse af vedligeholdelsesbehov af anlæg og komponenter, hvilket igen medvirker til maksimeret driftstid.

7. Referencer

- Boe K., Batstone D.J., Steyer J.-P. and Angelidaki I. (2010) State indicators for monitoring the anaerobic digestion process. *Water Research* 44: 5973-5980.
- Boe, K., Batstone, D.J., Angelidaki, I. (2007) An innovative online VFA monitoring system for the anerobic process, based on headspace gas chromatography. *Biotechnology and Bioengineering*, 96 (4): 712-721.
- Chen Y., Cheng J.J., Creamer K.S. (2008) Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99(10): 4044–4064
- De Vrieze J, Hennebel T., Boon N., and Verstraete W. (2012) *Methanosarcina*: The rediscovered methanogen for heavy duty biomethanation. *Bioresource Technology* 112: 1-9.
- Esteves, S.R.R., Wilcox, S.J, O'Neill, C., Hawkes, F.R. and Hawkes, D.L. (2000) On-line Monitoring of Anaerobic-Aerobic Biotreatment of a Simulated Textile Effluent for Selection of Control Parameters. *Environmental Technology* 21(8): 927-936.
- Fricke K., Santen H., Wallmann R., Huttner A. and Dichtl N. (2006) Operating problems in anaerobic digestion plants resulting from nitrogen in MSW. *Waste Management* 27: 30–43.
- Jacobi, H.F., Moschner, C.R, and Hartung, E. (2009) Use of near infrared spectroscopy in monitoring of volatile fatty acids in anaerobic digestion. *Water Science and Technology* 60(2), 339 – 346.
- Lesteur, M., Latrille, E., Bellon-Maurel, V., Roger, J.M., Gonzalez, C., Junqua, G. and Steyer, J.P. (2010) First step towards a fast analytical method for the determination of biochemical methane potential of solid wastes by near infrared spectroscopy. *Bioresource Technology*. 102(3): 2280-2288.
- Lhunegbo F.N., Madsen M., Esbensen K.H., Holm-Nielsen J.B. and Halstensen M. (2012) Acoustic chemometric prediction of total solids in bioslurry: A full-scale feasibility study for on-line biogas process monitoring. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 110 (1): 135–143
- Lomborg C.J, Holm-Nielsen J. B., Oleskowicz-Popiel P, Esbensen K.H. (2009) Near infrared and acoustic chemometrics monitoring of volatile fatty acids and dry matter during co-digestion of manure and maize silage. *Bioresource Technology* 100 (5): 1711–1719
- Madsen M., Holm-Nielsen J.B. and Esbensen K.H. (2011) Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 3141 – 3155

Monson K.D., Esteves S.R., Guwy A.J. and Dinsdale R.M. (2007) Anaerobic Digestion of Biodegradable Municipal Wastes – A Review, University of Glamorgan ISBN 978-1-84054-156-5.

Reed, J.P., Devlin, D., Esteves, S.R.R., Dinsdale, R., Guwy, A.J. (2011) Performance parameter prediction for sewage sludge digesters using reflectance FT-NIR spectroscopy. Water Research, 45(8): 2463 – 2472.

Spanjers, H. and van Lier, J.B. (2006) Instrumentation in anaerobic treatment – research and practice. Water Science and Technology, 53(4-5): 63-76.

Steyer J.P., Bouvier J.C., Conte T., Gras P., Sousbie P. (2002) Evaluation of a four year experience with a fully instrumented anaerobic digestion process. Water Science and Technology, 45(4-5): 495 – 502.