

Biologisk fosforfjerning

Av Torleiv Bilstad

Torleiv Bilstad er Professor ved Høgskolen i Stavanger

Sammendrag

Mikrobiell akkumulering av fosfor, utover cellenes ordinære metabolske fosforbehov, er dokumentert i flere hundre fullskala aktivslamanlegg siden 1970. Stabile og lave utløpskonsentrasjoner for fosfor oppnåes året rundt ved vekselvis anaerobe og aerobe tilstander i avløpsvannet.

Det er avgjørende at den anaerobe bioreaktor blir tilført nødvendige mengder lavmolekylære flyktige organiske syrer, spesielt eddiksyre, for at mikroorganismene skal stimuleres til å akkumulere fosfor. I kaldt, tynt og oksygenrikt avløpsvann er det normalt ikke tilstrekkelig med fettsyrer i råvannet til at fosfat separeres til under 0,1 mg/l P i utløpet. Kontrollert fermentering av forsedimentert slam resulterer imidlertid i tilstrekkelig produksjon av nødvendige fettsyrer.

Fosforfjerning i aktivslam er naturlig tilrettelagt til også å separere nitrogen i felles biomasse. Nitrifiserende slam separeres dessuten mer effektivt i blanding med fosforakkumulerende mikroorganismer enn i separatsystem.

Summary

Biological phosphorous removal (BPR) has been well tested and documented in

full scale plants internationally since 1970. Stable and low effluent concentrations are obtained by alternating activated sludge biomass between anaerobic and aerobic conditions.

Short chain volatile fatty acids (SCVFA), particularly acetates, are primary carbon compounds responsible for stimulating biological phosphorous release and uptake in BPR processes. SCVFA are naturally formed in sewers. However, operating experiences from plants in northern climates have demonstrated the need for enhanced SCVFA production to ensure consistent compliance with effluent objectives of 0.1 mg/l dissolved phosphorous on a monthly average without chemical addition.

Controlled fermentation of primary sludge converts particulate and soluble organics to a variety of SCVFA compounds. The direct discharge of fermented supernatant to the anaerobic zone provides a consistent source of SCVFA and significantly improves BPR.

Innledning

Naturens mikroorganismer har behov for karbon (C), nitrogen (N) og fosfor (P) til sine livsprosesser. For normal

metabolsk virksomhet er det en tommelfingerregel at cellebehovet er 100:5:1 uttrykt som BOF5:N:P. I vanlig aerob aktivslam for fjerning av organiske forbindelser inneholder overskuddslammet derfor både N og P. Fosfor i avløpsvannet reduseres tilsvarende. For kommunalt avløpsvann betyr dette at 5 mg/l TotP i råvannet typisk reduseres til 4 mg/l TotP i utløpet.

For avløpsvann med BOF5 rundt 150 mg/l er ikke aerob aktivslam et rensalternativ dersom fosfor skal være særlig mindre enn 4 mg/l i utløpet. Fysisk stripping av fosfor er heller ikke et rensalternativ, slik det er for nitrogen. I motsetning til nitrogen, NH₃ og N₂, opptrer ikke fosfor i gassform. Kjemisk felling med metallsalter (Fe, Al, etc) var derfor før 1975 eneste praktiske alternativ for fosforfjerning.

Fosforakkumulering

I 1960-årene ble det gjort flere observasjoner i fullskala aktivslamanlegg som viste TotP konsentrasjoner under 0,5 mg/l i utløpet (1 og 2). Oppfølgende undersøkelser og forskning rundt årsakene til denne uventede ekstrasfjerningen av fosfor, utover det metabolske cellebehov, har resultert i kriterier for dimensjonering av aktivslamanlegg som gir over 95% fosforfjerning for temperaturer over 5°C (3).

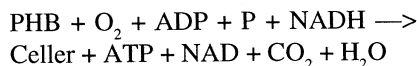
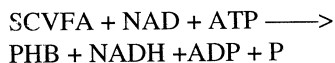
I 1975 ble det i Sør Afrika satt i drift et biologisk rensanlegg hvor aktivslammet strømmet gjennom anaerobe og aerobe reaktorer (4). Slik vekseldrift fører til en naturlig utvelgelse av fosforakkumulerende mikroorganismer som lagrer fosfor utover det normale

metabolske cellebehov. Flere hundre aktivslamanlegg verden over inkluderer i dag biologisk P-rensing (BPR). Forståelse for prosessene gjør det mulig å styre aktivslam slik at løst fosfor i utløpet blir mindre enn 0,1 mg/l uten tilsetning av eksterne kjemikalier (5).

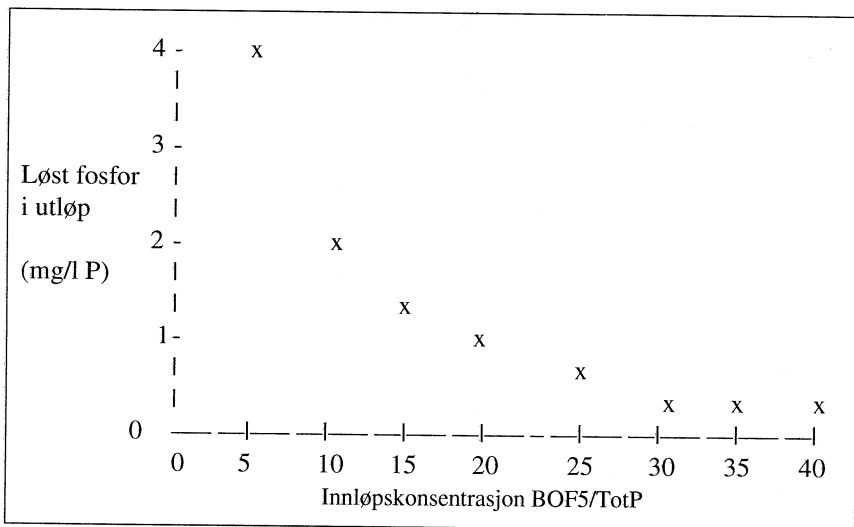
Forklaring på mekanismene som resulterer i den observerte ekstrasfjerningen av fosfor, har variert fra kjemisk felling via mikrobiell adsorpsjon til biosyntese (6, 7, 8 og 9). Det er i dag alminnelig akseptert at biokjemiske prosesser er nødvendige for denne ekstrasfjerning av fosfor i aktivslamsystemer.

En rekke av mikroorganismene som anrikes i aktivslam akkumulerer fosfor som polyfosfat til over 10% av sin tørrvekt (3). Spesielle vekstforhold som tilrettelegger for disse poly-P-mikroorganismene er en forutsetning for fullstendig fosforfjerning fra avløpsvannet. For aktivslam betyr dette vekselvis anaerobe og aerobe tilstander.

Modeller for biokjemiske reaksjoner for fosforakkumulering kan beskrives for henholdsvis anaerobe og aerobe tilstander:



Under anaerob tilstand frigjør mikroorganismene polyfosfat via hydrolyse fra fosforbindinger (ATP) i cellemassen. Fosfor konsentrasjonen i vannfasen øker følgelig i den anaerobe fase. Energi fra



Figur 1. Konsentrasjon av fettsyrer (BOF5) i innløpet til anaerob bioreaktor bestemmer fosforkonsentrasjonen i utløpet fra BPR prosessen (10).

hydrolysen blir brukt til mikrobiell assimilerings av substrat i form av lavmolekylære flyktige organiske syrer (SCVFA) fra avløpsvannet. Fettsyrene blir lagret som PHB (Poly-B-hydroxybutyric acid) i cellene. Nicotinamide Adenine Dinucleotide (NAD) reduseres til NADH.

Påfølgende aerobe forhold har molekylært oksygen (O_2) som elektronmottaker. PHB i celledmassen blir oksydert med tilhørende frigjøring av energi som mikroorganismene bruker til å akkumulere løst fosfor fra avløpsvannet og lagrer dette bl.a. som energibærer ATP. NADH er videre oksydert til NAD.

Det understrekes at uten fettsyrer i avløpsvannet blir det ingen mikrobiell fosforakkumulering. Eddiksyre er den mest effektive av fettsyrene til biokjemisk P-akkumulering (10).

Fosforfjerningsmodellene viser at minimumselementet for de biokjemiske reaksjonene enten er fettsyrer eller fosfor. Fosfor vil ikke separeres fullstendig fra avløpsvannet dersom tilgangen på SCVFA er begrenset i den anaerobe bioreaktor. I Figur 1 er fettsyrer uttrykt som BOF5 og kurven viser hvor mye organisk substrat som er nødvendig for å separere fosfor fra vannfasen. Dersom forholdet BOF5/TotP er større enn 20 i innløpet til den anaerobe bioreaktor, vil løst fosfor i utløpet være mindre enn 1 mg/l. Det er avgjørende at BOF5/TotP forholdet representerer innløpet til den anaerobe sone; hovedstrøm av avløpsvann kombinert med eventuelle sidestrømmer og returstrømmer. Det er også viktig at avløpsvannet allerede har fettsyrer tilgjengelig for at forholdet skal gjelde. For mikroorganismene i

den anaerobe bioreaktor er det imidlertid likegyldig om fettsyrene kommer fra råvannet eller fra andre interne eller eksterne kilder.

Fettsyreproduksjon

Gjæring og produksjon av fettsyrer i avløpsnettet fram til renseanlegget er avhengig av forhold som oppholdstid, temperatur, oksygenkonsentrasjon og organiske forbindelser. Det blir liten gjæring og produksjon av fettsyrer ved lav temperatur, turbulente strømningsforhold og store mengder fremmedvann.

Den anaerobe bioreaktor kan kombineres til både å produsere fettsyrer og assimilere disse i biomassen (PHB). Gjæringsprosessen er imidlertid langsom sammenlignet med mikrobielt opptak av fettsyrer. Volumet av den anaerobe bioreaktor kan derfor reduseres dramatisk dersom fettsyreproduksjonen kan gjøres annensteds; for eksempel i en egen fermentor.

Mangel på tilstrekkelige mengder fettsyrer i avløpsvannet kan korrigeres ved gjæring av forsedimentert slam og produksjon av fettsyrer i en egen fermentor. Dekanteringsvann med fettsyrer fra fermentoren ledes så til påfølgende anaerob bioreaktor slik at BOF5/TotP forholdet her blir tilstrekkelig for fullstendig biologisk fosforseparasjon fra avløpsvannet. Den biologiske renseprosessen for fosfor gjøres dermed mindre avhengig av eksterne miljøforhold som lave vanntemperaturer, små mengder løste organiske forbindelser i råvannet og mangel på gjæring i avløpsnettet.

Intern produksjon av fettsyrer

(SCVFA) i egen fermentor kan defineres som økologisk kjemikalieproduksjon og har flere fordeler:

1. Ikke behov for eksterne kjemikalier.
2. Slamproduksjonen er vesentlig mindre enn ved bruk av metallsalter til P-felling.
3. Den nødvendige oppholdstid i anaerob bioreaktor for biologisk assimilering av SCVFA reduseres til 20-30 minutter.
4. Overproduksjon av SCVFA, utover behovet for P-fjerning, kan brukes til biologisk nitrogenfjerning.

Anleggsdrift

Anlegg for biologisk fosforfjerning hvor TotP konsekvent skal være under 1 mg/l og hvor avløpsvannet til tider er både kaldt og tynt, bør ha egen fermentor for produksjon av fettsyrer. Erfaringer fra Canada med produksjon av fettsyrer fra forsedimentert slam i egen fermentor gir 0,1 mg/l løst fosfor i utslippet for råvannstemperaturer ned til 8 °C (5).

Det er viktig å understreke at oppholdstiden i den anaerobe bioreaktor ikke må være lengre enn at fettsyrene blir assimilert. Dersom bio-P mikroorganismene ikke raskt deretter får luft, vil fosforhydrolyse fortsette uten opptak av fettsyrer. I den aerobe sone vil derfor PHB lageret i mikroorganismene ikke være tilstrekkelig til fullstendig opptak av fosfor.

Oppholdstiden i den aerobe bioreaktor må avpasses slik at fosfor ikke frigjøres ved hydrolyse av aktivslam. Riktige oksygenkonsentrasjoner og oppholdstider er derfor avgjørende for god drift av BPR.

Aktivslam må beskyttes mot utvas-king. I perioder med høg tilførsel av fremmedvann må deler av avløpsstrømmen gå i overløp. Spesielt er den anaerobe reaktor sårbar for situasjoner hvor fettisyreopptaket blir forstyrret.

Biologisk fosforfjerning er ikke i samme grad som biologisk nitrogenseparasjon begrenset av lave temperaturer. En rekke mikroorganismer, psykofile og mesofile, er i stand til å akkumulere fosfor. Psykofile mikroorganismer kan faktisk ha h gre celleproduksjon enn de mer varmekjære mikroorganismene (11). Slamalder må styres etter behov og ved $6,6 < \text{pH} < 7,4$ vil fosfor i avløpsvannet bio-akkumuleres til under 5 oC.

Avvanning og handtering av slamstr mmer må være slik at akkumulert fosfor ikke frigjøres fra biomassen. Fosfor i returstrømmer til bioreaktorene vil være en ekstra belastning på renseanlegget. Slamstr mmene bør derfor holdes aerobe.

Simultanseparasjon av N og P.

Biologisk fosforfjerning er et alternativ til kjemisk felling. Begge anleggstypene vil tilfredsstillende de strengeste utslippskrav til fosfor; i.e., 0,1 mg/l løst fosfor i utslippet året rundt.

Biologisk rensing er i praksis enerådende som prosess for fjerning av nitrogen; nitrifikasjon og denitrifikasjon. Kjemisk felling er ikke et alternativ.

Aktivslamanlegg som inkluderer nitrogenrensing kan tilrettelegges til også å separere fosfor. Det omvendte er likeså tilfelle; aktivslamanlegg for fosforfjerning (BPR) kan tilrettelegges til også å fjerne nitrogen. Dette er styr-

ken til aktivslam generelt; simultanseparasjon av næringsstoffene nitrogen og fosfor sammen med l ste organisk forbindelser i en felles biomasse.

Nitrifiserende aktivslam har generelt dårlige sedimenteringsegenskaper. Fosforanrikt aktivslam har gode sedimenteringsegenskaper og vil positivt påvirke nitrogenseparasjonseffekten ved simultanseparasjon av N og P. Aktivslamsystemer for nitrogenrensing innbefatter anokse og aerobe bioreaktorer. For å fjerne fosfor i felles slamsystem med nitrogen er det tilstrekkelig at 7% av aktivslamanleggets bioreaktorvolum er anaerobt (4).

I et biologisk renseanlegg med simultanfjerning av næringsstoffene nitrogen og fosfor (BNR) via aktivslam, er det hensynet til nitrifisering for vanntemperaturer under 10 oC som er dimensjonerende og begrensende for driften. Dette er under forutsetning av at den anaerobe bioreaktor har tilstrekkelig tilgang på fettsyrer til mikrobiell lagring som PHB. Denne karbonkilden frigjøres ved mikrobiell fosforakkumulering i aerob bioreaktor og vil deretter tilfredsstillende deler av karbonbehovet ved denitrifisering i den anokse bioreaktor. Videre vil eventuell overproduksjon av fettsyrer, som ikke blir lagret som PHB, likeså kunne nyttes som karbonkilde ved denitrifisering.

Korrekt tilrettelagt biologisk rensing med aktivslam gir fordeler sammenlignet med alternative kombinasjonsløsninger med kjemisk felling:

1. Separerer både nitrogen og fosfor i felles aktivslam.
2. Bruker ikke eksterne kjemikalier.

3. Produserer mindre slam.
4. Separerer effektivt løste organiske forbindelser.
5. Har vesentlig lavere driftsutgifter.

Den store utfordringen med aktivslamanlegg for simultanseparasjon av nitrogen og fosfor er ikke de tekniske løsningene, men den daglige drift. Ut-danning og opplæring av driftspersonell må være på et nivå som gir forståelse av teknologien i prosessene. En god forståelse er nødvendig for biologisk nitrogenfjerning alene, og desto mer påkrevd for den kombinerte BNR løsning.

Referanser

1. Levin, G.V. og J.Shapiro (1965). Metabolic Uptake of Phosphorous by Wastewater Organisms. Jour. Water Pollution Control Federation, 37, 800.
2. Bergmann, R.D. et al.(1970). Continuous Studies in the Removal of Phosphorous by the Activated Sludge Process. Chem. Engr. Symp. Ser., 67, 117.
3. Converti, A. et al. (1995). Biological Removal of Phosphorous from Wastewater by Alternating Aerobic and Anaerobic Conditions. Wat.Res. Vol. 29, No 1, 263-269.
4. Barnard, J. (1995). Personlig kommunikasjon.
5. Stevens, G.M. og W.K.Oldham (1992). Biological Nutrient Removal Experience at Kelowna, British Columbia. Proc.BNR Conference, Leed University, Leeds, UK.
6. Menar, A.B. og D.Jenkins (1970). Fate of Phosphorous in Waste Treatment Processes: Enhanced Removal of Phosphate by Activated Sludge. Environ. Sci. Tech., 4, 1115-1121.
7. Bark, K. et al. (1992). Differences in Polyphosphate Accumulation and Phosphate Adsorption by Acinetobacter Isolates from Wastewater Producing Polyphosphate: AMP Phosphotransferase. Wat.Res., 26, 1379-1388.
8. Yall, I. et al. (1970). Biological Uptake of Phosphorous by Activated Sludge. Appl. Microbiol., 20, 145-150.
9. Fuch, G.W. og M.Chen (1975). Microbiological Basis of Phosphate Removal in the Activated Sludge Process for the Treatment of Wastewater. Microb. Ecol., 2, 119-138.
10. Abu-ghararah, Z.H. og C.W.Randall (1991). The Effect on Organic Compounds on Biological Phosphorous Removal. Wat. Sci. Tech., 23, 585.
11. Randall, C.W. et al. (1992). Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal. IAWQ 1992 Conference Workshop.