

Förord

För att minska belastningen på miljön renas allt avloppsvatten. Samtidigt genereras emellertid avloppsslam som, förutom organiskt material och näringsämnen, även innehåller läkemedelsrester, mikroplaster, tungmetaller, patogener samt en stor del oorganiskt material. Genom rötning kan en del av den organiska fraktionen utnyttjas för att producera energi i form av metan.

Även om olika rötningssteg och en eventuell näringsutvinning har gjorts ur avloppsslammet återstår både energi och näringsämnen i det rötade slammet. Genom termisk behandling av avloppsslam och näringsextraktion från aska kan energi och eventuella näringsämnen, främst fosfor, utvinnas. Vidare kan problemen med läkemedelsrester, mikroplaster och andra organiska problemämnen undvikas genom termisk destruktion. Internationellt sett har förbränning i många år varit den främsta termiska processen för hantering av slam från reningsverk och i flera europeiska länder bränns i stort sett allt slam vid monoförbränningsanläggningar avsedda för enbart slam eller vid samförbränning med annat avfall.

Under senare år har nya termiska processer som förgasning och pyrolys utvecklats för hantering av avfall. De presenteras i ökad omfattning som metoder vilka kan användas för behandling av avloppsslam. Många större forskningsprojekt har startats och företag erbjuder pilotkörningar eller körningar i fullskaliga anläggningar. Framför allt har intresset för förgasning av avloppsslam ökat. Eftersom information kring teknikens mognadsgrad och potential ur ett svenskt perspektiv är svår att hitta, finns ett behov av att sammanställa den tillgängliga informationen. Detta är särskilt viktigt för att ge en uppfattning om vilka tekniker som är bäst anpassade för svenska förhållanden. I denna rapport presenteras därför det internationella läget när det gäller förgasning av avloppsslam, men här görs också en bedömning av potentialen för teknikens inpassning inom svensk VA-teknik.

Rapporten är en del av ett projekt om termisk förgasning inom VA-teknik Södras fokusgrupper *Framtidens avloppsvattenrening* och *Energi och Resurshushållning* men utgör också en del av ett projekt genomfört av TK Energy ApS för den danska energistyrelsens Energiteknologiske Udviklings- og Demonstrationsprogram (EUDP) - *10 MW pressurised gasification*. TK Energy ApS ska inom projektet utvärdera potentialen för att utveckla en trycksatt suspensionsförgasare som ska användas för biomassor av låg kvalitet såsom slam från avloppsreningsverk.

Utöver denna rapport har en gemensam studieresa gjorts till två slamförgasare som är i kommersiell drift i Tyskland. Resultatet från studieresan presenteras i rapporten *Reseberättelse från studieresa i Tyskland till reningsverk med termisk slamförgasning* (Hey, Koch & la Cour Jansen, 2017).

Foto på framsidan: Förgasningsanläggningen i Balingen med teknikrum till vänster och förgasaren till höger. Foto: Jes la Cour Jansen.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Innehållsförteckning.....	3
Sammanfattning	5
1 Inledning.....	7
2 Projektets syfte och genomförande	9
3 Termisk förgasning, vad är det?.....	11
4 Karakterisering av slam ur förgasningssynpunkt.....	15
5 Förgasningsprocesser	17
5.1 Fastbäddsmedströmsförgasare	18
5.2 Fastbäddsmotströmsförgasare	19
5.3 Fluidbäddsförgasare	20
5.4 Suspensionsförgasare	22
6 Kort presentation av fullskaliga slamförgasningsanläggningar och storskaliga experiment	25
7 Potentialen för slamförgasning i Sverige	27
Referenser.....	29

Sammanfattning

I avloppsslam återstår både energi och näringsämnen efter rötning. Här finns också läkemedelsrester, mikroplaster och andra organiska ämnen som kan ställa till problem vid användning av slam inom jordbruket. Förbränning har under många år varit den förhärskande termiska processen internationellt sett för att lösa detta problem. I allt fler europeiska länder bränns i stort sett allt slam vid mono-förbränningsanläggningar vilka är till för enbart slam eller vid samförbränning med annat avfall.

Under senare år har nya termiska processer som förgasning och pyrolys utvecklats för hantering av avfall och de presenteras i ökad omfattning som metoder vilka kan användas för behandling av avloppsslam. Syftet har varit att göra hanteringen billigare, men också att utnyttja en större del av slammets organiska innehåll till högvärdigt bränsle i stället för att endast få värme från förbränning.

Eftersom information kring förgasningsteknikens mognadsgrad och potential ur ett svenskt perspektiv är svår att hitta finns ett behov av att sammanställa den tillgängliga informationen. I den här rapporten presenteras det internationella läget för förgasning av avloppsslam och det görs också en bedömning av potentialen för teknikens anpassning till svensk VA-teknik.

Förgasning uppnås genom att ett kolhaltigt bränsle upphetas till 800–1 200 grader i en atmosfär med underskott av syre tillsammans med ett förgasningsmedel, exempelvis luft, syrgas eller vattenånga, för att bilda väte och kolmonoxid.

Slam från avloppsreningsverk har ett lägre energiinnehåll per kg TS jämfört med vanliga typer av biomassa som förgasas, till exempel ved och halm, och innehåller avsevärt mer vatten och aska. Ur energi- och teknisk synvinkel är ett högt värmevärde och låg fukt- och askhalt önskvärd. Fukten måste drivas ur bränslet vilket kräver energi. Askan följer med som energiförbrukande dödsvikt i förgasningsprocessen och innebär stora askmängder att hantera i förhållande till andra biomassor. Slam är därför inte idealt som bränsle och efterfrågas inte. Slamförgasning får följaktligen betraktas som en slambehandlingsmetod och inte i första hand som en metod för energiproduktion.

En genomgång av de vanligaste metoderna för slamförgasning visar att de flesta inte är lämpade för förgasning av slam då askans fysikaliska egenskaper inte på ett enkelt sätt kan anpassas till teknikens krav.

Det är endast förgasningsteknik baserad på en fluidiserad bädd som verkar ha någon potential för svenska avloppsreningsverk. De enda två fullskaliga slamförgasningsanläggningar (i Tyskland) som har presenterat driftsresultat är baserade på denna teknik. I nuläget har anläggningarna varit i drift en längre tid, men ingen av dem har haft överskott av gas för produktion av el då torkning av slammet har krävt all producerad energi. Anläggningarna genomgår dock förbättringar och företaget som har levererat anläggningarna arbetar med både konstruktion och process. En ny större anläggning byggs dessutom nu i Koblenz (Tyskland).

Mycket stora anläggningar baserade på suspensionsförgasning kan troligen också hantera slam från avloppsreningsverk, men denna förgasningstyp kräver en mängd bränsle som motsvarar slam från samtliga avloppsreningsverk i hela Sverige. Den typen är därför endast intressant för de svenska avloppsreningsverken om en anläggning för andra biomassor byggs i

Sverige. Slam från intilliggande avloppsreningsverk kan då ingå som en mindre del av bränslet till anläggningen.

Tekniken för slamförgasning kan därför inte anses mogen och potentialen för inpassning i svensk VA-teknik bedöms inte att vara intressant i nuläget.

1 Inledning

Avloppsslam innehåller många nyttigheter som man i Sverige försöker återföra i kretsloppet, till exempel jordbildande ämnen, fosfor och andra näringsämnen. Här finns dock också ämnen som inte ska med i kretsloppet, till exempel patogena organismer, organiska mikroföroreningar, tungmetaller och mikroplast.

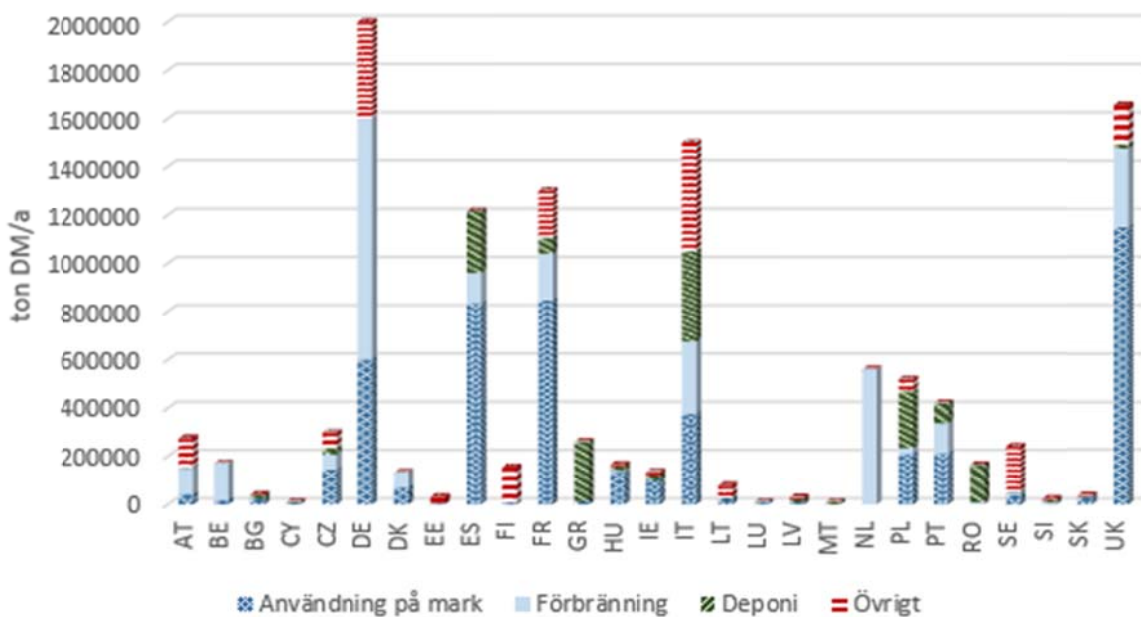
Det pågår ständigt arbete med att återföra så mycket som möjligt av de nyttiga delarna av avloppsslam utan att äventyra kvaliteten på jordbruksmarken. Samtidigt ska avloppsreningsverken vara energisnåla och klimatanpassade.

Arbetet i Sverige och även internationellt följer två olika spår:

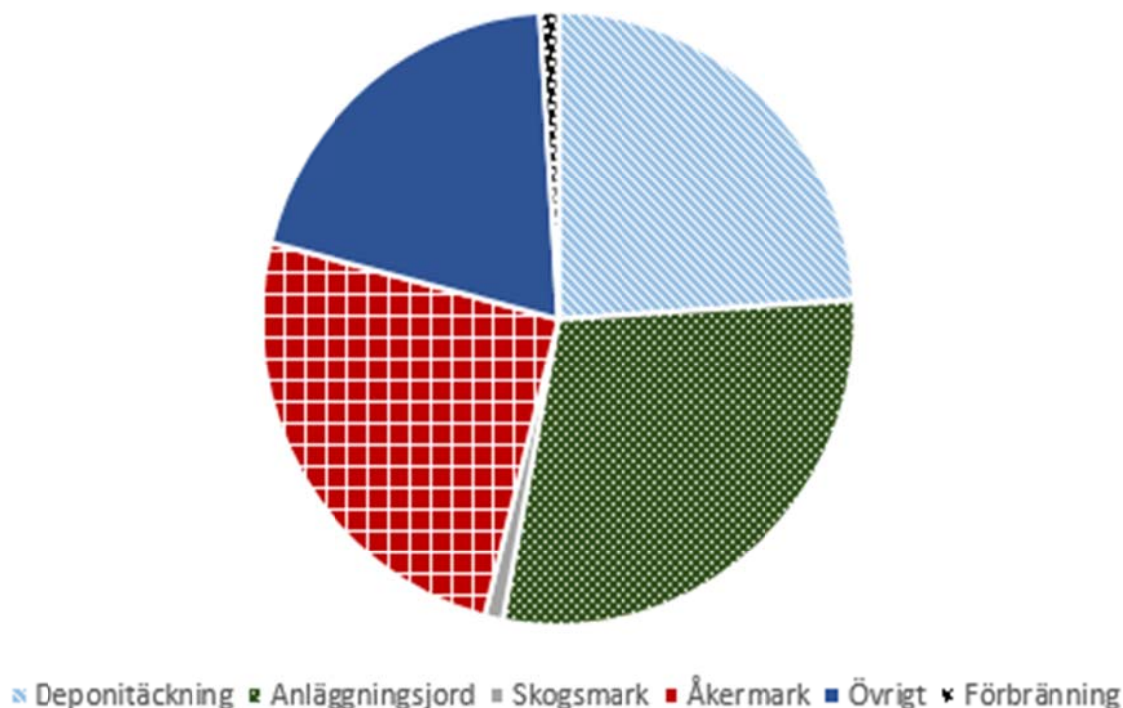
I det spår där kretsloppet är i fokus görs stora insatser inom uppströmsarbetet för att reducera halterna av oönskade ämnen i slammet. Restriktioner sätts upp för tillåtna halter av organiska mikroföroreningar och tungmetaller i slam som ska användas i jordbruket. Slammet rötas för att reducera innehållet av patogena mikroorganismer, stabilisera slammet, reducera luktutsläpp och samtidigt utvinna energi i form av metan. I flera länder hygieniseras slammet dessutom för att ytterligare reducera halten av patogena mikroorganismer.

I många europeiska länder följs ett annat spår. Slammet anses vara oanvändbart i jordbruket och för att undvika problem med stora deponier eldas slammet före deponering. I många länder pågår experiment för att utvinna fosfor, men i nuläget är de olika resultaten inte kommersiellt försvarbara.

Figur 1 visar hur slammet hanterades i EU vid den senaste redovisningen från 2010 (Milieu Ltd, WRC och RPA, 2010) och figur 2 ger en detaljerad presentation av hur slammet hanteras i Sverige. I Tyskland är ny lagstiftning på väg vilken kommer att flytta den största delen av slammet till förbränning framför att använda slammet inom jordbruket. Denna utveckling sker också i en rad andra länder efter skärpta krav om renare slam, vilket leder till att större delen av slammet inte klarar kraven.



Figur 1. Slamd disponering i Europa år 2010 (Milieu Ltd, WRC och RPA, 2010).



Figur 2. Avsättning för avloppsslam i Sverige (Sveriges officiella statistik, 2016).

Eldning av avloppsslam har fördelen att organiska mikroföroreningar (inklusive mikroplast) och patogena mikroorganismer försvinner på ett effektivt sätt. Däremot försvåras återvinningen av närsalter och dessutom utnyttjas inte andra positiva effekter i slammet inom jordbruket.

Under senare år har en rad andra termiska behandlingsmetoder föreslagits för hantering av slam. Syftet har varit att göra hanteringen billigare och att utnyttja en större del av slammets organiska innehåll till högvärdigt bränsle, i stället för att endast få värme som resultatet av förbränning.

Pyrolys och termisk förgasning är gamla processer inom energiproduktion och stora anläggningar har byggts baserade på förgasning av kol. Under andra världskriget användes tekniken till exempel i bilar där ved fick ersätta bensin som bränsle. Under senare år har anläggningar byggts i flera länder för produktion av förnyelsebart bränsle (och värme) baserade på ved, halm och organiskt avfall, trots att tekniken kring dessa bränslen fortfarande är under utveckling. Också avloppsvattensslam är föreslaget som ett potentiellt bränsle. Det finns många laboratorie- och pilotförsök, men troligtvis endast två fullskalanläggningar i kommersiell drift, båda i Tyskland.

2 Projektets syfte och genomförande

Projektets syfte är att göra en genomgång av tillgänglig ny teknik för termisk förgasning av avloppsslam för att utvärdera den tekniska mognadsgraden.

Resultatet är uppdelat i två rapporter. I den ena beskrivs de möjliga förgasningsteknikerna och deras lämplighet att hantera slam från avloppsreningsverk. Utvärderingen baseras på de erfarenheter som kan hittas i litteraturen. I den andra rapporten presenteras en studieresa till de troligtvis enda två fullskalanläggningar i kommersiell drift som finns (Hey, Koch & la Cour Jansen, 2017).

Den här rapporten är strukturerad så att förgasningstekniken sätts i sammanhang med andra termiska slambehandlingsprocesser i kapitel 3. I kapitel 4 ges en karakterisering av avloppsslam som "bränsle" i en förgasningsprocess. Därefter presenteras i kapitel 5 de typer av förgasare som kan vara aktuella och slammets egenskaper värderas mot de krav som förgasarna ställer på bränslet. I kapitel 6 ges en kort presentation av de anläggningar och storskaliga experiment med slamförgasning som finns beskrivna i litteraturen. I kapitel 7 sammanfattas avslutningsvis läget och potentialen för slamförgasning i Sverige.

3 Termisk förgasning, vad är det?

Förgasning är en termisk process, vilken omvandlar fasta kolhaltiga bränslen, såsom biomassa eller slam, till gasformiga bränslen som innehåller väte och kolmonoxid.

Syftet med en förgasningsprocess kan vara att producera ett bränsle av bättre kvalitet ur ett bränsle med dålig kvalitet, till exempel att producera elektricitet eller flytande bränslen ur lågvärdiga bränslen. Syftet kan också vara att man önskar separera aska och energiproduktion, så att man kan utnyttja energin i förorenad biomassa utan att askan i bränslet ger drifts- och miljöproblem där energi produceras. Syftet med förgasning av slam är en sådan separering av energi från förorenad biomassa, men förgasning kan potentiellt också vara en bättre metod för slutbehandling av slam än förbränning om slam inte får återföras till jordbruksmark.

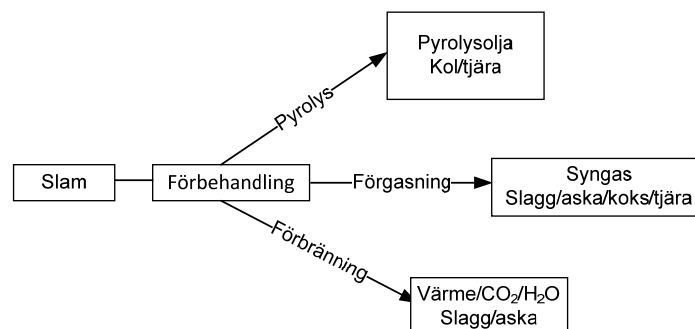
Förgasning uppnås genom att ett kolhaltigt bränsle upphetas till 800–1 200 grader i en atmosfär med underskott av syre tillsammans med ett förgasningsmedel, exempelvis luft, syrgas eller vattenånga, för att bilda väte och kolmonoxid.

Ett problem vid förgasning är att det också bildas olika typer av tjära. Definitionen av vad som utgör dessa tjärer är inte helt klar. Organiska föreningar, producerade under termisk eller partiell oxidation av organiskt material, kallas för tjärer och är, generellt kemiskt sett aromatiska föreningar. De utgör ett problem vid förgasning eftersom de sätter igen rör och påverkar effektiviteten hos värmeväxlare. Tjärer är inte heller önskvärda i syntesgasen. Aromatiska föreningar ställer också till problem om aska från förgasning eller pyrolys är tänkt att användas inom jordbruket. Temperaturen under förgasningen påverkar vilken typ av tjära som bildas. Högre temperatur leder till att det bildas mindre mängder tjära.

Förgasning vid höga temperaturer (>1 000°C) leder till mer vätgas och kolmonoxid i syntesgasen då tjärämnen bryts sönder. För vidare syntetisering är det önskvärt med mycket vätgas och kolmonoxid i syntesgasen. Den höga temperaturen medför att askan smälter samman och tas ut i botten av reaktorn som ett inert slag. Denna process kallas för förglasning och leder till ett geologiskt stabilt material utan risk för läckage av tungmetaller.

Förgasningsmedlen som tillförs systemet genom ett gasinjektionssystem kan vara luft, syrgas eller vattenånga. Fördelen med luft är att den är lättillgänglig och billig. Fördelarna med syrgas och vattenånga är att syntesgasen får låga koncentrationer av kvävgas. Nackdelen med hög andel kvävgas i syntesgasen är att värmeverdets per volymsenhet minskar. Genom att använda vattenånga som reagensgas erhålls mer vätgas jämfört med om luft eller syrgas används.

Vid termisk behandling av slam ingår översiktligt sett de processer som beskrivs i figur 3.



Figur 3. Översikt över produkter och biprodukter vid termiska behandlingsmetoder av avloppsslam.

Vanligt slam från avloppsreningsverk måste torkas före termisk behandling. Därefter kan slammets organiska beståndsdelar brytas ned till enklare föreningar beroende på temperatur och tillgång till syre eftersom indelningen i de tre olika teknikerna beror på avsaknad av eller tillgången till oxidationsmedel. Pyrolys sker helt utan tillgång till oxidationsmedel. Förgasning sker med begränsad tillgång till oxidationsmedel, medan förbränning lämpligtvis sker med tillgång till oxidationsmedel i överskott, vanligtvis syre.

Mest omfattande blir nedbrytningen vid en vanlig förbränning där kolet omvandlas till koldioxid. Vid förbränning är slutprodukten en aska vars beståndsdelar är de oorganiska föreningarna, men dessa kan dock vara förorenade av en liten mängd oförbränt kol. Utan tillgång till syre (eller med begränsad tillgång) erhålls vid hög temperatur syngas, vilken består av väte och kolmonoxid, samt en rest som består av slammets oorganiska beståndsdelar som dock har vissa halter av koks och tjära beroende på temperatur och vilken förgasningsprocess som används. Vid lägre temperatur erhålls ingen gas och kolföreningarna blir till olja. Även vid den här processen får man en aska med halter av koks och tjärföreningar.

Slamförbränning är en välbeprövad teknik som är mycket vanlig i många länder, se figur 1. Processen beskrivs inte närmare här. Pyrolys är en del av den termiska förgasningen och ingår i beskrivningen nedan. Den anses dock inte vara lämplig som enda process för slam då den producerade gasen har höga halter av tjära och partiklar. Dessutom är askan förorenad av oförbränt kol och tjära.

Förgasningsprocessen för slam består av fyra steg:

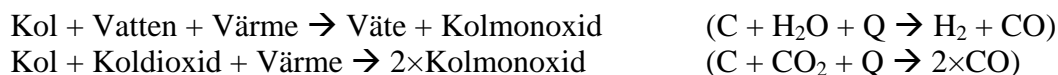
- Torkning av bränslet sker vid temperaturer upp till 150 grader
- Pyrolys av bränslet sker från 200 grader till 700 grader
- Förgasning sker vid temperaturer över 700 grader
- Partiell förbränning för att ge energi till processerna sker samtidigt med förgasningen

Slamtorkning kan ske på många sätt och är välbeprövat också i Sverige. Processen beskrivs inte närmare här.

Pyrolys är en termisk destillation av bränslet i vilken kolet separeras i pyrolysgas och koks. Pyrolysgasen består av gas, tjära och vatten, medan koks består av kol och aska med betydande halt av tjärasubstanser.

I förgasningssteget omvandlas koksen till kolmonoxid och väte och delar av tjäran i pyrolysgasen bryts ned till kolmonoxid och väte.

De mest betydande förgasningsprocesserna ser då ut så här:



Effektiviteten hos förgasningsprocessen och graden av nedbrytning av tjära är beroende på den temperatur förgasningsprocesserna arbetar vid. Ju högre temperatur, desto mer omfattande nedbrytning av kolet, vilket gör att allt renare gas produceras.

Uppvärmningen av processen sker vanligen genom att en del av bränslet i processen eldas. Därigenom produceras också koldioxid.

Den maximala temperaturen som förgasningsprocessen kan arbeta vid bestäms delvis av utformningen av förgasaren, delvis av askans smältkaraktär.

För de flesta bränslen är askans smältpunkt lägre än den temperatur som erfordras för att producera en ren, tjärfri gas. För att undvika att askan smälter och bildar slagg är det i många fall nödvändigt att driva förgasaren vid en temperatur som är för låg för att uppnå en fullständig reaktion av kol och tjära i gasen.

En mer utförlig, men fortfarande enkel beskrivning av termisk förgasning, inklusive ett faktablad över de väsentligaste teknikerna finns på hemsidan för IEA International Energy Agency (TASK 33 Gasification of Biomass and Waste, 2017).

4 Karakterisering av slam ur förgasningssynpunkt

Vid bedömningen av hur användbart slam från avloppsreningsverk är som bränsle i förgasare fokuseras på tre olika områden:

- Vilket bränslevärde har slammet?
- Finns substanser i slammet som försvårar förgasning?
- Har slammet en struktur som passar till den typ av förgasare som är aktuell?

Bränslevärdet hos slam beror i stort sett på vilken slamtyp som är tänkt att förgasas och vilken torrhalt slammet har. Tre olika typer av slam finns i större mängd i slammet från avloppsreningsverk: primärslam, slam från aktivslamanläggningar och utrötat slam (eller en blandning av de två första).

Kvaliteten på slam som finns tillgängligt för termisk behandling varierar beroende på vilken teknik som respektive avloppsreningsverk använder sig av. Idag har många anläggningar ett rötningsssteg. TS-halten efter rötningen är ca 3–4 %. Genom mekanisk avvattning kan TS-halten öka till 20–35 %.

Genom rötningen minskar energivärdet per kg torrsubstans och Strömberg och Svärd (2012) anger ett värde på 15–24 MJ för askfritt, torrt rötslam. Med en typisk askhalt på 50 % för bra utrötat slam erhålls ett värmevärde på högst 12 MJ/kg TS. Det lägre energivärdet reducerar energivinsten vid förgasning. Rötningen ger dock en bra energigas (metan) så i praktiken anses utrötat slam vara det enda realistiska slambränslet. De anläggningar som har drivits i större skala har också baserats på rötat slam. I tabell 1 jämförs utrötat slam med andra typer av bränsle.

Tabell 1. Typiska värmevärden, TS- och askhalt för utvalda bränslen (Bioenergiportalen, 2013).

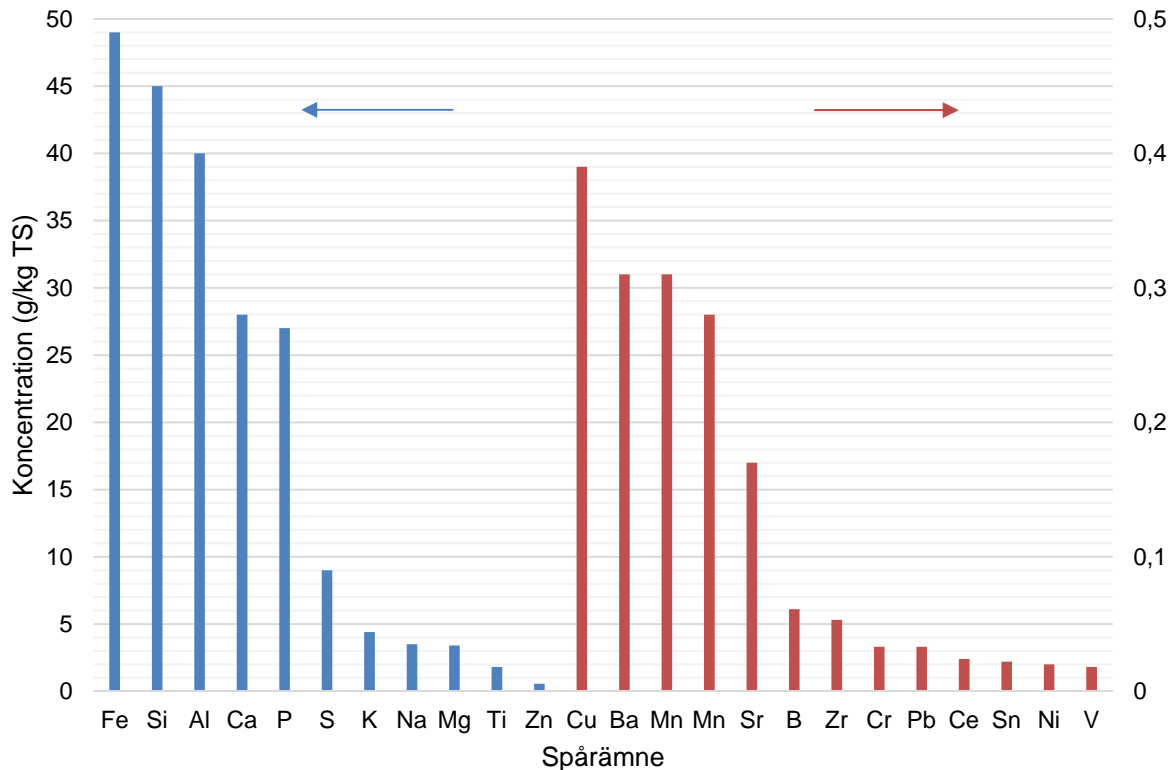
	Enhet	Halm	Flis	Eldningsolja	Utrötat slam
Värmevärde	MJ/kg TS	17,4	19,2	42,7	12
TS-talt	%	85	>~50	>99,9	25
Aska	% TS	7	~1	0,005	35

På ett enskilt reningsverk kan askhalten vara både högre och lägre än 50 % i utrötat slam. I litteraturen förekommer askhalter på upp till 60 % (Judex, Gaiffi & Burgbacher, 2012).

Av tabell 1 framgår det att utrötat slam har ett lägre energiinnehåll per kg TS jämfört med vanliga typer av biomassa som förgasas och att det innehåller avsevärt mer vatten och aska. Ur energi- och teknisk synpunkt är ett högt värmevärde och låg fukt- och askhalt önskvärt. Fukten måste drivas ut ur bränslet vilket kräver energi. Askan följer med som energiförbrukande dödvikt i förgasningsprocessen och medför stora askmängder att hantera i förhållande till andra biomassor. Slam är därför inte idealt som bränsle och efterfrågas inte. Slamförgasning får därför betraktas som en slambehandlingsmetod och inte som en metod för energiproduktion.

Avloppsslam innehåller många olika organiska och oorganiska föreningar och ämnen. De spårämnen som generellt sett förekommer i högst koncentration i slam finns sammanställda i figur 4. Slam har varierande innehåll beroende på varifrån det kommer. Ur ett förgasningsperspektiv är, utöver den stora askhalten, speciellt alkalimetallerna kalium och natrium intressanta då halterna har stor betydelse för askans smältegenskaper. Tungmetallerna har

betydelse om askan ska användas i jordbruket. Halten organiskt material reduceras rejält vid förgasning och om de krav, som ställs för användning inom jordbruket på tungmetallhalt i förhållande till TS-halt, höjs skulle det försvåra utnyttjandet inom jordbruket. Också innehåll av andra substanser (till exempel tjära) producerade under förgasningen kan göra askan oanvändbar i jordbrukssammanhang.



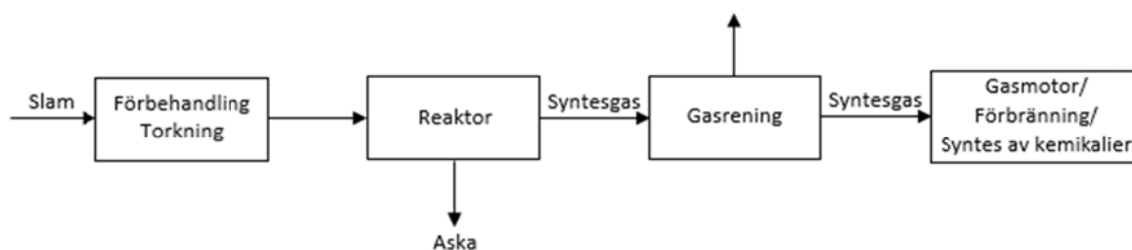
Figur 4. Spårämnena med högst förekomst i avloppsslam, uttryckt som gram per kg TS (Eriksson, 2001).

I allmänhet karakteriseras slam genom att det består av relativt små partiklar, har en hög askhalt och att delar av askan har en låg smältpunkt. De förgasarteknologier som kan vara attraktiva för slam ställer skilda krav på dessa egenskaper. Några kräver stora, likartade, fasta partiklar medan andra kräver små partiklar som har en mycket snabb reaktionstid. Slammets grundstruktur och den struktur det får genom torkning ska därför vara speciellt anpassat till den förgasningsteknologi som används.

5 Förgasningsprocesser

Förgasningsprocesser finns i många tillämpningar beroende på bränsletyper och syftet med processen. De finns i alla storlekar från mycket stora GW-kolförgasningsanläggningar, som tillverkar kemikalier av syntesgasen, till små anläggningar vilka kan producera drivgas till en bil. Förgasningsprocesser har utvecklats under mer än 100 år för många olika ändamål. Det är dock bara inom ett litet antal områden som processerna har fått stora framgångar. Ofta har det endast byggts enstaka anläggningar utan att de utvecklats för kommersiell spridning.

De använda processerna är rent processmässigt och tekniskt sett mycket olika. De kan dock alla sägas följa den principiella uppbyggnaden som visas i figur 5.



Figur 5. Schematisk bild av förgasningsprocessen.

Varje process har sina speciella karakteristika och sina för- och nackdelar. Nedan presenteras de processtyper som man har arbetat mest med inom de skandinaviska och europeiska forskningsprogrammen under de senaste 25 åren och som får anses vara de tekniskt sett mest användbara bland de olika processerna vid slamförgasning. Tabell 2 ger en översikt över teknikerna och deras viktigaste karakteristika.

Tabell 2. Tekniskt sett de mest användbara förgasningsprocesserna för slamförgasning med deras viktigaste karakteristika. Antal x anger hur väl teknologierna har utvecklats som bäst, d v s med det optimala bränslet.

Process	Storlek (MW)	Storlek ¹ (TS/år)	Bränsle flexibilitet	Gas-kvalitet	Kommersiell utvecklingsnivå	Ask-kvalitet
Fastbädd nedåt (medströms)	0,01–1	250–2 500	x	xx	xxx	xx
Två-steps fastbädd	0,01–2	250–5 000	x	xxx	x	xx
Fastbädd uppåt (motströms)	1–10	2 500–25 000	xxx	x	xxx	xxx
Fluidiserande bädd	0,5–100	750–15 000	xx	xx	xx	xx
Två-steps fluidiserande bädd	1–20	2 500–50 000	xx	xx	x	xxx
Suspensionsförgasare	100–1000	150 000–1 500 000	xxx	xxx	xxx	xxx

¹ Anger nivån för behandlad slammängd per år som TS med 5 000 driftstimmar och värmevärde 12 MJ/kg TS.

5.1 Fastbäddsmedströmsförgasare

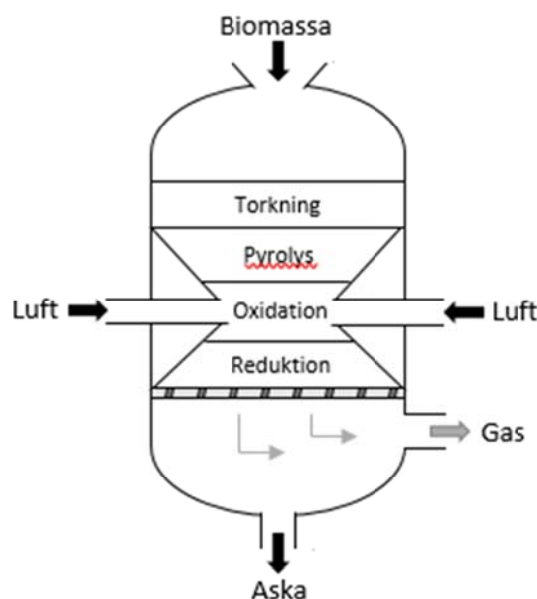
Fastbäddsmedströmsförgasare är den absolut vanligaste typen av förgasare som finns. Under andra världskriget producerades mer än 2 miljoner ”gasgeneratorer” av den här typen, baserade på ved som ersättning för bensin https://en.wikipedia.org/wiki/Wood_gas_generator.

Principen för medströmsförgasare visas i figur 6. Biomassan tillförs bädden ovanifrån och reagensgasen (vanligtvis luft) tillsätts från sidan över det galler som utgör botten på reaktionslagret. Luft och den gas som produceras strömmar ned genom bränslet medan reaktionerna sker. Gas tas ut vid hög temperatur och har därför en låg tjärhalt. Aska tas ut i botten av medströmsförgasaren.

Gallret kräver att processen tillförs bränsle med mycket likartade, mekaniskt stabila partiklar (10–50 mm) för att upprätthålla en lämplig och låg tryckförlust över bränslelagret och för att fungera tillfredsställande med endast en liten förlust av kol i askan. Principen kräver också en hög smältpunkt för askan i bränslet för att gallret inte ska slagga igen.

Många typer av bränsle, även slam, får därför göras om till briketter innan förgasningen. I praktiken har det dock visat sig vara svårt att producera briketter som är mekaniskt stabila. Går de sönder bildas det damm och småpartiklar som stoppar processen eller bildar kanaler.

Om processen skalas upp till över 0,5-1 MW blir gaskvaliteten sämre eftersom det är svårt att säkerställa en jämn temperatur ju större bädden är på grund av att luften tillsätts punktvis över gallret. Ojämn temperaturfördelning leder till att askan smälter i varma zoner där luften tillsätts samt att en stor mängd tjära produceras i kalla zoner.

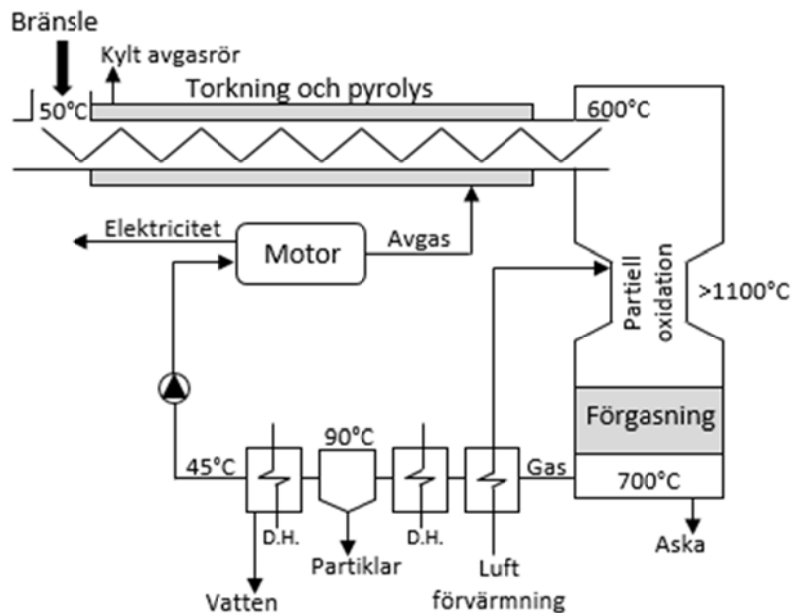


Figur 6. Principen för en fastbäddsmedströmsförgasare.

Ett sätt att öka kapaciteten är att dela upp processen i separata steg där de enskilda delarna av processen separeras fysiskt, se figur 7. Vanligtvis görs torkning och pyrolys i ett separat steg och förgasningen av pyrolysgas och koks i ett annat. På det sättet kan temperaturfördelningen

utjämnas och processen skalas upp i förhållande till den icke-uppdelade processen samt att ännu renare gas kan erhållas. De tekniska lösningarna blir dock mycket mer komplicerade genom uppdelningen.

Några få anläggningar har drivits i Danmark av denna typ med förgasning av ved, men i praktiken har det varit svårt att få processen att fungera industriellt och ingen av anläggningarna är i drift idag.

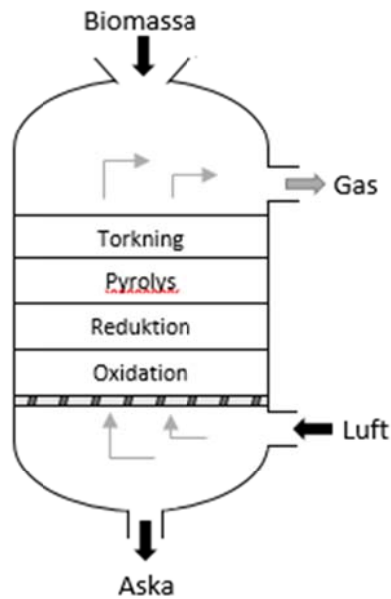


Figur 7. Principen för en tvåstegs fastbäddsmotströmsförgasare. D.H. i figuren innebär kylning och värmen går till fjärrvärme (District Heating).

5.2 Fastbäddsmotströmsförgasare

Fastbäddsmotströmsförgasare har använts industriellt de senaste 100–120 åren för värme- och gasproduktion och till olika industriella processer, exempelvis keramik- och glasproduktion.

Biomassan tillförs bädden ovanifrån och reagensgasen, vanligtvis luft, tillsätts underifrån som visas i figur 8. Bädden klarar av biomassa med relativt hög askhalt (upp till 15 %) och hög halt av fukt (upp till 50 %). Den är mer robust än andra fastbäddsförgasare och klarar variationer i storlek och kvalitet på biomassa bättre. Bränslet sjunker genom bädden och askan tas ut i botten. Bränsle med mycket vatten medför att det bildas mer koks och att temperaturen i förgasaren sjunker. I motsats till medströmsförgasaren rör sig den producerade gasen och bränslet mot varandra så att gasen lämnar reaktorn vid en låg temperatur, vilket medför att den har en hög tjärhalt och många partiklar. Om gasen ska användas till mer än förbränning krävs en mycket komplicerad och kostsam rening av gasen.



Figur 8. Principen för en fastbäddsmotströmsförgasare.

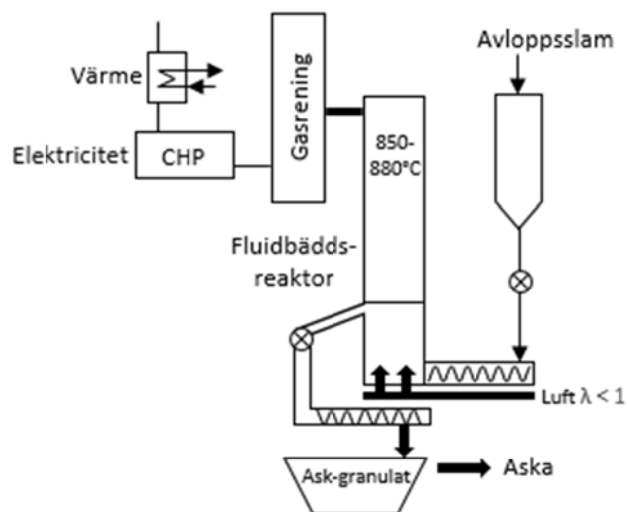
Tekniken ställer samma krav som medströmsförgasarna när det gäller att bränslet inte får ha alltför låg smältpunkt och att partiklarna ska vara mekaniskt stabila och stora för att få ett rimligt luft- och gasflöde genom processen.

Exempel på anläggningar är Harboøre Varmeværk i Danmark som har drivits med våt skogsflis i mer än 15 år och principen används också fortfarande för förgasning av torv i några finska värmeverk.

5.3 Fluidbäddsförgasare

Förgasare baserade på en fluidiserande reaktorer har använts de senaste 80–100 åren för tillverkning av energirik gas. De fullskaliga slamförgasare som har hittats i detta projekt är också baserade på denna teknik.

Förgasartypen finns i många olika utföranden. Figur 9 visar grundprincipen, vilken också utgör grunden för två fullskaliga anläggningar i Tyskland (se Hey, Koch & la Cour Jansen, 2017).



Figur 9. Principen för en fluidbäddsslamförgasare.

Torkad, finfördelad biomassa med någorlunda jämn partikelstorlek tillförs bädden i botten ovanför luftinblåsningen. I reaktorn finns tillsatt bäddmaterial – av typen sand – som säkerställer en snabb förgasning. Bränslet virvlas runt i reaktorn och sanden säkerställer en effektiv temperaturfördelning. Alla processer sker snabbt och simultant. Vid de tyska anläggningarna tillsätts ingen sand då slammets halt av oorganiska partiklar räcker.

Gasen lämnar reaktorn i toppen vid hög temperatur. Den har dock betydande innehåll av flygaska, mestadels fina kolpartiklar och tjära, som kräver avancerad partikelseparation och reduktion av tjärämnen i de fall gasen ska användas till annat än värmeproduktion. En del av kolet lämnar också vanligen reaktorn i form av mycket små partiklar.

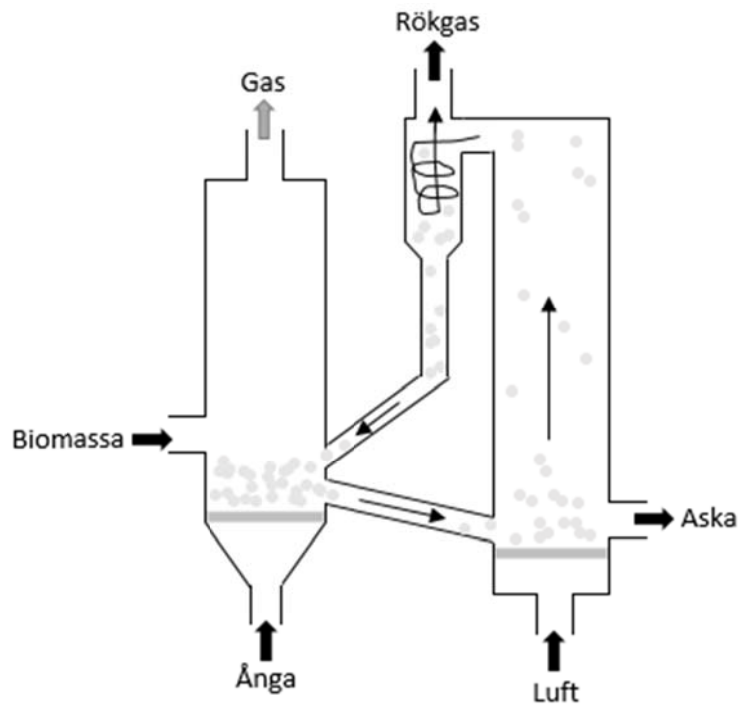
Askan samlas i den nedre delen av bädden varifrån den tas ut. Den innehåller vanligen 5-20 % av det tillförda kolet.

Arbetstemperaturen i förgasaren bestäms av bränslets smältkaraktär, vanligtvis en temperatur på 750– 950°C. Om bränslet har höga halter av beståndsdelar från aska med låg smältpunkt får bäddmaterialet bytas ofta vilket betyder stor askproduktion, eller alternativt får temperaturen sänkas med hög tjärhalt till följd. För att minska problemen med askämnen, såsom alkali, klor och svavel, kan kalk, magnesiumoxid eller andra ämnen tillsättas.

Stor kolförlust i askan och tjärinnehållet i gasen resulterar i en låg verkningsgrad och medför utmaningar vad gäller deponering av flyg- och bottenaska.

Många försök att modifiera förgasaren har gjorts genom steguppdelning av processerna. En typ av förgasare delar på förgasning och förbränning i två zoner där kvarvarande kol i askan eldas för att ge värme till processen. Även flera försök med andra modifieringar har gjorts. I praktiken ökar dock steguppdelningen komplexiteten i konstruktion och drift.

Utöver de två tyska slamförgasningsanläggningarna är också vedförgasaren i Skive i Danmark en fluidbäddsförgasare. Den är emellertid steguppdelad, principen visas i figur 10.



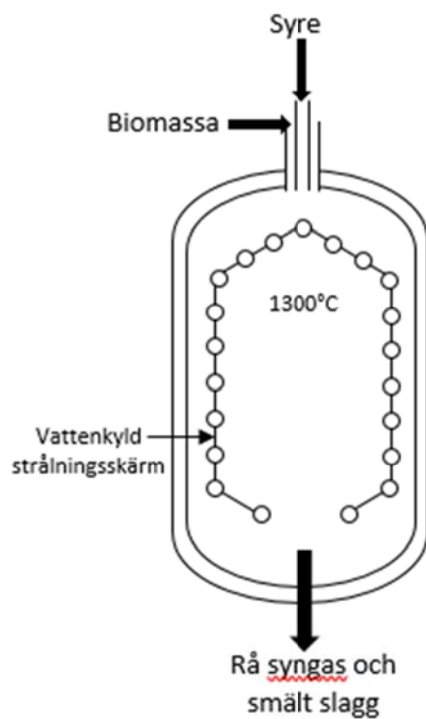
Figur 10. Principen för en steguppdeld fluidbäddsför gasare.

5.4 Suspensionsför gasare

Suspensionsför gasare är globalt sett den vanligast förekommande tekniken för kommersiella för gasare i stor skala. Dessa anläggningar producerar syntesgas för produktion av kemikalier. Kolför gasare av denna typ är mycket stora, ända upp till 1 GW tillfört kol. Som jämförelse är detta, i det fall det är intressant att bygga en sådan för gasningsanläggning för slam i Sverige, många gånger större än motsvarande den svenska totala slamproduktionen.

För gasarens princip visas i figur 11. Mycket finfördelat bränsle, ~0,1 mm, tillsätts reaktorn tillsammans med syrgas under högt tryck (30–50 bar) och vid hög temperatur (~1 300°C). För gasningen sker i stort sett momentant och det bildas ingen tjära eller koks. Askan är flytande och lämnar reaktorn som en väska. Den principiella utmaningen med suspensionsprincipen i relation till slamför gasning är att anläggningen ska vara mycket stor, > 250 MW, för att klara en rimlig verkningsgrad. Det betyder att för gasaren ska ha 15–25 kg TS per sekund. En sådan anläggning ska därför ta in motsvarande ca 375 000 ton TS per år vid 5 000 driftstimmar, vilket motsvarar hela Sveriges årliga produktion av orötat slam. Fördelen är emellertid att tekniken ger en ren gas och en geologiskt stabil aska där inga tungmetaller läcker ut.

Reaktorn ställer inte andra krav på bränslet än att det ska vara finfördelat och torrt. Om halten av aska är hög som i slam får man naturligtvis en stor mängd för glasad aska vars uppvärmning reducerar energivinsten.



Figur 11. Principen för en suspensionsförgasare.

Anläggningstypen anses inte vara lämplig då slam är den enda biomassen, men förgasning av slam tillsammans med annat avfall kan å andra sidan vara en bra lösning. Slammet får dock finfördelas före inmatningen.

Det finns ingen anläggning av den här typen i Skandinavien.

6 Kort presentation av fullskaliga slamförgasningsanläggningar och storskaliga experiment

Den kommersiella statusen för förgasning av avloppsslam presenterades senast i Brown & Caldwell (2012). Presentationen introducerar förgasning i generella termer och ger sedan en detaljerad presentation av de fem identifierade pilotskaleförsöken och de fyra fullskaliga förgasarna för avloppsslam som identifierats i världen. Genomgången gör det klart att teknologin är i ett väldigt tidigt stadium. Med Brown & Caldwell genomgång som utgångspunkt har de fyra fullskaliga anläggningarna kontrollerats för att se utvecklingen sedan 2012. Dessutom har en sökning efter andra fullskaleanläggningar eller andra pilotanläggningar genomförts, men inga ytterligare anläggningar har identifierats. Det finns många reklamskrifter för förgasningsanläggningar, men endast dokumenterade verkliga försök eller anläggningar inkluderas i denna rapport.

SÜLZLE KOPF: Fullskaliga installationer

Det tyska företaget SÜLZLE KOPF har byggt två fullskaleinstallationer för förgasning av avloppsslam. De två anläggningarna är beskrivna i en reserapport (Hey, Koch & la Cour Jansen, 2017). De är båda baserade på fluidbäddsteknologin och hanterar i normal drift 4 600 t TS/år (anläggningen i Balingen) och 5 000 t TS/år (anläggningen i Mannheim). Båda anläggningarna använder i dagsläget all producerad energi till slamtorken. Anläggningen i Mannheim är under ständig optimering och anläggningen byggs om för att optimera torken så att energiöverskottet i framtiden ska kunna användas till elproduktion.

Den första anläggningen startades år 2002 och den andra år 2012. Den första var en experimentanläggning i Balingen i Tyskland som behandlar 5,4 ton torkat slam per dygn. Den andra anläggningen byggdes i Mannheim och behandlar 15,7 ton torkat slam per dygn. Dimensioneringen av den andra anläggningen var baserad på anläggningen i Balingen. De två anläggningarna finns beskrivna i Judex, Gaiffi & Burgbacher (2012) och en ytterligare detaljerad beskrivning finns på SÜLZLE KOPFs hemsida: <http://suelzle-kopf.de/en/sewage-sludge-utilisation-plants-in-balingen-and-mannheim/>. En ny installation i Koblenz förväntas tas i drift under 2018.

MaxWest Environmental Systems fullskaleinstallation i Sanford USA

MaxWest Environmental Systems utvecklade en fluidbäddaförgasare för avloppsslam och baserat på pilotförsök byggdes en prototypinstallation för 80 ton vått slam per dygn i Sanford, USA. Anläggningen nådde aldrig full belastning och några år senare gick företaget i konkurs och anläggningen stängdes ner. Teknologin baserades på en torkningsenhet följd av en fluidbäddsförgasare. Gasen användes huvudsakligen för torkning och uppvärmning av systemet och hur askan användes är okänt.

Tokyo Bureau of Sewerage – Kiyose fullskaleinstallation

Tokyo Bureau of Sewerage fullskaleinstallation togs i drift år 2010 och den var baserad på pilotförsök under åren 2005 och 2006. Det har varit svårt att hitta tekniska specifikationer för anläggningen och inget har rapporterats från den sedan 2010. En kommersiell presentation med endast några få detaljer kan hittas på hemsidan för Kiyose Water Reclamation Center (Bureau of Sewerage, Tokyo) http://www.gesui.metro.tokyo.jp/english/news/r_and_r08/ och också på hemsidan för företaget METAWATER som har levererat anläggningen (http://www.metawater.co.jp/eng/product/plant/sewer/gas_convert/). Dessa presenterar

anläggningen som är gjord för 100 ton avfall (antags avse vått slam) per dygn som bestående av en torkningsenhet for torkning av det våta avloppsslammet till 20-30 % av det ursprungliga vatteninnehållet (vilket inte anges), följd av en pyrolysenhet som drivs vid 780-800°C. Efter pyrolysen förbränns en del av gasen för uppvärmning av systemet medan en del av gasen renas och används för elektricitetsproduktion.

Stamford, CT Waste to Energy Project

The Stamford, CT Waste to Energy Project var ett försök att utveckla ett energisystem för att kunna leverera billig energi. The City of Stamford (USA) bjöd in tre leverantörer att delta och demonstrera sina förgasningsteknologier för biomassa.

Efter pilotförsök under 2008 skickades torkat slam till större anläggningar som drevs av de tre leverantörerna Kopf (numera SÜLZLE KOPF) i Tyskland (se ovan), Primenergy i Tulsa Oklahoma och Nexterra i Kamloops i British Columbia.

Projektet i Stamford som sådant har stängts ner p g a höga kostnader och brist på teknisk genomförbarhet. Teknologin som SÜLZLE KOPF erbjuder är beskriven ovan. Primeenergy har ingen information om projektet eller om förgasning på sin hemsida <http://www.primenergy.com/>. Nexterra testade det torkade slammet från Stamford vid sitt Product Development Centre i Kamloops, BC. Företaget säljer fastbäddas motströmsförgasare och påstår på sin hemsida (<http://www.nexterra.ca/files/offices.php>) att Nexterras system kan drivas stabilt med följande biomassor:

- Trä (bark/flis, sågspån)
- Rent byggavfall
- Biomassa från avloppsslam.

Emellertid finns inga referenser på hemsidan och inga publikationer har publicerats om försök med slamförgasning.

7 Potentialen för slamförgasning i Sverige

Genomgången av olika förgasningstekniker i kapitel 5 och de internationella erfarenheterna som beskrivits i kapitel 6 visar att förgasning av slam är svårt. Endast anläggningar baserade på fluidbäddsförgasare finns idag i stor skala. En genomgång av de olika teknikerna visar att slam troligen har egenskaper som gör det lämpligt endast för denna typ förgasare och för suspensionsförgasare. Den senare förgasartypen kräver så stora anläggningar att den inte i sig är intressant för slamförgasning i Sverige. Om en suspensionsförgasare etableras i Sverige för hantering av andra biomassor kan slam dock tänkas ingå som supplerande bränsle. Den höga askhalten gör dock att slammet inte är ett attraktivt bränsle.

I ljuset av ovanstående kan tekniken för slamförgasning ännu inte anses var mogen och potentialen för ett införande i svensk VA-teknik bedöms därför inte vara intressant i nuläget.

Referenser

- Brown and Caldwell (2012) *Gasification of Sludge and Biosolids – A Review of Technology Fundamentals and the Current Commercial Status PNCWA*.
http://www.pncwa.org/assets/2012Conf/Presentations/Session_20_Energy_Recovery/winkler_gasification_sludge_biosolids.pdf (Använd 26 augusti 2017).
- Det Internationella Energiagentur (IEA), TASK 33 Gasification of Biomass and Waste. (2017). <http://task33.ieabioenergy.com/> (Använd 26 augusti 2017).
- Hey, T., Koch, T. & la Cour Jansen, J. (2017) *Reseberättelse från studieresa i Tyskland till reningsverk med termisk slamförgasning*. VA-Teknik Södra Rapport Nr. 07, 2017.
- Judex, J. W., Gaiffi, M. & Burgbacher, H. C. (2012) *Gasification of dried sewage sludge: Status of the demonstration and the pilot plant*. Waste Management 32 (2012) 719–723.
- Kiyose Water Reclamation Center (Bureau of Sewage, Tokyo)
http://www.gesui.metro.tokyo.jp/english/news/r_and_r08/ (Använd 26 augusti 2017).
- METAWATER. http://www.metawater.co.jp/eng/product/plant/sewer/gas_convert/ (Använd 26 augusti 2017).
- Milieu Ltd, WRC & RPA (2010) *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Final Report. Part I: Overview Report*.
http://ec.europa.eu/environment/archives/waste/sludge/pdf/part_i_report.pdf (Använd 26 augusti 2017).
- Nexterra. <http://www.nexterra.ca/files/offices.php> (Använd 26 augusti 2017).
- Primeenergy. <http://www.primenergy.com/> (Använd 26 augusti 2017).
- Strömberg, B. & Svärd, S. H. (2012) *Bränslehandboken 2012*. VÄRMEFORSK Serviceaktiebolag. ISSN 1653-1248.
- Süelzle-Kopf homepage: <http://suelzle-kopf.de/en/sewage-sludge-utilisation-plants-in-balingen-and-mannheim/> (Använd 26 augusti 2017).
- Sveriges officiella statistik (2016) *Utsläpp till vatten och slamproduktion 2014, Kommunala reningsverk, massa- och pappersindustri samt viss övrig industri*. Statistiska meddelanden MI 22 SM 1601.