

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Inst för Energiteknik
412 96 Göteborg

KRAFTPRODUKTION MED VÅTOXIDATION AV TORV

-
en sammanfattning och bedömning

Rapport A82-115

Anders Lyngfelt

Bo Leckner

September 1982

Detta arbete har delfinansierats av Nämnden för
Energiproduktionsforskning, projekt 1360 651 Våtoxidation CTH.

INNEHÅLL

SUMMARY	1
INLEDNING	2
BAKGRUND	3
Vad är våtoxidation	3
Tänkbara energiprocesser	6
Erfarenheter av våtoxidation	7
Reaktorns funktion	8
Termodynamiska aspekter	11
Energisystemaspekter	12
Miljöaspekter	12
Forsknings- och utvecklingspotential	13
SAMMANFATTANDE DISKUSSION	15
Genomförbarhet	15
Kostnader	15
Förslag	17
Slutsats	18
REFERENSLISTA	19
BILAGOR	
1. Litteraturöversikt	
2. Energibalanser för Burnieanläggningen	
3. Jämförelse mellan partiell våtoxidation och våtkolning	

SUMMARY

A general background on the subject of a peat wet air oxidation power process is given, including technical experiences, reactor function, environmental aspects, thermodynamics, and future research and development. The technical and economical feasibility of the process is discussed. It is concluded that although the process is technically feasible it is not cost competitive at current power rates in Sweden. However, a wet air oxidation steam process might well be cost competitive. Experiences from such a process will also provide a better basis to judge the feasibility of a possible future peat wet air oxidation power process.

INLEDNING

Denna rapport sammanfattar den första etappen av NE:s projekt 1360 651 Våtoxideration CTH. Rapportens huvudsyfte är att ge ett underlag för att bedöma möjligheterna att omvandla icke avvattnad torv till elektricitet med en kraftprocess baserad på våtoxideration. Tre rapporter har hittills presenterats inom ramen för projektet:

"En termodynamisk analys av våtoxiderationsprocessen för kraftproduktion" [1] behandlar de termodynamiska begränsningarna för processen. Ett sammandrag med i princip samma innehåll har presenterats vid 17TH INTERSOCIETY ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE [2].

"Våtoxideration - processkemi och reaktorteknik" [3] behandlar masstransportmekanismer, reaktionskinetik och olika reaktoralternativ.

"Erfarenheter av våtoxideration vid höga temperaturer och tryck" [4] redovisar våtoxiderationsteknikens status. Till en betydande del bygger rapporten [4] på de erfarenheter som gjorts vid Associated Pulp & Paper Mills (APPM) anläggning i Burnie på Tasmanien.

Tyngdpunkten i föreliggande rapport ligger i den sammanfattande diskussionen, som skall peka på de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för ett införande av tekniken. För att denna diskussion skall bli begriplig ges en bakgrund som till stor del baserar sig på innehållet i de tre publicerade rapporterna, i första hand på "Erfarenheter av våtoxideration vid höga temperaturer och tryck" vilken också rekommenderas till den som vill få lite mer känsla för vad våtoxiderationstekniken är. I bilaga 1 ges en introduktion till den litteratur som finns inom ämnet våtoxideration.

BAKGRUND

Vad är våtoxideration?

Med våtoxideration menas en förbränningsprocess som äger rum i vatten. Det organiska material som skall förbrännas är löst eller uppslammat i vattnet. En sådan lösning eller suspension kallas här för slurry. Exempel på tänkbara bränslen för en våtoxiderationsprocess är avloppsslam, lutar från massaindustrier och torv. Förbränningen kräver syre. Detta fås genom att luft, eller syrgasanrikad luft, bubblas genom slurryn. Syret diffunderar då in i slurryn där det reagerar med den organiska substansen. För att reaktionen inte skall bli för långsam måste temperaturen vara tillräckligt hög, fig. 1. Att upprätthålla temperaturen på önskad nivå är självfallet bara möjligt om trycket är tillräckligt högt då förångning av vattnet annars kommer att kyla slurryn snabbare än reaktionsvärmets hinner utvecklas, fig. 2.

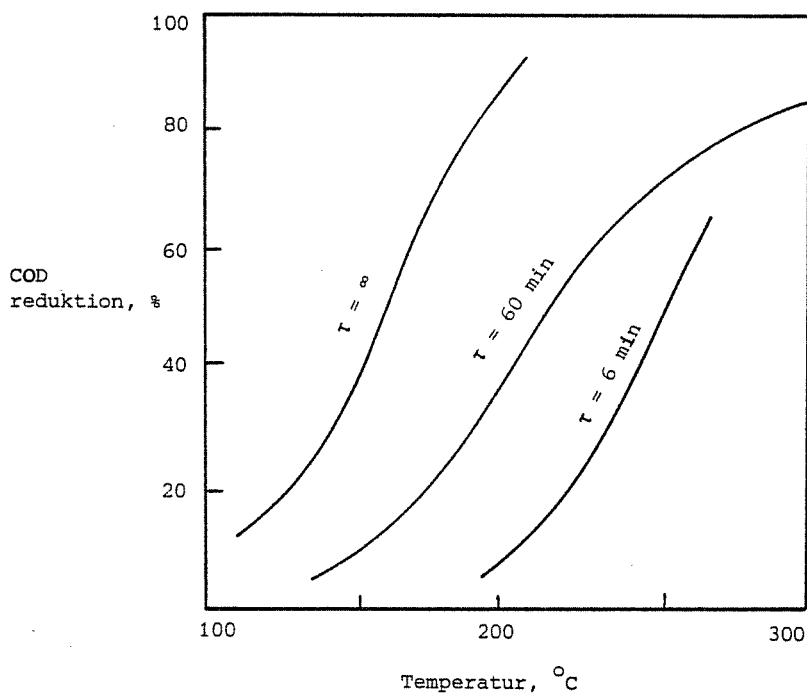


Fig. 1. Figuren visar oxidationsgrad eller minskning av organisk substans, räknat som COD (chemical oxygen demand), som funktion av reaktionstemperaturen vid reaktionstiderna 6 min, 60 min och oändlig uppehållstid, [5]. Diagrammet gäller våtoxideration av avloppsslam. Torv antas vara lättare att våtoxidera. Diagrammet visar inte förloppet över 300 °C. Av betydelse för kurvans utseende vid temperaturer över 300 °C är att vid temperaturer omkring 310 - 320 °C börjar oxidationen av ättikssyra bli betydande. Reaktorn i Burnieanläggningen uppges uppnå en oxidationsgrad på >96% vid 320 °C och en dryg timmes uppehållstid.

Precis som i en vanlig förbränningsprocess reagerar syre och organisk substans till koldioxid och vatten varvid värme utvecklas. Reaktionsvägarna skiljer sig dock mellan en vanlig förbränning och en våtoxideration. Generellt kan sägas att oförbränt organiskt material från en våtförbränningsprocess främst består av små organiska molekyler såsom ättiksyra, metanol, acetaldehyd, metan med mera. Vidare kommer oorganiska substanser att föreligga i sitt mest oxiderade tillstånd. (Svavel som sulfat, metaller som katjoner osv.) Ett undantag är kväve som även kommer att föreligga som ammoniak. De flesta substanser, med undantag av små gasformiga organiska molekyler, kommer således att lämna processen i vattenfasen. Detta bör innebära fördelar när det gäller att kontrollera emissionerna från anläggningen.

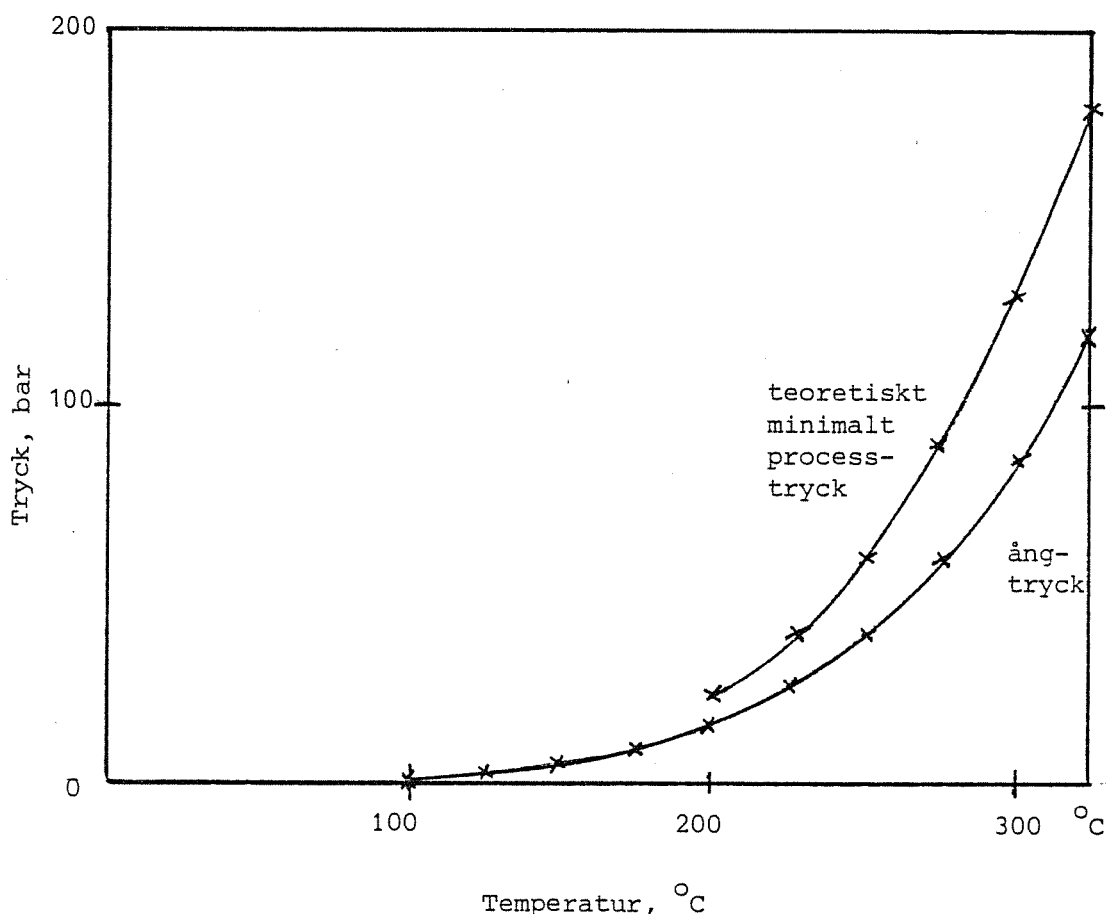


Fig. 2. Figuren visar ångtryck och "lägsta tänkbara" processtryck som funktion av temperaturen. En värmebalans över reaktorn visar att om det utvecklade reaktionsvärmnet skall balansera förångningen måste trycket vara ungefär 1,5 gånger så stort som mättnadstrycket för den aktuella reaktionstemperaturen. I praktiken måste trycket vara något högre än så då en del av det utvecklade reaktionsvärmnet tas i anspråk för temperaturstegring över reaktorn.

Tänkbara energiprocesser

Möjliga varianter är kraftprocesser, värmeproducerande processer, bränsleproducerande processer och kombinerade processer.

Vid en kraftprocess genereras el dels genom expansion av rökgasen, dels genom en sekundär ångcykel. En kraftprocess baserad på våtoxidering belastas av att det stora kompressorarbetet (1/4 av reaktionsvärmets) endast delvis kan återvinnas samt av att de låga temperaturnivåerna ger en dålig termodynamisk verkningsgrad för den sekundära ångcykeln. Verkningsgraden, definierad som netto utvunnen elenergi dividerat med tillfört bränsles kalorimetriska* värmevärde, för kraftprocessen begränsas därför till omkring 15%.

Värmeproducerande process: Finns det möjlighet att nyttiggöra lågtrycksånga i anslutning till anläggningen kan en våtoxideringsprocess ge ett mycket högt utbyte av den tillförda energin då våtoxideringsprocessen i princip varken har förluster i rökgas eller för torkning. 70%, kanske 80%, verkningsgrad är möjlig om verkningsgraden är definierad som netto producerat värme minus uppoffrad elektrisk kraft dividerat med bränslets kalorimetriska* värmevärde.

*Normalt beräknas verkningsgraden med det effektiva värmevärdet. Kvoten mellan effektivt och kalorimetriskt värmevärde för torv är 0,77 respektive 0,83 för torrsustanshalterna 40 och 50%. Denna kvot skall alltså multipliceras med verkningsgraden för den förbränningsanläggning som våtoxideringsprocessen skall jämföras med vid jämförelse med de här presenterade siffrorna. Energiåtgång vid transport och beredning - pressning med mera - bör också inkluderas i jämförelsen.

För kraftprocessen och för den värmeproducerande processen kan man tänka sig dels en fullständig förbränning vid 320 °C, 210 bar, dels en långtgående förbränning (>80%), vid exempelvis 270 °C, 100 bar. Den senare måste dock kompletteras med ett reningssteg för den ofullständigt oxiderade slurryn.

Bränsleproducerande process: Torv kan våtoxideras partiellt (10 - 15% av organisk substans) vid låg temperatur (≈ 190 °C), varvid en avvattningsbar återstod erhålls, [6]. Då ungefär 10 - 15% av det organiska materialet följer med pressvattnet innebär detta att omkring 70 - 80% av torven kan omvandlas till torrt bränsle. Kompressorarbetet är mycket mindre besvärande för denna process än för högoxidationsprocessen, dels då trycket bara är omkring 20 bar, dels då luftbehovet bara är en tiondel. Ett reningssteg krävs för pressvattnet. Eftersom detta har hög biologisk nedbrytbarhet är metanjäsning kanske lämplig.

Den partiella våtoxidationsprocessen är mycket nära besläktad med våtkolningsprocessen, [7]. Skillnaden består i att luft inte tillförs i våtkolningsprocessen vilket innebär att värme måste tillföras externt.

Bland bränsleproducerande processer kan också nämnas Koppelmanprocessen där delvis avvattnad torv skruvas genom en speciell reaktor vars utsida är värmd av ånga, [8]. En del av den organiska substansen avgår i motström, dels som gas, dels löst i vatten. Gasen förbränns för att försörja reaktorn med ånga och genom våtoxidation av det i vattnet lösta organiska materialet fås värme till förvärmning av torven.

Erfarenheter av våtoxidation

Våtoxidationsprocessen är känd sedan länge. Men det var först på 50-talet som man försökte använda den i samband med energiproduktion. Intresset för detta avtog dock med stigande oljepriser. Processen kom att tillämpas i första hand för att göra avloppsslam sterilt och avvattningsbart, men även för mera speciella avfall i vattenlösning. För närvarande finns runtom i världen över 200 våtoxidationsanläggningar som

destruerar avfall i olika former. Ett mycket begränsat antal arbetar vid de höga temperaturer som krävs för att uppnå en fullständig förbränning.

APPM har en anläggning i Burnie, Tasmanien, som våtförbränner lut från massatillverkning. Denna anläggning, som kommit mycket nära en fullständig förbränning, har en omfattande energiåtervinning och producerar netto 28 000 kg ånga/h, (se bil. 2). Tillgängligheten uppges vara över 90%, men då är många komponenter, såsom pumparna, dubblerade. Någon kraftåtervinning utnyttjas inte då man anser att anläggningen är för liten för att en sådan skall vara lönsam, men man ser inga skäl till varför det inte skulle vara praktiskt möjligt. Burnieanläggningen finns utförligt beskriven i [4]. Den sammanfattande diskussionen baserar sig till stor del på de erfarenheter som gjorts vid denna anläggning.

I Newark Bay, New Jersey, byggs för närvarande en annan ur energisynpunkt mycket intressant anläggning. Där skall avloppsslam våtoxideras partiellt för att ge bränsle för produktion av kraft och ånga. Ca 300 ton torrsubstans/dag skall behandlas i 12 stycken 40 m höga reaktorer.

Det finns inga erfarenheter av våtoxidation av torv i kommersiell skala. Med avseende på själva reaktionen hör torv till de bränslen som är lätta att våtoxidera. Beträffande system för värmeväxling och inmatning finns erfarenheter från våtkolning, [7]. Brytning och rörtransport av torv har också studerats i andra sammanhang.

Reaktorns funktion

Förutom att vara det kärl där reaktionen äger rum är reaktorn också en kontaktnordning mellan förbränningsluften och slurryn.

Reaktionshastigheten i slurryn beror av temperaturen, syrekoncentrationen och av typ av reaktant och dess koncentration. Masstransporthastigheten för syret från gasfasen till vätskefasen beror av diffusionshastigheten,

syrets löslighet i vätskan (vilka bägge beror av temperaturen), fasgränsyntans storlek samt koncentrationsgradienten, dvs. av partialtrycket av syre i gasfasen och dess koncentration i vätskefasen. Partialtrycket av syre i gasfasen beror av hur mycket syre som förbrukats, totaltrycket samt ångtrycket (temperaturberoende). I vätskefasen finns kopplingen till de beroenden som gäller reaktionshastigheten. Om reaktionen är så snabb att den till stor del äger rum i gränsskiktet kring bubblorna fås även ett beroende av det organiska materialets diffusionshastighet. Det bör observeras att vi har att göra med ett mycket stort antal reaktanter och intermediärer med olika reaktionshastigheter. Dessutom kommer inte bara den kemiska sammansättningen att ändras successivt i reaktorn utan också mediets fysikaliska egenskaper kommer att påverkas vilket har betydelse för massöverföringen. Systemet är alltså ganska komplext. Reaktions- och masstransportmekanismer finns beskrivna i [3].

Den vanliga reaktorkonstruktionen innebär att medierna går i medström dvs. förbränningsluft och syre införs i botten av reaktorn. Detta innebär att reaktanter och syre har hög koncentration i början av reaktorn. I en sådan reaktor sker kanske 90% av reaktionen i den första fjärdedelen av reaktorn vilket också innebär att slurryn snabbt uppnår temperaturer nära reaktorns topptemperatur. (Ytterligare värmeutveckling i slurryn går i första hand till ytterligare förångning snarare än till temperaturökning.) I slutet av reaktorn sker reaktionen däremot långsamt, dels på grund av att den organiska substans som återstår är den mest svåröxiderade men också på grund av den låga koncentrationen syre och organisk substans.

Ett sätt att utnyttja reaktorvolymen effektivare är att låta sista delen av reaktionen gå i motström. Detta kan exempelvis göras så att slurryn efter att ha gått igenom första fjärdedelen av reaktorn förs upp till toppen där den får vandra nedåt och möta de sista tio procenten av förbränningsluften, fig. 4. Detta har provats i den förra reaktorn hos APPM i sex månader och uppges kunna öka reaktionshastigheten med ungefär 50%. Anledningen till att

denna konstruktion inte används i deras nya reaktor är främst svårigheterna med genomföringar då reaktorn har dubbla skal.

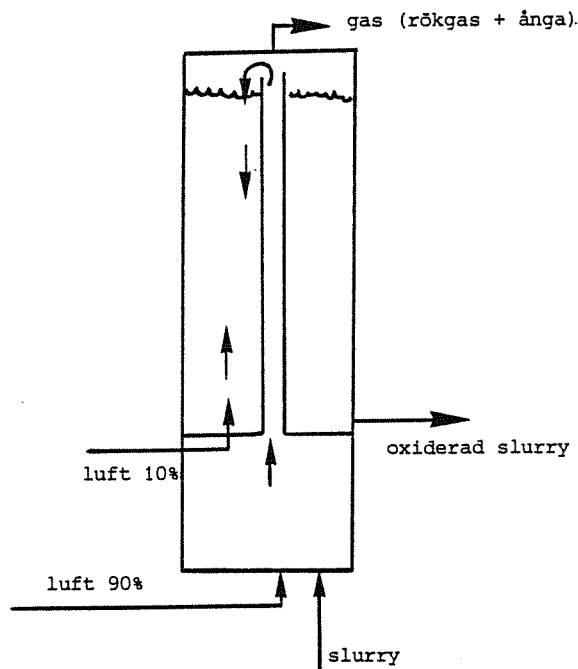


Fig. 4. Principskiss som visar hur slutfasen av reaktionen kan köras i motström.

I stället för att uppnå tillräckligt stor kontaktyta mellan vätska och gas genom att bygga mycket höga reaktorer finns möjligheten att utnyttja omrörare som slår sönder luftbubblorna. Det innebär dock stora tekniska problem med genomföringar vid tryck högre än omkring 40 - 50 bar. Att fylla reaktorn med packningsmaterial är ju en annan vanlig metod att öka kontaktytan mellan olika faser men kan knappast användas för ett medium som torv. Om man kunde finna någon lämplig metod att utnyttja katalysator i ett medium som torv skulle reaktionstemperatur och -tryck kunna nedbringas väsentligt.

Det kan således finnas möjligheter att förbättra reaktorns funktion så att mindre reaktorer kan byggas eller så att processtrycket och -temperaturen kan minskas vilket skulle förbättra processens ekonomi.

Termodynamiska aspekter

Det finns två tänkbara varianter för kraftprocessen. Den ena innebär att den mättade rökgasen värmeväxlas för att producera ånga till en sekundär ångcykel. Ångan i rökgasen kondenserar härvid och kan avskiljas och den relativt torra gasen kan expanderas genom en gasturbin. Den andra varianten innebär att den mättade rökgasen bara kyls så långt att värmebehovet för att förvärma slurryn bli tillfredsställt. Sedan expanderas den mättade rökgasen (ungefär hälften ånga, hälften rökgas) i en turbin som är anpassad till att klara detta speciella medium. Totalverkningsgraden för denna senare process blir sannolikt något lägre men den är mycket enklare då den saknar sekundär ångcykel med ångturbin, kondensator etc. Verkningsgraden för kraftprocessen har uppskattats till omkring 15%. Att bara 15% av tillfört reaktionsvärme blir nyttig energi kan verka litet, men det bör observeras att kompressorarbetet motsvarar ungefär en fjärdedel av tillfört reaktionsvärme. Av brutto producerad kraft går alltså den största delen åt till att täcka pump- och kompressorarbetet. Detta innebär att netto producerad kraft fås som en skillnad mellan två stora tal vilket gör att den beräknade totalverkningsgraden blir känslig för val av indata. Att verkningsgraden blir så låg beror inte bara på det stora kompressorarbetet, som endast delvis kan återvinnas, utan också på att processtemperaturen är låg, jämfört med konventionella kraftprocesser. Skall sekundärångan överhettas till de nivåer som är normala i kraftsammanhang måste detta göras med externt tillförd energi. Vinsten av detta blir räknat som förbättring av vätoxidationsprocessens verkningsgrad en ökning av denna med några procentenheter, [1].

Om istället sekundärångan används till uppvärmning, exempelvis processånga i en industri, fås ett mycket bättre utnyttjande av den frigjorda värmen i slurryn. I bilaga 2 finns en genomräkning av Burnieanläggningens energibalans. Denna visar att anläggningen, som ju producerar värme, har en verkningsgrad på närmare 40%. Med den kondensatåterföring, som ännu inte (september -81) tagits i drift, och med ett förbättrat utnyttjande av värmets i avgående flöden borde verkningsgraden

öka med närmare 20%. Hade dessutom en gasturbin utnyttjats borde verkningsgraden bli c:a 70%. Skulle sekundärångan i stället utnyttjats till enbart kraftproduktion skulle denna anläggning fått en verkningsgrad på drygt 10%. Vid jämförelse mellan verkningsgraden för kraft- och värmeproducerande processer har liknande resultat fåtts i ref [1] och [2]. Det kan fastslås att verkningsgraden för en värmeproducerande process är 4 - 7 gånger så stor som den för en kraftproducerande våtoxiderationsprocess. Normalt brukar kvoten mellan verkningsgraderna för kraft- och värmeproducerande processer vara omkring 2,5. Ur strikt termodynamisk synvinkel kan alltså fastslås att våtoxiderationsprocessen är bättre lämpad för värme- än för kraftproduktion.

Energisystemaspekter

En våtförbränningsanläggning bör förläggas vid råvarukällan. En kraftproducerande anläggnings storlek optimeras med hänsyn till bränsletransportkostnaden under anläggningens livstid.

En värmeproducerande anläggning är dessutom beroende av en värmeförbrukare inom rimligt avstånd. En tänkbar storlek skulle kunna vara 20 MW_v. Med utnyttjningstiden 7 000 h/år under 20 år skulle detta kräva 3,5 TWh eller en mosse på ett par hundra hektar. En kraftprocess måste säkerligen vara väsentligt större. Detta gäller särskilt om den är försedd med sekundärkrets. Då krävs också kylvatten till kondensorn.

En väsentlig fråga är hur problem med frysning kan klaras vid pumpning och brytning.

Miljöaspekter

Det bör observeras att det inte finns publicerat någon undersökning av sammansättningen av varken den gasformiga eller vätskeformiga fas som lämnar processen. Utflödet från en partiell våtoxideration är däremot väl dokumenterat. I [8] diskuteras miljöpåverkan av olika våta torvprocesser för energiproduktion.

Vätskeformiga utsläpp: Huruvida vätskefasen behöver någon rening beror på hur fullständig oxidation som uppnåtts. En fullständigt oxiderad torvslurry innehåller lösta och suspenderade salter, oxider och silikater och innehåller svavelsyra/sulfater i proportion till torvens svavelinnehåll. Eventuellt behöver pH justeras i vätskefasen och i den avskilda fasta fasen, slammet, som normalt är sura. Det är inte praktiskt möjligt att uppnå en fullständig oxidation då detta skulle kräva en "oändlig" uppehållstid, dvs. reaktorvolym. Några procent av det organiska materialet kommer därför att förbli oförbränt. Främst är det fråga om små enkla organiska molekyler, såsom ättiksyra, som har hög biologisk nedbrytbarhet. En biologisk rening av utgående vätskefas kan behövas.

Gasformiga utsläpp: vid en fullständig oxidation kommer allt svavel att omvandlas till sulfat och allt kväve att omvandlas till ammoniak och dess salter. Detta innebär att det inte förekommer SO_x eller NO_x . Gasfasen kommer att innehålla gasformiga små organiska molekyler, såsom exempelvis metan, samt kolmonoxid och vätgas. Dessa ämnen kan efterförbrännas i ett katalytiskt filter men detta bör inte vara nödvändigt då det är fråga om relativt små mängder.

Forsknings- och utvecklingspotential

Våtoxidationsprocessen är en gas- vätskefasreaktion av en typ som är svår att skala upp eller ner. Det kan därför vara svårt att få en meningsfull information om reaktorns funktion - masstransporter m. m. - ur en mindre pilotanläggning. Dessutom är det säkerligen svårt att få kringsystem - såsom pumpning och värmning av torv - att fungera för små flöden. För den typ av reaktor som är vanlig, dvs. medströms bubbelreaktor med bottnar för att motverka backmixing, är det egentligen bara uppehållstiden (reaktorvolym), reaktionstemperaturen och höjden (gasfasens kontakttid/yta) som kan påverkas. Erfarenhetsmässigt känner reaktortillverkarna till vilken reaktorhöjd, reaktorvolym och reaktionstemperatur som krävs för att uppnå en viss oxidationsgrad. Det företag som dominerar inom området hävdar att man har så stor erfarenhet

att man kan projektera en reaktor på basis av autoklavförsök med den aktuella slurryn. Att studera våtoxideringen för att ta fram dimensioneringskriterier är därför säkerligen både överflödigt och svårt.

Däremot vore det av intresse att studera vilka restprodukter som fås i gas- och vätskefasen vid en (nästan) fullständig våtoxidering. Detta skulle ge underlag för bedömning av hur långt det är optimalt att driva reaktionen med hänsyn till miljökrav och eventuella behov av reningsanordningar. Sådana försök kan utföras i autoklaver och kan vara en lämplig uppgift för en teknisk högskola.

Av intresse vore också att få belyst energisystemaspekterna för en våtoxideringsprocess som nöjer sig med att producera värme. Finns, eller går det att skapa, underlag för sådana anläggningar i rimlig närhet till torvtäkter?

För en kraftprocess vore det intressant att få mera kunskap om möjligheterna att använda en turbin som kan expandera rökgasen utan att först huvuddelen av ångan kondenserats. Kan en sådan turbin utformas med kontinuerlig vattenavskiljning eller på annat lämpligt sätt till rimliga kostnader och med acceptabel verkningsgrad?

Mycket arbete återstår också när det gäller att öka kunskapen om metoder för värmeväxling, pumpning och beredning av torvslurry.

SAMMANFATTANDE DISKUSSION

Genomförbarhet

Våtförbränning vid höga tryck och temperaturer har genomförts med framgång i en anläggning i kommersiell skala. Denna anläggning producerar värme, men den extra utrustning som behövs för elproduktion är konventionell eller bygger på etablerad kunskap.

Erfarenheterna av våtoxideration av torv samt av system för brytning, transport och lagring av våt torv är begränsade. Val av bränsle påverkar något reaktorns utformning, utsläppens egenskaper och utförandet av värmeväxlare. Erfarenheter av värmeväxling av torvslurry finns dock från våtkolningsanläggningar [7].

Man kan fastslå att kraftproduktion genom våtoxideration är praktiskt genomförbar om än otillräckligt utvecklad.

Kostnader

Det är svårt att bedöma de verkliga kostnaderna för en teknik som till stora delar är oprövad. Erfarenheterna från Burnieanläggningen är mycket intressanta och kan ge någon vägledning eftersom denna anläggning nu varit i drift i några år och fungerar bra. Anläggningen är dessutom en "andra generation". Innan den byggdes hade man nämligen våtförbränt lut i en något mindre anläggning i över 10 år.

Med hänsyn till APPM:s önskemål kan inga detaljerade kostnadsuppgifter för anläggningen publiceras här. Storleksordningen kan dock antydast även om skillnader sannolikt finns mellan en anläggning i Tasmanien och vid en svensk torvmosse. Kapitalkostnaderna och underhållskostnaderna för Burnieanläggningen är tillsammans större än de kostnader för ny baskraft som är aktuella i Sverige i dag om en totalverkningsgrad för anläggningen på 10% antas. Då bör följande observeras:

- Kostnader för de delar av systemet som skulle krävas för att ge en kraftproduktion - dvs. gasturbin, ångturbin, kondensator och generatorer - är inte inräknade.

- Kostnad för bränsle är inte inräknad. För en process med en verkningsgrad på 10% måste stora mängder torv brytas.

- Burnieanläggningen är en enstaka anläggning med en storlek på ungefär 20 MWv (maximum). Ett våtoxkraftverk skulle med nödvändighet vara större och dessutom borde flera kunna byggas i serie vilket borde minska både specifika drifts- och underhållskostnader.

- En högre verkningsgrad borde vara möjlig, [1,2]. 15% verkningsgrad i stället för 10% skulle minska de specifika kostnaderna med en tredjedel.

- Det är ofullständigt känt vad det innebär, när det gäller tekniska lösningar och ekonomi, att använda torvslurry i stället för massalut exempelvis vid värmeväxling och pumpning.

- Lutförbränningen är, till skillnad från torvförbränning, en kretsprocess vilket innebär att organiskt material (främför allt ättiksyra) återcikuleras, i den mån det inte är fråga om gasformiga molekyler. Vidare är lutens pH lägre vilket minskar mängden organiska syror i gasfasen. Detta kan innebära extra kostnader för rening av utgående flöden vid våtoxidation av torv jämfört med lut.

Utgående från det begränsade kunskapsunderlag som finns konstaterar vi att elproduktion med våtoxidation inte kan bli ekonomiskt lönsamt med dagens elpriser. Å andra sidan kan elpriserna på sikt förväntas öka. Kostnaden för elproduktion med våtoxidation bör jämföras med alternativa anläggningar för omvandling av torv försedda med reningsutrustning som medför jämförbar miljöpåfrestning. Vid denna jämförelse blir då produktionskostnaden inte enbart en fråga om anläggningskostnader för själva omvandlingsanläggningen. Den blir även beroende av metodik för utvinning, beredning och transport av torv, samt av möjligheten att driva anläggningen

på vintern. Det måste understrykas att elproduktion från torv skiljer sig från elproduktion från kol eller olja i att transportkostnaderna sannolikt utgör en storleksbegränsande faktor. Ekonomiska skaleffekter talar därför mot en elproduktion från torv. Å andra sidan är torvpriserna och leveranssäkerheten mer under kontroll vid användning av ett inhemskt bränsle än vid användning av importerade bränslen. Dessa påverkande faktorer är för närvarande otillräckligt kända. Slutsatsen blir kvalitativ: Våtoxideringsprocessen bör studeras vidare såsom föreslås i följande avsnitt.

Att kostnaden för att producera el med våtoxidering ter sig hög med dagens elpriser och med det begränsade kunskapsunderlag som finns innebär inte att produktion av ånga med våtoxidering skulle vara ekonomiskt orealistiskt. Den stora skillnaden i verkningsgrad mellan en våtoxideringsprocess för kraftproduktion och en för värmeproduktion [1,2] får ett stort genomslag vid en ekonomisk jämförelse. Om den tidigare är 10 - 15% och den senare 60 - 70% innebär detta att värmeprocessen levererar fyra till sju gånger så mycket energi till en lägre total kostnad (processen blir ju något enklare om inte kraft behöver genereras). En våtoxideringsprocess för värmeproduktion kan därför vara ekonomiskt försvarbar redan i dag. Det är visserligen fråga om värme i stället för el men då skillnaden mellan el- och värmekostnader för närvarande är relativt liten i Sverige skulle det verka underligt att producera el i stället för värme till en kostnad som är 5 - 10 gånger högre. En värmeproducerande våtoxideringsprocess måste dock jämföras med andra metoder för att förbränna ofullständigt torkad torv, såsom exempelvis Fagerstaprocessen.

Förslag

De praktiska erfarenheterna av våtoxidering i kommersiell skala är små. Samtidigt dröjer det kanske 20 år innan elproduktion med våtoxidering av torv kan bli aktuell. Under denna tid kan en kunskapsutveckling ske inom ramarna för normal ekonomisk lönsamhet. Man kan börja med att skaffa sig

erfarenheter inom följande områden:

- En satsning på våtkolning - eller partiell våtförbränning
- av torv skulle ge värdefulla erfarenheter när det gäller värmeväxling av torv, "våt" torvhanteringsteknik med mera.

- För massaindustrins avlutar är våtförbränningsprocessen ett mycket intressant alternativ till nu använda metoder. Våtförbränningsprocessen lämpar sig dock knappast för annat än svavelfria alkalilutar. Sådana används för närvarande inte i Sverige men utgör ett intressant framtidsperspektiv [9]. Tekniken att våtoxidera massalutar är visserligen redan prövad med gott resultat men det skulle ändå vara en fördel om dessa erfarenheter av våtoxidation vid höga temperaturer fanns på närmare håll än Tasmanien. Av stort intresse är självfallet de erfarenheter av våtoxidation av lut som gjordes vid Borregaard A/S, Sarpsborg, i slutet av femtiotalet och början av sextiotalet [4,10].

- Våtoxidation av torv för ångproduktion är möjligen ekonomiskt genomförbar redan nu. En nödvändig förutsättning är dock att man har en mosse tillräckligt nära en förbrukare av ånga eller, omvänt, att man förlägger en industri med behov av processånga i anslutning till en mosse.

Slutsats

Det finns stor brist på kunskap både beträffande tekniken och ekonomin för ett våtoxkraftverk för torv. Vår bedömning är att det är lämpligt att avvakta med en satsning på en sådan anläggning tills mera praktisk erfarenhet finns i enlighet med de ovan antydda stegen. Tiden är inte ännu mogen för varken en storsatsning på, eller ett definitivt förkastande av, våtoxidationens möjligheter att omvandla torv till elkraft. Däremot skulle det vara av stort intresse att bättre få belyst möjligheten att producera ånga med våtoxidation av torv.

REFERENSER

- [1] Lyngfelt, A. och Leckner, B., En termodynamisk analys av en våtoxideringsprocess för kraftproduktion. Rapport A82-110. Inst. för Energiteknik. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg 1982.
- [2] Lyngfelt, A. and Leckner, B., A thermodynamic study of a wet air oxidation power process. Bidrag till 17th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Los Angeles 8-13 aug. 1982.
- [3] de Vos, R., Våtoxidering - processkemi och reaktorteknik. Rapport A82-111. Inst. för Energiteknik. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg 1982.
- [4] Lyngfelt, A., Erfarenheter av våtoxidering vid höga temperaturer och tryck. Rapport A82-112. Inst. för Energiteknik. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg 1982.
(Även utgiven av Nämnden för Energitillämpningsforskning som projektrapport NE/FBA-82/87)
- [5] Ploos van Amstel, J.J.A., The oxidation of sewage sludge in the liquid water phase at elevated temperatures and pressures. Ph.D. thesis. Technische Hogeschool te Eindhoven. Eindhoven 1971.
- [6] Cederquist, K.N. och Bering, P., Wet combustion - a process for the utilization of peat. Acta Polytech. Chem. Incl. Metall. Ser., 3, No. 1(1952) 1-34.
- [7] Hägglund, S.-E., Våtkolning av torv. AB Svensk Torvförädling. Lund 1960.
- [8] Smith, R.T., Environmental aspects of alternative wet technologies for producing energy/fuel from peat. Energy Resources Co., Inc.. Walnut Creek 1981.
(Kan beställas från NTIS som DOE/FC/10169-T1)
- [9] Cederquist, K.N., Våtförbränning av sodasvartlut intressant framtidsperspektiv. Sven. Papperstidn., 85(1982) 28-33.
- [10] Blikstad, F., Zimmermannprocessen för celluloseindustrin. Nor. Skogind., No.5(1956) 172-180.

BILAGA 1 LITTERATURÖVERSIKT

Denna litteraturöversikt gör en innehållsmässig gruppering av materialet men refererar inte innehållet i den presenterade litteraturen. Några artiklar nämns dock speciellt. I litteraturlistan finns artiklarnas namn utskrivna vilket underlättar sökandet.

En grov uppdelning av det material om våtförbränning som finns publicerat har gjorts på följande områden:

- Allmänt orienterande [1 - 12]
- Avloppsslam [13 - 30]
- Massa och papper [31 - 51]
- Reaktionskinetik och masstransport [52 - 70]
- Torv [71 - 78]
- Kol [79 - 82]
- Material, korrosion [83 - 84]
- Termodynamik [85 - 93]
- Våtkolning [94 - 104]

I gruppen "allmänt orienterande" finner man i första hand artiklar som behandlar både våtoxideration av avloppsslam och avlutar från massaindustrin. Bland tidiga artiklar av intresse kan nämnas [3,4,11,12]. [9] är en nyskriven översiktsartikel.

Under rubriken avloppsslam finns den största gruppen. Här innefattas förutom kommunalt avloppsslam också våtoxideration av giftiga avfall [15] och organiskt avfall från båtar [19]. [27,29] behandlar den kemiska sammansättningen hos våtoxiderat avloppsslam.

I gruppen "papper och massa" behandlas i första hand våtoxideration av avlutar men också våtoxideration av processvatten från papperstillverkning [39,40,42]. [45,46,48,74] behandlar APPM:s anläggning i Burnie. [37] är en nyskriven artikel som belyser möjligheterna att utnyttja våtoxiderationsprocessen i massaindustrin. Borregaard A/S anläggning beskrivs i [34].

En anseelig del av det material som finns publicerat har skrivits av medarbetare på Zimpro Inc., det företag som varit dominerande på våtoxiderationsområdet [10,11,12,20,28,29,30,41,42,48,50,51,81,82,84] eller behandlar Zimproanläggningar [2,6,14,15,16,17,18,22,26,33,39,40,44]. En konkurrerande process, Wetox, har också resulterat i ett antal artiklar [5,32,35,36,72].

De flesta artiklarna i gruppen "reaktionskinetik och masstransport" behandlar katalytisk våtförbränning [52,54,55,56,58,59,60,65,66,67]. Hastighetskonstanter för enskilda ämnen har studerats i ett doktorsarbete [69]. I en annan doktorsavhandling [61] har en modell för oxidationshastigheten av avloppsslam ställts upp. Se även [62,63]. I två välskrivna artiklar behandlas masstransport [64] respektive reaktionskinetik [53]. Grunderna i reaktionskinetik och masstransport ges i [68]. I [57] studeras lösningshastighet för fast material samt reaktionskinetik. Syrets diffusionshastighet behandlas i [70].

Partiell våtoxideration behandlas i [71]. Möjligheten att producera kraft genom en fullständig våtoxideration av torv har studerats i [72,73,75,76,77]. [72] kommenteras speciellt i [92]. Miljöaspekter behandlas i [78] och tekniska förutsättningar i [74].

En kraftprocess för våtoxideration av kol diskuteras i [81,82]. Försök med våtförbränning av kol redovisas i [79,80]. I [80] redovisas även resultat av vissa försök med torv.

[83,84] behandlar livslängden hos olika konstruktionsmaterial för reaktorer.

[85,90,92,93] behandlar våtoxiderationsprocessens termodynamik. [85] kommenteras speciellt i [92]. Vid studium av våtoxiderationsprocessens termodynamik krävs kunskap om egenskaperna hos det medium som lämnar reaktorn. Dessa har studerats i [86,87,88,89,91].

AB Torvförädlings omfattande arbete med våtkolning på 50-talet presenteras i [98]. Vid detta arbete skrevs också ett mycket stort antal delrapporter av vilka några [94,95,97,99,100] kan vara av intresse vid jämförelse mellan våtkolning och partiell våtoxideration. [101 - 104] är exempel på nyare arbeten inom området våtkolning. [96] beskriver några olika processer för partiell våtoxideration.

LITERATURE

General

- [1] Anon., Wet oxidation: a brief description. Ontario Research Foundation. Mississauga, date missing.
- [2] Anon., Wet air oxidation comes of age. Environ. Sci. Technol., 9(1975) 300-301.
- [3] Bruner, B., Järnberg, T., and Jönsson, S.-E., Vad kan det bli av våtförbränning? Sven. Papperstidn., 58(1955) 332-345.
- [4] Cederquist, K.N., Våtförbränning. Sven. Papperstidn., 58(1955) 154-164.
- [5] Gavelin, G., Kan våtförbränningen komma tillbaka? Kem. Tidskr., No. 7(1981) 92-96.
- [6] Hurwitz, E. and Dundas, W.A., Wet oxidation of sewage sludge. J. Water Pollut. Control Federat., 32(1960) 918-929.
- [7] Lohmann, U., and Tilly, A., Nassverbrennung. Chem. Ing. Tech., 37(1965) 913-916.
- [8] Othmer, D.F., Earth + water + air = fire - wet air oxidation of wastes. DECHEMA-Monografien Vol. 86/II, pp. 597-616. Verlag Chemie. Weinheim 1980.
- [9] Perkow, H., Steiner, R., and Vollmüller, H., Wet air oxidation - a review. Ger. Chem. Eng., 4(1981) 193-201.
- [10] Pradt, L.A., Developments in wet air oxidation. Chem. Eng. Prog., 68(1972) 72-77.
- [11] Teletzke, G.H., Wet Air Oxidation. Chem. Eng. Prog., 60(1964) 33-38.

- [12] Zimmermann, F.J., New Waste Disposal Process. Chem. Eng. N.Y., 65(1958) 117-120.

Sewage Sludge

- [13] Anon., Abwasserreinigung durch nassoxydation. Verfahrensberichte zur physikalisch-chemischen Behandlung von Abwässern, (6).
Verband der Chemischen Industrie e.V.. Frankfurt am Main 1976.
- [14] Anon., Sludge treatment and disposal by the Zimmermann process. J. of San. Eng. Div., Proc. Am. Soc. Civil Engineers, 85, No. SA4 (1959) 13-24.
- [15] Anon., Wet air oxidation works in Louisville, Ky. Water Wastes Eng., 14, No. 9,(1977) 54.
- [16] Anon., Thermal conditioning with air. Water Serv., 81(1977) 341-344.
- [17] Angegend, F.-J., Die Nass-Luft-Oxydation von Schlamm. Brennst.-Wärme-Kraft, 18(1966) 252-256.
- [18] Bachofen, M., Die Schlammbehandlung - System Zimpro der ARA Staz/Celerina. Gas Wasser Abwasser, 52(1972) 16-21.
- [19] Bridges, D.W. and Fasell, W.M., Pilot-plant demonstration of wet oxidation for treatment of shipboard waste waters. Barber-Colman Co.. Irvine 1975.
(Available from NTIS as ADA-028 819)
- [20] Flynn Jr., B.L., Wet air oxidation of waste streams. Chem. Eng. Prog., 75(1979) 66-69.
- [21] Guccione, E., Wet combustion of sewage sludge solves disposal problems. Chem. Eng. N.Y., 71(1964) 118-120.

- [22] Harding, J.C. and Griffin, G.E., Sludge disposal by wet air oxidation at a five mgd plant. J. Water Pollut. Control Federat., 37(1965) 1131-1141.
- [23] Kershaw, M.A., Sludge treatment - future trends. Process Biochem., 1(1969) 46-48.
- [24] Ottengraf, S.P.P and Lotens, J.P., Heat treatment and low pressure oxidation of aqueous sewage sludge. Water Res., 12(1978) 171-178.
- [25] Satoh, M. and Tanaka, Y., Evaluation of wet air oxidation process in sewage sludge treatment. Report Sewage Works Bureau. The City of Yokohama, Yokohama. Date missing.
- [26] Seegert, N., Wet air oxidation of communal sewage sludge. Vattenhygien, No. 2(1965) 47-57.
- [27] Sommers, L.E. and Curtis, E.H., Wet air oxidation: effect on sludge composition. J. Water Pollut. Control Federat. 49(1977) 2219-2225.
- [28] Teletzke, G.H., Wet air oxidation of sewage sludge. Process Biochem., 3(1966) 329-333.
- [29] Teletzke, G.H., Gitchel, W.B., Diddams, D.G., and Hoffman, C.A., Components of sludge and its wet air oxidation products. J. Water Polut. Control Federat., 39(1967) 994-1005.
- [30] Wilhelmi, A.R. and Knopp, P.V., Wet air oxidation - an alternative to incineration. Chem. Eng. Prog., 75(1979) 46-42.

Pulp and Paper

- [31] Anon., Waste: a hot item these days! Environ. Sci. Technol., 12(1978) 754-756.

- [32] Anon., Can Wetox handle spent sulfite liquor. Can. Chem. Process., Nov.(1977) 20-22.
- [33] Anon., How Hammermill solved its effluent problem. Pulp. Pap., 30(1956) 98-99.
- [34] Blikstad, F., Zimmermannprocessen for celluloseindustrien. Nor. Skogind., No.5(1956) 172-180.
- [35] Cadotte, A.P. and Laughlin, R.G.W., New development in waste disposal. Pulp Pap. Can., 80(1979) T341-T344.
- [36] Cadotti, A.P. and Laughlin, R.G.W., Air/water pollution minimized by burning under water. Ontario Research Foundation. Mississauga 1977.
- [37] Cederquist, K.N., Våtförbränning av sodasvartlut intressant framtidsperspektiv. Sven. Papperstidn., 85(1982) 28-33.
- [38] Cederquist, K.N., Some remarks on wet combustion of cellulosic waste liquors. Sven. Papperstidn., 61(1958) 38-.
- [39] Fenchel, U. and Ulrich, C., Nassoxydation von Klärschlamm und Zellstoffablauge mit dem Zimpro-Verfahren. Wochenbl. Papierfabr., 104(1976) 733-734.
- [40] Fenchel, U., Klärschlammverwertung durch Nassoxydation nach Zimpro. Papier (Darmstadt), 32, No. 10A(1978) V54-V60.
- [41] Flynn Jr., B.L., Wet air oxidation for black liquor recovery. Chem. Eng. Prog. 72(1976) 66-68.
- [42] Flynn Jr., B.L., Swiss mill is trying wet air oxidation to get rid of sludge and recover filler. Pap. Trade J., May(1976) 23-24.
- [43] Hanssen, L., Litt om våtforbrenning av avlut fra cellulosefabrikasjonen. Nor. Skogind. No 12(1954) 454-465.

- [44] Jackson, D.T. and Brown, R.W., Oxidation of spent semichemical pulping liquors. Pulp. Pap. (1958) 69-72.
- [45] Maddern, K.N., Wet air oxidation recovery at Burnie. Appita, 34(1980) 130-134.
- [46] Morgan, J.E. and Saul, C.M., The Zimmermann process in a soda pulp mill recovery system. Development of a commercial process. Appita, 22(1968) 60-75.
- [47] O'Donoghue, R., Neutral spent sulphite semichemical recovery systems. Tappi, 38(1955) 162A-167A.
- [48] Pradt, L.A., New soda recovery plant used at eucalyptus pulp mill. Pulp. Pap., Oct.(1969) 56-68.
- [49] Samuelsson, O. and Sjöberg, L-A., Wet combustion of dissolved solids during oxygen-bicarbonate cooking. Sven. Papperstidn, 80(1977) 386-389.
- [50] Soukup, C.L., Wet air oxidation at Ontonagon. Paper given at the Alkaline Pulping Conference. Williamsburg 1975.
- [51] Zimmermann, F.J. and Diddams, D.G., The Zimmermann process and its applications in the pulp and paper industry. Tappi, 43(1960) 710-715.

Reaction kinetics and mass transport

- [52] Chowdhury, A.K. and Ross, L.W, Catalytic wet oxidation of strong waste waters. AIChE Symp. Ser., 71, No. 151(1975) 46-58.
- [53] Day, D.C., Hudgins, R.R., and Silveston, P.L., Oxidation of propionic acid solutions. Can. J. Chem. Eng., 51(1973) 733-740.
- [54] Farha, F.E., Box Jr., E.O., Dunn, R.O., and Kuerston, R.D., Liquid phase catalytic oxidation of waste water. General paper presented before the division of Petroleum Chemistry, Inc.. American Chemical Society. Anaheim meeting, March 12-17, 1978.

- [55] Johnsson, A., Katalytisk våtförbränning av torv. M.Sc. thesis, Report T82-102. Dept. of Energy Conversion, Chalmers University of Technology. Göteborg 1982.
- [56] Katzer, J.R., Catalytic oxidation of organics in wastewater. Dept. of Chemical Engineering, Delaware University. Newark 1975. (Available from NTIS as PB-226 300)
- [57] Katzer, J.R., Solubilization and wet oxidation of suspended and dissolved organics. Dept. of Chemical Engineering, Delaware University. Newark 1975. (Available from NTIS as PB-247 106)
- [58] Katzer, J.R., Ficke, H.H., and Sadana, A., An evaluation of aqueous phase catalytic oxidation. J. Water Pollut. Control Federat., 48(1976) 921-933.
- [59] Levec, J. and Smith, J.M., Oxidation of acetic acid solutions in a trickle-bed reaktor. AIChE J., 22(1976) 159-168.
- [60] Levec, J., Herskowitz, M., and Smith, J.M., An active catalyst for the oxidation of acetic acid solutions. AIChE J., 22(1976) 919-920.
- [61] Ploos van Amstel, J.J.A., The oxidation of sewage sludge in the liquid water phase at elevated temperatures and pressures. Ph.D. thesis. Eindhoven University of Technology. Eindhoven 1971.
- [62] Ploos van Amstel, J.J.A. and Rietema, K., Nassoxidation von Abwasserschamm. Teil I: Oxidation von Glucose als Modellsubstanz. Chem. Ing. Tech., 45(1973) 981-990.
- [63] Ploos van Amstel, J.J.A. and Rietema, K., Wet air oxidation of sewage sludge. Part II: The oxidation of real sludges. Chem. Ing. Tech., 45(1973) 1205-1211.

- [64] Pruden, B.B. and Le, M., Wet air oxidation of soluble components. Can. J. Chem. Eng., 54(1976) 319-325.
- [65] Sadana, A. and Katzer, J.R., Catalytic oxidation of phenol in aqueous solution over copper oxide. Ind. Eng. Chem. Fundam., 13(1974) 127-134.
- [66] Smith, J.M. and Goto, S., Trickle-bed reactor performance. Part II. Reaction studies. AIChE J., 21(1975) 714-720.
- [67] Smith, J.M., Removal of organic carbon from water by oxidation with solid catalysts. Dept. of Chemical Engineering, University of California. Davis 1975.
(Available from NTIS as PB-248182)
- [68] de Vos, R., Våtoxidation - processkemi och reaktorteknik. Report A82-111. Dept. of Energy Conversion, Chalmers University of Technology. Göteborg 1982.
- [69] Weygandt, J.C., High pressure oxidation of organic compounds in aqueous solution. Ph.D. thesis. Kent State University 1969.
- [70] Willman, W.W., Oxygen diffusion in wet air oxidation processes. Naval Research Laboratory. Washington D.C. 1972.
(Available from NTIS as AD-749 350.)

Peat

- [71] Cederquist, K.N. and Bering, P., Wet combustion - a process for the utilization of peat. Acta Polytech. Chem. Incl. Metall. Ser., 3, No. 1(1952) 1-34.
- [72] Gallo, T. and Sheppard, J.D., Wet oxidation of peat. Ontario Research Foundation. Mississauga, 1981.

- [73] Kjellström, B., Våtoxideration av torv - rapport från sammanträffande med professor D.F. Othmer och representanter för Zimpro Inc 1978-12-01 och 1978-12-04. AB Fjärrvärme. Trosa 1978. (Available from The National Swedish Board for Energy Source Development as NE/TO-79/11)
- [74] Lyngfelt, A., Erfarenheter av våtoxideration vid höga temperaturer och tryck. Report A82-112. Dept. of Energy Conversion, Chalmers University of Technology. Göteborg 1982. (Available from The National Swedish Board for Energy Source Development as NE/FBA-82/87)
- [75] Othmer, D.F., Peat for power. Combustion, Aug.(1978) 44-47.
- [76] Schuster, R., Våtoxideration av torv - översiktlig för undersökning av teknisk och ekonomisk potential för torvbaserad elproduktion. AB Fjärrvärme. Trosa 1979. (Available from The National Swedish Board for Energy Source Development as NE/TO-79/12)
- [77] Schuster, R., Våtoxideration av fuktiga bränslen. Grundläggande förutsättningar. AB Fjärrvärme. Trosa 1980. (Available from The National Swedish Board for Energy Source Development as NE/TO-80/5.)
- [78] Smith, R.T., Environmental aspects of alternative wet technologies for producing energy/fuel from peat. Energy Resources Co., Inc.. Walnut Creek 1981. (Available from NTIS as DOE/FC/10169-T1)

Coal

- [79] Bettinger, J.A., Wet oxidation of coal for energy production: test plan and potential results. Centre for waste management programs. Houghton 1980. (Available from NTIS as DOE/ET/12328-TI)

- [80] Bettinger, J.A., Lamparter, R.A., and McDowell, D.C., Coal combustion by wet oxidation. Centre for waste management programs. Houghton 1980.
(Available from NTIS as DOE/ET/12328-T2)
- [81] Pradt, L.A., Wet oxidation boiler - incinerator. Zimpro Inc.. Rothschild, date missing.
- [82] Pradt, L.A., Wet oxidation of coal for energy. Paper presented at Kentucky Coal Conference, May 2. Lexington 1979.

Materials, corrosion

- [83] Materials for wet oxidation processing equipment (shipboard). Report of The Ad Hoc Committee on Materials for Wet Oxidation Processing Equipment (Shipboard). National Materials Advisory Board, Division of Engineering - National Research Council. Publication NMAB-312. National Academy of Sciences - National Academy of Engineering. Washington D.C. 1973.
(Available from NTIS as AD-771 745)
- [84] Oettinger, T.P. and Fontana, M.G., Austenitic stainless steels and titanium for wet air oxidation of sewage sludge. Mater. Perform., 15, No. 11(1976) 29-35.

Thermodynamics

- [85] Chou, C.L. and Verhoff, F.M., Process for power generation from wet air oxidation with application to coal gasification waste waters. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 20(1981) 12-19.
- [86] Heidemann, R. and Prausnitz, J.M., Equilibrium data for wet air oxidation. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 16(1977) 375-381.
- [87] Heijkenskjöld, L., Ånggas från våtförbränningsprocessen. M.Sc. thesis. Report T81-94. Dept. of Energy Conversion, Chalmers University of Technology. Göteborg 1981.

- [88] Kantarovich, B.V. and Kramarenko, S.S., Calculation of the state of water-air mixtures for processes combusting moist fuels with incomplete vaporization of water. (Russ.) appearing in: Thermal and oxidative pyrolysis of fuels and polymers. Nauka, Moscow 1966.
- [89] Kantarovich, B.V. and Kramarenko, S.S., Some thermodynamic properties of water-air systems in oxidation of organic matter with water present. (Russ.) appearing in: Improvement of and complex utilization of fuels. Nedra, Moscow 1965.
- [90] Kramarenko, S.S., A thermodynamical analysis of the wet air oxidation process with generation of mechanical energy. (Russ.) appearing in: New methods of fuel combustion including problems of combustion theory. Edited by Kantarovich, B.V.. Nauka, Moscow 1972.
- [91] Lindberg, S., Termodynamiska data för en mättad rökgas - metoder för grafisk återgivning. M.Sc. thesis. Report T82-103. Dept. of Energy Conversion, Chalmers University of Technology. Göteborg 1982.
- [92] Lyngfelt, A. and Leckner, B., En termodynamisk analys av en våtoxideringsprocess för kraftproduktion. Report A82-110. Dept. of Energy Conversion, Chalmers University of Technology. Göteborg 1982.
- [93] Lyngfelt, A. and Leckner, B., A thermodynamic study of a wet air oxidation power process. Paper presented at 17th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Los Angeles 8-13 Aug. 1982.

Wet Carbonization

- [94] Anon., Diverse arbeten rörande våtkolningsfiltrat och -kondensat. Report No. 16:74. AB Svensk Torvförädling. Lund 1960.

- [95] Altmann, H., Bering, P., Dahlman, S., Krikström, D., Kristensson, E., and Möller, G., Olika faktorers inverkan på reaktionsförloppet vid våtkolning. Report No. 16:15. AB Svensk Torvförädling. Lund 1953.
- [96] Björklund, M., Fridjonsson, K., Ssimbwa, S., and Tillman, T., Våtkolning av torv. Student Independent Work. Dept. of Energy Conversion, Chalmers University of Technology. Göteborg 1980.
- [97] Bresle, Å., Nyberger, M., and Eriksson O., Jämförelse mellan sur oxidation och våtkolning. Report No. 27:5. AB Svensk Torvförädling. Stockholm 1950.
- [98] Hägglund, S.-E., Våtkolning av torv. AB Svensk Torvförädling. Lund 1960.
- [99] Hägglund, S.-E. and Lundblad, B., Jämförande avvattningsegenskaper hos normalt våtkolad torv och torv våtkolad i samband med partiell våtförbränning. Report No. 16:33. AB Svensk Torvförädling. Lund 1957.
- [100] Magnusson, K., Dispergering av luft i torv med hjälp av omrörare. Report No. 10:21. AB Svensk Torvförädling. Mölndal 1953.
- [101] Myrén, B., Finlands kol. Kem. Kemi, 6(1979) 700-703.
- [102] Myrén, B., Industrial refining of peat by wet carbonization. Presented at the 6th International Peat Congress, Duluth, Minnesota, August 14-23, 1980.
- [103] Myrén, B., The peat fuel process. Presented at symposium, Finn energy '79 - Specialized technologies from Finland, Chapter 1, 1979.
- [104] Myrén, B., Våtkolning av torv. Tutkimus ja tekniikka, No. 2 (1978) 24-27.

BILAGA 2.

VÄRMEBALANSER OCH VERKNINGSGRADER FÖR BURNIEANLÄGGNINGEN

De siffror som presenteras i denna bilaga demonstrerar verkliga och tänkta värmebalanser för en existerande våtoxiderationsanläggning. Bilagan utgör ett komplement till de teoretiska studier av våtoxiderationens termodynamik (1,2) som gjorts och understryker många av de slutsatser som kan dras ur dessa.

Först beräknas värmeverkningsgraden för anläggningen såsom den fungerar idag enligt de driftsdata som finns tillgängliga. Sedan beräknas elverkningsgraden för anläggningen såsom den antas bli om den utrustades med de komponenter (rökgasturbin, ångturbin och kondensator) som erfordras för att ge en nettoelproduktion. Därefter beräknas värme- och elverkningsgrader för anläggningen under antagande att vissa processförbättringar genomförs. Processchema för anläggningen visas i fig. 1.

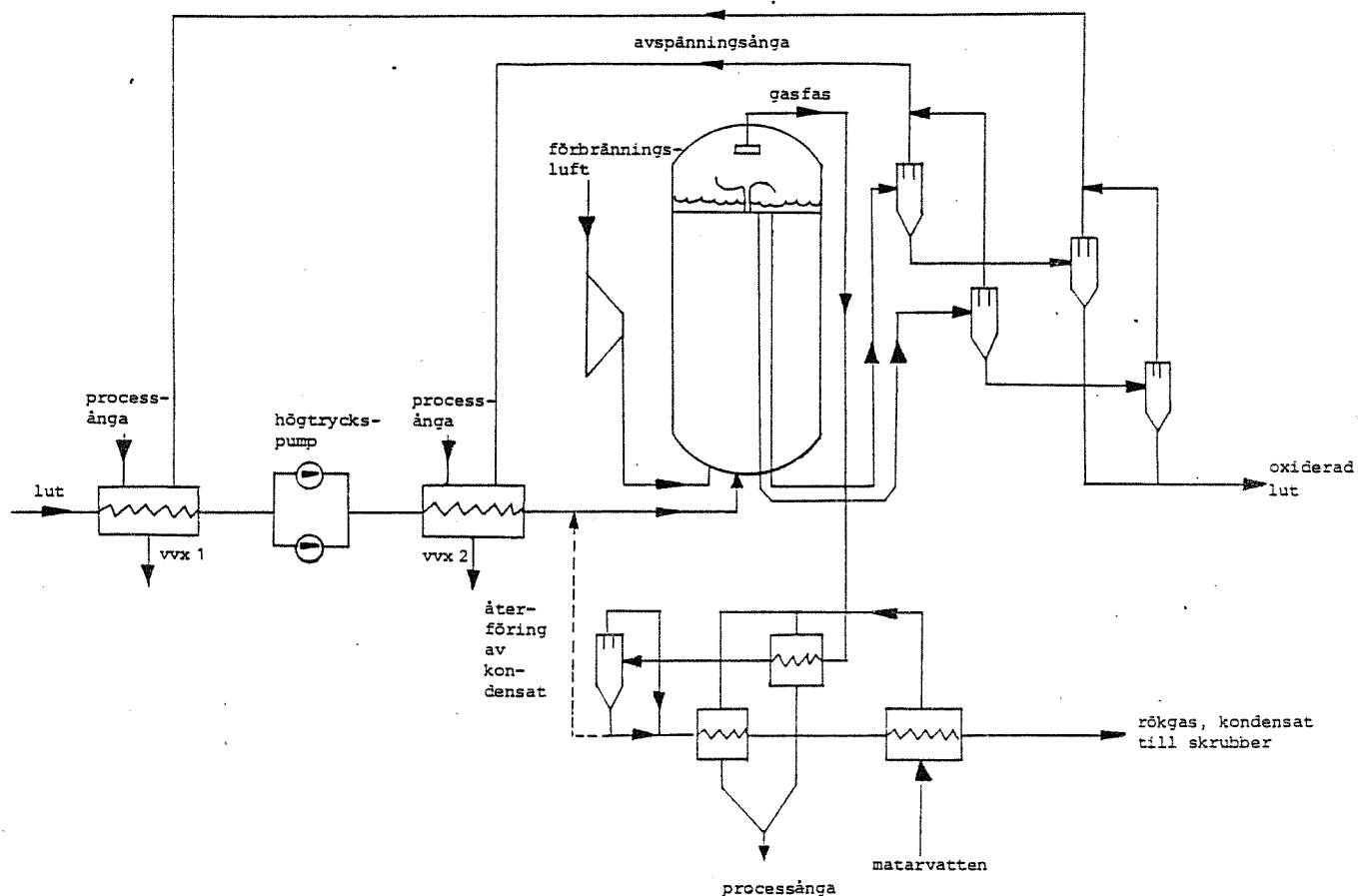


Fig. 1. Processchema för APPM:s våtoxiderationsanläggning i Burnie.

Verkningsgrad för anläggningen så som den fungerar idag

Denna verkningsgrad kan beräknas med data från den befintliga processen (3,4):

Kompressorarbete	7	MW	
Utvecklat reaktionsvärme	28	MW	
Producerad ånga, brutto	23,5	MW	36 ton/h *
netto	18,3	MW	28 ton/h *
Pumparbete	0,5	MW	

Värmeverkningsgraden blir:

$$\eta_v = (18,3 - 7 - 0,5)/28 = 38,5\%$$

Värme är jämställt med elektrisk effekt vilket är ett något oegentligt sätt att beräkna verkningsgrad. Om inte den förbrukade elektriciteten framställts i kondenskraftanläggningar finns inte något odiskutabelt riktigt sätt att beräkna verkningsgraden. (En värmefaktor så som för värmepumpar kunde beräknats, men denna tar ej hänsyn till bränslemängden.) Det sätt att beräkna värmeverkningsgraden som tillämpats här har använts konsekvent och gäller för en (fiktiv) process där processången expanderas i en mottrycksturbin med 100% verkningsgrad så långt att den producerade kraften skulle täcka processens kraftförbrukning i övrigt. Det vill säga:

$$W(\text{mottrycksturb.}) = W(\text{kompr.}) + W(\text{pump}) - W(\text{rökgasturb.})$$

där $W(\text{rökgasturb.})$ i detta fall är lika med noll. För just detta fall då gasturbin ej utnyttjas är detta synsätt felaktigt då en mottrycksturbin inte skulle kunna täcka förbrukningen i pump och kompressor. Detta är lämpligt att observera då denna värmeverkningsgrad jämförs med värmeverkningsgraden för en process med gasturbin.

* Ångans energiinnehåll har beräknats som entalpiskillnaden mellan ångan (20 bar) och matarvattnet (106 °C).

Elverkningsgrad om anläggningen kompletterades med el-
producerande komponenter

För att anläggningen skulle kunna ge ett överskott av kraft krävs både att processången utnyttjas för att producera kraft och att rökgasen expanderas genom en rökgasturbin. Om processången (netto) omvandlas till elektricitet med 25% verkningsgrad (sekundärkretsverkningsgrad) fås $18,3 \cdot 0,25 = 4,6$ MW. Kraftproduktionen från en rökgasturbin är uppskattad till 3,8 MW. (Rimligheten av denna uppskattning inses vid jämförelse med kompressorarbetet på 7 MW.) Om netto producerad värme i form av ånga ersätts med producerad kraft i gas- och ångturbin fås elverkningsgraden för denna fiktiva process:

$$\eta_{e1} = (4,6 + 3,8 - 7 - 0,5)/28 = 3,2\%$$

Värmebalanser över reaktorn med och utan återcirkulation av
kondensat

Vid produktion av sekundärånga kondenserar en stor del av ångan i den ånggas som lämnar reaktorn vid hög temperatur. Om detta kondensat återcirkuleras minskas energiförbrukningen för förvärmning av slurryn. Nedanstående värmebalanser syftar endast till att utreda hur mycket av den processånga som förbrukas för förvärmning av slurryn som skulle frigöras vid en sådan kondensatåterföring. Vid reaktortemperaturen 324°C fås, enligt [3], följande värmebalans över reaktorn om kondensatåterföring utnyttjas:

BORTFÖRT:	GJ/h
vattenånga	130,1
icke kondenserbar gas	10,5
våtoxiderad lut (före avspänning)	<u>28,9</u>
	169,5

TILLFÖRT:	
reaktionsentalpi	100,7
luft	5,5
återfört kondensat, 23 200 kg/h	30,8
förvärmad lut, 42 000 kg/h	<u>32,5</u>
	169,5

energi. Energiinnehållet hos kondensatet är så stort att det skulle kunna räcka till för att spara in resten av den processånga som förbrukas på förvärmning. Vidare kan mera av energiinnehållet i den oxiderade slurrin utnyttjas då ångan avspännes vid 20 och 5 bar (150 °C). Vi antar här att all den processånga som förbrukas för förvärmning av slurrin kan sparas in. Detta har alltså förutsatts i de fortsatta beräkningarna.

Värmeverkningsgrad vid kondensatåterföring och förbättrat värmeutnyttjande

Vid beräkning av värmeverkningsgraden för detta fall kan brutto producerad ånga (23,5 MW) sättas in i uttrycket för verkningsgraden i stället för netto producerad ånga (18,3 MW). Då fås värmeverkningsgraden (jämför ovan):

$$\eta_v = (23,5 - 7 - 0,5)/28 = 57\%$$

Värmeverkningsgrad med kondensatåterföring, förbättrat värmeutnyttjande och expansionsturbin

Man kan utnyttja både möjligheten att göra en återföring av kondensat och expandera rökgasen i en gasturbin. Då ersättes netto processånga (18,3 MW) med brutto processånga (23,5 MW) plus gasturbineffekt (3,8 MW) vid beräkning av värmeverkningsgraden (jämför ovan):

$$\eta_v = (23,5 + 3,8 - 7 - 0,5)/28 = 71\%$$

Elverkningsgrad med kondensatåterföring och förbättrat värmeutnyttjande

För det fall att kondensatåterföring utnyttjas blir självfallet också verkningsgraden för en tänkt elproducerande process högre. Sekundärkretsens verkningsgrad skall då multipliceras med brutto processånga (23,5 MW). Vid 25% sekundärkretsverkningsgrad fås då (jämför beräkningen av elverkningsgrad ovan):

$$\eta_{el} = (23,5 \cdot 0,25 - 7 - 0,5 + 3,8)/28 = 7,8\%$$

Om 30% sekundärkretsverkningsgrad antas fås:

$$\eta_{e1} = (23,5 \cdot 0,30 - 7 - 0,5 + 3,8) / 28 = 12,0\%$$

Slutord

Även om beräkningarna inrymmer osäkerheter visar resultatet hur nödvändigt det är att energiåtervinningen i en kraftproducerande process drivs så långt som är möjligt. Vidare demonstreras den mycket höga verkningsgrad som bör vara möjlig för en värmeproducerande process. Det bör observeras att alla beräknade verkningsgrader är beräknade på basis av det kalorimetriska värmevärdet. (Se fotnot s. 6 i huvudrapporten.) En värmeverkningsgrad på 70% är alltså mycket hög i jämförelse med verkningsgraden vid värmeproduktion från torv med konventionella processer.

Referenser

- [1] Lyngfelt, A. och Leckner, B., En termodynamisk analys av en våtoxideringsprocess för kraftproduktion. Rapport A82-110. Inst. för Energiteknik. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg 1982.
- [2] Lyngfelt, A. och Leckner, B., A thermodynamic study of a wet air oxidation power process. Bidrag till 17th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Los Angeles 8-13 aug. 1982.
- [3] Morgan, J.E. och Saul, C.M., The Zimmermann process in a soda pulp mill recovery system. Development of a commercial process. *Appita*, 22(1968) 60-75.
- [4] Lyngfelt, A., Erfarenheter av våtoxidering vid höga temperaturer och tryck. Rapport A82-112. Inst. för Energiteknik. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg 1982. (Även utgiven av Nämnden för Energiproduktionsforskning som projektrapport NE/FBA-82/87)

BILAGA 3

JÄMFÖRELSE MELLAN PARTIELL VÅTOXIDATION OCH VÅTKOLNING

För att göra studien av våtoxideration av torv mera fullständig har också ett mycket begränsat studium av den partiella våtoxiderationsprocessen gjorts. Vid den partiella våtoxiderationen utnyttjas reaktionsvärmets till att värma torven. Denna värmebehandling medför att avvattningsegenskaperna förbättras. Den partiella våtoxiderationen med efterföljande pressning är alltså en avvattningsprocess. Den beskrivs i [1]. Ett mycket omfattande arbete har bedrivits på en avvattningsprocess benämnd våtkolning [2]. Denna process bygger på samma princip som den partiella våtoxiderationen, nämligen att torvslurryns avvattningsbarhet ökar markant efter en värmebehandling vid temperaturer omkring 200 °C. Våtkolningen skiljer sig från den partiella våtoxiderationen på det sättet att den värme som krävs för uppvärmningen av torvslurryn tillförs med ånga - från exempelvis en torveldad ångpanna - i stället för att skapas genom intern förbränning av en del av slurryn såsom vid partiell våtoxideration.

Det finns mycket välskrivet material om partiell våtoxideration och våtkolning. Syftet med denna bilaga är endast att belysa skillnaden mellan de två processerna. De skillnader mellan processerna som kan tänkas vara betydelsefulla är:

- Närvaron av syre vid den partiella våtförbränningen kan tänkas medföra annorlunda egenskaper hos den behandlade slurryn, dvs. den slurry som skall pressas.

- Behovet av att skapa kontakt mellan gas- och vätskefas, t. ex. genom omrörning, vid våtoxiderationsprocessen kan tänkas påverka valet av torrsustanshalt hos slurryn. Vidare kan behovet av ett tillräckligt stort reaktionsvärme vid den partiella våtoxiderationen innebära restriktioner för möjliga torrsustanshalter.

- Vid den partiella våtoxidationen måste en mättad rökgas avskiljas från den slurry som lämnar reaktorn.

Syrets betydelse för den behandlade slurryns egenskaper

[3] visar att närvaro av syre - upp till 18% av COD - knappast påverkar presskakans sluttorrhalt eller avvattningshastigheten vid reaktionstemperaturer omkring 200 °C. Kolhalt, vätehalt och värmevärde blir obetydligt lägre, delvis beroende på ökande askhalt (en del av det organiska materialet förbränns). En större andel av torrsubstansen går i lösning vid partiell våtoxidation än vid våtkolning men denna andel är starkt beroende av torrsubstanshalten. (Hög torrsubstanshalt ger låg andel löst substans.)

Slutsats: Den partiella våtoxidationen har inte några fördelar framför våtkolning vad avser den behandlade slurryns kvalitet, snarare är det så att problemen med det försmutsade pressvattnet accentueras vid partiell våtoxidation jämfört med våtkolning. Motivet för en partiell våtoxidationsprocess får alltså sökas i att tillförsel av extern värme i form av ånga icke behövs.

Torrsubstanshalter

Optimal torrsubstanshalt (TS) för våtkolning uppges vara omkring 7% [2].

Enligt [4] som prövat olika omrörare för dispergering av gas i torvslurry skulle det vara svårt men möjligt att dispergera gas i en torvslurry med TS-halten 7%. Vid lägre halt (5%) är det enklare. Den refererade studiens resultat gäller för torvslurries vid rumstemperatur. Vid reaktionstemperaturen 200 °C är slurryns viskositet lägre. Cederquist [1] har utfört sina försök med partiell våtoxidation av torv vid TS-halter på 10 - 15% i en omrörd reaktor utan att rapportera några problem att få syret att reagera.

Räkneexempel: Antag 7% TS och 15% oxidationsgrad. Detta ger ett reaktionsvärme på ungefär 230 kJ/kg vatten vilket motsvarar 55 °C temperaturstegring. Om hälften av reaktionsvärmets tas i anspråk för att avdunsta det vatten som i form av ånga följer med gasfasen återstår för temperaturökning i reaktorn en värmemängd motsvarande 25 - 30 °C.

Slutsats: Syrets reaktion förefaller inte att ge några restriktioner på torrsustanshalten som skulle särskilja den partiella våtoxiderationsprocessen från våtkolningsprocessen.

Gaser

Den partiella våtoxiderationsprocessen kräver avskiljning av stora mängder rökgas. Vid en våtkolningsprocess bildas stora volymer koldioxid vilket innebär att även våtkolningsprocessen kräver åtgärder för gasavskiljning även om kvantiteten gas blir betydligt mindre än vid partiell våtoxideration.

Slutord

Den partiella våtoxiderationsprocessen är mycket närmare besläktad med våtkolningsprocessen än med den fullständiga våtoxiderationsprocess som diskuteras i huvuddelen av denna rapport. Det är därför lämpligare att studera partiell våtoxideration i samband med våtkolning än i samband med fullständig våtoxideration. Sammanfattningsvis kan sägas att den partiella våtoxiderationen tillfredsställer värmebehandlings energibehov mera elegant än vad våtkolningsprocessen gör - men till priset av ett mera försmutsat pressvatten.

Referenser

- [1] Cederquist, K.N. och Bering, P., Wet combustion - a process for the utilization of peat. Acta Polytech. Chem. Incl. Metall. Ser., 3, No. 1(1952) 1-34.

- [2] Hägglund, S.-E., Våtkolning av torv. AB Svensk Torvförädling. Lund 1960.
- [3] Altmann, H., Bering, P., Dahlman, S., Krikström, D., Kristensson, E. och Möller, G., Olika faktorerers inverkan på reaktionsförloppet vid våtkolning. Rapport nr. 16:15. AB Svensk Torvförädling. Lund 1953.
- [4] Magnusson, K., Dispergering av luft i torv med hjälp av omrörare. Rapport nr. 10:21. AB Svensk Torvförädling. Mölndal 1953.