

Systemperspektiv för effektiv produktion och användning av vätgas via koppling till fjärrvärme AP7 Syrgasens värde

## Syrgasens potentiella värde och möjligheter

### Sammanfattning

Vid produktion av vätgas från elektrolys produceras också syrgas. Denna rapport beskriver olika möjligheter och användningsområden för syrgas. Dessa är inom pappers- och massaindusti, sjukvård, reningsverk och syresättning av havsbotten mm.

Störst fokus i denna studie är syrgasens möjligheter inom kraftvärme där ökad syrgashalt kan bidra till ökad effektivitet i förbränningen av avfall och biobränslen. Inspädning av syrgas vid förbränning med syrgas istället för luft skapar också potential för effektivare koldioxidinfångning ”carbon capture” genom att rökgasen innehåller färre kväveföreningar. Ökad syrgashalt i förbränningsprocesser innebär vissa utmaningar då det resulterar i förändrad stökiometri och temperaturer i de befintliga pannorna. Det ekonomiska värdet av syrgasen inom kraftvärme beror på ökad förbränningseffektivitet och extra värmeproduktion (om anläggningens övriga system har kapacitet för ökad last), indirekt minskat behov av bränsletillförsel.

Notera även att det finns en bilaga till denna rapport ”Nyttiggörande av syrgas från elektrolysör i en förbränningsanläggning” som är skriven av Tekniska verken i Linköping.

### Innehåll

Sammanfattning .....	1
Innehåll.....	1
1. Bakgrund.....	2
1. Introduktion.....	3
2.1 Kryogen framställning av syrgas .....	3
2.2 Syrgas från elektrolys .....	3
2. Möjligheter för kraftvärmeverk .....	4
3.1 Förbränning av biobränsle.....	4
3.2 Förbränning av avfall.....	5
3.2.1 Vatteninjektion i avfallspanna.....	5
3.3 Syreberikad förbränning .....	6
3.4 The Ecotube® System.....	7

### RISE Research Institutes of Sweden AB

Postadress  
Box 857  
501 15 BORÅS

Besöksadress  
Sommargatan 101A  
626 37 Karlstad

Tfn / Fax / E-post  
010-516 50 00  
033-13 55 02  
info@ri.se

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte RISE Research Institutes of Sweden AB i förväg skriftligen godkänt annat.

3. Syrgas i pappers- och massaindustri.....	8
4. Syre inom medicinsk tillämpning.....	9
5. Syrgas för reningsverk, aquakultur och fiskodling .....	10
6. Syre till restaurering av syrefattiga havs- och sjöbottnar.....	11
7. Övrigt.....	11
8. Ekonomiskt värde för syrgas .....	12
Bilaga.....	12
Referenslista .....	13

## 1. Bakgrund

I omställningen mot ett allt mer förnybart energisystem anses vätgasen utgöra en viktig pusselbit, som en framtida energibärare. Elektrolys är en elektrokemisk process som kan användas för att producera vätgas. I processen tillförs el som klyver vattenmolekyler till vätgas och syrgas. Det går åt drygt 10 l vatten för att producera 1 kg vätgas och det skapas samtidigt 8 kg syrgas.

Europeiska Kommissionen lanserade i juli 2020 en vätgasstrategi, där mål om att inom EU installera elektrolysanläggningar för förnybar vätgas med minst 6 GW kapacitet och att producera upp till en miljon ton förnybar vätgas. Främst för att ersätta den fossila vätgasen som idag finns inom kemisektorn, men även för att underlätta implementering i andra industriprocesser och kanske även för tunga transporter. I en senare fas mellan 2025-2030 beskrivs att vätgasen behöver bli fullvärdigt integrerad i energisystemet, där finns målet om att installera elektrolysanläggningar för förnybar vätgas med minst 40 GW effekt som producerar upp till tio miljoner ton förnybar vätgas i EU.

Energimyndigheten författade i november 2021 ”Förslag till Sveriges nationella strategi för vätgas, elektrobränslen och ammoniak”. Där skrivs nationella mål om att till 2030 installera 5 GW elektrolysrörkapacitet och till år 2045 utöka elektrolysrörkapacitet med ytterligare 10 GW. I Sverige lyfts framför allt det fossilfria stålet fram som en stor framtida användare av grön vätgas. I vätgasstrategin framförs även att sektorkoppling ökar systemets möjligheter att bli mer energi- och resurseffektivt. Där handlar det om att kunna ta tillvara restprodukter och sidoströmmar i form av värme, syrgas och överproduktion av vätgas.

Energiforsk (2021) nämner i sin rapport ”Sektorkoppling för ett mer effektivt energisystem” möjligheter kring att nyttja restvärmen från elektrolysörer i fjärrvärmesystem. Där skrivs att på kort sikt är förutsättningarna för detta begränsade, främst på grund av liten marginal mellan framledningstemperatur och restvärmesystemtemperatur. I framtiden kan det skapas bättre förutsättningar med ökad elektrolysrörkapacitet, större tillgänglighet av högttemperaturelektrolysörer och större utbyggnation av lågttemperaturefjärrvärme. Det nämns också syrgas är en möjlig restprodukt att nyttja för att skapa fler inkomstkällor i samband med vätgasproduktion.

## 1. Introduktion

Syre är ett grundämne och utgör 21% av jordens atmosfär. Syre är en förutsättning för liv och förbränning. Gasen är luktfri, färg- och smaklös. Syre kan reagera med alla grundämnen (dock ej ädelgaser) vid olika temperaturer, varpå oxider skapas. Syre är något lättare än luft och flytande syre syns som en klarblå vätska. (Linde u.å)

Det finns ett flertal användningsområden för koncentrerad syrgas såsom tex medicinska tillämpningar, rymdteknologi, teknologi med rent syre och bränningsgas i smältugnar, processugnar, svetsningar och metallskärning. Inom kemikalieproduktion används syre som råmaterial och inom pappersmasseindustrin används syre som blekningsmedel.

RISE (2021) anger att syrgas även kan användas inom fiskodlingar, syresättning av havsbottnar för att motverka övergödning, kommunal vattenrening, samt vattenrening och blekning i massabruk, oxyfuel för att minska NO<sub>x</sub>-utsläpp och omvandling av syrgas till ozon för minskning av NO<sub>x</sub> i kombination med blötskrubber.

I denna rapport sammanställs några av syrgasens nuvarande och framtida möjligheter, med störst fokus på möjligheter för ett kraftvärmeverk. I de fall det är möjligt ges en uppskattning på syrgasens ekonomiska värde. Notera att ekonomiska värden är relativa och förändras över tid.

### 2.1 Kryogen framställning av syrgas

Den vanligaste metoden för framställning av koncentrerad syrgas inom industrin kallas för ”kryogen luftseparation”. Saxe & Alvfors (2007) skriver att kryogen luftseparation energimässigt kostar 0,5 kWh/Nm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>. De skriver vidare att använda biprodukten syrgas från elektrolys istället från kryogen luftseparation sparar energibehovet med 0,25 kWh/Nm<sup>3</sup> O<sub>2</sub> och genom att även nyttja spillvärmen kan spara ytterligare 0,75 kWh/Nm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>. Det innebär att totalt kan en energibesparing på 21% göras av energibehovet till elektrolysen genom att ta tillvara på spillvärme och syrgas.

Kato et al. (2005) skriver att den mest effektiva och kostnadseffektiva metoden för att producera stora mängder syrgas är via kryogen luftseparation. Energikonsumtionen för den metoden är 0,5 kWh/NM<sup>3</sup> O<sub>2</sub>. Renhet på syrgas producerad från kryogen luftseparation är 99 volymprocent eller högre.

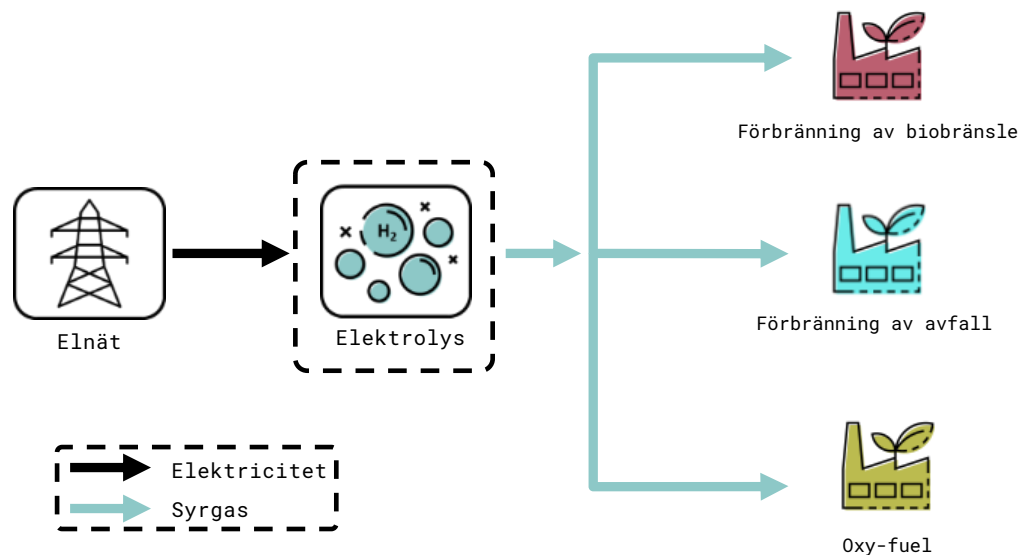
### 2.2 Syrgas från elektrolys

En viktig aspekt för potentiella användningsområden för elektrolytiskt producerad syrgas är att ta hänsyn till renhetsgraden. Med det menas den faktiska halten syrgas, där det även kan finnas en liten del vattenånga och vätgas. Vissa användningsområden kräver hög renhet i syrgasen. Utmaningen när syrgasen är mättad med vatten är att syrgasen ska torkas vid lågt tryck för att sedan komprimeras, vilket är dyrt och kan vara komplicerat.

En alkalisk elektrolys av modellen DQ50/1.6 från Suzhou Jingli Hydrogen Equipment Co har en renhetsgrad av O<sub>2</sub> till minst 98,5 % (Zhang et al. 2021). Green Hydrogen Systems (2021) anger för sina alkaliska elektrolysörer med modellema A30, A60 och A90 att syrgasen har en renhet på >99.998 %. Maggio et al. (2022) skriver i sin studie om att syrgas från elektrolys har en hög renhet (>99 %), vilket inte kräver extra renhetsprocesser som tex torkning.

## 2. Möjligheter för kraftvärmeverk

Inom detta avsnitt beskrivs olika möjligheter att använda syrgas inom kraftvärmeverk. En sammanfattande illustration ses nedan i figur 1.



Figur 1. Flödesschema för syrgasens möjligheter inom kraftvärme.

### 3.1 Förbränning av bibränsle

Förbränning med ökad syrehalt ger ökad verkningsgrad. Med högre syreinhåll tillförs mindre kväve i förbränningsprocessen och rökgasvolymen reduceras därmed. Det kan dock behövas ökad recirkulation av rökgaserna, då det är oklart hur det kan påverka värmeöverföring och effektivitet i rökgaskondenseringen.

Newborough & Cooley (2021) påstår att det idag används syreberikning i ugnar upp till koncentrationer av ca 35 %, men om brännarna inte byts ut begränsas koncentrationen till ca 25 %. För eldning av biomassa tillsammans med ett fossilt bränsle kan en högre andel biomassa användas om flamttemperaturen höjs, det genom att tillsätta syre. På samma sätt för ugnar kan syreberikning möjliggöra en större genomströmning genom att öka drifttemperaturen. Ett exempel är att temperaturen i en naturgaseldad ugn kan ökas från 1570 °C till 2000 °C genom att öka koncentrationen av syre till 30 %.

Värdet av syreberikad förbränningsluft till ett bi kraftvärmeverk beror på vald driftstrategi baserat bland annat på tillgängligt värmeunderlag och elpris. Elpriset har stor inverkan på driftsekonomin. Ett fall i HyCoGen har kommit fram till att syreberikad förbränning av trädbränsle i en Bubblande Fluidiserad Bädd "BFB" (kapacitet 90 MW ånga) med ett flöde på 1500 kg O<sub>2</sub>/h kan sänka fjärrvärmeproduktionskostnaden med ca 1 % utan ändrat driftläge. Detta resulterar i en årlig besparing på 400 000 kr vid 4 350 fullastekvivalenttimmar vilket motsvarar ett värde för syrgasen på 0,06 kr/kg O<sub>2</sub>. Genom att ersätta delar av förbränningsluften med ett syrgasflöde på 1500 kg O<sub>2</sub>/h skulle också pannans effekt kunna ökas med 3 %. Det ger både ökad el- och värmeproduktion och skapar ytterligare värde vid höga elpriser och/eller stort värmebehov genom att ersätta dyrare spetslastbränslen. Alternativt skulle man kunna använda fuktigare bränsle eller befukta bränslet och med en lägre pannlast

erhålla högre fjärrvärmeproduktion vid oförändrad elproduktionsnivå. Vilket av alternativen som ger bäst produktionsekonomi beror av aktuellt värmebehov och elpris.

Det är möjligt att använda syrgas i primärluften för att upprätthålla effekten vid fuktiga bränslen i en rosterpanna, men kan vara förknippat med en viss risk. Det är en fråga om reglering, där man måste ha koll på temperaturen på rostern och bra visuell koll på utbränningen. Då man vill hålla bäddtjockleken och flamfronten någorlunda statiska så ger syredopning i primärluften både möjligheter till bättre reglering, samtidigt som det bidrar till fler risker för driftpersonalen att "köra i diket". (Sweco 2022)

### 3.2 Förbränning av avfall

Syrgas kan ha goda chanser att effektivisera en avfallsförbränningsprocess. Avfall är ett heterogent bränsle och därmed svårare att elda än ett homogent bränsle, därför finns större risk för att man behöver gå in med stödbrännare för att hålla uppe temperatur och uppehållstid i eldstaden vid svängningar i bränslets värmevärde. Stödbrännare måste enligt lag finnas vid avfallsförbränning och de ska automatiskt gå i ingrepp om temperatur och uppehållstid riskerar understiga uppsatta nivåer. Med syrgas kan kanske liknande funktion erhållas i viss utsträckning och därmed reducera mängden stödbränsle som behöver tillföras.

Det finns anläggningar där man har bytt ut den fossila stödoljan mot bioljja, där den nyttjas någon procent på tillförd energi per år. Dock är bioljjan mycket dyr och var fram till och med december 2022 skattepliktig för både energi- och koldioxidskatt (innan 2020 var 5,3 % av volymen för RME skattepliktig). From 2023 kan anläggningar inom EU-ETS göra avdrag med 100 % av koldioxidskatten (3793 kr/m<sup>3</sup>) och endast betala energiskatt på 279 kr/m<sup>3</sup> (LSE, 6a kap. 1 § 11a och § 11b). Vad gäller täckningsbidraget från behandlingsavgiften så finns vissa specialfall som Sverige, Danmark och Litauen, som har inkluderat i sina avfallspannor i EU-ETS, vilket med all plast i avfallet innebär att en stor del, nästan hela, av den kalkylerade behandlingsavgiften slukas av kostnaden för de tillkommande utsläppsrätterna.

HyCoGen har undersökt fallet att öka syrgashalten och vatteninsprutning i avfallsförbränning i befintlig rosterpanna med en total effekt på omkring 21-22 MW inklusive rökgaskondensering. För ett fall bedöms man kunna tillföra 1500 kg O<sub>2</sub>/h, vilket utökar avfallsbehandlingen med 11 % vilket blir 0,6 ton/h. Med en behandlingsintäkt för avfall på 417 kr/ton motsvarar det 250 kr/h som blir 0,17 kr/kg O<sub>2</sub>.

Utöver det tillkommer extra värmeproduktion från avfallsbehandlingen med ca 12 % vilket blir 2,3 MW. Värdet på den värmen varierar från 0 kr/MWh till ca 1300 kr/MWh beroende på vilken timme på året den tillförs, dvs vilken annan typ av värmeproduktion som ersätts. Ifall värmen tillförs jämnt fördelar över året och antar ett genomsnittsvärde för värmen på 200 kr/MWh innebär det en besparing på 460 kr/h eller motsvarande 0,31 kr/kg O<sub>2</sub> (då tillförsel är 1500 kg O<sub>2</sub>/h).

Genom att addera båda ovan föreskrivna nyttor blir det totala värdet för syrgasen i avfallspannan således 0,48 kr/kg O<sub>2</sub> med dessa förutsättningar.

#### 3.2.1 Vatteninjektion i avfallspanna

Tekniska verken AB (projektpartner i HyCoGen) har utfört vatteninjektion i en av sina avfallspannor, vilket resulterade i en ökad avfallsbehandling. Detta gjordes utan syrgasanrikning, vilket medförde ett ökat rökgasflöde, med därvid hörande problem. Problemen man undvikas genom att balansera injektionen med motsvarande grad av syrgasanrikning. Dock kvarstår en överflyttning av förbränningsentalpi från ångsidan till

rökgassidan när man injicerar vatten. Den entalpi som absorberas av förångningen av det injicerade vattnet försvinner från ångcykeln och kan utvinnas i rökgaskondenseringen istället som lågvärdig värme. I fallet för Tekniska verken AB kompenserade de detta med ökad bränsleinmatning vilket återställde ångflödet. Detta medförde dock att rosterns kapacitet överskreds, med dålig utbränning av bottenlaggen som följd. Utbränningsgraden regleras av miljöreglerna för avfallsförbränning (SFS 2013:253), vilket pannan inte längre klarade. Därför fick de sluta med vatteninjektionen. Men med syrgas kanske bottenlaggen går att hantera, samtidigt som man slipper problemen från det ökade rökgasflödet. Det är dock inte uppenbart att syrgasanrikningen hjälper mot detta problem. Det finns en möjlighet att syrgasanrikning av primärluften kan hålla upp utbränningsgraden, men med ökad risk för överhettning av rostem. Det krävs därför försök för att fastställa var gränserna går.

### 3.3 Syreberikad förbränning

Inspädning av syrgas vid förbränning med syrgas istället för luft skapar också potential för effektivare koldioxidinfångning ”carbon capture” genom att rökgasen innehåller färre kväveföreningar. Det är lättare att tillföra syrgas till bäddpannor än rosterpannor pga mindre risk för hot spots.

Oxy-fuel är en teknik där man med ren syrgas förbränner ett bränsle som ger koncentrerad koldioxid. Vid förbränning med 100 % syrgas tillförs inget kväve och mängden bränsle som behövs minskar. Det innebär att NO<sub>x</sub>-utsläppen kan minskas mycket, dock kanske inte helt elimineras då kan bränslet fortfarande innehålla en liten mängd kväve. Man kan via denna process komma upp i mycket höga flamtemperaturer, dock kan rökgasåterföringen reglera temperaturen.

Historiskt sett har den primära användningen av oxy-fuel varit inom svetsning och skärning av metaller, där särskilt stål. Det har på senare tid fått mycket uppmärksamhet i samband med möjligheter inom carbon capture and storage (CCS). Glasindustrin har övergått till oxy-fuel sedan tidigt 1990-tal, då glasugnen kräver en temperatur omkring 1500 °C.

Det finns en del fördelar med oxy-fuel framför de andra kända teknologierna för Carbon Capture (Post combustion & Pre combustion).

- Man behöver inte separera CO<sub>2</sub> från rökgaserna och man kan fånga CO<sub>2</sub> direkt.
- Ökad effektivitet av förbränningen av ökad syrehalt
- Panneffektivitet är högre i oxy-fuel förbränning än i luftförbränning för samma operating conditions, då mängden rökgaser minskar.
- NO<sub>x</sub>-utsläpp minskar

Idag finns en oxyfuel-anläggning på Boliden. De köper syrgas från Gas Company som drifvar en cryogenic air separation unit (ASU) på Boliden. Idag är efterfrågan på syrgas omkring 10 gånger större än förväntad syrgasproduktion från den möjliga elektrolysören (3 000 NM<sup>3</sup>/h). RISE (2021) har i sin studie räknat på om syrgasen i denna applikation har ett ekonomiskt värde på 50 €/ton, kan besparingar upp emot 8 % uppnås. Detta på grund av att syrgas inte behöver köpas in externt.

Seo et al. (2021) har gjort en tekno-ekonomisk jämförelse mellan luftförbränning och oxy-fuel i ett kraftverk med cirkulerande fluidbädd med ultra-superkritisk cykel. Oxy-fuel förbränning resulterar i högeffektiv och ekovänlig kraftgenerering. Dock krävs extra utrustning för produktion av syrgas och behandling av CO<sub>2</sub>. Dessutom resulterar det i en ökning med 64 % av kapitalkostnad jämfört med en luftförbränd kraftanläggning.

Sohn et al. (2021) har genomfört analyser på en oxy-fuel förbränning i ett kraftverk med kol och biomassa, som i sin tur driver en elkraftgenererande turbin i en ångcykel. De använder

syrgas med hög renhet från en PEM-elektrolysör. Där har jämförelser gjorts på samma anläggning med syrgas från konventionell luftseparation och med syrgas från en PEM-elektrolys. Dessutom undersöktes även resultat för ett kombinerat system med oxy-fuel panna och P2G-anläggning. Resultaten blev att det kombinerade systemet resulterade i ett högre nettovärde på den el som genereras och därmed högre effektivitet jämfört med att ha individuella anläggningar. Processens effektivitet ökas även av att ersätta kol med biomassa till oxy-fuel förbränningspannan och vid tillfällen då vattenånga är superkritisk. Om detta system drifas under optimala förhållanden (supercritical steam cycle, oxy-biomass combustion boiler) ökas energieffektiviteten med 13,64 % jämfört med fallet då en enskild oxy-fuel panna används. Kostnaden för vätgas (LCOH) baserat på denna process blev omkring \$3,67/kgH<sub>2</sub>. Faktorer som påverkar den ekonomiska lönsamheten är utrustningens kapacitet och elpris.

Khavidak et al. (2015) har undersökt värmeöverföring i en ugn av cirkulerande fluidiserad bädd (CFB). Studien har innefattat både matematiska modeller och experimentella tester på en 4-MWth CFB. Studien har innefattat tester för både förbränning med luft (21% syrgashalt) och med större syrgashalt (upp till 28 %). Modellens resultat pekar på andelen strålningsvärmeutvinning i ugnen är >70 % för samtliga studerade fall och att det ökar med ökad ugnstemperatur. Värmeöverföringskoefficienter i ugnen som beräknas från mätningar visar sig på liknande trender och storleksordningar för lufteldade och syrebränsleldad (oxy-fuel) under experimentella förhållanden. På väggarna uppstår en koncentration av fasta partiklar mellan 0,35-18 kg/m<sup>3</sup> och temperaturer mellan 1054-1168 K. Både uppmätta och uppskattade värmeöverföringskoefficienter i ugnen visar på måttliga öknings med ökad suspensionstemperatur, pga temperaturberoendet för strålningsvärmeöverföringskoefficienten.

Lupion et al. (2013) skriver om experimentella tester med syreberikad förbränning en CFB i storleksordningen 30 MWth som var installerad på "CIUDEN's Technology Development Centre for CO<sub>2</sub> Capture and Transport", lokaliserad i nordvästra Spanien. Resultaten visade på att det enkelt gick att automatiskt byta från luftförbränning till syreberikad förbränning (oxycombustion), med en transitionstid på 30-40 min. Dessutom visades en signifikant minskning gällande utsläpp av NO<sub>x</sub> och SO<sub>x</sub> under syreberikad förbränning. CO<sub>2</sub>-halten i rökgaserna kunde uppnå en volymhalt på 80 % (torr), medan i konventionell luftförbränning är halten 3 %. Studien låg till grund för en framtida 330 MWe supercritical Oxy-Combustion Power Station (OXY-CFB-300 Compostilla Project), för att demonstrera CCS-teknologi på kommersiell skala.

Ma et al. (2019) har utfört experimentella tester med syreberikad förbränning på en 8 MWth panna (utan rökgasåterföring) med kapacitet att förbränna 150 ton kommunalt fast avfall per dag i Hangzhou i Kina. Syrgaskoncentrationen kunde ökas från 21 till 27 %. Resultaten visar på minskade utsläpp av SO<sub>2</sub> och HCl. Även en genomsnittlig temperaturökning kunde påvisas från 999 °C till 1052 °C, vilket resulterade i en ökad termisk effektivitet från 89,19 % till 89,81 % och mer fullständig förbränning. Studien visade att syreberikad förbränning resulterar i minskade rökgasförluster, men dock ökade värmeförluster pga ökad temperatur i ekonomiser.

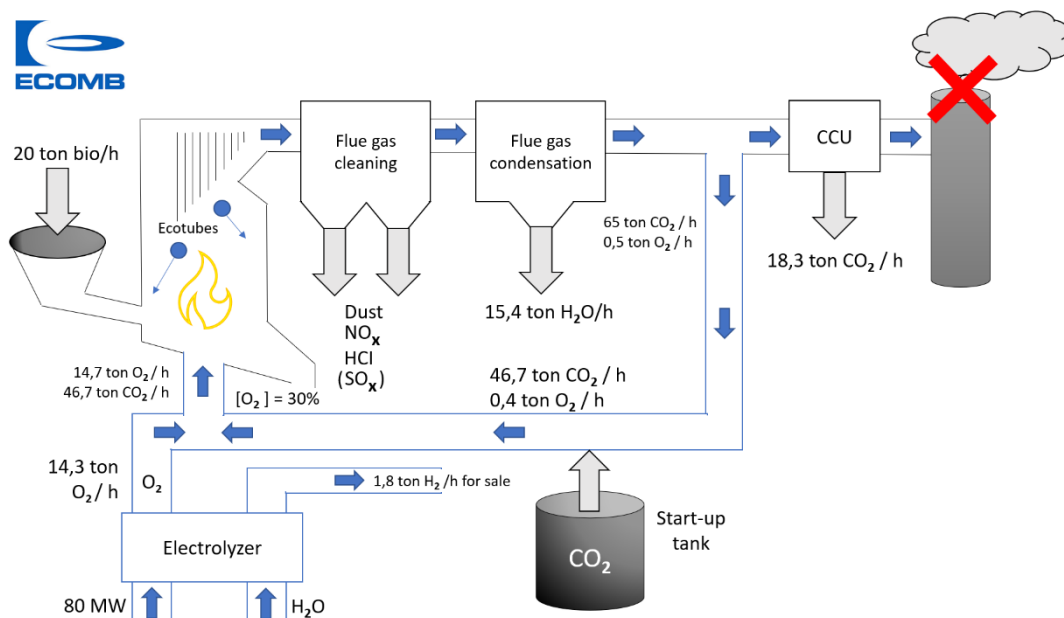
Oxy-fuel resulterar i hög koncentration av CO<sub>2</sub> i rökgaserna underlättar vid CO<sub>2</sub>-infångning (Carbon Capture, "CC"). Avfallsförbränning har stora chanser för att skapa god ekonomi i Carbon Capture. I avfallsförbränningen förekommer omkring 10 % CO<sub>2</sub> idag, ju större andel CO<sub>2</sub> i rökgaserna innebär bättre utväxling för CO<sub>2</sub>-infångning. (Böhn et al. 2021)

### 3.4 The Ecotube® System

Företaget ECOMB (grundades 1992) har utvecklat en produkt benämnt Ecotube® system, som är ett kostnadseffektivt optimeringsverktyg för förbränningsprocesser och består till huvudsak av automatiskt utdragbara lansar som är utrustade med insprutningsmunstycken. Ecotube® kan tillföra olika medier vid höga tryck och hastigheter. Det förbättrar blandningen av

förbränningsprodukterna, som resulterar i att laminära gasstråk bryts och helt turbulenta flödesmönster bildas. Ecotube® system förbättrar prestanda och minskar emissioner som NO<sub>x</sub> i fastbränsleeldade pannor inom fjärrvärme- och industrisektorn, de finns även på den internationella marknaden. Dotterbolaget ECOMB Ocean Recycle AB jobbar med att syresätta övergödda sjöar och hav med en egen teknik.

ECOMB har sedan vidareutvecklat och modifierat detta till Ecotube® Zero där all rökgas återförs till förbränningsprocessen, vilket innebär att utsläppen till atmosfären blir nära noll. En delström av rökgasen avskiljs och kan användas för slutlagring med CCS, där en väldigt hög koncentration av CO<sub>2</sub> minimerar kostnader för CCS. I Ecotube® Zero elimineras luftens kväve från en förbränning genom att ren syrgas tillförs pannorna istället för den vanliga förbränningsluften. Men att endast låta förbränning ske med ren syrgas i en konventionell eldstad är inte möjlig pga materialproblem. Därför återförs delar av rökgasen (som endast innehåller koldioxid och vattenånga) till pannan, som resulterar i ett minimalt syreöverskott. Det innebär att koldioxiden har ersatt kväve från luften. Systemskiss över Ecotube® Zero ses nedan i figur 2. (Ecomb 2022)



Figur 2. Systemskiss över Ecotube® Zero, lanserat av ECOMB.

### 3. Syrgas i pappers- och massaindustri

Inom massabruk används syrgas för delignifiering. En del bruk har dessutom ett fullständigt blekeri där syrgas kan användas för peroxidblekning. Det finns enstaka bruk som har egna anläggningar för syrgasproduktion, där en vanligt förekommande metod är VPSA (Vacuum-Pressure-Swing-Adsorption) men andra kör även med kriogeniska metoder. De flesta köper dock syrgas från externa leverantörer. VPSA är en teknologi som separerar luft i vanlig omgivningstemperatur genom att låta zeolit adsorbera kväve, vilket resulterar i att det skapas en ström av hög halt syrgas (Mahler AGS GmbH 2021).

Krav på renhet för syrgas i pappers- och massaindustri är inte så stränga, kravet är ofta omkring ~93 %. VPSA-anläggningar levererar syrgas med renhet över 90 % (Zhu et al. 2022; Makarem et al. 2019). Att syrgasen innehåller en liten andel vattenånga är inget problem, då reaktionen i VPSA ändå sker i en vattenlösning.



Vissa massabruk kör även vidareblekning med ozon (O<sub>3</sub>) som genereras på plats av den syrgas som redan finns. För ozonproduktion finns hårdare krav för renhet på syrgas, många anläggningar kräver 99,9 % renhet och extralåga halter av vatten samt residual kolväte.

Andra applikationer för syrgas kan förekomma i ett massabruk, som tex stöd till förbränningsprocesser i sodapannan och mesaugnen.

#### 4. Syre inom medicinsk tillämpning

Syrgas är en viktig komponent på vårdcentraler och sjukhus. Syrgas kan distribueras som komprimerad gas i flaskor eller via pipeline.

Vätgas Sverige (2021) skriver att priset för syrgas till sjukvård skiljer sig mycket, från 8,5 – 400 SEK/kg. Idag tillgodoses en stor del av behovet med flytande syre, dock är kostnaden att kondensera syrgasen stor och betalningsviljan låg (1,8 SEK/kg).

Syrgas klassas som läkemedel och två tillstånd behövs från en anläggning som ska leverera medicinsk syrgas.

- Tillverkningstillstånd från Läkemedelsinspektionen
- Registrering från regulatoriska enheten, för registrering av läkemedel

I Sverige finns idag fyra tillverkare av medicinsk syrgas och de är Praxair, Linde (AGA), Air Liquide och Strandmöllen. De framställer syrgas genom luftseparering, vilket är en billigare teknik än elektrolys, dock krävs betydligt mer rening av gasen.

För att få tillverkningstillstånd rekommenderas att processen följer ISO 9001. Registreringen hos regulatoriska enheten följer Common Technical Dossier (CTD). För att registrera ett läkemedel är kostnaden omkring 400 kSEK, detta om processen går igenom utan problem. För varje ny anläggning som producerar syrgas är detta en engångskostnad. Sedan tillkommer löpande kostnader för tillverkningstillstånd på 30 kSEK/år, där även en inspektion var tredje år är inkluderat.

Kato et al. (2005) skriver i sin rapport att syrgas som produceras från PEM-elektrolys är så pass ren att den kan användas för medicinskt bruk inom Japans sjukvård.

Maggio et al. (2022) skriver att syrgas vanligtvis produceras i stora centraliserade anläggningar och distribueras i vätskeform eller som komprimerad gas till sjukhus via lastbilar. Vanligtvis i sjukhus, distribueras syrgasen sedan i pipeline till patienternas rum. I ambulanser och hemsjukvård placeras syrgasflaskor nära patientsängen. Transportkostnader är betydande i dessa fall, speciellt för komprimerad syrgas (200 eller 300 bar).

Mer nyligen har trycksvängningsgeneratorer och små syrekoncentratorer utvecklats och kommersialiserats för att möjliggöra produktion på plats vid sjukhus, om elförsörjning finns tillgänglig.

I denna studie har man undersökt ifall högkvalitativ syrgas som krävs inom sjukvården kan tillverkas via elektrolys, där vätgasen anses som en biprodukt men som även den kan användas vidare och därmed öka totaleffektiviteten. Tex vätgas som bränsle till ambulans, back-up power, förbränningspannor.

I studien har ett system undersökt innehållande alkalisk elektrolys (1 MW) med integrerad solcellsanläggning (1,25 MW). För att syrgasen från elektrolys ska vara ekonomisk konkurrenskraftigt bör det säljas för ett marknadspris mellan 3-4 €/kg, detta för ett sjukhus som har mer än 300 sjukhussängar. Elektrolysen på 1 MW beräknas producera omkring 160,000 Nm<sup>3</sup>/år O<sub>2</sub>, vilket kan räcka till 200-250 sjukhussängar.

I rapporten inom projektet [Vätgasproduktion för ellagring efter elnätsnytta och affärsmodeller | RISE](#) (2022) tas även upp syrgas inom medicinskt bruk. Det finns särskilda bestämmelser för syrgas som avses användas för läkemedel ”medicinskt oxygen”. Läkemedelsverket är den myndighet som ger tillstånd för tillverkning och försäljning av medicinskt oxygen. Det finns idag två standarder för medicinskt oxygen, ”[Oxygen](#)” och ”[Oxygen \(93 per cent\)](#)”. Dessa standarder specificerar syrgasens renhetsgrad, samt hur den ska tillverkas och användas. Dessa standarder är för närvarande skrivna på så sätt att syrgas från elektrolys inte är tillåtet för medicinskt bruk.

## 5. Syrgas för reningsverk, aquakultur och fiskodling

Mohammadpour et al. (2021) skriver i sin rapport om att syrgas kan ersätta luft för behandling av avloppsvatten i en aktiv slamprocess eller inom industriell aquakultur. I den biologiska reningen av avloppsvatten i aktiv slamprocess står luftningen för mellan 45-70 % av energikonsumtionen i hela anläggningen. Luftblåsare komprimerar luft och injicerar det som fina eller grova bubblor i det aktiva slammet.

Studien beskriver att om ett traditionellt avloppsreningsverk som använder grova luftbubblor byter från luft till syrgas och återanvänder syret, skulle det spara 850 kWh/t vilket är 30 % av den energi som krävs för energin från en elektrolysör som är 2600 kWh/t O<sub>2</sub>. Teoretiskt sett innebär det energibesparing på 30 % för vätgasproduktionen. Dessa besparingar är mindre för anläggningar som kräver finare luftbubblor. Ytterligare fördel av att ersätta luft med syrgas är att det krävs ett mindre gasflöde med ren syrgas, vilken i sin tur minskar tiden för denna process.

Studien har undersökt till vilken grad energibesparingar som finns vid ersättning av luft till mer syreberikad luft eller ren syrgas för reningsverk för avloppsvatten med aktivslamprocess. Genom att nyttja syrgas som en biprodukt från elektrolytisk vätgasproduktion, kan det bidra till att dra ned kostnad för vätgaslager med upp till 30 %. Detta gäller då biprodukten syrgas används för att ersätta luft vid ett befintligt centraliserat avloppsreningsverk som använder luftning med grova bubblor. Högre besparingar upp till 60 % kan erhållas om kravet på syrgas för ändamålet är 5 mg/L och högre vilket är kravet i specifika aquakulturer.

Böhm et al. (2021) skriver att en idealisk placering av lågtemperatur elektrolysörer är i reningsverk. Där kan både spillvärmen användas direkt och syrgas kan nyttjas effektivt i behandlingsprocessen.

I projektet [Vätgasproduktion för ellagring efter elnätsnytta och affärsmodeller](#) utredes möjligheter att nyttja syrgas från elektrolys i reningsverk. Där nämndes bl.a. dessa tre nedanstående områden:

I konventionella reningsverk i Sverige finns steget ”biologisk vattenrening”. Denna process sker under aeroba förhållanden och syrgas behöver tillföras. Idag används stora maskiner för att blåsa in vanlig luft i bassängerna och dessa kräver energi. En möjlighet till minska elförbrukning och samtidigt öka effektiviteten är att byta ut blåsmaskinerna till ett syresättningssystem med koncentrerad syrgas. Detta undersöktes för Mariestads kommunala reningsverk. Genom att byta ut befintlig blåsmaskin mot en ny syresättare skulle man spara omkring 530 000 kr/år med en syrgasanvändning på 1850 kg O<sub>2</sub>/dygn. Som slutsats presenteras att det ekonomiska värdet av att använda syrgas från elektrolys till luftning i reningsverk är någonstans mellan 0,70-1,07 kr/kg O<sub>2</sub>.

Dessutom finns fler potentiella användningsområden för syrgas inom reningsverk, som reningen av läkemedelsrester. Detta är inte obligatorisk i Sverige ännu, men är det i andra länder i Europa. Det råder en diskussion om detta även ska införas i Sverige framöver. Ett sätt

att rena vatten från läkemedelsrester är att använda ozon (O<sub>3</sub>), vilket kan framställas från syrgas.

Ytterligare en möjlighet för användning av syrgas är ”biologiska reningsverk”. Idag finns inte detta i Sverige men i andra länder. Processen kräver både värme och syrgas. Biologiska reningsverk skiljer sig från konventionella reningsverk på så vis att de inte luktar, är mer energieffektiva, producerar mindre slam och är miljövänliga. Till utseende liknar de mer växthus än reningsverk.

## 6.1 Fiskodling

RISE (2021) skriver om att syrgas i fiskodlingsapplikationer är en god möjlighet, för att förbättra lagertätheten, behålla den sjukdomsfri och hålla produktivitet o total lönsamhet hög.

Hansen (2021) skriver att betalningsviljan för syrgas är 695 000 kr/år. Det beräknat för en fiskodling innehållande tilapia, regnbåge och lax, 40 ton fisk per år. Skulle förbruka 1,16 % av syrgasen från en 3 MW PEM-elektrolys. Genomsnittliga kostnaden för syrgas för arterna i en odling på 40 ton/år beräknas till 8900 kr/år.

## 6. Syre till restaurering av syrefattiga havs- och sjöbottnar

Det finns en del forskning kring att syresätta sjöar och vattendrag, som blivit syrefattiga på grund av övergödning och dålig vattencirkulation.

I Sveriges vätgasstrategi (Energimyndigheten 2021) nämns en stor pågående forskning på institutionen för marina vetenskaper på Göteborgs universitet om restaurering av Östersjön. Genom att syresätta djupvatten med syrgas från elektrolys kan det hjälpa till att motverka övergödningen i Östersjön. Den mängd syrgas som behövs för denna behandling skulle motsvara de volymer av syrgas som fås från produktion av 400 000 ton vätgas under ett år.

Genom att tillsätta mer syre sker en större absorption av syre då inget kväve avlägsnar syret från vattenmolekylerna. Samma mekanism sker i uppfriskning av havsbotten och i vattenreningsverk. (RISE 2021)

Magnus Karlsson från IVL berättade vid webinariet ”Restflöden från vätgasproduktion” att bort emot 1-10 miljoner ton O<sub>2</sub>/år skulle krävas för att åstadkomma effekt från syresättning i tex Östersjön. Det skulle även krävas kontinuitet och varaktighet, annars riskerar systemet att återgå till tidigare jämviktsläge och fosfor diffundera tillbaka till vattenmassan. (Sweco 2022)

## 7. Övrigt

Ytterligare en möjlighet för syrgasen som restprodukt från elektrolys-processen är att distribuera den till en förgasningsprocess från biomassa där bl.a. vätgas blir slutprodukt.

Newborough & Cooley (2021) skriver om fördelar att förbränna med syrgas istället för luft för att minska NO<sub>x</sub>-utsläpp eller att syrgas kan användas som oxidationsmedel. Syrgas kan användas för att höja prestandan för industriella termiska processer. Processer för kända metaller kräver temperaturer upp emot 1350°C (smältning, glödning) och upp till 1650°C för icke-metaller (tillverkning av glas och cement). Genom att blanda in syrgas med luften i dessa processer ökar flamtemperaturen, samtidigt som det minskar värmeförluster från rökgaser då mindre luft behövs per konsumerad MWh av värmeproduktionen. Det leder till minskat behov

av tid, förbättrar produktkvalitet och redan vid låga nivåer av syrgas även leder till minskade NO<sub>x</sub>-utsläpp.

Författarna skriver även vidare att syrgas kan injekteras direkt under en flamma. Detta är fördelaktigt vid smältning av metall och glas i roterande ugnar, då det ökar strålningen till ”stocken” utan att betydande påverka värmeöverföringen till ugnstaket, detta förbättrar den termiska effektiviteten och bibehåller tiden för eldningen. För smältugnar har det rapporterats minskningar på 70-90 % av NO<sub>x</sub>-utsläpp och 20-70 % av partiklar och 50 % i specifik energikonsumtion, genom att använda multifunktionella oxy-fuel brännare. Även om en cementtillverkning är designad endast för att använda oxy-fuel brännare, kommer CO<sub>2</sub> koncentrationen i rökgaserna att nå 85 %, vilket förbättrar för CCS.

Andra användningsområden för syrgas är inom bryggerier till jäsningsprocessen för tex öl, till förpackning av livsmedel och för gassvetsning inom verkstäder.

## 8. Ekonomiskt värde för syrgas

Det finns många faktorer som bör tas med i beräkningen för pengar på syrgas, tex kostnader för logistik och vilken process som egentligen ska få värdet av synergin.

Under en konferens arrangerat av SHDC (Swedish Hydrogen Development Center) under hösten 2021 så nämndes att syrgasen anses ha ett marknadsvärde mellan 40-160 €/ton O<sub>2</sub>. I grova drag motsvarar det inte mer än 10 % av värdet på vätgas. (Schalin 2021) Under samma konferens nämndes att syrgas producerad från luftseparation (ASU, Air Separation Unit) på plats kostar omkring 50-80 €/ton. Ytterligare inkomst kan fås för infångad CO<sub>2</sub>, ca 1 €/kg H<sub>2</sub> (~50 €/ton CO<sub>2</sub>). (Furusjö 2021)

Mosheni et al. (2017) anger syrgasens värde till 0,63 kr/kg eller 0,9 kr/Nm<sup>3</sup>, (vilket motsvarar 10 % av priset för slutkund). AGA:s pris för syrgas på flaska uppgår till 7-8 kr/kg. Ett av Sveriges större sjukhus nämner att de betalar 1 kr/kg för syrgas vid bulkinköp i flytande form.

Generellt kan sägas att syrgas är lätt att framställa även på andra sätt och att dess värde därför är förhållandevis lågt.

Applikation för syrgas	Värde på syrgas
Syrgas till ökad effektivitet i förbränning av biobränslen	0,06 kr/kg O <sub>2</sub>
Syrgas för ökad effektivitet i avfallsförbränning	0,48 kr/kg O <sub>2</sub>
Syrgas till biologiskt steg i reningsverk	0,70-1,07 kr/kg O <sub>2</sub>
Medicinsk syrgas	8,5 – 400 kr/kg O <sub>2</sub>

## Bilaga

Bilaga 1 – Nyttiggörande av syrgas från elektrolysör i en förbränningsanläggning, 2023-02-21

Henrik Lindståhl

FoU, Stab Teknik och system

Tekniska verken i Linköping AB (publ)

Bilagan ligger sammanfogad i denna rapport, efter Referenslistan

## Referenslista

- Böhm, H., Moser, S., Puschnigg, S. & Zauner, A. (2021). Power-to-hydrogen & district heating: Technology-based and infrastructure-oriented analysis of (future) sector coupling potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- ECOMB (2022). *ECOMB lanserar Ecotube Zero – Ingen rök utan med el!* [Ecomb AB - Nyheter - 2022 - ECOMB lanserar Ecotube Zero - Ingen rök med el!](#) [2022-12-05]
- Energiforsk (2021). *Sektorkoppling för ett mer effektivt energisystem: Förstudie gas tillsammans med el och fjärrvärme.* [sektorkoppling-for-ett-mer-effektivt-energisystem-energiforskrappport-2021-764.pdf](#) [2022-10-02]
- Energimyndigheten (2021). *Förslag till Sveriges nationella strategi för vätgas, elektrobränslen och ammoniak.* [Förslag till nationell strategi för fossilfri vätgas \(energimyndigheten.se\)](#) [2022-03-16]
- Europeiska Kommissionen (2020). *Meddelande från Kommissionen till Europaparlamentet, rådet, europeiska ekonomiska och sociala kommittén samt regionkommittén: En vätgasstrategi för ett klimatneutralt Europa.* [EUR-Lex - 52020DC0301 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#) [2022-01-10]
- Furusjö, E. (2021). *Oxygen for production of climate positive bio-based hydrogen.* Muntlig presentation på SHDC (Swedish Hydrogen Development Center) konferens “Workshop on total business model/sector coupling”. Stockholm, Sverige, 17-18 November.
- Green Hydrogen Systems (2021). *HyProvide™ A-Series specifications* [Technical Overview]. [A-Series-brochure-120421.pdf \(greenhydrogen.dk\)](#) [2022-01-18]
- Hansen, P. (2021). *Potentiell koppling mellan elektrolys och landbaserad fiskodling: En analys av behov och tillgång på syrgas och värme.* Examensarbete vid högskolan i Gävle.
- Kato, T., Kubota, M., Kobayashi, N., & Suzuoki, Y. (2005). Effective utilization of by-product oxygen from electrolysis hydrogen production. *Energy*, 30(14), 2580-2595.
- Khavidak, S. S., Pallarès, D., Normann, F., Johnsson, F. & Ylä-Outinen, V. (2015). Heat transfer in a 4–MWth circulating fluidized bed furnace operated under oxy-fired and air-fired conditions: Modeling and measurements. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 37, 264-273.
- Linde (u.å). *Syrgas.* [Syrgas | Linde \(tidigare AGA\) Industrigas \(linde-gas.se\)](#) [2022-03-22]
- LSE. *Lag om skatt på energi.* [Lag \(1994:1776\) om skatt på energi Svensk författningssamling 1994:1994:1776 t.o.m. SFS 2022:1781 - Riksdagen](#)
- Lupion, M., Alvarez, I., Otero, P., Kuivalainen, R., Lantto, J., Hotta, A. & Hack, H. (2013). 30 MWth CIUDEN oxy-cfb boiler-first experiences. *Energy Procedia*, 37, 6179-6188.
- Ma, C., Li, B., Chen, D., Wenga, T., Ma, W., Lin, F. & Chen, G. (2019). An investigation of an oxygen-enriched combustion of municipal solid waste on flue gas emission and combustion performance at a 8 MWth waste-to-energy plant. *Waste Management*, 96, 47-56.
- Maggio, G., Squadrito, G. & Nicita, A. (2022). Hydrogen and medical oxygen by renewable energy based electrolysis: A green and economically viable route. *Applied Energy*, 306, 117993.
- Mahler AGS GmbH (2021). *VPSA Oxygen Generator Plants.* [Mahler AGS Oxygen Plants \(mahler-ags.com\)](#) [2023-01-11]

- Makarem, M. A., Mofarahi, M., Jafarian, B. & Lee, C. H. (2019). Simulation and analysis of vacuum pressure swing adsorption using the differential quadrature method. *Computers & Chemical Engineering*, 121, 483-496.
- Mohammadpour, H., Cord-Ruwisch, R., Pivrikas, A. & Ho, G. (2021). Utilisation of oxygen from water electrolysis—Assessment for wastewater treatment and aquaculture. *Chemical Engineering Science*, 246, 117008.
- Mohseni, F., Görling, M., Llidén, M. & Larsson, M. (2017). *Genomförbarhetsstudie för power to gas på Gotland*. Energiforsk Media, Stockholm.
- Newborough, M. & Cooley, G. (2021). Electrolysers for producing net-zero heat. *Fuel Cells Bulletin*, 2021(6), 16-21.
- RISE Research Institutes of Sweden (2021). *Detaljerad analys state-of-the-art industriell elektrolys – fallstudie*. [Detaljerad analys state-of-the-art industriell elektrolys - Fallstudie | RISE](#). [2022-04-26]
- RISE Research Institutes of Sweden (2022). *Vätgasproduktion för ellagring efter elnätsnytta och affärsmodeller*. [Vätgasproduktion för ellagring efter elnätsnytta och affärsmodeller | RISE](#). [2022-08-17]
- Saxe, M. & Alvfors, P. (2007). Advantages of integration with industry for electrolytic hydrogen production. *Energy*, 32(1), 42-50.
- Schalin, B. (2021). *Fish farming in the hydrogen economy*. Muntlig presentation på SHDC (Swedish Hydrogen Development Center) konferens “Workshop on total business model/sector coupling”. Stockholm, Sverige, 17-18 November.
- Seo, S. B., Kim, H. W., Kang, S. Y., Go, E. S., Keel, S. I. & Lee, S. H. (2021). Techno-economic comparison between air-fired and oxy-fuel circulating fluidized bed power plants with ultra-supercritical cycle. *Energy*, 121217.
- Sohn, G., Ryu, J. Y., Park, H. & Park, S. (2021). Techno-economic analysis of oxy-fuel power plant for coal and biomass combined with a power-to-gas plant. *Energy for Sustainable Development*, 64, 47-58.
- Sweco (2022). *Restflöden från vätagasproduktion*. Webinarium inom projektet Omvärldsbevakning vätagas [2022-12-20]
- Vätgas Sverige (2021). *Vätgas som möjliggörare för energiomställning och stadsutveckling*. *Trelleborgs Energi*. [2022-05-26]
- Zhang, C., Wang, J., Ren, Z., Yu, Z. & Wang, P. (2021). Wind-powered 250 kW electrolyzer for dynamic hydrogen production: A pilot study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(70), 34550-34564.
- Zhu, X., Sun, Y., Liu, Y., Sun, X. & Shi, J. (2022). Experimental performance analysis of vacuum pressure swing adsorption air separation process under plateau special conditions. *Separation Science and Technology*, 1-9.

## Bilaga 1 – Nyttiggörande av syrgas från elektrolysör i en förbränningsanläggning

### Grundläggande förbränningskemi

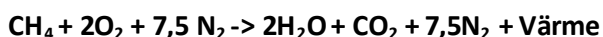
Förbränning är en kemisk reaktion mellan syre och oxiderbara ämnen (bränsle). Reaktionen (oxidationen) är exoterm, dvs. sker under värmeutveckling vilket är själva avsikten med förbränningen. Vanliga bränslen som olja, kol, ved och fossilgas består av olika kolväteföreningar. Syret (oxidationsmedlet) finns lätt tillgängligt som en naturlig beståndsdel i luften. Luftens naturliga sammansättning framgår av Tabell 1.

Gas	Volym(%)	Massa(%)
Kväve	78,03	75,47
Syre	20,99	23,19
Koldioxid, Argon	0,94	1,30
Väte	0,01	0,01
Övrigt	0,03	0,03

Tabell 1 - Beståndsdelar i torr luft

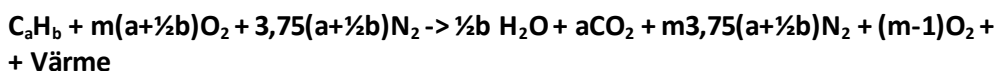
Som synes består luften till ca 1/5 av syre. Huvuddelen, eller närmare fyra femtedelar, utgörs av kväve medan resterande (ca 1 %) är koldioxid, ädelgaser mm.

Som ett enkelt exempel på stökiometrin vid förbränning kan man ta förbränningen av metan (CH<sub>4</sub>, huvudkomponent i fossilgas). Relationen mellan bränslets andelar av kol, väte och eget syre kan variera, men med variation i koefficienterna gäller nedanstående formel för alla bränslen:



Som synes utgör luftens kväve enbart en ballast som inte deltar kemiskt i förbränningsreaktionen. Däremot har kvävet en viktig fysikalisk funktion dels genom att bromsa syrets tillträde till oxiderbara molekyler vilket saktar ner reaktionen, dels genom att absorbera en stor del av den värme som utvecklas vid förbränningsreaktionen.<sup>1</sup>

Formeln ovan visar det stökiometriska sambandet i en ideal situation. I verkligheten krävs ett överskott av syre för att uppnå fullständig förbränning av rökgasen, vilket innebär att en mer generell formel för beräkning av rökgasflöde bör skrivas



där a och b är koefficienter för antalet mol av kol respektive väte i bränslet och luftfaktorn m är ett tal större än 1 som beskriver luftöverskottet. Faktorn m ligger vanligen mellan 1,2 respektive 1,6 (vilket motsvarar 3-8 % O<sub>2</sub> i torr gas i skorsten), och har alltså en stor inverkan på det totala rökgasflödet.

<sup>1</sup> [Energiforsk Rapport 1995:68 – Ingemar Gunnarsson](#)

Förbränningsluftens syrehalt är en konstant som panntillverkaren kan påverka på tre olika sätt. Det vanligaste är att sänka halten genom återföring av rökgas. I rökgasen har merparten av syret reagerat till  $\text{CO}_2$  respektive  $\text{H}_2\text{O}$  som båda, jämte kvävgasen, bidrar till att minska partialtrycket av syre, och därmed förbränningshastighet och temperatur i eldstaden. Halten syrgas kan också sänkas genom uppfuktning av ingående förbränningsluft via rökgaskondensering. Med tillgång till syrgas öppnas en frihetsgrad i form av ökning av ingående syrgashalt som ger intressanta möjligheter.

## Effekter av introduktion av syrgas i förbränningen

Av ovan kan dras ett antal slutsatser kring effekterna av ökad syrehalt i förbränningsluften. Framför allt sjunker andelen "ballast" i form av kväve som följer med syret, dvs. konstanten 7,5 i formeln ovan minskar. Detta har ett antal effekter:

- Gasflödet genom pannan minskar, såväl flödet av förbränningsluft som rökgasflödet
- Förbränningstemperaturen ökar
- Fukthalten i utgående rökgas ökar

Eftersom ökande syrehalt accelererar förbränningsreaktionen via flera mekanismer (se ovan) är verkan av ökande syrehalt långt från linjär.

## Ökad syrehalt i befintliga pannor

Närmast tillhands ligger att använda det syre som bildas från elektrolysen av vätgas till redan existerande förbränningsanläggningar. Dessa är inte dimensionerade för syreanrikad förbränningsluft, men syret kan ändå komma till god nytta, särskilt i pannor med varierande bränsle, så som avfallsförbränningsanläggningar och biobränslepannor. Syrgasanrikning av tilluften i befintliga pannor ska göras med stor försiktighet, eftersom skador i pannan pga övertemperaturer i pannan annars lätt kan uppstå. En teknisk lösning kan vara att tillföra syrgas till rökgasrecirkulation i en blandningskammare innan den går in i pannan. Exakt hur detta ska göras kräver ett omfattande ingenjörsarbete som faller utanför denna rapport.

## Avfallsförbränningsanläggningar

Pannor som utvinner energi ur avfall lyder under två generella regelverk<sup>2</sup> som båda är sprungna ur EU:s miljölagstiftning för industriutsläpp (Industriemissionsdirektivet). Ur det breda spektrum av krav som riktas mot avfallspannornas miljöprestanda finns även sådana som berör förbränningen.

### *Minst 850 °C i minst 2 sekunder*

Pannor som eldar avfall måste enligt dessa regelverk uppnå en uppehållstid av minst två sekunder under minst 850 °C i rökgasen för att säkerställa fullständig förbränning av även de mest svårnedbrytbara organiska föreningarna som kan finnas i avfallet. För att säkerställa att det kravet uppfylls finns även krav på att sådana pannor ska vara utrustade med stödbrännare, som automatiskt aktiveras när risk finns för att temperaturkravet inte kan upprätthållas. Eftersom dessa brännare eldas med olja

---

<sup>2</sup> SFS 2013:253 samt BAT-slutsatser för avfallsförbränning



medför varje sådant tillfälle en kostnad för anläggningen, och i de vanligt förekommande fall då fossil eldningsolja används, även ett fossilt utsläpp.

Genom att tillföra syrgas till förbränningsluften skulle temperaturkravet kunna upprätthållas utan insats av stödbrännare även under betydande fall i bränslets värmevärde. Detta sker dels genom att reaktiviteten ökas, vilket kompenserar för den nedbromsning som fuktigare bränsle medför, dels genom att rökgashastigheten avtar i pannan när tillförseln av inert kvävgas via förbränningsluften avtar.

### *Fullständig utbränning*

Ett annat förbränningsrelaterat krav är att avfallet måste vara nära nog fullständigt utbränt efter passagen av pannan. Utgående bottenlagg får inte innehålla mer än tre procent organiskt kol. I händelse av en snabb fukthaltsförändring av ingående avfall kan tröghet i pannans reglering medföra att detta krav inte klaras vid alla tidpunkter. Även här kan möjligheten att anrika ingående primärluft med syrgas vara till god hjälp. Detta måste dock tillämpas med försiktighet och precision för att inte orsaka överhettning av rostern alternativt sintringar i fluidbädden.

### *Emissionspåverkan av syrgastillförsel*

En kinesisk studie från 2019<sup>3</sup> har undersökt effekten av syreanrikning till nivåerna 24% respektive 27 % O<sub>2</sub> i ingående förbränningsluft. Undersökningen omfattar NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl och dioxiner. Resultaten indikerade att ökad syrgashalt minskade halterna av SO<sub>2</sub> och HCl, medan NO<sub>x</sub>, med NO<sub>x</sub> ökade och bildningen av dioxiner ökade kraftigt. Pannan saknade rökgasåterföring.

Mekanismen för den ökad NO<sub>x</sub>-bildningen kan vara att ökat partialtryck av syre ökar temperaturen i förbränningen, samtidigt som försöket inte drevs till sådana syrgashalter att kvävehalten minskade tillräckligt för att bli begränsande för reaktionen.

Ökningen av dioxiner är en aspekt som måste beaktas. Dioxinerna renas bort via dosering av aktivt kol i rökgasreningen. Ökad spridning via rökgasen går alltså att förhindra, men vid syrgasanrikad förbränning kan man behöva öka doseringen av aktivt kol, beakta rökgasreningensrestens högre dioxinhalt samt i den efterföljande behandlingen.

Minskning av SO<sub>2</sub> kan förklaras med att den ökade oxidativa kraften i förbränningen driver oxidationen av svavel till sulfat, som bildar salter som avskiljs som stoft från rökgasen. När det gäller HCl kan det vara så att ökad syrgashalt konkurrerar om tillgängligt väte på sådant sätt att kloriderna istället bildar salter. I så fall kan detta leda till mer korrosiva beläggningar i pannan.

### *Biobränslepannor*

Biobränsleeldade pannor har inte samma krav på sig som avfall, varken när det gäller förbränningstemperatur eller oförbränt i utgående aska. Men även för dessa pannor kan möjligheten att tillföra syrgas till förbränningsluften vara av värde. Trots god reglering leder ofta plötsliga fall i värmevärdet hos ingående bränsle till att panneffekten faller. Effektkurvan över dygnet kan därför uppvisa flera gropar som motsvarar utebliven värmeproduktion. Under perioder av hög last används ofta en spetslastpanna med

---

<sup>3</sup> [An investigation of an oxygen-enriched combustion of municipal solid waste on flue gas emission and combustion performance at a 8 MWth waste-to-energy plant - ScienceDirect](#)

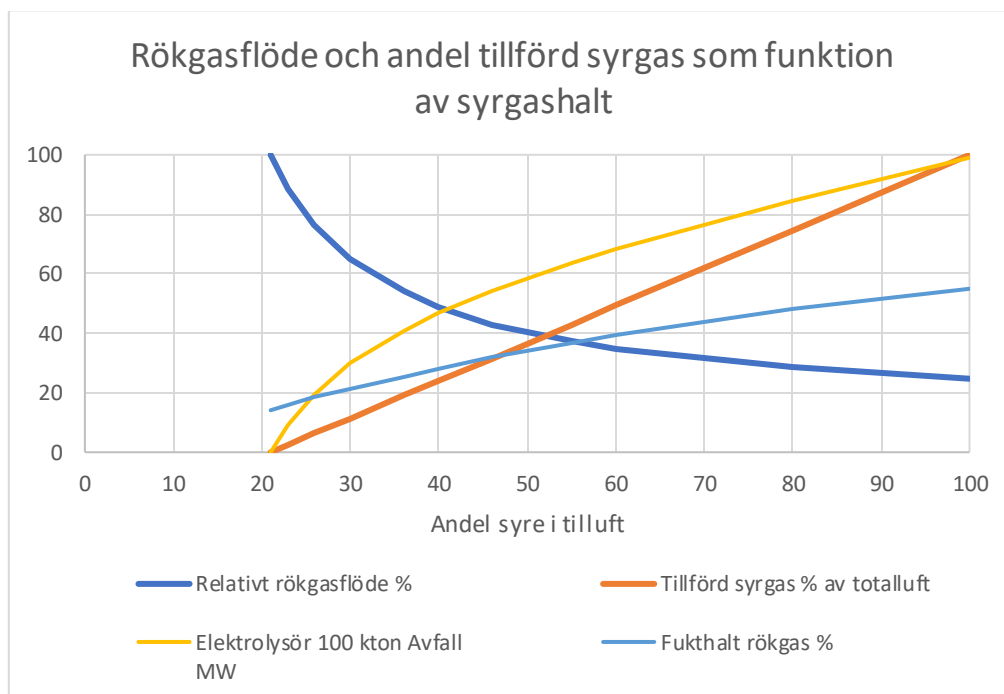
dyrare, och kanske fossilt bränsle parallellt med en biopanna för att täcka behovet. Under sådana perioder måste groparna i biopannans effektkurva fyllas av energi från spetslastpannan, med högre kostnader och större utsläpp till följd. Med tillgång till syrgas skulle den typen av energibortfall kunna pareras snabbare och effektivare, varvid behovet av drift på spetspannan kan begränsas.

### Syrgastillförselns effekt på verkningsgraden

Ovanstående exempel på syrgasens nytta relaterar till bränsleberoende störningar i driften. Men även en kontinuerlig tillförsel av syrgas har positiv effekt på pannans verkningsgrad, i synnerhet om den är utrustad med rökgaskondensering.

Som visat under avsnittet "Grundläggande förbränningskemi" minskar rökgasflödet vid tillförsel av syrgas, samtidigt som temperaturen på förbränningen ökar. Detta medför att verkningsgraden på pannan ökar.

Med minskande flöde och ökande temperatur ökar värmeupptagningen hos befintliga värmeytor så att utgående rökgasflöde inte bara kyls av mer, utan också bär med sig mindre värme ur processen just för att flödet minskar. Vidare ökar fukthalten i rökgasen. I biobränsle- och avfallspannor kommer fukten i ungefär lika delar från förbränningsreaktionen (oxidation av väte i bränslet) respektive från fukthalten i ingående bränsle. Detta innebär att med minskande flöde av ingående förbränningsluft ökar fukthalten, och därmed daggpunkten hos rökgasen som går in i rökgaskondenseringen. Detta gör att en högre andel av denna värme kan utvinnas.



Figur 1. Relativ minskning av rökgasflöde med hjälp av syrgasinblandning

Figur 1 visar hur rökgasflöde, fukthalt, andel tillförd syrgas, alla i procent, varierar med ökande syrehalt i ingående luft. Dessutom visas den effekt (MW) som krävs för en elektrolysör med 70 % verkningsgrad för att producera aktuell mängd syrgas till en

avfallspanna som eldar 100 kton/år. Förhållandet är linjärt, vilket innebär att en panna som eldar 200 kton avfall per år behöver en dubbelt så stor medeleffekt på elektrolysören. Alla kurvor startar vid 21 % O<sub>2</sub> som är den normala halten i atmosfären vid marknivå. Som framgår av figuren minskar rökgasflödet kraftigt med anrikad syrehalt i tilluften. Grafen illustrerar effekten av syrgasanrikning i en avfallspanna där fukthalten i utgående rökgas är 14 % vid normal syrehalt. Hur pannans behov av syreöverskott beror av ingående syrehalt är svårt att beräkna, därför antas här att syreöverskottet hålls konstant på 7 % (vilket i atmosfärluft motsvarar en luftfaktor  $m=1,5$ , se "Grundläggande förbränningskemi" ovan) oavsett tillförsel av syrgas. Ökande tillförsel av syrgas medför att ballasten i form av inertgaser (kvävgas, fukt och CO<sub>2</sub>, samt spår av ädelgaser,) som följer med tilluften minskar, för att helt upphöra när förbränningen drivs med ren syrgas. Det som återstår i rökgasen är då främst CO<sub>2</sub>, fukt, syreöverskott samt spår av NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> och HCl.

Rökgasflödet faller kraftigt med ökande syrgashalt, vilket dels beror på att beräkningarna utgår från konstant last i pannan, och det minskade rökgasflödet minskar behovet av ingående bränsle genom att verkningsgraden ökar. Vidare minskar syreöverskottets bidrag till rökgasflödet när andelen inertgas som följer med syret minskar. Hur mycket flödet minskar beror i hög grad av vilket syreöverskott förbränningen behöver.

Beräkningen utgår från att bränslet alstrar lika mycket fukt från förbränningen via bränslefukt och förbränningsfukt oavsett syrehalt. Därmed ökar fukthalten i utgående rökgas när andelen kväve i tilluften avtar.

Som exempel kan tas att andelen syre i förbränningsluften ska hållas vid 30 % O<sub>2</sub>. Enligt figur 1 behöver då andelen tillförd syrgas utgöra 11,4 % av all tilluft. Av diagrammet framgår också att fukthalten ökar från 14 % till 21 %. För att hålla en sådan syrehalt behöver en panna på 100 kton avfall all syrgas som alstras från en elektrolysör som arbetar vid 30 MW som medeleffekt under året.

Med denna syrgastillförsel minskar rökgasflödet med en tredjedel, till 65 %, vilket, givet oförändrad avgastemperatur medför att verkningsgraden i pannan ökar. Pannverkningsgraden för fastbränsle ligger typiskt runt 83-85 %. Förlusten är alltså ca 16 %. Denna kan förväntas minska linjärt med rökgasflödet. Vid 30 % ingående syrehalt minskar alltså rökgasförlusten med ca 5 %. Förändringen i effekten från en rökgaskondenseringsanläggning blir obetydlig. Samtidigt som en större andel av rökgasfukten kan kondenseras ut minskar också bidraget från den sensibla värmen i proportion till det minskade rökgasflödet. Utan syrgastillförsel är bidragen från rökgasens temperatursänkning över rökgaskondenseringen respektive från utkondensering av rökgasfukten ungefär lika stora.

Vid syrgasanrikning till 30 % ökar andelen utkondenserad fukt också med ca 30 %, samtidigt minskar flödet med 35 %, vilket, beroende på hur nedkylningen av rökgasen i föregående steg påverkas, motverkar effekten av den ökade kondenserings effektiviteten.

## Syrgasbehov

För en panna som eldar 100 000 ton avfall per år behövs under året ett medelflöde av ca 1,6 kg O<sub>2</sub>/s för att uppnå en ingående syrgashalt på 30 %. För att erhålla detta flöde från

en elektrolysör med en verkningsgrad på 70 % behövs en genomsnittlig elektrolysöreffekt på 30 MW under året.

## Syrgasanrikning och CCS

Vid litteratursökning på syrgasanrikad förbränning utgör koldioxidinfångning ett viktigt skäl till att tekniken studeras, parallellt med möjligheten att för olika tekniska processer, som stål- och glastillverkning, nå högre temperaturer. Verkningsgradsvinster och effektivare förbränningsreglering i kraftvärmepannor nämns mer sällan. I samband med CCS är det positivt att genom syrgastillförsel öka CO<sub>2</sub>-koncentrationen i rökgasen, vilket gör CO<sub>2</sub>-avskiljningen effektivare, att den kan byggas mer kompakt och därmed blir mindre kostsam.

### Intjäning syrgasanrikning

Andelen olja som åtgår för att upprätthålla förbränningen i en avfallspanna uppgår till 0,1 – 0,3 % av tillförd bränsleenergi i en avfallspanna. Därtill kommer olja för uppstart av pannan, men den går inte att ersätta med syrgas.

Som exempel kan tas en avfallspanna som eldar 100 000 ton avfall per år, vilket motsvarar tillförd energi på ca 300 GWh. Av detta är ca 600 MWh olja som tillförs för att upprätthålla förbränningen, vilket motsvarar ca 55 m<sup>3</sup>. Detta ger ett utsläpp av dryga 150 ton CO<sub>2</sub>, och orsakar en hög kostnad, i dagsläget i storleksordningen 1 Mkr/år. Används RME eller annat högt förädlad bio-olja blir kostnaden ännu högre.

Därtill finns en potential i ökad pannverkningsgrad. Normalt kan man inte anta att en avfallspanna producerar mer för att verkningsgraden ökar, däremot kan uteblivna effektsvackor till följd av bränslevariationer slätas ut, vilket kan ge en viss ökning. Den ökade verkningsgraden kan medföra att avfallsbehandlingen minskar, vilket (hittills) har gett en negativ ekonomisk påverkan. I en bristsituation, där otillräcklig avfallstillförsel medför att driften i avfallspannan måste ersättas av pannor med betalande bränslen blir situationen en annan.

I exemplet med en panna med kapaciteten 100 kton/år skulle inbesparingen bli ca 15 GWh/år (5 % av 300 GWh). Med ett antagande om detta minskar behovet av alternativbränsle, samt ett bränslepris på 200 kkr/GWh blir besparingen i så fall 3 Mkr.

Alltså: vid den hittills ovanliga situationen att det råder brist på avfall, där högre verkningsgrad ger längre drifttid på avfallspannan för att bränslet räcker längre, kan man skatta att en syrgasanrikning till 30 % i en avfallspanna på 100 000 ton ger en inbesparing på 4 Mkr/år via högre verkningsgrad och minskad oljeeldning. Om tillgången till avfall är god blir inbesparingen ca 1 Mkr/år för en sådan panna.

Detta är små belopp i sammanhanget, vilket kan förklaras med att syret annars tas ur luften gratis. På vilken annan planet som helst i vårt kända universum skulle syrgasbidraget vara närmast ovärderligt för mänsklig verksamhet, men just här är det tyvärr inte mycket värt, i varje fall inte för förbränning.