

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Fossilfri omvärmningsugn	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska [Klicka här och skriv]	
Universitet/högskola/företag SWERIM	Avdelning/institution Värmning och Bearbetningsteknik
Adress Box 812, 971 25 Luleå	
Namn på projektledare Andreas Johnsson	
Namn på ev övriga projektdeltagare John Niska, Annika Nilsson, Ola Ritzen, Thomas Ekman, Ebrahim Moosavi, Fredrik Bjurbo, Helena Roos, Jonas Bergman, Emma Nynäs	
Nyckelord: 5-7 st Fossilfri värmningsugn, avgaskondensering, vätgas-oxyfuel, värmeåtervinning, energibesparing	

## Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten, SMT, Linde och Radscan med SWERIM som projektledare.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	3
Summary .....	4
Inledning/Bakgrund .....	5
Genomförande .....	5
Resultat .....	7
<b>WP 1 KUNSKAPSUPPBYGGNAD</b> .....	7
<b>WP 2 Utveckling av ugnskoncept</b> .....	8
<b>WP 3 KONDENSERINGSENHET</b> .....	13
<b>WP 4 INVERKAN PÅ PRODUKT/PROCESS</b> .....	16
<b>WP 5 HELHETSLÖSNING FÖR SYSTEM</b> .....	19
<b>PROJEKTETS BETYDELSE I BEFINTLIG OCH FRAMTIDA     VERKSAMHET</b> .....	24
Diskussion och Sammanfattning .....	25
Publikationslista .....	<b>Fel! Bokmärket är inte definierat.</b>
Referenser, källor .....	25
Bilagor .....	25

## Sammanfattning

Projektets utmaning är att minska stålindustrins utsläpp av växthusgaser. Denna genomförbarhetsstudie har fokuserat på förutsättningar för en övergång till fossilfri förbränning i stålindustrins värmningsugnar. Värmningsugnarna står för en stor del av stålindustrins utsläpp.

Genomförbarhetsstudien har fokuserat på att utreda möjligheten att övergå till vätgas/oxyfuel förbränning med vattenånga som restprodukt. Studien har bedömt vilka förutsättningar som finns och vilka problemställningar och möjligheter som finns.

För att besvara de grundläggande frågorna gällande tekniken gjordes tester av vätgas och oxyfuel förbränning i en ugn i Lindes lab. Testerna visade att förbränningen av vätgas inte innebär någon större skillnad mot dagens system när det gäller brännare och styrsystem för ugnen. Man behövde använda en bärgas för att kunna mäta ugnsavgasernas sammansättning. I försöken uppmättes upp till 99% vattenånga i ugnen.

En annan viktig frågeställning som utvärderades var hur produkten påverkas av den nya ugnsatmosfären därför testades värmning av SMT:s material, t.ex. hur påverkas glödskaalsbildning, utbytet och avkolning av produkten. En annan kritisk frågeställning var ifall vätgasförbränning bidrar till väteförspredning vilket är förödande för produkter. Tester och utvärdering visade att skillnaden var marginell.

De inledande pilotskaliga testerna hos Linde är mycket lovande men med begränsade antal stålsorter, värmningscykler, mm. Industriskalig vätgas-oxyfuel förbränning kanske har en större inverkan på produktkvaliteten hos andra material eller andra negativa effekter som ökat ugnsslitage och oönskad kondensation i ugnen.

I det nya ugnskonceptet är det tänkt att använda rökgaskondensering för att underlätta återvinning av restenergin. I denna genomförbarhetsstudie har projektgruppen bedömt möjligheten att applicera rökgaskondensering i SMT:s gropugnar.

Gropugnarna valdes som underlag för att bedöma hur en tillämpning för industrin kan göras. Gropugnarna har redan mycket goda förutsättningar för att vara platsen för en industriell demoanläggning. De eldas redan genom oxyfuel förbränning, de har god täthet och lämplig storlek för industriella tester t.ex. på en av ugnarna. Vätgas/oxyfuel skulle kunna testas på en av ugnarna medan en kondenseringsanläggning kan dimensioneras för att hantera alla avgaser från de fyra gropugnarna. Det finns lämplig plats för kondensorn vid avgaskanalen från gropugnarna.

Den största svårigheten i dagsläget är en mycket begränsad tillgång på vätgas. Kostnaden för värmning med vätgas är betydligt högre än kostnaden för värmning med naturgas eller gasol idag, vilket medför en högre produktionskostnad, men kanske kan det ge en marknadsföringsmässig fördel med fossilfri omvärmning.

## Summary

The project's challenge is to reduce greenhouse gas emissions in the steel industry. This feasibility study has focused on the prerequisites for a transition to fossil-free combustion for steel reheating furnaces in the steel industry. Steel reheating furnaces account for an important fraction of the steel industry's emissions.

This feasibility study has focused on investigating the possibility of switching to hydrogen - oxyfuel combustion with water vapor as the main residual product. The study has assessed the conditions that exist and the problems and opportunities available.

To answer the basic questions about the technology, tests using hydrogen oxyfuel combustion were carried out in a pilot furnace in Linde's lab. The tests showed that the combustion of hydrogen does not make a significant difference relative to the current system in the case of the burners and control systems for the furnace. A carrier gas was needed to measure the furnace exhaust gases composition. In the experiments, up to 99.9% water vapor was measured in the furnace.

Another important issue that was evaluated was how the final steel product is affected by the new furnace atmosphere, therefore pilot trials were made with hydrogen oxyfuel reheating of SMT's materials, including oxide scale losses, product yield and decarburization. Another critical issue was whether hydrogen combustion contributes to hydrogen embrittlement, which is devastating for steel products. Tests and evaluations showed that the difference was marginal.

The initial tests at Linde were very promising but were for a very limited number of steel alloys, reheating cycles, etc. Hydrogen-oxyfuel reheating on an industrial scale may have a greater impact on the product quality of other materials or other adverse effects such as increased furnace wear and unwanted condensation in the furnace. In the new furnace concept, it is intended to use flue gas condensation to facilitate the recovery of residual energy. In this feasibility study, the project team assessed the possibility of applying flue gas condensation in SMT's pit furnaces.

The pit furnaces were chosen as the basis for assessing how an application for industry can be made. The pit furnaces already have many advantages for being the site of an industrial demo plant. For example, they are already fired using oxyfuel combustion, the furnaces are well sealed and the use of one pit furnace would have a suitable size for industrial tests. Hydrogen oxyfuel combustion could be tested in one of the furnaces while a condensing unit can be sized to handle all the exhaust gases from the four pit furnaces. There is a suitable place for the condenser at the exhaust duct from the pit furnaces.

The greatest difficulty at present is the very limited supply of hydrogen. The cost of reheating steel with hydrogen is considerably higher than the cost of reheating with natural gas or propane today, which leads to a higher cost for production, but the technology may provide a marketing advantage to sell steel products made with fossil-free reheating and processing.

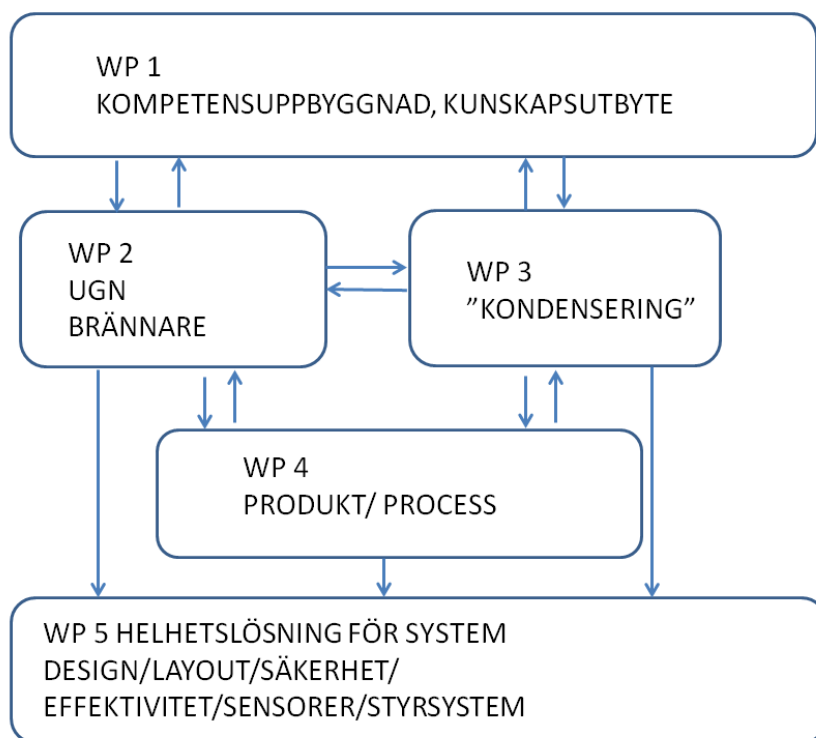
## Inledning/Bakgrund

Värminsgugnar i stålindustrin värms vanligtvis med fossila bränslen som naturgas, gasol och olja, vilket bidrar till utsläpp av CO<sub>2</sub> och NO<sub>x</sub> (samt SO<sub>2</sub> om med svavelhaltiga bränslen). Sverige har som målsättning att bli ett av världens första fossilfria länder. För att uppnå detta måste företag drastiskt minska sina utsläpp av växthusgaser. Stålindustrins värminsgugnar står för en stor del av utsläppen. Projektets utmaning är att medverka till en övergång till fossilfri förbränning i stålindustrins värminsgugnar. Värminsgugnarna står för en mycket stor del av stålindustrins utsläpp. Genomförbarhetsstudien har fokuserat på att utreda möjligheten att övergå till en fossilfri vätgas/oxyfuelförbränning med vattenånga som restprodukt.

Frågeställningarna vid projektet start har varit om det är praktiskt möjligt att elda vätgas/oxyfuel i en omvärmningsugn, med vattenånga i atmosfären. Hur fungerar ugnsstyrningen, hur påverkas värminscykeln och produkten av ångatmosfären. Ta reda på vilka problem och möjligheter som finns och också utreda hur en praktisk lösning för industrin skulle kunna se ut.

## Genomförande

Projektet har genomförts i 5 arbetspaket som täcker arbete både övergripande lösningar och detaljlösningar (se Figur 1). Parterna har olika bakgrund vilket bidragit till ett stimulerande kunskapsutbyte vilket gynnat projektarbetet.



Figur 1. Projektets struktur

Arbetspaketen har anpassats för att täcka berörda kunskapsområden och naturliga samarbeten. Samordningsvinster finns genom att samordna styrning av ugn och

kondenseringsenhet. Ugnsstyrningen och kondensorkapaciteten måste följa produktion och processkrav.

Rådgivande funktionstester av förbränning med vätgas/oxyfuel i pilotskala hos Linde gav mycket goda resultat vilket gjorde att projektgruppen valt att fokusera arbetet på att utveckla tekniken för industriimplementering. En passande applikation är värmning av göt innan valsning i SMT:s gropugnar i Sandviken.

Metoder som har använts i genomförbarhetsstudien är kunskapsutbyte, fysiska möten, presentationer och diskussioner. I projektet har det utförts praktiska tester i en pilotugn hos Linde, och utvärdering av prover i mikroskop och vid mekanisk test hos SMT. Radscan har i samarbete med SMT och Linde dimensionerat och konstruerat en anläggning för avgaskondensering. Enheten har ritats på en ritning över ugnshallen. Linde har skissat på styrsystemombyggnation och layout för helhetslösningen.

Projektarbetet utmynnat i en skiss till helhetslösning i enighet med projektets målsättning. Då resultaten varit positiva har projektgruppen kunnat skissa på planer för ett möjligt fortsättningsprojekt i form av en industridemo hos SMT.

Konsortiet omfattar aktörer, experter från verksamheten som täcker in det berörda verksamhetsområdet.

Tabell 1. Projektets parter

Partners	Organisationsnummer	Projektdeltagare
Swerim	556585-4725	Annika Nilsson John Niska Andreas Johnsson
AGA Gas Aktiebolag (nu Linde gas AB)	556069-8119	Ola Ritzen Thomas Ekman
Aktiebolaget Sandvik Materials Technology	556234-6832	Ebrahim Moosavi Fredrik Bjurbo Therese Mauritzon
RADSCAN Aktiebolag	556234-5214	Helena Roos Jonas Bergman Emma Nynäs

Swerim har lång erfarenhet från forsknings och utvecklingsprojekt inom metallforskning där nya tekniker och koncept testats och utvecklats i samarbete med industripartners ute i industrin eller i pilotskala i SWERIM:s egna pilothallar. Linde har en central roll som förbrännings och ugnsexpert. De hanterar förbränningsteknik, styrsystem och mätteknik men är dessutom både gasproducent /distributör. Sandvik använder redan vätgas i sin ståltillverkning och har en vätgaspipeline från Lindes elektrolysör till Sandviks industriområde. Sandvik behärskar alla delsteg i processkedjan från råvara via produktion till färdig kvalitetsprodukt vilket täcker ugn- och produktionsaspekter men också de effektivitets- och säkerhetskrav som ställs i industriell skala. Radscan har unik kunskap gällande rökgaskondensering som behövs för att nå en fungerande lösning i detta nya koncept. Helt nytt är målsättningen att ersätta skorstenen med rökgaskondensering och vattenrening.

## Resultat

De olika arbetspaketen har olika fokus och projektets medlemmar har bidragit med viktiga resultat till projektet.

I industrin används redan oxyfuelförbränning (förbränning med tillförsel av syrgas som oxidant) i stor utsträckning. Detta innebär att man förbränner en blandning av bränsle och syrgas. Vanligast är att man använder flamlös förbränning vilket innebär att ugnsgasens ”flamma” fyller stor del av ugnsutrymmet, dvs. bränslet förbränns samtidigt i hela ugnskammaren. I dagsläget är det vanligt att använda oxyfuel tillsammans med naturgas (LNG) och propan (LPG) som bränsle i värmningsugnar. Tillgången på LNG och LPG på marknaden är god, gasen levereras med lastbilar, tåg och båt till konsumenterna.

## WP 1 KUNSKAPSUPPBYGGNAD

För att studera inverkan av vätgas har försök genomförts i en värmningsugn hos LINDE i Stockholm. Flera stålproducenter skickade provbitar till LINDE för värmningsförsöken med målet att studera om materialegenskaperna och glödskalbildningen ändras med konvertering av värmningsugnar till vätgas som bränsle.

Värmningarna baserades på eldning i tre olika tillfällen med olika bränsle, första gången med vätgas oxyfuel, andra gången med LPG (95% propan och 5% Butan) oxyfuel och tredje gång med naturgas (90–95 % metan) oxyfuel. Energivärdet och andra egenskaper för dessa som rena gaser finns i Tabell 1. Vätagas har mer energi per kilo bränsle men mindre energi per Nm<sup>3</sup>. Vätagas och andra bränslepriser följer energipriset, så man kan förvänta sig att ett kg vätagas är dyrare än ett kg gasol eller naturgas. En termodynamisk analys av vätagas och metan med oxyfuel eldning finns i bilaga 2. En värmebalans visas att vätagas är jämförbar med metan som bränsle.

Tabell 1. En jämförelse av egenskaper av vätagas med olika fossila bränsle

<i>Different sources provide slightly different values and use different reference points, e.g. 0°C, 15°C or 21.1°C. These are selected (and sometimes) average values for comparative purposes only!</i>	Hydrogen (H <sub>2</sub> )	Methane	Propane	n-Butane
(Some) Hazards	<i>combustible</i>	<i>greenhouse</i>	<i>greenhouse</i>	<i>greenhouse</i>
Molecular Weight (g/mol)	2,0158	16,04	44,1	58,12
Density (kg/Nm <sup>3</sup> )	0,0899	0,7175	2,0098	2,709
Speed of Sound (m/s)	1290	466	250	
Specific Heat Capacity cp (kJ/(kg.°C))	14,3	2,232	1,696	1,734
Auto Ignition Temperature in Air (°C)	572	632	493	405
Auto Ignition Temperature in Oxygen (°C)	560	556	468	283
Theoretical Volume Oxygen Required for Combustion (Nm <sup>3</sup> O <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> fuel)	0,5	2	5	6,5
Theoretical Volume Air Required for Combustion (Nm <sup>3</sup> air/Nm <sup>3</sup> fuel)	2,4	9,6	23,9	31,1
Adiabatic Flame Temperature with Air (°C)	2125	1942	2007	2020
Adiabatic Flame Temperature with Oxygen (°C)	2894	2710	2744	2751
Lower Heating Value (kJ/Nm <sup>3</sup> )	10758	35874	93680	123738
Lower Heating Value (kWh/Nm <sup>3</sup> )	2,99	9,97	26,02	34,37
Lower Heating Value (kWh/kg)	33,24	13,89	12,95	12,69
Specific Oxygen Demand (Nm <sup>3</sup> O <sub>2</sub> / kWh)	0,17	0,20	0,19	0,19
Flue Gas Volume for <b>Oxyfuel Combustion</b> (Nm <sup>3</sup> /kWh)	0,336	0,300	0,267	0,263
Upper Flammability Limit in Air (vol%)	4	5	2,1	1,8
Lower Flammability Limit in Air (vol%)	74,2	15	13,8	8,4
Upper Flammability Limit in Oxygen (vol%)	4,7	5	2,3	1,8
Lower Flammability Limit in Oxygen (vol%)	93,3	61	55	49
Flame Propagation Velocity in Air (m/s)	2,83	0,45	0,46	0,4
Flame Propagation Velocity in Oxygen (m/s)	11,7	4,5	3,72	3,55

Kunskapsutbyte inom projektet inkluderade två fysiska möten och flera internetmöten via Teams. De fysiska mötena och kunskapsutbytet har främjat samarbetet och gjort det möjligt att komma i mål med projektet.

Tillgången på vätgas som bränsle är i dagsläget mycket begränsad. Processen för att framställa fossilfri vätgas med elektrolys är investeringstung och kräver tillgång på billig elkraft. För att processen ska ha låg klimatpåverkan är det viktigt att elen som används är förnyelsebar (framställts t.ex. vind och vattenkraft). Allt detta ger en stor investeringskostnad för att byta ifrån fossila bränsle till vätgas.

En annan svaghet är att vätgasen är svår att lagra pga den behöver stor lagringsvolym som lågtrycks gas (som tex kokgas och masugnsgas i gasklockor). Det är vanligast att lagra vätgas i komprimerad form, vid 200–700 bar, eller i flytande form efter stor investering. SANDVIK har dock en pipeline som transporterar vätgas från Lindes anläggning till Sandvik. Vätgasen som produceras kan användas för industriella syften men också för att tanka de få vätgasdrivna fordon som finns i området.

## **WP 2 Utveckling av ugnskoncept**

En designlösning för en "H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>"-ugn där vätgas och syrgas förbränns med restprodukten varmt vatten kräver förändringar jämfört med en traditionell värmningsugn. Här finns en lista av några förändringar:

Skorsten utgår – kondenseringsenhet tillkommer med ventil och mindre kanal för restgaser

Brännarteknik – ingen större skillnad när oxyfuel eldning redan finns

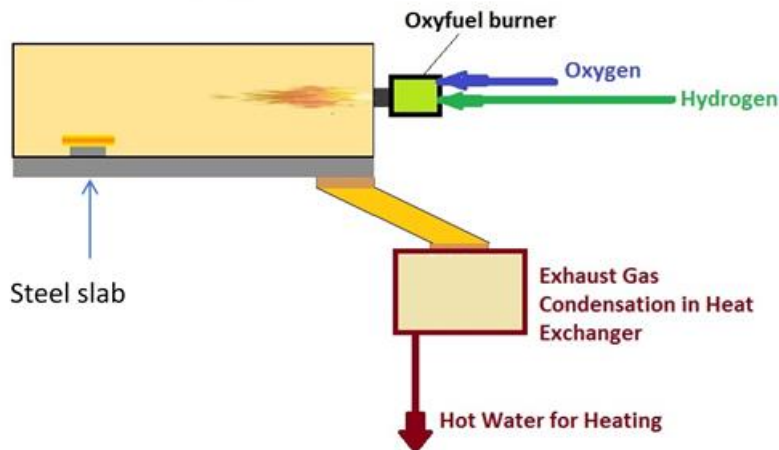
Ugnsatmosfär – ingen större skillnad i värmeöverföring när oxyfuel eldning redan finns, men vätgas ger inga risker för CO bildning under förbränning

Ugnstäthet – Hög täthet är bra för att minska värmeförluster och NO<sub>x</sub>-bildning

### **Skorsten utgår – kondenseringsenhet tillkommer**

Med denna förbränningsreaktion är restprodukten het vattenånga vilket gör att skorstenen kan utslutas/minskas. Ugnen utrustas istället med en kondenseringsenhet som kan rena och tillvarata restenergin i den heta vattenångan. Kondenseringsenhetens konstruktion anpassas till olika ugnar och kapacitet. Grundtekniken för kondensering och värmeväxling av vatten och gaser är långt utvecklad och används i många industritillämpningar inom olika industrier t.ex. kemi, trä, metall, värmeteknik etc. Den specifika lösningen för olika typer av värmningsugnar finns inte i dagsläget men existerande komponenter och beräkningsmodeller kan anpassas för tillämpningen för värmningsugnar där dimensionering och layouten behöver anpassas till valsverksmiljön. En enkel skiss av hur man kan bygga systemet finns i Figur 2.





Figur 2. Skiss på ugnskomponenterna

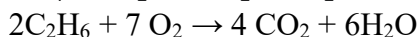
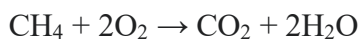
### Brännarteknik - ingen större skillnad när oxyfuel eldning redan finns

Vätgas har använts tidigare som energikälla i värmningsugnar (t.ex. hos Celsa, Mo-i-Rana) och kan även ingå till upp till 50% i andra bränslen som koksgas. Tester har visat att etablerade brännarkonstruktioner fungerar även för vätgasförbränning men kraven på tätet för ett vätgassystem är högre eftersom vätgasmolekylen är betydligt mindre än de gaser som normalt används. Tätningar och materialval måste beaktas vid konstruktion av brännarsystemet. För att optimera förbränningens effektivitet kan det vara intressant att titta på speciella brännarlösningar för vätgas/oxyfuel applikationer men tekniken för förbränning av vätgas som energikälla följer samma principer som förbränning av t.ex. naturgas. Linde har dock utvecklat en specialanpassad brännare för vätgas.

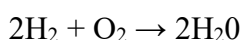
### Ugnsatmosfär - betydande förändring

I dagens värmningsugnar sker ofta förbränningen av gaser i luft. Vid luftförbränning (luft har ca. 78% N<sub>2</sub>, 21 % O<sub>2</sub> och 1% Ar) kan ge stora utsläpp av CO<sub>2</sub> vilka är en växthusgas och mindre mängder av kväveoxider NO<sub>x</sub> och kolmonoxid CO som är giftiga för människan och kan också bidra till växthuseffekten.

Förbränningsreaktioner vid förbränning av naturgas (metan/CH<sub>4</sub> och etan/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)

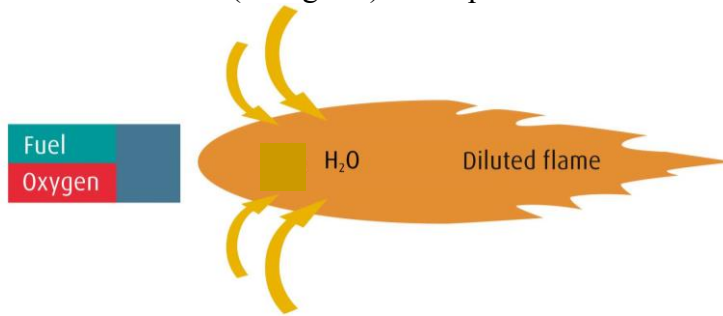


Förbränningsreaktion av vätgas med nya konceptet



Förbränning av vätgas med syre (oxyfuel eldning) kan ge höga halter av NO<sub>x</sub> om det finns kväve (pga inläckande luft). Lösningen för att minska NO<sub>x</sub> är att använda flamlös förbränning dvs när bränsle och syre blandas i ugnen istället för i brännaren och

en tät ugn. De bildade rökgaserna har endast vattenånga samt enstaka % syrgas under idealiska förhållande (se Figur 3) men i praktiken bildas en viss del NO<sub>x</sub> också.



Figur 3. Flamlös Oxyfuelförbränning, exempel med vätgas som bränsle

Linde har genom tester kunnat visa att vätgas oxyfuel eldning i den fossilfria ugnen fungerar vid en testkampanj. I försöken uppmättes upp till 99.9% vattenånga som restprodukt i pilotugnen hos Linde med en traditionella oxyfuelbrännare.

Avgasmängden i den vätgas oxyfuel eldade ugnen utgör en mindre volym än avgaserna vid luftförbränning. Avgaserna bör teoretiskt bör bestå av ren vattenånga ifall inga föroreningar av läckluft och föroreningar från stålprodukterna utfälls. För att kunna mäta avgassammansättningen (ångmängd samt eventuella utsläpp i en skorsten/ventil) behöver en referensgas tillsättas. I Lindes försök användes koldioxid (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) för detta ändamål.

Bedömningen är att vätgas/oxyfuel (H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>) redan idag kan användas i många ugnar i industrin, även i ugnar som inte har hög täthet. Förutsättningen för att nå en effektiv/fossilfri (H<sub>2</sub>+ O<sub>2</sub>) förbränning skiljer sig dock mellan olika ugnar.

Det finns många ugnstyper i stålindustrin. Ugnstätheten är en viktig faktor för att undvika utsläpp av kväveoxider (NO<sub>x</sub>). Vanlig luft består av 78% kväve N<sub>2</sub> och ett luftinsläpp i ugnen ger ett utsläpp av kväveoxider i avgaserna och ökade rökgasförluster.

Satsugnar där man värmer enstaka ämnen eller ämnen i grupp är generellt tätare än kontinuerliga ugnar där ämnen kontinuerligt fylls på, stegas fram och plockas ut genom stora luckor. Ugnarnas väggar, tak och botten har dessutom ofta hål för mätutrustning och inspektioner där luft kan läcka in.

Ett mindre problem som kan tänkas uppstå är att vattenånga kondenserar på kalla områden i ugnar vilket på lång sikt kan öka slitaget på infodringen. Problematiska ställen kan behöva byggas bort. Vid testerna hos Linde syntes ingen tendens till kondensering i den pilotkammargugn som användes vid testerna.

Vätgasen till Sandvik tillverkas m.h.a. elektrolys av vatten av Linde i en vätgasfabrik som redan finns i Sandviken. Elen som används i elektrolysören är grön el från förnybara källor. Vätgas transporteras via rörledning till Sandviks industriområde där den idag används framförallt i värmebehandlingsugnar av SMT. Linde Gas AB har

tillsammans med bl.a. SMT genomfört pilotskalademonstrationer med värmning av stålprover med vätgas som bränsle i Lindes pilothall i Älvsjö (se Figur 4). Resultaten visar att det går att värma stål med vätgas-syrgasförbränning utan negativ påverkan på stålet. Resultaten för Sandviks stålsorter redovisas senare i rapporten.



**Figur 4. Vätgas-oxyfuel värmning av stålprovbitar hos Linde**

En demoanläggning skulle var möjligt i gropugn 58 hos SMT. Ugnen består av fyra stycken celler som chargerats med göt eller blooms från stålverket. Ämnena värms till önskad temperatur (~1150-1300 °C) före varmvalsning (se Figur 5).



**Figur 5. Gropugn 58 hos Sandvik**

Förbränningssystemet idag används naturgas som transporteras till Sandviken som LNG och eldas med syrgas som oxidant. Varje gropugnscell har 2 st, 600 kW oxyfuel brännare. För att elda med samma effekt (kW) med vätgas istället för LNG eller gasol krävs ett betydligt högre gasvolymflöde men lägre massflöde. Skillnaden i egenskaper

visas i tabell 1. För att elda en cell med max. 1200 kW (2\*600 kW) behövs för vätgas ca 400 Nm<sup>3</sup>/h (~3 kWh/Nm<sup>3</sup>\*400) jämfört med naturgas ca 120 Nm<sup>3</sup>/h (10 kWh/Nm<sup>3</sup>\*120). Vätgas har dock betydligt lägre tryckfall och kan levereras vid ett högre tryck. Beräkningar visar att vätgas kan användas i samma förbränningsystem i de flesta fall. Trycket kan behövas ökas något och justeringar krävs på kalibrering av flödesmätare, ventiler samt parametrar i styrsystemet.

I fallet med SMT:s ugn 58 som är relativt nytt och uppfyller gällande normer krävs:

- inkoppling av vätgas till flödesreglersträckorna
  - marginell tryckökning av bränslet och justering av tryckregulatorn samt avsäkring
  - kalibrering av flödesmätare och ventiler
  - parametrering i styrsystemet för nya flödet och kvotreglering
  - byte av bränslelansarna i brännarna om samma hastighet önskas
- P&ID för Ugn 58 med vätgas som har tagits fram i projektet

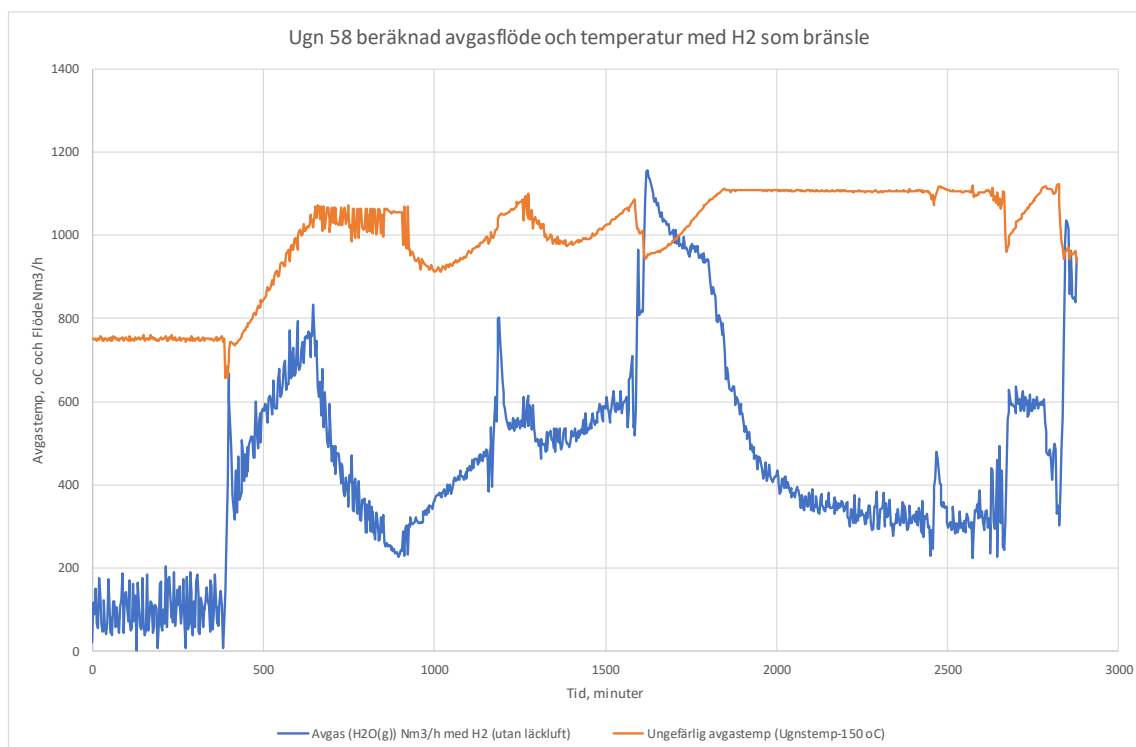
### Dimensioneringsunderlag för rökgaskondensor Ugn 58

Gropugnsprocessen är en satsprocess där ämnen chargerats individuellt i varje cell. Efter chargering vädras cellen med fläktluft (om temperaturen fallit under 750 °C) för att säkerställa att inga brännbara gaser finns i ugnen. Därefter tänds brännarna och eldas med hög effekt tills måltemperaturen uppnås. Måltemperaturen bibehålls under ett antal timmar för att uppnå jämn temperatur i ämnet. Då ämnet blir varmare krävs mindre energi för att bibehålla önskad temperatur. Ett exempel på en värmningskurva visas i Figur 6 nedan.



Figur 6. Värmningskurva för stålämnen

Baserat på flödesdata från samtliga fyra celler och omräknat till vätgas som bränsle är ett troligt avgasflöde och temperatur i gemensamma kanalen enligt Figur 7. Radscan har använt dessa data för dimensionering av rökgaskondensorn till ugn 58, redovisas i separat rapport 9999913 från Radscan.



Figur 7. Beräknad avgasflöde för ugn 58

### Placering av rökgaskondensorn

Baserat på förslag från RadsScan på rökgaskondensorn finns ett par olika placeringar av denna. Vilken placering som är lämpligast m.a.p. plats, höjd och kringliggande utrustning behöver studeras/diskuteras på plats. Två alternative placeringar beskrivs i Bilaga 3.

## WP 3 KONDENSERINGSENHET

Rökgaskondensering är en metod för att utvinna värmeenergi ur rökgaser från förbränning. Beroende på vilket bränsle som används så innehåller rökgaser alltid en viss mängd vattenånga och genom att kyla ner rökgaserna under vattenångans daggpunkt får man ångan att kondensera, varvid ångbildningsvärmenergin frigörs. Värmen kan tas omhand och exempelvis tillföras ett värmenät. Den återvunna värmen från anläggningen beror av bränsle, fukthalt i bränslet, returtemperatur, luftfaktor mm. Förutom att värmen tas tillvara genom rökgaskondensering så tvättas även rökgasen från stoft och orenheter.

Rökgasen från grop omvärmningsugnar hos SMT har en temperatur på omkring 1200°C. På grund av rökgasens höga temperatur så skulle rökgaskondenseringssystemet i detta fall bestå av två separata kylare, först en rökgaskylare, följt av en rökgaskondensorn. Den första kylaren har som uppgift att sänka temperaturen på rökgasen före rökgasen leds in i den andra kylaren, rökgaskondensorn. Som kylmedia används närvärmevatten som först leds via rökgaskondensorn och sedan leds vidare till rökgaskylaren. Genom att använda närvärmevattnet kan den värmeenergi som finns



bunden i rökgasen tas ta tillvara. Processen i de olika stegen beskrivs i närmare detalj nedan.

### ***Rökgaskylare***

I det första steg kyls den heta rökgasen ner i en rökgaskylare. Kylningen behövs för att kyla ner rökgasen innan den leds in i rökgaskondensorn, eftersom den heta rökgasen har en temperatur som är alldeles för hög för kondenseringen. Rökgasen leds in i botten på kylaren. Inuti kylaren finns vertikala rör för rökgasen, med kylvatten som passerar utanför rören. Det blir inga problem med korrosion i kylaren eftersom rökgasen inte kommer att kylas så mycket så att temperaturen på rökgasen sjunker under daggpunkten.

### ***Rökgaskondensor***

Den andra kylaren i systemet är själva rökgaskondensorn. Kondensorn är en tubvärmväxlare med gaserna invändigt vertikala tuber och kylvattnet utvändigt tuberna. Rökgasen leds in i toppen på kylaren, med vertikal anströmning uppifrån och ned och vattnet leds tvärströms gasen i ett flertal pass. Materialet i tuberna är ett syrafast stål som väl motsvarar de korrosionskrav som bränslets rökgaser ställer.

### ***Rökgaskondensatet***

Kondensatet som bildas i rökgaskondensor samlas upp i en kondensattank under kondensorn. En del av kondensatet används för att spola rökgaskondensorn. Spolvattnet pumpas upp från kondensattanken, leds till en dysa i toppen av kondensorn och sprejas över den. Inne i kondensorn hålls tuberna rena genom att spolvatten och nybildat kondensat blandas med gasen under kraftig turbulens.

Kondensatet kommer att innehålla partiklar och andra orenheter som fanns i rökgasen, så kondensatet som lämnar kondensattanken förs vidare till vattenrening. I detta fall skulle kondensatvattnet ledas vidare till Sandviks egna vattenreningsanläggningar för behandling.

### ***Vattenanalys***

Provet togs 2020-01-30 lämnades in till Synlab i Linköping 2020-02-06, och resultat av vattenanalys beskrivs i Tabell 2.

Provförfarande:

1. Provet har tagits i den gemensamma avgaskanalen från samtliga celler, dvs alla celler i gropugn 58.
2. Provet har sugits ut, passerat en kyld glaskolonn, kyld till ca 5°C. Från kolonnen har provet pumpats med en slangpump.
3. Då provet var i gasfas och vätskefas på väg till provbehållaren så har det kommit i kontakt med slangar av PTFE-typ.
4. Provet har inte passerat något filter eller någon pump (förutom slang pumpen), men det kan finnas spår av tidigare provtagning i utrustningen.

Tabell 2. Analys på kondensat vatten

Parameter	Enhet	Resultat	Mätosäkerhet
Partiklar	mg/l	12	±1,8
Arsenik, As	µg/l	14	±2,1
Bly, Pb	µg/l	21	±3,2
Kadmium, Cd	µg/l	0,13	±0,030
Kobolt, Co	µg/l	2	±0,30
Koppar, Cu	µg/l	170	±26
Krom, Cr	µg/l	1600	±240
Nickel, Ni	µg/l	160	±24
Vanadin, V	µg/l	16	±3,2
Zink, Zn	µg/l	200	±30
Klorid, Cl	mg/l	1,1	±0,90
Fluorid, F	mg/l	190	±29
Svavel, S	mg/l	2,4	±0,36

Mätningarna och analysen har följande kommentarer medskickade:

- \* ”Mätosäkerheten för kadmium är högre än angivet på grund av störningar från molybden”
- \* ”Metallhalterna kommer att variera kraftigt beroende på materialet som omvärms.”

Kondensatanalysen ger en föraning om hur gasen ser ut. Med antagande av hur mycket av föroreningarna som avskiljs vid kondenseringen kan gasens sammansättning beräknas och medför följande kommentarer och åtgärder:

1. Gasen kommer att innehålla en hel del tunga partiklar vilka kan ansamlas på kylarens övre gavel.
  - Kylaren bor spolat kontinuerligt med fullkonsdysor för att hålla den övre gaveln ren från partiklar
2. Metallerna har halter liknande som vid kondensering av rökgaser från förbränning av returträ, även om kromhalten är extremt hög i detta fall.
  - Föranleder ingen åtgärd
3. De sura föroreningarna klorid och svavel som bildar molekylerna HCl och SO<sub>2</sub> vid förbränning analyseras till låga halter jämfört med vad som är normalt med fastbränsleeldning.
  - Föranleder ingen åtgärd.
4. Fluorid som bildar den sura molekylen HF vid förbränning analyseras till väldigt hög halt. Vid dessa halter är fluoriden förödande för stål, även för höglegerade syrafasta stål.
  - Halten HF gör att ett nickelbaserat material behöver användas i kondensorn.
  - Halten HF påverkar styrningen av kylvattnet genom kylaren. HF halten är så hög att dess dagpunkt är ca 150°C. Detta betyder att kylaren måste styras så att gasen är med god marginal högre än 150°C. Vid idrifttagning är det också viktigt att HF mäts så att dagpunkten kan verifieras.

### **Närvarmevatten**

Vid en rökgaskondensering så återvinns värmen i närvarmenätet. I denna anläggning så kommer närvarmevattnet att kyla rökgasen i två steg. Närvarmevattnet går motströms i jämförelse med rökgasen, det vill säga, returvattnet leds först in i rökgaskondensorn innan det leds vidare genom rökgaskylaren och vidare till närvarmenätet.

Vid kylning av rökgasen med returvattnet erhålls värmning av vattnet från i princip två skilda mekanismer. Det första är sänkningen av gasens temperatur. Sänkning av gasens temperatur frigör sensibelt värme. Den andra mekanismen är att vid temperatursänkningen kondenseras vattenångan till vatten under frigöring av ångbildningsvärmens som också höjer returvattentemperaturen. Ångbildningsvärmens är större än den sensibla värmens. Värmeuttaget kan regleras genom att reglera flödet på närvärmevattnet. Vid ett lägre vattenflöde minskar även nedkylningen av rökgasen.

#### *Återcirkulation av närvärmevatten*

Det är viktigt att säkerställa att rökgasens temperatur i rökgaskylaren kondensorn inte sjunker under syra-daggpunkten. Rökgasflödet som leds genom kylarna varierar beroende på hur många ugnar som körs samtidigt. Vid lägre rökgasflöde behövs en mindre mängd närvärmevatten med en högre temperatur för att få en lämplig temperatur utgående rökgasen ur rökgaskylaren. För att höja temperaturen på närvärmevattnet som leds in i kylaren återcirkuleras en del av närvärmevattnet och blandas med det vatten som kommer från kondensorn.

Närvärmevattnets utgående temperatur från kylaren bör ligga runt 115°C för att kunna ledas direkt till framledningen. Det är också viktigt att närvärmevattnet inte blir för hett och börjar koka. För att minimera risken för kokning kan gasflödet som leds genom växlarna regleras med inkommande spjäll eller rökgasfläkten.

En rökgaskondenseringsenhet har konstruerats och dimensionerats för SMT:s gropugnar. Enheten klarar rökgaserna från 4 ugnar och kan ta vara på restvärmens.

Problemet med höga halter fluorid (F), som kan existera som korrosiv HF (fluorvätesyra) kan ge säkerhetsrisker för underhållspersonal och kräva speciella material i anläggningen (tex nickelbaserade legeringar i värmeväxlare och glasfiber kondensvattenledningar). Tekniker som t.ex. neutralisering med släckt kalk för att binda fluorider skulle minska risker och behovet av speciella ledningar till SMT:s vattenreningsverk.

#### **WP 4 INVERKAN PÅ PRODUKT/PROCESS**

Provbitar från tre olika stränggjutna stålsorter skickades till LINDE. De ingående stålsorterna var Cr-stål, kolstål och Duplex. Provstorleken var ca 260x180x70 mm. Värmningstemperatur och hålltiden är enligt nedan med de tre olika energikällor, H<sub>2</sub>-Gas, Naturgas samt LPG gas. Anledningen för 3 timmars hålltid för Cr-stålet är att SMT har en hålltid för Cr-stålet i produktion.

Stålsort Duplex, värmningstemperatur 1200 °C och hålltid 1 timme  
Stålsort kolstål, värmningstemperatur 1200 °C och hålltid 1 timme  
Stålsort Kromstål, värmningstemperatur 1200 °C och hålltid 3 timme

Ovanstående försök genererade nio olika prover för undersökning. De undersökningarna var enligt nedan.



Glödskalanalys  
Mikrostrukturundersökning  
Slagseghetsprovning

### Glödskalvikter

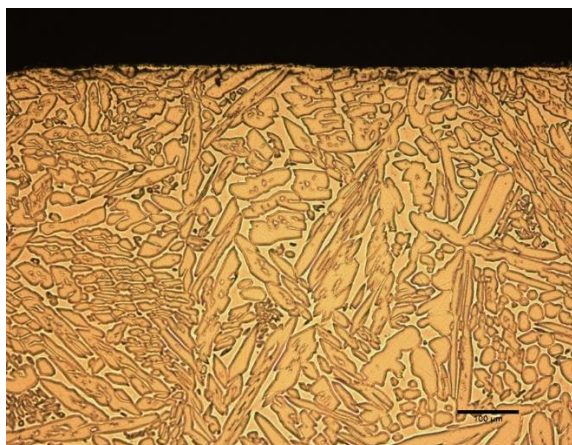
Efter värmningsförsöken överlämnades nio kutsar från LINDE till SMT. De rapporterade vikterna för prover och glödskal är enligt Tabell 3. Proverna från stålsort 4HS64 och 13C26 hade en påse innehållande löst glödskal som hade skrapats (lossnats) från proverna men en del glödskal satt fast på proverna. Från Duplex stålsorten hade det inte lossnat några glödskala bitar. Det glödskal som täckte proverna hade mycket tunn tjocklek.

Tabell 3. Redovisning av prov- och glödskalvikt samt beräknad andel glödskalbildning i %.

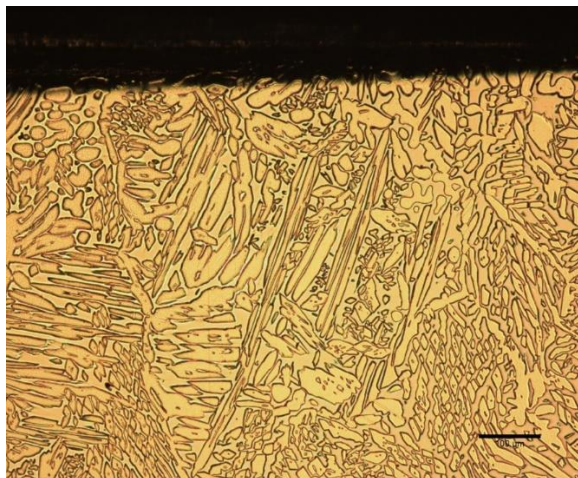
Löst glödskalvikt per prov (gram)				Prov vikter (gram)			Glödskal % per 100 gram stål		
Stålsort	Naturgas	LPG	Vätgas	Naturgas	LPG	Vätgas	Naturgas	LPG	Vätgas
Duplex	0	0	0	19783	23966	23722	0.00	0.00	0.00
Kolstål	164	336	93	14511	25445	24021	1.13	1.32	0.39
Cr-stål	1058	1141	1394	19355	26252	30514	5.47	4.35	4.57

Duplex stålsorten hade det minsta glödskalbildningen, dvs nästan inget. Kolstålet tar andra platsen mellan de tre stålsorterna och Cr-stålet bildar mest glödskal. En orsak är att Cr-stålet hade tre gånger längre hålltid än kolstålet. Bortsett från hålltiden bildar Cr-stålet ändå mest glödskal jämfört med de andra två. Den viktiga slutsatsen är att kolstålet bildar minst glödskal med vätgaseldning enligt ovanstående försöken. Figur 8 och 9 visar att mikrostrukturen för duplex stålet var väldigt lika med LPG eller vätgas med värmning vid 1200°C för 1 hr.

Figur 8.  
Mikrostruktur  
Nära ytan  
Stålsort Duplex  
Värmning med H<sub>2</sub>  
Temp. 1200 °C  
Hålltid 1 timme  
X100



Figur 9.  
Mikrostruktur  
Nära ytan  
Stålsort Duplex  
Värmning med LPG  
Temp. 1200 °C  
Hålltid 1 timme  
X100



### **Kemisk analys av Glödskal**

Glödskal lämnades till labbet för kemisk analys. Det fanns inget glödskalpulver för kemisk analys från Duplex stålsorten. Som nämnts tidigare fanns det bara ett tunt fast oxidskikt på ytan av proverna.

Halten av vissa ämnen i glödskalanalysen stämmer inte med chargeanalysen på grund av anrikning och förångning av olika ämnen samt syrets intrång i oxiden som påverkar procenthalten. Gjutpulvret har också en del inverkan på glödskalet.

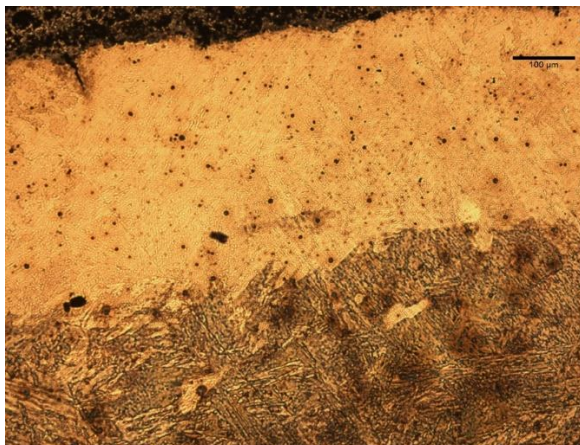
### **Glödskalanalys med SEM**

Prover som hade glödskal på ytan lämnades in för SEM-analys både för ingående ämnen samt olika oxidhalter i glödskalet. Här måste nämnas igen att gjutpulvret har inverkan på glödskalanalysen.

### **Mikrostruktur analys i LOM**

Mikrostrukturen nära ytan under glödskalet undersöktes för att se eventuell avkolning eller utskiljningar i materialet. Undersökningen visar ingen större skillnad mellan mikrostrukturen inom samma stålsort. Mikrostrukturen för kolstålet visas i Figur 10. Kolstålet visade ca 300 µm avkolning på ytan. Det kan bero på syreöverskott som har funnits i ugnen på grund av att brännarna går på både vätgas och syrgas. Avkolning hos kolstål förekommer också i samma utsträckning i naturgas och LPG eldade ugnar.

Figur 10.  
 Mikrostruktur  
 Nära ytan  
 Kolstål  
 Värmning med H<sub>2</sub>  
 Temp. 1200 °C  
 Hålltid 1 timme  
 Avkolning nära ytan, djup  
 300 µm  
 X100



### Slagseghetsundersökning

Prover för slagseghetsprovning togs från alla nio kombinationerna. Provingen genomfördes i rumstemperatur. Slagsegheten inom stålsorterna försämrades inte på grund av eldning med vätgas, se Tabell 4. Undersökning av slagseghet visar ingen skillnad mellan de tre värmningsmetoderna dvs ingen effekt av väteförsprödning kunde bevisas.

Tabell 4. Slagseghet vid rumstemperatur

<b>Slagseghet vid rumstemperatur (J)</b>			
<b>Stålsort</b>	<b>H2 gas</b>	<b>Naturgas</b>	<b>LPG</b>
<b>Kolstål</b>	16	18	14
<b>Cr-stål</b>	4	4	4
<b>Duplex</b>	198	172	155

I sammanfattning, SMT har utvärderat materialprover från Lindes värmningstester (glödskal och sprödhet). Resultaten visade att värmningen med vätgas eldning inte ger några större skillnader jämfört med traditionell värmning.

SMT har tagit fram underlag till Radscan för att de ska kunna dimensionera kondensorn. SMT vill helst ha ut 115°C fjärrvärmvatten vid 13 bars tryck och 65°C retur vatten med styrventil för rätt vattentemperatur.

### WP 5 HELHETSLÖSNING FÖR SYSTEM

Projektarbetet har bedömt att ett fortsättningsprojekt skulle kunna vara ett demoprojekt för Sandviks gropugnar som värmer göt inför varmvalsning (se Figur 11).



Figur 11. Varm göt som skall varmvalsas efter omvärmning

Målsättningen vid förbränningen av vätgas-oxyfuel är att uppnå 100% vattenånga i ugnskammaren vilket skiljer sig från den vanliga sammansättningen av ugnsgaser vid luftförbränning. I dagsläget förekommer en viss mängd ånga i värmningsugnar t.ex. pga. väte som finns i fossila bränsle.

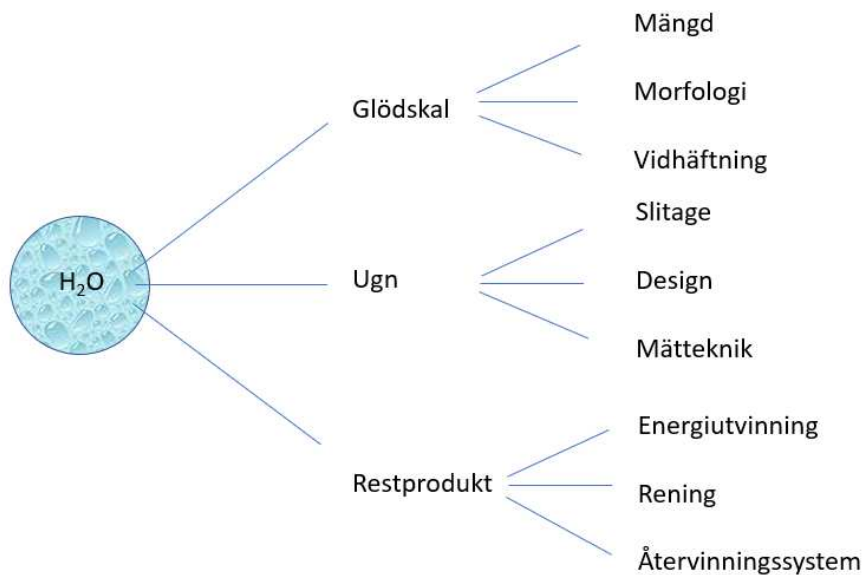
Den nya sammansättningen av ugnsatmosfär förväntas ge risk för:

- Högre oxidation speciellt av låglegerade stål
- Ökat slitage av material

Förväntade korrekationer/ ombyggnader

- Designlösning för att motverka oönskad kondensation
- Köra med mindre syreöverskott för att minimera glödskaalsbildning
- Lösningar för att minimera/eliminera läckluft
- Uppdaterade värmningsmodeller för gasstrålning/ väggstrålning och värmeledning
- Behov av att kontrollera/säkerställa funktion av sensorer

Dessa faktorer sammanställas i Figur 12.



Figur 12. Parametrar som förväntas påverkas med ugnsatmosfär av vattenånga

### Ugnsdesign och ugnstyrning

Ugnstäthet är inte ett bekymmer för själva processen men det är ett bekymmer för miljön. Normalt sker förbränningen av gaser i luftatmosfär (78% N<sub>2</sub>). För att undvika utsläpp av NO<sub>x</sub> är det viktigt att minimera mängden kväve i ugnen.

Vanligtvis förekommer relativt stort inläckage av luft i värmningsugnar i och med att materialet chargerats och lastas ut genom luckor och luftförbränning används. Ugnsluckorna vid chargering av slabs är stora då ämnen lastas in/ut i fullängd på ugnens kortsidor. Ugnsluckor är lika långa som slabsen vilket ger stort luftinläpp. Utöver detta har ugnarna luftläckage genom diverse håligheter för processutrustning som mätutrustning och brännare. Vid chargering av långa produkter (billets, blooms) chargerats ämnen ofta från sidan genom små luckor bara något större än ämnets tvärsnitt placerade på långsidan vilket ger en bättre täthet.

Batchugnar är ofta tätare då flera ämnen chargerats samtidigt i ett relativt tätt utrymme. Detta kortar tiden då ugnen är öppen. Ämnena värms tillsammans och luckan öppnas en gång vid iläggning av ämnena och sedan varje gång ett ämne tas ut. En typ av batchugn som lämpar sig för industriförsök är en gropugn som är vanligt förekommande vid värmning av göt. Gropugnar är håligheter ”gropar” ofta i golvet med ”lock” där man kan chargerats t.ex. 1-6 göt. Gropugnar lämpar sig bra för tester då försök kan utföras med begränsade produktionsstörningar jämfört med andra typer av omvärmningsugnar (se Tabell 5). Ugnstätheten kan förbättras genom nya innovativa lösningar t.ex. användning av slussar eller gasknivar vid chargering av ämnen.

Tabell 5. Uppskattad täthet för olika ugnstyper (2 relativt tät- 5 relativt otät)

UGNSTYP	ÄMNE	Luftläckage	Kommentar
Stegbalksugn	Slabs	5	Stor lucka/otät
Stegbalksugn	Billets/blooms	3	Liten lucka



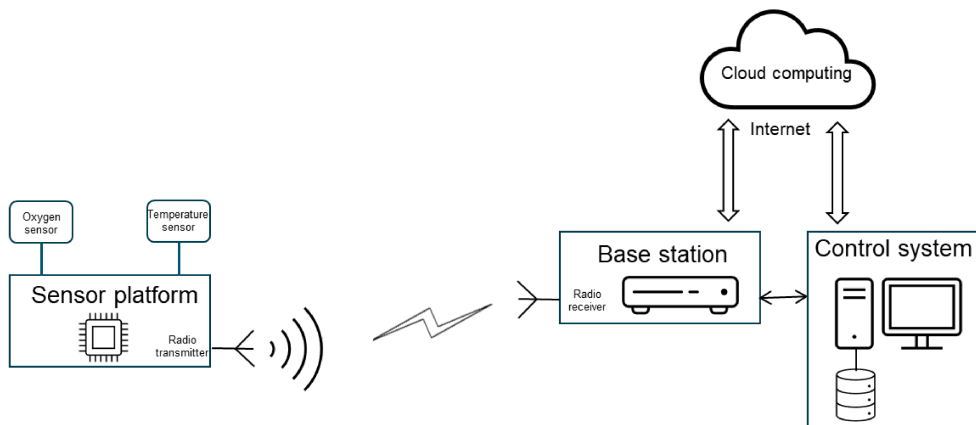
Genomskjutningsugn	Slabs/Billets/Blooms	3-4	Tätare botten
Batchugn: Grop- och kammarugnar	Göt och billets	2	Sluten stor del av värmningscykeln

Styrsystemet vid förbränning av vätgas-oxyfuel förväntas likna redan etablerade system. Vid ugnar med avgaser använder man ofta avgaserna för förvärmning av t.ex. förbränningsluft. Det finns olika typer av sensorer som behövs till ugnsstyrning, t.ex. temperatur sensorer (termoelement), flödes sensorer (strypskivor) och gastrycket sensorer. Visa sensorer är ”on-line” eller för kontinuerligt bruk och andra sensorer användes för kortare kontroll (t.ex. gas analys sensorer).

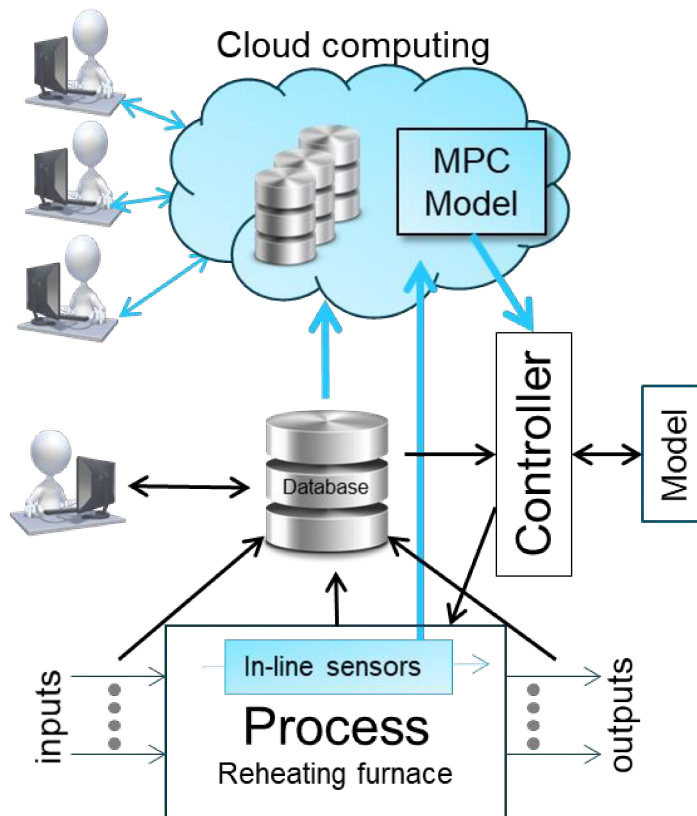
I ugnar finns det möjlighet att använda uppkopplade sensorer i produktionsflödet för online bedömning av processen (temperatur och syre) och samtidigt uppdatera i processkontrollen i realtid. Det är speciellt intressant i ugnstyper där materialet förflyttas i ugnen t.ex. stegbalksugnar där kan det finnas variationer i miljön som inte registreras av konventionella fastmonterade sensorer. Intressant att mäta är temperatur, syre och fuktighet. I Figur 13 visas ett exempel på en avancerad uppkopplad temperatursensor som kommunicerar trådlöst via radiolänk (Wi-Fi) med en basenhet utanför ugnen [1]. Ett framtida alternativ är det nya 5G nätet som erbjuder direkt uppkoppling av sensorer och dataöverföring i real-tid. I Figur 14 visas på en principskiss på hur ett uppkopplat system med en trådlös sensor som uppdaterar styrsystemet i real-tid. Analysen av mätdata kan ske direkt i det lokala styrsystemet eller så finns möjligheten att utnyttja dagens moderna analysverktyg som kallas ”Cloud computing” [2]. I Figur 15 visas en principskiss på ett styrsystem som använder en molnbaserad beräkning- och lagringstjänst tillsammans med ett lokalt styrsystem. Det lokala styrsystemet reglerar ugnen i real-tid enligt inställda parametrar. Samtidigt fås optimerade parameterinställningar från molntjänsten. Molntjänsten använder moderna regleralgoritmer t.ex. Model Predictive Control (MPC) för adaptiv optimering av värmningsprocessen. Uppkopplade sensorer i ugnen skickar mätdata både till den lokala- och molnbaserade servern för optimering av processen. Ugnsoperatören har direkt övervakning av det lokala styrsystemet. Övriga kan logga in på molntjänsten och få en överblick av styrsystemet och dess status. Det bör påpekas att ”Cloud computing” kan också ske lokalt, om företaget i fråga har tillgång till moderna servrar och datorkapacitet.



Figur 13. Till vänster visas ett kretskort för temperaturmätning och trådlös dataöverföring. Storleken på kretskortet är 18x35 mm. Till höger är kretskortet inmonterad i ett keramiskt isoleringsmaterial redo för att användas i ugnen. Systemet utvecklades i projektet DISIRE [1].



Figur 14. Principskiss på hur uppkopplade sensorer kan användas. Sensorn är i kontakt med en basstation via trådlös kommunikation t.ex. Wi-Fi. Basstationen skickar data till antingen till det lokala styrsystemet eller till molnet via internet som efter analys (cloud computing) skickar styrrekommendationer till det lokala styrsystemet.



Figur 15. Principskiss på ett styrsystem med både lokal datorkraft och molnbaserad beräkningskapacitet för optimerad styrning av processen.

Vätgas är explosivt om det blandas med syre och antänds i ett begränsat utrymme. Brinnande vätgas exploderar inte om vätgaslågan redan är antänd och brinner. Brännare är utrustade med flamvakter och om lågan av någon anledning slocknar stängs tillförseln av gas direkt. Vätgas är flyktigt och stiger uppåt. Explosionsrisk uppkommer

om gasen blandas med syre och antänds i ett begränsat utrymme, t.ex. i en stängd lokal under själva antändningstemperaturen. LINDE har dock visat att befintliga säkerhetssystem fungerar också vid vätgasförbränning. Tabell 6 visar en sammanfattning av skillnader mellan eldning med fossila bränsle-luft som är vanligt idag jämfört med den nya förslag av vätgas oxyfuel.

Tabell 6. Jämförelse av skillnader med den nya koncept och vanliga värmningsugnar.

Faktor	Dagens ugn med luftförbränning av fossila bränsle	Kondensering vätgas-oxyfuel ugn
1. Kostnaden för bränsle	Lägre bränslekostnader	Mycket höga kostnader för framtagning av H <sub>2</sub>
2. Växthusgasutsläpp		Lägre GHG (CO <sub>2</sub> ) utsläpp
3. Produktivitet med samma ugnstorlek		Högre produktivitet med oxyfuel värmning
4. Glödskalbildning och rensning	Välkänt data om glödskalets egenskaper	Goda förutsättningar enl. utvärdering på SMT material men behöver studeras för fler material
5. Investeringsrisker	Låg risk med beprövad teknik	Höga investeringskostnader för vätgasproduktion
6. Strategiska faktorer	Företag behöver ersätta fossila bränsle	Marknadsfördelar med ”grönt stål” Undvika importerade fossila bränslen
7. Gas analys sensorer	Risk för giftig CO bildning som kan skada Zr-oxid O <sub>2</sub> sensorer	Inga CO bildning gör O <sub>2</sub> mätning lättare
8. Styrssystem	Dagens styrssystem kan vara många år gamla	Nya ugnstyrning kan inkludera övervakning av sensorer och process data

## PROJEKTETS BETYDELSE I BEFINTLIG OCH FRAMTIDA VERKSAMHET

Projektet har gått ut på att göra en bedömning av den praktiska möjligheten att införa denna typ av ugnar i stålindustrin. Projektarbetet har visat att detta är fullt möjligt och att ugnsatmosfären inte ger någon betydande påverkan på glödskalets bildningen vilket är av stor betydelse för processen.

En betydande svårighet är att tillgången på vätgas inte är tillräcklig och att infrastrukturen för vätgasproduktion inte är utvecklad. För de ugnar som redan i dagsläget har tillgång till oxyfuel är det lättare att implementera tekniken, de som saknar oxyfuel måste göra ännu en investering.



## Diskussion och Sammanfattning

Projektarbetet har kommit mycket långt i och med att man visat att tekniken borde fungera bra och att inverkan på produkterna ser ut att vara små jämfört med nuvarande process. Det är troligt att den fossilfria ugnen har en plats i stålindustrin och kommer att bidra till ett hållbart energisystem- om vätgasen kan framställas på ett hållbart sätt.

Resultaten utgör ett bra underlag för att söka ett fortsättningsprojekt i form av ett demoprojekt. Nackdelen är att tekniken kräver tillgång till stora mängder vätgas på en prisnivå som kan konkurrera med fossila bränsle, vilket i dagsläget är svårt att uppfylla utan stöd.

Linde Gas har ritat kondenseringsenheten till SMT: Ugn 58 (se bilaga 3--Konfidentiell) som är en del av underlaget till ett möjligt fortsättningsprojekt.

## Referenser, källor

[1]J. Johansson and J. Borg, 'Encapsulation method for small wireless measurement systems in high temperature environments', presented at the IMAPS International Conference and Exhibition on High Temperature Electronics, HiTEC 2016, Albuquerque, 10-12 May 2016, 2016.

[2] Goldin, E., Feldman, D., Georgoulas, G., Castaño Arranz, M., & Nikolakopoulos, G. (2017). Cloud computing for big data analytics in the Process Control Industry. In 2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017 (pp. 1373–1378). Piscataway, NJ. <https://doi.org/10.1109/MED.2017.7984310>

## Bilagor

- *Administrativ bilaga (se mall) (OBLIGATORISK)*

*Andra bilagor kan t ex vara:*

- *Vetenskapliga artiklar (färdiga, accepterade, eller inskickade manus)*
- *Ritningar, kartor, fördjupade metodbeskrivningar, resultattabeller etc*
- *Avhandlingar*
- *Känslig information som ej ska publiceras i Energimyndighetens projektdatabas.*

*Bilagor som inte ska publiceras externt ska märkas upp genom att "KÄNSLIG INFORMATION" skrivs in i dokumentets rubrik. Alternativt kan dokumentet vattenstämplas med "KÄNSLIG INFORMATION". Dessutom ska i filnamnet läggas in orden "KÄNSLIG INFORMATION".*

**Bilaga 1. Administrativ bilaga**

## Bilaga 2/Appendix 2. Hydrogen combustion thermodynamics and efficiency

Hydrogen is a low calorific gas based on the lower heating value of 3 kWh/Nm<sup>3</sup> versus 10 kWh/Nm<sup>3</sup> for methane (which is the main component in natural gas), but the adiabatic flame temperature in air is 2125°C which is higher than for natural gas (1942°C—see table 1 in the main project report). A good method for examining the thermodynamic performance of various fuels in steel reheating furnaces is to examine the lower heating value available heat (abbreviated LHV-AH) for various furnace conditions. This is essentially an energy balance for the combustion process as shown in Equation A.1 below [1] without the condensation of the water vapor.

$$\text{LHV Available heat} = \frac{(\text{LHV for fuel}) + (\text{s.enthalpy inputs}) - (\text{s.enthalpy out})}{(\text{LHV for fuel})} \quad (\text{Eq. A.1})$$

Large amounts of impure hydrogen are already used in steel reheating furnaces in coke oven gas (COG), which is a gaseous fuel mixture composed of primarily hydrogen (50-60%), plus methane (25-30%), CO (5%) and N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and other gases (5%). Hydrogen and CO are both low calorific gases, yet they are excellent fuels for steel reheating furnaces. Hydrogen has a lower heating value (LHV) of 10.8 MJ/Nm<sup>3</sup> (or 241 845 kJ/kmole) and CO has a LHV of 283 005 kJ/kmole. A LHV available heat analysis for hydrogen combustion in Figure A2.1. shows that hydrogen can directly replace conventional fossil fuels like natural gas (modelled as methane) in steel reheating furnaces.

The efficiency of oxyfuel versus air combustion can also be examined with the same type of analysis to show the advantage of using the oxygen which is produced with the electrolysis of water with oxyfuel combustion. There are several factors to consider:

- \* A high combustion air preheat temperature is needed to compete with the use of oxyfuel combustion to give a similar amount of available heat to heat the stock,
- \* The use of oxyfuel combustion gives a combustion gas with a higher gas emissivity for faster heat transfer, and
- \* the lower gas volume can allow a higher power input into the furnace, if the exhaust duct system limits the furnace performance.

Preheated air combustion can be analysed, if one knows the temperature of the air. Combustion air temperatures can be as low as room's temperature and about 500°C for a good recuperator or even higher with regenerative air preheating. A combustion air temperature of 800K (527°C) was chosen for an analysis of preheated air combustion in Figure A2.1. The figure shows that oxyfuel combustion is excellent for saving energy for high temperature processes, especially steel reheating furnaces which can have exhaust gas temperatures over 900°C plus oxyfuel combustion can increase the furnace productivity.

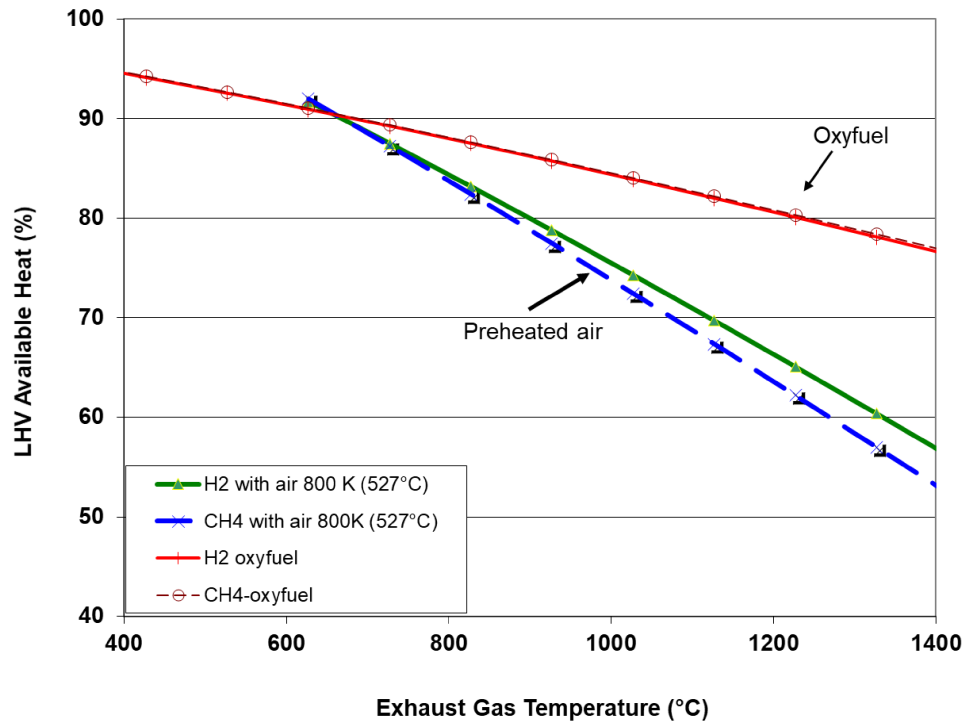


Figure A2.1. Hydrogen-oxyfuel combustion gave nearly the same available heat as methane-oxyfuel combustion (where methane is used as an approximation to natural gas) [1].

A tight furnace is beneficial for a high energy efficiency, high reheating productivity and to avoid excessive scale losses. The energy efficiency decreases with increased air infiltration, since the cold air needs to be heated to the furnace temperature. Most of the energy in the hot exhaust gases can be recovered with this proposed technology for implementing exhaust gas condensation. Note that oxyfuel fired pit furnaces typically have a high thermodynamic efficiency, so there is no need for heat recovery from the exhaust gases. Figure A2.2 below shows that an excess oxygen level of about 10.5% has about 50% water vapor and 50% infiltration air assuming that the oxyfuel burner is operating at stoichiometric combustion. If the burner is operating with excess oxygen, then there is an additional cost for the excess oxygen which one might be able to reduce due to the supply of excess oxygen from air infiltration.

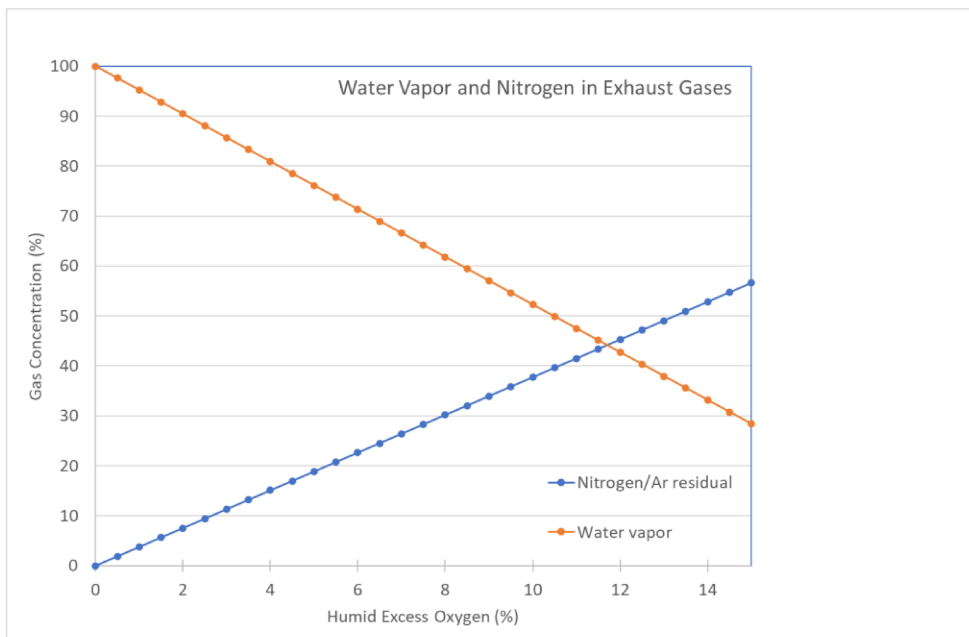


Figure A.2.2. Effect of air infiltration on the furnace atmosphere

References:

1. Niska, J. et.al, "Hydrogen as a fuel in steel reheating furnaces", Nordic Flame Days 2019, Turku, Finland 28-29, Aug. 2019 (extended abstract).

**Bilaga 3. KÄNSLIG INFORMATION (skickas som separat fil)****(RITNINGAR AV KONDENSERINGSANLÄGGNING)**