

Energimyndighetens titel på projektet – svenska <b>PLATIS - Plasmateknik i stålindustrins ugnar</b>	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska <b>Plasma technology in steel industry furnaces</b>	
Universitet/högskola/företag <b>Jernkontoret</b>	Avdelning/institution <b>Teknikområde 51</b>
Adress <b>Box 1721, 111 87 Stockholm</b>	
Namn på projektledare <b>Nicklas Tarantino, Sustainable Steel Region och Helena Malmqvist, Jernkontoret</b>	
Namn på ev övriga projektdeltagare <b>Jonas Engdahl, SSAB Borlänge, Andreas Johnsson, Swerim, Maria Swartling &amp; Daniel Sundberg, ScanArc, Ilman Nuran Zaini, Rikard Svanberg &amp; Weihong Yang, KTH, Nils-Erik Wessberg, Anette Bergén &amp; Jan Pettersson, SSAB Oxelösund, Ola Ritzén &amp; Kristofer Bölke, Linde Gas, Christian Fredriksson, LKAB, Pontus Hydén &amp; Kristoffer Lundkvist, Höganäs AB, Fredrik Sandberg, Sandvik SMT, Anders Lugnet, Ovako, Cecilia Lille &amp; Jenny Granqvist, Outokumpu</b>	
Nyckelord: 5-7 st <b>plasma, värmningsugnar, fossilfri, värmning, stål, värmebehandling, oxidation</b>	

## Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten och deltagande företag inklusive SSAB, Höganäs AB, Ovako Sweden AB, Linde Gas AB, LKAB, Outokumpu Stainless AB, Sandvik Materials Technology AB, ScanArc Plasma Technologies AB och Swerim AB. Jernkontoret utgjorde projektägare, Sustainable Steel Region ansvarade för projektledning och Kungliga tekniska högskolan ansvarade för forskningsrelaterade frågor. Jernkontorets Teknikområde 51, Energi- och ugnsteknik, utgjorde referensgrupp och bidrog med värdefull information.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	4
Summary .....	5
Bakgrund.....	6
Kunskapsläget.....	8
Syfte.....	8
Projektets upplägg.....	9
Genomförande .....	9
AP 0. Projektledning, ekonomistyrning och administration.....	10
AP 1. Omvärldsstudie .....	10
AP 2. Identifiering av industrins förutsättningar och utvärdering av möjliga bär-gaser.....	11

AP 3. Pilotförsök.....	11
Pilotutrustningens tekniska utformning .....	12
Provhantering.....	13
Processövervakning och datainsamling .....	13
Testprocedur .....	14
AP 4. Materialanalys.....	16
Metodik SSAB Borlänge .....	16
Metod Outokumpu Stainless.....	17
Metod SSAB Oxelösund.....	19
Metod Ovako .....	19
AP 5. Processanalys .....	19
Metod Höganäs .....	20
AP 6. Teknisk-Ekonomisk analys.....	20
Metod.....	21
Processmodellering och simulering .....	21
Ekonomiska beräkningar .....	24
Resultat .....	28
AP 1. Omvärldsstudie .....	28
AP 2. Identifiering av industrins förutsättningar och utvärdering av möjliga bärgaser.....	30
Industrins processer - nuläge .....	30
Tillgängliga gaser .....	30
Stålföretagens frågeställningar .....	31
Val av gaser till pilotförsöken.....	32
AP 3. Pilotförsök.....	33
Resultat process och teknisk prestanda.....	33
Resultat processövervakning och datainsamling .....	33
Resultat provhantering och testprocedur .....	34
AP 4. Materialanalys.....	34
Resultat SSAB Borlänge.....	34
Resultat Outokumpu Stainless .....	36
Resultat SSAB Oxelösund .....	39
Resultat Ovako.....	44
Slutsatser av materialundersökningar kolstål och rostfritt stål .....	45
AP 5. Processanalys .....	46
Temperaturjämnhet och förekomst av hot spots.....	46
Effekt och prestanda .....	47
Förekomst av NO <sub>x</sub> i avgaserna .....	48
Konvertering till plasmateknik och kombination med annan förbränningsteknik.....	50
Påverkan på processutrustning.....	51
Slutsatser och förslag till fortsatt processutveckling .....	51
Resultat Höganäs .....	53
AP 6. Teknisk-Ekonomisk analys.....	54
Utvärdering av scenarier med plasmateknik.....	54
Kontinuerlig värmningsugn .....	54
Batchugn .....	59

Ekonomisk utvärdering .....	61
Slutsatser av teknisk-ekonomisk analys .....	65
Diskussion.....	65
Utfall av processanalys .....	65
Utfall av materialanalys .....	67
Möjligheter med plasmateknik .....	68
Utmaningar och möjliga åtgärder .....	68
Implementering av plasmateknik i nya och befintliga ugnar.....	69
Plasmateknik i jämförelse med andra alternativ .....	70
Forsknings- och utvecklingsbehov .....	71
Plasmateknikens möjligheter i stålindustrins ugnar.....	73
Publikationslista.....	73
Referenser .....	73
Bilagor .....	74

## Sammanfattning

En elektrifiering av stålindustrins värmningsugnar kan få en avgörande roll för att nå det svenska nollutsläppsmålet. Projektet PLATIS har därför testat och utvärderat plasmateknik som alternativ värmekälla i stålindustrins ugnar. Projektet har byggt en pilotanläggning, genomfört försök, utvärderat processen, analyserat uppvärmt material och genomfört en teknisk-ekonomisk analys. Pilotförsöken visade att det är både praktiskt och funktionellt möjligt att värma stål med plasmateknik. Försöken påvisade goda processtekniska egenskaper, trots att pilotanläggningen inte var helt optimerad för ändamålet.

Försöken visade att rätt val av plasmagas och optimering av driftförhållanden har potential att ge stålindustrin önskad stålqualität i samband med värmning. För kolstål gav CO<sub>2</sub> mindre avkolning jämförelse med en N<sub>2</sub>-atmosfär. Omvänt gav N<sub>2</sub> mindre oxidtillväxt. Generellt sett skilde sig oxidering och avkolning ytterst lite åt mellan företagens respektive prover. Den övervägande delen av glödskalet var som regel lättrensat och släppte även från ytan utan mekanisk påverkan. Tyvärr går det inte att dra några slutsatser av efterföljande betningsförsök. När det gäller rostfritt material gav värmning med N<sub>2</sub> och N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O bästa resultaten avseende oxidationsdjup, tillväxt och avlägsnande av oxid genom betning. En tunn kromrik oxid erhöles, vilket resulterade i en kort betningstid. Mest oxidation erhöles för provbitar uppvärmda med CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O.

Några generella utmaningar är processens NO<sub>x</sub>-bildning, systemeffektivitet och underhållskostnader, men även design och uppskalning i nästa steg. Plasmatekniken har potential att implementeras i både nya och befintliga ugnar. Tekniken bedöms passa bäst i värmningsprocesser där hög temperaturer >1000°C eller viss atmosfär eftersträvas, exempelvis värmningsugnar eller som värmekälla vid pulver- och järnsvampstillverkning. En recirkulation av gaser är fördelaktigt för att minimera NO<sub>x</sub>-utsläpp och minska kostnaden för gas. Användning av N<sub>2</sub> och CO<sub>2</sub> som energibärare ger lägre gasflöden än gasol/luft-förbränning, vilket bör beaktas vid både nykonstruktion och ombyggnad.

Baserat på kapital- och driftskostnaden för enbart plasmageneratoren, visar den teknisk-ekonomiska jämförelsen en total produktionskostnad på 221 SEK/ton stål för plasmaalternativet. Detta innebär ytterligare 62,6 SEK/ton stål jämfört med dagens förutsättningar, vilket är potentiellt billigare än alternativet CO<sub>2</sub>-infångning eller vätgasförbränning. Plasma ger den lägsta kostnaden för att undvika CO<sub>2</sub> jämfört med andra antagna alternativ, med en kostnad på 761 SEK/ton undviken CO<sub>2</sub>. Eventuell NO<sub>x</sub>-rening kan dock öka produktionskostnaden.

Plasmatekniken kan sannolikt inte ses som en lösning för stålindustrins ugnar de närmsta åren, men med ökad FoU skulle tekniken kunna vara ett konkurrenskraftigt alternativ på längre sikt (4-10 år). För att nå dit krävs bl.a. forskning för att kvalitetssäkra uppvärmt material och motverka NO<sub>x</sub>-bildning, men även processoptimering, plasmautrustningens utformning och placering, värmeåtervinning, underhåll och kraftförsörjning för att maximera effektivitet och minimera kostnader.

## Summary

Electrification of steel industry heating furnaces can play a crucial role in achieving the Swedish zero emission target. Thus, the PLATIS project has tested and evaluated plasma technology as an alternative heat source in the steel industry's furnaces. The project has built a pilot plant, performed tests, evaluated the process, analyzed heated material, and conducted a technical-economic analysis. The pilot experiments showed that it is both practical and functionally possible to heat steel with plasma technology. The tests demonstrated good process characteristics, even though the pilot plant was not fully optimized for the purpose.

The experiments showed that the right choice of plasma gas and optimization of operating conditions has the potential to provide the steel industry with the desired steel quality after heating. For carbon steel, CO<sub>2</sub> produced less decarbonation compared to an N<sub>2</sub>-atmosphere. Conversely, N<sub>2</sub> produced less oxide growth. In general, oxidation and decarbonization differed very little between the test samples. Most of the scale formation was easily cleaned and even released from the surface without mechanical influence. Unfortunately, no conclusions can be drawn from subsequent pickling attempts. In the case of stainless steel, heating with N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O gave the best results in terms of oxidation depth, growth and removal of oxide by pickling. A thin chromium-rich oxide was obtained, resulting in a short pickling time. Most oxidation was obtained for test samples heated with CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O.

Some general challenges are the NO<sub>x</sub>-formation, system efficiency and maintenance costs, but also design and upscaling in the next step. Plasma technology has the potential to be implemented in both new and existing furnaces. The technology is best suited to heating processes where high temperatures >1000°C or certain atmospheres are required, such as heating furnaces or as heat source in powder and iron sponge production. A recirculation of gases is beneficial to minimize NO<sub>x</sub> emissions and reduce the cost of gas. The use of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> as energy carriers results in lower gas flows than LPG/air combustion, which should be considered in both new and rebuilt furnaces.

Based on the capital and operational cost of the plasma torch alone, the technical-economic comparison shows a total production cost of SEK 221 SEK/tonne of steel for the plasma option. This means additional 62.6 SEK/tonne of steel compared to today's conditions, which is potentially cheaper than carbon capture or hydrogen combustion. Plasma provides the lowest cost of avoiding CO<sub>2</sub> compared to other adopted options, with a cost of 761 SEK/ton avoided CO<sub>2</sub>. However, possible NO<sub>x</sub>-treatment can increase the production cost.

Plasma technology can not likely be seen as a solution for steel industry furnaces in the coming years, but with more R&D the technology could be a competitive option in the long term (4-10 years). To get there, more research is needed, e.g. ensure the quality of heated material and counteract NO<sub>x</sub>-formation, but also process optimization, design and placement of plasma units, heat recovery, maintenance, and power supply to maximize efficiency and minimize costs.

## Bakgrund

År 2045 ska Sverige uppnå noll nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären och bör därefter uppnå negativa utsläpp. Negativa utsläpp innebära att Sverige på en övergripande nivå bidrar till att minska växthusgaser i atmosfären. Stålindustrin är en av de sektorer som släpper ut mest koldioxid och står för 7 procent av koldioxidutsläppen globalt (Regeringen, 2019). Energiförbrukningen för järn- och stålindustrin i Sverige 2016 var 21,7 TWh, där fossila bränslen står för 16,9 TWh. Samma år släppte svensk stålindustri ut 6,06 miljoner ton CO<sub>2</sub>-ekvivalenter, vilket motsvarar 11 procent av de svenska koldioxidutsläppen (SCB, 2021).

Utsläppen av fossil koldioxid från stålindustrin är främst direkta utsläpp från produktionsprocesser och interna transporter. Dessa direkta utsläpp genereras genom användning av kol för reduktion av järnmalm (85 %), användning av bränsle för att värma och bearbeta stålet (12 %) samt användning av kolhaltiga råvaror och tillsatser (3 %) (Jernkontoret, Klimatfärdplan för en fossilfri och konkurrenskraftig stålindustri i Sverige, 2018).

En växande global befolkning och ökad urbanisering förväntas öka den globala stålefterfrågan till 2050. Återvunnet skrot kommer inte i tillräcklig utsträckning att möta den ökande efterfrågan på nytt stål. Koldioxidavtrycket inom stålindustrin är därför en utmaning för Europa och resten av världen (SSAB, 2021).

En elektrifiering av värmningsugnar i processindustrin kan få en avgörande roll för att nå det svenska nollutsläppsmålet. Elektrifiering i kombination med större andel billig fossilfri elkraft kan kraftigt minska utsläppen av växthusgaser. Därför är elektrifiering av industriella processer ett alltjämt växande område för teknikforskning, utveckling, demonstration och utbyggnad runt om i världen (Wei M, 2019;6).

Stålindustrin har antagit en klimatfärdplan för att bidra till ett fossilfritt Sverige 2045, där både bioenergi och elektrifiering ses som potentiella åtgärder för att minska koldioxidutsläppen (Jernkontoret, Klimatfärdplan för en fossilfri och konkurrenskraftig stålindustri i Sverige, 2018). Det råder dock stor osäkerhet om bioenergins förutsättningar med tanke på pris, utbud och efterfrågan på biomassa inom andra sektorer (Klimatpolitiska rådet, 2019). Osäkerheten kring bioråvarans tillgänglighet bidrar till att stålindustrin i allt större utsträckning ser elektrifiering som ett reellt alternativ, både genom direkt användning i olika värmningsprocesser och indirekt användning via elektrolys och vätgas i förbrännings- och reduktionsprocesser.

För stålföretagen innebär omställningsbehovet strategiska beslut och stora investeringar, vilket kan få ödesdigra konsekvenser om företagen gör fel teknikval. Det gäller att lösningarna blir både effektiva och hållbara utifrån funktion, miljö och ekonomi. Därför är det viktigt att alla möjliga alternativ utvärderas, för att så snart som möjligt skapa erforderliga beslutsunderlag.

Med hänsyn till osäkerhet kring framtida energiförsörjning och bioråvara är det också angeläget att utvärdera kombinationen av olika energikällor. Genom att

tillgängliggöra olika energikällor vid en specifik förbrukare kan flexibiliteten ökas genom kombinationen och alternering av olika typer av bränslen och energiformer.

Stålindustrin arbetar just nu intensivt med att både implementera och identifiera alternativ för att ersätta dagens fossila processer. Flertalet projekt genomförs, både enskilt och branschgemensamt (Jernkontoret, Samforsk klimat, 2021). För att åtgärda de enskilt största koldioxidutsläppen, från järnmalmsreduktion, kommer en ny process implementeras s.k. vätebaserad direktreduktion (DRI), i huvudsak baserad på vätgas från elektrisk elektrolys (SSAB, 2021).

När det gäller värmnings- och värmebehandlingsugnar är de hållbara alternativen fortfarande en mer öppen frågeställning. I klimatfärdplanen 2018 bedömde stålindustrin att cirka 80% av tillförd bränsleenergi för värmebehandling och 20% av tillförd bränsleenergi för uppvärmning i stålindustrins ugnar kunde elektrifieras med konventionell teknik, vilket motsvarar cirka 1 - 2 TWh el. Övriga uppvärmningsprocesser, motsvarande ca 2–3 TWh fossila bränslen, bedömdes som alltför utmanande för att kunna elektrifieras. De så kallade övriga processer kräver ofta en kombination av hög temperatur (>1000°C) och hög energitäthet, vilket med nuvarande grad av teknikmognad kan vara utmanande att åstadkomma med konventionell eluppvärmning (exempelvis resistiv och induktiv uppvärmning).

I takt med pågående forskning och teknikutveckling öppnas elektrifiering även upp sig som potentiell lösning för de mer utmanande processerna, där plasmateknik kan ses som en av de framväxande teknikerna. De främsta fördelarna med plasmateknik jämfört med andra alternativ är kombinationen av plasmans höga temperatur, plasmans höga energitäthet och möjligheten att använda olika plasmagaser för att styra atmosfären beroende på önskad applikation. Att ersätta fossila brännare med plasmageneratorer kan leda till lägre utsläpp av växthusgaser. Andra fördelar är en kontrollerad processkemi, skalbara installationer och snabb reglering (Lindén E, 2019).

Den största skillnaden vid nyttjande av plasmateknik är att det inte finns någon förbränningsreaktion i den normala förbränningszonen, vilket påverkar processgassammansättningen och kan medföra högre NO<sub>x</sub>-emissioner (Lindén E, 2019). Därför behöver termisk plasma i industriella ugnar noggrant utvärderas och utvecklas för att uppnå hög effektivitet och låga utsläppsnivåer.

Plasmatekniken har potential att både utgöra ett alternativ och ett komplement till bioråvara. Kombinationen mellan plasma och biomassa skulle kunna ge en ökad flexibilitet och förlänga befintliga ugnars livslängd. I vissa tillämpningar, med rätt förutsättningar, bör plasmateknik kunna kombineras med biogas.

Genom utveckling av plasmatekniken i ugnapplikationer skulle även de mer utmanande ugnprocesserna helt eller delvis kunna konverteras till elektrifierad uppvärmning. En succesiv konvertering av befintliga ugnar skulle kunna ge stålindustrin kostnadseffektiva lösningar och förmodligen en snabbare omställning. För att bedöma plasmateknikens potential i stålindustrins ugnar

måste möjligheter, begränsningar och utmaningar utvärderas. En avgörande fråga är om plasmatekniken kan uppfylla stålindustrins krav.

### *Kunskapsläget*

Plasmageneratorer omvandlar elektrisk energi till energi som bärs av en het gas. En elektrisk urladdning genereras mellan elektroderna och gasen uppnår aggregationstillståndet plasma, vilket leder till extremt höga temperaturer då molekylernas beståndsdelar skiljs åt och elektronerna rör sig fritt från kärnan. De flesta gaser kan upphettas till detta tillstånd, vilket ger stora möjligheter att designa processer efter gasens användningsområde.

För att kunna avgöra plasmateknikens potential har stålindustrin ett behov av att öka kunskapen om plasmateknikens möjligheter i ugnapplikationer. Stålindustrin har god kunskap och erfarenhet vilka krav som kan ställas på värmningsprocesser för att uppnå eftersträfvade processtekniska förutsättningar och erforderlig materialkvalitet. Det är också allmänt känt att plasmatekniken är el-baserad och kan generera höga temperaturer, vilket fångar stålindustrins intresse. I kombination med fossilfri elkraft är tekniken ett potentiellt alternativ för att uppnå fossilfri produktion i ugnar som kräver höga temperaturer. Däremot saknas kunskap om hur plasma kan implementeras och hur det påverkar material, ugnsutrustning, miljö, arbetsmiljö, energianvändning, underhåll, elförsörjning och kostnader.

Kunskapsläget om plasmateknik är god hos teknikleverantörerna, men de saknar specifik kunskap om hur tekniken kan implementeras i värmningsugnar, inklusive dimensionering, processtekniska behov etc. Termisk plasmateknik används vanligtvis vid skärande bearbetning av material, men teknikföretaget ScanArc Plasma Technologies har sedan tidigt 80-tal använt tekniken som värmekälla i metallurgiska smältprocesser. Som värmningsmetod är dock tekniken relativt utforskad. I allt större utsträckning börjar även andra branscher se plasmatekniken som en möjliggörare för reduktion av växthusgaser, exempelvis cement- och gruvindustrin. Plasmatekniken har potential att stödja klimatomställningen i svensk processindustri, men tekniken behöver i så fall optimeras, anpassas och testas för respektive behov.

I Bilaga 2, *Industriell implementering av plasmateknik*, går det att läsa mer hur ScanArc implementerar tekniken i industriella processer och vilka komponenter som normalt ingår i en leverans.

### *Syfte*

Syftet med projektet är att med plasmateknik skapa förutsättningar för stålindustrin att även elektrifiera sina mer utmanande ugnprocesser. Implementering av tekniken kan på sikt bidra till att göra stålindustrin oberoende av fossila bränslen och allt mindre beroende av biobränslen, vilket skulle minska industrins bidrag av växthusgaser betydligt. Tekniken kan öka stålindustrins flexibilitet där man i högre grad alternerar och kombinerar biobränslen och elkraft i samma process eller alternativt i kombinerade steg.



Projektet vill påvisa forsknings- och utvecklingsbehov för att möjliggöra implementering av plasmateknik i stålindustrin. Förhoppningsvis kommer resultaten bidra till tekniksprång och stödja stålindustrin i framtida teknikval. Projektet kommer att ge värdefull information för att kunna bedöma den relativt obeprövad plasmateknologin i jämförelse med andra uppvärmningsmetoder.

### *Projektets upplägg*

Projektet genomfördes med ekonomiskt stöd från Energimyndigheten mellan 2020-01-01 och 2021-06-30. Projektägaren Jernkontoret ansvarade för genomförandet i samarbete med Sustainable Steel Region som operativ projektledare. Industriella projektpartners utgjorde SSAB Borlänge, SSAB Oxelösund, Höganäs AB, Ovako Sweden AB, Linde Gas AB, LKAB, Outokumpu Stainless AB och Sandvik Materials Technology AB. Övriga partners har varit ScanArc Plasma Technologies AB (ScanArc), som levererade tekniska lösningar och ansvarade för praktiska försök samt Kungliga tekniska högskolan (KTH) och Swerim som utgjorde forskningsstöd. Jernkontorets Teknikområde 51, Energi- och ugnsteknik, ett forum för industrins, akademins och forskningsinstitutens ugnsexperter, utgjorde referensgrupp.

## **Genomförande**

Målsättningen för projektet har varit att praktiskt testa och bedöma plasmatekniken som en möjlig processteknik för stålindustrins uppvärmningsugnar. Detta gjordes genom att under en tidsbegränsad period upprätta en pilotanläggning hos ScanArc i Hofors. Piloten skapade förutsättningar att testa olika typer av bär-gaser i praktiska försök. Utifrån försök och samlad kompetens kunde potentialen bedömas, inklusive processtekniska, materialtekniska, ekonomiska och miljömässiga för- och nackdelar. Projektet har också identifierat fortsatta behov av forskning och utveckling för att kunna understödja en implementering i stålindustrin. För att kunna beakta kritiska frågeställningar och förbereda försöken på bästa möjliga sätt, genomfördes en omvärldsstudie, kartläggning av industrins förutsättningar samt en utvärdering och urval av möjliga bär-gaser.

Projektet är en del av stålföretagens strategi för att nå uppsatta klimatmål genom nya tekniska lösningar med förhoppningen att bidra till industrins energi och klimatomställning. Projektet avsåg att:

- Påvisa plasmateknologins möjligheter för att ersätta fossila bränslen och öka flexibiliteten i stålindustrins ugnar.
- Öka kunskapen för elektrifiering av stålindustrins ugnar.
- Identifiera och föreslå teknisk ugnslayout för att ersätta och komplettera befintliga brännarsystem med plasmagenerator.
- Påvisa att plasmateknologin kan skapa en ugnsatmosfär som motsvarar stålindustrins kravställning vid uppvärmning av stålämnen.
- Påvisa att materialet kan uppnå önskad kvalitet med plasmateknologi.

- Påvisa systemets effektivitet och miljöpåverkan, samt föreslå utvecklings- och forskningsbehov.
- Bedöma om tekniken är ekonomisk och ekologisk hållbar.
- Bedöma om tekniken kan användas för andra värmningsändamål i stålindustri.

Målsättningen var ett relativt snabbt genomförande av praktiska tester, för att därigenom kunna fastställa om plasmatekniken är ett alternativ för stålindustrin att värma upp och värmebehandla stål. Projektet, inklusive omvärldsstudie, etablering av pilotanläggning, tester, analys och rapportering genomfördes under en mycket begränsad tid.

Projektet har därför avgränsats till att inte besvara frågeställningar om tekniska lösningar, extern elförsörjning eller elens ursprung, eftersom förutsättningarna särskiljer sig mellan företag och produktionsenheter. I projektet förutsätts ett framtida energisystem som kan leverera 100% fossilfri elkraft.

Projektet har inte heller utvärderat plasmagasernas produktionsmetoder och ursprung. I dagsläget är tillgången på exempelvis biogen koldioxid begränsad. I projektet förutsätts en framtida tillgång på fossilfria industrigas.

För att uppnå önskade resultat delades projektet in i sex arbetspaket (AP).

#### **AP 0. Projektledning, ekonomistyrning och administration**

Operativ projektledningen leddes av Sustainable Steel Region. Inom ramen för arbetspaketet ingick ordinarie projekt- och ekonomistyrning, inklusive planering och koordinering av gemensamma insatser samt projekt-, styr- och referensgruppsmöten. Arbetspaketet inkluderade även slutrapportering, extern kommunikation och spridning av resultat. Slutrapport sammanställdes i samarbete med ansvariga delprojektledare.

#### **AP 1. Omvärldsstudie**

Omvärldsstudien genomfördes av Kungliga Tekniska högskolan för att identifiera historisk och aktuell forskning, samt genomförda pilotförsök med plasmateknik i olika typer av ugnapplikationer. Studien hade både ett nationellt och internationellt perspektiv.

Omvärldsstudien bygger på litteraturstudier. Litteratur samlades in från olika tidskriftsdatabaser såsom ScienceDirect (Elsevier Journals), Willey, Springers, m.fl. Fakta hämtades också från öppna källor via internet. Information om pågående och i närtid genomförda plasmarelaterade forskningsprojekt erhöles bland annat från Energimyndigheten och teknikleverantören ScanArc Plasma Technologies. Utifrån studiens syfte riktades större fokus mot teknisk tillämpning, det vill säga hur plasmageneratorer kan ersätta brännarutrustning för fossila bränslen i konventionella värmningsugnar.

## **AP 2. Identifiering av industrins förutsättningar och utvärdering av möjliga bärigheter**

Som en förberedelse inför pilotförsöken genomförde ScanArc en undersökning av de deltagande industriföretagens förutsättningar och frågeställningar kring plasmateknik i stålindustrins ugnar. Syftet var att skapa en överblick över industrins nuläge och vilken potential de ser att introducera plasmateknik som värmekälla för värmningsugnar. ScanArc ansvarade för datainsamling och sammanställning.

Det specifika målet med undersökningen var att skapa ett underlag för att designa projektets pilotförsök och möjliggöra att projektets slutresultat blir ett värdefullt beslutsunderlag. Fem av de deltagande industriföretagen bidrog till undersökningen genom att svara på ett frågeformulär.

I frågeformuläret ombads företagen redovisa vilka värmningsprocesser som kan vara aktuella för hel eller delvis konvertering till plasmateknik och vilka frågeställningar man i första skedet bedömde som viktiga att bemöta vid utvärdering av tekniken. Vidare ombads de redovisa gasflöden som finns tillgängliga på industriområdet, primära och sekundära flöden i egna och närliggande processer.

Utifrån samlad information planerades fem testdagar, med syfte att skapa önskad ugnsatmosfär för uppvärmning av stålämnen. Val av gaser och ugnsatmosfär för pilotförsöken gjordes utifrån svarsunderlaget från undersökningen. Valet av gaser tog hänsyn till industrins tillgängliga gaser och frågeställningar som de ville angripa.

## **AP 3. Pilotförsök**

ScanArc ansvarade för pilotförsöken och genomfördes i nära samarbete med övriga parter. Med utgångspunkt från undersökningen i AP2 skapades en försöksplan för genomförande och processmätningar. Följande kritiska faktorer identifierades för att uppnå erforderliga resultat:

- Pilotutrustningens tekniska utformning
- Provhantering
- Testprocedur
- Processövervakning och datainsamling

Pilotförsöken utformades för att möjliggöra behandling av stålämnen under en specifik tidsperiod, vid specifik atmosfär och vid en specifik temperatur. Samtidigt skulle processdata samlas in för att bemöta industrins frågeställningar och utvärdera processens prestanda.

### *Pilotutrustningens tekniska utformning*

#### **Pilotugn**

Pilotugnen var en isolerad kammarugn som tillhandahölls av Swerim, se Figur 1. Ugnens dimensioner var 3.5 x 2.2 x 2.2 m. Ugnen installerades i ScanArcs försökshall och kopplades upp mot befintlig infrastruktur. Plattformen där ugnen ställdes var något upphöjd för att få en arbetshöjd för de tre sidoluckor där prover kunde tas in och ut.

Ugnskroppen hade fyra kylkanaler inbyggda, dessa togs bort då de inte hade någon funktion i de kommande försöken. Ugnskroppen tätades för att täppa igen befintliga hål från kylkanalerna och från annan tidigare installerad utrustning.

Ugnskroppen bestyckades med termoelement i befintliga hål i ugnskroppen.

Infordringen inspekterades och bedömdes vara i gott skick, ingen vidare åtgärd gjordes. Bord byggdes upp och isolerades för att hålla stålproverna under försökets genomförande.

En flänsanslutning för forma och plasmagenerator tillverkades och installerades på ugnen, där sattes även anslutningarna för inkommande el- och gassystem. Kylvatten anslöts till plasmasystemet. Av säkerhetsskäl jordades ugnen.

Ett kombinerat avgassystem som kyler processgasen med luft och vatten kopplades till ugnen. Kylvattnet samlades i en tank och genomgick en rutinmässig reningsprocess för att säkerställa låga halter av metaller innan det släpptes till avloppet.

Ett styrsystem programmerades och anslöts till alla mätinstrument, elsystem och vattenrening för övervakning, datainsamling och processtyrning.



**Figur 1. Kammarugn installerad i pilotanläggning.**

#### **Plasmasystem**

Det plasmasystem som användes för uppvärmning hade en effekt på 250 kW. Plasmageneratoren installerades på ugnens ena kortsida. Direkt nedströms plasmageneratoren installerades en forma, som är en reaktionskammare mellan

plasmagas och formagas. Utrustningen är optimerad för luft som plasmagas, men är även kompatibel med andra gaser.

### **Gasförsörjning**

Luft, gasol och kvävgas tillhandahölls från ScanArcs system, med anslutning till Ovacos distributionsnät. Koldioxidtank och förångare tillhandahölls av Linde Gas. Vatten tillsattes direkt i forma som direktgenererade ånga i plasmaströmmen.

### **Temperaturmätning och värmefluxmätning**

Flertalet temperaturmätare var placerade i ugnen. Dess positioner syftade till att styra processen och utvärdera temperaturjämnhet i ugnen. Temperaturmätare var även placerade i prover permanent placerade i ugnen under hela försöksperioden. KTH installerade en sond för mätning av total värmeöverföring genom strålning och konvektion (Total Heat Flux). Sonden var placerad i mitten av ugnskammaren och THF-värdet beräknades utifrån temperaturskillnaden mellan två typ-K-termoelement.

### **Provhantering**

Varje deltagande företag tog fram önskat provmaterial och specificerade önskad uppehållstid i ugnen. Provbitarna var av varierande storlek, men i huvudsak av dimensionen 150\*150\*20 mm med en vikt på 2 - 3 kg. Riktlinjerna för provbitarnas dimensioner syftade till att ha en uniform storlek, underlätta provhanteringen och möjliggöra en jämförelse av deltagande företags resultat.

I ett fall placerades en provbit permanent i ugnen, i övriga fall hade respektive företag 1 - 4 provbitar per testdag och uppehållstid på 60 - 300 minuter enligt stålföretagens önskemål i AP4. Proverna vägdes vid tre tillfällen:

- Innan pilottest.
- Direkt vid uttag från ugn.
- Efter svalning till rumstemperatur.

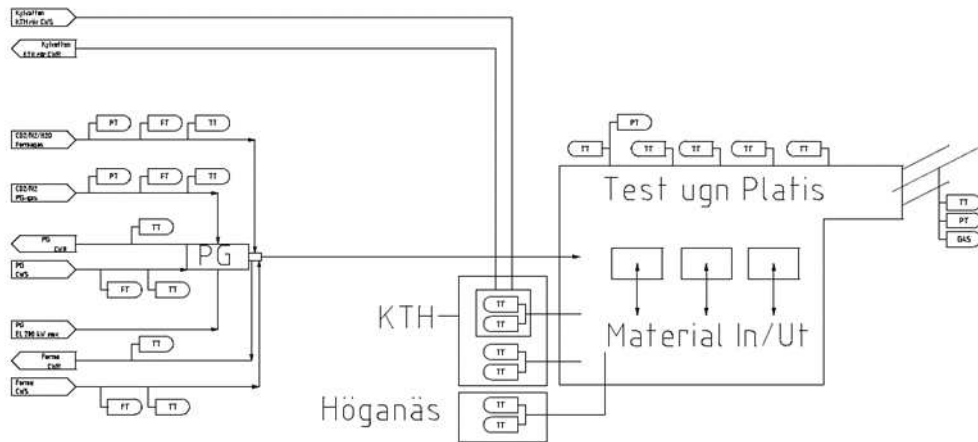
### **Processövervakning och datainsamling**

Figur 2 visar datainsamlingspunkter för testuppställningen. I figuren indikerar TT temperaturmätning, PT tryckmätning, FT flödesmätning och GAS uttag för gasanalys.

KTH placerade två termoelement i ett prov permanent i ugnen under hela testperioden. De placerade även utrustning för värmefflödesmätning i ugnen. KTH:s mätutrustning övervakades i ett separat system utanför ScanArcs processövervakning och beskrivs närmare i Bilaga 5, *Technical report*. Höganäs placerade också två termoelement i prover permanent i ugnen under samtliga testdagar. Dessa övervakades i ett ytterligare system utanför ScanArcs processövervakning.

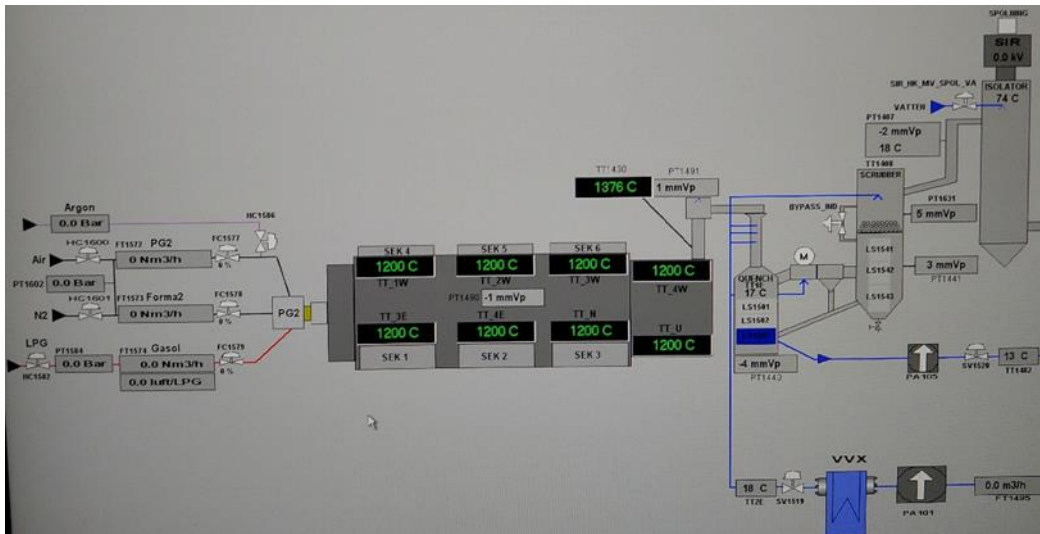
Vid avgasutloppet analyserades gasen med avseende på O<sub>2</sub>, CO, och CO<sub>2</sub>. Dessa mätningar gav en förbränningsgrad på avgaserna som kan användas för direkt

processtyrning och kontroll på ingående gaser. Mätningar utfördes även av KTH och Linde Gas i separata övervakningssystem för mer avancerad processutvärdering av bland annat NO<sub>x</sub>-halter i avgaserna.



**Figur 2. Datainsamlingspunkter för processtyrning och -övervakning**

Figur 3 visar vyn för processövervakning. Samtliga data i övervakningsvyn loggas och sparas för utvärdering.



**Figur 3. Vy för processövervakning under försök.**

### Testprocedur

Den planerade testproceduren var samma för varje försöksdag.

### Förvärmning

Förvärmning av ugn utfördes med den aktuella dagens gas som bärgas i plasma och forma. Förvärmningsfasen avslutades när ugnen uppnått en jämviktstemperatur på 1150°C, det vill säga ett medelvärde kring 1150°C på samtliga termoelement.

**Tillsats av ånga**

Vid testdagarna där ånga tillsattes atmosfären tillsattes vatten i formen när ugnen uppnått 1150°C. Värmningen fortsatte en stund för att åter hitta jämviktsläget, samt för att säkerställa att ugnens atmosfär var homogen.

**Placering av prover i ugn**

Samtliga prover vägdes. Luckorna öppnades och proverna placerades på sin position.

**Uttag av prover**

Enligt en bestämt testplan togs prover ut efter önskad uppehållstid. Direkt efter uttag vägdes det varma provet, och ytterligare en vägning genomfördes när provet helt svalnat. De flesta företagen lät sina prover svalna i rumstemperatur och rumsatmosfär, förutom Outokumpu som önskade kylning av prover i kvävgasatmosfär. Figur 4 och Figur 5 visar provhantering under pågående test.



**Figur 4. Hantering av prover för placering och uttag ur ugnen.**



**Figur 5. Vägning av prov direkt efter uttag från ugn.**

#### **AP 4. Materialanalys**

SSAB Borlänge, Outokumpu, SSAB Oxelösund och Ovako tillhandahöll material som värmdes upp i ugnen under olika tidsperioder, beroende på företag och typ av material. Måltemperaturen sattes till 1150 °C för alla dagar men temperaturerna varierade delvis. Tillförda gaser (plasma/forma) ändrades mellan dagarna. Temperaturen mättes med hjälp av termoelement i ugnen. Syrehalt och temperatur uppmättes i ugnen 60, 75, 120, 180 respektive 300 minuter efter att prover fylldes på i ugnen. Pilotförsökens förutsättningar respektive dag kan ses i Tabell 1.

**Tabell 1. Syrehalt (torr gas) och ugnstemperatur per dag**

	Dag 1 Luft/LPG		Dag 2 CO <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub>		Dag 3 N <sub>2</sub> / N <sub>2</sub>		Dag 4 CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O		Dag 5 N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	
Medelvärde	O <sub>2</sub>	Temp	O <sub>2</sub>	Temp	O <sub>2</sub>	Temp	O <sub>2</sub>	Temp	O <sub>2</sub>	Temp
<b>60 min</b>	8	1180	4	1171	1	1131	0.14	1164	1	1070
<b>120 min</b>	8	1185	3	1181	1	1169	0.76	1173	1	1116
<b>180 min</b>	8	1188	3	1172	2	1171	0.84	1181	1	1147
<b>300 min</b>	9	1188	3	1172	2	1171	0.94	1181	1	1147

Materialanalyser och resultatsammanställning gjordes av respektive stålföretag. Sammanvägt resultat och slutsatser sammanställdes av Swerim i dialog med SSAB Borlänge, som var ansvarig för arbetspaketet.

#### *Metodik SSAB Borlänge*

En stålsort och två provbitar värmdes i 60 respektive 120 minuter varje dag, för att sedan svalna i luft, se Tabell 2. Materialet vägdes före och efter värmning för att få ett mått på oxidation. Provbitarna levererades sedan till laboratorium hos SSAB Borlänge och undersöktes metallografiskt. Provbitarna snittades och de två oxidytorna limmades samman med ledande silver, dels för att kunna undersöka bitarna i FEG-SEM EBSD (Electron back scatter diffraction) och dels för att oxiden inte ska påverkas under provberedningen då den är väldigt spröd. I Figur 6



kan en kapad provbit ses och i Figur 7 limningen där oxidytorna fästes mot varandra med silverfärg. Bitarna gjöts in i plast och provbereddes genom slipning, polering och etsning. Etsningen utfördes med 3% Nital.

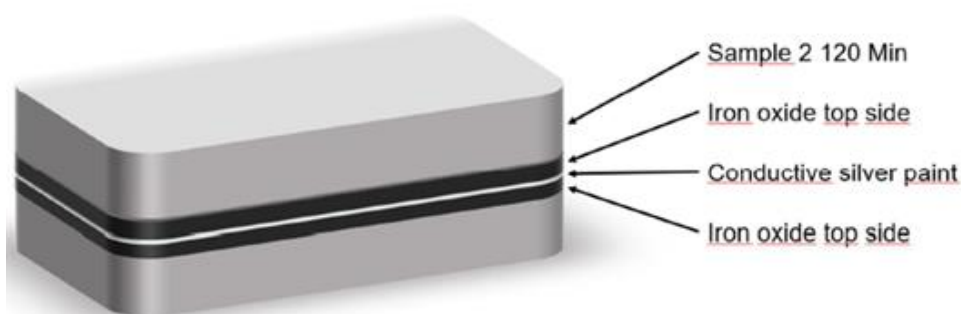
Proverna undersöktes avseende oxidernas sammansättning och avkolningsdjup i tre zoner P1, P2 och P3. Zon P1 mäter zonen med kraftig avkolning, P2 delvis avkolning och P3 är den totala zonen djup, där hela den påverkade ytan är inkluderad. Analys av avkolningsdjup följer standardförfarande enligt SS-EN-ISO3887:2018.

**Tabell 2. SSAB Borlänges prover per dag och respektive värmningstid**

	Dag 1 Luft/LPG	Dag 2 CO <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub>	Dag 3 N <sub>2</sub> / N <sub>2</sub>	Dag 4 CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	Dag 5 N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O
Prov 1	60 min	60 min	60 min	60 min	60 min
Prov 2	120 min	120 min	120 min	120 min	120 min



**Figur 6. En kapad provbit från SSAB**



**Figur 7. Limmade oxidtytor mot varandra**

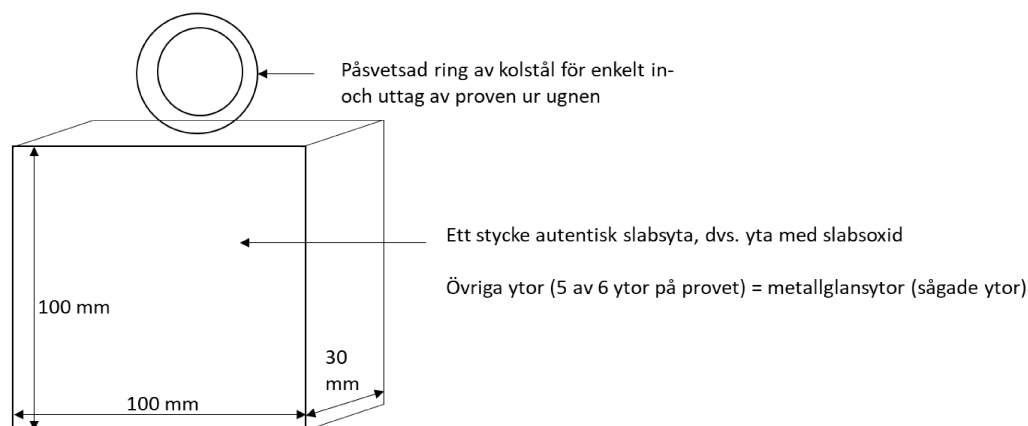
#### *Metod Outokumpu Stainless*

Provbitar för värmning sågades ut från tjocka slabs, men endast 30 mm av toppen på slabset användes. Följaktligen hade provbitarna innan värmning en gjuten yta

medan övriga sidor var sågade, dvs. metallglansytor utan gjutoxid, se Figur 8. En rostfri stålsort värmades, togs ut ur ugnen och fick svalna i skyddsatmosfär bestående av kvävgas för att förhindra vidare oxidation. Varje dag värmades tre provbitar som togs ut ur ugn efter 60, 120 samt 180 minuter, se Tabell 3. Provbitarna levererades sedan till laboratorium hos Outokumpu R&D i Avesta och undersöktes metallografiskt. Materialet vägdes före och efter värmning för att få ett mått på oxidation. Efter värmning undersöktes oxiden samt hur bra oxiden gick att avlägsna via betning på proven värmda 60 och 180 minuter.

Betningen utfördes i en syra bestående av  $\text{HNO}_3/\text{HF}$ . Proverna betades till dess att ytorna ansågs vara fria från oxidrester enligt standardiserat förfarande. Tiden i minuter som krävdes i syrabad för att uppnå oxidfri yta ger ett mått på hur kemiskt stabil, samt hur tät en oxid är och därigenom hur svårbetad en oxid är. Dessutom så vägdes och noterades viktminskningen vid varje upptagning från betbadet.

Proverna undersöktes även metallografiskt, de kapades och gjöts in i bakelit varefter de slipades och polerades. Oxidjockleken mättes upp med ett bildanalyssystem kopplat till ljusoptiskt mikroskop och anges som ett snitt av 10 mätvärden. Oxiden analyserades även i SEM-EDS för att fastställa dess kemiska sammansättning.



**Figur 8. Sågad yta och slabsyta på samma prov**

**Tabell 3. Outokumpus prover per dag och respektive värmningstid**

	Dag 1 Luft/LPG	Dag 2 $\text{CO}_2/\text{CO}_2$	Dag 3 $\text{N}_2/\text{N}_2$	Dag 4 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$	Dag 5 $\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}$
Prov 1	60 min	60 min	60 min	60 min	60 min
Prov 2	120 min	120 min	120 min	120 min	120 min
Prov 3	180 min	180 min	180 min	180 min	180 min

### Metod SSAB Oxelösund

Två stålsorter, en låglegerad och en höglegerad, och varierade tider beroende på gas och dag värmdes enligt Tabell 4 och fick sedan svalna i luft. Materialet vägdes före och efter värmning för att få ett mått på oxidation. Provbitarna levererades sedan till laboratorium hos SSAB Oxelösund. Där undersöktes två av proverna, ett lägre och ett högre legerat stålämne, benämnda nr 7 och 8 i Tabell 4, och undersöktes metallografiskt. Bitarna kapades. Ett tvärsnitt gjöts in i plast och provbereddes genom slipning och polering i flera steg. För prover som ska undersökas med EBSD avslutas poleringen med oxidpolering för att få en så deformationsfri yta som möjligt. För undersökning i ljusoptiskt mikroskop etsades ytan med 2% Nital.

Den kemiska sammansättningen undersöktes med SEM- EDS och verifierades med EBSD, där kristallstrukturen hos respektive fas kontrollerades. Mätningarna utfördes i ett svepelektronmikroskop med en accelerationsspänning på 15 kV.

**Tabell 4. SSAB Oxelösunds prover per dag och respektive värmningstid. Siffror anger identifikationsnummer (L = låglegerad, H = Höglegerad)**

	Dag 1 Luft/LPG	Dag 2 CO <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub>	Dag 3 N <sub>2</sub> / N <sub>2</sub>	Dag 4 CO <sub>2</sub> /Ånga	Dag 5 N <sub>2</sub> /Ånga
120 min (L)	4	5	1	7	3
300 min (L)		6		9	
120 min (H)			2	8	
300 min (H)				10	

### Metod Ovako

En stålsort värmdes i 75 min varje dag försöken pågick, och fick sedan svalna i luft, se Tabell 5. Materialet vägdes före och efter värmning för att få ett mått på oxidation. Provbitarna levererades sedan till laboratorium hos Ovako och undersöktes metallografiskt. Bitarna gjöts in i plast och provbereddes genom slipning, polering och etsning.

Proverna undersöktes avseende oxidtjocklek och avkolningsdjup.

**Tabell 5. Ovakos prover per dag och respektive värmningstid**

	Dag 1 Luft/LPG	Dag 2 CO <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub>	Dag 3 N <sub>2</sub> / N <sub>2</sub>	Dag 4 CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	Dag 5 N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O
Prov 1	75 min	75 min	75 min	75 min	75 min

## AP 5. Processanalys

ScanArc ansvarade för processanalysen av plasmabaserad ämnesvärmning och genomfördes med stöd av framför allt KTH och Linde Gas. Den utgick från de frågeställningar som framkom i AP 2, resultat från pilotförsök, se bilaga 5 *Technical report*, samt från teknisk-ekonomisk analys, se bilaga 8 *Techno-economic analysis*. Analysen baserades också utifrån tidigare erfarenheter om

plasmateknik i industriella processer och de deltagande företagens samlade kunskap om förutsättningarna i stålindustrins värmningsprocesser.

Analysen syftade till att utvärdera hur tekniken kan implementeras industriellt i stålindustrins värmningsprocesser, samt identifiera vilka frågeställningar som bör angripas i ett nästa utvecklingssteg.

#### *Metod Höganäs*

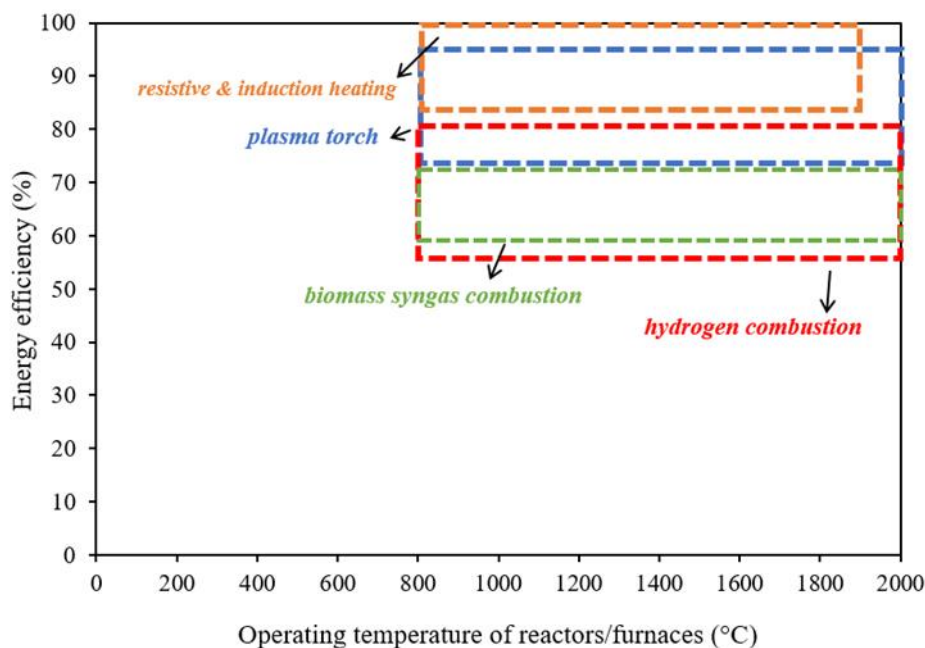
Medan övriga stålföretag utvärderade plasmateknikens påverkan på provmaterial, studerade Höganäs AB i stället de processmässiga förutsättningarna för att få en uppfattning om plasmatekniken passar deras specifika processer. Temperaturer, effektförbrukning och gasförbrukning var speciellt intressanta parametrar. Därför placerade en Höganäspecifik muffel med termoelement i ugnskammaren, där den bibehölls under hela provperioden. Höganäs loggade data i separat mätutrustning. Processdata analyserade i egen regi och i dialog med ScanArc, KTH och Linde gas. Utfallet presenteras lite mer detaljerat i bilaga 7 *Summary of PLATIS trials – External*.

#### **AP 6. Teknisk-Ekonomisk analys**

I AP 6 genomförde KTH en teknisk-ekonomisk analys av plasmauppvärmda ugnar. Analysen inkluderar ett scenario med enbart plasmauppvärmning och ett scenario med kombinationen plasmateknik och konventionella gasbrännare. Dessutom genomfördes en ekonomisk analys för att bedöma kostnaden för plasmavärmning i jämförelse med andra CO<sub>2</sub>-reducerande teknologier.

Figur 9 redovisas några potentiellt fossilfria uppvärmningsmetoder utifrån energieffektivitet och drifttemperatur. Det illustrerade området utgår från tillgänglig teknik och olika typer av konfigurationer. Normalt sett har en likströms-plasma, som testas i detta projekt, en lägre verkningsgrad än en växelströmsapplikation. För biogas och vätgas blir energieffektiviteten lägre än plasma, med hänsyn till omvandlingsförluster vid gasproduktion. När det gäller elektrisk resistiv och induktiv värmning är effektiviteten något högre än plasmavärmning. Däremot exkluderas dessa teknologier i den ekonomiska jämförelsen, då det sannolikt krävs större kapitalkostnad för ny design av befintliga ugnar. Plasmasystem och förbränningsprocesser med biogas eller väte bedöms lättare kunna implementeras i befintliga ugnar.

I bilaga 8, *Techno-economic analysis*, redovisas övriga för- och nackdelar med respektive uppvärmningsmetod.



**Figur 9. Jämförelse mellan olika värmningsteknologier**

Syftet med den teknisk-ekonomiska analysen är att öka den allmänna förståelsen för plasmateknik i uppvärmningsprocesser och föreslå en kostnadseffektiv teknisk lösning. För att uppnå resultatet innefattades även följande:

- Utvärdera effektiviteten för olika systemkonfigurationer och driftförhållanden.
- Analys av plasmaprocessens ekonomiska aspekter i jämförelse med andra CO<sub>2</sub>-reducerande processer och åtgärder.

#### *Metod*

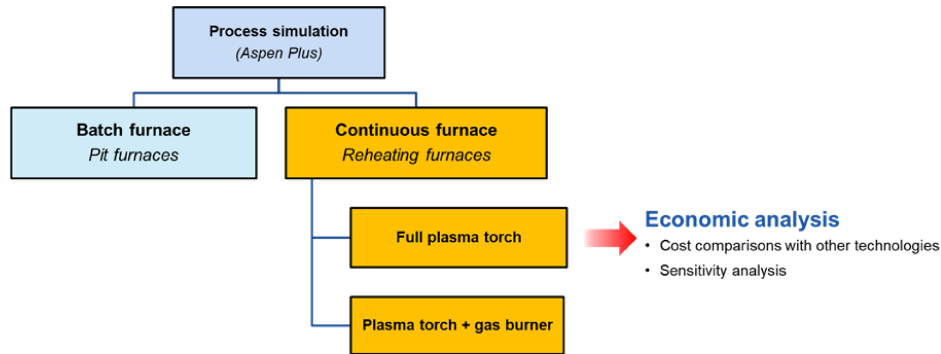
Arbetet delades in i två delar. Den första delen omfattade processsimuleringar med mjukvaruprogrammet Aspen Plus. I den andra delen utfördes ekonomiska beräkningar och analyser utifrån de resultat som erhöles vid simuleringar.

#### *Processmodellering och simulering*

Processsimuleringarna gjordes för två olika typer av värmningsugnar.

- En kontinuerlig omvärmningsugn
- En batchugn

Figur 10 beskriver upplägget på simuleringar och ekonomiska analyser.



**Figur 10. Upplägg av processimulering och ekonomiska analyser**

### Antagna driftförhållanden vid simulering av plasmateknik

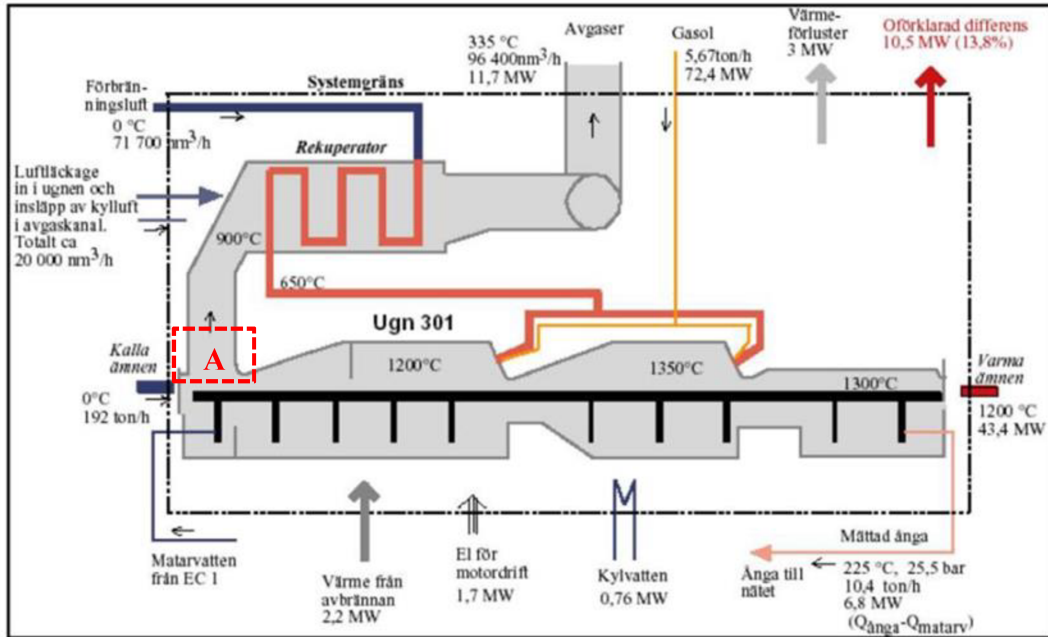
Plasmasystemet driftparametrar baserades huvudsakligen på resultaten från genomförda pilotförsök i AP3. Ytterligare inspel och rekommendationer från ScanArc beaktades också i simuleringen.

- Simuleringarna baseras på DC-plasma, d.v.s. med likströmsförsörjning. Omvandlingen från växelström antas till 92,5%.
- Plasmageneratorns maximala verkningsgrad antogs till 90 %, vilket motsvarar teoretisk verkningsgrad enligt ScanArc.
- Gasernas specifika entalpi antogs till 2 - 4 kWh/Nm<sup>3</sup>, som ett utfall av genomförda pilottester och analys.
- CO<sub>2</sub> antogs som plasmagas, som en slutsats av genomförda pilottester och analys.

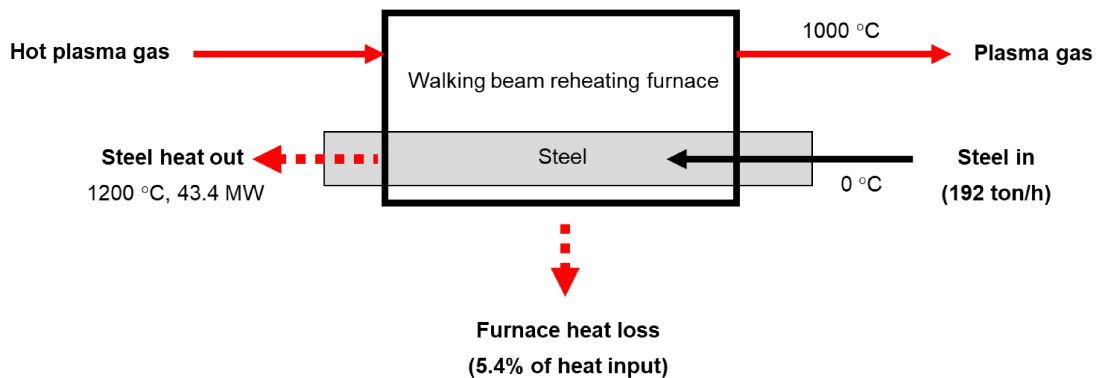
För detaljerad information se bilaga 8.

### Förutsättningar för simulering av kontinuerlig omvärmningsugn

Simuleringar av en kontinuerlig värmningsugn är baserad på SSAB Borlänges omvärmningsugn. I simuleringen antogs att plasmageneratorer ersätter befintliga gasbrännare i samma värmezonen och enligt samma fördelning. Därför förenklas processmodellen genom att anta att temperaturen i inloppsdel är 1000 °C (se punkt "A"), vilket därmed även blir simuleringens sluttemperatur. Plasmagasens temperatursänkning till 1000 °C är ett resultat av uppvärmning av 192 ton/h stål från 0 till 1200 °C med 5,4 % värmeförluster i ugnen enligt Figur 11. Utifrån erhållna uppgifter fastställdes den simulerade ugnens förutsättningar och driftförhållanden för plasma enligt Figur 12. Övriga antaganden presenteras i bilaga 8.



Figur 11. SSAB Borlänges omvärmningsugn U301, en momentan bild från cirka år 2000



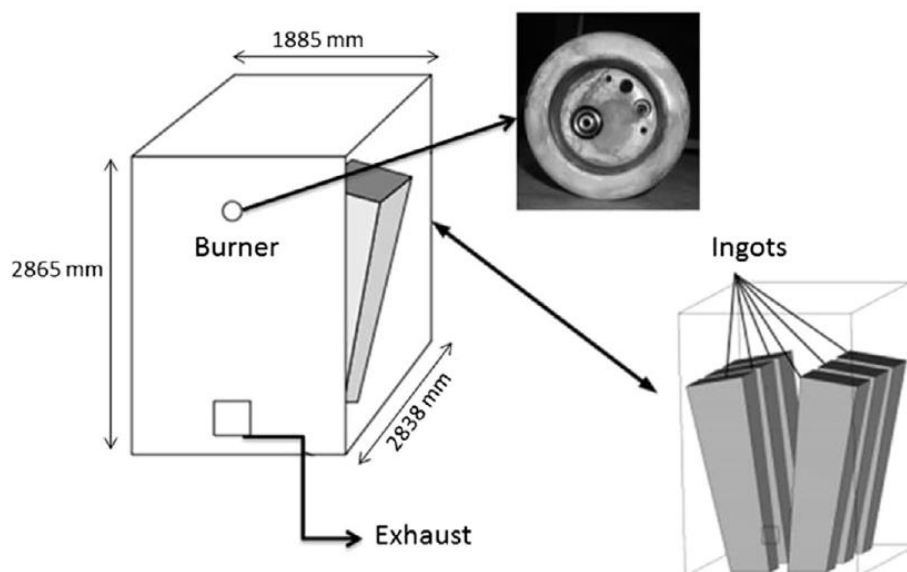
Figur 12. Förutsättningar och antagande för simulering av kontinuerlig omvärmningsugn

En simulering gjordes även för att undersöka prestanda i en kombinerad uppvärmningsprocess med plasmagenerator och gasbrännare. Gasbrännaren antas använda en syngas som framställt vid förgasning av biomassa.

#### Förutsättningar för simulering av batchugn

Ovakos gropugn utgör en fallstudie av en batchugn, se Figur 13. Befintlig oxy-fuelbrännare och avgaskanal är placerad på ugnens främre vägg för att förstärka en bättre rökgascirkulation. Brännarens termiska effekt är 560 kW. Totalt upphetas normalt sex 4,2 ton göt inne i kammaren. Göten värms upp från 900 till 1200 °C. Typiska driftfall presenteras i Tabell 6.

Övrig bakgrundsinformation och referenser, se bilaga 8.



Figur 13. Soaking pit furnace configuration and arrangement of the ingots

Tabell 6. Olika driftfall i befintlig gropugn

Driftfall	Energitillförsel propan	$\lambda$	Rökgas- temperatur
<b>Värmning av ugnen</b>			
Vid initial temp 900 °C	560 kW	1.02	~900 °C
Vid måltemp. 1200 °C	560 kW	1.02	~1200 °C
<b>Stabiliseringsperiod (°C)</b>	150 kW	1.02	~1200 °C

### Ekonomiska beräkningar

De ekonomiska beräkningarna utgick från en referensugn av typen kontinuerlig omvärmningsugn, d.v.s. en ugn enligt Figur 11, med antagandet att ett nytt värmesystem ersätter befintliga brännare i ugnen. Beräkning av kapitalkostnad bestämdes därför utifrån kostnaden för utrustning, exklusive kapitalkostnad för befintlig ugn. Ekonomiska analyser och jämförelser gjordes mellan följande potentiella tekniska lösningar för att begränsa koldioxidutsläpp.

- Plasmateknik
- Koldioxidinfångning och lagring med MEA-teknik
- Förbränning av vätgas och oxy-fuel



### Förutsättningar och antaganden för ekonomiska beräkningar

Ekonomiska beräkningar förutsätter följande. Övriga antagande samt bakomliggande information och beräkningar, se bilaga 8.

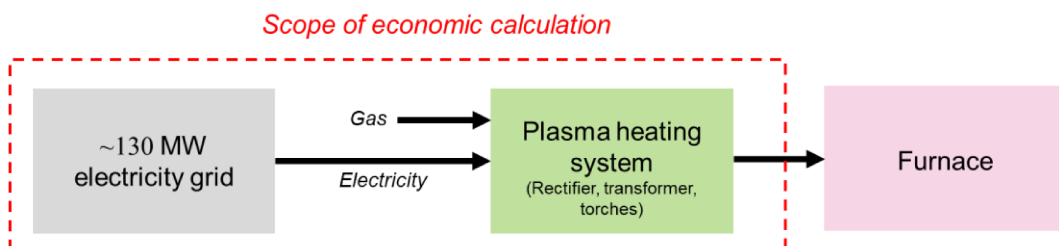
- Skala för simulerad kontinuerlig värmningsugn motsvarar SSAB:s omvärmningsugn med en maxkapacitet på 128 MW.
- Stålproduktionen 192 ton/h.
- Livslängd för det nya värmesystemet är 20 år.
- Kalkylräntan 8%.
- Elkostnaden 0,45 SEK/kWh.
- Gasol kostnaden 0,42 SEK/kWh.

### Referensugn med plasmateknik

I plasmascenariot baseras beräkningarna på extra kostnad för att utrusta befintlig ugn med plasmageneratorer. Beräkningen beaktar inte eventuell ekonomisk förlust för att stoppa produktionen under ombyggnadsprocessen. I scenariot används CO<sub>2</sub> som plasmagas, som recirkuleras under hela uppvärmningsprocessen. Inget läckage av CO<sub>2</sub> antas. Återcirkulation av CO<sub>2</sub> görs med hjälp av kompressorer. Den ekonomiska utvärderingen är genomförd utifrån antaganden i Tabell 7. Förutsättningar för beräkningen illustreras i Figur 14.

**Tabell 7. Antagna CAPEX-förutsättningar i plasmascenariot**

Post	Kostnad
Plasmasystem	3 MSEK/MW
Elnät	0.38 MSEK/MW
Design och projektledning	20 % av CAPEX + 1 MSEK
Underhållskostnad för plasmageneratorer (årlig)	3 % av CAPEX



**Figur 14. Förutsättningar för den ekonomiska beräkningen i plasmascenariot**

### Referensugn med MEA-teknik för koldioxidinfångning

I Tabell 8 presenteras antagna driftsförhållanden som användes för den ekonomiska analysen. Det bör noteras att fasta drifts- och underhållskostnaden för befintlig ugn har exkluderats. Total OPEX-kostnad för referensugnar tar därmed endast hänsyn till energikostnader och underhåll av befintliga brännare. Kostnad för brännarunderhåll antas vara 3% av brännarnas kapitalkostnad. Detta görs genom att anta att det aktuella priset är 0,32 MSEK/brännare, se bilaga 8.

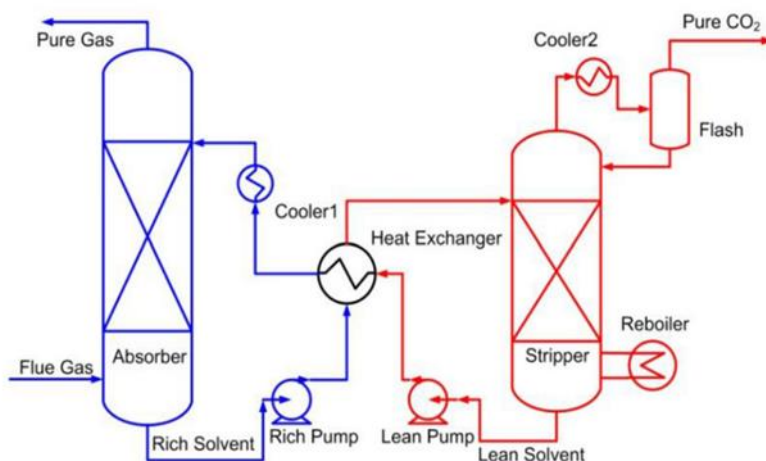
**Tabell 8. Antagande för referensugnens drifförutsättningar**

Drifförutsättningar	Värde
Maximal kapacitet	128 MW
Ämnesflödes hastighet	192 ton/h
Gasolkonsumtion	377 kWh/ton stål
CO <sub>2</sub> emissioner	82,9 kg CO <sub>2</sub> /ton stål

I scenariot med koldioxidavskiljning efter förbränning förutsätts en process baserad på monoetanolaminteknik (MEA) i slutet av rökgasströmmen, se Figur 15 och Figur 16. Denna teknik väljs som en av de mest anpassade teknikerna för ändamålet. CAPEX och OPEX i avskiljningsscenarioet bestäms av kostnadsparametrar i Tabell 9 och antagen avskiljningsgrad på 90%. Kostnad för transport och lagring antas till 223,4 SEK/ton CO<sub>2</sub>. Se övriga antaganden i bilaga 8.



**Figur 15. Förutsättningar för ekonomiska beräkning i MEA-scenariot**


**Figur 16. Processchema för en MEA-utrustningen**
**Tabell 9. CAPEX för MEA-anläggningen**

Post	Pris
Utrustning för förbehandling	48.2 MSEK
Utrustning för CO <sub>2</sub> -infångning	243.8 MSEK
Kompressor	197.3 MSEK
Kringutrustning	10.3 MSEK

### Referensugn med förbränning av vätgas och oxy-fuel

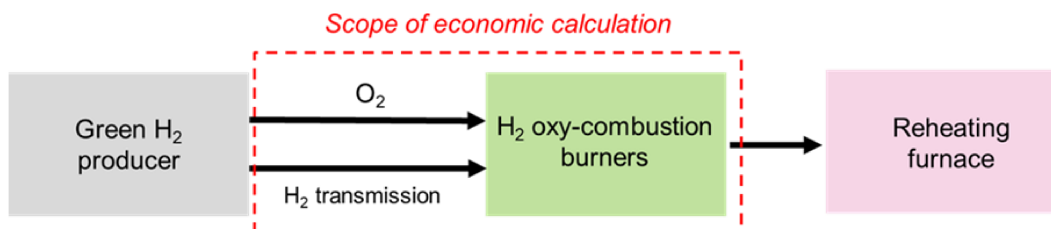
Scenariot innebär att befintliga brännarna ersätts med oxy-fuelbrännare för vätgas och användning av referensanläggningens befintliga värmeåtervinning enligt Figur 11.

Resultaten av simuleringen presenteras i Tabell 10. Det krävs 8,2 kg vätgas/ton stål för att värma stålslabs vid samma driftstemperatur som den befintliga processen. På motsvarande sätt behövs 67,4 kg syrgas/ton stål för en fullständig förbränning med 3% syrgasöverskott. Simuleringen ger en specifik energiförbrukning på 273,3 kWh/ton stål.

**Tabell 10. Resultat av simuleringen i vätgasscenariot**

Parameter	Value
Vätgasförbrukning	8.2 kg/ton stål
Syrgasförbrukning	67.4 kg/ton stål
Specifik energiförbrukning	273.3 kWh/ton stål

Antagna kapital- och rörelsekostnader anges i Tabell 11. I scenariot antas fossilfri vätgas som produceras och levereras av gasproducent till förbrukarstället, enligt Figur 17. Avståndet mellan vätgasanläggningen och förbrukarstället antas vara 50 km.



**Figur 17. Förutsättningar för ekonomiska beräkning i vätgasscenariot**

**Tabell 11. Kostnadsparametrar i vätgasscenariot**

Parameter	Value
Vätgaspris	25 SEK/kg
Syrgaspris	0.4 SEK/kg
Oxy-fuelbrännare	0.32 MSEK/brännare
Styrssystem	2 MSEK/zon
CAPEX för vätgasförsörjning	0.077 SEK/MWh <sub>H2</sub> /km

## Resultat

### AP 1. Omvärldsstudie

Utifrån litteraturstudien kan det konstateras att DC-plasmageneratorer är den mest använda plasmotypen för industriella processer. Det är betydligt lämpligare i jämförelse med andra typer av termisk plasma på grund av den alstrar mindre flimmer i elnätet, den är tystare, har bättre reglerbarhet och stabilare drift, har lägre energi och elektrodförbrukning samt sliter mindre på eldfast material.

I dagsläget används i huvudsak termisk plasma i smältugnar, som en del av den metallurgiska processen. Processen kan i dagsläget anses som mogen och kan hantera ett brett spektrum av metalliska material.

Gruv, järn- och stålindustri utvärderar för tillfället flera innovativa idéer att använda termisk plasma, med syfte att försöka minska koldioxidutsläppen. Några möjliga tillämpningar omfattar härdning av järnmalmspellets eller ersätta konventionell masugn, elektrisk ljusbågsugn samt fossileldade skänkfövärmare. De flesta applikationerna befinner sig fortfarande i ett tidigt utvecklingsskede eller i pilotskala. Studien har inte kunnat identifierat någon förekommande tillämpning av termisk plasma i ugnar för värmning av stål.

Utanför metallurgiområdet har termiska plasma i stor utsträckning anpassats för plasmaförgasning, med syfte att omvandla avfall till energi. Ett antal plasmatillverkare har med framgång utvecklat storskalig förgasare, men fortfarande är antalet kommersiella plasmaförgasare för avfallshantering relativt begränsat runt om i världen. Det pågår även ett svenskt projekt med syfte att nyttja plasmatekniken i cementindustrins ugnar. Arbetet är fortfarande i ett tidigt skede och resultaten från pilotförsök är ännu ej offentliga.

I metallurgiska processer med plasmateknik används oftast inerta gaser som energibärare, framför allt argon och kväve. I förgasningsprocesser med plasmateknik utgör ofta luft och ånga energibärare.

För tillämpning av plasmateknik i värmningsugnar krävs grundlig utvärdering av förutsättningar och driftsparametrar. Detta gäller särskilt vid val av energibärare, s.k. plasmagas. Utifrån tidigare erfarenheter är det känt att direkt byte från konventionella brännare till plasmageneratorer i luftatmosfär potentiellt ökar NO<sub>x</sub>-emissionerna. Termisk NO<sub>x</sub>-bildning kan i huvudsak härledas till kombinationen av hög temperatur, luftens kväveinnehåll och fritt syre.

Tillsats av vätgas eller ånga kan eventuellt förhindra alstring av termisk NO<sub>x</sub>. Vid höga temperaturer (>1000 °C) kan dock närvaro av ånga avsevärt öka oxidationshastigheten för vissa eldfasta material och stålmaterial. Det kan påverka ugnens funktion negativt, liksom kvalitet på uppvärmda stålprodukter.

Generellt sett har implementering och användning av termisk plasmateknik på industriell nivå ofta motverkats av några vanligt förekommande utmaningar. Det har ofta orsakats av en relativt ny teknik som inneburit höga kapital- och driftskostnader, processen är mycket energikrävande, begränsad teknisk och samhällelig mognadsgrad, begränsad kommersialiseringsgrad etc.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att det saknas information om hur plasmatekniken kan nyttjas för elektrifiering av konventionella industriella ugnar. Dagens tillämpningar och applikationer med termisk plasma är inriktade på de metallurgiska processerna, där plasmageneratorer används för att ersätta andra el-baserade värmekällor.

Informationen om hur termisk plasma kan användas för att ersätta brännare av fossila bränslen i andra processindustrier är begränsat. Även om termiska plasma har uppvisat lovande potential, behövs fortsatt utveckling på koncept-, simulerings-, labb- och pilotstadiet för att kunna aktualisera användning i industriella värmningsugnar, exempelvis värmningsugnar för stål.

Omvärldsstudien i sin helhet inklusive källor presenteras i Bilaga 3, *Applications of thermal plasma torches for industrial furnaces: A review*.

## AP 2. Identifiering av industrins förutsättningar och utvärdering av möjliga bär-gaser

### *Industrins processer - nuläge*

De deltagande industriföretagen redovisade vilka värmningsprocesser som enligt egen bedömning kan utvärderas för hel eller delvis konvertering till plasmateknik som värmekälla. Processer som lyftes upp var:

- Förvärmning av skänkar och gjutlådor
- Förvärmning av skrot i ljusbågsugn
- Värmebehandlingsprocesser som normalisering, glödning, anlöpning, austenitisering och fastfasreduktion
- Ämnesvärmning inför valsning, smide eller annan bearbetning

Processer av batchtyp förekommer i ljusbågsugn, skänk, kammarugn och gropugn där den nominella effekten finns inom intervallet 0,5 MW till 10 MW. Andra processer är kontinuerliga där exempel på ugnar är stegbalksugn, genomskjutningsugn, rullugnar, tunnelugn, bandugn och glödgningsugn. Den nominella effekten finns inom det högre intervallet 5 MW till 152 MW.

Dagens bränslen är gasol, naturgas, eldningsolja eller oförbränd processgas från annan process, i kombination med luft, luft-syre eller syre som oxidationsgas. I de flesta fall rör sig den normala drifttemperaturen i intervallet 900 - 1300 °C och ugnsatmosfären har en syrehalt inom intervallet 1 – 5 %, bortsett från en värmebehandlingsprocess som har en syrehalt uppemot 15 %.

De provmaterial som deltagande företag önskar utvärdera är ämnen eller utrustning/material som idag värms i någon av de angivna ugnprocesserna: stålämnen, plåt, muffel, eldfast tegel och gjutmassa.

### *Tillgängliga gaser*

I plasmabaserad värmning används en bär-gas som värms i plasmaenheten (plasmagas), det är den gas som används för att överföra elektrisk energi till värme i processen. Plasmagasen behöver vara fri från partiklar, samt ha normal rumstemperatur och ett övertryck. Ytterligare en eller flera andra gaser tillsätts i en forma (formagas) framför plasmaenheten. Den resulterande ugnsatmosfären är summan av plasmagas och formagas.

Formagasens syfte varierar efter processens behov. Det kan vara injektion av gasol för att kontrollera NO<sub>x</sub>-bildningen, injektion av pulver eller utspädning av plasmagasen för att ge en mer homogen temperaturprofil. Formagasen är mer tillåtande, den kan ha en högre temperatur och behöver ej vara partikelfri. Det möjliggör injektion av gas som inte kan användas direkt i plasmaenheten, t.ex. ånga eller recirkulation av varm processgas.

En översyn av industrins tillgängliga gaser gjordes, primära och sekundära gasflöden i egna och närliggande processer inklusive tillgänglighet och andra

förutsättningar. Underlaget användes för att fastställa vilka gaser som var aktuella som plasmagas och formagas i pilotförsöken.

### **Luft och syre med gasformiga eller flytande bränslen**

Luft eller syre i kombination med gasformiga eller flytande bränslen finns tillgängligt och används idag i de flesta företagens värmningsprocesser. Ett försök med luft och gasol förutsattes som ett referensförsök för jämförelse med befintlig förbränningsteknik. Luft kan användas som plasmagas, och en luft-gasol-blandning används som formagas.

### **Kvävgas**

Kvävgas finns tillgängligt på samtliga företag. Det är en intressant gas ur perspektivet att skapa en inert och syrefri atmosfär för slutna ugnar. Kvävgas kan användas både som plasmagas och formagas.

### **Koldioxid**

Koldioxid inte tillgängligt på något företag idag. Den är dock liksom kvävgas en intressant gas ur perspektivet att skapa en inert och syrefri atmosfär för slutna ugnar. Koldioxid förväntas också ge en högre effekt i plasmaenheten. Koldioxid kan användas både som plasmagas och formagas.

### **Vätgas**

Vätgas finns tillgänglig på några industrieföretag. Vätgas används i första hand som formagas men bör med omsorg kombineras med val av plasmagas ur ett säkerhetsperspektiv.

### **Ånga**

Överhettad eller mättad ånga finns tillgänglig på flertalet industrier. Ånga är intressant att testa avseende pris, tillgänglighet och en förväntat god värmeöverföring.

### ***Stålföretagens frågeställningar***

I samband med undersökningen ombads företaget nämna sina frågeställningar kring plasmateknik och dess applikation i stålindustrins ugnar. Svaren redovisas nedan och användes som ett underlag inför planering av pilotförsöken och behovet av mätningar.

### **Materialpåverkan**

Vid konvertering till plasmavärmning skapas en möjlighet att förändra ugnsatmosfären och samtidigt bibehålla andra parametrar som driftstemperatur och behandlingstid. Vissa batchprocesser eller slutna processer kan skydda ugnsatmosfären mot omgivande atmosfär, vilket gör det intressant att utvärdera värmning i annan gas än vad som sker idag. Andra öppna och kontinuerliga processer är föremål för en delvis konvertering till plasmateknik.

Materialpåverkan och glödskausbildning är viktiga parametrar att studera, och därför är det viktigt att minimera mängden läcksyre som förhindrar en atmosfär av exempelvis ren kvävgas eller koldioxid.

Förvärmning av skänkar, gjutlådor eller skrot inför smältning i ljusbågsugn orsakar ingen materialpåverkan på stålprodukten. Däremot påverkar ugnsatmosfären infodring och dess slitagebild. Att utvärdera detta är inte aktuellt inom ramen för detta projekt.

### **Temperaturjämnhet och hot spots**

En jämn uppvärmning, homogen temperaturprofil och undvikande av hot spots eftersträvas i försöken. Det ger information om vilken avvägning som krävs mellan plasmagas och formagas, där ett väl avvägt förhållande skapar en temperaturjämnhet i ugnen. Det är också viktigt att utrusta ugnen med termoelement så temperaturprofilen kan utvärderas.

### **NO<sub>x</sub>-bildning**

Många företag lyfter upp behovet av att studera processens NO<sub>x</sub>-bildning, då den har en negativ inverkan på både hälsa och miljö. För de flesta industriella processer likt stålindustrins värmningsprocesser omfattas NO<sub>x</sub>-utsläpp av tillståndsgivna villkor och behöver kontinuerligt övervakas. Särskild utrustning installerades för att mäta NO<sub>x</sub>-halter i avgaserna under försöken.

### **Val av gaser till pilotförsöken**

Baserat på industrins tillgängliga gaser och identifierade önskemål och frågeställningar fastställdes ett testprogram med val av gaser och ugnsatmosfär. I Tabell 12 ses de bärgaser som användes per försöksdag. Ugnens atmosfär är summan av plasmagas och formagas.

**Tabell 12. Bärgaser som användes per försöksdag.**

Testdag	Plasmagas	Formagas
1	Luft	Luft och gasol
2	Koldioxid	Koldioxid
3	Kvävgas	Kvävgas
4	Koldioxid	Koldioxid + ånga
5	Kvävgas	Kvävgas + ånga

Testdag 1 med luft och gasol syftade till att vara ett referensförsök med 3% överskottssyre. Syftet var att skapa förutsättningar som efterliknade deltagande företags värmningsprocesser.



Testdag 2 och 3 syftade till att skapa ugnsatmosfärer utan närvaro av fritt syre. Det ger förutsättningar att studera glödskausbildning jämfört med dagens industriella processer samt skapa förutsättningar för minimal NO<sub>x</sub>-bildning.

Testdag 4 och 5 syftade till att införa ånga som komplement till en syrefri ugnsatmosfär. Glödskausbildning och NO<sub>x</sub>-bildning vid närvaro av ånga är intressant att studera. Ånga har även en teoretiskt god värmeöverföring.

### **AP 3. Pilotförsök**

De fem testdagarna utfördes enligt utsatt plan. Resultatet från experimentförsöken är insamlade data och behandlade stålprover som utgör grunden till projektets process- och materialanalys. Processdata sammanställdes i bilaga 5, *Technical report*.

#### *Resultat process och teknisk prestanda*

Den testspecifika utrustningen, såsom ugn, kringutrustning och plasmasystem, fungerade mycket väl och gav delvis ett gott underlag för att utvärdera värmningsprocessen utifrån ett industriellt perspektiv. Specifika observationer och avvikelser att lyfta fram är följande:

- Forman som användes är optimerad för luft/gasol-blandning där forman agerar som en blandningskammare. På grund av behovet av omblandning har forman större tillgänglig yta som också kyler gasen. Vid användning av andra gaser utan krav på omblandning behövs inte denna större yta, och därför är kylförlusterna onödigt stora.
- Läckluft in i ugnskammaren detekterades tidigt och visade sig vara en utmaning att hålla nere i samtliga tester. Det resulterade i att ugnsatmosfären hade högre O<sub>2</sub>-halter än avsett. Det innebar i sin tur att NO<sub>x</sub>-bildningen ökade markant. Detta är särskilt tydligt under försöken med N<sub>2</sub> och CO<sub>2</sub>, då det teoretiskt vid optimala förutsättningar och utan läckluft hade inneburit minimal NO<sub>x</sub>-bildning.
- Under pågående test öppnas luckorna vid flertal tillfällen för att ta in och ut prover. Luckorna deformerades under pågående tester och blev svårare att stänga. Det var en stor bidragande faktor till ovanstående observation om läckluft till ugnskammaren. Att öppna luckorna under pågående test var dock oundvikligt för att kunna genomföra testet.

#### *Resultat processövervakning och datainsamling*

Övervaknings- och analysutrustningen möjliggjorde nödvändig datainsamling för processanalys och utvärdering. Specifika observationer och avvikelser att lyfta fram är följande:

- Ett bord i ugnen, med lämplig höjd för enklare hantering av in- och uttag av prover, hade byggts upp av isolerade stålbalkar. Efter två testdagar kollapsade dock borden och istället byggdes nya upp av tegel. Tyvärr gick ett av

termoelementen sönder vid haveriet, vilket gav något mindre information till efterföljande processutvärdering.

- Installerad tryckmätare i ugnskammaren gav ej korrekta värden och ingen data finns därför tillgänglig i efterhand.

I bilaga 4, *PLATIS Pilotförsök Testdag 1 – 5*, ses en sammanställning av respektive testdag. De data som presenteras i bilagorna ligger till grund för processanalys- och utvärdering i AP5.

#### *Resultat provhantering och testprocedur*

Syftet med pilotförsöken var, utöver att möjliggöra för en teknisk processanalys, att leverera behandlade stålprover för vidare utvärdering. Stålproverna var uppvärmda till måltemperaturen 1150°C och uppehölls i den temperaturen under önskad tid. Proceduren upprepades för varje testdag. Provhantering av stålämnen utfördes enligt plan vilket möjliggjorde fortsatt materialanalys. En avvikelse att lyfta fram är följande:

- Vid testdag 3, med kvävgas som plasma- och formagas, tog förvärmningsfasen lång tid. Man bytte då gas till luft/gasol för att snabbare nå jämviktstemperaturen på 1150°C. Därefter byttes det tillbaka till kvävgas. Försöket genomfördes därefter i sin helhet med kvävgas, och ingen provbit exponerades för luft/gasol-atmosfär annat än de som var permanent installerade i ugnen.

#### **AP 4. Materialanalys**

Nedan redogörs betydande resultat och slutsatser av stålföretagens materialanalyser. För mer detaljerad information se bilaga 6, *Sammanställning av utförda materialanalyser inom projekt PLATIS*.

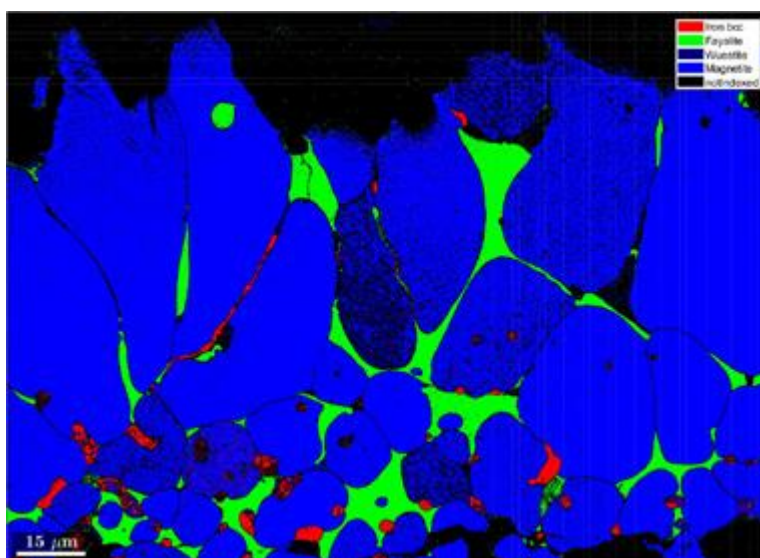
#### *Resultat SSAB Borlänge*

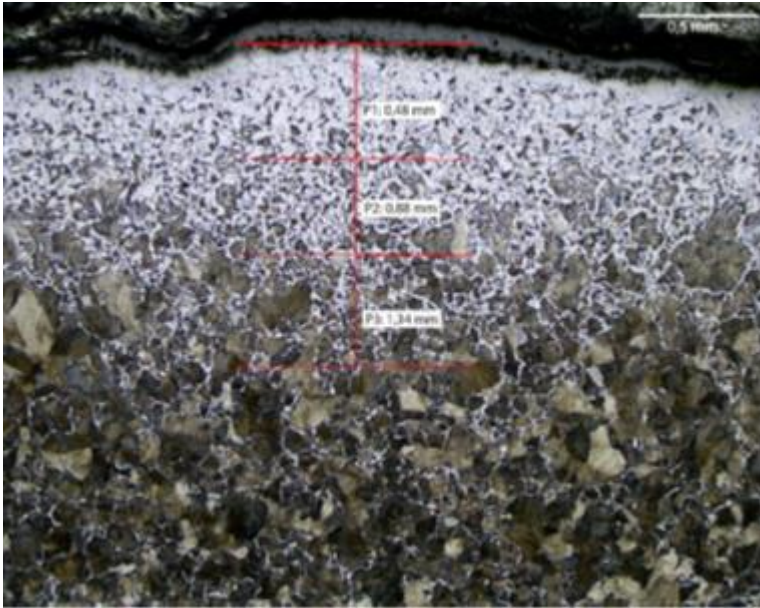
Provbitarna vägdes före och efter uppvärmning i 60 respektive 120 minuter, för att ge ett mått på oxidtillväxt då syre upptas vid oxidation och totalvikten därmed ökar. Proverna som undersöktes i SEM-EBSD ger oxidernas fasandelar och man får svar på vilka oxider som bildas. Resultatet från undersökningen visar förekomst av tre olika järnoxider, FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> och Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> med namnen wustit, magnetit respektive hematit. Sett från stålytan ligger wustit först och hematit sist och avspeglar andelen syre där den yttersta fasen hematit är närmast ugnens atmosfär och därmed högsta syrehalt. Hematit kunde dock bara ses i ett av proverna. En annan fas som bildades är fayalite som är en olivin som bildas över 1173 °C tillsammans med wustit, FeO/Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. I Figur 18, där stålytan är längst ned, kan oxidens faser ses som en EBSD-mappning där olika faser har olika färg. Bilden är från dag 2, prov 120 minuter.

I Tabell 13 summeras resultaten per dag för oxidtillväxt i gram, oxidernas fasandelar och avkolningsdjup i de tre zonerna P1, P2 och P3. Avkolning och de tre zonerna kan ses i Figur 19, som är från dag 2, prov 120 minuter.

**Tabell 13. SSAB Borlänges resultat för oxidation och avkolning**

Tid (min)	Dag 1 Luft/LPG		Dag 2 CO <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>		Dag 3 N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>		Dag 4 CO <sub>2</sub> /Ånga		Dag 5 N <sub>2</sub> /Ånga	
	60	120	60	120	60	120	60	120	60	120
<b>Vikt (g)</b>										
Före	2491	2374	2352	2383	2389	2281	2321	2368	2321	2298
Efter	2519	2420	2376	2421	394	2288	2337	2404	2327	2317
Viktökning, %	1.1	1.9	1.0	1.6	0.2	0.3	0.7	1.5	0.3	0.8
<b>Faser andelar i oxidskikt (%)</b>										
Fayalite		13.22		7.79		10.8		8.9		23.19
Wustit		13.06		6.38		2		8.12		1.89
Magnetit		72.86		86.73		0.13		82.81		75.36
Hematit		1.08		--		89.8		--		--
<b>Avkolningsd jup (mm)</b>										
P1										
P2		0.53		0.47		0.57		0.46		0.54
P3		0.86		0.83		1.27		0.79		1.08
		1.21		1.34		1.75		1.13		1.69


**Figur 18. Oxidytan dag 2, prov 120 minuter.**



**Figur 19. Avkolning dag 2, prov 120 minuter.**

Det kvarvarande skiktet om ca 100 - 150  $\mu\text{m}$  prövades att avlägsnas genom betningsförsök, men trots längre tid i betbadet kunde glödskalet ej avlägsnas fullständigt. Ingen tydlig skillnad mellan proverna kunde noteras så det kan antas att detta var atmosfäroberoende. En möjlig orsak är att kylningen av proverna skedde i rumstemperatur och utan glödskalsspolning, så att glödskalet blivit alltför intakt och bundet till grundmaterialet.

Några observationer från undersökningen

- Magnetit är den vanligaste förekommande fasen. Mest wustit fanns i provet som värmdes med luft/gasol, vilket också var det enda provet som visade på förekomst av hematit. Osäkert om det beror på att atmosfären innehöll mest syre vid detta tillfälle, innan ugnsluckorna tätades.
- Värmning i  $\text{CO}_2$  ger de största magnetit-kornen medan tredje dagens värmning med  $\text{N}_2/\text{N}_2$  gav de minsta magnetit-kornen
- Det största avkolningsdjupet förekom med  $\text{N}_2/\text{N}_2$ -atmosfär följt av  $\text{N}_2/\text{Ånga}$ . Minsta avkolningsdjupet förekom då dag 2 och 4 och tillförsel av  $\text{CO}_2$ .
- Fayalite följer magnetitkornens korngränser och ankrar mot stålytan, vilket ofta brukar ge en svåravlägsnad oxid. Bildas i stål som innehåller Si.

### **Resultat Outokumpu Stainless**

För att få ett mått på oxidationshastigheten så vägdes provbitarna före och efter uppvärmning i 60, 120 respektive 180 minuter. Kylning av proverna skedde i kvävgas för att minska fortsatt oxidbildning. Dubbelprover från respektive provbit betades från respektive yta på provbiten, dels den råa slabsytan, dels en sågad yta. Skillnaden här är att slabsytan redan har oxid från stränggjutningen medan den

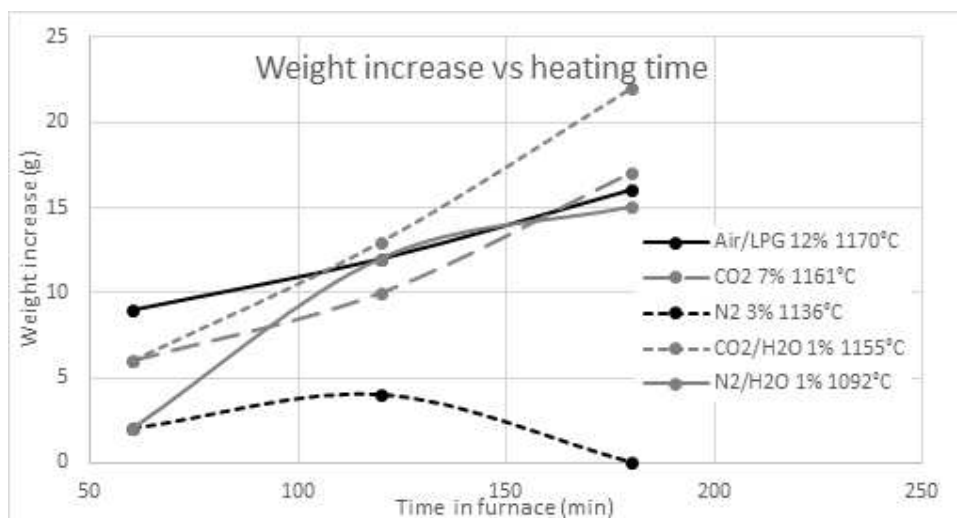
sågade ytan är oxidfri, d.v.s. den ena ytan bygger oxid på befintlig gjutoxid och den andra ytan bygger oxid på en oxidfri yta. Ytor värmda i 60 respektive 180 minuter utvärderades. Resultaten kan ses i Tabell 14 avseende viktökning under värmning, viktförlust under betning och oxidtjocklek efter värmning och kylning.

I Figur 20 kan man se viktökning sammanställt mot tid.

Viktminskningen under betning ger en indikation på hur mycket oxid som avlägsnats, och blir därför ett mått på hur oxiderade proverna är (resultat i Tabell 14). Tiden som det tar att avlägsna oxiden ger ett mått på hur enkel oxiden är att avlägsna vilket kan vara ett mått på både vidhäftning samt mängden oxid.

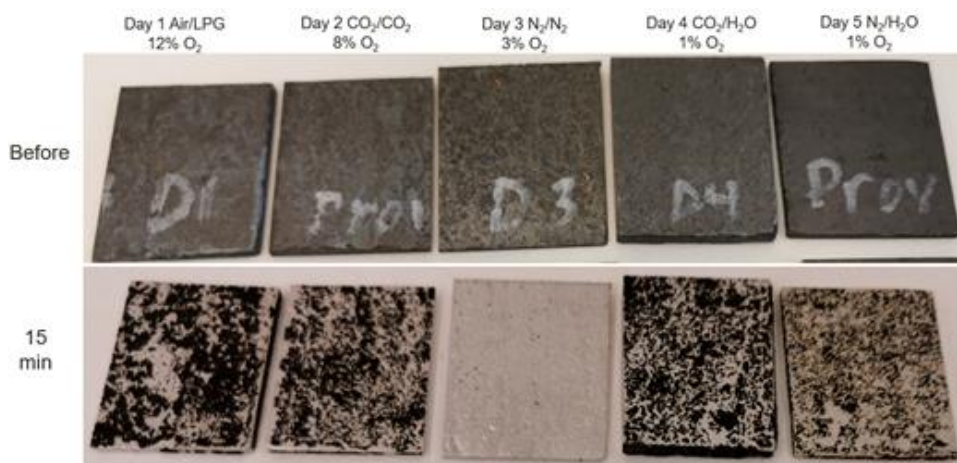
**Tabell 14. Outokumpus prover inkl. viktökning (värmning), tidsperiod till oxidfri (betning, medel dubbelprov) och oxidtjocklek**

	Dag 1 Luft/LPG	Dag 2 CO <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub>	Dag 3 N <sub>2</sub> / N <sub>2</sub>	Dag 4 CO <sub>2</sub> /Ånga	Dag 5 N <sub>2</sub> /Ånga
<b>Viktökning (g)</b>					
1 timme	9	6	2	6	2
2 timmar	12	10	4	13	12
3 timmar	16	17	0	22	15
<b>Betning (60 min värmning)</b>					
Slab yta (tid till oxidfri min)	27.5	22.5	10	30	14
<b>Betning (60 min värmning)</b>					
Kapad yta (tid till oxidfri min)	22.5	15	9	27.5	15
<b>Betning (180 min värmning)</b>					
Slab yta (tid till oxidfri min)	42.5	42.5	20	92.5	47.5
<b>Betning (180 min värmning)</b>					
Kapad yta (tid till oxidfri min)	52.5	52.5	20	80	40
<b>Oxidtjocklek (60 min värmning)</b>					
Slab yta (µm)	19±5	17±9	5±5	59±17	34±17
<b>Oxidtjocklek (180 min värmning)</b>					
Slab yta(µm)	240±99	159±91	24±28	230±54	164±27



Figur 20. Vikttökning mot värmningstid för respektive plasma- och formagas (dag).

I Figur 21 ses ett exempel på 15 minuter betade ytor, ytor som värmts 180 minuter i de olika ugnsatmosfärerna vilka orsakas av de olika plasma- och formagaserna.



Figur 21. Slabsyta (värmad 180 minuter), inspektion efter 15 minuters betning.

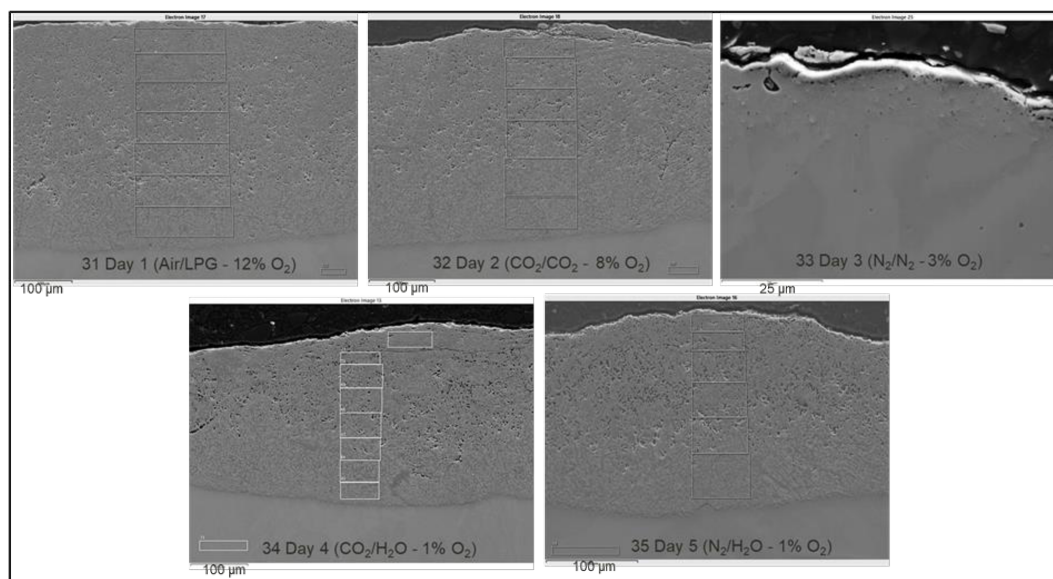
Oxiden studerades i både ljusoptiskt mikroskop samt i svepelektronmikroskop (FEG-SEM). Oxidens kemiska sammansättning analyserades med hjälp av EDS i FEG-SEM. På proven som värmdes 60 minuter kännetecknas oxiden av:

- Varierad oxidtjocklek på respektive prov längs den oxiderade ytan.
- Tunnare oxidlager är laminerade där mörkare partier har hög Cr-halt och där man kan se ljusare områden som inte är oxiderade med hög Ni-halt.
- Mestadels tunnare oxidlager över ytorna förutom för CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O (1% O<sub>2</sub> 1151°C) och N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O (1% O<sub>2</sub> 1057°C).
- Längs ytan, där oxiden är tunnare, visar analysen på ett tydligt inre Cr-rikt oxidlager med Cr-nivåer över 40 viktprocent.

På proven som värmdes 180 minuter fanns inga tunna laminerade oxidområden. Oxiden på N<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> proven (3% O<sub>2</sub>, 1124°C) var mycket tunnare jämfört mot oxiden på övriga prov, se oxidtjockleks resultat i Tabell 14 samt exempel i Figur 22.

Efter 180 minuters värmning är oxiderna generellt sett mycket tjocka.

Dag 3 som värmdes med kvävgas som både plasma och formagas sticker ut, då krominnehållet är över 75% och oxiden är väldigt tunn. Nämnvärt är att temperaturen bara kom upp i 1124 °C, vilket givetvis påverkar oxidationen som är starkt temperaturberoende vid så höga temperaturer.



**Figur 22. Exempelbilder på oxid, 180 min värmda slabsytor, i FEG-SEM**

Oxidtjockleken mättes med hjälp av ljusoptiskt mikroskop på tvärsnitt av oxiderna (förutom på 60 minuters oxiderade sågade ytor då några av dessa oxider var för tunna för att mäta i ljusoptiskt mikroskop), se Tabell 14.

### Resultat SSAB Oxelösund

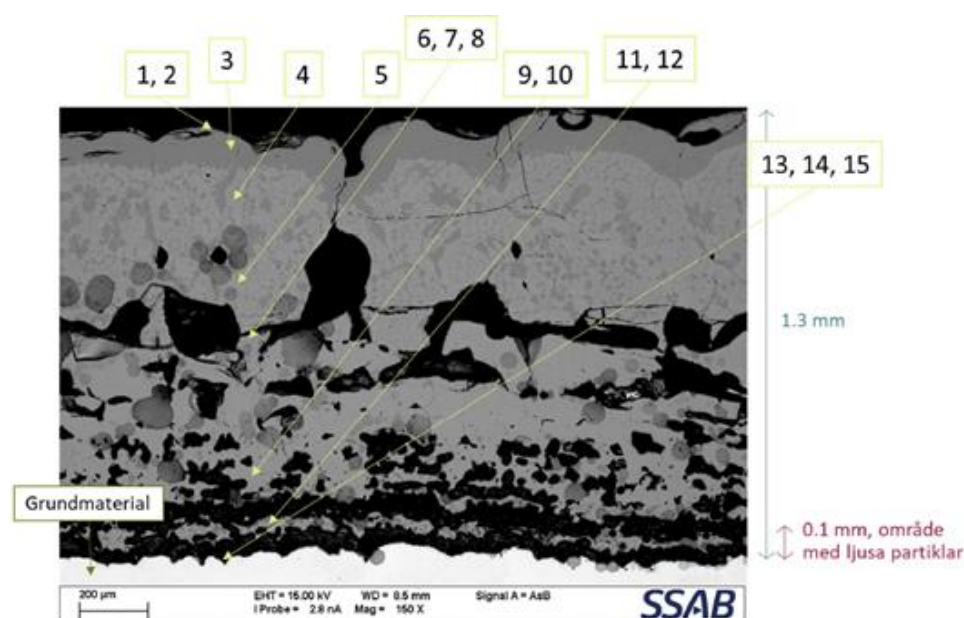
Provbitarna vägdes före och efter uppvärmning i 120 respektive 300 minuter, för att ge ett mått på oxidtillväxt då syre upptas vid oxidation och totalvikten därmed ökar. Viktökningen i gram och andel kan ses i Tabell 15.

**Tabell 15. Viktökning på SSAB Oxelösunds prover**

	Dag 1 Luft/LP G	Dag 2 CO <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub>		Dag 3 N <sub>2</sub> / N <sub>2</sub>		Dag 4 CO <sub>2</sub> /Ånga		Dag 4 CO <sub>2</sub> /Ånga		Dag 5 N <sub>2</sub> /Ånga
Tid (min)	120 (L)	120 (L)	300 (L)	120 (L)	120 (H)	120 (L)	300 (L)	120 (H)	120 (H)	120 (L)
Vikt (g)										
Före	2058	2116	2252	2512	1939	2513	2212	2014	1926	2434
Efter	2102	2172	2620	2529	1953	2562	2284	2056	1991	2458
Viktökning, %	2.1	2.6	3.9	0.6	0.7	1.8	3.3	1.9	3.4	0.9

Proverna som undersöktes i SEM-EDS och EBSD gav information om glödskalets sammansättning och vilka oxider som bildades.

Prov 7, som värmdes dag 4 med CO<sub>2</sub>/ånga i 120 minuter och bestod av det lägre legerade stålet, hade en tjocklek på oxidskiktet på 1,3 mm och består av olika oxider med olika sammansättning. Det översta skiktet är hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) och är ca 10 µm tjockt. Därefter kommer nästa skikt som består av magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) som är ca 100 µm tjockt. Sedan kommer ett lager blandat mellan magnetit och wustit (FeO) ca 500 µm tjockt. Efterföljande lager är mer porösa och består huvudsakligen av wustit med inslag av magnetit och fayalite, Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, och i ett ca 100 µm poröst lager finns små ljusa partiklar som har en hög halt nickel. I Figur 23 kan man se en SEM-bild på prov 7:s oxidskikt. Markeringarna är de platser där analyser gjorts med SEM-EDS. I Tabell 16 kan man se resultaten av analyserna. I Figur 24 kan man se resultatet av en EBSD-mätning där fasen fayalite (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) påträffats.



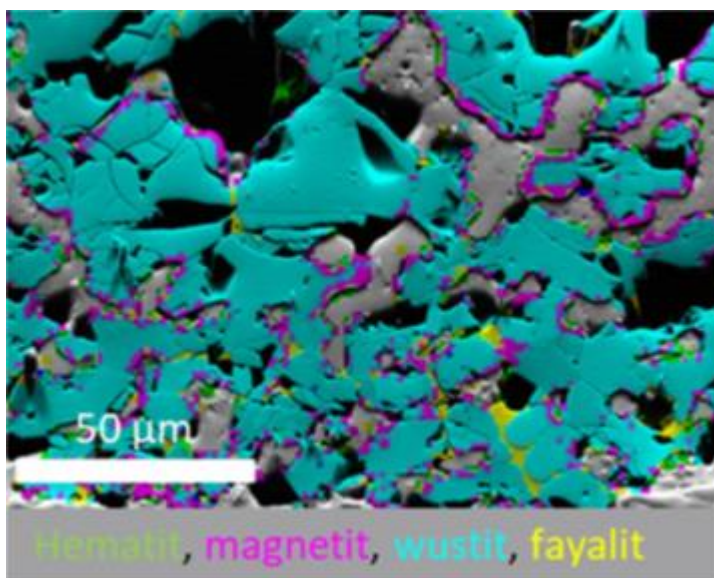
Figur 23. Bild på prov 7 oxidskikt och markeringar där analyser gjorts.

Tabell 16. Analysresultat.

Mätning	Sammansättning	Oxid	Övriga ämnen i viktprocent
1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematit	0.4 % Mn, 3.7 % C
2	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetit	0.9 % Mn, 3.7 % C
3	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetit	1.0 % Mn, 2.5 % C
4	FeO	Wustit	1.4 % Mn, 2.6 % C
5	FeO	Wustit	1.3 % Mn, 2.8 % C
6	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetit	1.3 % Mn, 2.8 % C
7	FeO	Wustit	1.2 % Mn, 3.0 % C
8	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetit	0.7 % Mn, 2.9 % C

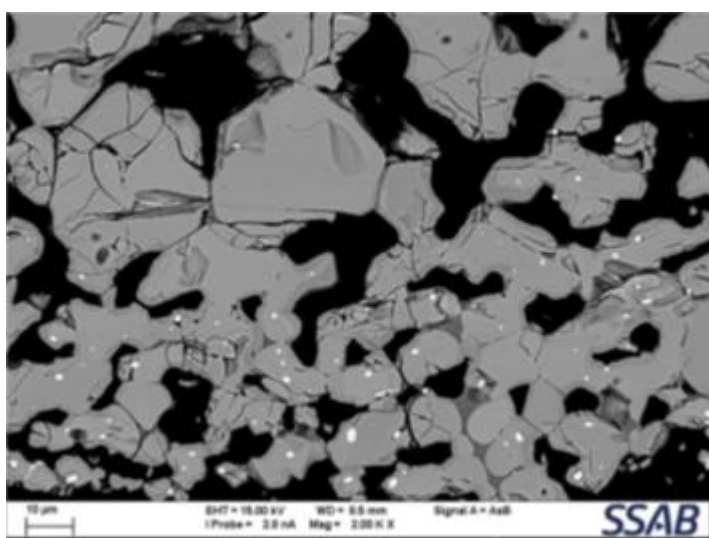


9	FeO	Wustit	1.2 % Mn, 0.2 % Si, 2.6 % C
10	Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Fayalite	3.6 % Mn, 0.8 % P, 2.7 % C
11	FeO	Wustit	1.1 % Mn, 0.2 % Si, 2.3 % C
12	Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Fayalite	2.6 % Mn, 0.7 % P, 3.6 % C



**Figur 24. EBSD-analys, prov 7.**

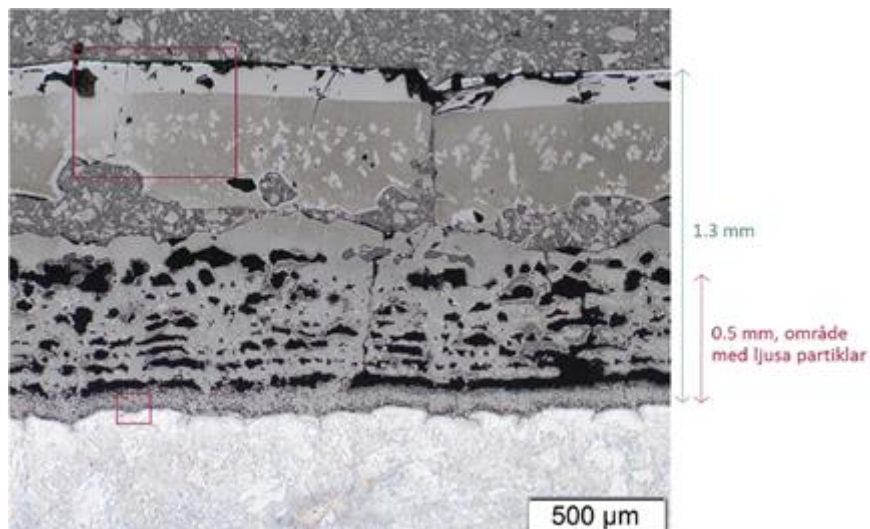
I Figur 25 kan man se samma område som i Figur 24 ovan, men i en SEM-bild där de ljusa partiklarna är nickelhaltiga.



**Figur 25. SEM-bild av prov 7**

Prov 8, som värmdes dag 4 i CO<sub>2</sub>/ånga i 120 minuter och bestod av högre legerat stål, undersöktes endast med ljusoptiskt mikroskop och en jämförelse gjordes med prov 7. Den polerade ytan etsades med 2% Nital hos båda proven för att framhäva de olika faserna i oxidskiktet. Oxiden på prov 8 har en tjocklek på ca 1,3 mm och

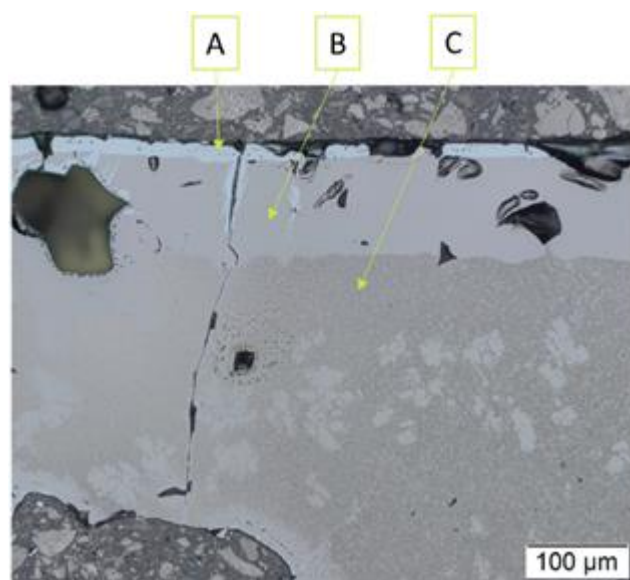
kan även i detta fall delas in i olika skikt med varierande sammansättning, se Figur 26.



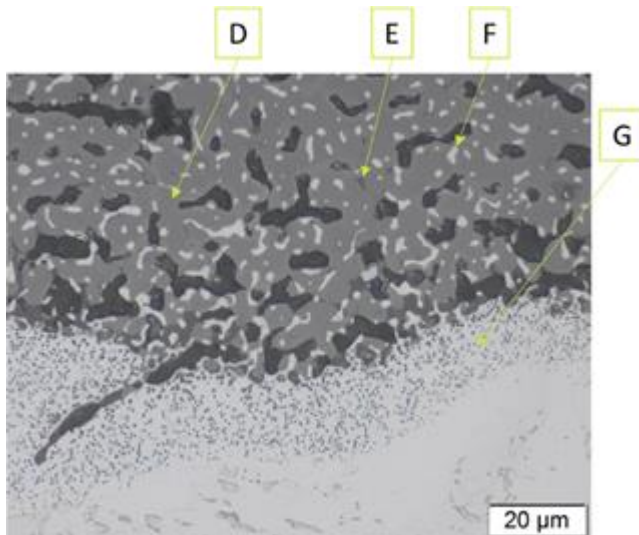
**Figur 26. Oxid och stålyta på prov 8.**

Det yttersta skiktet (A) har en tjocklek på ca 15µm och består av hematit, medan nästa lager (B) är ca 100µm och består av magnetit, se Figur 27.

Det mer porösa skiktet liknar motsvarande lager hos prov 7 förutom att de ljusare partiklarna förekommer i ett 0,5 mm tjockt område ned till grundmaterialet, se Figur 27 och Figur 28. I kanten av grundmaterialet förekommer även här ett ca 20 µm tjockt band med små runda mörka partiklar som är mindre än 1 µm.

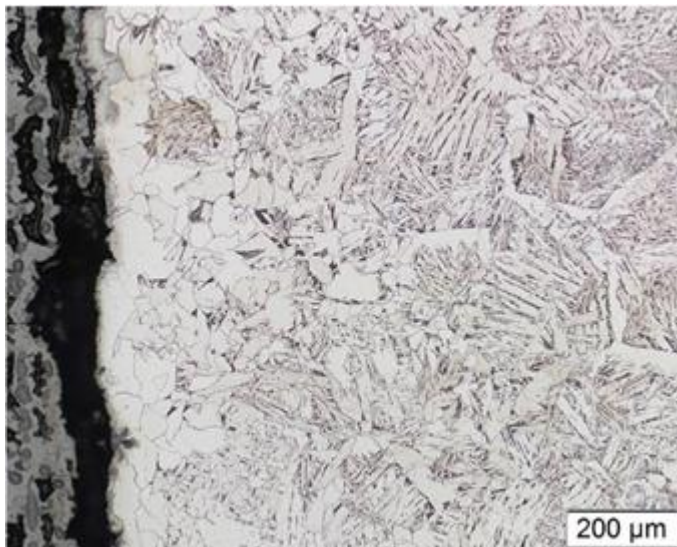


**Figur 27. Yttersta oxidskiktet med olika oxidtyper, prov 8. Förslag på oxid i A- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (hematit), B- Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetit) och C- FeO (wustit)**

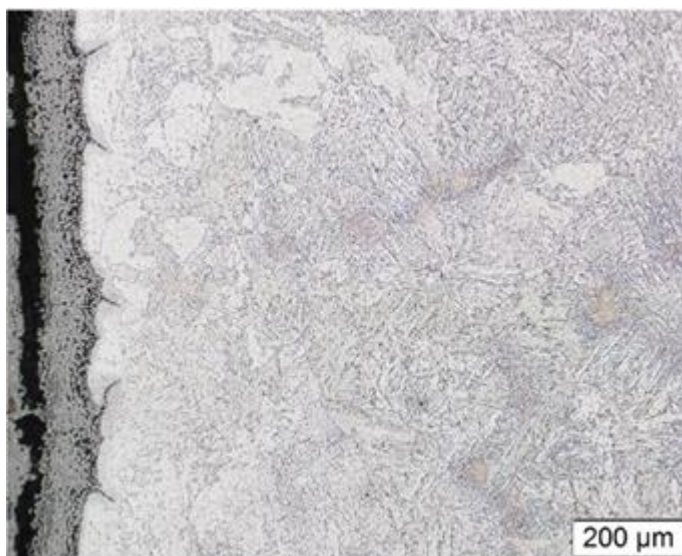


**Figur 28.** Poröst skikt nära grundmaterialet, prov 8. Förslag på oxid i D- FeO (wustit) E - Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (fayalite), F- okänt, G- MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Avkolningen bedömdes med ljusoptiskt mikroskop på en yta som etsats med Nital på både prov 7 och 8. I Figur 29 kan man se ytan på prov 7 till vänster och ett avkolningsdjup på ca 100μm. I Figur 30 kan man se motsvarande för prov nr 8, även här är avkolningsdjupet ca 100μm.



**Figur 29.** Avkolning på etsad yta, prov 7.



**Figur 30. Avkolning på etsad yta, prov 8.**

Slutsatser man kan dra från ovanstående resultat är att oxideringen skiljde sig väldigt lite mellan lägre legerat och högre legerat stål. Även avkolningen skiljde sig väldigt lite åt. En notering är att oxiden i prov 7 lossnade ganska lätt och då i gränsen till grundmaterialet. För prov 8 lossnade den övre halvan av glödskalet väldigt lätt, och den undre halvan var mer bunden till grundmaterialet. Det går att se skillnaden i de två sista figurerna där prov 7, Figur 29, har ett litet mellanrum mellan glödskalet och grundmaterial, medan det inte är fallet i prov 8, Figur 30.

### Resultat Ovako

I Tabell 17 kan man se resultatet från Ovako i form av oxidtillväxten i gram och viktökningen i procent, uppmätt glödskaletjocklek samt avkolningsdjup.

**Tabell 17. Ovacos provresultat inklusive oxidation, viktökning, glödskaletjocklek och avkolningsdjup**

	Dag 1 Luft/LPG	Dag 2 CO <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub>	Dag 3 N <sub>2</sub> / N <sub>2</sub>	Dag 4 CO <sub>2</sub> /Ånga	Dag 5 N <sub>2</sub> /Ånga
Tid (min)	75	75	75	75	75
Vikt (g)					
Före	9511	9547	8885	8911	8902
Efter	9568	9594	8896	8959	8918
Viktökning, %	0.6	0.5	0.1	0.5	0.2
Oxidtjocklek mm	0.85	0.93	0.64	1.02	0.44
Avkolningsd jup mm	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1

Slutsatser från resultaten är att kvävgas i plasmagas och särskilt där det är kvävgas i både plasmagas och formagas ger den minsta oxidtillväxten medan skillnaderna är väldigt små mellan luft/gasol och CO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> samt CO<sub>2</sub>/ånga. Omvänt kan man säga att kvävgasens inverkan är på avkolningen, där största avkolningsdjupet kan ses hos provet med kvävgas i både plasmagas och forma.

### *Slutsatser av materialundersökningar kolstål och rostfritt stål*

För kolstål så kan man dra följande slutsatser:

- Det största avkolningsdjupet förekom med  $N_2/N_2$ -atmosfär följt av  $N_2/\text{Ånga}$ . Minsta avkolningsdjupet förekom dag 2 och 4 vid tillförsel av  $CO_2$ .
- Fayalite följer magnetitkornens korngränser och ankrar mot stålytan, vilket ofta brukar ge en svåravlägsnad oxid. Bildas i stål som innehåller Si.
- Slutsatser man kan dra från ovanstående resultat är att oxideringen skiljde sig väldigt lite mellan lägre legerat och högre legerat stål. Även avkolningen särskilde sig marginellt.
- En notering är att oxiden för det låglegerade stålet från SSAB Oxelösund lossnade ganska lätt och då i gränsen till grundmaterialet. För det mer höglegerade stålet lossnade den övre halvan av glödskalet väldigt lätt, och den undre halvan var mer bunden till grundmaterialet. Det går att se skillnaden i Figur 29 och Figur 30 där prov 7 har ett litet mellanrum mellan glödskal och grundmaterial, medan det inte är fallet i prov 8.
- Slutsatser från resultaten för Ovako är att kvävgas i plasmagas och särskilt där det är kvävgas i både plasmagas och formagas ger den minsta oxidtillväxten medan skillnaderna är väldigt små mellan luft/gasol och  $CO_2/CO_2$  samt  $CO_2/\text{ånga}$ . Omvänt kan man säga att kvävgasens inverkan är på avkolningen, där största avkolningsdjupet kan ses hos provet med kvävgas i både plasmagas och forma.

Slutsatser från Outokumpus materialundersökning av rostfritt material:

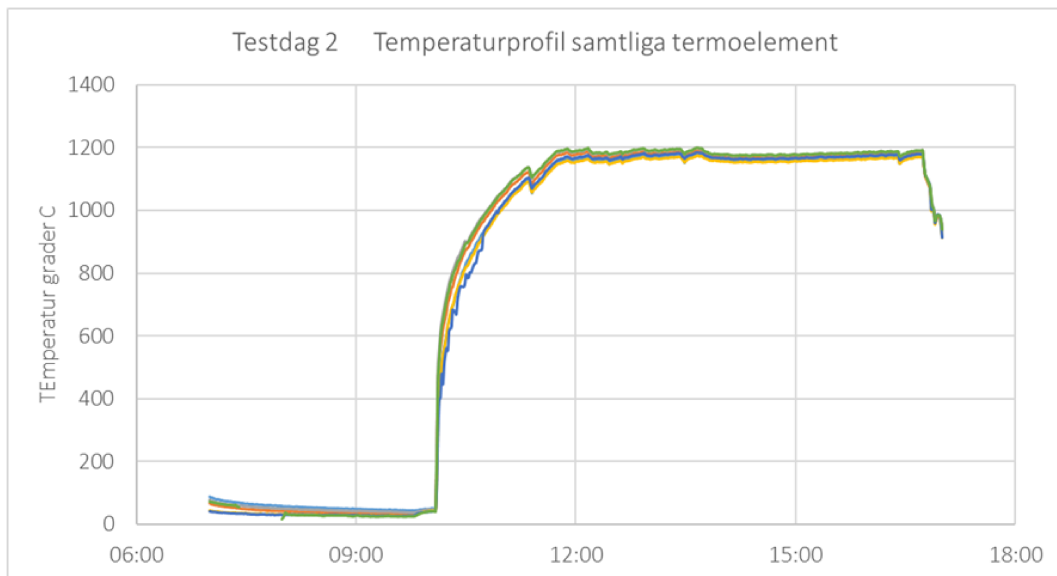
- Plasmagas och forma luft/gasol, valdes för att få ett referensprov med en atmosfär som liknar dagens atmosfär. Före uppvärmning hade provbitarna en autentisk slabsyta och en kapad yta, som därigenom inte har någon redan existerande oxid på ytan.
- Ur ett oxidationsperspektiv ger värmning med  $N_2/N_2$  och  $N_2/H_2O$  bästa resultaten avseende oxidationsdjup, tillväxt och avlägsnande av oxid genom betning. Tunn oxid, kort betningstid. Från ett värmningsperspektiv där man tar hänsyn till värmeöverföring och specifik värmekapacitet är dock dessa atmosfärer sämre. Det är viktigt att inte minska i produktivitet, d.v.s. en snabb och stabil värmningsprocess är viktig.
- Oxiden var tunn och kromrik för prov uppvärmt med  $N_2/N_2$ .
- Mest oxidation för provbitar uppvärmda med  $CO_2/H_2O$  som bärgas/formagas, följt av luft/gasol och  $CO_2/CO_2$ .
- $CO_2/CO_2$  liknade luft/gasol proverna vid 180 min värmning, medan  $CO_2/CO_2$  visade på mindre oxidation än luft/gasol för 60 min värmning.

- Sågade ytor var mindre oxiderade och mindre viktninskning och snabbare tider för avlägsnande under betning än slabsytorna.
- Proverna som värmdes med  $N_2/H_2O$  är svåra att dra slutsatser från då de värmdes vid lägre temperatur.
- Den övergripande bedömningen från Outokumpu är att  $CO_2/CO_2$  och  $CO_2/H_2O$  är de mest intressanta alternativen om utsläppt  $CO_2$  kan återcirkuleras. Från Outokumpus sida finns det fortfarande en del frågetecken och osäkerhet kring tekniken. En nackdel är bland annat att plasmageneratorer kräver kylda gaser vilket innebär att potentiell återcirkulation av utsläppt  $CO_2$  måste kylas före återanvändning. Kylning och återuppvärmning resulterar i energiförluster. Det finns också en utmaning med mycket höga  $NO_x$ -nivåer vid luftläckage, med närvaro av kväve och syre. Detta måste undersökas ytterligare hur det kan minskas. Dessutom skulle det också vara bra att ha en flexibel teknik där plasmageneratorer kan användas i kombination med konventionella brännare, vilket skulle kunna bidra till en smidig övergång.
- Plasmagenerator med  $CO_2/H_2O$ -tillsats resulterade i högre oxidation än under tillsats av endast  $CO_2$  (högre viktninskning under betning och vid kortare uppvärmningstider också längre betningstid). Den högre oxidationen med  $CO_2/H_2O$  som bärgas kan bero på relativt hög mängd vattenånga i ugnsatmosfären (ca 50 volym%) och/eller på relativt låg mängd överskott av syre, båda har en känd negativ effekt på oxidation av rostfritt.

## AP 5. Processanalys

### *Temperaturjämnhet och förekomst av hot spots*

Ugnen var bestyckad med termoelement för att utvärdera temperaturjämnhet och om tendens till hot spots förekom. I Figur 31 ses ett exempel från testdag 2, och hur de sex till antalet symmetriskt placerade termoelementen mycket väl följer varandra. Det indikerar att temperaturprofilen i ugnen var jämn, och med det följer även ett rimligt antagande att ugnens atmosfär var väl omblandad.



**Figur 31. Temperaturprofil dag 2 med CO<sub>2</sub>, samtliga termoelement.**

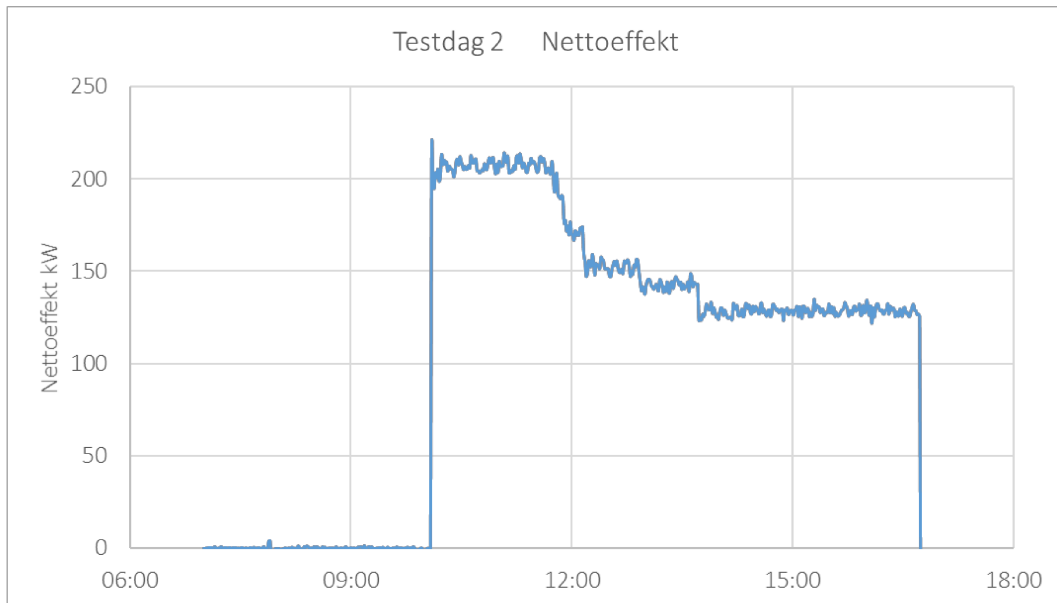
Temperaturprofilerna i Figur 31 användes för direkt processtyrning mot tillförd effekt. KTH utförde mer noggranna mätningar som styrker observationerna om en jämn temperaturfördelning i ugnen och ingen förekomst av hot spots.

KTH kan i sina mätningar se en viss variation mellan de olika testdagarna. Uppvärmning med CO<sub>2</sub> eller luft/gasol-blandning tenderar att ge en mer stabil temperaturjämnhet än till exempel N<sub>2</sub>. En bidragande faktor till resultatet är gasernas respektive specifika värmekapacitet, det vill säga gasens förmåga att lagra värme per viktenhet och grad. Denna faktor spelar mest roll under uppvärmningsfasen, och mindre roll när jämviktstemperaturen är uppnådd. I en industriell tillämpning torde denna skillnad mellan bärgaserna var marginell, och inte ha någon större påverkan vid val av gas i en process.

#### *Effekt och prestanda*

Figur 32 visar nettoeffekt under testdag 2 där CO<sub>2</sub> användes som bärgas. Initialt krävdes en nettoeffekt strax över 200 kW för uppvärmning, men då jämviktstemperatur uppnått sänktes effekten gradvis till en slutlig nettoeffekt på 130 kW för att bibehålla önskad temperatur.

Effekt, kylförluster och därmed resulterande nettoeffekt beror delvis på bärgasens specifika värmekapacitet. En högre specifik värmekapacitet hos gasen ger lägre kylförluster i plasmagenerator och forma och därmed en högre verkningsgrad. Liksom i fallet med temperaturjämnhet i ugnen beror det på gasens inneboende förmåga att lagra värme.



**Figur 32. Tillförd nettoeffekt under testdag 2.**

Verkningsgraden på ett plasmasystem tar hänsyn till ingående effekt och kylförluster. Kylförlusterna finns i plasmagenerator och forma. Den uppsättning som användes var sedan tidigare optimerad för luft som bärgas. Forman är en vattenkyld anslutningspunkt mellan plasmagenerator och den process som den är ansluten till. Den används primärt som blandningskammare vid användning av två eller fler gaser. Vid användning av enskilda gaser där ingen ytterligare gasinjektion är nödvändig kan storleken på forman reduceras. En åtgärd som minskar systemets kylförluster och ökar verkningsgraden.

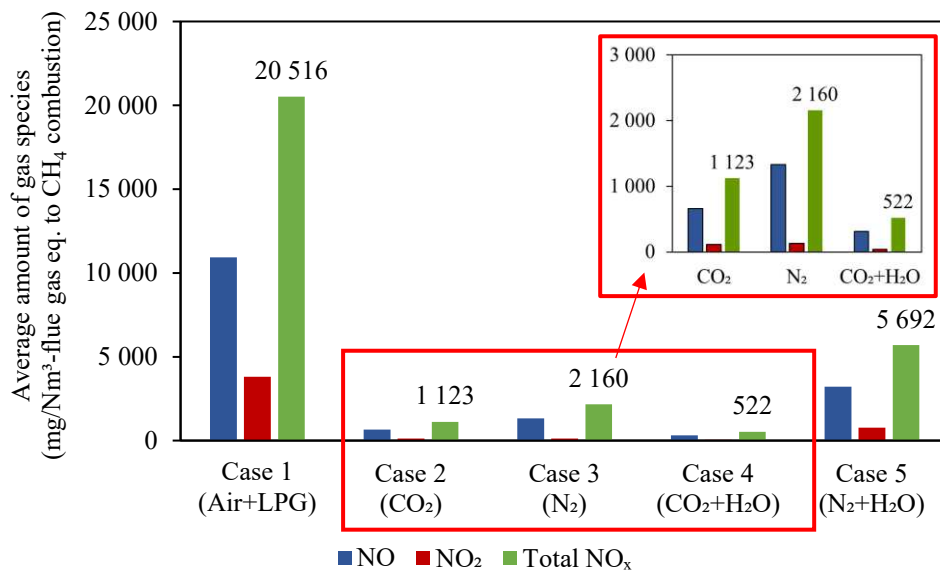
Verkningsgraden under försöken var från 60 % till 77 %. Vid en optimering av plasmasystemet, anpassat för en given plasma- och formagas och given applikation kan man för N<sub>2</sub> teoretiskt nå verkningsgrader mellan 70-75 % för hela systemet och 75-80% för plasmageneratoren utan forma. För CO<sub>2</sub> kan verkningsgrader teoretiskt nå mellan 75-80 % för systemet och 80-85 % för plasmagenerator utan forma.

Gasen som tillförs en process ska utföra ett arbete, t.ex. värmning, och det är då fördelaktigt med hög entalpi (energiinnehåll per gasvolym). Det är dock svårt att kombinera hög entalpi och hög verkningsgrad, då den höga entalpin också resulterar i en ökad strålningsbelastning i plasmasystemet och därmed ökar förlusterna. Man kan därför behöva optimera processen utifrån entalpi och verkningsgrad. Vilket läge som är optimalt är i första hand beroende på bärgas och i andra hand på storleken på plasmasystemet.

#### *Förekomst av NO<sub>x</sub> i avgaserna*

NO<sub>x</sub>-halterna i avgaserna var under testerna höga. I Figur 33, hämtad från bilaga 5, *Technical report*, ses en sammanställning över NO<sub>x</sub>-halter i avgaserna från de olika försöksdagarna.





**Figur 33. NO<sub>x</sub>-halter i avgaser i de olika försöksdagarna.**

Testdag 1 användes en luft- och gasolblandning. Blandningen hade ett riktvärde om 3% överskottssyre för att efterlikna ugnsatmosfären hos de deltagande företagen. Deltagande företag uppgav en ugnsatmosfär med 1 - 5% överskottssyre. Blandningen skulle också möjliggöra att försöket kunde användas som ett referensförsök för materialanalysen. Med kvoten luft/gasol över stökiometrisk förbränning skapas en atmosfär som är rik på N<sub>2</sub> och O<sub>2</sub>. Under sådana förutsättningar är det välkänt att NO<sub>x</sub>-halterna blir mycket höga, något som också uppmättes i försöket.

Vid användning av luft/gasol-blandning kan man minska NO<sub>x</sub>-bildningen genom att skapa ett underskott på syre och undvika full förbränning vid plasmaenheten. Men man bör ändå alltid ta höjd för behovet av NO<sub>x</sub>-rening av avgaserna, något som redan finns vid de flesta industriella termiska processer.

Testdag 2 - 5 hade teoretiskt goda förutsättningar att undvika NO<sub>x</sub>-bildning då inget fritt syre injicerades i plasma- eller formagas. De lägsta halterna uppmättes dag 2 och 4 då CO<sub>2</sub> respektive CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O användes.

Under dessa testdagar förekom mycket läckluft in i ugnskammaren, något som troligtvis var den dominerande faktorn till höga NO<sub>x</sub>-halter. Vid fortsatt processutveckling bör inflödet av läckluft särskilt angripas och strikt minimeras, till exempel genom tätning och genom att skapa ett visst övertryck i ugnskammaren. Man bör därmed kunna utvärdera vilken förekomst av NO<sub>x</sub> som är en direkt effekt av plasmavärmning under optimala förutsättningar och hur känsligt bildningen är för läckluft.

De mätningar som presenteras från försöken anger halt i avgaserna per volymenhet. Men det bör i sammanhanget noteras att en plasmavärmd gas har en mycket hög entalpi, det vill säga energiinnehåll per gasvolym. Det innebär att den mängd gas som krävs för att tillföra samma energimängd är mindre än vid

konventionella förbränningsprocesser, och därmed är också avgasmängderna mindre. Som en följd blir NO<sub>x</sub>-halten i avgaserna högre uppmätt per volymenhet (mg/Nm<sup>3</sup>).

Man bör i fortsatt processutveckling utvärdera NO<sub>x</sub>-halten per tillförd energimängd (mg/kWh) samt processens totala utsläpp (mg). Det bör vidare jämföras med utsläpp från dagens befintliga processer samt om dessa nivåer kan hanteras med dagens befintliga gasreningsutrustning.

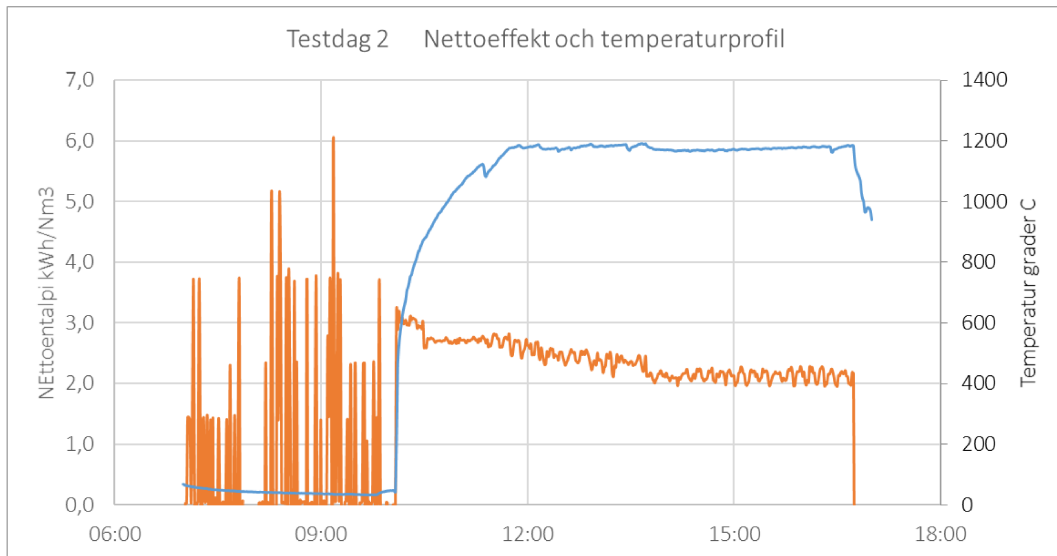
#### *Konvertering till plasmateknik och kombination med annan förbränningsteknik*

Plasmavärmd gas har en hög entalpi, det är ett mått på energiinnehåll per gasvolym (kWh/Nm<sup>3</sup>). Nettoentalpi tas hänsyn till kylförluster från plasmagenerator och forma och är ett mått på den ingående gasens energiinnehåll. Figur 34 visar processgasens nettoentalpi och temperaturkurva under försöksdag 2 med CO<sub>2</sub> som bärgas, men är representativ för samtliga testdagar. Entalpin är en viktig parameter för operatörer vid styrning av plasmasystemet mot en optimal drift. Ett optimalt driftläge är normalt en entalpi mellan 2 och 4 kWh/Nm<sup>3</sup>, oavsett vilken effekt plasmasystemet är dimensionerat för.

I en konventionell förbränningsteknik har processgasen en entalpi på 0,5 – 1 kWh/Nm<sup>3</sup>. Det betyder att vid plasmavärmd gas behövs en betydligt mindre mängd gas för att tillföra samma mängd energi. Konvertering till en teknik som har en faktor 2 till 8 gånger högre entalpi i processgasen ger en minskning av gasmängd med motsvarande faktor vid bibehållen tillförd effekt.

Som en följd av det kan avgasreningen dimensioneras för betydligt mindre gasmängder. Det bör därmed noteras att även en delvis konvertering av värmningsugnar till plasmavärmning skulle resultera i mindre avgasmängder.

En negativ effekt kan dock vara, som tidigare nämnts, att halter av NO<sub>x</sub> och andra föroreningar koncentreras till höga halter i avgaserna. Det är dock inte en självklar följd att de totala utsläppen ökar.



**Figur 34. Nettoentalpi och temperaturkurva under försök. De instabila värdena för entalpin innan uppstart kan bortses ifrån.**

Kombinationen plasmateknik med annan förbränningsteknik kunde inte undersökas i pilottesterna. Testdag 1 kan möjligtvis ses som en kombinerad plasma- och gasbrännare då luft och gasol användes.

#### *Påverkan på processutrustning*

Den processutrustning i plasmasystemet som utsätts för slitage är främst kopparelektrodena i plasmageneratoren. Dessa slitagedelar byts av användarens egen personal och sker vid optimerad drift efter upp till 500 driftstimmar. Det innebär normalt inte något driftsstopp då man ofta har två plasmageneratorer som växlas på samma position.

Slitagebilden på elektroderna mättes inte under experimentförsöken, försöken var för korta för att ge någon värdefull information.

En plasmagenerator har elektroder uppströms och nedströms. Lutad mot tidigare samlad erfarenhet kan konstateras att förekomst av  $O_2$  i gasen ger en helt annorlunda slitagebild än vid frånvaro av  $O_2$ , t.ex. vid drift på  $CO_2$  eller  $N_2$  som bärgas. I det ena fallet blir slitaget större på nedströms elektrod, och i andra fallet större på uppströms elektrod. Slutsatsen är att slitagebilden är något som behöver utvärderas och optimeras specifikt mot val av bärgas. För att förändra en slitagebild och maximera drifttiden kan man testa sig fram genom geometrioptimeringar av hur plasmasystemet är uppbyggt.

#### *Slutsatser och förslag till fortsatt processutveckling*

Utifrån procesanalysen utformas ett antal förslag till fortsatt processutveckling.

#### **NO<sub>x</sub>-bildning**

NO<sub>x</sub>-bildningen i pilotförsöken var höga, och NO<sub>x</sub> omfattas oftast av tillståndsgivna villkor för en verksamhet. Man bör fortsatt utvärdera NO<sub>x</sub>-halten per tillförd energimängd (mg/kWh) samt processens totala utsläpp (mg). Det ger

ett underlag till en jämförelse med utsläppen från dagens värmningsprocesser, och hur processens totala utsläpp påverkas av byte av värmningsteknik eller delvis konvertering till plasmavärmning. Man bör också utvärdera om dessa nivåer av utsläpp kan hanteras med dagens befintliga gasreningsutrustning.

Vid användning av en luft/gasol-blandning som bärgas blir NO<sub>x</sub>-bildningen stor om det finns överskott på syre. En direkt åtgärd för minskad NO<sub>x</sub>-bildning är att använda en blandning med underskott på syre vid inflödet. En massflödeskvot lägre än 24 ger syreunderskott och acceptabla NO<sub>x</sub>-halter (25 ger full förbränning). Det innebär dock att processgasen inte blir fullt förbränd och att man inte tillvaratar all energi. Man bör då undersöka möjligheten att under kontrollerade former efterförbränna processgasen med syrgas i ugnskammaren och studera dess inverkan på NO<sub>x</sub>-bildning.

Vid användning av andra gaser fria från fritt syre som N<sub>2</sub> eller CO<sub>2</sub>, eventuellt i kombination med ånga, bör man särskilt angripa och strikt minimera läckluft in i ugnskammaren. Man bör därmed kunna utvärdera vilken förekomst av NO<sub>x</sub> som är en direkt effekt av plasmavärmning under optimala förutsättningar och hur känsligt bildningen är för läckluft.

#### **Verkningsgrad och kylförluster**

Man bör fortsatt studera plasmasytemets verkningsgrad och kylförluster och optimera uppsättningen av forma och plasmagenerator utifrån den valda gasen. Just val av forma är en viktig komponent för att minska kylförlusterna. Vid användning av enskilda gaser där ingen ytterligare gasinjektion är nödvändig kan storleken på forman reduceras, alternativt helt ta bort behovet av forman.

Dock skapar gasinjektion i forman ett större gasflöde och bidrar troligtvis till en mer homogen temperaturprofil i ugnskammaren. Man bör därmed fortsatt studera temperaturjämnhet i ugnskammaren och förekomst av hot spots vid förändrat flödesförhållande för plasmagas/formagas.

Vidare föreslås att man för vald bärgas hittar ett optimalt driftläge för tillförd entalpi och accepterade kylförluster. Därmed kan verkningsgraden optimeras.

En studie föreslås för att utreda om kylvattnet från plasmasytemet kan vara föremål för energiåtervinning. Med processutveckling är det möjligt att öka temperaturen på utgående vatten till 80 - 90 °C. Idag är temperaturen max 60 °C på grund av rådande säkerhetsanordningar.

#### **Värmeöverföring**

I Tabell 18 ses gasegenskaper vid normal temperatur och normalt tryck för luft, N<sub>2</sub> och CO<sub>2</sub>. Den största skillnaden mellan gaserna är deras densitet. Densiteten har stor betydelse för de olika gasernas förmåga att transportera energi. En högre densitet innebär en högre massa per volymsenhet, och gasen kan därmed bära mer energi in till processen.

Dessutom finns en skillnad i gasernas specifika värmekapacitet,  $C_p$ . Det är ett mått på den mängd energi som krävs för att öka ett 1 kg av ett specifikt ämnes temperatur 1 K. Egenskapen avgör något förenklat vilken temperatur som gaserna har vid samma entalpi, det vill säga vid samma energiinnehåll.

**Tabell 18. Gasegenskaper vid normal temperatur och normalt tryck.**

	Specifik värmekapacitet $C_p$ [J/kg*K]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]
Luft	1006	1,293
N <sub>2</sub>	1040	1,251
CO <sub>2</sub>	849	1,795

*Grundläggande entalpiuträkning  $h=C_p*T$*

*$h$  = entalpi [J/kg]*

*$T$  = temperatur [K°]*

*$C_p$  = [J/kg\*K]*

CO<sub>2</sub> har högst densitet och lägst specifik värmekapacitet. Dessa två egenskaper leder i samma riktning mot bättre värmeöverföring, som ses i Tabell 19. Det återspeglas i försöksresultaten att drift med CO<sub>2</sub> som bärgas ger en bättre värmeöverföring och gav till exempel ett snabbare uppvärmningsförlopp. N<sub>2</sub> har med detta som grund en teoretiskt sämre värmeöverföring än CO<sub>2</sub>. En möjlig förbättringsåtgärd är kompensation med en högre entalpi, det vill säga ha en högre temperatur på tillförd gas.

**Tabell 19. Samband mellan densitet, specifik värmekapacitet och värmeöverföring.**

Vid given effekt:		
Hög densitet →	Mer energi per volym tillförd gas →	Bättre värmeöverföring
Låg specifik värmekapacitet →	Högre temperatur på tillförd gas →	Bättre värmeöverföring

### Drifftid och slitage

Elektrods slitaget bör studeras vid längre försök på valda bärgaser. Genom att specifikt studera slitagebilden kan den minskas genom geometrioptimeringar av hur plasmasytemet är uppbyggt.

### Resultat Höganäs

Höganäs, som gjorde parallella mätningar och analys av processen, kunde bekräfta frånvaron av "hot spots". Temperaturmätningarna överensstämde också med ScanArcs mätningar. De konstaterar genom analysen att plasmateknik har potential att nyttjas som värmekälla vid pulvertillverkning i bandugnar. Det kan även vara av intresse ersätta tunnelugnarnas naturgasbrännare med plasmasytem

och utnyttja den relativt variabla uteffekten. Det kan också handla om processteg där smältans temperatur ska hållas konstant eller atmosfären behöver regleras.

Fullständigt resultat redogörs i bilaga 7 *Summary of PLATIS trials – External*.

## **AP 6. Teknisk-Ekonomisk analys**

Nedan redovisas övergripande resultat av teknisk-ekonomisk analys. För mer detaljerade bakgrundsdata och resultat se bilaga 8, *Techno-economic analysis*.

### *Utvärdering av scenarier med plasmateknik*

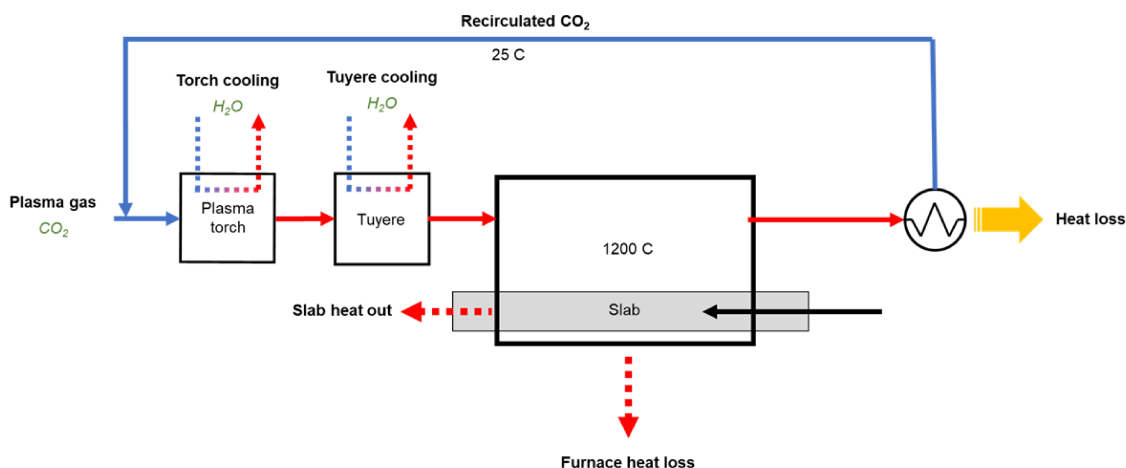
I avsnittet presenteras genomförda simuleringar. Resultatet inkluderar diskussioner om olika typer av systemkonfigurationer där plasmateknik helt eller delvis används som värmekälla i en industriell ugn för värmning av stål.

- Simulering av omvärmningsugn genomfördes utifrån två olika systemkonfigurationer:
  - a) Kontinuerlig värmningsugn med plasma som enda värmekälla.
  - b) Kontinuerlig värmningsugn med kombinationen plasma och gasbrännare för biogen syngas.
- Simulering av en batchugn med plasma som enda värmekälla.

### *Kontinuerlig värmningsugn*

#### **Omvärmningsugn med plasma som enda värmekälla (a)**

Figur 35 illustrerar en omvärmningsugn som är enbart uppvärmd av plasmateknik. I detta fall återcirkuleras låg-tempererat flöde av CO<sub>2</sub> (<60°C) direkt till plasmageneratoren. Kylsystemet i plasmagenerator och forman genererar den största energiförlusten i plasmasystemet. Het plasmagas strömmar sedan in i ugnskammaren som en värmekälla med en maximal tillåten specifik entalpi på 4 kWh/Nm<sup>3</sup>. Efter uppvärmningsprocessen kyls rökgasen till rumstemperatur innan den återcirkuleras tillbaka till plasmagenerator.



Figur 35. Schematisk bild över en omvärmningsugn med plasma som enda värmekälla

Tabell 20. Jämförelse av avgas-/rökgasflöden från olika bränslen och oxidationsprocesser med en tillförd nettoenergi på 57,3 MW.

Bränsle/ Energibärare	Oxidant/ plasmagas	Bränsle (kg/h)	Tillförd oxidant/ plasmagas (Nm <sup>3</sup> /h) <sup>a</sup>	Av-/rök- gaser (kg/h)	Varma av- /rökgaser (Nm <sup>3</sup> /h) <sup>b</sup>
Plasma	CO <sub>2</sub>	-	15137	29972	72245
LPG	Air	4451	55337	73622	275196
LPG	O <sub>2</sub>	4451	11274	20562	74648
Hydrogen	Air	1719	45659	59953	259106
Hydrogen	O <sub>2</sub>	1719	9492	15282	90256

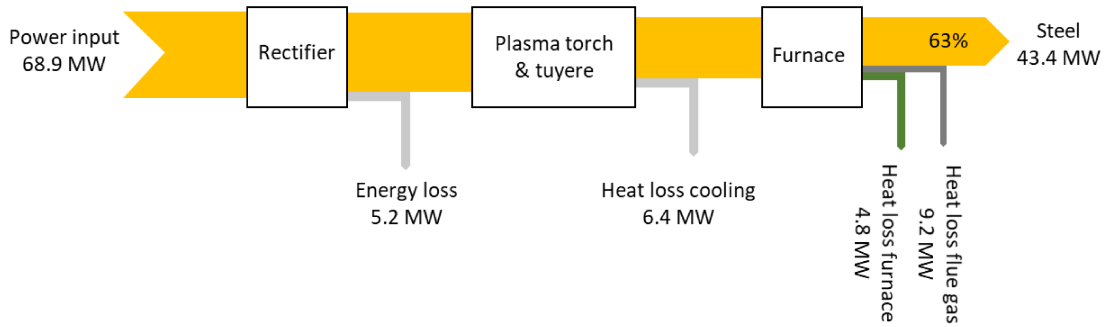
<sup>a</sup>at 25 °C, 1 bar

<sup>b</sup>wet gases, at 1000 °C and 1 bar

Tabell 20 visar skillnaden i avgasmängd beroende på vilket bränsle/energibärare som används. Med CO<sub>2</sub> som plasmagas krävs ett volymflöde på 15 137 Nm<sup>3</sup>/h vid 25 °C. Dessa volymer är jämförbara med en rökgaserna från oxy-fuelförbränning, men 3,5 gånger lägre jämfört med konventionell förbränningen med luft.

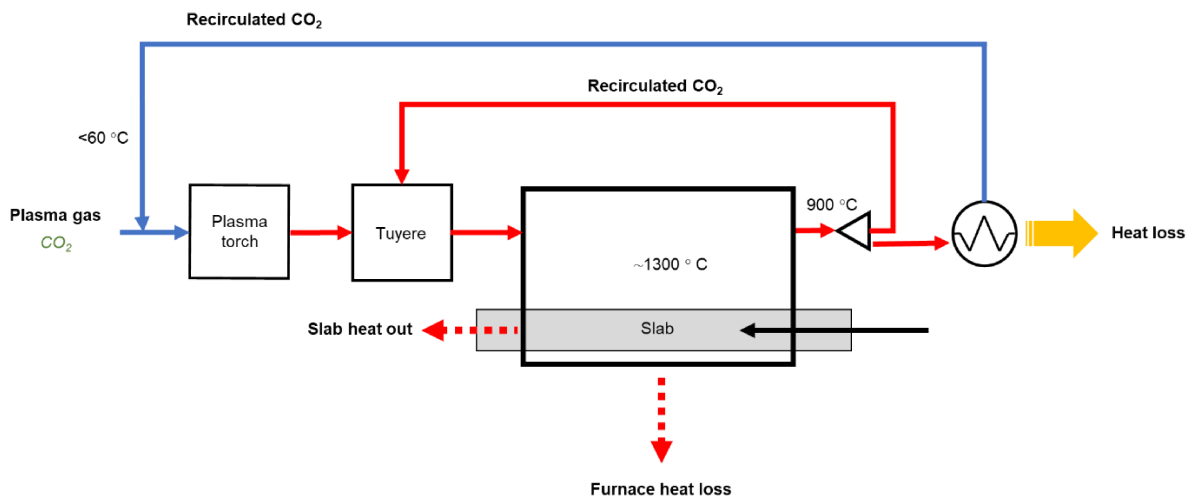
Analysresultatet och diagrammen i bilaga 8, *Tekno-economic analysis*, visar att den simulerade plasmautrustade ugnens och referensugnens specifika energiförbrukning korrelerar när specifik entalpi för plasmagasen är större än 3 kWh/Nm<sup>3</sup> och plasmageneratorns effektivitet är högre än 85 %.

Om plasmasytemets effektivitet antas till 90% och plasmagasens specifika entalpi förutsätts vara 4 kWh/Nm<sup>3</sup>, erhålls en ugnseffektivitet på 63%, se Figur 36.



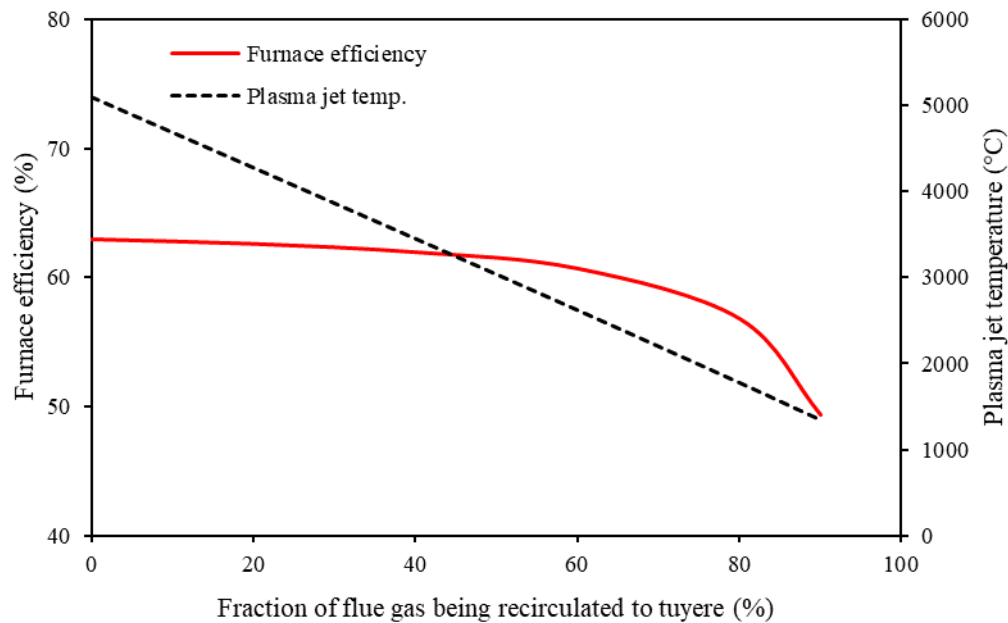
Figur 36. Energiflöde för plasmauppvärmd omvärmningsugn med en plasmaverkningsgrad på 90% och en specifik gasentalpi på 4 kWh/Nm<sup>3</sup>.

Ett alternativt koncept är att delvis recirkulera avgaser med hög temperatur (max 800 °C) direkt i forman, enligt Figur 37. Detta föranleder dock att gasblandningens specifika entalpi liksom ugnens effektivitet minskar. Figur 38 visar hur ugnseffektiviteten minskar med ökad recirkulation i forman.



Figur 37. Schematisk bild över en plasmauppvärmd eftervärmningsugn med recirkulation av heta rökgaser till forman.





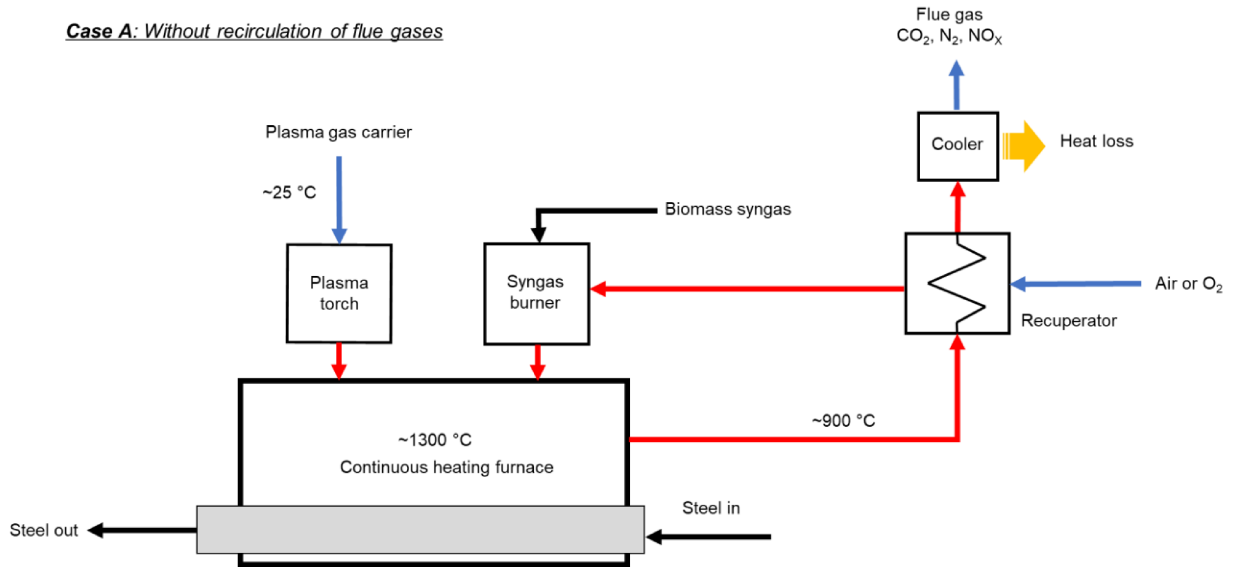
**Figur 38.** Ugnseffektivitet vid olika mängd återcirkulerad rökgas till forman (plasmagasens entalpi = 4 kWh/Nm<sup>3</sup>; plasmans effektivitet = 90 %).

Slutsatsen är att en injektion i forman bör undvikas om hög uppvärmningsprestanda vill upprätthållas. Användningen av formagas kan dock vara användbar för specifika fall, exempelvis med syfte att reducera NO<sub>x</sub> eller där specifika atmosfärsförhållanden vill uppnås.

#### **Kontinuerlig värmningsugn med kombinationen plasma och gasbrännare för biogen syngas (b)**

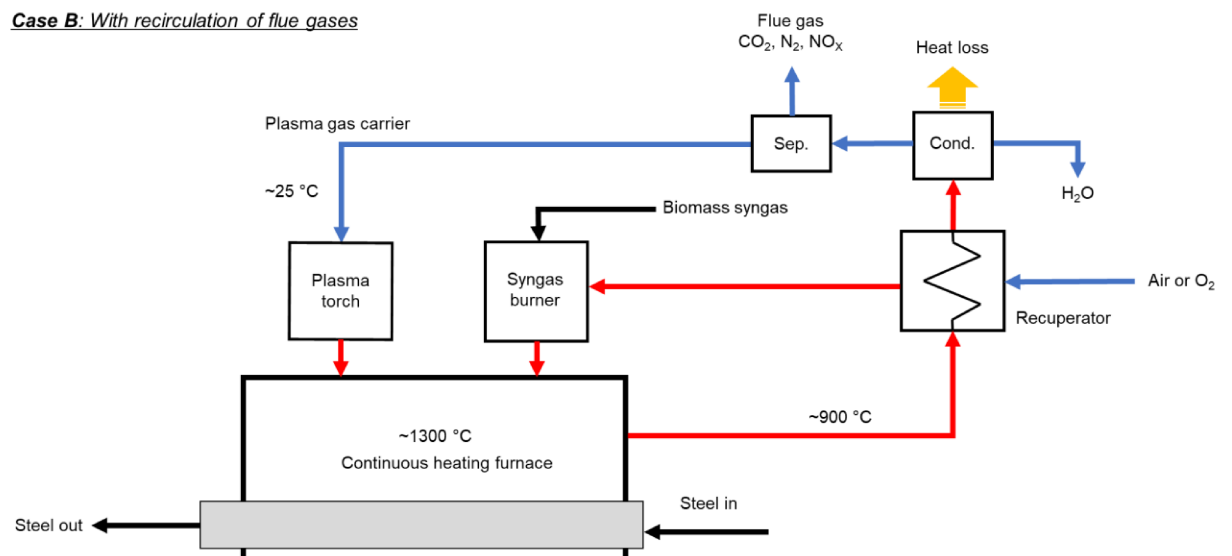
En annan möjlig konfiguration är kombinationen av plasmateknik och gasbrännare för syngas. Kombinationen kan också ge mer flexibla driftsförutsättningar med möjlighet att alternera baserat på elkraftens eller bioråvarans pris och tillgång. Figur 39 och Figur 40 visar två olika alternativ, med och utan rökgascirkulation.

I fall A, Figur 39 släpps rökgaserna direkt till atmosfären. Möjliga plasmagasbärare begränsas till luft, O<sub>2</sub>, eller N<sub>2</sub>. Gaserna kan potentiellt generera högre mängd termisk NO<sub>x</sub>, vilket kan kräva optimering eller NO<sub>x</sub>-rening.

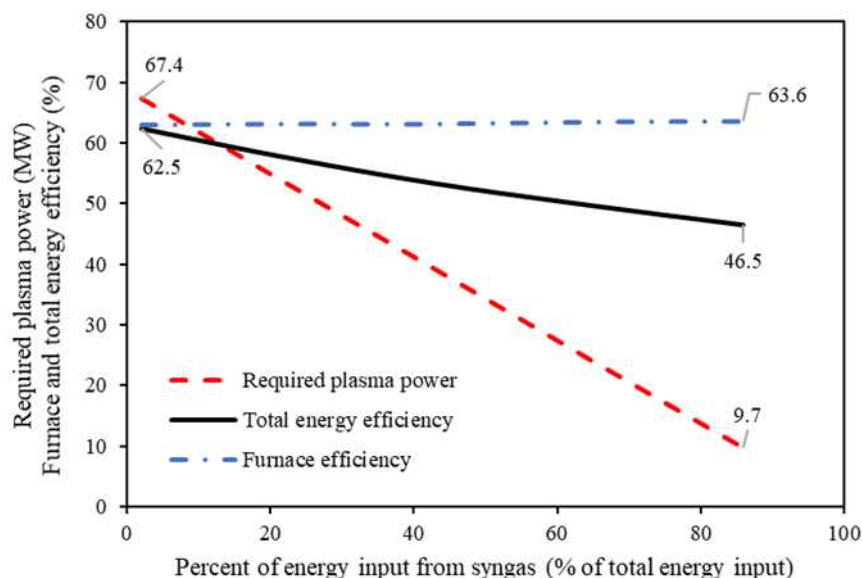


**Figur 39. Schematisk bild med kombinationen gasbrännare och plasmagenerator utan återcirkulation av rökgaser (fall A).**

I fall B, Figur 40, används CO<sub>2</sub> som plasmagasbärare genom att separera och återcirkulera en del av avgaserna, vilket kan reducera NO<sub>x</sub>-genereringen i ugnen. Installationen kräver gasavskiljare och kompressor i slutet av rökgasströmmen, vilket ökar kapitalkostnaden. Förekomsten av N<sub>2</sub> i recirkulerad rökgas kan minska plasmasytemets prestanda. För att inte skada plasmageneratoren, måste rökgaserna kondenseras innan de recirkuleras.



**Figur 40. Schematiska bilder med kombinationen gasbrännare och plasmagenerator med återcirkulation av rökgaser (fall B).**



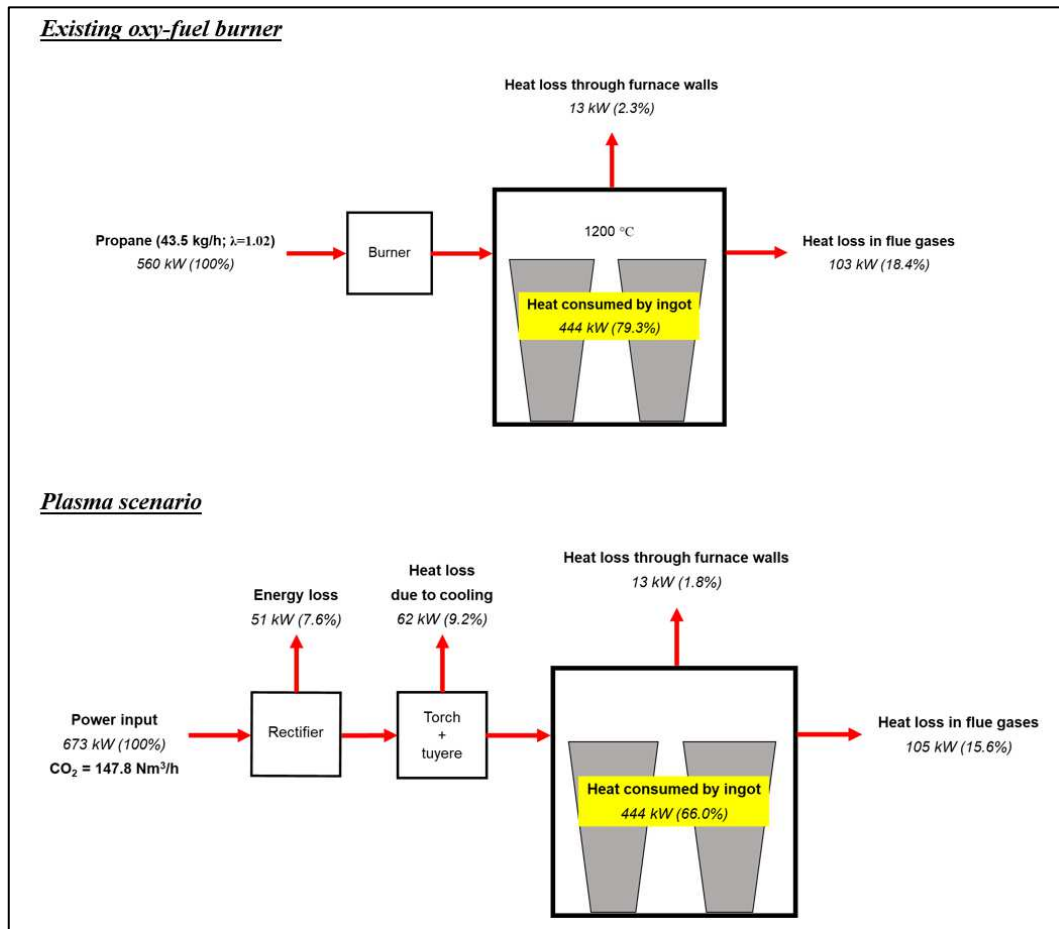
**Figur 41. Effekt av andel bioenergi på plasmaeffekt, ugnseffektivitet och total energieffektivitet**

Figur 41 visar effekten av andel bioenergi. Som framgår av grafen ökar ugnseffektiviteten med ökad andel bioenergi. Denna trend beror främst på att gasbrännaren har högre termisk effektivitet än plasmageneratoren. Tillsats av biogen syngas ger dock lägre total energieffektivitet på grund av förluster i förgasningsprocess för biomassa. En ökning av bioenergiandel från 0 till 85 % minskar total energieffektivitet från 63 till 46,5 %.

### *Batchugn*

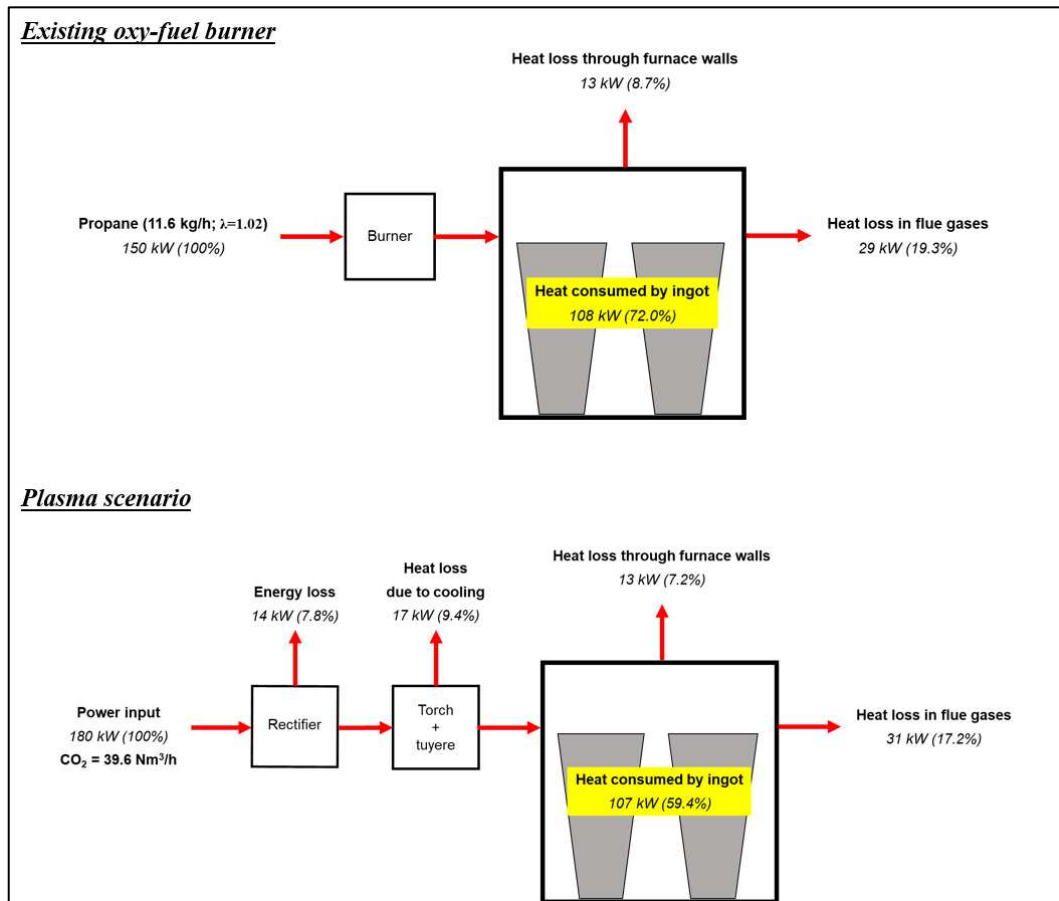
Figur 42 visar energiflöden i Ovakos batchugn med befintliga oxy-fuelbrännare respektive simulerad plasmagenerator. Simuleringen av plasmascenariot antar en entalpi på 4 kWh/Nm<sup>3</sup>, 90 % verkningsgrad i plasmagenerator och CO<sub>2</sub> som plasmagasbärare.

Enligt simuleringen krävs en högre mängd energitillförsel i plasmascenariot för att bibehålla samma driftstemperatur. Detta beror på större energiförluster i likriktare, plasmagenerator och forman. Vid denna driftpunkt är uppskattad ugnseffektivitet för plasmascenariot 66%, vilket är lägre jämfört med befintlig oxy-fuelförbränning (79,2%). Det bör noteras att värmeöverföringseffekten i ugnen inte beaktas i simuleringen, vilket påverkar effektivitet och uppvärmningstid i en verklig applikation.



**Figur 42. Energiflöden i Ovacos batchugn med befintliga oxy-fuelbrännare (ovan) och plasmagenerator (nedan), vid en tidpunkt då måltemperaturen 1200 °C uppnås med en tillförd nettoeffekt på 560 kW**

Figur 43 visar energiflödesdiagrammen under stabiliseringsperioden vid en konstant temperatur av 1200 °C. Under detta ögonblick minskar energitillförseln från 560 kW till 150 kW. I detta läge är ugnseffektiviteten för plasmascenariot 59,4%, medan effektiviteten med oxy-fuel är 72,0%.



**Figur 43. Energiflöden i Ovacos batchugn med befintliga oxy-fuelbrännare (ovan) och plasmagenerator (nedan), under stabiliseringsperioden vid 1200 °C uppnås med en tillförd nettoeffekt på 150 kW.**

### *Ekonomisk utvärdering*

I ekonomisk beräkning jämfördes:

- Kontinuerlig omvärmningsugn, där befintliga gasbrännare helt ersätts med plasmageneratorer
- Kontinuerlig omvärmningsugn med konventionella gasbrännare och koldioxinfångning med MEA-teknik
- Kontinuerlig omvärmningsugn, där befintliga gasolbrännare ersätts med vätgasbrännare och oxy-fuel

Uppskattade CAPEX för plasma-, MEA- och vätgasininstallationen presenteras i Tabell 21, Tabell 22 och Tabell 23. Plasmascenariot utgår ifrån processen i Figur 37, där CO<sub>2</sub> används som plasmagas och fullständigt återcirkuleras till plasmageneratoren.

I plasmascenariot, med en total kostnad på cirka 549,2 MSEK, motsvarar själva plasmasytemet 70% av totala CAPEX. I scenario 2 står MEA-processens infångningsutrustning av CO<sub>2</sub> för 40% av totala CAPEX. MEA-processen blir i fallet 52 % billigare än plasmascenariot. Vätgasscenario med infrastruktur för distribution på ca 50 km ger total kostnad på 508,9 MSEK. Däremot blir vätgasscenariot betydligt billigare (51,5 MSEK) om distributionen exkluderas.

**Tabell 21. CAPEX för installation av plasmasytem**

CAPEX parameter	Kostnad (MSEK)
Elnät	48.6
Plasmasytem	384.0
CO <sub>2</sub> filter och kompressor	38.8
Projektledning & design	77.8
<b>Total CAPEX (MSEK)</b>	<b>549.2</b>

**Tabell 22. CAPEX för installation av MEA-baserad koldioxidinfångning**

CAPEX parameter	Kostnad (MSEK)
Förbehandlingsutrustning	20.8
CO <sub>2</sub> infångningsutrustning	105.4
CO <sub>2</sub> kompressor	85.3
Kringutrustning	4.5
Projektledning & design	44.6
<b>Total CAPEX (MSEK)</b>	<b>260.7</b>

**Tabell 23. CAPEX för vätgasscenariot**

CAPEX parameter	Kostnad (MSEK)	
	Med H <sub>2</sub> överföring	Utan H <sub>2</sub> distribution
Brännare	24.0	24.0
Styrsystem	16.0	16.0
Vätgas distansdistribution	363.1	-
Projektledning & design	81.6	9
<b>Total CAPEX (MSEK)</b>	<b>508.9</b>	<b>51.5</b>

Total produktionskostnad för alla scenarios presenteras i Tabell 24. Kalkylen tar dock inte hänsyn till den befintliga ugnens kapital-, drift- och underhållskostnad, samt personalkostnader för drift av installerad processutrustning. Några utdrag ur tabellen.

- Produktionskostnaden för plasmascenariot är cirka 221,3 SEK/ton stål, vilket främst beror på elkostnaden. Jämfört med dagens system innebär det en fördyring med 62,6 SEK/ton stål.
- Driftkostnaden för plasmascenariot är lägre än för MEA-scenariot, trots högre CAPEX. Denna skillnad kan vara ännu större om man beaktar arbetskostnad för att bemanna den nya utrustningen.
- Energikostnaden i MEA-processen är 41,5 SEK/ton stål högre än för befintlig ugn på grund av driften av tillkommande elektrisk utrustning. Jämfört med befintlig ugn är MEA-scenariot 83,6 kr dyrare per ton stål.
- Vätgasscenariot har den högsta produktionskostnaden oavsett om en längre vätgasdistribution beaktas eller ej. Det ger en fördyring med 104,3 SEK/ ton stål med längre distributionssträcka och 76,2 SEK/ton stål utan. Vätgaspriset är dock en stor osäkerhetsfaktor. Dagens pris på 22 - 28 kr/kg förutspås sjunka i framtiden. IRENA förutspår att kostnaden för vätgas kan bli så låg som 13 kr/kg 2030 och 10 kr/kg 2050.

**Tabell 24. Total produktionskostnad för olika tekniker exklusive personalkostnad och kapitalkostnad för existerande ugn.**

Kostnad (SEK/ton stål)	Exist- erande ugn	Ny installerad process			
		Plasma	MEA <sup>a</sup>	Vätgas (with H <sub>2</sub> transmission)	Vätgas (without H <sub>2</sub> transmission)
CAPEX	-	35.4	16.8	31.2	3.2
OPEX					
Elkraft	-	179.0	41.5	-	-
Bränslen	158.3	-	158.3	231.1	231.6
Övriga O&M	0.4	6.9	23.6	0.7	0.7
Total OPEX	158.8	185.9	223.7	231.8	231.8
<b>Total LCOP (SEK/ton stål)</b>	<b>158.8</b>	<b>221.3</b>	<b>235.5</b>	<b>263.1</b>	<b>231.8</b>
<b>Ökade kostnader gentemot referensugn (SEK/ton stål)</b>	-	<b>62.6</b>	<b>83.6</b>	<b>104.3</b>	<b>76.2</b>

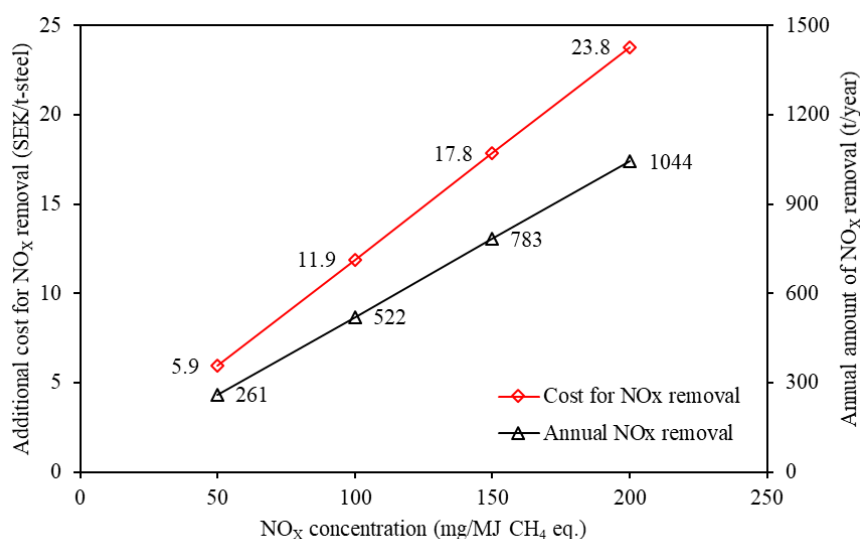
**Tabell 25. CO<sub>2</sub>-emissioner och kostnad för att undvika koldioxid.**

Parameter	Plasma	MEA	Vätgas (utan H <sub>2</sub> överföring)	Vätgas (med H <sub>2</sub> överföring)
CO <sub>2</sub> genererad (kg CO <sub>2</sub> /ton stål)	-	8.3	-	-
CO <sub>2</sub> fångad (kg CO <sub>2</sub> /ton stål)	-	74.6	-	-
CO <sub>2</sub> undviken (kg CO <sub>2</sub> /ton stål)	82.9	74.6	82.9	82.9
<b>CO<sub>2</sub> undviken kostnad (SEK/ton CO<sub>2</sub>)</b>	<b>760.6</b>	<b>1120.6</b>	<b>1258.0</b>	<b>919.4</b>

Tabell 25 presenterar koldioxidutsläpp och kostnader för att undvika koldioxid. Som framgår av tabellen har plasmascenariot, med hög verkningsgrad och hög entalpi, lägre kostnader för att undvika koldioxid än övriga alternativ. Kostnaden på 760,6 SEK/ton CO<sub>2</sub> är 47 % och 21 % lägre kostnad än för MEA- respektive vätescenariot.

Simuleringar och ekonomiska analys har utgått från att det inte genereras NO<sub>x</sub> som överskrider gällande gränsvärden, vilket är teoretiskt möjligt vid användning av CO<sub>2</sub> eller N<sub>2</sub> som plasmagasbärare och genom förhindrat luftläckage.

Trots detta kan NO<sub>x</sub> under vissa förutsättningar och i närvaro med luft kunna bli ett problem och en kostnadsfråga. I plasmaapplikationer kan NO<sub>x</sub>-reduceringen göras med direkta (in situ) eller indirekta metoder. En indirekt metod är Selectiv Catalytic Reduction (SCR). Bedömd merkostnad redovisas i Figur 44.



**Figur 44. Kostnad för NO<sub>x</sub>-reduktion vid olika koncentrationer av NO<sub>x</sub>-utsläpp (beräknat vid plasmagasspecifik entalpi = 4 kWh/Nm<sup>3</sup>; brännareffektivitet = 90%) .**



En annan möjlighet till NO<sub>x</sub>-reduktion är direkt reduktion som kan uppnås genom optimering av plasmageneratordesign och driftsparametrar. Detta kan potentiellt ha en lägre total kostnad än SCR-metoden eftersom det främst påverkar CAPEX. Samtidigt kan OPEX begränsas eftersom det inte kräver löpande drift och underhåll.

Känslighetsanalyser som effekt av plasmaeffektivitet och kostnadspåverkan redogörs i bilaga 8.

#### *Slutsatser av teknisk-ekonomisk analys*

- 1 I en kontinuerlig omvärmningsugn med 100% plasmavärme erhålls högsta ugnseffektivitet när rökgasen återvinns och återcirkulerar tillbaka till ugnen via plasmageneratoren. Injektion av sekundär gas i forman minskar värmekapaciteten hos plasmagasen som går in i ugnen, vilket minskar ugnens effektivitet. Vid plasmagenerators teoretiska maximala verkningsgrad resulterar processimuleringen i en något högre ugnseffektivitet än befintlig process.
- 2 Installation av plasmateknik har potentiellt lägre produktionskostnad och kostnad för att undvika koldioxidutsläpp jämfört med koldioxidinfångning och vätgasförbränning med oxy-fuel. Vid plasmagenerators maximala verkningsgrad ökar produktionskostnaden med 62,6 SEK/ton stål, vilket korrelerar med undvikande CO<sub>2</sub>-kostnad på 761 SEK/ton CO<sub>2</sub>.
- 3 Resultatet av den ekonomiska analysen visar att elförbrukning och el-pris är de viktigaste faktorerna i plasmascenariot. 25% förändring av elpriset kommer att väsentligt förändra den totala produktionskostnaden (cirka 20%) och kostnaden för att undvika koldioxid (70 %). Därmed är plasmagenerators effektivitet den mest betydande driftsparametern. Simuleringen visar att en minskning av effektivitet från 90 till 80% kan öka kostanden för att undvika koldioxid med 63% och totala driftkostnaderna med 18%.

## **Diskussion**

Nedan lyfts iakttagelser och slutsatser från projektet, som underlag för bedömning av möjligheter, utmaningar och behov.

### **Utfall av processanalys**

Processmässigt åstadkom plasmatekniken en atmosfär som motsvarar stålindustrins krav, åtminstone utifrån ett värmningsperspektiv. Ur ett miljö- och effektivitetsperspektiv finns det fortfarande mer att bevisa. Försöken visade en jämn temperaturprofil i ugnen och ingen förekomst av hot spots, vilket tyder på en väl omblandad atmosfär. Det kunde endast ses en mindre variation mellan de olika testfallen. Uppvärmning med CO<sub>2</sub> eller luft/gasol-blandning tenderar att ge en mer stabil temperaturjämnhet än exempelvis N<sub>2</sub>, vilket delvis beror på gasernas förmåga att lagra värme. I industriell tillämpning torde denna skillnad ha mindre betydelse, och bör inte avgöra vid val av gas. Det är viktigt att poängtera att

pilotugn och plasmagenerator inte var specifikt designad för den sammansatta processen, vilket talar för betydande optimeringspotential.

Ugnen vämdes upp i ett relativt snabbt förlopp. Vid uppstart krävde processen drygt 50% högre effekt än vid stabil drift, då det räckte med 130 kW för att bibehålla önskad temperatur. Effekt och verkningsgrad beror liksom i fallet med temperaturjämnhet på gasens inneboende förmåga att lagra värme. Detta innebär att exempelvis CO<sub>2</sub> ger en högre verkningsgrad än N<sub>2</sub>. Det visades sig också vara svårt att upprätthålla kvävgasens temperatur med motsvarande effekt under pilotförsöken. Hög gasentalpi är en fördel, men ökad strålningsbelastning i plasmasystemet ökar även förlusterna. Det är därför en balansgång att kombinera hög entalpi och upprätthålla hög verkningsgrad.

Vid försöken nådde verkningsgraden 60 % till 77 % inklusive samtliga förluster. När det gäller kvävgas är det teoretiskt möjligt att nå verkningsgrader mellan 70 och 75 % för hela plasmasystemet och 75-80 % för enbart plasmageneratoren (utan forma), där motsvarande siffror för CO<sub>2</sub> är 75-80 % respektive 80-85%. Här finns således stora optimeringsmöjligheter utifrån processens specifika behov.

Redan innan pilotförsöken konstaterades att fritt syre i kombination med kväve, ger upphov till kväveoxider i processen. Liksom föraningarna bekräftades också höga halter av NO<sub>x</sub> i avgaserna, speciellt vid referensförsöket med gasol/luftblandning och 3% O<sub>2</sub>-halt. NO<sub>x</sub>-genereringen kan i viss mån begränsas genom en understökiometrisk förbränning, men de kan ändå föranleda ett behov av NO<sub>x</sub>-rening. En atmosfär som kan motverka kombinationen syre och kväve kan därför vara att föredra, exempelvis ren kvävgas eller ren koldioxid.

Även i försöken med CO<sub>2</sub>- och N<sub>2</sub>-gas uppmättes relativt höga halter NO<sub>x</sub>, vilket framför allt kan härledas till luftläckage i ugnskammaren. I samband med tätningåtgärder sjönk NO<sub>x</sub>-halten betydligt, vilket påvisar en större potential. Lägre NO<sub>x</sub>-värden bör kunna erhållas vid optimering, exempelvis genom förtätad ugnskammare, optimerad ugnstryckreglering och slussmetoder för in- och utmatning av material.

Plasmavärmd gas har en mycket hög entalpi, d.v.s. energiinnehåll per gasvolym. Det innebär betydligt mindre avgasmängder än vid exempelvis gasol/luftförbränning, som genererar cirka fyra gånger så mycket avgaser än ren CO<sub>2</sub> som plasmagas. Avgasmängden behöver beaktas vid redovisning av NO<sub>x</sub>-utsläpp där värde per volymenhet (mg/Nm<sup>3</sup>) kan vara orättvis i jämförelse med gasol/luftförbränning. Trots högre specifikt värde kan de absoluta utsläppen vara mindre än vanlig förbränning.

De minskade avgasvolymerna vid fullständig eller kombinerad plasmaanvändning måste även beaktas vid ugnsdimensionering, där ugnsutrymme, avgassystem och avgasrening måste anpassas för lägre avgasvolym. I ett kombinerat system med plasma och vanlig förbränning kommer sannolikt specifik NO<sub>x</sub>-halt öka som följd av fritt syre, men det är inte självklart att de totala utsläppen ökar. Kombinationen plasmateknik med annan förbränningsteknik kunde av tekniska skäl inte undersökas i pilottesterna. Testdag 1 kan möjligtvis ses som en kombinerad

plasma- och gasbrännare då luft och gasol användes, och därmed ge en indikation på möjligheter, utmaningar och behov.

Rent praktiskt skulle det gå att ersätta befintliga brännare med plasmageneratorer i befintliga ugnar, men det krävs sannolikt modifieringar för att begränsa gasvolym och NO<sub>x</sub>-utsläpp. Det krävs också utökad kraftförsörjning och ett försörjnings-system för valda gaser.

Påverkan på processutrustning kunde inte identifieras under testerna, då försöken genomfördes under en alltför begränsad period. Normalt slits kopparelektroder i plasmageneratoren, som vid optimerad drift byts efter 500 drifttimmar. Bytet kan ske under normal drift genom att ha två plasmageneratorer som växlar på samma position. Slitagebilden påverkas också av gastyp och närvaro av syre, vilket föranleder ett behov av optimering utifrån vald gas.

### Utfall av materialanalys

SSAB Borlänge, SSAB Oxelösund och Ovako testade och analyserade kolstål. Slutsatsen är att en atmosfär med CO<sub>2</sub> ger mindre avkolning jämförelse med en N<sub>2</sub>-atmosfär. Omvänt ger kvävgas mindre oxidtillväxt och framför allt i fallet utan vatten/ånginblandning. Generellt sett skilde sig oxidering och avkolning ytterst lite åt mellan företagens respektive prover. Det gick heller inte att skönja någon större skillnad mellan högre och lägre legerat stål.

Den övervägande delen av glödskalet, storleksordning 1mm, var som regel lättrensat och släppte även från ytan utan mekanisk påverkan. Det kvarvarande skiktet om ca 100-150µm försöktes att avlägsnas genom betning, men trots längre tid i betbadet kunde glödskalet ej avlägsnas fullständigt. Ingen tydlig skillnad mellan proverna kunde noteras så det kan antas att detta var atmosfäroberoende. En möjlig orsak är att kylningen av proverna skedde i rumstemperatur och utan glödskaalsspolning, så att glödskalet blivit alltför intakt och bundet till grundmaterialet. I det tunna skiktet kring stålytan kunde konstateras att fayalite följde magnetitkornens korngränser, men också delvis var förankrad vid stålets yta. Detta kan ge upphov till en mer svåravlägsnad oxid.

När det gäller rostfritt material, som testades av Outokumpu, gav värmning med N<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> och N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O bästa resultaten avseende oxidationsdjup, tillväxt och avlägsnande av oxid genom betning. En tunn kromrik oxid erhöles, vilket resulterade i en kort betningstid. Mest oxidation erhöles för provbitar uppvärmda med CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O som bärgas/formagas, följt av luft/gasol och CO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>. Vid 180 minuters värmning i CO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> respektive luft/gasol uppvisade proverna liknande resultat, medan CO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> efter 60 minuter påvisade mindre oxidation än luft/gasol. Sågade ytor var också mindre oxiderade och hade mindre viktninskning, vilket gav kortare betningstider. Proverna som värmdes med N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O är svåra att dra slutsatser från då de värmdes vid lägre temperatur.

CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O resulterade i högre oxidation än under tillsats av endast CO<sub>2</sub>. Högre oxidation kan bero på den relativt höga mängden vattenånga och/eller överskott av syre. Båda faktorerna har en känd negativ effekt på oxidation av rostfritt stål.

Ur ett oxidationsperspektiv ger värmning med  $N_2/N_2$  och  $N_2/H_2O$  bästa resultaten avseende oxidationsdjup, tillväxt och avlägsnande av oxid genom betning, men ur ett värmningsperspektiv kan gasblandningarna minska produktiviteten. Den övergripande bedömningen från Outokumpu är att  $CO_2/CO_2$  och  $CO_2/H_2O$  är de mest intressanta alternativen. Speciellt om  $CO_2$  kan återcirkuleras.

### **Möjligheter med plasmateknik**

Plasmateknikens energiförsörjning är 100% elektrisk, vilket med en helt fossilfri nordisk el-mix innebär fossilfri energiförsörjning. Genom att använda biogena och fossilfria värmebärargaser erhålls en helt fossilfri process.

Plasmateknik skapar förutsättningar för snabba och kontrollerade uppvärmningsförlopp. Svarstiden vid reglering är omedelbar. Genom att optimera och välja typ av plasmagas har man möjlighet att skapa en atmosfär som gynnar processen. Det finns också potential att nyttja plasmans intensiva värmestråle för att påverka materialets egenskaper, eventuellt i kombination med impinging jet-teknik.

Genom att ersätta gasol/luft-förbränning med  $CO_2$  eller  $N_2$  minskas flödet genom ugnen, vilket skapar förutsättningar för betydligt mindre ugnsvolymer. All kringutrustning kan dimensioneras ned, inklusive fläktar, rökgassystem, eventuell avgasrening etc. Dessutom kan tilluftssystem exkluderas, men i gengäld behövs infrastruktur för elkraft och valda gaser. Detsamma gäller även om en konventionell brännare ersätts av en plasmagenerator i befintlig process. Om det går att hantera  $NO_x$ -problematiken skulle plasmatekniken kunna användas för att succesivt konvertera befintliga ugnprocesser och skapa en smidig övergång, men förutom utökad kraftförsörjning krävs sannolikt modifieringar av ugnen.

Plasmatekniken har ett antal utmaningar som värmekälla i ugnar, men tekniken har under årtionden utvecklats för helt andra ändamål. Detta innebär sannolikt fortsatta utvecklingsmöjligheter när det gäller exempelvis effektivitet,  $NO_x$ -reducering, drift, underhåll, materialval m.m. Ett tydligt exempel är forman, som är nödvändig i många andra applikationer, men som eventuellt kan exkluderas i en värmningsugn. Då skulle formans kylförluster undvikas och bidra till en effektivare process.

### **Utmaningar och möjliga åtgärder**

Den tydligaste utmaningen, som även bekräftades av försöken, är processen förmåga att generera termisk  $NO_x$ . All fritt syre har en förmåga att reagera med kväve. Med en kväverik atmosfär räcker det med ett litet luftläckage för att generera betydande mängder  $NO_x$ . Har man luft som värmebärare blir utmaningarna desto större, medan ren  $CO_2$  har betydligt bättre förutsättningar att hålla  $NO_x$ -nivån på en rimlig nivå. I applikationer med förekomst av syre föranleder sannolikt ett behov  $NO_x$ -rening, exempelvis katalytisk avgasrening.

En inert ugnsatmosfär ställer krav på ugnens täthet och tryckreglering. Detta är förmodligen en mindre utmaning om man designar en ny ugn, men kräver sannolikt åtgärder i en befintlig ugn. Speciellt i kombination med reducerade

gasflöden genom ugnen, då även detta måste beaktas. En möjlig orsak till luftläckage är dock in- och uttransport av material. Detta blir extra utmanande i en kontinuerlig process. I en batchprocess, där material laddas mellan värmningsprocesserna, är förutsättningarna desto bättre. Slussningssystem för in- och utmatning skulle kunna vara en metod för att hålla atmosfären inert.

Recirkulation av avgaserna är också en möjlighet att bidra till inert atmosfär, upprätthålla en effektiv process och samtidigt minimera gasförbrukningen. Detta är något som görs i andra typer av plasmaprocesser. En återcirkulation kräver kylda gaser före återanvändning, vilket kan innebära energiförluster. För att undvika större energiförluster krävs systemperspektiv för att återanvända avkyld energi i aktuell eller närliggande process.

En kombinerad process, med plasmateknik och konventionella gasbrännare i kombination med luft eller syre, blir utifrån NO<sub>x</sub>-problematiken också en utmaning. Det kräver sannolikt någon typ av NO<sub>x</sub>-rening.

Plasmageneratorer är effektkrävande, vilket ställer krav på elförsörjningen. Den energi som idag försörjs med fossila bränslen, ska vid plasmatilämpning ersättas med elkraft med tillräcklig kapacitet. Beroende på lokala förutsättningar kan det vara både en utmaning och kostnadsfråga att erhålla effekt från elnätet via elleverantören och bygga intern kraftdistribution.

En fossilfri plasma kräver också fossilfri gasproduktion och gas från biogena källor. I närtid kan det vara en utmaning och en kostnadsfråga, men i takt med samhällets och gasleverantörernas omställning skapas också förutsättningar för fossilfritt framställda och biogena gaser.

Drift, underhåll och personsäkerhet kan vara en utmaning då plasma ännu inte är etablerad i stålindustrin. Det förutsätter att tekniken integreras på ett tillämpbart och personsäkert sätt. Risker måste identifieras och förebyggas redan i designstadiet.

Underhållskostnaden för plasmateknik är något som oroar industrin. I plasmasystemet är det främst kopparelektrodena i plasmageneratorn som slits och byts efter 500 timmar. De kan visserligen bytas under drift, men frekvensen kan bidra till höga underhållskostnader för material och personal.

Uppskalning och implementering kommer att innebära många avvägningar och anpassningar, både när det gäller effektivitet, kväveoxider, val av gas och ugnsgdesign. Vid val av gas så måste både önskade materialegenskaper och brännareffektivitet beaktas. Vid val av plasmagas kan viss grad av energieffektivitet behöva kompromissas bort gentemot önskade materialegenskaper.

### **Implementering av plasmateknik i nya och befintliga ugnar**

Plasmatekniken har potential att implementeras i både nya och befintliga ugnar. Generellt sett skulle tekniken få sin allra bästa effekt i en nykonstruerad ugn, som anpassats utifrån plasmateknikens förutsättningar. Plasmatekniken bör rent

tekniskt kunna integreras i befintliga ugnar. Sannolikt krävs modifieringar med hänsyn till avgasflöde, NO<sub>x</sub>-reducering och vald gas.

Plasmatekniken bedöms också passa bäst i värmningsprocesser där hög temperaturer >1000°C eller viss atmosfär eftersträvas. Utifrån denna studie anses därför ämnesvärmningsugnar och eventuellt ugnar för järnsvamp och pulvertillverkning som de mest lämpande för implementering.

Tekniken bedöms också kunna användas för värmebehandling, som i regel kräver lägre temperaturer, d.v.s. <800°C. För dessa processer finns redan konkurrenskraftiga och tillämpbara alternativ genom exempelvis elektrisk resistiv och induktiv värmning. Dessa tekniker bedöms i dagsläget vara mer kostnadseffektiva, men ett möjligt skäl till plasmateknik kan vara att nyttja plasmagasens energiintensitet för att påverka materialspecifika förutsättningar eller öka produktiviteten.

Plasmatekniken passar sannolikt bättre i batchugnar än kontinuerliga processer, då batchprocessen är lättare att isolera från luftens syre och kväve. En kontinuerlig process finns många källor till luftläckage. Vissa av dem kan säkert motverkas, men utmaningarna är större.

Dagens ämnesvärmningsugnar är designade för stora gasflöden. För att kunna upprätthålla trycket i samma ugn krävs en förändring av layouten och optimerad tryckreglering. Annars är risken stor för luftläckage. I ett initialt skede är det sannolikt plasma lättare att implementera i en mindre ugn.

En integrering av plasmatekniken kräver sannolikt någon typ av recirkulation för att minimera NO<sub>x</sub>-utsläpp och kostnader för gaser. Studien har inte kunnat fastställa en detaljerad designlösning. Motsvarande cirkulationssystem finns dock i andra typer av etablerade plasmaprocesser, vilket påvisar dess möjlighet.

### **Plasmateknik i jämförelse med andra alternativ**

Den teknisk-ekonomiska analysen visar att plasmateknik har största CAPEX i jämförelse med koldioxidinfångning och vätgasförbränning. Dock har plasma potentiellt lägre produktionskostnad och kostnad för att undvika koldioxidutsläpp jämfört med övriga alternativ. Produktionskostnaden för plasmascenariot blir 221,3 SEK/ton stål, vilket är en fördyring med 62,6 SEK/ton stål i jämförelse med dagens system, men billigare än koldioxidinfångning eller vätgas.

Det bör beaktas att koldioxidinfångning med MEA-teknik endast ger cirka 90 % CO<sub>2</sub>-reduktion, vilket kräver ytterligare åtgärder för att bli fossilfri. Plasma ger den lägsta kostnaden för att undvika CO<sub>2</sub> i jämförelse med andra antagna alternativ, med en kostnad på 760,6 SEK/ton undviken CO<sub>2</sub>. Beroende på framgången att förebygga NO<sub>x</sub> vid design av en plasmautrustad ugn, kan det ändå krävas NO<sub>x</sub>-rening, vilket kan fördyra produktionskostnaden. En reduktion av 200 mg NO<sub>x</sub>/MJ CH<sub>4</sub> ekv. ökar kostanden med 24 kr/ton stål

## Forsknings- och utvecklingsbehov

Teknikutvecklingen är i sin linda när det gäller plasmateknik i uppvärmningsprocesser. Några fortsatta FoU-behov är:

- **Reduktion av kväveoxider**
  - I detalj studera vart NO<sub>x</sub> genereras i processen.
  - Studera och utveckla specifika lösningar för att minimera NO<sub>x</sub> i ugnar med plasmasystem, inklusive förebyggande åtgärder och reningsteknik, exempelvis:
    - Förhindra att ugnskammaren exponeras av omgivande luftatmosfär
      - Utveckla tätare ugnar.
      - Optimera tryckreglering.
    - Studera luft/gasol-blandning som bärargas, med understökiometrisk förbränning och efterförbränning av processgas inklusive inverkan på NO<sub>x</sub>-bildning.
    - Utveckla tekniken för recirkulation av plasmagas i värmningsugnar.
- **Verkningsgrad och optimering av plasmautrustning**
  - Studera plasmasystemets verkningsgrad och kylförluster samt optimera uppsättningen av plasmagenerator och forma utifrån valda gaser samt värmnings- och materialspecifika behov. Studera möjlig exkludering av forma, inklusive följdverkan.
  - Studera temperaturjämnhet i ugnskammaren och förekomst av hot spots vid förändrat flödesförhållande för plasmagas/formagas.
  - Optimera kylförluster och kylvattentemperaturer. Med process- och materialutveckling är det möjligt att öka temperaturen på utgående vatten uppemot 90 °C. Idag är temperaturen begränsad till 60 °C på grund av rådande säkerhetsnivå.
- **Ugns- och systemlayout**
  - Processoptimering för att förbättra ugnens termiska effektivitet.
  - Genomföra grundläggande CFD-simuleringar (Computational Fluid Dynamics) för att ytterligare förstå värmeöverföring inuti ugnskammaren vid olika driftförhållanden.
  - Utifrån CFD-simuleringar fastställa lämplig ugnslayout, exempelvis:
    - Fastställa ugnskammarutformning

- Dimensionera rökgassystem
- Utredda den föreslagna recirkulationens effekter
- Utveckla tekniska lösningar för in- och uttransport av material med minimal påverkan på ugnsatmosfären.
- Studera plasmageneratorernas placering för optimala förutsättningar.
- Studera och utveckla systemintegration för att ta tillvara restenergi i kylvatten.
- Genomför ytterligare systematiska tester i labb- eller pilotskalaför att förstå och bekräfta utredningens hypoteser. Kontrollvariabler bör fastställas för att förstå och testa det relativa förhållandet mellan beroende (t.ex. värmeflöde, ugnstemperatur osv.) och oberoende variabler (t.ex. plasmaeffekt, bärgasflöde osv.).
- **Implementering i nya och befintliga ugnar**
  - Studera hur processens utsläpp påverkas av en partiell konvertering till plasmateknik.
  - Studera de tekniska förutsättningarna för att implementera plasmateknik i en befintlig ugn, för att bland annat fastställa detaljerad kostnadskalkyl.
  - Undersöka möjligheten att optimera kraftelektroniken, både avseende storlek och investeringskostnad.
- **Drift, underhåll och personsäkerhet**
  - Studera plasmatekniken förutsättningar och inverkan vid industriell tillämpning och i industriell miljö.
  - Process- och materialoptimering för att förlänga plasmageneratorns underhållsintervall.
  - I långvariga tester utvärdera hur plasmatekniken påverkar ugnsutrustning och infordring.
- **Materialpåverkan**
  - Studera hur olika gaser och olika grader av H<sub>2</sub>O-injektion påverkar värmeöverföring och material.
  - Studera plasmavärmning och effekten på material i ett ännu mer ”verkligt” fall, som även inkluderar en reglerad kylprocess.
  - Studera plasmateknikens förutsättningar att påverka materialegenskaper i kombination med impinging jet-teknik.



## Plasmateknikens möjligheter i stålindustrins ugnar

De förhållandevis enkla pilotförsöken i studien har visat att det är både praktiskt och funktionellt möjligt att värma stål med plasmateknik. Rätt val av plasmagas och optimering av driftförhållanden har potential att ge stålindustrin önskad stålqualität vid värmning. Försöken har också visat att plasmateknik har potential att utgöra värmekälla vid tillverkning av pulver och järnsvamp.

Teknikutvecklingen för att nyttja plasmatekniken som värmekälla i ugnar är trots allt i ett mycket tidigt skede, vilket torde innebära stora möjligheter till optimering. Det finns ett antal utmaningar som måste lösas, som framför allt är kopplat till NO<sub>x</sub>-utsläpp, effektivitet och kostnader för underhåll.

Plasmatekniken kan sannolikt inte ses som en lösning för stålindustrins ugnar de närmsta åren, men med ökad FoU skulle tekniken kunna vara ett konkurrenskraftigt alternativ på längre sikt (4-10 år). För att nå dit krävs bl.a. forskning för att kvalitetssäkra uppvärmt material och motverka NO<sub>x</sub>-bildning, men även processoptimering, plasmautrustningens utformning och placering, värmeåtervinning, underhåll och kraftförsörjning för att maximera effektivitet och minimera kostnader.

## Publikationslista

- Abstract: *Towards CO<sub>2</sub>-free Swedish steel industries: Application of plasma torches for heat-treating furnaces*, I. Nuran Zaini, R. Svanberg, D. Sundberg, M. Swartling, J. Engdahl, A. Johnsson, W Yang, N. Tarantino. Konferensbidrag ESTAD, European Steel Technology and Application Days, 30 aug - 2 sept 2021, Stockholm. Presentation av processanalys och teknisk-ekonomisk analys.

## Referenser

- Jernkontoret. (2018). *Klimatfärdplan för en fossilfri och konkurrenskraftig stålindustri i Sverige*.
- Jernkontoret. (2021). Hämtat från Branschfakta och statistik: <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/branschfakta-och-statistik/energianvandning/>
- Jernkontoret. (2021). *Samforsk klimat*. Hämtat från <https://www.samforskklimat.se/>
- Klimatpolitiska rådet. (2019). *Klimatpolitiska rådets rapport*.
- Lindén E, T. E. (2019). *Electrification of the heat treatment process for iron ore pelletization at LKAB*. Chalmers tekniska universitet.
- Regeringen. (den 17 december 2019). *En samlad politik för klimatet – klimatpolitisk handlingsplan*. Hämtat från Regeringens proposition: <https://www.regeringen.se/4a9c81/contentassets/61f93d2abb184289a0c81c75395207b6/en-samlad-politik-for-klimatet--klimatpolitisk-handlingsplan-prop.-20192065>
- SCB. (2021). *Utsläpp och upptag av växthusgaser*. Hämtat från <https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/>

SSAB. (den 1 februari 2021). *First in fossil-free steel. Using HYBRIT Technology*. Hämtat från <https://www.ssab.com/company/sustainability/sustainable-operations/hybrit>

Wei M, M. C. (2019;6). Electrification of Industry: Potential, Challenges and Outlook. . i *Curr Sustain Energy Reports* (ss. 140–148). Can, de la Rue du S. .

Övriga källor, se respektive bilaga.

## Bilagor

**BILAGA 1:** Administrativ bilaga PLATIS

**BILAGA 2:** Industriell implementering av plasmateknik, ScanArc Plasma Technologies

**BILAGA 3:** Applications of thermal plasma torches for industrial furnaces: A review. I Nuran Zaini, R Svanberg, W Yang. Department of Materials Science and Engineering, KTH Royal Institute of Technology

**BILAGA 4.** PLATIS Pilotförsök dag 1 - 5, ScanArc Plasma Technologies

**BILAGA 5.** Technical report. Application of thermal plasma torch for steel heat-treatment furnaces. Result from the pilot scale. I Nuran Zaini, R Svanberg, W Yang, KTH Royal Institute of Technology. D Sundberg, ScanArc Plasma Technologies. K Bölke, Linde Gas

**BILAGA 6.** Sammanställning av utförda materialanalyser inom projekt PLATIS\_ *EJ SPRIDNING*. A Johnsson, Swerim.

**BILAGA 7.** Summary of PLATIS trials – External. K. Lundqvist, Höganäs AB.

**BILAGA 8.** Techno-economic analysis of thermal plasma torch application for heating furnaces. I Nuran Zaini, W Yang. Department of Materials Science and Engineering, KTH Royal Institute of Technology