

Energimyndighetens titel på projektet – svenska <b>HYBRIT Pilotprojekt – Fossilfri gasvärmning med el</b>	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska <b>HYBRIT Pilot project – Fossil-free Gas heating</b>	
Universitet/högskola/företag <b>HYBRIT Development AB</b>	Avdelning/institution
Adress <b>Box 70, 101 20 Stockholm</b>	
Namn på projektledare <b>Volker Schöllmann</b>	
Namn på ev övriga projektdeltagare	
Nyckelord: 5-7 st <b>Elektrisk värmning, processgasvärmning, direktreduktion, värmarteknik</b>	

## Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten, HYBRIT Development och Kanthal. Samriskbolaget HYBRIT Development ägs gemensamt av SSAB, LKAB och Vattenfall.

En gemensam utvecklingskommitté som etablerats inom ramen för samarbetsavtalet mellan HYBRIT Development och Kanthal har fungerat som styrgrupp för projektet. Arbetet har genomförts med i huvudsak specialister från de deltagande företagen och samarbetspartners.

## Innehållsförteckning

Förord .....	1
Innehållsförteckning .....	1
Sammanfattning .....	2
Summary .....	2
Inledning och bakgrund .....	3
Genomförande .....	7
Resultat .....	10
Diskussion .....	17
Bilagor .....	17

## Sammanfattning

HYBRIT (HYdrogen BReakthrough Ironmaking Technology) är ett gemensamt initiativ av de tre företagen SSAB, LKAB och Vattenfall med målet att ta fram världens första fossilfria malmbaserade ståltillverkning. Fossilfri värmningsteknik är ett viktigt utvecklingsområde för att industrialiseringen ska bli framgångsrik både miljömässigt och kommersiellt. HYBRIT och Kanthal har därför drivit ett gemensamt projekt för att utveckla en ny fossilfri gasvärmningslösning baserad på el för framtida implementering i storskaliga industriella anläggningar.

Projektet har utvecklat, installerat och testat en ny elbaserad gasvärmare, med ca 1 MW effekt, i reduktionsgaskretsen i HYBRIT:s pilotanläggning för direktreduktion i Luleå. Elbaserad gasvärmning medför inga utsläpp av växthusgaser under drift, under förutsättning att fossilfri el nyttjas. Värmaren har körts fullt integrerat i direktreduktionsprocessen, som styrs som ett sammanhållet produktionssystem. Pilotförsöken har framgångsrikt visat på värmkonceptets potential som en metod att ersätta fossila bränslen med fossilfri el. Kunskaper kring processintegration, styrning och reglering har inhämtats, till stöd för fortsatt utveckling och uppskalning av tekniken. Nästa steg i det tekniska utvecklingsarbetet har baserats på projektets resultat och drivs med fokus på optimering av design och fastställande av designkriterier för en kostnadseffektiv industriell lösning med hög tillgänglighet.

## Summary

HYBRIT (HYdrogen BReakthrough Ironmaking Technology) is a joint initiative by the three companies SSAB, LKAB and Vattenfall with the objective of developing the world's first fossil-free ore-based steelmaking. Fossil-free heating technology is an important development area for the industrialization to be successful both environmentally and commercially. HYBRIT and Kanthal have therefore run a joint project to develop a new fossil-free gas heating solution based on electricity, for future implementation in large-scale industrial facilities.

The project has developed, installed, and tested a new electricity-based gas heater, with approximately 1 MW power output, in the reduction gas circuit in HYBRIT's pilot plant for direct reduction in Luleå, Sweden. Electricity-based gas heating entails no emissions of greenhouse gases during operation, provided that fossil-free electricity is used. The heater has been run fully integrated in the direct reduction process, which has been controlled as a cohesive production system. The pilot tests have successfully shown the potential of the heater concept as a method to replace fossil fuels with fossil-free electricity. Know-how regarding process integration, control and regulation has been acquired, to support continued development and up-scaling of the technology. The next step in the technical development work has been based on the project's results and is driven with a focus on optimizing the design and establishing design criteria for a cost-effective industrial solution with high availability.

## Inledning och bakgrund

### Globala och nationella klimatmål

Parisöverenskommelsen<sup>1</sup> i december 2015 innebar att världens länder kom överens om ett ramverk för att begränsa den globala uppvärmningen. Överenskommelsen innebar att temperaturökningen måste begränsas till under 2 °C och insatser ska sikta på att begränsa ökningen till 1,5 °C.

Sverige har ett mål om nettonollutsläpp av växthusgaser år 2045. Masugnarna i stålindustrin står för en stor del, ca 10 %, av utsläppen av fossil koldioxid i Sverige. En omställning av befintlig värdekedja mot en fossilfri produktion kan uppnås när kol ersätts som reduktionsmedel av vätgas, och därmed indirekt el. Detta innebär en betydande ökad elanvändning, uppskattningsvis 15–20 TWh/år. Förutsatt att tillförd elenergi produceras med fossilfria källor så innebär detta att den absoluta huvuddelen (>90 %) av CO<sub>2</sub>-utsläppen i Sverige som idag härrör från järnmalms-, järn- och stålindustrin inom överskådlig tid kan elimineras.

### HYBRIT – ett initiativ för att genomföra omställningen

HYBRIT (HYdrogen BReakthrough Ironmaking Technology) är ett gemensamt initiativ av de tre företagen SSAB, LKAB och Vattenfall med målet att ta fram världens första fossilfria malmbaserade ståltillverkning genom riktade utvecklingsprojekt. Initiativet startades våren 2016 och sedan dess har ett flertal studier kopplat till värdekedjan genomförts med finansiellt stöd av Energimyndigheten.

För att utveckla nya produktionssystem krävs normalt en flerstegsutveckling där varje steg besvarar olika frågeställningar och där avståndet mellan varje steg är avvägt för att minimera utvecklingsrisker. Ambitionen för HYBRIT-initiativet är att etablera den nya värdekedjan genom laboratorie- och pilotstudier följt av en demonstrationsfas. En första kommersiell anläggning förväntas därefter bekräfta både process och produkt industriellt och kommersiellt, vilket är en förutsättning för vidare spridning både inom och utom Sverige.

### Utvecklingsbehov för fossilfri gasvärmningsteknik för direktreduktion

I alla industriella processer är energiförbrukningen en huvudfaktor för att nå en låg produktionskostnad. Vid reduktion av järnmalm (d.v.s. järnoxid) till metalliskt järn skiljer sig reaktionsvärmnet – den energi som avges eller förbrukas då reaktionen sker – kraftigt åt beroende på om reduktionsmedlet är kolbaserat eller vätgasbaserat. Reduktion med kolhaltiga gaser resulterar i en svagt värmeavgivande (exoterm) reaktion medan reduktion med vätgas är värmekrävande (endoterm). Detta skifte i energibehov förändrar reduktionsprocessens värmebalans och ett extra värmestillskott krävs vid

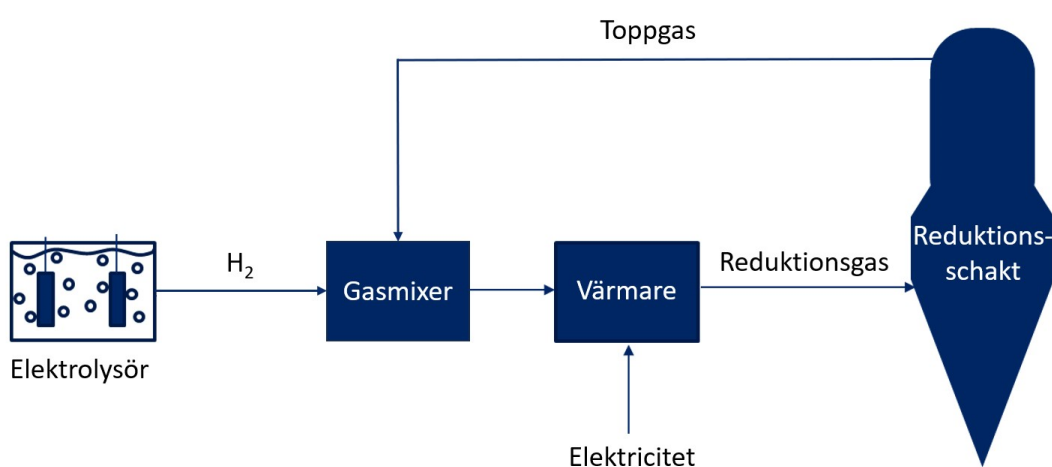
---

<sup>1</sup> Parisavtalet – Ett avtal mellan 197 nationer efter förhandlingar inom ramen för FN:s "Framework Convention on Climate Change".

vätgasreduktion. Utmaningen är att finna en lämplig fossilfri teknik för värmning av reduktionsgasen.

### Gasvärmningsteknik för industriell implementering

Vid utformningen av en direktreduktionsanläggning med vätgas som reduktionsmedel har utgångspunkten varit existerande teknik och processutformningar för fossila kolhaltiga gaser. Reduktionsgasen hettas upp till hög temperatur för att klara värmebalansen för den kemiska reaktionen i reduktionsschaktet. Energibehovet för värmning av gasen varierar beroende på design av gaskretsen och tillhörande återvinning av energi från toppgasen. Ett förenklat flödesdiagram för en vätgasbaserad direktreduktionsprocess med reduktionsschakt, gaskrets och gasvärmare visas i Figur 1.



**Figur 1. Översiktligt processflödesschema för en direktreduktionsanläggning med vätgas som reduktionsmedel.**

Olika gasvärmningsalternativ har utvärderats och testats inom ramen för HYBRIT-initiativet för en industriell implementering. Dagens kommersiella storskaliga gasvärmningslösningar som når hög temperatur baseras främst på förbränning av fossila bränslen.

Förbränning av vätgas är ett tekniskt moget och fossilfritt alternativ för värmning av gas. Låg verkningsgrad genom förluster i samband med produktion av vätgas via elektrolys gör dock detta alternativ ekonomiskt mindre attraktivt. Biobränsleeldade alternativ bedöms inte kunna nyttjas på grund av begränsade temperatur- och försörjningsmöjligheter för stora volymer i en marknad med begränsad storlek. Kommersiellt tillgängliga elbaserade gasvärmningslösningar når endast gastemperaturer upp till ca 800–900 °C. Plasmateknik är en lovande elbaserad teknik för värmning av gaser. Plasmateknik har utvärderats inom flera projekt, bland annat i HYBRIT:s pilotprojekt för sintring av järnmalmspelletts<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> HYBRIT Pilot Fossilfri pellets. Energimyndigheten projektnummer 46752-1.

Resultat från dessa försök är lovande men tekniken är ännu inte tillgänglig för tillämpning i stor skala.

Det saknas en fossilfri och konkurrenskraftig gasvärmningslösning för vätgasbaserad direktreduktion som uppfyller kraven – hög gastemperatur för HYBRIT:s reduktionsgassammansättning, fossilfrihet, tillgänglighet för en storskalig implementering i närtid och låg kostnad. Utifrån de undersökta alternativen bedöms elbaserad gasvärmning vara den mest relevanta tekniken idag, med stor potential för vidare utveckling med relativt kort ledtid.

### **Syfte och metod**

Syftet med projektet var att utveckla en ny fossilfri gasvärmningslösning baserad på el för framtida implementering i storskaliga direktreduktionsanläggningar.

Den tekniska utvecklingen av värmningslösningen har inledningsvis skett i ett försökslaboratorium för att testa och validera funktion och prestanda. Därefter har lösningen tillämpats integrerat i direktreduktionsprocessen i HYBRIT:s pilotanläggning. Med den stegvisa uppskalningen har det varit möjligt att identifiera och testa de kritiska aspekterna i successivt växande skala, både ur ett användarperspektiv och ur konstruktionssynpunkt.

### **Utgångspunkt för projektet**

Utgångspunkten för projektet var ett nytt koncept för elektrisk värmning av gaser som föreslagits av Kanthal.

Kanthals föreslagna värmningslösning har flera fördelar, såsom hög effekt med en mindre och lättare konstruktion jämfört med konventionella lösningar samtidigt som komplexiteten i systemet sjunker. Kanthals metalliska motståndsmaterial kan tillverkas både som värmeelement och konstruktionsmaterial (rör, plåt etc.). Då materialet i elementen och rören kan vara detsamma kan en värmekonstruktion innefattande rör, som i detta fall, designas så att röret agerar både som konstruktionsmaterial och element på samma gång. Denna lösning gör värmaren mer kompakt än om rör värms med element fästa på rören utsida. Dessutom minskar värmeförlusterna i systemet.

### **Projektmål**

Avsikten med projektet är att utveckla en fossilfri och effektiv gasvärmningslösning för implementering i en vätgasbaserad direktreduktionsprocess i industriell skala. Fossilfri gasvärmningsteknik bedöms kunna ge betydande utsläppsreduktioner jämfört med konventionell fossilbaserad teknik. En elbaserad värmningslösning bedöms vidare kunna utformas med hög verkningsgrad och ge en signifikant energibesparing för uppvärmningen av reduktionsgas.

En central aspekt av utvecklingen har varit design och tillverkning av prototyper för testning samt validering av prestanda och funktionalitet i en semi-industriell skala och produktionskontext. Tanken är att genom dessa tester värdera den tekniska mognaden inför implementering i industriell skala.

**Projektets mål:**

- Utveckla och installera en effektiv elbaserad gasvärmare i pilotskala (ca 1 MW) samt utveckla en processlösning och know-how för integration i en direktreduktionsprocess.
- Genom test i pilotskala verifiera design och prestanda av Kanthals gasvärmarlösning som underlag till implementering och tillämpning i industriell skala, inför första implementering i HYBRIT:s demonstrationsanläggning.
- Genomföra minst tre års drift med experimentella försök i laboratoriemiljö samt drift under försökskampanjer i HYBRIT:s pilotanläggning för direktreduktion.

**Tidplan**

Projektet genomfördes 2020-11-01–2023-12-31.

**Finansiering**

Projektparterna HYBRIT Development AB och Kanthal AB har tillsammans bidragit med 75 % av projektkostnaden och Energimyndigheten med 25 %.

## Genomförande

### Projektparter

#### *HYBRIT*

HYBRIT Development AB är ett samriskbolag mellan SSAB, LKAB och Vattenfall. Genom att använda vätgas i stället för koks och kol i järn- och ståltillverkningen är ambitionen att utveckla en fossilfri produktionsprocess. Initiativet tillkännagavs våren 2016 och samriskbolaget bildades ett år senare. Bolagets forskning och utveckling syftar till att möjliggöra en omställning av ägarbolagens verksamhet till en fossilfri produktion och ett fossilfritt Sverige år 2045.

#### *Kanthal*

Kanthal grundades 1931 i Hallstahammar och är en division inom Alleima-koncernen. Kanthal är ett världsledande varumärke för produkter och tjänster inom industriell värmeteknik och motståndsmaterial. Visionen är att genom utveckling av hållbara värmelösningar så hjälper vi våra kunder att sänka sina energikostnader och koldioxidutsläpp, samtidigt som produktiviteten, kostnadseffektiviteten och arbetsmiljön förbättras. Kanthal har en stark tradition av forskning och utveckling i nära samarbete med kunder och vår kompetens sträcker sig från utveckling av motståndsmaterial för en bred flora av applikationer, allt från dagens teknik till morgondagens lösningar.

### Organisation

Det tekniska utvecklingsarbetet i projektet har bedrivits i tre arbetspaket.

Arbetspaket 1 har hanterat design, tillverkning och testning av en värmare i laboratorieskala med en effekt på 200–400 kW. Utvecklingsarbetet och tester har skett i laboratorium för största möjliga kontroll och flexibilitet. I arbetspaket 2 har sedan en pilotvärmare med samma elektriska effekt som värmaren i arbetspaket 1 utvecklats, för att utvärdera värmarens funktion integrerat i en del av HYBRIT:s pilotanläggning för direktreduktion. Baserat på erfarenheterna från arbetspaket 1 och 2, har därefter en värmare för huvudgaskretsen i pilotanläggningen designats och tillverkats inom arbetspaket 3. Denna värmare (effekt ca 1 MW) har tillåtit utvärdering av värmarens funktion och prestanda för reduktionsgas integrerat i direktreduktionsprocessen. Pilotförsöken med värmare i arbetspaket 2 och 3 har genomförts i samband med försökskampanjer för utveckling och testning av en vätgasbaserad direktreduktionsprocess.

### **Arbetspaket 1 – Värmare i laboratorieskala 200–400 kW**

#### *Bakgrund*

Utgångspunkten var det nya gasvärmarekoncept som Kanthal utvecklat för HYBRIT:s behov. En första gasvärmare 200–400 kW utifrån detta koncept har designats, konstruerats och testats i laboratorieskala inom arbetspaket 1.

### *Syfte och mål*

Syftet med arbetspaketet var att realisera konceptet med att värma gas med elektriskt direktvärmda rör. Målet med utvecklingen var att genom praktiska tester verifiera de simuleringar och beräkningar som ligger till grund för designen och på så sätt utgöra underlag för utvecklingen av värmare av reduktionsgas i pilotskala och industriell skala.

### *Aktiviteter*

Design, tillverkning och testning av en värmare i laboratorieskala har letts av Kanthal. Försöken i laboratorieskala har syftat till att lära sig hur värmaren kan och bör köras och bidra med kunskap nödvändig för konstruktionen och driften av de värmare som installeras i HYBRIT:s pilotanläggning för direktreduktion. I arbetspaketet ingick även datorsimuleringar av temperatur, tryck, flöde etc. för värmarna, till stöd för design och drift.

## **Arbetspaket 2 – Pilotvärmare 200–400 kW**

### *Bakgrund*

Denna värmare har installerats i en del av kretsen där endast en delmängd av processgasen passerar, som ett steg i teknikutvecklingen och ett led i uppskalningen av försöken. Detta har medgivit en utvärdering av den nya värmarlösningen för en delmängd av processgasen med en lägre temperatur och annan gassammansättning än i huvudkretsen.

### *Syfte och mål*

- Utveckla en elvärmare med effekten 200–400 kW för olika processbetingelser i pilotskala
- Integrera värmaren med befintlig processutrustning i direktreduktionsanläggningen
- Utvärdera prestanda för olika tryck, temperaturer och gassammansättningar samt tillgänglighet, effektbehov och nyttjandegrad

### *Aktiviteter*

Design och tillverkning av pilotvärmare 200–400 kW har letts av Kanthal. Elvärmaren har designats utifrån specifikation från HYBRIT för olika definierade processfall. Installation, drifttagning och testning av värmaren i pilotanläggningen för direktreduktion har letts av HYBRIT. Arbetspaketet har även hanterat projektering och genomförande av de anläggningsändringar i pilotanläggningen för direktreduktion som varit nödvändiga för att implementera värmarlösningen.

Testning av värmaren i pilotskala har genomförts gemensamt med det övergripande direktreduktionsprojektet inom HYBRIT<sup>3</sup>, eftersom pilotvärmarna är en integrerad del av processen i pilotanläggningen för direktreduktion.

---

<sup>3</sup> Försöksverksamheten inom projektet HYBRIT Pilot Fossilfri järn-, stål- och vätgasproduktion. Energimyndigheten projektnummer 46751-1.



Pilotförsöken har skett kampanjvis med 4–8 veckor per försökskampanj med relativt korta stopp mellan kampanjer för analys, utvärdering och eventuell ombyggnation.

Under och efter försökskampanjerna har driftdata och praktiska erfarenheter från anläggningen utvärderats. Resultaten har sammanfattats i löpande projektrapportering och projektets slutrapport.

### **Arbetspaket 3 – Pilotvärmare 1 MW**

#### *Bakgrund*

Denna större värmare har installerats i huvudgaskretsen i pilotanläggningen där gassammansättning och flöden skiljer sig till viss del mot installationen i arbetspaket 2.

#### *Syfte och mål*

- Utveckla en elvärmare med effekten ca 1 MW för värmning av reduktionsgas till höga temperaturer i pilotskala
- Integrera värmaren med befintlig processutrustning i direktreduktionsanläggningen
- Utvärdera prestanda för olika tryck, temperaturer och gassammansättningar samt tillgänglighet, effektbehov och nyttjandegrad

#### *Aktiviteter*

Design och tillverkning av pilotvärmare 1 MW har letts av Kanthal. Elvärmaren har designats utifrån specifikation från HYBRIT för olika definierade processfall och erfarenheter från arbetspaket 1 och 2. Installation, drifttagning och testning av värmaren i pilotanläggningen för direktreduktion har letts av HYBRIT. Arbetspaketet har även hanterat projektering och genomförande av de anläggningsändringar i pilotanläggningen för direktreduktion som varit nödvändiga för att implementera värmarlösningen.

Testning av värmaren i pilotskala har genomförts – på samma sätt som i arbetspaket 2 – gemensamt med det övergripande direktreduktionsprojektet inom HYBRIT, eftersom pilotvärmarna är en integrerad del av processen i pilotanläggningen för direktreduktion. Pilotförsöken har skett kampanjvis med 4–8 veckor per försökskampanj med relativt korta stopp mellan kampanjer för analys, utvärdering och eventuell ombyggnation.

Under och efter försökskampanjerna har driftdata och praktiska erfarenheter från anläggningen utvärderats. Resultaten har sammanfattats i löpande projektrapportering och projektets slutrapport. Möjligheter och eventuella hinder för fortsatt uppskalning har också utgjort en viktig utvärderingsparameter för detta arbetspaket.

## Resultat

### Arbetspaket 1 – Värmare i laboratorieskala 200–400 kW

#### *Konceptuell utformning*

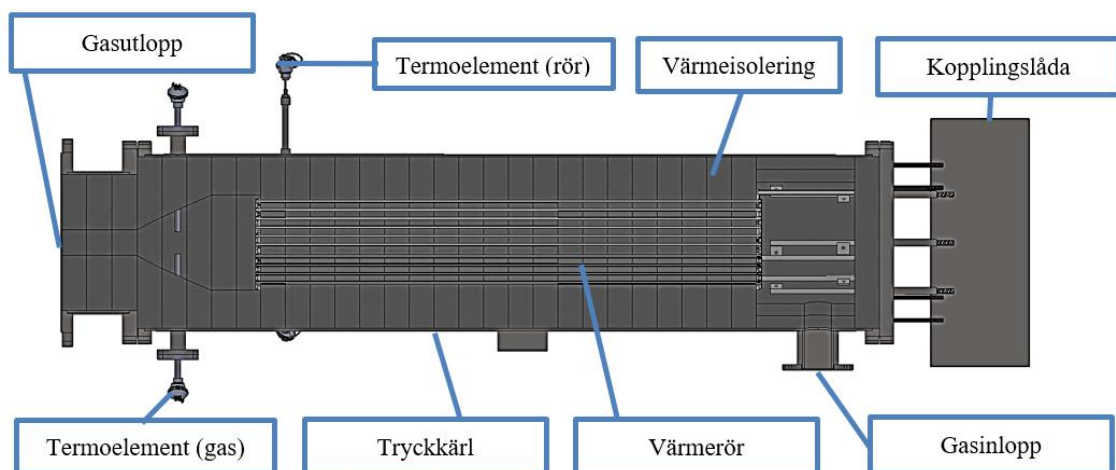
Elektrisk processgasvärmare installerad hos Kanthal i Hallstahammar. Funktionen är att värma luft, från ca 25 °C till 1100 °C, som därefter leds ut via en utsugshuv över tak.

Luften flödar horisontellt genom värmaren som består av ett värmeisolerat tryckkärl med värmarrör (se Figur 2). Luften leds in genom ett inlopp på ena sidan av värmaren och passerar genom värmarrören till utloppet på andra sidan av värmaren där det råder atmosfärstryck. Luften matas från en kompressor och flödet är justerbart.

Elvärmaren är av direktvärmande typ, vilket betyder att luften värms direkt av de elektriskt spänningssatta horisontellt monterade värmarrören (Kanthal APM-rör). Fördelen med direktvärmning är små värmeförluster och därigenom hög verkningsgrad.

Värmarrören är uppdelade i elektriskt seriekopplade sektioner som effektmatas av en tyristor. Värmarrören är instuckna i fiberplattor längs hela rörens längd som håller rören elektriskt isolerade från varandra och jord.

Termoelement placerade mellan sektionerna av värmarrör säkerställer att den högsta tillåtna temperaturen på rören inte överskrids. Andra termoelement är placerade i gasutloppet och mäter den utgående gasens temperatur. Effektregleringen sker genom ett framräknat effektbehov utifrån luftflöde, temperatur och tryck.



Figur 2. Horisontellt tvärsnitt över värmare i laboratorieskala 200–400 kW sedd uppifrån.

### Genomförda tester

En serie tester har genomförts under perioden juni 2021 till maj 2023 (se Tabell 1). Inledande tester fokuserades främst på att utvärdera värmarkonceptets grundläggande funktionalitet. Senare under projektet genomfördes tester av reglerutrustning och styrningsprinciper. Under försöken har endast luft nyttjats som gas.

Värmaren har körts under olika driftbetingelser för utvärdering av värmeöverföringsmekanismer, temperaturfördelning över rörpaketets tvärsnitt från centrum till periferi, mottryckets inverkan på värmeöverföringen, isoleringens egenskaper, flödesfördelning mellan värmerör och inverkan av förstrykning av flödet på ingångssidan av rören samt förhållanden mellan gastemperatur/rörtemperatur/manteltemperatur. I slutet av projektet har en längre driftsperiod genomförts med en reglerprincip som bygger på helvågsstyrning, istället för fasvinkelstyrning som systemet ursprungligen utvecklades för.

**Tabell 1. Genomförda försök med värmare i laboratorieskala 200–400 kW vid tekniska centret hos Kanthal i Hallstahammar.**

Datum	Försök
juni–juli 2021	Inledande försök för kontroll av grundläggande funktionalitet
augusti–december 2021	Försök med olika tryck och gasflöden
januari–mars 2022	Renovering och ombyggnation
mars–oktober 2022	Fortsatta försök med förstrykning av gasflödet på inloppet
november–april 2023	Inledande försök med alternativa styrningsmetoder
april–maj 2023	Långtidsförsök med helvågsstyrning

### Resultat och diskussion

En av utmaningarna med värmarens konfiguration har varit att uppnå en jämn temperatur över hela rörpaketets tvärsnitt, från centrum till periferi. Det faller sig naturligt att rören i en periferi, med större förluster och avsaknad av intilliggande rör, kommer verka i en lägre temperatur än de centralt belägna rören.

Problematiken förvärras dock av att trycket i de varmare rören ökar och därmed begränsar gasflödet i dessa rör, vilket leder till ytterligare förstärkt temperaturdifferens mellan centralt och perifert placerade rör. Problematiken har kompensrats genom att öka mottrycket på ingångssidan av rören, vilket gett positiva men inte tillräckliga resultat.

Värmarens konfiguration har inneburit utmaningar att på ett tillförlitligt sätt mäta rör- och lufttemperaturer i värmarvolymen. Både styrningen och analysen av värmarens funktion har försvårats av kombinationen av ojämna uppvärmning av värmarrören och svårigheten att mäta temperatur med tillräcklig precision i hela värmarvolymen.

Under senare delen av försöksperioden har arbetet främst fokuserats kring effektregleringen och tyristorenhetens funktionalitet vid fasvinkelstyrning. Vid avslutande långtidstest kördes värmaren med helvågsstyrning, vilket gav stabil drift under hela testperioden.

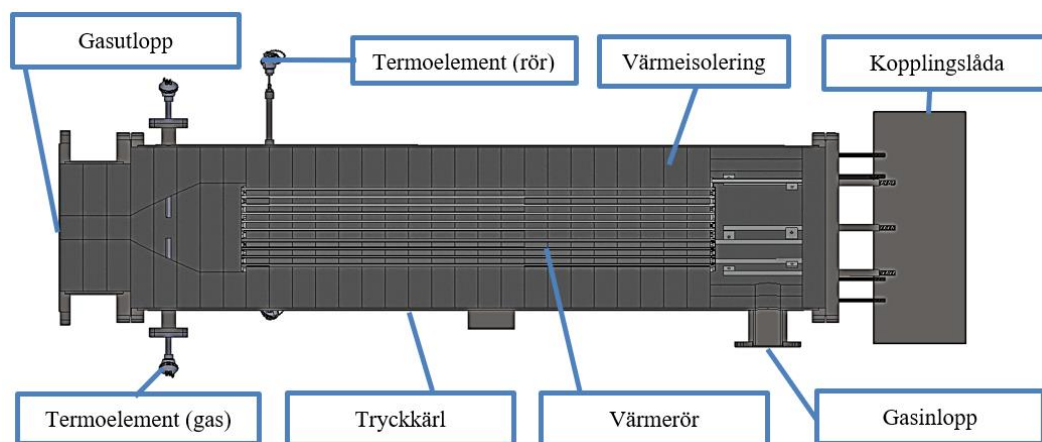
Försöken visar att värmärkonceptet är en intressant teknik för direktvärmning med el, med hög effekttäthet och med ett minimalt antal komponenter. Lärdomarna från försöksupställningen rörande framför allt reglerprinciper, temperaturmätning, isoleringens egenskaper och underhållsaspekter visar vidare på vilka utvecklingsbehov som föreligger för att uppnå tillförlitlighet över tid i en uppskalad anläggning.

## Arbetspaket 2 – Pilotvärmare 200–400 kW

### Konceptuell utformning

Elektrisk processgasvärmare installerad i HYBRIT:s pilotanläggningen för direktreduktion. Funktionen är att värma gas (exempelvis vätgas), från ca 50 °C till 800 °C, som därefter leds in i processen.

Gasen flödar horisontellt genom värmaren som består av ett värmeisolerat tryckkärl med värmarrör (se Figur 3). Gasen leds in genom ett inlopp på ena sidan av värmaren och passerar genom värmarrören till utloppet på andra sidan av värmaren.



**Figur 3. Horisontellt tvärsnitt över pilotvärmare 200–400 kW sedd uppifrån.**

Elvärmaren är av direktvärmande typ, vilket betyder att gasen värms direkt av de elektriskt spänningssatta horisontellt monterade värmarrören (Kanthal APM-rör). Fördelen med direktvärmning är små värmeförluster och därigenom hög verkningsgrad.

Värmarrören är uppdelade i elektriskt seriekopplade sektioner som styrs av en tyristor. Värmarrören är instuckna i fiberplattor längs hela rörens längd som håller rören elektriskt isolerade från varandra och jord.

Termoelement placerade mellan sektionerna av värmarrör säkerställer att den högsta tillåtna temperaturen på rören inte överskrids. Andra termoelement är placerade i gasutloppet och mäter den utgående gasens temperatur. Effektregeringen sker genom ett framräknat effektbehov utifrån gasflöde, temperatur, tryck och sammansättning.

### *Genomförda tester*

Testning av värmaren i pilotskala har genomförts gemensamt med det övergripande direktreduktionsprojektet inom HYBRIT, eftersom pilotvärmarna är en integrerad del av processen i pilotanläggningen för direktreduktion. Pilotförsöken har skett kampanjvis och genomförda försökskampanjer redovisas i Tabell 2.

De första försöken fokuserades på en säker och systematisk driftsättning av värmaren i pilotanläggningen. Därefter utvärderades värmarens grundläggande funktionalitet utgående från den specificerade kravbilden (t. ex. maximal temperatur för ett specifikt flöde, gassammansättning, systemtryck etc.). Slutligen utvärderades värmarens prestanda såsom exempelvis värmeeffektivitet, temperaturstabilitet över tid, etc.

**Tabell 2. Genomförda försökskampanjer med pilotvärmare 200–400 kW i pilotanläggningen för direktreduktion.**

<b>Utrustning</b>	<b>Försökskampanj</b>
Pilotvärmare 200–400 kW	K03b/K3 (vecka 40–47 2021)
	K4b (vecka 20–25 2022)
	K5 (vecka 43–48 2022)

### *Resultat och diskussion*

De svårigheter med ojämn uppvärmning som värmaren i laboratorieskala uppvisade vid tester i luft, kom att bekräftas vid pilottesterna med andra gasblandningar. Tester i pilotskala visade på ojämn uppvärmning av värmarrören och risk för lokal överhettning. Utredning, inklusive datorsimuleringar av flöden och temperatur, visade på den omslutande isoleringens inverkan på temperaturutvecklingen i värmarvolymen. Med en omslutande fiber minskar robustheten i lösningen då värmeavgången genom strålning från rörens yttersida begränsas. För att förbättra värmefördelningen bör vidare ett jämnare gasflöde genom värmarrören eftersträvas och takten vid ökning av elektrisk effekt (och därigenom temperatur) sänkas.

För att förbättra värmefördelningen i värmarvolymen minskades mängden isolerande fiberplattor i värmaren och åtgärder genomfördes för att säkerställa en jämnare flödesfördelning i värmarrören. Även förändringstakten för elektrisk effekt minskades vid efterföljande tester.

Dessa åtgärder förbättrade situationen och stabil drift uppnåddes. Under kommande kampanj uppnåddes den specificerade högsta temperaturen (800 °C) för värmaren med vätgas och högt flöde. Genomförda tester visar att värmaren

kan hantera varierande gasflöden med god temperaturstabilitet över tid liksom generellt låga tryckfall över värmaren. Genomförda åtgärder gav dock inte tillräckligt stor effekt för att fullt ut hantera den ojämna uppvärmningen och risken för lokala överhettning. Den horisontella orienteringen av värmaren, där isoleringen fungerar som mekaniskt stöd för värmarrören, innebär vidare begränsningar i möjligheterna till genomgripande förändringar av värmarens utformning, varför fortsatta modifieringar av utformningen inte ses som en framkomlig väg.

Lärdomarna rörande värmarens horisontella orientering och isoleringen samt insikterna från genomförda datorsimuleringar av flöden och temperatur inarbetades vid designen av värmaren i arbetspaket 3.

### **Arbetspaket 3 – Pilotvärmare 1 MW**

#### *Konceptuell utformning*

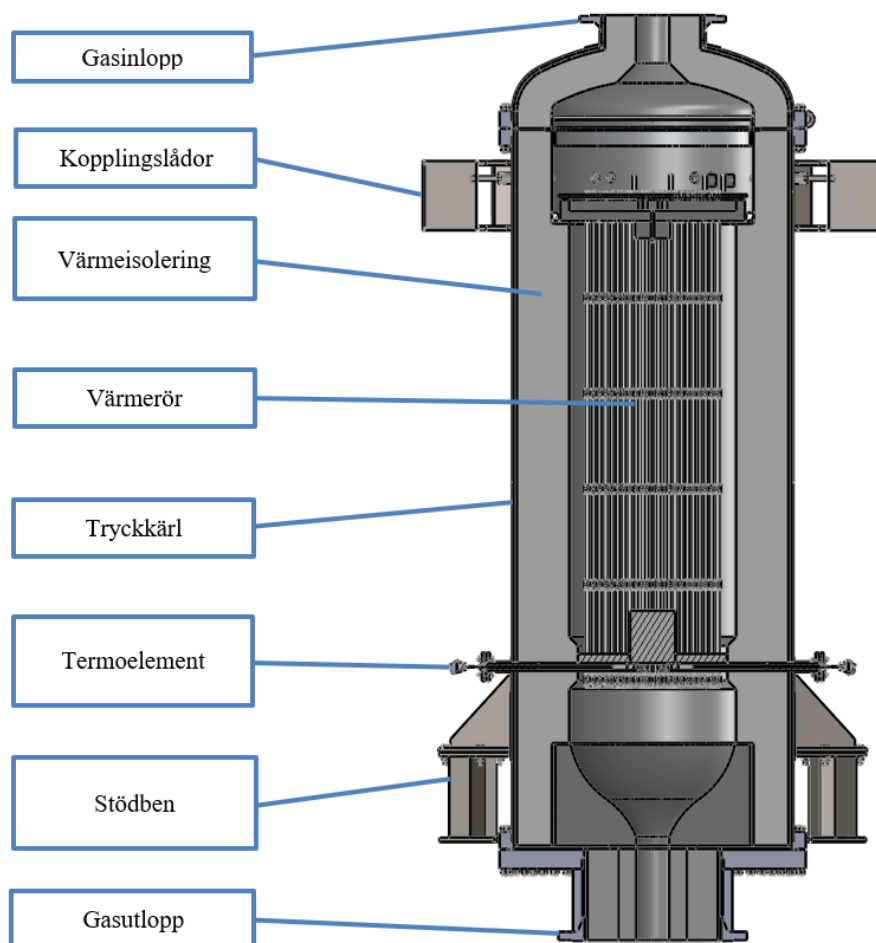
Elektrisk processgasvärmare installerad i HYBRIT:s pilotanläggningen för direktreduktion. Funktionen är att värma gas (exempelvis vätgas), från ca 50 °C till 1100 °C, som därefter leds in till reduktionsschaktet.

Gasen flödar vertikalt genom värmaren som består av ett värmeisolerat tryckkärl med värmarrör i mitten (se Figur 4). Gasen leds in genom ett inlopp i toppen, passerar genom värmarrören och leds ut genom ett utlopp i botten av värmaren.

Elvärmaren är av direktvärmande typ, vilket betyder att gasen värms direkt av de elektriskt spänningssatta vertikalt monterade värmarrören (Kanthal APM-rör). Fördelen med direktvärmning är minimala förluster och därigenom hög verkningsgrad.

Värmarrören är uppdelade i elektriskt seriekopplade sektioner som styrs av en tyristor. Värmarrören hänger vertikalt från topplattan inne i det isolerade tryckkärlet och är elektriskt isolerade från varandra.

Termoelement instuckna mellan sektionerna av värmarrör säkerställer att den maximalt tillåtna temperaturen på rören inte överskrids. Andra termoelement sitter i gasutloppet och mäter den utgående gasens temperatur. Effektregeringen sker genom ett framräknat effektbehov utifrån gasflöde, temperatur, tryck och sammansättning.



**Figur 4. Vertikalt tvärsnitt över pilotvärmare 1 MW.**

### *Genomförda tester*

Testning av värmaren i pilotskala har genomförts gemensamt med det övergripande direktreduktionsprojektet inom HYBRIT, eftersom pilotvärmarna är en integrerad del av processen i pilotanläggningen för direktreduktion. Pilotförsöken har skett kampanjvis och genomförda försökskampanjer redovisas i Tabell 3.

**Tabell 3. Genomförda försökskampanjer med pilotvärmare 1 MW i pilotanläggningen för direktreduktion.**

<b>Urustning</b>	<b>Försökskampanj</b>
Pilotvärmare 1 MW	K4a (vecka 11–14 2022)
	K4b (vecka 20–25 2022)
	K5 (vecka 43–48 2022)

De första försöken fokuserades på en säker och systematisk driftsättning av värmaren i pilotanläggningen. Därefter utvärderades värmarens grundläggande funktionalitet utgående från den specificerade kravbilden (t. ex. maximal

temperatur för ett specifikt flöde, gassammansättning, systemtryck etc.). Slutligen utvärderades värmarens prestanda såsom exempelvis värmeeffektivitet, temperaturstabilitet över tid, etc.

### *Resultat och diskussion*

Driftsättningen i gaskretsen och första start av värmaren gick planenligt. Effekt- och temperaturreglering av värmaren fungerade väl och värmaren svarade snabbt på förändrade driftlägen. Värmaren uppvisade god förmåga att öka temperaturen i lämplig takt för systemet som helhet, där relativt stor massa i form av konstruktionsstål och eldfast material i anläggningens komponenter behöver värmas upp samtidigt som processens råmaterial. Under drift i pilotanläggningen hålls sedan processförhållandena konstanta under relativt långa perioder för att ge stabila försöksförutsättningar, vilket också efterliknar förhållanden under storskalig kontinuerlig drift.

Gassammansättningar och flödesförändringar relevanta för en vätgasbaserad direktreduktionsprocess testades under stabil drift. Värmaren fungerade även väl vid start och stopp av processen i den integrerade direktreduktionsanläggningen, där utmaningen är temperatur- och flödesförändring i en varierande gassammansättning av vätgas och kvävgas. Dessa två gaser har relativt olika fysikaliska egenskaper, vilket ställer krav på värmarens förmåga att hantera ett spann av egenskaper hos gasblandningen. Genomförda tester visar att värmaren kan hantera olika gasblandningar och varierande gasflöden med god temperaturstabilitet över tid. Värmaren uppvisar generellt låga tryckfall över värmaren.

Värmaren uppvisar vidare hög verkningsgrad, ca 95 %, i tillämpligt processfönster av temperatur, gassammansättning och flöde. Verkningsgraden förväntas generellt kunna höjas något för en storskalig värmare jämfört med en mindre värmare då värmeförlusterna minskar.

Värmaren uppvisar dock en ojämn temperaturfördelning i värmarvolymen, vilket resulterade i att högsta specificerade gastemperatur inte testades i värmaren. Den ojämn temperaturfördelningen bedöms bero på skillnad i gasflödet mellan olika värmarrör. Värmaren modifierades successivt under projektets gång för att skapa en jämnare flödesfördelning och därmed en jämnare temperaturfördelning i värmarvolymen. Modifieringarna förbättrade situationen med bibehållen hög verkningsgrad, men mekaniska begränsningar i värmarens grundkonstruktion satte en praktisk gräns för hur långt modifieringarna kunde drivas inom detta projekt.

Datorsimuleringar av flöden och temperatur har använts som ett stöd i designen av värmarna och experimentella data från pilottesterna har använts för validering av dessa simuleringsmodeller, till grund för framtida implementering i större skala.

Inspektioner av värmaren och dess komponenter har genomförts mellan försökskampanjerna för att kontrollera statusen och följa egenskapsutvecklingen för centrala komponenter. Av särskilt intresse är värmarrören i värmaren och hur kombinationen av hög temperatur och reducerande förhållanden påverkar dessa över tid. Värmarrören visar inga tecken på åldring och en matt oxiderad yta



styrker slutsatsen att de små mängder vatten som gasen innehåller (som en följd av reduktionsprocessen) är tillräckligt för att både skapa och bibehålla ett skyddande oxidskikt på värmarrören. De elektriska egenskaperna hos värmarrören har följts under projektet och uppvisar ingen förändring över tid. Den sammanlagda försökstiden är i sammanhanget kort jämfört med de livslängder som förväntas av ingående komponenter och material, och pilottesterna kan inte förväntas fånga upp åldringsförlopp och egenskapsförändringar med långsamma tidsförlopp. Värmaren uppvisar inte heller några sådana förändringar i slutet av projektet.

Med en mer omfattande instrumentering för temperaturmätning skulle en bättre bild av temperaturfördelningen i värmarvolymen kunnat erhållas, vilket hade underlättat analysen av värmarens funktion.

## Diskussion

Projektet har utvecklat och installerat en elbaserad gasvärmare, med ca 1 MW effekt, i reduktionsgaskretsen i HYBRIT:s pilotanläggning för direktreduktion i Luleå. Värmaren har körts fullt integrerat i direktreduktionsprocessen, som styrs som ett sammanhållet produktionssystem. Genomförda tester visar att värmaren kan hantera olika gasblandningar och varierande gasflöden med god temperaturstabilitet över tid. Värmaren uppvisar vidare hög verkningsgrad. Kunskap och erfarenhet kring processintegration, styrning och reglering har inhämtats.

Fossilfri värmningsteknik är en central komponent för att etablera en fossilfri värdekedja för järn- och ståltillverkning. Genom pilotförsöken har elbaserad gasvärmning med framgång testats i den tänkta applikationen – direktreduktion av järnmalmspellets med vätgas. Testerna har visat på konceptets potential som en metod att ersätta fossilbaserade lösningar med fossilfri el. Försöken har vidare visat på utvecklingsområden för att etablera en lösning i industriell skala.

Värmarkonceptet har vidare potential att användas även inom andra industriella segment, utanför järn- och stålindustrin. Värmning av industriella gaser i stor skala har traditionellt skett genom förbränning av fossila bränslen. Fossilfria gasvärmningslösningar i industriell skala behöver designas och anpassas efter den aktuella processen, baserat på gasblandning, temperatur, tryck, flöde etc. Det aktuella värmarkonceptet, baserat på fossilfri el och med påvisad hög verkningsgrad, bör utgöra ett miljömässigt och ekonomiskt intressant alternativ i en sådan utveckling.

## Bilagor

- Administrativ bilaga – Fossilfri gasvärmning med el