

Veikart for gass i metallindustrien— Økt verdiskaping og reduserte utslipp

Utarbeidet av: Halvor Dalaker SINTEF, Eli Ringdalen SINTEF, Leiv Kolbeinsen, NTNU, Jostein Mårdalen, NTNU

Visjon og mål

Til grunn for dette veikartet ligger en visjon om en *bærekraftig norsk metallindustri som oppnår CO₂-nøytralitet innen 2050*. Økt bruk av gass i metallproduksjon er et bidrag for å nå denne visjonen. Dette veikartet beskriver hva som skal til for å oppnå *økt bruk av gass i metallproduksjon*.

Bakgrunn

Økt bruk av gass kan gjøre metallproduksjon mer miljøvennlig og samtidig gjøre norske metallprodusenter mer konkurransedyktige. Med gass menes her både naturgass, biogass, hydrogen og avgass fra egen og andres produksjon. Gassen kan erstatte kull og koks eller gi grunnlag for utvikling av nye prosesser som enten er mer energieffektive eller har lavere CO₂-utslipp. Bruk av avgasser utnytter en råvare som i dag ikke brukes; bruk av hydrogen eller biogass reduserer fossile CO₂-utslipp; og bruk av naturgass fjerner CO₂-utslipp fra flyktige forbindelser i kull. Redusert bruk av kull og koks reduserer globale miljøbelastninger fra kullgruver. Utvikling av nye prosesser kan gi norsk industri en konkurransefordel.

En viktig faktor som sjelden nevnes er at karbon i veldig liten grad er ønskelig som bestanddel i de metaller som produseres. Bruken av karbon i metallurgisk industri tjener egentlig bare to formål: å fjerne oksygen fra malmen og sørge for at det kan transportere det ut som gass. Karbonforbruk, og dermed CO₂-utslipp, i metallproduserende industri er altså i hovedsak prosessbetinget og ikke produktbetinget.

I Norsk Industri sitt 'Veikart for Prosessindustrien' beskrives en rekke metoder for å redusere CO₂-utslipp, som karbon fangst og lagring (CCS), bruk av biokarbon og BioCCS. Veikartet som presenteres her fokuserer på bruk av gass. Dette kommer inn under kategorien 'andre tiltak' som i Norsk Industri sitt veikart er anslått til å bidra med 24 % av reduksjonen i CO₂-utslipp i industrisektoren i Norge.

Sammendrag

For å øke bruken av gass i metallproduksjon må det utvikles nye—og videreutvikles eksisterende—gassbaserte teknologier, og disse må tas i bruk industrielt. Som eksempel beskriver dette veikartet en rekke mulige teknologier sammen med deres miljøeffekt, teknologiske modenhet og endringsgrad. Veikartet beskriver hvilke forutsetninger som må oppfylles for utvikling av nye teknologier for økt bruk av gass i metallproduksjon, og hvilke forutsetninger som må oppfylles for industrialisering av disse.

Veikartet beskriver nødvendig spesifikk kompetanse relevant for bruk av gass som må finnes hos universiteter og forskningsinstitusjoner og som industrien må kunne bruke. Utvikling og industrialisering av nye gassbaserte teknologier krever et større forsknings- og utviklingsarbeid som



er avhengig av fortsatt god støtte i virkemiddelapparatet. For å nå målet i veikartet er det spesielt viktig med FoU-prosjekter med lengre tidshorisonter enn hva som er tilfellet i dag og gode muligheter for forskning på teknologier med lav modenhetsgrad og høyt potensiale.

For at forskningsinnsatsen skal munne ut i nye og forbedrede prosesser og verk trengs også risikoreducerende tiltak for industrien, som risikofrie lån og tilskudd til miljøvennlige investeringer.

Summary

Gas in metal production – sustainable growth and reduced emissions

This roadmap is founded on a vision for Norwegian metallurgical industry: *Increased value creation with zero emission in 2050*. Increased use of gas-based technologies in metal production will contribute to reach this vision. The road map presented here describes how to obtain *increased use of gas in metal production*.

For this vision to become reality, industry, research institutes, and universities must work together to develop technologies and competence required to achieve broad industrialisation of gas based technologies. High competence within specific relevant areas is a basis for this. To succeed in the development continued governmental support is required, particularly to R&D projects of longer duration and to industrially relevant projects with lower technological readiness, levels are required. For the research to result in new and improved processes and plants, the government must ease the risk of the industry through actions like risk-free loans and support for environmentally friendly actions.

1 Innledning

Økt bruk av gass i metallproduksjon kan gi forbedrede prosesser og produkter og samtidig redusere miljøkonsekvensene. Dette veikartet beskriver noen aktuelle teknologier som kan være en del av en framtid der gass er en viktig råvare i metallproduksjon, og veien dit. De vil bidra til en bærekraftig prosessindustri som fortsetter å være viktig for norske arbeidsplasser og verdiskaping.

Global oppvarming stiller verden overfor en krevende utfordring og ifølge klima-forskerne er det liten tid til rådighet. Norge tar klimautfordringen på alvor og styrer mot et globalt lavutslipps-samfunn i 2050. Rapporten fra regjeringens Ekspertutvalg for Grønn Konkurranseskraft med industriens eget veikart fokuserer på hvordan norsk industri kan få konkurranseskraft gjennom å redusere egne utslipp. Industrien ser behov for ambisiøse og langsiktige teknologiutviklingsløp.

I produksjon av metaller brukes reduksjonsmidler for å fjerne oksygen fra malm. I Norge og ellers i verden er disse hovedsakelig basert på fossilt karbon. Dette bidrar til CO₂-utslipp som er negativt for klimautviklingen. Endringer må til for å nå målsetninger om dobling av produksjonen og samtidig negativt utslipp av drivhusgasser i 2050. For å nå dette målet blir fangst og lagring eller bruk av CO₂ (CCS-Carbon Capture and Storage; CCU-Carbon Capture and Utilisation), samt erstatning av fossilt karbon med biokarbon, nødvendige verktøy sammen med en rekke andre tiltak. Gassbaserte teknologier vil spille en viktig rolle i CO₂-reduksjon, både ved å erstatte fast karbon med hydrogen, ved å bruke karbon fra naturgass slik at utslipp av CO₂ fra forkoksning av kull unngås, ved å bruke biogass og ved utvikling av nye prosesser som er bedre egnet for karbonfangst og lagring.

I tillegg har gassteknologier andre fordeler. Gass kan minske avhengigheten av kritiske råvarer, minske energiforbruk og bidra til utvikling av prosesser med økt lønnsomhet. Gass inneholder ofte mindre av kritiske forurensninger og er enklere å rense enn faste råvarer som kull og koks. Bruk av gass kan derfor gi renere produkt og mindre utslipp av miljøgifter. Videre vil bruk av gass ofte innebære å tenke helt nytt på over hundre år gamle prosesser. Dette øker sjansen for en step-change endring med en helt ny prosess, ikke bare trinnvise forandringer og forbedringer.

Norske metallprodusenter er allerede blant de beste i verden når det gjelder lavest mulige CO₂-utslipp og miljøkonsekvenser. Å opprettholde og øke andelen til norske metallprodusenter er derfor god klima- og miljøpolitikk. Gjennom økt bruk av gass kan norske metallprodusenter forbedre kvaliteten og lønnsomheten på sine prosesser og produkter, styrke sin konkurransevne, og samtidig lette veien mot en enda grønnere metallproduksjon i framtida.

Hvis norsk prosessindustri når sine bærekraftsmål vil det ikke skyldes én løsning alene. Flere større og mindre teknologiutviklinger og nyvinninger vil bidra i større eller mindre grad. Det er viktig at arbeidet starter raskt, med høy intensitet allerede tidlig. For å kunne utvikle de langsiktige løsningene som skal være i bruk i 2050, må utviklingsarbeidet starte allerede i dag parallelt med utvikling av de mer kortsiktige mellomløsningene. Veikartet presenterer noen aktuelle gassbaserte teknologier for metallproduksjon, både teknologier som er på god vei mot industrialisering og ideer som så vidt har vært undersøkt i lab-skala.

For å realisere teknologiene må flere rammebetingelser være på plass. Kapittel 4 og 5 i dette veikartet adresserer noen av de viktigste. Dette er noe aktørene i prosessindustrien ikke selv har innflytelse over. Det er derfor viktig at alle beslutningstakere involveres. De beste forskningsresultater vil ikke føre til endringer i industrien dersom de rette forutsetningene ikke er tilstede.

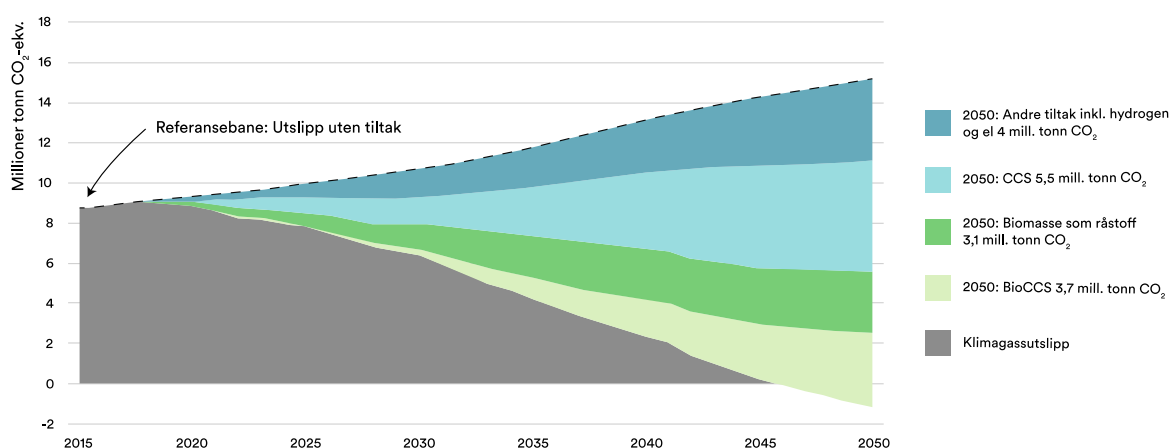
Kostnader til utvikling og realisering av de nye teknologiene og lønnsomheten til disse er ikke vurdert her. Nødvendig informasjon for å beskrive business case og lønnsomhet vil komme frem som en del av utviklingsarbeidet for de enkelte case. Det er ikke gratis å ta klimautfordringen på alvor, men det blir enda dyrere å ikke handle i tide. De som klarer å omsette utfordringen med å oppnå lavt utslipp av klimagasser til muligheter for videre utvikling, vil være best rustet i konkurransen i de kommende tiår.

2 Bakgrunn for veikartet

I tiden før 2014 ble det arbeidet strategisk ved NTNU og SINTEF for å øke innslaget av naturgass som råvare i norsk metallproduksjon, med målsetninger om å redusere CO₂-utslipp, øke verdiskapningen i Norge knyttet til norsk naturgass, og å sikre og øke konkurranseevnen til norsk landbasert industri. I 2014 arrangerte SINTEF gjennom det interne prosjektet NatGasMetal en workshop med norske industriaktører med tema: 'Økt bruk av naturgass i metallproduksjon'. Et tema på workshopen var et "Veikart mot økt bruk av naturgass". Det kom mange gode innspill på denne workshopen. Basert på disse ble planer for og innhold i et veikart utarbeidet, og presentert på Metallurgisk sommermøte i 2014 (Eli Ringdalen) og PROSIN-konferansen 2014 (Nina Dahl). Veikartet ble ikke ferdigstilt i den runden, men arbeidet som ble gjort ga grunnlaget for sterkt industristøttede infrastruktuksøknader i 2014 og 2016.

I 2014 ble det spesielt fokusert på bruk av naturgass. En viktig motivasjon var økt verdiskapning i Norge med økt bruk av naturgass i fastlandsindustrien. Siden 2014 har fokuset på bærekraft økt, og begrep som "Grønn konkurransekraft" og "Det grønne skiftet" har entret det offentlige ordskiftet og blitt viktige for utviklingen av norsk industri

I november 2016 ble det, gjennom kompetanseprosjektet KPN GassFerroSil, arrangert en ny workshop med fokus på bruk av gass i metallproduksjon. Denne gangen var fokuset vridd mer over på gass generelt, og gass fra andre kilder som biogass, hydrogen og avgasser ble inkludert. Igjen var et viktig punkt på agendaen å utarbeide et "veikart mot økt bruk av gass" med diskusjonen fra 2014 som bakgrunn.



Figur 1: Utslipp og utslippsreduksjoner etter type sammenlignet med en referansebane med robust vekst i industrien [ref.: "Veikart for prosessindustrien", Ø. Slåke, presentasjon, workshop Trondheim november 2016.]

I mai 2016 presenterte Norsk Industri et 'Veikart for prosessindustrien'¹. Her ble det lagt fram en visjon om at norsk prosessindustri skal ha null netto utslipp av klimagasser innen 2050, uten at dette går ut over veksten i næringen. Dette innebærer en total reduksjon i utslipp på 16.35 mill. tonn CO₂-ekvivalenter i 2050 der bidragene til reduksjon illustrert i Figur 1 er som følger:

- Karbon fangst og lagring (CCS): 5.5 mill. tonn CO₂-ekv. (34% av totalen)
- Biokarbon: 3.1 mill. tonn CO₂-ekv. (19%)
- BioCCS: 3.7 mill. tonn CO₂-ekv. (23%)
- Andre tiltak: 4.0 mill. tonn CO₂-ekv. (24%)

En så ambisiøs visjon krever utvikling og implementering av en rekke nye teknologiske løsninger innen mange felt. Gassbaserte løsninger vil direkte være en del av "andre tiltak" i listen over.

Produksjon av biokarbon vil i tillegg til fast karbon også gi flyktige produkter som biogass som også kan inngå i gassbaserte teknologier for metallproduksjon. Den viktigste bestanddelen i biogass er metan, som også er hovedkomponenten i naturgass. En metanprosess kan med andre ord bruke naturgass som råvare på mellomlang sikt, for så å gå over til CO₂-nøytral biogass hvis tilstrekkelige volumer av dette blir tilgjengelig.

En viktig motivasjon for dette veikartet er å bidra til reduksjon i CO₂-utslipp, men det er også flere andre fordeler med økt bruk av gass i metallproduksjon. Råvaretilgjengelighet er en utfordring spesielt siden mye av det faste karbonet som brukes i metallurgiske prosesser kommer fra politisk ustabile områder og ikke kan erstattes på en enkel måte. Selv om kull til metallindustrien utgjør en liten del verdensforbruket, vil en reduksjon i dette bidra til å minske uttaket og de negative miljøpåvirkningene av kullgruvedrift. Kull og koks inneholder mange sporstoffer og urenheter som påvirker både prosess og produkt negativt, og som fører til utslipp. Gasser inneholder som regel færre kritiske urenheter enn koks og kull, og kan være enklere å rense enn et fast stoff.

Gassbaserte teknologier kan være et verktøy for å bedre konkurranseevnen og øke lønnsomheten til norske metallprodusenter. Siden norske metallprodusenter har en mer miljøvennlig produksjon enn gjennomsnittet vil det å opprettholde og øke metallproduksjonen i Norge gi en god miljøgevinst.

Nye gassbaserte prosesser i metallproduksjon vil være en av flere viktige løsninger for å sikre bærekraft og konkurransekraft, og er tema for dette veikartet. "Veikart for gass i metallindustrien" presenteres som et supplement til Norsk Industris veikart for prosessindustrien. Hensikten er å fremme bruk av gass i metallproduksjon spesielt, og gå i mer detalj på hvordan gass i metallproduksjon kan brukes til å nå målene i Norsk Industri sitt veikart. "Veikart for gass i metallindustrien" vil ikke gå i detalj på områder som ikke direkte berører gassteknologi, men heller henvise til Norsk Industris veikart.

I de neste kapitlene vil aktuelle gassbaserte teknologier med potensiale for å forbedre metallproduksjon bli presentert, sammen med en vurdering av deres potensiale og realiserbarhet i metallindustrien.

Det pekes også på hvilke andre rammevilkår som er nødvendige for realisering av veikartet. Disse deles inn i to hovedkategorier. I kapittel 4, "Forutsetninger for teknologiutvikling" beskrives forutsetningene som må på plass for å kunne utvikle nye gassbaserte teknologier som kan implementeres i

¹Norsk Industri: Veikart for Prosessindustrien—økt verdiskapning med nullutslipp i 2050

metallindustrien. I kapittel 5 "Forutsetninger for industriell bruk" beskrives de forutsetningene som må være på plass for at teknologiene, når de er utviklet, skal kunne implementeres og industrialiseres.

3 Aktuelle teknologier

Innledning

Økt bruk av gass i metallproduksjon vil i mange tilfeller kreve andre teknologiske løsninger enn de som har vært brukt historisk. I noen tilfeller er disse teknologiene tilgjengelige, men i mange tilfeller gjenstår varierende grad av forskning og utvikling. Det kan være trinnvise endringer på eksisterende prosesser, eventuelt med nye prosesstrinn eller delprosesser; eller helt nye prosesser og verk.

Gassbaserte teknologier kan brukes i metallproduksjon på flere ulike måter, som for eksempel forbehandling og for-reduksjon av materialer. I enkelte tilfeller kan gass også erstatte fast karbon som reduksjonsmiddel og slik spille en rolle i reduksjon til ferdig metall. En annen innfallsvinkel er å bruke gassen som en kilde til fast karbon, og reduksjon i smeltet fase er også mulig.

Det er naturlig å starte med fokus på de lettest tilgjengelige løsningene, men i et så langsiktig tidsperspektiv som 2050—og med så høye mål som null utslipp av klimagasser—er det nødvendig også å vurdere teknologier som ikke kan brukes direkte i dagens prosesser og på eksisterende verk. Nettopp fordi utvikling av revolusjonerende teknologier er så krevende må det satses langsiktig nok til at disse løsningene er tilgjengelige i god tid til å nå målene i 2050. Store, langsiktige endringer vil være mer attraktive dersom utviklingen av disse også kan føre til forbedringer av dagens prosesser. En slik vekselvirkning med eksisterende teknologi vil også gi muligheter for å høste erfaringer underveis, og slik gjøre teknologiene lettere å realisere. Der det er mulig peker veikartet derfor på sammenhenger mellom framtidige og nåværende teknologier, og hvordan disse sammenhengene kan utnyttes.

I det følgende blir noen mulige gassbaserte teknologier presentert. Dette er ment som eksempler på muligheter, og ikke en komplett beskrivelse, hverken i form av en liste over alle mulige teknologier, eller en fullstendig beskrivelse av hver enkelt teknologi. Hver teknologi er gitt en standard karakterisering som oppsummerer noen av deres viktigste egenskaper. Faktorene som beskrives i denne oppsummeringen er:

- Miljøeffekter. En kvantifisering av miljøeffektene vil være en omfattende jobb forbundet med betydelig usikkerhet. De er derfor her kun beskrevet med nøkkelord.
- Endringsgrad. Med dette menes i hvor stor grad teknologien er kompatibel med eksisterende prosesser eller om den krever større eller mindre forandringer/nyvinninger. Teknologiene er grovt sortert etter tre kategorier av nødvendig endringsgrad:
 - Ny råvare. Krever kun små tilpasninger/justeringer på en eksisterende prosess
 - Tilpassing av eksisterende prosess. Krever modifikasjon av eksisterende prosesser eller nye delprosesser.
 - Nytt verk. Krever komplett restrukturering, industrialisering vil sannsynligvis kreve anlegg av nytt verk.
- Teknologisk modenhetsnivå (Technology Readiness Level= TRL-nivå). Dette er beskrevet ut fra definisjonen til EU-kommisjonen. Her oppsummert til
 - TRL 0-4: fra idé via testing og forståelse av mekanismer og prinsipper opp til en demonstrasjon i lab-skala



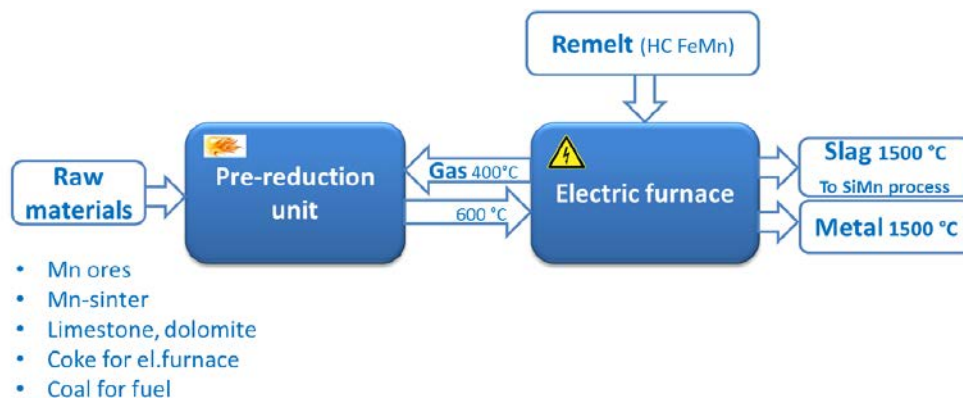
- TRL 5- 6: Pilottesting i forskjellig skala
- TRL 7-8: igangsetting av fullskala anlegg.
- TRL 9: godt etablerte teknologier som er tilgjengelige kommersielt.

3.1 Forbehandling og for-reduksjon

Metall produseres fra oksygenholdig malm ved at oksygenet fjernes i reaksjon med et reduksjonsmiddel, oftest karbon, ved høy temperatur. Som en separat prosess før selve reduksjonstrinnet kan malmen behandles med varm gass. Dette vil varme opp og tørke råvarene og potensielt senke energiforbruket i den etterfølgende reduksjonsprosessen. Ved *forbehandling* er det energiinnholdet i gassen som utnyttes, til å varme og tørke råvarene. Dette kan gi lavere energiforbruk i den etterfølgende reduksjonsprosessen. Ved *for-reduksjon* brukes en reduserende gass til å fjerne noe av oksygenet i malmen slik at behovet for karbon i den etterfølgende reduksjonsprosessen blir redusert. De mest aktuelle gassene for for-reduksjon og forbehandling er H_2 og CO , som kan stamme fra f.eks. avgasser fra metallproduksjon eller fra produksjon av biomaterialer.

Forbehandling og for-reduksjon av mangan

Mangan (Mn) produseres ved at malm med manganoksider (MnO_2 , Mn_2O_3 , og Mn_3O_4) reduseres med karbon til Mn-metall og CO_2 . Reduksjonen skjer i flere trinn, der høyere ordens oksider (MnO_2 , Mn_2O_3 og Mn_3O_4) først reduseres til MnO og deretter ved reduksjon i flytende fase til mangan. Ved for-reduksjon skjer oppvarming, tørking og delvis reduksjon til MnO i en egen enhet før resten av oksygenet fjernes og metall produseres i en tradisjonell smelteovn som illustrert i Figur 2.



Figur 2: Illustrasjon av manganprosess.

I den vanligste prosessen i dag skjer reduksjon fra høyere ordens oksider til MnO og fra MnO til Mn-metall i samme smelteovn. For-reduksjonen til MnO utvikler energi som reduserer energiforbruket i ovnen, men industrielt er det bare ca. 40 % av det teoretiske potensialet som tas ut. Oppvarming og tørking krever mye energi, og ved å gjøre dette i en separat forbehandlingseenhet reduseres behovet for elektrisk energi til smelteovnen. Et ekstra prosesstrinn gir ofte lavere virkningsgrad slik at det totale energibehovet kan øke, men en egen forbehandlingseenhet gjør det mulig å bruke andre energikilder som ulike gasser. Dette er spesielt aktuelt når det er dårlig tilgjengelighet eller høy pris på elektrisk energi, eller når elektrisiteten kommer fra ikke fornybare kilder. Den bedre kontrollen på råvaren som oppnås ved oppdeling i separate enheter kan redusere energibehov i ovn og totalt energiforbruk. Bruk

av H₂ eller av CO-rik avgass som i dag ikke utnyttes vil gi reduserte CO₂-utslipp. Bruk av biokarbon som energikilde istedenfor kull eller koks, vil redusere utslipp av fossilt CO₂.

For-reduksjon av manganmalm gjøres allerede industrielt. Kashima Works i Japan for-reducerer malmen med kull og CO-gass i en prosess illustrert i Figur 2. Energiforbruket i deres smelteovn er over 600 kWh/ tonn metall lavere enn for tilsvarende produksjon uten forreduksjon. Forbehandling av malmen gir et potensiale for å redusere energiforbruket pr tonn metall i ovnsprosessen. Dette vil, når elektrisk energi er produsert fra fossile brensler, gi lavere totale CO₂ utslipp

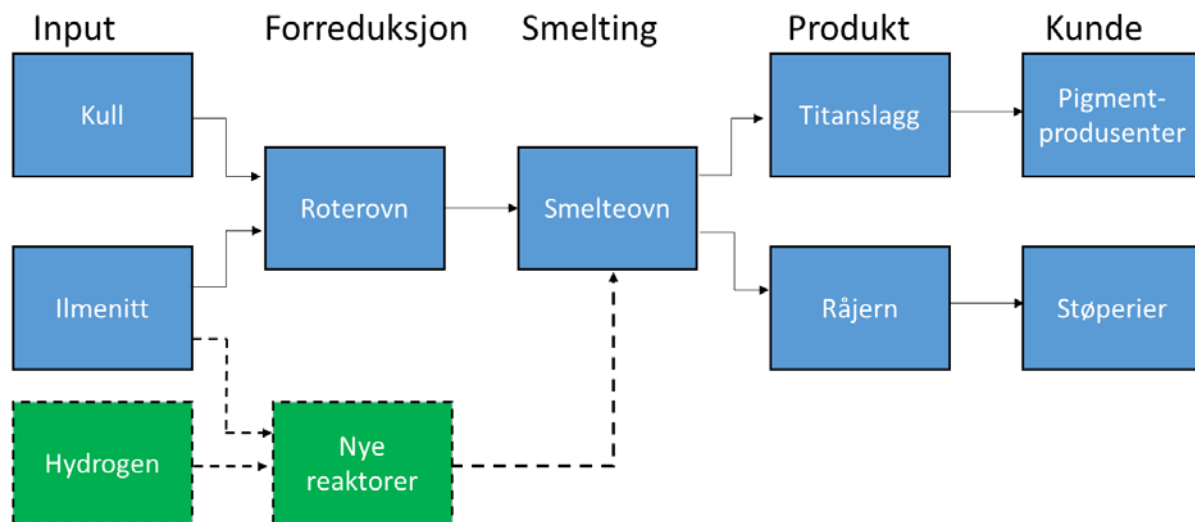
For-reduksjon med kun gass brukes i dag ikke industrielt i Mn produksjon. Erfaringer fra kromindustrien, der gassbasert for-reduksjon av kromittmalm er i installert på flere kromverk, kan brukes i utvikling av gassbasert for-reduksjon av mangan. Dette er derfor en prosess med høy teknologisk modenhet som kan installeres på eksisterende verk. Noen gasser kan gi redusert CO₂-utslipp, men hoveddrivkraft vil være fleksibilitet i energikilde, mulighet for redusert energiforbruk og mulige forbedringer i eksisterende prosess.

Miljøeffekter: Middels.

TRL:5-6 Endringsgrad: Ny enhet i eksisterende verk

For-reduksjon av ilmenitt med gass.

TiZir Titanium & Iron i Tyssedal produserer titanslagg (TiO₂) til pigment og spesialkvaliteter av råjern til blant annet vindmøller i en to-trinns prosess illustrert i Figur 3.



Figur 3: Skisse av TiZir Titanium & Irons produksjon av titanslagg og råjern fra ilmenitt [Basert på skisse av H. Grande].

Ilmenittmalmen for-redukeres først i en roterovn før råjern og TiO₂ produseres i en elektrisk smelteovn. For-reduksjonen benytter kull som reduksjonsmiddel hvor varme tilføres ved forbrenning av ovnsgass. TiZir Titanium & Iron jobber med muligheten for å ta i bruk hydrogen som reduksjonsmiddel i en ny for-reduksjonsprosess. Hydrogengassen kan potensielt produseres via elektrolyse av vann. Fossilt karbon vil kun benyttes på smelteovnen for å balansere endelig reduksjonsgrad på produktene. CO₂-utslipp per tonn slagge kan dermed reduseres med opptil 90 %. TiZir Titanium & Iron er den norske metallprodusenten som har kommet lengst når det gjelder å implementere gassteknologi. Dette omtales også i Norsk Industris veikart, omtalen er gjengitt i Figur 4.

TIZIRS HYDROGENTEKNOLOGI

TiZir vil erstatte kull med hydrogen som reduksjonsmiddel i produksjonen av titan-slagg og rent råjern i forbindelse med produksjonsøkning. Dette skal gjøres gjennom et prosjekt med fire trinn:

Av prosjektets fire trinn er nå trinn 1 i gang der ny teknologi skal introduseres. Det skal forberedes for fremtidig overgang fra kull til hydrogen, spesifikke CO₂-utslipp og spesifikt energiforbruk skal reduseres, samt at produksjonskapasiteten skal økes uten å øke grensene i utslippstillatelsen. Det brukes 450 millioner kroner på dette trinnet, med støtte fra Enova på 122 millioner kroner. Trinn 2 i 2017 er demoanlegg for prereduksjon med hydrogen. Trinn 3 i 2019 er fullskala pilot og trinn 4 omkring i 2021 er full produksjonslinje med prereduksjon med hydrogen og ytterligere en ovn.

Nåværende produksjonsprosess har kald innmating til smelter, noe man taper energi på. Planlagt prosess med hydrogen skal sørge for varm innmating til smelter. Ved bruk av hydrogen i stedet for kull vil spesifikt utslipp gå ned fra 1,73 til 0,18 tonn CO₂/tonn slagg (reduksjon på 90 prosent) og energiforbruket reduseres fra 6,4 til 3,8 MWh/tonn slagg (reduksjon på 40 prosent). Totalt sett skal slagproduksjonen økes fra 195 000 til 655 000 tonn/år og CO₂-utslippet reduseres fra 338 000 til 118 000 tonn/år. I forbindelse med prosjektet skal det også installeres nye renseanlegg som skal redusere diffuse støvutslipp og redusere støv-konsentrasjonen i rensset avgass.

Hydrogen skal produseres fra vann med vannelektrolyse basert på kraft. Teknologien som utvikles vil være mulig å overføre til annen produksjon og andre bransjer.

Figur 4: Omtale av TiZir Titanium & Irons hydrogenteknologi [Norsk Industri: Veikart for Prosessindustrien—økt verdiskapning med nullutslipp i 2050].

Miljøeffekter: **Høy**

TRL:5-6 Endringsgrad: **Ny enhet i eksisterende verk**

3.2 Reduksjon til metall i fast fase

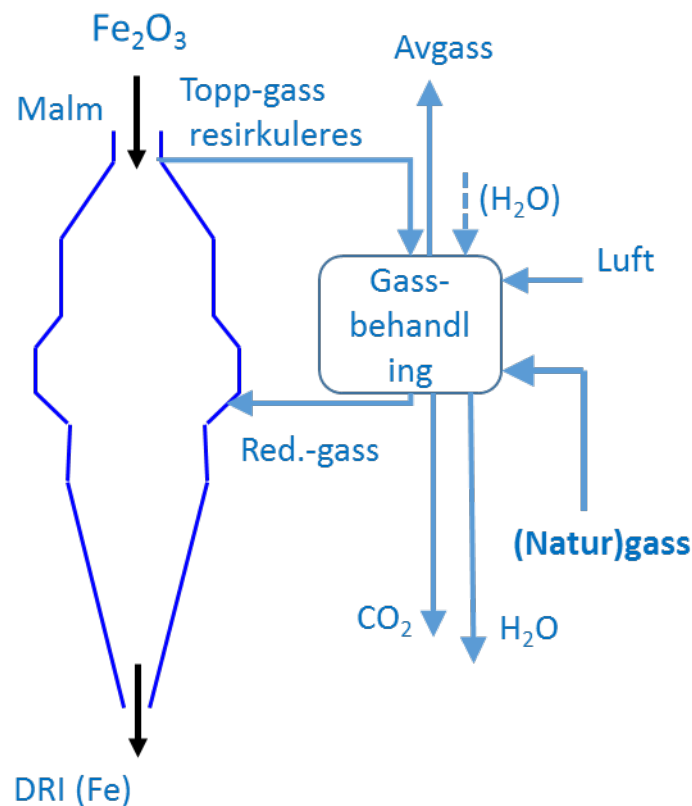
Hvis gass kan brukes til å fullstendig redusere oksider til metall vil det ikke være behov for fast karbon, og hvis malmen er ren nok trengs heller ingen separasjon i smelteprosessen. CO₂-utslipp og energiforbruk kan da reduseres. I hvilken grad et metall er egnet for en slik direkte reduksjon avhenger av stabiliteten av metalloksidet og av reduksjonspotensialet til gassen som brukes. De mest aktuelle gassene H₂ og CO, og ulike blandinger av disse brukes i jernproduksjon. Et mer spekulativt alternativ som ikke er i bruk i dag er metangass (CH₄). Teoretisk er metan et kraftigere reduksjonsmiddel enn H₂ og CO og kan



benyttes på flere metaller, men det er flere praktiske utfordringer som må overvinnes før dette kan bli nyttiggjort industrielt.

Direkteredusert jern (DRI, Direct Reduced Iron).

Jern er et av få metaller som teoretisk kan reduseres fullstendig til metall i fast fase ved hjelp av syntesegass, en blanding av CO og H₂. Dette har vært brukt siden 1970-tallet for industriell produksjon av 'Direct Reduced Iron (DRI)'. Global produksjon er økende og nå på over 70 millioner tonn i året. Det er ingen aktuelle produsenter i Norge, men teknologien er likevel relevant. I flere år ble det utredet muligheten for Ironman-prosjektet på Tjeldbergodden. Planen var å bruke norsk naturgass og svensk eller norsk jernmalm, og slik produsere svært miljøvennlig jern og samtidig drastisk øke verdien på eksportstrømmen av naturgass fra Norge. Prosjektet mangler investorer og ligger nå på is.



Figur 5: Skisse av DRI-prosess.

DRI også viktig fordi det representerer en realisert gassbasert metallurgisk prosess. Flere ulike teknologier er utviklet og i bruk. En av disse er illustrert i Figur 5. Dette gir godt grunnlag for utvikling av nye prosesser, og flere av teknologiene kan det være mulig å overføre eller endre så de kan brukes i produksjon av andre metaller.

Produksjon av DRI er også indirekte relevant for jernmalm-produsenter. RaNaGass var et fireårig forskningsprosjekt som undersøkte mulighetene for å videreføre norsk jernmalm slik at den ble egnet for DRI produksjon. Prosjektet var vellykket, men videreføringen av aktivitetene ligger på is på grunn av reduserte priser på jernmalm globalt.

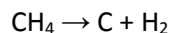
DRI en teknologi med stort potensiale for å redusere globale CO₂-utslipp. Ved produksjon i masovner er utslippene ca. 1,9 tonn CO₂ pr tonn jern, mens de ved produksjon av DRI med naturgass er ca. 0.5 tonn CO₂ pr tonn jern, dvs. 75 % lavere. Globalt ble det i 2014 produsert 1500 mill. tonn stål. Av dette var ca. 1150 mill. tonn stål fra råjern produsert i masovner. Dette store produksjonsvolumet, samt at gassbasert DRI står for under 5% av globalt volum, viser at det er store muligheter for å redusere CO₂-utslipp ved økt bruk av DRI i jernproduksjon.

Miljøeffekter: Høy

TRL:9 Endringsgrad: Nytt verk

Reduksjon til metall med metan som reduksjonsmiddel.

Når metan varmes opp blir det ustabil og dekomponerer til fast karbon og hydrogengass:



Teoretisk sett skal dekomponeringen starte ved ca. 500 °C, en temperatur som er for lav for reduksjon av malm. I praksis ser man imidlertid at metan kan bevares i metastabil tilstand til betraktelig høyere temperaturer enn dette, varmt nok til at enkelte metalloksider kan reduseres. Ved så høye temperaturer vil metangass være veldig ustabil og ha et stort reduksjonspotensiale. Reduksjon vil da kunne foregå ved lavere temperaturer enn når tradisjonelle karbonkilder som kull og koks benyttes, og energiforbruket reduseres. Dersom biogass er kilde til metan vil netto CO₂-utslipp fra reduksjonen være null. Et biprodukt fra en slik prosess vil være en høyverdig gassblanding av hydrogen, metan og CO.

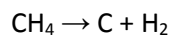
Reduksjon av oksider med metan er vist i lab skala for blant annet krom og mangan. En teknologi som utnytter metan på denne måten industrielt må kunne kontrollere reduksjonsprosessen slik at dekomponering av metan unngås. Dette er en stor utfordring som krever fundamental forståelse av reaksjonsmekanismer ned på molekylnivå. Veien til industrialisering anses med andre ord som lang, men potensialet er høyt.

Dette konseptet har vært studert i flere prosjekter finansiert av Norges Forskningsråd: for silisiumproduksjon i ReSiNa og KiSelROx; og for krom i Coralsea.

Miljøeffekter: Medium (naturgass) - Høy (biogass) TRL:1-2 Endringsgrad: Nytt verk

3.3 Gass som karbonkilde

Som beskrevet over vil metan dekomponere til hydrogen og karbon ved høy temperatur:



Karbonet som dannes kan være et alternativ til kull og koks. Kull inneholder flyktige bestanddeler som gir et vesentlig CO₂-utslipp som elimineres ved bruk av metan. I tillegg unngås negative miljøeffekter knyttet til kullgruvedrift.

Karbon produseres allerede industrielt fra dekomponering av metan, og er kommersielt tilgjengelig som carbon black. Dette veikartet ser primært på bruk av gass i selve metallproduksjonen eller i forbehandlingsenheter hvor gass møter råvarene og ikke på bruk av eksternt produsert carbon black.



Karbon deponert fra gass har andre egenskaper enn partikler av kull og koks. Dette kan i flere tilfeller være en fordel eller en forutsetning for prosessene og teknologiene som brukes. Karbon fra gass kan for eksempel deponeres inne i porer, dekke overflater på oksid som kan reduseres, eller danne finfordelte partikler uten behov for knusing. Hydrogen som dannes under dekomponeringen kan også utnyttes i reduksjonen eller danne et biprodukt. En del mulige bruksområder er beskrevet nedenfor som eksempler.

Komposittmaterialer med carbon black fra gass.

En måte å utnytte karbon i metan på er å deponere det direkte på malmen så det produseres en komposittråvare som inneholder både oksid og karbon. Et slikt materiale forventes å kunne brukes som råvare i eksisterende ovner uten store endringer i infrastruktur. Et karbonlag som fullstendig dekker oksidoverflaten gir en svært stor kontaktflate mellom karbon og oksid. Dette kan påvirke reaksjonsmekanismer og øke reaksjonshastighet noe som kan gi økt utbytte og redusert energiforbruk.

Deponering av karbon fra metan på oksid har vært studert i liten skala i KPN GassFerroSil.

Komposittmaterialer som agglomereres gir også muligheter for å bruke finstoff, partikler mindre enn ca. 5mm, som ellers ikke kan brukes. Kombinert med deponering av karbon fra gass, gir dette en stor kontaktflate mellom oksid og karbon som er gunstig når det ønskes høye reaksjonshastigheter. Hydrogen, kanskje i blanding med metan, vil også her være et biprodukt. Komposittmaterialene som blir produsert kan brukes i eksisterende eller framtidige prosesser. Miljøgevinstene er økt materialutbytte, reduserte utslipp fra forkoksning og ved bruk av biogass reduserte utslipp av fossilt CO₂.

Miljøeffekter: Medium

TRL: 4 Endringsgrad: Ny råvare til eksisterende prosess

Densifisering av biokarbonbasert trekull

Ikke-fossilt karbon, biokarbon er ofte porøst. Dette er en ulempe når karbonet skal være mekanisk sterkt og ikke for reaktivt som i manganproduksjon i. Porene i biokarbon kan tettes ved deponering av karbon fra metan som illustrert i Figur 6. Dette kan lette overgangen til bruk av biokarbon som reduksjonsmiddel.



Figur 6: Porøst biokull kan tettes ved deponering av karbon inne i porene.

Metangass eller andre karbonholdige gasser kan blåses gjennom biokarbon ved høy nok temperatur til at fast karbon deponeres. En to-trinns prosess, der porene først tettes delvis med karbon fra metan ved 1000-1100 °C, og så fullstendig ved varmebehandling ved enda høyere temperatur er en annen mulighet. I begge tilfelle kreves god kontroll av gassflow både før, under og etter deponering. Dette

er ikke testet ut. Teknologisk modenhet bedømmes som lav. Denne prosessen kan også tenkes integrerte i produksjonen av biokarbon

Miljøeffekter: Høy

TRL:1 Endringsgrad: Ny råvare til eksisterende prosess

Carbon black fra gass i elektrodeproduksjon

Carbon black fra gass er aktuelt som råvare for elektroder både til aluminium og ferrolegeringsindustrien. Anoder for aluminiumsproduksjon lages i dag av kull og tjære, iblandet resirkulert anodemateriale. Karbonmaterialet i anodene kan erstattes med carbon black produsert fra gass og med innblanding av biokarbon. Etterhvert som oljeraffineriene stadig øker sin utnyttelse av petroleum i høyverdiprodukter synker kvaliteten på tjære-biproduktene som brukes i anodeproduksjon. Fortynning med rent gassbasert karbon bidra til å oppnå nødvendig renhet. Noe carbon black produseres i dag vha. termisk dekomponering av metan, såkalt thermal black. Det gir god kontroll over renhet, og gir en kompakt carbon black struktur velegnet for anoder med lav porøsitet.

Dekomponering av metan er en endoterm reaksjon som krever kontinuerlig tilførsel av energi. Under produksjon av carbon black gjøres dette ved brenning av hydrogenrik avgass. Dersom produksjon av carbon black til anoder legges i tilknytning til et smelteverk kan spillvarme fra smelteverket brukes til å varme opp carbon black-reaktoren. Brenning av hydrogen vil da være unødvendig, og hydrogen kan tas vare på som et biprodukt.

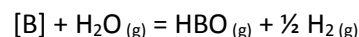
Miljøeffekter: Medium (naturgass)/Høy (biogass) TRL:2 Endringsgrad: Ny råvare til eksisterende prosess

3.4 Gass i smelte

Gassraffinering av silisium

Silisium som skal benyttes i solceller må oppfylle strenge renhetskrav. Størsteparten av solcellesilisium produseres gjennom varianter av den såkalte Siemens-prosessen, som er en effektiv med svært energikrevende prosess. Det har vært lagt ned betydelig arbeid i å finne mer energieffektive renseprosesser, og Elkems prosess er et vellykket eksempel på dette.

Et alternativ som har vært utforsket er å bruke gass til å rense silisium i smeltet form. Som et eksempel kan bor, som er et av de viktigste elementene å kontrollere, fjernes ved spyling med vanddamp. Bor som er løst i smelten vil da reagere til flyktig hydrogenboroksid (HBO) som fjernes i avgassen:



3.5 Nye prosesser

Metallsmelte som reaksjonsmedium, ny prosess for manganproduksjon

Metan kan spaltes i en metallsmelte, og arrangert som vist på Figur 7 vil man få hydrogen (H₂) og karbonmonoksid (CO) i separate strømmer. Brennes disse i turbiner eller lignende med hhv luft og oksygen vil el-kraft kunne produseres med "ferdigfanget" CO₂.

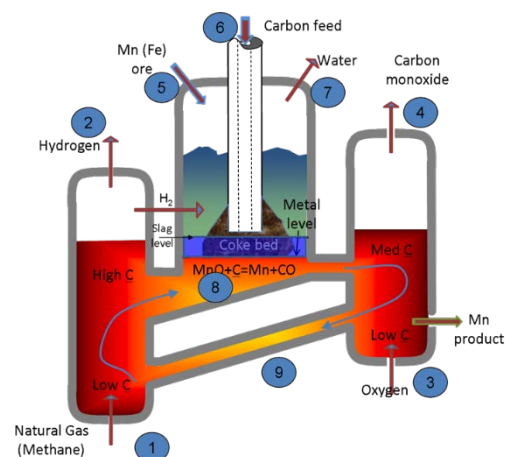
Eksempler på områder som vil kreve nærmere utredning/forskning:



1. Injisere metan; oppløsning av C i smelte
2. Hydrogen fra "cracking" $\text{CH}_4(\text{g}) \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2(\text{g})$
3. Injisere oksygen for C-raffinering
4. CO fra C-raffinering $2\text{C} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}(\text{g})$
5. Tilførsel av malm
6. Tilførsel av fast karbon
7. Avgass fra for-reduksjon
8. Reduksjon av MnO med løst C

Den skisserte prosessen kan beskrives som «Produksjon av syntesegass ($\text{CO} + \text{H}_2$) ved hjelp av Mn-smelte med separering av CO og H_2 i hver sin gren, og Mn med lavt C-innhold som bi-produkt». Syntesegassproduksjonen samsvarer med punktene 1 – 4 over; Mn-produksjon vil avhenge av de øvrige 4 punktene. Dersom avgassen benyttes til kraftproduksjon eller annen forbrenning, og der CO-gassen forbrennes med oksygen, vil det representere en mulighet for «ferdigfanget CO_2 ». På denne måten kan naturgass og Mn-malm kunne konverteres til f.eks. elektrisitet og Mn-legering uten utslipp av drivhusgass. Dette forutsetter at den CO_2 som produseres lar seg deponere eller utnytte. Her er det tale om gassmengder tilsvarende et gasskraftverk i størrelsesorden 450 MW.

Produsert hydrogen kan selvfølgelig også benyttes til andre formål: Fra for-reduksjon av Ilmenitt til drivstoff for biler.



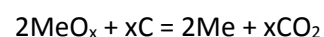
Figur 7: Skisse av mulig prosess for metallsmelte som reaksjonsmedium.

Karbon fra naturgass løst i metall kan på denne måten gi en reduktant med lite forurensninger som kan brukes til reduksjon av oksider.

Miljøeffekter: Lav **TRL: 4** **Endringsgrad: Nytt verk**

Reduksjon med fast karbon i gassblandinger med H_2 eller CH_4

I tradisjonell metallproduksjon brukes karbon til å fjerne oksygen fra oksidet (malmen) slik at det dannes CO_2 -gass, og den overordnede reaksjonsligningen blir:



I realiteten skjer ikke reduksjonen ved direkte reaksjon mellom fast karbon og oksid, men via gass. Karbonmonoksid, CO og karbondioksid, CO₂ "frakter" oksygen og karbon mellom oksid og et fast karbonholdig material som for eksempel koks eller kull. Andre gasser som H₂ og CH₄ kan også brukes til denne "transporten". Beregninger og innledende forsøk tyder på at metallproduksjonen kan foregå raskere og ved en lavere temperatur når det er H₂ og CH₄ i gassen. Dette kan gi redusert energiforbruk og også gi mulighet for utvikling av prosesser med høyere utbytte.

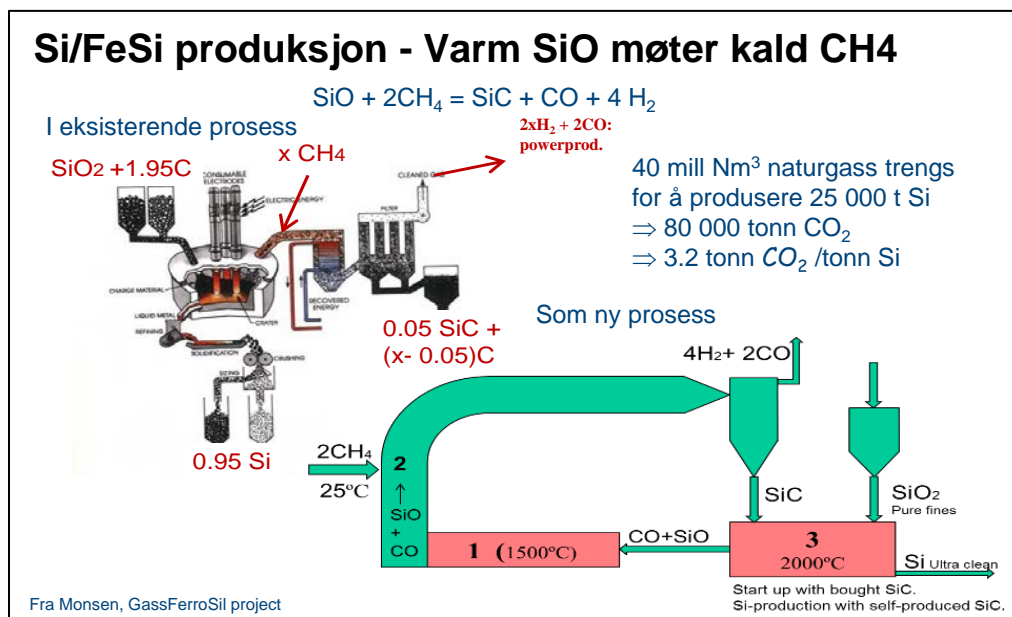
Bruk av metan kan gi grunnlag for en ny kombinert prosess. Metan (CH₄) kan dekomponeres til C og H₂ og slik være kilde både for karbonet som trengs til reduksjonen og hydrogengassen reduksjonen kan foregå i. Siden hydrogenet ikke forbrukes i prosessen vil hydrogen kunne gjenvinnes fra avgassen.

Miljøeffekter: Medium **TRL: 2** **Endringsgrad: Nytt verk**

SiC fra SiO og CH₄.

Silisiumkarbid (SiC) og silisiummonoksid (SiO) er mellomprodukter i silisiumproduksjonen, og SiC er også et eget produkt som blant annet brukes som slipemiddel.

Varm SiO gass som møter kald metangass (CH₄) reagerer til SiC. Dette er demonstrert i liten skala², men har ikke vært forsøkt oppskalert og mekanismene i prosessen er enda ikke undersøkt. Som i mange andre tilfeller vil gassen kunne være en langt renere karbonkilde enn f.eks. kull. Dette gir potensiale for nye prosesser som gir et spesielt rent SiC, aktuelt som råvare for f.eks. solcellesilisium. Et eksempel på dette er vist i figur 8. Det kan også gi mulighet for et høyere utbytte av silisium. Siden produksjon av SiO er den mest energikrevende delen av metallproduksjonen, vil økt utbytte redusere energiforbruket pr tonn silisium.



Figur 8: Skisse av hvordan gassbasert SiC-produksjon kan brukes til å modifisere eksisterende prosess, eller bli en helt ny prosess²

² Monsen et al: Possible use of natural gas for silicon or ferrosilicon production; INFACON 13, Alamy, Kazakhstan 2013

Metan kan også tenkes brukt i eksisterende silisiumprosesser. For eksempel kan man ved å blåse metan over chargeoverflaten kjøle ned SiO₂-holdig avgass og produsere SiC som så faller tilbake til prosessen og kan reagere videre til Si. Det er en rekke HMS utfordringer knyttet til dette.

Miljøeffekter: Høy

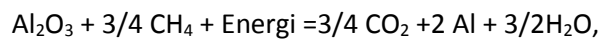
TRL:2-4 Endringsgrad: Ny råvare til eksisterende prosess

Gassanoder for aluminium

Aluminium (Al) produseres ved hjelp av elektrolyse fra aluminiumoksid (Al₂O₃) oppløst i et saltbad:

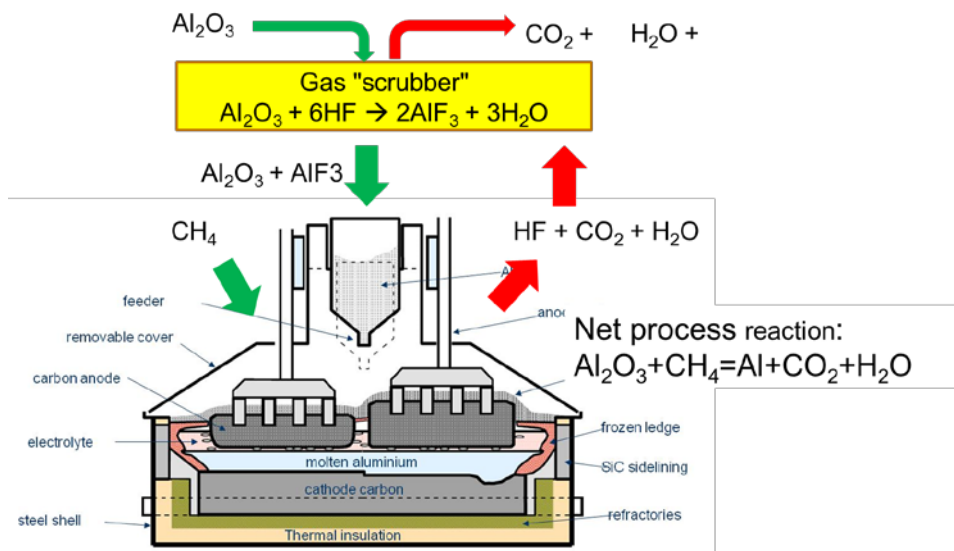


I eksisterende prosess er karbonkilden karbonanoder som forbrukes i prosessen. Smeltet aluminiumoksid reagerer til aluminium og CO₂ ved en elektrokjemisk reaksjon. Inerte anoder, der all energi til reduksjon av Al₂O₃ kommer fra elektrisitet, vil fjerne CO₂-utslippet fra prosessen fullstendig, men energiforbruket vil økes kraftig. Selv etter flere år med forskning har det ikke lyktes å utvikle en inert anode som overlever i den svært korrosive kryolittsmelta. Dersom det benyttes porøse anoder som ikke forbrukes av prosessen, men der karbonet tilføres i form av metangass gjennom anodene som illustrert i Figur 9, endres reaksjonsligningen til



Dette gir tilnærmet samme energiforbruk som dagens prosess, mens CO₂-utslippet pr. enhet aluminium reduseres med 50%.

Utfordringene for gassanoder ligger i anodeteknologi, og i å kontrollere utslipp av flussyre (HF). Når hydrogen fra metan reagerer med fluoridsalter i saltbadet genereres HF, som er sterkt korroderende og giftig. Det har vært forsket på om HF i avgassen kan reageres med Al₂O₃ eller Al(OH)₃ til AlF₃. Dette kan så sendes tilbake til og gjenbrukes i saltbadet.



Figur 9: Gassanoder med scrubber for fjerning av HF i avgass.

Utvikling av porøse anoder krever forståelse av og kontroll med fordeling av gass og elektrisk strøm, og av trefasereaksjonen mellom saltbad, elektrode og gassfase. Anodemateriale må også tåle det reaktive saltbadet.



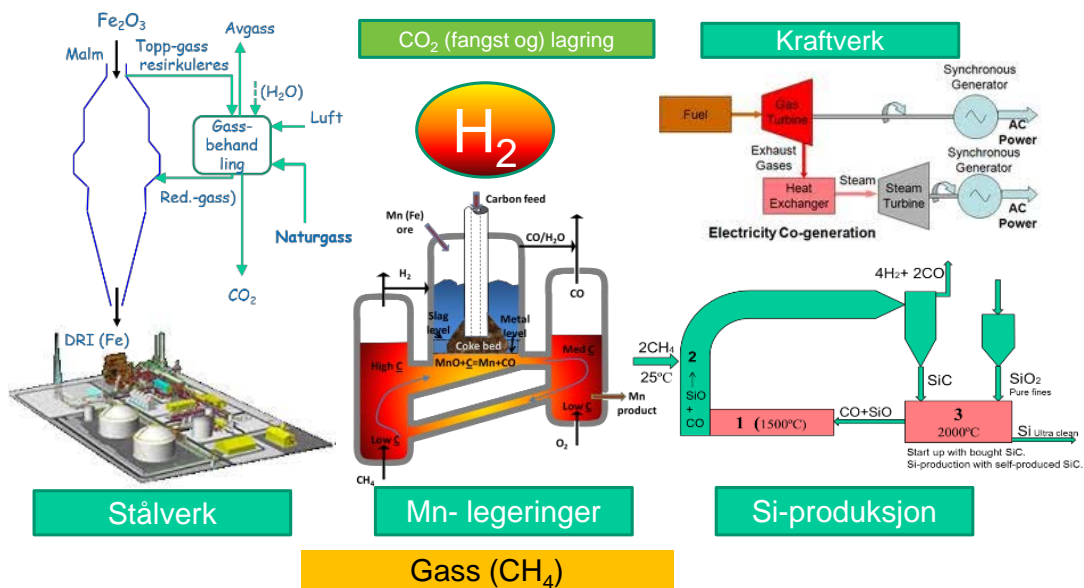
Gassanoder har vært studert i de NFR-finansierte forskerprosjektene FP Gassanode og FP NovAl og i Sintefs interne strategiske prosjekt NatGasMetal.

Miljøeffekter: Høy

TRL: 2-3 Endringsgrad: Nytt verk

Samlokalisering av ulike industrier i industriklynger

Samlokalisering av ulike industribedrifter gir mulighet for bruk av avgass fra en bedrift som råvare i en annen. Dette kan også kombineres med kraftverk og karbonfangst og lagring. En illustrasjon av mulighetene dette gir er vist i Figur 10. Samlokalisering og klynger er studert i prosjektene KPN GassMat og KPN GassFerroSil. Det er da tale om klynger av typen som kalles «industriell symbiose» hvor de enkelte bedriftene som inngår virker sammen med gjensidig utbytte etter samme prinsipper som vi finner i symbioser i naturen.



Figur 10. Muligheter ved samlokalisering av ulike prosesser

Miljøeffekt og teknologisk modenhet varierer med kombinasjonen av prosessene som velges og er ulik fra tilfelle til tilfelle. Det vurderes derfor ikke her.

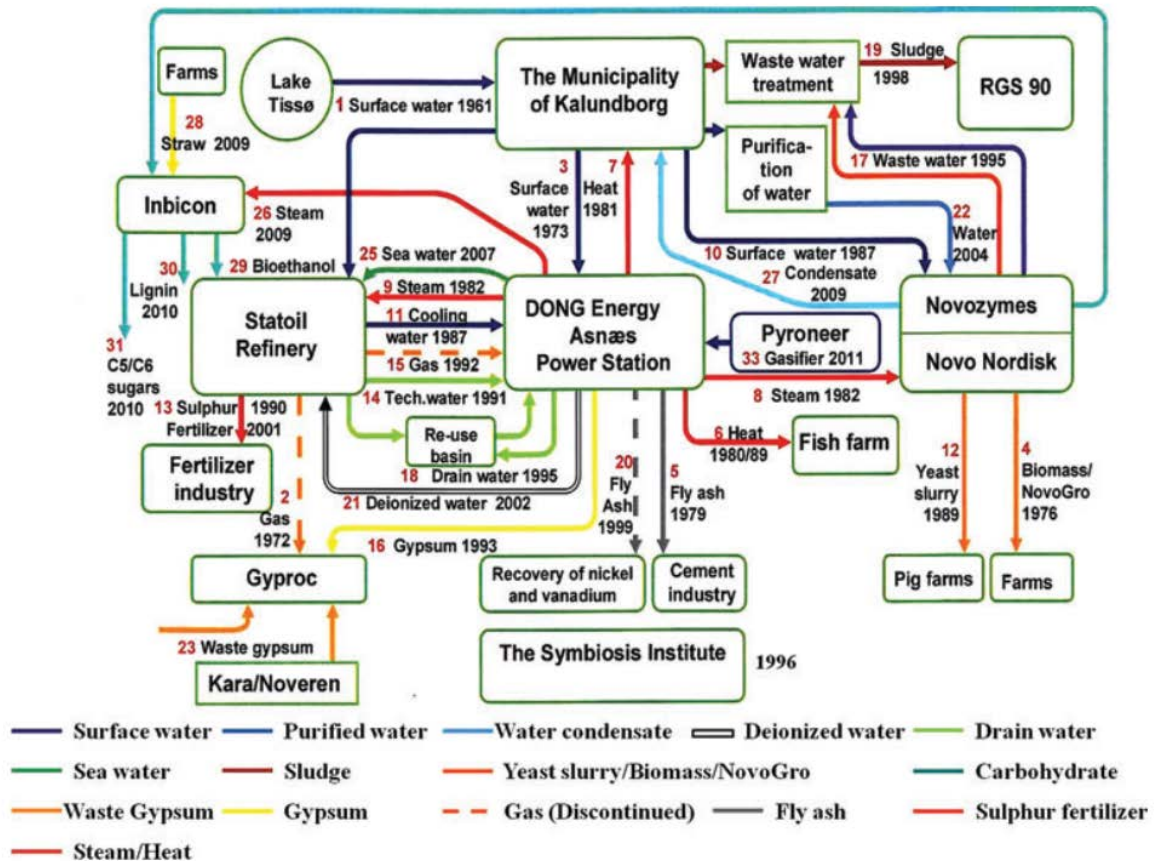
Professor Marian Chertow ved Yale University, School of Forestry and Environmental Studies, USA har studert slike industrielle symbioser i en årrekke og påpeker at det er uhyre vanskelig å konstruere slike klynger; de må vokse fram, eller utvikle seg naturlig gjennom en tretrinns prosess³:

1. Formative stage involving numerous actors engaging in material and energy exchanges,
2. Conscious recognition and intentional pursuit of network benefits
3. Institutionalization of beliefs and norms enabling successful collaborative behavior.

Chertow har i likhet med mange andre forskere innen Industriell Økologi studert utviklingen av industriparken Kalundborg Symbiosis. Denne industriparken blir ofte omtalt som verdens eldste og mest avanserte industrielle symbiose. Historien om Kalundborg Symbiosis startet i 1961, da Statoil (den gang Esso) trengte kjølevann til det nye oljeraffineriet sitt. I stedet for å bruke det kommunale

³ Chertow, M., and Ehrenfeld, J. (2012). Organizing Self-Organizing Systems: Toward a Theory of Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 16(1), 13-27. doi: 10.1111/j.1530- 9290.2011.00450.x

drikkevannet, ble overflatevann via rør fra innsjøen Tissø benyttet. Denne løsningen ble utviklet og gjennomført i samarbeid med det kommunale vannverket. Videre gikk utviklingen i trinn over tid som vist på figur 11. Det gikk så 11 år før neste trinn i utviklingen av denne industriparken ved at gass som var et biprodukt fra raffineriet ble da utnyttet av Gyproc som framstiller gips.



Figur 11. Kalundborg industriell symbiose. Viktige utvekslinger av materialer og energi er nummerert fra 1 til 33 og årstallene indikerer tidspunkt for igangsettelse av slike utvekslinger. Koblinger som senere er fjernet er vist som stiplede linjer. Figuren er hentet fra <http://www.symbiosis.dk/en/system> og senere modifisert av Chertow.

I 1989 var omtrent halvparten av dagens prosjekter for utveksling av ressurser i gang i Kalundborg. Det var da de involverte aktørene satte ord på det de drev med, og begynte å kalle det industriell symbiose, og altså nådde trinn 2 i Chertows modell. De innså at de jobbet etter samme prinsipp som en symbiose i naturen, der ulike arter virker sammen med et gjensidig utbytte.

4 Forutsetninger for teknologiutvikling

En realisering av dette veikartet i form av økt bruk av gass i metallproduksjon er avhengig av utvikling av eksisterende og nye teknologier, i mange tilfeller et betydelig forskningsløft. Med teknologiutvikling menes her utviklingen av en idé fram til den er moden nok til å ta videre i industriell bruk, dvs. opp til demonstrasjon i pilotskala (TRL 6). Teknologiutvikling, slik ordet er brukt her, vil med andre ord hovedsakelig finne sted på forskningsinstitusjonene, men også i bedriftenes forskningsavdelinger. Et tett samarbeid mellom alle aktørene er nødvendig for å utvikle teknologier som kan realiseres industrielt. De viktigste forutsetningene for at den nødvendige teknologiutviklingen skal finne sted vil

bli beskrevet i dette kapitlet. Selv om veien fra pilotskala og fram til kommersiell drift også i høy grad er et spørsmål om "teknologiutvikling", har vi i dette veikartet definert denne delen av realiseringen som "industrialisering". Forutsetningene for industrialisering er beskrevet i neste kapittel, 5. Også etter realisering vil det være behov for kontinuerlig forskning og utvikling for å forbedre prosesser, slik norsk metallurgisk industri har gjort i over hundre år.

4.1 Kompetanse

Den viktigste forutsetningen for all teknologiutvikling er kompetanse. Vi går ikke inn på basiskompetanse her, men henviser til Norsk Industris veikart for Prosessindustrien og regjeringens industrimelding, der det f.eks. pekes på at rett kompetanse må være tilgjengelig på alle nivåer av både industribedriftene og forskningsinstitusjonene.

For å nå målene i dette veikartet må det fokuseres på spesifikk fagkompetanse som en forutsetning for teknologiutvikling. Dette innebærer at hovedaktørene må opprettholde og videreutvikle sin kompetanse innen metallurgiske og prosesstekniske fagdisipliner. Disse omfatter, men er ikke begrenset til:

Termodynamikk:

Termodynamikken vil være grunnleggende for forståelsen av gassbasert metallurgi, slik den er det for andre kjemiske prosesser. Ekspansjon til nye prosesser vil kreve oppdatering av termodynamiske modeller av systemer og databaser.

Reaksjonskinetikk:

Forbedring av prosesser krever at reaksjonsmekanismene er forstått fundamentalt sett. Et nødvendig verktøy for en slik forståelse er god kompetanse om reaksjonskinetikk og evne til å lage kinetiske modeller.

Råvareegenskaper:

Råvarenes egenskaper påvirker utformingen og driften av prosesser. Kompetanse om råvarenes mekaniske og elektriske egenskaper, og om hvordan disse kan påvirkes gjennom forbehandling (tørking, agglomerering, etc.) er nødvendig. God metodikk for måling og beskrivelse av egenskaper er også viktig.

Fluiddynamikk:

Fluiddynamikk er nødvendig for beskrivelse av gasstrømmer og i design av reaktorer og prosesser, og kan også være en komponent i modellering og forståelse av reaksjonsmekanismer.

Gass-faststoff reaksjoner:

En stor andel av de aktuelle reaksjonene vil være gass-faststoff reaksjoner. Dette gjelder de fleste reduksjonsreaksjonene, men også ting som katalyseeffekter ved cracking av metan.

Gasshåndtering

Ikke bare er dette et punkt for industrialisering og bygging av nye verk, det er også en del av byggingen av testtrikker i pilot- og labanlegg, og helt nødvendig for god HMS

For å bygge opp ytterligere kompetanse på disse områdene må de prioriteres gjennom strategiske satsninger og gjennom kompetansebyggende prosjekter. Deltakelse i internasjonale samarbeidsprosjekter vil gi tilgang til internasjonal kompetanse.



Forskningsmiljøene må være attraktive nok til at personer med høy kompetanse vil jobbe med disse områdene. For å sikre rekruttering både til industrien og forskningsmiljøene må det fokuseres på den nødvendige kompetansen i utdannelsen av MSc-kandidater, og det må tilbys masteroppgaver innen emnet. Det er også nødvendig å ha oppdatert kunnskap om aktuelle industrielle produksjonsmetoder, utstyr og teknologier. Dette sikres best ved at universiteter, forskningsinstitusjoner og industribedrifter samarbeider tett.

4.2 Forskning og Utvikling

Langsiktig og målrettet forskning gjennom flere år er påkrevd for å utvikle de nye teknologiene som trengs. Behovene varierer mellom teknologier, men i mange tilfeller er det nødvendig å starte på grunnleggende nivå, med prosjekter der forskningsinstitusjonene har hovedrollen. Industriens rolle vil øke etterhvert som teknologiene modner, og teknologiutviklingen vil ferdigstilles i industristyrte prosjekt. Hvor mange og hvor lange forskningsprosjekter som er nødvendige for å nå fram dit vil variere, men felles for all utvikling av grensesprengende teknologi er nødvendigheten av å arbeide med en lang tidshorisont, f.eks. et 10-års perspektiv.

4.3 Forskningsinfrastruktur

Ny teknologi har behov for nye typer forskningsinfrastruktur. Metallurgiske prosesser foregår ved høye temperaturer, opp mot 2000 °C, og alle de aktuelle gassene (H₂, CO, CH₄) er brennbare. Det kan også bli aktuelt å jobbe under trykk. Når teknologiene modner vil det også være nødvendig med forsøk i større skala, ofte med stort og tungt utstyr. Disse forholdene gjør at det stilles store krav til eksperimentelt utstyr og til bruk og vedlikehold av dette. SINTEF og NTNU har gjennom årtier bygd opp avansert laboratorieutstyr egnet til denne type forsøk, og kompetanse om å bruke dette. Kontinuerlig vedlikehold, oppgradering og modernisering av utstyr slik at det til enhver tid er state-of-the-art er krevende.

Det ble i 2014 og 2016 sendt inn søknader om forskningsinfrastruktur til forskning på bruk av gass i metallproduksjon. Disse søknadene hadde sterkt støtte i industrien, og ble etter 2014 satt på 'Norsk veikart for forskningsinfrastruktur' over "store og nasjonalt viktige forskningsinfrastrukturer, som [...] er vurdert som støtteverdig av Forskningsrådet". Søknadene involverte også katalyse og kjemisk prosess på industri og FoU-siden. Dette gjenspeiler de mange like behov de forskjellige fagfeltene har for utstyr. En felles nasjonal infrastruktur kan gi grunnlag for videre forskningssamarbeid, noe som er relevant for framtidige industriklynger med bedrifter både fra metallproduksjon og kjemisk prosessindustri.

Ut over store løft som nyinvesteringer beskrevet over, er det også nødvendig at FoU-institusjonene kjøper nytt utstyr og oppgraderer laboratorier som kan betjene en metallindustri interessert i gassbaserte løsninger. Særlig er HMS-aspektet og muligheten til å håndtere brennbare gasser i relevante mengder viktig.

4.4 Finansiering av teknologiutvikling

Den nødvendige teknologiutvikling krever finansiering ut over den industrien og forskningsinstitusjonene selv kan stå for. Det finnes flere finansieringsinstrumenter tilgjengelige i dag, i hovedsak gjennom Norges Forskningsråd, Innovasjon Norge, Enova, SIVA og EU.

Det er en utfordring at programmene kan ha ulike formål og trekke i forskjellig retning. PILOT-E apparatet som ble lansert for miljøvennlig energi i 2016 kan være en modell til etterfølgelse. Her

opereres det med ett felles søknadssystem. Prosjektene i ordningen støttes i hele prosjektløpet fra flere finansieringsaktører, gitt positivt resultat ved milepæler underveis.

Utvikling fra en idé til en ny prosess eller en prosessendring, krever ofte et forskningsprosjekt som har en lengre tidshorison enn vanlig for de fleste finansieringsordninger.. Norsk Industri peker også på dette i sitt veikart, og etterlyser prosjekt som går over 4-8 år. Korte prosjekt kan føre til at vellykkede resultater ikke videreføres eller realiseres. Med opphold mellom to prosjektperioder kan viktig kompetanse forsvinne til andre forskningsoppgaver.

De siste årene har det vært økt fokus på forskningsfinansiering av prosjekter med kort vei til realisering og gevinst, både fra Norges Forskningsråd og EU. Friere forskningsmidler er gjenstand for ekstrem hard konkurranse siden de deles mellom alle felter. Det er en fare for at det blir et "hull" i finansieringen for ideer med lavere teknologisk modenhet. Når det grønne skiftet skal gjennomføres over et tidsperspektiv på flere tiår er det nødvendig at industrielt relevante prosjekter med lav teknologisk modenhet også prioriteres. Det foreslås basert på dette en vridning mot finansieringsordninger og virkemidler med en langsiktig horison. Dette er en viktig forutsetning for å utvikle teknologi for bruk av gass i metallproduksjon.

Dette kan realiseres gjennom et eget program for prosessindustrien i Norges Forskningsråd. Norsk Industri anbefaler et slikt program i sitt Veikart for Prosessindustrien. Denne anbefalingen gjentas og understrekes her, med en ytterligere anbefaling om at et slikt program bør ha en tidshorison fram mot 2050.

5 Forutsetninger for industriell bruk

Med "industrialisering" menes her at ny eller eksisterende teknologi som gir økt bruk av gass i metallproduksjon er tatt i bruk industrielt. Det er en glidende overgang fra teknologiutvikling til industriell produksjon. De siste deler av teknologiutviklingen som pilotforsøk og utviklingen av demonstrasjonsanlegg gjøres ofte som en del av industrialiseringen. De forutsetninger som går på mer grunnleggende utvikling av teknologi er beskrevet i kapittel om teknologiutvikling. Flere viktige forutsetninger må være på plass for at gassbaserte teknologier tas bruk til industriell metallproduksjon.

5.1 En levende industri

Den viktigste forutsetningen for at veikartet skal bli realisert er at det eksisterer en sunn industri med evne til å utvikle og implementere ny teknologi. Dette innebærer at industrien har kompetanse, handlingsrom og ressurser tilgjengelig til å ta de nødvendige løft.

Det er derfor imperativt at rammevilkårene ligger til rette for en sunn industri i Norge, som beskrevet i Norsk Industris Veikart for prosessindustrien. Det pekes særlig på at Norge må være et attraktivt vertskapsland for investering i—og utvikling av—prosessindustri, med "stabile, langsiktige og globalt konkurransedyktige rammebetingelser og virkemidler".

5.2 Lønnsom og bærekraftig teknologi

For at gass kan bli en viktig innsatsfaktor i metallproduksjon må den aktuelle teknologien være lønnsom og bærekraftig. Å etablere nye verk og prosesser og å øke produksjon i Norge forventes å være vanskelig politisk dersom det ikke er miljømessig bærekraftig.

På den annen side vil ikke nye miljøvennlige konsepter realiseres dersom de ikke er lønnsomme, og mer lønnsomme enn alternativene. Store og omfattende prosjekter som å erstatte en eksisterende prosess har en betydelig risiko og må ha en betydelig forventet lønnsomhet.



Støtte- og incentivordninger kan gjøre at marginalt lønnsomme prosjekter realiseres, men det er likevel viktig med kontinuerlig vurdering av lønnsomhet under hele teknologiutviklingsperioden.

5.3 Råvaretilgjengelighet

Naturgass og biogass

De nye prosessene og teknologiene beskrevet i kapittel 3 i veikartet skiller ikke på biogass, naturgass, avgasser eller andre gasskilder. Prosessene krever gasser eller gassblandinger som er en blanding av metan (CH_4), karbonmonoksid (CO) eller hydrogen (H_2). Hvordan disse gassene og gassblandingene produseres er sekundært fra et rent prosesssteknisk synspunkt. Den viktigste bestanddelen i både biogass og naturgass er metan, CH_4 , og fra metan kan man produsere både karbon, karbonmonoksid og hydrogen. Både naturgass, avgasser fra produksjon og biogass er egnede råmaterialer for metallproduksjon. Hydrogen kan også produseres fra vann ved hjelp av elektrisk kraft.

Langsiktig bærekraft er avhengig av en fornybar gasskilde, som for eksempel biogass. Det vil imidlertid forsinke utviklingen kraftig om implementeringen av gassbaserte teknologier står på hold helt til de kan gjøres karbonnøytrale med biogass. I en overgangsperiode må det brukes naturgass eller andre gasser som bidrar på veien mot lavere CO_2 utslipp. Når bruk av biogass og biomasse øker i omfang, kan det forventes at dette skjer i flere bransjer, ikke bare metallproduksjon. For at biokarbonet skal gi den største nytten til samfunnet innenfor et bærekraftig nivå av avvirkning er det viktig at biokarbonet brukes der det gjør størst nytte, og der det ikke finnes andre alternativer

Bruk av gass som ikke produseres ved smelteverket krever et distribusjonsapparat. Norsk Industri skriver i sitt veikart at "En forutsetning for økt bruk av naturgass er at det åpnes for tredjepartsadgang i distribusjonsanleggene som alt er bygget og vil bli bygget." Uten slik tredjepartsadgang fungerer ikke markedet, man får regionale monopol, og prisene blir ikke konkurransedyktige. For at biomasse og biogass skal kunne anvendes, må det også finnes et distribusjonsnettverk for dette.

Andre råvarer

Gassbaserte teknologier vil være avhengige av andre råvarer utover gass, ofte med andre krav enn dagens teknologier. For eksempel kan det være andre krav til renhet av råvarer, som for DRI til jernproduksjon. Nye prosesser kan ha andre og lignende krav til råvarer. En forutsetning for industrialisering er at de rette råvarene er tilgjengelige i en kvalitet som er forenelig med prosesskrav og til en konkurransedyktig pris.

5.4 Elektrisk energi

Norske metallprodusenter bruker klimanøytral elektrisk kraft fra vannkraftverk. Ved eksport av denne kraften kan det kanskje argumenteres at man isolert sett senker det globale CO_2 -utslipp, siden behovet for fossil kraftproduksjon i mottagerlandet synker. Imidlertid kan dette virke mot sin hensikt totalt sett, ved at norsk miljøvennlig metallproduksjon gjøres mindre konkurransedyktig og erstattes av mer forurensende produksjon andre steder, eller at en større del av vekst i produksjon tas av mer forurensende bedrifter i andre land. Eksport av "energi i fast form" som metall er et alternativ til krafteksport. Tilgang på elektrisk kraft og rammevilkår rundt dette er behandlet i Norsk Industris Veikart for prosessindustrien.



5.5 Kombinerte prosesser og klyngedannelse

For å oppnå maksimal utnyttelse av råvarer, energi og sidestrømmer kan klyngedannelse være en mulighet. Klynger gir gevinsten som følge av geografisk samlokasjon og de fordeler det gir med distribusjon av innsatsfaktorer som råvarer, gass og elektrisitet. Klynger kan også representere enda tettere tilknytninger, i form av kombinerte prosesser der prosessoptimalisering kan skje på tvers av bransjer og produkter.

I både metall- og kjemikalieproduksjon kan syntesegass, som er en blanding av karbonmonoksid (CO) og hydrogen (H₂), benyttes som et råstoff. Konvertering av metan til syntesegass er en kostnads- og energikrevende prosess, og en felles syntesegassproduksjon for både metall- og kjemikalieproduksjon vil gi en potensiell synergieffekt.

Det kan bli aktuelt å ta i bruk CCS og CCU i forbindelse med metallurgisk virksomhet i framtida, og det vil da være naturlig å vurdere samlokasjon av flere bedrifter for å oppnå storskala fordeler for slike løsninger.

Fleire av de mulige teknologiene nevnt i dette veikartet for metallproduksjon gir avgasser med høyt innhold av hydrogen, karbonmonoksid og metan. Dette er verdifulle gasser som potensielt kan utnyttes i andre prosesser. I en industriklynge kan optimal bruk av slike sidestrømmer sikres. Etablering i klynger forutsetter langsiktig planlegging og tilrettelegging, og vil ofte måtte involvere myndighetene. Uansett er det, som nevnt tidligere, sannsynlig at en vellykket klynge ikke bare kan planlegges og bygges – den må gis anledning til å vokse og utvikle seg på en naturlig måte.

5.6 Kapital og risiko

Selv med alle andre forutsetninger er på plass vil industrialisering av nye gassbaserte teknologier i metallindustrien kunne stoppes av at de krever store investeringer av kapital, med betydelig risiko. Industrien og deres finansieringsinstitusjoner samt andre investorer må bidra med hovedtyngden av kapitalen.

Investeringsvnen hos bedriftene og andre investorer kan økes ved at myndighetene bidrar med tiltak som gjør forholdet mellom risiko og forventet avkastning bedre. Rene tilskudd reduserer det totale kapitalbehovet fra bedriften. Tilskudd fra det offentlige kan også være i form av støtteordninger fra ENOVA til energibesparende tiltak, eller støtte til førstegangsinvestorer i ny teknologi. Andre tiltak kan være risikofrie lån som begrenser det mulige tapet ved en mislykket investering eller garantiordninger som minsker risiko ved investeringer.

6 Konklusjoner

Dette veikartet understøtter Norsk Industri sin visjon om en bærekraftig norsk metallindustri som oppnår CO₂-nøytralitet innen 2050. Veikartet peker på flere aktuelle gassbaserte teknologier som kan være en del av realiseringen av en slik visjon. Gassbaserte teknologier kan spille en viktig rolle i å gjøre metallproduksjon mer miljøvennlig og samtidig gjøre norske metallprodusenter mer konkurransedyktige.

Gassbaserte teknologier kan bidra til at norske metallprodusenter øker konkuranssevnen og markedsandelen. Metallindustrien er en viktig eksportindustri i Norge, og samtidig viktig for mange lokalmiljø. Siden metallproduksjon i Norge er blant de mest effektive med lave utslipp av klimagasser og annen forurensning er utvikling av denne industrien et godt tiltak for å nå de nasjonale miljømålene. Gassbaserte teknologier kan også bidra til å gjøre norske metallprodusenter enda mer miljøvennlige,



og øke klimagevinsten ytterligere. Gjennom å satse på gassbaserte teknologier kan norske metallprodusenter øke lønnsomheten av sin virksomhet. Det kreves vilje til å satse langsiktig og å foreta radikale omstillinger. Det må også rekrutteres til industrien folk med riktig kompetanse.

Norske universiteter og forskningsinstitusjoner må sammen med industrien utføre en betydelig del av det forskningen som trengs for å realisere dette. For å være i stand til å spille denne viktige rollen må strategiske og kompetansebyggende prosjekter innen bruk av gass i metallproduksjon prioriteres, og den relevante typen utstyr må prioriteres ved investeringer i forskningsinfrastruktur. Norske universiteter må også utdanne nok kandidater med rett kompetanse slik at disse blir tilgjengelige for rekruttering i både industrien og FoU sektoren.

Det offentlige kan på sin side bidra ved å legge til rette for norsk næringsliv, og å sikre at Norge blir sett på som et attraktivt vertsland for eksisterende og framtidig landbasert industri. Videre kan de bidra ved å sikre at en god nasjonal infrastruktur kommer på plass for tilgang og distribusjon av naturgass, bio-gass og andre gasser.

Det er viktig at det offentlige støtter opp og styrke virkemiddelapparatet og gjør det lettere for industrien å gjennomføre langsiktige FoU-prosjekter som går over mange år. Et annet viktig punkt er at gjør det lettere å finansiere industrirelevante prosjekter med noe lavere modenhetsgrad. Det er også helt nødvendig med tiltak som reduserer risiko for investeringer i ny teknologi i kapitalintensiv industri. Dette kan være i form av tilskudd for miljøvennlige tiltak eller risikofrie lån.

Gassbaserte teknologier representerer store muligheter for forbedringer innen metallproduksjon. Det er derfor viktig at alle parter drar i samme retning og legger til rette for en grønn framtid.