

Projektledare Kentaro Umeki
Projekttitel Hållbar produktion av metallpulver med biokol i Höganäs ABs anläggningar

## Administrativ bilaga till Slutrapport

### Uppföljning av måluppfyllelse och nyttiggörande

I samband med att ni lämnar in slutrapport för ert projekt ska också denna blankett fyllas i och läggas som bilaga till slutrapporten.

Denna blankett riktar sig till Energimyndigheten, och visas *inte* i vår externa projektdataas.

Syftet med blanketten är att följa upp projektets måluppfyllelse enligt Energimyndighetens beslutsdokument, eventuella avvikelser i projektets måluppfyllelse och genomförande samt vad projektet har gjort/kommer att göra för att projektets resultat ska komma till gagn för övriga samhället. Samtidigt följer vi också upp ett antal generella indikatorer som Energimyndigheten följer för de projekt vi stödjer.

**Detta dokument ska skickas in som en bilaga till slutrapporten via E-kanalen.**

### 1. Projektets måluppfyllelse

a) Vilka var projektets mål (enligt Energimyndighetens beslutsdokument)?

Projektets övergripande syfte är att bygga fundamental men praktiskt tillämpbar kunskap relaterat till användning av biomassabaserade reduktions- och uppkolningsmedel i två av Höganäs AB:s produktionsprocesser: järnsvampsprocessen samt smältning-/atomiseringsprocessen. Ett ytterligare syfte med projektet är att stärka kompetensen inom områdena reaktions- och processteknik samt högtemperaturkemi inom metallurgiska processer vid de deltagande organisationerna.

Projektets mål är att ha

1. Utvecklat en omfattande kravspecifikation för biokol för användning i järnsvampsprocessen och smältning-/atomiseringsprocessen. Mer specifikt,
  - a) definierat kravspec för acceptabel nivå av oorganiska ämnen med hänsyn till både sammansättning och mängd,
  - b) beskrivit de optimala egenskaperna för biokol (inklusive reaktivitet, densitet mm.).
2. Föreslagit optimerade produktionssystem och förhållanden för biokolsframställning. Mer specifikt,

- a) samlat in och sammanställt data om tillgänglighet och förväntad prisbild gällande lågkvalitativa biomassaråvaror,
  - b) utvecklat en databas om inverkan av processförhållanden på utbyte, egenskaper och asksammansättning vid produktion av biokol via pyrolys,
  - c) belyst hur biomassans kvalitet och egenskaper (i synnerhet med avseende på asksammansättning och partikelstorlek) påverkar utbytet och egenskaperna vid biokolsproduktion.
3. Utvecklat en strategi för att kunna anpassa och optimera järnsvampsprocessen för användning av biokol, genom numerisk simulering. Mer specifikt,
- a) utvecklat en numerisk multiskalmodell som beräknar gasflöde och reaktioner (Boudouardreaktion och järnmalmsreduktion) samt transportprocesser på partikelskala,
  - b) fastställt en lämplig procedur för att kunna identifiera optimala processförhållanden för järnsvampsframställning i tunnelugn med nya biomassabaserade reduktionsmedel.

- b) Hur förhåller sig projektets resultat till projektets mål?  
För vart och ett av projektets mål, redovisa de viktigaste resultaten och bedöm i vilken utsträckning och/eller på vilket sätt dessa bidrar till att projektets mål uppnåtts eller kan komma att uppnås. (Exempel: Om projektets mål var att fram en prototyp av ett visst slag som sparar x kWh jämfört med en viss annan teknik, berätta hur många kWh som faktiskt sparas med den teknik som tagits fram inom projektet jämfört med den referensteknik som angavs i målet).

Vi har uppfyllt **första syftet** (att bygga kunskap för användning av biomassabaserade reduktions- och uppkolningsmedel) som framgår av flera vetenskapliga publiceringar och deltagande i seminarium (5 artiklar i vetenskapliga tidningar, 4 presentationer i internationell konferens, 4 presentation i seminarium och workshop). Vår forskning fick även pris för bästa presentation i en internationell konferens (7th International Symposium on Gasification and Its Application, som hölls online i 27-30 September, 2021). En del kunskap som tagits fram i projekt användes i pilotförsök hos Höganäs AB (P2020-90128) där man har verifierat genomförbarhet för 20% biokolsanvändning i fullskaligt järnsvampsproduktion med en potentiell sänkning av 27 000 ton CO<sub>2</sub>-eq per år.

För **andra syftet** (att stärka kompetensen hos de deltagande organisationerna) har vi lyckats att höja kompetensen betydligt. Två doktorander inom projektet (Ali Hedayati och Aekjuthon Phounglamcheik) har disputerat under projektperioden och de jobbar nu i Höganäs AB samt Envigas AB (företag som utvecklar produktionsprocessen för biokol) som utvecklingsingenjörer. Vi är stolta över att ha utbildat duktiga forskare/ingenjörer som nu fortsätter att bidra till utvecklingen av biomassaanvändning inom metallurgisk industri.

Projektet har haft ytterligare tre specifika mål.

**Första målet** var utveckling av en omfattande kravspecifikation för biokol för användning. Målet har uppfyllts genom termodynamisk jämviktsberäkning och laboratorieexperiment.

1-a) kravspec för acceptabel nivå av oorganiska ämnen

Oorganiska ämnen reagerar med varandra i ugnen och till viss del bildar föreningar med specifika egenskaper. Därför kan kravspec för acceptabelt innehåll av varje oorganiskt ämne variera beroende på nivåer av övriga ämnen och inte bestämmas till allmänna specifika värden. Istället finns det behov att beräkna deras reaktioner och interaktion med varandra och Fe för varje typ av biokol. Denna beräkningsprocedur har etablerats. Till exempel, har termodynamiska beräkningar av smältförlopp för föreningar av oorganiska ämnen i biokol visat potentialen för dess föreningar att bilda lokala slaggsnälar med hög viskositet som kan hindra inlösning av C vid uppkolning av stålsnälar.

1-b) beskrivning av de optimala egenskaperna inklusive reaktivitet och densitet  
Ökningen av massdiffusionsbegränsningen med kontroll av partikelstorlek identifierades som en viktig metod för att reducera biokolets reaktivitet och bibehålla reducerande atmosfär. I partikelskala minskade reaktiviteten monotont med ökning av partikelstorlek som förutsagt av teorin. Det fanns dock begränsningar i optimeringen av egenskaperna för biokol med avseende på reaktivitet och densitet, även med mekanisk förtätning av biokol. Effekten av densitet och partikelstorlek på reaktivitet beskrevs med teoretiska modeller för att möjliggöra bedömning av egenskaperna för olika typer av befintlig och framtidens biokol. Från labb- och pilotförsöken hos Höganäs AB har man kunnat fastställa minimikrav för biokols C-fix halt, apparent densitet, och reaktivitetsbenägenhet vid tillämpning som kolråvara i järnsvamps- och smältprocesserna.

**Andra målet** var att föreslå optimerade produktionssystem och förhållanden för biokolsframställning. Målet har uppfyllts genom litteraturstudie och laboratorieexperiment.

2-a) kartläggning och sammanställning av tillgänglighet och förväntad prisbild för lågkvalitetsbiomassa

Litteraturstudier och omvärldsbevakning (inklusive utveckling på policyområdet) har använts för att införskaffa och bibehålla en uppdaterad bild av tillgång och prisbild för relevanta biomassasortiment, i form av främst biprodukter från skogsbruk och skogsindustri. Geografisk omfattning har varit hela Sverige, då konkurrenssituationen kan förväntas vara hårdare i södra än norra Sverige.

2-b) utveckling av en databas om inverkan av processförhållanden på utbyte och egenskaper av biokol

En databas har utvecklats genom litteraturstudie. Reaktionstemperatur, tryck, uppvärmningshastighet, reaktion gas, partikelstorlek, och upphållningstid identifierades som viktiga processförhållanden. Reaktionstemperatur var den viktigaste parametern under pyrolysisprocessen. Högre temperatur gav bättre egenskaper av biokol (t.ex. högre C-fix, lägre reaktivitet) dock medförde det lägre utbyte samt förhöjd nivå av oorganiska ämnen.

2-c) belysning av hur biomassans kvalitet och egenskaper påverkar utbytet och egenskaperna vid biokolsproduktion.

För att öka förståelse av effekten av biomassans kvalitets utfördes pyrolysexperiment av tallbark, GROT samt majscolv följt av biokolskaraktärisering.

Biomassaråvara i Sverige, som främst består av skogsbioprodukter, har högt innehåll av Ca, K och P vilket stannar kvar i biokolet efter pyrolysis och koncentreras på grund av förlust av flyktiga ämnen från biomassa. Högt Ca-innehåll är fördelaktigt eftersom det finns möjlighet att minska kalkkonsumtionen och bidra till ytterligare minskning av CO<sub>2</sub> medan hög K och P innehåll anses som en nackdel i generellt.

Lignin-, Ca- och K-innehåll samt partikelstorlek har identifierats som de viktigaste egenskaperna och kvaliteterna hos biomassan som påverkar utbytet och egenskaper av biokol med avseende på reaktivitet. Biokol med högt innehåll av K har också hög reaktivitet vilket gör att vi vill minska innehållet av K och P innan pyrolysis genom syralakning. Lakning med ättiksyra var effektivt för att minska askämnen och reaktivitet. Dock minskade utbytet av biokol samtidigt. Därför föreslår vi att bästa sätt att producera biokol från lågkvalitetsbiomassa är att först pyrolysera utan förhandling och sedan laka biokolet med vatten efter pyrolysis.

**Tredje mål** var att utveckla en strategi för att kunna anpassa och optimera järnsvampsprocessen för användning av biokol. Målet har uppfyllts genom utveckling och användning av numerisk simulering tillsammans med experimentell försök i enkapselugnen på Höganäs Pilot Centre.

3-a) Utveckling av en numerisk multiskalmodell

En numerisk multiskalmodell för järnsvampsprocessen har utvecklats. Modellen beräknar gasflöde, mass- och värmetransport, reaktioner (Boudouardreaktion, järnmalmsreduktion, och kalcinering) och förändring av porstruktur efter reaktioner. Resultat från 1-b angående effekten av partikelstorlek på reaktivitet har tillämpats i reaktionsmodellerna. För att möjliggöra simulering inom rimlig tid har transportparameter i modellen beräknats i egen modell om partikelpackning (discrete element modell) i förväg. En experimentell kampanj med avbrutna försök har utförts i Höganäs AB:s enkapselugn där tre fall med olika halter av biomassabaserade reduktionsmedel har studerats; Referens (0% biokol), Blandning 1 (20% biokol), Blandning 2 (55% biokol). Dessa resultat används för validering av den numerisk multiskalmodell.

3-b) Fastställelse av en lämplig procedur för optimering av processförhållanden med nya biomassabaserade reduktionsmedel

En ny procedur för processoptimering har utvecklats inom projekt. I proceduren används numerisk simuleringsmodell från 3-a och test av nya geometrier för att undvika negativa effekter av biokolsanvändning (t.ex. otillräcklig reduktion, för hög konsumtion av reduktionsmedel, m.m.). Dock är det nödvändigt att validera simuleringsresultaten med experimentella försök i Enkelkapselugnen

för att bekräfta att resultaten inte är felaktiga. Generellt möjliggör den nya proceduren att vi kraftigt kan minska antalet experiment och därmed associerad kostnad. Prototyp av fyllrör med nya ringdiameter har tillverkats under hösten 2023. Inledande tester har gjorts men det visar sig att försöksuppställningen behöver modifierats för att åstadkomma jämförbara resultat med standard ringdiameter.

## 2. Kommentera eventuella betydande avvikelser i projektets måluppfyllelse och/eller genomförande i förhållande till Energimyndighetens beslut om stöd till projektet

Om projektet inte nått målen eller om betydande förändringar gjorts i projektets genomförande jämfört med projektbeslutet, motivera detta. Beskriv också vad som har gjorts för att motverka dessa avvikelser.

## 3. Spridning och nyttiggörande av resultatet i samhället

- a) Hur har projektet arbetat för att sprida projektets resultat och/eller på andra sätt se till att det kommer till nytta? Vilka eventuella ytterligare aktiviteter kommer att göras framöver? Beskriv projektets genomförda och planerade kommande aktiviteter för att sprida projektets resultat och/eller på andra sätt se till att det kommer till nytta i samhället. Berätta också om ni har förslag på resultat som ni eventuellt skulle vilja kommuniceras genom Energimyndighetens kanaler (genom nyhet, information riktad till Energi – och klimatrådgivare etc), och föreslå i så fall gärna hur detta skulle kunna göras.

Huvudsakligen har projektet använt vetenskapliga publikationer, internationella konferenser, nyheter på LTUs och Höganäs ABs hemsidor samt presentationer i workshop/seminarium för resultatspridning. Projektets resultat har även spridits i flera allmänna medier dock är det omöjligt att följa och lista alla som har tagits upp i mindre medier. Projektets publikationer/presentationer sammanställs nedan.

Projektresultat har redan använts i planering av pilotförsök på Höganäs AB, som har utförts med stöd från Energimyndigheten (P2020-90128). Deltagarna i projektgruppen är även involverade i andra projekt fokuserade på produktionsteknik av biokol dit de tar med sig kunskaper från detta projekt. Inom projektgruppen för vi diskussioner om fortsatt samarbete för att ytterligare accelerera användningen av biokol i Höganäs ABs produktionsprocesser genom ytterligare utökad kunskap och kompetens. Detta är nödvändigt då Höganäs AB, efter detta projekts start, beslutat att accelerera sin klimatfärdplan och nu även har som mål att uppnå nettonollutsläpp (scope-1) till 2030.

### Lista över sprida publikationer/presentationer

Vetenskapliga publikationer inklusive internationella konferenser

1. Zahra Ghasemi Monfared, J. Gunnar I. Hellström, Kentaro Umeki, The Impact of DEM (Discrete Element Method) Parameters on Realistic

- Representation of Spherical Particles in a Packed Bed, *processes*, submitted.
2. Aekjuthon Phounglamcheik, Markus Bäckebo, Ryan Robinson, Kentaro Umeki, The significance of intraparticle and interparticle diffusion during CO<sub>2</sub> gasification of biomass char in a packed bed, *Fuel* 310 (2022) 122302
  3. Ryan Robinson, Liviu Brabie, Magnus Pettersson, Marko Amovic, Rolf Ljunggren, An Empirical Comparative Study of Renewable Biochar and Fossil Carbon as Carburizer in Steelmaking, *ISIJ Int.* 62 (2022) 2522-2528.
  4. Aekjuthon Phounglamcheik, Ricardo Vila, Norbert Kienzl, Liang Wang, Ali Hedayati, Markus Broström, Kerstin Ramser, Klas Engvall, Øyvind Skreiberg, Kentaro Umeki, Gasification reactivity of char from high-ash biomass, *ACS Omega* 6 (2021) 34115–34128
  5. Aekjuthon Phounglamcheik, Liang Wang, Henrik Romar, Norbert Kienzl, Markus Broström, Kerstin Ramser, Øyvind Skreiberg, Kentaro Umeki, The effects of pyrolysis conditions and feedstocks on the properties and gasification reactivity of charcoal from woodchips, *Energy & Fuels* 34 (2020) 8353–8365.
  6. Zahra Ghasemi Monfared, Gunnar Hellström, Kentaro Umeki, Characterization of Packed Bed Reactors Using X-Ray Microtomography: Effect of Particle Irregularity and Particle Size Distribution on the Bed Morphology, 14th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Algarve, Portugal, April 2024
  7. Kentaro Umeki, Ryan Robinson, Ali Hedayati, Aekjuthon Phounglamcheik, Zahra Ghasemi Monfared, Elisabeth Wetterlund, Marcus Öhman, Elin Hernebrant, Magnus Pettersson, Sponge Iron with the New Black: Production and Use of Bio-coal in a Direct Reduced Iron (DRI) Plant, 16th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), online/Dubrovnik, Croatia, October 2021.
  8. Aekjuthon Phounglamcheik, Markus Bäckebo, Ryan Robinson, Kentaro Umeki, Effect of packing property on gasification reactivity of bio-coal in a packed-bed reactor, 7th International Symposium on Gasification and its Applications, online, September 2021.
  9. Aekjuthon Phounglamcheik, Liang Wang, Henrik Romar, Norbert Kienzl, Markus Broström, Kerstin Ramser, Øyvind Skreiberg, Kentaro Umeki, Effect of pyrolysis conditions and feedstocks on char gasification reactivity, 7th International Symposium on Gasification and its Applications, online, September 2021.

Presentationer i workshop/seminarium

10. Kentaro Umeki, Ryan Robinson, Fossil Free Iron Powder: Production and Use of Biocarbon in a Direct Reduced Iron (DRI) Plant, Jernkontorets och Metallinjalostajats seminarium om biokol och bioråvara, 28-29 September 2022

- <https://www.jernkontoret.se/sv/publicerat/nytt-fran-jernkontoret/nyheter/2022/lyckat-svensk-finskt-seminarium-om-biokol/>
11. Kentaro Umeki, Biocarbon research in Luleå/Sweden - Toward sustainable steel industry -, invited presentation at BioCarbUp project meeting, Trondheim, Norway (online participation), March 2021.  
<https://www.sintef.no/projectweb/biocarbup/>
  12. Elin Hernebrant, Möjligheter med biokol för att minska Höganäs AB:s klimatavtryck, föredrag vid Metallurgmöte hos Jernkontoret, March 2023.
  13. Ryan Robinson, Biokol – nödvändigt för stålindustrins omställning, invited presentation at Svebios Årsmöte & Värmöteskonferens, online participation, April 2023.

#### Egna nyhetsartiklar

14. ”Forskare vid Luleå tekniska universitet hjälper Höganäs AB att bli fossilfria” - Höganäs AB, 19 december 2018  
<https://www.hoganas.com/sv/news-and-events/news/2018/lulea-university-are-helping-hoganas-to-become-fossil-free/>
15. ”Miljonsatsning på forskning om fossilfri ståltillverkning” - Luleå tekniska universitet, 19 december 2018  
<https://www.ltu.se/research/subjects/Energiteknik/Nyheter-och-aktuellt/Miljonsatsning-pa-forskning-om-fossilfri-staltillverkning-1.182923>
16. ”Utvecklar grönt kol för industrin” – Luleå tekniska universitet, 19 januari 2021  
<https://www.ltu.se/research/subjects/Energiteknik/Utvecklar-gront-kol-for-industrin-1.205296>
17. ”Minska koldioxidavtrycket med biokol” – Höganäs AB  
<https://www.hoganas.com/en/sustainability/climate-and-energy/decreasing-the-carbon-footprint-with-biochar/>

Några exempel på artiklar om projektet som har publicerats i allmänna medier:

- SVT: <https://www.svt.se/nyheter/vetenskap/tre-vagar-till-gronare-stal-sa-kan-stalindustrin-minska-utslappen-forskning-hjalper-stalindustrin-att-bli-gronare-sa-kan-stalet-bli-gronare-sa-hjalper-forskning-gora-stalindustrin-miljovanligare-tre-forskningsprojekt-for-en-miljovanligare-stalindustri>
- SVT: <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/helsingborg/fornybart-kol-satsningen-som-ska-minska-utslappen-fran-metallpulvertillverkaren>
- Dagens industri: <https://www.di.se/nyheter/biokol-nasta-for-hoganas/>
- Ny Teknik: <https://www.nyteknik.se/hallbar-industri/hoganas-testar-att-tillverka-jarnsvamp-med-biokol-det-blev-jattelyckat/4201746>
- Bioenergitidningen: <https://bioenergitidningen.se/hardgjord-biokol-hjalper-hoganas-att-bli-klimatneutrala/>

- b) Har eller planeras projektet resultera i några patent eller andra bevis på rättigheter till resultat, eller några ansökningar om detta? Om bevis på rättigheter till resultat tagits ut eller ansökningar planeras, vem äger/har nyttjanderätt till dessa?  
Beskriv detta i så fall här.

Just nu har vi ingen plan att söka patent eller andra former av rättigheter.

#### 4. Eventuella bilagor till rapporten som inte ska visas i Energimyndighetens externa projektdatabas

- a) Innehåller slutrapporteringen bilagor som inte ska visas i Energimyndighetens externa projektdatabas? Slutrapporten ska alltid kunna visas i Energimyndighetens externa projektdatabas. Däremot visas inte denna Administrativa bilaga i projektdatabasen. Innehåller slutrapporteringen andra bilagor som inte ska visas i Energimyndighetens externa projektdatabas?
- Ja                       Nej
- b) Om "Ja" i frågan ovan, vilka bilagor gäller det?  
Skriv filnamnen på eventuella bilagor till slutrapporten som inte ska publiceras externt här.  
Bilagor som inte ska publiceras externt ska märkas upp genom att "KÄNSLIG INFORMATION" skrivs in i dokumentets rubrik. Alternativt kan dokumentet vattenstämplas med " KÄNSLIG INFORMATION". Dessutom ska i filnamnet läggas in orden " KÄNSLIG INFORMATION".