

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Hållbar produktion av metallpulver med biokol i Höganäs ABs anläggningar	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Sustainable production of metal powder with bio-carbon in Höganäs AB's processes	
Universitet/högskola/företag Luleå tekniska universitet (LTU) / Höganäs AB (HAB)	Avdelning/institution LTU Institutionen för teknikvetenskap och matematik / HAB Global Technology
Adress 971 87 Luleå	
Namn på projektledare Kentaro Umeki	
Namn på ev övriga projektdeltagare (LTU) Aekjuthon Phounglamcheik, Ali Hedayati, Zahra Ghasemi Monfared, Elisabeth Wetterlund, Marcus Öhman (HAB) Ryan Robinson, Liviu Brabie, Ali Hedayati, Elin Hernebrant, Magnus Pettersson, Pontus Hydén	
Nyckelord: 5-7 st Biokol, hållbar industri, järnsvamp, direkt reducerat järn (DRI), pyrolysis, askakemi	

Förord

Projektet, Hållbar produktion av metallpulver med biokol i Höganäs ABs anläggningar, har utförts som forskningssamarbete mellan Luleå tekniska universitet (LTU) och Höganäs AB (HAB) mellan 2019 och 2023. Projektet har huvudsakligen finansierats av Energimyndigheten, med inkind-bidrag från LTU och HAB. Projektledare har varit Kentaro Umeki, professor i energiteknik på LTU. Från HABs sida var projektledare Ryan Robinson, utvecklingsingenjör inom Global Technology.

Tre seniorforskare på LTU (Kentaro Umeki, Marcus Öhman och Elisabeth Wetterlund) samt tre doktorander (Aekjuthon Phounglamcheik, Ali Hedayati, samt Zahra Ghasemi Monfared) har deltagit i projektet, varav Ali Hedayati efter disputation anställdes vid HAB och därefter deltog i projektet från HABs sida.

Deltagare från HAB bestod av ingenjörsexpertis inom utveckling av reduktionsprocesser (Ryan Robinson och Elin Hernebrant), smältmetallurgi (Liviu Brabie), och produktionsprocesser (Pontus Hydén och Magnus Pettersson), med deltagande även av flera tekniker vid Höganäs Pilot Centre.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	3
Inledning/Bakgrund	4
Genomförande	8
Resultat	16
Diskussion.....	32
Publikationslista.....	38
Referenser, källor.....	40
Bilagor	43

Sammanfattning

HAB tillverkar två olika huvudtyper av järnpulver: svamppulver med hjälp av en DRI-process (Direct Reduced Iron, direktreducerat järn) och vattenatomiserat pulver med hjälp av en EAF-process (Electric Arc Furnace, elektrisk ljusbågsugn) där koks och kol fungerar som reducerande och/eller uppkolande medel. Detta projekt kombinerade olika FoU-insatser för att ersätta fossilbaserade kolkällor med biomassabaserade kolkällor. Syftet var att bygga upp både praktisk och grundläggande kunskap om att ersätta fossilt kol med biokol. Därför har en holistisk undersökning av hela biokolvärdekedjan genomförts. De viktigaste aktiviteterna inkluderade (i) specificering av erforderliga materialprestanda för utnyttjande av biokol i den befintliga anläggningen, (ii) utvärdering av strategier för att omvandla biomassa till biokol med de erforderliga kvaliteterna, (iii) utvärdering av tillgängliga råmaterialresurser för biomassa, och slutligen (iv) undersökning av biokolets beteende i den befintliga anläggningen. Nyckelutmaningar relaterade till användningen av biokol identifierades inom olika områden, inklusive tillgången på och priset på råvaror, sammansättningen av askbildande element, reaktiviteten hos Boudouard-reaktionen, biokolutbyte i pyrolysisprocessen, och partikeldensitet. Resultaten ger värdefull information för att kunna utnyttja biokol inte bara inom HABs verksamhet utan även i andra metallurgiska industrier.

Summary

HAB produces two different types of iron powders: sponge iron using a direct reduced iron (DRI) and water-atomized powder using an electric arc furnace (EAF) process where coke and coal act as reducing and/or carburizing agents. This project combined various R&D efforts to replace fossil-based carbon sources with biomass-based carbon sources. The aim was to build both practical and fundamental knowledge related to the replacement of fossil coal with biocarbon. Therefore, a holistic investigation of the entire biocarbon value chain has been carried out. The major activities included (i) specification of the material performance needed for the utilisation of biocarbon in the existing plant, (ii) assessing strategies for converting biomass into biocarbon with the required qualities, (iii) evaluating available biomass feedstock resources, and finally (iv) investigating the behaviour of biocarbon in the existing plant. Key challenges related to the use of biocarbon were identified in various areas, including the availability and price of raw materials, the composition of ash-forming elements, reactivity of the Boudouard reaction, biocarbon yield in the pyrolysis process, and particle density. The results provide valuable information in order to utilize biocarbon not only in HAB but also in other metallurgical industries.

Inledning/Bakgrund

Sveriges klimatpolitiska ramverk trädde i kraft den 1 januari 2018 och innebär ett nationellt mål om att Sverige inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären 2045, för att därefter uppnå negativa utsläpp. En stor del av dagens växthusgasutsläpp kommer från järn- och stålindustrin, som därför är central i satsningar på åtgärder för utsläppsminskningar inom industrin.

HAB är en världsledande producent av metallpulver. Råpulvret tillverkas genom två huvudsakliga processer: fastfasreduktion av finkornig järnmalm till järnsvamp i tunnelugn (järnsvampsprocess), respektive smältning av stålskrot i ljusbågsugn och atomisering av det flytande stålet med högtrycksvatten till pulver (smältning- och atomiseringsprocess). De främsta reduktions- och uppkolningsmedlen i dessa processer är antracitkol, koksgrus, grafit och petroleumkoks. HAB släpper i dagsläget ut ca 200 000 ton CO₂eq från fossila kolråvaror årligen i Sverige, vilket motsvarar ca 1,3% av svensk processindustris totala utsläpp (Naturvårdsverket 2023), varav den största delen kommer från användandet av fossila reduktions- och uppkolningsmedel.

Höganäs järnsvampsprocess är över 100 år gammal och används för att producera högkvalitativt DRI (direktreducerat järn). Processen har över tid optimerats kring användning av fossila material, och utgör idag huvudkällan till HABs växthusgasutsläpp (180 000 ton CO₂eq, eller 80% av utsläppen från HAB i Sverige).

I processen packas järnmalmkoncentrat (slig) och finmalet reduktionsmedel i cylindriska keramiska kapslar, utan att blandas med varandra (järnmalmen packas i en ring, med reduktionsmedel i mitten samt på utsidan av malmringen). Kapslarna placeras på vagnar (25 kapslar per vagn) som förs in i tunnelugnar (ca 1200 °C, uppehållstid 2-3 dagar) där järnmalmen reduceras och sintras till järnsvamp. Efter tunnelugnen avlägsnas den förbrukade reduktionsmixen (tunnelugnskalk) från de sintrade ihåliga järnsvampspelarna, som sedan efterarbetas till järnsvampspulver.

Reduktionen av järnmalm till järnsvamp sker med hjälp av CO



där CO tillförs genom Boudouardreaktion av reduktionsmedel med CO₂



Om de fysiska och kemiska egenskaperna hos järnmalm och reduktionsmedel gör att reduktionsprocessen tar längre tid än uppehållstiden i tunnelugnen, riskeras att järnmalmen inte reduceras fullständigt. Samtidigt har järnsvampsprocessen en fördel i åtskillnaden mellan järnet och askorna i kolen och kokset. Vissa reduktionsmedel kan dock innehålla oorganiska ämnen/askkomponenter som uppvisar högre flyktighet och reaktivitet. Vid sådana tillfällen kan dessa element ge upphov till oönskad interaktion/reaktion med järnsvampsprodukten under processen. Därför behöver reduktionsmixen uppfylla vissa krav vad gäller fysiska och kemiska egenskaper (t.ex. reaktivitet, densitet och askkemi). Dessa krav har under de senaste femtio åren utvecklats till en relativt liten mängd lämpliga

reduktionsmedel för fossila material, dvs. olika typer av kol och koks. Det är därmed en svår uppgift att hitta alternativa biomassabaserade reduktionsmedel som uppfyller samma specifika krav. Kostnaden, samt begränsade möjligheter att utföra ändringar i produktionsprocessen, är de faktorer som HAB främst överväger när de ska ta beslut om en eventuell fullständig övergång till biomassabaserade reduktionsmedel.

Redan under 1980-talet gjordes enklare försök på HAB att introducera biomassa för att öka produktiviteten, men problem med askämnen gjorde att försöken avbröts. Under senare år har intresset för biomassabaserade reduktionsmedel ökat och inom projekt PROBIOSTÅL (Energimyndigheten, projektnr. 38685-1) har man gjort och planerar ytterligare försök med att tillämpa biokoks (sekundärprodukt från biomassaförgasning) från biomassa som reduktionsmedel. Även utanför projektet PROBIOSTÅL har HAB utvärderat andra biokol på marknaden med avseende på om och hur de kan användas som reduktionsmedel bl.a. i två tidigare examensarbeten (Lyttbacka 2015; Hernebrant 2015). Preliminära försök görs också med biokol som uppkolningsmedel inom smältmetallurgi, dvs. för användning i ljusbågsugnar och skänkungar. Utfört arbete så här långt indikerar några avgörande problem, vilka är i fokus i detta projekt och beskrivs nedan.

Mängderna och sammansättningen av askbildande element i biomassa skiljer sig avsevärt från de i kol och koks. Speciellt för biomassa av låg kvalitet (hög askhalt) kan en annorlunda askkemi/-sammansättning hos biokolet leda till oönskade interaktioner/reaktioner med järnmalmen/järnsvampen. HAB har idag kriterier vad gäller acceptabla mängder av K, Na, P och S i koks- och kolbaserade reduktionsmedel. I dagsläget saknas dock kriterier för andra element och för biokol. Då de askbildande elementen i biomassa både uppvisar en högre reaktivitet och återfinns i skilda mängder i biomassa jämfört med i kol och koks, kan en annorlunda askkemi, och -beteende, t. ex. lägre asksmälttemperatur, skillnader i den bildade asksmältans viskositet och högre koncentration av flyktiga oorganiska komponenter, förväntas hos biokol i jämförelse med hos dagens fossila reduktionsmedel. Askbeteendet hos biokol kommer också att påverkas av vilken biomassaråvara som används liksom av val av pyrolysisprocess. Därför är det nödvändigt att utveckla nya kriterier eller utvärderingsmetoder för mängden askbildande element som är specifika för biomassabaserade reduktionsmedel.

Densiteten på i dagsläget tillgängligt biomassabaserat kol är betydligt lägre än för fossila motsvarigheter. Detta är ett avgörande problem för balansen i kapslarna och utan betydligt högre densitet kommer det inte vara möjligt att ersätta det fossila materialet. Det är därför av stor vikt att dels öka densiteten hos biomassabaserat kol, dels utvärdera och beskriva ytterligare nyckelegenskaper för biokol.

De biomassaråvaror som utifrån tidigare studier förefaller kunna ge en acceptabel askkemi är baserade på stamved, vilket innebär en hög kostnad för kolmaterialet och därmed dålig ekonomisk bärighet. För att kunna hålla nere kostnaderna för biokol behöver därför alternativa biomassaråvaror undersökas. Vidare kan den framtida sammantagna efterfrågan på biomassa i Sverige också befaras överstiga den hållbara tillförselpotentialen, i synnerhet om omställningen av transportsektorn till fossiloberoende ska mötas med inhemska resurser (Börjesson 2017). Biomassa

med lägre kvalitet (t.ex. avverkningsrester och skogsindustriella biprodukter som bark, slammer och lignin) behöver därför undersökas som råvara för biokolsframställningen, för att minska konkurrensen med annan biomassaanvändning.

Anpassning av pyrolysisprocessen är en del av den primära strategin för införandet av biokol, så att HABs produktionsprocesser behöver modifieras så lite som möjligt. För att kunna anpassa pyrolysisprocessen är det nödvändigt att känna till effekten av alla relevanta reaktionsparametrar. Tidigare studier har visat att temperaturen, speciellt mellan 400 och 800 °C, avsevärt påverkar reaktiviteten, densiteten (Brewer 2014), och sammansättningen hos askan (Suopajarvi 2018) vid produktion av biokol. Vidare påverkas viktiga reaktionsparametrar, t.ex. uppvärmningshastighet (Cetin et al. 2004), reaktionsgaser, tryck (Recarj 2014) och partikelstorlek (Wang 2011), också av pyrolysisreaktorns utformning. Kritisk information för att kunna utforma och anpassa pyrolysisprocesser saknas dock i dagsläget i litteraturen, relaterat till t.ex. de kombinerade effekterna av dessa reaktionsparametrar samt effekten av biomassaråvarans ingående fukthalt. Informationen är särskilt knapp vad gäller lågkvalitetsbiomassa, där kunskapsuppbyggnad krävs.

En annan primär strategi för införandet av biokol gäller att öka kunskapen kring hur produktionsprocessen i HAB kan optimeras baserat på variationer i egenskaperna hos biomassabaserade reduktions- och uppkolningsmedel. Nuvarande krav för fysiska och kemiska egenskaper (t.ex. reaktivitet, densitet och askkemi) hos reduktionsmixen är erfarenhetsmässigt framtagna. Dessa kan vara möjliga att modifiera, om hög produktkvalitet kan uppnås med endast små justeringar av produktionsprocessen (t.ex. mängd järnmalm respektive reduktionsmedel). Att identifiera optimala processförhållanden enbart genom experimentella försök kan bli mycket kostsamt, då många försök behövs för varje utvärderad typ av biokol. En del av projektet är därför inriktad mot prediktiv modellering, där alla relevanta fysiska och kemiska processer inkluderas, baserat på vetenskaplig kunskap framtagen inom ramen för projektet.

Detta projekt syftar till att ta fram grundläggande kunskap för att fullt ut kunna ersätta dagens fossila reduktions- och uppkolningsmedel med biomassabaserade, dvs. biokol, för att på så sätt väsentligt kunna minska HABs växthusgasutsläpp. För att undvika oönskade konsekvenser från introduktionen av biomassabaserat reduktions- och uppkolningsmedel i HABs produktion, t.ex. i form av nedsatt produktionskapacitet, försämrad produktkvalitet (metallpulver) samt kraftigt ökade produktionskostnader, krävs ökad kunskap relaterat till såväl biokolsproduktionen som användningen i metallpulverproduktionen. Detta projekt kommer att tillhandahålla grundläggande kunskaper för att kunna ta fram konkreta strategier för att introducera biomassabaserade reduktions- och uppkolningsmedel med ovan nämnda egenskaper i åtanke. Vidare kan projektet ses som ett första steg i ett långsiktigt åtagande att implementera biokol i den metallurgiska industrin, både som hållbar metallpulverproduktion på HAB, och som en mer allmän studie av hållbar stålproduktion inom den svenska skrotbaserad stålindustrin.

Syfte och mål

Projektets övergripande syfte är att bygga fundamental men praktiskt tillämpbar kunskap relaterat till användning av biomassabaserade reduktions- och uppkolningsmedel i två av HABs produktionsprocesser: järnsvampsprocessen samt smältnings-/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 smältnings-/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 sammanställa 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.

Genomförande

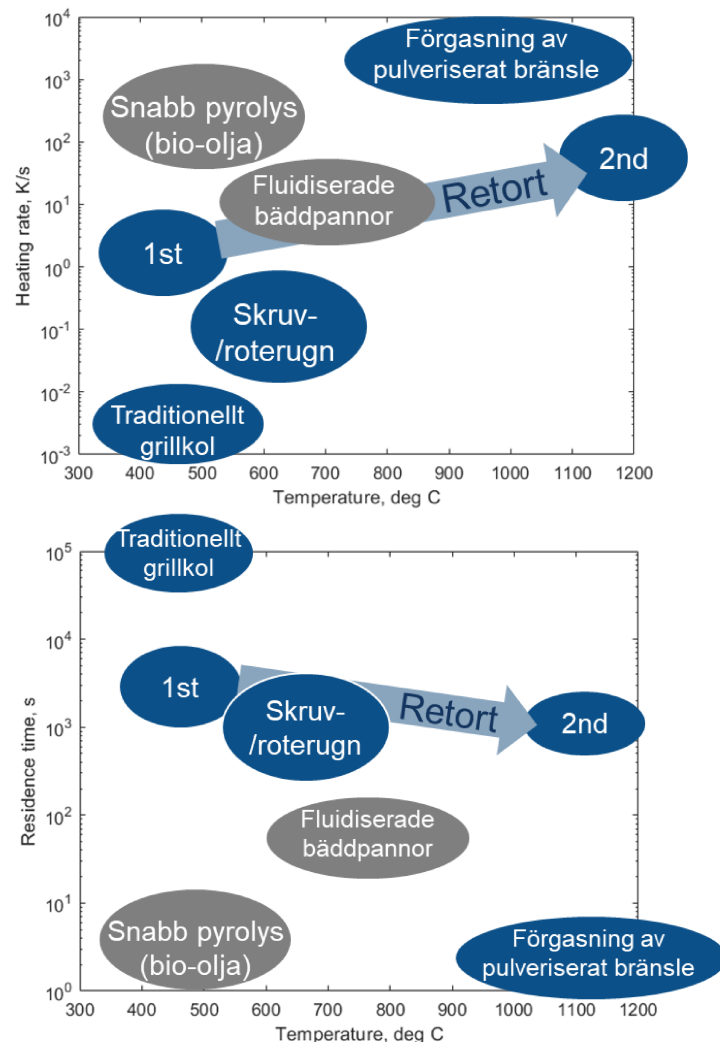
Projektet har tillämpat ett holistiskt angreppssätt för att generera ny kunskap och lämpliga strategier. Arbetet har varit indelat i tre arbetspaket (AP) enligt nedan.

AP1: Kravspecifikation för biokol

I detta AP byggdes en kravspecifikation för biokol innehållande kriterier för önskade och acceptabla egenskaper avseende (1) nivå av oorganiska ämnen med hänsyn till sammansättning och mängd, och (2) förmåga att bibehålla reducerande atmosfär under reduktionsprocessen. AP1 utfördes av både LTU och HAB.

Nuvarande reduktionsmedel och befintligt biokol på marknaden

Koksgrus och antracit, som för närvarande används som reduktionsmedel och uppkolningsmedel, sattes som referensmaterial.



Figur 1 Reaktionsförhållanden för olika typer av termokemiska omvandlingstekniker för biomassa med möjlighet att producera biokol.

Figur 1 visar reaktionsförhållandena för olika termokemiska omvandlingstekniker för biomassa, inklusive tekniker med möjlighet att producera biokol även om huvudprodukten är en annan än biokol. Som illustreras av den stora spridningen i reaktionstemperatur, uppvärmningshastighet och uppehållstid, kan olika tekniker potentiellt ge ett brett utbud av kvalitet och utbyte av biokol.

Fyra biokolprover samlades in från flera pyrolysanläggningar i industriell skala. Biokol A representerar biokol från förgasning av pulveriserad biomassa. Biokol B kommer från en skruvreaktor. Biokol C kommer från en konventionell långsam pyrolysisprocess för grillkolsproduktion. Biokol D är från en tvåstegs pyrolysisprocess (retort i Figur 1). En del biokol förtätades också genom en extruderingsprocess som för närvarande är under utveckling. Två andra typer av reaktorer (fluidiserad bädd och snabb pyrolysis) har under projektperioden utvecklats inom ramen för andra initiativ (t.ex. Energimyndigheten projekt P2022-00212), men de har inte beaktats inom detta projekt då det inte finns/fanns pilotanläggning då biokol samlades in.

Biokol A är en bottenaska från en biomassaförgasare av cyklontyp (Chishty 2021), som använder granpulver som råvara. Temperaturen inuti reaktorn varierade från 700 °C i botten till 1200 °C nära bränsleinjektionspunkten. På grund av en kort partikeluppehållstid på ca. 10 s innehåller partiklarna relativt hög kolhalt. En uppskattad uppvärmningshastighet för biomassapulvret under pyrolysis är ungefär 10^3 – 10^4 °C/s.

Biokol B erhöles från en pyrolysisreaktor av skruvtyp som var indirekt uppvärmd. Björkspån av storlek 10–30 mm pyrolyseras vid maximal temperatur av 600 °C. Reaktorn är icke-isotermisk och den hade en temperaturprofil som liknar en motströmsvärmeväxlare. Upphållstiden för partiklarna var ca. 60 minuter, och den uppskattade uppvärmningshastigheten 10–20 °C/min.

Biokol C är ett kommersiellt träkol som produceras för grilländamål. Det finns ingen information tillgänglig för produktionsförhållandena, dock hänvisas typiska förhållanden för industriell produktion av träkol här (Garcia-Nunez 2017): förkolning i retorter vid en temperatur på cirka 500 °C och en uppehållstid på 8 till 40 timmar.

Biokol D framställdes genom en tvåstegsprocess: pyrolysis vid 350–400 °C i en roterugn, följt av en värmebehandling vid 1100 °C i en retort (Robinson 2020).

Karakteriseringsmetoder

Provberedning. Varje prov framställdes enligt DIN 51701-3. Varje prov homogeniserades och en representativ del av provet (\pm 300 g) togs ut genom kvartering. Provet förtorkades i en ugn vid 40 °C i minst 12 timmar. Bulkdensiteten mättes efter förtorkning. Varje förtorkat prov delades sedan upp jämnt i åtta delprover med hjälp av Retsch PT100 roterande provdelare upprepade gånger tills mängden representativa prov nådde kravet för respektive analysmetod.

Elementar- och bränslesammansättning. Elementarsammansättning (kol, väte, kväve, och syre) mättes med hjälp av EA3000 från EuroVector srl.

Sammansättningen av oorganiska ämnen mättes enligt SS-EN-ISO 16967:2015 och 16968:2015. Halterna av flyktiga ämnen och aska mättes enligt SS-EN-ISO 18122:2015 och 18123:2015.

Densiteter. Bulkdensiteten mättes enligt analog VDLUFA-metod A 13.2.1. Ca 300 ml homogeniserat prov fylldes i en graderad cylinder (500:5,0 ml). Sedan vägdes provets, varefter provets volym mättes efter 10 gångers komprimering med hjälp av stampning. För att mäta partikeldensiteten mättes först massan och volymen av cirka 15 ml Al₂O₃ i en mätcylinder (25:0,5 ml) efter stampning. Ungefär 3-5 ml prov tillsattes sedan till Al₂O₃ varefter den slutliga massan och volymen mättes. Partikeldensiteten beräknades sedan som förhållandet mellan masskillnad och volymökning. Sann densitet mättes med hjälp av Micromeritics AccuPyc II 1340 Gas Displacement Pycnometry System (gasförskjutnings-pykometri) med helium som medium.

Reaktivitet hos biokol. Reaktionshastigheten för biokolprov med CO₂ mättes med en termogravimetrisk analysator, TGA8000, kopplad med gasblandningsanordning GMD8000 från PerkinElmer Inc. Biokol maldes till en partikelstorlek under 75 µm och ca. 0,5-1,2 mg spreds på botten av en aluminiumoxiddegel, för att minimera påverkan av massdiffusion. Gasflödet var 50 ml min⁻¹ i standardtillstånd. Temperaturen höjdes från 30 °C till reaktionstemperaturer med en hastighet av 10 °C min⁻¹ i en N₂-atmosfär. Efter att provet stabiliserats vid reaktionstemperaturen ändrades gassammansättningen till 20% CO₂ i N₂ (volymbasis). Provet hölls tills massan stabiliserats. Experimentdata normaliserades för att beräkna omvandlingen (X) i följande ekvation,

$$X = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_{ash}}, \quad (3)$$

där m_0 är den initiala massan, m_{ash} den slutliga massan, och m provmassan under förgasningen. Slutligen utvärderades biokolets reaktivitet genom det initiala värdet av omvandlingshastigheten, som definieras av tidsderivatan hos omvandlingen.

För att undersöka effekten av partikelstorlek på reaktionshastigheten valdes sju storleksfraktioner ut, enligt tabell 1. Termerna d_{min} , d_{max} och d_{mid} hänvisar till minimi-, maximi- och medelstora partikelstorlekar.

Tabell 1. Partikelstorlek hos olika prov

Prov	d_{min} (µm)	d_{max} (µm)	d_{mid} (µm)
d_{p1}	–	75	–
d_{p2}	180	212	196
d_{p3}	315	400	358
d_{p4}	500	630	565
d_{p5}	800	1000	900
d_{p6}	2000	3150	2575
d_{p7}	4000	6300	5150

Termodynamiska jämviktsberäkningar

Termodynamiska jämviktsberäkningar (TECs) användes för att förutsäga beteendet hos oorganiska element i reduktionsblandningen (andel bildad mängd smälta, kemisk sammansättning och viskositet hos bildad smälta, bildade fasta faser, avgång av alkali från saggern). TECs utfördes med Equilib-modulen i FactSage 8. De nyttjade databaserna som också återfinns i FactSage 8 var en kombination av FactPS (för gas och stökiometriska fasta ämnen) och FToxid (fasta lösningar och oxidsmältor) tillsammans med FTsalt-databaser (saltsmältor). Viskositeten för smältan beräknades genom nyttjande av viskositetsmodulen i FactSage 8. Det bör påpekas att denna modul inte tar hänsyn till effekten av P på viskositeten.

Följande biomassaprover/-analyser valdes ut för att representera ett brett utbud av biokol med olika sammansättningar hos den bildade biokolaskan; 1) barrstamved rik på Ca och K, 2) barrbark rik på Ca, K och Si, 3) grenar och toppar från barrved, dvs. skogsrester rik på Ca, Si och K, och 4) vetehalm rik på Si och K. För att uppskatta sammansättningen av askbildande element hos biokol producerade från typiska elementarsammansättningar hos de ovanstående ingående biomassaråvarorna (Strömberg 2012) nyttjades följande antaganden med utgångspunkt från tidigare arbeten (Suopajärvi 2018; Hedayati 2021a; Hedayati 2021b): 1) utbytet av biokol efter pyrolys är 35 vikts-%, 2) 90 vikts-% av Cl och S avgår från den råa biomassan under pyrolysen, dvs. återfinns ej i det producerade biokolet, 3) 5 vikts-% av K, Na och P avgår från den råa biomassan, och 4) Ca, Si, Mg, Al och Fe avgår ej från biomassaråvaran under pyrolysen.

TEC utfördes vid 1000 och 1200 °C. Följande fem reduktionsblandningar undersöktes: (1) fossilbaserad referensreduktionsblandning, (2) fossilkolet i referensreduktionsblandning bytes ut helt mot biokol från stamved, (3) fossilkolet och fossilkoksen i referensreduktionsblandning bytes ut helt mot biokol från bark, (4) fossilkolet och fossilkoksen i referensreduktionsblandning bytes ut helt mot biokol från skogsrester (toppar och grenar) och (5) fossilkolet och fossilkoksen i referensreduktionsblandning bytes ut helt mot biokol från vetehalm. Alla reduktionsblandningar blandades med kalk i samma mängder som i den fossilbaserade referensreduktionsblandningen och samma mängder återcirkulerat material ingick i beräkningarna som den som HAB idag nyttjar i sin referensreduktionsblandning.

Uppkolningsförsök hos HAB

För att utvärdera biokolets egenskaper som uppkolningsmedel i stålsmältor gjordes en jämförelse med de konventionella material som normalt används i ljusbågsugnen. Fyra olika kolmaterial användes i jämförelsen: syntetisk grafit, antracitkol, och två typer av biokol; BC1 och BC2.

Tabell 2 visar de olika kolmaterialens kemiska och fysiska egenskaper. Prover av grafit och antracitkol togs från standardråmaterialen till ljusbågsugnen vid Halmstadsverket. Biokol BC1 var baserat på skogsflis och BC2 på kommersiella träpellets från sågspån. Biokolmaterialen var framställda med den metod för Biokol D som beskrivits tidigare i rapporten (tvåstegspyrolys/retort).

Tabell 2 Kemiska och fysiska egenskaper

	Grafit	Antracit	BC 1	BC 2
Volatila/flykt (vikts-%)	-	2,7	14	8,8
C-fix (vikts-%)	99,95	92,4	72,3	89,8
Aska (vikt-%)	0,05	4,9	13,7	1,4
Bulkdensitet (g/cm ³)	0,22	0,42	0,27	0,41
Sann densitet, medel (g/cm ³)	2,26	1,81	1,77	1,57

Till försöken briketterades kolmaterialen med rent järnpulver för att ge tillräckligt tyngd så kolet sjunker ned i stålbadet i stället för att flytta ovanpå.

Uppkolningsförsöken utfördes i en induktionsugn där vi började med att smälta en 10 kg blandning av rena järnpulverflagor och granulerat gjutjärn till en temperatur av 1600 °C och 0,2% [C]. Under tiden det tog att förbereda smältan evakuerades ugnskammaren från luft och fylldes därefter med kvävgas för att undvika oxidering av kolbriketterna innan de tillsattes järnsmältan. Efter att stålbadet nått en stabil temperatur chargerades fem briketter, 100 g styck, till badet varefter provtagning av smältan var 30:e sekund inleddes. Efter 150 sekunder chargerades ytterligare fem briketter, följt av samma provtagningsrutin. För varje kolmaterial gjordes två uppkolningsförsök.

Försök i enkapselugnen hos HAB

Enkapselugnen används som en testmetod för att utvärdera nya råmaterial till järnsvampsprocessen. I princip är skalan 1/100 av en vagn som körs i den fullskaliga processen.

En enkelkapsel, sagger på engelska, packas på samma sätt som i fullskaleprocessen, som består av staplar av kapslar, med järnmalm och reduktionsmedel i koncentriska ringar längs kapselns höjd. Den packade kapseln ställs i en kall ugn som sedan värms till processtemperatur, varefter reduktion av järnmalm till järnsvamp fortskrider över flera dygn. I standardutförande mäts temperaturen utanför kapseln och gassammansättningen mäts med en gassond placerad i kapselns topp.

En första testkampanj utfördes i syfte att kartlägga prestandan hos olika kvaliteter av skogsbaserade biokol som delersättning av fossila reduktionsmedel, för att sedan kunna använda som input till utformningen av en kravspecifikation för biokolbaserade reduktionsmedel. Följande biokolstyper testades och jämfördes med fossila standardreduktionsmedel: Biokol C och tre typer av Biokol D baserade på träpellets, grot och bark (som tidigare beskrivits). Baserat på tidigare erfarenheter var en förutsättning i denna testkampanj att biokolmaterialen behöver förkompakteras till en styckedensitet $\geq 0,7$ g/cm³ för att kunna testa rimliga substitutionsnivåer, dvs. ersättning av $\geq 20\%$, av de fossila reduktionsmedlen i processen.

AP2: Förslag på optimala produktionssystem och förhållanden för biokolsframställning

I detta AP föreslogs lämpliga biokolsproduktionssystem och produktionsförhållanden med hänsyn till råvaruresurser, tillgänglighet, utbyte och produkt-egenskaper (baserat på resultat från AP1).

AP2 utfördes av LTU i nära kommunikation med HAB.

Biomassatillgångar

En kartläggning och sammanställning gjordes över tillgänglighet och förväntad prisbild för olika typer av relevanta biomassasortiment. Kartläggningen byggde på en genomgång av aktuell litteratur, i kombination med egna beräkningar. Dataunderlaget utgjordes av vetenskaplig och grå litteratur, branschstatistik, och diskussioner med experter i relevanta branscher. Fokus var på råvarupotential i Sverige med ett kort- till medellångt tidsperspektiv (2024-2030). Beaktade råvarukandidater var rester från skogen och skogsindustrin, slammer från massaindustrin, samt lignin från massaindustrin.

För priser och kostnader gjordes inflationsjustering till 2022 års KPI-nivå.

Pyrolyprocesser för biomassa

En databas byggdes om hur processförhållanden under pyrolysen påverkar utbyte, egenskaper och asksammansättning vid biokolsframställning. Databasen byggdes huvudsakligen utifrån tidigare publicerad öppet tillgänglig litteratur.

Dessutom genomfördes pyrolysexperiment i laboratorieskala som komplement till litteraturstudien, för att belysa hur biomassans sammansättning påverkar utbyte, egenskaper och asksammansättning vid produktion av biokol. Biokol framställdes av tallbark, skogsrester och majscolvar med en partikelstorlek på 4–30 mm. Den utvalda råa biomassan innehöll olika relativa sammansättningar av askbildande element för att representera de olika typerna av lågkvalitetsbiomassa. Surlakning användes för att ytterligare undersöka inverkan av oorganiska element i dessa biomassor. En mängd förkolningsegenskaper analyserades; grundämnessammansättning, specifik ytarea, kolstruktur och förgasningsreaktivitet.

AP3. Strategi för anpassning av järnsvampsprocessen för användning av biokol

I detta AP utvecklades en strategi för att anpassa och optimera järnsvampsprocessen för användning av biokol, genom numerisk simulering. AP3 utfördes av både LTU (numerisk simulering) och HAB (experiment i pilotanläggning).

Utveckling av numerisk modell

En detaljerad numerisk modell av järnsvampsprocessen utvecklades med hjälp av multiskalmodellering (multi-scale modelling), vilket är nödvändigt då modellen behöver innefatta både fysik på såväl reaktors- som partikelskala, och kemiska reaktioner i både reduktionsmedel och järnmalm. För att möjliggöra simulering inom rimlig tid beräknades transportparameter i modellen i en egen modell om partikelpackning (discrete element modell) i förväg.

Reaktormodell. För att möjliggöra simulering med rimlig tidsåtgång utfördes reaktorsimuleringen med antagandet om kontinuum istället för att beräkna rörelser och reaktioner hos individuella partiklar. Modellen beräknar gasflöde, mass- och värmetransport, reaktioner (Boudouardreaktion, järnmalmsreduktion, och kalcinering) och förändring av porstruktur efter reaktioner. Övergripande styrande ekvationer presenteras här.

Tryck och flöde av gas inom reaktorn beräknades med hjälp av kontinuitetsekvation och Darcys lag som:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \rho_g) + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}) = Q_m, \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu}(\nabla p_{bed} - \rho_g \mathbf{g}), \quad (5)$$

där ϵ är porositet, ρ_g är gasdensitet, \mathbf{u} är gashastighet, Q_m är massutbyte mellan gas- och fastfaser, κ är permeabilitet, μ är viskositet, p_{bed} är tryck. Temperaturen beräknades med hjälp av värmetransportekvation som:

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g C_{p,g} \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) = Q, \quad (6)$$

där C_p är specifik värmekapacitet, T är temperatur, k_{eff} är effektiv konduktivitet, och Q är värmeproduktion från kemiska reaktioner. Gassammansättningen beräknades utifrån massatransportekvation som:

$$\rho_g \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho_g (\mathbf{u} \cdot \nabla) Y_i = \nabla \cdot \left(\rho_g D_i \nabla Y_i + \rho_g D_i Y_i \frac{\nabla M_n}{M_n} \right) = R_i, \quad (7)$$

där Y_i är massfraktion av gas i , D_i är diffusivitet av gas i , M_n är molmassa och R_i är produktionshastighet av gas i från kemiska reaktioner. Densiteten av olika fasta material (t.ex. biokol, kalk, magnetit, järn), $\rho_{s,i}$, beräknades med hjälp av en enkel bevarandeekvation som:

$$\frac{\partial \rho_{s,i}}{\partial t} = R_i. \quad (8)$$

Flera parametrar i ovanstående ekvationer är beror av både fördelning av partikelstorlek och av flera andra parametrar. De viktigaste parametrar vars värden inte är fastställda är (partikel)densitet, porositet, reaktionskinetik, permeabilitet, specifik värmekapacitet och konduktivitet, samt hur värme och reaktioner ändrar strukturen hos en packad bädd (t.ex. krympning, sintring). Värden för de flesta parametrar togs från litteraturen, men vissa kritiska parametrar mättes experimentellt för att säkerställa modellens tillförlitlighet, eller så valdes de efter känslighetsanalyser. En del av resultaten från AP1 angående effekter av partikelstorlek och densitet på reaktivitet tillämpades i reaktionsmodellerna för biokol.

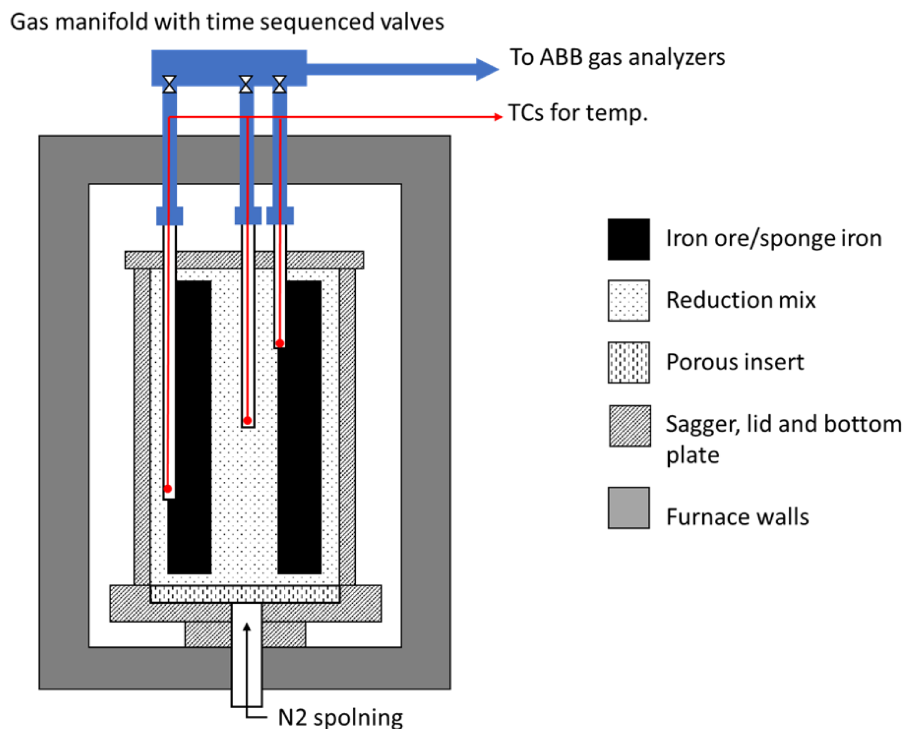
Diskreta elementmetoden (DEM). Reaktormodellen använder många parametrar som påverkas av fördelningen av partikelstorlek samt hur tätt partiklar packar sig. De flesta modeller som finns tillgängliga i litteraturen har utvecklats för identiska sfärformade partiklar och det är osäkert om modellerna fungerar även för oregelbundna partiklar med bred fördelning av partikelstorlek. Modellens tillförlitlighet kan utökas betydligt om värdena mäts i experiment eller partikel-

simulering (diskreta elementmetoden, DEM). DEM beräknar krafter som verkar på individuella partiklar för att uppskatta rörelsen hos de individuella partiklarna. Då kan DEM användas för att förutse porositet, slingrighet (tortositet, förhållandet mellan passage för gas och en rak linje från punkt A till B), samt även för att beräkna transportparametrar som t.ex. konduktivitet.

Vidare försök i enkapselugnen hos HAB

En andra testkampanj utfördes i syfte att ta fram empiriska data från tre fall med olika halter av Biokol C i reduktionsblandningen; Referens (0% biokol), Blandning 1 (20% biokol), Blandning 2 (55% biokol). Avbrutna försök, vid valda tidpunkter i reduktionsförloppet, användes för att analysera förändringar i reduktionsblandning och järnsvamp. Dessa resultat användes sedan för validering av den numeriska multiskalmodell som beskrivs ovan.

För dessa försök modifierades enkapselugnen enligt Figur 2 så att temperatur och gassammansättning i de olika delarna av kapseln kunde särskiljas och kvävgas-spöling användas vid de avbrutna försöken.



Figur 2 Modifieringar av enkapselugnen

Resultat

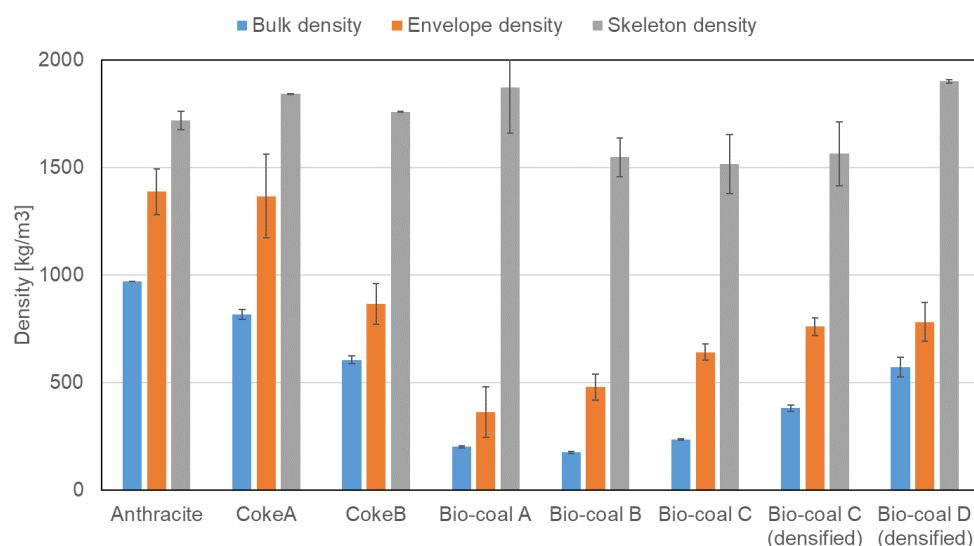
Kravspecifikation för biokol

Densitet

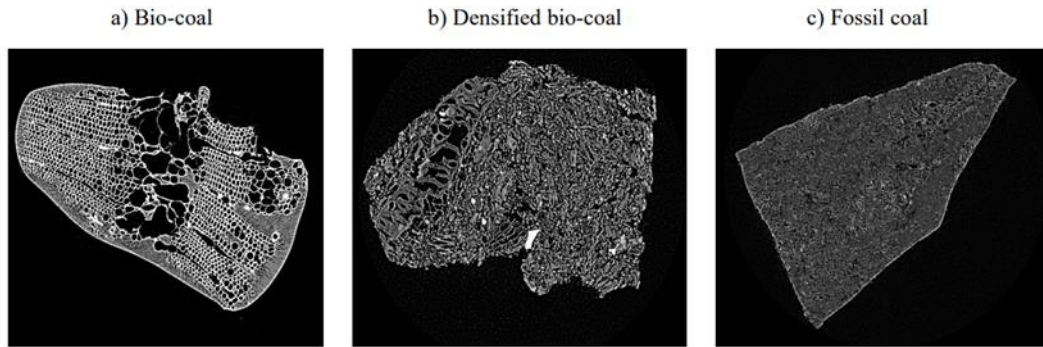
Densitet är en av de viktigaste egenskaperna då den direkt bestämmer mängden kol som kan packas i en sagger. Densiteten kan definieras på tre olika sätt; bulkdensitet (massa delat med volymen av packad bädd), partikeldensitet (envelope density, massa delat med volymen av partikelvolym), och sann densitet (skeleton density, massa delat med volym fast material exklusive inre porer).

Figur 3 jämför densiteter av olika biokol med fossilbaserade material. Biokolens bulkdensiteter var betydligt lägre än densiteterna hos stenkol och koks. Förtätning av biokol medförde en signifikant förbättring, men värdena förblev ändå lägre än för kolproverna. Skillnaden kan förklaras av partikeldensitet, då biokol har mycket högre inre porositet i de enskilda partiklarna, även efter förtätningen. Figur 4 visar att inre porer som har sitt ursprung i träets cellstruktur kvarstår utan att förstöras även efter förtätning. För bättre resultat av förtätningen, dvs. att förtätningen medför högre densitet, kan rå biomassa pelletiseras innan pyrolys, eftersom lignin då genomgår glasomvandling vilket gör att cellväggen mjuknar. Samma resultat kan inte förväntas om förtätning utförs efter pyrolys.

Resultaten visar relativt sett mindre skillnad vad gäller sann densitet, även om det verkar finnas en svag korrelation med pyrolystemperaturen. Detta är rimligt eftersom hög pyrolystemperatur resulterar i ordnad inriktad kolstruktur (så kallad glödgning) (Kreitzberg 2019).



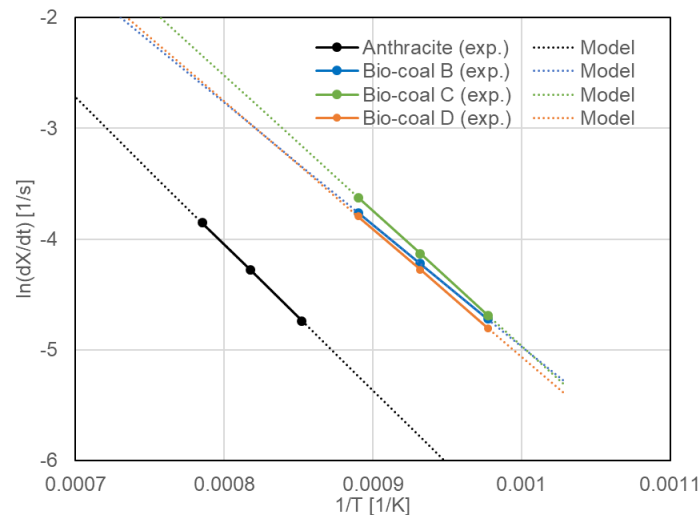
Figur 3. Densitet hos stenkol och biokolprover



Figur 4. Röntgenmikrotomografibild av biokol, förtätad biokol, och stenkol

Reaktivitet

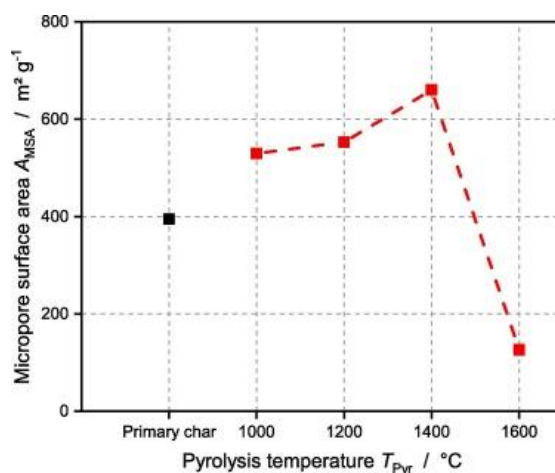
Boudouardreaktionen (ekvation 2), är en kritisk reaktion för järnmalmsreduktionen eftersom den ger den reducerande gasen, CO. Därför är reaktiviteten hos biokol en av dess viktigaste egenskaper. Figur 5 visar en jämförelse av reaktiviteten hos olika kolmaterial i form av en Arrheniusplot. Resultaten visar att reaktiviteten hos olika biokol knappast skiljer sig från varandra. Biokol som har pyrolyserats vid lägre temperatur och kortare uppehållstid hade relativt sett högre reaktivitet. Skillnaden är dock betydligt mindre än om jämförelse görs med stenkol. Det skulle därför vara en stor utmaning att kontrollera reaktionshastigheten för Boudouardreaktionen när fossilt material ersätts med biokol. Tillsammans med densiteten hos biokol belyser detta resultat utmaningarna med att ersätta fossilt kol med biokol.



Figur 5. Jämförelse av reaktivitet hos biokol

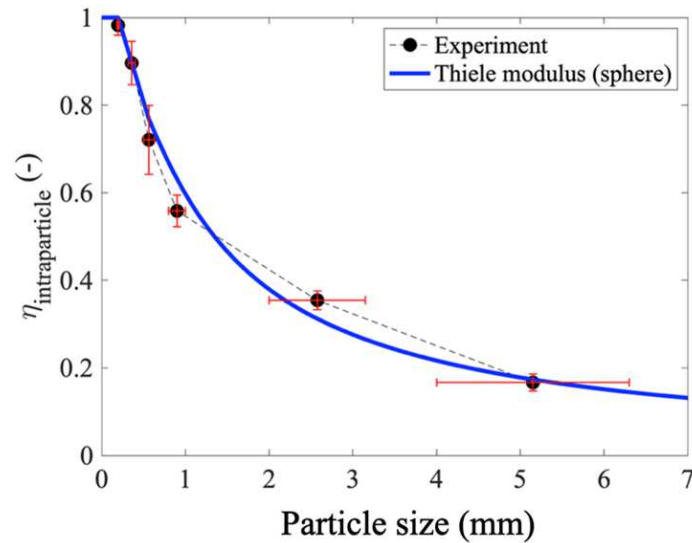
Ett sätt att minska reaktiviteten hos biokol är inaktivering av biokol vid höga temperaturer och avsättning av katalytiskt aktiva oorganiska ämnen (t.ex. K, Ca). Reaktiviteten påverkas starkt av ytareorna som bildas av små porer i intervallet 0,2-20 nm, och storlekarna på grafen-liknande aromatiska skikt som bildar biokol. Vi observerade att den specifika ytan hos biokol plötsligt minskade avsevärt vid temperaturer runt 1200-1600 °C, som visas i figur 6. En del av biokolet i reduktionsmedel bör därför produceras vid sådana temperaturnivåer för att producera

biokol som har liknande molekylstruktur som fossilt kol, och därför låg reaktivitet. Huvudsakligen K och Ca men även några andra oorganiska ämnen har katalytisk aktivitet genom redoxcykel (t.ex. $C + CaCO_3 \rightarrow CaO + 2CO$; $CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$). För att undvika denna katalytiska aktivitet rekommenderas att avlägsna oorganiska ämnen på något sätt. En möjlig metod är urlakning av oorganiska ämnen. För att maximera möjligheten att laka ut K och Ca på ett kostnadseffektivt sätt bör dessa grundämnen finnas i biokol i vattenlöslig form, dvs. K_2CO_3 och CaO . Om biokol produceras vid pyrolystemperaturer över ca. $800\text{ }^\circ\text{C}$ för tillräckligt lång tid, kan K_2CO_3 och CaO vara de dominerande formerna. Ett annat sätt att minska katalytiska aktivitet av Ca och K är att modifiera askkemi genom tillsatser, t.ex. Si och Al mineraler, som bildar inaktiva föreningar med K och Ca.



Figur 6 Effekt av pyrolystemperatur på specifika yta.

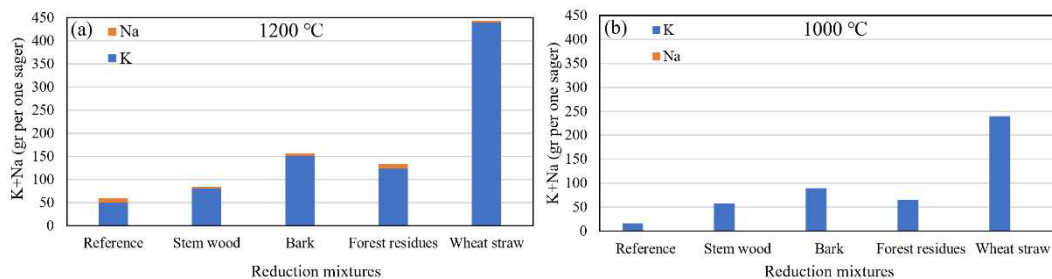
Ett annat sätt att ta itu med frågorna relaterade till den höga reaktiviteten hos biokol är användningen av täta och stora partiklar. Den totala reaktiviteten för reaktioner mellan gas och partikel är känd för att minska när partikelstorleken ökar. Som visas i figur 7 observerades samma tendens för Boudouardreaktionen hos biokol. Minskningen i reaktivitet beror främst på det starka motståndet mot massdiffusion. Fysiska former av biokol kan manipuleras effektivt för att maximera detta motstånd genom att öka densiteten och partikelstorleken. Här rekommenderas starkt utveckling av effektiva förtätningsmetoder för att även uppnå kravspecifikation med avseende på reaktiviteten hos biokol.



Figur 7. Effekten av partikelstorlek på reaktionshastighet (effectiveness factor)

Avgång av alkali i gasfas från saggern

Figur 8 visar den beräknade avgången av alkali till gasfasen från saggern från respektive reduktionsblandning vid 1200 °C och 1000 °C. Jämfört med fossilt kol innehåller biokol vanligtvis mycket lägre halter av Na jämfört med K. I figur 8 är därför den huvudsakliga avgången av alkali relaterad till huvudsakligen elementärt K och i viss utsträckning andra K-föreningar i gasfas. Oavsett typ av reduktionsmedel förutspås en högre alkaliavgång till gasfasen från saggern vid en högre temperatur. Den högsta K-avgången till gasfasen förutspås för den vetehalmsbaserade reduktionsblandningen då koncentrationen av K är mycket hög i detta biokol. Reduktionsblandningar innehållande biokol från bark och skogsrester visar på högre K-avgång än den hos den fossilbaserade reduktionsreferensblandningen där Si- och Al-halten var hög och där K fångats upp/inkorporerats i olika fasta silikatfaser eller i en silikatsmäta.



Figur 8. Avgång av K- och Na-föreningar till gasfasen från saggern vid (a) 1200 °C, (b) 1000 °C.

Kondenserade faser

Resultat från TECs visade att den bildade askan från både de fossilbaserade reduktionsblandningarna och de vetehalmsbaserade reduktionsblandningarna dominerades av silikatfaser på grund av den höga Si-halten i det ingående reduktionsmedlet. Oxider, främst CaO på grund av relativt höga Ca-koncentrationer, dominerade askan från de stamveds-, bark- och skogsrestsbaserade reduktionsblandningarna. Figur 9 visar beräknad mängd asksmälta och Figur 10 visar viskositeten hos bildad smälta för de studerade reduktionsblandningarna. Den lägsta mängden smälta vid 1000 °C respektive den högsta mängden smälta vid 1200 °C förutspås enligt beräkningarna erhållas från den fossilbaserade reduktionsblandningen. Vid 1200 °C är viskositeten hos smältan från den fossilbaserade reduktionsblandningen ungefär fem gånger högre än hos de biokolbaserade reduktionsblandningarna. Detta beror på dels det högre innehållet av Si och Al, dels på det lägre innehållet av K i den fossilbaserade reduktionsblandningen. Reduktionsblandningar baserade på skogs- och jordbruksrester (dvs. bark, skogsrester och vetehalm) visade på högre smältamängder vid 1000 °C men lägre vid 1200 °C jämfört med den fossilbaserade reduktionsblandningen. De studerade biokolsblandningarna visar på bildning av en betydande mängd lågviskös smälta inom ett brett temperaturområde. Detta kan medföra risker relaterade till att asksmältan rinner ner genom saggern och därmed inte ger upphov till samma rigida struktur som den hos den mer högviskösa smälta som erhålls från det fossilbaserade reduktionsmedlet.

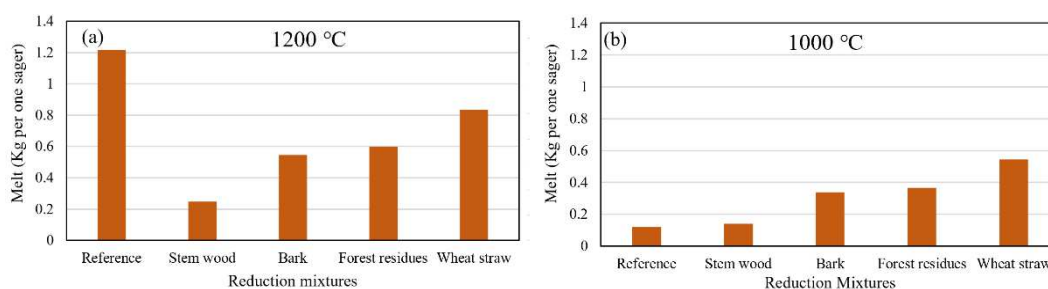


Figure 9 Beräknad mängd asksmälta vid (a) 1200 °C, (b) 1000 °C.

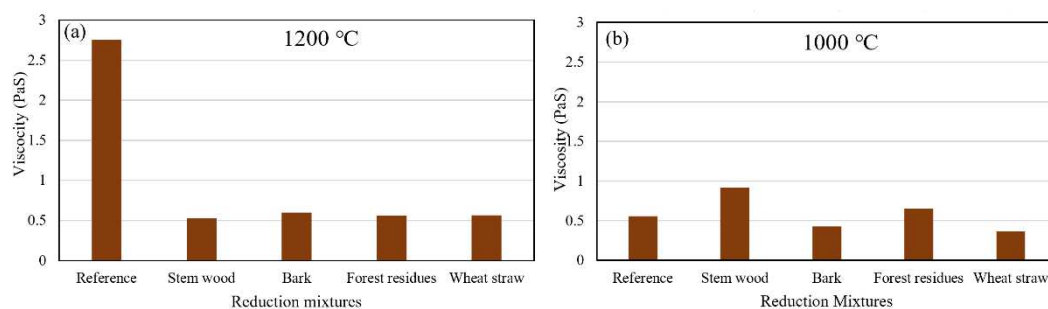
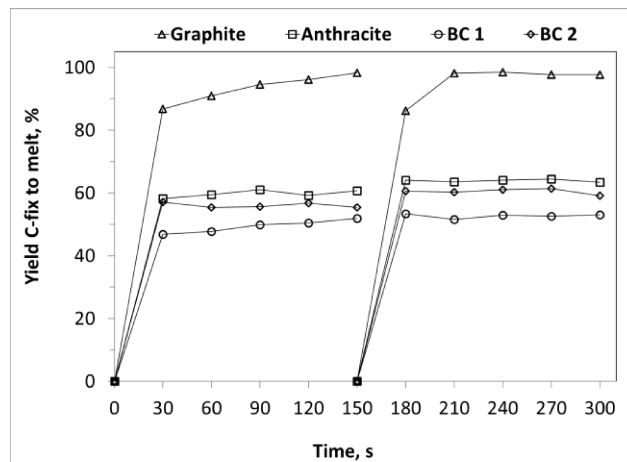


Figure 10. Beräknad viskositet hos bildad asksmälta vid (a) 1200 °C, (b) 1000 °C.

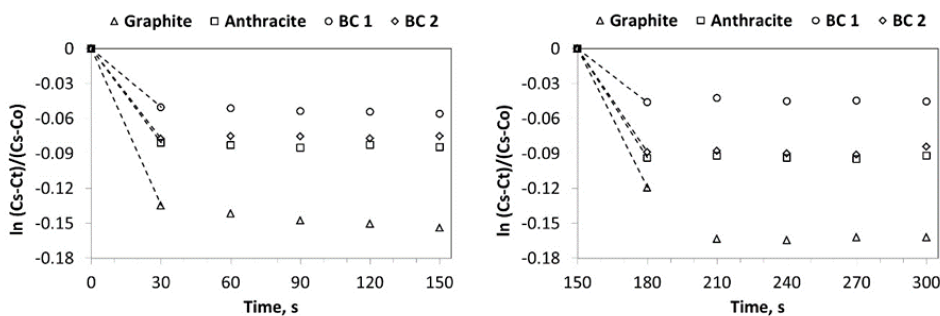
Försök hos HAB för definition av kravspecifikationen för biokol

Uppkolning i stålsmäلتa

Uppkolningshastighet och utbyte av kol till stålsmäلتan är nyckelfaktorer i en utvärdering av uppkolningsmedel. Figur 11 visar utbytet för C-fix i de olika kolmaterialen till stålsmäلتan vid försöken. I Figur 12 visas en integrerad form av en första ordningens kinetisk ekvation för uppkolning, $dC/dt = K(C_s - C_t)$, mot försökstiden. Där C_s är den mättade koncentrationen vid 1600 °C, C_t är den aktuella koncentrationen vid tiden t , och C_o är koncentrationen vid $t=0$. Lutningen under tiden 0-30 och 150-180 sekunder ger den generella konstanten för uppkolningshastigheten, $K \text{ s}^{-1}$, som sedan kan relateras till den specifika uppkolningshastigheten, $k' \text{ m/s}$, genom att veta briketternas gränssnittsytta och smältans volym.



Figur 11 Utbyte av C-fix i kolmaterialen till stålsmäلتan



Figur 12 Integral av första ordningen av uppkolning vs försökstid

Resultaten för k' i fallande ordning var grafit (1.90), antracit (1.31), BC2 (1.25), och BC1 (0.72). Från Tabell 2 är det tydligt att ju högre C-fix kolet har, desto snabbare uppkolning i stålsmäلتan i dessa försök. Även låga halter av volatila

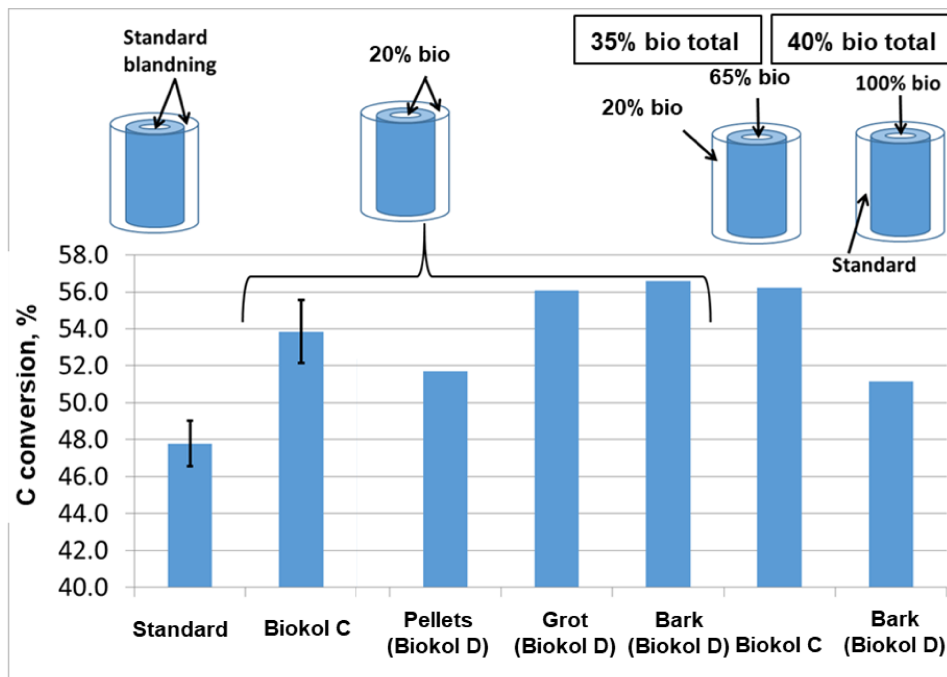
ämnen kan delvis relateras till snabbare uppkolning och högre utbyte, vilket styrks av liknande resultat från litteraturen. Däremot har tidigare studier i ämnet också konstaterat att kolstrukturen i biokol kan ha egentliga svagheter jämfört med fossilt kol även vid liknande C-fix, såsom låg densitet och lågt kristallinitet, vilket leder till långsam uppkolning och dåligt utbyte. Vi observerade inte dessa svagheter när det gäller biokol BC2, trots både lägre C-fix och lägre densitet jämfört med antracit, då k' är väldigt likt de emellan. Emellertid var uppkolningshastigheten för BC1 betydligt lägre, vilket inte kan förklaras enbart med ett lägre C-fix och högre volatilhåll. Detta kan möjligen förklaras via beräkningar av viskositet för asksmältor i antracit, BC1 och BC2, där viskositeten i BC1 var betydligt högre. En högviskös asksmälta i uppkolningsmedel kan lägga sig som ett skikt mellan kolytan och stålsmältan vilket skulle försvåra upplösning av kolet i stålsmältan.

Huvudslutsatsen från uppkolningsförsöken är att ett biokol med optimerade egenskaper helt kan ersätta fossila uppkolningsmedel i stålmetallurgin.

Försök i enkapselugnen

Resultaten från den första testkampanjen i enkapselugnen visade att vid 20% ersättning av fossila reduktionsmedel uppnås godkänd reduktionsgrad i järnsvampen för samtliga biokol som testades. Försök vid högre ersättning, upp till 40%, genom att använda olika andelar biokol i den yttre respektive inre reduktionsblandningen, visade sig också uppnå godkänd reduktionsgrad.

Däremot påverkade särskilt skillnader i partikeldensitet och halter av K_2O+Na_2O mellan biokolmaterialen kolförbrukningen i försöken, se Figur 13. Partikeldensiteten för biokolen var, i fallande ordning: Pellets ($0,8 \text{ g/cm}^3$), Grot ($0,77 \text{ g/cm}^3$), Bark ($0,76 \text{ g/cm}^3$), Biokol C ($0,74 \text{ g/cm}^3$), medan halter av K_2O+Na_2O var, i fallande ordning: Grot (0,86%), Bark (0,75%), Biokol C (0,35%), Pellets (0,21%). Låg kolförbrukning gynnades av en högre partikeldensitet, t.ex. i Pellets, men missgynnades samtidigt av högre halter K+Na som katalyserar Boudourd reaktonen, t.ex. i Grot och Bark. Dessa resultat pekar på betydelsen för utveckling av metoder för att öka densiteten och avlägsna alkalimetaller från biokol för att uppnå en effektiv biokol användning i metallurgiska processer.



Figur 13 Kolförbrukning i enkapselugnsförsök

Gällande befarade effekter på järnsvampskvaliteten av högre halter av K, Na och P i vissa biokol, jämförde vi med de fossila standardmaterialen (kol och koks). En viss tendens fanns för upptag av K och Na i järnsvamp i försöket med 40% biokol från bark, vilket måste utredas vidare. Däremot fanns inga bevis för P-upptag, vilket är känt för att vara direkt skadligt för tillämpningar av järnsvampspulver.

Utifrån dessa empiriska resultat för användning i smält- respektive järnsvampsprocessen rekommenderas en grov kravspecifikation för biokol enligt tabell 3.

Tabell 3. Övergripande kravspecifikation för biokol för smält- respektive järnsvampsprocessen

Kolanalys	Biokol för uppkolning (smältprocessen)	Biokol för reduktion (järnsvampsprocessen)
C-fix	> 85%	> 75%
Volatila/flykt	< 10%	< 15%
Aska	< 5%*	< 10%

* Askhalter upp till max 10% kan tillåts om askan bildar lågviskös smälta

Tillgänglighet och förväntad prisbild för lågkvalitetsbiomassa

Rester från skogen och skogsindustrin

Två sortiment har varit av särskilt intresse för detta projekt: grot (grenar och toppar från avverkning) och biprodukter från sågverk och massabruk (främst bark).

Grot. Under senare år har grotens status som hållbar energiråvara varit under kraftig diskussion, då det under en period såg ut som att dess användning skulle begränsas kraftigt i och med EUs reviderade förnybartdirektiv (RED III). Efter avslutade förhandlingar om RED III blev resultatet att skogsbaserad primär bioråvara som grot, gallringsved och sekunda ved får fortsätta användas för energiändamål, under förutsättning att risker för biologisk mångfald, miljö och klimat minimeras. Däremot införs en begränsning när det gäller möjligheten att använda industriduglig rundved för energiändamål, då biomassa ska användas enligt kaskadprincipen.

Den ekologiska potentialen för grotuttag i Sverige är ca 21 TWh/år (Skogforsk, 2023a). Då förutsätts att grot tas ut i alla slutavverkningar på produktiv skogsmark, med undantag för olika skyddade arealer, och med begränsningar enligt Skogsstyrelsens rekommendationer och baserat på erfarenheter av vad som praktiskt går att ta ut. Av detta tas runt 7,4 TWh/år ut idag (jämfört med ca 12 TWh år 2012), främst för användning i fjärrvärmesektorn, vilket visar på en ökningspotential i storleksordningen 13-14 TWh/år (Skogforsk, 2023a). Hur mycket grot som tas ut begränsas främst av efterfrågan från marknaden och vilket pris som marknaden är villig att betala. På kort sikt begränsas kapacitetsökning dock även av förekomst av välfungerande försörjningskedjor. Den stora ökningspotentialen finns främst i norra Sverige, där det saknas maskin- och logistikkapacitet idag, efter flera år av nedläggningar till följd av minskande efterfrågan.

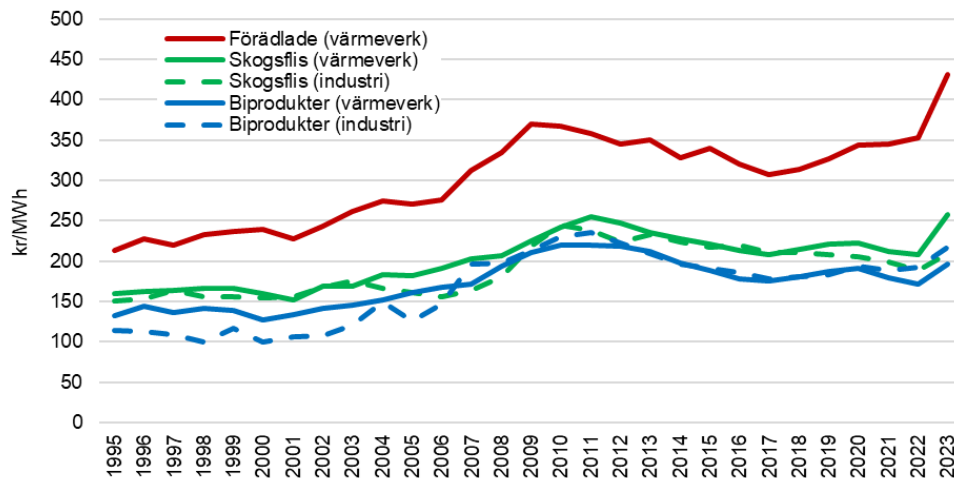
Biprodukter från skogsindustrin. Mer än hälften av inkommande träråvara till sågverken hamnar i biprodukter (totalt ca 45 TWh/år), varav råflis (45%), sågspån+torrflis (41%), och bark (14%). Råflisen används som fiberråvara i massaindustrin. En tredjedel av all bark och sågspån+torrflis används för att täcka sågverkens interna energibehov, en tredjedel går till pelletsindustrin (främst sågspån+torrflis) och en knapp sjättedel till energisektorn. Runt 10% går förlorat till följd av lagringsförluster. Från massaindustrin faller drygt 8 TWh bark per år, varav det mesta används internt. Ca 1,5 TWh/år går till energisektorn. (Svensson m.fl., 2023)

Potential för ökad tillgång av biprodukter från skogsindustrin ligger främst i de relativt betydande möjligheter till energieffektivisering som finns i sågverksindustrin. Effektiviseringspotentialen bedöms vara upp till 20% (1,5-2% per år), vilket motsvarar ca 1,5 TWh biprodukter per år till år 2035 (Börjesson, 2021; Andersson, 2020). Även om detta är sammantaget för hela landet, dvs. från ca 140 sågverk utspridda från norr till söder, så genereras ca en fjärdedel vid de 25 största sågarna (Skogforsk, 2023b)

Pris. Figur 4 visar prisutvecklingen på olika bioenergisortiment. Priserna har i många år varit relativt konstanta, runt 200 kr/MWh för skogsflis (vilket främst är grot) respektive 180 kr/MWh för skogsindustriella biprodukter, med en svagt nedåtgående trend om inflationsjusterade priser beaktas. Bidragande faktorer till sjunkande priser och minskande grotuttag (särskilt i norr) har varit en långvarig högkonjunktur i skogsindustrin vilket tillgängliggjort mycket biprodukter på marknaden, utbyggnad av avfallsförbränning, och import av RT-flis.

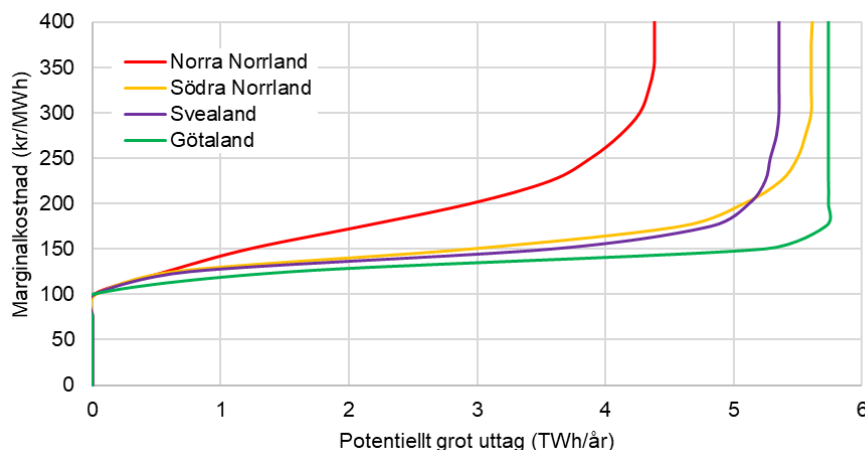
De senaste årens geopolitiska oroligheter i kombination med utfasning av fossila bränslen inom EU har påverkat energimarknaderna kraftigt och även drivit upp

priserna på biobränslen. Grot/skogsflis handlas främst lokalt eller regionalt vilket ger viss buffring mot globala omvärldsfaktorer, men priset drivs upp då efterfrågan på pellets och biprodukter ökar.



Figur 14. Prisutveckling på bioenergisortiment, KPI-justerat till 2022 års prisnivå (Energimyndigheten/SCB, 2023). För 2023 är priset sammanvägt för Q1-Q3.

Från producentperspektiv innebär högre betalningsvilja från marknaden ökande incitament att öka uttaget av särskilt grot från slutavverkning, vari den största ökningspotential ligger. Som nämns ovan krävs dock återuppbyggnad av både teknik- och affärssystem i norra Sverige för att mobilisera betydande mängder grot till marknaden. Med det följer ökande kostnader för grotuttag, då kostnadsbilden i norr är betydligt högre än i söder (Figur), främst pga. längre avstånd över hela värdekedjan.



Figur 15. Marginalkostnadskurva för grot från slutavverkningar, per landsdel.

Potentialen avser prognosen för perioden 2020–2024, och är inte inflationsjusterat. I marginalkostnaden ingår skotning, sönderdelning och vidaretransport till slutkund, men inte markägarersättning, administrationskostnad eller marginal för risk och vinst. (efter Lacruz m.fl., 2023, återpublicerad med tillåtelse)

Vad gäller prisbilden för industrins biprodukter fanns det för ett par år sedan ett överskott av främst bark som kunde handlas till mycket låga priser, då alternativet var något som närmast kan liknas vid destruktionsförbränning. Med ökande marknadspriser ökar dock efterfrågan även på dessa sortiment och priserna (sett till värmevärde) följer i princip dem för annat skogsbränsle (Figur) (personlig kommunikation med branschrepresentanter).

Slam och lignin från massaindustrin

Slam. Från massa- och pappersindustrin genereras två olika slamströmmar som kan vara av intresse för produktion av hydrokol via HTC (hydrothermal carbonisation); fiberslam (primärslam) respektive bioslam (sekundärslam). Lämpligheten att producera hydrokol är betydligt större för bioslammet än för fiberslammet. Det totala kolinnehållet i bioslammet har skattats utifrån publikt tillgängligt data för massa- och pappersindustrins produktion, utsläpp av organiskt material (COD), och antaganden om slamutbyte och reningsprocessernas effektivitet (Chiew m.fl., 2023 (manuskript); Skogsindustriernas miljödatas, 2023), till totalt ca 70 kt/år från samtliga svenska massa- och pappersbruk (ca 150 kt bioslam). Även kolinnehållet i fiberslammet har skattats utifrån produktionsvolymerna och slamutbyten för olika typer av bruk, enligt Hassan m.fl. (2019), till totalt ca 100 kt/år (ca 340 kt fiberslam).

Utbyte i HTC-processen är beroende av både substratets egenskaper och processförhållanden men om ett kolutbyte på 60% antas, med 60% totalt kol i det producerade hydrokolet (baserat på uppgifter från HTC-tillverkarna C-Green och Ingelia) skulle drygt 170 kt hydrokol per år kunna tillverkas, med ett totalt kolinnehåll av ca 100 kt/år. Noteras skall att detta är mycket grova siffror, med stor osäkerhet kring mängd volatila respektive C-fix.

Kostnadsmässigt uppskattas produktionskostnaden för hydrokol från massa- och pappersbruksslam till i storleksordningen 3200-5200 kr/t. Vilken typ av bruk processen integreras med har stor inverkan, där en lägre kostnad kan erhållas vid integration med avsalubruk med nettoenergiöverskott, jämfört med integration med integrerat massa- och pappersbruk (kraftliner) där brukets energibehov är betydligt större (Chiew m.fl., 2023 (manuskript); Abdullahi, 2022). Stor osäkerhet föreligger i kostnader både för investering och för drift och underhåll, vilket får stor inverkan på slutlig produktionskostnad.

Lignin. Två huvudsakliga strömmar av lignin kan vara av intresse som råvara för biokol till järn- och stålindustrin: hydrolyslignin och svartlutslignin. Här beaktas endast svartlutslignin.

Lignin kan avskiljas från svartluten via olika typer av separationsprocesser, som utfällning följt av filtrering, t.ex. LignoBoost-processen. Uppfattningarna går isär kring hur stor del av det totala svartlutsflödet som kan avskiljas utan att kemikalieåtervinningen i sodapannan äventyras. I en bruk-för-bruk-skattning av Thuresson och Johansson (2016) beräknades det totalt möjliga ligninuttaget till ca 6,7 TWh/år (baserat på 2014 års massaproduktion), vilket skulle kräva en ökad energitillförsel till bruken på 5,9 TWh/år för att kompensera för energibortfallet i sodapannorna. En mer optimistisk skattning bygger på antagandet att 30% av totala

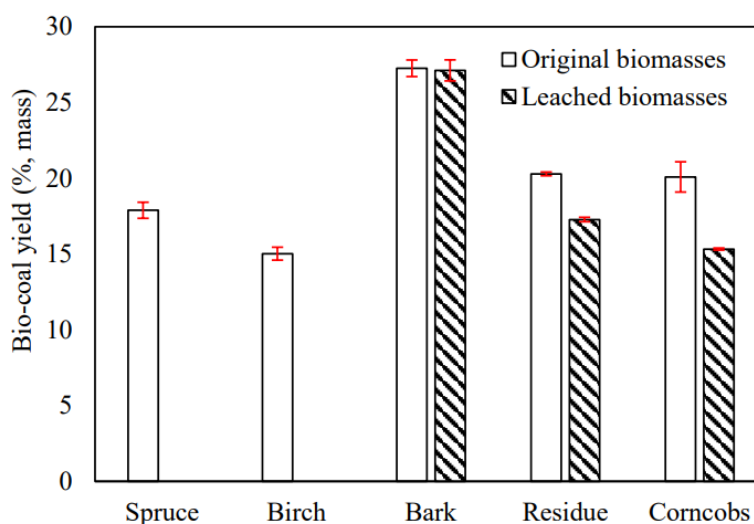
svartlutsmängden kan extraheras i alla bruk, vilket ger en totalpotential av 14 TWh med dagens massaproduktion. Med ett ansatt lignininnehåll i svartluten på 35% (Ek m.fl, 2009), ligninutbyte i LignoBoost-processen på 50% (skattat utifrån Nilsson, 2023) och 66% kolinnehåll i utfällda ligninet motsvarar detta totalt 350-750 kt lignin/år, med en total kolpotential på 230-490 kt/år.

Kostnadsmissigt uppskattas produktionskostnaden för LignoBoost-lignin till i storleksordningen 2300-4300 kr/t (personlig kommunikation Sennai Mesfun, RISE, december 2023). Produktionskostnaden domineras av kompensationsbehovet för bortfallen ång- och elproduktion, och är kraftigt beroende av el- och biobränslepriser. Även kemikaliekostnaden har stor inverkan, med viss osäkerhet i kemikalieåtgången.

Biokolproduktion från lågkvalitetsbiomassa

Biokolutbyte

Biokolutbytet från olika biomassar jämfördes, som visas i figur 16. Biokolutbytet varierar mycket med biomassaråvarans sammansättning, särskilt vad gäller innehåll av lignin respektive oorganiska ämnen. Stamved (gran och björk) gav ett lägre biokolutbyte än askrika biomassar (tallbark, grot och majscolvar) på grund av skillnaderna i lignin- och askhalt. Ligninhalten orsakade skillnader i utbyte mellan gran och björk. Samtidigt hade bark det högsta biokolutbytet, eftersom barken hade den högsta lignin- och askhalten. Vidare minskade biokolutbytet i syraurlakad biomassa. Det höga oorganiska innehållet i dessa biomassar med hög aska påverkar dock biokolets reaktivitet avsevärt, vilket diskuteras senare.



Figur 16 Biokolutbytet från olika biomassar vid 700 °C.

Restbiomassa från skogsbruk och skogsindustrin kan kategoriseras som grot, bark, och stamved (flis och sågspån). De viktigaste trädslagen i Sverige är tall (mest i norr), gran (söder) och björk. Eftersom grot kan betraktas som en blandning av stamved och bark, förutom asksammansättningen, visar tabell 4 den typiska makromolekylära sammansättningen av stamved och bark för gran, tall och björk.

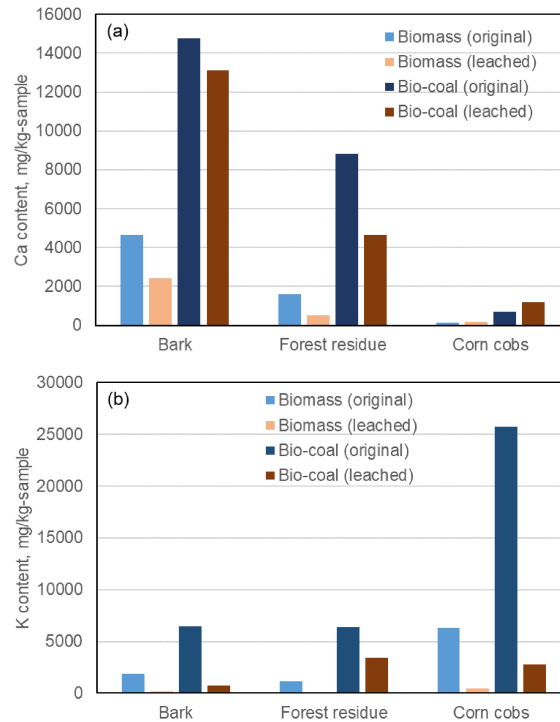
Som framgår är ligninhalten i bark mycket högre än i stamved. Vid jämförelse mellan stamved uppvisar barrvedarter högre ligninhalten än björk, vilket stämmer överens med det högre biokolutbytet (Figur 16). Detta indikerar att den övergripande resurseffektiviteten skulle kunna bli bättre om bark används som råvara för att producera biokol, i stället för att fortsätta nuvarande praxis, dvs. förbränning av bark i sågverk och energianläggningar, och användning av grot som råvara. Det bör dock noteras att denna hypotes behöver utvärderas med en systemstudie innan vi rekommenderar det.

Tabell 4 Typiska sammansättningar av skogsbiomassa i Sverige

Vikt-%	Stamved			Bark		
	Gran	Tall	Björk	Gran	Tall	Björk
Cellulosa	42	42	39	34	33	17
Hemicellulosa	27	25	38			
Lignin	29	28	20	38	40	54
Övrigt	2	5	3	28	27	29

Askinnehåll.

Alkalimetaller, särskilt K, är benägna att frigöras till gasfasen under DRI-processen, som tidigare visat i figur 17. Dessutom är, som nämnts, Ca och K kända för att ha katalytiska egenskaper för Boudouardreaktionen om de föreligger som karbonater, vilket inte är självklart när annan biomassa än skogsbaserade bränslen tex. Slam och strå används som rå biomassa. Figur 17 visar innehållet av dessa askbildande ämnen i både biomassa- och biokolprover. Surlakning visade en signifikant effekt att kunna minska K-halten i biomassa, medan effekterna på Ca-halten blev relativt måttliga. Samtidigt ökade både Ca- och K-innehållet avsevärt vid pyrolys, vilket syns av de höga värdena i biokolet. Resultaten överensstämde med det tidigare arbetet från Hedayati et al. (2021a) som visade att mer än 85% av K och P fanns kvar i producerat biokol. Eftersom biokolutbytet från pyrolys var mellan 15-30%, ökade den relativa koncentrationen signifikant. Det finns därför ett behov av att laka ut askbildande element från askrik biomassa om pyrolys-temperaturen är relativt låg (500-900 °C). En alternativ strategi är att försöka binda K och Ca till olika Ca-Al-silikater och K-Al silikater genom att tex tillföra Kaolin eller andra lermineraler som ett additiv till biokol eller biomassan innan pyrolys. Förutom att reducera de katalytiska effekterna hos K och Ca skulle detta också kunna bidra till mer asksmälta av en högre viskositet i likhet med den som bildas vid nyttjande av de nuvarande fossila reduktionsmedlerna.



Figur 17. Innehåll av askbildande ämnen i biomassa och biokol producerat vid 700 °C i N₂; (a) Ca (b) K.

Reaktivitet hos biokol. Som tidigare visat i figur 5 är reaktiviteten för biokol mycket högre än för kol medan skillnaden mellan biokol (från stamved och bark) visade sig vara relativt liten. Reaktiviteten kan dock variera avsevärt mellan biokol från askrika biomassor på grund av alkalimetallernas katalytiska aktivitet (Umeki 2012). Förändringen i askhalten vid syraurlakning påverkar oundvikligen även biokolets reaktivitet. Figur 18 visar reaktiviteten hos biokol från tre olika biomassor med och utan syraurlakning. Reaktiviteten minskade signifikant vid urlakning för alla tre typerna av biomassa. En lös korrelation med K-innehåll i figur 17(b) kan skönjas, även om andra askbildande element också kan påverka resultaten. Denna korrelation tycks dock endast gälla för biokol från biomassa utan urlakning, och korrelationen minskade efter urlakningen.

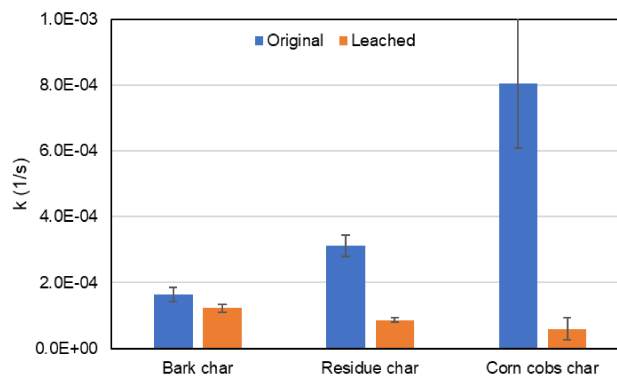
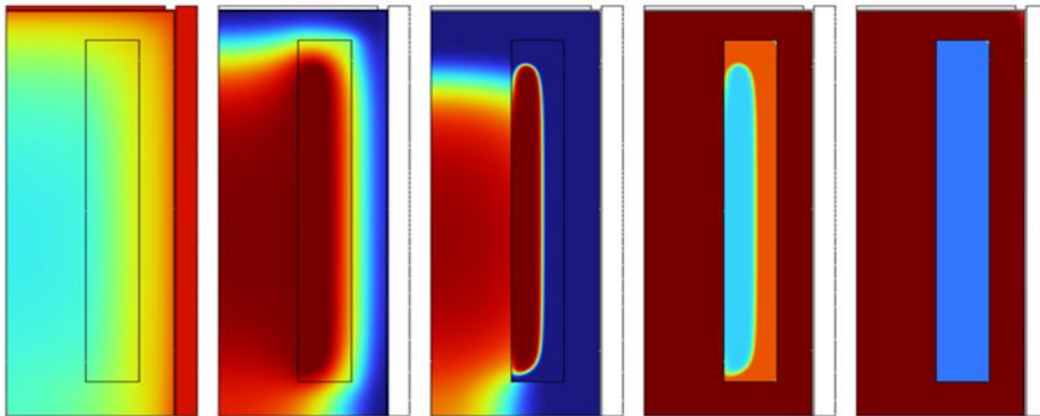


Figure 18. Reaktiviteten hos biokol producerat vid 700 °C i N₂. Mätt vid 800 °C i 20% CO₂ och 80% N₂.

Detaljerad numerisk modell av järnsvampsprocessen

Reaktormodell

Reaktorsimuleringen genomfördes för olika scenarier, t.ex. 20%, 50%, och 100% substitutionsnivå för biokol. Vid en given tidpunkt kan resultaten visas i olika former (2D/3D bild, integrerat värde av kolkonsumtionen eller reduktionsgrad, värden vid alla intressanta platser som till exempel temperatur på samma positioner som termoelementen).



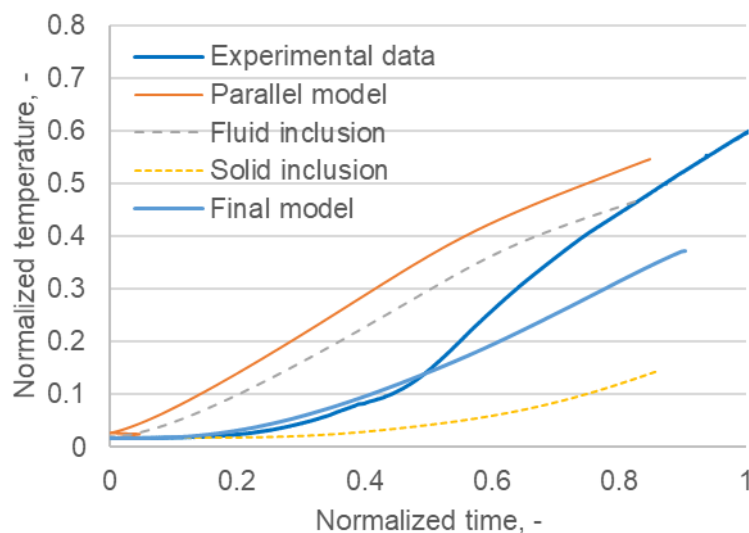
Figur 19. Exempel på resultat från numerisk simulering av enkapselugnsreaktor.

Från vänster till höger: 1) temperatur, 2) massfraktion av CO₂, 3) densitet av magnetit (inre rektangeln) och kalk (yttre rektangeln), 4) densitet av wüstite (inre) och antracit (yttre), och 5) densitet av järn (inre) och koks (yttre).

Figur 19 visar ett exempel på resultat från den numeriska simuleringen av enkapselugnsreaktor vid HAB. Från vänster till höger visas 2D-fördelningsdiagrammen för temperatur, massfraktion av CO₂, densitet av magnetit och kalk, densitet av wüstite och antracit, och densitet av järn och koks. Figuren illustrerar att temperaturen inuti ugnen inte är jämn under uppvärmningsperioden. Kalcineringen av kalk är nästan avslutad genom hela ugnen, medan reduktionen av malm är i första steget (magnetit till wüstite). Antracit och koks har knappt reagerat och ingen järnsvamp dykt upp än.

Som beskrivits i kapitlet "Genomförande" har flera parametrar behövt uppdateras för att säkerställa modellens tillförlitlighet. Vi undersökte också känsligheten för några viktiga parametrar. Resultat från experimentella försök har använts för att kontrollera flera detaljer av den numeriska modellen. Figur 20 jämför t.ex. experimentella resultat med simuleringsresultat från olika konduktivitetsmodeller. Den packade bädden i reaktorer i Höganäsprocessen består av fasta partiklar och gas mellan partiklarna. Hastigheten för värmeutbredning inom den packade bädden beror på både materialegenskaper och på hur partiklarna ligger i förhållande till varandra i bädden. Det finns flera olika modeller för att beskriva konduktiviteten genom att ta hänsyn till bäddens struktur (t.ex. partiklar ligger i linje, och bildar parallella linjer). Den numeriska simuleringen visar att konduktiviteten bör modelleras med två olika förutsättningar för reduktionsmix- respektive

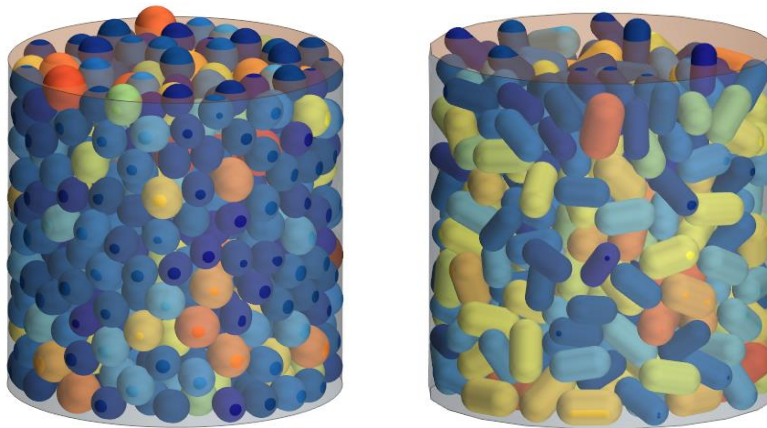
järnmalmszonerna. I reduktionsmixzonen föreligger majoriteten av det fasta materialet som kontinuum, med gas som bubblor inom det fasta materialet i reduktionsmixen. I järnmalmszonen föreligger det fasta materialet som individuella partiklar vilket gav större motstånd mot värmeöverföring. Både valideringen av simuleringsresultaten och tomografibilderna indikerar att dessa antaganden är korrekta.



Figur 20. Validering av uppvärmningsprofil i enkapselugn. Experimentella resultat jämfördes med simuleringsresultat från olika konduktivitetsmodeller.

Parameteruppdatering

För att ytterligare öka modellens tillförlitlighet genomfördes DEM för att undersöka effekten av partikelstorleksfördelning på porositeten. Figur 21 visar ett exempel på simuleringsresultat för olika partikelformer. Resultaten kan sedan bearbetas ytterligare för att beräkna porositet och slingrighet. De här slutliga resultaten är en viktig del av reaktormodellen när den ska användas som designverktyg i framtiden. Partikelstorleken är en betydande justerbar parameter för att biokolet ska kunna bibehålla reduktionsatmosfären, utan att förbrukas av kemiska reaktioner. Vi identifierade ökad spridning av partikelstorlekar som en lösning för att minska reaktiviteten. Dock finns i dagsläget ingen tillgänglig modell i litteraturen som är tillämplig för en tillräckligt bred partikelstorleksfördelning.



Figur 21. Exempel på DEM-simuleringsresultat för olika partikelformer.

Figur 22 illustrerar en kraftig effekt av spridningen på partikelstorlek. Partiklar som har relativt enhetlig storlek (4–5,5 mm) uppvisar mycket högre porositet än det teoretiska värdet utifrån packning av sfärer med identisk storlek (röd- och blåstreckade linjer). Detta beror på att partiklarna inte är helt sfäriska. Tvärtom visar packning av partiklar med bredare storleksintervall lägre porositetsvärde än vad som visats teoretisk möjligt med enhetliga partiklar. Denna information kan användas för att utöka bulkdensiteten av biokol samt för att uppdatera parametrarna i reaktorsmodellen.

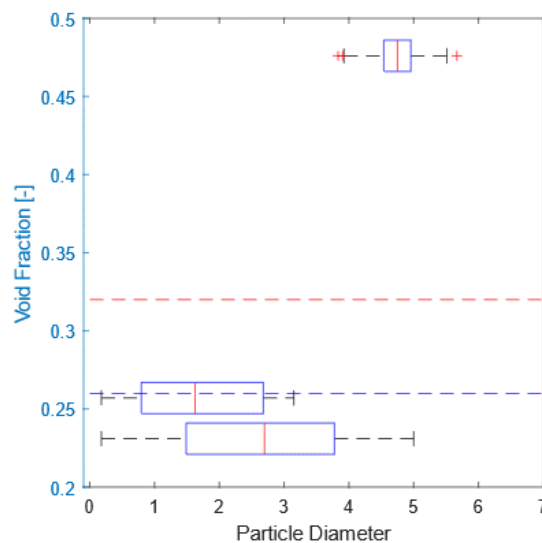
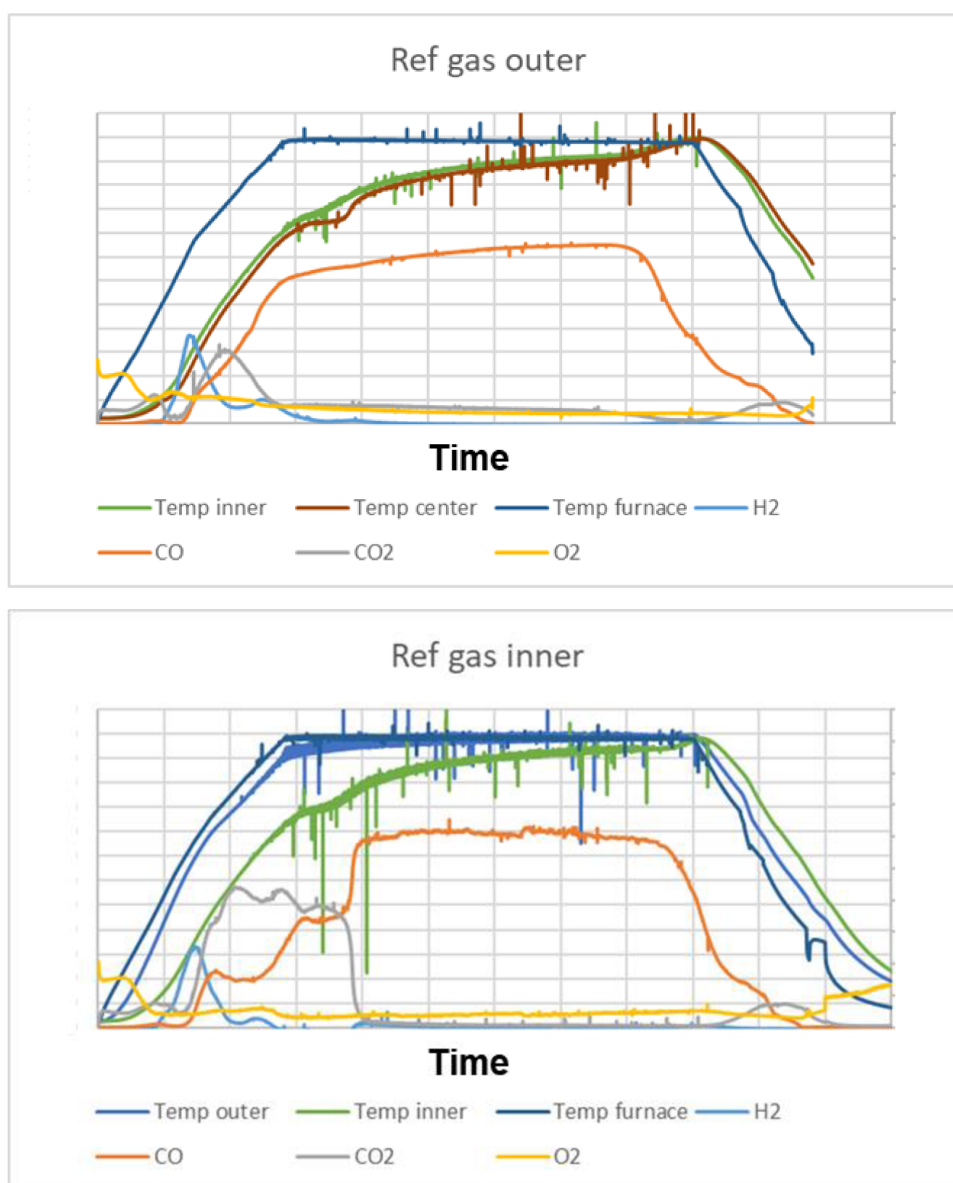


Figure 22. Effekt av fördelning av partikelstorlek på porositet, jämfört med det teoretiska värdet utifrån packning av sfärer med identisk storlek (streckade röda och blå linjerna)

Valideringsförsök i enkapselugnen

Figur 23 visar ett exempel på dataloggning från ett försök i den modifierade enkapselugnen där utveckling av både temperatur och gassammansättning skiljer sig mellan den yttre och den inre del av kapseln.



Figur 23 Loggning av temperatur och gassammansättning från yttre och inre delen av kapseln under ett enkapsselförsök

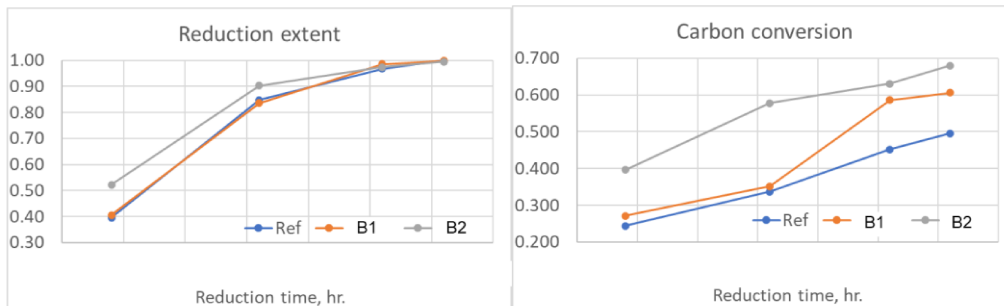
Inledande iakttagelser från de tre fallen; Ref (0% biokol), B1 (20% biokol), B2 (55% biokol) är:

1. För alla fallen är temperaturutvecklingen i den inre delen fördröjd jämfört med i den yttre delen.
2. Med en ökande andel biokol i reduktionsblandningen blir fördröjningen av temperaturutvecklingen ännu större i både yttre och inre reduktionsblandningen.

3. Processen når en högre reduktionspotential i gassammansättningen vid en tidigare tidpunkt med ökande andel biokol i reduktionsblandningen.

En fördröjning i temperatur mellan den inre och yttre delen av kapseln är vedertagen erfarenhet från järnsvampsprocessen. Det är just värmeöverföringen från den yttre till inre delen av kapseln som delvis bestämmer processtiden i fullskala. I försöken med biokol är det uppenbart att värmeöverföringen försämras jämfört med Ref-fallet. Detta beror på flera faktorer, bl.a.; biokols sämre fysiska värmeledning pga. den högre porositeten, kylningseffekter pga. biokols högre reaktivitet via den endoterma Boudouardreaktionen, och högre andel volatila.

Trots en sämre värmeöverföring med ökande andel biokol kan den högre reaktiviteten delvis kompensera för denna temperaturfördröjning genom en snabbare reduktion av järnmalm vid lägre temperatur, se Figur 24. Resultaten från B2 med 55% biokol visar att 90% reduktionsgrad uppnås vid ungefär 15% kortare tid. Nackdelen med den kvaliteten av biokol som har åstadkommit hittills är att reaktiviteten ändå är för hög, vilket ses i skillnaden för kolförbrukning mellan Ref och B2, där förbrukningen är närmare 20% högre för B2 vid 90% reduktionsgrad.



Figur 24 Reduktionsgrad och kolförbrukning vid valda tider under enkapsel-försöken för de tre fallen

Biokolets högre reaktivitet leder till en annan mer praktisk svårighet i processen. I slutdelen av järnsvampsprocessen är det kritisk att den förbrukade reduktionsblandningen upprätthåller en struktur som inte sjunker ihop och blottlägger den nyreducerade järnsvampen för återoxidering. I försöken med blandning B2 var det tydligt att askkolumnen hade sjunkit till hälften av den ursprungliga höjden. Detta beteende tros bero på skillnaderna i askmängd och asksammansättning mellan fossilt kol och koks, och biokol. Detta belyser behovet att studera askbildningen i Ref-fallet närmare för att komma på idéer hur biokolsaska ska modifierats med tillsatser för att bilda den struktur som behövs i järnsvampsprocessen.

Diskussion

Detta projekt har lyft fram de viktigaste tekniska och ekonomiska utmaningarna för att ersätta fossilbaserade reduktions- och uppkolningsmedel med biokol, som sammanfattas nedan.

Kravspecifikation för biokol

Nuvarande kravspecifikation vad gäller C-fix, aska, och volatila ämnen (tabell 3) är inte särskilt svår att uppnå, under förutsättning att biokolet produceras vid tillräckligt hög temperatur och tillräckligt lång upphållningstid. Dock visade sig några andra egenskaper hos biokol vara kritiska och utmanande för att uppnå jämförbar kvalitet gentemot nuvarande fossila kolmaterial.

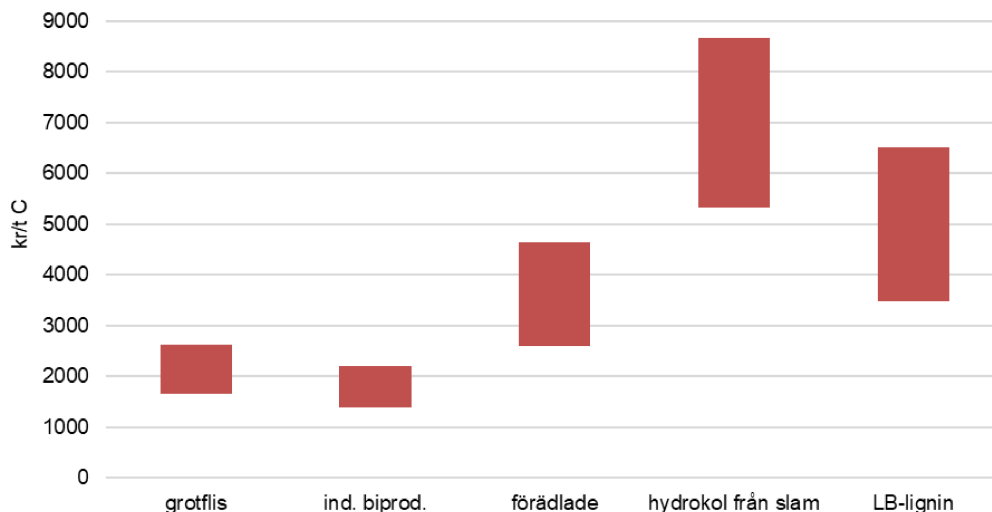
Biokol och fossilt kol har liknande sann densitet, men partikel- och bulkdensiteten för biokol är betydligt lägre än för fossilt kol, även efter förtätning av biokolet. Utveckling av effektiv förtätning är därför ett centralt utvecklingsområde under kommande år för att kunna uppnå 100% ersättning med biokol. Den främsta anledningen till begränsningen i förtättningsprocessen är att mikrostrukturen hos biokol är relativt hård och spröd. Det är dock möjligt att förbättra förtätningen och uppnå högre densitet om rå biomassa pelletiseras innan pyrolysen. Ett annat alternativ är att använda bindematerial med hög flytbarhet, som lignin, för att fylla gapet mellan kornen. Detta är möjligt eftersom lignin genomgår glasomvandling och fungerar som vätska vid ca. 90 °C.

Reaktivitet hos biokol är relativt lika varandra oavsett i vilken reaktortyp eller under vilka reaktionsförhållanden som biokolet producerats. Reaktiviteten är dock betydligt högre än för stenkol, och skillnaden måste dämpas genom i första hand ökat massdiffusionsmotstånd (större partiklar och högre densitet). För att ersätta reduktionsmedel med 100% biokol är det dock nödvändigt att även minska reaktiviteten på molekylär nivå. En metod är att termiskt behandla biokol vid extremt höga temperaturer (>1000 °C) så att nanostrukturen hos biokolet blir mer intakt och mindre porös. Det är dock fortfarande oklart hur hårda reaktionsförhållanden biokol behöver behandlas vid och ytterligare undersökningar behövs. Andra sätt att minska reaktiviteten är avsättning eller fasmodifiering av katalytiskt aktiva oorganiska ämnen (t.ex. K, Ca) genom urlakning eller genom tillsatser av Si och Al mineraler som bildar inaktiva föreningar med K och Ca. Under vissa reaktionsförhållanden förväntas K och Ca i biokol finnas som vattenlösliga former och då blir det kostnadseffektivt att laka med vatten. Experimentell validering behövs för att bekräfta att dessa metoder fungerar i praktiken.

Sammansättningen av askbildande ämnen gör att aska från skogsbaserade biokol och vetehalm har mycket lägre smältbildning med lägre viskositet än kolbaserade reduktionsblandningar. Högre avgång av alkali från saggern förutspåddes också. För att få aska och askbildande element att uppföra sig på samma sätt som de fossilbaserade reduktionsmedierna krävs aktiv kontroll av asksammansättningen, såsom tillsats och urlakning som diskuterats ovan.

Tillgänglighet och förväntad prisbild för lågkvalitetsbiomassa

Figur visar en sammanställning av uppskattade kostnader för olika biokolkällor, uttryckt som kr/ton totalt biogent kol. Från tillgängligt data tycks det som att lignin kan uppvisa något lägre kostnader än slambaserat hydrokol (dock med stora osäkerheter för båda kostnadsuppskattningarna), och med betydligt större total potential för lignin än för slam. Dock skulle ligninseparation kräva betydligt större ingrepp i massabrukens processer än HTC av slamströmmar.



Figur 25. Sammanställning av uppskattade kostnader per ton totalt kol för olika bioråvaror för produktion av biokol, utifrån dagens läge. För grotflis, industriella biprodukter och förädlade trädbränslen bygger kostnadsuppskattningarna på leveranspriser för de olika sortimenten (2010-2023). För hydrokol och LignoBoost-lignin bygger uppskattningarna på uppskattade produktionskostnader.

För att mobilisera inhemska bioresurser för produktion av biokol för järn- och stålindustrins kommer krävas uppbyggnad av både teknik-, logistik- och affärssystem. För grot kommer krävas återuppbyggnad av nedlagd kapacitet, vilket kräver långsiktighet och tillit i hela värdekedjan. Nödvändiga investeringar kräver engagemang från såväl skogsägare och entreprenörer, som kunder.

En nyckel till framgång torde vara att skapa nya aktörskonstellationer mellan användarna av biokolet, råvaruägarna (skog eller industri) och teknikutvecklare och -leverantörer, liknande som skett inom biodrivmedelsproduktion.

Biokolproduktion från lågkvalitetsbiomassa

Biokolutbytet varierar mycket med innehållet av lignin och oorganiska ämnen i biomassen (ju högre desto bättre). Så kallade ”lågkvalitetsbiomassa” inklusive bark och grot innehåller ofta högre lignin- och askhalt, vilket är positivt för att uppnå högt biokolutbyte. Dessa egenskaper (hög halt av vissa oorganiska element, t.ex. Ca och K) verkar dock negativt i de metallurgiska processerna. Vid normala pyrolystemperaturer (<800 °C) avgår endast S och Cl i några signifikanta nivåer

från bibränsleråvaran under pyrolysen. Praktiskt taget frigjordes det inte askbildande element under pyrolys, vilket resulterade i betydligt högre askhalt. Därför rekommenderas avsättning av askbildande ämne efter pyrolyprocessen eller tillsats av additiv för att minimera effekten av de katalyserande ämnena.

Ett klokt val av råvara, ett korrekt tillvägagångssätt för askbehandling (dvs. urlakning efter pyrolys eller tillsatser innan eller efter pyrolys) och utveckling av pyrolysmetoder för att förbättra utbytet är alla viktiga både av ekonomiska skäl och resurseffektivitetsskäl. Till exempel skulle en effektivitetsökning av biokolutbytet från 20% till 21% innebära en ökning av intäkterna för biokolproducenten med 2,5 Mkr/år om produktionskapaciteten är 10 000 ton/år och biokolpriset 5 000 kr/ton. Samtidigt skulle totalbehovet av biomassa för biokolproduktion i Sverige kunna minska från 1 250 kton till 1 190 kton (antagande: 250 kton/år efterfrågan på biokol, inklusive efterfrågan från HYBRIT och H2GS).

Detaljerad numerisk modell av järnsvampsprocessen

En numerisk modell av järnsvampsprocessen utvecklades och validerades mot experimentdata från enkapselugnen. Ett lovande (även om det är kvalitativt) resultat är att förlusten av kolmaterial i ugnen, och därmed förlusten av förmåga att bibehålla reducerande atmosfär under reduktionsprocessen, förutspåddes korrekt med en viss substitutionsnivå av biokol. Det finns dock fortfarande ett utrymme för förbättringar i modellen, som kan implementeras i framtiden.

Modellen kommer vara ett användbart verktyg när HAB går vidare till högre substitutionsnivåer av reduktionsmedel med biokol. Ett sätt att använda detta verktyg är att utvärdera nya biokolmaterial och uppskatta vilken substitutionsnivå som skulle kunna vara möjlig utan att reduktionsbeteendet påverkas. Ett annat sätt är att definiera specifikationskravet för biokol (en kombination av densitet, partikelstorlek och reaktivitet) beroende på den avsedda nivån av ersättning med biokol. Slutligen är det också möjligt att utvärdera mindre förändringar i designen av saggår, om det inte är möjligt att uppnå specifikationskravet för biokol vid högre substitutionsnivå.

Publikationslista

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*,
2. Aekjuthon Phounglamcheik, Markus Bäckbo, Ryan Robinson, Kentaro Umeki, The significance of intraparticle and interparticle diffusion during CO₂ 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 Bäckbo, 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 Robinsson, 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 ABs klimatavtryck, invited presentation for the Metallurgmöte at Jernkontoret, March 2023
13. Ryan Robinson, Biokol - nödvändigt för stålindustrins omställning, invited presentation at Svebios Årsmöte & Värmöteskonferens, online participation, April 2023

Egen nyheter artiklar

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 stältillverkning" - Luleå University of Technology, 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/>

Referenser, källor

Abdullahi A (2022), Techno-economic evaluation of hydrochar via hydrothermal carbonisation of organic residues. Examensarbete Luleå tekniska universitet.

Andersson E (2020), Enabling industrial energy benchmarking: Process-level energy end-use, key performance indicators, and efficiency potential. Linköping Studies in Science and Technology Dissertation No. 2076, Linköpings tekniska universitet.

Brewer CE et al. (2014), New approaches to measuring biochar density and porosity, *Blomadd and Bioenergy* 66:176-185

Börjesson P, Hansson J, Berndes G. (2017), Future demand for forest-based biomass for energy purposes in Sweden. *Forest Ecology and Management* 383:17–26.

Börjesson P (2021), Potential för ökad tillförsel av inhemsk biomassa i en växande svensk bioekonomi – en uppdatering. Rapport nr. 121, Lunds universitet.

Cetin E, et al. (2004), Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars. *Fuel* 83:2139–50.

Chiew YL, Wetterlund E, m.fl. (2023), Hydrothermal carbonisation (HTC) based industrial symbiosis in Sweden - techno-economic and environmental feasibility assessment. Manuskript.

Chishty, M.A., et al. (2021), Numerical simulation of a biomass cyclone gasifier: Effects of operating conditions on gasifier performance. *Fuel Process. Technol.*, Vol. 218, Art. No. 106861.

Ek M, m.fl. (eds.) (2009), *Pulp and Paper Chemistry and Technology, Volume 2 : Pulping Chemistry and Technology*, Walter de Gruyter.

Energimyndigheten/SCB (2023), Trädbränsle-, torv- och avfallspriser (officiell statistik). <https://www.energimyndigheten.se/statistik/den-officiella-statistiken/statistikprodukter/tradbransle--och-torvpriser/> [2023-12-10]

Garcia-Nunez, J.A., et al. (2017), Historical Developments of Pyrolysis Reactors: A Review. *Energy & Fuels*, Vol. 31, pp 5751–5775.

Hassan MK, Villa A, m.fl. (2019). An assessment of side-stream generation from Finnish forest industry. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21:265–280, <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0787-5>

Hedayati, A., et al. (2021a), Fate of phosphorus and potassium in single-pellet thermal conversion of forest residues with a focus on the char composition. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 150, Art. No. 106124.

Hedayati, A., et al. (2021b), Ash transformation during single-pellet gasification of agricultural biomass with focus on potassium and phosphorus. *Fuel Process. Technol.*, Vol. 217, 106805.

Hernebrant E (2015), Optimization of Biomass Materials for use in the Sponge Iron Process, Master's thesis, Lund University, <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/7760175>

Kreitzberg, T., et al. (2019), Thermally induced changes in microstructure and reactivity of biogenic and fossil fuel particles., Appl. Energy, vol. 254, Art. No. 113607

Lacruz RF, Eriksson A, m.fl. (2023), Marginalkostnadskurvor för skoglig biomassa. Vad kan tas ut till vilken kostnad? Skogforsk arbetsrapport 1174-2023, https://www.skogforsk.se/cd_20231120102108/contentassets/b1364291500a4e069d02452168831509/ap-1174-2023-marginalkostnadskurvor-for-skoglig-biomassa.pdf [2023-12-18]

Lyttbacka J (2015), Alternativa reduktionsmedel i järnsvampsprocessen, Examensarbete, Luleå tekniska universitet, Industriell miljö- och processteknik <http://ltu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1016928&dswid=2769>.

Naturvårdsverket (2023), Industri, utsläpp av växthusgaser, <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-industrin/> [2023-12-14]

Nilsson W (2023), Lignin Extraction from Black Liquor in a Softwood Pulp Plant, A Process Simulation and Evaluation of how much Lignin can be Extracted and its Impacts on the Plant. Examensarbete Chalmers tekniska högskola.

Recari J, et al. (2014), Effect of temperature and pressure on characteristics and reactivity of biomass-derived chars. Bioresour Technol 170:204–10.

Robinson, R., et al. (2020), An Empirical Comparative Study of Renewable Biochar and Fossil Carbon as Carburizer in Steelmaking. ISIJ Int., Art. No. ISIJINT-2020-135.

Skogforsk (2023a), Skogsbränsle – stor potential för mer energi från skogen (faktablad), <https://www.skogforsk.se/kunskap/temasidor/skogsbransle/faktasammanstallning-grot/> [2023-12-10]

Skogforsk (2023b), Kan spån bidra till att Sverige blir världens första fossilfria välfärdsland? Kunskapsbanken, <https://www.skogforsk.se/kunskap/kunskapsbanken/2023/kan-sagspan-bidra-till-att-sverige-bli-varldens-forsta-fossilfria-valfardsland/> [2023-12-10]

Skogsindustrierna (2023), Skogsindustriernas miljödatabas, <https://miljodatabas.skogsindustrierna.se/simdb/web/main/main.aspx?l1=home>

Strömberg, B., Herstad Svärd, S. (2012), The Fuel Handbook, Värmeforsk, Stockholm.

Suopajärvi H et al. (2018), Use of biomass in integrated steelmaking - Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies, Applied Energy 213:384-407.

Suopajarvi, H., Umeki, K., Mousa, E., et al., (2018), Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies, *Appl. Energy*, Vol. 213, pp 384–407.

Svensson S, Furusjö E, m.fl. (2023), Kartläggning av biogena kolflöden i de skogsbaserade värdekedjorna i Sverige. RISE Rapport: P116313.

Thuresson T, Johansson A (2016). Bioenergi från skog och skogsindustri. Stockholm: Pöyry Management Consulting AB.

Umeki, K., et al. (2012), A model of biomass char gasification describing the change in catalytic activity of ash. *Chem. Eng. J.*, Vol. 207–208, pp 616–624.

Wang L, et al. (2011) Is Elevated Pressure Required To Achieve a High Fixed-Carbon Yield of Charcoal from Biomass? Part 1: Round-Robin Results for Three Different Corn cob Materials. *Energy & Fuels* 25:3251–65.

Bilagor

1. Administrativ bilaga
2. 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*,
3. Aekjuthon Phounglamcheik, Markus Bäckbo, Ryan Robinson, Kentaro Umeki, The significance of intraparticle and interparticle diffusion during CO₂ gasification of biomass char in a packed bed, *Fuel* 310 (2022) 122302
4. 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
5. 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
6. 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.
7. 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
8. 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.
9. Aekjuthon Phounglamcheik, Doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet (2021)