

Kandidatarbete SEEX16-24-01

# Järnsand som ersättning för kiselsand i fluidiserade bäddpannor för kraftvärmeproduktion

Utvärdering och mätning av fysikaliska egenskaper hos Järnsand  
som bäddmaterial för förbränning



## Författare

Adam El Sayed, Andrea Kilbo, Eric Johannesson  
Jack Gardiner, Karin Jansson, Mátyás Dobner

## Handledare

Ivana Stanićić  
Pavleta Knutsson  
Victor Purnomo

## Examinator

Magnus Rydén

## Abstract

### **Iron-rich copper smelter slag as an alternative to silica sand as fluidised bed material in heat and electricity production**

In recent research, the use of oxygen-carrying bed materials has been shown to be a viable way of improving fluidised bed combustion (FBC). One promising material is the product Järnsand (a copper smelting by-product) which has been tested in a semi-industrial setting at Chalmers University of Technology small-scale thermal plant. This study aims to evaluate some of the properties of Järnsand that dictate its use in FBC. Järnsand samples of various residence times within a fluidised bed were available for analysis. The minimum fluidisation velocity,  $U_{mf}$ , was measured for Järnsand and other conventional bed materials, as well as the magnetic susceptibility and separability of the material. Samples of Järnsand were also subjected to SEM-EDS to study the change of morphology and elemental distribution as well as any buildup of ash layers.

Magnetic separation of unused Järnsand was not possible, as it is only weakly magnetic, but Järnsand samples of all other residence times were adequately magnetised for separation. The magnetic susceptibility increased with residence time for all samples, but the measured  $U_{mf}$  remained largely unchanged. SEM-EDS images revealed an ash layer accumulated during operation, consisting primarily of calcium with traces of magnesium and iron.

The main conclusions that can be drawn are that the magnetic susceptibility of Järnsand increases with the residence time, and that magnetic separation of Järnsand becomes possible even after only two hours of residence time in a boiler. It was also noted that while particle sizes decreased, both bulk density and  $U_{mf}$  of used Järnsand remained relatively unchanged.

## Sammanfattning

Under de senaste åren har forskning visat på fördelar med att använda syrebärande material för att förbättra fluidiserad bäddförbränning. Ett material som har uppvisat potential är produkten Järnsand, en biprodukt från koppartillverkning, som har testkörts i semiindustriell skala i Chalmers kraftcentral. Detta arbetes syfte är att undersöka några av de egenskaper hos Järnsand som är centrala för dess användning i fluidiserade bäddpannor. Järnsandsprover med olika uppehållstider, alla från samma panna, fanns tillgängliga för undersökning. Magnetisk susceptibilitet, magnetisk separerbarhet, den minsta fluidiseringshastigheten ( $U_{mf}$ ) och bulkdensitet mättes för Järnsand och jämfördes mot andra mer etablerade bäddmaterial. Utöver detta har prover studerats med SEM-EDS för att undersöka partiklarnas morfologi och grundämnesfördelning.

Försök visade att magnetseparation inte är genomförbar på färsk Järnsand, som bara är svagt magnetisk. Samtliga prover som hämtats från drift i panna uppvisade däremot en magnetisering stark nog för bandseparation. Den magnetiska susceptibiliteten ökade kontinuerligt under driften, medan den uppmätta  $U_{mf}$  inte uppvisade någon större variation. SEM-undersökningar visade en kontinuerlig uppbyggnad av asklager på partiklarna. Asklaget innehöll huvudsakligen kalcium samt en mindre mängd järn och magnesium.

De huvudsakliga slutsatser som kan dras från arbetet är att den magnetiska susceptibiliteten av Järnsand ökar med uppehållstiden och att magnetisk separation är möjlig redan efter två timmar i panna. Trots en viss minskning av partikelstorlek över tid observerades ingen större förändring av bulkdensitet eller  $U_{mf}$ .

## **Förord**

Kandidatgruppen vill tacka handledare Ivana Stanićic, Victor Purnomo, Pavleta Knutsson och examiner Magnus Rydén för deras stöd genom projektet. Alla har varit mycket hjälpsamma i att vägleda oss genom projektet, och varit mycket entusiastiska i att dela med sig av sin expertis inom ämnet. Gruppen vill även tacka Jessica Bohwalli för att hon tog sin tid till att ta med gruppen på en rundvandring i Chalmers kraftcentral.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>1</b>
1.1	Avfallsförbränningens roll i Sverige . . . . .	1
1.2	Fluidisering . . . . .	1
1.3	Fluidiserade bäddpannor . . . . .	2
1.4	Syrebärrarstött förbränning . . . . .	3
1.4.1	Järnoxider som syrebärande material . . . . .	4
1.4.2	Järnsand . . . . .	5
1.5	Försöksanläggningen (Chalmers kraftcentral) . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Syfte</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Frågeställning</b>	<b>8</b>
3.1	Magnetiska egenskaper . . . . .	8
3.2	Fluidiseringsegenskaper och bulkdensitet . . . . .	8
3.3	Strukturförändringar . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Avgränsningar</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Bedömning av samhällseliga och etiska aspekter</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Metod</b>	<b>10</b>
6.1	Undersökning av magnetiska egenskaper . . . . .	10
6.1.1	Utvärdering av magnetiska egenskaper . . . . .	10
6.2	Minsta fluidiseringshastighet . . . . .	11
6.2.1	Praktiskt utförande av $U_{mf}$ -mätningar . . . . .	12
6.2.2	Beräkningar av fluidiseringshastighet . . . . .	12
6.3	Mätning av bulkdensitet . . . . .	13
6.4	SEM/EDS . . . . .	14
<b>7</b>	<b>Resultat</b>	<b>15</b>
7.1	Utvärdering av minsta fluidiseringshastighet . . . . .	15
7.1.1	Experimentella mätningar . . . . .	15
7.1.2	Analytiska resultat . . . . .	16
7.1.3	Övriga observationer i samband med mätningar . . . . .	16
7.2	Bulkdensitet . . . . .	17
7.3	Partikelstorlek . . . . .	17
7.4	Magnetisk separation . . . . .	18
7.5	Magnetisk Susceptibilitet . . . . .	19
7.6	SEM . . . . .	20
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>22</b>
8.1	$U_{mf}$ -mätningar . . . . .	22
8.1.1	$U_{mf}$ -mätning av färsk Järnsand . . . . .	22
8.1.2	Analytiskt resultat . . . . .	22
8.2	Magnetism . . . . .	23
8.3	Asklager . . . . .	23
8.4	Agglomeration . . . . .	24

<b>9</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>25</b>
<b>10</b>	<b>Möjlig vidare forskning</b>	<b>26</b>
<b>A</b>	<b>Magnetseparation</b>	<b>30</b>
<b>B</b>	<b>SEM-bilder</b>	<b>32</b>
B.1	2h . . . . .	33
B.2	27h . . . . .	34
B.3	Järnsand 78 h . . . . .	37
B.4	spektrum . . . . .	41
<b>C</b>	<b>Experimentmatris</b>	<b>42</b>
<b>D</b>	<b>Analytisk beräkning av <math>U_{mf}</math></b>	<b>43</b>

# 1 Bakgrund

Mer än en tredjedel av all total producerad elektricitet i världen fås från förbränning av fasta bränslen - kol, biomassa och avfall [1]. Biomassa och särskilt avfall är svåra att förbränna på grund av sitt heterogena innehåll och varierande fukthalt, och innehåller i vissa fall även oönskade föroreningar. Det är därför viktigt att utveckla metoder för att minimera bildning av skadliga biprodukter och avskilja aska och föroreningar under förbränningen. En sådan metod är förbränning i fluidiserade bäddar, som kan underlätta förbränning av framförallt heterogena bränslen som biomassa och avfall, och som kan effektiviseras ytterligare med hjälp av syrebärande bäddmaterial.

## 1.1 Avfallsförbränningens roll i Sverige

I Sverige går ca 99,3 % [2] av allt hushållsavfall till återvinning eller energiomvandling, vilket i praktiken innebär förbränning. Även avfall från industrier och annan verksamhet används till energiomvandling [3]. Förbränning av avfall för energiproduktion brukar gå under samlingsnamnet *WtE* - *Waste to Energy*. Biomassa från exempelvis skogsindustrin nyttjas också som energiresurs i förbränningsanläggningar. Både avfall och biomassa innehåller dock askkomponenter som medför stora problem i förbränningsanläggningar. Exempelvis orsakar kalium och klor problem med slaggning, korrosion och *fouling*, det vill säga oönskade beläggningar på processutrustningen [4]. Ett sätt att minska sådan problematik i förbränningsanläggningar är att förbränna bränslet i en bädd av fasta partiklar, där dessa oönskade ämnen då kan reagera med bäddpartiklarna. Detta löser dock inte grundproblemet utan överför det till sanden, som då måste bytas ofta och bildar stora mängder oönskat avfall som i dagsläget inte kan återbrukas som bäddmaterial. Nya, tåligare bäddmaterial som bevarar sin funktion längre i en utsatt förbränningsmiljö, och som därmed inte behöver bytas lika ofta, kan potentiellt minska detta problem [4].

## 1.2 Fluidisering

*Fluidisering* är en fysikalisk process där material bestående av fasta partiklar ges fluidegenskaper. Ett sätt att åstadkomma detta är att strömma en gas genom en partikelbädd [5]. Beroende på gasens bärförmåga i relation till partiklarnas fallhastighet fås antingen en lätttrörlig sjudande eller bubblande bädd, vars beteende liknar en vätska, eller en fri ström av granulat (s.k cirkulerande bädd) som följer med gasen. Den gashastighet som behövs för att balansera eller övervinna tyngdkraften som verkar på partiklarna beror bland annat på fluidens viskositet och densitet samt partiklarnas storlek och form. Bäddens rörlighet och den turbulens som uppstår i den gynnar omblandning samt värmeöverföring, vilket gör fluidisering mycket intressant inom ett flertal kemi- och energitekniska områden. Eftersom fluidiseringshastigheten beror av egenskaper hos partiklarna är det viktigt att bädden är relativt homogen, eftersom den annars kan separeras till olika fraktioner. Om bädden innehåller fint damm kan detta också följa med bärgasen ut ur bädden och orsaka luftföroreningar eller skador på utrustning.

Fluidisering är fördelaktigt vid förbränning av biomassa och avfall i ett flertal olika avseenden, bland annat: [4]

- Förbränningsanläggningen blir mindre känslig mot stora variationer i bränslesammansättning.

- Bäddmaterialet kan absorbera vissa alkaliska komponenter, vilket leder till minskad risk för korrosion på processutrustningen. Detta kan dock leda till agglomeration i bädden, dvs. sammansmältning av bäddpartiklar till större klumpar.
- Lägre drifttemperaturer och mer homogen temperatur i pannan, vilket potentiellt medför lägre NO<sub>x</sub>-bildning.
- Möjlighet till samförbränning av olika bränslen.

### 1.3 Fluidiserade bäddpannor

I en fluidiseringspanna fördelas bränslet i en bädd av sand, vanligtvis s.k. kiselsand (kiseldioxid), samt mindre mängder andra oxider. Utöver sin temperaturutjämnande effekt kan sanden och dess tillsatser även interagera med föroreningar från bränslet, på ett sätt som gör det lättare att avskilja dem och skydda pannan från skador. Exempel på ämnen som bör absorberas är svavel, alkali- och tungmetaller från bränslet. Exempelvis tillsätts kalciumkarbonat (CaCO<sub>3</sub>) vid kolförbränning för hantering av svavelföroreningar. Vid avfallsförbränning tillsätts istället svavel eller svavelrikt kol för att ta upp kalium ur bränslet och förhindra bildning av KCl och andra oönskade alkaliföreningar [6]. Det är även möjligt att införa mindre mängder av andra ämnen som förbättrar förbränningen eller förhindrar utsläpp av specifika föroreningar. Kiselsanden samt dess renande tillsatser kan dock bara hantera en viss mängd aska och restämnen innan dess egenskaper påverkas tillräckligt att den inte längre är brukbar, huvudsakligen genom bildande av klumpar. Den ideala livslängden kan vid förbränning av högt förorenade bränslen som t.ex. hushållsavfall vara enstaka dagar, beroende på bädden och pannans utformning samt aktuella driftförhållanden. Detta kan ge en dagsförbrukning på många ton sand för en enskild anläggning. Det är också svårt att avskilja förbrukad sand från brukbar sådan, vilket innebär att en viss andel av den utsorterade sanden är fullt användbar och den tillsatta sanden därmed inte utnyttjas maximalt. För att minska kostnaden och öka nyttjandegraden kan det vara gynnsamt att utforska alternativ till kiselsand.

Ersättning av kiselsand i fluidiserade bäddpannor är även eftersträvansvärt från ett miljöperspektiv. Under det nationella miljökvalitetsmålet *Grundvatten av god kvalitet* finns ett delmål för minskning av uttaget av naturgrus, som bland annat innefattar kiselsand [7], eftersom naturgruset utgör en viktig del i den naturliga grundvattenlagringen. Utöver att sanden i sig är en begränsad resurs kan stora uttag därmed förstöra viktiga vattentäkter. I dagsläget förbrukas uppskattningsvis 160–180 kiloton kiselsand varje år som bäddmaterial i Sverige [4], vilket motsvarar ungefär en tredjedel av Sveriges totala produktion av kiselsand [8].

#### Slitage på bäddmaterial

Ett problem vid användning av fluidiserade bäddar för förbränning är att själva bäddmaterialet slits och regelbundet måste bytas ut. Slitage kan delas upp i tre delar: klumbildning, [6] nötning och andra fysiska eller kemiska förändringar i bäddmaterialet som gör det olämpligt för fortsatt bruk, exempelvis splittring [9].

#### Klumbildning

Klumbildning orsakas främst av alkalisilikater, som bildas på bäddpartiklarnas yta vid förbrän-

ning vid temperaturer över 800°C. Dessa föreningar kan till viss del smälta vid temperaturerna i pannan, vilket gör att bäddpartiklar som kolliderar med varandra fastnar och smälter ihop när silikaterna stelnar [6]. Eftersom en del av silikatet har sitt ursprung i bränslet går det inte helt att undvika klumpbildning genom byte av bäddmaterial, men förekomsten kan minskas, bland annat genom bäddmaterial som innehåller järn eftersom järnsilikater har betydligt högre smältpunkt än alkalisilikater [6]. Användning av syrebärande bäddmaterial kan därför förväntas leda till lägre klumpbildning och därmed längre livslängd.

## Nötning

Den nötning av bäddpartiklarna som uppstår vid drift orsakas av både direkta kollisioner mellan partiklar och sprickbildning driven av termisk och kemisk stress. Majoriteten av de mycket små partiklar som produceras i bädden tycks bildas när större partiklar spricker, varefter skärvarnas vassa kanter nöts ned. Orsaken till detta sönderfall är huvudsakligen värmechocker [9] som uppstår när panntemperaturen varierar eller bäddpartiklarnas kontakt med bränslet är ojämn. Detta gör att bäddpartiklarna växlar mellan temperaturen hos gasen i pannan och det brinnande bränslets flamtemperatur. Särskilt utsatta är porösa bäddmaterial, då gasen i partikelns porer expanderar när den hettas upp. Om brännbara gaser som ansamlats i porerna antänds kan den plötsliga tryck- och temperaturökningen slita sönder partikeln i vassa skärvor [9]. Risken för detta är särskilt stor vid eldning med biobränslen, eftersom de på kort tid avger stora mängder flyktiga komponenter, vilket ökar risken för den gasansamling inuti partiklarna som nämns ovan [10]. Risken kan också ökas av syrebärande material, som kan tillföra syre även i områden där det råder underskott av fri syrgas, och därmed möjliggöra förbränning exempelvis inuti porer. Nötning och sönderdelning är dock ett jämförelsevis marginellt problem med kiselsand eftersom klumpbildning är den dominerande orsaken till att sådant bäddmaterial blir uttjänt. Dessa mekanismer kan dock vara mer relevanta för järnrika bäddar eftersom deras redoxaktivitet som nämnts ovan kan leda till förbränning i partikelns porer, vilket ökar sannolikheten för värme- och tryckchocker. De är också på grund av sin sammansättning mindre benägna att forma silikater på ytan och därmed bilda klumpar. Nötning och sönderdelning kan därmed få större betydelse för bäddens livslängd [6].

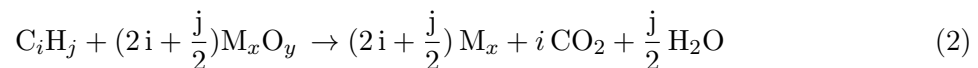
## Övriga kemiska förändringar

Bäddmaterialet kan även genomgå andra kemiska förändringar utöver bildning av alkalisilikater som påverkar dess beteende i pannan. Bland annat har tidigare studier av bäddprover från Chalmers Järnsandsförsök visat på bildning av asklager samt järnrika avlagringar på partiklarnas yta [10]. För att avgöra om detta inverkar negativt på förbränningen krävs dock ytterligare studier. Järnsand genomgår även oxidation under upphettning i syrerik atmosfär, vilket påverkar både materialets syrebärande förmåga och dess magnetism [11]. Det sistnämnda är särskilt intressant eftersom detta kan öka partiklarnas magnetiska susceptibilitet och därmed göra dem enklare att separera.

### 1.4 Syrebärrstödd förbränning

Syrebärrstödd förbränning (OCAC - *Oxygen Carrier Aided Combustion*) innebär att det konventionella, icke-redoxaktiva bäddmaterialet ersätts med ett material som har syrebärande egen-

skaper. Försök med OCAC genomfördes för första gången på Chalmers kraftcentral 2012 [12]. Bäddmaterialet som användes var ilmenitkoncentrat, som erhöles genom krossning och bearbetning av ilmenit, en naturligt förekommande malm av järn och titan. Målet med undersökningen var att angripa problem med bäddslitage och utsläpp kopplade till förbränning av fasta biobränslen. Konceptet bygger på användning av ett bäddmaterial som har reducerande och oxiderande egenskaper som gör att det vid förbränning kan reduceras av det tillförda bränslet, och oxideras av syre i den inmatade luften i förbränningspannan. Detta cykliska reaktionsförlopp beskrivs av ekvation (1) - (2) [13].



Efter förbränningsreaktionen (2) kan den reducerade metallen ( $M_x$ ) oxideras igen av den tillförda luften till reaktorn enligt reaktion (1). Med metall (M) i detta reaktionsförlopp menas syrebärande i bäddmaterialet, dvs. redoxaktiva metalljoner. OCAC ökar bränslets tillgång till det syre som krävs vid förbränning, och gör det därmed möjligt att få samma praktiska syretillgång vid en lägre luftfaktor  $\lambda$ , som definieras som förhållandet mellan tillförd luft och den teoretiskt lägsta mängden luft som krävs för stökiometrisk förbränning. I tidigare experiment på industriell skala har syrebärande metalloxyder använts som helt eller delvis har ersatt kiselsand som bäddmaterial. Dessa har visats förbättra panneffekten eftersom luftfaktorn kan sänkas [10], vilket innebär att den producerade värmen fördelas på en mindre gasmängd. Även bäddmaterialets livslängd ökar, vilket ökar sandens längsta möjliga uppehållstid och därmed minskar den mängd nytt material som måste tillföras [4]. Många lämpliga oxider är även magnetiska, vilket ger nya möjligheter att separera ut dem från askan som bildas i pannan och därmed återcirkulera en större andel av dem.

Syrebärande material har också visats ha en *syrebufferterande* förmåga, vilket innebär att förbränning kan ske med syre från materialet istället för fri syrgas i luften [14]. Denna buffertförmåga är särskilt viktig för pannor eldade med mindre homogena bränslen, eftersom biomassa och framförallt avfall kan ha en ojämn sammansättning och ett varierande syrebehov vid förbränning. Även bränslets fukthalt kan variera, vilket kan påverka dess värmevärde och förbränningshastighet [15]. Den syrebufferterande effekten har i försök med luftunderskott visats minska bildning av kolmonoxid i pannan och öka syretillgången i pannan när införseln utifrån är otillräcklig, eftersom syre kan tas upp av bädden under syrerika förhållanden och sedan avges när syrekonzentrationen sjunker. Dessa effekter uppnås även vid inblandning av mindre mängder, ner till 20%, järnrik sand i en bädd av kiselsand. Den syrebärande Järnsanden minskade även koncentrationen av kväveoxid (NO) i rökgaserna [10].

#### 1.4.1 Järnoxider som syrebärande material

Majoriteten av den existerande forskningen rörande OCAC har genomförts med ilmenit. Sedan testkörningen som genomfördes 2012 på Chalmers har ilmenit som bäddmaterial även testats på kommersiell skala i flera olika förbränningsanläggningar i Sverige [4]. Ilmenit som bäddmaterial

har uppvisat tydliga förbättringar jämfört med förbränning med en konventionell bädd av kiselsand. Bland annat har bytet möjliggjort en minskning av lufttillförsel och lägre förbrukning av bäddmaterial [10]. Ilmenit är dock inte den enda möjliga kandidaten som syrebärande medium i fluidiserade bäddar. Dessutom är ilmenitbaserade bäddar patenterade [16], vilket kan påverka valet av medium. Tillgången på ilmenit är också begränsad, medan produktionen av slaggbaserade material relativt enkelt kan ökas genom att vattenkyla en större andel av den slagg som redan produceras, eller bearbeta redan tillverkat material. Ilmenit är en primärresurs med begränsad tillgång och många andra användningsområden, vilket inte gäller för Järnsand. Det är även svårt att i dagsläget kartlägga andra relevanta ekonomiska aspekter av olika syrebärande bäddmaterial. Exempelvis krävs förbehandling av bäddmaterialet, vilket medför stora kostnader. Vilka som åläggs uppdraget för förbehandlingen (ägarna av förbränningsanläggningen eller gruvföretaget) finns det heller inget definitivt svar på [4]. Därutöver är marknaden för titanmineraler, där ilmenit ingår, i dagsläget dominerad av framställning av pigment, som används för ett stort antal tillämpningsområden [17]. Med detta som utgångspunkt finns ett incitament att utforska alternativa syrebärande material som kan användas till samma ändamål. Ett sådant material är Järnsand [4].

#### 1.4.2 Järnsand

Järnsand är en kommersiell produkt som tillverkas från kopparslagg genom snabb vattenkylning av smält slagg, vilket leder till bildande av små kulor som mals ner till ett pulver[18]. Järnsand används bland annat som konstruktionsmaterial. Endast en liten andel av allt kopparslagg som bildas i Bolidens gruvverksamhet går till produktion av Järnsand. Resterande andel, som luftkyls och därmed får en annan form och sammansättning, måste krossas och sedan siktas för att kunna nyttjas som ett bäddmaterial. Under hösten 2023 utfördes ett nytt försök på Chalmers kraftcentral där bädden, som först utgjordes av kiselsand, gradvis över flera dagar ersattes med en ökande andel järnsand. Därefter tömdes pannan på bäddmaterial, och fylldes på med endast Järnsand, varefter pannan driftsattes under ytterligare fyra dygn. Provkörningen påvisade liknande resultat med avseende på förbränning som ilmenit, vilket givit upphov till ökat intresse för Järnsand för detta ändamål [10].

Den kemiska sammansättningen av Järnsand presenteras i tabell 1. Färsk Järnsand är efter nerkylning i princip helt amorft [19]. Vid upphettning omstruktureras järnsanden till en blandning av hematit ( $\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3$ ), magnetit ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$ ) och kristobalit ( $\text{SiO}_2$ ), där de två järnoxiderna skapar den syrebärande effekten [10].

Tabell 1. Kemisk sammansättning av Järnsand (vikt%). Resterande andel är huvudsakligen syre [10]

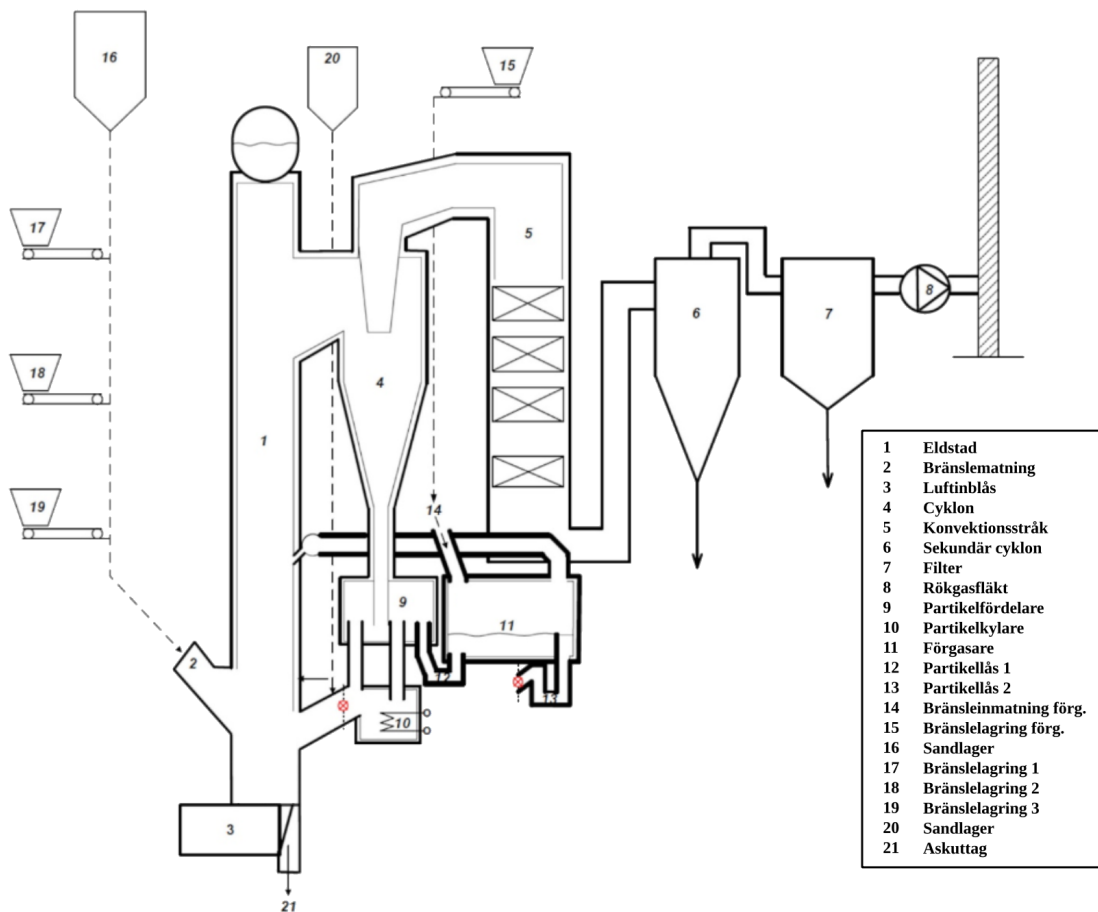
Fe	Si	Al	Ca	Zn	Mg	Cu	Na	K	S	Mn	Cr
43,6	18,6	2,9	2,4	1,0	1,0	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2

#### 1.5 Försöksanläggningen (Chalmers kraftcentral)

Under flera års tid har Chalmers Tekniska Högskola haft ett samarbete med företaget E.ON, i syfte att utveckla ett koncept för fluidbäddsförbränning som baseras på kemiskt aktiva järnoxider. Under hösten 2023 testades Järnsand som fluidiseringsmedium i Chalmers kraftcentrals

fluidiseringspanna [10]. Provkörningen uppvisade potential och förhoppningen är att slaggprodukter som i dagsläget används som fyllnadsmassa, kan ersätta den resurskrävande kiselsand som idag är det konventionella fluidiseringsmediet i fluidbäddspannor [8].

Chalmers kraftcentral är en cirkulerande fluidiserad bäddpanna i semi-industriell skala [10]. En översiktsbild på anläggningen visas i figur 1. Till vänster syns bränslelagren och eldstaden; från denna passerar bäddpartiklarna genom en primär cyklon som avskiljer större delen av sanden för återcirkulation via förgasaren. Där skiljs sanden från skrot och agglomerat genom partikellås, innan gasen går vidare till konvektionsstråket. Efter konvektionsstråket anses gasen förbrukad och passerar genom två ytterligare cykloner och en drivfläkt innan den utgår genom skorstenen.



Figur 1. Schematisk skiss över förbränningsanordningen i Chalmers kraftcentral. Reproducerad från [10] med översatta etiketter.

## 2 Syfte

Arbetets syfte är att undersöka några av de egenskaper hos Järnsand som är relevanta för dess användning som bäddmaterial. Målet är att utveckla en bättre förståelse av hur Järnsand skulle kunna användas i fluidiserade bäddar och på sikt bidra till en kommersiell implementering. Framförallt kommer egenskaper relevanta för fluidiserad bäddförbränning att undersökas, genom att mäta materialets fluidiseringshastighet, magnetisering och kemiska förändringar i pannan. Särskilt intressant är bäddmaterialets förändring över tid, för att se om återcirkulation av använt material är möjligt.

Egenskaper som kommer undersökas är minsta fluidiseringshastighet, bulkdensitet, partikelstorlek, magnetisk separation, magnetisk susceptibilitet samt undersökning av asklager och partiklar genom elektronmikroskopi.

### 3 Frågeställning

Det huvudsakliga problem som angrips i arbetet är att undersöka hur Järnsand står sig som bäddmaterial jämfört med kiselsand och ilmenit, samt att undersöka Järnsandens magnetiska egenskaper för att se om magnetisk separation av aska och Järnsand kan vara möjlig för återcirkulation av Järnsand. Det övergripande syftet är att undersöka om och hur Järnsand skulle kunna implementeras i industriella pannor och vilka tänkbara svårigheter som skulle kunna uppstå. Mer specifikt besvaras följande frågor:

- *Hur magnetiskt blir Järnsand över tid och går det att separera?*
- *Vilken gashastighet krävs för att fluidisera sanden?*
- *Hur byggs asklagret upp, vad innehåller det och hur mycket nöts partiklarna ner?*

Arbetet är betydelsefullt eftersom det bäddmaterial som i dagsläget används i fluidiserade bäddar varken är miljömässigt hållbart eller optimalt för förbränningen. Därför är det av vikt att undersöka alternativa material och dess egenskaper, för att upptäcka lovande alternativ och möjliggöra en eventuell kommersiell implementering av dessa. Järnsand är ett sådant potentiellt lämpligt material, i synnerhet på grund av att det härstammar från en restprodukt.

#### 3.1 Magnetiska egenskaper

För att Järnsanden ska kunna användas mer effektivt än det bäddmaterial som används idag är det nödvändigt att undersöka möjligheten att separera aska och icke syrebärande bäddpartiklar från det järnrika redoxaktiva bäddmaterialet. Troligen kan även andra syrebärande metalloxider förekomma i bädden eftersom detta rör sig om en slaggprodukt, men eftersom separationen sker med avseende på magnetisk känslighet kommer dessa att sorteras ut med askan. För att möjliggöra separation är det viktigt att mäta bäddens magnetiska susceptibilitet, som tillsammans med partikelstorleken avgör hur enkelt en magnetisk separation kan ske. Eventuellt kan då den magnetiska andelen återcirkuleras till pannan, vilket ökar bäddens livslängd.

#### 3.2 Fluidiseringsegenskaper och bulkdensitet

För att det ska vara möjligt att använda Järnsand som bäddmaterial på kommersiell skala i dagens anläggningar är det även nödvändigt att känna till den minsta gashastighet som krävs för att Järnsanden ska fluidiseras. Det är även viktigt att undersöka bulkdensiteten på bäddmaterialet samt det förväntade tryckfallet över bädden. Dessa materialegenskaper är viktiga vid tillämpning av Järnsand i fluidiserade bäddar, och måste därmed mätas för att kunna jämföra Järnsand med dagens kommersiellt använda bäddmaterial kiselsand och ilmenit. Om Järnsand skiljer sig signifikant mot dagens bäddmaterial skulle användning kräva anpassning av partikelstorlek. Därför är det viktigt, huvudsakligen ur ett ekonomiskt perspektiv, att Järnsand har fysikaliska egenskaper jämförbara med kiselsand och ilmenit.

#### 3.3 Strukturförändringar

Inför en eventuell kommersialisering av Järnsand som bäddmaterial i fluidiserade bäddpannor är det viktigt att undersöka hur materialets morfologi och kemisk sammansättning förändras under förbränningen. Detta kan ge svar på både vilken grad av nötning som sker och på vilket sätt, samt vilka kemiska förändringar som sker. I förlängningen kan detta svara på frågan om

och i vilken omfattning det är lämpligt att återcirkulera utseparerat material. Vidare kan det även avgöra om det är möjligt att separera ut allt det material som är i tillräckligt gott skick för att återbrukas, eller om en del av det måste kastas eftersom det inte är magnetiskt nog att kunna isoleras. Denna undersökning kommer huvudsakligen göras med elektronmikroskop, för att studera grundämnesfördelning och ev. asklager vid olika uppehållstider.

## 4 Avgränsningar

Projektet är avgränsat till att undersöka vissa intressanta fysikaliska egenskaper hos Järnsand och jämföra dessa mot kiselsand och ilmenit. Andra bevarade prover från forskningsförsöket, bland annat aska och flygaska, undersöks inte i projektet då dessa prover inte anses lika relevanta för den grundläggande frågeställningen. Askans påverkan på bäddpartiklarna kommer dock att undersökas i form av eventuell kemisk omvandling av de prover som tagits efter en längre uppehållstid i panna.

Vidare avgränsades projektet till att endast undersöka fyra olika prover av Järnsand: (I) Färskt material, samt (II) Bäddprov från Chalmers kraftcentral med 2 h, (III) 27 h, och (IV) 78 h uppehållstid. Notera att uppehållstiden för prover III och IV är genomsnittsvärden då nytt bäddmaterial tillsattes efter cirka 6 timmar. För att jämföra resultatet med ett bäddmaterial som redan används industriellt kommer motsvarande analys även att genomföras på ilmenitprover, färskt samt kört i 25 timmar, från samma panna. Dessutom kommer två prover av färsk kiselsand med olika storleksfördelningar, 20 kt och 30 kt, att analyseras.

Egenskapsundersökningen är begränsad till mätning av magnetisk susceptibilitet, densitet, partikelstorleksfördelning, tryckfall, minsta fluidiseringshastighet samt hur partiklarnas struktur och egenskaper förändras under förbränningen. Skälet är att information om dessa egenskaper är av stor vikt vid byte av bäddmaterial i fluidiserade bäddar.

Detta projekt sträcker sig inte bortom förbränningstekniken; tillgång och införskaffning av slaggprodukt eller avfallshantering av förbrukad bädd innefattas inte av projektet. Dessa aspekter blir intressanta först om Järnsand visar sig vara brukbart som bäddmaterial, och kan i sådana fall undersökas i senare studier.

## 5 Bedömning av samhällliga och etiska aspekter

Tillgång till billig energi har visats vara en nyckelfaktor för modernisering av samhället och ökat välbefinnande [20]. Eftersom förbränning är en viktig energikälla globalt [1] kan utveckling av nya och förbättrade förbränningsanläggningar därför bidra till ökat välbefinnande globalt, med minskade föroreningar och utsläpp jämfört med motsvarande utbyggnad av existerande teknik. Utbyte av kiselsanden kan även minska uttaget av en begränsad resurs och skapa ett nytt värde i en restprodukt. Det skulle även bidra till uppfyllelsen av ett av Sveriges miljömål, att minska utvinningen av naturgrus i Sverige [21]. Projektet kan därför betraktas som övervägande positivt, givet att produkten som silikatet ersätts med inte medför allvarigare problem som i dagsläget inte är kända. Studier av eventuell dammproduktion, effekten av spill vid transporter, avfallshantering och dylikt måste därför genomföras, men ingår av praktiska och tidsmässiga skäl inte i denna rapport.

## 6 Metod

För att nå projektets mål utförs litteraturstudier, databehandling, experiment och resultatanalys. Experiment utförs i olika laboratorier på Chalmers för att undersöka egenskaperna hos bäddprover, som tagits under den kampanj som utfördes i samarbete med E.ON under hösten 2023 [10]. En kort sammanfattning av utförda mätningar presenteras i tabell 6. I bilaga C presenteras en mer detaljerad sammanställning.

*Tabell 2. Sammanställning av mätningar och utvärderingar som görs i projektet. För Järnsand genomförs samtliga mätningar på alla prover. För ilmenit begränsas undersökningen till de egenskaper som är intressanta i jämförelse med järnsand. Med 'Blandning' avses en blandning av ca 50/50 vikt% Järnsand/kiselsand.*

	Järnsand	Kiselsand	Ilmenit	Blandning
<b>Partikelstorleksfördelning</b>	<b>x</b>			<b>x</b>
<b>Bulkdensitet</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	
$U_{mf}$	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	
<b>Magnetseparation</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
<b>Magnetisk susceptibilitet</b>	<b>x</b>		<b>x</b>	
<b>SEM - analys</b>	<b>x</b>			

### 6.1 Undersökning av magnetiska egenskaper

Analys av provets magnetism genomförs med två instrument: En magnetisk bandseparator där en grov magnetisk avskiljning utförs och utvärderas, och ett specialiserat instrument för att mäta så kallad *magnetisk susceptibilitet*. Detta är ett mått på hur magnetiskt ett bulkmaterial blir då det utsätts för ett magnetiskt fält [22], och används här för att undersöka hur uppehållstiden i pannan påverkar Järnsandens magnetiska egenskaper. Detta är intressant både av separations- och återcirkuleringskäl och för att tidigare studier visat att askuppyggnad kan påverka partiklarnas magnetism [23], [24].

För att avskilja den syrebärande fraktionen av bäddmaterialet från aska och mindre redoxaktiv bädd kan anläggningen förses med en magnetisk separationsenhet, som kan avskilja fast material med avseende på deras magnetiska susceptibilitet. Detta koncept har använts med ilmenit [24], och visat sig vara ett möjligt sätt att avskilja reaktivt OCAC-material från det redox-inerta materialet och annat fast material från förbränningsanordningen.

Det är alltså av intresse att undersöka magnetiska egenskaper för att dessa påverkar hur separationsenheten bör användas, samt för att undersöka möjliga kopplingar mellan uppehållstid, uppyggnad av asklager och magnetisk susceptibilitet.

#### 6.1.1 Utvärdering av magnetiska egenskaper

Den magnetiska separationen genomförs på alla Järnsandprover (I-IV). För att jämföra resultatet med ett bäddmaterial som redan används industriellt genomförs analysen även på ett ilmenitprov från samma panna. Magnetseparation genomförs även för ett blandat bäddprov från 2023

innehållande cirka 50 viktprocent Järnsand respektive kiselsand [10].

Järnsand- och ilmenitproverna separeras med en magnetisk bandseparator i laboratorieskala. Proverna (200-500 g) magnetsepareras genom att de gradvis fördelas på separatorns roterande band med hjälp av en partikelfördelare. Under separatorn placeras två behållare som fångar upp den icke-magnetiska respektive den magnetiska fraktionen.

För att erhålla total separation av fraktionerna sker separationen i tre steg. I första steget separeras hela bäddprovet och i stegen därefter separeras erhållen magnetisk fraktion ytterligare gånger för att sälla ut ev. ickemagnetiskt material som finns kvar. Efter varje separationssteg vägs de magnetiska och icke-magnetiska fraktionerna separat för att undersöka hur stor andel av bädden som är magnetiskt separerbar samt hur stor andel av separationen som sker i varje steg. De två fraktionerna blandas sedan ihop, varefter försöket upprepas ytterligare två gånger så att ett genomsnittsvärde kan beräknas. Efter den tredje separeringsomgången lämnas fraktionerna i separerat tillstånd för att underlätta vidare experiment.

Den magnetiska susceptibiliteten mäts för färsk Järnsand och för de magnetiska fraktionerna av varje bäddprov, förutom för det cirka 50-procentiga Järnsandprovet. Mätningarna utförs på en Bartington MS2B magnetic susceptibility sensor, där 10 ml av varje prov analyseras med instrumentets inställning för låg frekvens. Fem mätningar per prov genomförs varefter ett medelvärde beräknas.

## 6.2 Minsta fluidiseringshastighet

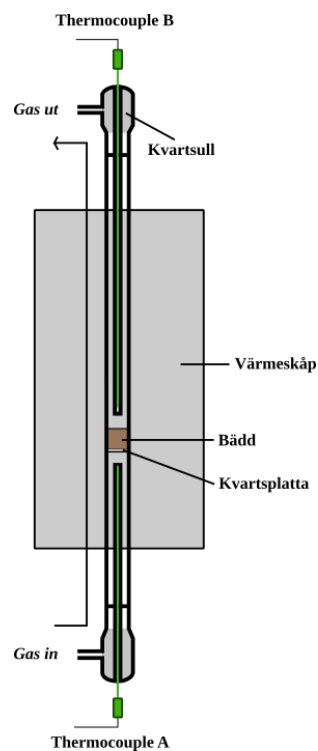
Vid materialbyte i existerande pannor är fluidiseringshastigheten framförallt viktig i relation till motsvarande hastighet för den konventionella bädden, eftersom en större avvikelse kan kräva att bäddmaterialets medelstorlek måste minskas genom krossning och eller malning. Högre fluidiseringshastighet ökar även av nödvändighet den luftvolym som passerar bädden, vilket antingen ökar volymen rökgaser som släpps ut eller kräver större recirkulering av dem. Sammantaget kan en högre fluidiseringshastighet kräva krossning av bäddmaterialet till mindre genomsnittlig partikelstorlek eller andra kostsamma anpassningar, något som kan utgöra en praktisk och ekonomisk barriär mot användning av Järnsand. Fluidiseringshastigheten kan även tänkas variera med bäddens ålder, eftersom partiklarnas storlek är en nyckelfaktor [25] och nötning kan förväntas ske under driften. Om skillnaden mellan en färsk och en äldre bädd av järnsand är stor kan detta därför tänkas påverka den uppehållstid som är praktiskt möjlig att nå i redan existerande anläggningar efter byte till Järnsand.

Bestämning av minsta fluidiseringshastighet ( $U_{mf}$ ) görs genom praktiska mätningar. Detta är nödvändigt eftersom de teoretiska modeller som utvecklats för fluidisering inte är anpassade för partiklar med hög densitet, och därför kan ge stora fel vid beräkning av fluidiseringshastighet för Järnsanden [26]. Mätningen görs genom att en bädd på ca 12 g i liten skala utsätts för en varierande gasström tills tydlig fluidisering uppstår. Hastigheten sänks sedan i steg tills hastigheten når noll. Det är särskilt viktigt att mäta gränshastigheten under reduktion av flödet, eftersom det krävs viss överhastighet för att övervinna en icke-fluidiserad bädds packning och kontaktkrafter mellan partiklarna. Den uppåtgående hastighetströskeln blir därmed högre än den nedåtgående hastighetströskeln, där den senare är mer relevant för en anläggning i kontinuerlig drift. Gränsen för fluidisering kan antas vara den punkt där tryckfallet över bädden inte

längre ökar när gashastigheten ökas [27]. Bäddvolymen är konstant för alla prover, även ilmenit och kiselsand, men på grund av annorlunda bulkdensiteter får jämförelseprovernas bäddar något olika massor. Skillnaden i massa innebär att tryckfallet ej bör jämföras mellan de olika bäddmaterialen.

### 6.2.1 Praktiskt utförande av $U_{mf}$ -mätningar

Minsta fluidiseringshastighet för varje prov ( $U_{mf}$ ) utvärderas genom att placera provet i en glasbehållare i en ugn. Ugnen hettades upp till den konstanta temperaturen  $850\text{ }^\circ\text{C}$  för att efterlikna temperaturen i en kommersiell bäddpanna. Kvävgas strömmades genom bädden i stegvis ökande gasflödeshastigheter från inget flöde till en punkt där fluidiseringshastigheten var långt passerad, och därefter sänktes gasflödet stegvis ner till noll. Se figur 2 för en illustration av experimentets uppställning. Den relevanta uppmätta parametern är tryckfallet över provbädden. För att isolera tryckfallet från provet från naturligt flödesmotstånd i utrustningen genomfördes även en körning med en tom glasbehållare, vars tryckfall subtraherades från alla efterkommande mätningar. För att detta resultat ska vara giltigt användes samma reaktorrör och kopplingsdelar för alla mätningar.



Figur 2. Schematisk översikt över utrustning för  $U_{mf}$ -mätningar.

### 6.2.2 Beräkningar av fluidiseringshastighet

Bestämning av fluidiseringshastighet görs i detta fall genom mätningar. Det finns dock teoretiska ansatser, som visserligen inte alltid är välanpassade till partiklar med hög densitet [26], men som ändå kan ge insikt i vilka centrala egenskaper som bestämmer den nödvändiga gashastigheten. En vanlig sådan ansats är Erguns ekvation, som i en delvis experimentellt anpassad form ges av

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{1 - \epsilon^2}{\epsilon^3} \frac{\mu_f v}{(\phi d_p)^2} + 1.75 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho_f v^2}{\phi d_p} \quad (3)$$

där  $\phi d_p$  är partikelns ekvivalenta sfärdiameter, i form av partikelns diameter viktad med yta-reakvoten mellan partikeln och en sfär med dess diameter.  $\rho_f$  är fluidens densitet,  $\mu_f$  fluidens viskositet och  $\epsilon$  bäddens fluidfraktion, som kan beräknas från partiklarnas volym dividerat med den totala bäddens volym, och  $L$  är partikelbäddens höjd. [5]. Den minsta fluidiseringshastigheten  $U_{mf}$  är den gashastighet som krävs för att tryckfallet förblir konstant, även vid vidare ökning av gashastigheten.

Ett annat sätt att bestämma den minsta fluidiseringshastigheten för sfäriska partiklar är genom Wen och Yus korrelation, som har tillämpats i tidigare utvärdering av lägsta fluidiseringshastighet för Järnsand [11]. Den lägsta fluidiseringshastigheten  $U_{mf}$  tas fram genom det kallade Arkimedestalet,  $Ar$ , som beskrivs av ekvation (9).

$$Ar = \frac{\rho_f d_p^3 (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2} \quad (4)$$

Wen och Yus korrelation för Arkimedestalet lyder

$$Ar = 1650 Re_{p,mf} + 24.5 Re_{p,mf}^2 \quad (5)$$

där  $Re_{p,mf}$  är Reynolds tal vid den lägsta fluidiseringshastigheten.

$$Re_{p,mf} = \frac{\rho_f U_{mf} d_p}{\mu_f} \quad (6)$$

Partikeldiametern som används för Wen och Yus korrelation är *Sauters medeldiameter*, som är ett statistiskt medelvärde på partikelstorleken som tas fram genom flera mätningar av denna [25] [28].

### 6.3 Mätning av bulkdensitet

Mätning av bulkdensitet genomförs genom att en metalleylinder med volym  $25 \text{ cm}^3$  fylls med materialet. Cylindern vägs med och utan material, och bulkdensiteten beräknas därefter genom medelvärdet av fem mätningar:

$$\rho_{bulk} = \frac{m}{V} \quad (7)$$

Densiteten är en viktig materialegenskap eftersom den påverkar fluidiseringshastigheten, som beror av partiklarnas massa. En hög densitet är därför ett tecken på att partikelstorleken kan behöva reduceras för att möjliggöra användning av Järnsand i pannor byggda för kiselsand. Det är dock viktigt att notera att det som mäts på detta sätt är bulkdensiteten, som är lägre än materialdensiteten eftersom partiklarna inte fyller ut hela volymen. Bulkdensiteten kan även variera med partikelstorlek, form och packning.

## 6.4 SEM/EDS

För analys av provernas ytor och strukturer (morfologi) och kemiska sammansättning användes svepelektronmikroskopi (SEM) tillsammans med Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). SEM-metoden innebär att magnetiskt accelererade primärelektroner skjuts mot provet. Kollisionen ger upphov till frislagna sekundära elektroner som kan uppmätas och därefter användas för att producera en bild. Primära elektroner som träffar atomkärnor kan spridas bakåt i det som kallas backscattering och dessa elektroner registreras också; de kan åtskiljas från sekundärelektroner genom skillnader i genomsnittsenergi. Backscattering ger därför upphov till bilder med varierande upplösning beroende på atommassa. EDS används för att mäta den kemiska sammansättningen hos prov med hjälp av röntgenstrålning som uppstår när elektronstrålen träffar provet, och används ofta tillsammans med SEM. Metoden är relativt bra på identifiera och kvantifiera ämnen som finns i större mängder, men brus kan göra att ämnen i låg koncentration över- eller underskattas. [29].

I detta arbete kommer vid SEM-undersökningen dock endast användas bakåtspridda elektroner för att analysera provernas yta och struktur samt den kemiska sammansättningen. Proverna gjuts i epoxyskivor och slipas sedan ned så att partiklarnas kärnor exponeras och asklagret syns i tvärsnitt. Ur dessa kan information erhållas om asklagrets uppbyggnad över tid samt dess sammansättning. Det går även att med icke-bearbetade prover studera partiklarnas tredimensionella form, vilket kan avslöja om det skett mekanisk nerbrytning, agglomeration eller splittring av partiklar.

De parametrar som används vid SEM-undersökningen tillåts variera något beroende på det prov som studeras och storleken på den intressanta regionen. Genomgående används accelerationsspänning 15kV och full bakåtspridningsdetektion (BSD-full); fokalbredd och förstoring varierar med den önskade storleken och detaljnivån. Upplösningen vid grundämnesskanning, dvs antal pixlar i mappens längsta dimension, tillåts också variera beroende på storleken på det studerade området. Vid helbildsskanning används genomgående 256px; vid mindre snitt och detaljbilder kan upplösningen variera mellan 64, 128 och 256 pixlar. Detta anges vanligtvis automatiskt i bilden.

## 7 Resultat

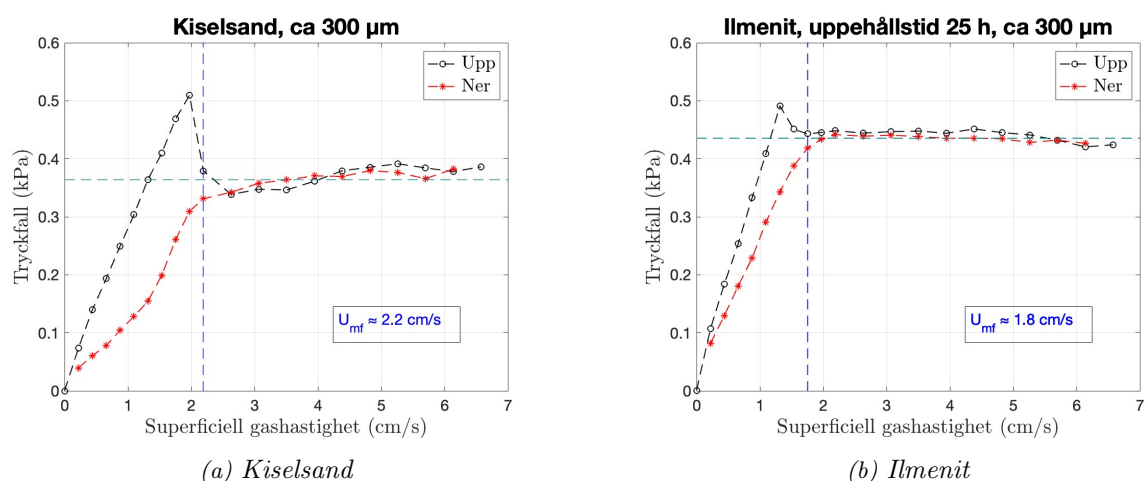
I detta avsnitt presenteras resultat som anses relevanta för projektets syfte och frågeställning. Ytterligare resultat som inte är av primärt intresse framgår i bilagor.

### 7.1 Utvärdering av minsta fluidiseringshastighet

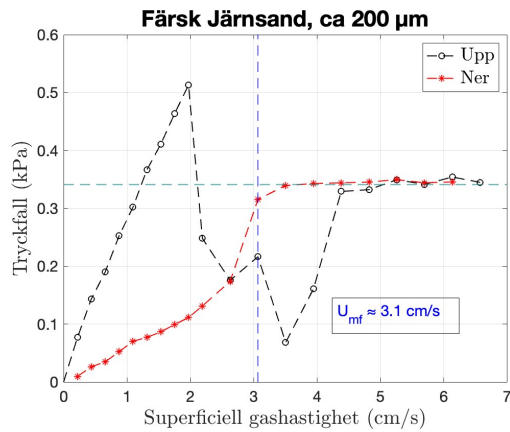
Den minsta fluidiseringshastigheten bestämdes experimentellt enligt beskrivning i 6.2.1 och jämfördes med resultat från beräkningar utförda med Yen och Wus korrelation, som beskrivs i 6.2.2.

#### 7.1.1 Experimentella mätningar

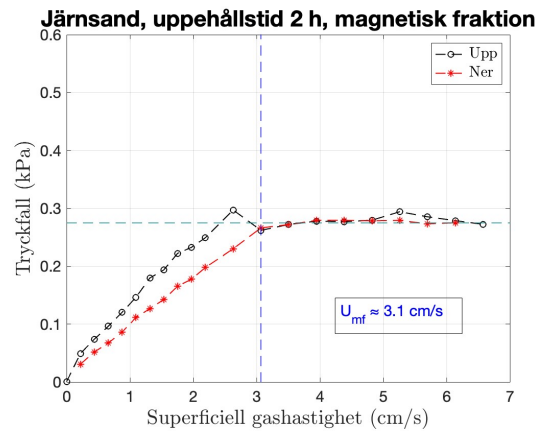
$U_{mf}$  utvärderades för färsk Järnsand, magnetiska fraktioner av övriga Järnsandsprover, för jämförelseproverna ilmenit (ett färskt prov samt ett prov med 25 h uppehållstid), samt färsk kiselsand. Samma ungefärliga massa användes för alla försök. Resultat från siktade prover av kiselsand, ilmenit och Järnsand framgår i figurerna 3-4. För 300  $\mu\text{m}$  användes spannet 255-350  $\mu\text{m}$ , för 200  $\mu\text{m}$  180-255  $\mu\text{m}$ . Övriga prover siktades bara mycket grovt för att ta bort kolbitar och andra mycket stora partiklar. För detta användes en sikt med maskvidd 710  $\mu\text{m}$ . Notera att gashastigheten inte är direkt uppmätt utan uppskattad efter en kalibreringsskala för en manuellt kontrollerad massflödesregulator. Gashastigheten kan dock variera radiellt eftersom reaktorns diameter är liten; angiven gashastighet är den s.k. superficiella hastigheten.



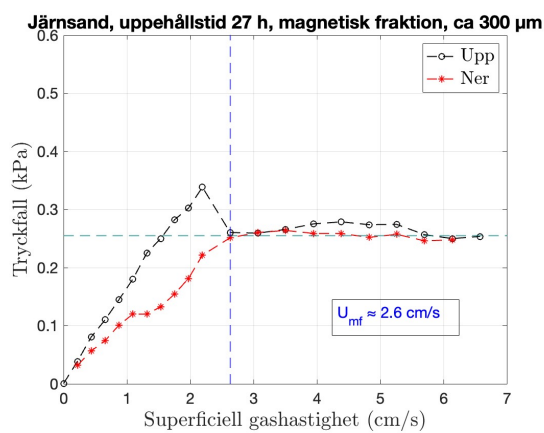
Figur 3. Resultat fluidiseringsförsök av färsk kiselsand samt ilmenit som haft en medeluppehållstid på 25 h i Chalmers kraftcentral. Proven siktades till ca 300  $\mu\text{m}$  för dessa mätningar.



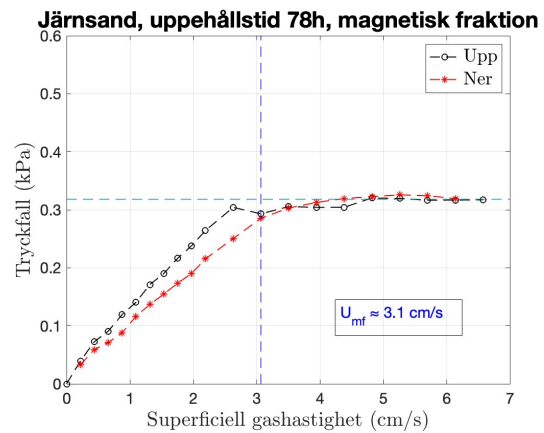
(a) Färsk



(b) 2h uppehållstid



(c) 27h uppehållstid



(d) 78h uppehållstid

Figur 4. Resultat av fluidiseringshastighetsmätningar för järnsand. Det avvikande utseendet i a) diskuteras i 8.1.1.

### 7.1.2 Analytiska resultat

Beräkningar med Wen och Yus korrelation som framgår i ekvation (9) - (10) ger vissa avvikelser från experimentellt bestämda värden på fluidiseringshastigheten. För färsk Järnsand med partikelstorleken 200 µm beräknas  $U_{mf}$  med hjälp av ekvation (8)-(9) till 2.51 cm/s, vilket är cirka 19 % mindre än det experimentellt uppmätta värdet 3.1 cm/s. Redovisning av beräkning framgår i Bilaga D.

### 7.1.3 Övriga observationer i samband med mätningar

I samband med mätningar av  $U_{mf}$  gjordes även andra intressanta observationer. Bland annat noterades att använd Järnsand med medeluppehållstiden 78 h blev mycket statiskt efter mätningen, till den grad att det var svårt att få tillbaka det använda provet i kärlet. Färsk Järnsand uppvisade även tydliga tendenser till vad som till en början antogs vara sintning. Detta kan dock ha varit temporär mekanisk koppling av partiklar eftersom fenomenet var reversibelt, i den mån att provet återgick till ett fririnnande granulat när det togs ut ur apparaten. Det skedde alltså ingen permanent sammansmältning av provet till en fast massa. Detta prov återanvändes sedan för den mätning som redovisas nedan; under den andra körningen uppstod ingen agglomeration.

## 7.2 Bulkdensitet

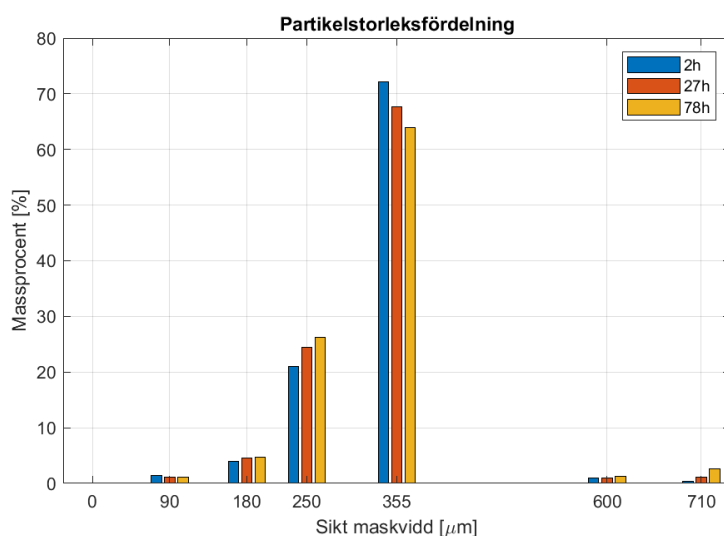
Resultat från mätningarna av bulkdensitet framgår i tabell 3. Det finns inga betydelsefulla skillnader i bulkdensitet mellan siktad och osiktad järnsand. Däremot verkar bulkdensiteten uppnå ett maximum någon gång under uppehållstiden i pannan. Dessa små skillnader kan dock bero på skillnader i packning och partikelstorlek snarare än skillnader i materialets densitet. Notera även att Järnsandens densitet ligger mellan uppmätta värden för ilmenit och kiselsand.

Tabell 3. Bulkdensiteter för olika prover.

Prov	Bulkdensitet( $g/cm^3$ )
Kiselsand, 30kt, ca 200 $\mu m$	1,49
Ilmenit, färsk	2,32
Järnsand, färsk, osiktat	1,68
Järnsand, färsk, 300 $\mu m$	1,62
Järnsand, 2 h, < 710 $\mu m$	1,84
Järnsand, 27 h, ca 300 $\mu m$	1,81
Järnsand, 78 h, < 710 $\mu m$	1,78

## 7.3 Partikelstorlek

Siktdata för bestämning av partikelstorleksfördelning togs för varje uppehållstid av Järnsand och presenteras i Figur 5. Figuren visar procent av den totala bäddprovets massa som låg på varje maskviddstorlek efter siktning. Fördelningen uppvisade en ökning av andelen massa över 710  $\mu m$  med uppehållstiden. Partiklarna över denna storlek bestod främst av vad som ser ut som vanlig sten och grus, vilka kan ha hamnat i bränslet innan förbränning, men också större kolbitar. Fördelningen tyder också på att partiklarna minskade i storlek över tid då massandelen mellan 355  $\mu m$  och 600  $\mu m$  minskade med uppehållstid medan den mellan 250  $\mu m$  och 355  $\mu m$  ökade.

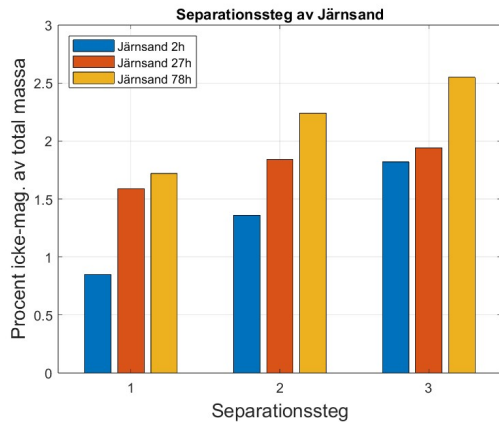


Figur 5. Partikelstorleksfördelningen för 2, 27 och 78 timmars Järnsand.

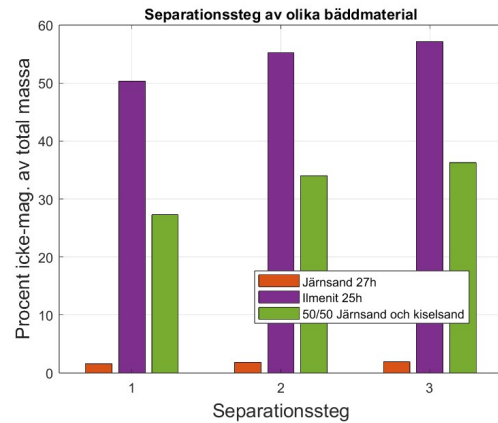
## 7.4 Magnetisk separation

Färsk Järnsand uppvisade i stort sett ingen magnetism och gav försumbart lite magnetiskt material. För de använda proverna var detta förhållande omvänt och de ickemagnetiska fraktionerna var mycket små. Figur 6a visar att andelen icke-magnetisk massa ökar med uppehållstiden, men trots det uppnår den ickemagnetiska fraktionen aldrig mer än 3 viktprocent efter tre separationssteg. Detta innebär att i stort sett allt bäddmaterial går att separera och återcirkulera redan efter två timmar i pannan. Det är dock möjligt att den ickemagnetiska fraktionen skulle vara större om ett annat bränsle än biomassa användes, exempelvis sopor, eftersom askinnehållet kan variera. I figur 6b jämförs den separerade viktandelen av icke-magnetiskt material mellan ilmenit, Järnsand, och den 50/50 viktprocentiga Järnsand-kiselsandblandningen. Figuren visar att mer än hälften av ilmenit med 25 timmars uppehållstid är icke-magnetiskt medan 27-timmars Järnsand har en icke-magnetisk andel på under 5 procent. Den stora skillnaden i magnetisk viktandel mellan ilmenit- och Järnsandprovet tyder på att Järnsand magnetiseras snabbare än ilmenit i pannan. Av figur 6b framgår även att mer än 60 procent av det blandade Järnsand-kiselsandprovet är magnetiskt separerbart. Detta innebär att en effektiv separation av Järnsand från kiselsand och aska är möjlig, förutsatt att kiselsanden inte magnetiseras inne i pannan. Järnsand är även betydligt mer magnetiskt separerbart än ilmenit, vilket bör medföra att separation av Järnsand är betydligt enklare och kräver mindre magneter.

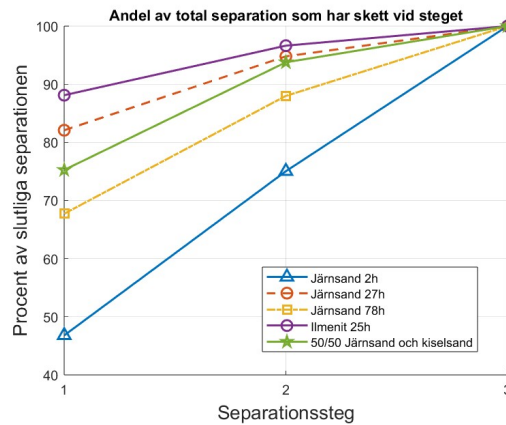
Om den slutliga separationsgraden efter tre steg antas vara ett totalt separerat prov, kan andelen av separation som sker i varje steg representeras som en andel av den totala separationen. På så sätt kan betydelsen av varje separationssteg kvalitativt avgöras. Figur 6c visar en sådan graf, som indikerar att det framför allt är Järnsand med 2 timmars uppehållstid som kräver flera steg för fullständig magnetisk separation. Efter första separationssteget har mindre än hälften av den totala separationen skett, jämfört med 78-timmarsprovet som ger nästan 70 procent i samma separationssteg. Detta kan bero på att proven med lägre uppehållstid generellt är mindre magnetiska, vilket innebär att skillnaden mellan magnetisk och ickemagnetisk fraktion minskar.



(a) Viktprocent av den icke magnetiska fraktionen av Järnsand prover med uppehållstider av 2, 27 och 78 timmar.



(b) Viktprocent av den icke magnetiska andelen av 27 timmars Järnsand, 25 timmars Ilmenit och 25 timmars Järnsand-kisesandblandning.

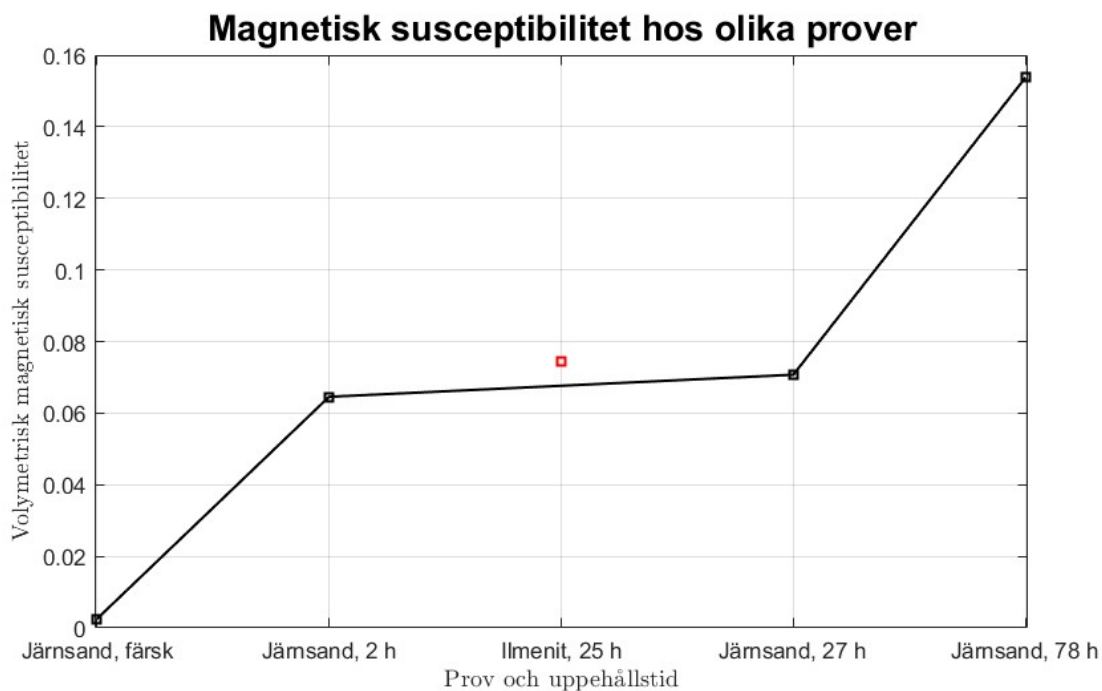


(c) Andel av den slutliga separationen plottad mot antal separationssteg.

Figur 6. Sammanfattning av resultat från magnetseparations experiment. Alla grafer har antal separations steg som x-axel. (a): Viktprocent av den icke magnetiska fraktionen av Järnsand med olika uppehållstider. (b): Jämförelse av magnetseparations resultat mellan olika bäddprover med liknande uppehållstider i pannan. (c): Separations andel av icke magnetsikt fraktion som sker i varje steg representerad som andel av det totala separationen.

## 7.5 Magnetisk Susceptibilitet

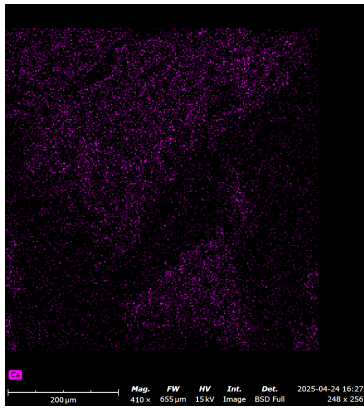
Resultat från mätningarna av den magnetiska susceptibiliteten hos olika prover framgår i figur 7. För järnsanden genomfördes mätningarna på den magnetiska fraktionen för alla prov utom färsk Järnsand. Notera att susceptibiliteten ökar kraftigt under driften, med en faktor 25 två timmar efter införseln, och en faktor ca 60 efter 78 timmar i pannan gentemot färsk Järnsand. Det bör därför redan tidigt efter införseln vara möjligt att magnetiskt separera Järnsand från aska. Det bör även noteras att susceptibiliteten framförallt ändras mellan färsk järnsand och 2h samt mellan 27 h och 78 h. I tidsintervallet mellan 2h och 27h kan en betydligt mindre ändring i susceptibilitet observeras. För ilmenit med 25 timmars uppehållstid är den magnetiska susceptibiliteten ungefär lika stor som för Järnsanden med 27 timmars uppehållstid.



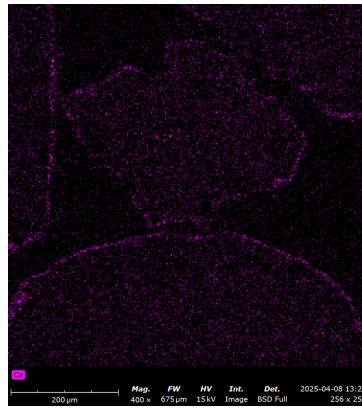
Figur 7. Graf över uppmätt magnetisk susceptibilitet för de fyra olika järnsandsproverna samt ilmenit (röd punkt).

## 7.6 SEM

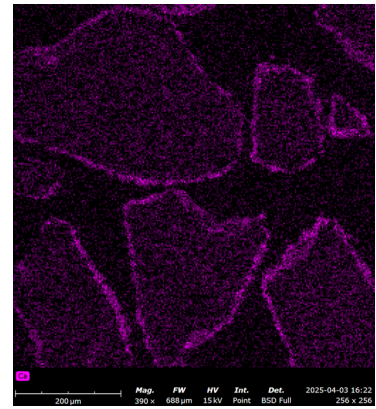
Undersökning av de olika Järnsandsproven med SEM visar tydligt asklagrets uppbyggnad. Efter två timmars drift är asklagret mycket tunt och svårt att urskilja; enstaka partiklar har tydligare lager men genomsnittstjockleken är mycket liten, ca 5-10  $\mu\text{m}$ . Efter 27 timmars drift är asklagret dock tydligt och efter 78 timmar är det mycket synligt även vid skanning med låg upplösning. Detta visas i figur 8. Asklagret tycks huvudsakligen kunna identifieras genom en tydlig koncentration av kalcium och i vissa fall magnesium, som inte återfinns i partikelns inre. Lagret innehåller även kisel och syre samt en mindre mängd järn. Se exempelvis figur 17 i bilaga B.3. Det senare är intressant eftersom det tyder på att järn migrerar ut i asklagret även när det är tämligen tjockt. Detta är viktigt eftersom det är järnet som är redoxaktivt, och en bibehållen järnkoncentration bör därför innebära att bädden förblir aktiv även efter längre uppehållstider.



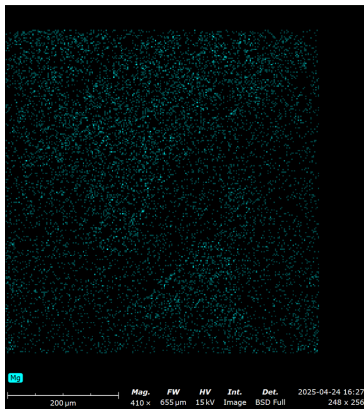
(a) Kalcium, 2 h (bearbetad)



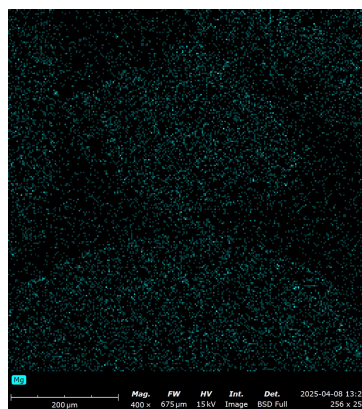
(b) Kalcium, 27 h



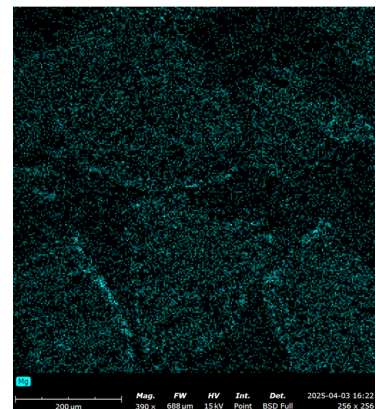
(c) Kalcium, 78 h



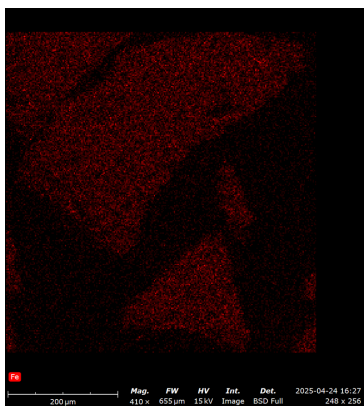
(d) Magnesium, 2 h



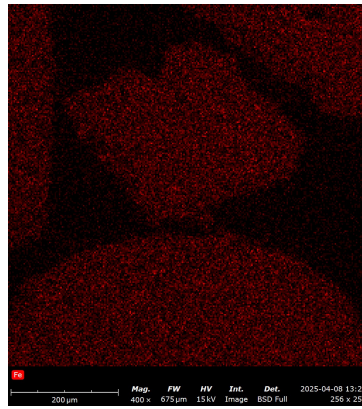
(e) Magnesium, 27 h



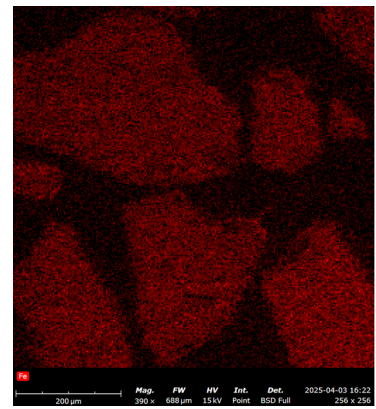
(f) Magnesium, 78 h



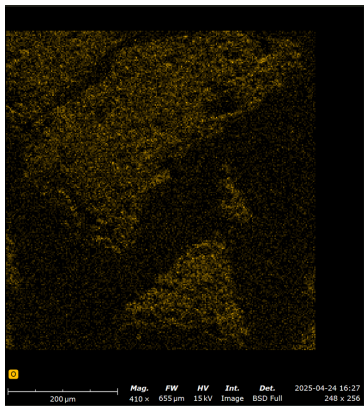
(g) Järn, 2 h



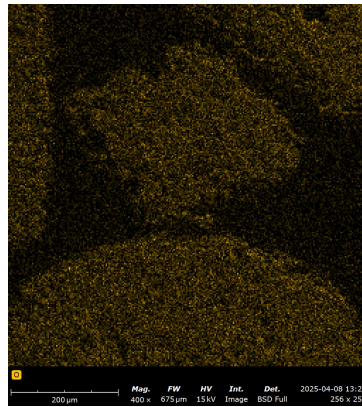
(h) Järn, 27 h



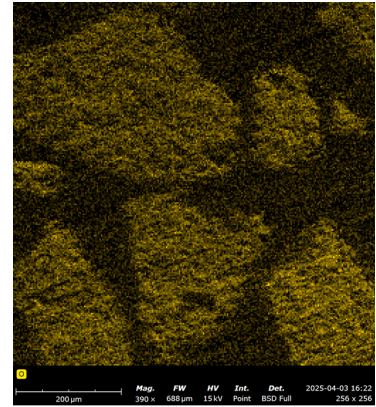
(i) Järn, 78 h



(j) Syre, 2 h



(k) Syre, 27 h



(l) Syre, 78 h

Figur 8. Utveckling av grundämnesprofiler hos Järnsand med olika uppehållstid i pannan. Figureerna för kalcium och magnesium påvisar en tydlig uppbyggnad av ett asklager. Bilderna visar partiklarnas tvärsnitt.

## 8 Diskussion

Separationsförsök och susceptibilitetsmätningar visar att Järnsand redan efter två timmar i pannan är tillräckligt magnetisk för att separation med hjälp av en magnetseparator ska vara möjlig. Detta är en väsentlig förbättring gentemot ilmenit, som trots en liknande magnetisk susceptibilitet efter 25 timmars drift inte kan magnetsepareras med arbetets utrustning. Detta kan möjligen bero på att ilmenit har betydligt högre densitet än järnsand, och därmed kräver en starkare attraktionskraft för att separeras trots jämförbar susceptibilitet. Järnsandens magnetism fortsätter även att öka under hela den tid sanden befinner sig i pannan. Samtidigt byggs ett lager av järn, magnesium och kalcium upp. Mätningarna visar även att lägsta fluidiseringshastighet för Järnsand är något större än för dagens bäddmaterial, ilmenit och kiselsand. Det kan därför bli nödvändigt att reducera partikelstorleken.  $U_{mf}$  för Järnsanden var dock relativt konstant oberoende av uppehållstiden. Bulkdensiteten ändrades inte heller märkvärt för Järnsand över uppehållstiden, men däremot var skillnaden mellan färsk och aktiverad Järnsand (2 timmars uppehålltid) märkbart större. Järnsandens bulkdensitet ligger mellan bulkdensiteterna för kiselsand och ilmenit för alla tagna prover.

### 8.1 $U_{mf}$ -mätningar

Jämförelse av fluidiseringshastighet för Järnsand och för de kommersiella alternativen ilmenit och kiselsand visar att järnsandens  $U_{mf}$  är betydligt högre. För att få en likvärdig  $U_{mf}$  skulle Järnsandens partikelstorlek behöva minskas, exempelvis genom krossning eller siktning. Fluidiseringshastigheten för Järnsand tycks inte vara beroende av uppehålltid, inom det tidsspann som studerats. Däremot tyder skillnaden mellan det siktade provet och de övriga på att partikelstorlek påverkar  $U_{mf}$ , vilket är väntat.

#### 8.1.1 $U_{mf}$ -mätning av färsk Järnsand

Under  $U_{mf}$ -mätningarna uppstod en del svårigheter med färsk Järnsand. Vid det första fluidiseringsförsöket med det färska provet skedde ingen fluidisering, och figur 4a visar därför ett upprepat försök med samma prov. Svårigheterna kan troligen förklaras av Järnsandens komplexa morfologi, som orsakas av framställningsprocessen. Den Järnsand som användes för detta försök framställs genom vattenkyllning av flytande slagg, vilket ger ett så hastigt temperaturfall att den flytande slaggens amorfa struktur bevaras vid stelningen. Omstruktureringens kinetik är starkt försvagad vid låga temperaturer, trots att omvandlingen är termodynamiskt gynnsam, och partiklarna bevaras därmed i ett metastabilt tillstånd. När partiklarna värms upp till 850 °C ökar jonernas rörlighet och den amorfa strukturen kan övergå till en mer stabil kristallin form.

#### 8.1.2 Analytiskt resultat

Avvikelsen i den analytiskt uppskattade minsta fluidiseringshastigheten understryker nödvändigheten av att genomföra fysiska experiment. Den stora avvikelsen beror bland annat på att särskilda krav för att nyttja ekvationen troligtvis inte uppfylls. För Wen och Yus korrelation ska exempelvis Sauters medeldiameter användas, men i detta fall användes den uppskattade medeldiametern från siktningen. Partiklarna är dessutom inte sfäriska, och eftersom siktningen bara

sorterar partiklar i ett tvådimensionellt plan kan avlånga partiklar passera genom en maskvidd som är mindre än partikelns längsida. Geometriska komplikationer så som detta och hålrum i partiklarna kompenseras i Erguns ekvation genom fluidfraktion och ekvivalent sfärdiameter. Emellertid är dessa svåra att uppskatta, och är troligtvis inte bara parametrar som varierar från partikel till partikel, utan även sådana som kan variera vid uppvärmningen av Järnsand. Av dessa orsaker, samt att Erguns ekvation inte är väl anpassad till höga partikeldensiteter, utelämnas någon analytisk beräkning av  $U_{mf}$  med denna.

## 8.2 Magnetism

Att Järnsand snabbt magnetiseras vid de förhållanden som råder i en förbränningspanna skulle kunna härledas till interna förändringar i järnjonernas laddning och omgivande joner. Färsk Järnsand består huvudsakligen av en amorf fraktion samt fajalit. När fajaliten hettas upp i en syrerik miljö oxideras den fullständigt till hematit. Hematit är magnetiskt och syrebärande. Detta skulle kunna förklara den kraftiga ökningen av magnetisk susceptibilitet som uppmätts även efter kort uppehållstid. Ökningen vid 78 timmars uppehållstid i pannan kan bero på att asklagret minskar tillgången till syre, vilket skulle kunna sänka oxidationsgraden i partikelns kärna [11]. Denna partiella oxidation skulle då kunna leda till att magnetit bildas istället för hematit. Magnetit är mer magnetisk än hematit[30], och omvandlingen skulle därmed kunna förklara ökningen av magnetisk susceptibilitet vid 78 timmars drift. Därför skulle det också vara intressant för fortsatt forskning att genomföra röntgendiffraktion av de olika proverna för att kvalitativt avgöra fördelningen över olika oxidationstal och strukturer, och hur denna ändras över tid. Detta skulle då även kunna ge en bättre bild över Järnsandens magnetiska egenskapers utveckling över tid.

Mätningar av magnetisk susceptibilitet visar att ilmenit har ungefär lika stor susceptibilitet som Järnsand efter 25-27 timmars drift, men trots detta går en stor andel av ilmeniten inte att avskilja med den tillgängliga separatoren. Detta illustreras även i figur 6b. Figur 6 indikerar även att Järnsand magnetiseras på kortare tid än ilmenit. En tidigare studie [31] visade även att ilmenit kräver drift under hela 11 dagar för att uppnå liknande magnetisk separationsgrad som här uppnåddes för Järnsand efter två timmars uppehållstid. Det är möjligt att en högre separationsgrad skulle kunna uppnås för ilmenit med en starkare magnet. Orsaken till de stora skillnaderna över tid är troligen partiklarnas sammansättning, men eftersom susceptibiliteten var likvärdig efter 25-27 timmars drift bör denna faktor inte vara orsaken till skillnaden i separationsgrad för dessa prov. I detta fall kan istället den stora skillnaden i densitet vara avgörande, eftersom tyngre partiklar kräver en starkare attraktionskraft för att separeras ut.

## 8.3 Asklager

Partiklarnas asklager analyserades med svepelektronmikroskop. Asklagret byggs upp kontinuerligt över tid och består primärt av kalcium från bränslet samt små lager av magnesium och järn som tros komma från själva Järnsanden. Särskilt efter 78 timmars drift (figur 8c) är lagret mycket synligt, framförallt genom uppbyggnaden av ett kalciumskikt. Asklagrets effekt på den syrebärande förmågan har inte studerats i detta arbete, men har i tidigare forskning visats leda till ökad reaktivitet, åtminstone vid relativt korta drifttider [10]. Detta är positivt eftersom partiklarna från 78h-provet, som har tjocka asklager, fortfarande är magnetiska. Det går därför inte att separera partiklar med ett kraftigt asklager från övriga bäddpartiklar med magnetseparation, vilket hade varit önskvärt om askan försämrat OCAC-effekten. Möjligen skulle det, om ökningen

av magnetisk susceptibilitet fortsätter när drifttiden förlängs, vara möjligt att med en svagare magnet separera ut de mest magnetiska partiklarna och förkasta dem. Om ingen försämring av reaktiviteten sker är detta dock inte nödvändigt.

#### 8.4 Agglomeration

Den färska Järnsanden uppvisade en tendens till agglomeration under det första fluidiseringsförsöket vid hög temperatur. Detta problem uppstod inte med använd Järnsand eller vid en upprepade körning av den färska Järnsanden, vilket tyder på att agglomerationsrisken framförallt uppstår vid den första upphettningen. Då det storskaliga försöket i Chalmers kraftcentral [10] inte uppvisade några av dessa problem kan detta dock vara en effekt av den experimentella uppställningen, som inte utgör någon större risk vid industriell skala. Detta är en tydlig fördel gentemot kiselsand, som agglomererar med oönskade ämnen i bränslet och då skapar stora partiklar som måste sorteras ut. Denna i huvudsak fördelaktiga egenskap har dock en baksida, eftersom det kan innebära att Järnsanden inte samlar upp föroreningar och skadliga ämnen lika effektivt som kiselsanden. Detta skulle då kunna leda till att ytterligare tillsatser i bädden eller andra åtgärder, exempelvis rökgasrenare, behövs för att se till att oönskade ämnen som t.ex. tungmetaller inte avges i rökgaserna. Resultaten från partikelstorleksfördelningen, som framgår i figur 5, visar att järnsandens beteende är det omvända mot kiselsand; större partiklar av Järnsand nöts ner med ökad uppehållstid så att medeldiametern minskar. Denna slutsats stöds även av observationer från SEM-studier, där asklagrets tjocklek är märkbart ojämn. Se exempelvis figur 8c och figur 17 i bilaga B.3. Effekten är relativt liten, men värd att notera då agglomeration är ett vanligt förekommande problem hos kiselsand.

## 9 Slutsatser

Syftet med arbetet var att undersöka några viktiga egenskaper för Järnsand inför en möjlig implementering som bäddmaterial i fluiderade pannor, samt jämföra mot de material som används idag. Mot bakgrund av detta kan fyra huvudsakliga slutsatser gällande järnsandens användning dras ur de genomförda försöken:

- Magnetseparation är möjlig, men först efter att Järnsanden aktiverats i pannan.
- Den magnetiska susceptibiliteten och därmed separationsmöjligheterna ökar under hela drifttiden.
- Partikelstorlek minskar med upphållstid men bulkdensitet och  $U_{mf}$  är relativt konstant.
- Ett tydligt asklager av huvudsakligen kalcium med en viss mängd magnesium och järn byggs upp under drifttiden.

Jämförelser med dagens material visar att Järnsand ligger mellan kiselsand och ilmenit i bulkdensitet, närmare kiselsand än ilmenit. Fluidiseringshastigheten var dock högre än för de redan använda materialen, och därmed kan en lägre partikelstorlek vara nödvändig jämfört med övriga bäddmaterial för att järnsand ska kunna användas i existerande anläggningar.

Den största skillnaden vid drift av en industriell panna med Järnsand istället för kiselsand eller ilmenit är att järnsanden är magnetiskt separerbar, vilket tillåter återcirkulering av bäddmaterialet och därmed längre uppehållstider. Detta kan genomföras utan större ändringar av pannan, då det i sådana fall är utlopp och inlopp som kräver modifikation och inte själva eldstaden. Denna återcirkulation kan ske tills partiklarna nöts ner till en nivå där de bärs ut av rökgasen, dvs där separation i den första cyklonen misslyckas. Detta till skillnad från kiselsand, där agglomeration är den begränsande faktorn för maximal uppehållstid.

Sammantaget visar undersökningarna att användning av järnsand i existerande anläggningar bör vara fullt möjligt. Järnsanden har också både praktiska och miljömässiga fördelar jämfört med ilmenit: magnetseparation är enklare att genomföra, materialet är i dagsläget billigare och enklare att skala upp produktionen av, och användning av järnsand som bäddmaterial ökar värdet på en rest- eller biprodukt, vilket är positivt ur hållbarhetssynpunkt.

## 10 Möjlig vidare forskning

I ett framtida projekt hade det varit intressant att utföra en röntgendiffraktionsanalys av både färsk och använd Järnsand. Detta hade kunnat ge svar på vilka järnoxider som finns i partiklarna och hur sammansättningen ändras med uppehållstid, och förhoppningsvis en tydligare förklaring till förändringen av den magnetiska susceptibiliteten under Järnsandens uppehållstid i pannan. Det skulle dessutom vara fördelaktigt att undersöka hur länge Järnsanden kan återcirkuleras innan den deaktiveras och de syrebärande egenskaperna försämras eller försvinner helt som en konsekvens av asklagrets uppbyggnad. Slutligen hade det varit intressant att använda Järnsand i fluidbäddsförbränning med ett annat bränsle, exempelvis hushållsavfall, och utvärdera det som gjorts i detta projekt för jämförelse.

## Referenser

- [1] International Energy Agency (IEA). *World Energy Mix (2022)*. URL: <https://www.iea.org/world/energy-mix>.
- [2] Smart City Sweden. *Waste to Energy*. URL: <https://smartcitysweden.com/focus-areas/energy/waste-to-energy/>.
- [3] Avfall Sverige. *Avfall som behandlas med energiåtervinning*. URL: <https://www.avfallsverige.se/fakta-statistik/avfallsbehandling/energiatervinning/avfall-som-behandlas-med-energiatervinning/>.
- [4] Felicia Störner, Fredrik Lind och Magnus Rydén. “Oxygen Carrier Aided Combustion in Fluidized Bed Boilers in Sweden - Review and Future Outlook with Respect to Affordable Bed Materials”. I: *Applied Sciences* 11(17) (2021). DOI: <https://doi.org/10.3390/app11177935>.
- [5] M. Horio. “1 - Overview of fluidization science and fluidized bed technologies”. I: utg. av Fabrizio Scala. Woodhead Publishing, 2013, s. 3–41.
- [6] I. Gulyurtlu m. fl. “9 - Pollutant emissions and their control in fluidised bed combustion and gasification”. I: *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*. Utg. av Fabrizio Scala. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, 2013, s. 435–480. ISBN: 978-0-85709-541-1. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098801.2.435>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095411500091>.
- [7] Lars-Ove Lång m. fl. *Fördjupad utvärdering av Grundvatten av god kvalitet 2023*. Rapport 39-1426/2021. SGU, 2022. URL: <https://resource.sgu.se/dokument/publikation/sgurapport/sgurapport202213rapport/s2213-rapport.pdf>.
- [8] Chalmers. Slaggprodukter som ersättning för kiselsand i förnybar energiomvandling - analys av magnetisk känslighet och fluidiseringssegenskaper.
- [9] Ming-Yen Wey och Chou-Liang Lin. “Effects of high temperature and combustion on fluidized material attrition in a fluidized bed”. I: *Korean J. Chem. Eng.* 20 (2003), s. 1123–1130. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02706947>.
- [10] Felicia Störner m. fl. “Oxygen carrier aided combustion with copper smelter slag as bed material in a semi-commercial wood-fired circulating fluidized bed”. I: *Biomass and Bioenergy* 193 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107565>.
- [11] Victor Purnomo m. fl. “Performance of iron sand as an oxygen carrier at high reduction degrees and its potential use for chemical looping gasification”. I: *Fuel* 339 (2023), s. 127310. ISSN: 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127310>.
- [12] Henrik Thunman m. fl. “Using an oxygen-carrier as bed material for combustion of biomass in a 12-MWth circulating fluidized-bed boiler”. I: *Fuel* 113 (2013), s. 300–309.
- [13] Angelica Gyllén. “Oxygen carrier aided combustion: Implementation of oxygen carriers to existing industrial settings”. Diss. Chalmers tekniska högskola, 2019. ISBN: 978-91-7905-124-2.
- [14] Fredrik Lind, Angelica Corcoran och Henrik Thunman. “Validation of the oxygen buffering ability of bed materials used for OCAC in a large scale CFB boiler”. I: *Powder Technology* 316 (2017). Fluidization for Emerging Green Technologies, s. 462–468. ISSN: 0032-5910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.048>.

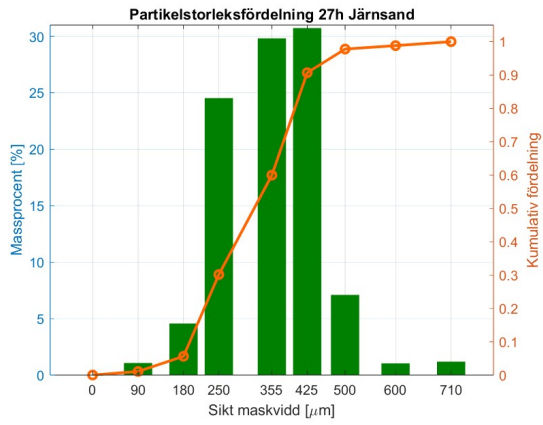
- [15] A.A. Khan m. fl. “Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies”. I: *Fuel Processing Technology* 90.1 (2009), s. 21–50. ISSN: 0378-3820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.012>.
- [16] Lars-Ove Lång m. fl. “E.ON gets grant for method for operating a fluidized bed boiler using ilmenite particles”. I: (2023). URL: <https://www.power-technology.com/data-insights/e-on-gets-grant-for-method-for-operating-a-fluidized-bed-boiler-using-ilmenite-particles/>.
- [17] Subasinghe m. fl. “Global distribution, genesis, exploitation, applications, production, and demand of industrial heavy minerals.” I: *Arab J Geosci* 15 (2022), s. 14.
- [18] Tian Hongyu m. fl. “Comprehensive Review on Metallurgical Recycling and Cleaning of Copper Slag.” I: *Resources, Conservation and Recycling* 168 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105366>.
- [19] Sofia Lidelöw m. fl. “Leaching behaviour of copper slag, construction and demolition waste and crushed rock used in a full-scale road construction”. I: *Journal of Environmental Management* 204 (2017), s. 695–703. ISSN: 0301-4797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.032>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479717308940>.
- [20] Hans Rosling, Ola Rosling och Anna Rosling Rönnlund. *Factfulness*. Sceptre (Hodder & Stoughton), 2018.
- [21] Naturvårdsverket. *Grundvatten av god kvalitet*. URL: <https://sverigesmiljomal.se/miljomalen/grundvatten-av-god-kvalitet/>.
- [22] Joseph Weygand m. fl. “Spatial Precision in Magnetic Resonance Imaging–Guided Radiation Therapy: The Role of Geometric Distortion”. I: *International Journal of Radiation Oncology\*Biophysics\*Physics* 95.4 (2016), s. 1304–1316. ISSN: 0360-3016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2016.02.059>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360301616002285>.
- [23] Robin Faust m. fl. “Magnetic properties of ilmenite used for oxygen carrier aided combustion”. I: *Fuel* 340 (2023), s. 127593. ISSN: 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127593>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123002065>.
- [24] Angelica Gyllén m. fl. “Magnetic separation of ilmenite used as oxygen carrier during combustion of biomass and the effect of ash layer buildup on its activity and mechanical strength”. I: *Fuel* 269 (2020), s. 117470. ISSN: 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117470>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120304658>.
- [25] D. Wang och L.-S. Fan. “2 - Particle characterization and behavior relevant to fluidized bed combustion and gasification systems”. I: *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*. Utg. av Fabrizio Scala. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, 2013, s. 42–76. ISBN: 978-0-85709-541-1. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098801.1.42>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095411500029>.

- [26] Shuyue Li m. fl. “Comparative analysis of particle density effects on initial fluidization in gas-solid fluidized beds”. I: *Chemical Engineering Journal* 477 (2023), s. 146966. ISSN: 1385-8947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146966>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894723056978>.
- [27] J.S. Dennis. “3 - Properties of stationary (bubbling) fluidised beds relevant to combustion and gasification systems”. I: *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*. Utg. av Fabrizio Scala. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, 2013, 77–148e. ISBN: 978-0-85709-541-1. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098801.1.77>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095411500030>.
- [28] Ray Cocco, Sb Karri och Ted Knowlton. “Introduction to Fluidization”. I: *Chemical Engineering Progress* 110 (nov. 2014), s. 21–29. URL: [https://www.researchgate.net/publication/290873097\\_Introduction\\_to\\_Fluidization](https://www.researchgate.net/publication/290873097_Introduction_to_Fluidization).
- [29] Seifollah Nasrazadani och Shokrollah Hassani. “Chapter 2 - Modern analytical techniques in failure analysis of aerospace, chemical, and oil and gas industries”. I: *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry*. Utg. av Abdel Salam Hamdy Makhlouf och Mahmood Aliofkhaezai. Butterworth-Heinemann, 2016, s. 39–54. ISBN: 978-0-08-100117-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100117-2.00010-8>.
- [30] Geosci. *Magnetic susceptibility physical properties*. URL: [https://gpg.geosci.xyz/content/physical\\_properties/magnetics\\_susceptibility\\_duplicate.html](https://gpg.geosci.xyz/content/physical_properties/magnetics_susceptibility_duplicate.html).
- [31] Elin Andersson m. fl. “Magnetisk separation av bäddmaterial för CO2 negativ el- och värmeproduktion”. Kandidatarbete. Chalmers University of Technology, 2018.
- [32] Boliden. *Järnsand*. URL: [https://www.boliden.com/globalassets/operations/products/by-products/jarnsand\\_produkblad\\_se5.pdf](https://www.boliden.com/globalassets/operations/products/by-products/jarnsand_produkblad_se5.pdf).

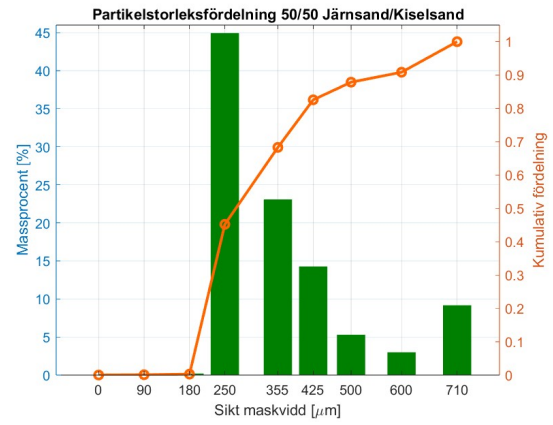
## A Magnetseparation

Tabell 4. Magnetseparationsdata

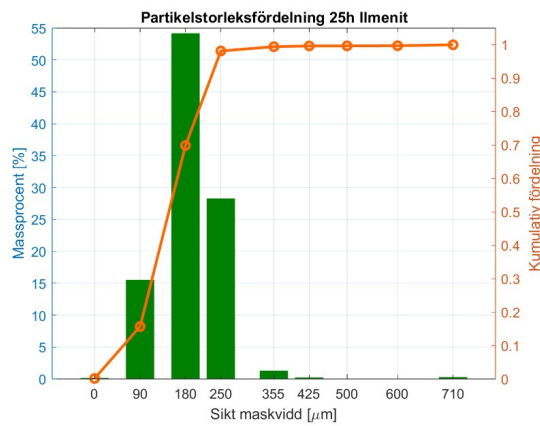
	JS 78h		JS 27h		JS 2h	
	Mag.	Non. mag.	Mag.	Non. mag.	Mag.	Non. mag.
Tot mass	217.8		323.9		496.4	
1	210.2	-	318	4.4	490.1	4.7
	208.4	-	316.4	5.5	487.4	10
	207.8	5.5	315.2	6.1	484.5	15.6
Fraktion	0.974215	0.025785	0.981015	0.018985	0.968806	0.031194
Tot mass	213.4		321.3		496.4	
2	205.9	3.9	316.3	3.9	489.9	4.4
	204.2	-	315	5.8	487	6.7
	203.5	5.5	313.1	6.1	484.7	8.3
Fraktion	0.973684	0.026316	0.98089	0.019110	0.983164	0.016836
Tot mass	207.5		319.2		493	
3	204.2	3.3	316.3	6.1	489.7	3.9
	200.7	4.6	310.5	6.3	487.4	6.3
	200.8	5	308.9	6.3	484.5	8.7
Fraktion	0.9757046	0.024295	0.980013	0.019987	0.982360	0.01764



(a) Järnsand 27h



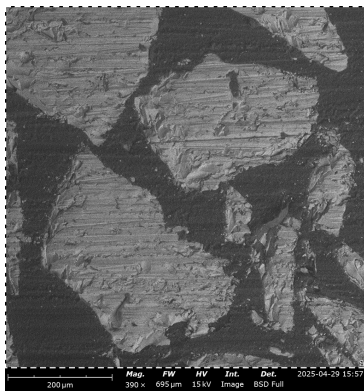
(b) 50/50 Järnsand/kiselsand



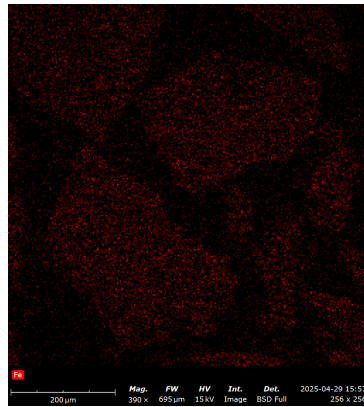
(c) Ilmenit 25h

Figur 9. Sikt diagram för Järnsandsproverna och Ilmenit

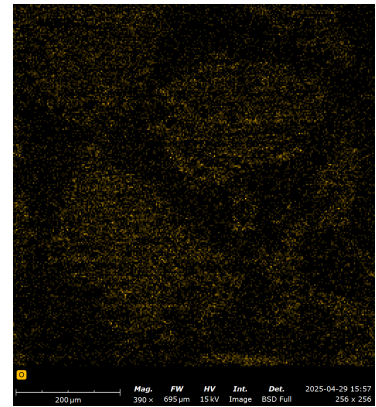
## B SEM-bilder



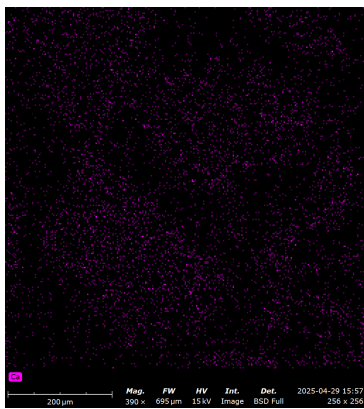
(a) Järnsand



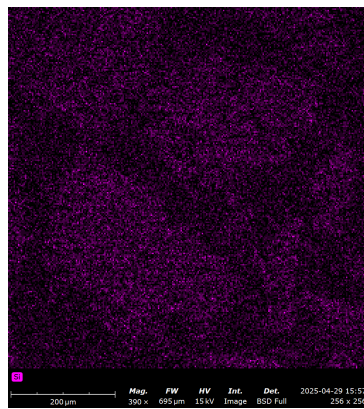
(b) Järn



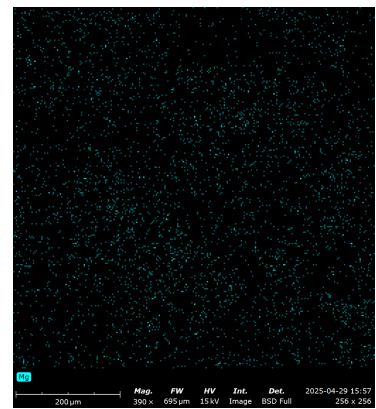
(c) Syre



(d) Kalcium



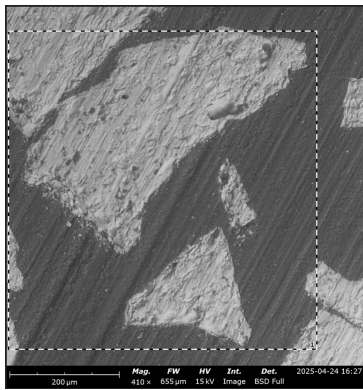
(e) Kisel



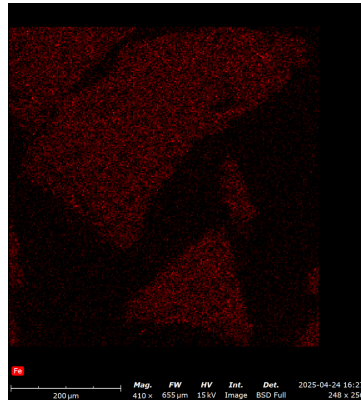
(f) Magnesium

Figur 10. SEM-bild samt ämnesfördelningar för färsk Järnsand.

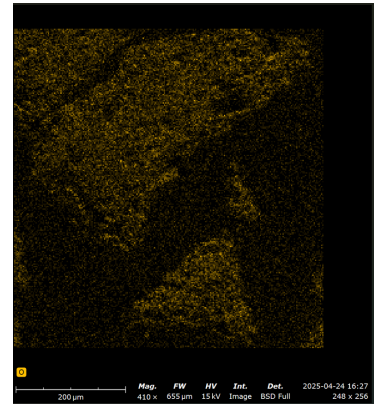
## B.1 2h



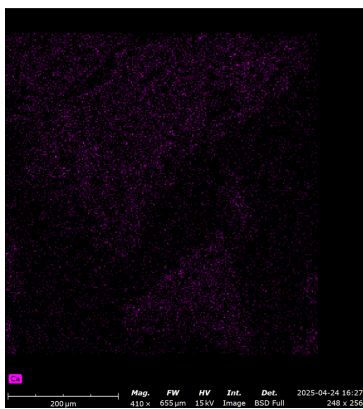
(a) Järnsand 2 h



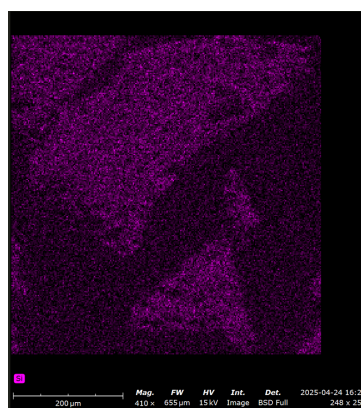
(b) Järn



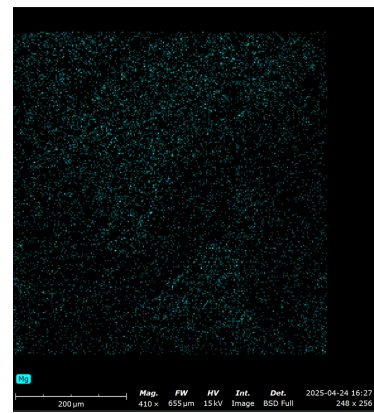
(c) Syre



(d) Kalcium

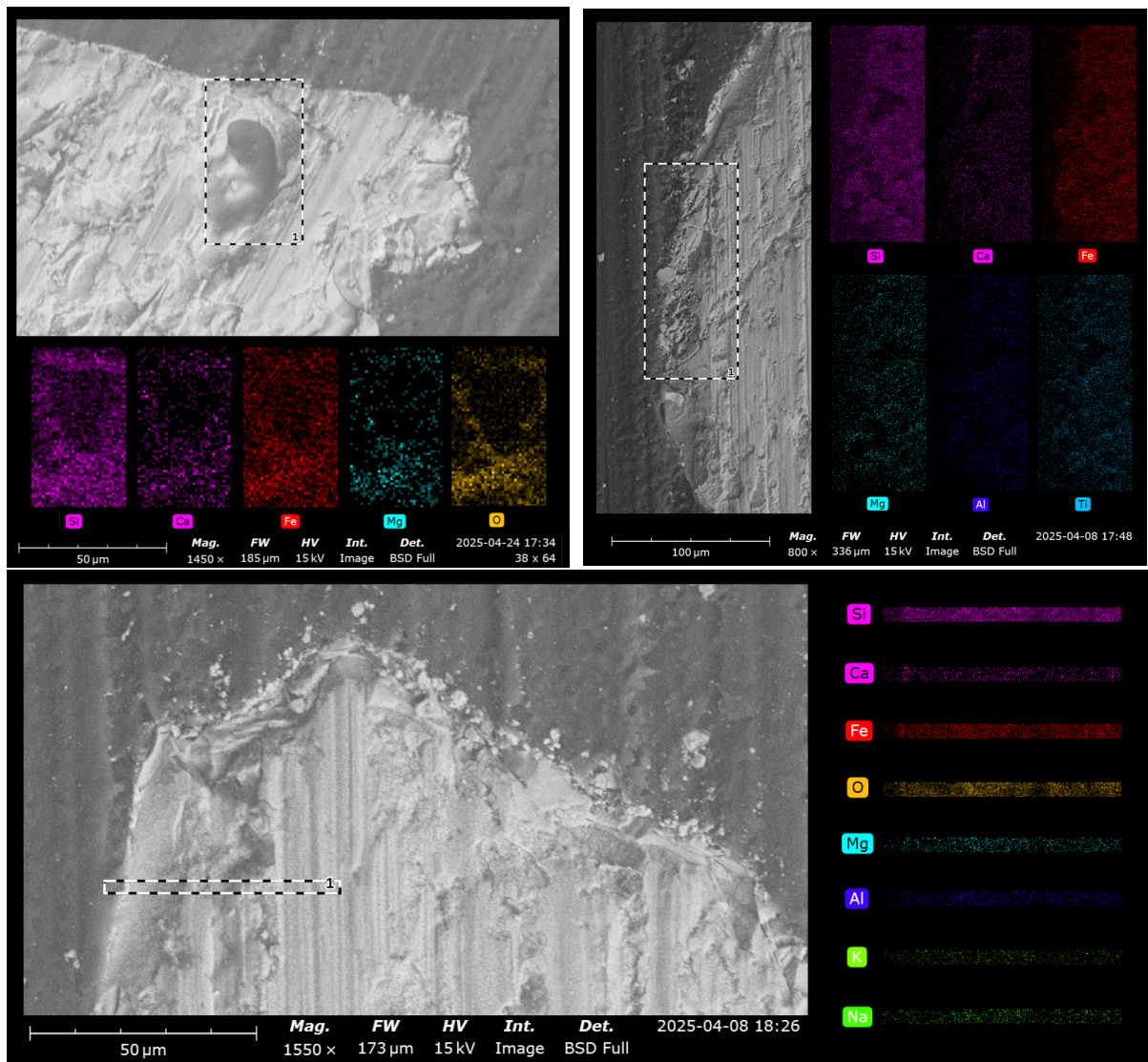


(e) Kisel



(f) Magnesium

Figur 11. SEM-bild av Järnsand med uppehållstid 2 h samt ämnesfördelningar. Samtliga med 410x förstoring och fokalbredd 655 mikrometer.

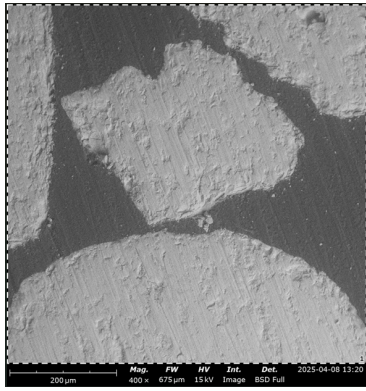


Figur 12. Detaljbilder av järnsand, 2 timmar. a) hål i en partikel samt ämnesfördelningar, förstoring 1450x, fokalvidd 185 mikrometer. b) ytterskikt samt ämnesfördelningar, förstoring 800x, fokalvidd 336 mikrometer. c) Snitt genom partikel, förstoring 1550x, fokalvidd 173 mikrometer, upplösning 256px.

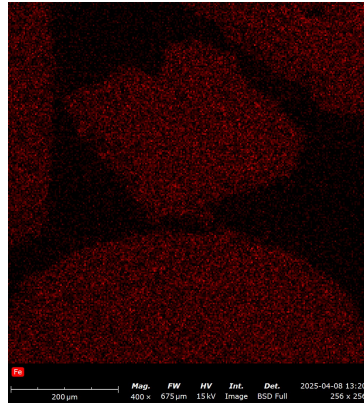
Detaljbilder av partiklar från tvåtimmarsprovet kan ses ovan. Asklaget är mycket litet, nästintill osynligt. Notera dock att själva partikeln tycks innehålla mindre mängder av både magnesium och titan. Det senare är särskilt intressant eftersom ilmenit, ett järn-titanmineral, redan används som bäddmaterial.

## B.2 27h

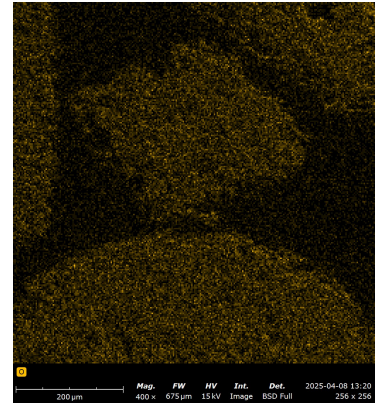
Efter 27 timmar finns ett synligt asklager av kalcium och en mycket svag ansamling av magnesium, som även finns i partikelns kärna. Asklaget är fortfarande så tunt att det är svårt att se på helpartikelbilder (figur 13), men vid detaljstudier framgår det tydligt (figur 15).



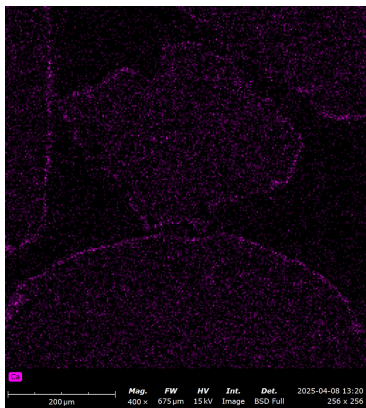
(a) Järnsand 27h



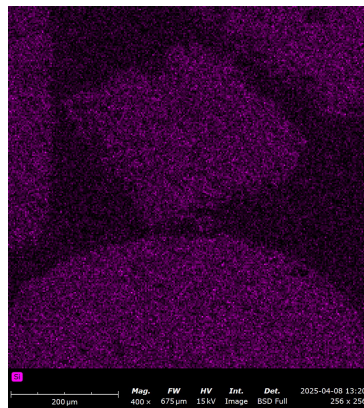
(b) Järn



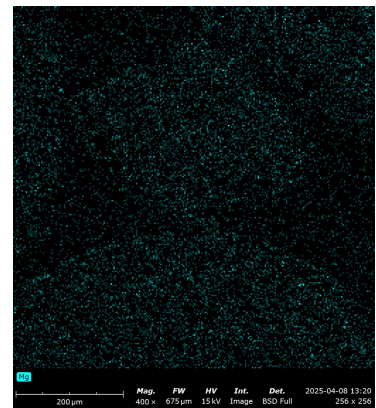
(c) Syre



(d) Kalcium

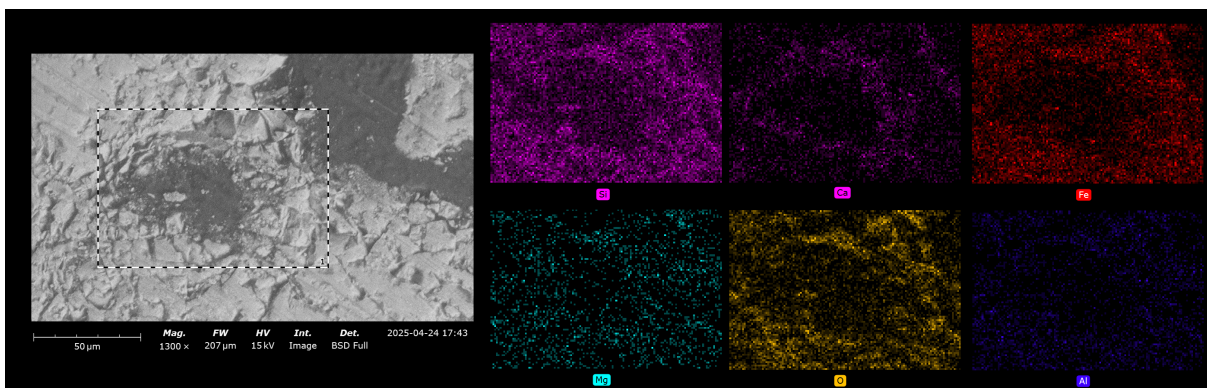


(e) Kisel

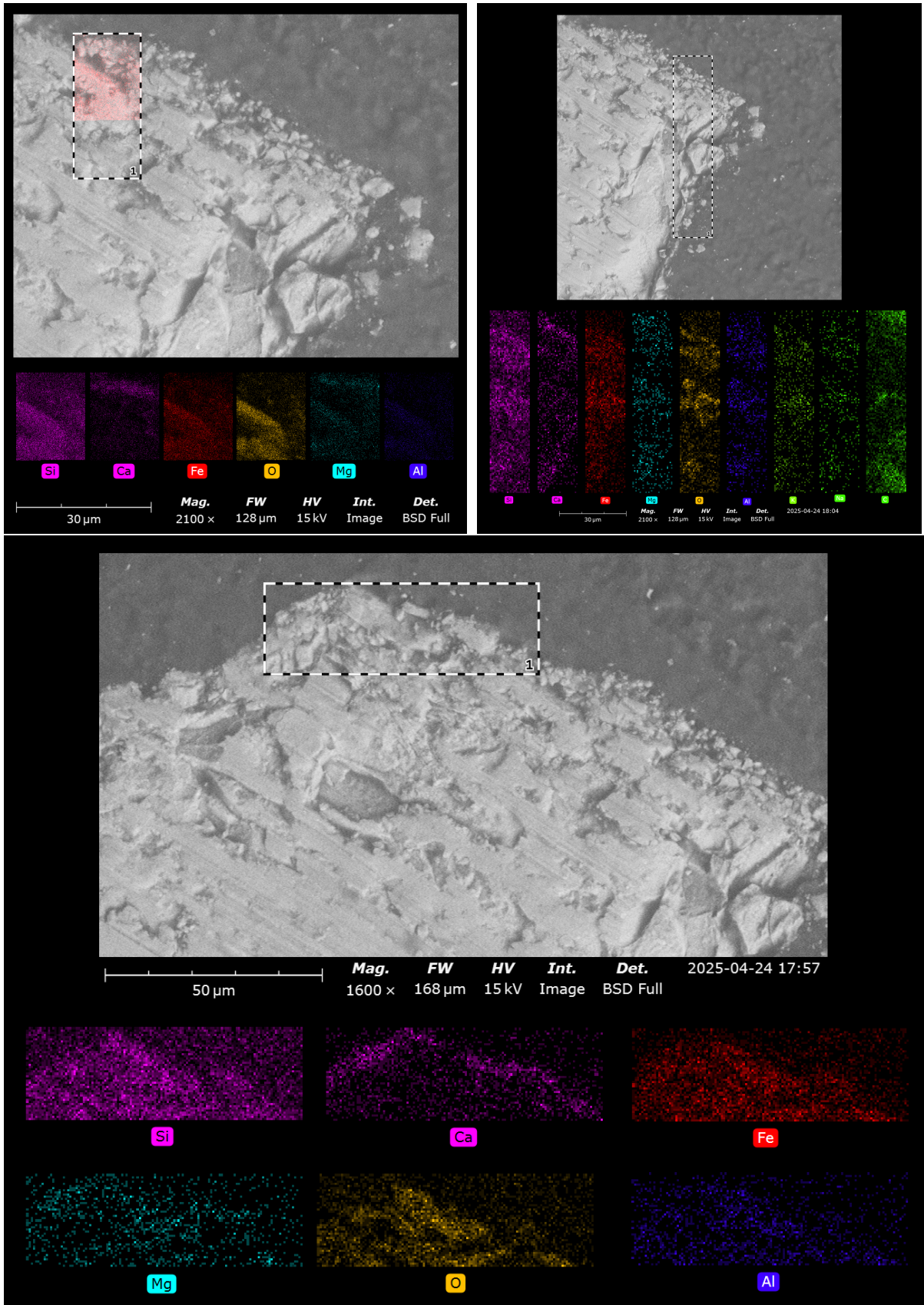


(f) Magnesium

Figur 13. SEM-bild av Järnsand med uppehållstid 27 h samt ämnesfördelningar. Samtliga 400x förstoring och fokalvidd 675 mikrometer.



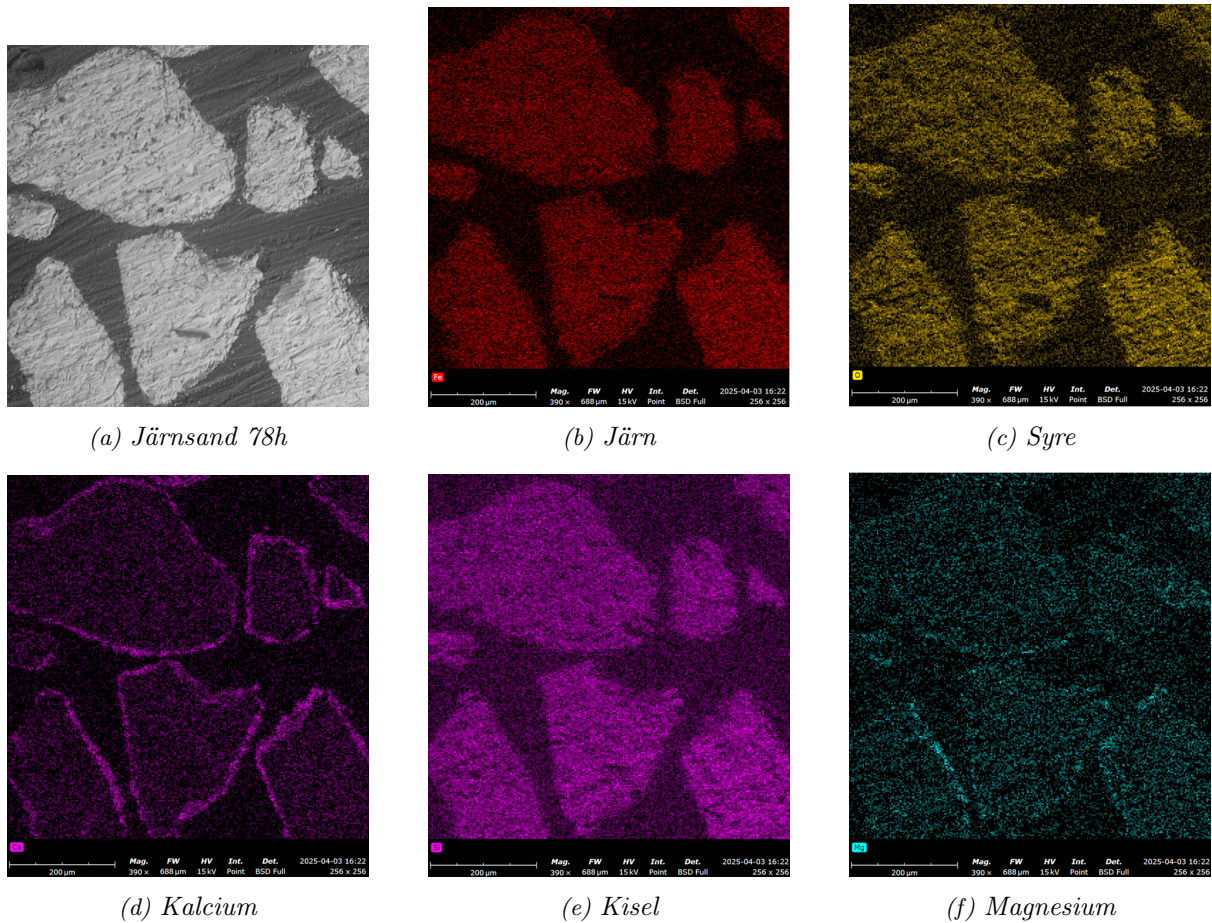
Figur 14. SEM-bild av ett hål i en partikel, Järnsand med uppehållstid 27 h, samt ämnesfördelningar. Förstoring 1300x, fokalvidd 207 mikrometer, upplösning 128x88px. Hålets diameter ca 50 mikrometer. Notera kalciumkanten kring hålet.



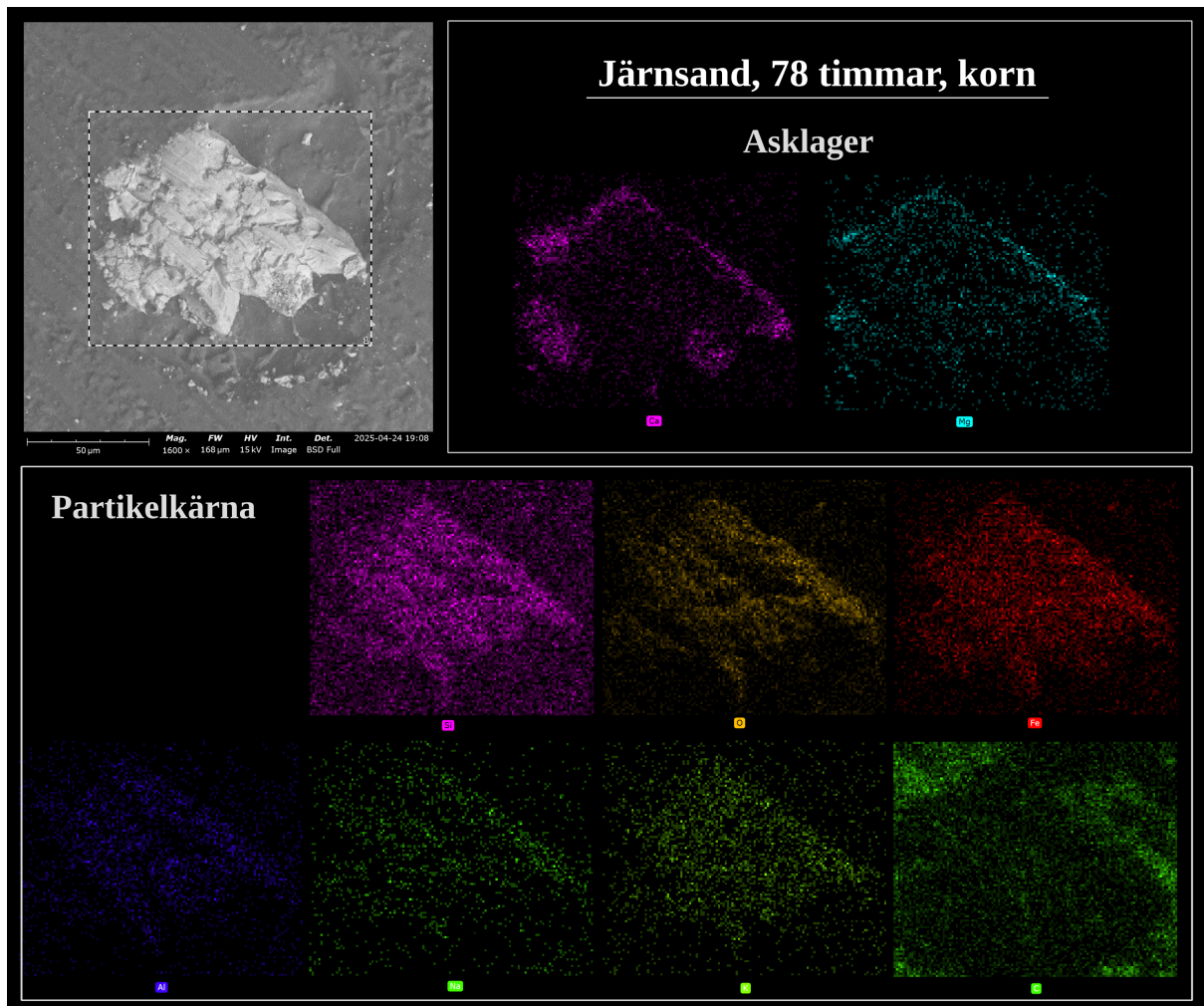
Figur 15. Detaljbilder av järnsand, 27 timmar, alla från samma partikel. Notera att skanningen i den första bilden avslutades manuellt eftersom resterande del inte bedömdes vara intressant. a, b) förstoring 2100x, fokalvidd 128 mikrometer, längsta dimension 256 resp. 128px. c) förstoring 1600x, fokalvidd 168 mikrometer, 128 x 43px.

### B.3 Järnsand 78 h

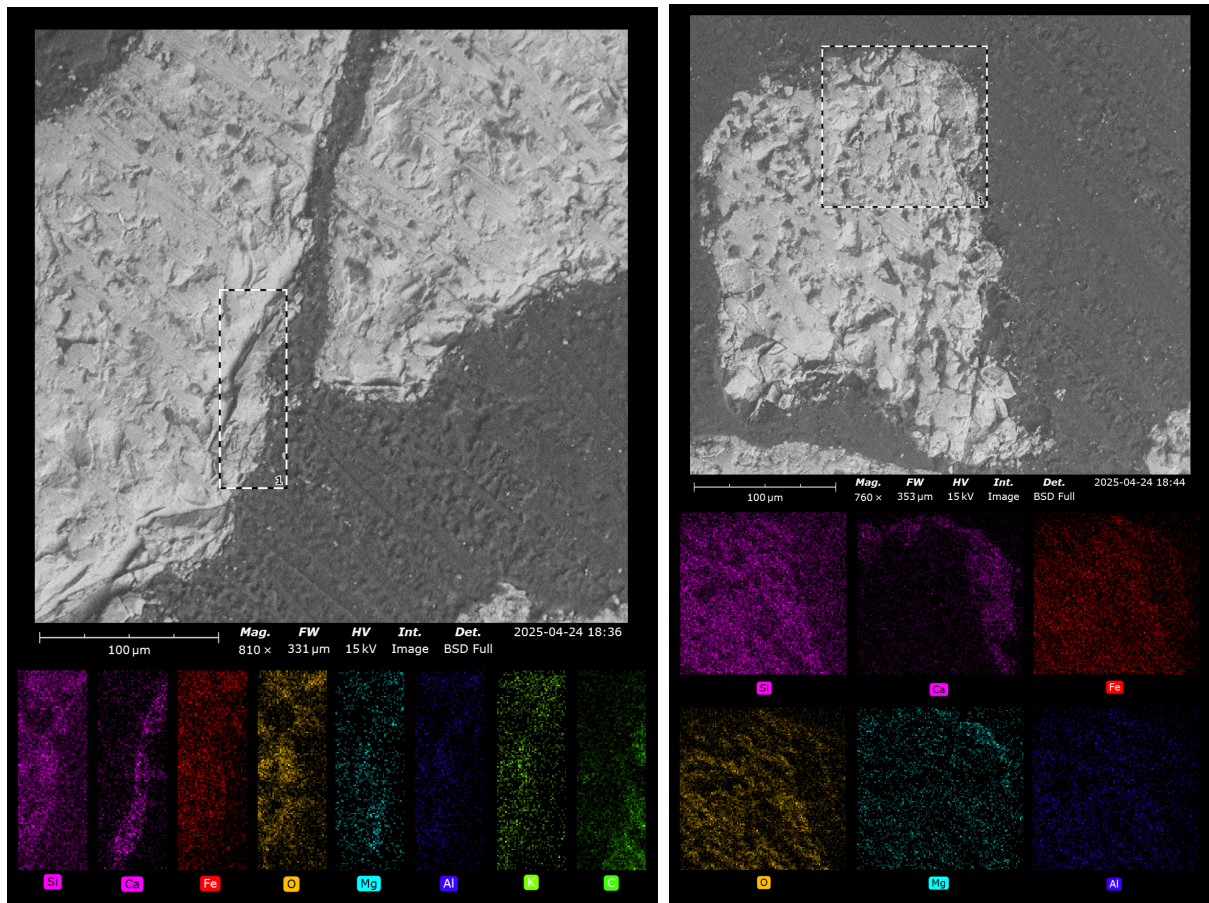
Efter 78 timmar i pannan är asklagret välutvecklat. Partiklarna har även fått en mer oregelbunden form jämfört med 27-timmarsprovet, och asklagrets tjocklek är ojämn, vilket kan tyda på att splittring skett.



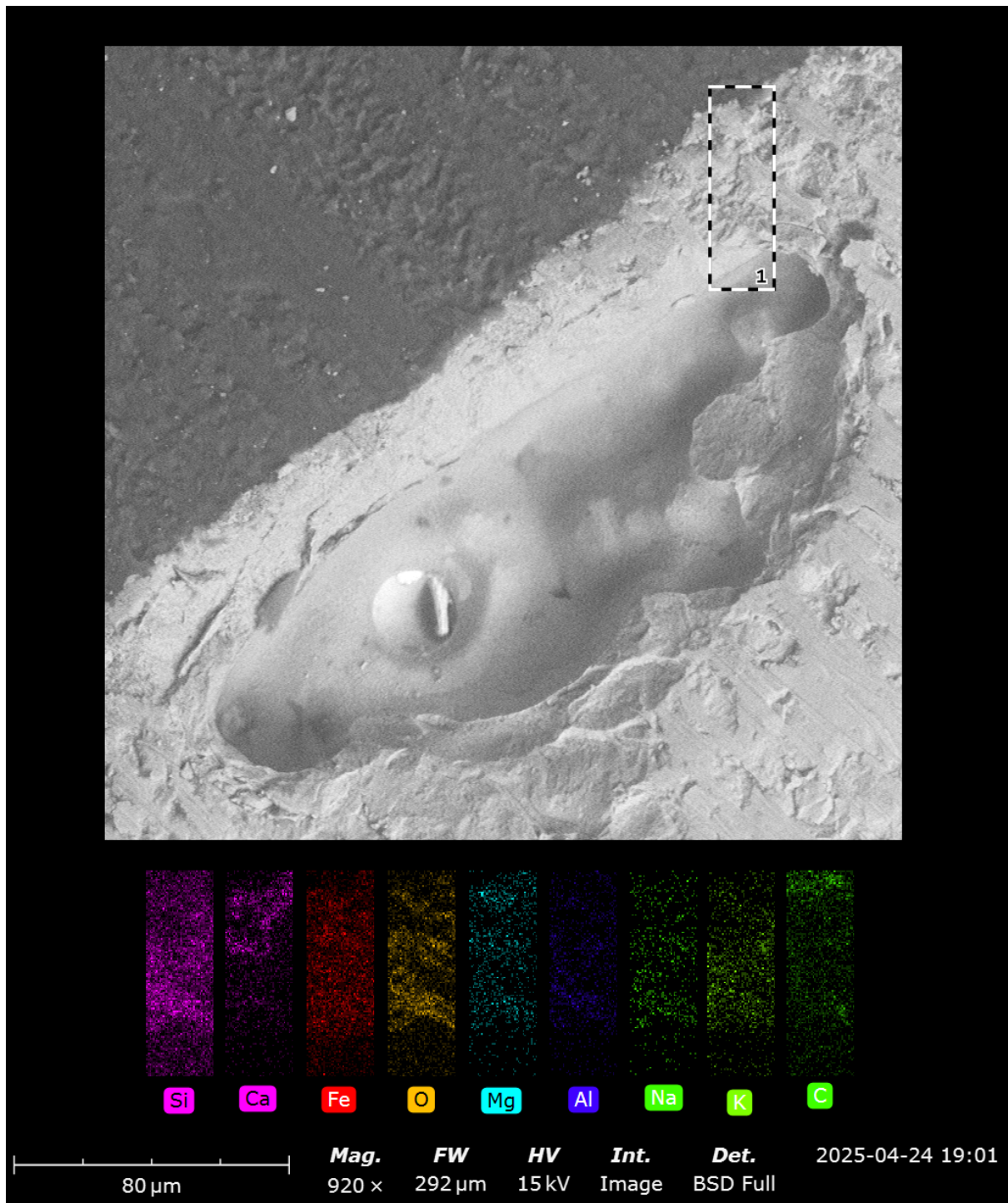
Figur 16. SEM-bild av Järnsand med uppehållstid 78 h samt ämnesfördelningar. Samtliga 390x förstoring och fokalvidd 688 mikrometer.



Figur 17. SEM-bild av mindre partikel, Järnsand med uppehållstid 78h, samt ämnesfördelningar. Förstoring 1600x, fokalvidd 168 mikrometer, upplösning 128 x 106px. Partikelns diameter ca 100 mikrometer.

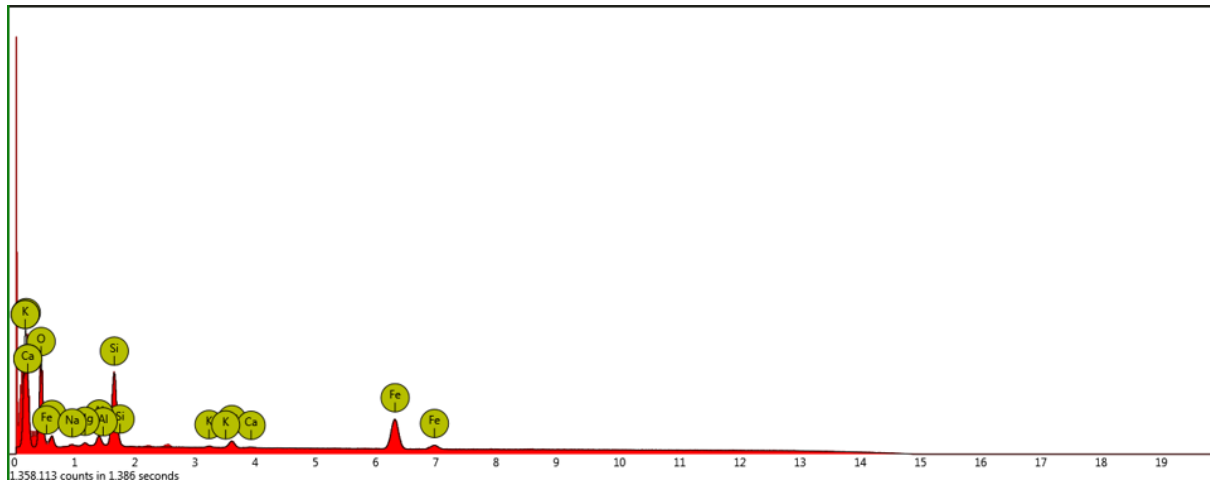


Figur 18. Detaljbilder av järnsand, 78 timmar. a) förstoring 810x, fokalvidd 331 mikrometer, 44x128 px. b) förstoring 760x, fokalvidd 353 mikrometer, 128x125px.

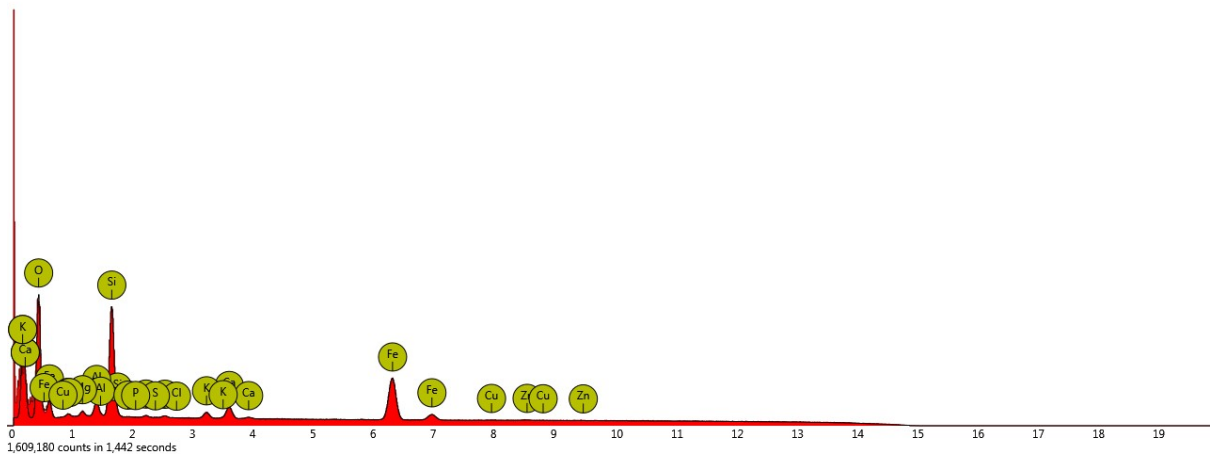


Figur 19. SEM-bild av ett hål i en partikel, Järnsand med uppehållstid 78 h, samt ämnesfördelningar. Förstoring 920x, fokalvidd 292 mikrometer, upplösning 42 x 128px. Hålets dimensioner ca 50 x 200 mikrometer.

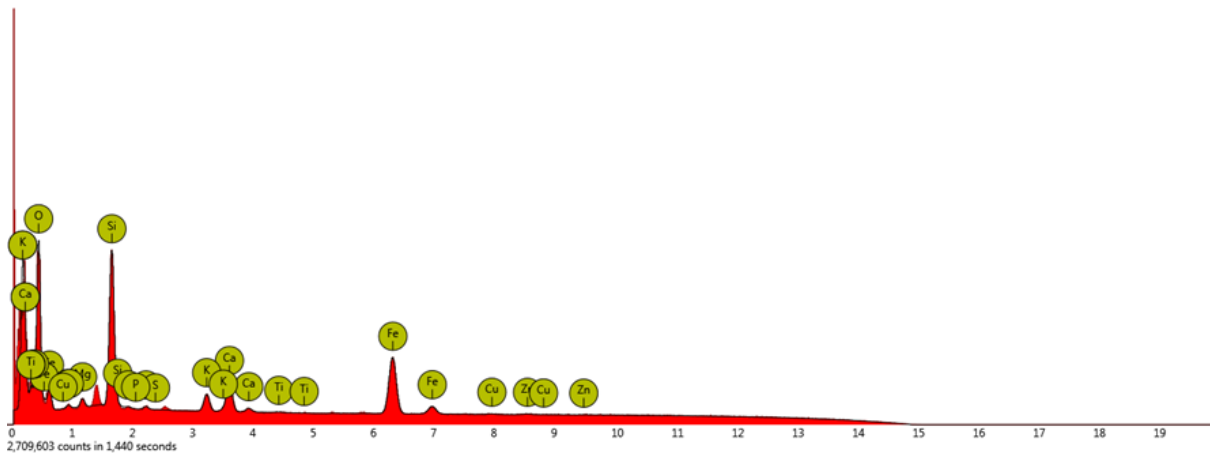
## B.4 spektrum



Figur 20. Järnsand 2 h spektrum



Figur 21. Järnsand 27 h spektrum



Figur 22. Järnsand 78 h spektrum

## C Experimentmatrix

Tabell 5. En detaljerad sammanställning av utförda mätningar i projektet.

<b>Experimentmatrix</b>	
<b>Utvärdering av partikelstorleksfördelning</b>	<b>Mätning av bulkdensitet</b>
Järnsand, färsk, magnetisk och icke-magnetisk fraktion	Kiselsand, "30kt", ca 300 $\mu\text{m}$
Järnsand, ca 2 h uppehållstid, magnetisk och icke-magnetisk fraktion	Järnsand, färsk, 200 $\mu\text{m}$
Järnsand, ca 27 h uppehållstid, magnetisk och icke-magnetisk fraktion	Järnsand, ca 2 h uppehållstid, magnetisk fraktion 710 $\mu\text{m}$ och neråt
Järnsand, ca 78 h uppehållstid, magnetisk och icke-magnetisk fraktion	Järnsand, ca 27 h uppehållstid, magnetisk fraktion, 300 $\mu\text{m}$
<b>Utvärdering av <math>U_{mf}</math></b>	Järnsand, ca 78 h uppehållstid, magnetisk fraktion 710 $\mu\text{m}$ och neråt
Kiselsand, färsk, 300 $\mu\text{m}$	Ilmenit, färsk
Järnsand, färsk, 200 $\mu\text{m}$	
	<b>Magnetseparation</b>
Järnsand, ca 2 h uppehållstid, magnetisk fraktion 710 $\mu\text{m}$ och neråt	Järnsand, ca 2 h uppehållstid
Järnsand, ca 27 h uppehållstid, magnetisk fraktion, 300 $\mu\text{m}$	Järnsand, ca 27 h uppehållstid
Järnsand, ca 78 h uppehållstid, magnetisk fraktion 710 $\mu\text{m}$ och neråt	Järnsand, ca 78 h uppehållstid
Ilmenit, färsk, osiktat	Järnsand, ca 25 h, 51 procent
Ilmenit, ca 25 h uppehållstid, 300 $\mu\text{m}$	Ilmenit, ca 25 h uppehållstid
<b>Mätning av magnetisk susceptibilitet</b>	<b>SEM - Ämnesanalys</b>
Järnsand, färsk	Järnsand, färsk
Järnsand, ca 2 h uppehållstid, magnetisk fraktion	Järnsand, ca 2 h uppehållstid
Järnsand, ca 27 h uppehållstid, magnetisk fraktion	Järnsand, ca 27 h uppehållstid
Järnsand, ca 78 h uppehållstid, magnetisk fraktion	Järnsand, ca 78 h uppehållstid
Ilmenit, ca 25 h uppehållstid, ej separerad	

## D Analytisk beräkning av $U_{mf}$

Korrelationen lyder:

$$Ar = 1650Re_{p,mf} + 24.5Re_{p,mf}^2 \quad (8)$$

där

$$Ar = \frac{\rho_f d_p^3 (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2} \quad (9)$$

Och slutligen Re:

$$Re_{p,mf} = \frac{\rho_f U_{mf} d_p}{\mu_f} \quad (10)$$

- $\rho_f = \frac{101325 \cdot 0,028}{8,314 \cdot (273 + 850)} = 0,304 \text{ kg/m}^3$  (Kvävgas, interpolerat tabellvärde)
- $\mu_f = 33,6 \mu\text{Pas}$  (Interpolerat tabellvärde)
- $\rho_p =$  (Järnsand, datablad från Boliden, "korndensitet"[32]) =  $3550 \text{ kg/m}^3$
- $d_p$  (siktat till ca) =  $200 \mu\text{m}$

Arkimedeastalet beräknas till

$$Ar = 89.5$$

Därefter kan reynoldstalet beräknas genom

$$Re_{mf} + \frac{1650}{24.5} Re_{mf}^2 - \frac{Ar}{24.5} = 0$$

Alltså

$$Re = -\frac{1650}{24.5 \cdot 2} + \sqrt{\left(\frac{1650}{24.5 \cdot 2}\right)^2 - \frac{Ar}{24.5}} = 0.054$$

Detta ger slutligen

$$U_{mf} = 2.51 \text{ cm/s}$$