

Jonas Melhus
Trym Woldstad
Vegard Bjerve

Karakterisering og analysering av ubehandlet og varmebehandlet flyveaske fra restavfallsforbrenning i Skandinavia

Bacheloroppgave i Materialteknologi

Veileder: Gabriella Tranell

Medveileder: Kai Erik Ekstrøm

Mai 2021



Institutt for materialteknologi

Karakterisering og analysering av ubehandlet og varmebehandlet flyveaske fra restavfallsforbrenning i Skandinavia

Characterization and Analysis of Raw and Heat Treated Municipal Solid Waste Incineration
Fly Ash from Scandinavia

Skrevet av:

Jonas Melhus

Trym Woldstad

Vegard Bjerve

Bacheloroppgave - Mai 2021

Prosjektnummer: IMA-B-15-2021

Gradering: Åpen

Intern veileder: Gabriella Tranell

Ekstern veileder: Kai Erik Ekstrøm

Forord

Denne oppgaven ble skrevet som en avslutning på en treårig bachelorgrad i materialteknologi ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Oppgaven ble skrevet i samarbeid med NOAH AS våren 2021.

Vi vil først og fremst takke veilederne våre Gabriella Tranell og Kai Erik Ekstrøm. Gabriella har gitt god støtte og veiledning underveis i semesteret, og den positive innstillingen hennes har smittet over på oss i perioder der ting har vært vanskelig. I tillegg vil vi takke Kai Erik (NOAH AS) for tilbakemeldinger og oppklaringer tilknyttet prosjektet, som har gjort veien videre i oppgaven lettere. Han har også stilt med nødvendig prøvemateriale og god informasjon om flyveasken.

Videre vil vi takke Andrey Kosinskiy, labansvarlig ved NTNU Kalvskinnet, for sin hjelpsomhet og tilgjengelighet. I tillegg har han gitt god opplæring og sørget for tilgang til nødvendig utstyr. Vi vil også takke NTNU for å være behjelpelige med diverse laboratorier. Spesielt Azam Rasouli og Trygve Lindahl Schanche har vært svært hjelpsomme med opplæring og støtte på Gløshaugen.

Til slutt vil vi takke alle andre som bistod oss underveis i arbeidet. Dere har alle bidratt til å gjøre oppgaven enklere.

Tusen takk!

Trondheim, 2021

Jonas Melhus, Trym Woldstad og Vegard Bjerve.

Sammendrag

Flyveaske (FA) er et biprodukt fra forbrenning av husholdningsavfall. Sammensetningen i FA vil variere ut ifra hvilken forbrenningsprosess som brukes. De to vanligste er ristovnforbrenning (GF) og virvelsjiktforbrenning (CFB). Grunnet høy pH og innhold av tungmetaller blir FA kategorisert som farlig avfall. Avfallet stabiliseres før det deponeres. Dette leder til at ressursene i FA tas ut av kretsløpet. I denne oppgaven blir enkelte behandlingsmuligheter for virvelsjiktaske (CFBA) og ristovnaske (GFA) vurdert ved hjelp av karakterisering med ulike analyseteknikker som SEM/EDS, XRD og XRF. Med utgangspunkt i analysene ble to alternative behandlingsmetoder undersøkt. Den første metoden bestod av et ovnsforsøk hvor hensikten var å redusere ut rene metallfaser fra FA. Den andre metoden bestod av et karbonatiseringsforsøk hvor hensikten var å se om FA kan brukes til å fange CO₂.

De innledende analysene viste relativt stort innhold av metaller i FA, spesielt CFBA. Med utgangspunkt i analysene ble reduksjonsforsøk gjennomført ved 1100°C og 1200°C. Analysene viste også stort innhold av Ca i både CFBA og GFA. Teorien tilsier at CaO/Ca(OH)₂ vil reagere med CO₂ og denne reaksjon kan akselereres ved økt temperatur. På bakgrunn av dette ble det gjennomført karbonatiseringsforsøk ved 500°C.

Resultatene fra reduksjonsforsøkene viste tydelige metallpartikler i CFBA. Partiklene inneholdt i hovedsak Fe. Reduksjonsforsøk ved 1200°C førte til større ansamlinger av jern enn forsøket ved 1100°C. Analysene etter karbonatiseringsforsøkene viste at karbonater ble dannet som følge av opptak av CO₂, for eksempel CaCO₃. Resultatene antydte et større opptak av CO₂ for GFA enn for CFBA.

Det ble konkludert med at reduksjon av metaller og opptak av CO₂ er mulig for FA. Karakterisering av FA viser likheter med tidligere forskning, men viser også at sammensetningen i FA vil variere i ulike deler av verden. Ovnsforsøkene bekreftet potensialet for reduksjon av metaller og CO₂-fangst ved hjelp av karbonatisering av FA.

Til slutt er det lagt frem et forslag for videre arbeid. For reduksjons- og karbonatiseringsforsøk vil det være interessant å undersøke hvilke forhold som er best egnet for de to metodene. Forbehandling av FA, temperatur og trykk samt komponenter i atmosfæren under forsøket vil være faktorer som påvirker resultatet og er av interesse for videre arbeid.

Abstract

Fly ash (FA) is a by-product from municipal solid waste incineration. The composition of FA will vary depending on the incineration process used. The two most common processes are grate furnace incineration (GF) and circulating fluidized bed incineration (CFB). Due to the high pH and the content of heavy metals, FA is categorized as hazardous waste. Because of this the waste is stabilized and then used for landfill, and in the process valuable resources in the FA are lost. In this thesis the scope is to investigate the potential for valorisation of circulating fluidized bed ash (CFBA) and grate furnace ash (GFA). The composition of the ashes was established using different analysis techniques such as SEM/EDS, XRD and XRF. Based on the analysis two alternative valorisation methods were tested. The first method was a furnace experiment where the intention was to reduce pure metal phases from FA. The second method was a carbonation experiment, where the purpose was to see if FA can be used to capture CO₂.

The initial analysis showed a relatively high content of metals in FA, especially in CFBA. This is supported by the theory behind CFBA incineration processes. Based on this, reduction experiments were executed at 1100°C and 1200°C. The analysis also displayed a high content of Ca in both CFBA and GFA. The theory states that CaO/Ca(OH)₂ will react with CO₂ and the reaction can be accelerated at higher temperatures. Therefore, carbonation experiments were done at 500°C.

The results from the reduction experiments showed metal particles in CFBA. The particles contained mainly Fe. Reduction experiments at 1200°C led to larger accumulations of iron than the experiment at 1100°C. The analysis after the carbonation experiments showed that carbonates were formed because of the uptake of CO₂, for example CaCO₃. The results indicate a greater capture of CO₂ for GFA than for CFBA.

It was concluded that reduction of metals and capture of CO₂ is possible for FA. Even though the composition of FA analyzed in this thesis shows similarities with FA from previous research, the results indicates that the composition varies around the world. The furnace experiments confirmed the potential for reduction of metals and CO₂ capture utilizing carbonation in FA.

Finally, suggestions for further work are presented. For the reduction and carbonation experiments, an interesting possibility is to investigate which conditions are best suited for each of the two methods. Pre-treatment of FA, temperature and pressure, as well as the atmosphere during the experiments are factors that affect the result and should be looked further into.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	II
Abstract	III
Liste av figurer	VI
Liste av tabeller	VIII
Forkortelser	VIII
1 Introduksjon	1
2 Teori	4
2.1 Industri i Norge	4
2.2 Forbrenningsteknologier	5
2.2.1 Ristovnsaske	6
2.2.2 Virvelsjiktaske	7
2.3 Rensing av røykgass	8
2.4 Innhold i FA.....	9
2.4.1 XRD-resultater fra tidligere forskning	10
2.5 Reduksjon av metaller.....	13
2.6 Karbonatisering.....	15
2.7 Hva gjøres i dag	17
2.7.1 Saltgjenvinning	17
2.7.2 Materialgjenvinning.....	18
2.7.3 Karbonatisering.....	20
3 Material og metode	21
3.1 Materialer.....	21
3.2 Ovnsforsøk.....	22
3.2.1 Reduksjonsforsøk.....	24
3.2.2 Karbonatisering.....	26
3.3 Analyser	27
3.3.1 SEM/EDS.....	27
3.3.2 XRD	30
3.3.3 XRF.....	30
3.4 Modellering.....	31
4 Resultat	33
4.1 Metodeutvikling.....	33

4.1.1	SEM/EDS.....	33
4.2	Analyser av ubehandlet FA.....	35
4.2.1	SEM/EDS.....	35
4.2.2	XRD	40
4.2.3	XRF.....	42
4.3	Ovnforsøk.....	44
4.3.1	Reduksjonsforsøk.....	44
4.3.2	Analyser av redusert FA	46
4.3.3	Karbonatisering.....	55
4.3.4	Analyser av karbonatisert FA	56
4.4	Modellering.....	63
5	Diskusjon	66
5.1	Metodeutvikling.....	66
5.2	Analyser av ubehandlet FA.....	67
5.2.1	Virvelsjiktaske – CFBA	67
5.2.2	Ristovnaske – GFA	68
5.2.3	Sammenligning av FA	68
5.3	Ovnforsøk.....	69
5.3.1	Reduksjonsforsøk.....	70
5.3.2	Karboniseringsforsøk	74
5.4	Usikkerhet og feilkilder	76
5.4.1	SEM/EDS-analyse	77
5.4.2	XRD	77
5.4.3	XRF.....	78
5.4.4	Ovnforsøk.....	78
6	Konklusjon	79
6.1	Reduksjonsforsøk.....	79
6.2	Karboniseringsforsøk	79
7	Videre arbeid	80
	Referanser	81
	Vedlegg A: Oversikt over XRD	IX
	Vedlegg B: Sikkerhetsdatablad for flyveaske	XVI
	Vedlegg C: Populærvitenskapelig artikkel	XXX
	Vedlegg D: Risikoanalyser	XXXIII

Liste av figurer

FIGUR 1 OVERSIKT OVER ULIKE MÅTER Å AVHENDE PRODUKTER PÅ. FRA TOPP TIL BUNN: MEST BÆREKRAFTIG TIL MINST BÆREKRAFTIG (MILJØSTATUS, 2013).	1
FIGUR 2 GLOBAL BEHANDLING OG AVHENDING AV AVFALL (THE WORLD BANK, 2016).	1
FIGUR 3 KALKSTEINSBRUDDET PÅ LANGØYA SOM NOAH AS BRUKER TIL DEPONI (NOAH AS, 2021).	4
FIGUR 4 GRUVEGANGENE I MOFJELLET SOM FYLLES MED SEMENT FYLT MED STABILISERT FA (SÆTHER, 2018).	5
FIGUR 5 EN ENKEL SKISSE AV RISTOVN OG DE ULIKE STEGENE I FORBRENNINGEN (ROGERS, 1973).	6
FIGUR 6 ET FORENKLET FLYTSKJEMA SOM VISER HVORDAN FORBRENNING PÅ RISTOVN FOREGÅR. RISTOVNEN HAR EN HELNING NED TIL UTSLIPPET AV BUNNASKE (LEW, 2018). 7	
FIGUR 7 ET FORENKLET FLYTSKJEMA SOM VISER HVORDAN FORBRENNING PÅ VIRVELSJKT FOREGÅR.	8
FIGUR 8 ELLINGHAM DIAGRAM MED MARKERT UT REAKSJONER FOR ULIKE FASER AV FE MED TILHØRENDE GIBBS ENERGI VED 1100°C (WIKIPEDIA, 2021).	14
FIGUR 9 ASH2SALT-PROSESSEN, FRA ASKE TIL SALTER (EASYMINING, 2021).	18
FIGUR 10 SKJEMATISK OPPSETT AV FLUWA-PROSESSEN PÅ INDUSTRIELL SKALA (WEIBEL, ZAPPATINI, WOLFFERS, & RINGMANN, 2021).	19
FIGUR 11 BEHOLDERE TIL FA. FRA VENSTRE: GFA OG CFBA.	21
FIGUR 12 FRA VENSTRE: UBEHANDLET GFA OG UBEHANDLET CFBA.	22
FIGUR 13 TIL VENSTRE ER ET BILDE AV TF2-OVNEN SOM BLE BRUKT I FORSØKENE (NTNU, 2015). TIL HØYRE ER EN ENKEL SKISSE AV OVNENS VIRKEMÅTE.	23
FIGUR 14 REAKTOR MED PAKNING SOM BLE BRUKT UNDER OVNFORSØK.	23
FIGUR 15 FRA VENSTRE: CFBA OG GFA I GRAFITTDIGEL.	24
FIGUR 16 TEMPERATURUTVIKLING I OVN, CFBA – 1 TIME - 1100°C.	25
FIGUR 17 FRA VENSTRE: CFBA OG GFA I ALUMINADIGEL.	26
FIGUR 18 HANSKEPOSE FYLT MED CO ₂	26
FIGUR 19 TEMPERATURUTVIKLING I OVN.	27
FIGUR 20 PRØVEHOLDER FYLT MED EPOXY.	28
FIGUR 21 GULLBELAGT EPOXYPRØVE.	28
FIGUR 22 PRØVEHOLDER AV AL MED KARBONTEIP.	29
FIGUR 23 INPUT-VERDIER FOR MODELLERING AV FE-REDUKSJON.	31
FIGUR 24 INPUT-VERDIER FOR MODELLERING OPPFØRSELEN TIL ZN UNDER TEMPERATURØKNING.	32
FIGUR 25 INPUT-VERDIER FOR MODELLERING AV KARBONATISERINGSFORSØK.	32
FIGUR 26 SEM-BILDE FOR Å ANSLÅ KORNSTØRRELSE.	35
FIGUR 27 OMRÅDEANALYSE AV CFBA.	36
FIGUR 28 OMRÅDEANALYSE AV GFA.	36
FIGUR 29 PUNKTANALYSE AV CFBA PÅ KARBONTEIP.	38
FIGUR 30 PUNKTANALYSE AV CFBA PÅ KOBBERTEIP.	38
FIGUR 31 PUNKTANALYSE AV GFA PÅ KARBONTEIP.	39
FIGUR 32 PUNKTANALYSE AV GFA PÅ KOBBERTEIP.	39
FIGUR 33 DIFFRAKTOGRAM FOR UBEHANDLET CFBA MED MARKERTE TOPPER.	40
FIGUR 34 DIFFRAKTOGRAM FOR UBEHANDLET GFA MED MARKERTE TOPPER.	41
FIGUR 35 CFBA ETTER REDUKSJON VED 1100°C. FRA VENSTRE: FA I DIGEL, KLUMP DANNET UNDER REDUKSJON OG FA FRA DIGEL ETTER AT KLUMPER ER TATT UT.	44
FIGUR 36 REAKTOR OG CFBA ETTER REDUKSJON VED 1200°C. FRA VENSTRE: REAKTOR SOM BLE ØDELAGT UNDER FORSØK, KLUMP MED FA I DIGEL OG KLUMPEN TATT UT AV DIGEL.	45

FIGUR 37 DANNELSE AV METALLFASER (LYSE OMRÅDER) VED 1200 GRADER – LYSMIKROSKOPBILDE.....	45
FIGUR 38 GFA ETTER REDUKSJON VED 1100°C. FRA VENSTRE: DIGEL MED RESTPRODUKT FRA GFA, FA TATT FRA DIGEL OG FA SKRAPET AV FRA LOKKET AV REAKTOREN.	45
FIGUR 39 LOKKET PÅ REAKTOREN ETTER REDUKSJONSFORSØK FOR GFA VED 1100°C.	46
FIGUR 40 REDUSERT CFBA VED 1100°C UNDER RØD STREK, UBEHANDLET.	46
FIGUR 41 REDUSERT GFA VED 1100°C UNDER RØD STREK, UBEHANDLET OVER.	46
FIGUR 42 SEM-BILDE AV CFBA REDUSERT VED 1100°C.....	47
FIGUR 43 SEM-BILDE AV CFBA REDUSERT VED 1200°C.....	47
FIGUR 44 PUNKTANALYSER FOR CFBA REDUSERT VED 1100°C.....	48
FIGUR 45 PUNKTANALYSER FOR CFBA REDUSERT VED 1200°C.....	48
FIGUR 46 PUNKTANALYSE FOR CFBA REDUSERT VED 1200°C.	49
FIGUR 47 PUNKTANALYSE FOR CFBA REDUSERT VED 1200°C.	49
FIGUR 48 PUNKTANALYSER FOR GFA REDUSERT VED 1100°C. FA FUNNET PÅ LOKKET TIL REAKTOR ETTER REDUKSJON.	50
FIGUR 49 PUNKTANALYSER FOR GFA REDUSERT VED 1100°C. FA TATT FRA DIGEL ETTER REDUKSJON.	50
FIGUR 50 SAMMENLIGNING AV DIFFRAKTOGRAM MELLOM CFBA FØR OG ETTER REDUKSJON VED 1100°C.....	51
FIGUR 51 DIFFRAKTOGRAM FOR CFBA ETTER REDUKSJONSFORSØK VED 1100°C MED MARKERTE TOPPER.....	52
FIGUR 52 SAMMENLIGNING AV DIFFRAKTOGRAM MELLOM GFA FØR OG ETTER REDUKSJON VED 1100°C.....	53
FIGUR 53 DIFFRAKTOGRAM FOR GFA ETTER REDUKSJONSFORSØK VED 1100°C MED MARKERTE TOPPER.....	54
FIGUR 54 CFBA ETTER KARBONATISERING VED 519°C. FRA VENSTRE: URØRT FA I DIGEL I REAKTOR OG FA I DIGEL.....	55
FIGUR 55 GFA ETTER KARBONATISERING VED 514°C. FRA VENSTRE: FA I DIGEL I REAKTOR OG NÆRBILDE AV FA-KLUMP DANNET UNDER FORSØK.....	56
FIGUR 56 KARBONATISERT CFBA UNDER RØD STREK, UBEHANDLET OVER.....	56
FIGUR 57 KARBONATISERT GFA UNDER RØD STREK, UBEHANDLET OVER.	56
FIGUR 58 PUNKTANALYSE FOR CFBA KARBONATISERT VED 519°C.....	57
FIGUR 59 PUNKTANALYSE FOR CFBA KARBONATISERT VED 519°C.....	57
FIGUR 60 PUNKTANALYSE FOR GFA ETTER KARBONATISERING VED 514°C.	58
FIGUR 61 PUNKTANALYSE FOR GFA ETTER KARBONATISERING VED 514°C.	58
FIGUR 62 SAMMENLIGNING AV DIFFRAKTOGRAM MELLOM CFBA FØR OG ETTER KARBONATISERINGSFORSØK.....	59
FIGUR 63 DIFFRAKTOGRAM FOR CFBA ETTER KARBONATISERING MED MARKERTE TOPPER. 60	
FIGUR 64 SAMMENLIGNING AV DIFFRAKTOGRAM MELLOM GFA FØR OG ETTER KARBONATISERING.....	61
FIGUR 65 DIFFRAKTOGRAM FOR GFA ETTER KARBONATISERING MED MARKERTE TOPPER.	62
FIGUR 66 REDUKSJON AV FE. PLOTTET VISER MENGDEN AV ULIKE FASER GITT I KG (Y-AKSEN) SOM EN FUNKSJON AV MENGDEN C TILSATT(X-AKSEN).....	63
FIGUR 67 OPPFØRSEL TIL ZN/ZNO VED ØKENDE TEMPERATUR I KARBONHOLDIG ATMOSFÆRE.	64
FIGUR 68 KARBONATISERING AV CA(OH) ₂ VED ØKENDE MENGDE CO _{2(G)} VED 500°C.	64
FIGUR 69 EN ENKEL SKISSE AV PARTIKKELEN MED JERNSMELTE. ELEMENTENE ER OPPGITT MED PROSENT FRA EDS-ANALYSEN.	73

Liste av tabeller

TABELL 1 FORKORTELSER BRUKT I OPPGAVEN	VIII
TABELL 2 OVERSIKT OVER FORBINDELSER I UBEHANDLET FA FUNNET VED XRD.....	11
TABELL 3 OVERSIKT OVER FORBINDELSER I BEHANDLET FA FUNNET VED XRD.	12
TABELL 4 OVERSIKT OVER HVILKE OVNSFORSØK SOM BLE GJENNOMFØRT MED CFBA OG GFA.	23
TABELL 5 OVERSIKT OVER METODER BRUKT FOR CFBA OG GFA FØR OG ETTER OVNSFORSØK.	30
TABELL 6 ULIKE METODER FOR SEM/EDS-ANALYSE. FRA TOPP: FIGUR 1 TIL 5.....	33
TABELL 7 OVERSIKT OVER FASER FOR CFBA.	40
TABELL 8 OVERSIKT OVER FASER FOR GFA.	41
TABELL 9 XRF-RESULTATER FOR CFBA (SEMIKVANTITATIV).....	42
TABELL 10 XRF-RESULTATER FOR GFA (SEMIKVANTITATIV).....	43
TABELL 11 OVERSIKT OVER FASER I CFBA FØR OG ETTER REDUKSJON VED 1100°C.....	52
TABELL 12 OVERSIKT OVER FASER I GFA FØR OG ETTER REDUKSJON VED 1100°C.....	54
TABELL 13 OVERSIKT OVER VEKT PÅ CFBA OG GFA FØR OG ETTER KARBONATISERINGSFORSØK.....	55
TABELL 14 OVERSIKT OVER FASER I CFBA FØR OG ETTER KARBONATISERINGSFORSØK VED 519°C.....	60
TABELL 15 OVERSIKT OVER FASER I GFA FØR OG ETTER KARBONATISERING VED 514°C.....	62
TABELL 16 UBEHANDLET FA SAMMENLIGNET MED REDUSERT OG KARBONATISERT FA.	70

Forkortelser

Tabell 1 viser en liste over forkortelser og hva det står for på engelsk og norsk som er brukt i oppgaven

Tabell 1 Forkortelser brukt i oppgaven

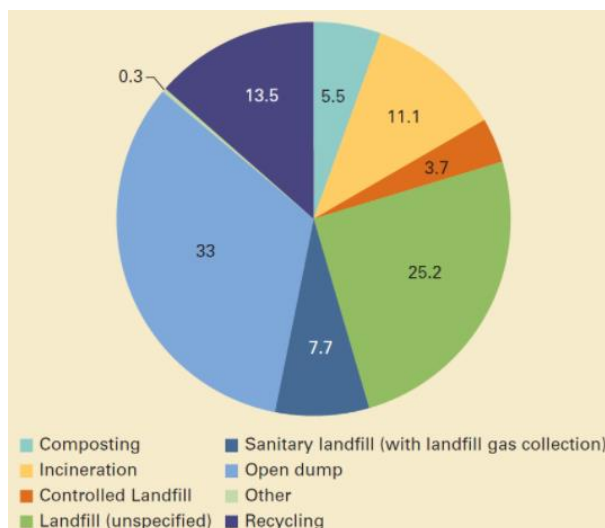
Forkortelse	Engelsk	Norsk
FA	Fly ash	Flyveaske
CFBA	Circulating fluidized bed ash	Virvelsjiktaske
GFA	Grate furnace ash	Ristovnaske
TRL	Technology readiness level	Teknologiens kommersialitet
XRD	X-ray diffraction	Røntgenkristallografi
XRF	X-ray fluorescence	Røntgenfluorescens
SEM	Scanning electron microscopy	-
EDS	Energy-dispersive x-ray spectroscopy	-
ACC	Accelerated carbonation curing	Akselerert karbonatisering

1 Introduksjon

Dagens samfunn er i økonomisk vekst. Økt forbruk bidrar til mer avfall (Miljødirektoratet, 2019). Håndtering og gjenvinning av avfall er et stort fokusområde for dagens forskning. Figur 1 viser ulike måter produkter kan avhendes. Øverst i figuren står gjenbruk som regnes som den mest bærekraftige måten å avhende avfall på. Nederst i figuren er de minst bærekraftige alternativene. Deponering av avfall er den mest brukte metoden i dag på verdensbasis, se Figur 2 (The World Bank, 2016).



Figur 1 Oversikt over ulike måter å avhende produkter på. Fra topp til bunn: mest bærekraftig til minst bærekraftig (Miljøstatus, 2013).



Figur 2 Global behandling og avhending av avfall (The World Bank, 2016).

I Norge er deponi av ordinært avfall uten energigjenvinning lite brukt. Dette skyldes reguleringer med tanke på miljøpåvirkninger avfallet kan ha. En metode anvendt mye i Norge er forbrenning av husholdningsavfall. Totalt finnes det 18 energigjenvinningsanlegg i Norge i dag (Avfall Norge, 2019).

Forbrenningen ved anleggene brukes til å produsere strøm og/eller varmt vann til fjernvarme. Gjenvinningsanleggene produserer i tillegg flere biprodukter fra forbrenningen. Et av disse er flyveaske (FA), som klassifiseres som farlig avfall. Farlig avfall krever deponier som er godkjent for håndtering av denne type avfall. I Norge fordeles avfallet til deponier i tre kategorier avhengig av egenskaper og sammensetning. De tre kategoriene er inert, ordinært og farlig avfall. De tre kategoriene har ulik grad av forurensing og påvirkning på mennesker, dyr og natur. Inert avfall er avfall som ikke vil reagere fysisk eller kjemisk og heller ikke skade andre stoffer ved kontakt (Miljødirektoratet, 2019). Denne type avfall vil i liten grad være forurensende. Ordinært avfall er definert av miljødirektoratet som «*organisk eller uorganisk blandet avfall som ikke er farlig, eksplosivt, radioaktivt eller smittefarlig*» (Miljødirektoratet, 2019). Den siste kategorien er farlig avfall. Dette er avfall som kan gi store forurensende konsekvenser og være skadelig for mennesker.

I 2019 ble cirka 1,61 millioner tonn farlig avfall levert til godkjent behandling (SSB, 2020). I 2015 var det 1,41 millioner tonn, noe som betyr at i løpet av fire år økte mengden farlig avfall med 14%. I Norge er det kun to godkjente deponier for håndtering av farlig avfall. Det er NOAH AS på Langøya og Miljøteknikk Terrateam AS i Mo i Rana. Ved disse deponiene stabiliseres avfallet slik at det ikke vil reagere og slippe ut uønskede stoffer. Det er ved disse to deponiene FA håndteres (Avfall Norge, 2019).

NOAH på Langøya blander FA med avfallssyre fra Kronos Titan AS og stabiliserer avfallet til en gips, som deretter brukes til å fylle igjen etter det gamle kalksteinsbruddet på Langøya. Dette er en sikker metode for å ikke skape utslipp av farlige forbindelser i naturen, men dette leder til at verdifulle ressurser tas ut av kretsløpet. Miljøteknikk Terrateam AS støper avfallet inn i sement for å stabilisere avfallet. Immobiliserte tungmetaller føres tilbake til fjellet samtidig som gruvegangene støpes igjen (Miljøteknikk terrateam AS, 2021). Mengden av tungmetaller og andre metaller som blir stabilisert øker med mengden avfall som produseres. Det gir økt tap av ressurser som ikke kan gjenbrukes.

Slik som situasjonen er i dag anslås det at deponiene vil være fulle i løpet av få år, og det vil være nødvendig med ny deponikapasitet. Aller helst trengs det ny teknologi for å kunne materialgjenvinne farlig avfall og FA. Et aktivt forskningsfelt er gjenvinning og resirkulering av verdifulle råvarer fra FA, som igjen vil bidra til å minke mengde som må deponeres. Per 2021 har det ikke blitt tatt i bruk teknologi for å skille metaller fra FA på en økonomisk bærekraftig måte.

Når råvarer hentes ut fra jordskorpen blir konsentrasjonen av disse lavere. Etter hvert som dagens malmer brukes opp, vil man måtte gå over på malmer med lavere kvalitet. Dette vil gjøre det mindre effektivt å hente ut råvarer fra primær kilden og dermed koste mer. Resirkulering blir dermed viktigere og viktigere for dagens samfunn. Om avfall, som i utgangspunktet ikke er verdt noe, kan gjøres om til en verdifull ressurs vil det være gunstig for miljøet. Hvis det i tillegg vil være lønnsomt vil flere ta i bruk teknologien. Dette betyr at enda mer materiale vil kunne bli resirkulert.

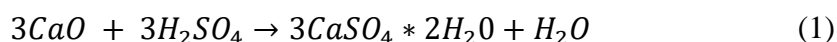
Hensikten med denne oppgaven er å undersøke alternative måter å behandle FA på enn deponering. Det blir gjort ved å karakterisere innholdet i FA ved hjelp av ulike analyseteknikker. Basert på analysene blir det undersøkt om reduksjon av metallfaser i FA er en mulighet. I tillegg skal det sees på om FA er i stand til å ta opp CO₂ ved karbonatisering.

2 Teori

Dette kapitlet tar for seg håndtering av FA i Norge (del 2.1), forbrenningsprosesser som genererer ristovnaske (GFA) og virvelsjiktaske (CFBA) (del 2.2) og hvordan rensing av røykgass foregår (del 2.3). Det vil også bli sett på innhold i FA og tidligere studier av FA vil bli presentert med funn fra XRD (del 2.4) og teorien bak reduksjon av metaller og karbonatisering (del 2.5 og 2.6). Til slutt presenteres det forskning knyttet til håndtering av FA (del 2.7).

2.1 Industri i Norge

NOAH AS er ett av to selskaper i Norge som har godkjent deponi for håndtering av FA. NOAH blander avfallssyre fra Kronos titan (20% H_2SO_4) sammen med FA. FA er nøytralisert ved syre/base – nøytralisering (SINTEF, 2018). Fra rensing av røykgass ved forbrenningen (del 2.3) tilsettes ofte blant annet kalk for å rense avgassen for svovel, og resulterer i betydelige mengder restkalk i FA (Fortum, 2021). Avfallssyren (H_2SO_4) og kalkandelen i FA er essensen i stabiliseringsprosessen. Kalk og svovelsyren reagerer med hverandre og danner kalsiumsulfat, gips, vist i reaksjonsligning (1).



Tungmetaller og annet farlig avfall vil holdes stabilt i gipsen uten at det gir uønskede utslipp som kan reagere med omgivelsene. Gipsen deponeres i det gamle kalksteinsbruddet på Langøya for gjenoppbygging av øyas opprinnelige topografi, se Figur 3. Prosessen regnes som økonomisk lønnsom (SINTEF, 2018).



Figur 3 Kalksteinsbruddet på Langøya som NOAH AS bruker til deponi (NOAH AS, 2021).

Miljøteknikk Terrateam AS som holder til i Mo i Rana er det andre godkjente deponiet som håndterer FA. Her støpes farlig avfall, som blant annet FA, for så å stabiliseres i sement. Innstøpningen og stabiliseringen i sementen hindrer utslipp av uønskede gasser og reaksjoner med omgivelsene (Miljøteknikk terrateam AS, 2021). Sementen brukes som deponi i gruvegangene i Mofjellet. Figur 4 viser en del av gruvegangene Miljøteknikk Terrateam AS fyller. Det er en etablert prosess med kun ett hovedsteg for stabilisering som gir en relativt billig total prosess. Metoden Miljøteknikk anvender gir ingen materiell gjenvinning, og bruken av sement øker mengden som deponeres (SINTEF, 2018).



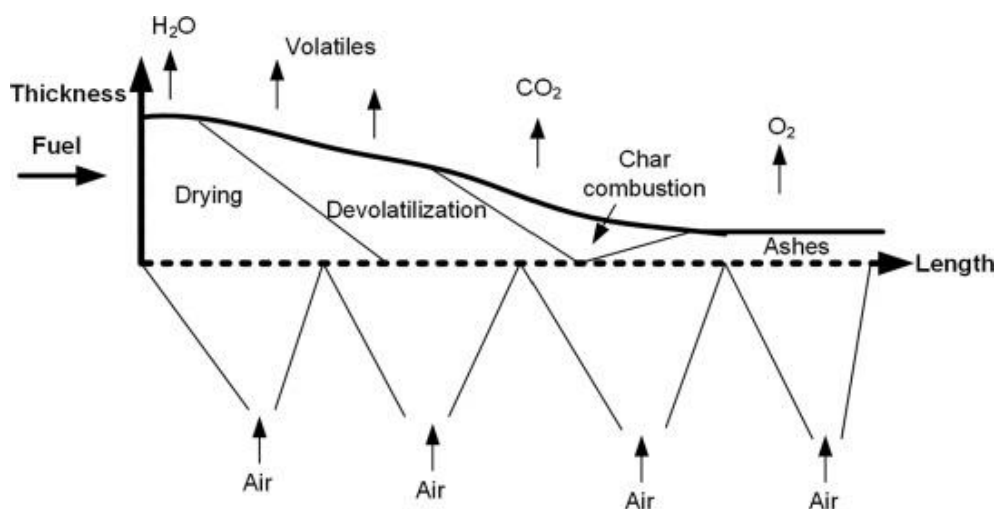
Figur 4 Gruvegangene i Mofjellet som fylles med sement fylt med stabilisert FA (Sæther, 2018).

2.2 Forbrenningsteknologier

Forbrenningsprosessen som blir brukt, prosess for rensing av røykgassen som anvendes og hvilket avfall som forbrennes er i stor grad avgjørende for den kjemiske sammensetningen til FA. Disse parameterne vil også påvirke andelen tungmetaller og andre flyktige komponenter i FA. Denne teoridelen tar for seg to av de vanligste forbrenningsteknologiene. Forbrenning på ristovn, som gir ristovnaske (GFA) og forbrenning på virvelsjikt, som gir virvelsjiktaske (CFBA) (Wang, Hu, & Cheng, 2019).

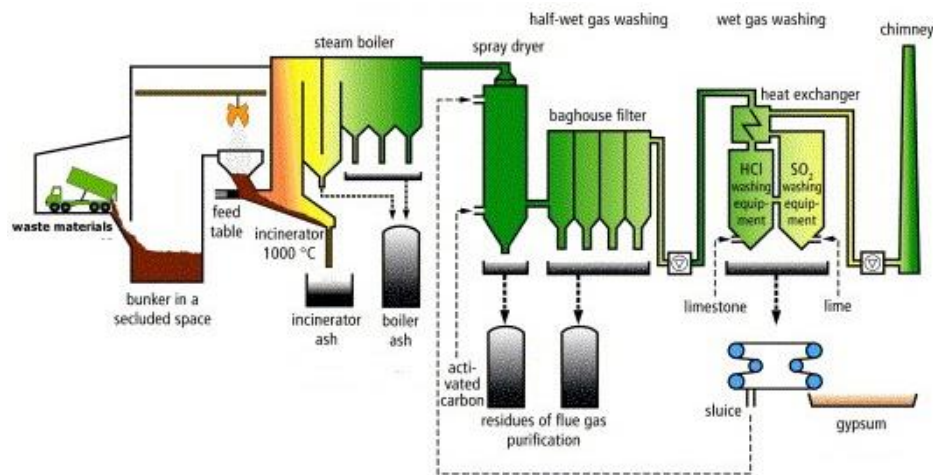
2.2.1 Ristovnsaske

Forbrenning ved hjelp av ristovn er en av de eldste og enkleste forbrenningsteknologiene av avfall. Under prosessen blir avfall ført inn i et kammer og brent på en rist ved en temperatur rundt 1000°C. Risten har en helning, som gjør at bunnasken samles i bunnen av forbrenningskammeret og kan tas ut separat, se Figur 6. Bunnasken tas direkte ut fra forbrenningskammeret. Vann, flyktige komponenter, CO₂ og oksygen vil avdampe fra asken stegvis, vist i Figur 5. Luft blir kontinuerlig tilført gjennom stegene for å få fullstendig forbrenning (Leckner & Lind, 2020)



Figur 5 En enkel skisse av ristovn og de ulike stegene i forbrenningen (Rogers, 1973).

De mest flyktige komponentene samt de med lavest kokepunkt vil føres med røykgassen ut av forbrenningskammeret og inn i røykgassanlegget, som illustrert i Figur 6. Figur 6 viser et flytskjema for hele forbrenningen. Røykgassen må deretter renses, slik at uønskede komponenter ikke blir sluppet ut. Tungmetaller, sure komponenter og organisk giftmateriale blir skilt fra den resterende gassen ved hjelp av posefilter eller elektrostatiske filtre. Asken fra filterne i tillegg til en blanding av partikler fra beholderen utgjør FA (Weibel, Eggenberger, Schlumberger, & Mader, 2017). FA tas deretter ut av rensenanlegget. Før rensenanlegget skilles dampen fra røykgassen. Dampen brukes til energigjenvinning, og dette er en del av prosessen avfall-til-energi («Waste-to-energy», WtE) (Covanta, 2020).

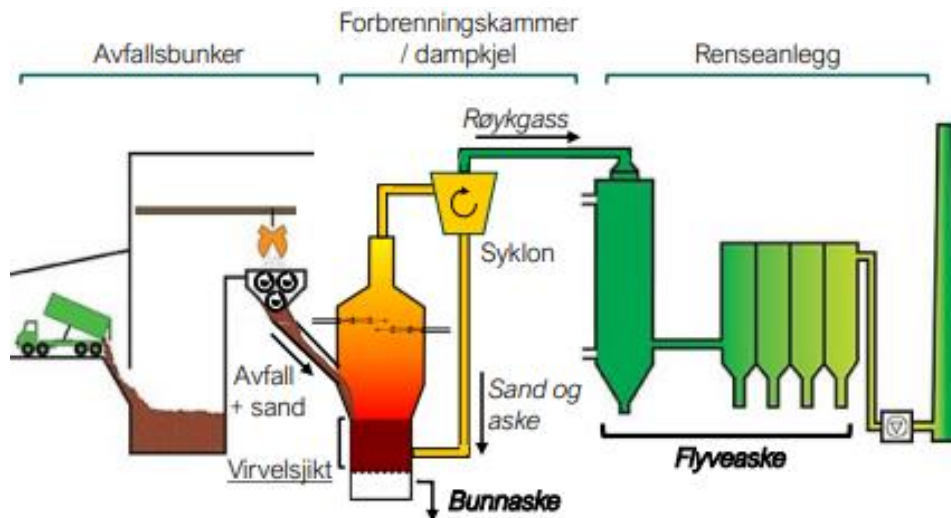


Figur 6 Et forenklet flytskjema som viser hvordan forbrenning på ristovn foregår. Ristovnen har en helning ned til utslippet av bunnaske (Lew, 2018).

I en ristovn vil bunnasken utgjøre store deler av den totale mengden aske. Omtrent 90% av asken vil være bunnaske, mens de resterende 10% vil være FA (Leckner & Lind, 2020). Dette skyldes det enkle designet som skiller partikler dårligere og liten forbehandling av avfallet kan gi store partikler som har tyngre for å fraktes med røykgassen (Leckner & Lind, 2020).

2.2.2 Virvelsjiktaske

Forbrenningsprosessen som gir virvelsjiktaske (CFBA) inneholder flere trinn. Først blir avfallet knust til partikler i lik størrelsesorden. Jevnere partikkelstørrelse gjør separeringen mer effektiv. Det knuste avfallet blandes deretter med silika-holdig sand som fortynnes med aske (Leckner & Lind, 2020). I kammeret blåses det inn oksygen med høy hastighet som virvler opp sand og avfall. Temperaturen vil være lik som for prosessen til ristovnsaske, rundt 1000°C. Etter oppvirvlingen separeres sand og større partikler (aske) fra røykgassen ved hjelp av en syklon. Disse partiklene vil bli ført tilbake til forbrenningskammeret, vist i Figur 7, for å fortsette prosessen og til slutt fullføre forbrenningen (Su, et al., 2015). Fordi partiklene er mindre og finere fordelt vil det være lettere for flyktige metaller å følge røykgassen. Separeringen er bedre som en følge av syklonen (Su, et al., 2015). I renseanlegget vil disse metallene skiller fra resten av gassen og gi en FA med høyere konsentrasjoner av metaller (Leckner & Lind, 2020).



Figur 7 Et forenklet flytskjema som viser hvordan forbrenning på virvelsjikt foregår.

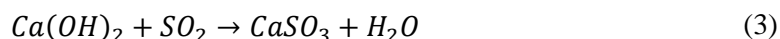
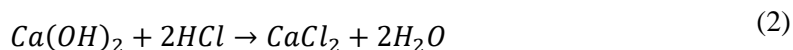
For områder med dårlige systemer for kildesortering vil CFBA være et bedre alternativ sammenlignet med GFA. Bedre separering og en forbehandling av avfallet gjør det mulig å skille avfallet bedre (Su, et al., 2015).

2.3 Rensing av røykgass

I rensetrinnet i forbrenningsprosessen separeres uønskede forbindelser fra røykgassen. Rensing av røykgass er en prosess som foregår i flere trinn hvor deler av røykgassen blir fanget opp ved ulike tilsatser og filtre. For at røykgassen skal få god utbrenning må gassen holde en temperatur på over 850°C i minst to sekunder (Fortum, 2021). Røykgassen føres deretter gjennom et posefilter hvor partikler fra gassen samles opp og blåses ut av posen med jevne mellomrom. Deretter faller asken ned og elektrostatiske filtre fanger opp negativt ladde røykgasspartikler. Kammeret i renseanlegget inneholder elektroder som samler opp de ladde partiklene. Disse vil fungere som en magnet for andre partikler. Elektrodene bankes jevnlig slik at partikler faller ned (Fortum, 2021). Filtrene vil fange opp tungmetaller og gi en høyere konsentrasjon av metaller i FA (Su, et al., 2015).

I neste trinn gjennomgår røykgassen en vaskeprosess. I denne prosessen absorberes organiske komponenter og farlige stoffer fra røykgassen ved tilsats av HOK, en form for aktivt kull. Sure komponenter som HCl og SO₂ fjernes ved pH-justeringer. Disse avfallsstoffene vil følge med vannet som renses i et separat renseanlegg (Fortum, 2021).

Røykgassen inneholder mye sure komponenter og det er ønskelig å redusere blant annet NO_x-mengden. Ved tilsetning av ammoniakk (NH₃) og tørr kalsiumhydroksid (Ca(OH)₂) fanges disse opp. En katalysator gjør det mulig for reaksjonene å gå ved lavere temperaturer. Kalsiumhydroksid vil reagere med HCl og SO₂ og produktet som dannes er mindre farlige komponenter (Su, et al., 2015). Forenklete reaksjoner for prosessen er vist ved reaksjonslikning (2) og (3):



I det siste trinnet slippes den rensede røykgassen ut som vanndamp gjennom en skorstein. De to restproduktene som gjenstår er FA og slam. Partiklene som fanges innledningsvis utgjør FA, mens slammet kommer fra vannrensingen. Begge restproduktene sendes til et eget deponi for videre håndtering.

2.4 Innhold i FA

Innhold i FA varierer ut ifra hva avfallet består av og hvordan det brennes. Temperaturen forbrenningen går ved påvirker mengden metall som transporteres med røykgassen fra forbrenningskammeret. Forbehandlingen av FA vil også påvirke innholdet av (tung)metaller i FA. Totalt vil tungmetaller utgjøre 1-3% av asken (Avfall Norge, 2019). CFBA vil ha større mengder av (tung)metaller sammenlignet med GFA.

Tilsetning av CaO/Ca(OH)₂ under rensingen av røykgassen gjør at kalsiumforbindelser ofte ender opp i FA. Disse forbindelsene vil derfor ofte være blant hovedfasene i FA. CaSO₄ med eller uten krystallvann er ofte til stede. En annen kalkforbindelse er CaCO₃, som dannes ved reaksjonen mellom Ca(OH)₂ og CO₂. Kalk i sin enkleste form, CaO, kan forekomme i FA (Zhang, et al., 2021).

Saltinnholdet i FA utgjør en stor andel av den totale massen. Rapporter for svensk og finsk FA viser at salter utgjør henholdsvis opp til 20% og 30% av den totale sammensetningen (Lorange, 2019). Den totale mengden salter i FA øker behovet for deponi. Typisk er det Na, Ca og K som danner klorider i FA (Lorange, 2019). Stort innhold av klorider bidrar også til å klassifisere FA som farlig avfall (Zhang, et al., 2021).

Forbrenningen av husholdningsavfall skjer ved ca. 1000°C, som gjør at metaller med lavere kokepunkt enn 1000 °C vil følge med røykgassen. Noen metaller som typisk følger røykgassen er Zn, Pb og Cd. Disse har lavere kokepunkt enn 1000°C og vil være typisk å finne i både ristovnsaske og virvelsjiktaske (Pedersen, Store norske leksikon, 2019). Forbehandlingen av avfall for CFBA gir mindre og lettere partikler. Det, sammen med syklonsepareringen, vil kunne føre faser som ikke smelter/koker ved forbrenningstemperaturen med i røykgassen. Fe, Cu og Al er metaller som vil kunne være i CFBA i forskjellige faser. Finere partikler og syklonseparering fra CFB-prosessen gir økt sjans for mer Fe, Cu og Al i FA (Pedersen, Store norske leksikon, 2019).

Totalt sett har FA en kompleks sammensetning som varierer betydelig. Typisk inneholder FA silikater, ofte forbundet til Ca og Al. SiO₂ er en av de vanligste komponentene i FA. Disse Si-forbindelsene betegnes som hovedelementer i FA. Fe-forbindelser, typisk Fe₂O₃, er vanlige faser i CFBA og finnes også i GFA. Andre vanlige metaller er Zn, Mg, Pb, Cd, Cu og Mn (Zhang, et al., 2021). Disse metallene finnes i lavere konsentrasjoner enn hovedelementene og kan ses på som sporelementer, se del 2.4.1. Sammensetningen i FA gjør karakterisering av enkelte komponenter krevende.

2.4.1 XRD-resultater fra tidligere forskning

Innholdet i FA har blitt nøye studert i tidligere forskning. SEM/EDS og XRD har blitt brukt mye i forskning og analysering på FA verden rundt. Det vil være forskjeller på asken fra avfallsforbrenning fra Norge kontra for eksempel Kina, fordi innholdet i avfallet som blir brent varierer fra land til land. Tidligere forskning vil gi en oversikt over hvilke forbindelser som kan være mulig å finne i FA. Ulike prepareringer av asken kan være med å påvirke fasesammensetning og kompleksiteten til fasene. Ulike metoder for håndtering av FA blir praktisert rundt i verden. Noen land forbehandler asken før håndtering eller deponering, mens andre håndterer FA ubehandlet.

Ubehandlet FA

I Tabell 2 blir det presentert forbindelser som har blitt funnet ved bruk av XRD i tidligere forskning. Dette skal gi et overblikk over hva som vil være forventet å finne i FA-prøvene som blir sett på i dette arbeidet. Forbrenningsteknologiene til FA i Tabell 2 er ukjent.

Tabell 2 Oversikt over forbindelser i ubehandlet FA funnet ved XRD.

Kilde	Forbindelser funnet	Land
<i>Heavy metal removal from MSS fly ash by thermal and chlorination treatments</i> (Liu, Chen, & Huang, 2015)	CaSO ₄ , CaCO ₃ , NaCl, KCl, Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ , Ca ₂ (PO ₄) ₃ , CaO, SiO ₂ , CaAl ₂ SiO ₆ , CaAlOH	Kina
<i>Characterization of fly ash from bio and municipal waste</i> (Lima, Ottosen, Pedersen, & Ribeiro, 2008)	CaSO ₄ , CaCO ₃ , Fe ₂ O ₃ , KCl, NaCl, MgCO ₃	Danmark
<i>Characterization of fly ash from bio and municipal waste</i> (Lima, Ottosen, Pedersen, & Ribeiro, 2008)	Al ₂ O ₃ , CaSO ₄ , CaCO ₃ , Fe ₂ O ₃ , KCl, NaCl, SiO ₂	Portugal
<i>Treatment process for MSW combustion fly ash laboratory and pilot plant experiments</i> (Wilewska-Bien, Lundberg, Steenari, & Theliander, 2007)	SiO ₂ , CaCO ₃ , CaSO ₄ , NaCl, KCl, CaO, Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ , Ca ₃ Al ₂ O ₆	Sverige
<i>Effects of a water-extraction process on heavy metal behavior in municipal solid waste incinerator fly ash</i> (Wang, Chiang, Lin, & Sun, 2001)	SiO ₂ , CaSO ₄ , Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ , KAlSi ₃ O ₈ , Al ₂ SiO ₅ , CaCl ₂ , NaCl, KCl, CaCl ₂ *Ca(OH) ₂ *H ₂ O	Taiwan
<i>Comparison of the characteristics of bottom and fly ashes generated from various incineration processes</i> (Chang & Wey, 2006)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , KCl, CaCO ₃ , NaCl	Taiwan

Behandlet FA

I Tabell 3 blir resultater fra tidligere forskning presentert, men i dette tilfelle har FA blitt behandlet. Behandlingsmetodene er vasking og/eller varmebehandling. Det gir en oversikt over hva som vil være forventet i dette arbeidet. I den svenske rapporten (Wilewska-Bien, Lundberg, Steenari, & Theliander, 2007) ble det funnet mer eller mindre av forbindelser etter behandling, vist i Tabell 3 med henholdsvis (+) og (-). Forbrenningsteknologiene til FA i Tabell 3 er ukjent.

Tabell 3 Oversikt over forbindelser i behandlet FA funnet ved XRD.

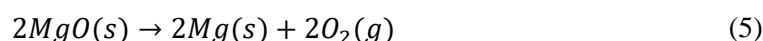
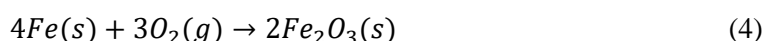
Kilde	Behandling	Forbindelser funnet	Land
<i>Treatment process for MSW combustion fly ash laboratory and pilot plant experiments</i> (Wilewska-Bien, Lundberg, Steenari, & Theliander, 2007)	Vasket	SiO ₂ , Al (-), CaCO ₃ (+), CaSO ₄ (-), Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ , Ca ₃ Al ₂ O ₆	Sverige
<i>Effects of a water-extraction process on heavy metal behavior in municipal solid waste incinerator fly ash</i> (Wang, Chiang, Lin, & Sun, 2001)	Vasket	SiO ₂ , CaSO ₄ , Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ , CaAl ₂ Si ₂ O ₈ , KAlSi ₃ O ₈ , Al ₂ SiO ₅ , Ca ₅ SiO ₅ , Ca ₂ SiO ₄ , Ca ₅ MgSiO ₃ O ₁₂ , NaAlSiO ₄ , NaCaAlSi ₂ O ₇	Taiwan
<i>Heavy metal removal from MSS fly ash by thermal and chlorination treatments</i> (Liu, Chen, & Huang, 2015)	Redusert ved 900°C	Na ₂ Mg ₃ Al ₂ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ , Ca ₂ Fe ₃ Al ₂ (Si ₆ Al ₆)O ₂₂ -(OH) ₂ , Na ₂ (Fe,Al,Mg) ₅ Si ₈ O ₂₂ , Fe ₅ Al ₄ Si ₆ O ₂₂ (OH) ₂ , Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈ , ZnSe, ZnS, Na ₃ Mg(CO ₃) ₂ Cl, Ca ₅ (P,Si,S) ₃ O ₁₂ (Cl,OH,F), Ca _{9,983} (PO ₄) ₆ Cl _{7,966}	Kina
<i>Heavy metal removal from MSS fly ash by thermal and chlorination treatments</i> (Liu, Chen, & Huang, 2015)	Vasket og redusert ved 900°C	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈ , Ca ₂ Fe ₃ Al ₂ (Si ₆ Al ₆)O ₂₂ -(OH) ₂ , Na ₂ Mg ₃ Al ₂ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ , Fe ₅ Al ₄ Si ₆ O ₂₂ (OH) ₂ , Na ₂ (Fe,Al,Mg) ₅ Si ₈ O ₂₂ -(OH) ₂ , Pb ₆ Al ₂ Si ₆ O ₂₁ , Cd ₂ SiP ₄ O ₁₄ , Ca ₁₀ (SiO ₄) ₃ (SO ₄) ₃ Cl ₂ , Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ , Ca ₁₄ Mg ₂ (SiO ₄) ₈	Kina

I både Tabell 2 og Tabell 3 blir det tatt for seg flere land, som gir en oversikt over forskjeller på FA fra land til land.

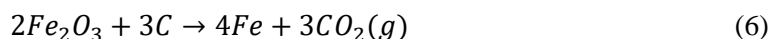
2.5 Reduksjon av metaller

FA inneholder mange forskjellige forbindelser, deriblant metaller i komplekse faser. Den totale vektprosenten metaller i FA er ikke særlig høy, men fordi det genereres så store mengder FA til sammen vil det være hensiktsmessig å gjenvinne metallene.

Reduksjon av metaller beskriver den prosessen hvor et metall gjennom en reaksjon går fra en metallkomponent (oksid, sulfid, klorid) til rent metall. Den motsatte reaksjonen kalles oksidasjon og er den reaksjonen hvor et metall binder seg til oksygen. Mange metaller er reaktive og vil binde seg til oksygen for å danne oksider. Reaksjonsligningene gitt i (4) og (5) viser to eksempler hvor jern oksideres, og magnesium reduseres.



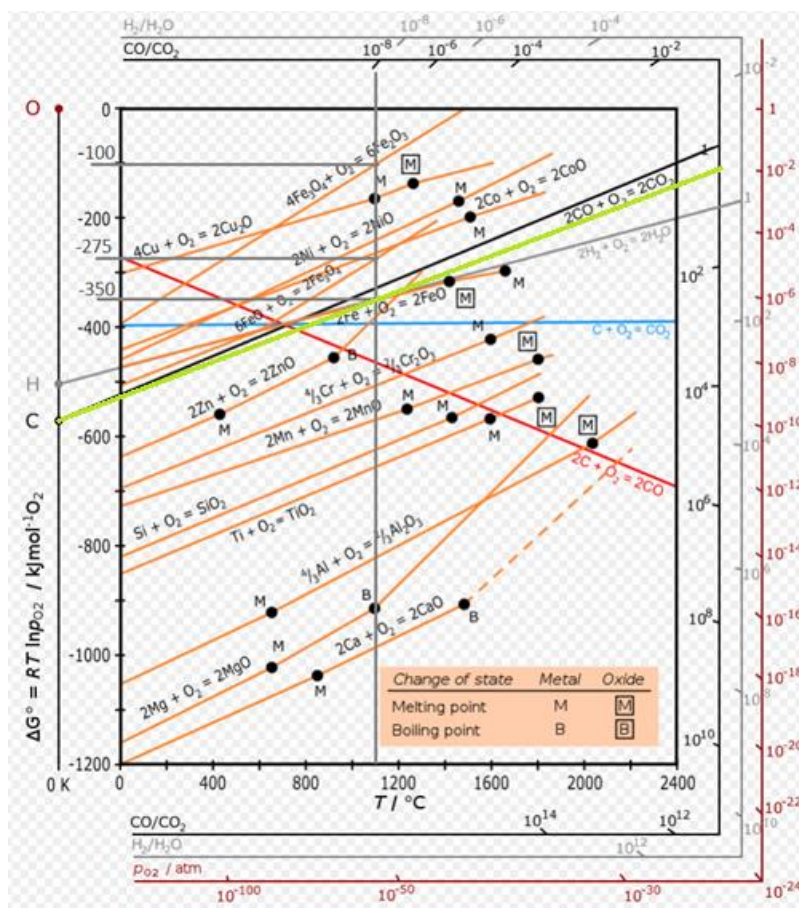
I mange tilfeller vil det være ønskelig å redusere metalloksidet for å få rent metall. Dette kan gjøres ved å skape en reduserende atmosfære, ved for eksempel å tilføre karbon og varme. Oksygenet vil da reagere med karbonet og danne CO₂, vist i (6).



Som en følge av reaksjonen vil jernet reduseres og karbonet oksideres.

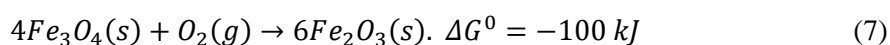
Et Ellingham diagram brukes til å finne ut om reaksjoner er termodynamisk spontane ved ulike temperaturer og partialtrykk. Figur 8 viser et Ellingham diagram der ulike reaksjoner for Fe er markert med tilhørende Gibbs fri energi ved 1100°C. Fra diagrammet kan O₂-partialtrykk (P_{O₂}) og CO/CO₂-forhold leses av. I Figur 8 er CO/CO₂-forholdet for ligning (9) markert opp med grønn linje. For reaksjoner med høyere ΔG⁰-verdi vil CO/CO₂-forholdet minke. Mengden av CO og CO₂ til stede påvirker hvor lett metaller kan bli redusert. CO-linjen er vist med rød linje i Figur 8, og viser at CO som reduksjonsmiddel ved høye temperaturer vil være gunstig. CO-CO₂ forholdet operere som en likevekt. Ved høye temperaturer vil likevekten forskyves mot CO, lavere temperaturer gir mer CO₂-gass. Disse vil hele tiden ligge i fase sammen (Yoshioka, Nakashim, Nakamura, Shceka, & Keppler, 2019).

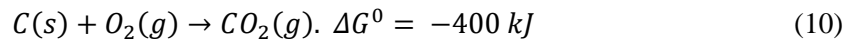
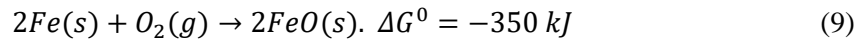
I FA er jernfaser ofte blant hovedfasene, typisk Fe_2O_3 . Ved bruk av karbon som reduksjonsmiddel og inert atmosfære, som vil inneholde små mengder O_2 , kan Ellingham diagrammet brukes til å forutsi om reduksjon av metaller vil skje ved gitte temperaturer. Reduksjon av metall kan skje så lenge reaksjonen for metall ligger lengre opp i diagram enn oksidasjonen for karbon (10). Oksidasjonen av karbon er markert med blå linje i Figur 8.



Figur 8 Ellingham diagram med markert ut reaksjoner for ulike faser av Fe med tilhørende Gibbs energi ved 1100°C (Wikipedia, 2021).

For Fe_2O_3 ved 1100°C vil flere reaksjoner med innhold av Fe totalt gi en totalreaksjon med tilhørende Gibbs fri energi som forteller om reduksjonen vil skje under betingelsene. Disse reaksjonene er hentet fra Figur 8 ved 1100°C og er markert i figuren, og er vist i (7), (8), (9) og (10).





For å få ønsket totalreaksjon ble ligning (7), (8), (9) og (10) slått sammen til en reaksjonsligning med en tilhørende Gibbs fri energi. Likning (11) viser hvordan reaksjonsligningene ble brukt til å gi totalreaksjonen i (6).

$$\frac{-\Delta G^0(7) - 2 * \Delta G^0(8) - 6 * \Delta G^0(9) - 9 * \Delta G^0(10)}{3} = \Delta G_{tot}^0(6) \quad (11)$$

$$\Delta G_{tot}^0 = \left(\frac{100 + 2 * 275 + 6 * 350 - 9 * 400}{3} \right) \text{kJ} = -283,33 \text{kJ}$$

Likning (11) viser en total Gibbs fri energi for reduksjon av Fe vist i likning (6). Den er negativ, og betyr at reaksjonen vist i likning (6) er termodynamisk spontan ved 1100°C.

Gibbs fri energi brukes til å bestemme om reaksjoner går spontant ved gitte betingelser. Den avhenger av temperatur, entropi og entalpi, og gitt ved formel (12).

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S \quad (12)$$

Entropiendringen for reaksjonen i (6) vil være positiv. For reaksjoner ved konstant temperatur der det ikke skjer faseoverganger vil entalpi og entropi være konstant. Linjene i Figur 8 viser hvordan Gibbs energien endres ved temperatur, ved å ta hensyn til endring i entalpi og entropi ved temperaturøkning, og ved faseoverganger (Stempo, 2011).

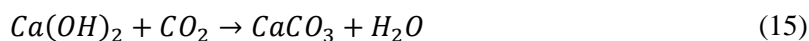
2.6 Karbonatisering

Gjennom rensing av røykgass tilsettes store mengder kalk (CaO), eventuelt Ca(OH)₂, for å fjerne uønskede sure komponenter. Tilsetningen av kalsiumforbindelser gir høyt innhold av kalsium i FA, som gjør det mulig å fange CO₂. Kalk i ren form vil reagere med CO₂ i luft og danne kalsiumkarbonat, CaCO₃, gitt ved reaksjonslikning (13) (Lin, Kiga, Wang, & Nakayama, 2011).

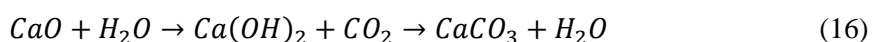


I kontakt med luft vil ikke CaO være en stabil forbindelse. Kalken vil trekke til seg CO₂ og vann. Reaksjonslikning (13) viser den ønskede prosessen ved karbonatisering. Reaksjonen vil være spontan, men saktegående ved romtemperatur. Ved økende temperatur vil kinetikken i reaksjonen akselereres.

Tilsatsen av CaO/Ca(OH)₂ ved røykgassrensing og reaksjon med fukt og CO₂ påvirker de faktiske reaksjonene som skjer ved karbonatisering av FA. CaO vil reagere med fukt/vann og danne Ca(OH)₂, vist i reaksjonslikning (14). Reaksjonslikning (15) viser reaksjonen mellom Ca(OH)₂ og CO₂, som gir CaCO₃.



Likning (13), (14) og (15) satt sammen vil gi en totallikning som tar hensyn til at CaO reagerer med fukt. I likning (16) blir en rekke med reaksjoner vist for kalsiumfaser og CO₂ som til slutt gir CaCO₃ og vann.



Mengden av kalsiumfaser og CO₂ tilgjengelig under reaksjonen påvirker mengden karbonater som dannes. Systemet vil operere som en likevekt, der temperatur spiller en viktig rolle. Partialtrykket av CO₂ og oksygen vil bestemme hvilke reaksjoner som skjer (Lin, Kiga, Wang, & Nakayama, 2011).

NOAH har sett på muligheten for å anvende FA til fangst av CO₂ ved hjelp av karbonatisering. I FA er pH-en høy. CO₂ vil fungere som en syre som er med på å nøytralisere FA og gi en pH rundt 9. Per tonn FA vil CO₂-opptaket ligge på tilnærmet 50-100kg. Dette vil variere ut ifra hvilken type FA som er til stede. Temperaturen som eventuelt skal brukes avhenger av forbehandlingen av FA. Tørr FA krever temperaturer over 400°C, mens fuktet FA reagerer raskt ved romtemperatur (NOAH AS, 2017).

2.7 Hva gjøres i dag

Økende mengde FA som skal håndteres øker med mengden avfall. Strengere krav knyttet til utslipp og miljøhensyn gjør håndtering av FA til et stort forskningsområde. I Norge nærmer deponikapasiteten seg maks. Innen sommeren 2024 er det beregnet at Langøya sin kapasitet er nådd (Avfall Norge, 2019). Redusere deponeringsgraden og materialgjenvinning er områder det forskes på hvor teknologier og prosesser er under stor utvikling. Saltinnhold i FA er stort, og utvasking av salter vil minske deponibehovet (Lorange, 2019). Materialgjenvinning og utnyttelse av ressurser vil kunne være et steg mot sirkulærøkonomi (Norsk Energi, 2018) (Lorange, 2019).

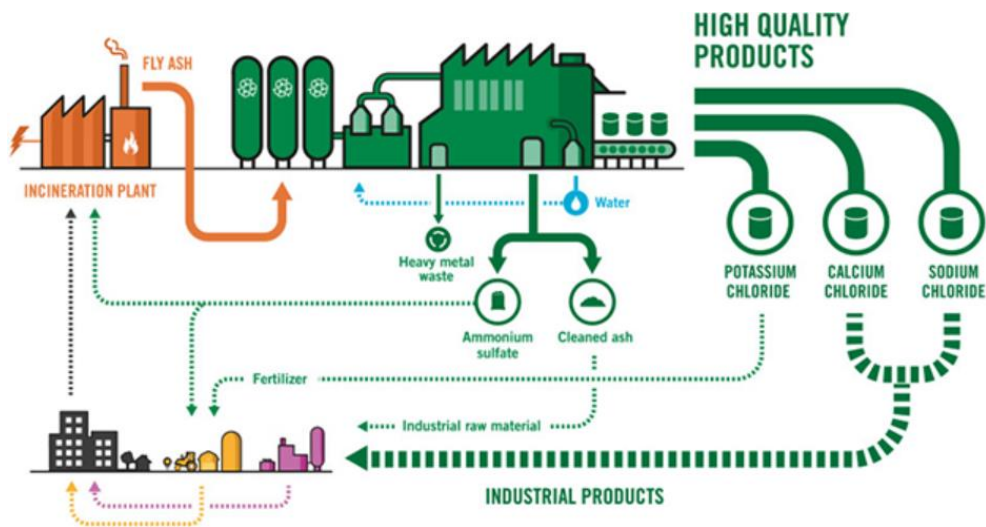
Ulike prosesser som fokuserer på håndtering av FA, som enten er kommersielle eller under forskning, har en TRL-verdi (Technology Readiness Level). Det er en skala fra 1-9 og forteller noe om hvor moden teknologi og kommersielt tilgjengelig prosessen er. Prosesser med lavere TRL enn 9 er under utvikling (SINTEF, 2018).

2.7.1 Saltgjenvinning

Saltinnholdet i FA gjør potensialet for saltgjenvinning stort. Ved å gjenvinne omtrent 20% vil deponibehovet reduseres med opp mot 100 000 tonn (per 2019) i Norden (Lorange, 2019). I dag er det flere land som har fokus på gjenvinning av salt. Vasking er et viktig trinn i prosessen for å gjenvinne salt, ettersom salter er vannløselige. Ash2Salt av Ragn-Sells og NOAHs ReSalt er to av prosessene som utvikles og testes i dag. Begge prosessene fokuserer på gjenvinning av tre salter som kan selges på råvaremarkedet; natriumklorid, kalsiumklorid og kaliumklorid (Avfall Norge, 2019). I Ash2Salt prosessen vil tungmetaller også separeres ut fra FA. TRL for Ash2Salt er estimert til 5-7, men prosessen er lovende (SINTEF, 2018).

Ash2Salt

Figur 9 viser et enkelt flytskjema for behandlingstegene i Ash2Salt-prosessen.



Figur 9 Ash2Salt-prosessen, fra aske til salter (EasyMining, 2021).

Ash2Salt er en metode for å skille salter fra FA. Prosessen består av to trinn. Det første trinnet er å vaske asken med vann, som resulterer i en vasket aske samt skrubbevæske bestående av hovedsakelig salter og tungmetaller. I det andre trinnet blir sulfider brukt til å utfelle tungmetaller fra skrubbevæske. Man sitter da igjen med en kloridmettet væske, og det er nå selve Ash2Salt-prosessen starter, se Figur 9 (EasyMining, 2021).

Ash2Salt-prosessen går ut på å skille kaliumklorid, natriumklorid og kalsiumklorid. Dette gjøres ved bruk av en fordampner. Vannet man står igjen med kan brukes på nytt til trinn én av prosessen. De tre saltene man får utvunnet ved bruk av denne teknologien kan deretter selges på råvaremarkedet. Denne teknologien er enda ikke i kommersielt bruk, men i mai 2020 ble byggingen av Ragn-Sells nye anlegg for akkurat denne type teknologi startet. Om alt går etter planen skal igangsettingen av det nye Ash2Salt-anlegget skje sommeren 2022 (Ragn-Sells AS, 2021).

2.7.2 Materialgjenvinning

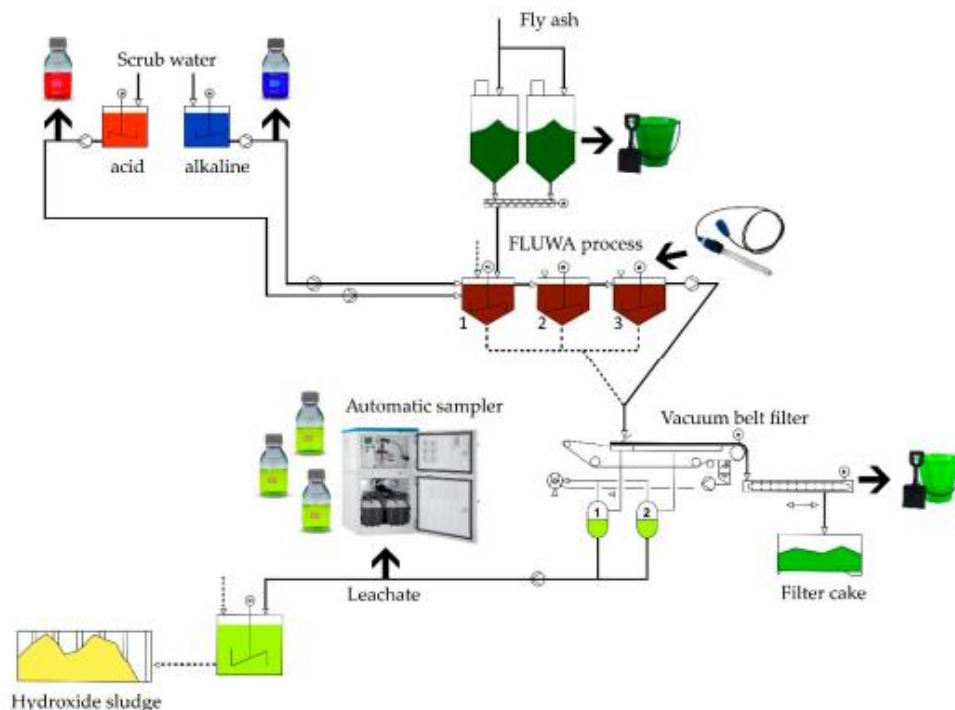
Tungmetaller utgjør 1-3% av FA. Med de store mengdene FA som produseres årlig, er det store mengder tungmetaller, samt andre metaller, som ligger i FA. Ved kun stabilisering av FA går disse ressursene tapt. Derfor er det stort fokus på material/metallgjenvinning fra FA. I dag er det primært én

kommersiell tilgjengelig prosess for metallgjenvinning i Europa. Det er FLUWA/FLUREC-prosessen. Denne anvendes kommersielt i Sveits grunnet lovpålagt metall/produkt ekstraksjon av Zn. Dyre drifts- og behandlingskostnader gjør prosessen lite økonomisk gunstig (Norsk Energi, 2018).

FLUWA er en prosess som har vært tilgjengelig siden 1990 og evner å gjenvinne utvalgte metaller: Cu, Zn, Pb og Cd. Prosessen er energikrevende og vil ikke redusere deponimengden nevneverdig, men er med på å ufarliggjøre avfallet. FLUREC kom på markedet senere, og har gjort det mulig å få ut flere typer metall fra FA. FLUREC er en dyr prosess, som gjør at prisen for FLUWA og FLUREC vil være høy. TRL til prosessene er 9 og er fullt kommersielt operasjonelle (SINTEF, 2018).

FLUWA/FLUREC

Prosessen baserer seg på utvasking av en Zn-rik fraksjon ved hjelp av skrubbevæske fra røykgassrensningen. Den Zn-rike fraksjonen separeres fra resten av FA. I den separerte fraksjonen vil det i tillegg til Zn være akkumulert konsentrasjoner av metaller (Pb, Cd og Cu) som senere kan gjenvinnes. I FLUWA prosessen er målet å produsere slam med høy konsentrasjon av metall. Hvor mye metall og hvilke faser skrubbevæske består av avhenger av mange ulike variabler; pH, redokspotensialet og hvilket avfall som er brent. pH bestemmes ut ifra alkaliteten til FA, se Figur 10 (Weibel, Zappatini, Wolffers, & Ringmann, 2021).



Figur 10 Skjematisk oppsett av FLUWA-prosessen på industriell skala (Weibel, Zappatini, Wolffers, & Ringmann, 2021).

Etter utvasking og slam med ønsket konsentrasjoner er oppnådd, kan FLUREC prosessen gjennomføres. Her blir de ønskede metallene separert ut av slam ved hjelp av selektiv oppløsning og elektrolyse. I dag gjenvinnes i hovedsak Zn fra prosessen (SINTEF, 2018). FLUREC er en renseprosess av slammet en får i FLUWA-prosessen. Zn kan gjenvinnes med opp til 99,99% renhet. Biproduktet av utvinningen av veldig ren sink er et sekundært konsentrat av bly (Pb), kobber (Cu) og kadmium (Cd). Dette biproduktet vil være i en form som kan gjenbrukes etter passende resirkuleringsprosess. Uten bruk av FLUREC-prosessen vil Zn fortsatt kunne gjenvinnes. Da selges slammet som er rikt på Zn til smelteverk som produserer Zn (SINTEF, 2018).

2.7.3 Karbonatisering

NOAH forsøker å stabilisere FA ved hjelp av ACC (Accelerated Carbonation Curing). Dette innebærer at asken blandes med en CO₂-rik gass fra en sementfabrikk eller en annen type industriell prosess. FA tilsettes i en karbonatisert fase og blir til faste klumper. Dette stabiliserer innholdet i FA (SINTEF, 2018).

Til tross for dette blir alt avfall deponert på grunn av forurensinger. Samtidig som asken stabiliseres, tas CO₂-gass fra industrielle anlegg opp og blir dermed forbrukt. Metoden er utprøvd og fungerer for et variert utvalg FA. I mars 2018 ble TRL estimert til 5-6 på storskala prototyper. Ønsket er å oppnå en TRL på 9 og dette ble estimert til å være mulig å få til i løpet av 4-6 år fra 2018. I Suffolk i England finnes det et anlegg hvor denne metoden er kommersialisert. Carbon8 Aggregates, firmaet som står bak anlegget, benytter seg av samme ACC-prosess som NOAH og har planlagt å bygge et nytt anlegg i Bristol (SINTEF, 2018).

3 Material og metode

Dette kapitlet beskriver materialene som ble brukt under det eksperimentelle arbeidet (del 3.1) og hvordan det eksperimentelle arbeidet (ovnsforsøk) ble gjennomført (del 3.2). Deretter blir metoden for analyser presentert, med analyse før og etter eksperimentelt arbeid og metodeutvikling for analysedelen (del 3.3). Til slutt presenteres ulike modelleringer som er aktuelle for det eksperimentelle arbeidet (del 3.4)

3.1 Materialer

I det eksperimentelle arbeidet ble det først gjort analyser av ubehandlet FA. FA brukt i dette arbeidet er fra NOAH AS på Langøya. Den kommer fra avfallsforbrenning i Skandinavia.

Forbrenningsparameterne er ukjente, men man kan anta at forbrenningen som ga CFBA og GFA ble gjort på rundt 1000°C. Dette ble gjort ved to forskjellige forbrenningsteknologier: virvelsjikt- og ristovnsforbrenning. FA ble mottatt i midten av februar 2021. De kom i to beholdere, en for CFBA og en GFA, vist i Figur 11. Figur 12 viser ubehandlet GFA og CFBA. Det er disse FA som blir brukt under analyser og eksperimentelt arbeid. Se Vedlegg B: Sikkerhetsdatablad for flyveaske for mer informasjon om FA.



Figur 11 Beholdere til FA. Fra venstre: GFA og CFBA

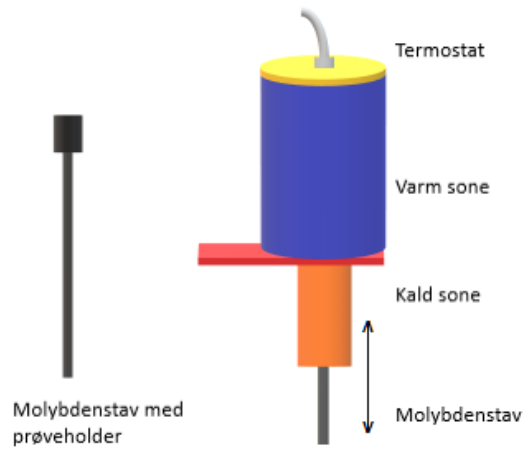


Figur 12 Fra venstre: ubehandlet GFA og ubehandlet CFBA.

Under analysene ble SEM/EDS, XRD og XRF brukt til kartlegging og kategorisering av FA for å gi en oversikt over faser og grunnstoffer til stede. Det ble deretter gjennomført reduksjons- og karboniseringsforsøk i ovn. Etter ovnsforsøk ble SEM/EDS og XRD brukt til analyse av FA og de ulike produktene dannet under ovnsforsøk. Dette er for å se hvordan FA endrer seg under de forskjellige forsøkene.

3.2 Ovnsforsøk

Under det eksperimentelle arbeidet ble det gjennomført to forskjellige ovnsforsøk på CFBA og GFA. Først ble reduksjonsforsøk gjennomført, deretter karboniseringsforsøk. I begge ovnsforsøkene ble FA varmebehandlet ved ulike temperaturer. Videre i oppgaven vil FA bli omtalt som redusert og karbonisert for å skille mellom forsøkene. Ved begge ovnsforsøkene ble en grafitt rørovn, «Graphite tube furnace – TF2 translation», brukt. Figur 13 viser ovnen og en enkel skisse over hvordan ovnen fungerer. Molybdenstaven ble brukt til å kunne føre prøveholder ut og inn av ovn, samt mellom kald og varm sone i ovnen. Ved reduksjons- og karboniseringsforsøk ble reaktor av 316 syrefast stål brukt. Det ble brukt en grafittpakning på reaktor, vist i Figur 14.



Figur 13 Til venstre er et bilde av TF2-ovnen som ble brukt i forsøkene (NTNU, 2015). Til høyre er en enkel skisse av ovnens virkemåte.



Figur 14 Reaktor med pakning som ble brukt under ovnsforsøk.

I Tabell 4 blir det presentert hvilke ovnsforsøk som ble gjort for hver av askene.

Tabell 4 Oversikt over hvilke ovnsforsøk som ble gjennomført med CFBA og GFA.

Ovnsforsøk	CFBA	GFA
Reduksjon ved 1100°C	X	X
Reduksjon ved 1200°C	X	
Karbonatisering ved 500°C	X	X

Reduksjon ved 1200°C ble ikke gjennomført for GFA grunnet uønskede reaksjoner på reaktoren under forsøket ved 1200°C for CFBA, og uvisshet om eventuelle konsekvenser for ovnen som ble brukt.

3.2.1 Reduksjonsforsøk

Figur 15 viser grafittedigel med henholdsvis CFBA og GFA før reduksjonsforsøk.

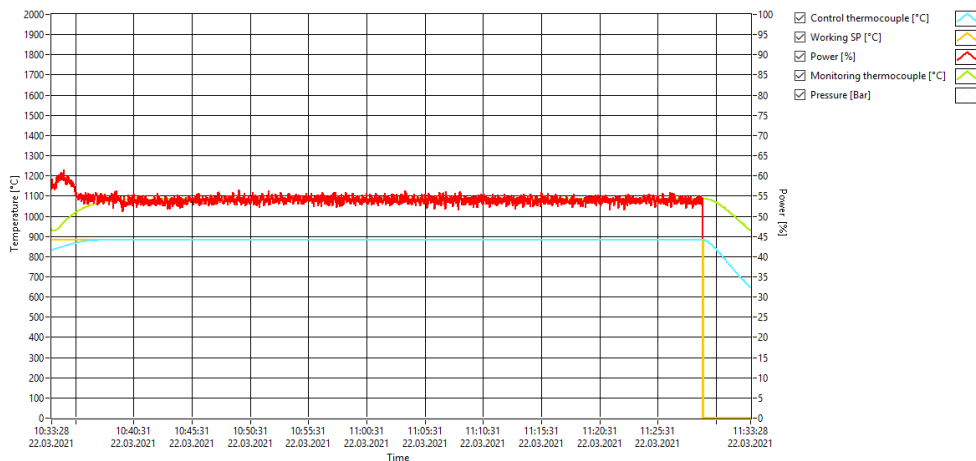


Figur 15 Fra venstre: CFBA og GFA i grafittedigel

Preparering av prøveholder ble gjort i avtrekksskap. Omtrent ett gram FA ble plassert i digel laget av grafitt, for å gi et reduksjonsmiddel i reaktor. Prøveholderen ble deretter plassert i reaktoren i hanskeboks. Hanskeboks ble brukt for å få en inert atmosfære i reaktoren, for å unngå uønskede reaksjoner med oksygen. Reaktoren ble derfor fylt med argongass.

Reduksjonsforsøk 1 – CFBA

Ovnen ble forvarmet til 1084°C. Prøven sto i varm sone i ovnen i én time. Etter endt forsøk ble ovnen slått av og prøven ble stående i varm sone, slik at den ble kjølt ned med samme hastighet som ovnen. Prøven ble tatt ut etter cirka to timer. FA ble deretter tatt ut av reaktoren og plassert i forskjellige beholdere basert på hvor i rektoren den behandlede FA ble funnet. FA ble så tatt med til videre analyse. Figur 16 viser temperaturutviklingen under reduksjonsforsøk 1.



Figur 16 Temperaturutvikling i ovn, CFBA – 1 time - 1100°C.

Reduksjonsforsøk 2 – GFA

Samme prosess ble gjort for forsøk 2 som for forsøk 1, men den endelige temperaturen ble 1093°C i dette forsøket. Ved endt forsøk ble prøven flyttet ned til kald sone i ovnen, som resulterte i noe raskere avkjøling enn i forsøk 1. I forsøk 2 ble prøven tatt ned til kald sone siden ovnen skulle forbli påskrudd. Dette var fordi et nytt forsøk skulle gjennomføres fortløpende. Etter avkjøling ble FA tatt ut av reaktor og plassert i separate beholdere for videre analyse.

Reduksjonsforsøk 3 – CFBA

Ovnen ble forvarmet til 1195°C. Prøven ble så plassert i varm sone i én time. Ved endt forsøk ble ovnen slått av og prøven ble plassert i kald sone til romtemperatur var nådd. Deretter ble FA tatt ut av reaktor og klar for videre analyse.

3.2.2 Karbonatisering

Figur 17 viser CFBA og GFA i aluminadigel før karboniseringsforsøk.



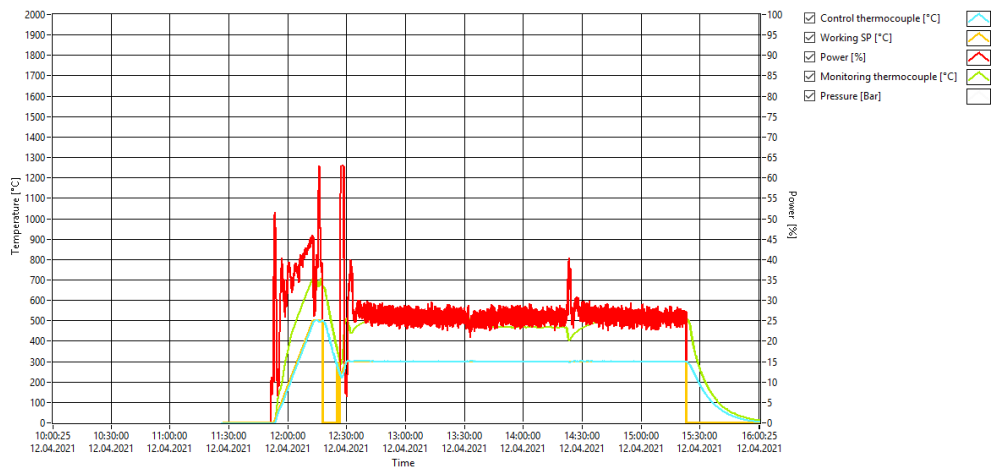
Figur 17 Fra venstre: CFBA og GFA i aluminadigel

1,0g CFBA og 0,9g GFA ble plassert i hver sin digel laget av alumina. Dette ble gjort i avtrekksskap. Prøveholder med FA, reaktor med pakning og nødvendig verktøy ble så plassert i en hanskepose. Hanskeposen ble fylt med CO₂, oppsettet er vist i Figur 18. Da posen hadde oppnådd en CO₂-rik atmosfære ble reaktoren med prøveholder lukket og klargjort for ovnsforsøk.



Figur 18 Hanskepose fylt med CO₂.

Prøven med CFBA ble varmebehandlet i én time på 519°C. Prøven med GFA ble varmebehandlet i én time på 514°C. Temperaturutvikling i ovnen er vist i Figur 19, hvor CFBA sto i ovn fra rundt 12:45 til 13:45 og GFA sto fra omtrent 14:20 til 15:20.



Figur 19 Temperaturutvikling i ovn.

3.3 Analyser

Det ble gjennomført analyser av CFBA og GFA før og etter ovnsforsøk. Elektronmikroskopet JEOL Neoscope JCM-6000 ble brukt til SEM-analyser. SEM ble brukt for å se på sammensetningen til enkeltpartikler og områder i FA, både før og etter ovnsforsøk. Rigaku Miniflex 600 ble brukt til XRD-analyse. Dette ble gjennomført for å finne ut hvilke faser FA besto av før og etter de ulike ovnsforsøkene. PANalytical Zetium 4 kW X-ray spectrometer ble brukt til XRF-analyser. Disse analysene ble kun gjennomført på FA før ovnsforsøk og brukt til å underbygge analysene fra SEM og XRD.

3.3.1 SEM/EDS

For å optimalisere punkt- og områdeanalysene fra SEM/EDS ble fem ulike metoder brukt. De fem metodene ble testet for å finne hvilken metode som passet til de ulike formålene med analysene.

Metode 1 – epoxyprøve med FA i pulverform

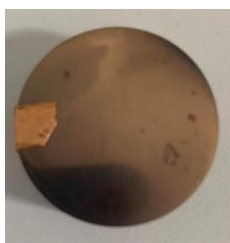
Trinn 1: prøvene ble preparert ved støping i epoxy. En liten mengde av begge typene FA ble plassert ubehandlet i støpeform, og deretter tilsatt flytende epoxyblanding. Prøvene sto i 24 timer for å bli herdet. Figur 20 viser fylt prøveholder.



Figur 20 Prøveholder fylt med epoxy.

Trinn 2: Etter at prøvene hadde blitt herdet ble de slipt på grovt pussepapir (SiC) med kornstørrelse 220 og videre på finere papir med kornstørrelse 4000. Til slutt ble de slipt med diamant.

Trinn 3: Epoxy prøvene ble så belagt med et tynt lag gull for å få en ledende overflate, se Figur 21.



Figur 21 Gullbelagt epoxyprøve.

Trinn 4: For å få kontakt mellom den ledende overflaten og bunnen av prøven ble det plassert en kobberteip fra topp til bunn av prøven. Kobberteipen på toppen av prøven fikk en liten brett, slik at den ledende overflaten på teipen berørte den ledene overflaten på prøven. Figur 21 viser endelig prøve.

Det ble i tillegg forsøkt å tørke FA i ovn ved 120 °C i minimum 20 timer for å fjerne fukt, samt tilsette mer FA i innstøpingen.

Metode 2 – epoxyprøve FA i klumper

Denne metoden ble brukt til å analysere klumper for å kunne se på tverrsnitt. Metoden ble brukt på karbonatisert GFA, samt begge FA fra reduksjonsforsøk. Klumpene ble støpt inn i epoxy på samme måte som i metode 1. I denne metoden ble det slipt med et ikke vandig smøremiddel. Det ble brukt olje og isopropanol for å unngå at partikler i FA løses opp i vann. Trinn 3 og 4 fra metode 1 ble brukt i metode 2.

Metode 3 – FA på karbonteip

Tørket FA ble knust i morter og deretter plassert på karbonteip festet på prøveholder av Al, se Figur 22. En liten mengde FA ble plassert på karbonteip. Denne metoden ble brukt til områdeanalyser av ubehandlet FA.



Figur 22 Prøveholder av Al med karbonteip.

Metode 4 – Oppløst FA på karbonteip

Tørket FA ble knust med morter, så tilsatt etanol for oppløsning. Oppløst FA ble pipettert på karbonteip på prøveholder av Al. Metoden ble brukt til punktanalyser av enkeltpartikler i FA før og etter ovnsforsøk.

Metode 5 – Oppløst FA på kobberteip

Tørket FA ble knust med morter, så tilsatt etanol for oppløsning. Oppløst FA ble pipettert på karbonteip på prøveholder av Al. Metoden ble brukt til punktanalyser av enkeltpartikler i FA før og etter ovnsforsøk.

Tabell 5 viser en oversikt over hvilke metoder som ble brukt for de ulike FA før og etter ovnsforsøk. CFBA redusert inneholder både reduksjon ved 1100°C og 1200°C.

Tabell 5 Oversikt over metoder brukt for CFBA og GFA før og etter ovnsforsøk.

	CFBA Ubehandlet	GFA Ubehandlet	CFBA Redusert	GFA Redusert	CFBA Karbonatisert	GFA Karbonatisert
Metode 1						
Metode 2			X	X		
Metode 3	X	X				
Metode 4	X	X				
Metode 5	X	X			X	X

3.3.2 XRD

Ved analyser før ovnsforsøk ble små mengder av FA ble plassert i prøveholdere og blandet med etanol. Etter at etanolen hadde fordampet ble prøven plassert i XRD-apparatet (Rigaku MiniFlex 600). Det ble scannet med én grad/minutt i 120 grader, som resulterte i at prøvene sto i omtrent to timer.

Prøvene etter ovnsforsøk ble knust med morter og tilsatt etanol. Små mengder oppløst FA ble pipettert på en glassplate på prøveholder. Prøvene fra reduksjonsforsøk og karbonatiseringsforsøk ble scannet én grad/minutt opp til 120 grader.

Hver av analysene ga et diffraktogram som ble sett på i databasen ICDD (The International Centre for Diffraction Data) med utgangspunkt i tidligere forskning, se Tabell 2 og Tabell 3.

3.3.3 XRF

Analysene ble utført med PANalytical Zetium 4 kW X-ray spectrometer på pressede piller (9,6 g prøve blandet med 2,4 g Lico-wax). Resultatene rapporteres som semi-kvantitative. XRF ble kun benyttet på ubehandlet FA.

3.4 Modellering

Under ovnsforsøkene forventes det å få flere ulike reaksjoner, som for eksempel reduksjon av metaller og karbonatisering. Ved hjelp av termodynamiske modelleringer er det mulig å beregne hvilke reaksjoner som forventes å skje under ovnsforsøkene. Programmet som ble brukt til disse beregningene er HSC Chemistry og tillater å gjøre termodynamiske beregninger med flere variabler. Dette gjør det mulig å studere hvordan reaksjoner og likevekter oppfører seg under ulike forhold, samt se på hvilke produkter som dannes.

Modellering ble utført for å underbygge teorien og gi et estimat på om reaksjonene beskrevet i del 2.5 og 2.6 vil skje under de forholdene ovnsforsøkene ble gjort under. Figur 23 viser de innsatte verdiene for modellering av Fe-reduksjon. Inngangsverdien for mengden Fe_2O_3 ble satt til 1 kg, og karbon ble tilsatt i 100 steg med 0,01kg for hvert steg. Atmosfæren ble satt til å inneholde CO , O_2 og CO_2 . Beregningen ble gjort ved 1100 °C og 1 bar.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Species	Feed	Activity	Amount	Initial	Initial	Add	Add
2	Formula	Temperature	Coefficient	Unit	Amount	Amount	X-amount	Z-amount
3		°C	f			%		
4	Råvarematerial		Pure		1	100	0,01	0
5	Fe2O3	25	1	kg	1	100		
6	C	25	1	kg	1E-20	1E-18	0,01	
7	Fe3O4	25	1	kg	0	0		
8	FeO	25	1	kg	0	0		
9	Metallsmelte		Pure		0	0	0	0
10	Fe(l)	25	1	kg		0		
11	C(l)	25	1	kg		0		
12	Atmosfære		Mixture		0	0	0	0
13	CO(g)	25	1	Nm3		0		
14	O2(g)	25	1	Nm3		0		
15	CO2(g)	25	1	Nm3		0		

Figur 23 Input-verdier for modellering av Fe-reduksjon.

Figur 24 viser input-verdiene for modellering gjort med Zn. For denne modelleringen ble det sett på temperaturintervallet 700-1200°C, delt opp i 10 steg. Trykket ble satt til én bar.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Species	Feed	Activity	Amount	Initial	Initial	Add	Add
2	Formula	Temperature	Coefficient	Unit	Amount	Amount	X-amount	Z-amount
3		°C	f			%		
4	Råvare material		Pure		2	100	0,01	0
5	Zn(s)	25	1	kg		0		
6	Zn(HCP)	25	1	kg		0		
7	Zn(FCC)	25	1	kg		0		
8	C	25	1	kg	1	50	0,01	
9	ZnO	25	1	kg	1	50		
10	Smelte		Mixture		0	0	0	0
11	Zn(l)	25	1	kg		0		
12	C(l)	25	1	kg		0		
13	Atmosfære		Mixture		0	0	0	0
14	O2(g)	25	1	Nm3		0		
15	CO2(g)	25	1	Nm3		0		
16	CO(g)	25	1	Nm3		0		
17	Zn(g)	25	1	Nm3		0		

Figur 24 Input-verdier for modellering oppførselen til Zn under temperaturøkning.

Figur 25 viser input-verdier for modellering av karbonatisering. Samme betingelser som for Fe-reduksjon er satt for denne modelleringen, utenom at temperaturen er 500°C.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Species	Feed	Activity	Amount	Initial	Initial	Add	Add
2	Formula	Temperature	Coefficient	Unit	Amount	Amount	X-amount	Z-amount
3		°C	f			%		
4	Råvare material		Pure		1	100	0	0
5	CaO	25	1	kg	0	0		
6	CaCO3	25	1	kg		0		
7	Ca(OH)2	25	1	kg	1	100		
8	Atmosfære		Mixture		1E-20	100	0,01	0
9	CO2(g)	25	1	Nm3	1E-20	100	0,01	
10	O2(g)	25	1	Nm3		0		
11	H2O(g)	25	1	Nm3		0		

Figur 25 Input-verdier for modellering av karbonatiseringsforsøk.

4 Resultat

Dette kapitlet tar for seg resultatene fra analysene og ovnsforsøkene. Kapitlet består av fire hoveddeler: metodeutvikling for SEM/EDS (del 4.1), analyser av FA før ovnsforsøk (del 4.2), reduksjonsforsøk med tilhørende analyser og karbonatiseringsforsøk med tilhørende analyser (del 4.3). Til slutt er resultatene fra modelleringen presentert (del 4.4). SEM/EDS-, XRD- og XRF-analyser ble brukt under det eksperimentelle arbeidet og er presentert i resultatdelen.

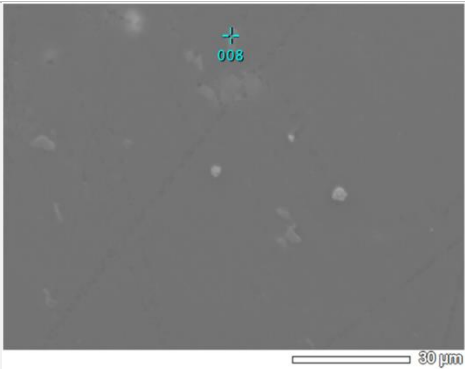
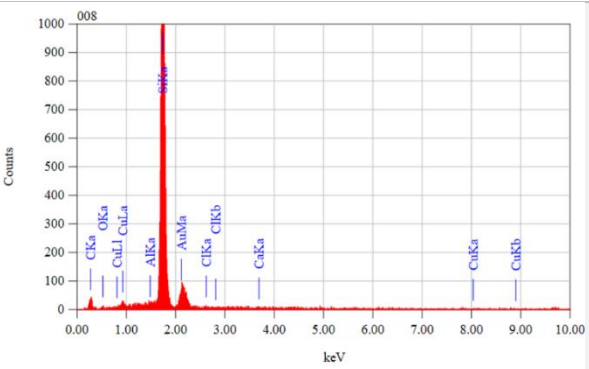
4.1 Metodeutvikling

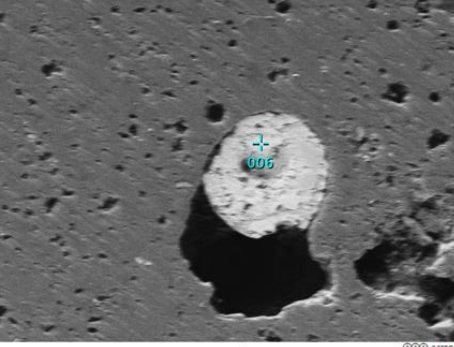
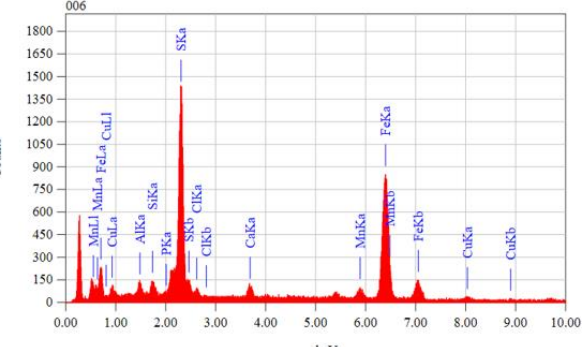
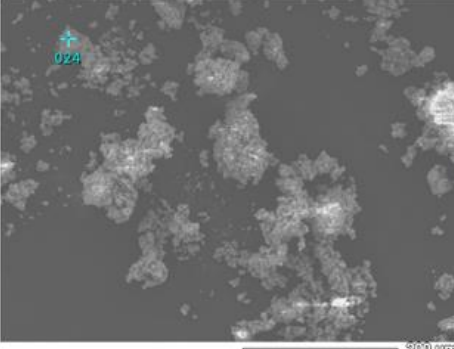
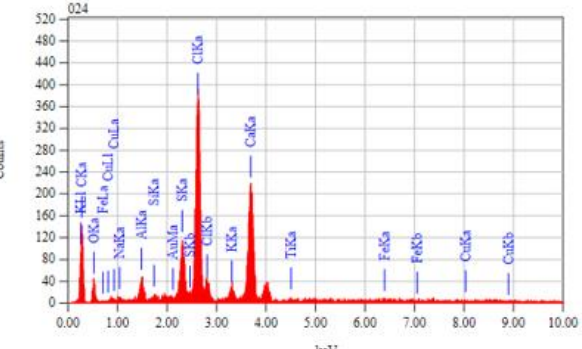
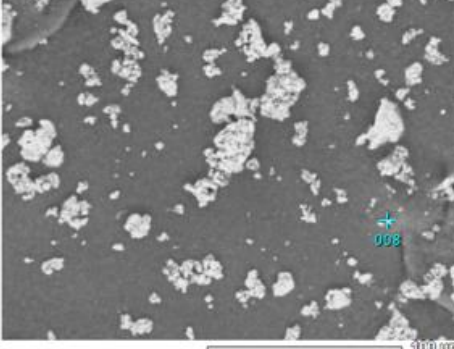
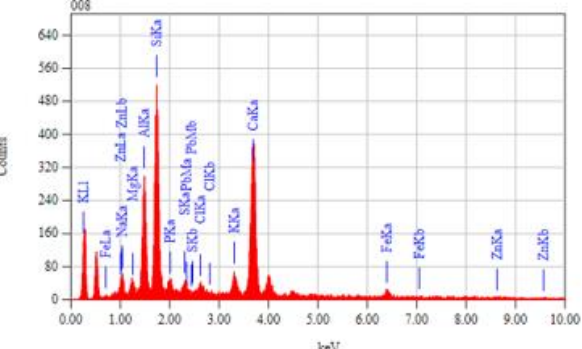
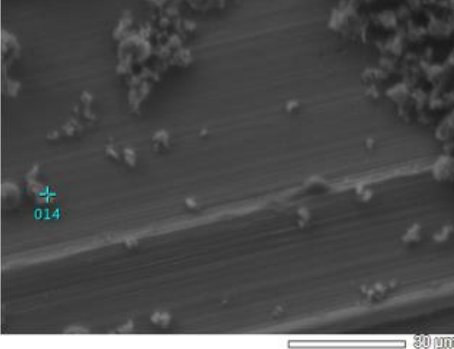
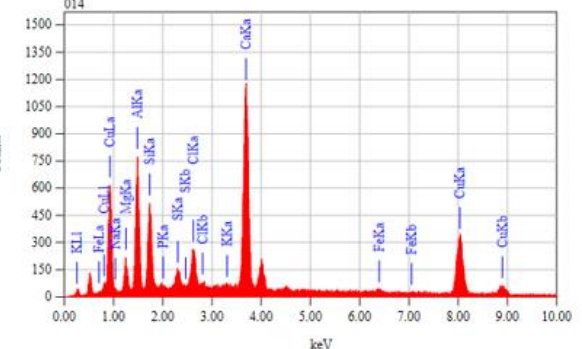
Gjennom arbeidet ble flere ulike metoder for SEM/EDS gjort for å få best mulig resultat. Dette er en oversikt over resultatene fra de forskjellige metodene.

4.1.1 SEM/EDS

Tabell 6 viser kvaliteten på resultater ved bruk av forskjellige metoder for SEM/EDS-analyse. Disse resultatene ble brukt til å bestemme hvilken metode som vil gi best resultater for videre analyser i dette arbeidet.

Tabell 6 Ulike metoder for SEM/EDS-analyse. Fra topp: Figur 1 til 5.

Metode	SEM	EDS
Epoxyprøve med FA i pulverform <i>I</i>		

<p>Epoxyprøve med FA i klumper</p> <p>2</p>		
<p>FA på karbonteip</p> <p>3</p>		
<p>Oppløst FA på karbonteip</p> <p>4</p>		
<p>Oppløst FA på kobberteip</p> <p>5</p>		

Tabell 6 viser at metodene gir varierende resultater for SEM. Metode 1 var den første som ble tatt i bruk og ga ikke nok informasjon om sammensetningen på grunn av at FA ikke ble skilt fra epoxymatriksen. Metoden ble derfor ikke videreført i arbeidet. Metode 2 ble brukt til å analysere tverrsnitt av FA der partikler hadde sintret til klumper. Metode 3 ble i hovedsak brukt til å gjøre raske

analyser av en større mengde FA, enten for å bestemme sammensetningen i flere områder eller for å se på endringer i FA med SEM. Metode 4 og 5 ble brukt til analyse av enkeltpartikler i FA, ettersom disse var de mest gunstige metodene for separering av partikler i FA.

4.2 Analyser av ubehandlet FA

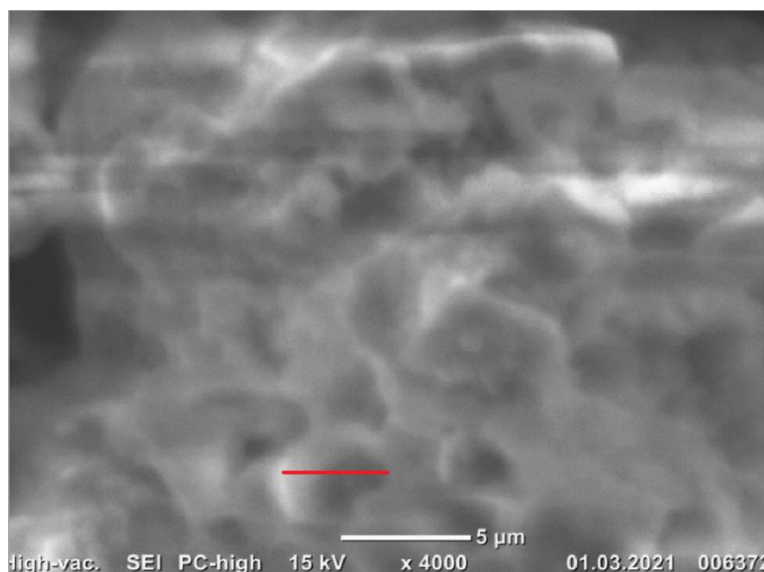
Det ble gjort innledende analyser for å få oversikt over hva FA inneholder. Til å begynne med ble SEM/EDS-analyser utført på CFBA og GFA, både område- og punktanalyser. I tillegg ble XRD og XRF brukt for å karakterisere innhold og faser i begge FA før ovnsforsøk.

4.2.1 SEM/EDS

SEM/EDS analyse ble brukt til å anslå kornstørrelse, bestemme sammensetningen for hele områder og finne sammensetningen til ulike partikler i FA.

Kornstørrelse

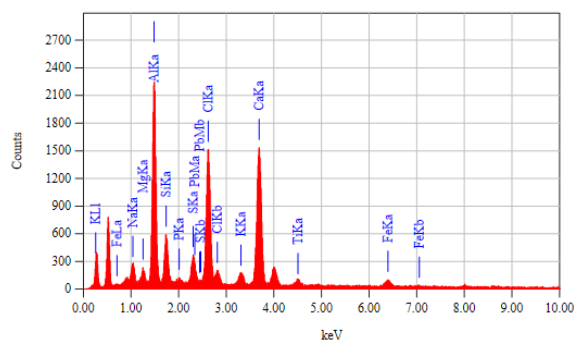
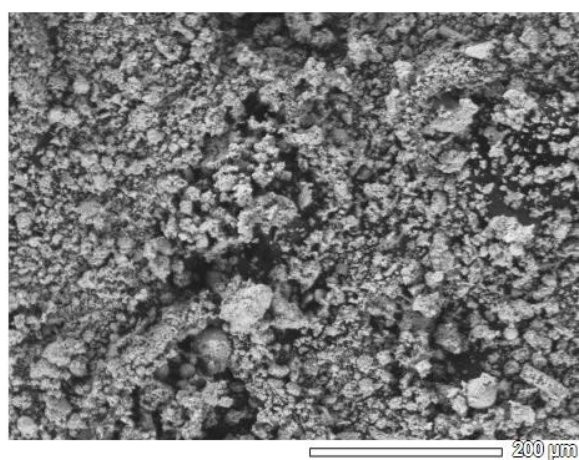
SEM ble brukt til å ta bilder av FA for å anslå kornstørrelse til den ubehandlede FA. Flere bilder ble tatt, blant annet vist i Figur 26 og resultatet var at FA bestod av korn med en størrelse fra 2 til 10 μm . Korn er markert med rød linje.



Figur 26 SEM-bilde for å anslå kornstørrelse.

Områdeanalyse

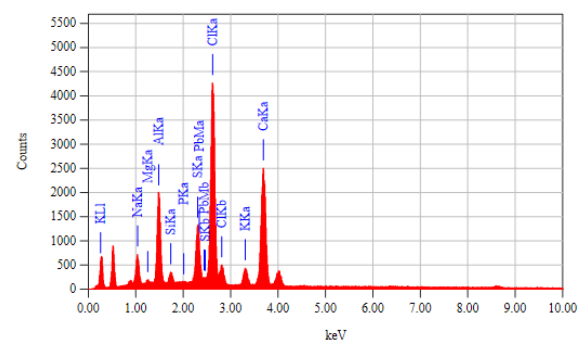
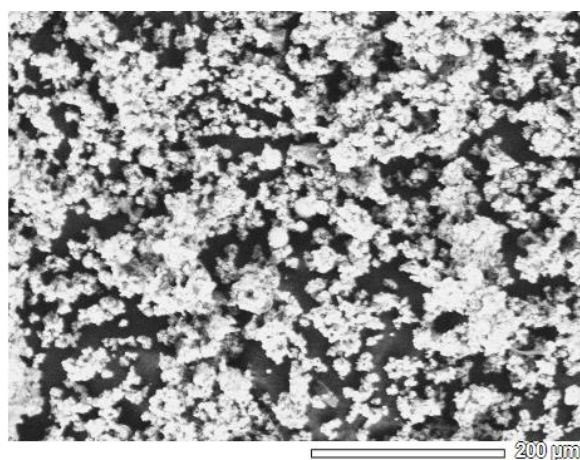
Områdeanalyse ble gjort for å få en oversikt over hva CFBA og GFA inneholdt. Metode 3 – FA på karbonteip ble brukt til områdeanalysene. Resultater for CFBA er vist i Figur 27 og GFA er vist i Figur 28. Øverst i figuren vises et SEM-bilde av FA, under er det et plot med antall tellinger på y-aksen og keV på x-aksen. keV-verdien blir knyttet opp mot matchende grunnstoffer. Tabellen nederst i figuren viser til anslått masse- og atomprosent for de grunnstoffene som er funnet. Sigma-verdien anslår usikkerheten, lav verdi gir lav usikkerhet. Metode 3 – FA på karbonteip er brukt til disse områdeanalysene.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1691

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
Pb M				
P K	2.013	0.6	0.1	0.6
Mg K	1.253	1.9	0.1	2.5
Ti K	4.508	2.1	0.1	1.5
K K	3.312	2.5	0.1	2.1
Na K	1.041	3.3	0.1	4.8
S K	2.307	3.9	0.1	4.1
Fe K	6.398	4.3	0.2	2.6
Si K	1.739	6.7	0.1	8.0
Cl K	2.621	20.7	0.2	19.5
Al K	1.486	22.8	0.2	28.3
Ca K	3.690	31.2	0.2	26.0
Total		100.0		100.0

Figur 27 Områdeanalyse av CFBA.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1222

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
Pb M				
P K	2.013	0.2	0.0	0.2
Mg K	1.253	0.5	0.0	0.7
Si K	1.739	1.6	0.0	1.9
K K	3.312	4.4	0.1	3.8
Na K	1.041	5.5	0.1	8.1
S K	2.307	8.3	0.1	8.8
Al K	1.486	12.0	0.1	15.2
Ca K	3.690	33.0	0.1	28.0
Cl K	2.621	34.6	0.1	33.2
Total		100.0		100.0

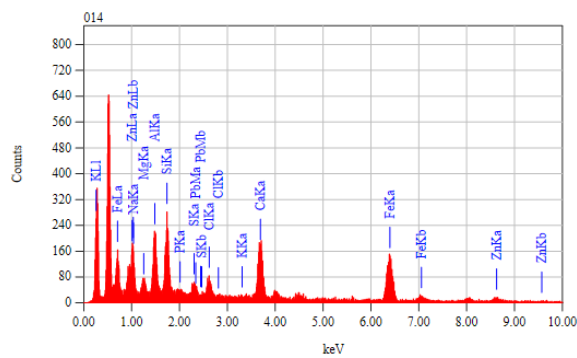
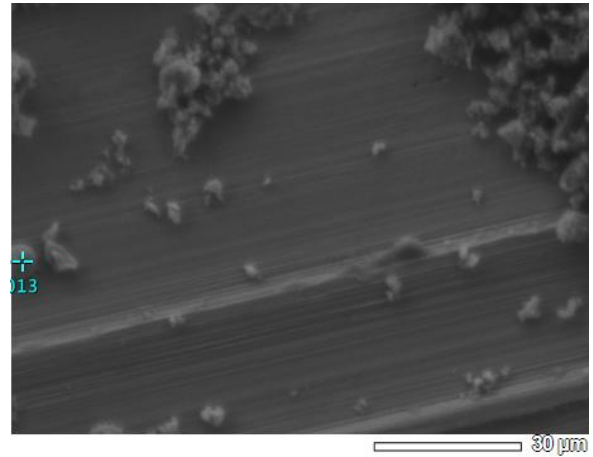
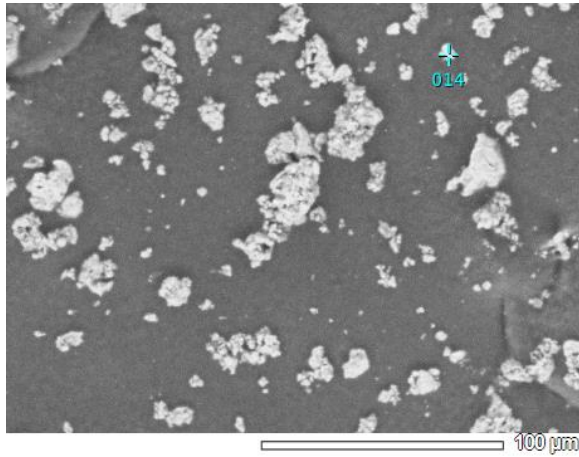
Figur 28 Områdeanalyse av GFA.

Øverst i Figur 27 og Figur 28 er et SEM-bilde av en mengde FA med varierende partikkelstørrelse. EDS-analysen under bildene viser hvilke grunnstoffer som er mest fremtredende i det gitte området. For CFBA ble det funnet mest Ca, Al og Cl i området. Fra tabellen under vises det betydelige mengder Si og Fe, i tillegg til flere andre grunnstoffer. I GFA ble det i hovedsak funnet Cl og Ca, i tillegg til mindre mengder Al, S, Na og K.

Punktanalyse

Videre ble det gjort punktanalyser for å finne sammensetningen til enkeltpartikler i FA. Øverst i figurene er SEM-bildet med markert opp hvilket punkt som ble analysert.

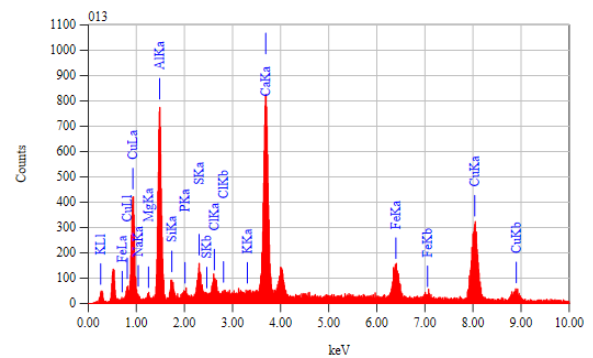
Figur 29 viser en punktanalyse av CFBA på karbonteip og Figur 30 viser en punktanalyse av CFBA på kobberteip. Metode 4 – Oppløst FA på karbonteip og Metode 5 – Oppløst FA på kobberteip for SEM ble brukt.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.5442

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
K K	3.312	0.0	0.1	0.0
Pb M				
P K	2.013	0.4	0.2	0.5
S K	2.307	2.5	0.2	3.0
Cl K	2.621	3.4	0.2	3.6
Mg K	1.253	4.0	0.3	6.2
Na K	1.041	5.1	0.5	8.3
Zn K	8.630	8.5	0.8	4.9
Al K	1.486	12.3	0.4	17.2
Ca K	3.690	14.4	0.3	13.5
Si K	1.739	14.5	0.4	19.4
Fe K	6.398	34.8	0.7	23.4
Total		100.0		100.0

Figur 29 Punktanalyse av CFBA på karbonteip.



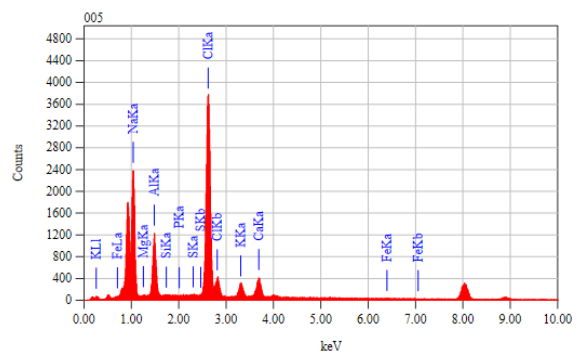
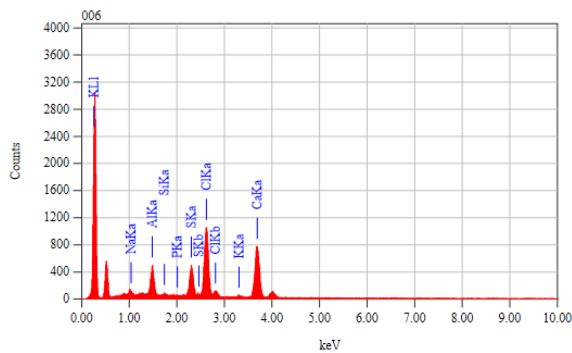
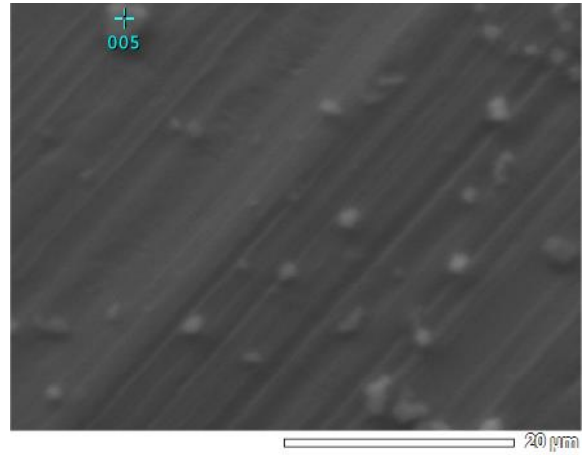
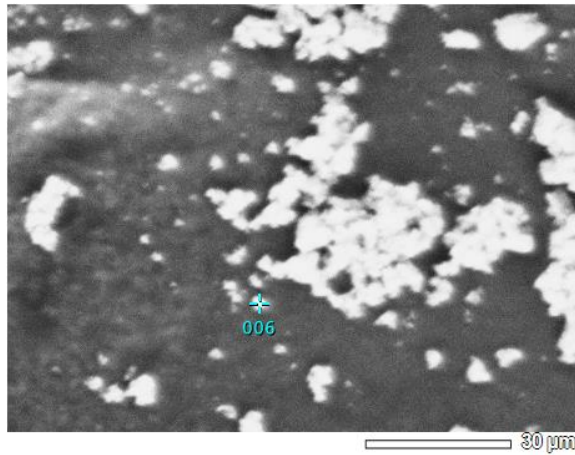
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.0969

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
K K	3.312	0.3	0.0	0.3
P K	2.013	0.5	0.1	0.8
Mg K	1.253	0.6	0.1	1.2
Na K	1.041	0.9	0.1	1.8
Cl K	2.621	1.4	0.1	1.8
Si K	1.739	1.6	0.1	2.6
S K	2.307	2.0	0.1	2.8
Fe K	6.398	9.1	0.2	7.3
Al K	1.486	16.3	0.2	27.0
Ca K	3.690	17.8	0.2	19.8
Cu K	8.040	49.3	0.7	34.7
Total		100.0		100.0

Figur 30 Punktanalyse av CFBA på kobberteip.

Figur 29 viser en punktanalyse av en partikkel hvor sammensetningen tydelig er forandret fra områdeanalysen i Figur 27. Intensiteten på toppene samt tabellverdiene under viser at blant annet Fe og Zn er fremtredende elementer i det analyserte punktet. I Figur 30 vises et annet punkt av en CFBA-partikkel. Hovedelementene i det analyserte punktet er Ca, Al og Fe, dersom bidraget fra Cu antas å komme fra kobberteipen under prøven.

Figur 31 viser punktanalyse av GFA på kobberteip og Figur 32 viser på karbonteip. Metode 4 – Oppløst FA på karbonteip og Metode 5 – Oppløst FA på kobberteip ble brukt for disse punktanalysene.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.5749

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
P K				
Si K	1.739	0.5	0.1	0.6
K K	3.312	1.1	0.1	1.0
Na K	1.041	2.4	0.1	3.7
Al K	1.486	10.2	0.2	13.3
S K	2.307	12.1	0.1	13.2
Cl K	2.621	33.9	0.2	33.5
Ca K	3.690	39.8	0.3	34.7
Total		100.0		100.0

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1975

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
P K				
Si K	1.739	0.2	0.1	0.2
S K	2.307	0.2	0.0	0.2
Mg K	1.253	0.3	0.1	0.3
Fe K	6.398	0.3	0.1	0.2
K K	3.312	5.6	0.1	4.4
Ca K	3.690	8.1	0.2	6.2
Al K	1.486	12.7	0.2	14.4
Na K	1.041	24.4	0.2	32.4
Cl K	2.621	48.3	0.2	41.7
Total		100.0		100.0

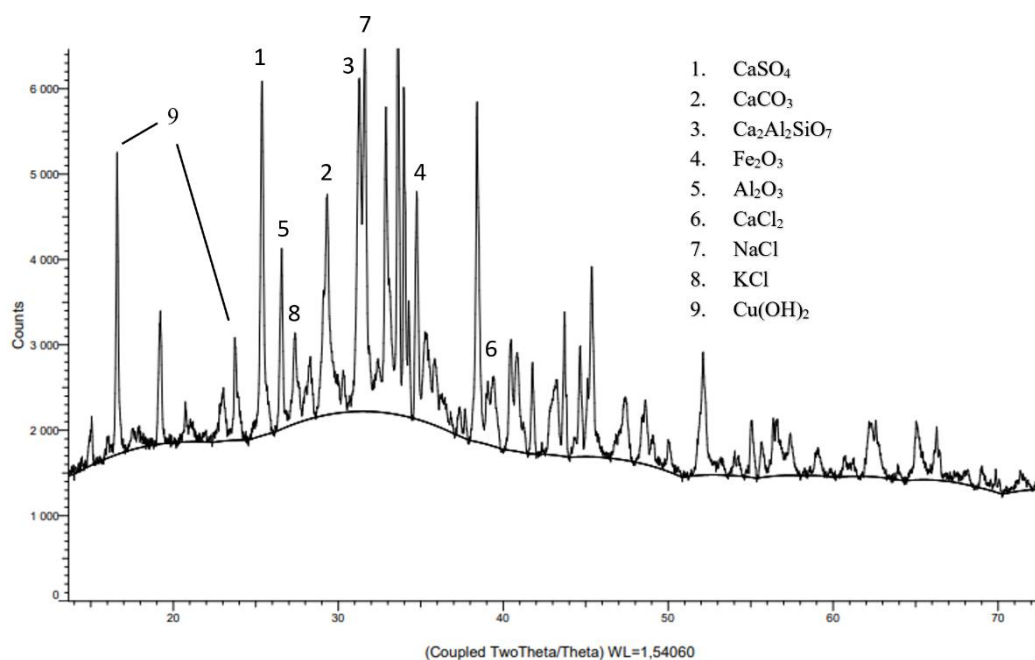
Figur 31 Punktanalyse av GFA på karbonteip.

Figur 32 Punktanalyse av GFA på kobberteip.

Figur 31 og Figur 32 viser to ulike punktanalyser for GFA, hvor to partikler ble analysert. Partikkelen til venstre bestod i hovedsak av Ca, Cl, S og Al, til forskjell fra partikkelen til høyre som primært inneholdt Cl og Na. Det tydelige bidraget fra Al kan i begge analysene skyldes at teipen var festet på en bit aluminium.

4.2.2 XRD

XRD ble gjennomført for GFA og CFBA. Figur 33 viser diffraktogram for CFBA med toppene til hovedfasene markert. I Tabell 7 er hovedfasene i CFBA presentert. Fasene som ble sjekket i databasen og antas å være til stede ble merket som «sannsynlig» og «svært sannsynlig».



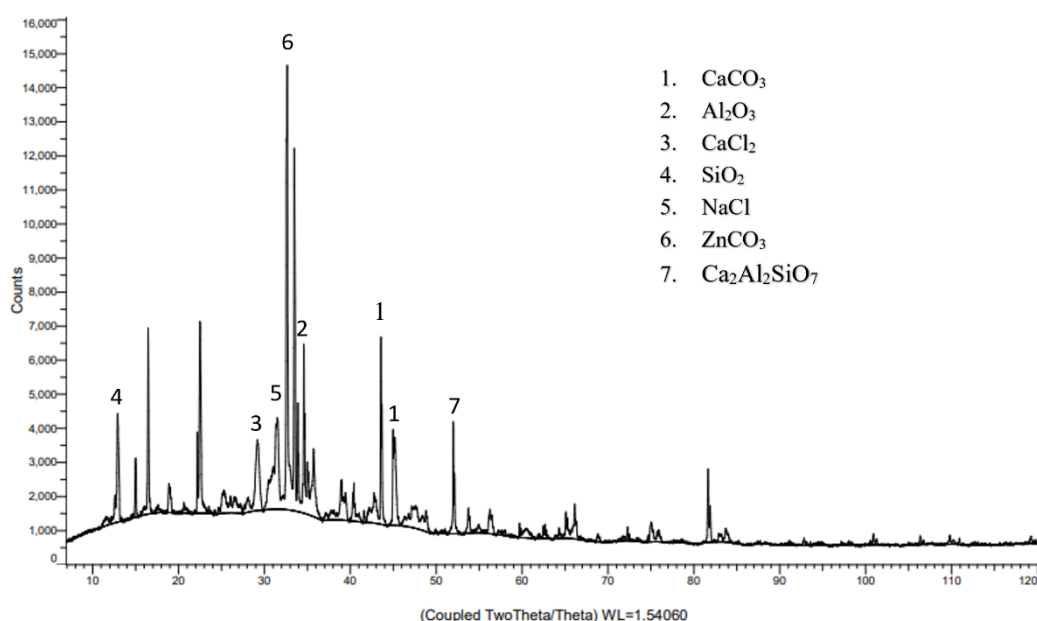
Figur 33 Diffraktogram for ubehandlet CFBA med markerte topper.

Tabell 7 Oversikt over faser for CFBA.

Faser	Match
CaSO ₄	Sannsynlig
CaCO ₃	Sannsynlig
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Sannsynlig
Fe ₂ O ₃	Sannsynlig
Al ₂ O ₃	Sannsynlig
CaCl ₂	Sannsynlig
NaCl	Svært sannsynlig
KCl	Sannsynlig
Cu(OH) ₂	Sannsynlig

I CFBA ble det funnet ulike salter, kalsiumforbindelser, mineraler og metalloksider, vist i Figur 33 og Tabell 7. De høyeste toppene ble markert i diffraktogrammet og alle forbindelsene med unntak av NaCl ble vurdert som sannsynlige matcher. NaCl ble kategorisert som svært sannsynlig for CFBA, vist i Tabell 7. Toppene som ikke er markert i diffraktogrammet ble ikke identifisert.

Diffraktogram for GFA vises i Figur 34 med hovedfaser markert i figuren. I Tabell 8 er hovedfasene i GFA presentert. Fasene som ble sjekket i databasen og antas å være til stede er presentert som «mindre sannsynlig», «sannsynlig» og «svært sannsynlig».



Figur 34 Diffraktogram for ubehandlet GFA med markerte toppene.

Tabell 8 Oversikt over faser for GFA.

Faser	Match
CaCO ₃	Sannsynlig
Al ₂ O ₃	Sannsynlig
CaCl ₂	Sannsynlig
SiO ₂	Sannsynlig
NaCl	Svært sannsynlig
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Sannsynlig
ZnCO ₃	Mindre sannsynlig

Det ble funnet ulike klorider og oksider i GFA. Totalt syv topper ble funnet som sannsynlig eller svært sannsynlig i diffraktogrammet, vist i Figur 34 og Tabell 8. Ut ifra søkene i databasen var det NaCl og Al₂O₃ som var de mest sannsynlige forbindelsene i GFA, markert som topp 2 og 5 i Figur 34. ZnCO₃ ble funnet som en sannsynlig fase ut ifra diffraktogrammet, topp nummer 6. På bakgrunn av EDS-analyser og senere XRF-resultater antas det å være lite sannsynlig at ZnCO₃ er like dominerende som vist i diffraktogrammet. I Tabell 8 er den derfor markert som mindre sannsynlig. Topper som ikke er markerte i diffraktogrammet ble ikke identifisert.

Vedlegg A: Oversikt over XRD presenterer ytterlige faser identifisert i CFBA og GFA, med ulik sannsynlighet for at fasene er til stede i FA.

4.2.3 XRF

XRF-analyse ble gjennomført og elementene i CFBA og GFA ble delt opp i hovedelementer og sporelementer, ut ifra mengden funnet i FA. Tabell 9 viser XRF-resultatene for CFBA.

Tabell 9 XRF-resultater for CFBA (Semikvantitativ).

Hovedelementer (>3,5%)	Vektprosent (%)	Sporelementer (<3,5%)	Vektprosent (%)	Sporelementer	Vektprosent (%)
Al ₂ O ₃	11,5	MnO	0,19	Cr ₂ O ₃	0,1
SiO ₂	11,2	MgO	2,10	ZrO ₂	0,03
CaO	25,5	P ₂ O ₅	1,02	Co ₃ O ₄	0,02
Fe ₂ O ₃	5,94	K ₂ O	1,79	NiO	0,04
Cl	10,7	TiO ₂	2,4	CuO	1,27
SO ₃	8,11	Na ₂ O	2,61	ZnO	1,24
		SrO	0,06	BaO	0,74
		Br	0,13	CdO	0,01
		I	0,01	MoO ₃	0,01
		PbO	0,29	Sb ₂ O ₃	0,05
		SnO ₂	0,06		
Totalt hoved	72,95			Totalt spor	14,17
				Totalt	87,12

Den kjemiske sammensetningen i CFBA ble funnet ved hjelp av XRF. Hovedelementene som ble funnet var oksider med Si, Al, Ca, Fe og S i tillegg til Cl og utgjorde 72,59 vektprosent til sammen, vist i Tabell 9. Sporelementene som ble funnet er presentert til høyre og utgjorde 14,17 vektprosent av FA. Fordi metoden som ble brukt er standardisert og vanligvis ikke brukes på komplekse FA ble resultatene semikvantitative. I tillegg detekterer analysemetoden kun oksider og rene stoffer. Mest sannsynlig vil Na og K ikke ligge som oksider, men egentlig være bundet til Cl.

Samme analyse ble gjort på GFA, og resultatet er vist i Tabell 10.

Tabell 10 XRF-resultater for GFA (Semikvantitativ).

Hovedelementer (>3,5%)	Vektprosent (%)	Sporelementer (<3,5%)	Vektprosent (%)	Sporelementer	Vektprosent (%)
Na ₂ O	4,03	MnO	0,04	Cr ₂ O ₃	0,03
K ₂ O	3,55	MgO	0,49	ZrO ₂	0,01
CaO	35,4	P ₂ O ₅	0,23	SnO ₂	0,08
Cl	23,1	SiO ₂	1,97	NiO	0,01
SO ₃	19,5	TiO ₂	0,54	CuO	0,136
		Al ₂ O ₃	0,8	ZnO	2,56
		SrO	0,03	BaO	0,17
		Br	0,21	CdO	0,02
		I	0,2	Sb ₂ O ₃	0,14
		PbO	0,45	Fe ₂ O ₃	0,73
Totalt hoved	85,58			Totalt spor	8,846
				Totalt	94,426

Hovedelementene utgjorde totalt 85,58 vektprosent av GFA, hvor CaO (35,4), Cl (23,1) og SO₃ (19,5) var de største elementene, vist i Tabell 10. Sporelementene utgjorde kun 8,846 vektprosent der SiO₂ (1,97) og ZnO (2,56) var de største. Mest sannsynlig vil Na og K ikke ligge som oksider, men egentlig være bundet til Cl.

4.3 Ovnforsøk

Etter at reduksjonsforsøk og karboniseringsforsøk var gjennomført ble det gjort analyser av den behandlede FA. SEM/EDS og XRD ble brukt til analysene for å se på sammensetningen til FA etter forsøk og for å sammenligne med før forsøk.

4.3.1 Reduksjonsforsøk

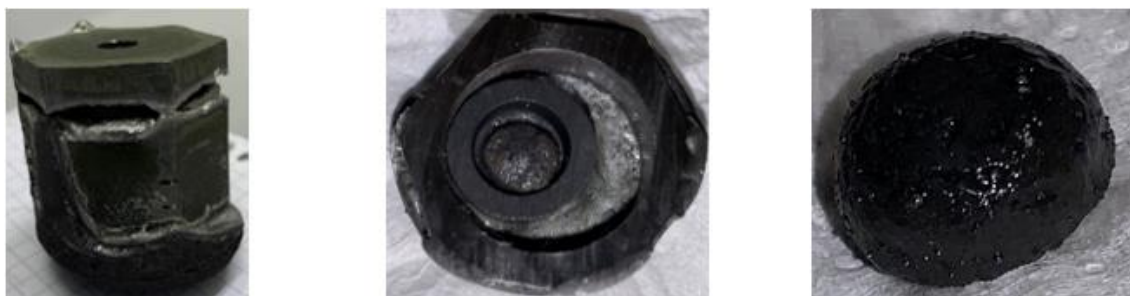
For CFBA ble det gjennomført to reduksjonsforsøk. Figur 35 viser hvordan FA i digel så ut etter reduksjon ved 1100°C, og hvilke produkter som ble dannet under forsøket. Både klump vist i midten og FA til høyre lå i digelen etter forsøket.



Figur 35 CFBA etter reduksjon ved 1100°C. Fra venstre: FA i digel, klump dannet under reduksjon og FA fra digel etter at klumper er tatt ut.

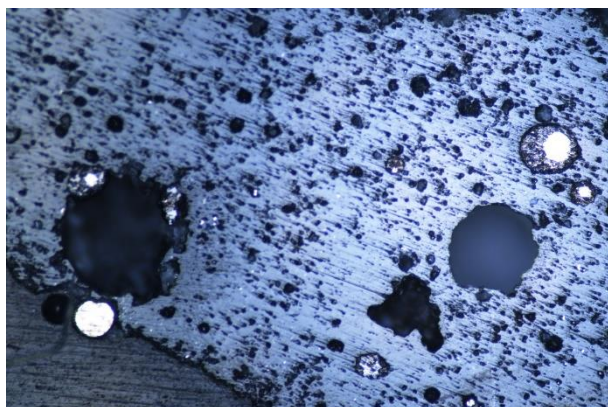
Klumpen og FA med større partikler i Figur 35 sammenlignet med før reduksjonsforsøk tyder på at partiklene i CFBA har agglomerert sammen til større agglomerater.

Figur 36 viser hvordan reaktor og CFBA så ut etter reduksjonsforsøk ved 1200°C. Reaktor ble ødelagt og måtte kuttes opp. Det ble brukt avkjølingsvann til kutting, som resulterte i en noe fuktig FA. Bildet i midten viser CFBA som en klump i digelen.



Figur 36 Reaktor og CFBA etter reduksjon ved 1200°C. Fra venstre: Reaktor som ble ødelagt under forsøk, klump med FA i digel og klumpen tatt ut av digel.

Klumpen med FA ble knust og innsiden viste tydelige lyse partikler. Deler av klumpen ble derfor støpt inn og sett på i lysmikroskop. Figur 37 viser et lysmikroskopbilde av CFBA-klumpen, og de lyse sirklene i figuren viser tydelig dannelse av metallfaser etter reduksjon ved 1200°C.



Figur 37 Dannelse av metallfaser (lyse områder) ved 1200 grader – lysmikroskopbilde.

For GFA ble det gjennomført et reduksjonsforsøk ved 1100°C. Figur 38 viser hvordan digelen og FA fra digelen og FA skrapet av lokket så ut etter reduksjonsforsøk for GFA.



Figur 38 GFA etter reduksjon ved 1100°C. Fra venstre: Digel med restprodukt fra GFA, FA tatt fra digel og FA skrapet av fra lokket av reaktoren.



Figur 39 Lokket på reaktoren etter reduksjonsforsøk for GFA ved 1100°C.

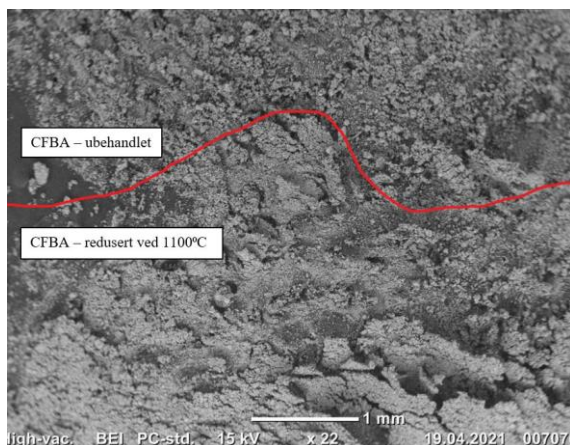
Produktene vist i Figur 38 tyder på at partiklene i GFA har agglomerert under reduksjonsforsøket ved 1100°C. Figur 39 viser lokket til reaktoren etter forsøket.

4.3.2 Analyser av redusert FA

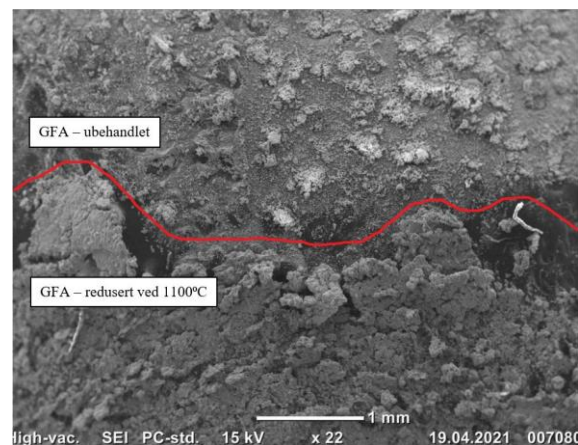
Analyser av redusert FA ble gjennomført. SEM/EDS og XRD ble brukt til å se på sammensetningen til behandlet FA og sammenligning med FA før ovnsforsøk.

SEM/EDS

Figur 40 viser SEM-bilde med ubehandlet CFBA over rød strek og redusert ved 1100°C under rød strek for sammenligning av struktur til FA før og etter reduksjonsforsøk. I Figur 41 er det ubehandlet GFA over rød strek og redusert ved 1100°C under rød strek for sammenligning. Metode 3 – FA på karbonteip ble brukt til sammenligningsbildene.



Figur 40 Redusert CFBA ved 1100°C under rød strek, ubehandlet.

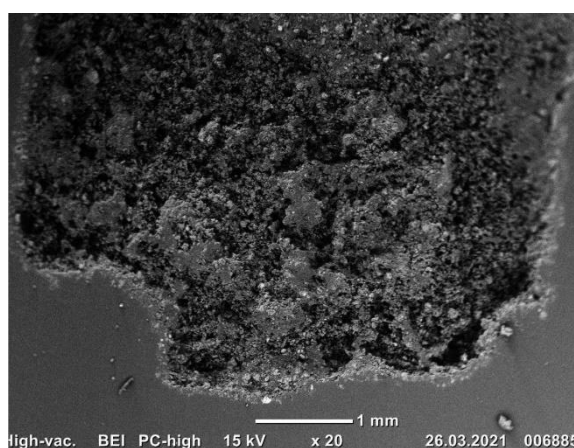


Figur 41 Redusert GFA ved 1100°C under rød strek, ubehandlet over.

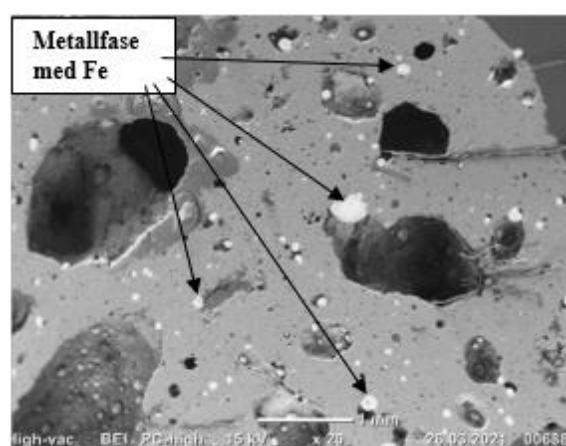
Sammenligningen mellom CFBA før og etter reduksjonsforsøk viser ulikheter i kornstørrelse og form, vist i Figur 40. Nederst til høyre i figuren vises større partikler eller «flak» med FA. Det samme

gjelder for sammenligningen for GFA, vist i Figur 41. I øvre del av figuren vises den ubehandlede FA med små partikler, mens nedre del viser større ansamlinger med sintret FA.

Etter reduksjon av CFBA og GFA ble produktene fra de ulike reduksjonsforsøkene tatt bilde av og analysert med SEM/EDS. Det ble tatt SEM-bilde av CFBA etter reduksjon ved 1100°C og 1200°C for å sammenligne de to forsøkene. Figur 42 viser SEM-bilde for CFBA redusert ved 1100°C og Figur 43 viser SEM-bilde for CFBA redusert ved 1200°C. Metode 2 – epoxyprøve FA i klumper er brukt til SEM-bildene.



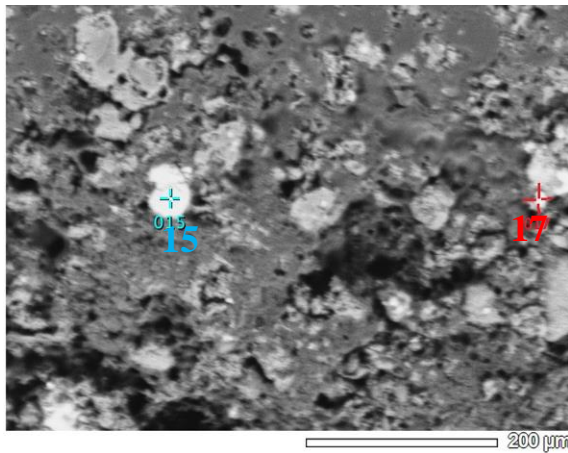
Figur 42 SEM-bilde av CFBA redusert ved 1100°C.



Figur 43 SEM-bilde av CFBA redusert ved 1200°C.

Figur 42 og Figur 43 viser at det er forskjell på CFBA etter reduksjonsforsøk ved 1100°C og 1200°C. Ved bruk av BEI (tilbakespredte elektroner) som signalkilde vil bilde vise kontrastforskjeller mellom ulike faser. Mer metaller i partikkelen vil gi lysere punkter. De lyse partiklene i Figur 43 tyder på reduksjon av metall under forsøk. Svarte faser er porer i FA og lys grå fase er FA.

Punktanalyser for CFBA etter reduksjonsforsøk ble gjennomført. Figur 44 viser punktanalyser ved bruk av SEM/EDS for CFBA redusert ved 1100°C. Punktanalyser for CFBA etter reduksjonsforsøk ved 1200°C er vist i Figur 45. Metode 2 – epoxyprøve FA i klumper er brukt til punktanalysene.



Punkt 15

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1060

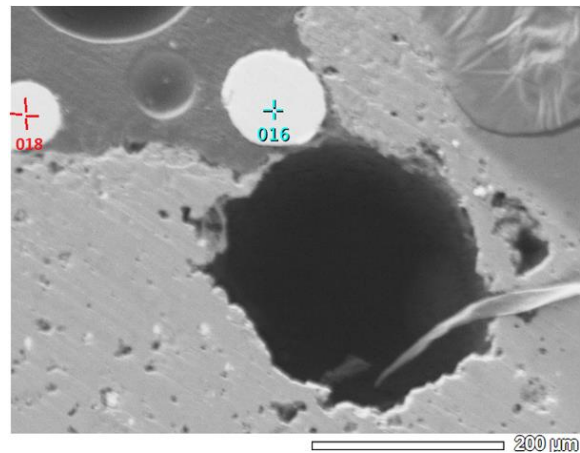
Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
Mn K ⁺	5.894	12.6	0.2	10.7
Fe K ⁺	6.398	17.2	0.2	14.4
S K ⁺	2.307	33.4	0.2	48.7
Zn K ⁺	8.630	36.8	0.5	26.3
Total		100.0		100.0

Punkt 17

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.3373

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
Mn K				
Pb M ⁺	2.342	0.2	0.3	0.0
Si K	1.739	0.6	0.1	1.1
Al K	1.486	1.7	0.1	3.2
Ca K	3.690	3.2	0.1	4.0
P K ⁺	2.013	3.6	0.1	5.8
S K	2.307	13.0	0.1	20.3
Cu K	8.040	34.4	0.5	27.0
Fe K	6.398	43.2	0.4	38.6
Total		100.0		100.0

Figur 44 Punktanalyser for CFBA redusert ved 1100°C.



Punkt 16

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1069

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
Cl K	2.621	0.3	0.0	0.4
Al K	1.486	0.6	0.1	1.2
Si K	1.739	0.6	0.1	1.0
Ca K	3.690	0.6	0.0	0.7
P K	2.013	15.1	0.1	24.0
Fe K ⁺	6.398	82.8	0.4	72.7
Total		100.0		100.0

Punkt 18

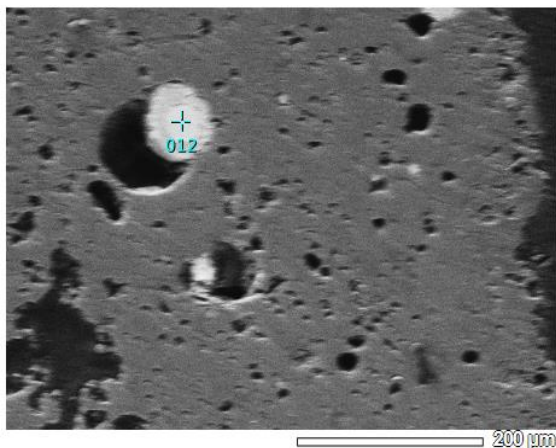
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1060

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
Si K	1.739	0.4	0.1	0.7
Cl K	2.621	0.5	0.0	0.7
Ca K	3.690	0.6	0.0	0.7
Al K	1.486	0.8	0.1	1.4
P K	2.013	14.8	0.1	23.5
Fe K	6.398	82.9	0.4	72.9
Total		100.0		100.0

Figur 45 Punktanalyser for CFBA redusert ved 1200°C.

Punkt 15 i Figur 44 viser et høyt innhold Zn, S og Fe og den runde lyse partikkelen kan tyde på reduksjon av metaller. Punkt 17 i Figur 44 viser også en liten rund partikkel som er lys. Her er det høyt innhold av Fe og Cu, og kan indikere reduksjon av metall ved 1100°C. Punkt 16 og punkt 18 i Figur 45 viser runde, lyse partikler bestående av Fe og P og viser redusert metallfase.

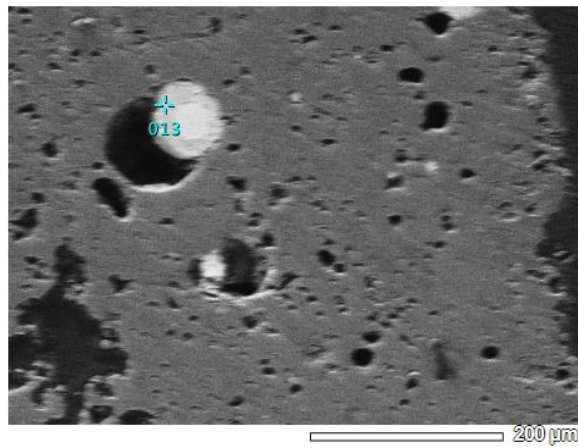
I Figur 46 og Figur 47 blir punktanalyser av CFBA redusert ved 1200°C presentert. Punktanalysene er tatt fra samme SEM-bilde, men fra to forskjellige punkter. Metode 2 – epoxyprøve FA i klumper ble brukt til disse punktanalysene.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1215

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
S K				
Mn K				
Ca K	3.690	0.2	0.1	0.2
Si K	1.739	0.6	0.1	1.2
Cl K	2.621	0.6	0.0	0.9
Al K	1.486	0.8	0.1	1.6
Cu K	8.040	2.9	0.2	2.3
P K	2.013	12.6	0.1	20.3
Fe K	6.398	82.2	0.4	73.6
Total		100.0		100.0

Figur 46 Punktanalyse for CFBA redusert ved 1200°C.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1191

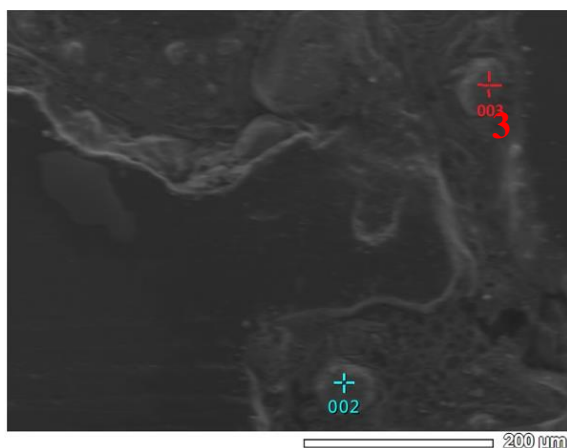
Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
P K				
Si K	1.739	0.5	0.1	0.8
Cl K	2.621	0.6	0.0	0.7
Al K	1.486	0.9	0.1	1.4
Cu K	8.040	4.6	0.2	3.1
Ca K	3.690	5.2	0.1	5.6
Fe K	6.398	26.0	0.3	20.0
Mn K	5.894	26.5	0.3	20.7
S K	2.307	35.6	0.2	47.7
Total		100.0		100.0

Figur 47 Punktanalyse for CFBA redusert ved 1200°C.

Punktanalysen i Figur 46 viser en rund, lys partikkel bestående av Fe og P, mens Figur 47 fra samme SEM-bilde har høyt innhold av S, Mn og Fe. Lyse og runde partikler etter reduksjonsforsøk tyder på at det er blitt redusert metall. Punkt 12 viser en lysere partikkel omgitt av en mørkere fase i punkt 13.

Det ble gjort SEM/EDS analyser av GFA etter reduksjon ved 1100°C. Figur 48 viser to punktanalyser av GFA tatt fra lokket på reaktoren etter reduksjon, vist i Figur 39. Figur 49 viser to punktanalyser av

GFA tatt fra digelen etter reduksjon. Metode 2 – epoxyprøve FA i klumper er brukt til disse punktanalysene.



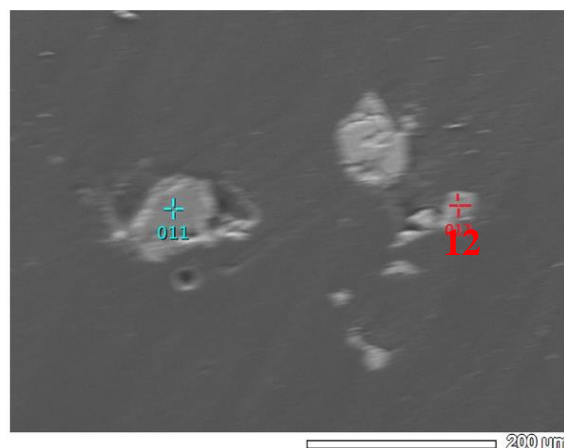
Punkt 2

```
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1216
Element      (keV)  Mass%  Sigma  Atom%
Mg K         1.253   0.1    0.1    0.1
Si K         1.739   0.4    0.1    0.3
K K          3.312   0.5    0.1    0.3
Al K         1.486   0.7    0.1    0.5
Ti K*        4.508   12.9   0.2    5.0
Cl K         2.621   15.0   0.2    7.9
Ca K         3.690   21.4   0.3    10.0
C K          0.277   48.9   0.6    76.0
Total                            100.0  100.0
```

Punkt 3

```
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1062
Element      (keV)  Mass%  Sigma  Atom%
K K          3.312   0.2    0.1    0.1
Mg K         1.253   0.9    0.1    0.7
Al K         1.486   2.7    0.1    1.9
Si K         1.739   4.7    0.1    3.1
Ti K         4.508   6.4    0.1    2.5
Cl K         2.621   9.0    0.1    4.7
Ca K         3.690   28.3   0.2    13.1
C K          0.277   47.8   0.2    73.9
Total                            100.0  100.0
```

Figur 48 Punktanalyser for GFA redusert ved 1100°C. FA funnet på lokket til reaktor etter reduksjon.



Punkt 11

```
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1042
Element      (keV)  Mass%  Sigma  Atom%
S K          3.312   0.2    0.0    0.1
K K          3.312   0.5    0.1    0.3
Al K         1.486   1.1    0.1    0.8
Mg K         1.253   2.3    0.1    1.8
Cl K         2.621   7.1    0.1    3.9
Si K         1.739   11.0   0.2    7.7
Ca K         3.690   36.6   0.2    17.8
C K          0.277   41.8   0.5    67.9
Total                            100.0  100.0
```

Punkt 12

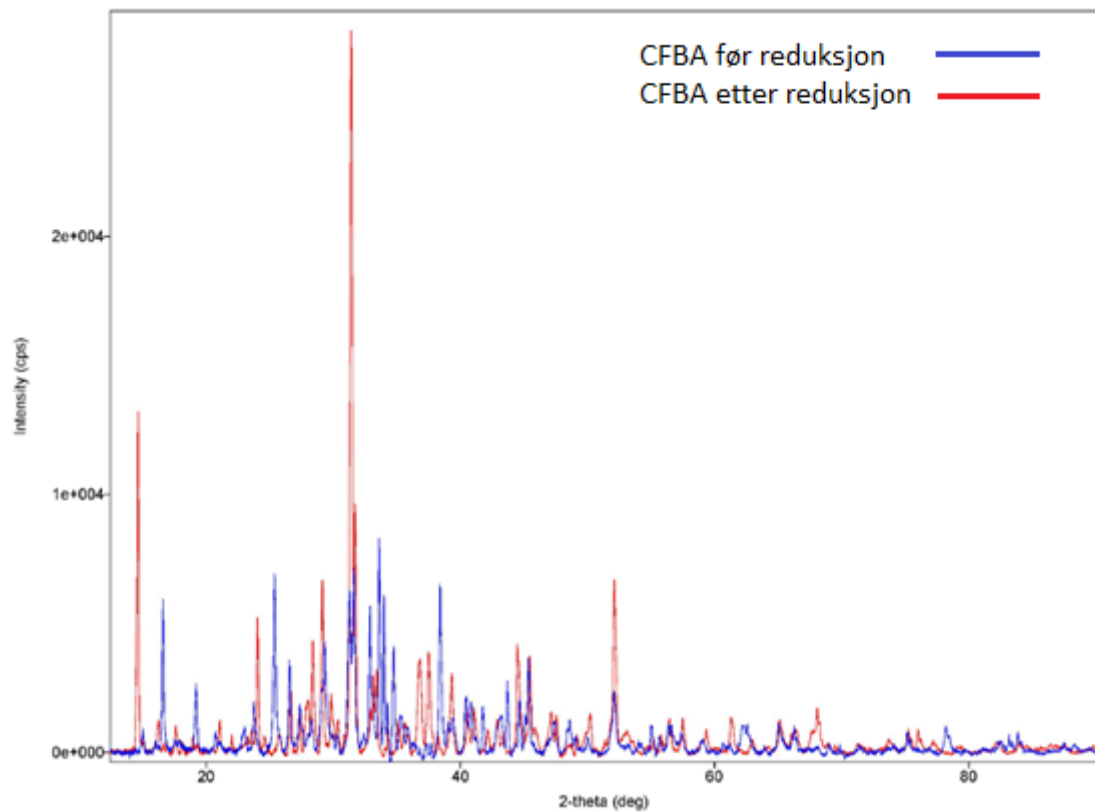
```
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.0709
Element      (keV)  Mass%  Sigma  Atom%
Mg K         1.253   0.9    0.1    0.7
Si K         1.739   0.0    0.0    0.0
K K          3.312   0.5    0.1    0.3
Al K         1.486   0.1    0.0    0.0
Cl K         2.621   0.5    0.0    0.2
S K          2.307   19.6   0.2    10.4
Ca K         3.690   24.6   0.2    10.5
C K          0.277   55.2   0.6    78.7
Total                            100.0  100.0
```

Figur 49 Punktanalyser for GFA redusert ved 1100°C. FA tatt fra digel etter reduksjon.

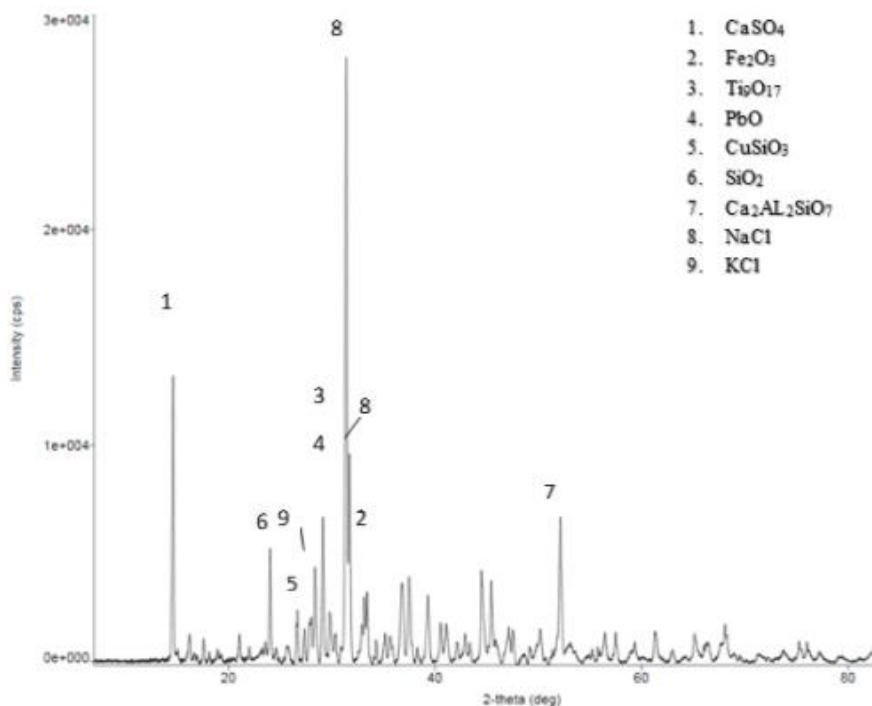
Høyt innhold av C, Ca, Cl og Ti, samt noe Al, Mg og Si, utgjør sammensetningen for GFA tatt fra lokket av reaktoren. Punkt 2 og 3 i Figur 48 viser dette. Punktanalysene av GFA tatt fra digelen etter reduksjonsforsøket, punkt 11 og 12 i Figur 49, viser likt innhold som punktene i Figur 48, utenom innholdet av Ti.

XRD

Etter reduksjonsforsøkene ble det gjort analyser av FA i XRD. De to diffraktogrammene fra før og etter reduksjon for CFBA er vist i Figur 50. Figur 51 viser diffraktogrammet for CFBA etter reduksjonsforsøk med markerte topper. Tabell 11 viser fasene funnet i CFBA før og etter reduksjon som med størst sannsynlighet utgjør hovedfasene i FA.



Figur 50 Sammenligning av diffraktogram mellom CFBA før og etter reduksjon ved 1100°C.



Figur 51 Diffraktogram for CFBA etter reduksjonsforsøk ved 1100°C med markerte topper.

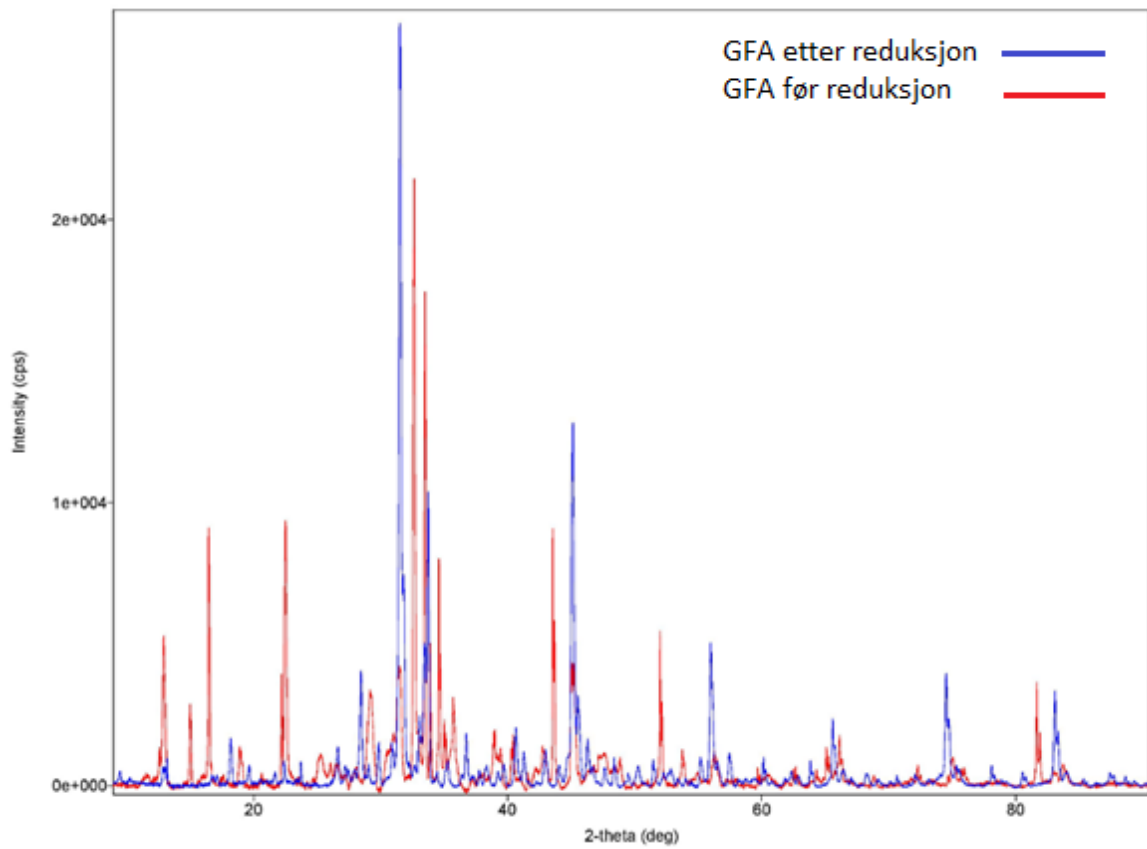
Tabell 11 Oversikt over faser i CFBA før og etter reduksjon ved 1100°C.

Faser	Match	
	Før	Etter
CaSO ₄	Sannsynlig	Sannsynlig
CaCO ₃	Sannsynlig	-
Fe ₂ O ₃	Sannsynlig	Sannsynlig
Al ₂ O ₃	Sannsynlig	Sannsynlig
Ti ₉ O ₁₇	-	Sannsynlig
PbO	-	Sannsynlig
CuSiO ₃	-	Sannsynlig
SiO ₂	-	Sannsynlig
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Sannsynlig	Svært sannsynlig
NaCl	Svært sannsynlig	Svært sannsynlig
KCl	Sannsynlig	Sannsynlig
CaCl ₂	Sannsynlig	-
Cu(OH) ₂	Sannsynlig	-

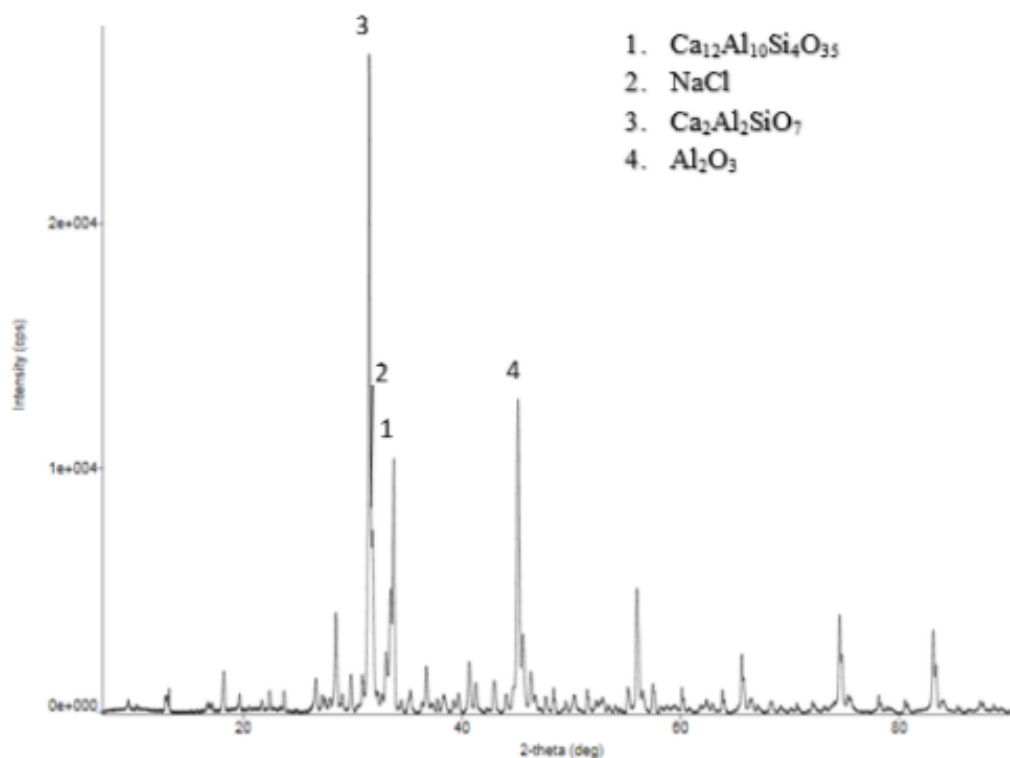
Fra resultatene presentert i Figur 51 og Tabell 11 ble det funnet 10 hovedfaser med best match i diffraktogrammet for CFBA etter reduksjon. Ca₂Al₂SiO₇ (8) og NaCl (9) har størst sannsynlighet for

å være hovedfaser for CFBA etter reduksjon ved 1100°C. $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ er den største forskjellen mellom CFBA før og etter reduksjon ved 1100°C. Topper som ikke er markerte i diffraktogrammet ble ikke identifisert.

Figur 52 viser diffraktogrammene for GFA før og etter reduksjon, mens Figur 53 viser diffraktogrammet for GFA med markerte toppe. Tabell 12 viser fasene som med størst sannsynlighet er hovedfasene i GFA før og etter reduksjonsforsøk.



Figur 52 Sammenligning av diffraktorgram mellom GFA før og etter reduksjon ved 1100°C.



Figur 53 Diffraktogram for GFA etter reduksjonsforsøk ved 1100°C med markerte topper.

Tabell 12 Oversikt over faser i GFA før og etter reduksjon ved 1100°C.

Faser	Match	
	Før	Etter
$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{10}\text{Si}_4\text{O}_{35}$	-	Svært sannsynlig
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Sannsynlig	-
$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$	-	Sannsynlig
Al_2O_3	Svært sannsynlig	Sannsynlig
NaCl	Svært sannsynlig	Sannsynlig
CaCO_3	Sannsynlig	-
ZnCO_3	Mindre sannsynlig	-
SiO_2	Sannsynlig	-

Resultatene i Figur 52 og Tabell 12 viser at $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{10}\text{Si}_4\text{O}_{35}$ med stor sikkerhet er en av hovedfasene i GFA etter reduksjonsforsøk ved 1100°C. Totalt ble det funnet fem faser som med relativt stor sannsynlighet er blant hovedfasene. Fra Figur 52 og Tabell 12 vises det at hovedforskjellen er antall faser før og etter reduksjon.

Vedlegg A: Oversikt over XRD viser ytterligere faser identifisert i CFBA og GFA etter reduksjon, men med lavere sikkerhet for match.

4.3.3 Karbonatisering

FA ble veid før og etter karboniseringsforsøk. Tabell 13 viser verdiene for både CFBA og GFA.

Tabell 13 Oversikt over vekt på CFBA og GFA før og etter karboniseringsforsøk.

	Vekt FA før karbonatisering [g]	Vekt FA etter karbonatisering [g]	Massetap [g]
CFBA	1,0g	0,8g	0,2g
GFA	0,9g	0,9g	0g

Før forsøket veide CFBA 1,0g og GFA 0,9g. Etter forsøket viste det seg at CFBA var 0,2g lettere enn før forsøket, mens GFA var uforandret.

Figur 54 viser hvordan CFBA så ut etter karbonatisering. Figuren viser at CFBA endret seg lite under forsøket.



Figur 54 CFBA etter karbonatisering ved 519°C. Fra venstre: urørt FA i digel i reaktor og FA i digel

Figur 55 viser GFA etter karbonatisering. Figuren viser tydelig at GFA har reagert under forsøket og endret form, til en pellet-lignende struktur.



Figur 55 GFA etter karbonatisering ved 514°C. Fra venstre: FA i digel i reaktor og nærbilde av FA-klump dannet under forsøk.

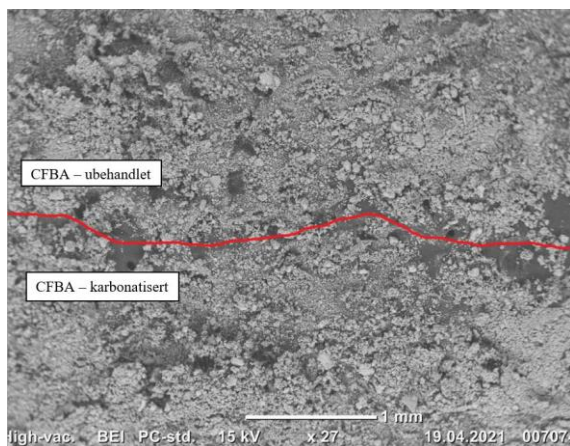
4.3.4 Analyser av karbonisert FA

Analyser av FA etter ovnsforsøk, der SEM/EDS analyser og XRD ble benyttet til å bestemme sammensetningen til karbonisert FA.

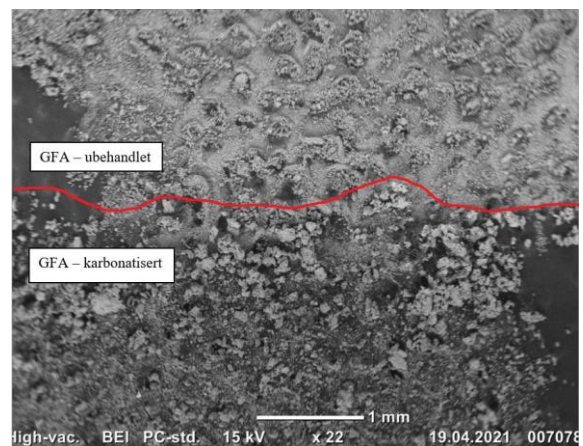
SEM/EDS

Figur 56 viser et SEM-bilde med sammenligning mellom CFBA før og etter karbonatisering.

Ubehandlet CFBA er over rød strek, mens karbonisert er under. Figur 57 viser det samme, men for GFA. Ubehandlet GFA er over rød strek og karbonisert er under. Metode 3 – FA på karbonteip er brukt til sammenligningsbildene.



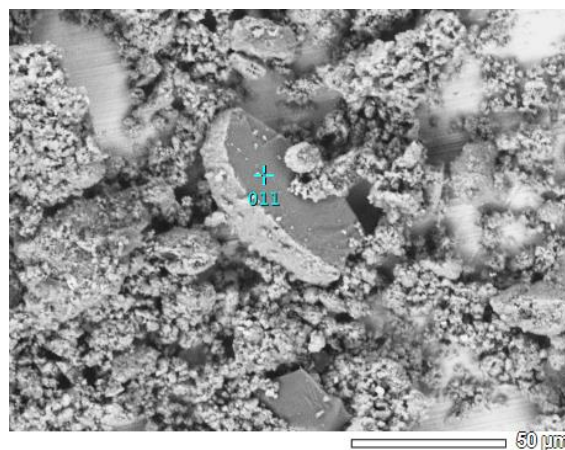
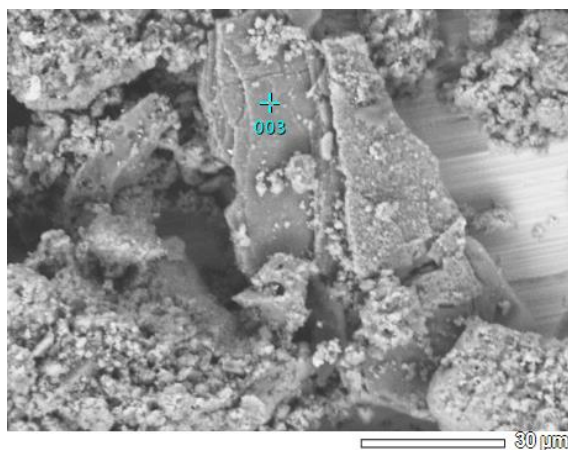
Figur 56 Karbonisert CFBA under rød strek, ubehandlet over.



Figur 57 Karbonisert GFA under rød strek, ubehandlet over.

Sammenligningen av ubehandlet og karbonisert CFBA i Figur 56 viser liten endring i partikkelstørrelse. Endringen vises tydeligere i Figur 57, der ubehandlet og karbonisert GFA blir presentert. GFA etter karbonatisering har større partikler, og en flak-lignende form.

CFBA og GFA ble analysert ved bruk av SEM/EDS etter karbonatiseringsforsøket. Figur 58 og Figur 59 viser punktanalyser av CFBA etter karbonatisering. Metode 5 – Oppløst FA på kobberteip ble brukt til disse punktanalysene.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.3540

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
S K	2.307	0.4	0.0	0.3
Mg K	1.253	0.7	0.1	0.7
Zn K	8.630	0.9	0.2	0.3
Fe K	6.398	1.9	0.1	0.8
K K	3.312	7.1	0.1	4.1
Cl K	2.621	8.6	0.1	5.5
Ca K	3.690	9.1	0.2	5.2
Al K	1.486	20.8	0.2	17.5
C K	0.277	23.2	0.5	43.8
Si K	1.739	27.2	0.2	21.9
Total		100.0		100.0

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.4253

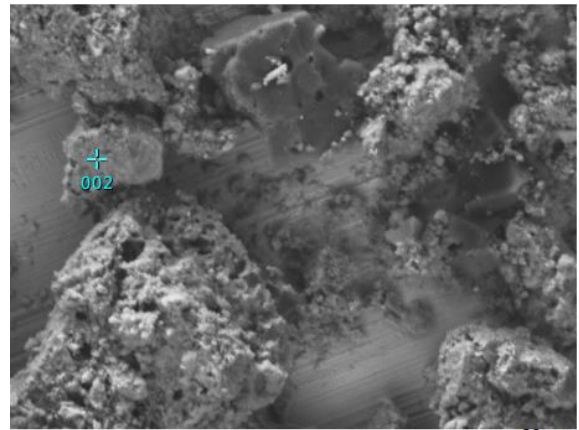
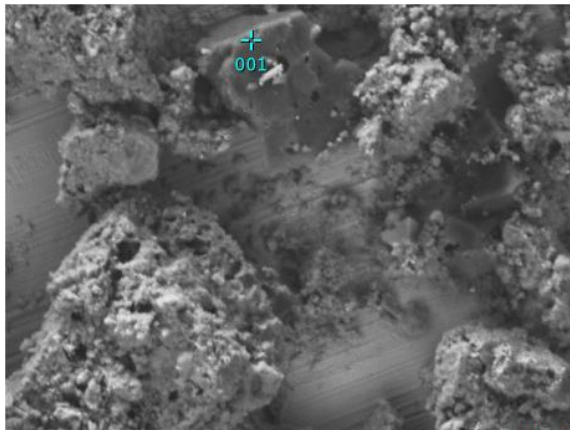
Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
P K				
Mg K	1.253	0.1	0.0	0.1
S K	2.307	0.2	0.0	0.1
Zn K	8.630	0.4	0.2	0.1
Fe K	6.398	0.6	0.1	0.2
Cl K	2.621	1.7	0.1	1.0
Ca K	3.690	2.6	0.1	1.3
Al K	1.486	11.8	0.1	8.9
K K	3.312	13.2	0.1	6.9
C K	0.277	32.2	0.5	54.5
Si K	1.739	37.1	0.2	26.9
Total		100.0		100.0

Figur 58 Punktanalyse for CFBA karbonatisert ved 519°C.

Figur 59 Punktanalyse for CFBA karbonatisert ved 519°C.

Punktanalysene i Figur 58 og Figur 59 av karbonatisert CFBA viser høyt innhold av Si, Al, Ca, K og Cl. Figurene viser også høyt innhold av C, noe som kan skyldes at EDS-detektoren måler innhold av C unøyaktig.

Figur 60 og Figur 61 viser punktanalyser for GFA etter karbonatisering. Metode 5 – Oppløst FA på kobberteip ble brukt til disse punktanalysene.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1923

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
Mg K	1.253	0.0	0.0	0.0
P K				
Si K	1.739	0.1	0.0	0.0
Fe K	6.398	0.1	0.0	0.0
K K	3.312	0.4	0.0	0.1
Al K	1.486	0.6	0.0	0.3
S K	2.307	0.7	0.0	0.3
Zn K	8.630	1.3	0.1	0.3
Ca K	3.690	4.2	0.0	1.4
Cl K	2.621	6.1	0.0	2.3
C K	0.277	86.5	0.2	95.3
Total		100.0		100.0

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1654

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%
P K				
Fe K	6.398	0.1	0.1	0.0
Mg K	1.253	0.3	0.0	0.3
Al K	1.486	0.4	0.0	0.4
K K	3.312	0.5	0.0	0.3
Si K	1.739	1.1	0.0	1.0
Zn K	8.630	3.9	0.2	1.5
S K	2.307	7.7	0.1	6.0
Cl K	2.621	21.1	0.1	14.8
C K*	0.277	24.2	0.4	50.3
Ca K	3.690	40.7	0.2	25.3
Total		100.0		100.0

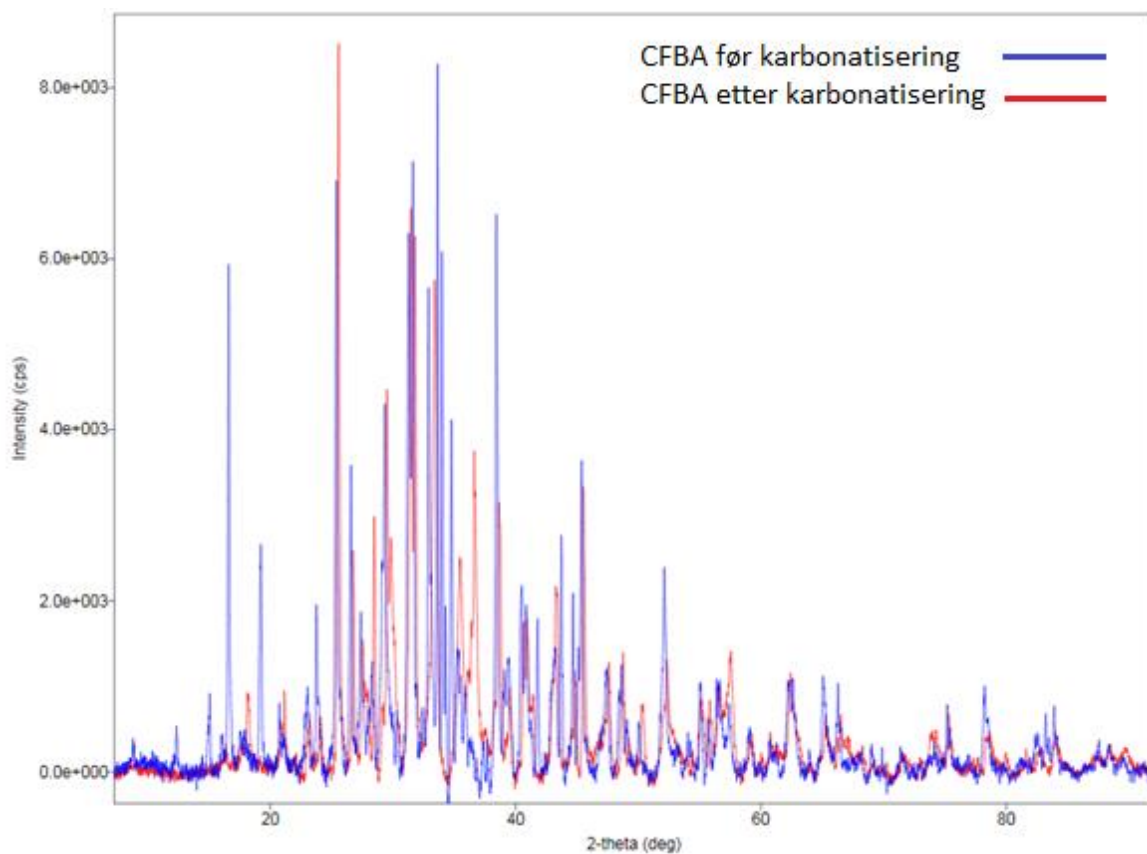
Figur 60 Punktanalyse for GFA etter karbonatisering ved 514°C.

Figur 61 Punktanalyse for GFA etter karbonatisering ved 514°C.

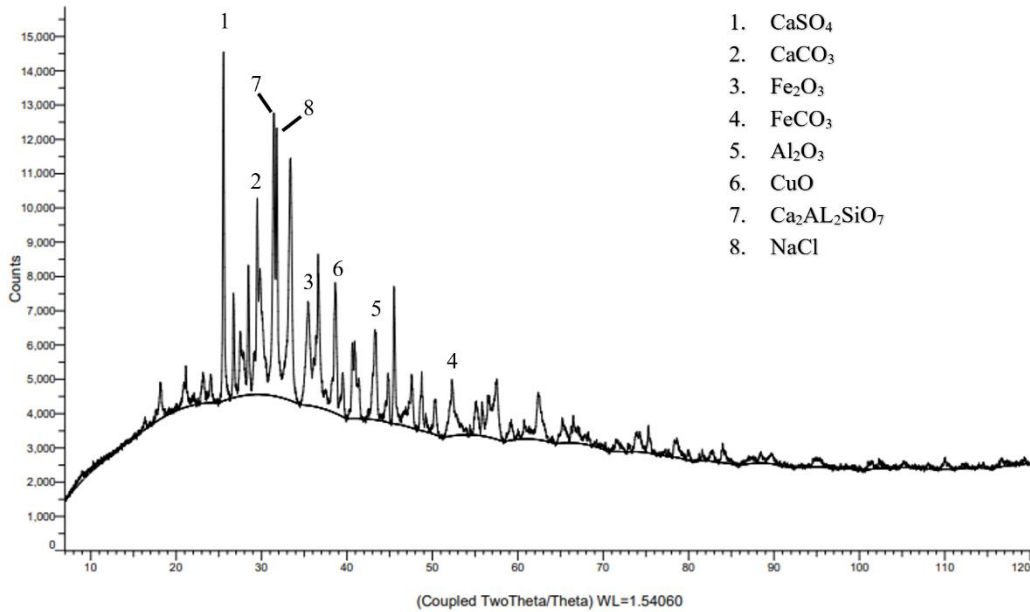
Punktanalysene i Figur 60 og Figur 61 viser høyt innhold av Cl, Ca og C. Karboninnholdet er usikkert på grunn av unøyaktigheter med EDS-målinger. Høyt innhold av C kan komme av opptak av CO₂ under karbonatisering. Innholdet av de andre grunnstoffene tyder på salter/klorider utgjør en stor del av sammensetningen i disse punktanalysene.

XRD

Det ble gjort XRD-analyser etter ovnsforsøkene med karbonatisering. Hver av FA ble skannet i XRD og sammenlignet med diffraktogrammene fra tidligere, hvor FA var ubehandlet. Figur 62 viser diffraktogrammene fra før og etter karbonatiseringsforsøk for CFBA. Figur 63 viser diffraktogrammet til CFBA etter karbonatisering med hovedfaser markert i figuren. I Tabell 14 er fasene som med størst sannsynlighet er hovedfasene i CFBA før og etter forsøk presentert.



Figur 62 Sammenligning av diffraktogram mellom CFBA før og etter karbonatiseringsforsøk.



Figur 63 Diffraktogram for CFBA etter karbonatisering med markerte topper.

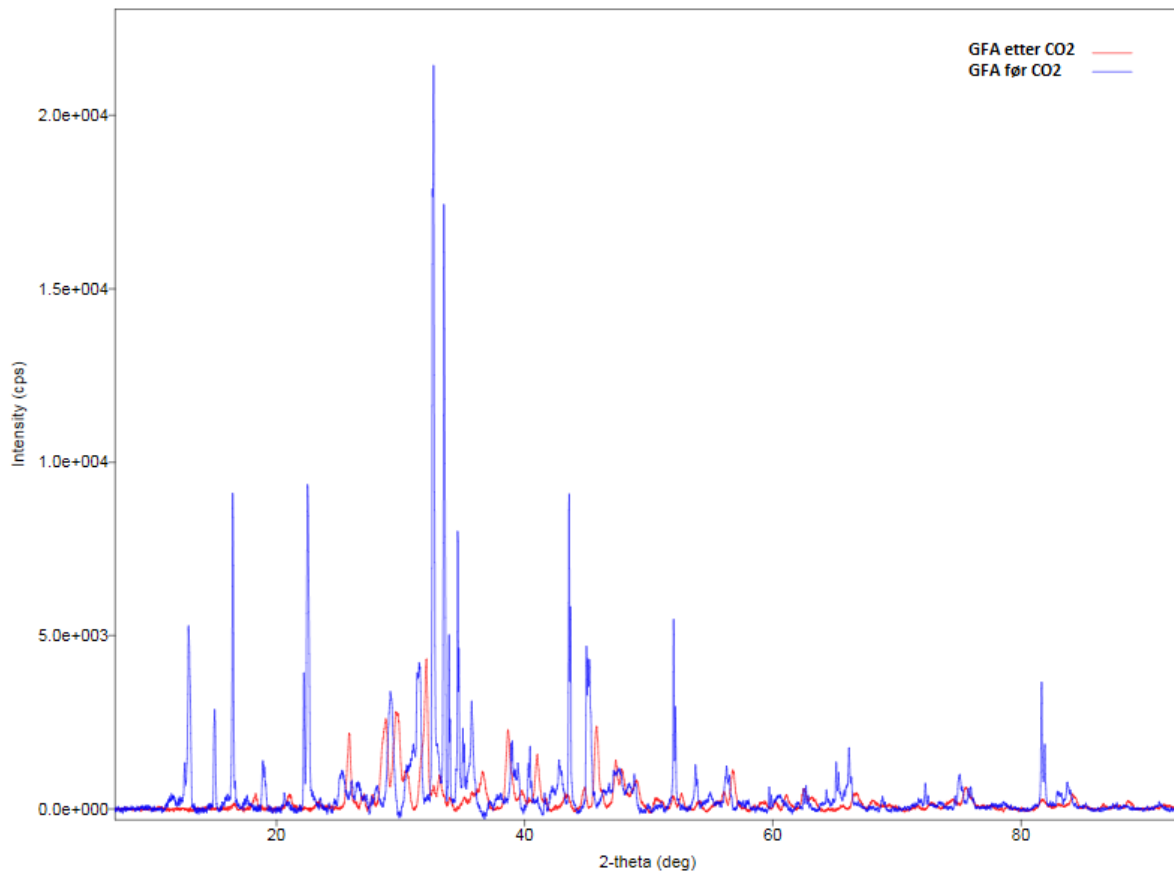
Tabell 14 Oversikt over faser i CFBA før og etter karbonatiseringsforsøk ved 519°C.

Faser	Match	
	Før	Etter
CaSO ₄	Sannsynlig	Sannsynlig
CaCO ₃	Sannsynlig	Sannsynlig
Fe ₂ O ₃	Sannsynlig	Sannsynlig
FeCO ₃	-	Mindre sannsynlig
Al ₂ O ₃	Sannsynlig	Sannsynlig
CuO	-	Sannsynlig
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	Sannsynlig	Svært sannsynlig
NaCl	Svært sannsynlig	Svært sannsynlig
CaCl ₂	Sannsynlig	-
Cu(OH) ₂	Sannsynlig	-
KCl	Sannsynlig	-

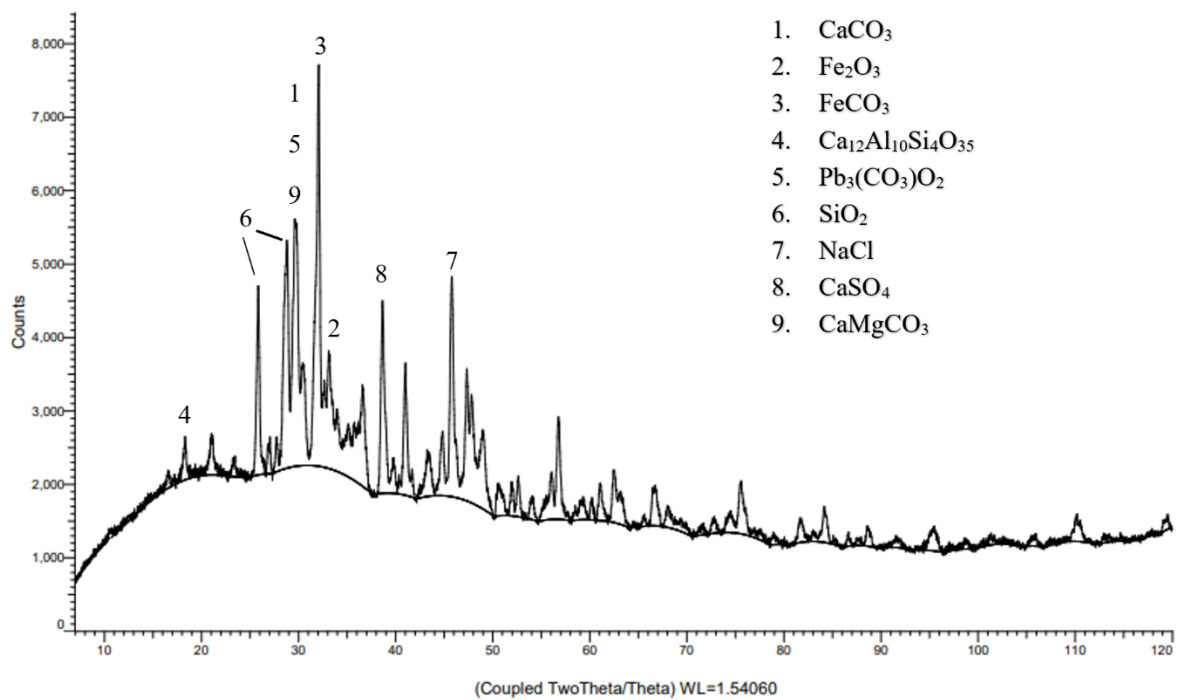
Mange av toppene som ble funnet for CFBA før og etter karbonatisering er like, vist i Figur 62 og Tabell 14. Dette antyder liten endring i sammensetningen til CFBA. Figur 63 og Tabell 14 viser ingen

betydelig økning i karbonater i FA og tyder på lite opptak av CO₂. Topper som ikke er markerte i diffraktogrammet ble ikke identifisert.

Figur 64 viser diffraktogrammene for GFA før og etter karbonatiseringsforsøk. Figur 65 viser diffraktogrammet til GFA etter karbonatisering med hovedfaser markert i figuren. Tabell 15 presenterer fasene funnet i GFA før og etter karbonatisering som med størst sannsynlighet utgjør hovedfaser.



Figur 64 Sammenligning av diffraktogram mellom GFA før og etter karbonatisering.



Figur 65 Diffraktogram for GFA etter karbontisering med markerte toppe.

Tabell 15 Oversikt over faser i GFA før og etter karbonatisering ved 514°C.

Faser	Match	
	Før	Etter
CaCO_3	Sannsynlig	Sannsynlig
Fe_2O_3	-	Sannsynlig
FeCO_3	-	Mindre sannsynlig
$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{10}\text{Si}_4\text{O}_{35}$	-	Sannsynlig
$\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2\text{O}_2$	-	Mindre sannsynlig
SiO_2	Sannsynlig	Sannsynlig
NaCl	Svært sannsynlig	Sannsynlig
CaSO_4	-	Sannsynlig
CaMgCO_3	-	Sannsynlig
Al_2O_3	Svært sannsynlig	-
CaCl_2	Sannsynlig	Sannsynlig
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Sannsynlig	-
ZnCO_3	Mindre sannsynlig	-

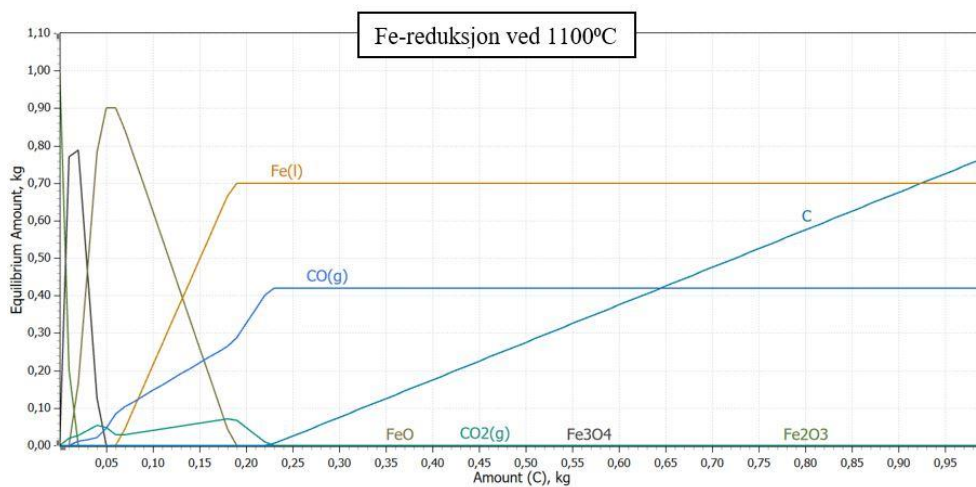
Ut ifra resultatene presentert i Figur 65 og Tabell 15 kan det antas at mengden karbonater har økt noe i GFA sammenlignet med før forsøket. Det kan dermed antas at en ukjent mengde CO_2 har blitt tatt

opp. Figur 64 sammenligner GFA før og etter forsøket. Diffraktogrammene viser at antall faser ble redusert etter karbonatiseringen. Topper som ikke er markert i diffraktogrammet ble ikke identifisert.

Vedlegg A: Oversikt over XRD inneholder ytterligere faser identifisert i CFBA og GFA etter karbonatisering.

4.4 Modellering

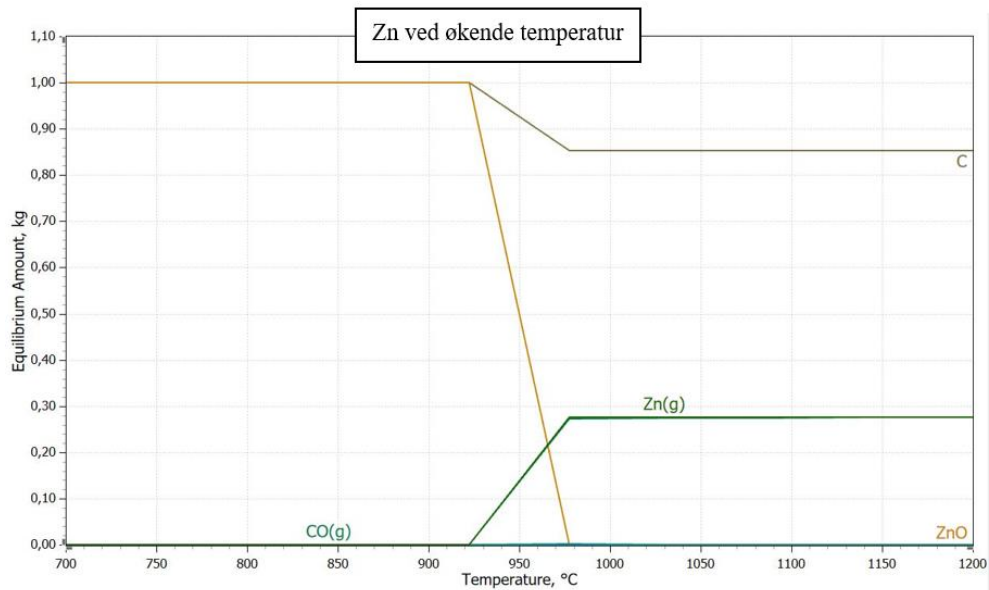
Det ble gjort tre ulike termodynamiske beregninger for reduksjon og karbonatisering av FA. Figur 66 viser modelleringen av input-verdiene fra Figur 23, som gjelder for reduksjon av jern ved 1100 °C.



Figur 66 Reduksjon av Fe. Plottet viser mengden av ulike faser gitt i kg (y-aksen) som en funksjon av mengden C tilsatt(x-aksen).

Modelleringen viser at ved 1kg Fe₂O₃ kan maksimalt 0,7kg Fe-smelte dannes. Alt av Fe₂O₃ har redusert ved tilsats av ca. 0,18kg C. Fra beregningen og modelleringen i Figur 66 skal det kunne reduseres Fe ved betingelsene gitt i reduksjonsforsøket ved 1100°C og 1200°C.

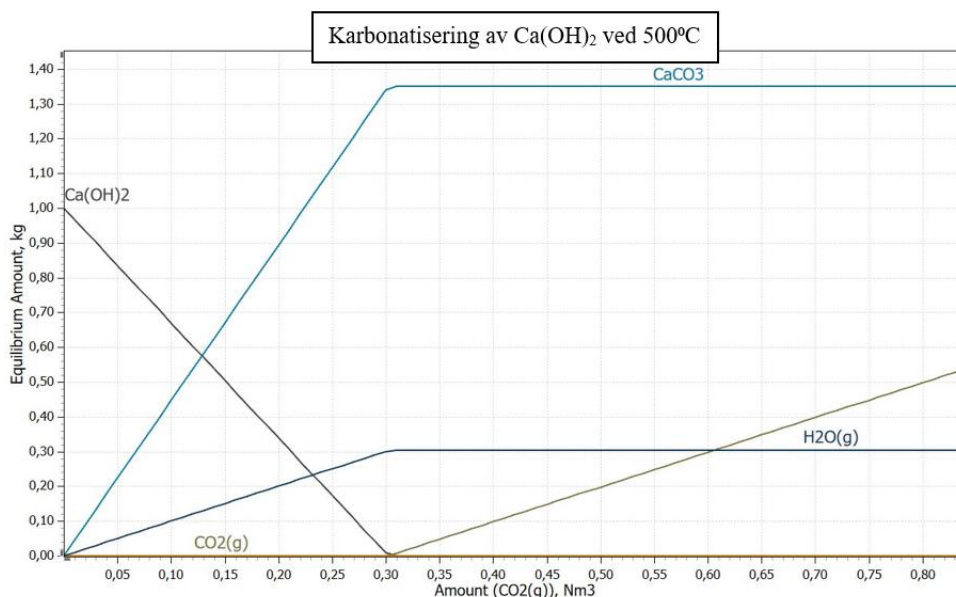
Figur 67 viser ulike likevektsfaser for Zn som en funksjon av temperaturen.



Figur 67 Oppførsel til Zn/ZnO ved økende temperatur i karbonholdig atmosfære.

Ved å anta at Zn kun ligger som ZnO før ovnsforsøk og i en karbonholdig atmosfære (C/CO/CO₂) under reduksjonsforsøk, viser Figur 67 at ved temperaturer over ca. 980°C vil det kun dannes Zn-gass.

Figur 68 viser et plott av karbonatisering av Ca(OH)₂, der likevektsfasene er en funksjon av tilsatt mengde CO₂-gass.



Figur 68 Karbonatisering av Ca(OH)₂ ved økende mengde CO_{2(g)} ved 500°C.

Modelleringen av karbonatisering gitt i Figur 68 viser at Ca(OH)_2 vil omdannes til CaCO_3 i en CO_2 -rik atmosfære. Ved tilsats av omtrent $0,3\text{Nm}^3$ CO_2 vil ett kilogram Ca(OH)_2 være omdannet til CaCO_3 under de gitte forholdene.

5 Diskusjon

I diskusjonskapittelet vil de ulike metodene testet for SEM/EDS bli diskutert og hvordan de egnet seg til ulike formål (del 5.1). Analysene av ubehandlet FA (del 5.2), hvorfor ovnsforsøk ble gjort og resultatene det ga (del 5.3) vil også bli diskutert. Til slutt blir ulike utfordringer og feilkilder for analyser og eksperimentelt arbeid (del 5.4) bli diskutert.

5.1 Metodeutvikling

En stor del av oppgaven var å identifisere, karakterisere og analysere FA ved bruk av SEM/EDS, XRD og XRF. For å få gode resultater ved SEM/EDS var det nødvendig å optimalisere prøvene før analysene. De mest gunstige metodene ble utviklet gjennom prøving og feiling av ulike teknikker for prøvepreparering. Fem forskjellige metoder ble testet ut og brukt til ulike formål.

Hensikten med *Metode 1 – epoxyprøve med FA i pulverform* var å se på tverrsnittet av enkeltpartikler i FA. Metoden ble først brukt til å se på ubehandlet FA, men dette ga dårlige resultater. Dette skyldes at FA i pulverform binder seg sammen til større agglomerater og det ble vanskelig å finne sammensetningen på individuelle partikler, vist i metode 1 i Tabell 6. I tillegg var det til tider vanskelig å skille mellom FA og epoxymatriksen. *Metode 2 – epoxyprøve FA i klumper* var i prinsippet den samme som metode 1, men ble brukt etter reduksjonsforsøk hvor FA hadde sintret til en fast klump. Metoden var langt mer gunstig til dette formålet fordi partiklene hadde blitt større og fastere, noe som ga mulighet til å analysere tverrsnittet av FA. Metode 2 i Tabell 6 viser tverrsnittet av en partikkel med tilhørende analyse.

Metode 1 og 2 har tidligere blitt brukt til analyser av FA (*Kutchko & Kim, 2006*). Her ble ubehandlet FA støpt inn i epoxy og slipt for å kunne analysere tverrsnittet av enkeltpartikler. Resultatene ga bilder som viste det polerte tverrsnittet av partikler. Dette resultatet ble ikke oppnådd i denne oppgaven, noe som kan skyldes at SEM-apparatet brukt har dårligere oppløsning og vil og kreve mye mer erfaring fra brukere.

For å kunne bestemme sammensetningen til enkeltpartikler måtte metoder som separerer partiklene testes ut. Derfor ble *Metode 3 – FA på karbonteip* testet ut. Metoden ble brukt som en rask og enkel metode for å analysere FA i pulverform, presentert i metode 3 i Tabell 6. Metoden viste seg å være effektiv for analyser av store områder og større mengder FA. Partiklene ble derimot fortsatt liggende som agglomerater. Denne metoden har i likhet med metode 1 og 2 blitt brukt til analyse av enkeltpartikler i SEM tidligere. Metoden ga informasjon om partiklenes form og sammensetning,

samt fordeling av elementer i individuelle partikler (*Kutchko & Kim, 2006*). I denne oppgaven var ikke metode 3 egnet til dette formålet ettersom partiklene ikke lot seg skille fra hverandre. Dette kan skyldes at FA brukt i denne oppgaven bestod av mindre partikler som lettere festet seg til hverandre.

Metode 4 – Oppløst FA på karbonteip ble testet ut i et forsøk på å skille agglomerater. Metoden skiller seg fra metode 3 ved at FA først knuses med morter, i et forsøk på å separere større ansamlinger med partikler. Dette i kombinasjon med tilsats av etanol gjorde enkeltpartikler mer adskilte enn hva de tidligere metodene hadde gjort. *Metode 5 – Oppløst FA på kobberteip* var i prinsippet den samme som metode 4 bare at prøven ble preparert på kobber- og ikke karbonteip. Metode 4 og 5 i Tabell 6 viser hvordan disse metodene gjorde det mulig å analysere enkeltpartikler. Oppløst FA på kobberteip ble testet ut grunnet karbonteipen i metode 4 oppladet partiklene i FA, som medførte at analysene måtte utføres raskt. Kobberteipen gjorde ikke dette.

5.2 Analyser av ubehandlet FA

Innledende analyser ble gjort for å bestemme kornstørrelse. Kornstørrelse er av interesse grunnet følsomhet i SEM-maskinen for små partikler. Veldig liten kornstørrelse vil gjøre det vanskelig å analysere enkeltpartikler. Kornstørrelsen i både CFBA og GFA var mellom 2-10 μm (Figur 26). EDS har en oppløsning på ca. 1-2 μm . Dette gjorde det vanskelig å analysere de minste partiklene i FA, ettersom analysevolumet blir større enn selve partikkelen. De SEM/EDS-metodene der FA ble oppløst ga synlige enkeltpartikler, men de minste var fortsatt vanskelig å analysere. I tillegg agglomererte partiklene lett, noe som gjorde det vanskelig å vite om det var enkeltpartikler eller ansamling av flere partikler.

5.2.1 Virvelsjiktasje – CFBA

Forbrenning med virvelsjikt skal ifølge teorien gjøre at CFBA får et høyere metallinnhold enn GFA. Typiske metaller funnet i CFBA er Fe, Cu og Al. Høyt saltinnhold, mye kalsium og silisiumforbindelser var også å forvente i CFBA. Områdeanalysen i Figur 27 viser større innhold av Ca, Al, Cl, Si og Fe. Innholdet av Na og K er med på å bekrefte at det er relativt store mengder salt i CFBA. I områdeanalysen er det ikke funnet noe Cu. Dette kan komme av veldig små mengder Cu totalt i FA slik at andre partikler dekker over Cu-partikler. I tillegg vil innholdet i FA variere ut ifra hva som forbrennes. Sammensetningen i CFBA er veldig kompleks, og vil gjøre at innholdet varierer. Punktanalysene i Figur 29 og Figur 30 viser treff på mange grunnstoffer i samme punkt. Dette kan tyde på at flere faser er til stede og underbygger utfordringene med å skille partiklene fra hverandre. Grunnstoffene til stede i punktanalysene er likt som for områdeanalysen.

Tabell 2 presenterer faser tidligere funnet i FA ved XRD. Fasene markert i diffraktogrammet for CFBA, se Figur 33, er mange av de fasene som tidligere forskning har funnet: en rekke kalsiumforbindelser, klorider, samt noen metallforbindelser. Lave konsentrasjoner av metaller og en ellers kompleks sammensetning gjør identifikasjon av metallfaser med XRD krevende. Store hovedfaser overskygger små faser og gjør identifikasjon vanskelig. XRF-analysen presentert i Tabell 9 viser at det er mange forskjellige metaller til stede med mindre og større konsentrasjoner. Analysen understreker kompleksiteten til innholdet i CFBA, med mange forskjellige forbindelser til stede som danner mange ulike forbindelser. Oksidene Al_2O_3 og Fe_2O_3 ble ved XRD og XRF identifisert som hovedfaser i CFBA. Det høye saltinnholdet ble også understreket av XRF-analysen.

5.2.2 Ristovnaske – GFA

Sammensetningen i GFA skal være mindre kompleks sammenlignet med CFBA. Enklere forbrenningsteknologi ligger til grunn for det. Områdeanalysen i Figur 28 viser høyt innhold av Cl, Ca, Al, S, Na og K. Sammenlignet med CFBA, se Figur 27, viser områdeanalysen lavere innhold av metaller. Dette kan komme som følge av lite forbehandling av avfallet før forbrenning. Det gir større partikler som vil være vanskeligere å transportere med røykgassen. Grunnstoffene funnet i områdeanalysen, sammen med punktanalysene i Figur 31 og Figur 32, tyder på stort innhold av salter, og lavt innhold av Fe og Si.

Diffraktogrammet til GFA i Figur 34 viser færre topper enn CFBA. Flere av hovedfasene som ble identifisert er de samme som har blitt funnet i tidligere forskning (Tabell 2). Blant disse er Al_2O_3 , NaCl, SiO og CaCl_2 . XRF-analysen i Tabell 10 viser også funn av hovedfaser som inneholder grunnstoffer som utgjør store deler av sammensetningen i GFA, vist i Figur 28. Høyt innhold av salter og kalsium samt lavt innhold av metaller i GFA overstemmer i stor grad med teorien.

5.2.3 Sammenligning av FA

Rent visuelt er det forskjell mellom fargen til CFBA og GFA, henholdsvis brun og grå vist i Figur 12. Område- og punktanalysene, XRD og XRF viser også tydelig forskjell mellom FA. SEM/EDS-analysene viser at CFBA inneholdt større konsentrasjoner av metaller sammenlignet med GFA. Dette stemmer godt med teorien om hvordan forbrenningen ved de forskjellige teknologiene foregår.

Diffraktogrammene til de ulike FA viser også stor forskjell i kompleksitet. Fasene identifisert for FA ved XRD er relativt like, der salter og kalsiumforbindelser utgjør store deler av FA. Hovedforskjellen mellom CFBA og GFA var at Fe_2O_3 ble funnet i førstnevnte, vist i oversikten over XRD-faser i Tabell 7 og Tabell 8. Ved XRF ble forskjellen mellom de ulike FA enda tydeligere. Flere metaller, både som hoved- og sporelementer, var i større konsentrasjoner i CFBA sammenlignet med GFA.

Fra diffraktogrammene til ubehandlet CFBA og GFA kan det se ut til at CFBA har en mer komplisert sammensetning. XRF-analysene viser på sin side at GFA består av mange ulike elementer, men i mindre konsentrasjoner, vist i Tabell 10. Dette medfører at faser med større konsentrasjoner overskygger mindre konsentrerte faser, som gir færre toppler i diffraktogrammet for GFA. CFBA har høyere konsentrasjoner av metallfaser, Tabell 9, og disse vil dermed ikke overskygges i like stor grad. Dette i kombinasjon med klorider og silikater/mineraler ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) kan tyde på en mer kompleks sammensetning i CFBA enn i GFA.

Felles for CFBA og GFA er det høye innholdet av kalsiumforbindelser. Dette kommer av tilsatsen av $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ i rensingen av røykgassen. Disse er funnet ved SEM/EDS, XRD og XRF. XRF-resultatene viser at innholdet av Ca (CaO i Tabell 10) er større i GFA enn CFBA.

5.3 Ovnforsøk

Det ble gjennomført to ulike ovnsforsøk. Reduksjonsforsøk ble gjort for å undersøke muligheten for reduksjon av metaller i FA. Fra teorikapittelet Reduksjon av metaller ble det vist at det er termodynamisk mulig å redusere Fe i FA. Analysene av ubehandlet FA, spesielt CFBA, viser et høyt innhold av Fe_2O_3 . Av metallene i FA er det Fe som med størst sannsynlighet vil kunne reduseres under forholdene brukt ved ovnsforsøk. Al, Mg og Si vil kreve høyere temperaturer for reduksjon, vist i Ellingham diagrammet i Figur 8. Muligheter til dannelse av metallegeringer med for eksempel Fe vil kunne påvirke sannsynligheten for reduksjon av Al, Mg og Si. Konsentrasjonen av andre metaller i FA er veldig liten, og det vil derfor være vanskelig å identifisere endringene etter reduksjonsforsøk.

Karboniseringsforsøk ble gjort for å se om opptak av CO_2 ved bruk av FA er mulig. Reaksjonen mellom $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ og CO_2 er spontan og vil skje ved romtemperatur. Ved å øke temperaturen vil aktiveringsenergien for reaksjonen senkes. Reaksjonen vil som et resultat av dette gå fortere (UiO, 2018). Fra innledende analyser av ubehandlet FA ble det funnet at GFA har høyere kalsiuminnhold

enn CFBA. Det gjør potensialet for opptak av CO₂ større. NOAH AS (2.6) og Carbon8 (2.7.3) jobber begge med metoder som baserer seg på reaksjonen mellom CaO/Ca(OH)₂ og CO₂. Metodene viser at potensialet for CO₂-fangst er stort og et karbonatiseringsforsøk vil derfor være av stor interesse.

De to ulike ovnsforsøkene viste tydelig endringer i morfologien til partiklene. Tabell 16 viser en oversikt over CFBA og GFA før og etter reduksjons- og karbonatiseringsforsøk. Tabellen er med for å sammenligne den visuelle forskjellen på FA som ubehandlet, redusert (1100°C og 1200°C) og karbonatisert (500°C).

Tabell 16 Ubehandlet FA sammenlignet med redusert og karbonatisert FA.

	Ubehandlet	Redusert 1100°C	Redusert 1200°C	Karbonatisert 500°C
CFBA				
GFA			<i>Ikke gjennomført</i>	

5.3.1 Reduksjonsforsøk

Reduksjonsforsøk ble gjennomført ved 1100°C for CFBA og GFA og ved 1200°C for CFBA.

Hensikten med forsøket var å undersøke hvordan FA vil reagere ved en temperatur høyere enn forbrenningstemperaturen (1000°C). GFA ved 1200°C ble ikke gjennomført grunnet forsøket ved 1200°C for CFBA ga uønskede reaksjoner på reaktoren. Reaktoren ble ødelagt som et resultat av høyt trykk, vist i Figur 36. Uvisshet om eventuelle konsekvenser for ovnen gjorde også at det ikke ble gjort reduksjonsforsøk ved 1200°C for GFA.

Virvelsjiktaske – CFBA 1100°C

Etter reduksjonsforsøk ved 1100°C var det tydelig forskjell på CFBA sammenlignet med før forsøk, presentert i Tabell 16. Figur 35 viser produktene fra forsøket for CFBA. Det er tydelig at partikler har agglomerert og dannet klumper av forskjellig størrelse. Dette er å forvente etter forsøk ved så høy temperatur.

Sammenligningsbilde i Figur 40 viser CFBA før og etter reduksjonsforsøk. Figuren viser tydelig at det har blitt dannet større sammenfatninger av partikler og ligner mere på flak av partikler. Dette skyldes mest sannsynlig at den høye temperaturen i ovnen gjør at partiklene i FA sintrer. Sintring beskriver prosessen hvor metall og mineraler i pulverform varmes opp til høye temperaturer slik at partikler reagerer og vokser sammen til en større masse. Reaksjonene skjer ved temperaturer under smeltepunktet til materialene, og årsaken til sammenvoksingen er ulike diffusjonsprosesser (Mark E.Schlesinger, 2011).

Punktanalysene i Figur 44 indikerer at noe metallsmelte kan ha blitt dannet under reduksjonsforsøk. Lyse runde partikler med stort innhold av metaller, som Zn, Fe og Cu, tyder på metallfaser. Metallfasene ble ikke observert før forsøket. I modelleringen av oppførselen til Zn ved temperaturøkning (4.4) antas det at ZnO er til stede før reduksjonsforsøk. Hvis dette er tilfellet og reaksjonen har fått tid til å gå fullstendig, skal ikke Zn ligge som metallfase etter forsøket. Ved ca. 980°C vil det dannes Zn-gass. I punkt 15 i Figur 44 er derimot Zn-innholdet høyt, sammen med større konsentrasjoner av S, Fe og Mn. Innholdet av Zn som metallfase kan komme av flere årsaker. En av årsakene kan være at forsøket kun ble gjort i en time. Dette kan være for lite tid til at reaksjonene får gå fullstendig. Antakelsen om at det kun er ZnO til stede før forsøk kan også være feil. I tillegg vil Zn i forbindelse med andre grunnstoffer kunne få økt smelte- og kokepunkt. Det kan bidra til at Zn avdamper ved høyere temperaturer og metallsmelte kan dannes.

Oppførselen til Zn har tidligere blitt undersøkt av blant annet ScanArc i Sverige (Swartling, 2020). De viser at FA inneholder et sted mellom 0,5-6% Zn. I forsøkene som ble gjort vises det at Zn enkelt kan skilles fra resten av FA under reduserende forhold og høye temperaturer. I denne oppgaven ble tilsvarende forsøk gjort ved 1200°C, og resultatene antyder at Zn avgasset også ved lavere temperaturer enn plasmatemperaturer (3000-5000°C) (Swartling, 2020).

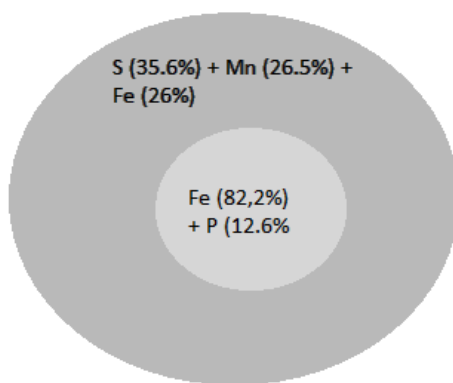
Punkt 17 i Figur 44 tyder på dannelse av Fe-smelte som følge av reduksjon. Høyt innhold av Fe, Cu og S kan indikere en form for metallfase. Modelleringen (del 4.4) og beregningen i teorien (del 2.5)

viser at reduksjon av jernoksid er termodynamisk mulig og kan derfor forventes. Metallpartikler i CFBA etter reduksjonsforsøk ved 1100°C kan tyde på reduksjon av metaller. Færre store metallpartikler kan tyde på at temperaturen ikke var høy nok til å få dannet større smeltefaser. Siden de lyse partiklene er små, vist i Figur 42, blir det vanskelig å analysere disse ved bruk av SEM/EDS. Ingen store smeltefaser kan skyldes for lite Fe og for kort tid til at disse fikk samlet seg i større smeltefaser. Små metalldråper har vanskelig for å bevege seg nedover gjennom resten av FA. Dermed er det ikke sikkert at høyere temperatur alene vil medføre større metallfaser.

Diffraktogrammet (Figur 51) for CFBA fra XRD-analysen viser færre, men tydeligere toppler. Dette vises i Figur 50 som sammenligner diffraktogrammene før og etter reduksjon. Tabell 11 viser forskjellen på hvilke hovedfaser som ble identifisert. Tabellen viser tydelig at silikatmineraler, for eksempel $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, er blant hovedfasene spesielt etter reduksjon. Færre og tydeligere toppler gjorde det lettere å identifisere faser som tidligere ikke hadde blitt funnet i CFBA. Metallfaser som Ti_9O_{17} , PbO og CuSiO_3 er faser som tidligere ikke har blitt oppdaget selv om de antas å ha vært til stede før reduksjonsforsøket. Ti_9O_{17} kan antas å være TiO_2 . Nedgang i antall toppler kan komme av at ved forsøk over forbrenningstemperatur (1000°C) vil reaksjoner som ikke ble fullstendig gjennomført ved avfallsforbrenningen bli fullstendige. Det kan gi færre metastabile faser etter forsøk. En annen forklaring på nedgangen i antall faser kan skyldes avdamping av forskjellige faser, for eksempel klorider.

Virvelsjiktasje – CFBA 1200°C

Reduksjonsforsøk ved 1200°C medførte store synlige endringer på CFBA. All FA etter forsøket hadde sintret og/eller smeltet til en klump, vist i Figur 36. Som et resultat av forsøket ble det dannet flere lysere faser, vist i Figur 37. Disse fasene ble antatt å være metallfaser som har oppstått under reduksjon. De lyse fasene ble analysert med SEM/EDS, vist i Figur 45. Punkt 16 og 18 i figuren viser høyt innhold av Fe i tillegg til P. Den analyserte fasen antas å være jernsmelte som har oppstått under reduksjonsforsøket, noe som var forventet ut ifra teorien beskrevet i Reduksjon av metaller og Modellering. Til forskjell fra reduksjonsforsøk ved 1100°C var det færre metallfaser for dette forsøket. Metallfasene var dog større og kan tyde på at flere av jernfasene ved 1100°C-forsøket har samlet seg til en større og renere smelte. Dette vises i Figur 42 og Figur 43.



Figur 69 En enkel skisse av partikkelen med jernsmelte. Elementene er oppgitt med prosent fra EDS-analysen.

Flere av metallfasene som oppstod etter reduksjonsforsøk ved 1200°C viste at den lyse fasen var omgitt av en mørkere fase, se Figur 46. Analysen i punkt 12 i figuren viser at den lysere fasen i hovedsak inneholder Fe og P, slik som tidligere vist i Figur 45. Den mørkere fasen rundt inneholder mest S, Mn og Fe, vist i punktanalysen i Figur 46. Figur 69 viser en skisse av hvordan den mørke fasen omringer en lysere fase bestående av jern. Store konsentrasjoner av Mn sammen med S kan tyde på at S har reagert med Mn og dannet MnS. Høyt innhold av Fe i den mørke fasen kan være grunnet forurensing fra den lyse fasen bestående av ren jernfase. Det høye innholdet av Fe og S i den mørke fasen kan også komme av at jernsulfider har lavt smeltepunkt, lavere enn typiske jernlegeringer. Det er dermed mulig for jernsulfidet å størkne rundt korn grensen til den rene jernfasen.

Ristovnaske – GFA 1100°C

Etter reduksjonsforsøk ved 1100°C var det en tydelig visuell forskjell på GFA sammenlignet med før, vist i Tabell 16. I likhet med reduksjonsforsøkene for CFBA viste produktene fra forsøket med GFA at asken har sintret til større partikler, presentert i Figur 38. Med unntak av agglomerering var den visuelle forskjellen mellom GFA før og etter forsøket liten. Punktanalyser som ble gjort for GFA etter reduksjonsforsøket underbygger det at forskjellene mellom GFA før og etter reduksjon er liten. I Figur 48 og Figur 49 blir punktanalyser av FA tatt fra henholdsvis lokk og digel etter forsøk presentert. Punkt 2 og 3 viser analyser av FA tatt fra lokket. Analysene viser høyt innhold av Ca og Cl, samt Ti og C. Innholdet av Ti fra FA i lokket kan være av interesse, men vil ikke bli diskutert videre i denne oppgaven.

Punkt 11 og 12 i Figur 49 viser analyser av GFA tatt fra digel. Her er innholdet likt som for analysene av FA fra lokket, utenom innhold av Ti. Innhold av Ca, Cl, samt noe S og C er likt som for GFA før reduksjon. Det kan antas at reduksjon av metaller har skjedd i GFA, slik som for CFBA ved 1100°C.

Grunnet langt lavere konsentrasjoner av aktuelle metaller, typisk Fe, vil det være vanskelig å se metallfasene i SEM og identifisere de ved EDS.

I likhet med redusert CFBA ved 1100°C har diffraktogrammet for redusert GFA fått færre og tydeligere topper. Dette vises i Figur 52. Nedgang i antall topper kan som tidligere nevnt komme av at forsøk ved temperaturer over forbrenningstemperatur (1000°C) vil reaksjoner som ikke ble fullstendig gjennomført ved avfallsforbrenningen bli fullstendige. Figur 53 viser diffraktogrammet etter reduksjon. Sammenlignet med diffraktogrammet for GFA før reduksjon (Figur 34) vises det at antall topper er redusert og tydeligere.

Før forsøket ble det i XRD funnet $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ som en tydelig hovedfase i GFA. Denne fasen ble ikke funnet etter forsøket. På en annen side ble $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{10}\text{Si}_4\text{O}_{35}$ funnet etter oppvarming til 1100°C, noe som kan tyde på at den tidligere fasen har reagert med andre forbindelser i GFA. Al_2O_3 og SiO_2 var to andre faser som var tydelige før forsøket, men mindre synlige etter forsøket. En mulighet er at disse forbindelsene har reagert med $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ og dannet $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{10}\text{Si}_4\text{O}_{35}$.

5.3.2 Karbonatiseringsforsøk

Karbonatisering av FA er en metode hvor CO_2 i atmosfæren reagerer med $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ og danner karbonater. Dette er en reaksjon som skjer spontant ved romtemperatur forklart i del 2.6, men vil kunne akselereres ved økt temperatur. På bakgrunn av dette ble karbonatiseringsforsøket gjennomført ved 500°C. Den eksakte temperaturen for CFBA og GFA ble målt til henholdsvis 519°C og 514°C, ettersom ovnen som ble brukt ikke var nøyaktig kalibrert.

Virvelsjiktaske – CFBA 500°C

Karbonatisering av CFBA viste få endringer i utseende etter forsøket sammenlignet med CFBA før forsøket, vist i Tabell 16. SEM-bildet som viser CFBA før og etter karbonatisering underbygger dette, presentert i Figur 56. Punktanalysene gjort ved høyere oppløsning viser for øvrig at partiklene i CFBA har reagert og dannet større agglomerater i flak-lignende strukturer, se Figur 58 og Figur 59. Innholdet i disse punktene viser hovedsakelig Si, Al, Ca, K og Cl i tillegg til C. Dette er elementer som tidligere har blitt funnet i ubehandlet FA, vist i Figur 29 og Figur 30. Den største forskjellen er at disse elementene er tydeligere og mer konsentrerte etter karbonatiseringsforsøket.

XRD-analysen av karbonisert CFBA viser relativt liten forskjell sammenlignet med ubehandlet CFBA, vist i diffraktogrammet i Figur 62. $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ var en av fasene hvor forskjellen var tydeligst etter forsøket, vist i Figur 63 og Tabell 14. Fra SEM/EDS resultatene for CFBA etter karbonisering ble det funnet store partikler med innhold av blant annet Si, Al og Ca. Det kan derfor være en mulighet at disse partiklene er $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ som har blitt mer synlige etter karboniseringsforsøk.

Hensikten med forsøket var å undersøke om CO_2 -gass vil bli tatt opp av FA og om nye karbonater dannes. Oversikten i Tabell 14 viser at FeCO_3 var det eneste nye karbonatet som ble oppdaget etter karbonisering. FeCO_3 ble vurdert som mindre sannsynlig, og det er dermed usikkert hvorvidt dette karbonatet faktisk var til stede i CFBA etter forsøket. Andre karbonater kan også ha vært til stede i CFBA etter forsøket, men ble ikke identifisert i XRD-analysen. Ut ifra teorien (del 2.6) forventes faser som CaO og $\text{Ca}(\text{OH})_2$ å reagere med CO_2 og danne kalsiumkarbonat. Årsaken til at ikke flere karbonater ble funnet kan skyldes at sammensetningen til CFBA er kompleks med mange forskjellige faser, vist ved diffraktogram i Figur 33 og XRF-analyse i Tabell 9 for CFBA. En antagelse er at komplekse faser med innhold av Ca krever høyere temperatur enn den som ble brukt i forsøket (500°C) for å kunne reagere med CO_2 .

I teorien vil FA bli tyngre etter opptak av CO_2 . Tabell 13 viser et massetap for CFBA etter karboniseringsforsøk. Dette kan skyldes avdamping og avgassing fra andre forbindelser i CFBA. I tillegg var det uvisst hvor mye CO_2 som var til stede i reaktoren under forsøket. Oppsummert antas det at lite CO_2 ble tatt opp i CFBA.

Ristovnaske – GFA 500°C

Ut ifra det visuelle bildet av GFA var det tydelig at FA hadde reagert under karbonisering. Tabell 16 viser sammenligningen mellom før og etter, hvor FA har endret karakter fra pulver til en hard klump. Sammenlignet med CFBA er forskjellen stor på FA før og etter, noe som underbygges ved SEM/EDS analyser. Figur 57 viser en sammenligning mellom ubehandlet og karbonisert GFA. Karbonisert GFA har flere store og sintrede partikler enn ubehandlet GFA. Utover dette ble det ikke observert noen store forskjeller.

Punktanalysene som ble gjort på GFA i Figur 60 og Figur 61 viser at partiklene er større enn før forsøket (Figur 28). Analysene viser høyt innhold av Ca, C og Cl. Ved opptak av CO_2 vil mengden C i FA øke. Det kan antas, selv om SEM/EDS-analysene er unøyaktige for karboninnhold, at mengden C har økt betydelig etter forsøk. I likhet med CFBA vil det ved opptak av CO_2 forventes vektøkning. For

GFA ble det ingen endring i vekten under forsøk (Tabell 13). Avdamping og avgassing antas å være lik for CFBA og GFA. Årsaken til at GFA ikke har fått massetap kan skyldes at opptak av CO₂ har utlignet massetapet fra avdamping og avgassing. Dette kan igjen tyde på opptak av CO₂.

Det høye innholdet av kalsiumforbindelser i ubehandlet GFA gjør opptak av CO₂ både teoretisk mulig og sannsynlig, så lenge atmosfæren i forsøket inneholder CO₂. XRF-analysene viser at GFA har 35,4 wt% CaO og i CFBA ble det funnet 25,5 wt% (Tabell 9 og Tabell 10). I tillegg er den totale sammensetningen i GFA mindre kompleks. Dette sammen med høyere kalkinnhold kan tyde på at karbonatisering er mer sannsynlig for GFA enn CFBA.

Diffraktogrammet for karbonatisert GFA (Figur 65) viser en nedgang i antall topper sammenlignet med før forsøket (Figur 64). Fasene identifisert etter forsøket tyder på en økning i antall karbonater til stede i FA. CaCO₃, FeCO₃, Pb₃(CO₃)O₂ og CaMgCO₃ er karbonatfaser funnet etter forsøk, presentert i Tabell 15. På grunn av lave konsentrasjoner er det liten sannsynlighet for at FeCO₃ og Pb₃(CO₃)O₂ utgjør noen hovedfaser etter karbonatisering. På bakgrunn av teorien (del 2.6) er det forventet en økning i antall karbonater. Modellering for karbonatisering presentert i del 4.4 viser at Ca(OH)₂ i CO₂-rik atmosfære ved 500°C vil ta opp CO₂ og danne CaCO₃. Resultatene fra karbonatiseringsforsøk for GFA samsvarer med teori og modellering, dog med noe usikkerhet.

Al₂O₃ ble identifisert som svært sannsynlig før karbonatisering av GFA vist i Tabell 15, men ble ikke funnet etter forsøket. En mulig forklaring på dette er at Al₂O₃ sammen med noe SiO₂ har reagert med Ca₂Al₂SiO₇ og dannet Ca₁₂Al₁₀Si₄O₃₅. Hvorvidt denne reaksjonen vil kunne skje ved betingelsene gitt i ovnsforsøket og sammensetningen i FA er svært usikkert, og vil ikke bli diskutert videre i denne oppgaven.

5.4 Usikkerhet og feilkilder

CFBA og GFA er FA med komplekse sammensetninger. For å få representative resultater for hele FA kreves det analyser av store mengder. Avhengig av hvilken del av beholderen FA (Figur 11) ble tatt fra til analysen er sjansen for varierende resultater stor. Område- og punktanalysene er tatt fra små fraksjoner av det totale volumet FA i beholderen. Per år håndterer NOAH As ca. 300 000 tonn FA. I

det eksperimentelle arbeidet var omtrent 1,5kg av både CFBA og GFA tilgjengelig. Med den komplekse og varierende sammensetningen i FA er det vanskelig å få representative resultater for FA.

5.4.1 SEM/EDS-analyse

Maskinen brukt til SEM/EDS-analyse måler verdiene for C og O med stor unøyaktighet. Det ble derfor, med unntak av punktanalysene for karbonisert FA, tatt bort C og O ved analyser av FA. Dette gjør at vektprosenten av de andre elementene blir høyere enn faktisk verdi. Derfor vil ikke SEM/EDS-analyser alene kunne brukes til å bestemme hvilke faser FA består av, men gi en indikasjon på hvilke elementer som er til stede. I Metode 3 – FA på karbonteip er det brukt C på prøveholderen. Det gir usikkerhet rundt C-innholdet ved analysen. Det samme vil gjelde for Cu i Metode 5 – Oppløst FA på kobberteip. Resultatet i Figur 30 er et eksempel på dette.

I alle analyser ved SEM/EDS ble det brukt prøveholder av Al. Kammeret som analysen utføres i er også av Al. Derfor vil det alltid detekteres noe Al ved SEM/EDS, selv om prøvematerialet ikke inneholder Al. Dette vil gjøre innholdet av Al identifisert i FA usikkert.

5.4.2 XRD

XRD-analysene for FA ble gjort med utgangspunkt i teori (del 2.4) og tidligere forskning, se Tabell 2 og Tabell 3. Som nevnt tidligere vil innhold i FA variere ut ifra hva avfallet som forbrennes inneholder. Fasene vist i tabellene er faser funnet i FA fra andre land. Innhold i avfall vil variere fra land til land. Det gjør at FA fra Kina vil kunne inneholde andre faser enn FA fra Skandinavia. Derfor vil det være usikkert hvorvidt alle fasene til stede i FA analysert i denne oppgaven vil bli identifisert.

Diffaktogrammene for CFBA og GFA var kompliserte med mange topp. Mange av toppene var i tillegg vanskelig å skille fra hverandre. Dette gjorde det vanskelig å identifisere hvilke faser hver topp tilhørte. Det er derfor knyttet stor usikkerhet til flere av fasene som ble identifisert.

Vedlegg A: Oversikt over XRD presenterer hvilke faser som ble sjekket for FA før og etter ovnsforsøk.

5.4.3 XRF

XRF-analysen finner kun kjemisk sammensetning i FA. Analysen gir derfor ingen informasjon om hvilke faser som er til stede. Eksempelvis vil ikke Na og K ligge som oksider, men vil mer sannsynlig være klorider. Metoden som ble brukt til XRF er standardisert for analyse av mineraler. Det medførte semi-kvantitative resultater og vektprosentene oppgitt i Tabell 9 og Tabell 10 utgjør ikke 100% totalt. Mengden av hvert element funnet vil derfor ikke være helt nøyaktig.

5.4.4 Ovnsforsøk

Ovnen som ble brukt i forsøkene var kun kalibrert for et utvalg temperaturer. Som et resultat av dette ble den faktiske temperaturen for forsøkene noe ulik den planlagte temperaturen. For reduksjonsforsøkene ved 1100°C ble temperaturen målt til 1084°C for CFBA og 1093°C for GFA. For reduksjon av CFBA ved 1200°C ble temperaturen målt til 1195°C. Karboniseringsforsøkene ble målt til henholdsvis 519°C og 514°C for CFBA og GFA. Ut ifra resultatene kan det antas at denne unøyaktigheten i liten grad har påvirket analysene.

Under reduksjonsforsøkene økte trykket inne i reaktoren som gjorde det vanskelig å åpne den. For å få åpnet reaktoren ble det brukt mye makt, noe som kan ha påvirket hvor i reaktoren FA ble hentet fra. Eksempelvis er det usikkert om FA i lokket faktisk lå i lokket etter forsøket, vist i Figur 38. Under karboniseringsforsøkene var det stor usikkerhet knyttet til mengden CO₂ i reaktoren. Dette skyldes at mengden CO₂ ikke ble målt. FA ble veid før og etter karbonisering. Hensikten var å undersøke opptak av CO₂ ut ifra endring i masse. Vekten som ble brukt målte kun til nærmeste 0,05g. Forsøket som ble gjort bestod av omtrent 1g FA. Små endringer i vekten vil dermed ikke bli oppdaget.

6 Konklusjon

Dagens samfunn genererer store mengder husholdningsavfall. Fra dette avfallet produseres farlig avfall, hvor FA er et biprodukt. Dette stabiliseres og deponeres, og dermed forsvinner de potensielt verdifulle komponentene i FA ut av kretsløpet. Deponiene fylles opp og det trengs nye metoder for å redusere mengden som deponeres. For å redusere mengden verdifulle ressurser som går til spille ble det i denne oppgaven sett på om reduksjon av metaller er en mulig behandlingsmetode for FA. I tillegg ble det sett på om karbonatisering av FA er en mulig behandlingsmetode for å fange CO₂.

6.1 Reduksjonsforsøk

I denne oppgaven ble det undersøkt hvilke metallfaser som er til stede i to ulike typer FA. CFBA inneholdt flere metallfaser enn GFA og hadde dermed større muligheter for å få reduksjon av metaller. Det var i tillegg stor forskjell mellom redusert CFBA ved 1100°C og 1200°C. Reduksjonsforsøk ved 1200°C viste større ansamlinger av reduserte metallpartikler. Resultatene fra det eksperimentelle arbeidet indikerer et stort potensial for å redusere metaller i FA. Det konkluderes med at høyere temperatur gir større muligheter for å få redusert metaller og at CFBA har større potensial enn GFA. Videre konkluderes det med at høyere temperaturer reduserer antall faser i FA, som medfører at sammensetningen blir mindre kompleks.

6.2 Karbonatiseringsforsøk

Videre i arbeidet ble mulighetene for opptak av CO₂ undersøkt. Gjennom karakterisering av FA ble det funnet store mengder Ca. Teorien tilsier at kalsiumfaser som CaO og Ca(OH)₂ vil kunne reagere med CO₂ og danne CaCO₃. Dette gir et stort potensial for CO₂-fangst i atmosfæren samt stabilisering av FA. Karbonatiseringsforsøk ble dermed gjennomført for CFBA og GFA ved 500°C. Resultatene antyder at GFA tok opp mer CO₂ enn hva CFBA gjorde. Dette kan skyldes høyere innhold av Ca i GFA. Det konkluderes med at begge FA kan brukes til karbonfangst, men resultatene antyder at høyere kalkinnhold i GFA gjør denne FA bedre egnet til dette formålet.

7 Videre arbeid

I denne oppgaven ble FA kun tørket i forkant av analysene. Høyt innhold av salter og andre vannløselige komponenter i FA indikerer at vasking som forbehandling er en mulighet. Dette vil kunne fjerne store mengder klorider i FA, som igjen vil medføre større konsentrasjoner av metaller og andre forbindelser. I begge forsøkene ble det brukt små mengder FA, omtrent ett gram. Videre i arbeidet vil det være fordelaktig å jobbe med større prøvemengder for å få tydeligere resultater.

For reduksjons- og karboniseringsforsøk vil det være interessant å undersøke hvilke forhold som er best egnet til de to metodene. Temperatur og trykk er to variabler som kan utforskes for å optimalisere både reduksjons- og karboniseringsforsøk. I denne oppgaven ble det kun sett på mulighetene for reduksjon av Fe. CFBA inneholdt en rekke andre metaller som også kan reduseres. Bruk av andre reduksjonsmidler til å undersøke om andre stabile faser utenom jern kan dannes.

Under forsøkene med karbonatisering ble det i denne oppgaven brukt «ren» CO₂. Dette er ingen reell atmosfære, ettersom de fleste industrigasser inneholder fraksjoner av CO₂ sammen med andre gasser. Derfor kan varierende atmosfære med ulike industrigasser som svovelholdige og nitrogenholdige gasser være et alternativ for å undersøke mulighetene for opptak av andre gasser i tillegg til CO₂ ved bruk av FA. I tillegg vil det være interessant å gjennomføre forsøk med kontinuerlig tilførsel på CO₂ for å holde tilgangen høy.

Referanser

- Avfall Norge. (2019). *Vi trenger en nasjonal løsning for flyveaske innen 2024*. Hentet Mars 26, 2021 fra <https://avfallnorge.no/bransjen/nyheter/vi-trenger-en-nasjonal-l%C3%B8sning-for-flyveaske-innen-2024>
- Chang, F.-Y., & Wey, M.-Y. (2006). Comparison of the characteristics of bottom and fly ashes generated from various incineration processes. *Journal of hazardous materials*, ss. Vol. s. 594-603.
- Covanta. (2020). *Waste-to-energy*. Hentet Mars 9, 2021 fra <https://www.covanta.com/what-we-do/waste-to-energy>
- EasyMining. (2021). *Ash2Salt*. Hentet Mars 23, 2021 fra [Easymining.se](https://www.easymining.se): <https://www.easymining.se/technologies/ash2salt/>
- Fortum. (2021). *Slik foregår røykgassrensing*. Hentet Mars 11, 2021 fra <https://www.fortum.no/bedrift-og-borettslag/avfall-og-energigjenvinning/vare-forbrenningstjenester/slik-foregar-roykgassrensing>
- Kutchko, B. G., & Kim, A. G. (2006, Desember). Fly ash characterization by SEM–EDS. *Fuel*, ss. Vol.85 s.2537-2544.
- Leckner, B., & Lind, F. (2020, Mai 15). Combustion of municipal solid waste in fluidized bed or on grate – A comparison. *Waste Management*, ss. Vol. 109. s. 94-108.
- Lew, R. (2018). *BioEnergy Consult*. Hentet Mars 15, 2021 fra <https://www.bioenergyconsult.com/moving-grate-incineration/>
- Lima, A., Ottosen, L., Pedersen, A., & Ribeiro, A. (2008). Characterization of fly ash from bio and municipal waste. *Biomass and bioenergy*, ss. Vol 32. s. 277-282.
- Lin, S., Kiga, T., Wang, Y., & Nakayama, K. (2011). Energy analysis of CaCO₃ calcination with CO₂ capture. *Energy Procedia*, ss. Vol 4. s. 356-361.
- Liu, J., Chen, J., & Huang, L. (2015). Heavy metal removal from MSS fly ash by thermal and chlorination treatments. *Scientific reports*, ss. Vol 5. s. 1-15.

- Lorange, I. R. (2019). Ekspertutvalget for reduksjon og behandling av farlig avfall. *SLUTTRAPPORT*, ss. 57-58. Hentet Mars 28, 2021 fra <https://www.regjeringen.no/contentassets/99097bd500bb41c9a949543587da8467/sluttrapport---ekspertutvalget-for-reduksjon-og-behandling-av-farlig-avfall---191101.pdf>
- Mark E.Schlesinger, M. J. (2011). Extractive Metallurgy of Copper. *Hydrometallurgical Copper Extraction: Introduction and Leaching*, ss. 281-322.
- Miljødirektoratet. (2019, Mai 5). *Miljødirektoratet*. Hentet fra Basiskarakterisere og velge avfallsdeponi: <https://www.miljodirektoratet.no/naringsliv/avfall/deponere-avfall/basiskarakterisere-og-velge-avfallsdeponi/>
- Miljødirektoratet. (2019). *Miljøstatus*. Hentet fra Miljødirektoratet: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/avfall/>
- Miljøstatus. (2013). *Miljødirektoratet*. Hentet fra Klima- og forurensningsdirektoratet: www.miljostatus.no
- Miljøteknikk terrateam AS. (2021). *Behandling og deponering*. Hentet April 5, 2021 fra <https://www.terrateam.no/project/behandling-og-deponering/>
- NOAH AS. (2017, April 5). *Kan flyveaske benyttes til å fange CO2?* Hentet fra noah.no: <https://www.noah.no/wp-content/uploads/2017/04/2017-04-05-Askdagen-2017-Morten-Breinholt-Jensen.pdf>
- NOAH AS. (2019). *Avfall mottatt og behandlet på Langøya*. Hentet Mars 18, 2021 fra <https://www.noah.no/wp-content/uploads/2020/10/NOAH-mottak-Lang%C3%B8ya-2019.pdf>
- NOAH AS. (2019). *NOAH AS*. (NOAH) Hentet fra <https://www.noah.no/for-kunder/mottaks-og-behandlingssteder/langoya/fakta-om-langoya/>
- NOAH AS. (2021). *Langøya*. Hentet Mars 21, 2021 fra <https://www.noah.no/for-kunder/mottaks-og-behandlingssteder/langoya/langoya-3/>

- Norsk Energi. (2018, Mai 5). *Norsk Energi, Oppdragsgiver: NOAH AS*. Hentet Mars 9, 2021 fra https://www.noah.no/wp-content/uploads/2018/06/Behandlingsl%C3%B8sninger-for-flyveaske_endelig-utgave-020518.pdf
- NTNU. (2015). *NTNU*. Hentet April 13, 2021 fra <https://www.ntnu.no/wiki/pages/viewpage.action?pageId=64458569>
- Pedersen, B. (2019, September 30). *Store norske leksikon*. Hentet Mars 19, 2021 fra <https://snl.no/metall>
- Pedersen, B. (2019, August 31). *Store norske leksikon*. Hentet Mars 28, 2021 fra <https://snl.no/kobber>
- Ragn-Sells AS. (2021). *Byggingen av et nytt anlegg tar form*. Hentet Mars 19, 2021 fra <https://www.ragnsells.no/om-oss/nyheter-og-presse/artikler/anlegg-flygeaske/>
- Rogers, J. E. (1973). *Solid Fuel Combustion and its Application to Incineration of Solid Refuse*. Massachussetts: Massachusetts institute of Technology.
- SINTEF. (2018, April 20). *Fly ash treatment technologies*. Hentet Februar 4, 2021 fra <https://www.noah.no/wp-content/uploads/2018/06/SINTEF-Report-2018-Fly-ash-treatment-technologies-FINAL.pdf>
- SSB. (2020, Desember 8). *Statistisk sentralbyrå*. (SSB) Hentet fra <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/mer-farlig-avfall-i-2019>
- Statkraft. (2019). *Statkraftvarme*. (statkraft) Hentet fra <https://www.statkraftvarme.no/om-statkraftvarme/vare-anlegg/trondheim/>
- Stempo, M. J. (2011). The Ellingham diagram: How to Use it in Heat-Treat-Process Atmosphere Troubleshooting. *Industrial Heating*, Vol 79. S. 55-58.
- Su, X., Zhang, L., Xiao, Y., Sun, M., Gao, X., & Su, J. (2015, Desember). Evaluation of a flue gas cleaning system of a circulating fluidized bed incineration power plant by the analysis of pollutant emissions. *Powder Technology*, ss. Vol 286. s. 9-15.

- Swartling, M. (2020). *Metallåtervinning och förglansning av flygaska från avfallsförbränning (ARCFUME)*. Malmö: ScanArc plasma technology AB.
- Sæther, M. (2018, Desember 5). *Avfall Norge: Velkommen til Miljøteknikk Terrateam AS*. Hentet Mars 16, 2021 fra <https://avfallnorge.no/bransjen/nyheter/velkommen-til-milj%C3%B8teknikk-terrateam-as>
- The World Bank. (2016). *What A Waste 2.0*. Hentet fra The World Bank: https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html
- UiO. (2018, Desember 14). *Temperatur*. Hentet fra Det matematiske fakultet: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/t/temperatur.html>
- Wang, K.-S., Chiang, K.-Y., Lin, K.-L., & Sun, C.-J. (2001). Effects of a water-extraction process on heavy metal behavior in municipal solid waste incinerator fly ash. *Hydrometallurgy*, ss. Vol 62. s. 73-81.
- Wang, P., Hu, Y., & Cheng, H. (2019). Municipal solid waste (MSW) incineration fly ash as an important source of heavy metal pollution in China. *Environmental pollution*, ss. Vol 252. s. 461- 475.
- Weibel, G., Eggenberger, U., Schlumberger, S., & Mader, U. K. (2017). Chemical associations and mobilization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration. *Waste management*, ss. Vol 62. s. 147-159.
- Weibel, G., Mader, U., Eggenberg, U., & Schlumberger, S. (2017). Optimized metal recovery from fly ash from municipal solid waste incineration. *Doktoravhandling, Universität Bern*.
- Weibel, G., Zappatini, A., Wolffers, M., & Ringmann, S. (2021). Optimization of Metal Recovery from MSWI Fly Ash by Acid Leaching: Findings from Laboratory-and Industrial-Scale Experiments. *Processes*, s. Vol 9. s. 352.
- Wikipedia. (2021, April 28). *Ellingham diagram*. Hentet fra Wikipedia - The Free Encyclopedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Ellingham_diagram

Wilewska-Bien, M., Lundberg, M., Steenari, B. M., & Theliander, H. (2007). Treatment process for MSW combustion fly ash laboratory and pilot plant experiments. *Waste management*, ss. Vol 27. s.1213-1224.

Yoshioka, T., Nakashim, D., Nakamura, T., Shceka, S., & Keppler, H. (2019). Carbon Solubility in Silicate melts in Equilibrium with a CO-CO₂ gas phase an graphite. I *Geochimica et cosmochimica acta* (ss. Vol 259, s. 129-143.). Elsevier Ltd.

Zhang, Y., Wang, L., Chen, L., Ma, B., Zhang, Y., Ni, W., & Tsang, D. (2021). Treatment of municipal solid waste incineration fly ash: State-of-the-art technologies and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, ss. Vol 411. s. 125-132.

Vedlegg A: Oversikt over XRD

Tabell A1 til A4 viser flere faser identifisert ved XRD før og etter ulike ovnsforsøk med ulik sannsynlighet for at FA inneholder fasene. Figur A1 til A6 viser diffraktogram for CFBA og GFA med utvalgte faser både før og etter ovnsforsøk.

- ingen match med diffraktogram

+ litt match (mindre sannsynlig) med diffraktogram

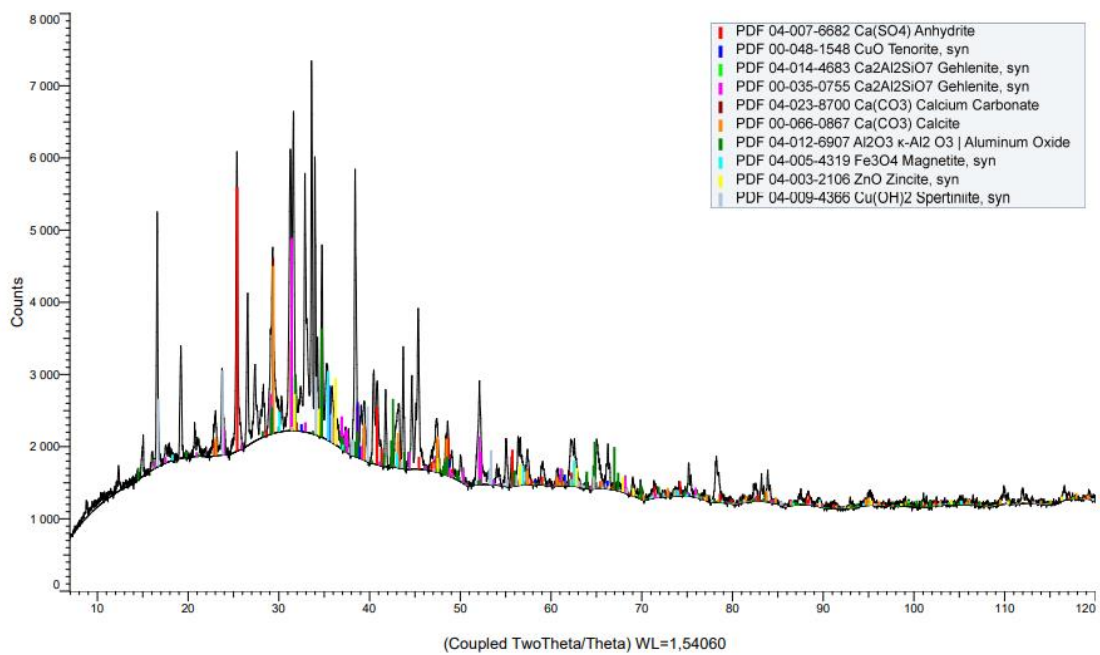
++ bedre match (sannsynlig) med diffraktogram

+++ Veldig god match (svært sannsynlig) med diffraktogram

Tabell A1 Faser identifisert i CFBA ved XRD-analyse (ubehandlet FA).

Faser	CFBA	Karbonater	Silikater	oksider
CaSO ₄	++			
CaSO ₄ *2H ₂ O	+			
CaCO ₃	++			
Fe ₂ O ₃	++			
CaAl ₂ SiO ₆	-			
CaAlOH	-			
Ca ₂ (PO ₄) ₃	-			
MgCO ₃	+			
Al ₂ O ₃	+			
CaCl ₂	++			
Al	Ingen ren Al	-	Al ₂ (SiO ₄)O +	Al ₂ O ₃ +
Ti	Ingen ren Ti	-	-	Ti ₄ O ₇ +
Fe	Ingen ren Fe	-	-	
Pb	Ingen ren Pb	Pb(CO ₃)O ₂ +	PbSiO ₅ +	PbO +
Cu	Ingen ren Cu	-	-	CuO + Cu(OH) ₂ ++
Cr	Ingen ren Cr	-	Cr ₂ SiO ₄ +	
Zn	+	ZnCO ₃ +	ZnSiO ₃ +	ZnO +
SiO ₂	+			
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	++			
CaO	+			

NaCl	+++			
KCl	++			
K ₂ ZnCl ₄	+			
Ca ₆ Al ₂ (OH) ₁₂ (SO ₄) ₃ ·26H ₂ O	+			
Ca ₄ O(PO ₄) ₂ O	+			
Ca(OH) ₂	-			

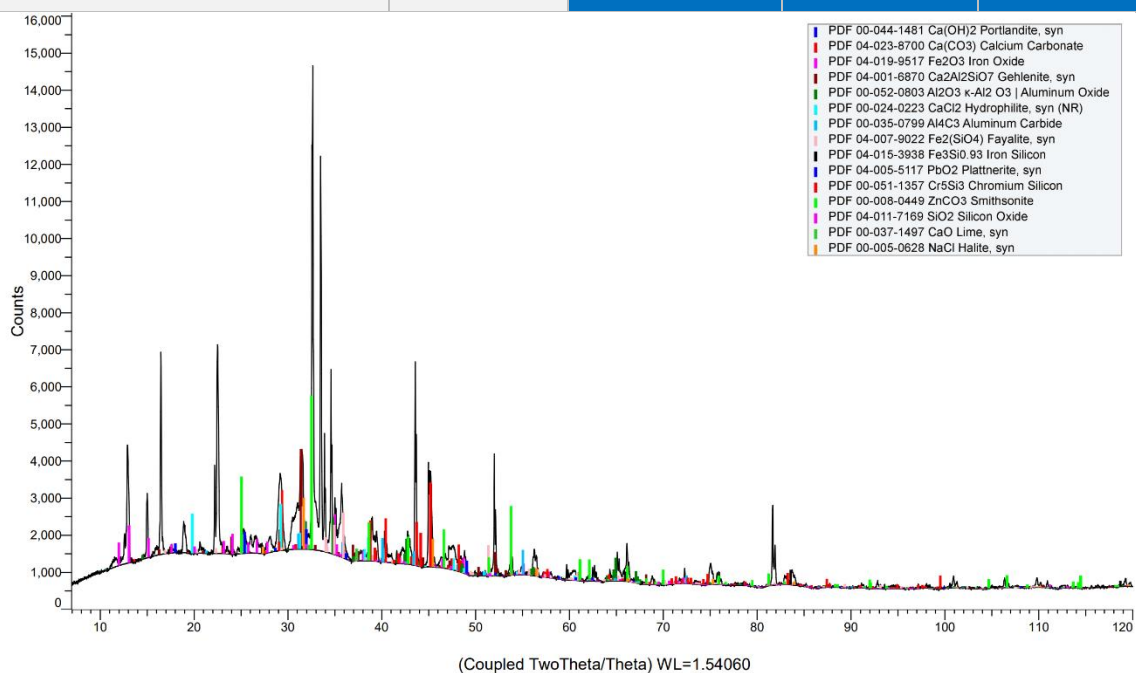


Figur A1 Diffraktogram for CFBA med utvalgte faser.

Tabell A2 Faser identifisert i GFA ved XRD-analyse (ubehandlet FA).

Faser	GFA	Karbonater	Silikater	oksider
CaSO ₄	-			
CaSO ₄ *2H ₂ O	-			
CaCO ₃	++			
Fe ₂ O ₃	+			
CaAl ₂ SiO ₆	-			
CaAlOH	-			
Ca ₂ (PO ₄) ₃	-			
MgCO ₃	-			
Al ₂ O ₃	+++			
CaCl ₂	++			
Al	Ingen ren Al	Al ₄ C ₃ +		
Fe	Ingen ren Fe	-	Fe ₃ SiO + Fe ₂ (SiO ₄)	-

			+	
Pb	Ingen ren Pb			PbO ₂ +
Cu	-	-	-	-
Cr	Ingen ren Cr		Cr ₅ Si ₃ +	
Zn	Ingen ren Zn	ZnCO ₃ ++		
SiO ₂	++			
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	++			
CaO	+			
NaCl	+++			
KCl	+			
K ₂ ZnCl ₄	+			
Ca ₆ Al ₂ (OH) ₁₂ (SO ₄) ₃ ·26H ₂ O	++			
Ca ₄ O(PO ₄) ₂ O	+			
Ca(OH) ₂	+			

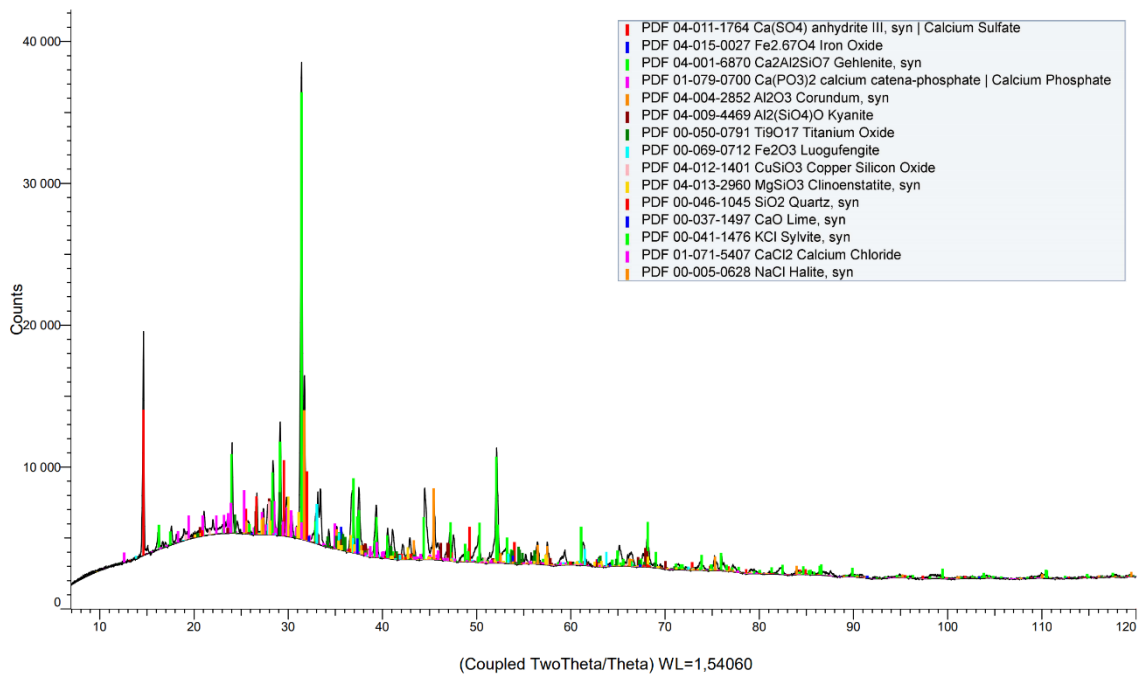


Figur A2 Diffraktogram for GFA med utvalgte faser.

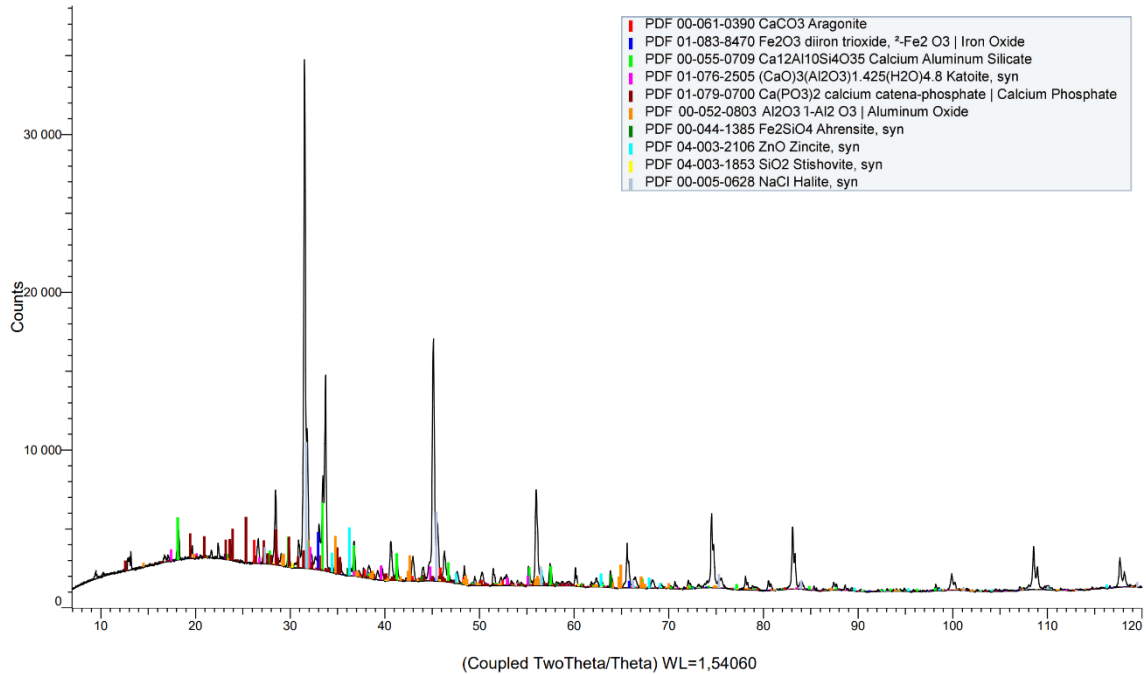
Tabell A3 Faser identifisert for CFBA og GFA etter reduksjon ved 1100°C.

Faser	CFBA – 1100°C	GFA – 1100°C
CaSO ₄	++	-
CaSO ₄ *2H ₂ O	-	-
CaCO ₃	-	+
Fe ₂ O ₃	++	+
Fe ₃ O ₄	++	-

CaAl ₂ SiO ₆	-	-
Ca ₁₂ Al ₁₀ Si ₄ O ₃₅	-	+++
Katoite	-	++
CaAlOH	-	-
Ca(PO ₃) ₂	++	-
Ca ₂ (PO ₄) ₃	-	+
MgCO ₃	-	-
Al ₂ O ₃	++	++
CaCl ₂	+	+
Al	Al ₂ (SiO ₄)O +	-
Ti	Ti ₉ O ₁₇ ++	-
Fe	Ingen ren Fe	Fe ₂ SiO ₄ +
Pb	Pb ₃ SiO ₅ + PbO ++	-
Cu	CuSiO ₃ ++	-
Cr	-	-
Mg	MgSiO ₃ +	-
Zn	Zn(C ₂ O ₄) ++	ZnO +
SiO ₂	++	+
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	+++	-
CaO	+	-
NaCl	+++	++
KCl	++	-
K ₂ ZnCl ₄	-	-
Ca ₆ Al ₂ (OH) ₁₂ (SO ₄) ₃ ·26H ₂ O	-	-
Ca ₄ O(PO ₄) ₂ O	-	-
Ca(OH) ₂	-	-



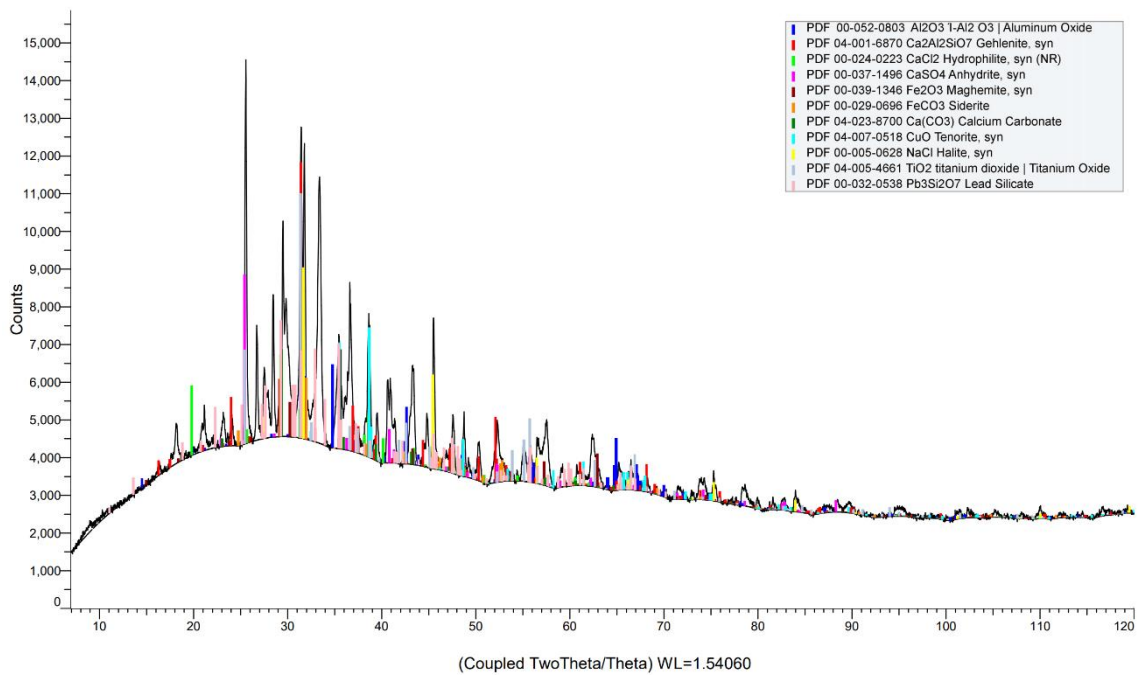
Figur A3 Diffraktogram for CFBA etter reduksjon med utvalgte faser.



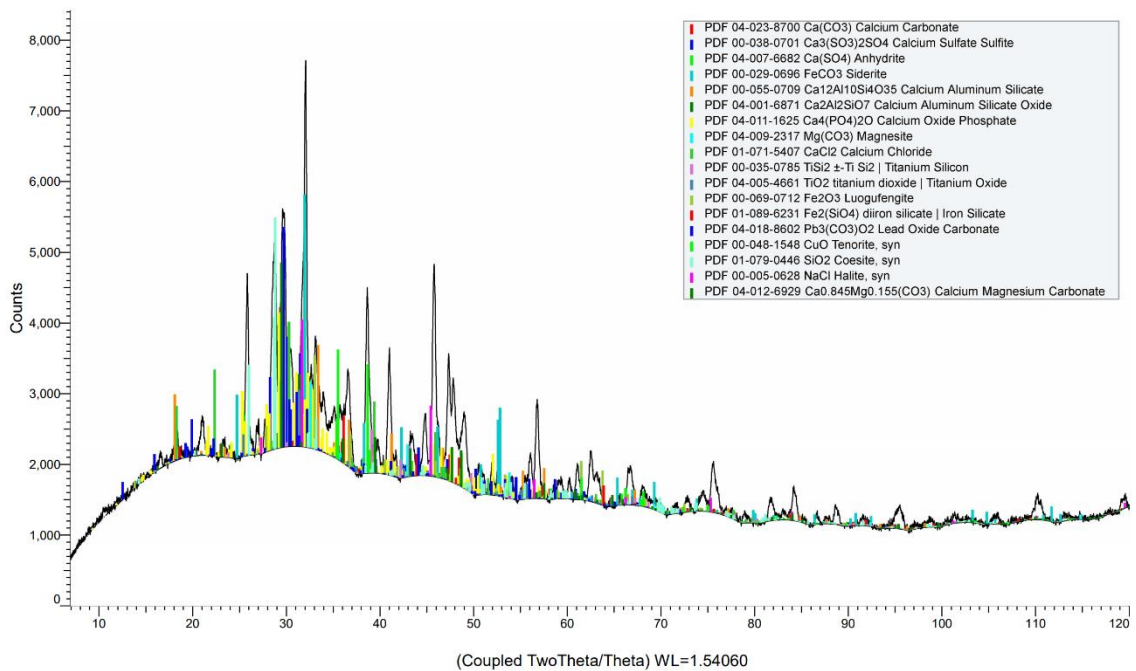
Figur A4 Diffraktogram for GFA etter reduksjon med utvalgte faser.

Tabell A4 Faser identifisert for CFBA og GFA etter karbonatisering.

Faser	CFBA	GFA
CaSO ₄	++	++
Ca ₃ (SO ₃) ₂ SO ₄		+
CaSO ₄ *2H ₂ O	+	-
CaCO ₃	++	++
Fe ₂ O ₃	++	++
FeCO ₃	+	+
Fe ₂ SiO ₄	-	+
CaAl ₂ SiO ₆	-	
Ca ₁₂ Al ₁₀ Si ₄ O ₃₅	-	++
CaAlOH	-	-
Ca ₂ (PO ₄) ₃	-	-
MgCO ₃	-	+
Al ₂ O ₃	++	+
CaCl ₂	+	+
Ti	TiO ₂ +	TiSi ₂ + TiO ₂ +
Pb	Pb ₃ Si ₂ O ₇ +	Pb ₃ (CO ₃)O ₂ +
Cr	-	CrO ₂ ++
Cu	+ CuO ++	CuO +
Mg	+	
SiO ₂	-	++
Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	++	+
CaO	-	-
NaCl	+++	++
KCl	-	-
K ₂ ZnCl ₄	-	-
Ca ₆ Al ₂ (OH) ₁₂ (SO ₄) ₃ *26H ₂ O	-	-
Ca ₄ O(PO ₄) ₂ O	-	+
Ca(OH) ₂	-	+
CaMgCO ₃		++



Figur A5 Diffraktogram for CFBA etter karbonatisering med utvalgte faser.



Figur A6 Diffraktogram for GFA etter karbonatisering med utvalgte faser.

SIKKERHETSDATABLAD

Tørr flyveaske fra avfallsforbrenning

Sikkerhetsdatabladet er i samsvar med Kommissjonsforordning (EU) 2015/830 av 28 mai 2015 om endring av europaparlaments- og rådsforordning (EF) nr. 1907/2006 om registrering, vurdering, godkjenning og begrensning av kjemikalier (REACH)

AVSNITT 1: IDENTIFIKASJON AV STOFFET / STOFFBLANDINGEN OG AV SELSKAPET / FORETAKET

Utgitt dato	04.05.2018
-------------	------------

1.1. Produktidentifikator

Kjemikaliets navn	Tørr flyveaske fra avfallsforbrenning
Krav om SDS bortfaller	Produktet er definert som avfall i hht REACH artikkel 2 pkt 2, og krav om sikkerhetsdatablad bortfaller i hht REACH artikkel 31.

1.2. Relevante identifiserte bruksområder for stoffet eller stoffblandingen og bruk som frarådes

Kjemikaliets bruksområde	Avfallsprodukt fra forbrenning av avfall. Gjelder gjennomsniittsasje mottatt på Langøya.
--------------------------	---

1.3. Opplysninger om leverandøren av sikkerhetsdatabladet

Firmanavn	NOAH AS
Postadresse	Postboks 317
Postnr.	3081
Poststed	Holmestrand
Land	Norge

1.4. Nødtelefonnummer

Nødtelefon	Telefon: 22 59 13 00 Beskrivelse: Giftinformasjonen
------------	--

AVSNITT 2: FAREIDENTIFIKASJON

2.1. Klassifisering av stoffet eller stoffblandingen

Klassifisering i henhold til CLP (EC) No 1272/2008 [CLP / GHS]	Skin Irrit. 2; H315; Ekspertvurdering. Eye Dam. 1; H318; Ekspertvurdering. Aquatic Chronic 3; H412
--	--

Stoffets/blandingens farlige egenskaper	HELSE: Irriterer huden. Gir alvorlig øyeskade.
	FYSISKE FARER: Ikke klassifisert.
	MILJØ: Skadelig, med langtidsvirkning, for liv i vann.

2.2. Merkingselementer

Farepiktogrammer (CLP)



Sammensetning på merkeetiketten	Kalsiumoksid 5 -10 %
Varselord	Fare
Faresetninger	H315 Irriterer huden. H318 Gir alvorlig øyeskade. H412 Skadelig, med langtidsvirkning, for liv i vann.
Sikkerhetssetninger	P280 Benytt vernehansker / verneklær / vernebriller / ansiktsskjerm. P264 Vask hendene grundig etter bruk. P302+P352 VED HUDKONTAKT: Vask med mye såpe og vann. P305+P351+P338 VED KONTAKT MED ØYNENE: Skyll forsiktig med vann i flere minutter. Fjern eventuelle kontaktlinser dersom dette enkelt lar seg gjøre. Fortsett skyllingen. P310 Kontakt umiddelbart et GIFTINFORMASJONSSENTER eller lege. P273 Unngå utslipp til miljøet.

2.3. Andre farer

PBT / vPvB	Blandingen består i hovedsak av uorganiske stoffer. PBT og vPvB er ikke relevant for uorganiske stoffer.
------------	--

AVSNITT 3: SAMMENSETNING/OPPLYSNINGER OM BESTANDDELER

3.2. Stoffblandinger

Komponentnavn	Identifikasjon	Klassifisering	Innhold
Aluminiumsilikat	CAS-nr.: 12141-46-7 EC-nr.: 235-253-8		10 -20 %
Silisiumdioksid, amorf	CAS-nr.: 7631-86-9 EC-nr.: 231-545-4		10 -20 %
Kalsiumoksid	CAS-nr.: 1305-78-8 EC-nr.: 215-138-9	Skin Irrit. 2; H315; Eye Dam. 1; H318; STOT SE 3; H335;	5 -10 %
Kalsiumklorid	CAS-nr.: 10043-52-4 EC-nr.: 233-140-8	Eye Irrit. 2; H319;	1 -5 %
Sinkklorid	CAS-nr.: 7646-85-7 EC-nr.: 231-592-0	Acute Tox. 4; H302; Skin Corr. 1B; H314; Aquatic Acute 1; H400; Aquatic Chronic 1; H410;	~ 0,4 %
Blyoksid	CAS-nr.: 1317-36-8	Acute Tox. 4; H302	< 0,29 %

	EC-nr.: 215-267-0	Acute Tox. 4; H332 Carc. 2; H351 Repr. 1A; H360 Lact; H362 STOT RE 1; H372 Aquatic Acute 1; H400; M-faktor 10 Aquatic Chronic 1; H410; M-faktor 1	
Blydioksid	CAS-nr.: 1309-60-0 EC-nr.: 215-174-5	Acute Tox. 4; H302; Acute Tox. 4; H332; Repr. 1A; H360Df; STOT RE 2; H373; Aquatic Chronic 1; H410; M-faktor M=1; Ox. Sol. 3; H272;	< 0,29 %
Kobberoksid og Dikobberoksid	CAS-nr.: 1317-39-1 EC-nr.: 215-270-7	Acute Tox. 4; H302; Eye Dam. 1; H318; Aquatic Acute 1; H400; M-faktor M=100; Aquatic Chronic 1; H410; M-faktor M=1; Acute Tox. 4; H332;	< 0,23 %
Sinkoksid	CAS-nr.: 1314-13-2 EC-nr.: 215-222-5	Aquatic Acute 1; H400; Aquatic Chronic 1; H410;	~ 0,2 %
Diantimontrioksid	CAS-nr.: 1309-64-4 EC-nr.: 215-175-0	Carc. 2; H351;	< 0,2 %
Bariummonoksid	CAS-nr.: 1304-28-5 EC-nr.: 215-127-9	Acute Tox. 4; H302; Acute Tox. 4; H332;	< 0,1 %
Tinn(IV) oksid	CAS-nr.: 1332-29-2 EC-nr.: 215-569-2		< 0,1 %
Krom(III) oksid	CAS-nr.: 1308-38-9 EC-nr.: 215-160-9		< 0,1 %
Krom(VI) oksid		Ox. Sol. 1; H271; Acute Tox. 3; H301; Acute Tox. 3; H311; Skin Corr. 1A; H314; Skin Sens. 1; H317; Resp. Sens. 1; H334; Muta. 1B; H340; Carc. 1A; H350; STOT RE 1; H372; Aquatic Acute 1; H400; Aquatic Chronic 1; H410; Repr. 2; H361f;	< 0,1 %
Koboltoksid	CAS-nr.: 1307-96-6 EC-nr.: 215-154-6	Acute Tox. 4; H302; Skin Sens. 1; H317; Aquatic Acute 1; H400; M-faktor M=10; Aquatic Chronic 1; H410; M-faktor M=10;	< 0,05 %
Disølvoksid	CAS-nr.: 20667-12-3 EC-nr.: 243-957-1	Ox. Sol. 2; H271 Eye Dam. 1; H318 Aquatic Acute 1; H400	< 0,02 %

Kvikksølv(II) oksid	CAS-nr.: 21908-53-2 EC-nr.: 244-654-7	Aquatic Chronic 1; H410 Acute Tox. 1; H310; Acute Tox. 2; H300; Acute Tox. 2; H330; STOT RE 2; H373; Aquatic Acute 1; H400; Aquatic Chronic 1; H410;	< 0,01 %
Beskrivelse av blandingen	Avfallsblanding med flere typer sporstoffer. Enkeltforbindelser med tiltaks- og grenseverdi er oppgitt i seksjon 8.		
Begrunnelse for å oppgi komponenten i SDS	Bariummonoksid, Krom(III) oksid, Tinn(IV) oksid, Sølvoksid og Kvikksølv(II) oksid: Stoffer for hvilke det er fastsatt unionsgrenseverdier for eksponering på arbeidsplassen, Disse har anmerking E i avsnitt 8.		
Bemerkning, komponent	Blyoksid og Blydioksid foreligger som en blanding på tilsammen 0,29 % Krom(III)oksid og Krom(VI)oksid foreligger i blanding på tilsammen < 0,1%		
Komponentkommentarer	For fullstendig tekst til inngående komponenters H-setninger, se avsnitt 16.		

AVSNITT 4: FØRSTEHJELPSTILTAK

4.1. Beskrivelse av førstehjelpstiltak

Generelt	Rask skylning med vann er avgjørende for omfanget av skaden. Dersom det er nødvendig med legehjelp, ha produktets beholder eller etikett for hånden. I tvilstilfeller eller dersom ubehag vedvarer, kontakt lege.
Innånding	Flytt personen til frisk luft og sørg for at vedkommende hviler i en stilling som letter åndedrettet. Dersom pasienten er bevisst, be vedkommende skylle nese, munn og svelg med vann. Kontakt lege snarest ved pustevansker, vedvarende hoste eller andre symptomer.
Hudkontakt	Fjern snarest tilsølte klær og skyl eller dusj huden grundig med vann i minst 15 minutter. Kontakt lege snarest dersom irritasjon eller annet ubehag oppstår.
Øyekontakt	Skyll straks med vann. Fjern eventuelle kontaktlinser dersom dette enkelt lar seg gjøre. Fortsett skylningen. Skyll i minst 15-30 minutter mens øvre og nedre øyelokk løftes av og til. Det er viktig at skylning ikke avbrytes for tidlig. Kontakt lege og fortsett skylning ved transport til lege/sykehus.
Svelging	Ikke fremkall brekning. Dersom vedkommende er ved bevissthet, be vedkommende skylle munnen med vann. Gi litt vann eller melk å drikke. Kontakt lege ved ubehag.

4.2. De viktigste symptomene og virkningene, både akutte og forsinkede

Akutte symptomer og virkninger	<p>INNÅNDING: Støv kan irritere luftveier og lunger og gi irritasjon, hoste og pustevansker. Sårhet i øvre luftveier og lunger.</p> <p>HUDKONTAKT: Kontakt med hud kan gi sterk irritasjon, smerte, sårhet.</p> <p>ØYNE: Støv kan gi sterk irritasjon og intens smerte. Fare for alvorlig øyeskade.</p>
--------------------------------	---

SVELGING: Kan gi sårhet og smerter i munn og svelg, magesmerter, kvalme og ubehag.

4.3. Angivelse av om umiddelbar legehjelp og spesialbehandling er nødvendig

Medisinsk behandling Symptomatisk behandling. Symptomer kan være forsinket. Giftinformasjonen kan gi råd om behandling ved forgiftning.

AVSNITT 5: BRANNSLOKKINGSTILTAK

5.1. Slokkingsmidler

Egnede slokkingsmidler Blandingen er ikke klassifisert som brannfarlig. Brannslukningsmiddel kan velges i henhold til omgivende brann.

Uegnede slokkingsmidler Benytt ikke vann i konsentrert stråle da det kan splitte og spre ilden.

5.2. Særlige farer knyttet til stoffet eller stoffblandingen

Brann- og eksplosjonsfarer Blandingen er ikke klassifisert som brannfarlig.

Farlige forbrenningsprodukter Røyk og oksider av metall. Røyk som dannes ved brann eller sterk oppvarming må ikke innåndes.

5.3. Råd til brannmannskaper

Personlig verneutstyr Brannpersonell som utsettes for forbrenningsgasser/spaltningsprodukter, skal ha lufttilført åndedrettsvern. Benytt brannbestandige / flammehemmende klær.

Annen informasjon Flammeutsatte beholdere kan flyttes, hvis mulig uten risiko, og kjøles med vann. Brannrester og kontaminert slukkevann må avhendes i hht lokalt regelverk.

AVSNITT 6: TILTAK VED UTILSIKTET UTSLIPP

6.1. Personlige forsiktighetsregler, personlig verneutstyr og nødrutiner

Generelle tiltak Uvedkommende må holdes på trygg avstand fra tilsølt område. Sørg for tilstrekkelig ventilasjon. Unngå innånding av støv samt kontakt med hud og øyne. Bruk personlig verneutstyr, se anbefalinger i avsnitt 8.

6.2. Forsiktighetsregler med hensyn til miljø

Sikkerhetstiltak for å beskytte ytre miljø Må ikke slippes ut i kloakk eller vassdrag. Behandles forsvarlig. Relevante myndigheter må informeres dersom produktet når vann eller avløpssystemer.

6.3. Metoder og materialer for oppsamling og rensing

Opprydding Spill samles forsiktig sammen. Unngå støvutvikling ved oppsamling. Ha i egnede beholdere som merkes med innhold. Avhendes som angitt i avsnitt 13.

6.4. Henvisning til andre avsnitt

Andre anvisninger Personlig verneutstyr: Se avsnitt 8.
Avfallsbehandling: Se avsnitt 13.

AVSNITT 7: HÅNDTERING OG LAGRING

7.1. Forsiktighetsregler for sikker håndtering

Håndtering	Sørg for tilstrekkelig ventilasjon. Unngå innånding av støv samt hud og øyekontakt. Arbeidsoperasjoner må tilrettelegges slik at støvdannelse unngås. Benytt personlig verneutstyr, se anbefalinger i avsnitt 8. Forskrift om utførelse av arbeid, kapittel 3, gir nærmere retningslinjer som må følges ved arbeid med kjemikalier
------------	---

Beskyttelsestiltak

Råd om generell yrkeshygiene	Vask huden etter endt arbeid med stoffblandingen, og før spisepauser, røykepauser og toalettbesøk. Det må ikke spises, drikkes eller røykes i områder der dette materialet håndteres, oppbevares og bearbeides. Ta av forurensede klær og verneutstyr og vask huden før du går inn i fellesområder. Verneutstyr og arbeidstøy må oppbevares separat fra annet utstyr. Sørg for gode hygieniske rutiner.
------------------------------	--

7.2. Vilkår for sikker lagring, herunder eventuelle uforenligheter

Oppbevaring	Må oppbevares adskilt fra næringsmidler, tobakk samt dyrefor. Bør oppbevares adskilt fra sterke syrer og sterke oksidasjonsmidler.
-------------	---

7.3. Særlig(e) sluttanvendelse(r)

Anbefalinger	Se avsnitt 1.2
--------------	----------------

AVSNITT 8: EKSPONERINGSKONTROLL / PERSONLIG VERNEUTSTYR

8.1. Kontrollparametere

Komponentnavn	Identifikasjon	Verdi	Norm år
Silisiumdioksid, amorf	CAS-nr.: 7631-86-9	8 t. normverdi: 1,5 mg/m ³ Kommentarer: Respirabelt støv.	
Kalsiumoksid	CAS-nr.: 1305-78-8	8 t. normverdi: 2 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavbeskrivelse: T	
Sinkklorid	CAS-nr.: 7646-85-7	Grense korttidsverdi Verdi: 1 mg/m ³	
Blyoksid	CAS-nr.: 1317-36-8	8 t. normverdi: 0,05 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavkoder: GR Kommentarer: Bly og uorganiske blyforbindelser, beregnet som Pb (støv og røyk)	
Blydioksid	CAS-nr.: 1309-60-0	8 t. normverdi: 0,05 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavkoder: GR	

		Kommentarer: Bly og uorganiske blyforbindelser, beregnet som Pb (støv og røyk)
Kobberoksid og Dikobberoksid	CAS-nr.: 1317-39-1	8 t. normverdi: 1 mg/m ³ Kommentarer: Støv 8 t. normverdi: 0,1 mg/m ³ Kommentarer: Røyk
Jernoksid	CAS-nr.: 1332-37-2	8 t. normverdi: 3 mg/m ³ Kommentarer: Beregnet som Fe
Titandioksid	CAS-nr.: 13463-67-7	8 t. normverdi: 5 mg/m ³
Sinkoksid	CAS-nr.: 1314-13-2	8 t. normverdi: 5 mg/m ³
Vanadiumpentoksid	CAS-nr.: 1314-62-1	8 t. normverdi: 0,2 mg/m ³ Kommentarer: Støv
Diantimontriksid	CAS-nr.: 1309-64-4	Grense korttidsverdi Verdi: 0,5 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavkoder: K Kommentarer: Antimon og antimonforb. (beregnet som Sb)
Mangandioksid	CAS-nr.: 1313-13-9	8 t. normverdi: 1 mg/m ³ Kommentarer: Inhalerbar fraksjon 8 t. normverdi: 0,1 mg/m ³ Kommentarer: Respirabel
Bariummonoksid	CAS-nr.: 1304-28-5	8 t. normverdi: 0,5 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavkoder: E Kommentarer: Barium og bariumforb. (unntatt bariumsulfat) (beregnet som Ba)
Tinn(IV) oksid	CAS-nr.: 1332-29-2	8 t. normverdi: 2 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavkoder: E Kommentarer: Tinnforbindelser, uorganiske (beregnet som Sn)
Krom(III) oksid	CAS-nr.: 1308-38-9	Grense korttidsverdi Verdi: 0,5 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavkoder: E Kommentarer: Krom og Cr ²⁺ - og Cr ³⁺ - forb. (beregnet som Cr)
Krom(VI) oksid		8 t. normverdi: 0,005 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavbeskrivelse: AK Kommentarer: Kromsyre og Kromater (beregnet som Cr(VI))

Koboltoksid	CAS-nr.: 1307-96-6	8 t. normverdi: 0,02 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavkoder: AKR Kommentarer: Kobolt, Co(II) -forb. (røyk) og uorg. (beregnet som Co)
Disølvoksid	CAS-nr.: 20667-12-3	8 t. normverdi: 0,1 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavkoder: E Kommentarer: Sølv, metallstøv og røyk
Kvikksølv(II) oksid	CAS-nr.: 21908-53-2	8 t. normverdi: 0,2 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavkoder: AE Kommentarer: Kvikksølv og kvikksølvforb. (unntatt alkylforbindelser) (beregnet som Hg)
Diarsentrioksid	CAS-nr.: 1327-53-3	8 t. normverdi: 0,01 mg/m ³ Grenseverdier, bokstav Bokstavkoder: K Kommentarer: Arsen og uorg. arsenforb. (unntatt arsenhydrid) (beregnet som As)
Annen informasjon om grenseverdier	A: Kjemikalier som skal betraktes som at de fremkaller allergi eller annen overfølsomhet i øynene eller luftveier, eller som skal betraktes som at de fremkaller allergi ved hudkontakt. E: EU har en veiledende grenseverdi for stoffet. G: EU har fastsatt en bindende grenseverdi for stoffet. K: Kjemikalier som skal betraktes som kreftfremkallende. R: Kjemikalier som skal betraktes som reproduksjonstoksiske.	
Biologisk grenseverdi	Kvikksølv: Biologisk grenseverdi for urin: 30 µg Hg/g kreatinin Biologisk grenseverdi for bly er 0,5 µmol/l per liter blod for kvinner i fertil alder og 1,5 µmol/l per liter blod for øvrige arbeidstakere	

8.2. Eksponeringskontroll

Forholdsregler for å hindre eksponering

Instruksjon om tiltak for å hindre eksponering	Sørg for tilstrekkelig ventilasjon. Forsøk å holde støvdannelsen ved arbeidsoperasjoner til et minimum. Nøddusj og øyespylingsutstyr må finnes nær arbeidsplassen. Alt personlig verneutstyr skal være CE-merket og testet i henhold til relevant CEN-standard. Det oppgitte verneutstyr er veiledende. Risikovurderingen (Faktisk risiko) kan føre til andre krav.
--	---

Øye- / ansiktsvern

Egnet øyebeskyttelse	Benytt tettsittende vernebriller eller hel ansiktsskjerm. Referanse til relevant standard kan være blant annet: NS-EN 166 Øyevem - Spesifikasjoner
----------------------	---

Håndvern

Egnede hansker

Benytt vernehansker av for eksempel nitrilgummi.
Tykkelse: > 0,4 mm
Gjennomtrengningstid: Anslått: 1-4 timer.

Anbefaling til hanskemateriale er gjort utfra informasjon i sikkerhetsdatablader fra leverandører av hovedkomponenter i blandingen samt informasjon i kjente hanskeguider. Gjennomtrengningstid er ikke målt spesifikt for blandingen, kun anslått basert på tilgjengelig informasjon.

Gjennomtrengningstiden kan variere med hanskens tykkelse, eksponering og type arbeidsoperasjon. Sørg for at hansken er hel uten huller eller rifter. Bytt hansker ofte!

Kontakt evt. hanskeleverandør for hjelp til riktig valg av hansker. Referanse til relevante standarder kan være blant annet:

NS-EN 374:2003 Vernehansker mot kjemikalier og mikroorganismer.

Hudvern

Egnede verneklær

Benytt hel støvdress eller annet egnet vernetøy ved fare for hudkontakt.
Referanse til relevante standarder kan være: NS-EN ISO 13982-1: 2004 og NS-EN ISO 13982-2: 2004:
Vernetøy mot kjemikalier i fast partikkelform del 1 og 2.

Åndedrettsvern

Anbefalt utstyrstype

Ved fare for innånding av støv, benytt maske med filter P3.
Ved fare for høye konsentrasjoner, bør det vurderes om friskluftsforsynt åndedrettsvern bør benyttes.

Referanser til relevante standarder kan være blant annet:

NS-EN 143:2000 + A1:2006: Åndedrettsvern - Partikkelfiltre- Krav, prøving og merking.

EN139:1994 Trykkluftbaserte hel- og halvmasker

Hygiene / miljø

Spesifikke hygienetiltak

Vask huden etter endt arbeid med blandingen og før spisepauser, røykepauser og toalettbesøk.
Tilsølte klær skiftes straks og vaskes før gjenbruk.

Passende miljømessig eksponeringskontroll

Begrensning av miljøeksponering

Unnå utslipp i kloakk og vassdrag.

AVSNITT 9: FYSISKE OG KJEMISKE EGENSKAPER

9.1. Opplysninger om grunnleggende fysiske og kjemiske egenskaper

Tilstandsform

Fast form- Pulver eller støv

Farge

Grå

Lukt

Ingen informasjon tilgjengelig.

pH

Verdi: > 12

	Kommentarer: Vannløsning
Smeltepunkt / smeltepunktintervall	Kommentarer: Ingen informasjon tilgjengelig.
Frysepunkt	Kommentarer: Ingen informasjon tilgjengelig.
Kokepunkt / kokepunktintervall	Kommentarer: Ingen informasjon tilgjengelig.
Flammepunkt	Kommentarer: Ikke relevant.
Eksplosjonsgrense	Kommentarer: Ingen informasjon tilgjengelig.
Tetthet	Kommentarer: Ingen informasjon tilgjengelig.
Løslighet	Medium: Vann Kommentarer: Noe løselig i vann.
Fordelingskoeffisient: n-oktanol/ vann	Kommentarer: Ingen informasjon tilgjengelig.

9.2. Andre opplysninger

Fysikalske farer

Stoffer som i kontakt med vann avgir brennbare gasser

Kommentarer: Det utvikles noe brennbare gasser fra blandingen i kontakt med vann, men mengden er under grensen for klassifisering.

Andre fysiske og kjemiske egenskaper

Fysiske og kjemiske egenskaper

Ytterligere opplysninger er ikke kjent.

AVSNITT 10: STABILITET OG REAKTIVITET

10.1. Reaktivitet

Reaktivitet

Det finnes ingen bestemte testdata på reaktivitet tilgjengelig for denne blandingen.

10.2. Kjemisk stabilitet

Stabilitet

Stabil ved normal håndtering.

10.3. Mulighet for farlige reaksjoner

Risiko for farlige reaksjoner

Farlige polymeriseringsreaksjoner vil ikke forekomme.

10.4. Forhold som skal unngås

Forhold som skal unngås

Unngå sterk oppvarming og materialer som angitt i avsnitt 10.5.

10.5. Uforenlige materialer

Materialer som skal unngås

Unngå kontakt med sterke syrer og oksidasjonsmidler.

10.6. Farlige nedbrytningsprodukter

Farlige spaltningsprodukter

Ved brann kan det dannes røyk og metalloksider.

AVSNITT 11: TOKSIKOLOGISKE OPPLYSNINGER

11.1. Opplysninger om toksikologiske virkninger

Øvrige helsefareopplysninger

Vurdering av akutt toksisitet, klassifisering	Klassifiseringsdata for alle komponenter er ikke tilgjengelig. Basert på tilgjengelig informasjon om komponenter, er ikke klassifiseringskriterier oppfylt for klassifisering av blandingen.
Vurdering hudetsende / hudirriterende, klassifisering	Irriterer huden. Basert på erfaring fra lignende stoffblandinger vurderes blandingen til ikke å være etsende selv om pH i vandig løsning er > 11,5.
Vurdering øyeskade / øyeirritasjon, klassifisering	Gir alvorlig øyeskade. Basert på erfaring fra lignende stoffblandinger vurderes blandingen til ikke å være etsende selv om pH i vandig løsning er > 11,5.
Innånding	Støv kan irritere luftveier og lunger og gi irritasjon, hoste og pustevansker. Sårhet i øvre luftveier.
Hudkontakt	Kan gi sterk irritasjon, rødhet, sårhet og etsekader ved langvarig kontakt med fuktig hud.
Øyekontakt	Støv kan gi sterk irritasjon og intens smerte. Symptomer kan være smerte, tåreflod, fremmedlegemefølelse, konjunktivalt ødem, korneasår, blakking av kornea, redusert skarpsyn. Pasienten kan ha lite symptomer kort tid etter eksponeringen på tross av alvorlig skade.
Svelging	Kan gi sårhet og smerter i munn og svelg, magesmerter, kvalme og ubehag.
Allergi	Basert på tilgjengelig informasjon anses ikke klassifiseringskriterier for å være oppfylt.
Arvestoffskader	Basert på tilgjengelig informasjon anses ikke klassifiseringskriterier for å være oppfylt.
Vurdering av arvestoffskadelig virkning på kjønnseller, klassifisering	Basert på tilgjengelig informasjon anses ikke klassifiseringskriterier for å være oppfylt.
Vurdering kreftfremkallende egenskaper, klassifisering	Basert på tilgjengelig informasjon anses ikke klassifiseringskriterier for å være oppfylt.
Vurdering av reproduksjonstoksicitet, klassifisering	Basert på tilgjengelig informasjon anses ikke klassifiseringskriterier for å være oppfylt.
Vurdering av bestemt målorgan SE, klassifisering	Basert på tilgjengelig informasjon anses ikke klassifiseringskriterier for å være oppfylt.
Vurdering av bestemt målorgan RE, klassifisering	Basert på tilgjengelig informasjon anses ikke klassifiseringskriterier for å være oppfylt.

AVSNITT 12: ØKOLOGISKE OPPLYSNINGER

12.1. Giftighet

Akutt akvatisk fisk	Verdi: 21,6 g/l Effektdose konsentrasjon: EC50 Eksponeringstid: 96 t Art: Sebrafisk
---------------------	--

Akutt akvatisk alge	<p>Kommentarer: Test utført på utlekkingsvann (I /S 10)</p> <p>Verdi: 0,664 g/l</p> <p>Effektdose konsentrasjon: IC50</p> <p>Eksponeeringstid: 72 t</p> <p>Art: Raphidocelis subcapitata</p> <p>Kommentarer: Test utført på utlekkingsvann (L/S 10).</p>
Akutt akvatisk Daphnia	<p>Verdi: 8,2 g/l</p> <p>Eksponeeringstid: 48 t</p> <p>Art: D. magna</p> <p>Kommentarer: Test utført på utlekkingsvann (L/S 10).</p>
Økotoksisitet	Skadelig, med langtidsvirkning, for liv i vann.

12.2. Persistens og nedbrytbarhet

Persistens- og nedbrytbarhetsbeskrivelse	Blandingen består i hovedsak av uorganiske forbindelser og brytes ikke ned. Bionedbrytning er ikke relevant for uorganiske forbindelser.
--	--

12.3. Bioakkumuleringsevne

Bioakkumuleringspotensial	Testdata for blandingen eller komponenter er ikke tilgjengelig.
---------------------------	---

12.4. Mobilitet i jord

Mobilitet	Ingen testdata tilgjengelig. Stoffet løses noe i vann.
-----------	--

12.5. Resultater av PBT- og vPvB-vurdering

PBT vurderingsresultat	Ikke relevant.
vPvB vurderingsresultat	Ikke relevant.

12.6. Andre skadevirkninger

Andre skadevirkninger / annen informasjon	Skadelig, med langtidsvirkning, for liv i vann. Unngå utslipp.
---	--

AVSNITT 13: SLUTTBEHANDLING

13.1. Avfallsbehandlingsmetoder

Egnede metoder til fjerning av kjemikaliet	Allt avfall skal behandles forsvarlig og leveres godkjent mottak for farlig avfall.
Avfallskode EAL	Avfallskode EAL: 190113 flyveaske som inneholder farlige stoffer Klassifisert som farlig avfall: Ja
Nasjonale forskrifter	FOR 2004-06-01 nr 930: Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall (avfallsforskriften) med senere endringer.
Annen informasjon	Riktig avfallsbehandling og koder må bestemmes av sluttbruker basert på den faktiske bruken av produktet.

AVSNITT 14: TRANSPORTOPPLYSNINGER

Farlig gods	Nei
-------------	-----

14.1. FN-nummer

Kommentarer	Ikke relevant.
-------------	----------------

14.2. FN-forsendelsesnavn

Kommentarer	Ikke relevant.
-------------	----------------

14.3. Transportfareklasse(r)

Kommentarer	Ikke relevant.
-------------	----------------

14.4. Emballasjegruppe

Kommentarer	Ikke relevant.
-------------	----------------

14.5. Miljøfarer

Kommentarer	Ikke relevant.
-------------	----------------

14.6. Særlige forsiktighetsregler ved bruk

Spesielle forholdsregler	Ikke relevant.
--------------------------	----------------

14.7. Bulktransport i henhold til vedlegg II i MARPOL 73/78 og IBC-regelverket

Forurensningskategori	Ikke relevant.
-----------------------	----------------

Andre relevante opplysninger

Andre relevante opplysninger	Ikke klassifisert som farlig gods i henhold til ADR, RID, IMDG eller IATA.
------------------------------	--

AVSNITT 15: OPPLYSNINGER OM REGELVERK**15.1. Særlige bestemmelser/særskilt lovgivning om sikkerhet, helse og miljø for stoffet eller stoffblandingen**

Referanser (Lover/Forskrifter)	<p>FOR 1272/2008 (CLP/GHS): Forskrift om klassifisering, merking og emballering av farlige kjemikalier.</p> <p>FOR 2008-05-30 nr 516: Forskrift om registrering, vurdering, godkjenning og begrensning av kjemikalier (REACH).</p> <p>FOR-2015-05-19-541: Forskrift om deklarerer av kjemikalier til produktregisteret (deklareringsforskriften)</p> <p>Forordning (EU) 2015/830.</p> <p>FOR 2009-04-01 nr 384: Forskrift om landtransport av farlig gods (landtransportforskriften). ADR/RID</p> <p>FOR 2006-06-29 nr 786: Forskrift om frakt av farlig last på lasteskip og lektere. IMDG.</p> <p>FOR 2003-01-11 nr 41: Forskrift om transport av gods i luftfartøy (BSL D 1-7). IATA.</p> <p>FOR 2011-12-06-1357: Forskrift om utførelse av arbeid med senere endringer.</p> <p>2011-12-06-1358: Forskrift om tiltaks og grenseverdier med senere endringer.</p>
--------------------------------	---

	Klassifiserings- og merkningsfortegnelsen: http://echa.europa.eu/web/guest/information-on-chemicals/cl-inventory-database Mellstrøm m. fl: Hanskeguiden. Granberg: www.granberg.no
Ikke deklareringspliktig pga.	Avfall.

15.2. Vurdering av kjemikaliesikkerhet

Vurdering av kjemikaliesikkerhet er gjennomført	Nei
---	-----

AVSNITT 16: ANDRE OPPLYSNINGER

Liste over relevante H-setninger (i avsnitt 2 og 3).	H271 Kan forårsake brann eller eksplosjon; sterkt oksiderende. H272 Kan forsterke brann; oksiderende. H300 Dødelig ved svelging. H301 Giftig ved svelging. H302 Farlig ved svelging. H310 Dødelig ved hudkontakt. H311 Giftig ved hudkontakt. H314 Gir alvorlige etseskader på hud og øyne. H315 Irriterer huden. H317 Kan utløse en allergisk hudreaksjon. H318 Gir alvorlig øyeskade. H319 Gir alvorlig øyeirritasjon. H330 Dødelig ved innånding. H332 Farlig ved innånding. H334 Kan gi allergi- eller astmasymptomer eller pustevansker ved innånding. H335 Kan forårsake irritasjon av luftveiene. H340 Kan gi genetiske skader H341 Mistenkes å kunne gi genetiske skader H350 Kan forårsake kreft H351 Mistenkes for å kunne forårsake kreft H360Df Kan gi fosterskader. Mistenkes for å kunne skade forplantningsevnen. H360 Kan skade forplantningsevnen eller gi fosterskader H361d Mistenkes for å kunne gi fosterskader. H361f Mistenkes for å kunne skade forplantningsevnen. H362 Kan skade barn som ammes. H372 Forårsaker organskader ved langvarig eller gjentatt eksponering H373 Kan forårsake organskader ved langvarig eller gjentatt eksponering H400 Meget giftig for liv i vann. H410 Meget giftig, med langtidsvirkning, for liv i vann. H411 Giftig, med langtidsvirkning, for liv i vann. H412 Skadelig, med langtidsvirkning, for liv i vann.
Klassifisering i henhold til CLP (EC) No 1272/2008 [CLP / GHS]	Skin Irrit. 2; H315; Ekspertvurdering. Eye Dam. 1; H318; Ekspertvurdering. Aquatic Chronic 3; H412
Opplysninger som er nye, slettet eller revidert	Nytt sikkerhetsdatablad: Ansvarlig: a111594.
Kvalitetssikring av informasjonen	Sikkerhetsdatabladet er utarbeidet i henhold til gjeldende regelverk. Bilfinger Industrial Services Norway AS har ikke ansvar for feil eller mangler i opplysninger

	fra produsent / importør /distributør. Produsent/leverandør oppgitt i seksjon 1 er juridisk ansvarlig for sikkerhetsdatabladets innhold.
Versjon	2
Utarbeidet av	Bilfinger Industrial Services Norway AS.

Vedlegg C: Populærvitenskapelig artikkel

Våren
2021

Flyveaske – jakten på de tapte ressursene

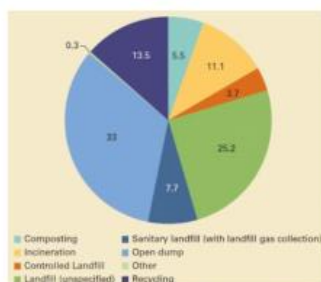
NTNU

Institutt for materialteknologi, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim

Trym Woldstad, Vegard Bjerve og Jonas Melhus

Fuller deponier

Dagens samfunn karakteriseres som et forbruker-samfunn. Bruk og kast er normen. Det gir økte mengder avfall som skal håndteres. Med mengden avfall kommer også økte mengde farlig avfall. Med strenge restriksjoner med tanke på utslipp og sjansen for negative miljøpåvirkninger, kreves det godkjenning for håndtering av farlig avfall (Avfall Norge, 2019). NOAH AS på Langøya er et av to godkjente deponier i Norge for håndtering av farlig avfall. Dette er et gammelt kalksteinsbrudd som brukes til deponi av stabilisert farlig avfall. Per år mottar NOAH AS ca. 400-500 tusen tonn farlig avfall (NOAH AS, 2019). Dette må stabiliseres, og deponeres. Deponivolumet er stort, og kapasiteten blir mindre og mindre. Det gir økt behov for nye behandlingsmetoder for farlig avfall.



Figur 1 Global behandling og avhending av avfall (The World Bank, 2006)

Økt mengde avfall og farlig avfall vil i tillegg føre til at mer og mer ressurser, i form av metaller og andre verdifulle komponenter, går tapt. Dette grunnet bruk av deponier der avfall stabiliseres, men ikke gjenbrukes. Det gir behov for mer primær-produksjon, spesielt av metaller, og dette er energikrevende. Resirkulering av komponentene i farlig avfall er derfor svært ønskelig!



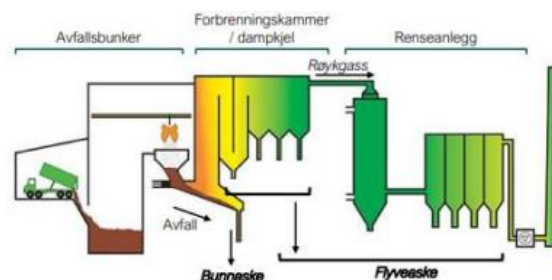
Figur 2 Langøya, Holmestrand. NOAH AS sitt deponi for farlig avfall (Hartman, 2018).

Hva er flyveaske?

Blant farlig avfall finner man flyveaske. Flyveaske er et biprodukt fra avfallsforbrenning. Det kategoriseres som farlig avfall grunnet høy pH, innhold av organiske komponenter, samt metaller og tungmetaller. Totalt utgjør tungmetallene 1-3% av den totale mengden (Avfall Norge, 2019). Ved dagens teknologier går metallene tapt ved at asken stabiliseres og brukes til landfyll. Med økte mengder avfall vil de totale mengdene metall som går tapt være store.

To ulike typer

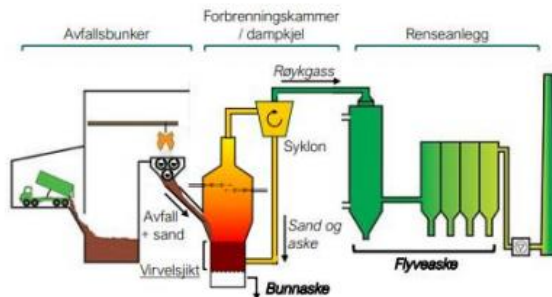
Flyveaske blir kategorisert ut ifra forbrenningsprosessen det dannes fra. To av de vanligste metodene er forbrenning på ristovn og virvelsjikt. Forbrenning på ristovn er en gammel metode. Avfall føres inn i forbrenningskammer på en rist med helning ved temperaturer rundt 1000°C. Flyktige komponenter og komponenter med lavere smelte- og kokepunkt enn 1000°C vil følge røkgassen. Resten av det brente avfallet vil forbrennes fullstendig og til slutt utgjøre bunnasken (Leckner & Lind, 2020). Røkgassen føres inn i et nytt kammer for rensing. Asken som blir skilt ut fra gassen utgjør flyveaske. (Leckner & Lind, 2020)



Figur 3 Forenklet oppsett av ristovnforbrenning.

Virvelsjiktforbrenning er en nyere forbrenningsmetode. Her knuses avfallet før forbrenning. Det gir finere og mer lik partikkelstørrelse for hele avfallet. I selve forbrenningen brukes sykron til separering av partikler. I forbrenningskammeret blåses oksygen inn med høy hastighet og virvler opp sand og aske.

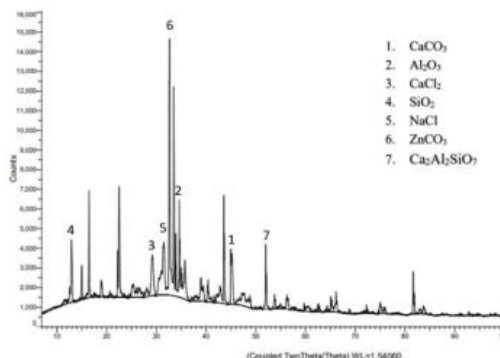
Syklonen separerer ut sand og aske fra røykgassen og sender det tilbake til forbrenningen. Det gir fullstendig forbrenning av avfallet (Su, et al., 2015).



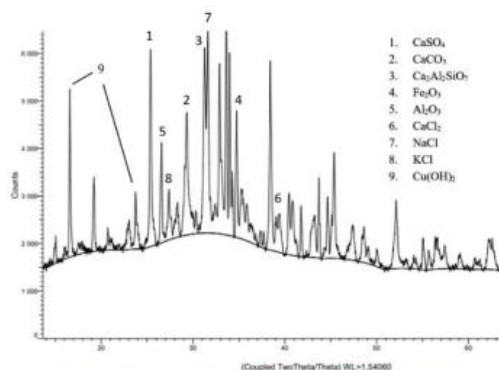
Figur 4 Forenklet oppsett av virvelsjiktforbrenning.

Innhold i flyveaske

Innholdet i flyveaske vil variere ut ifra hva avfallet består av og hvordan det brennes. Virvelsjiktaske vil bestå av større mengder (tung)metaller enn ristovnsaske. Fe, Cu og Al er typiske metaller. Tilsetning av kalk i rensingen av røykgassen gjør at kalsiumforbindelser ofte ender opp i flyveasken. Saltinnholdet i flyveaske utgjør en stor andel av den totale massen, typisk NaCl, CaCl₂ og KCl. Flyveaske består også ofte av silikater og karbonater. Analyse av virvelsjikt- og ristovnaske har gitt følgende hovedfaser i de to ulike asketypene. Analyser ble gjort ved XRD.



Figur 5 XRD-resultater for analyse av ristovnaske.



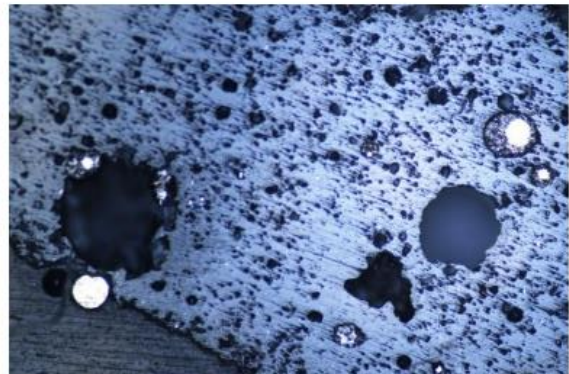
Figur 6 XRD-resultater for analyse av virvelsjiktaske.

Behandling av flyveaske

Et aktivt forskningsområde i dag er håndtering av flyveaske. Metallgjenvinning og saltgjenvinning er to av områdene det fokuseres mest på. ASH2SALT i Sverige fokuserer på gjenvinning av KCl, NaCl og CaCl₂ (Sintef, 2018). Fluwa/Flurec er en kommersielt tilgjengelig prosess som anvendes i Sveits, og fokuserer på Zn-gjenvinning fra flyveaske. Prosessen er ikke økonomisk gunstig, men anvendes i Sveits grunnet lovpålagt Zn-gjenvinning (Sintef, 2018).

Potensiale i flyveaske

Flyveaskens komplekse sammensetning gjør resirkulering vanskelig. Høyt innhold av metaller gjør likevel reduksjon av metaller til en teoretisk mulighet. Ved høye temperaturer og reduserende forhold vil man kunne få rene metallfaser. Den komplekse sammensetningen gjør metallekstraksjon vanskelig, men muligheten er der.



Figur 7 Lysmikroskopbilde med lyse runde partikler som viser Fe som ren fase etter reduksjonsforsøk.

Figur 7 viser en prøve med flyveaske som har blitt varmebehandlet ved 1200 °C i en time. På bilde, som er tatt med lysmikroskop, vises flere lyse sirkler. Dette er rene metallfaser med primært jern. Disse har oppstått som et resultat av at jernet har smeltet og blitt redusert.

I tillegg til høyt innhold av metaller inneholder flyveasken store mengder CaO. Som nevnt tidligere kommer dette av at CaO tilsettes i forbrenningsprosessen. CaO kan reagere med CO₂ for å danne CaCO₃, noe som gjør at flyveasken har mulighet til å fange CO₂ som finnes i lufta!



Figur 8 Bilde av ristovnsasken før (venstre) og etter (høyre) karbonatiseringsforsøk.

Prøveholderen til venstre i Figur 8 ble fylt med flyveaske og innkapslet i en CO₂-rik atmosfære før den ble plassert i ovn ved omtrent 500 °C. Til venstre i bildet vises prøven etter at den trolig har reagert med karbondioksidet i ovnen, og det løse pulveret har blitt til en fast klump!

Veien videre

Resultatene fra forskningen antyder at potensialet for materialgjenvinning er der. Det viser også at flyveaske er kapabel til å fange CO₂. Nå gjenstår det bare å kommersialisere dette. Det kreves enda mye forskning før dette blir realiteten.

For at det skal bli kommersielt må prosessen utkonkurrere andre teknologier. Forholdene i prosessene må optimaliseres: temperatur, trykk og atmosfære. Mulighetene er enorme, og det er mye verdifulle ressurser å hente ut fra flyveaske.



Figur 9 Ressursene i flyveaske er verdifulle (55quotes, 2021)

Referanser

- 55quotes. (2021, 04 30). Hentet fra pinterest: <https://www.pinterest.com.au/pin/688980442970651721/>
- Avfall Norge. (2019). *Vi trenger en nasjonal løsning for flyveaske innen 2024*. Hentet Mai 5, 2021 fra <https://avfallnorge.no/bransjen/nyheter/vi-trenger-en-nasjonal-l%C3%B8sning-for-flyveaske-innen-2024>
- Hartman, C. (2018, 5 25). *Teknisk ukeblad*. Hentet fra <https://www.tu.no/artikler/slik-bor-norge-reducere-mengden-farlig-avfall/436865>
- Leckner, B., & Lind, F. (2020, Mai 15). Combustion of municipal solid waste in fluidized bed on grate - A comparison. *Waste Management*, ss. Vol. 109. S. 94-108. Hentet fra Waste Management.
- NOAH AS. (2019). *Avfall motatt og behandlet på Langøye, 2019*. Hentet fra <https://www.noah.no/wp-content/uploads/2020/10/NOAH-mottak-Lang%C3%B8ya-2019.pdf>
- Sintef. (2018, April 20). *Fly ash treatment technologies*. Hentet fra <https://www.noah.no/wp-content/uploads/2018/06/SINTEF-Report-2018-Fly-ash-treatment-technologies-FINAL.pdf>
- Su, X., Zhang, L., Xiao, Y., Sun, M., Gao, X., & Su, J. (2015, Desember). Evaluation of a flue gas cleaning system of a circulating fluidized bed incineration power plant by the analysis of pollutant emissions. *Powder Technology*, ss. Vol 286. s. 9-15.
- The World Bank. (2006). *What A Waste 2.0*. Hentet fra The World Bank: https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html

Vedlegg D: Risikoanalyser

Risikoanalyser for håndtering av FA, analyse av FA (gjelder før og etter ovnsforsøk), for selve ovnsforsøk og håndtering av produkt etter ovnsforsøk.

Risikoanalyse – Håndtering av FA og analyse: SEM/EDS og XRD

Enhet/Institutt:	Institutt for Materialteknologi	Dato opprettet	07.02.2021
Ansvarlig linjeleder	Eva Rise	Sist revidert	08.02.2021
Ansvarlig for aktiviteten som risikovurderes	Gabriella Tranell		
Deltakere	Jonas Melhus, Trym Woldstad, Vegard Bjerve		

Beskrivelse av den aktuelle aktiviteten:
Risikoanalyse av håndtering av flyveaske og hva slags tiltak brukt ved analysemetodene SEM/EDS og XRD

Aktivitet	Mulig uønsket hendelse	Ekstiterende risiko tiltak	Sannsynlighet (1-5)	Konsekvens (1-5)				Risiko	Forebyggende tiltak	Restrisiko
				Menneske	Øk/mat erial	Ytre miljø	Omdømme			
Håndtering av flyveaske	FA på: Hud Øyne Innånding	Vernebriller Hansker Labfrakk	1	3	1	1	1	3	Åpne beholder i Avtrekksskap	2
Lagring av flyveaske	FA på: Hud Øyne Innånding	Vernebriller Hansker Labfrakk	1	3	1	1	1	3	Oppbevare tørt og merket	2
SEM/EDS analyse	FA på: Hud Øyne Innånding	Visir Hansker Labfrakk	1	3	3	1	1	3	Hansker og visir når prøver prepaperes Se på oppførsel til FA under analyse	2
XRD analyse	FA på: Hud Øyne Innånding	Visir Hansker Labfrakk	1	3	3	1	1	3	Hansker og visir når prøver prepaperes Se på oppførsel til FA under analyse	2

Risikoanalyse – Ovnsforsøk og etterbehandling av FA

Enhet/Institutt:	Institutt for Materialteknologi	Dato opprettet	16.03.2021
Ansvarlig linjeleder	Eva Rise	Sist revidert	16.03.2021
Ansvarlig for aktiviteten som risikovurderes	Gabriella Tranell		
Deltakere	Jonas Melhus, Trym Woldstad, Vegard Bjerve		

Beskrivelse av den aktuelle aktiviteten:
Ovnsforsøk. Jobber med svært små mengder materialer. Oppvarmer flyveaske opp til rundt sintringstemperatur, rundt 1100°C og 1200°C. Etter ovnsforsøk fraktes reaktor til avtrekkskap for åpning og innstøpning.

Aktivitet	Mulig uønsket hendelse	Eksisterende risiko tiltak	Sannsynlighet (1-5)	Konsekvens (1-5)				Risiko	Forebyggende tiltak	Restrisiko
				Menneske	Øk/mat erial	Ytre miljø	Omdø- mme			
Håndtering av flyveaske	FA på: Hud Øyne Innånding	Vernebriller Hansker Labfrakk	1	3	1	1	1	3	Maske	2
Prep av flyveaske	FA på: Hud Øyne Innånding	Vernebriller Hanskeboks Labfrakk	1	1	3	1	1	3	-	3
Ovnsforsøk	Utvikling av gass	Gassensor Lite FA	1	3	3	1	1	3	Overvåke ovn og reaktor	3
Etterbehandling	Produkt av FA på: Hud Øyne Innånding Gass	Åpne reaktor i avtrekkskap Gassensor Briller Hansker	2	3	1	1	1	6	Mask	6
Innstøpning av produkt	Produkt av FA på: Hud Øyne Innånding Gass	Avtrekkskap Gassensor Briller Hansker	2	2	1	1	1	4	Maske	4

