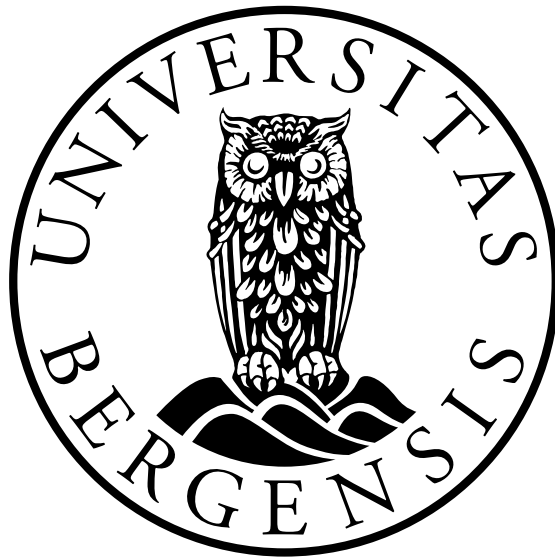


En eksperimentell oppgave på legeringer av silisium og jern

Henrik van Dam



Masteroppgave for ENERGI399
Fakultet for matematikk og naturvitenskap
Universitetet i Bergen

6. juni 2023

Anerkjennelser

Jeg ønsker å takke Universitetet i Bergen, institutt for geofysikk og institutt for fysikk og teknologi for muligheten til å utføre en mastergrad her. Særlig stor takk må rettes til veiledere Bjørn Arntzen og Trygve Skjold, samt Torfinn Buseth fra Elkem som har gitt god informasjon under arbeidet med oppgaven. Muligheten til å diskutere med medstudenter har også vært av stor nytte.

Henrik Dam
Bergen, 06.06.2023

Abstrakt

Silisium og legeringer med silisium er viktige materialer innen forskjellige industrier og brukes blant annet som tilsetningsstoff. I flere typer industri brukes slike legeringer i form av pulver, både for enklere transport og bedre kontroll under tilsetting. Slikt pulver inneholder store mengder energi og i verste fall, kan støvet i pulveret antennes og skape eksplosjoner. For å unngå alvorlige hendelser trengs kunnskap om støvenes eksplosjonsegenskaper. Denne masteroppgaven består av to deler. Den første delen tar for seg fire støv av ulik kjemi og ulike partikkelstørrelsesfordelinger sine eksplosjonsegenskaper og består av eksperimentelle undersøkelser i en modifisert 20 liters Siwek sfære. Målet med denne delen er å finne det maksimale eksplosjonstrykket, den maksimale trykkstigningshastigheten og beregne K_{st} -verdi. For å sammenligne støvene er også partikkelstørrelsesfordeling for hvert støv fra Malvern brukt, dette ble levert sammen med støvprøvene fra Elkem. Den andre delen av oppgaven består av utvikling av forbrenningsmodeller for de individuelle grunnstoffene basert på termodynamikkens første lov og et utkast er laget. Dette utkastet inneholder tre deler, som består av termodynamikkens første lov ved lav konsentrasjon der det er igjen oksygen, konsentrasjoner der oksidet går over i gassfase, der temperaturen er konstant lik det relevante oksidets koketemperatur og høy konsentrasjon, der det er igjen ubrent grunnstoff. Fra sammenligningen mellom støvenes eksplosjonsverdier og partikkelstørrelsesfordeling ble det funnet korrelasjoner mellom maksimal trykkstigningshastighet og det spesifikke overflatearealet [SSA]. For maksimaltrykk ble det funnet god korrelasjon med D10, D[3:2] og D[4:3]. Resultatene og sammenligningene som er gjort i denne oppgaven viser at å ta en analyse på partikkelstørrelsesfordelingen til et støv gir en viss antydning til støvets eksplosivitet, men det er fortsatt viktig å gjøre eksplosjonstester. Grunnen til det er at ingen støvpartikler er like og særlig når det kommer til legeringer, vil også variasjoner i kjemi virke inn.

Innhold

1	Introduksjon	3
1.1	Motivasjon for oppgaven	3
1.2	Bruksområder for silisiums legeringer	4
1.3	Hvorfor trengs slike oppgaver?	4
1.4	Oppgavens mål og oppbygging	4
2	Teori og tidligere arbeid	5
2.1	Definisjoner og konsepter for støvekspløsjoner	5
2.1.1	Eksplisjon, antennelse og forbrenning	5
2.1.2	Faktorer som påvirker støvekspløsjonen	6
2.1.3	Spesifikke egenskaper for metallstøv	7
2.1.4	Egenskaper til metalloksidene	7
2.1.5	Viktige verdier for grunnstoffene og oksidene som kan dannes	8
2.2	Partikkelstørrelseanalyse	9
2.2.1	Eksempler med forskjellige størrelser	9
2.2.2	Representativ prøvetaking	9
2.2.3	Forskjellige gjennomsnitt som blir brukt i partikkelstørrelses- analyse	10
2.3	Den ideelle gassloven	10
2.4	Hvordan brenner de forskjellige grunnstoffene?	11
2.5	Støvekspløsjoner og testing	11
2.5.1	20 liter mot 1 kubikk eksplosjonskammer	12
2.6	Eksplisjonsulykker	13
2.7	Tidligere arbeid	14
2.7.1	Jern og aluminiumstøv	14
2.7.2	Artikkel fra van Gool	15
2.7.3	Magnesiumstøv	15
2.7.4	Silisiumstøv fra masteroppgaven til Østgård(2022)	17
3	Metode	19
3.1	Bruk av 20 liter Siwek-sfære	19
3.1.1	Eksperimentoppsett	19
3.1.2	Kjemiske tennere	21
3.1.3	Kjøling	21
3.2	HMS og risikoer ved stoffene	21
3.2.1	HMS og hygiene	21
3.3	Gjennomføring av eksperimenter	22

3.3.1	Prøvetaking	22
3.4	K_{st} verdier	23
3.5	Test av fuktighet	23
3.6	Partikkelstørrelseanalyse	23
3.7	Analyse av kjemisk sammensetting av de forskjellige støvene	23
3.8	XRD analyse av produktene	23
3.9	Finne støkiometrisk konsentrasjon og konsentrasjon ved ufullstendig forbrenning	24
4	Resultat	27
4.1	Resultat fra 20 liter eksplosjonskammeret	27
4.1.1	FeSi 55	27
4.1.2	FSM finside	29
4.1.3	Patronfilter FSM	30
4.1.4	Syklon patronfilter	32
4.2	Resultat fra Malvern	33
4.3	Resultat fra XRF-analyse	34
4.4	Varmekammertest	35
4.5	Bilder av produktene etter test	36
4.6	Partikkelstørrelsesfordeling fra Malvern	37
5	Diskusjon	41
5.1	Sammenligning av verdier for alle støvene	41
5.2	K_{st} -verdi og P_{max} fra testene	43
5.3	Sammenligning mellom FeSi55 og B100	44
5.4	Topp-og bunnpunkt i grafene	47
5.5	Eksplosjonsverdier mot siktedata fra Malvern	47
5.5.1	D90	47
5.5.2	D50	48
5.5.3	D10	51
5.5.4	D[3:2]	53
5.5.5	D[4:3]	55
5.5.6	Spesifikt overflateareal	56
5.6	Oppsummering og kommentarer	58
5.7	Usikkerhet i metodene	59
5.7.1	Eksperimenter i Siwek sfæren	59
5.7.2	Støvets kjemi	60
5.7.3	Malvern analysen	61
6	Modellering	63
6.1	Nye koke- og smeltepunkt	63
6.2	Forenklinger og antakelser	63
6.3	Kjemi og termodynamikk	64
6.4	Modellering på de individuelle grunnstoffene	64
6.4.1	Shomate ligningen	64
6.5	Entalpiformelen	65
6.6	Massefraksjon oksid i gassfase	66

6.7	Temperaturgrafer	68
6.8	Feilkilder	71
7	Konklusjon	73
7.1	Videre arbeid	74

Nomenklatur

Uttrykk	Forklaring	Enhet
dp/dt	Trykkstigningshastighet	Bar/s
dp/dt_{maks}	Maksimal trykkstigningshastighet	Bar/s
P	Trykk	Bar
P_{maks}	Maksimalt trykk	Bar
K_{st}	dp/dt_{maks} ganget med en volumsfaktor	Bar/s*m
h	Entalpi per mol	J/mol
n	Mol	mol
m	Masse	g
M	Molar masse	g/mol
n_P	Mol av produkter	mol
n_0	Mol av reaktanter	mol
P_0	Initialtrykk	Bar
T	Temperatur	K
T_0	Initialtemperatur	K
T_P	Temperatur etter reaksjon	K
c	Konsentrasjon	g/m^3
V	Volum	m^3
C_{stk}	Støkiometrisk konsentrasjon	g/m^3
R	Den ideele gasskonstantet	$\frac{J}{K \cdot mol}$
t_1	Forbrenningstiden, tiden fra støvskyen antennes til makspunktet for trykk	s
t_2	tiden fra antennelse til trykkstigningstangenten skjærer linjen for 0 Bar	s
t_v	Tenningsforsinkelsestid	s
t_d	Tiden fra testen starter til støvet slippes inn i Siwek-sfæren	s
P_d	Differansen mellom trykket før og etter støvet er sluppet inn i Siwek-sfæren	Bar

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Motivasjon for oppgaven

Legeringer av forskjellige metaller er viktige produkter som blir produsert og brukt over hele verden, og behovet øker. I denne oppgaven blir det sett på legeringer med jern, silisium og magnesium. Et av de viktigste områdene for rent silisium er halvledere i elektronikk og elektronikk er det stor etterspørsel etter. Mens silisium-legeringer som ferrosilisium og ferrosilisiummagnesium, og kjent som FSM, brukes blant annet for å lage andre typer legeringer igjen. Når man produserer silisium og silisiums-legeringer vil man på flere punkt i produksjonen få metallisk støv. Dette støvet kan i verste fall begynne å brenne eller dispergeres og danne en eksplosiv sky, som representerer en stor fare i de typer industrier der materialer blir brutt ned til fint, brennbart støv. Dette støvet representerer farer hovedsakelig i rør der støvet blir transportert med hjelp av luft. En av de største forskjellene på en støvekspløsjon og en gassekspløsjon er at mens gassekspløsjoner er fullstendig forblanda, kaller man støvekspløsjoner for forblanda system med ublanda substrukturer. Disse substrukturene er da støvkornene som består av rent materiale. For å unngå disse farene er det veldig viktig med god informasjon om materialene man jobber med.

Denne typen informasjon er et utgangspunkt for sikkerhetsrutiner og tiltak. Det andre målet med denne oppgaven er å arbeide videre med en modell for metallstøv, presentert av Østgård til bruk for modellering av støvekspløsjoner i programmet FLACS DustEx [1]. Til å være brukbar på legeringer i tillegg til rene grunnstoffer. En slik modell vil være verdifull for risikoanalyse ved metallfabrikker, da det gir en realistisk analyse av forskjellige uhell som kan inntreffe. Når det kommer til legeringer av støv og modellering er det flere viktige spørsmål: hvor mye av støvet er det som faktisk brenner? Hvor fort kan en slik støvekspløsjon forplante seg og hvordan er det forskjellige fra rene stoffer? Dersom det kan dannes flere oksider av metallene, hvilke dannes når? Hvordan brenner de forskjellige grunnstoffene og brenner alle grunnstoffene til forskjellige tidspunkt eller brenner hele støvkornet likt?

Oppbyggingen av et system som kan gi støvekspløsjoner gir flere interessante spørsmål: hvor mye av støvet er det som faktisk brenner? Hvor fort vil en støvekspløsjon forplante seg? Hva har støvets partikkelstørrelse å si for eksplosjonsparameterne? Og for silisium spesifikt: Når får man silisiummonoksid eller silisiumdioksid? Hva er temperaturen på ubrente støvkorn? Hvor stor innvirkning har radioasjon på resultatet? Kan man lage en modell for radioasjon og absorpsjon? Og hvilken innvirkning har andre

materialer på forbrenningen av legeringer?

1.2 Bruksområder for silisiums legeringer

Ferrosilium og FSM legeringer brukes blant annet til å redusere andre metalloksid og deoksidering av stål og andre jernlegeringer for å unngå at legeringen skal miste karbon. Det brukes også under produksjon av silisium og legeringer av silisium som tåler høye temperaturer og korrosjon bedre og redusere mengden slag. [2] Ferrosilium og FSM legeringer har flere bruksområder. Det kan være deoksidering av stål eller andre jernlegeringer, der man ikke ønsker at legeringen skal miste karbon. Det finnes også en metode for å produsere hydrogen ved hjelp av ferrosilium som kan brukes for ballonger som er trygg, enkel og lite plasskrevende. FSM er kritisk viktig for å modifisere karbon i jernstørkningen.

1.3 Hvorfor trengs slike oppgaver?

For å ha et best mulig utgangspunkt i risikovurdering trengs informasjon. Jo mer informasjon man har tilgjengelig jo bedre beslutninger kan man gjøre og jo større sikkerhet kan man oppnå. Høyere sikkerhet på et anlegg betyr at det er tryggere å jobbe der, og arbeidstrygghet er viktig for både arbeidere som ikke ønsker å skade seg og eiere som ikke ønsker økonomiske konsekvenser. Når man har et produkt så stort og viktig som silisium og silisiumslegeringer er informasjonen fra denne oppgaven viktig. Da det gir mye bedre forståelse rundt hvordan man kan designe et produksjonsanlegg eller forbedre et eksisterende anlegg.

1.4 Oppgavens mål og oppbygging

Det første målet med denne oppgaven er å gi grunnlag for videre forståelse av eksplosiviteten til legeringer gjennom eksperimenter, og hvordan forskjellige konsentrasjoner påvirker eksplosivitet. Det er også et mål å bygge videre på tidligere arbeid innen modellering av støvekspløsjoner til å kunne brukes på legeringer, fremfor kun rene grunnstoff. Det andre målet er å videre bearbeide formler fra Østgårds master.

Kapittel 2 inneholder teori for de to hovedmålene i oppgaven og eksperimentelt oppsett og prosedyrer for disse eksperimentene. Kapittel 3 inneholder resultater fra eksperimentene og litt beskrivelse av interessante tall. Kapittel 4 inneholder diskusjon rundt resultatene i forhold til partikkelstørrelsefordeling og andre resultater med rene stoffer. Kapittel 5 omhandler modellering av forbrenning av metallene. Kapittel 6 inneholder konklusjon rundt eksperimentene og arbeidet som er gjort med formlene.

Kapittel 2

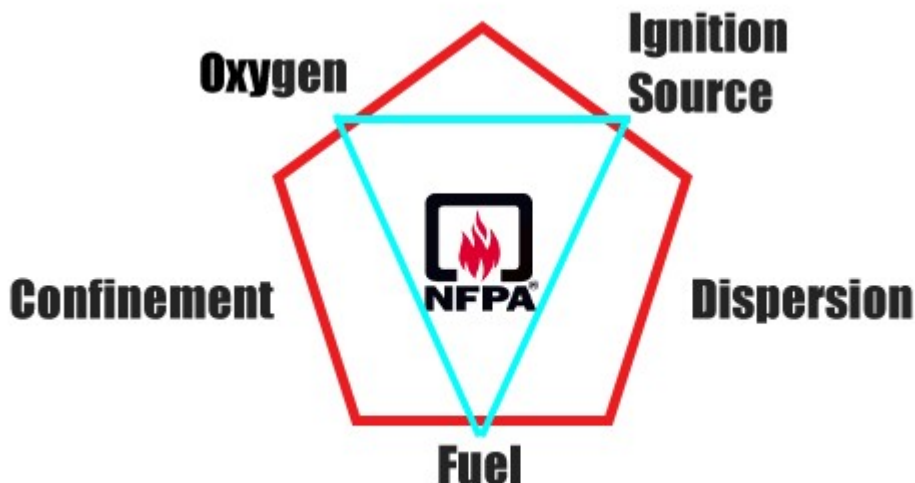
Teori og tidlige arbeid

2.1 Definisjoner og konsepter for støvekspløsjoner

2.1.1 Eksplosjon, antennelse og forbrenning

Eksplosjon har to hoved-definisjoner: den første fokuserer på smellet og lyden som følge av sjokkbølgen, og et eksempl her er vandampekspløsjoner og hva som førte til eksplosjonen blir sett på som mindre viktig. Den andre fokuserer på den plutselige frigjøringen av kjemisk energi. Det er den andre definisjonen som er mest interessant for denne masteroppgaven da støvekspløsjoner går under denne definisjonen og modelleringen som skal gjøres senere. Hvilken form energien hadde før den ble omdannet til varme er ikke relevant for denne definisjonen [3]. Antennelsen av eksplosjonen: antennelse er startreaksjonen, eller den første delen av en eksplosjon, der energi blir ført inn i støvskyen, noe som fører til at grunnstoffene i støvet dekomponerer i en reaksjon med oksygen. Forbrenning: forbrenningen i eksplosjonen er reaksjonen mellom reaktanten (her metallet) og oksidet, her oksygen. Denne reaksjonen produserer metalloksid og energi i form av varme, som fører til økt trykk i beholderen, den delen som er mest interessant for denne masteroppgaven. [3]

Forbrenningen av reaktanten vil avslutte dersom temperaturen synker under reaktantens tenntemperatur eller det ikke er mer tilgjengelig reaktant eller oksid. Det finnes flere måter en reaktant kan forbrenne på. Metallstøv er også her litt annerledes, da det ofte dannes et oksidlag på yttersiden av støvkornene som må smelte før forbrenningen tar stede. Det finnes flere måter støv kan brenne på, den første er heterogen forbrenning som skjer ved at oksygen reagerer på overflaten av støvkornene eller homogen forbrenning der reaktanten fordampes før den forbrennes. Jern er et eksempel på stoff som brenner heterogent mens rent magnesium fordampes gjennom oksidskallet før det forbrennes, og silisium brenner med en kombinasjon av disse to mekanismene. Dersom en blanding skal eksplodere kreves det mer enn for at en blanding skal brenne. Fra figur 2.1 ser man at en brann krever oksygen, brensel og varme, i tillegg til disse tre faktorene krever en eksplosjon at blandingen er innesperret så det kan dannes et høyt nok trykk og at brennselet og oksygenet er forblandet godt nok så reaksjonen kan skje raskt. Dersom en av kriteriene i branntrekanten ikke er innvilget blir det verken brann eller eksplosjon og dersom et av kriteriene i eksplosjonsfemkanten ikke er innvilget blir det brann i stedet.



Figur 2.1: viser branntrekant og eksplosjonsfemkant, hentet fra [4]

2.1.2 Faktorer som påvirker støvekspløsjonen

Det finnes flere faktorer som påvirker en eksplosjon, disse inkluderer: turbulens, kjemi og fuktighetsinnhold, initialt trykk og temperatur og varmeoverføring. Samt spesielt for støv: agglomerering, initial støvkonsentrasjon og spesifikt overflateareal. I denne masteroppgaven er faktorene initial støvkonsentrasjon og spesifikt overflateareal, eller partikkelstørrelse de viktigste. Initial støvkonsentrasjon er den mengden støv som blir puttet inn i 20 liter bomben og er en viktig parameter å sjekke eksplosjonstrykk og dp/dt etter. Spesifikt overflateareal sier noe om hvor mye material som er tilgjengelig for forbrenning. Dette er fordi støvene brenner på overflaten og et gitt areal har en gitt mengde atomer som kan reagere til en tid. Et eksempel er to like vedkubber på 1 kg. Dersom du deler den ene vedkubben i 2 så har disse 2 vedkubbene nå fått to nye overflateareal som kan brenne i ovnene, derfor vil de brenne raskere en den første vedkubben som har mindre overflateareal i forhold til volum. Dersom den initiale støvkonsentrasjonen er høyere en den støkiometrisk konsentrasjonen vil det være igjen uforbrent reaktant, og dette uforbrente støvet vil også varmes opp, noe som fører til mindre trykk. Dersom den initielle støvkonsentrasjonen er lavere enn støkiometrisk konsentrasjon er det mindre tilgjengelig reaktant og man vil få mindre varmedanning, noe som fører til mindre trykk. De to konsentrasjonene som ikke lenger gir eksplosjon, på grunn av for mye eller for lite tilgjengelig reaktant kalles LEL, lowest explosion limit og UEL, upper explosion limit. Spesifikt overflateareal er en viktig faktor for støvekspløsjoner, da den beskriver hvor mye reaktanten er tilgjengelig ved et tidspunkt. Jo mindre støvpartikkelen er, jo høyere spesifikt overflateareal har støvet. [3] [5]

2.1.3 Spesifikke egenskaper for metallstøv

Metallstøv har noen egenskaper som gjør at det er forskjellig fra andre støv, både i oppbevarings og eksplosjonsammenheng. En av de viktigste er at metallstøv ikke tar til seg vann i like stor grad som organisk støv gjør, noe som fører til at fuktighet spiller en veldig liten rolle når det kommer til støvets eksplosjonsegenskaper. Metallstøv skiller seg også fra organisk ved at det er mange flere grunnstoffer, fremfor organisk som kun består av karbon, oksygen, hydrogen og i noen tilfeller nitrogen. Metallstøvkornene inneholder derfor veldig lite oksid, men noe slagg og overflateoksid vil forekomme. For denne oppgaven er det snakk om legeringer. Legeringer lages for å oppnå andre egenskaper enn grunnstoffene legeringene allerede har. Støvet i denne oppgaven er forskjellige legeringer som hovedsakelig består av silisium og jern, noen inkluderer en større andel magnesium og kalsium samt mindre andeler av andre metaller som blir sett bort ifra i denne oppgaven for enkelthetens skyld. Dette betyr også at eksplosiviten og energiinnhold er annerledes i forhold til prøver av rene grunnstoff. Egenskaper som endres som er interessante for denne oppgaven er: minste tenn energi, koke- og smeltepunkt, minste tenn temperatur [6]. Støv av legeringer er mekanisk blandet, som betyr at grunnstoffene danner metallbindinger med hverandre, men ikke nye molekyler, som skjer ved dannelse av glukose fra karbon, oksygen og hydrogen. Legeringer påvirkes også av størkning som kan separere smelta til forskjellige deler med ulik sammensetning. Dette faller utenfor masterens omfang, men diskuteres som feilkilde.

2.1.4 Egenskaper til metalloksidene

Denne oppgaven tar for seg legeringer som består av opp til fem forskjellige grunnstoff, der jern og silisium er hovedparten, i tillegg til store deler av magnesium og mindre deler kalsium og aluminium. Alle grunnstoffene kan reagere med oksygen og danner et eller flere oksid. Magnesium danner kun MgO , og man skiller mellom lett og hardbrent magnesiumoksid, der lettbrent er løst, lett og mykt og hardbrent er tettere og har høyere densitet. Ved lavere temperaturer dannes det lettbrent, mens ved høye temperaturer dannes det hardbrent [7]. Jern kan danne tre oksid, FeO , Fe_2O_3 eller Fe_3O_4 . Fe_2O_3 er rødbrunt, men dette blir det dannet svært lite av og kun rundt visse konsentrasjoner [8], og de to andre er mørkgrå til svart i farge. Det er og sagt at Fe_3O_4 er magnetisk, som kan være en ok måte å se om dette oksidet er dannet [9]. Silisium danner enten SiO eller SiO_2 . SiO er brunt og SiO_2 er hvitt. SiO er ustabil ved lavere temperaturer og dekomponerer til en blanding av rent silisium og SiO_2 [10]. Kalsium danner kun ett oksid, CaO , som er et snøhvitt stoff, det har ingen andre spesielle egenskaper med unntak av at det er etsende [11]. Aluminium danner også kun et oksid, Al_2O_3 , som er et hvitt pulver [12].

2.1.5 Viktige verdier for grunnstoffene og oksidene som kan dannes

I dette underkapittelet vil forskjellige verdier som brukes i modelleringen vises, både for å gi litt mer kjennskap til stoffene og vise verdier som er brukt i utregninger.

Kjemisk betegnelse	Mg	Kjemisk betegnelse	Al
Atomnummer	12	Atomnummer	13
Atomvekt	24,30 g/mol	Atomvekt	26,98 g/mol
Smeltepunkt	923 K	Smeltepunkt	933 K
Kokepunkt	1363 K	Kokepunkt	2792 K
Kjemisk betegnelse	Ca	Kjemisk betegnelse	Si
Atomnummer	20	Atomnummer	14
Atomvekt	40,08 g/mol	Atomvekt	28,09 g/mol
Smeltepunkt	1115 K	Smeltepunkt	1683 K
Kokepunkt	1757 K	Kokepunkt	3538 K
Kjemisk betegnelse	Fe		
Atomnummer	26		
Atomvekt	55,85 g/mol		
Smeltepunkt	1811 K		
Kokepunkt	3134 K		

Tabell 2.1: Informasjon om de forskjellige grunnstoffene, smelte- og kokepunktene er hentet fra *handbook of physics and chemistry* [13]

Kjemisk betegnelse	MgO	Kjemisk betegnelse	Al_2O_3
Molvekt	40,30 g/mol	Molvekt	101,98 g/mol
Smeltepunkt	3098 K	Smeltepunkt	3098 K
Kokepunkt	3873 K	Kokepunkt	3873 K
Kjemisk betegnelse	CaO	Kjemisk betegnelse	SiO
Molvekt	56,08 g/mol	Molvekt	44,09 g/mol
Smeltepunkt	2886 K	Smeltepunkt	1975 K [15]
Kokepunkt	3123 K [14]	Kokepunkt	2153 K [15]
Kjemisk betegnelse	SiO_2	Kjemisk betegnelse	FeO
Molvekt	60,06 g/mol	Molvekt	71,85 g/mol
Smeltepunkt	1873 K [16]	Smeltepunkt	1650 K [17]
Kokepunkt	3223 K	Kokepunkt	3400 K [17]
Kjemisk betegnelse	Fe_3O_4		
Molvekt	231,55 g/mol		
Smeltepunkt	1879 K [17]		
Kokepunkt	2896 K [17]		

Tabell 2.2: Informasjon om de forskjellige oksidene. Kilden som er brukt her er "*Handbook of physics and chemistry*" [13] om ingen annen kilde er gitt.

Kjemisk betegnelse	Mg	Al	Ca	Si	Fe
H_{gas}^0 kJ/mol	147.10	329.70	177.80	450.00	415.47
H_{liquid}^0 kJ/mol	4.79	10.56	7.79	48.47	12.40

Tabell 2.3: Entalpiverdier på de forskjellige grunnstoffene fra NIST [18]

2.2 Partikkelstørrelseanalyse

Mange fagfelt bruker forenklinger som et hjelpemiddel for å kunne forklare hva som skjer på en bedre måte. Dette er ikke et unntak når det kommer til partikkelstørrelseanalyse, og her er den største forenklingen hvordan man ser på partiklene. Da det er vanlig å forenkle alle partikler, uansett originalform, til kuler. Kuler er en geometrisk form som er veldig lett å jobbe med, da den kan beskrives med kun en størrelse, diameteren. Disse kulene har forskjellige størrelser ut i fra hvilke faktor man ønsker å se mest på, enten maks. eller min. lengde, gjennomsnittelig overflateareal, vekt eller volum. Faktoren man velger å se på velger man ut ifra hva som er mest interessant.

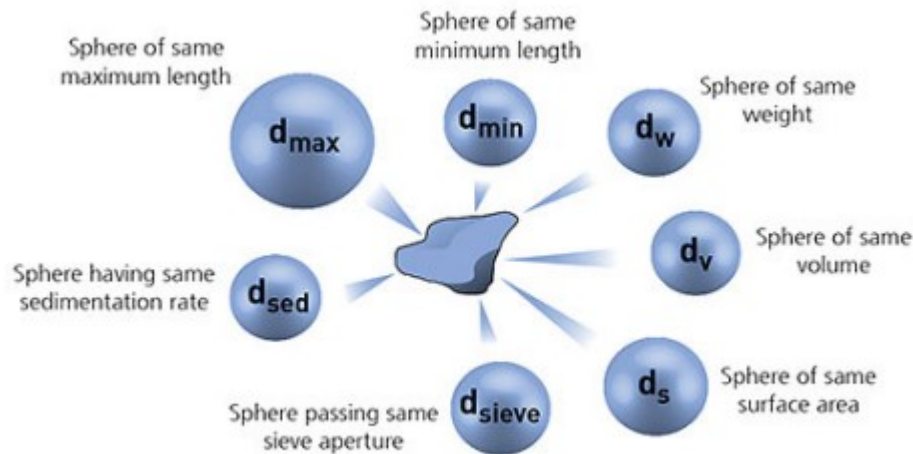
2.2.1 Eksempler med forskjellige størrelser

Det finnes flere eksempler på mat og leker som har forskjellige størrelser. Ett eksempel er Lego, som mange barn i aldersgruppen 6-30 år og eldre er veldig glad i. Dersom man har en beholder med forskjellige størrelser Lego vil man kunne se at de minste bitene som runde knapper (ID nummer 4073) og 1x2 brikker (ID nummer 3004) blir liggende på bunnen av beholderen, mens de største bitene ligger på toppen. Dette heter segregering og skjer på grunn av partikkelstørrelsesforskjell og bevegelse av partikler.

2.2.2 Representativ prøvetaking

Representativ prøvetaking betyr at den prøven man tar fra et sted i anlegget er representativt for enten hele eller den delen av anlegget man er interessert i. Dette er viktig for å få et korrekt anslag for hvordan støvet i helhet oppfører seg og reagerer for å kunne ta best mulig beslutninger. For denne oppgaven ble prøvetakingen foretatt med en spade i oppsamlingsposer som konstant ble påfylt med støv fra anlegget. Siden posene ble påfylt konstant antas det at det er en representativ måte å ta prøvene. Denne type prøvetaking kalles stikkprøve og er ikke representativ for variasjon over tid.

Siden representativ prøvetaking er en viktig faktor når det kommer til eksperimentene er det viktig at prøvetakingen skal være repeterbar. Siden det tok lite tid fra sekkene som prøvene ble tatt fra ble påfylt til prøvene ble tatt burde prøvene være representative. Det som kan være et problem er at det kan være forskjellige partikkelstørrelser i anlegget til forskjellige tider, men det burde være et såpass lite problem at det kan sees bort fra. Bjølvfossen produserer over hundre forskjellige kvaliteter som varierer i kjemi og størrelse. Prøvetaking er sitt eget fagfelt, kalt "theory of sampling", noe som burde vise til hvor viktig det er. [19]



Figur 2.2: viser forskjellige mål av en partikkel, ut ifra hvilken hensikt man har

2.2.3 Forskjellige gjennomsnitt som blir brukt i partikkelstørrelsesanalyse

Det brukes tre forskjellige persentiler som beskriver hvilke partikkelstørrelser som kumulativt ligger under denne verdien. Disse tre persentilene er D50, ved de nederste 50 prosentene av partikkene. D10, ved de nederste 10 prosentene av partikkene og D90, ved de nederste 90 prosentene av partikkene. De to andre gjennomsnittene som er interessante i denne oppgaven er D[3,2], overflatevektet gjennomsnitt og D[4,3], volumvektet gjennomsnitt. D[3,2] brukes dersom det spesifikke overflatearealet er relevant. D[4,3] brukes dersom volumet er relevant. I figur 2.2 kan man se forskjellige mål på samme partikkel.

2.3 Den ideelle gassloven

$$PV = nRT \quad (2.1)$$

$$PV = \frac{m}{M} * RT \quad (2.2)$$

Her er da P det absolutte trykket, V er volumet og trykk ganger volum er likt produktet av n, antall mol i gassfase, T, temperaturen og R, den ideelle gasskonstanten.

Deretter kan volumet og den ideelle gasskonstanten settes på en side og man kan dele ligningen før og etter eksplosjonen på hverandre:

$$\frac{P_p}{P_0} = \frac{n_p T_p}{n_0 t_0} \quad (2.3)$$

2.4 Hvordan brenner de forskjellige grunnstoffene?

Forskjellige grunnstoffer og molekyl brenner på forskjellige måter. Noen brenner på overflaten, noen må smelte og fordampe for så å kunne antenne osv. Grunnstoffene i denne oppgaven brenner også på forskjellige måter: Rent magnesium er veldig reaktivt og danner et oksidskall på utsiden av støvkornene. Når de blir utsatt for varme smelter det rene magnesiumet på innsiden av oksidskallet, dette presser seg ut av oksidskallet og brenner i reaksjon med luften som vist i få inn figur[20]. Jern brenner på overflaten [21] og aluminium brenner først etter at oksidlaget har smeltet. [20]

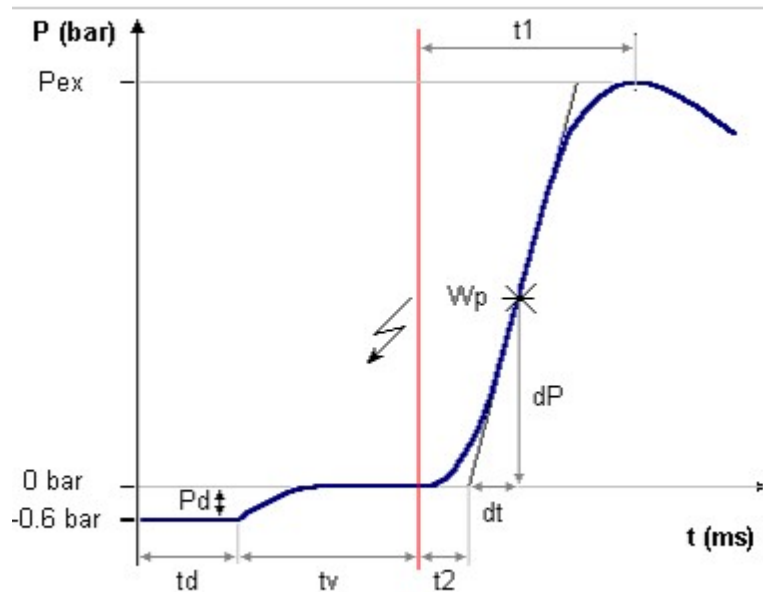
2.5 Støvekspløsjoner og testing

For alle eksplosjoner er det viktig å bestemme det maksimale eksplosjonstrykket, den maksimale trykkstigningshastigheten og K_{st} -verdien, P_{max} og dp/dt .

Standarden for denne typen test er 1 kubikks eksplosjonskammer, men da dette er veldig stort og krevende, brukes det oftere kammer på 20 liter, samt faktorer som tar hensyn til differansen i volum for trykkstigningshastigheten. Det maksimale eksplosjonstrykket kan finnes så lenge kammeret har et volum på 20 liter eller mer og er enten sfærisk eller kubisk. Da maksimal trykkstigningshastighet synker med høyere volum må man bruke kubikkrotloven for å kompensere, som vises nedenfor:

Kubikkrotsloven betyr at for et kammer på 20 liter så får man en faktor på 0,27144 som man ganger med dp/dt_{maks} for å finne K_{st} verdien. Testkammeret i denne oppgaven er målt til å være 20,5 liter, derfor blir faktoren som skal ganges med 0,27369. Samtidig blir trykkstigningshastigheten tilført en dimensjon, og endres fra Bar/s til Bar*m/s Si-enheten for trykk er Pascal. Men da trykket til eksplosjoner er veldig store brukes enheten Bar mer vanlig. 1 Bar tilsvarer hundre tusen pascal. Trykkstigningshastighet representeres i Bar*m/s.

En eksplosjon i et kammer vil få en trykk-tid kurve som vist under. Tester i Siwek sfæren starter med et undertrykk på 0,4 Bar absolutt, eller -0,6 Barg før støvet blåses inn i tillegg til 20 Bar for å utligne trykket før antennelse. Eksplosjonen gir da et overtrykk som når en topp, maksimaltrykket, før trykket minsker.



Figur 2.3: viser et eksempel på en trykk-tid kurve fra manualen for siwek sfæren, W_p er vendepunktet og den høyeste trykkstigningshastigheten, makstrykket er vist som P_{ex} og t_v er forsinkelsestiden, for en 20-liters sfære, 60 ms

Støvekspløsjoner klassifiseres i fire kategorier etter K_{st} verdi, som vist nedenfor.

Støvekspløsjonsklasse	$K_{st} \left[\frac{m \cdot \text{Bar}}{s} \right]$	Kommentar
St 0	0	Eksploderer ikke
St 1	>0-200	Svak eksplosjon
St 2	201-300	Sterk eksplosjon
St 3	>300	Veldig sterk eksplosjon

2.5.1 20 liter mot 1 kubikk eksplosjonskammer

I artikkelen Application of Laboratory-scale Determined K_{st} -values of Metal Dust to Industrial Scale Processes [22], vises det at 20 liters kammer får for liten K_{st} for lettmetaller og legeringer som inneholder lettmetaller. Lettmetaller inkluderer blant annet silisium, magnesium, kalsium og aluminium. Det blir derfor anbefalt at for å finne K_{st} verdien så gjøres tester i 1 kubikk eksplosjonskammer, eller at man dobler verdien fra 20 liters kammeret.

2.6 Eksplosjonsulykker

Det finnes mange eksempel på metallproduksjon der noe har gått alvorlig feil og resultatet har vært en støvekspløsjon. Her er det vist to eksempler av spesiell relevans. Den første er eksplosjonen på Smelteverket til Elkem i Bremanger i 1972, som var en silisiumstøvekspløsjon. Den andre er en nyere eksplosjon i Kunshan, Kina fra 2014 som er godt dokumentert. I 1972 ble Smelteverket Elkem Bremanger utsatt for en alvorlig støvekspløsjon, der fem arbeidere mistet livet og fire ble alvorlig skadet. Eksplosjonen tok sted i mølledelen av anlegget, mens denne delen var stengt ned for vedlikehold. Eksplosjonen forårsaket store skader på prosessutstyr og blåste ut veggpanel i bygget. Den høye flammemetemperaturen til den brennende støvskyen og sterk termisk radiasjon forårsaket alvorlige brannskader. Under undersøkelsen av området ble et mulig hendelsesforløp funnet, da et lite hull i et stålrør brukt for å transportere støv ble funnet sammen med en skjærebrenner. Og det er sterkt bevis for at skjærebrenneren ble brukt for å lage hullet. Stålrøret var sannsynligvis ikke rensset innvendig før hullet ble kuttet. Selv om denne delen av anlegget var nede, fungerte fortsatt støvekstraheringssystemet. Noe som førte til at et lag med støv ble suspendert og tilført nok energi for å antenne fra skjærebrenneren. Eksplosjonen i røret fungerte som primærekspløsjon og førte til at støv i andre deler av fabrikk ble suspendert og eksplosjonen propagerte til hele bygget. Bygget ble ikke gjenbygd etter eksplosjonen [3].

I 2014 var det en alvorlig ulykke på et industrianlegg i Kunshan, Kina, som stod for polering av felger av aluminiumlegeringer. Hendelsen fant sted under vanlig operering av anlegget. Anlegget bestod av 32 produksjonslinjer med 12 arbeidsplasser per linje. Da eksplosjonen fant sted, var det 348 arbeidere til stede. Poleringsarbeidet var manuelt, med avsug for støvet. Eksplosjonen tok mest sannsynlig sted i en automatisk filter-bagriste system som hadde vært ute av drift i lang tid før eksplosjonen og fordi den var ute av drift hadde arbeidere rensset den manuelt hver morgen ved å riste den. I tillegg var det ingen tiltak til stedet for å redusere risikoen for støvekspløsjoner i anlegget og støvsamlere. Rørene til støvsamlerne, stikkontakter eller strømfordelingsskap var jordet godt. Eksplosjonen tok sted på morgenen under vanlig aktivitet i anlegget. Videokamera fra en annen fabrikk viser at en serie av eksplosjoner tok sted på mellom 5-7 sekund. To viktige detaljer er notert. Den første er at bunnen i en tønne brukt til å samle støv var blåst av og den andre er at det ble funnet et lite hull i veggen på tønne, som mest sannsynlig ikke var skapt av eksplosjonen, men heller korrosjon over en lengre periode. Både filteret og tønnene stod utendørs og de to dagene før eksplosjonen hadde det regnet kraftig. Dette førte til at vann kunne ha trengt inn i tønne gjennom hullet og reagert med aluminiumstøvet i tønne og dannet aluminiumhydroksid, hydrogen og varme. Da legeringsstøvet var behandlet med organiske materiale, som poleringsvoks, ble støvet i tønne mer fluffy" og fikk mindre massetetthet. Antennelsen skjedde altså med en blanding av hydrogen og de organiske stoffene som selvantente og førte til en kjedereaksjon. [3]

2.7 Tidligere arbeid

Det finnes lite tidligere publisert arbeid på FSM legeringer, som er oppgavens fokus, samt at det som er publisert er mangelfullt. Derfor er fokuset på tidligere arbeid å vise resultater fra den rene grunnstoffene de forskjellige legeringene består av, samt tidligere arbeid i Siwek sfæren som ble brukt i oppgaven. Det lykkes ikke å finne tidligere arbeid på rent kalsium, og fra erfaring hos Gexcon har kalsiumeksplosjoner en veldig høy temperatur, som gjør slikt arbeid vanskelig.

2.7.1 Jern og aluminiumstøv

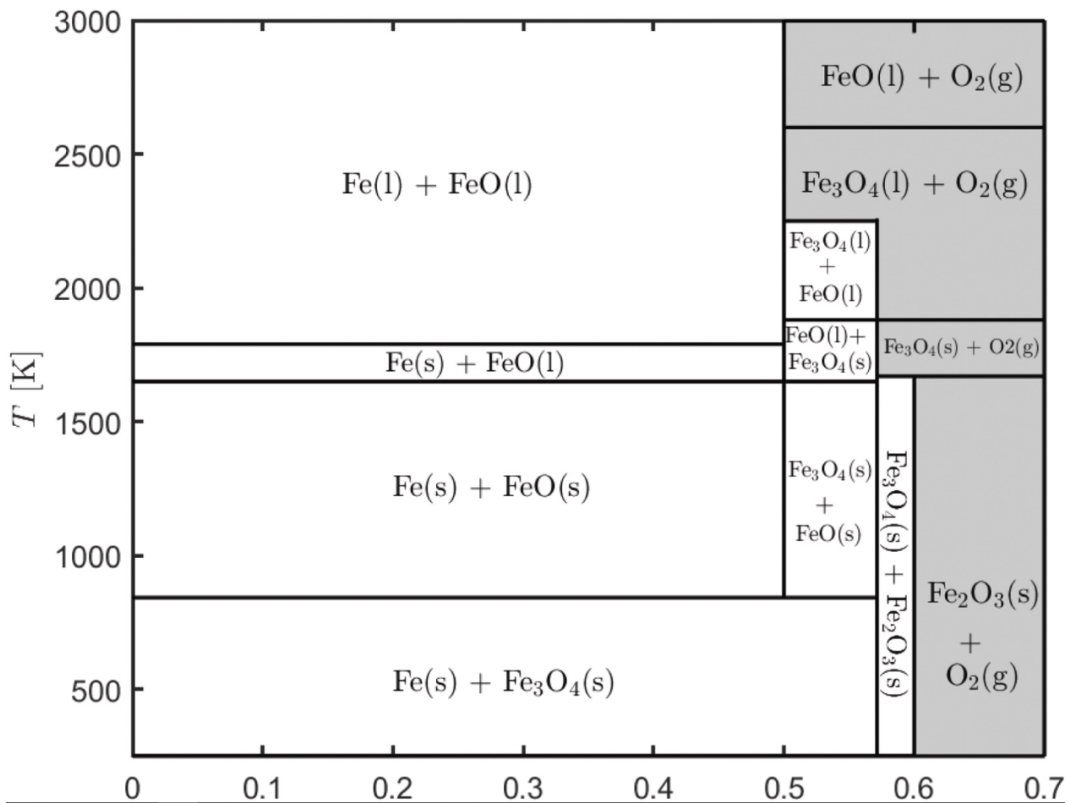
Verdiene for aluminium og jern i tabell 2.4 er hentet fra artikkelen "Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1-m³ [23] chambers"

Støv	d10(m)	d0(m)	d90(m)	d32(m)	Pmaks(Bar)	Kst($\frac{Bar \cdot m}{s}$)	C $\frac{g}{m^3}$
Al 100 (fine)	2	5	11	4	9,3	726	750-1750
Al 101 (medium)	13	28	57	24	7,9	98	1000
Al 103 (coarse)	63	119	181	102	2,2	4	1500-3000
Fe 101 (fine)	10	29	53	19	3,1	27	2250-2750
Fe 102 (medium)	11	32	63	22	3,0	34	2500-3000
Fe 103 (coarse)	47	115	180	86	1,9	2	1000-2000

Tabell 2.4: Fra [23], viser eksplosjonsresultatene for tre aluminiumstøv og tre jernstøv, samt partikkelstørrelsesfordeling og konsentrasjonene støvene ble testet over

2.7.2 Artikkel fra van Gool

I artikkelen "Particle Equilibrium Composition model for iron dust combustion"[17] er det laget et fasediagram for forbrenning av jern ved ulike temperaturer som kan sees i 2.4. Dette diagrammet brukes for modelleringen.



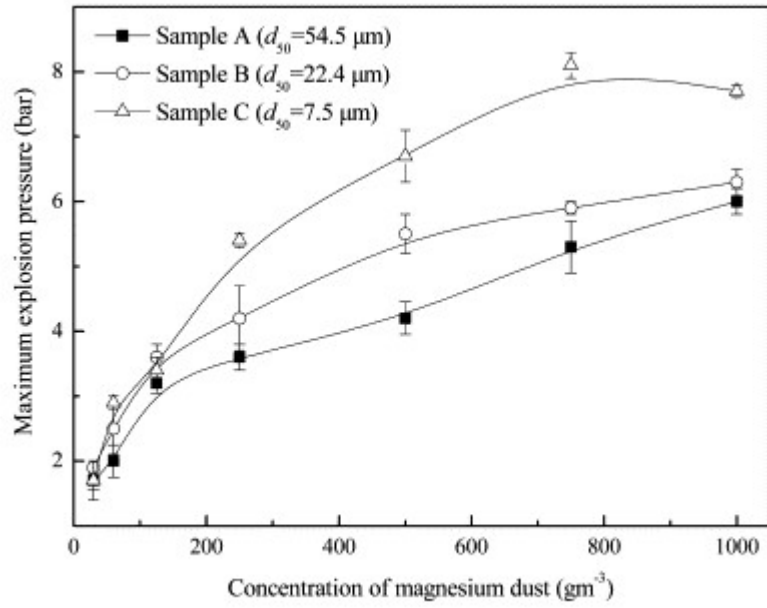
Figur 2.4: fasediagram for forbrenning av jern [17]

2.7.3 Magnesiumstøv

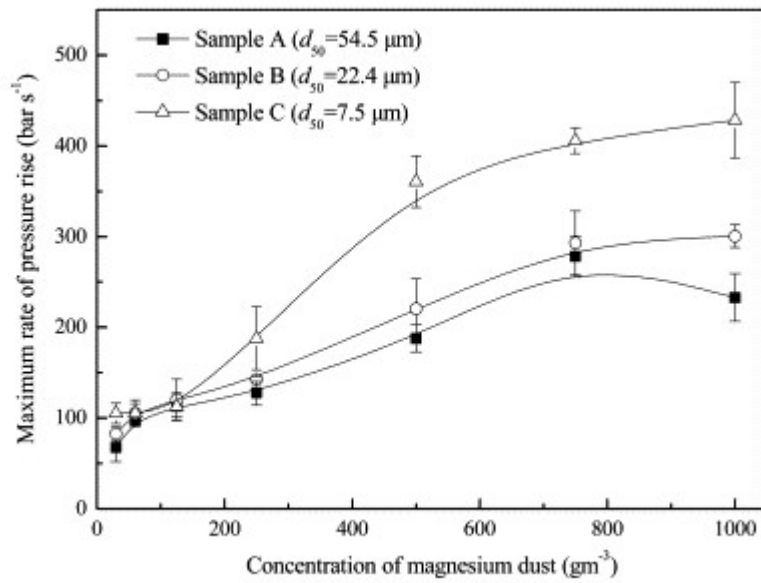
Verdiene for magnesium i 2.5 hentet fra artikkelen "Experiment-based investigations of magnesium dust explosion characteristics"

Støv	d10(m)	d50(m)	d97(m)
Sample A	24,9	54,5	129,9
Sample B	12,3	22,4	88,8
Sample C	4,1	7,5	23,9

Tabell 2.5: Fra [24], viser partikkelstørrelsesfordelingen til de tre magnesiumstøvene som ble testet



Figur 2.6: viser maksimal trykkstigningshastighet fra [24]

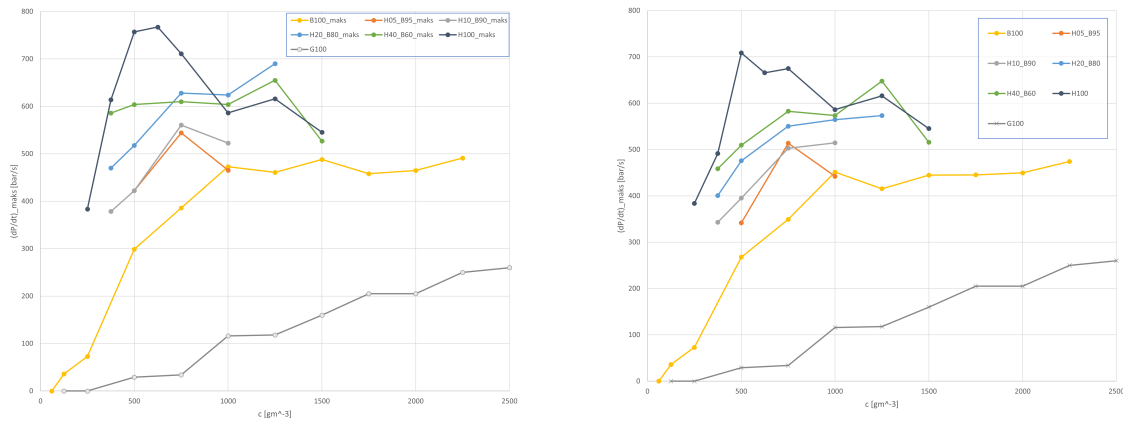


Figur 2.5: viser maksimal trykkstigningshastighet fra [24]

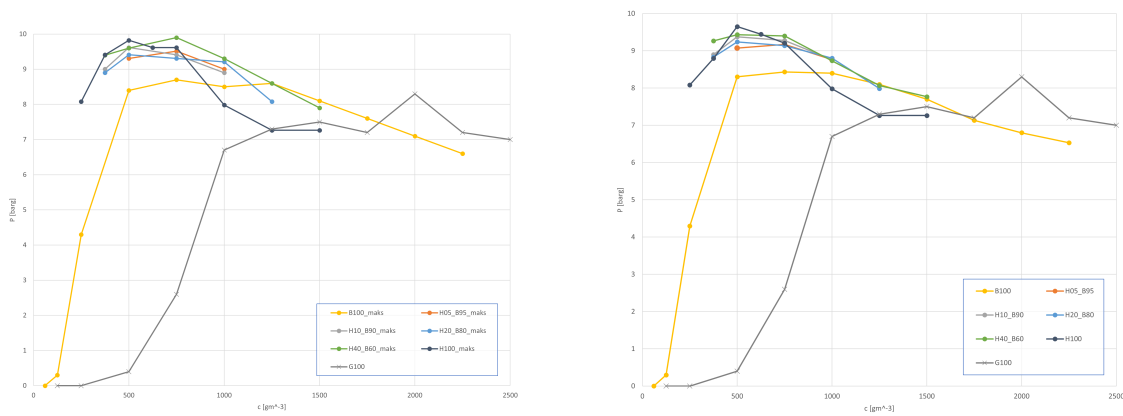
2.7.4 Silisiumstøv fra masteroppgaven til Østgård(2022)

Prøve	D50[m]	D10[m]	D90[m]	D100[m]	D[3,2][m]	D[4,3][m]	SSA[m ² /kg]
B100	24,1 ±2,4	5,23	56,0	105	11,2	27,8	230,5
H05B95	23,7 ±2,4	4,16	56,1	107	9,38	27,3	274,6
H10B90	23,8 ±2,4	3,54	56,2	98,0	8,16	27,1	315,6
H20B80	20,3 ±2,0	2,46	54,0	111	5,77	24,4	446,2
H40B60	12,4 ±1,2	1,65	50,6	110	3,84	20,2	670,4
H100	2,77	0,964	5,25	8,65	1,81	2,97	1423
G100	62,0 ±6,2	8,67	191	397	18,0	83,1	142,7

Tabell 2.6: viser partikkelstørrelsesfordeling fra Østgårds master, [1]. Partikkelstørrelsen til støvet B100 er av spesiell interesse da disse er veldig like partikkelstørrelsene til støvet FeSi55 i denne oppgaven og vil bli brukt til sammenligning.



Figur 2.7: viser maks og gjennomsnittsverdiene fra Østgårds master [1]



Figur 2.8: viser maks og gjennomsnittstrykk fra Østgårds master [1]

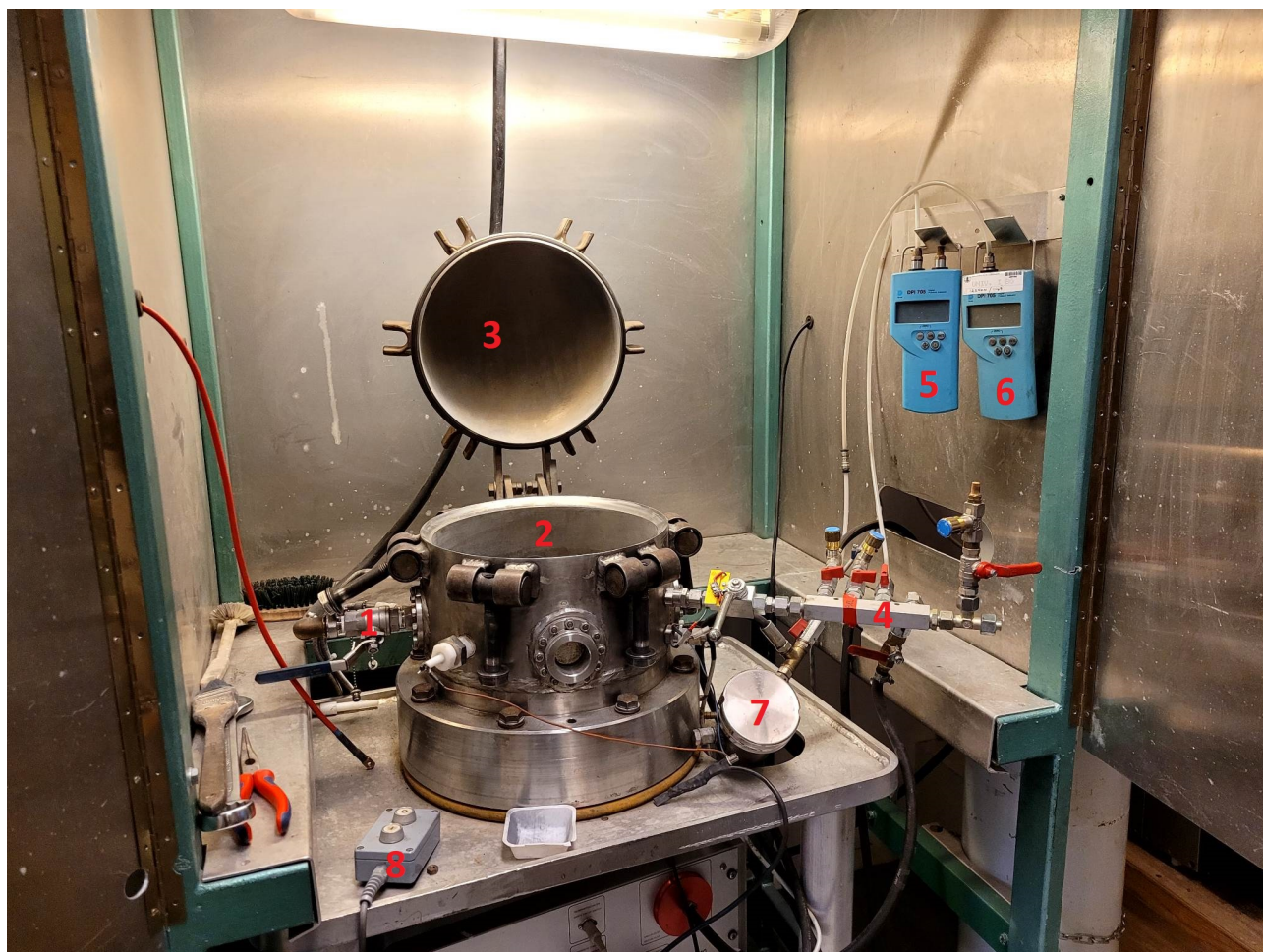
Kapittel 3

Metode

3.1 Bruk av 20 liter Siwek-sfære

3.1.1 Eksperimentoppsett

Eksperimentene i denne masteroppgaven ble utført i modifisert Siwek-sfære designet av Skjold for utførelse av masteroppgaven hans ved UiB i 2003 [25]. Det er tatt utgangspunkt i en standard 20 liter Siwek sfære, som har blitt modifisert med et lokk fra et standard USBM kammer for enklere rengjøring og erstatning av tennere. I Østgårds masteroppgave ble det indre volumet målt med vannfylling til $20,5 \pm 0,02$ liter. Hele sfæren er lagd av rustfritt stål etter amerikanske standarder. Siwek-sfæren er sertifisert opp til 27 Bar(g) av brannvesenet i Bergen. [1] Til sfæren er det koblet til to piezoelektriske trykksensorer i kvarts av typen kistler 701A. At det er dobbelt opp med trykksensorer skyldes ønske om å redusere måleusikkerhet. De kjemiske tennere styres elektronisk av kontrollenheten KSEP310 gjennom KSEP-programvaren. Trykksensorene er tilkoblet et måle-og kontrollsystem, KSEP 332, og en kontrollenhet, KSEP310. Utstyret inneholder også korreksjonsfaktor.



Figur 3.1: tallet 1 viser ventilen, 2 sfæren, 3 lokket, 4 juletreet, 5 vakuummåleren, 6 trykkluftsmåleren, 8 bryteren for trykkluft. Det som ikke vises på bildet er KSEP332 enheten under Siwek-sfæren, trykkluftsfasken på venstre side av Siwek-sfæren og vakuumpumpen på høyre side av Siwek-sfæren.

3.1.2 Kjemiske tennere

Da eksperimentene i denne masteren kun omhandler maksimumstrykk og maksimumstrykkstigningshastighet er det brukt 5 kj tennere. Disse er av merket FR SOBBE GmbH



Figur 3.2: 5 Kj kjemiske tennere fra FR SOBBE GmbH

3.1.3 Kjølning

En av de viktigste momentene med denne typen eksperiment er starttemperatur, noe man kan forstå gjennom idealgassloven. På det eksperimentelle utstyret er det ikke noen form for avkjølingsapparat eller temperaturmåling. Det betyr at man må vente til Siwek-sfæren er kjølt ned til romtemperatur mellom hvert eksperiment. Den tilgjengelige metoden for å bestemme om temperaturen i Siwek-sfæren er lav nok er at operatøren legger en hånd på overflaten, og dersom den kjennes for varm ut, venter man en stund til for så å sjekke på nytt. Fra Østgårds masteroppgave ble det funnet at det kan ta opp til 90 minutter mellom eksperimenter når man gjør tester på eksplosjonsparametere ved høye konsentrasjoner. I denne oppgaven ble det samme funnet, og for hvert skudd ble det satt av god ventetid for å gi bomben tid til å kjøle seg ned.

3.2 HMS og risikoer ved stoffene

Uansett hvilke eksperimenter man gjør vil det innebære risikoer, og det er retningslinjer og HMS tiltak som må følges. Å få i seg metallstøv og metalloksid er uheldig og noe som må unngås. Derfor er det flere sikkerhetstiltak som må følges under eksperimenteringen. Nedenfor er tiltak listet, hentet fra produktsikkerhetsblad for FeSi55 fra Elkem [26] og manualen for siwek sfæren [27]

3.2.1 HMS og hygiene

Under forsøkene skal operatøren følge HMS instruks med krav til personlig verneutrustning for å unngå å få støv på klær, seg selv og unngå å få det i seg, da støvet kan

være farlig for helsa. Utstyret som ble brukt inkluderer: labfrakk, maske og hansker når støv håndteres og visir når bomben renses etter et skudd.

3.3 Gjennomføring av eksperimenter

Prosedyre før eksperimenter:

Oppgave	Kryss av
Åpne døra og slå på ventilasjonen	
Åpne oksygenbeholderen	
Slå på KSEP 332	
Slå på trykksensorene (hold inne til det piper)	
Slå på PC og åpne KSEP programvare	
Slå på vekt og roter utvalgt støvbeholder flere ganger for å blande støvet godt	

Prosedyre for eksperimenter:

Oppgave	Kryss av
Mål opp riktig mengde støv	
Sett på plass to tennere og steng Siwek-sfæren	
Plasser støvet i støvkammeret	
Undertrykk og overtrykk	
Start eksperimentet	
Åpne avsuget og fyr av 7 Bar to ganger	
Børst og støvsug Siwek-sfæren innvendig	

Prosedyre etter eksperimenter:

Oppgave	Kryss av
Lukk oksygenbeholderen	
Slå av KSEP 332	
Se over at Siwek-sfæren er rent til neste dag	
Slå av trykksensorene	
Lukk KSEP programvaren og slå av PCen	
Slå av vekten og sett støv på plass	
Slå av ventilasjonen og lås døra	

3.3.1 Prøvetaking

Som nevnt tidligere ble støvprøvene rotert sakte i beholderen sin for at støvkornene skal blandes, før det blir oppveid rett mengde for forsøket. Det ble benyttet skje og spatel for å hente støv. Denne typen prøvetaking skal være grei nok og er i henhold til Malverns instruksjoner. Det finnes utstyr som roterende splitter, som vil minske usikkerheten enda mer, men dette var ikke tilgjengelig.

3.4 K_{st} verdier

For å bestemme P_{max} og dp/dt for et gitt stoff kjøres det tre serier i henhold til manualen for 20 liter apparat fra Cesana og Siwek [27]. Den første serien starter ved 60 g/m^3 og øker gradvist. Den første serien består av disse konsentrasjonene: 60 g/m^3 , 125 g/m^3 , 500 g/m^3 , 750 g/m^3 , 1750 g/m^3 , 1750 g/m^3 , 1000 g/m^3 , 1250 g/m^3 og 1500 g/m^3 . I denne masteren er det og gjort tester ved konsentrasjoner som er høyere en disse for å skaffe mer data. Når toppunktene til P_{max} og dp/dt er bestemt blir det kjørt to nye serier på tre tester hver, konsentrasjonene som benyttes i disse testene er toppunkt-konsentrasjonen i tillegg til konsentrasjonene før og etter toppunktet, dersom toppunktet for P_{max} ligger ved 1000 g/m^3 vil serie 2 og 3 inneholde tester ved 750 g/m^3 , 1000 g/m^3 og 1250 g/m^3 . Dersom det er variasjon på mer en 10% på toppunktet i de tre seriene må man gjennomføre minst en serie til. For å bestemme makstrykk og maksimal trykkstigning tar man snittet av de tre serienes respektive toppverdier. Det samme gjøres for konsentrasjonen til makspunktet, manualen fra Siwek er brukt, [27].

3.5 Test av fuktighet

For å teste om det er en betydelig mengde fuktighet i prøvene ble en mengde støv plassert i et varmekammer og varmet til 75 grader celsius i ett døgn. Prøven ble veid før og etter tørking og lang tid etter tørking.

3.6 Partikkelstørrelseanalyse

Partikkelstørrelsesanalysen ble gjort av Elkem med Malvern. Dette apparatet bruker isopropanol som suspenderingsvæske, et viktig moment da metaller kan reagere med vann.

3.7 Analyse av kjemisk sammensetting av de forskjellige støvene

For å analysere den kjemiske sammensetningen av de forskjellige støvene er det brukt en XRF analyse med glasstablett metode. Denne metoden bruker noen få gram av støvet som kjøres gjennom en røngten analyse.

3.8 XRD analyse av produktene

Det ble planlagt å gjøre analyse av produkter fra eksplosjoner med forskjellige konsentrasjoner, for å finne ut hvilke av forskjellige oksidene som dannes ved forskjellige konsentrasjoner og skaffe mer data til diskusjon og modellering av støvekspløsionen. Planen var å begrense analysen til type oksider, da produktene består av mye amorft, som metoden ikke klarer å ta hensyn til. Analysen skulle gjøres med hjelp av et XRD apparat på UiB sitt XRF-laboratorie, men apparatet var ute av drift mens eksperimentene foregikk og det gikk derfor ikke an å gjøre nødvendige analyser.

XRD står for X-ray diffraction og er en allsidig analysemetode som kan brukes til å analysere molekyler på en kvantitativ måte. Analysen går ut på å identifisere materiale basert på diffraksjonsmønsteret og sammenligne dette mønsteret med tilgjengelige mønster i en database[28] [29].

I artikkelen "Characterization of nanomaterial used in nanobioremediation"[30] ble det foretatt XRD analyse av sink pulver fra et posefilter, hvor det ble påvist sinkoksid. Noe som viser at XRD analyse er brukbart på metalloksid.

3.9 Finne støkiometrisk konsentrasjon og konsentrasjon ved ufullstendig forbrenning

Støkiometrisk konsentrasjon er det forholdet mellom reaktant og oksid i en kjemisk reaksjon som gir fullstendig forbrenning, for eksempel vil den støkiometriske konsentrasjonen for silisium være den konsentrasjonen som gir fullstendig forbrenning til SiO_2 . Det er viktig å vite den støkiometriske konsentrasjonen for å kunne sammenligne testresultater og når flere metaller brenner likt må den regnes ut litt annerledes. Metaller har gjerne flere oksider som kan dannes og det er også definert en annen konsentrasjon, ufullstendig konsentrasjon som er den konsentrasjonen der det oksidet med minst oksygen mot metall dannes, i denne oppgaven gjelder dette for silisiummonoksid og jernmonoksid.

For å finne den støkiometriske konsentrasjonen bruker man luftens oksygeninnhold i mol per kubikk ganget støvets molare masse og støkiometrisk forhold mellom støv og luft. Da den molare massen en så lenge er ukjent må man finne denne først. Dette blir gjort ved å ta målingene fra xrd analysen, si at masseprosentet er det samme som masse for enkelthetens skyld, omgjøre massen til mol og dele den totale massen på den totale molmengden. Dette er vist matematisk nedenfor for støvet sykklon-patronfilter.

$$\frac{m_{Mg} + m_{Fe} + m_{Si} + m_{Ca} + m_{Al}}{N_{Mg} + N_{Fe} + N_{Si} + N_{Ca} + N_{Al}} = M_{stv} \quad (3.1)$$

Syklon-patronfilterstøvet har denne konsentrasjonen:

$$8,27g_{Mg} = 0,340Mol_{Mg}$$

$$0,757g_{Al} = 0,028mol_{Al}$$

$$3,07g_{Ca} = 0,0,077mol_{Ca}$$

$$36,8g_{Fe} = 0,659Mol_{Fe}$$

$$44,6g_{Si} = 1,588mol_{Si}$$

Den totale massen er da her 96,1g, som tilsvarer 2,7602mol. Dette gir en molar masse på 34,82g/mol for støvet. Ved ufullstendig konsentrasjon er det omtrent 1:1 i forhold mellom metaller og oksygen, Ved høy konsentrasjon er det 1:1,68. det er 8,59 mol oksygen per kubikk luft.

Reaksjonsligningen for sykklon-patronfilterstøvet er:

$$0,34n_{Mg} + 0,659n_{Fe} + 1,588n_{Si} + 0,0,077n_{Ca} + 0,028n_{Al} + (0,34 + 0,659 + 1,588 + 0,0,077 + \frac{2}{3} * 0,0) \quad (3.2)$$

Oksygenmengden her tilsvarer mengden som trengs for å få fullstendig forbrenning ved høy konsentrasjon av støv, på $n_{O_2} = 4,53$. Dette gir et forhold på:

$$n_{stv} : n_{O_2} = 2,85 : 4,53 = 1 : 1,59$$

den støkiometriske konsentrasjonen for syklon-patronfilter blir da:

$$C_{stk} = C_{O_2} * \frac{n_{stv}}{n_{O_2}} = 8,59 * \frac{1}{0,5} = 17,18$$

$$C_{stk} = 17.18 \text{ mol/m}^3 = 598.21 \text{ g/m}^3$$

For den andre støkiometriske konsentrasjonen brukes samme formelen, men med et annet forhold mellom støvet og oksygenet, som følge av at oksidene har mer oksygen per metallatom.

$$0,34n_{Mg} + 0,659n_{Fe} + 1,588n_{Si} + 0,0,077n_{Ca} + 0,028n_{Al} + (0,34 + \frac{4}{3}0,659 + \frac{2}{1}1,588 + 0,0,077 + \frac{2}{3} * 0,028)n_{O_2} = 0,34n_{MgO} + 0,22n_{Fe_3O_4} + 1,588n_{SiO_2} + 0,0,077n_{CaO} + 0,0255n_{Al_2O_3}$$

Her blir da forholdet mellom støv og oksygen:

$$n_{stv} : n_{O_2} = 2,7602 : 4,556 = 1 : 1,651$$

Den støkiometriske konsentrasjonen for ufullstendig konsentrasjon blir da:

$$C_{stk} = C_{O_2} * \frac{n_{stv}}{n_{O_2}} = 8,59 * \frac{1,651}{1} = 14,18$$

$$C_{stk} = 14.18 \text{ mol/m}^3 = 493.82 \text{ g/m}^3$$

Når man gjør dette for de resterende tre støvene får man disse verdiene:

Støv	Ufullstendig konsentrasjon	Støkiometrisk konsentrasjon
Patronfilter	432.62 g/m ³	273.99 g/m ³
Syklon-patronfilter	500.30 g/m ³	299.94 g/m ³
FSM finside	508.20 g/m ³	302.35 g/m ³
FeSi55	538.30 g/m ³	305.50 g/m ³

Tabell 3.1: Støkiometrisk og ufullstendig konsentrasjon for de fire støvene, utregning ligger i vedlegg 2

Kapittel 4

Resultat

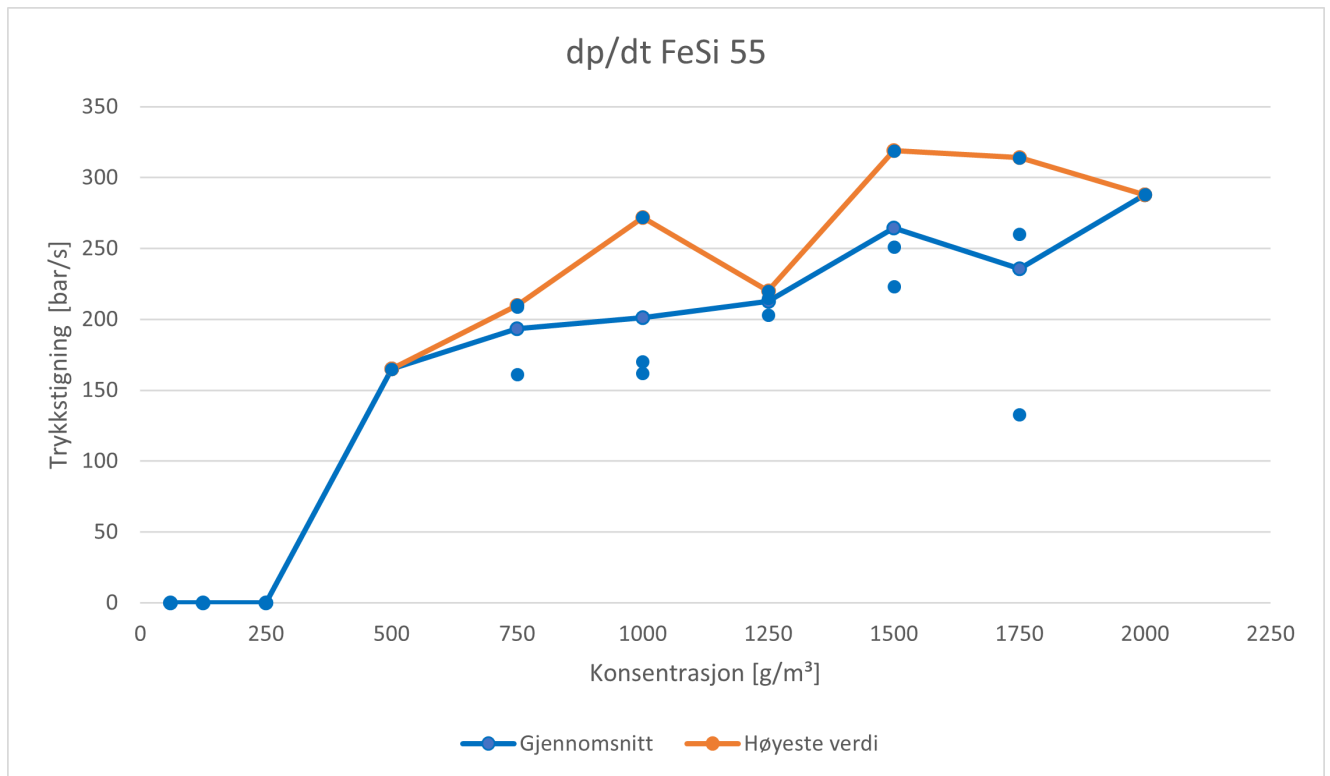
4.1 Resultat fra 20 liter eksplosjonskammeret

I dette delkapittelet representeres resultatene fra eksperimentene i 20 liters Siwek sfæren. Figurene inneholder alle testene for sine respektive støv. Det er også lagt ved støkiometrisk konsentrasjon og ufullstendig konsentrasjon som referansepunkt. De fire støvene i oppgaven er tatt fra forskjellige relevante deler av anlegget på Elkem Bjølvfossen og navnene skal til en viss grad vise hvor de er hentet fra. FeSi55 og Posefilter FSM er hentet fra to forskjellige posefilter, FSM syklon til patron er hentet fra en syklon som tar ut en stor andel av de groveste partikkelene, mens FSM patronfilter er hentet fra patronfilteret som står etter syklonen og inneholder derfor de fineste partikkelene. Alle resultatene legges også ved i vedlegg 1.

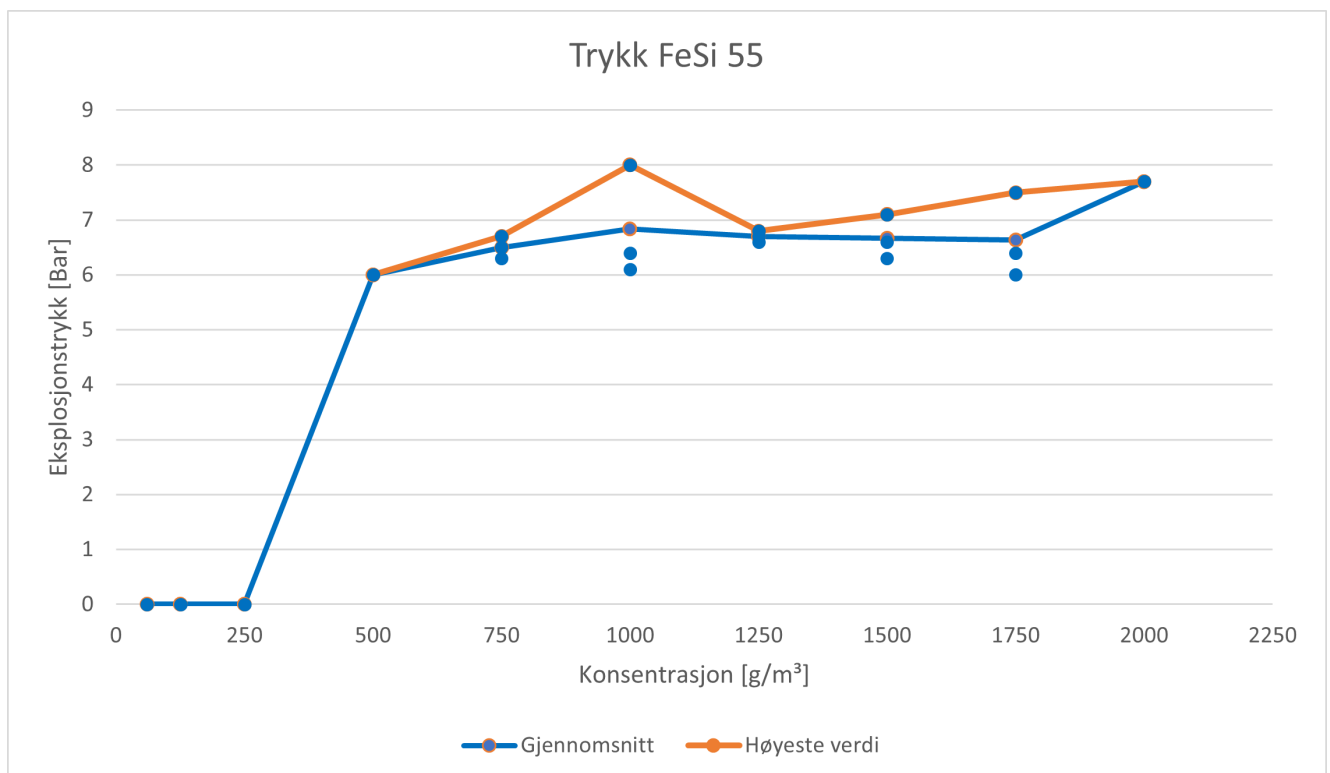
4.1.1 FeSi 55

Figur 4.1 viser maksimal trykkstigningshastighet. De tre høyeste trykkstigningshastighetene for hver serie ligger ved 1000 g/m^3 , 1750 g/m^3 og 1500 g/m^3 , med verdi på 272, 314 og 319. Maksimal trykkstigningshastighet blir da 302 bar/s ved 1250 g/m^3 er alle tre testene veldig jevne i forhold til verdiene rundt.

Figur 4.2 viser makstrykket for støvet FeSi55. De tre høyeste maksimaltrykkene for hver serie ligger ved 1000 g/m^3 , 1250 g/m^3 og 1500 g/m^3 , med verdi på 8, 6,7 og 7,1. Mellom 3,3 og 4,9 ganger høyere en støkiometrisk. Makstrykket er 8 Bar ved 1000 g/m^3 . Maksverdikurven ligger ganske jevnt med gjennomsnittskurven, med unntak av den høyeste verdien på 8 Bar ved 1000 g/m^3 .



Figur 4.1: viser trykkstigningshastigheten til støvet FeSi 55

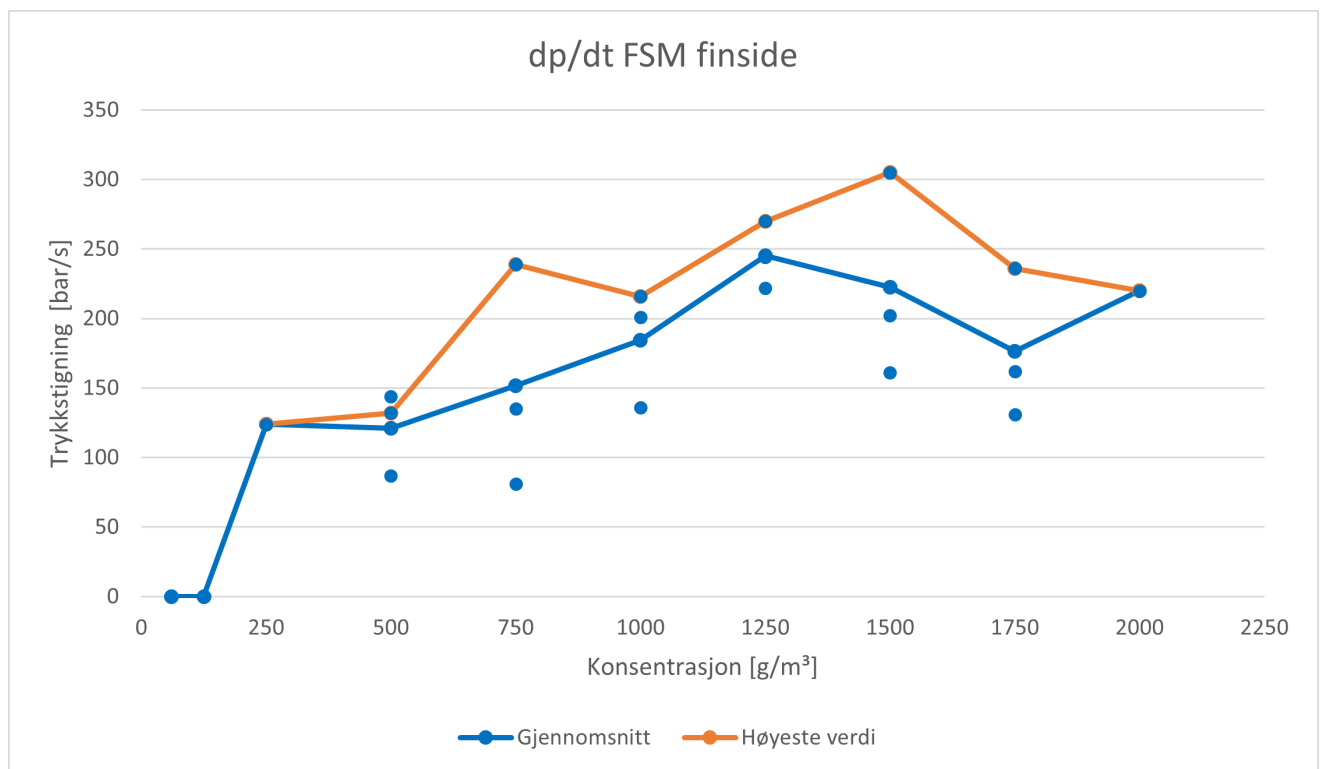


Figur 4.2: viser trykkkurven til støvet FeSi 55

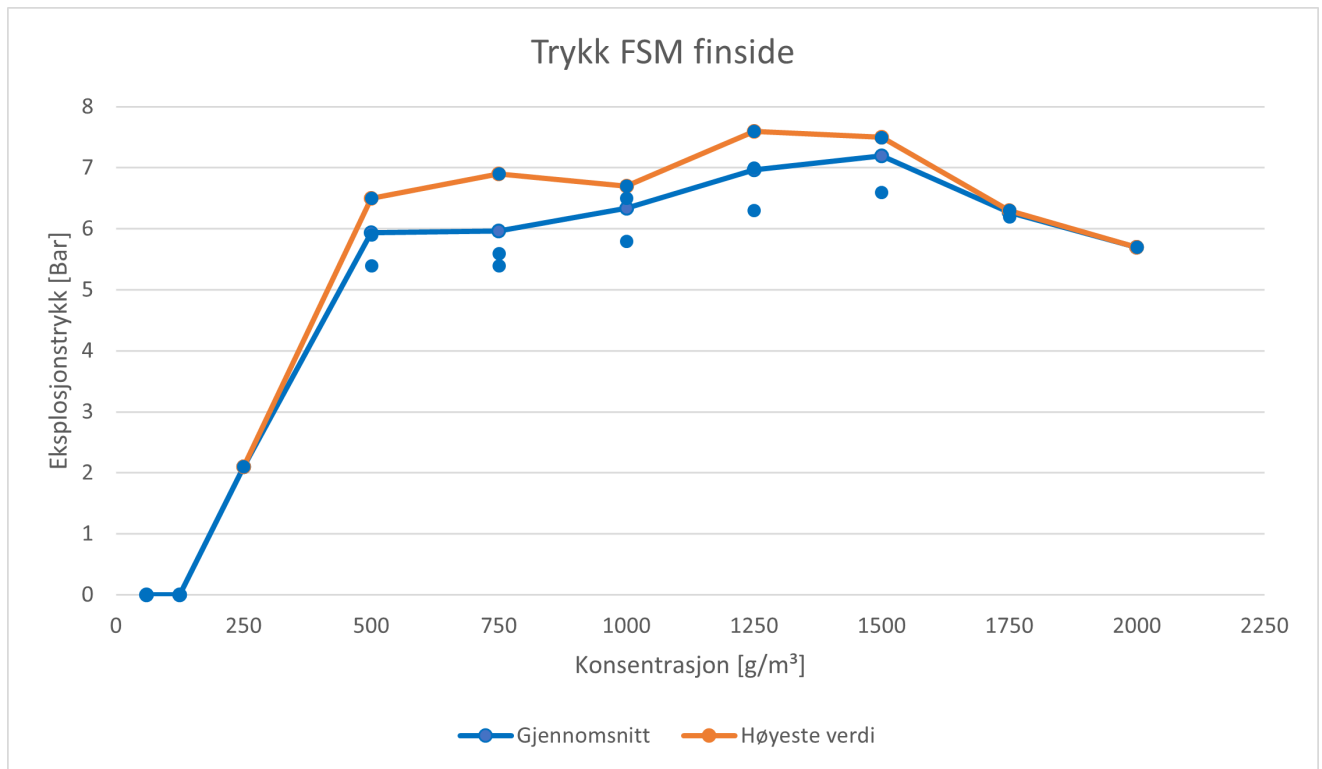
4.1.2 FSM finside

Figur 4.3 viser maksimal trykkstigningshastighet. To av de tre høyeste trykkstigningshastighetene for hver serie ligger ved 1250 g/m³g og en ligger på 1500 g/m³g, med verdier på 270 Bar/s, 244 Bar/s og 305 Bar/s. Dp/dtmaks blir da 273 ved 1333g, med 10% feilmargin. Maksverdikurven er mye mer ujevn en gjennomsnittskurven og ved konsentrasjonene 750 g/m³g og 1750 g/m³g er det betydelig variasjon.

Figur 4.4 viser makstrykket til støvet FSM finside. De tre høyeste maksimaltrykkene for hver serie ligger ved 1000 g/m³, 1250 g/m³ og 1500 g/m³, med verdier på 6,7 Bar, 7,6 Bar og 7,5 Bar, Dette er fire og fem gange så høy konsentrasjon som støkiometrisk. Makstrykket er 7,6 Bar ved 1250 g/m³g, med 10% feilmargin. maksverdikurven ligger ganske jevnt med gjennomsnittskurven.



Figur 4.3: viser trykkstigningshastigheten til støvet FSM finside

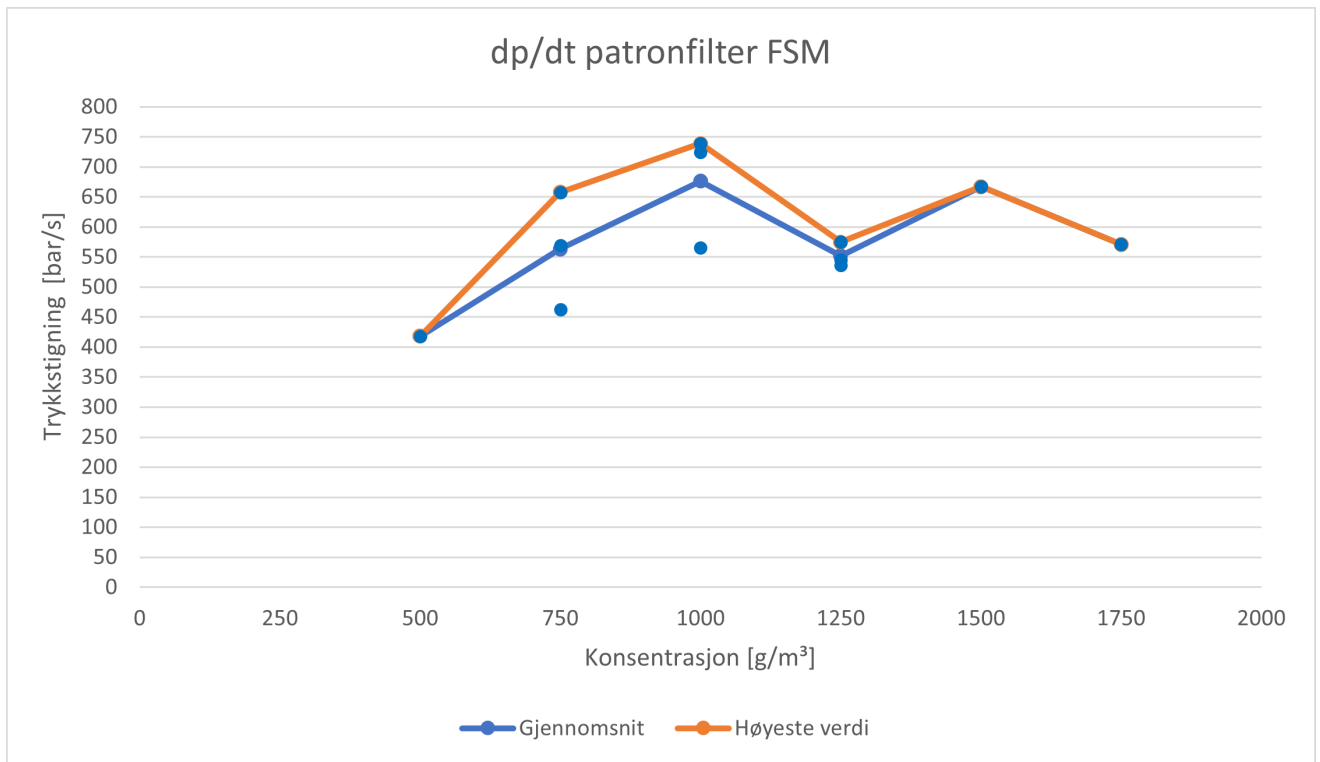


Figur 4.4: viser trykkkurven til støvet FSM finside

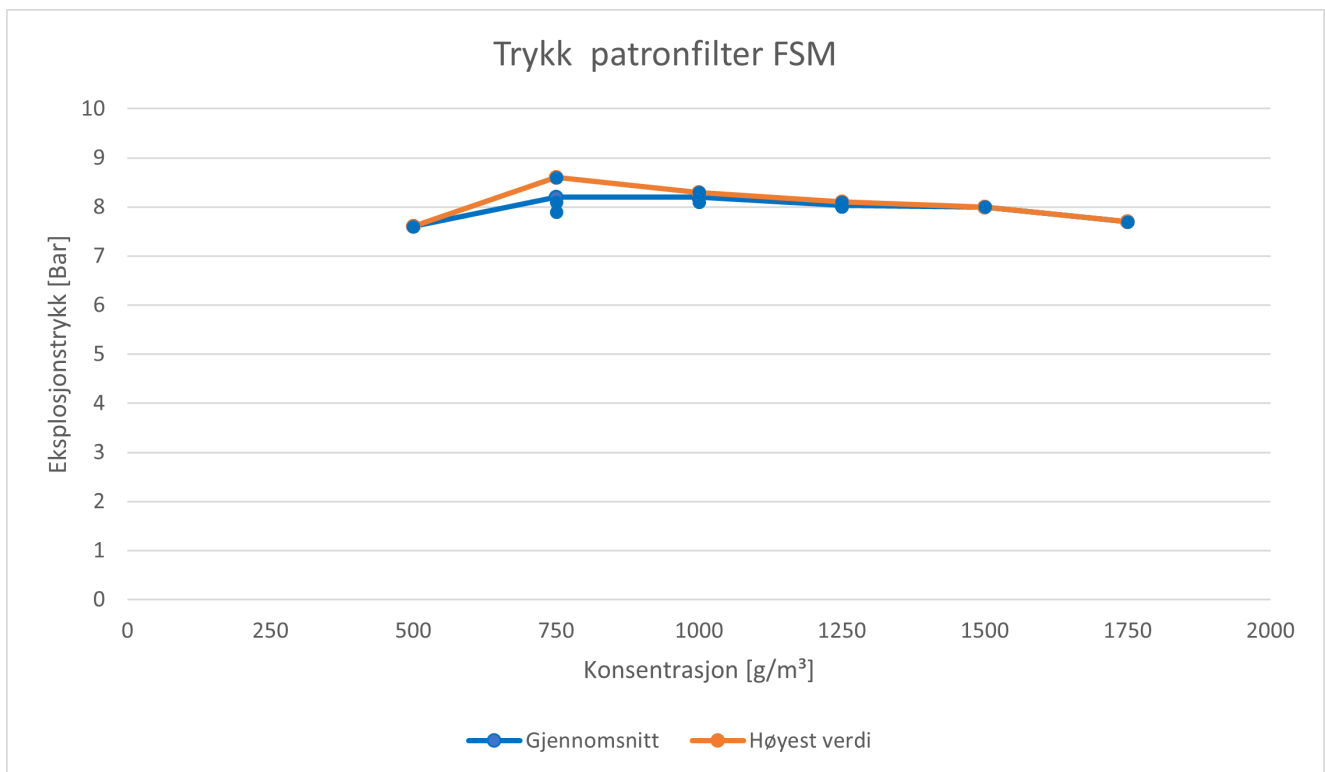
4.1.3 Patronfilter FSM

Figur 4.5 viser maksimal trykkstigningshastighet. De tre høyeste trykkstigningshastighetene for hver serie ligger ved 1000 g/m³, 1000 g/m³ og 569g, med verdi på 739, 725 og 569 Bar/s. Maksimal trykkstigningshastighet blir da 6,77 Bar/s ved 917g. Maksverdikurven ligger veldig jevnt med gjennomsnittskurven og det er et hakk i begge kurvene ved 1250 g/m³g.

Figur 4.6 viser makstrykket for støvet Patronfilter FSM. De tre høyeste maksimaltrykkene for hver serie ligger ved 1000 g/m³, 750 g/m³ med verdi på 8,3 8,6, og på den siste serien fikk alle tre testene, med konsentrasjoner på 750 g/m³, 1000 g/m³ og 1250 g/m³, samme trykk på 8,1. Mellom 2,7 og 3,7 ganger høyere en støkiometrisk. Makstrykket er 8,3 Bar ved 1000 g/m³g. Maksverdikurven ligger veldig jevnt med gjennomsnittskurven.



Figur 4.5: viser trykkstigningshastigheten til støvet patronfilter FSM. Da dette var det siste støvet som ble testet ble det ikke foretatt tester ved 60, 125 og 250 g/m³ for å spare tennere. Det ble bestemt å starte ved 500 g/m³ i forhold til resultater fra de andre testene samt den utregnede støkiometriske konsentrasjonen til støvet.

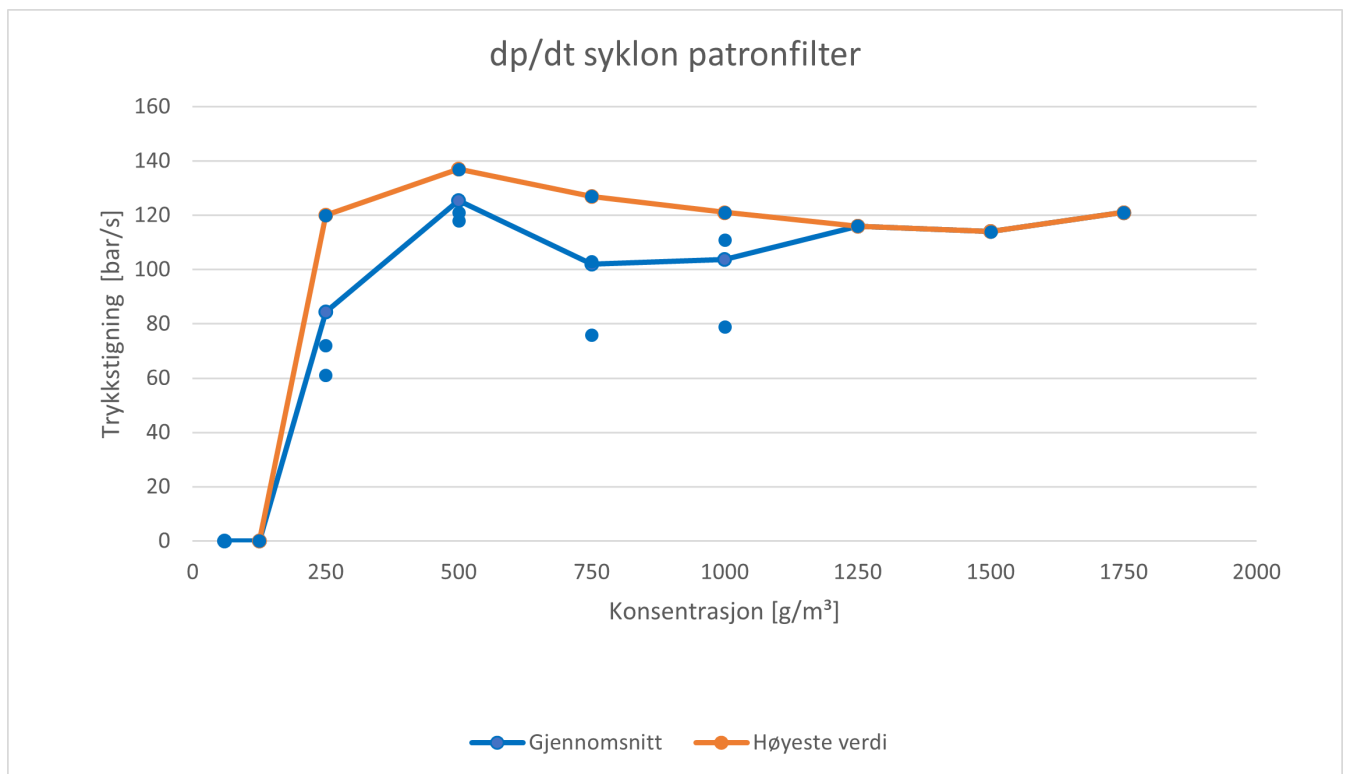


Figur 4.6: viser maksimaltrykket for støvet patronfilter FSM

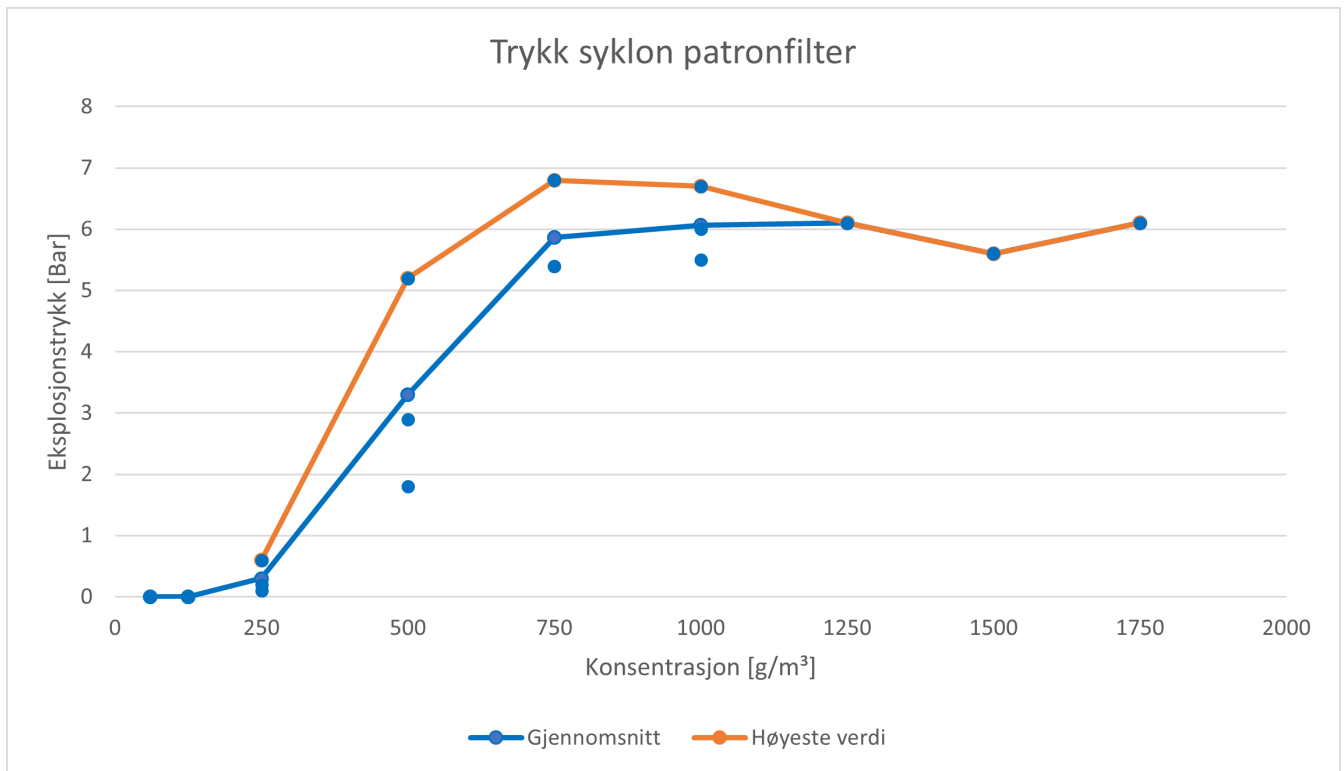
4.1.4 Syklon patronfilter

Figur 4.7 viser maksimal trykkstigningshastighet. De tre høyeste trykkstigningshastighetene for hver serie ligger ved 500 g/m^3 , 500 g/m^3 og for den tredje serien har konsentrasjonene 500 g/m^3 og 1000 g/m^3 samme trykkstigningshastighet, med verdier på 137 Bar/s, 118 Bar/s og for den tredje serien 121 Bar/s. $Dp/dtmaks$ blir da 125 Bar/s ved 583g, med 10% feilmargin. Maksverdikurven holder seg generelt ganske jevnt, men ved 500g har gjennomsnittskurven en høyere verdi enn rundt.

Figur 4.8 viser makstrykket til støvet Syklon patronfilter. De tre høyeste maksimaltrykkene for hver serie ligger ved 750 g/m^3 , og to på 1000 g/m^3 , med verdier på 6,8 Bar, 6 Bar og 6,7 Bar, Dette er 2,5 og 3,33 ganger så høy konsentrasjon som støkiometrisk. Makstrykket er 6,8 Bar ved 750 g/m^3 .



Figur 4.7: viser trykkstigningshastigheten til støvet syklon patronfilter FSM



Figur 4.8: viser trykket til støvet syklon-patronfilter FSM

4.2 Resultat fra Malvern

	D50	D10	D90	D[3:2]	D[4:3]	SSA
FSM Patronfilter BJO	8,41	1,74	23,6	3,94	10,9	653,7
Finside Posefilter FeSI	24,1	4,9	81,3	10,8	36,5	238,4
Finside Posefilter FSM	43,5	5,75	117	12,9	53,7	200,3
FSM Syklon til patronfilter	53,7	20,4	194	40,1	85	64,2

Tabell 4.1: Partikkelstørrelsesfordelingen til de fire støvene i masteroppgaven med støv fra minst til størst. Det er stor differanse fra det minste støvet, patronfilter FSM og Syklon til patronfilter FSM. Analysen er gjort av Elkem.

4.3 Resultat fra XRF-analyse

"Analysis - Unit - Method"	Patronfilter FSM	Syklon til patronfilter FSM	Finside Posefilter FSM	Finside Posefilter FeSi55
Mg % XRF	>10(18%)	8,3	7,3	2,2
Al % XRF	1,0	0,8	0,8	1,2
Ca % XRF	>5,1 (ca 5,4)	3,1	2,9	0,9
Fe % XRF	23,1	36,8	38,8	39,4
Si % XRF	42,8	44,6	46,2	51,9
O % Combustion	1,4	0,6	0,6	1,0
Total	91,7	95,0	96,8	96,6

Tabell 4.2: Denne tabellen viser mengden av forskjellige grunnstoffene i de fire støvene med en gyldig desimal. Det er kun hovedelementene som er tatt med, sporelementer på under 0,5% er ikke med. Patronfilter FSM har en veldig stor grad av magnesium og kalsium, som bidrar til å gjøre støvet mer brennbart. O% Combustion sier hvor stor prosentandel av støvet som allerede har oksidert, dette kommer for det meste av overflateoksid.

4.4 Varmekammertest

Fra varmekammer: for fuktighetstesten ble en støvmengde lagt på en plastdisk og plassert i varmekammeret over natten for å sjekke om massen endret seg. Vekten endret seg ikke i noen spesiell mengde, som betyr at mengden vann i støvet er tilnærmet lik luftfuktigheten. Dette stemmer overens med teorien om at metall ikke tar til seg vann. 70 grader i 24 timer. Sjekket deretter vekten på nytt. På bildene er det FeSi 55 i den rene skålen og patronfilter FSM i den skitne skålen. Det ble målt opp 30g i hver, og i tillegg vises vekten til skålen.



Figur 4.9: viser de to støvprøvene før de ble satt i varmekammeret.



Figur 4.10: viser de to støvprøvene rett etter at de ble tatt ut av varmekammeret.

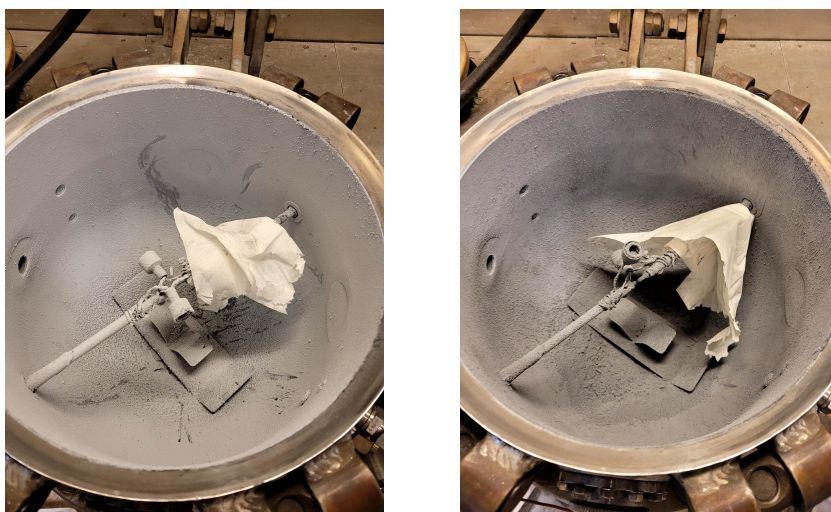


Figur 4.11: viser de to støvprøvene etter å ha stått ute i rommet en stund.

	støv 1	støv 2
Før varmekammer	32,47g	32,36g
rett etter varmekammer	32,45g	32,35g
ei stund etter varmekammer	32,47g	32,37g
Differanse mellom før og etter	0,02g	0,01g
Differanse mellom før og etter	0,67%	0,33%

Tabell 4.3: Vektene fra forsøket

4.5 Bilder av produktene etter test

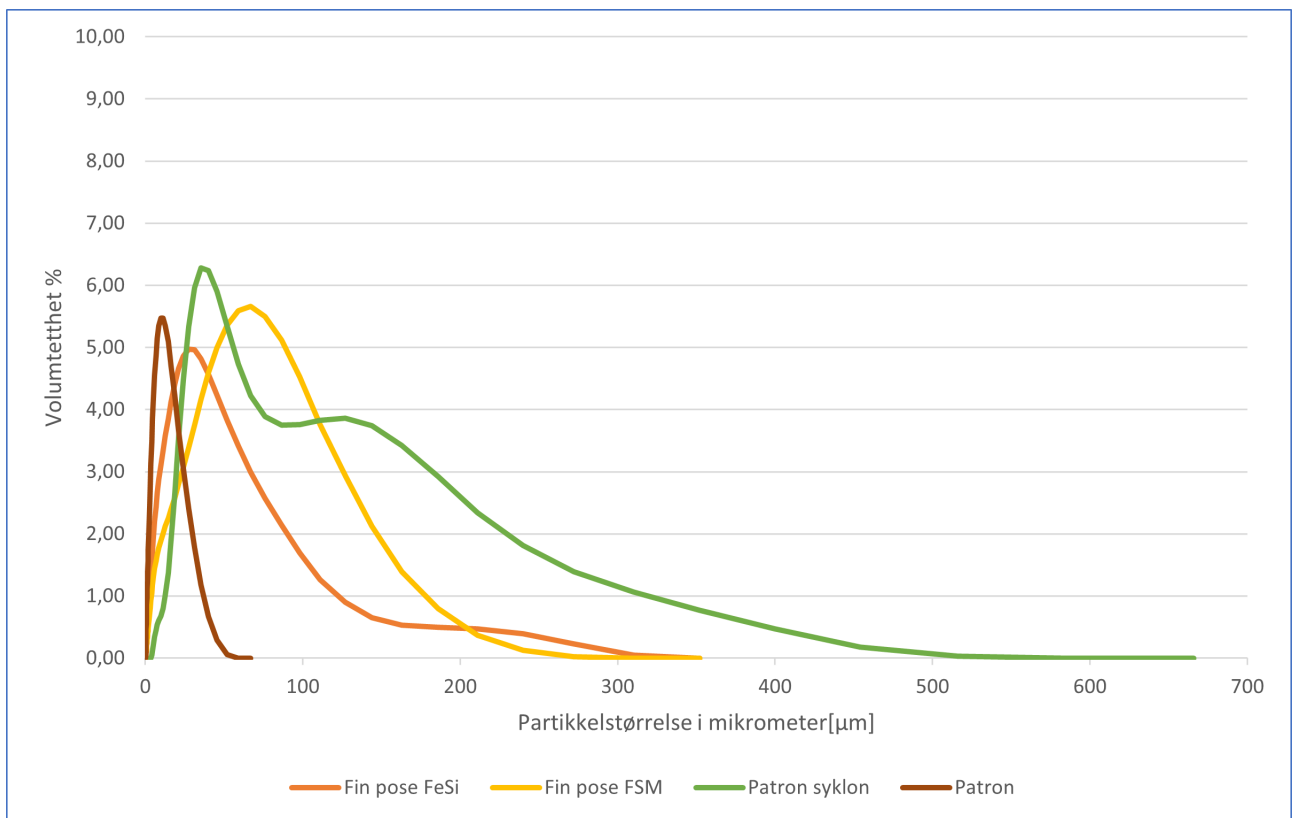


Figur 4.12: viser fargen av produktene etter tester. Det er også blitt blåst inn luft for å bli kvitt det støvet som befant seg i kammeret før neste forsøk, derfor er det ikke nupper her.

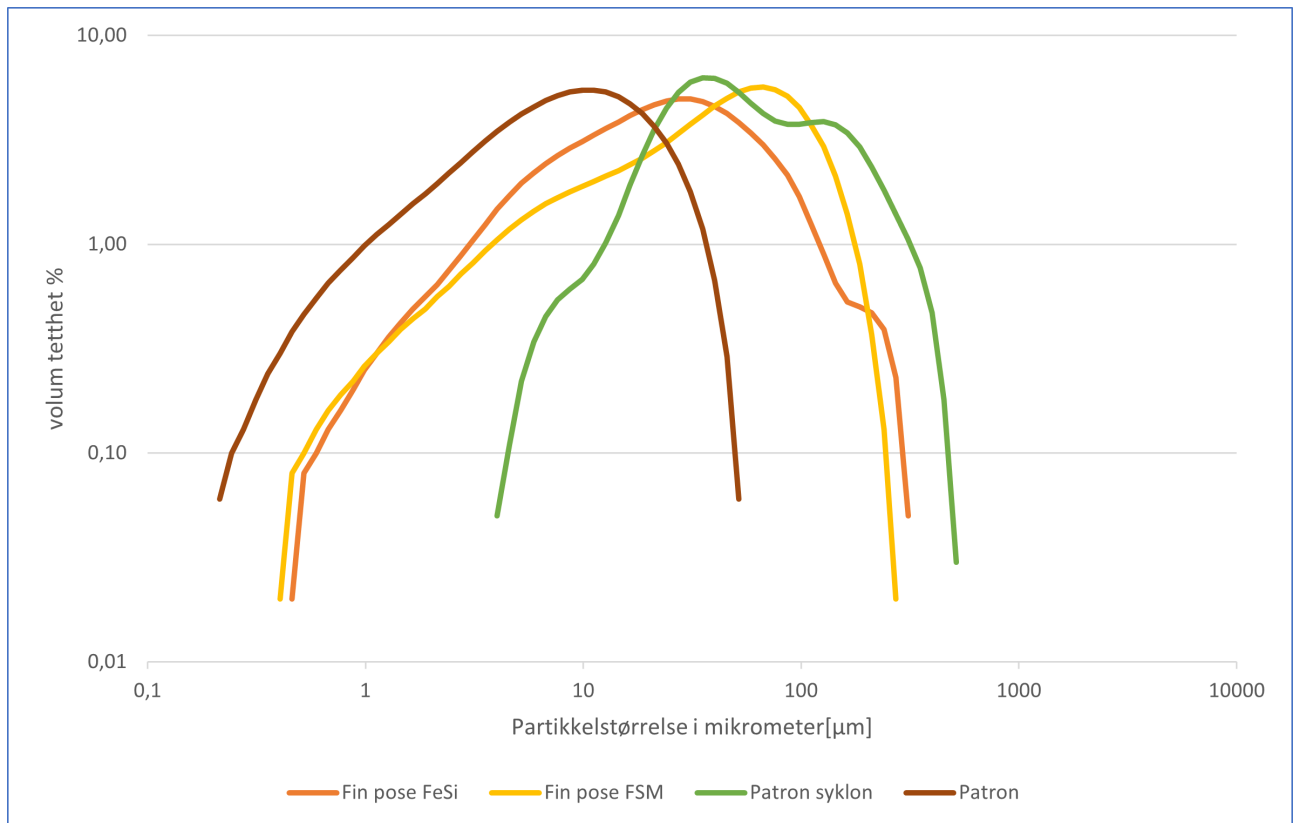


Figur 4.13: viser et bilde av produktene fra en test ved 750 g/m^3 per kubikk og en tydelig oransje farge. Dette skjedde noen få ganger ved konsentrasjoner på 750 g/m^3 og 1000 g/m^3 , men det var ikke reproduserbart.

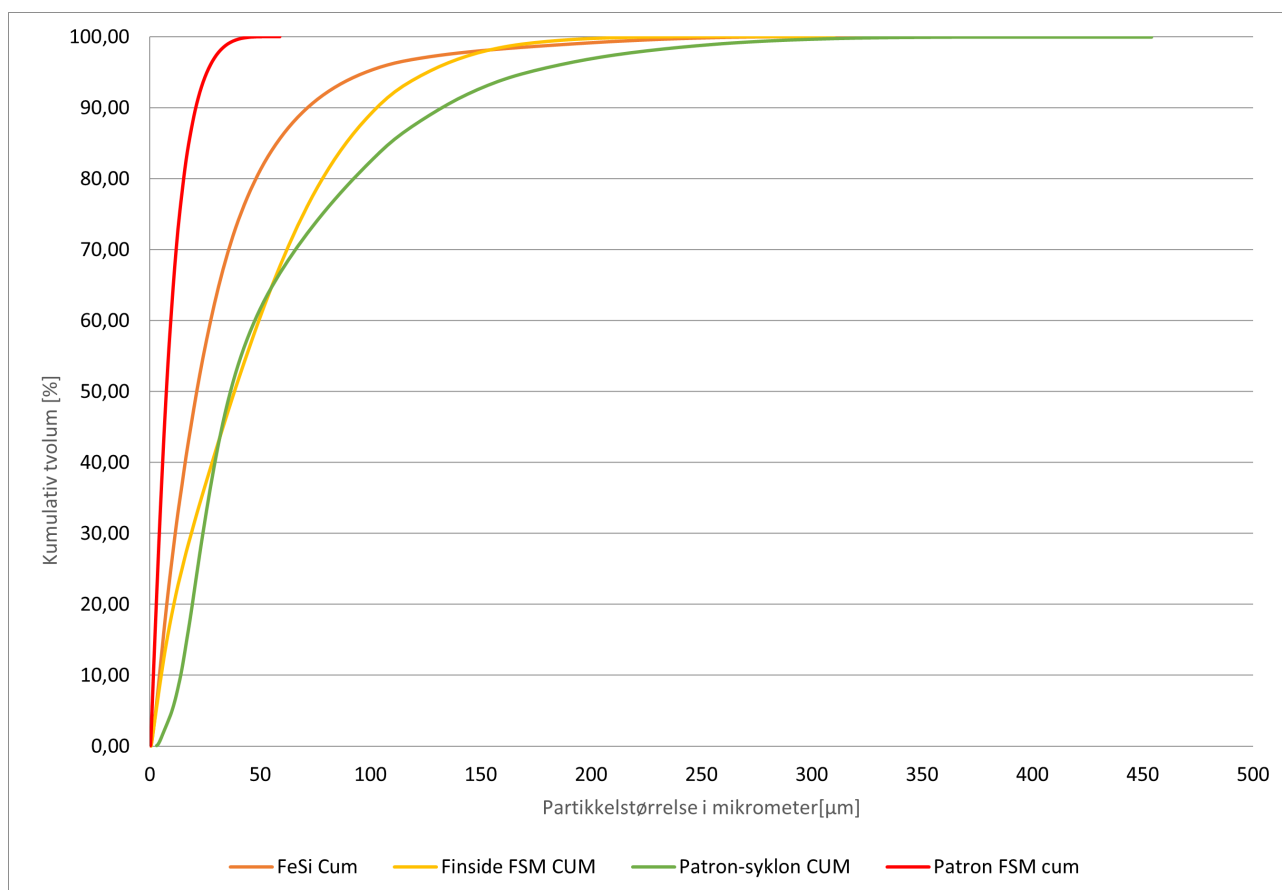
4.6 Partikkelstørrelsesfordeling fra Malvern



Figur 4.14: viser partikkelstørrelsesfordelingen til de fire støvene.



Figur 4.15: viser partikkelstørrelsesfordelingen logaritmisk.



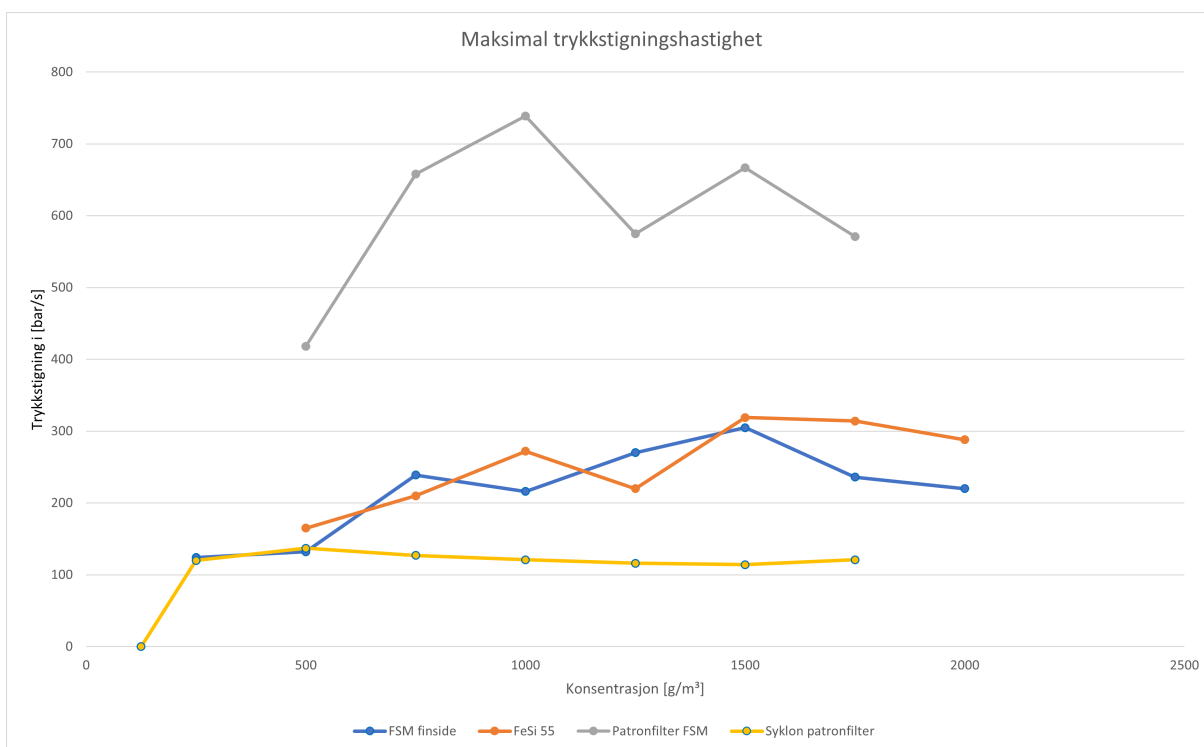
Figur 4.16: viser partikkelstørrelsesfordelingen i kumulativ form.

Kapittel 5

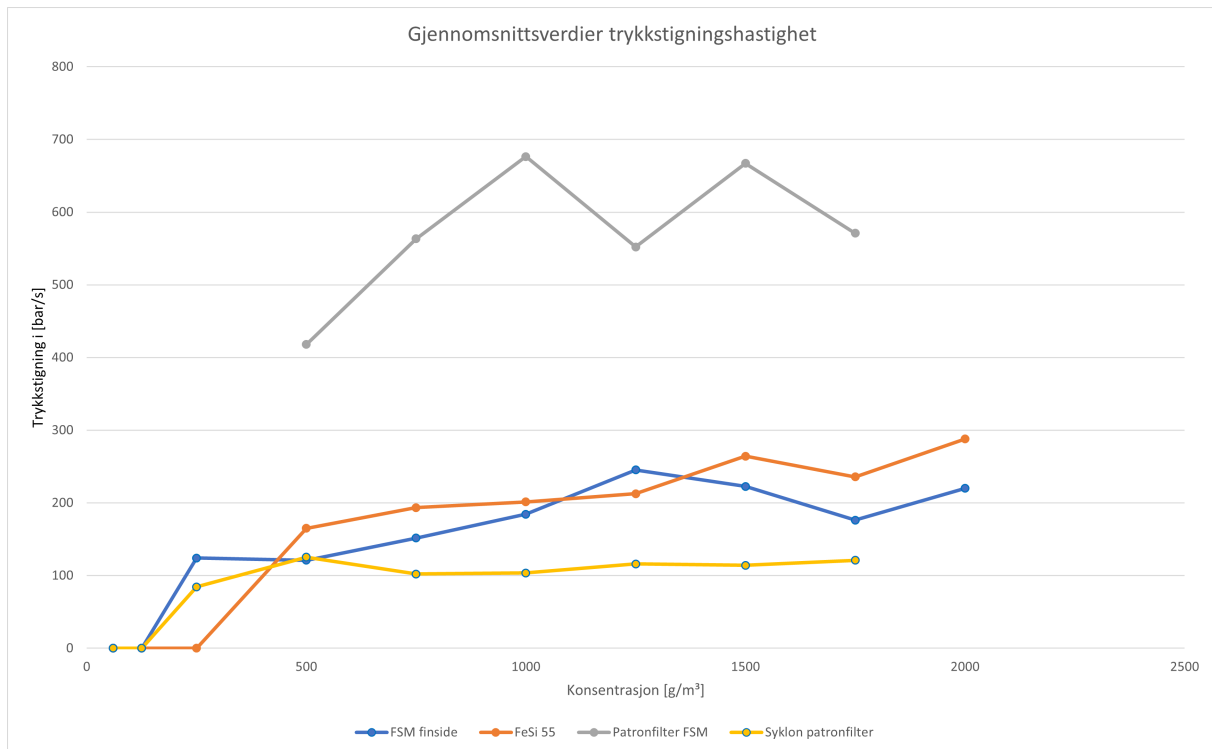
Diskusjon

5.1 Sammenligning av verdier for alle støvene

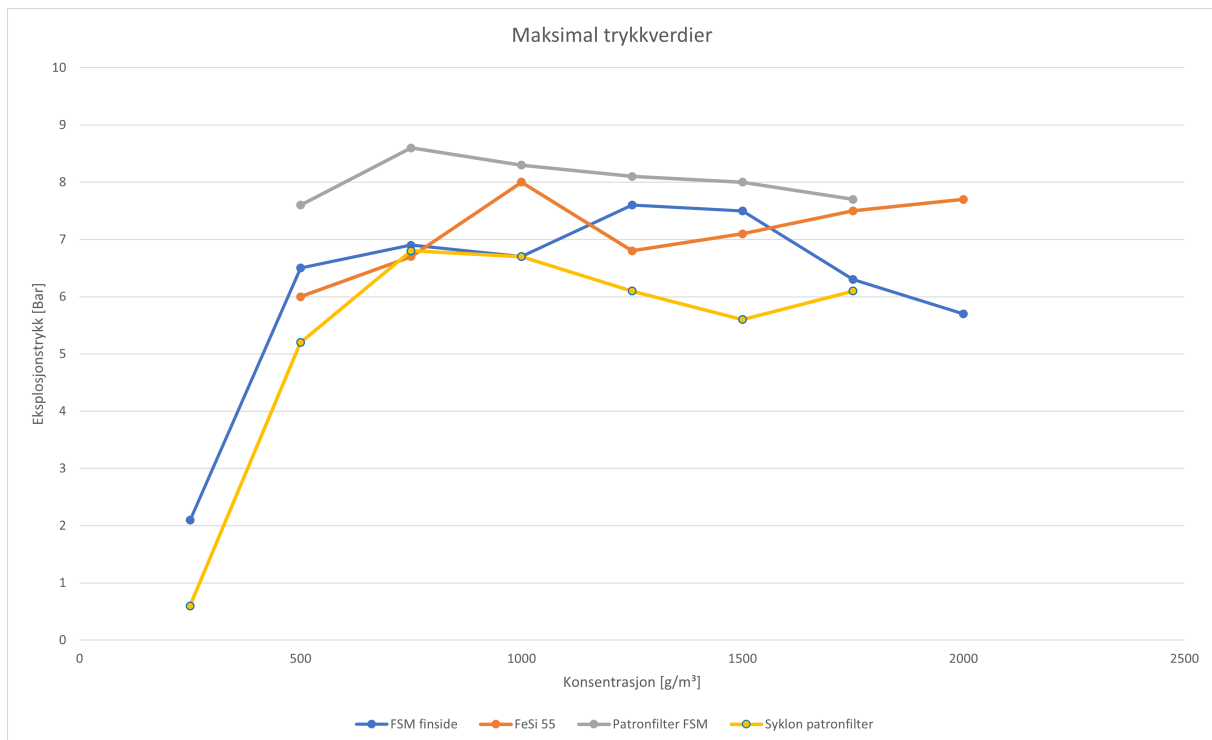
Da det ikke var noen tidligere erfaring med eksperimentering i Siwek sfære er flere tester gjort for å oppnå erfaring. Dette fører til at noen testserier er gjort over flere konsentrasjoner en det som er vanlig og går over det manualen sier. For å spare tennere og tid ble det også valgt å ikke kjøre tester på de laveste konsentrasjonene for patronfilter FSM og FeSi55. For gjennomsnittskonsentrasjonene er det også tatt med punkt på konsentrasjoner det kun ble gjort 1 test ved, for å få en mer tydelig graf. Alle sammenligninger ligger også i vedlegg 2.



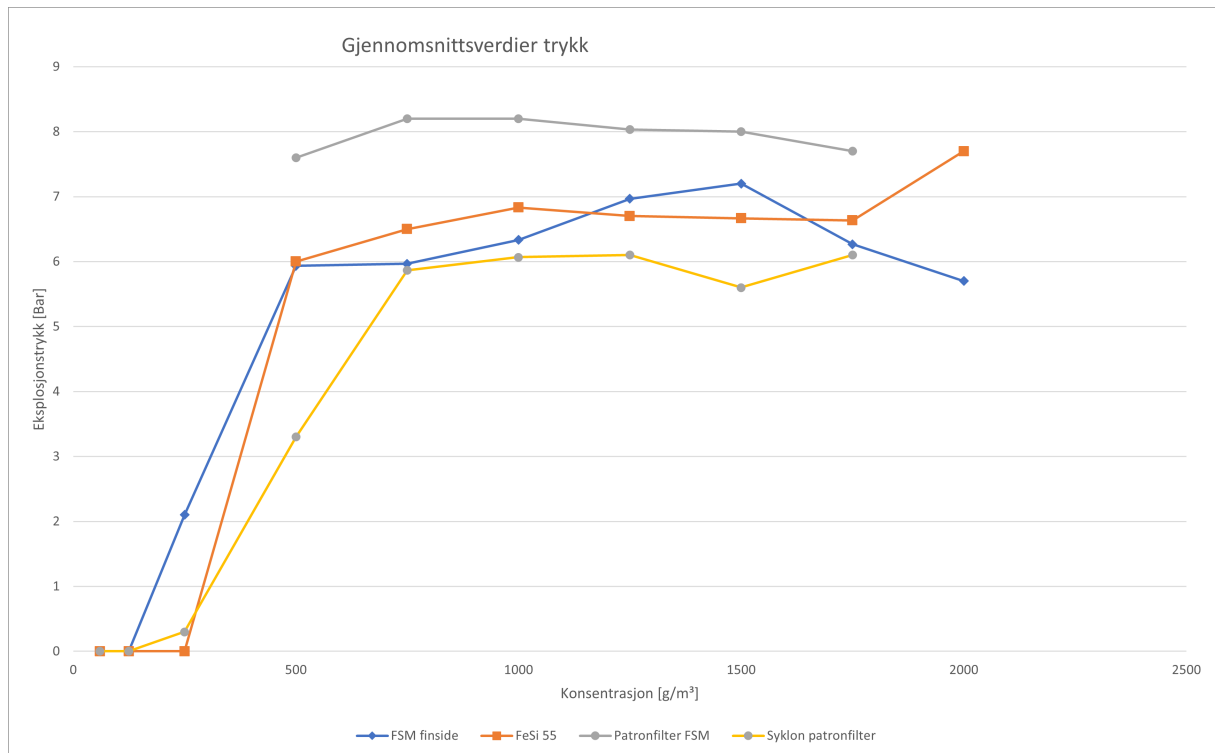
Figur 5.1: viser den maksimale trykkstigningshastigheten for alle støvene ved ulike konsentrasjoner.



Figur 5.2: viser den høyeste gjennomsnittelige konsentrasjonen for alle støvene ved ulike konsentrasjoner.



Figur 5.3: viser maksimaltrykket for alle støvene ved ulike konsentrasjoner.



Figur 5.4: viser gjennomsnittelig trykk for alle støvene ved ulike konsentrasjoner.

5.2 K_{st} -verdi og P_{max} fra testene

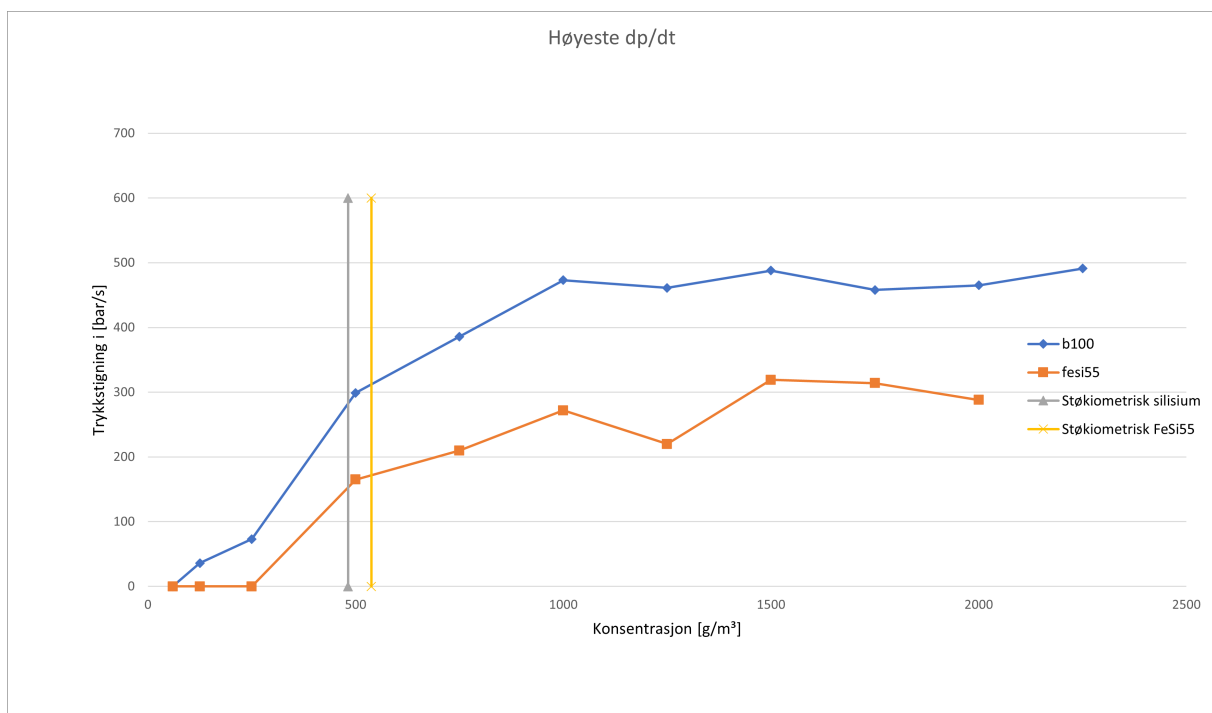
K_{st} -verdien er utregnet ved å bruke en faktor som samsvarer med volumet testene har tatt sted i, for 20,5 liter er denne faktoren 0,274. Faktoren for 20,5 liter er valgt i stedet for faktoren for 20 liter for nøyaktighet.

Støv	K_{st} -verdi [$Bar/m * s$]	P_{max} [Bar]
FeSi55	82,6	8,46
FSM finside	70,4	8
Patronfilter	185,5	9,494
Syklon-patronfilter	34,3	6,9

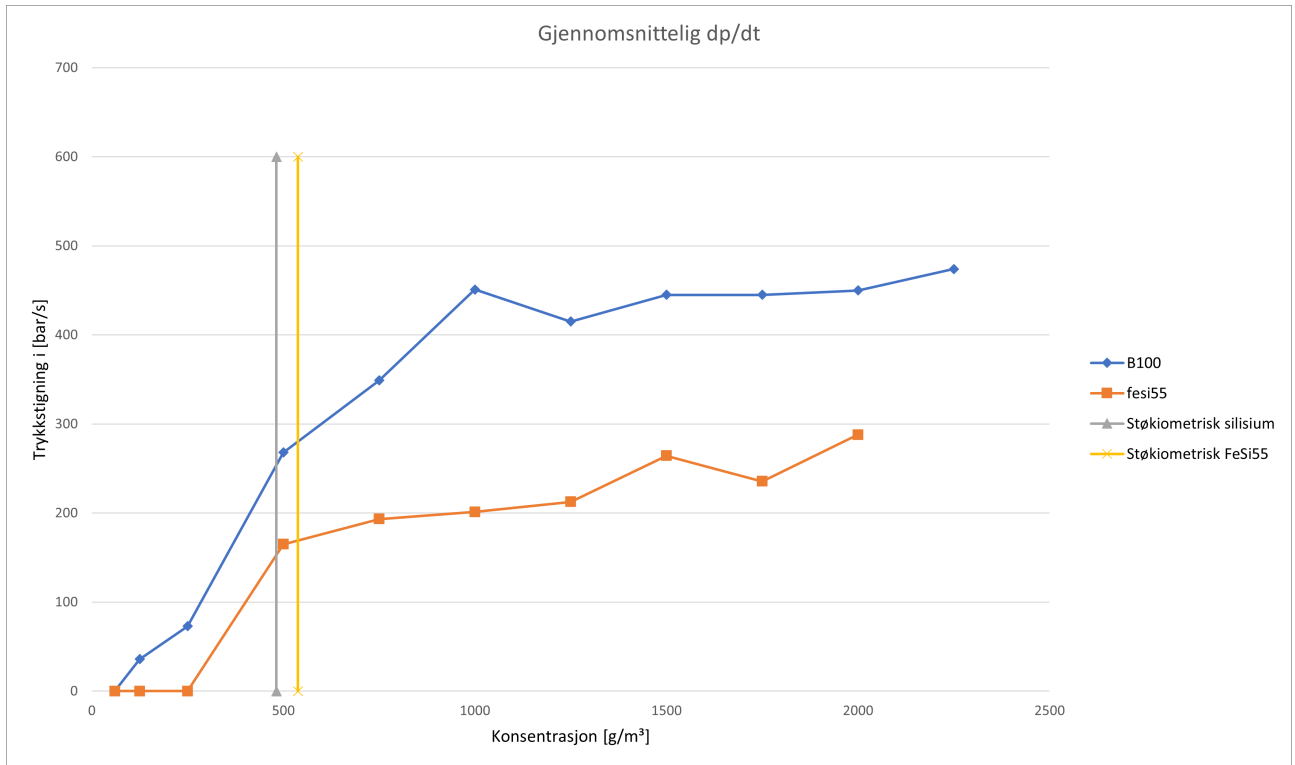
Tabell 5.1: viser K_{st} -verdiene og P_{max} til støvene

5.3 Sammenligning mellom FeSi55 og B100

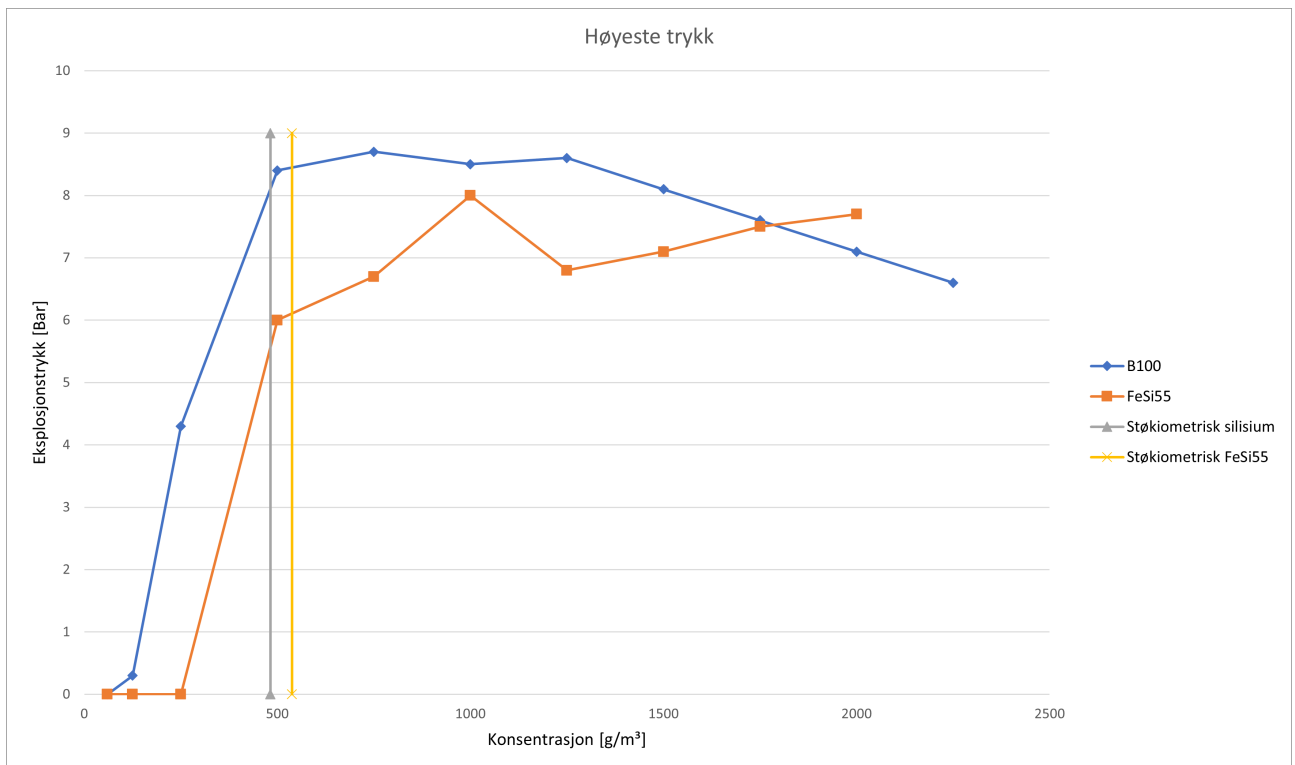
Da de to mest interessante parameterene for denne oppgaven er partikkelstørrelse og støvets kjemiske oppbygning er det interessant å sammenligne resultatene fra denne oppgaven med tidligere resultater. Med flaks så hadde et av støvene fra Østgårds master et støv av rent silisium, kalt B100, som hadde veldig like partikkelstørrelser som støvet FeSi55. Disse to støvene ble derfor sammenlignet nedenfor, både gjennomsnittelige og høyeste verdier. I tabellen kan man også se differansen mellom de to støvenes verdier. Støvet FeSi55 stiger.



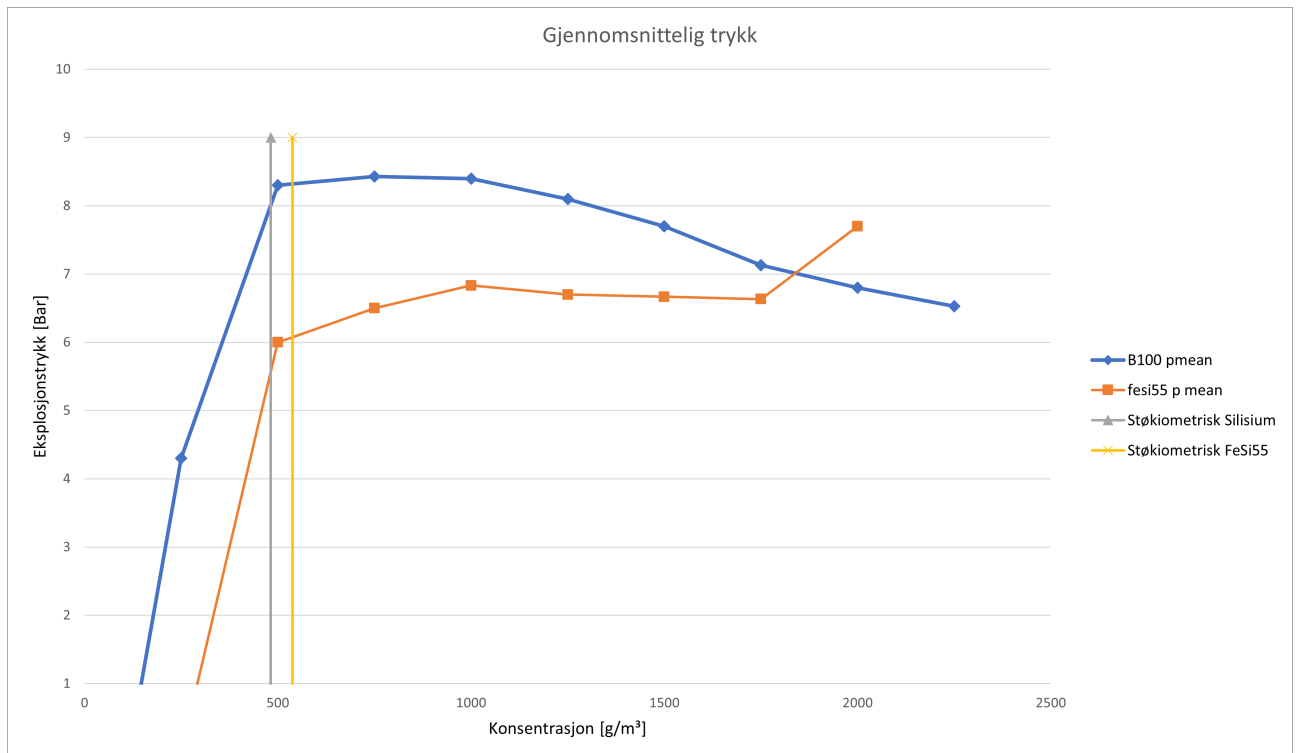
Figur 5.5: viser de to støvenes høyeste trykkstigningshastighet ved hver konsentrasjon.



Figur 5.6: viser gjennomsnitts-trykkstigningshastigheten ved hver konsentrasjon.



Figur 5.7: viser høyeste trykk ved hver konsentrasjon.



Figur 5.8: viser gjennomsnittstrykket ved hver konsentrasjon.

Også her er det gjennomsnittsverdiene som er mest interessante å se på, da høyeste trykk kun er et punkt. Støvet FeSi55 ligger generelt lavest både i trykkverdi og trykkstigningshastighet, med unntak av makstrykk ved konsentrasjonene 1750 g/m³ og 2000 g/m³, som er høyere konsentrasjoner enn det manualen tar utgangspunkt i. En grunn til at FeSi55 oppnår høyere trykk ved disse høye konsentrasjonene er at kun det fineste støvet blåses inn i 20 liters sfæren, som fører til at den faktiske konsentrasjonen er lavere enn 2000 g/m³ og partikkelen som blåses inn er mindre enn de støvparametrene som er oppgitt tilsier. Dette ble ikke sjekket i stor grad i denne oppgaven men i masteroppgaven til Østgård [1] ble det gjort observasjoner som samsvarer med denne hypotesen. De støkiometriske konsentrasjonene for både rent silisium og FeSi 55 er veldig like og burde ikke spille inn i stor grad.

5.4 Topp-og bunnpunkt i grafene

I grafene er det observert forskjellige topp og bunnpunkt. for eksempel har begge de to støvene Patronfilter FSM og FeSI55 lavere maksimal trykkstigningshastigheter ved 1250 g/m^3 , enN ved 1000 g/m^3 og 1500 g/m^3 . Disse ulikhetene i i verdier kommer fra at støvskyene som blir dannes i 20 liters volumet aldri er fullstendig like og homogene. For støvet Patronfilter FSM ble det kjørt tre tester ved konsentrasjonen 1250 g/m^3 på ulike dager og verdiene som kom var på 536 bar/s 575 bar/s 545 bar/s.

5.5 Eksplosjonsverdier mot siktedata fra Malvern

I dette avsnittet blir de fire støvenes maksimale eksplosjonstrykk og maksimale trykkstigningshastighet sammenlignet med partikkelstørrelsesfordelingen fra Malvern-analysen. Formålet med dette er å undersøke om det er noen korrelasjoner mellom eksplosjonsdata og partikkelstørrelsesfordelingen og fra minst til høyest verdi ligger støvene: FSM patronfilter, FeSi 55, FSM finside og FSM syklon til patronfilter.

5.5.1 D90

I figurene 5.9 og 5.10 er maksverdiene fra støvene sammenlignet med D90 verdiene.

For trykkstigningshastigheten da korrelasjonen:

$$y = -3,2542x + 705,61 \text{ med } R^2 = 0,8019$$

Omskrevet til:

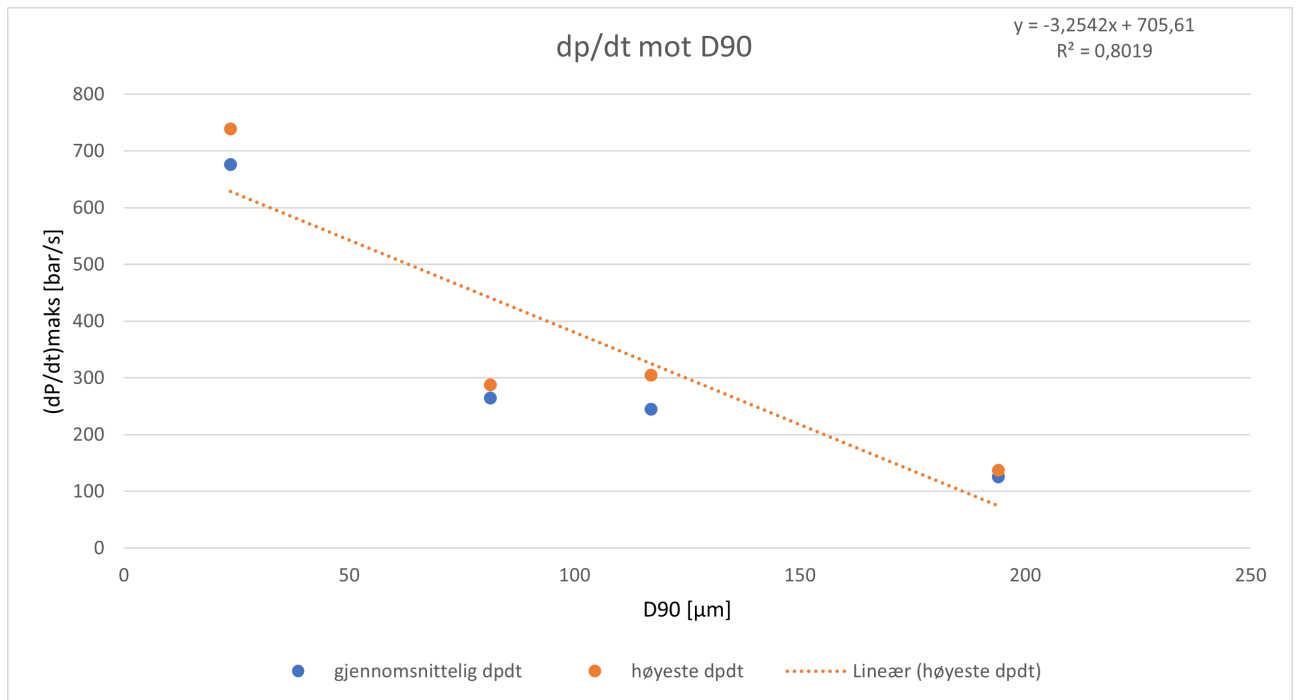
$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = 705,61 + 3,2542D[90] \quad (5.1)$$

Og for trykk:

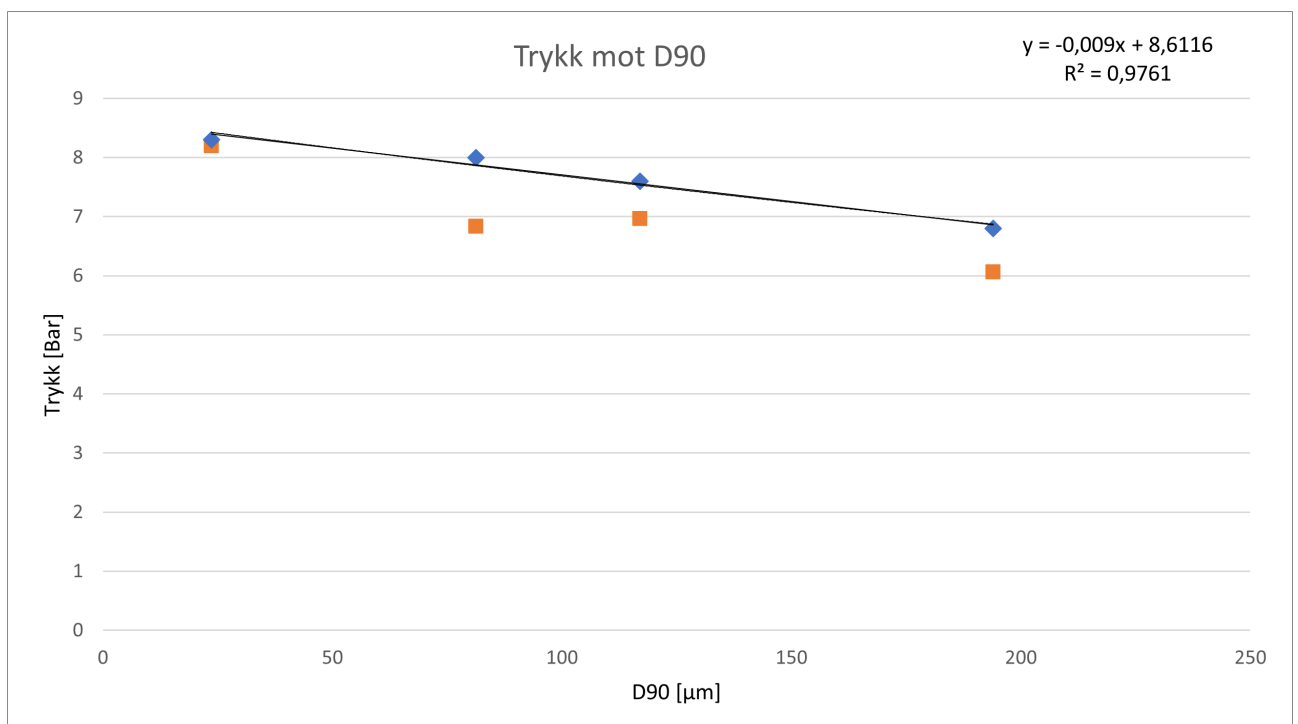
$$y = -0,009x + 8,6116 \text{ med } R^2 = 0,9761$$

Omskrevet til:

$$P_{max} = 8,6116 - 0,009D[90] \quad (5.2)$$



Figur 5.9: trykkstigningshastighet mot D90.



Figur 5.10: makstrykk mot D90.

5.5.2 D50

I figurene 5.11 og 5.12 er maksverdiene fra støvene sammenlignet med D50 verdiene. for trykkstigningshastigheten da korrelasjonen:

$$y = -10,695 + 674,66 \text{ med } R^2 = 0,08062$$

Omskrevet til:

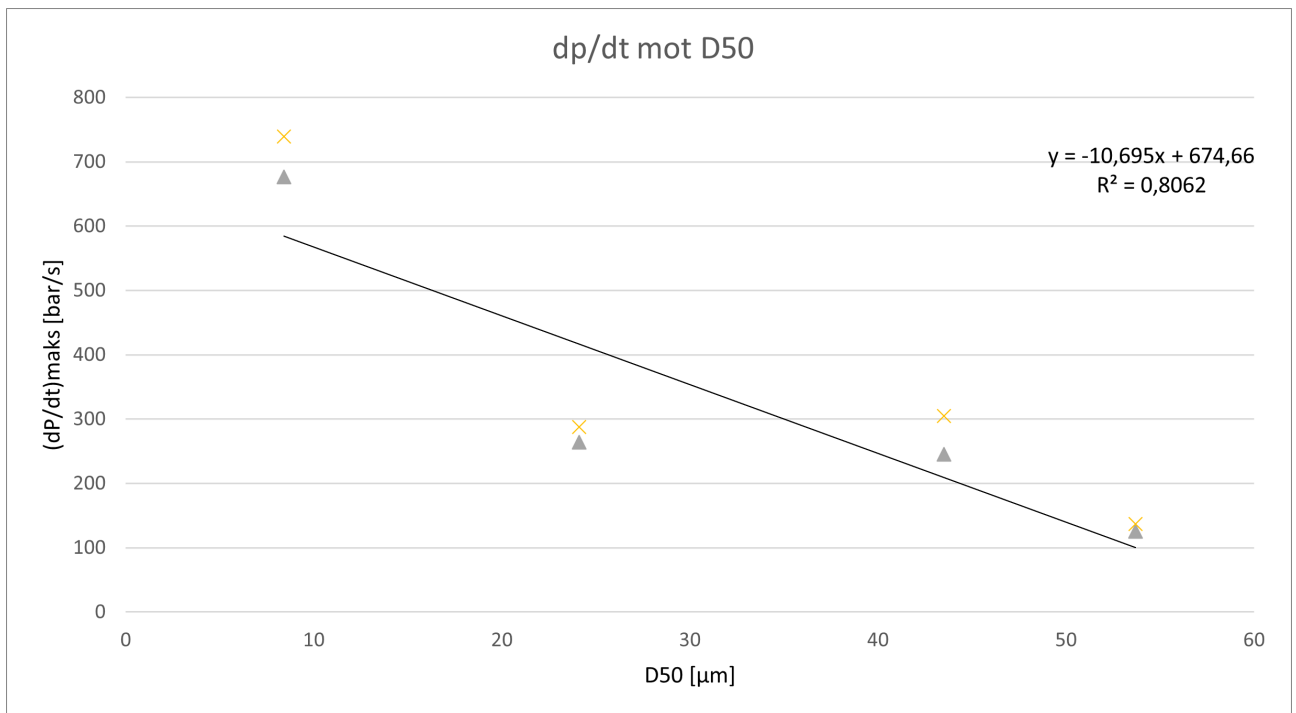
$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = 674,66 - 10,695D[50] \quad (5.3)$$

Og for trykk:

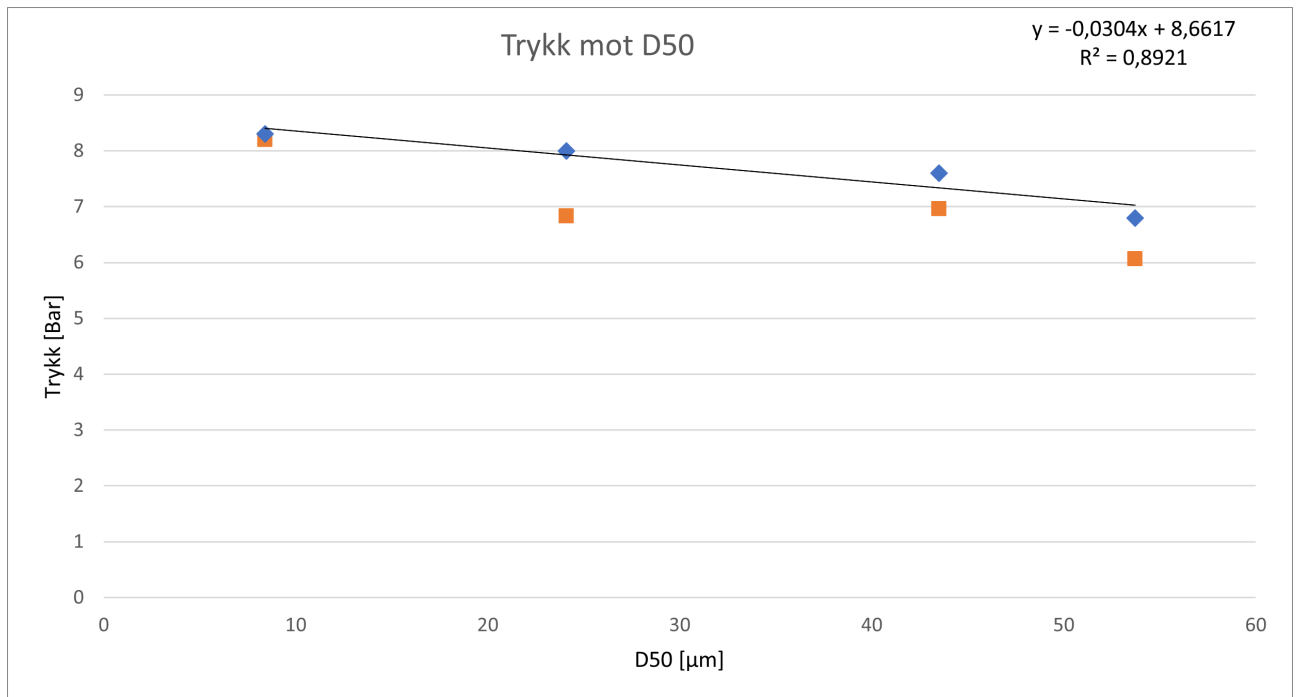
$$y = -0,0304x + 8,6617 \text{ med } R^2 = 0,86617$$

Omskrevet til:

$$P_{max} = 8,6617 - 0,0304D[50] \quad (5.4)$$



Figur 5.11: trykkstigningshastighet mot D50.



Figur 5.12: makstrykk mot D50.

5.5.3 D10

I figurene 5.13 og 5.14 er maksverdiene fra støvene sammenlignet med verdiene. For trykkstigningshastigheten da korrelasjonen:

$$y = -23,12x + 556,77 \text{ med } R^2 = 0,5507$$

Omskrevet til:

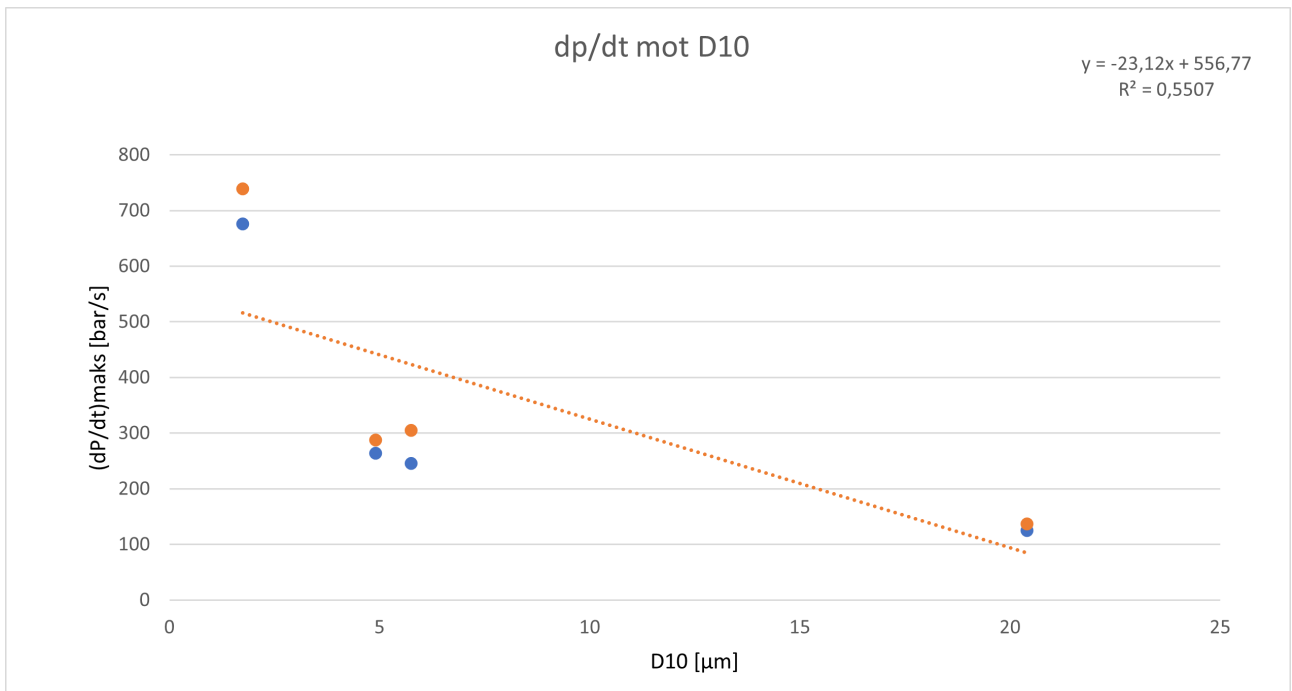
$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = 556,77 - 23,12D[10] \quad (5.5)$$

Og for trykk:

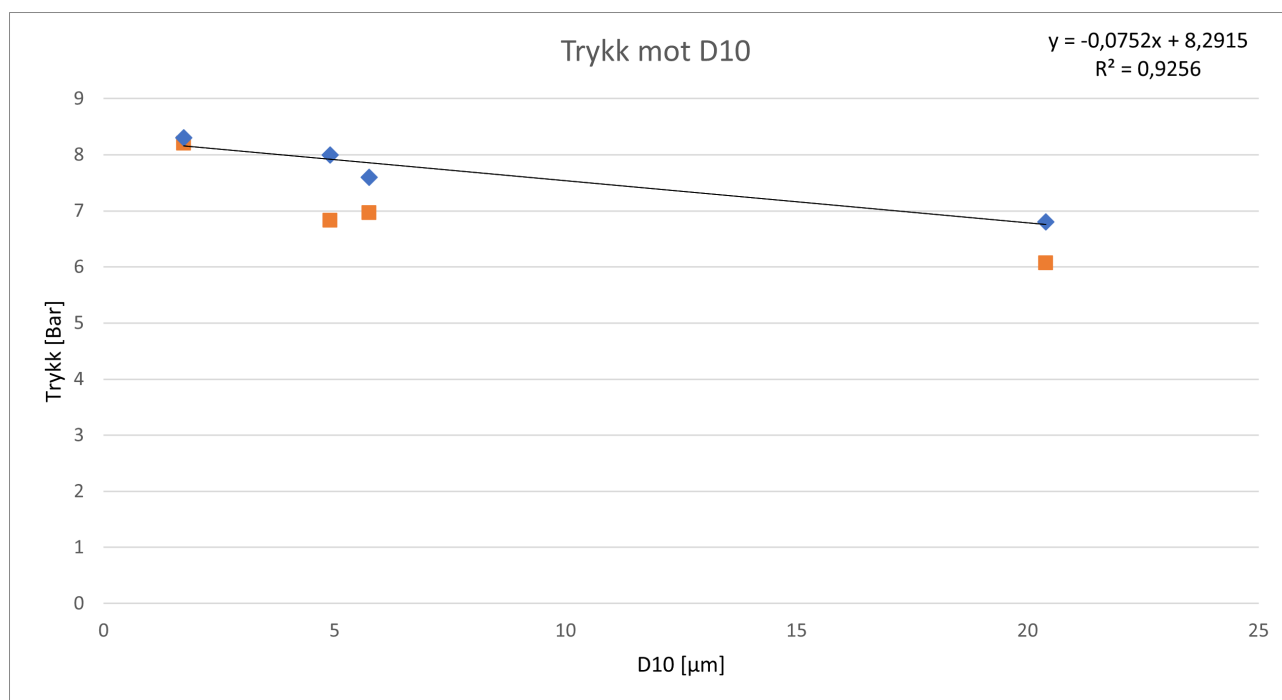
$$y = -0,0752x + 8,2915 \text{ med } R^2 = 0,9256$$

Omskrevet til:

$$P_{max} = 8,2915 - 0,0752D[10] \quad (5.6)$$



Figur 5.13: trykkstigningshastighet mot D10.



Figur 5.14: makstrykk mot D10.

5.5.4 D[3:2]

I figurene 5.15 og 5.16 er maksverdiene fra støvene sammenlignet med verdiene. For trykkstigningshastigheten da korrelasjonen:

$$y = -12,414x + 577,48 \text{ med } R^2 = 0,5812$$

Omskrevet til:

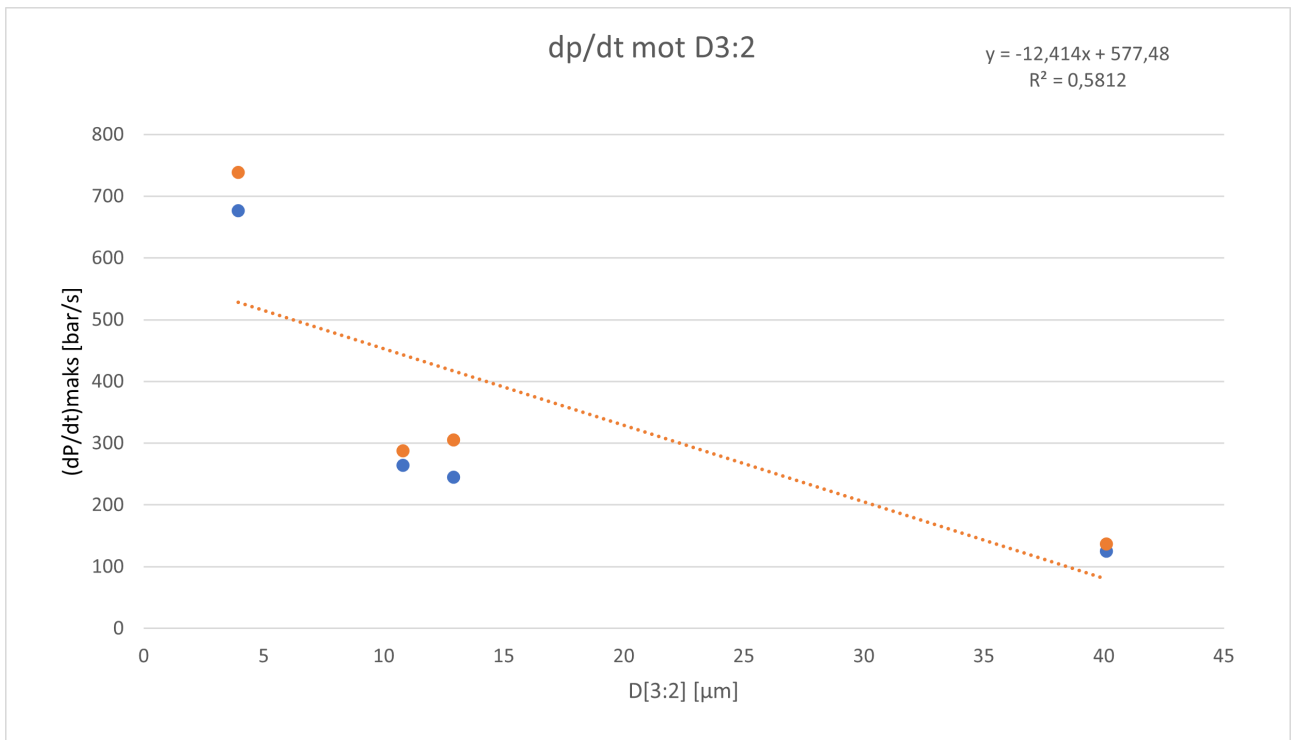
$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = 577,48 - 12,414D[3:2] \quad (5.7)$$

Og for trykk:

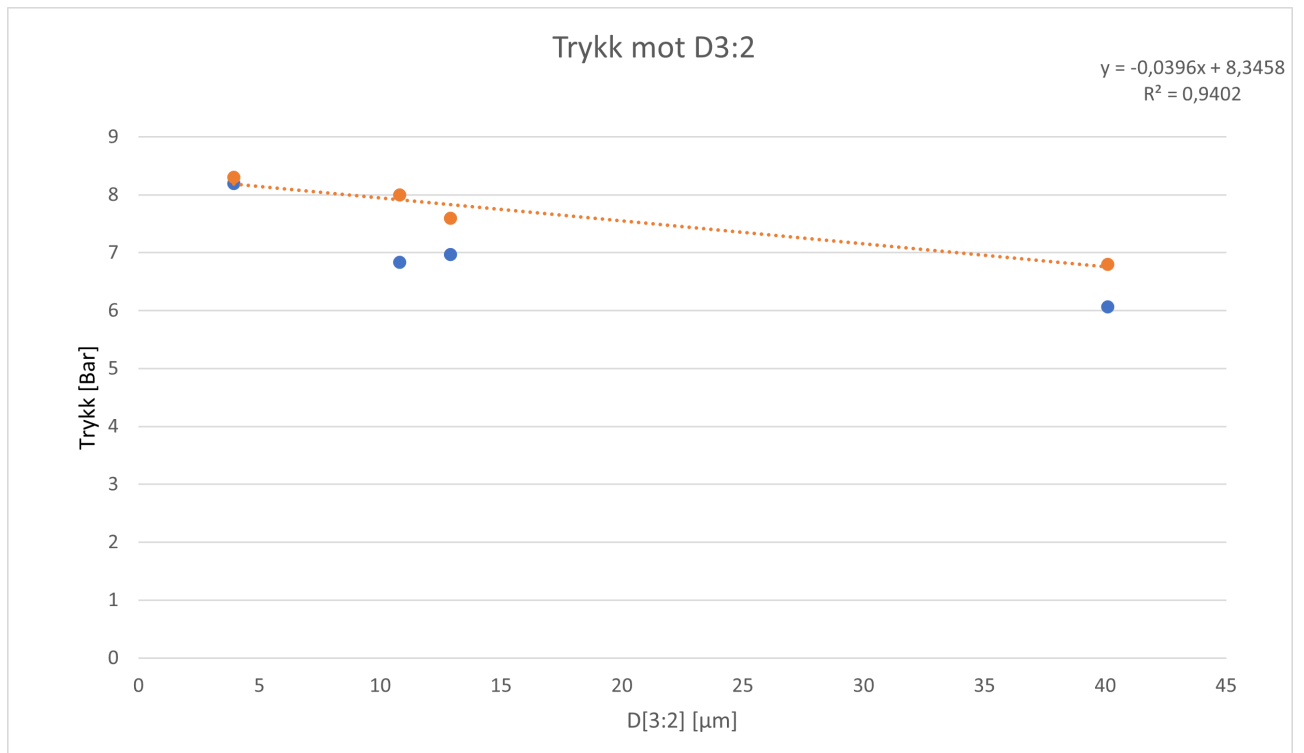
$$y = -0,0396x + 8,3458 \text{ med } R^2 = 0,9402$$

Omskrevet til:

$$P_{max} = 8,3458 - 0,0396D[3:2] \quad (5.8)$$



Figur 5.15: trykkstigningshastighet mot D[3:2].



Figur 5.16: makstrykk mot $D[3:2]$.

5.5.5 D[4:3]

I figurene 5.17 og 5.18 er maksverdiene fra støvene sammenlignet med verdiene. For trykkstigningshastigheten da korrelasjonen:

$$y = -7,4979x + 716,09 \text{ med } R^2 = 0,81$$

Omskrevet til:

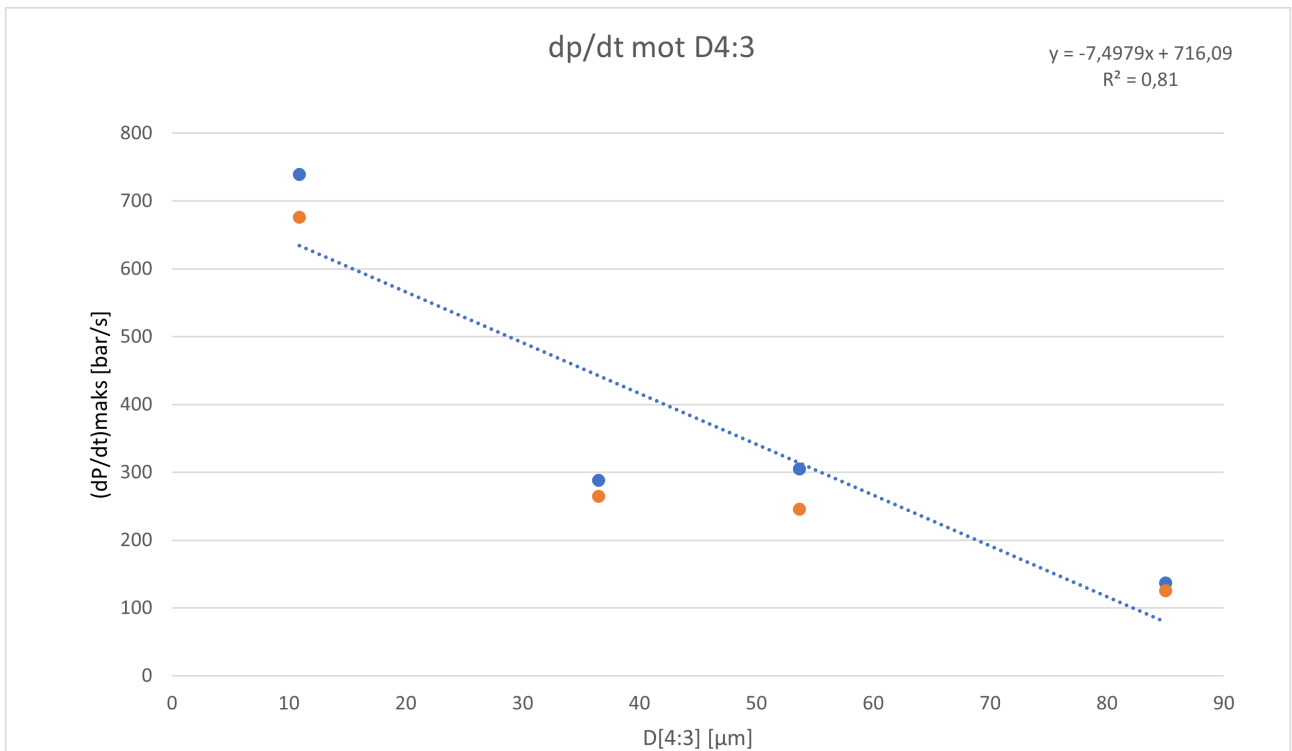
$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = 716,09 + -7,4979D[43] \quad (5.9)$$

Og for trykk:

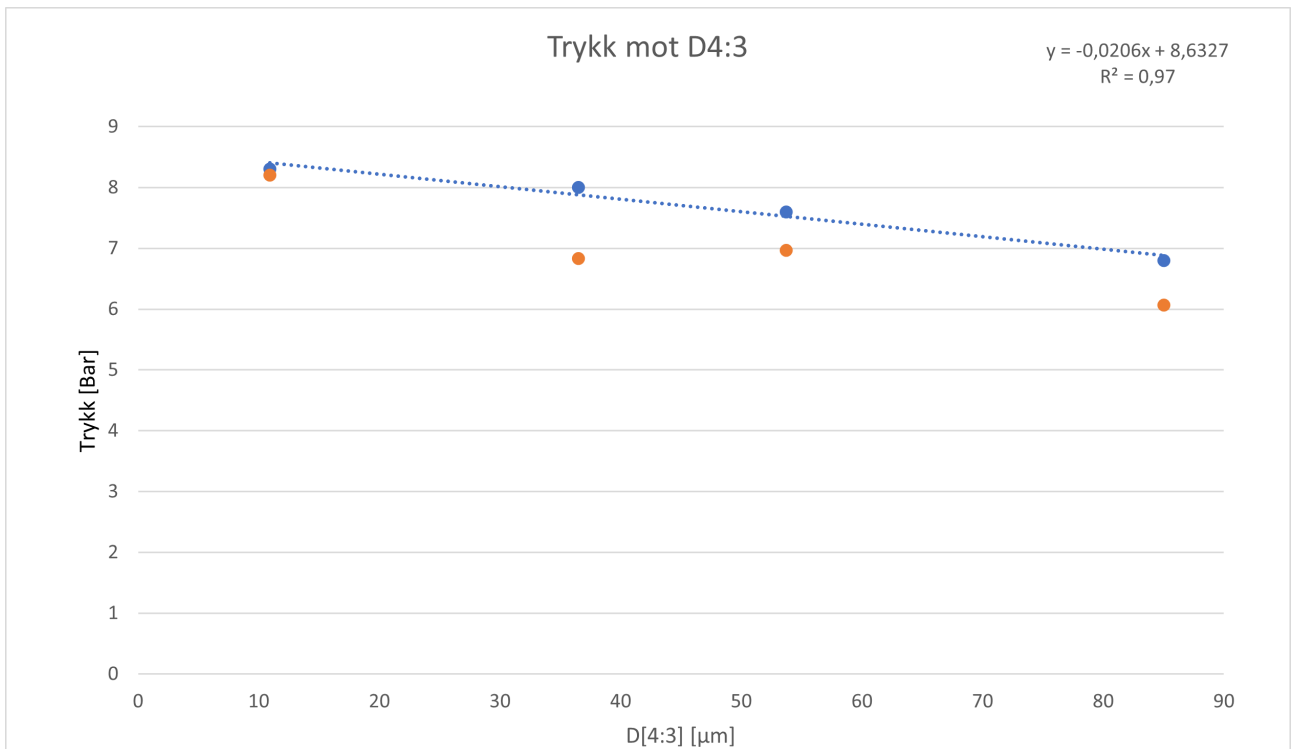
$$y = -0,00206x + 8,6327 \text{ med } R^2 = 0,97$$

Omskrevet til:

$$P_{max} = 8,6327 - 0,00206D[43] \quad (5.10)$$



Figur 5.17: trykkstigningshastighet mot D[4:3].



Figur 5.18: makstrykk mot D[4:3]

5.5.6 Spesifikt overflateareal

I figurene 5.19 og 5.20 er maksverdiene fra støvene sammenlignet med støvenes spesifikke overflateareal. For trykkstigningshastigheten da korrelasjonen:

$$y = 1,015x + 73,78 \text{ med } R^2 = 0,9923$$

Omskrevet til:

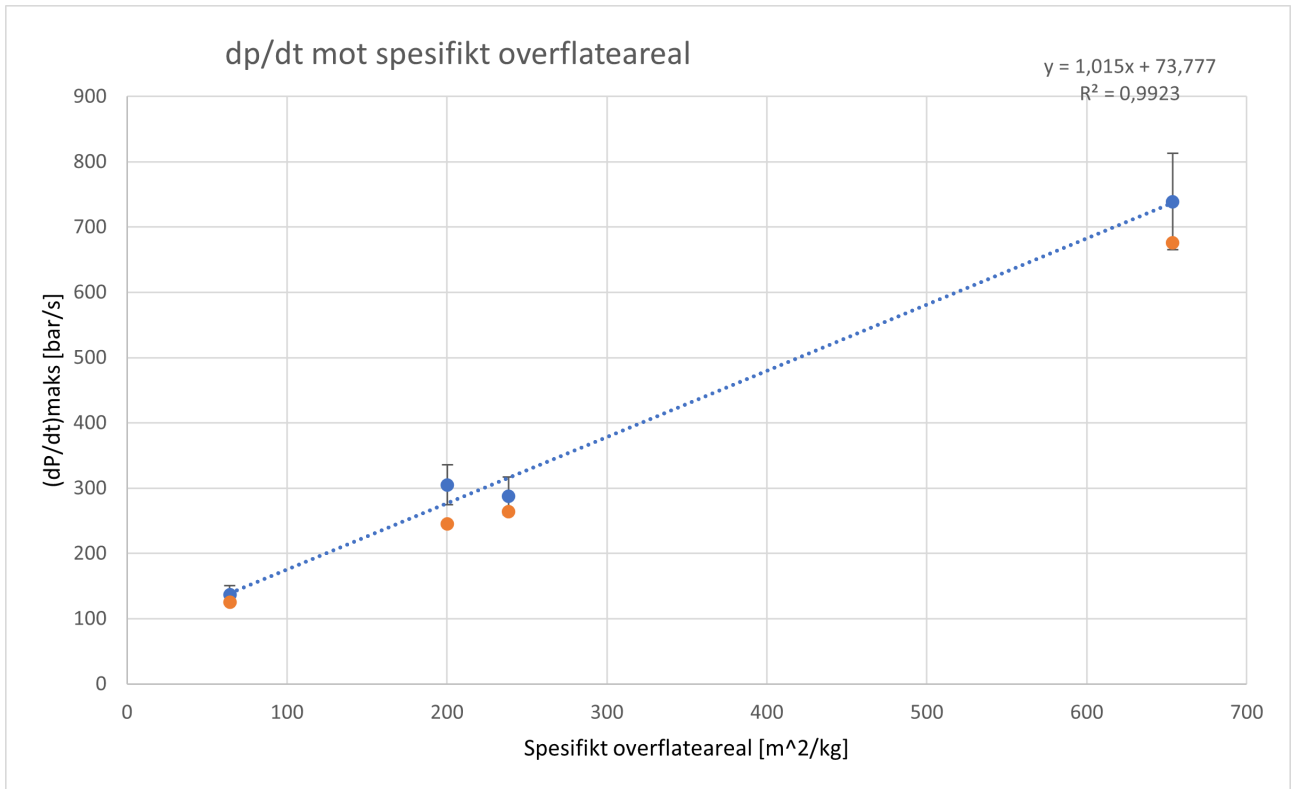
$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = 73,78 + 1,015[SSA] \quad (5.11)$$

Og for trykk:

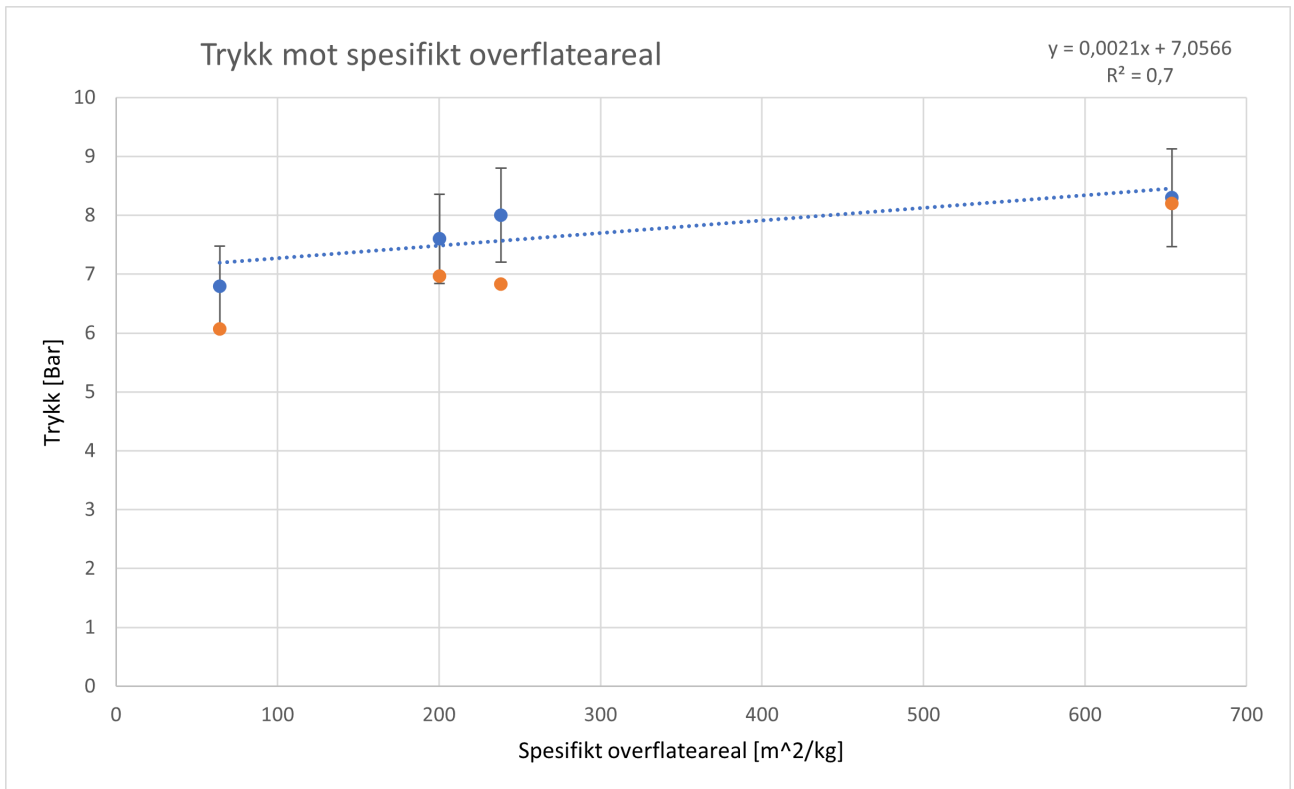
$$y = 0,0021x + 7,0566 \text{ med } R^2 = 0,7$$

Omskrevet til:

$$P_{max} = 7,0566 + 0,0021[SSA] \quad (5.12)$$



Figur 5.19: Trykkstigningshastigheten mot spesifikt overflateareal



Figur 5.20: Trykk mot spesifikt overflateareal

5.6 Oppsummering og kommentarer

	D50	D10	D90	D[3:2]	D[4:3]	SSA	Trykk (Bar)
FSM Patronfilter BJO	8,41	1,74	23,6	3,94	10,9	653,7	8,3
Finside Posefilter FeSi	24,1	4,9	81,3	10,8	36,5	238,4	8
Finside Posefilter FSM	43,5	5,75	117	12,9	53,7	200,3	7,6
FSM Syklon til patronfilter	53,7	20,4	194	40,1	85	64,2	6,8
R^2	0, 86617	0,9256	0, 8019	0,9402	0,97	0,7	

Tabell 5.2: viser partikkelstørrelsesfordelingen, det høyeste oppnådde trykket til støvet og R^2 -verdien til grafen for den gitte partikkelstørrelsesfordelingen.

	D50	D10	D90	D[3:2]	D[4:3]	SSA	dp/dt (Bar/s)
FSM Patronfilter BJO	8,41	1,74	23,6	3,94	10,9	653,7	739
Finside Posefilter FeSi	24,1	4,9	81,3	10,8	36,5	238,4	288
Finside Posefilter FSM	43,5	5,75	117	12,9	53,7	200,3	305
FSM Syklon til patronfilter	53,7	20,4	194	40,1	85	64,2	137
R^2	0, 08062	0, 5507	0, 8019	0, 5812	0, 81	0,9923	

Tabell 5.3: viser partikkelstørrelsesfordelingen, det høyeste oppnådde trykket til støvet og R^2 -verdien til grafen for den gitte partikkelstørrelsen.

Fra figurene over, og oppsummert i tabellene, er det vist at det er god korrelasjon mellom alle partikkelstørrelseparameterene og eksplosjonstrykket. Dette kan tolkes dit at det har sammenheng mellom den totale energimengden som blir frigitt og at de større partiklene bidrar til en lik mengde kjøling.

I forhold til eksplosjonstrykket er det ikke funnet en god sammenheng mellom noen av partikkelstørrelseparameterene og den høyeste oppnådde trykkstigningshastigheten, med unntak av de spesifikke overflatearealet. Noe som gir opphav til et spørsmål om hvilke andre faktorer som påvirker trykkstigningshastigheten i så stor grad? Og som nevnt tidligere er en annen faktor som påvirker støvekspløsjoner, støvets kjemi. Da støvene i oppgaven består av forskjellige sammensetninger av ulike metaller, som brenner i forskjellige hastigheter vil dette antakeligvis påvirke trykkstigningshastigheten i så stor grad at verdien man får ut ikke har en god korrelasjon mot kun partikkelstørrelsen. Dette vises også sammenligningen mellom FeSi55 fra denne oppgaven og det rene silisiumet B100. Hvor FeSi55, som inneholder en stor mengde jern får gjennomgående mindre trykkstigningshastighet enn B100. I forhold til FeSi55 og B100 inneholder støvet patronfilter FSM en stor mengde magnesium, et grunnstoff som reagerer veldig lett. Støvene i denne oppgaven varierer med både kjemi og partikkelstørrelsesparametre, noe som gjorde at det ikke gikk å finne en god korrelasjon mellom begge disse faktorene og makstrykk og trykkstigningshastighet. For å kunne gi en god konklusjon på dette spørsmålet vil den beste måten være å sammenligne en god del støv av ulike kjemi, men like partikkelstørrelseparametre. Like partikkelstørrelseparametre kan oppnås ved å bruke apparat som sikter støvet til forhåndsbestemte størrelser, men var ikke tilgjengelig for denne oppgaven.

5.7 Usikkerhet i metodene

Når det kommer til eksperimenter vil det alltid være en viss usikkerhet, og de modellene vi lager er forenklinger av virkeligheten. Hvordan virkeligheten faktisk fungerer er ekstremt komplisert, og det skrives både masteroppgaver og doktorgrader på små deler av den og det lages forenklete modeller og teorier som skal samsvare best mulig. Det er to ting man kan ta utgangspunkt i når man lager modeller og det er hvordan man vet at ting er og hvordan man tror at ting er. Støvekspløsjoner, som er denne oppgavens interessefelt er også kompliserte. to viktige parametre ved støvekspløsjoner er partikkelstørrelse og støvets kjemi. Men en annen viktig parameter, turbulens, gjør at støvskyer av samme støv og konsentrasjon aldri er helt like. Siwek sfæren er laget på en måte, slik at støvprøven blir lagt i et kammer, blåst gjennom røret med trykkluft og inn i sfæren, før antennelsen. Nedenfor er noen av momentene som anses som usikkerheter i oppgaven.

Som nevnt tidligere består støvet av både av partikler av forskjellige størrelser og forskjellig kjemi. For å få en mest mulig homogen blanding ble alle støvbeholderene rotet før eksperimentering, dette er en metode som gir homogen blanding i forhold til partikkelstørrelsesfordelingen, men det er spørsmål rundt om det gir homogen blanding i forhold til partikler med forskjellig kjemisk sammensetting.

5.7.1 Eksperimenter i Siwek sfæren

En operatør

I eksperimentene var det kun en operatør som gjorde alt. Det ble såklart gitt god opplæring og manualen ble gjennomgått flere ganger. Men dette gjør ikke at eksperimentene er garantert å være feilfri, og en liten misforståelse vil gi utslag på alle datasettene. Men da det ble gitt god opplæring er denne usikkerhet veldig liten, men fremdeles til stede. For eksperimentene i Siwek sfæren var det kun en operatør som gjorde alt. Det ble brukt same metode på alle eksperimentene, og metoden er hentet fra manualen for Siwek sfæren. I tillegg ble det gitt god opplæring av både biveileder og en tidligere masterstudent. Det kan likevel være en feilforståelse av metoden som kan gå igjen gjennom alle testene, men denne usikkerheten er såpass liten da metoden ble gjennomgått flere ganger før eksperimentene startet. Det ble brukt god tid for å lære hvordan eksperimentene startet både ved gjennomlesning av manualen og testing i sfæren.

Gjennomføring av eksperimenter

For gjennomføringen av eksperimenter ble det laget tre gjørelister som vist i kapittel 3.3. Disse listene ble laget ut ifra den opplæringen som ble gitt for å ha en enkel og korrekt framgangsmåte for alle tester, samt prosedyre ved start og slutt.

Når oppveing av støvet ble foretatt var feilmarginen veldig liten og metoden med å vente litt for å se om vekten endret seg er ganske normal. Det vil alltid være en mulighet for små feil, men en usikkerheten på 0,1 gram i forhold til den totale støvmengden som ble brukt i hver test er så og si ubetydelig i forhold til andre faktorer som at alt støvet ikke blåses inn i kammeret.

I starten av eksperimentfasen var det noen tester der en eller begge tennerene ikke gikk av, da de ikke var festet godt nok. Disse testene ble da fjernet og for alle testene som er vist i denne oppgaven er det sjekket at begge tennerene gikk av.

For oppveining og transport av støvet fra vekten til støvkammeret ble det brukt et plastbeger, som vist tidligere i oppgaven. Dette plastbegeret har sine overflateegenskaper og det ble blant annet observert at det la seg et tynt støvlag på plastbegeret. Dette laget er veldig tynt og vil antakeligvis ikke ha noen innvirkning på testresultatene, og i så fall kun svakt på de første testene som ble gjennomført, da de samme plastbegerene ble brukt til alle testene og forskjellen på støvmengden som ble sittende igjen i plastbegeret og støvmengden til de første testene med mindre konsentrasjon er størst. Ved de høyeste konsentrasjoner ble det observert at alt støvet ikke ble blåst inn, noe som betyr at konsentrasjonen ikke samsvarer med det som ble oppgitt.

For undertrykket på -0,6 barg ble det brukt en vakuummaskin og dette ble gjort manuelt. Det ble passet godt på at trykket i eksplosjonskammeret var innenfor grensen. Overtrykket ble delvis gjort manuelt og delvis automatisk, så det burde ikke være stor usikkerhet her.

Resten av eksperimentet skjedde automatisk ved hjelp av programmet eller bestod av rengjøring av eksplosjonskammeret og klargjøring til neste eksperiment.

Alle eksperimentene tok stede på vinteren eller våren, så den eneste oppvarmingen av støvlabben, der eksperimentene tok stede var varmeovnen og temperaturen var satt til 20 grader. Derfor har omgivelsestemperaturen ingen innvirkning på eksperimentene.

Lekkasje i Siwek sfæren

I slutten av eksperimenteringsperioden oppstod det en liten lekkasje i det som blir betegnet som juletreet. Denne gjorde at trykkmåleren hele tiden målte litt og litt lavere trykk. Da den var såpass liten og ikke hadde noen innvirkning på trykket i selve eksplosjonskammeret etter at juletreet var avstengt fra resten av systemet ble det bestemt at det beste var å fortsette eksperimenteringen uten å gjøre noe, før testingen av legeringene var ferdig.

5.7.2 Støvets kjemi

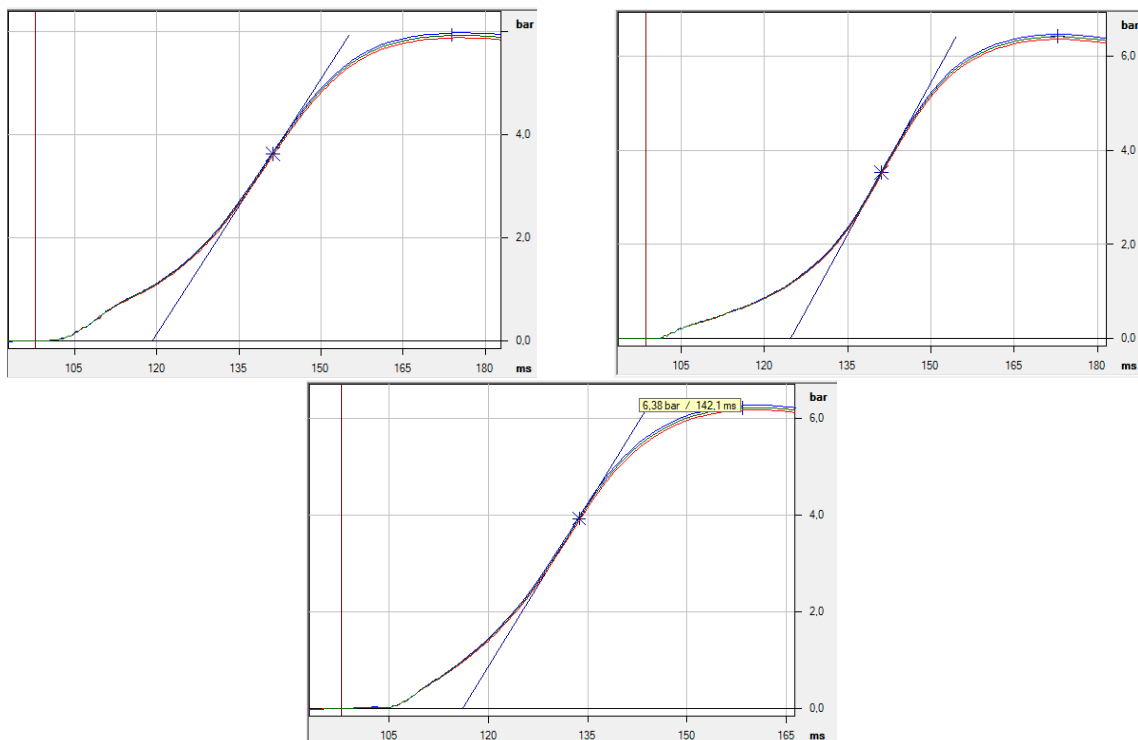
Da Elkem Bjølvefossen produserer forskjellige legeringer ut ifra bestillinger vil mengden av silisium, jern, magnesium og kalsium variere. Dette gjør at prøvene fra Bjølvefossen ikke er homogene. Xrf-analysen bruker kun noen få gram per test og dette kan gjøre at en XRF-analyse ikke er fullstendig representativ for støvet som ble testet i Siwek sfæren. Da støvet til xrf analysen og eksplosjonstestene ble tatt samtidig er det antakeligvis ikke en stor variasjon mellom støvet som ble brukt i xrf analysen og støvet som ble brukt i denne oppgaven. Men usikkerheten ligger fremdeles der og for å minske denne kan det være lurt å kjøre flere XRF-analyser på samme støvprøven.

Men det vil være variasjon mellom kjemien i oppgavens støv og det som finnes i anlegget til Bjølvefossen på ulike tidspunkt, da andelen av forskjellige grunnstoffer varierer. Resultatene i denne oppgaven vil trolig fortsatt være brukbare for dem, da partikkelstørrelse er en mye viktigere faktor en kjemisk sammensetting og testene på partikkelstørrelse burde være mye mer representative for anlegget som helhet. Støveksplasjoner avhenger spesielt av to faktorer, støvets kjemi og partikkelstørrelsesfordelingen.

Trykk-tid kurvene

For alle eksperimentene ble trykk-tid kurvene analysert for avvik. Avvik er hakkete trykk-tid kurver, som betyr at eksplosjonen kjøles ned og varmes opp. Det ble ikke observert slike tegn, annet enn der det ikke var antennelse. Ved testene der det ikke var antennelse varierte grafen litt opp og ned.

Vendepunktet til grafene ble også undersøkt, og tre eksempler er vist under for støvet FeSi55. Grafene for 500 g/m^3 og 1250 g/m^3 har et vendepunkt som er ganske likt, mens grafen for 1500 g/m^3 har vendepunkt tidligere. Dersom kammerveggen ikke kjølte ned flammen ville trykket fortsatt å akselerere helt opp til P_m punktet og det ville ikke vært en avrunding som vist på disse figurene.



Figur 5.21: Tre trykkurver for støvet FeSi55, ved konsentrasjonene 500 g/m^3 , 1250 g/m^3 og 1500 g/m^3

5.7.3 Malvern analysen

Det er en iboende feil i Malvern analysen da den bruker lys og måler mengden lys som passerer gjennom en støvsøy. da støvpartikler ikke er sfæriske, men kan variere kraftig i geometriforskjell vil analysens resultat alltid være påvirket av hvordan støvpartiklene er rotet i forhold til laseren. Silisium størkner også i krystallstruktur, og når dette knuses blir kornene skarpkantede og flakformet.

Kapittel 6

Modellering

Formålet med dette kapittelet er å finne fysiske verdier som kan brukes ofr å modellere støvekspløsjoner i støvekspløsjons-simulatoren FLACS DustEx, ved å bruke ideel gasslov og entalpidata for de forskjellige metallene og deres oksider i gass, væske og fast fase. Videre trengs P_{maks} fra eksperimentene for å finne ut hvr stor andel av støvet som forbrenner og hvilken fase oksidet er i, som funksjon av støvkonsentrasjon og partikkelstørrelsesfordeling. FLACS DustEx bruker K_{st} for å bestemme forbrenningshastigheten. Utrengninger av a - og d verdier, γ og temperatur ligger i vedlegg 3 og 4.

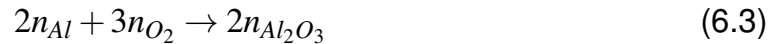
6.1 Nye koke- og smeltepunkt

Fra NIST [18] sine sider er flere koke- og smeltetemperaturer oppgitt som høyere en det som er funnet andre steder. For eksempel er magnesiumoksid sitt smeltepunkt oppgitt som 5000K, mens i Handbook of Physics and Chemistry er den oppgitt som 3873. Det er derfor valgt å bruke de nyeste og mest pålitelige kildene for koke- og smeltetemperaturer, men beholde de andre faktorene i Shomate ligningen fra Nist.

6.2 Forenklinger og antakelser

I denne modelleringen er det antatt at det kun er dannelsen av et oksid, med minst oksygen til metall forhold, som er relevant for temperatur og eksplosjonstrykk. Det er antatt at rent metall over støkiometrisk konsentrasjon fordamper. Å finne en formel som tar for seg flere oksid ble for vanskelig for denne modelleringen, og det er derfor fokusert på monoksid, med unntak av aluminium som det kun er funnet informasjon om et oksid på. Fra diagrammet 2.4 er det også kun tatt med et oksid for forbrennelse av jern. Det er ikke brukt andre tapsledd en energien som går med på å varme opp de forskjellige reaktantene, produktene og nitrogen, i virkeligheten vil objekter innad i volumet og tak, gulv og vegger måtte varmes opp og derfor vil energi gå tapt. For Flacs sin del er det også kun tatt med et oksid, dette i tillegg til antakelsen om at over den støkiometriske konsentrasjonen for jernmonoksid og silisiummonoksid så dannes det ikke andre oksider, gjør at usikkerheten rundt lavere konsentrasjoner blir stor.

6.3 Kjemi og termodynamikk



Luft inneholder en spesifisert mengde oksygen og nitrogen, 21% oksygen og 79% nitrogen. Luftens konsentrasjon er $40,83 \text{ mol/m}^3$ som da tilsvarer $8,59 \text{ mol/m}^3 \text{ O}_2$ og $32,24 \text{ mol/m}^3 \text{ N}_2$.

I FLACS er entalpien representert som med formelen nedenfor, hvor b kan settes lik null for støv og væsker:

$$h_k = a_k * T + \frac{b_k}{2} * T^2 - d_k \quad (6.8)$$

Grafene for entalpi som ble laget er lineære, derfor forenkles uttrykket til:

$$h_k = a_k * T - d_k \quad (6.9)$$

Termodynamikkens første lov sier at energi hverken kan skapes eller tillintetgjøres, dette gir dette uttrykket:

$$h_{etter} = h_{fr} \quad (6.10)$$

6.4 Modellering på de individuelle grunnstoffene

6.4.1 Shomate ligningen

For å få entalpiverdiene til grunnstoffene med a og d verdier, $H = aT + bT^2 - d$, brukes shomate ligningen. På Nist sine sider står shomate formelen og verdiene oppgitt slik:

$$H^2 - H_{298} = A * t + B * t^2 / 2 + C * t^3 / 3 + D * t^4 / 4 - E / t + F - H \quad (6.11)$$

Med et eksempel på hvordan verdiene er oppgitt:

Temperature (K)	923. - 1366.104
A	34.30901
B	$-7.471034 \times 10^{-10}$
C	6.146212×10^{-10}
D	$-1.598238 \times 10^{-10}$
E	$-1.152011 \times 10^{-11}$
F	-5.439367
G	75.98311
H	4.790011
Reference	Chase, 1998
Comment	Data last reviewed in September, 1983

Figur 6.1: viser Shomate verdiene for magnesium i væskefase med Nist sine koke- og smeltetemperatur.

For alle relevante grunnstoff og oksid er shomate ligningen brukt fra og med 250K og med de nye koke- og smeltetemperaturene. Deretter er det tatt trendlinjer for de tre fasene for å finne a og d verdiene. Excel filen med utregning er gitt i vedlegg 3.

For modelleringen er det grunnstoffenes a og d verdier i gassform som er relevant og for oksidene er det a og d verdier i væske og gassform som er relevante. Oksygen og nitrogen har kun et sett med verdier hver. I tabell 6.1 er verdiene for magnesium gitt, resten av verdiene, samt utregning er gitt i vedlegg 3.

Magnesium	a-verdi	d-verdi
fast	0,03	8,67
væske	0,03	5,44
gass	0,02	-140,90

Tabell 6.1: a og d verdiene til magnesium.

6.5 Entalpiformelen

I følge termodynamikkens første lov kan energi verken oppstå eller forsvinne, bare skifte form. Det gir opphav til denne formelen i vårt system, på generelt nivå, der a er et tilfeldig grunnstoff og oksid er grunnstoffets oksid:

$$n_a * h_a + n_{\text{oksid}} * h_{\text{oksid}} + n_{N_2} * h_{N_2} = n_{a_0} * h_{a_0} + n_{O_2} * h_{O_2} + n_{N_2} * h_{N_2} \quad (6.12)$$

Høyresiden av likningen er entalpien ved start, altså når temperaturen er 298K. Per definisjon er entalpien ved 298K lik null. Derfor blir uttrykket:

$$n_a * h_a + n_{\text{oksid}} * h_{\text{oksid}} + n_{N_2} * h_{N_2} = 0 \quad (6.13)$$

Et uttrykk som kan manipuleres lettere og det første steget er å sette inn formelen for entalpi 7.3

$$n_a * (a_a * T - d_a) + n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}}) + n_{N_2} * (a_{N_2} * T - d_{N_2}) = 0 \quad (6.14)$$

Denne formelen ganges nå ut og deles i temperatur og a ledd på høyresiden og d-ledd på venstresiden:

$$n_a * a_a * T + n_{\text{oksid}} * a_{\text{oksid}} * T + n_{N_2} * a_{N_2} * T = n_a * d_a + n_{\text{oksid}} * d_{\text{oksid}} + n_{N_2} * d_{N_2} \quad (6.15)$$

Videre tas temperaturleddet ut og settes alene:

$$T = \frac{n_a * a_a + n_{\text{oksid}} * a_{\text{oksid}} + n_{N_2} * a_{N_2}}{n_a * d_a + n_{\text{oksid}} * d_{\text{oksid}} + n_{N_2} * d_{N_2}} \quad (6.16)$$

6.6 Massefraksjon oksid i gassfase

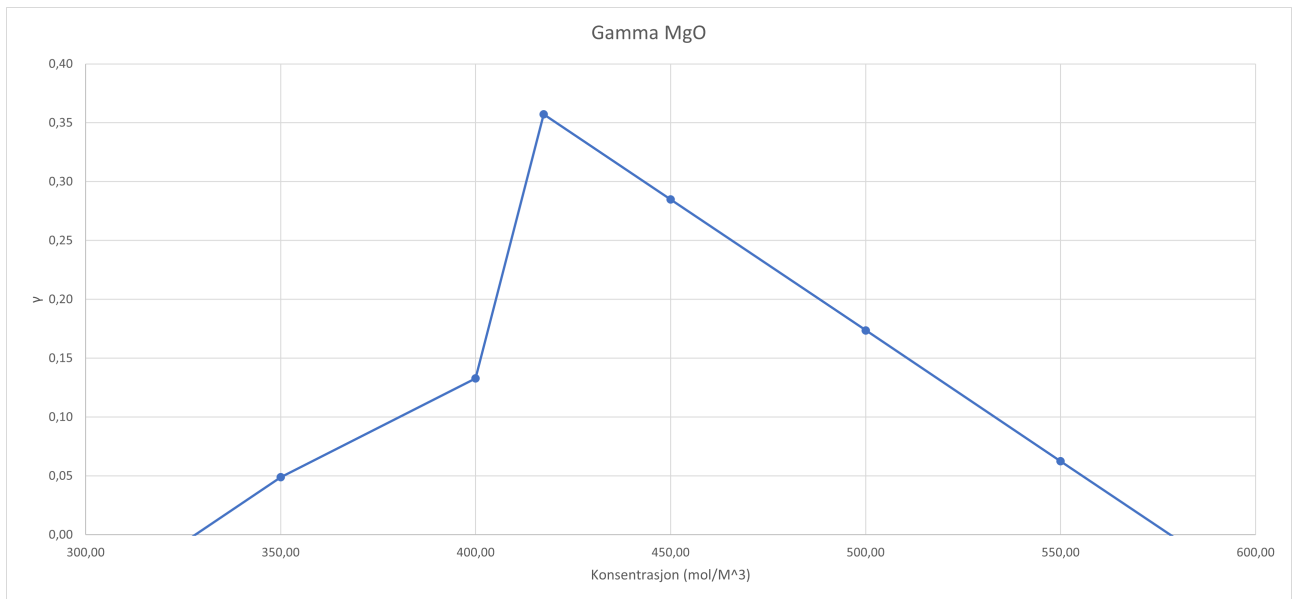
For å vite hvilken fase oksidene er i ved ulike konsentrasjoner innføres et uttrykk for massefraksjonen av oksid i gassfase, her kalt γ . Denne faktoren beskriver forholdet mellom oksid i gassfase og oksid i væskefase. Dersom gamma er høyere enn 1 er alt oksidet i gassfase, dersom gamma er mellom 1 og 0 er tilsvarende mengde oksid i gassfase og dersom gamma er under null er oksidet i væskefase. For å beregne γ brukes formelen 7.11, med to oksidledd, ett for væskefase og ett for gassfase. For å se hvilken konsentrasjoner man har stoff i gassfase settes temperaturen lik kokepunktet og konsentrasjonen varieres.

$$n_a * (a_a * T - d_a) + n_{\text{oksid}} * (\gamma)(a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_g + (1 - \gamma)(a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_v + n_{N_2} * (a_{N_2} * T - d_{N_2}) = 0 \quad (6.17)$$

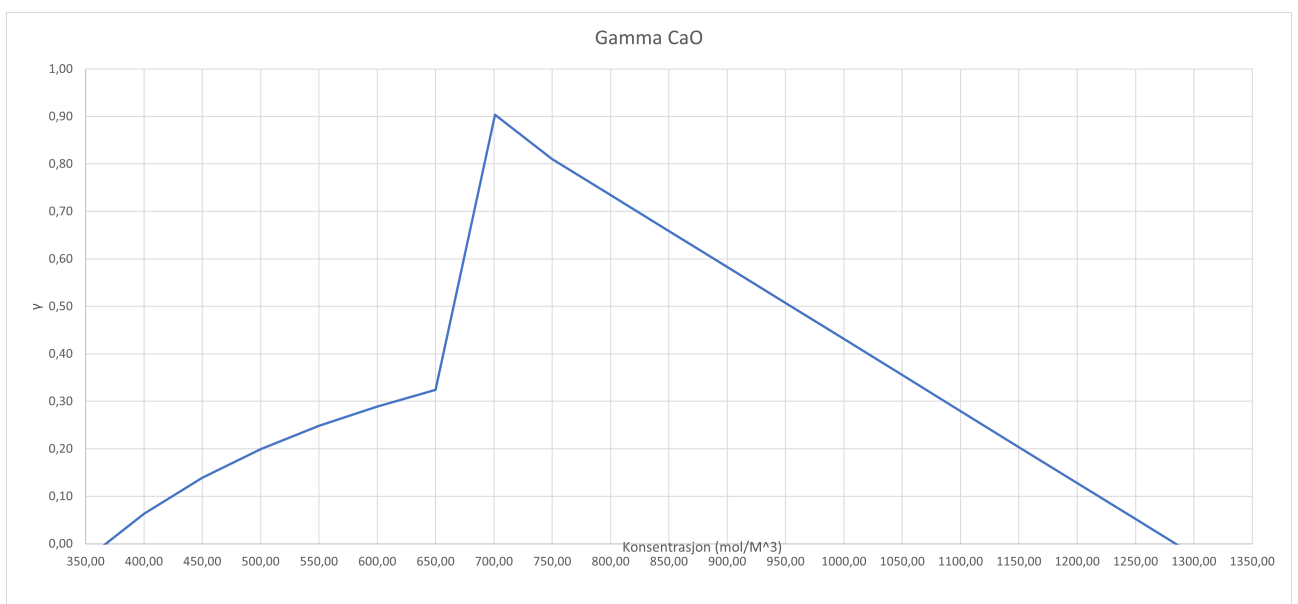
Deretter tas gamma-leddet ut og settes på høyre siden, og man får dette uttrykket:

$$\gamma = \frac{-(n_a * (a_a * T - d_a) + n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_l + n_{N_2} * (a_{N_2} * T - d_{N_2}))}{n_{\text{oksid}} * ((a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_g - (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_l)} \quad (6.18)$$

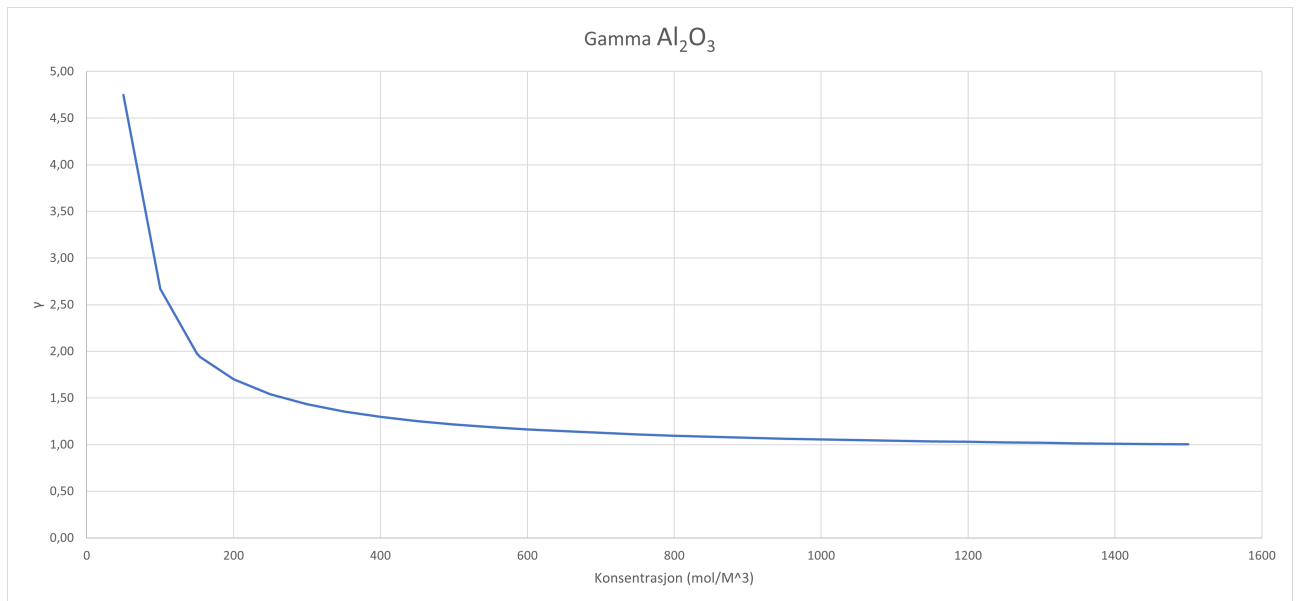
Så lenge gamma er over null og under 1, sies det at temperaturen tilsvarer koketemperaturen til oksidet. Nedenfor er grafene for grunnstoffene lagt ved, utregningen ligger i vedlegg.



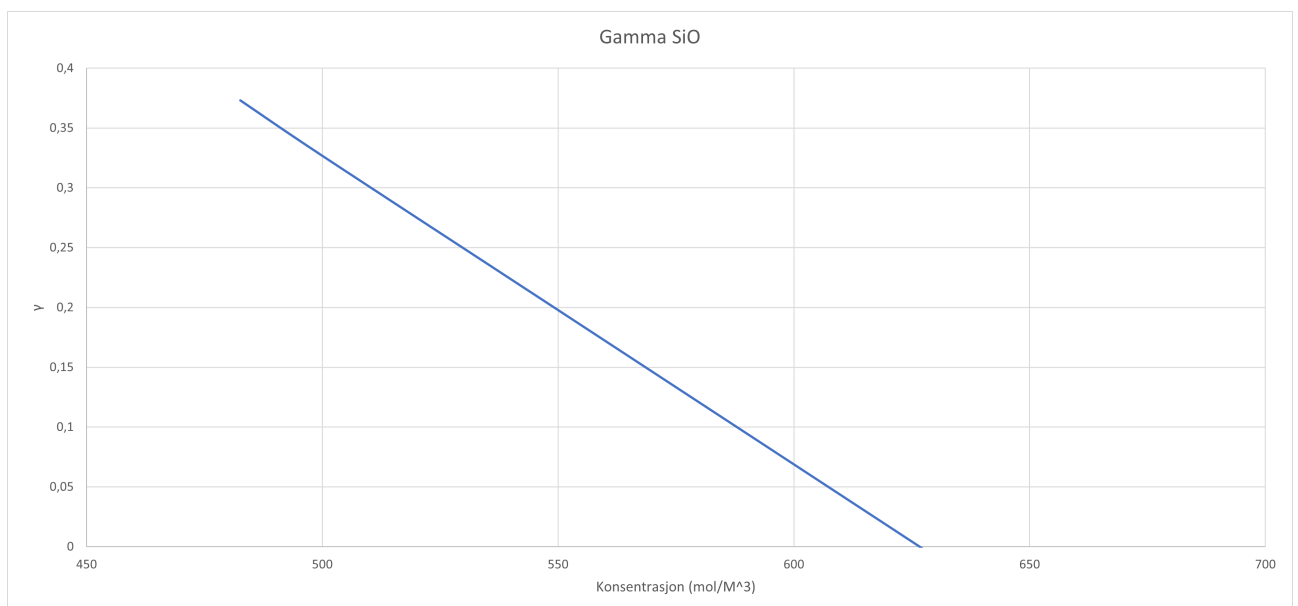
Figur 6.2: viser grafen med γ for MgO



Figur 6.3: viser grafen med γ for CaO



Figur 6.4: viser grafen med γ for Al_2O_3 , her er γ over 1 frem til en konsentrasjon på 1500 g/m^3

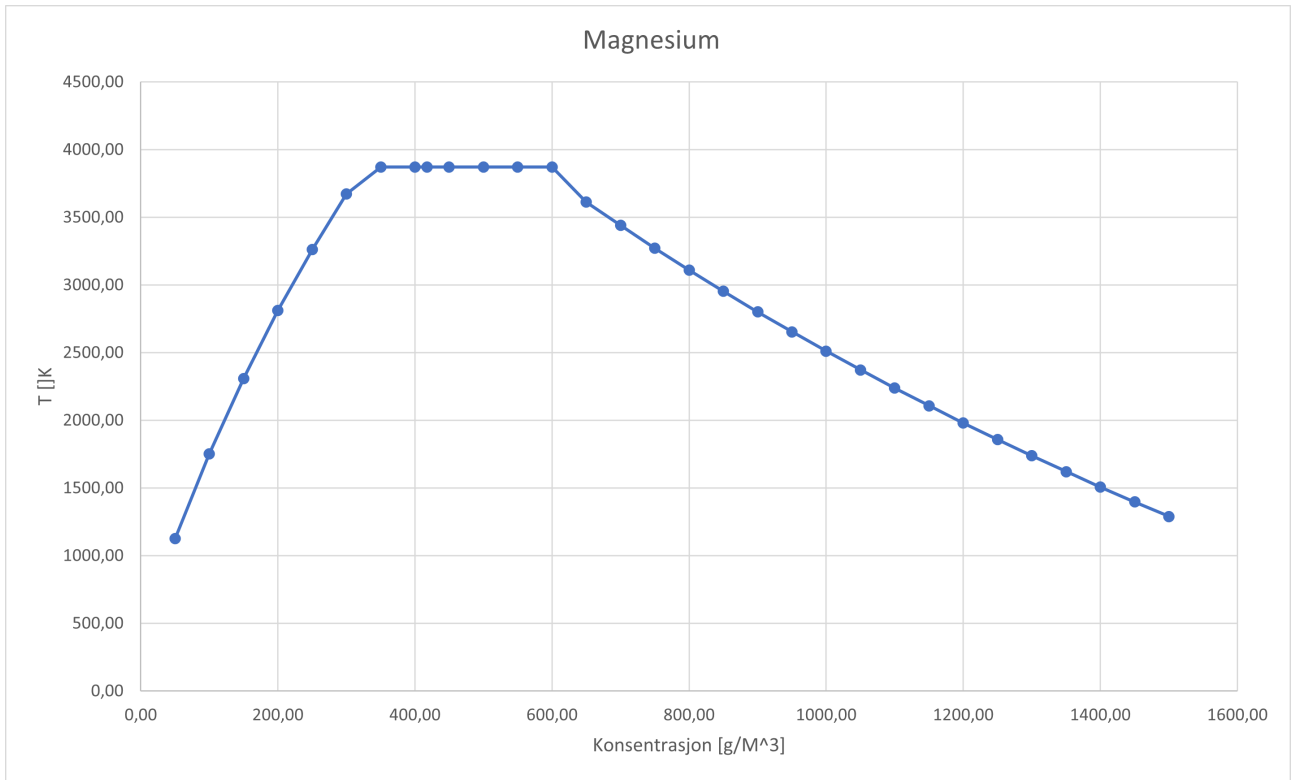


Figur 6.5: viser grafen med γ for SiO

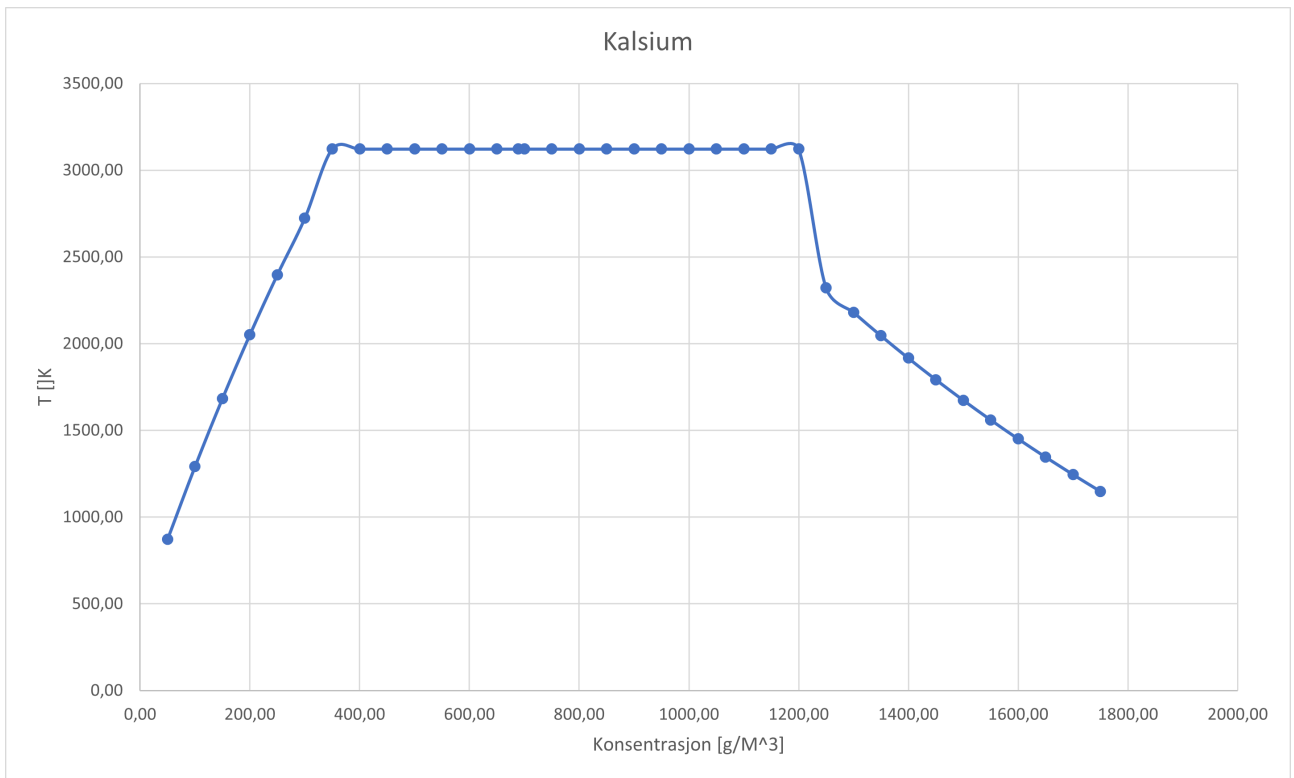
For jernmonoksid ble γ ved støkiometrisk konsentrasjon negativ, $-0,418$, som betyr at jernoksid ikke fordamper.

6.7 Temperaturgrafer

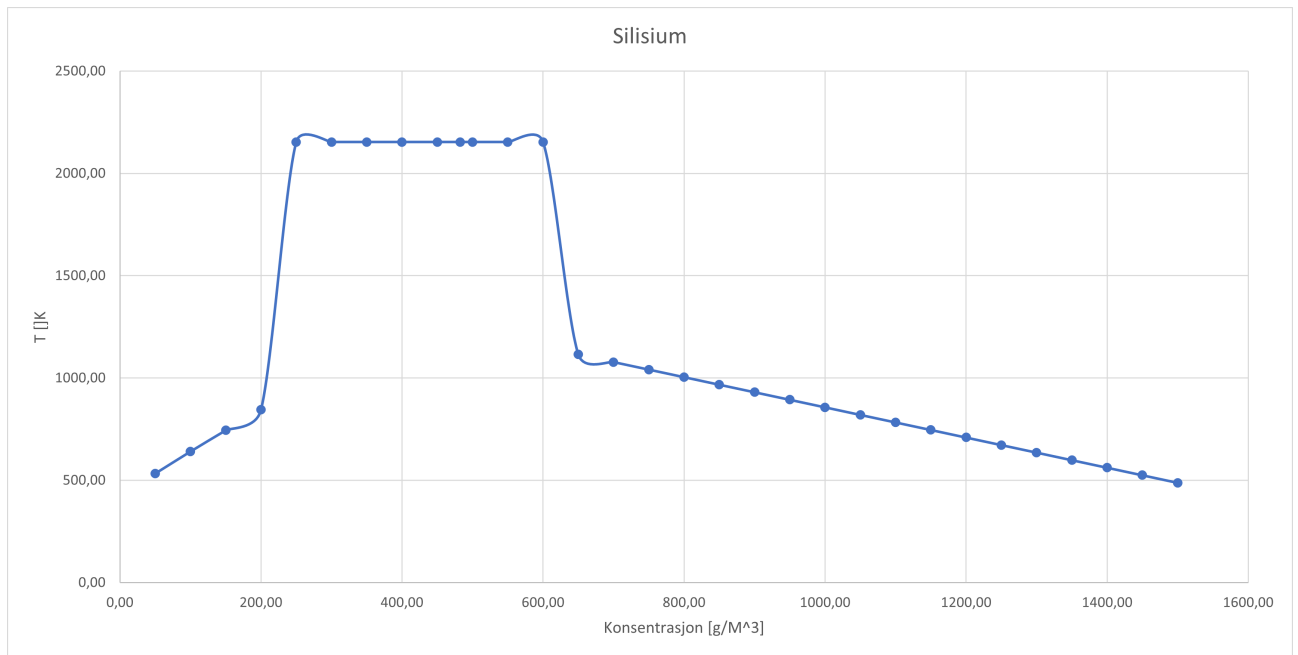
Nå som gamma er funnet kan temperaturer ved ulike konsentrasjoner beregnes ved å bruke entalpiformelen 6.16. Når konsentrasjonen er under støkiometrisk er det oksygen til stedet som tas med i beregningen i stedet for grunnstoff, og når konsentrasjonen er over støkiometrisk er det grunnstoff til stedet som også tas med i beregningen.



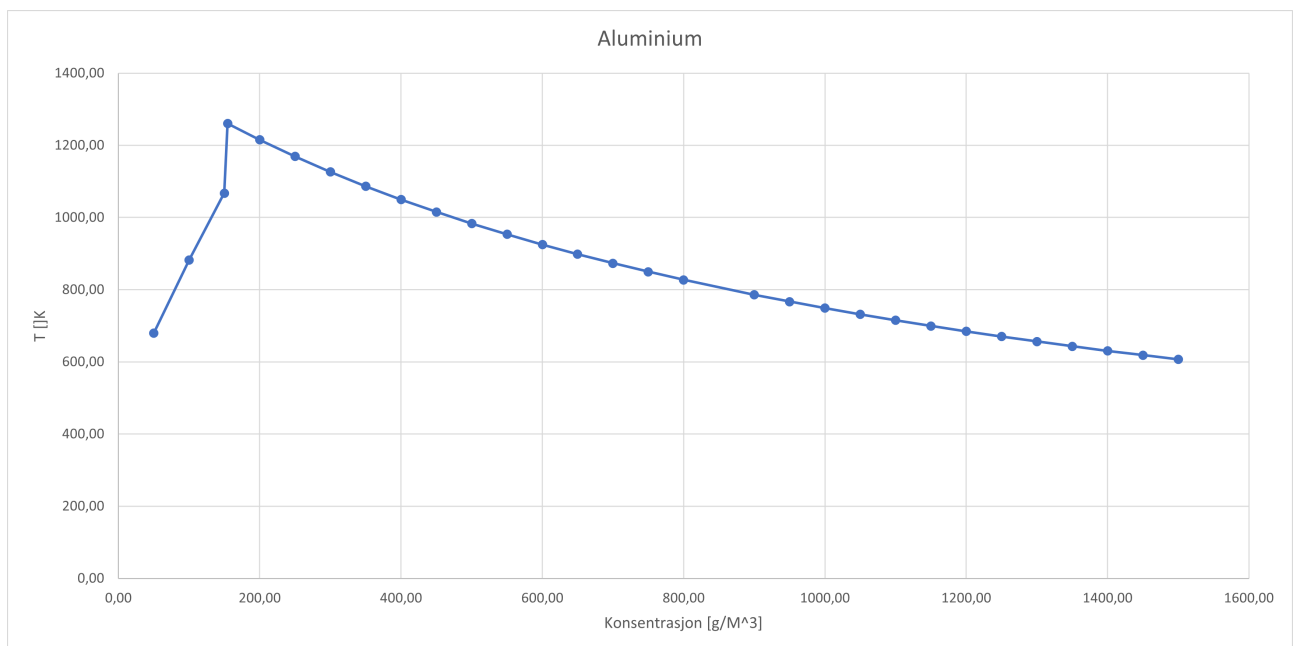
Figur 6.6: viser temperaturgrafer for magnesium.



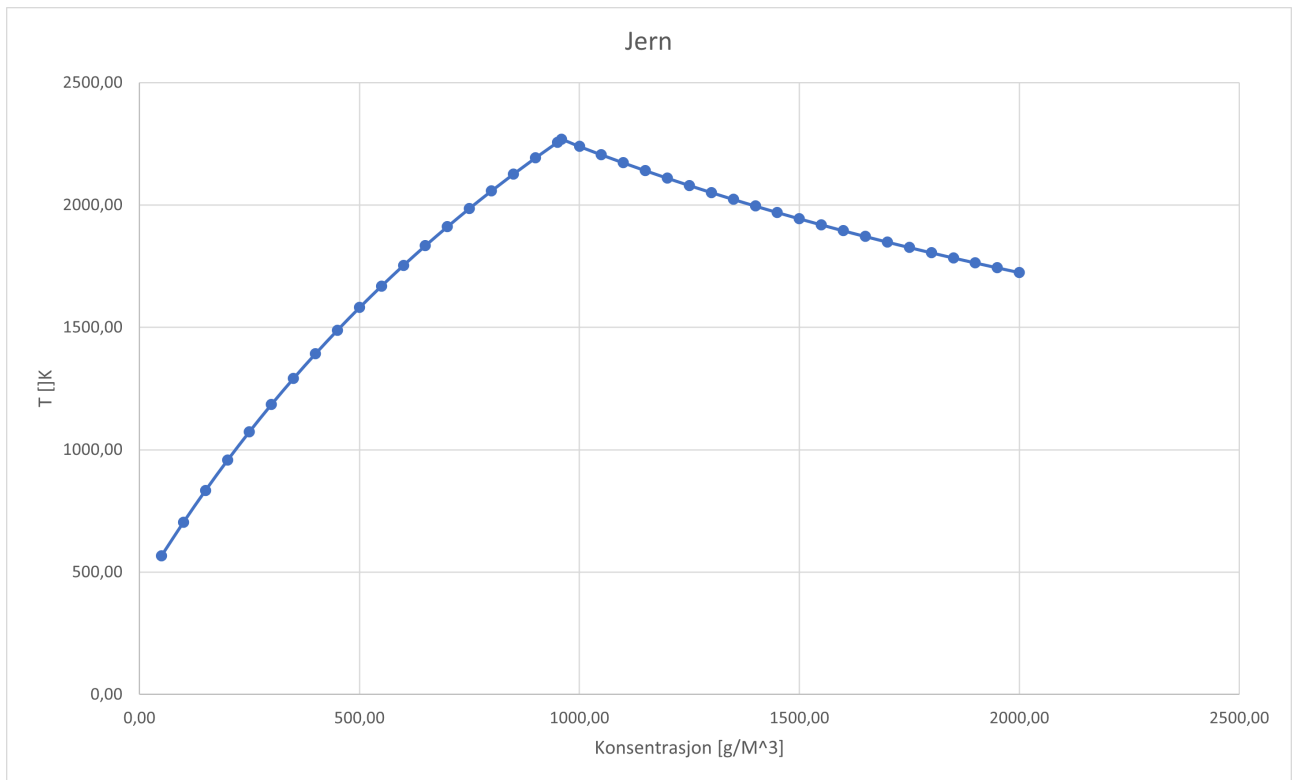
Figur 6.7: viser temperaturgrafer for kalsium.



Figur 6.8: viser temperaturgrafen for silisium.



Figur 6.9: viser temperaturgrafen for aluminium.



Figur 6.10: viser temperaturgraf for jern.

6.8 Feilkilder

Nist hadde ikke verdier for aluminiumoksid i gassfase, det ble istedet brukt a- og d verdier fra Gexcon [31].

For modelleringen er det antatt at dersom det er reaktant i systemet, så vil det brenne. Det er også antatt at det alltid er en konstant mengde luft, med $8,59 \text{ mol/m}^3 \text{O}_2$ og $32,24 \text{ mol/m}^3 \text{N}_2$ i systemet og at mengden av brensel ikke påvirker denne mengden. Det er også antatt at starttemperaturen er 298K

Det er og antatt at alt oksygenet vil konsumeres fra støkiometrisk blanding og oppover. For jern og silisium er det kun tatt med ett oksid. Det betyr at under den støkiometriske konsentrasjonen er det stor usikkerhet rundt hva og hvor mye oksid produktene faktisk består av.

Alle metallene i oppgaven kan danne nitrogenforbindelser. Disse dannes ved forskjellige temperaturer men dekomponerer også veldig lett. Så selv om det står som en liten usikkerhet vil de tvilsomt konkurrere med oksid i merkbar grad. Det finnes også aluminiummonoksid, men dette er kun observert ved spesielle eksperimenter i gassfase. Til slutt finnes det også Al_2O , som kan produseres ved brenning av Al_3O_2 og rent silisium i vakuum, derfor er det tvilsomt at dette også dannes.

Kapittel 7

Konklusjon

Hensikten med den eksperimentelle delen av oppgaven, som bestod av testing i Siwek sfæren, var å undersøke om det finnes empiriske korrelasjoner mellom partikkelstørrelsesfordelingen og eksplosjonsparameterene P_{max} og $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$. For P_{max} ble det funnet gode korrelasjoner med partikkelstørrelsesparameterene D10, D[3:2] og D[4:3]. For $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ ble det funnet sterk korrelasjon med det spesifikke overflatearealet [SSA].

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = 73,78 + 1,015[SSA]$$

Resultatene viser at støvets partikkelstørrelse har sterk innvirkning på maksimalt eksplosjonstrykk og maksimal eksplosjonstrykkhastighet.

I oppgavens modelleringsdel er det laget forbrenningsmodeller for fem rene grunnstoff. Modellen inneholder både beregninger av, om og når oksidene er i gassfase og hvor mye av oksidet som er i gassfase og beregning av temperatur ved forbrenning av grunnstoffene ved forskjellige konsentrasjoner. Fra modellen får man temperatur og mengde mol i gassfase, som kan brukes videre i simuleringsverktøyet FLACS-DustEx. Denne oppgaven inneholder en begrenset mengde datapunkter, og det kan hende at videre arbeid med lignende støv vil gi andre korrelasjoner. Det kan også finnes korrelasjoner som tar hensyn til støvenes kjemiske sammensetting.

7.1 Videre arbeid

For videre arbeid med støvtesting bør det gjøres mer tester på forskjellige typer legeringsstøv, der både kjemisk oppbygging og partikkelstørrelse varierer. Når det kommer til å finne en korrelasjon for alle støvenes eksplosjonsparameter bør man også ta med støvenes kjemi. Her kan man for eksempel se på støvenes støkiometriske konsentrasjoner eller regne ut energiinnhold ut ifra den kjemiske oppbyggingen. En slik korrelasjon vil gjøre testing på støv og beregninger enklere, da man vil få en veldig sterk pekepinn på hvor støvenes eksplosjonsparameter ligger. Men, for å sikre resultatene er det viktig å fremdeles gjøre eksperimentelle tester.

Modelleringen i denne oppgaven er basert på en god del forenklinger. Det er antatt at reaktanten som ikke reagerer med oksygen fordamper, noe som ikke er garantert, særlig ved høyere konsentrasjoner. Her kan man for eksempel innføre et gamma-lignende uttrykk som beskriver forholdet mellom reaktanten i gass og væskefase eller kanskje gass, væske og fast fase. Det kan også hende at et annet uttrykk for energimengden som overføres til reaktanten kan lages, som er mer korrekt enn dette forslaget. I denne modellutviklingen er det ikke tatt med kjøling, i form av for eksempel vegger og en faktor for denne kjølingen bør utvikles. For videre modellutvikling kan man gå videre med metoden som er brukt i denne oppgaven, da Nist har verdier på det meste av metaller og oksid. Men det trengs mer arbeid på forståelse av hvilke oksider som dannes for de forskjellige metallene. Når det gjeld istadenfor for videre arbeid på modelleringen på støvlegeringer kan det utvikles en metode for å bestemme hva som brenner ved å se på metallstøvetts kjemiske sammensetting på molbasis, og bestemme en prioriteringsrekkefølge ut ifra grunnstoffenes reaktivitet. De tilgjengelige dataene på smelte- og kokepunkt har vært av lav kvalitet for noen av oksidene, så her bør man gjøre mer arbeid. Entalpidataene bør også verifiseres. NASAs Thermo build program burde være et aktuelt program for dette arbeidet og arbeidet gjort med CEA i artikkelen Particle Equilibrium Composition model for iron dust combustion kan være et aktuelt utgangspunkt for videre arbeid her.

Bibliografi

- [1] T. Østgård, “En eksperimentell studie av partikkelstørrelsesfordelingens innvirkning på utvalgte eksplosjonsparametere for silisiumstøv,” Master’s thesis, The University of Bergen, 2022.
- [2] Elkem, “What is ferrosilicon?.” WebPage. <https://www.elkem.com/products/silicon/ferrosilicon/> Accessed: 16.01-2023.
- [3] E. R. K., *Explosion hazards in the process industry*, vol. 1. Elsevier, 2016.
- [4] V. A., “Dust disaster.” WebPage. <https://www.nfpa.org/dustdisaster> Accessed: 03-05-2023.
- [5] T. Skjold and K. E. Rolf, “Dust explosions in the process industries: research in the twenty-first century,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 48, pp. 337–342, 2016.
- [6] C. N., “legering.” WebPage. <https://snl.no/legering> Accessed: 18.01-2023.
- [7] P. B., “magnesiumoksid.” WebPage. <https://snl.no/magnesiumoksid> Accessed: 17-01-2023.
- [8] Y. Guo, K. Ren, A. Wei, C. Tao, W. Huang, P. Zhao, and D. Wu, “Iron dust explosion characteristics with small amount of nano-sized Fe_2O_3 and Fe_3O_4 particles,” *Fuel*, vol. 324, p. 124786, 2022.
- [9] H. H., “jernoksider.” WebPage. <https://snl.no/jernoksider> Accessed: 17-01-2023.
- [10] H. H., “silisiumoksider.” WebPage. <https://snl.no/silisiumoksider> Accessed: 17-01-2023.
- [11] M. J. Haraldsen H., “kalsiumoksid.” WebPage. <https://snl.no/kalsiumoksid> Accessed: 17-01-2023.
- [12] Y. M., “aluminiumoksid.” WebPage. <https://snl.no/aluminiumoksid> Accessed: 17-01-2023.
- [13] W. M. Haynes, *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC press, 2016.
- [14] americanelements, “calcium oxide.” WebPage. <https://www.americanelements.com/calcium-oxide-1305-78-8>.

- [15] americanelements, “silicon monoxide.” WebPage. <https://www.americanelements.com/silicon-monoxide-10097-28-6>.
- [16] americanelements, “silicon dioxide.” WebPage. <https://www.americanelements.com/silicon-dioxide-7631-86-9>.
- [17] C. van Gool, L. Thijs, W. Ramaekers, J. van Oijen, and L. de Goey, “Particle equilibrium composition model for iron dust combustion,” *Applications in Energy and Combustion Science*, p. 100115, 2023.
- [18] NIST, “Nist chemistry webbook.” WebPage. <https://webbook.nist.gov/chemistry/>.
- [19] T. Allen, *Particle size measurement*. Springer, 1990.
- [20] R. Eckhoff, *Dust explosions in the process industries: identification, assessment and control of dust hazards*. elsevier, 2003.
- [21] D. Ning, Y. Shoshin, J. A. van Oijen, G. Finotello, and L. De Goey, “Burn time and combustion regime of laser-ignited single iron particle,” *Combustion and Flame*, vol. 230, p. 111424, 2021.
- [22] K. van Wingerden, “Application of laboratory-scale determined kst-values of metal dust to industrial scale processes,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 77, pp. 679–684, 2019.
- [23] M. P. Clouthier, J. R. Taveau, A. G. Dastidar, L. S. Morrison, R. G. Zalosh, R. C. Ripley, F. I. Khan, and P. R. Amyotte, “Iron and aluminum powder explosibility in 20-l and 1-m³ chambers,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 62, p. 103927, 2019.
- [24] N. Kuai, J. Li, Z. Chen, W. Huang, J. Yuan, and W. Xu, “Experiment-based investigations of magnesium dust explosion characteristics,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 24, no. 4, pp. 302–313, 2011.
- [25] T. Skjold, “Selected aspects of turbulence and combustion in 20-litre explosion vessels: Development of experimental apparatus and experimental investigation,” Master’s thesis, The University of Bergen, 2003.
- [26] Elkem, “Elkem fesi-legeringer.” WebPage. Tilgjengelig fra <https://www.elkem.com/how-to-find-a-tds-sds/silicon-based-materials/sds/>.
- [27] C. Cesana and R. Siwek, “Manual for 20-l-apparatus 7.1,” 2016.
- [28] twi global, “x-ray-diffraction.” WebPage. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/x-ray-diffraction> Accessed: 05.02-2023.
- [29] UiB, “Xrf-lab.” WebPage. <https://www.uib.no/geo/90080/xrf-lab> Accessed: 05.02-2023.
- [30] P. B. Raja, K. R. Munusamy, V. Perumal, and M. N. M. Ibrahim, “Characterization of nanomaterial used in nanobioremediation,” in *Nano-bioremediation: fundamentals and applications*, pp. 57–83, Elsevier, 2022.

-
- [31] T. Skjold, B. J. Arntzen, I. E. Storvik, and O. R. Hansen, "Modelling in desc version 1.0b3," *Gexcon*, 2005.

Tillegg A

Utrykket:

$$h_{etter} = h_{fr} \quad (7.1)$$

Skrives ut slik:

$$n_a * h_a + n_{oksid} * h_{oksid} + n_{N_2} * h_{N_2} = n_{a_0} * h_{a_0} + n_{O_2} * h_{O_2} + n_{N_2} * h_{N_2} \quad (7.2)$$

Deretter settes høyresiden lik null og uttrykket for temperatur settes inn

$$h_k = a_k * T - d_k \quad (7.3)$$

Og man får dette uttrykket

$$n_a * (a_a * T - d_a) + n_{oksid} * (a_{oksid} * T - d_{oksid}) + n_{N_2} * (a_{N_2} * T - d_{N_2}) = 0 \quad (7.4)$$

For temperatur flytter man T ut og d-leddet til høyre sidet

$$n_a * a_a * T + n_{oksid} * a_{oksid} * T + n_{N_2} * a_{N_2} * T = n_a * d_a + n_{oksid} * d_{oksid} + n_{N_2} * d_{N_2} \quad (7.5)$$

Videre faktoreres T leddet ut:

$$T * (n_a * a_a + n_{oksid} * a_{oksid} + n_{N_2} * a_{N_2}) = n_a * d_a + n_{oksid} * d_{oksid} + n_{N_2} * d_{N_2} \quad (7.6)$$

og så settes T leddet for seg selv:

$$T = \frac{n_a * d_a + n_{oksid} * d_{oksid} + n_{N_2} * d_{N_2}}{(n_a * a_a + n_{oksid} * a_{oksid} + n_{N_2} * a_{N_2})} \quad (7.7)$$

når man er under støkiometrisk konsentrasjon har man ikke rent grunnstoff, men oksygen i stedet:

$$T = \frac{n_{O_2} * d_{O_2} + n_{oksid} * d_{oksid} + n_{N_2} * d_{N_2}}{(n_{O_2} * a_{O_2} + n_{oksid} * a_{oksid} + n_{N_2} * a_{N_2})} \quad (7.8)$$

For å få et uttrykk gamma bruker man formelen 7.11 og bytter ut et ledd for oksid med to for oksid i gass og væskefase:

$$En_a * a_a * T + \gamma * n_{oksid} * a_{oksidg} * T + (1 - \gamma) * n_{oksid} * a_{oksidl} * T + n_{N_2} * a_{N_2} * T = n_a * d_a + n_{oksid} * d_{oksid} + n_{N_2} * d_{N_2} \quad (7.9)$$

$$n_a * (a_a * T - d_a) + \gamma * n_{oksid} * (a_{oksid} * T - d_{oksid})_g + (1 - \gamma) * n_{oksid} * (a_{oksid} * T - d_{oksid})_l + n_{N_2} * (a_{N_2} * T - d_{N_2}) = 0 \quad (7.10)$$

I stedet for å løse for temperatur løses uttrykket for gamma:

$$n_a * (a_a * T - d_a) + \gamma * n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_g + n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_l - \gamma * n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_l + n_{N_2} * (a_{N_2} * T - d_{N_2}) = 0 \quad (7.11)$$

også her setter man leddene med gamma for seg selv:

$$\gamma * (n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_g - n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_l) = -(n_a * (a_a * T - d_a) + n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_l + n_{N_2} * (a_{N_2} * T - d_{N_2})) \quad (7.12)$$

og gamma settes for seg selv:

$$\gamma = -\frac{(n_a * (a_a * T - d_a) + n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_l + n_{N_2} * (a_{N_2} * T - d_{N_2}))}{(n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_g - n_{\text{oksid}} * (a_{\text{oksid}} * T - d_{\text{oksid}})_l)} \quad (7.13)$$