

Explosionsrisker med metaldamm

Stina Dufva
Anton Fast

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet

Fire Safety Engineering
Lund University
Sweden

Rapport 5557, Lund 2017
Examensarbete på brandingenjörsutbildningen



LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

Explosionsrisker med metaldamm

**Stina Dufva
Anton Fast**

Lund 2017

Titel

Explosionsrisker med metalledamm

Title

Explosion hazards with metal dust

Författare/Authors

Stina Dufva & Anton Fast

Report

5557

ISRN

LUTVDG/TVBB--5557--SE

Antal sidor

58

Sökord

Dammexplosion, metall, pulver, aluminium, damm, processindustri.

Keywords

Dust explosion, metal, powder, aluminium, aluminum, dust, process industry.

Abstract

Dust explosions in the process industry can have devastating consequences. The purpose of this work was to study the risks of dust explosions with metal dusts. It was also to provide an overview of the state of knowledge supplemented with laboratory scale experiments for different materials mainly to gain an understanding of the basic mechanisms. The experiments have been made with powder from different metals to compare the explosion bias. It is important to consider the possibility of an explosion, during operations involving metal dust. The design, size and material of the particles is of great importance.

Författarna ansvarar för innehållet i rapporten. Alla illustrationer där inget annat anges är gjorda av författarna.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2017

Avdelningen för Brandteknik	Department of Fire Safety Engineering
Lunds Tekniska Högskola	Lund University
Lunds Universitet	P.O. Box 118
Box 118	SE-221 00 Lund
221 00 Lund	Sweden
Telefon: 046 - 222 73 60	Telephone: + 46 222 73 60
http://www.brand.lth.se	http://www.brand.lth.se
brand@brand.lth.se	brand@brand.lth.se

Sammanfattning

En dammexplosion inom processindustrin kan få förödande konsekvenser och det finns många exempel på dammexplosioner där hela industrianläggningar har förstörts. Det är därför viktigt att vara medveten om och ha ett bra skydd mot dessa risker för att undvika skador, dödsfall och stora ekonomiska förluster.

I Sverige har flera dammexplosioner inträffat som medfört allvarliga personskador samt omfattande materiella skador. Ett exempel är en arbetsplatsolycka i Trångsund där en dammexplosion i en dammsugare ledde till att tre personer skadades (SVT, 2017).

Syftet med denna rapport var att studera de risker för dammexplosion och eventuell brand som kan uppstå i olika tillverkningsprocesser där det bildas metalldamm. Det var också att ge en översikt över kunskapsläget kompletterat med försök i laboratorieskala för ett antal olika material främst för att få förståelse för de grundläggande mekanismerna vid en explosion i metalldamm.

Målet var att få en bättre bild av frekvens, orsak och verkan i samband med inträffade explosioner med metalldamm och att erhållna resultat kan nyttjas för att förbättra kunskapsläget inom industrin och definiera vilka framtida insatser som behövs för att höja kunskapsnivån ytterligare.

För att ta ge en översikt av kunskapsläget om dammexplosioner med metalldamm har en litteraturstudie genomförts. Studien har utförts genom sökningar på Lunds universitets databas LUBsearch.

Egna försök har utförts och en sammanställning av resultatet har gjorts. Försöken har utförts i brandlaboratoriet på Lunds Tekniska Högskola och på Carlfors Bruk som ligger utanför Huskvarna. Försöken har gjorts med olika metallpulver för att jämföra explosionsbenägenheten.

En av de slutsatser som har kunnat dras av detta arbete är att det behövs mer kunskap och forskning om dammexplosioner. Det är viktigt att ta hänsyn till att det kan inträffa en explosion, speciellt för verksamheter där metalldamm förekommer. Partiklarnas utformning, storlek och vilket material det är har stor betydelse. Det finns många regelverk att följa men det är ibland otydligt vilka metallpulver går under eftersom brännbart damm inte omfattas av regler för explosiva varor då ämnena i ren form inte är explosiva.

Förord

Detta projektarbete är genomfört vid Avdelningen för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola. Under arbetets gång har vi fått vägledning och stöd från flera personer. Vi vill därför utan inbördes ordning tacka följande personer:

Stefan Svensson, LTH, för god handledning under arbetets gång och alla värdefulla kommentarer och tips.

Ken Nessvi, PS Group i Malmö, för god handledning och stöd under arbetets gång och under studiebesöket på Carlfors Bruk.

Jens Bengtsson, Briab, för stöttning under arbetets gång.

Svante Björklund och Peter Muckenhirn, Carlfors Bruk, för besök och försök på Carlfors Bruk.

Mikael Andersson, Aston Carlsson, för pulver till försök.

Anna Carlin Andersson, Räddningstjänsten Syd, för hjälp med vägledning att hitta statistik.

Lena Anstensen och Joakim Ekberg, MSB, för att hitta statistik.

Annika Roos, Rickard Sandberg och Lars-Olov Nordberg, Sandvik, för pulver till försök.

David Danielsson och Nils Dufva för korrekturläsning.

Lund, 2017

Förkortningar

AFS	Arbetsmiljöverkets författningssamling
BBR	Boverkets byggregler
LTH	Lunds Tekniska Högskola
NFPA	National Fire Protection Association
LBE	Lagen om brandfarliga och explosiva varor
MSB	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap

1. Innehåll

1.	Inledning	1
1.1.	Bakgrund	1
1.2.	Syfte och mål.....	1
1.3.	Frågeställningar.....	2
1.4.	Metod	2
1.5.	Läsanvisningar	3
1.6.	Avgränsningar och begränsningar.....	3
2.	Teori.....	5
2.1.	Definitioner	5
2.2.	Dammexplosion	7
2.3.	Åtgärder.....	10
3.	Genomgång av regelverk	13
3.1.	Europeiska regler.....	13
3.2.	Arbetsmiljöverkets föreskrifter	13
3.3.	Amerikanska regler	14
3.4.	Europeiska och svenska standarder.....	15
3.5.	Boverkets byggregler	15
3.6.	Lagen om brandfarliga och explosiva varor, MSB	16
3.7.	Övriga nationella standarder	16
4.	Statistik och inträffade händelser	16
5.	Praktiska försök	19
5.1.	Aston Carlsson	19
5.2.	Sandvik.....	19
5.3.	Mikroskop	20
5.4.	Brandlabbet på LTH.....	21
5.5.	Carlfors Bruk.....	23
5.6.	Resultat.....	25
5.7.	Felkällor	28
6.	Diskussion.....	31
6.1.	Kunskapsläget	31
6.2.	Resultat från försök	31
7.	Slutsats och behov av vidare forskning	33
	Referenser	35
	Bilaga A	39

1. Inledning

I följande kapitel redovisas bakgrunden till arbetet, dess syfte och mål samt metod och avgränsningar.

1.1. Bakgrund

Metallpulver har flera olika användningsområden. Metallpulver kan användas i alltifrån stötdämpare till flingpaket. Exempel på användning är komponenter till fordonsindustrin, ytbeläggning, lödning, elektromagnetiska applikationer samt filter för vattenrening. Pulver kan användas för färgsättning i olika typer av färg. Det kan även användas mer praktiskt såsom smörjmedel och för blåstring. Metallpulver används i bilindustrin, en bil tillverkad i Europa innehåller i genomsnitt ca 7 kg metallpulver. Det används metallpulver exempelvis i växellådor. Mycket metallpulver används vid tillverkning av komponenter. Med en 3D-skrivare kan man med metallpulver skriva ut små detaljer, såsom smycken och urtavlor till armbandsklockor (Höganäs AB, 2017).

En dammexplosion inom processindustrin kan få förödande konsekvenser och det finns många exempel på dammexplosioner där hela industrianläggningar har förstörts. Det är därför viktigt att vara medveten om och ha ett bra skydd mot dessa risker för att undvika skador, dödsfall och stora ekonomiska förluster.

I Sverige har flera dammexplosioner inträffat som medfört allvarliga personskador samt omfattande materiella skador. Ett exempel är en arbetsplatsolycka i Trångsund där en dammexplosion i en dammsugare ledde till att tre personer skadades (SVT, 2017).

Utomlands finns även exempel på allvarligare olyckor som orsakats av dammexplosioner. En katastrofal dammexplosion inträffade i Kina i augusti 2014 med 75 döda och ca 200 skadade. Av dessa 200 avled senare 71 till följd av sina skador vilket höjde det totala antalet omkomna till 146. På anläggningen i Kina tillverkades aluminiumfälgar och explosionen inträffade i det gemensamma utsugssystemet (Li, Yang, Yuan, & Eckhoff, 2016). Andra exempel är en explosion i aluminiumdamm vid Hayes Lemmerz i USA år 2003 som orsakade ett dödsfall (U.S. Chemical Safety and Hazard investigation board, 2005).

Värt att nämna är även att de studenter som idag studerar till Brandingenjör i Lund får en föreläsning om dammexplosioner i sin utbildning som är baserad på en skrift av IPS (lägg till referens). Föreläsningen ges under kursen Brandkemi. Det har för över tio år sedan givits en avancerad extern kurs om dammexplosioner på LTH, Lunds Tekniska Högskola.

1.2. Syfte och mål

Eftersom dammexplosioner med metalldamm kan ge upphov till olyckor med allvarliga konsekvenser är det viktigt att känna till och förstå de risker som finns med metalldamm. Syftet med denna rapport är därför att studera de risker för dammexplosion och eventuell brand som kan uppstå i olika tillverkningsprocesser där det bildas metalldamm. Syftet med examensarbetet är också att ge en översikt över kunskapsläget, kompletterat med försök i laboratorieskala för ett antal olika material främst för att få förståelse för de grundläggande mekanismerna vid en explosion i metalldamm.

Målet är att undersöka vilka skillnader som finns mellan olika metaller med avseende på hur kraftigt de reagerar och jämföra hur en dammexplosion med metalldamm skiljer sig från en

med organiskt damm. Målet är också att med hjälp av en litteraturstudie skapa en översiktlig bild av hur det vetenskapliga kunskapsläget ser ut samt att gå igenom vilka regelverk som omfattar brännbart damm.

1.3. Frågeställningar

För att uppnå målen med arbetet sattes följande frågeställningar upp.

I vilka processer och utrustningar uppstår explosiv atmosfär? Finns det typiska bearbetningsprocesser eller maskiner som oftare leder till metalldammexplosioner?

Var har metalldammet som högst koncentration och var sker oftast explosionen? Vilken kornstorlek och vilken geometri har partiklarna?

Hur stor andel av de dammexplosioner som inträffar utgörs av metalldamm?

Vad finns det för åtgärder för att förbygga och förhindra metalldammexplosioner?

Vilka egna försök behövs för att få övergripande förståelse för metalldammexplosioner samt för att jämföra explosionsbenägenheten hos olika metallpulver?

1.4. Metod

För att uppfylla syfte och mål med arbetet har i huvudsak två metoder använts. Dels en litteraturstudie och dels egna praktiska försök.

För att ge en översikt av kunskapsläget om dammexplosioner med metalldamm genomfördes en litteraturstudie. Studien utfördes genom sökningar på Lunds Universitets databas LUBsearch. LUBsearch är en gemensam ingång till bibliotekets samlade resurser. I sökmotorn är flera stora ämnesdatabaser såsom *Scopus* och *Web of Science* inkluderade (Lunds universitet, 2017).

Litteratursökningen utfördes enligt följande:

- Fastställande av vilka databaser som skulle användas
- Fastställande av vilka sökord som skulle användas, i vilka kombinationer och med vilka operatorer
- Urval av vilka källor som anses relevanta baserat på först titlar och sedan genomläsning av abstract
- Sammanställning av resultat

De sökkriterier som användes var att rapporterna skulle vara peer reviewed och tidsperioden 2007 till 2017. Detta för att bara få med rapporter som är kvalitetsgranskade och för att få ett hanterligt antal referenser.

Följande sökord användes: "dust explosion*" AND metal, powder AND explosion AND metal, dammexplosion* (utan kriterier)

LUBsearch valdes som den enda databas då det är det som Lunds Universitet använder sig av. Flera databaser är inlagda i LUBsearch och därför kommer mycket information med.

Sökorden som användes valdes just för att resultatet som eftersöktes är det allmänna kunskapsläget över dammexplosioner med metalldamm. De sökningar som gjordes på engelska valdes på grund av att det går att använda olika ord för samma sak. Den sökning

som gjordes på svenska gjordes för att få med den svenska litteraturen, för att få några resultat togs dock kriterierna bort.

För att sammanställa kunskapsläget gick resultatet igenom och de rapporter som inte ansågs vara relevanta sållades bort, först genom att läsa igenom alla rubriker, sedan alla abstrakt och sist relevanta delar av rapporterna. Urvalskriterierna för denna gallring var att rapporterna skulle behandla explosionsegenskaper för metalldamm, möjliga åtgärder för att minimera risker med brännbart metalldamm eller utredningar och beskrivningar av inträffade olyckor med metalldamm. Efter gallringen var det 50 rapporter kvar. En sammanställning av dessa samt sammanfattande beskrivningar av vad som avhandlas i varje rapport finns i Tabell 7 i bilaga A.

Det gjordes även en genomgång av de regelverk som idag finns.

Egna försök har utförts och en sammanställning av resultatet har gjorts. Försöken har utförts i brandlaboratoriet på Lunds Tekniska Högskola och på Carlfors Bruk som ligger utanför Huskvarna. Vid försöken testades olika metallpulver för att jämföra explosionsbenägenheten. En mer detaljerad beskrivning av försöken och resultaten finns i kapitel 6.

Därefter diskuterades och analyserades resultatet.

1.5. Läsanvisningar

Kapitel 2 – Teori

I detta kapitel förklaras och definieras dammexplosion.

Kapitel 3 – Genomgång av regelverk

I detta kapitel beskrivs de regelverk som gäller idag för verksamheter där det finns risk för dammexplosioner och en jämförelse mellan dessa.

Kapitel 4 – Statistik och inträffade händelser

I detta kapitel finns statistik för tidigare händelser.

Kapitel 5 – Praktiska försök

I detta kapitel beskrivs försöken som gjorts och vilka resultat som erhållits.

Kapitel 6 – Diskussion

I detta kapitel förs en friare diskussion angående problemställningar och övrigt som kommit fram under arbetsgång.

Kapitel 7 - Slutsats och behov av vidare forskning

Slutsatsen är en kortare sammanställning av rapportens slutsatser. I kapitlet beskrivs också vad författarna tycker är önskvärt i framtiden.

1.6. Avgränsningar och begränsningar

För att den tidsram som sattes för arbetet från början skulle hålla har det blivit nödvändigt att göra avgränsningar under arbetets gång.

Endast det vetenskapliga kunskapsläget har undersökts och inte hur det ser ut hos de industrier som producerar eller hanterar brännbart metalledamm.

Vid de praktiska försöken var det inte möjligt att utföra några kvantitativa mätningar av explosionsegenskaper. Detta på grund av att de testutrustningar som användes inte tillät detta. Istället har egna visuella jämförelser av flam- och plymhöjd legat till grund för bedömning av hur kraftigt de olika materialen reagerat.

2. Teori

I detta kapitel redovisas några definitioner som är väsentliga i rapporten, teorin bakom dammexplosioner och det som tidigare tagits fram vid forskning.

2.1. Definitioner

Nedan redovisas definitioner på ord och begrepp som används i rapporten. De definitioner som inte har någon källhänvisning är egna definitioner av vad begreppen står för i denna rapport.

Atomisering

Metod för att framställa pulver. Metoden går ut på att smält metall hålls genom en dysa och utsätts för jetströmmar av högt tryck vilket gör att metallen sönderdelas i små droppar som sedan solidifieras och faller till botten av behållaren (Osika, Lavesson, & Svegborn, 2015).

Damm

Små fasta partiklar inklusive fibrer och flingor som faller utav egen tyngd men som under viss tid kan bli svävande i luften. (ref=

Explosion

En reaktion som innebär en ”snabb avgivning av energi, till exempel en snabb avgivning av värme, exempelvis på grund av en mycket snabb reaktion eller en snabb tryckökning” (van Hees, 2015).

Explosionsfarlig miljö

Ett område där explosiv atmosfär kan förekomma samt intilliggande områden i vilka arbetstagare kan utsättas för fara orsakad av den explosiva atmosfären (Arbetsmiljöverket, 2003).

Explosiv atmosfär

Explosiv atmosfär definieras enligt arbetsmiljöverket som ”En blandning av gas/gaser med annan gas, ånga, aerosol eller damm i vilken en hastig exoterm kemisk reaktion med eller utan påtaglig tryckvåg efter antändning sprider sig till hela eller större delen av den oförbrända blandningen” (Arbetsmiljöverket, 2003).

Förbränningsentalpi

Den totala energimängd som frigörs vid en stökiometrisk förbränningsreaktion, (Drysdale, 2011).

K_{st}

En experimentellt framtagen konstant för tryckökningshastighet som en viss typ av damm ger upphov till vid en explosion. Kallas även deflagrationsindex eller tryckstegringskonstant. K_{st} beräknas enligt ekvation 1 nedan.

$$dp/dt = K_{st} V^{1/3} \qquad \text{Ekvation 1.}$$

Där

$p = \text{tryck (bar)}$

$t = \text{tid (s)}$

$K_{st} = \text{tryckstegringskonstant [bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

$V = \text{volym [m}^3]$

Ju högre värde på K_{st} desto kraftigare explosion kan dammet leda till (NFPA, 2012).

Undre explosionsgräns

Den lägsta koncentration av brännbart damm vid vilken en dammexplosion kan uppstå. Denna undre explosionsgräns kan ibland likställas med den undre brännbarhetsgränsen för gaser.

MEC

Minimum explosible concentration. Se lägsta explosionskoncentration.

MIE

Minimum ignition energy. Se tändenergi.

MIT

Minimum ignition temperature. Den lägsta temperaturen på en het yta som ett dammoln kan utsättas för och antända (Nessvi & Nilsson, 2011).

P_{max}

P_{max} och K_{st} är de explosiva egenskaperna som används för att mäta hur stor explosionen är. I grund och botten säger testerna hur stort tryck en innesluten explosion kommer generera och hur snabbt explosionen kommer att ske (Nessvi & Nilsson, 2011).

Shot Peening

Shot peening är en bearbetningsprocess som syftar till att stärka metalldelar mot korrosion och förlänga hållbarheten. Processen går ut på att ytan i fråga besprutas med små kulor av till exempel metall, keramiskt material eller glas (Progressive surface, 2017).

Tryckstegringshastighet (dp/dt)

Den högsta hastigheten för tryckstegring vid en innesluten explosion (Nessvi & Nilsson, 2011).

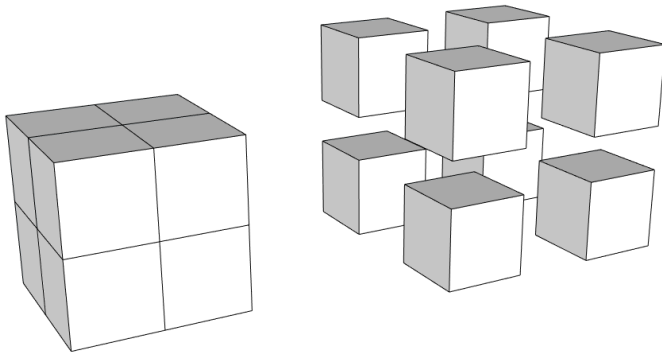
Tändenergi

Minsta tändenergi eller MIE är den lägsta energi som krävs för att antända en brännbar blandning av damm och luft (Arbetsmiljöverket, 2003).

2.2. Dammexplosion

Syftet med följande avsnitt är att ge en övergripande bild av fenomenet dammexplosioner, vilka mekanismer som ligger bakom, hur de uppstår och vilka åtgärder som kan vidtas för att förhindra dem. Avsnittet bygger till stor del på Rolf Eckhoffs bok *Dust explosions in the process industries* (2003).

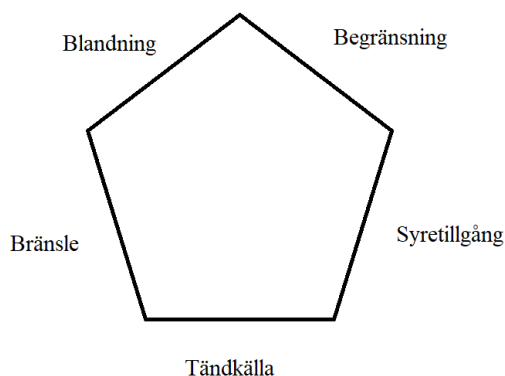
Hur en dammexplosion kan uppstå kan enklast förklaras med att förbränningshastigheten och intensiteten med vilka ett fast brännbart ämne brinner beror på hur finfördelat ämnet är. Detta eftersom att den totala kontaktytan med luften ökar med ökad finfördelning. Graden av finfördelning kan beskrivas som den totala ytan per volym- eller massenhet, så kallad specifik yta. Detta kan illustreras med hjälp av en kub som delas in mindre och mindre delar, se Figur 1 nedan.



Figur 1: Illustration av hur minskad partikelstorlek ger större specifik yta, figuren är återskapad efter förlaga från Rolf Eckhoff (Eckhoff R. K., 2003),

Om partiklarna befinner sig i ett utrymme som är tillräckligt stort för att de ska kunna sväva fritt och storleken är 0,1 mm eller mindre blir de mycket lättantändliga och förbränningshastigheten mycket hög. Om ett sådant dammoln antänds i ett slutet utrymme kan det leda till en kraftig explosion (Eckhoff R. K., 2003).

Ett enkelt och illustrativt sätt att beskriva förutsättningarna för en dammexplosion är med hjälp av den så kallade explosionspentagonen, se Figur 2 nedan. Den kan jämföras med brandtriangeln som beskriver förutsättningarna för att en brand ska uppstå. Förutom syre, bränsle och tändkälla krävs det för att en dammexplosion ska uppstå även att dammet är uppvirvlat och blandat med luften samt att koncentrationen ligger inom explosionsgränserna (Amyotte, Khan, & Dastidar, 2003).



Figur 2: Explosionspentagon.

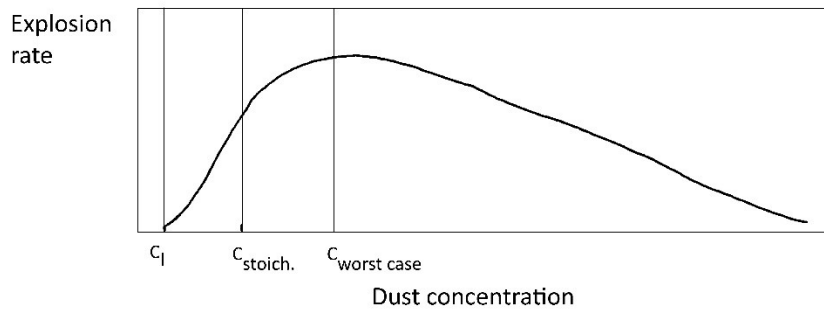
Både organiska och oorganiska ämnens damm samt vissa metallers damm kan ge upphov till dammexplosioner. Dammpartiklarnas egenskaper är avgörande för om en explosion kommer att uppstå: massa, densitet, specifik värmekapacitet och förbränningsentalpi.

Förbränningsentalpin för till exempel vissa metaller är avsevärt högre än för till exempel stärkelse eller socker vilket innebär att damm från dessa metaller kan ge upphov till kraftigare explosioner än till exempel damm från organiska ämnen. Det är dock viktigt att notera att mängden syre begränsar hur mycket energi som kan frigöras vid en explosion vilket innebär att det vid en jämförelse av de olika ämnenas potentiella farlighet är viktigt att relatera förbränningsentalpin till mängden syre som finns tillgänglig i dammolnet. I Tabell 1 nedan finns förbränningsentalpier för några olika ämnen listade.

Tabell 1: Förbränningsentalpi för några olika ämnen, (Eckhoff R. K., 2003).

Ämne	Förbränningsentalpi (kJ/mol)
Kalcium (Ca)	1270
Magnesium (Mg)	1240
Aluminium (Al)	830
Järn (Fe)	530
Stärkelse	470
Sackaros	470

Även andra faktorer såsom kemisk sammansättning, fukttinnehåll och partiklarnas storleksfördelning påverkar dammets antändlighet och explosionsintensitet. För att en partikel ska kunna sväva länge i luften krävs låg densitet, liten massa och så stort förhållande yta/massa som möjligt. Den ideal dammkoncentrationen för att åstadkomma kraftigaste reaktion ligger oftast strax ovanför den stökiometriska blandningen se Figur 3 (Eckhoff R. K., 2003).



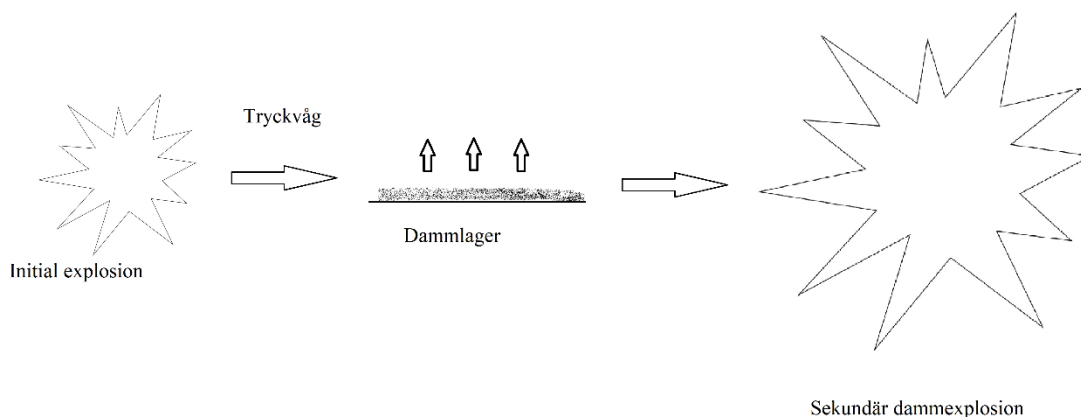
Figur 3: Illustration av hur maximalt explosionstryck och lägsta tändenergi varierar med varierande dammkoncentration, figuren är återskapad efter förlaga från Rolf Eckhoff (Eckhoff R. K., 2003).

En dammexplosion kan liknas vid en gas- eller ångmolnexplosion. Precis som för explosioner med gasformiga ämnen kan dammexplosioner endast ske om dammkoncentrationen ligger inom ett visst område. Med dammkoncentration menas massan damm per volymenhet dammoln. Detta så kallade explosionsområde har för damm generellt en undre gräns på cirka 50–100 g/m³ och en övre gräns på cirka 2–3 kg/m³. Explosionsgränserna är dock inte lika tydliga för damm som för gaser och det har visats att den undre explosionsgränsen beror på vilken partikelstorlek dammet har (Eckhoff R. K., 2003).

För att ett dammoln ska antända krävs en tillräckligt kraftig tändkälla. Vanliga tändkällor kan till exempel vara glödande eller brinnande damm, öppna lågor, heta ytor, värme från mekanisk påverkan eller elektriska urladdningar och ljusbågar.

Det finns metoder för att inertera processer där brännbart metalledamm förekommer. Hur MIE för aluminiumpulver beror av kvävgashalten i luften har undersökts varvid resultatet blev att en kvävgashalt på 90 % innebar en ökning av MIE till över 1000 mJ, vilket inte är vanligt förekommande vid elektrostatiske urladdningar i processindustrier (Choi, Sakasai, & Nishimura, 2015). För magnesiumpulver innebar en kvävehalt på 97 % att MIE ökade till 200 mJ (Choi, Sakasai, & Nishimura, 2016).

En dammexplosion kan också vara en tändkälla i sig själv. Detta genom att trycket från en första explosion virvlar upp eventuella dammskikt som sedan antänds i en så kallad sekundär explosion. Det är ofta så att den första utlösande explosionen är relativt liten, dock tillräcklig för att virvla upp damm från till exempel balkar, avsatsar eller andra ytor där damm ansamlats. Detta kan i sin tur leda till en större sekundär explosion och om det sker i en sluten volym även till detonation (Hayden, 2004). I Figur 4 nedan illustreras principen för en sekundär dammexplosion.



Figur 4: Illustration av en sekundär dammexplosion. En initial explosion skapar en tryckvåg som virvlar upp damm som sedan antänds och skapar en sekundär explosion.

Damm eller pulver med partikelstorlek mindre än 1 μm , så kallat nanodamm har blivit allt vanligare och används vid tillverkning av flera olika typer produkter. Som nämndes tidigare har partikelstorleken stor betydelse för explosionsegenskaperna och det kan antas att nanodamm skulle vara farligare än damm med större partikelstorlek. Det har dock visat sig att det inte nödvändigtvis är på det viset. Visserligen har nanodamm väldigt låg lägsta tändenergi, lägre än 1 mJ (Wu, Chang, & Hsiao, 2009). P_{max} och K_{st} blir högre med minskad partikelstorlek men bara till en viss gräns, 100 nm för Al (Wu, Ou, Hsiao, & Shih, 2010) och 400 nm för Mg (Mittal, 2014), varefter de minskar. Det framkommer dock även att det kan vara svårt att få till dammoln med så små partiklar då dessa på grund av starka interpartikulära krafter tenderar att bilda större klumpar (Eckhoff R. K., 2012). Vad gäller praktiska försök kan det påpekas att det finns en problematik kring skalning av främst K_{st} , det blir inte samma värden vid småskaliga och storskaliga försök (Van Wingerden & Scott, 2014).

2.3. Åtgärder

Konsekvenserna av en dammexplosion kan bli stora. Det kan ske förödande olyckor med dammexplosioner av metalldamm. Det finns flera åtgärder som kan vidtas för att minska riskerna. Nedan listas exempel på åtgärder.

Utvecklade bränder i metalldamm är närmast omöjliga att bekämpa. Det bästa tillvägagångssätt är att isolera materialet så mycket som möjligt, om det kan göras på ett säkert sätt.

De exempel på åtgärder som presenteras nedan hämtades från (Nessvi & Nilsson, 2011), (Europeiska kommissionen, 2003), (Arbetsmiljöverket, 2003), (Arbetsarkyddstyrelsen, 1981) samt intervju under platsbesöket på Carlfors bruk (Björklund, 2017).

Exempel på åtgärder/rekommendationer för att minska skadorna

- Se till att byggnader, lokaler, maskiner och apparater förses med tryckavlastare som avlastar en explosion till ofarlig plats (Nessvi & Nilsson, 2011).
- Se till så att utrymningsvägar finns ordnade, att de anställda känner till dessa och att det går snabbt att utrymma lokalen (Arbetsmiljöverket, 2003).
- Användning av släcksystem i utsatta utrustningar som genom att snabbt detektera explosioner och spruta in släckmedel sänker explosionstrycket till en nivå som utrustningen kan hantera (Nessvi & Nilsson, 2011).
- Inneslutning av explosion med explosionshållfast utrustning eller explosionsisolering som förhindrar explosioner från att sprida sig mellan olika processdelar (Nessvi & Nilsson, 2011).
- Användning av vatten på bränder är extremt farligt och skapar betydande risker och faror.

Exempel på åtgärder för att förhindra att dammexplosioner uppstår

- Hålla rent i lokaler där brännbart damm hanteras och inte låta brännbart damm ansamlas i stora mängder (Arbetarskyddstyrelsen, 1981).
- Kontroll av möjliga antändningskällor (Arbetsmiljöverket, 2003).
- Ordna arbetet så att det generas och ansamlas så lite damm som möjligt. Detta gäller speciellt det allra finaste och torraste dammet (Arbetarskyddstyrelsen, 1981).
- Håll lokaler och inredning, maskiner, apparater och ledningar fria från damm.
- Undvik uppvirvling och spridning av damm vid renhållning (Arbetarskyddstyrelsen, 1981).
- Välj maskiner, apparater och transportörer som är dammtäta och utan dammsamlade fickor (Arbetarskyddstyrelsen, 1981).
- Ordna utsugning av dammet. Helst separat utrustning för varje slag av damm och för varje apparat eller grupp av apparater (Arbetarskyddstyrelsen, 1981).
- Skilj bort föremål som kan orsaka gnistbildning då de kommer in i kross eller kvarn (Arbetarskyddstyrelsen, 1981).
- Ordna förbindelser av metall mellan maskiner, apparater och trummor och delar av dessa. Jorda förbindningen för att avleda statisk elektricitet (Arbetsmiljöverket, 2003).
- Undvik alltför låg luftfuktighet i lokalen för att undvika statisk elektricitet (Arbetsmiljöverket, 2003).
- Inertering med till exempel kvävgas (Arbetsmiljöverket, 2003).
- Förebyggande av tändkällor, eliminera tändkällor till exempel genom att elektrisk utrustning som används är EX-klassad (Europaparlamentet, 1999).

3. Genomgång av regelverk

I detta kapitel redovisas vilka regelverk som gäller för miljöer där dammexplosioner kan inträffa.

De regelverk som finns idag och gäller för explosionsrisk i Sverige är AFS 2003:3, EU-direktiv 1999/92/EG, Standarder och BBR verksamhetsklass 6.

I USA är det bland annat NFPA 484, NFPA 654, NFPA 499, NFPA 68, NFPA 69 och NFPA 652 som gäller.

3.1. Europeiska regler

Europiska Unionen har infört två direktiv som behandlar problemen med explosiva miljöer. EU-direktiven benämns oftast ATEX-direktiven och behandlar alla former av explosiva miljöer, allt från gas till damm.

Europaparlamentets och rådets direktiv 1999/92/EG om minimikrav för förbättring av säkerhet och hälsa för arbetstagare som kan utsättas för fara orsakad av explosiv atmosfär antogs av Europaparlamentet och Europarådet den 16 december 1999. I dokumentet anges vilka skyldigheter arbetsgivare har när det kommer till explosionsskydd.

Enligt Direktiv 99/92 har arbetsgivaren ett antal skyldigheter när det kommer till att förebygga explosioner i verksamheten. Bland annat ska de områden där explosiv atmosfär kan uppstå klassificeras i zoner beroende på hur ofta explosiv atmosfär uppkommer. Zonklassificeringen är densamma som i AFS 2003:3. Ett explosionsskyddsdocument som redovisar vilka explosionsrisker som finns, vilka åtgärder som vidtagits och vilka områden som klassificerats i vilka zoner ska upprättas. Tändkällor i form av elektrostatiska laddningar från kläder skall förebyggas genom att arbetstagare förses med arbetskläder som inte ger upphov till sådana laddningar. Utrustning, skyddssystem och varje tillhörande anslutningsanordning får endast användas om det i explosionsskyddsdocumentet framgår att den är lämplig att användas i explosiv atmosfär (Europaparlamentet, 1999).

3.2. Arbetsmiljöverkets föreskrifter

Det europeiska direktivet är infört i svensk lagstiftning genom AFS 2003:3 som är Arbetsmiljöverkets föreskrifter om arbete i explosionsfarlig miljö samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna. Allmänna råd är inte tvingande utan är till för att förtydliga innebörden i föreskrifterna och ge rekommendationer, bakgrundsinformation och hänvisningar. Föreskrifterna gäller där någon i arbetet kan utsättas för fara orsakad av explosionsfarlig miljö i byggnader, lokaler, utrustningar eller andra tekniska anordningar och på arbetsplatser i övrigt där explosionsfarlig miljö kan förekomma. Transportmedel som är avsedda att användas i explosionsfarlig miljö omfattas också av dessa föreskrifter (Arbetsmiljöverket, 2003).

Allmänt i AFS 2003:3 är att utrustning, installationer, skyddssystem, komponenter, anordningar, verktyg och material ska vara riskbedömda och lämpliga för den explosiva atmosfär de används i. De ska också underhållas så att explosionsskyddet upprätthålls. Byggnader, lokaler och arbetsplatser ska vara utformade, så långt det är möjligt, så att inte någon person utsätts för risk att skadas om en explosiv atmosfär antänds. Hantering och rutiner ska vara riskbedömda och lämpliga för den explosiva atmosfär de är avsedda för (Arbetsmiljöverket, 2003).

Arbetsgivaren måste se till att den som vistas i en explosionsfarlig miljö har lämplig utbildning och kunskap. För att förebygga explosioner ska lämpliga tekniska och organisatoriska åtgärder vidtas. För arbetsplatser där explosionsrisk föreligger ska arbetsgivaren innan arbete påbörjas upprätta ett explosionsskyddsdokument som är baserat på riskbedömningen. Dokumentet ska hållas aktuellt (Arbetsmiljöverket, 2003).

Ämnen som vid hantering kan förekomma i form av damm ska betraktas som material som kan bilda explosiv atmosfär om inte en undersökning har visat att de inte kan orsaka en explosion. Om man ska skicka iväg ämnen för dammexplosionsprov så ska provet vara representativt för dammexplosionsrisken. Det är viktigt att vara noga med fukt/vattenhalt och förpacka diffusionstätt. Man ska begära minst bestämning av lägsta tändenergi. Testmetod och testapparatens volym bör alltid anges (Arbetsmiljöverket, 2003).

Utbildningar för dammexplosioner ges regelbundet av utbildningsföretag, högskolor och brandförsvarsföreningen (Arbetsmiljöverket, 2003).

3.3. Amerikanska regler

National Fire Protection Association är en icke-vinstdriven organisation som arbetar för att reducera antalet dödsfall, personskador och ekonomiska skador till följd av brandrelaterade orsaker. För att göra detta ger de ut regelverk och standarder om allt från släcksystem till elinstallationer. Det finns ett antal standarder som gäller brännbart damm och dammexplosioner (NFPA, 2017). Nedan presenteras de standarder som bedömts som relevanta när det gäller dammexplosioner med metalledamm.

NFPA 484, NFPA 654, NFPA 499, NFPA 68, NFPA 69 och NFPA 652 gäller i USA.

NFPA 484 Standard for Combustible Metals

Denna standard gäller för produktion, bearbetning, efterbehandling, hantering, återvinning, förvaring och användning av alla metaller och legeringar som befinner sig i en form som kan förbrännas eller explodera, samt för operationer där metall eller metallegeringar utsätts för bearbetning eller efterbehandling som producerar brännbart pulver eller damm.

NFPA 654 Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids

Denna standard presenterar säkerhetsåtgärder för att förebygga och mildra bränder och dammexplosioner i anläggningar som hanterar brännbara partikelformiga fasta ämnen.

NFPA 499 Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas

Denna rekommenderade praxis presenterar kriterier för att bestämma antändningsrisker i kemiska processområden där brännbart damm produceras, bearbetas eller hanteras för att hjälpa till vid val av elektriska system och utrustning för säker användning på klassificerade platser.

NFPA 68 Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting

Denna standard gäller konstruktion, placering, installation, underhåll och användning av anordningar och system som släpper ut förbränningsgaserna och trycket som härrör från en deflagration i en inneslutning så att strukturella och mekaniska skador minimeras.

NFPA 69 Standard on Explosion Prevention Systems

Denna standard ger krav på att installera system för förebyggande och kontroll av explosioner i kapslingar som innehåller brandfarliga koncentrationer av brandfarliga gaser, ångor, dimma, damm eller hybridblandningar.

3.4. Europeiska och svenska standarder

Det finns flera fördelar med att ha gemensamma tekniska regler. Genom att utforma standarder blir säkerhetsfodringar tydliga och utvecklingskostnaderna rimliga samtidigt som marknadens acceptans för produkten eller tjänsten ökar. Standarder underlättar utvecklingen och höjer elsäkerheten. Många standarder inom elområdet beskriver tekniska lösningar och metoder som åstadkommer den elsäkerhet som föreskrivs av svenska myndigheter och av EU.

SS-EN 61241-10

Standard EN 61241-10 är en standard primärt utgiven av det internationella standardiseringsorganet, IEC (International Electrotechnical Commission), som sedan vidareutvecklats av CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) som är ett europeiskt standardiseringsorgan för att harmonisera nationella standarder inom elområdet.

Svensk standard SS-EN 60079-10-2

Explosiv atmosfär – Del 10-2: Klassning av områden med explosiv dammatmosfär.

Svensk standard SS-EN 13463-1:2009

Explosiv atmosfär – Icke elektrisk utrustning avsedd för användning i explosiv atmosfär – Del 1: Grundläggande metoder och krav.

Svensk standard SS-EN 14491:2012

Explosiv atmosfär – Dammexplosionsskydd genom tryckavlastning.

3.5. Boverkets byggregler

I Boverkets byggregler 24 (BBR) används begreppet verksamhetsklass 6 för lokaler med förhöjd sannolikhet för uppkomst av brand eller där en brand kan få ett mycket snabbt och omfattande förlopp. Lokaler som omfattas av föreskriften är främst sådana där lättantändligt material tillverkas och bearbetas i mer än ringa omfattning eller där lättantändligt damm kan anhopas. BBR ställer dock inte några specifika krav på lokaler där brännbart damm hanteras utan hänvisar till MSB och Lagen om brandfarliga och explosiva varor (Bengt Dahlgren; LTH; Brandskyddslaget, 2014).

3.6. Lagen om brandfarliga och explosiva varor, MSB

Lagen om brandfarliga och explosiva varor (LBE) syftar till att hindra, förebygga och begränsa olyckor och skador på liv, hälsa, miljö och egendom som kan uppkomma genom brand eller explosion orsakad av brandfarliga eller explosiva varor. Med brandfarliga varor avses brandfarliga gaser och vätskor samt brandreaktiva varor. Explosiva varor omfattar explosiva ämnen, blandningar och föremål (MSB, 2017).

Brännbart damm omfattas dock oftast inte av LBE då ämnena i ren form inte klassificeras som brandfarliga eller explosiva varor.

3.7. Övriga nationella standarder eller specifika regler från försäkringsbolag

Australien/Nya Zeeland – AS / NZS Standarder används i hela området, AS / NZS 61241-serien är lokala ekvivalenter till EN 61241-serien.

Kanada – Förordningsförslag om upphävande och ersättning Kontrollerade produkters föreskrifter att genomföra GHS klassificering en märkning av kemikalier (GHS) i Kanada, och att göra följdändringar att relatera regelverk.

Kina – GB/T standarder, i kinesisk form.

Sydafrika – SANS 612421- 0: 205 / EC61424: 10: 2014 Elektriska apparater för oss i närvaro av ett brännbart damm.

Storbritannien – Europeiska standarder som beskrivits tidigare plus EN 1127-1: 2009, EN 1050: 1996, EN 13463-1: 2005, EN 14491: 2006, EN 14460: 2006, EN 14797: 2006, EN 15089: 2007, EN 13821: 2002, EN 50281-2- 1: 1998, EN 618: 2002.

USA – OSHA (Occupational Safety and Health Administration) har ett antal federala standarder: 29 CFR 1910.1200, 29 CFR 1910.272, 29 CFR 1910.94, 29 CFR 1910.22, 29 CFR 1910.176, 29 CFR 1910.269, 29 CFR 1910.132 (a), 29 CFR 1910.307 för klass II damm. OSHA har använt följande NFPA-standarder: 61, 68, 69, 77, 499, 654, 664 och 484.

Det finns även specifika regler från försäkringsbolag. Som exempel kan FM Globals Property Loss prevention Data sheet 7-76 nämnas. Detta behandlar åtgärder för att förebygga och minska skadorna av bland annat dammexplosioner.

4. Statistik och inträffade händelser

För att skapa en bild av hur ofta dammexplosioner med metalldamm sker och för att ta reda på om det går att identifiera typiska bearbetningsprocesser eller maskiner som oftare än andra leder till dammexplosion har olycksstatistik från Arbetsmiljöverket hämtats in av Ken Nessvi och Lennart Evaldsson, PS Group. Denna statistik omfattar de händelser som rapporterats in till Arbetsmiljöverket mellan 2012 och 2017.

Statistiken omfattar både bränder och explosioner. Efter genomgång av statistiken från Arbetsmiljöverket kunde 13 händelser identifieras som har med dammexplosioner med metalldamm att göra. Dessa presenteras i Tabell 2 nedan.

Tabell 2: Händelser med metalldamm från Arbetsmiljöverket 2012–2017.

Händelse	År	Ämne	Process/utrustning
Gammalt slipdamm användes vid slipning, brände hål på utsugsrör	2012	Ståldamm	Utsug
Antändning av magnesiumspån i svarv	2012	Magnesium	Svarv
Brand/explosion i stoftavskiljare för shot peening	2013	Framgår ej	Stoftavskiljare
Explosion i filteranläggning för utsug av titandamm	2014	Titan	Filteranläggning/utsug
Misstänkt dammexplosion i blästermaskin	2014	Framgår ej	Blästermaskin
Kraftig smäll hos metallurgiföretag, oklar anledning	2014	Framgår ej	Framgår ej
Explosion vid rengöring av utsugningssystem	2016		Utsug
Explosion vid filterbyte i ventilationsaggregat	2016	Titandamm	Filter/ventilationsaggregat
Explosion i stoftavskiljare efter rökutveckling	2016	Framgår ej	Stoftavskiljare
Brand i ventilationsanläggning för svetsavdelning	2016	Framgår ej	Framgår ej
Explosion vid dammsugning/rengöring av svetsutsug	2017	Ooxiderat titanstof	Utsug
Explosion vid dammsugning av utsug till robotsvets	2017	Ooxiderat titanstof	Utsug
Kraftig brand i Hg-filter, deformerade plåtar	2017	Framgår ej	Hg-filter

Totalt identifierades 62 händelser som dammexplosioner vid genomgång av statistiken. Det rör sig bland annat om explosioner i aska, pellets och trädamm. Detta innebär att cirka 21 % av dammexplosionerna har med metalldamm att göra.

Enligt en rapport från CSB med statistik på dammexplosionsolyckor som har inträffat i USA har det skett 218 större olyckor mellan 1980 och 2005. Av dessa olyckor har 20 % varit med metalldamm (CSB, 2006). Detta kan jämföras med äldre statistik från USA från 1900 till 1956. Av dessa olyckor var det cirka 7 % som hade med metalldamm att göra (Eckhoff R. K., 2003).

I januari 2014 inträffade en dammexplosion på en fabrik i Foley, Alabama som tillverkade aluminiumskyltar. Två anställda fick flygas till sjukhus med svåra brännskador (Keown, 2016).

Enligt statistik från Kina var andelen av de inträffade dammexplosionsolyckorna mellan 1981 och 2011 som skedde i metallindustrier 10 % (Yan & Yu, 2012).

En av de mest katastrofala dammexplosionerna inträffade i Kina i augusti 2014 med 75 döda och ca 200 skadade. Av dessa 200 avled senare 71 till följd av sina skador vilket höjde det totala antalet omkomna till 146. På anläggningen i Kina tillverkades aluminiumfälgar och explosionen inträffade i det gemensamma utsugssystemet (Li, Yang, Yuan, & Eckhoff, 2016).

För att få in ett så heltäckande statistiskt underlag som möjligt kontaktades även MSB och Räddningstjänsten Syd. Det visade sig dock att varken MSB eller Räddningstjänsten Syd hade någon direkt statistik på dammexplosioner. Räddningstjänsten Syd hade inte haft någon händelse som kunde kopplas till metalldamm. MSB får in insatsrapporter från

räddningsinsatser i hela landet, men i dessa finns inte explosion med som fast alternativ vilket innebär att för att få med sådana händelser måste räddningsledaren ha fyllt i ”Explosion” i fältet precisera händelse (Ekberg, 2017).

5. Praktiska försök

För att få en övergripande förståelse för fenomenet dammexplosioner samt för att jämföra explosionsbenägenheten för ett antal olika metallpulver har småskaliga försök genomförts. I detta kapitel beskrivs vilka försök som genomförts och hur de använda testutrustningarna fungerar samt de resultat som erhöles. Det har gjorts försök både i brandlabbet på LTH och i laboratoriet på Carlfors Bruk utanför Huskvarna.

5.1. Aston Carlsson

Det har skett en del dammexplosioner i Sverige och i världen genom tiderna. Sommaren 2017 skedde en dammexplosion i Trångsund som ligger i södra Stockholm. Explosionen skedde i en dammsugare på företaget Aston Carlsson. Dammsugarens lock flög av vilket ledde till att damm virvlade upp och antändes utanför dammsugaren (Andersson, 2017). I denna rapport testas damm från samma dammsugare.

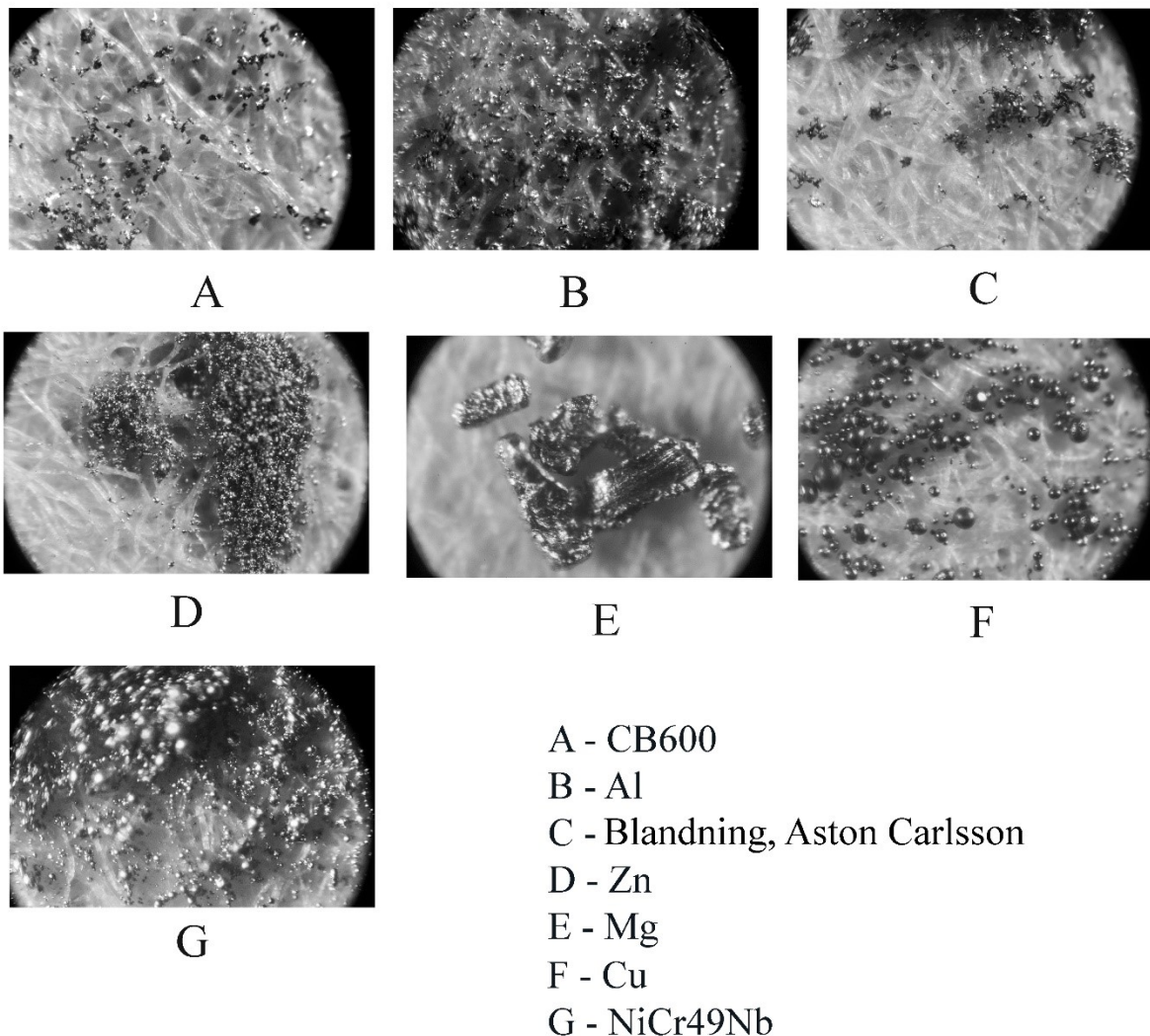
Aston Carlsson är ett företag som ligger i Trångsund i södra Stockholm. De säljer halvfabrikat i rostfritt stål, aluminium, mässing, koppar som plåt, stång, rör och rördelar såväl från egentillverkning som från externa leverantörer (Aston Carlsson AB, 2017).

5.2. Sandvik

Sandvik är en verkstadskoncern inom metallbearbetning, materialteknik, gruv- och anläggningsindustri. Sandvik Materials Technology tillverkar avancerade rostfria stål- och speciallegeringar för de mest krävande industrierna. De erbjuder produkter som rör, tråd, band och metallpulver samt produkter för industriell värmning. Sandviks specialitet är produkter av fint metallpulver, mindre än 38 μm (Sandvik AB, 2017).

5.3. Mikroskop

Varje material är unikt när det kommer till storlek och form på partiklarna. För att illustrera detta användes ett mikroskop för att jämföra de olika ämnena. I Figur 5 nedan finns bilder på samtliga testade ämnen.

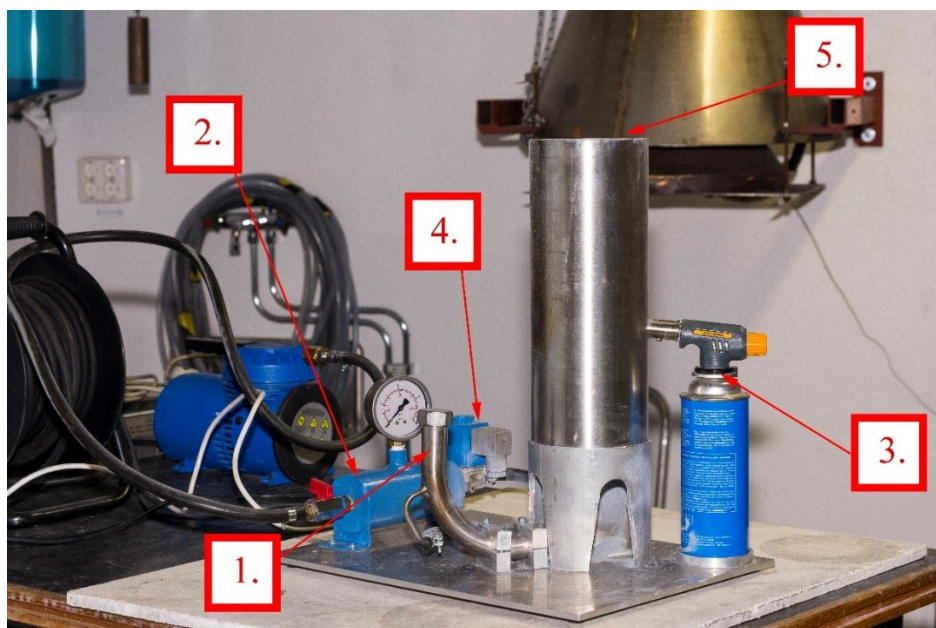


Figur 5: Bilder från mikroskop.

Det framgår i Figur 5 att det är skillnad i både storlek och form mellan de olika ämnena. Magnesium, koppar och nickellegeringen från Sandvik har störst partiklar medan övriga förhåller sig relativt lika. Framförallt magnesium utmärker sig vad gäller storleken. Vad gäller formen kan det konstateras att koppar och nickellegeringen har relativt sfäriska partiklar medan övriga har mer oregelbunden form. Något som också är värt att notera är att koppar- och magnesiumpartiklarna är av väldigt varierande storlekar.

5.4. Brandlabbet på LTH

Brandlabbet drivs av Avdelningen för Brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola. I brandlabbet finns en huv med luftflöde under vilket samtliga försök genomfördes. Försöken gjordes med en testutrustning från PS Group, se Figur 6 nedan. Utrustningen fungerar som så att pulver fylls på i röret (1), den blå tanken (2) trycksätts till önskat tryck, brännaren (3) tänds och magnetventilen (4) öppnas så att pulvret blåses upp ur röret (5) och antänds. Flera olika material och metaller testades. Från början fanns en idé om att kunna räkna på dammkoncentration, men då det var svårt att validera resultaten övergavs detta.



Figur 6: Testutrustningen från PSGroup. Bild av författare?

För att testa utrusningen och att för att jämföra en dammexplosion med organiskt material med en metalldammexplosion användes organiska material till en början. De organiska ämnena som testades var vetemjöl och florsocker. Metallerna som sedan testades var damm från Aston Carlsson, zink, koppar, aluminium, magnesium, aluminium från Carlfors Bruk och två nickellegeringar från Sandvik, NiCr49Nb och nickelbaslegering. En fullständig lista på vilka ämnen som testades och i vilka mängder finns i Tabell 3 nedan.

Tabell 3: De ämnen som testades i brandlabbet.

Sort	Diameter (µm)	Massa (g)
Vetemjöl	-	10
Florsocker	-	5
CB600	10	0,5
CB600	10	1
CB600	10	1,5
Al	-	1
Al	-	5
Al	-	10
Cu	-	5
Cu	-	10
Cu	-	15
Mg	-	1
Mg	-	2,5
Mg	-	4
NiCr49Nb	90	5
NiCr49Nb	90	10
NiCr49Nb	90	15
Nickelbaslegering	90	5
Nickelbaslegering	90	10
Nickelbaslegering	90	15
Blandning, Aston Carlsson	-	5
Blandning, Aston Carlsson	-	10
Blandning, Aston Carlsson	-	15
Zn	<45	5
Zn	<45	10
Zn	<45	15

5.5. Carlfors Bruk

Carlfors bruk ligger cirka 4 kilometer sydost om Huskvarna. Verksamheten består av tillverkning av olika sorters aluminiumpulver. Företaget har cirka 70 anställda och har funnits sedan 1898. Från början tillverkades guldbrons för förgyllning av olika typer av produkter. På 1920-talet började man tillverka aluminiumdamm. Av produktionen av aluminiumpulver exporteras cirka 98 % (Björklund, 2017).

Då aluminiumpulver är väldigt reaktivt och kan användas vid till exempel tillverkning av sprängmedel är det enligt EU-regler klassat som en så kallad ”dual use”-produkt. En dual use-produkt är något som används i både civila och militära tillämpningar. Detta innebär bland annat att Carlfors bruk är skyldiga att rapportera eventuella försök från privatpersoner att köpa aluminiumpulver (Björklund, 2017).

Användningsområdena för aluminiumpulvret är främst tillverkning av lättbetong, som tillsats i färg och som tillsats i sprängämnen. Vid lättbetongtillverkningen reagerar aluminiumet med vatten och bildar vätgasbubblor som gör att betongen expanderar. Vid tillsats av aluminium i färg erhålls en väldigt tät färg som till exempel kan användas i invändigt i tankarna på oljefartyg (Björklund, 2017).

Som råmaterial i tillverkningen används dels atomiserat aluminium och dels aluminiumskrot i form av folie, se Figur 7 nedan (Björklund, 2017). Tillverkningsprocessen med aluminiumfolie som råvara beskrivs övergripande nedan:

1. Folien rivs isär till mindre bitar.
2. Kulkvarnar med stålkulor maler materialet efter tillsats av lacknafta, se Figur 8 nedan. Lacknafta används för att förhindra oxidering och hindra dammexplosioner från att uppstå.
3. Filterpressar pressar samman materialet till en pasta.
4. Pastan vakuumtorkas, efter torkningen finns risk för dammexplosion. För att minska risken inerteras området där dammet kommer ut efter torkningen med kvävgas så att syrehalten blir cirka 7 %.
5. I det sista steget förpackas pulvret i 200-liters fat.



Figur 7: Aluminiumfolie som används som råmaterial.



Figur 8: Kulkvarn i vilken materialet mals ner och lacknafta tillsätts.

På Carlfors bruk finns även en mindre Hartmannbomb, se Figur 9 nedan. Denna användes för att testa ett antal olika ämnen. Utrustningen fungerar som så att önskad mängd damm/pulver fylls på i den nedre delen av behållaren (1), ett tryck pumpas upp för hand (2). När trycket släpps blåses dammet upp och antänds av den gnista som finns inne i behållaren vilket leder till att locket (3), som från början är stängt, flyger upp.



Figur 9: Testutrustningen som användes på Carlfors bruk.

Det fanns ingen möjlighet att mäta till exempel tryck eller tryckstegringshastighet i utrustningen vilket innebär att försöken endast kan användas för visuell jämförelse vad gäller kraften i explosionerna. Då det endast gick att göra subjektiva bedömningar av hur kraftiga explosionerna var filmades samtliga försök för att det skulle vara lätt att gå tillbaka och jämföra mer noggrant. Vilka ämnen som testades och i vilka mängder finns beskrivet i Tabell 4 nedan. Det gjordes flera försök med Carlfors egna produkter, CB 600, atomiserat aluminium och aluminiumflakes. CB 600 är ett flingformigt aluminiumpulver med partikeldiameter på 10 μm . Pulvren är malda i stearin för att skapa ett skyddande lager mot oxidation. Det gjordes även försök med damm från Aston Carlsson och med zink.

Tabell 4: De metaller som testades i testutrustningen på Carlfors bruk. (* Inte lika tjockt lager stearin som på CB 600)

Sort	Diameter (µm)	Massa (g)
CB 600 (flakes)	10	0,15
Blandning, Aston Carlsson	-	0,15
Blandning, Aston Carlsson, siktat 90 µm	<90	0,3
Blandning, Aston Carlsson, siktat 90 µm	<90	0,3
Zn	<45	0,3
Al atomiserat	9-10	0,3
Al flakes, mindre stearin*	18	0,16
Al flakes, mindre stearin*	18	0,3
Al flakes, mindre stearin*	18	0,4

5.6. Resultat

I detta avsnitt presenteras en sammanställning av resultaten från försöken på Carlfors Bruk och brandlabbet på LTH. Då det inte gick att mäta några explosionsparametrar i testutrustningarna gjordes istället egna visuella skattningar av storlekarna på reaktionerna. En tregradig skala användes där 1 motsvarar en liten reaktion, 2 en medelstor reaktion och 3 en stor reaktion. Skalan baserades på jämförelser av flammhöjd och plymstorlek, men då reaktionerna sker väldigt snabbt ska det poängteras att det blir en subjektiv bedömning. De försök där ingen antändning eller gnistbildning skedde överhuvudtaget betecknas med ett streck -. Alla försök filmades för att kunna gå tillbaka och jämföra.

Carlfors Bruk

Resultaten från försöken på Carlfors Bruk redovisas i Tabell 5 nedan. Försöken gjordes i en Hartmannbomb (ref). De pulver som testades var Carlfors egentillverkat aluminiumpulver av olika slag, damm från Aston Carlsson och Zink. Exakt vilka pulver och i vilka mängder framgår av Tabell 5 nedan. Damm från Aston Carlsson testades först som det var och sedan efter att ha siktats igenom en sil med maskor på 90 µm. Det mesta av dammet passerade dock vilket tyder på att det till stor del har en partikelstorlek som är mindre än 90 µm.

Tabell 5: Resultat från försöken på Carlfors Bruk. (* Inte lika tjockt lager stearin som på CB 600)

Sort	Diameter (µm)	Massa (g)	Reaktion
CB 600 (flakes)	10	0,15	1
Blandning, Aston Carlsson	-	0,15	2
Blandning, Aston Carlsson, siktat 90 µm	<90	0,3	1
Blandning, Aston Carlsson, siktat 90 µm	<90	0,3	1
Zn	<45	0,3	1
Al atomiserat	9-10	0,3	2
Al flakes, mindre stearin*	18	0,16	2
Al flakes, mindre stearin*	18	0,3	3
Al flakes, mindre stearin*	18	0,4	3

Från Tabell 5 framgår att de pulver som gav kraftigast reaktion var Al flakes med mindre skyddande lager av stearin. Värt att notera är att dammet från Aston Carlsson reagerade mindre kraftigt efter att det siktats.

Brandlabbet, LTH

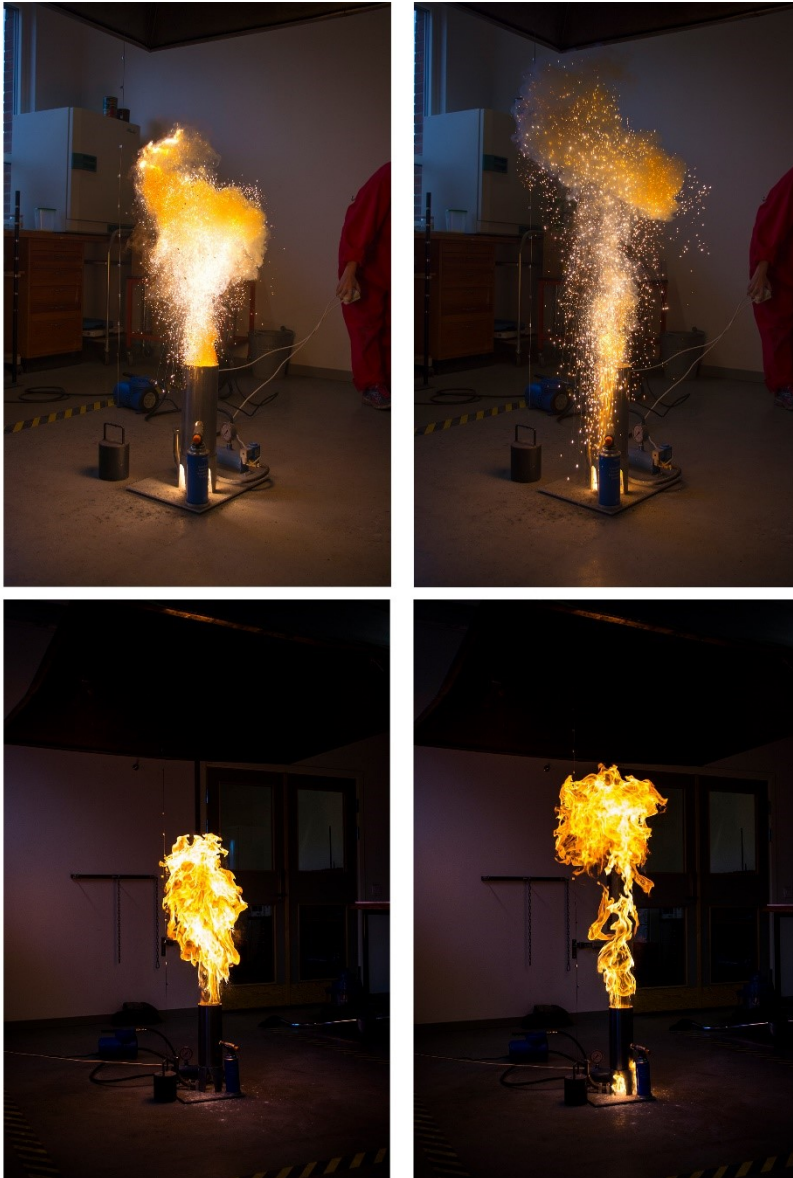
Resultaten från försöken i brandlabbet redovisas i Tabell 6 nedan. Det gjordes flera försök både på organiska ämnen och olika metaller. För att få till en representativ reaktion för varje metall testades olika mängder flera gånger. De försök som presenteras i tabellen utgör således ett slags medelvärde. Av de metaller som testades gav CB 600, magnesium och damm från Aston Carlsson störst reaktioner. Det kan noteras att för CB 600 och magnesium erhöles kraftiga reaktioner vid mängder som för övriga metaller knappt gav någon reaktion alls.

Tabell 6: Resultat från försöken i brandlabbet.

Sort	Diameter (µm)	Massa (g)	Reaktion
Vetemjöl	-	10	2
Florsocker	-	5	2
CB600	10	0,5	3
CB600	10	1	3
CB600	10	1,5	3
Al	-	1	-
Al	-	5	-
Al	-	10	-
Cu	-	5	-
Cu	-	10	-
Cu	-	15	-
Mg	-	1	1
Mg	-	2,5	3
Mg	-	4	2
NiCr49Nb	90	5	-
NiCr49Nb	90	10	-
NiCr49Nb	90	15	-
Nickelbaslegering	90	5	-
Nickelbaslegering	90	10	-
Nickelbaslegering	90	15	-
Blandning, Aston Carlsson	-	5	2
Blandning, Aston Carlsson	-	10	3
Blandning, Aston Carlsson	-	15	1
Zn	<45	5	-
Zn	<45	10	2
Zn	<45	15	2

Från Tabell 6 framgår att de ämnen som reagerade kraftigast var CB 600, magnesium och damm från Aston Carlsson. Magnesium och CB 600 reagerade kraftigt i mycket mindre mängder än övriga ämnen. Nickellegeringarna, koppar och det köpta aluminiumpulvret reagerade inte alls.

För att jämföra en explosion med ett organiskt material med en metalledammexplosion användes florsocker och vetemjöl. I Figur 10 nedan visas bilder på en dammexplosion med damm från Aston Carlsson (överst) och florsocker (nederst). Utifrån bilderna och försöken kan det konstateras att florsocker reagerar långsammare och med mer karakteristiska flammor medan metalledammet har en snabbare reaktion med gnistbildning som ger ifrån sig ett starkare ljussken.



Figur 10: Jämförelse mellan en explosion med metaldamm (Blandning, Aston Carlsson, överst) och organiskt damm (florsocker, nederst).

5.7. Felkällor

I försöken som gjorts finns flera felkällor som kan ha påverkat resultaten. För att säkerställa att resultaten blev tillförlitliga genomfördes samma försök flera gånger. Försöken har utförts så noggrant som möjligt men felkällor är oundvikliga.

Felkällor som kan ha påverkat försöken som gjordes på Carlfors Bruk är bland annat att trycket pumpades upp för hand vilket innebär att det antagligen inte blev exakt samma tryck varje gång.

Vid försöken i brandlabbet kunde det konstateras att samma mängd damm/pulver kunde reagera olika från försök till försök. Detta kan förklaras på flera sätt. Till exempel kanske en del av dammet fastnade i röret så att det inte blev exakt samma mängd vid varje försök. För magnesium gjorde det väldigt stor skillnad om pulvret hälldes ur burken eller om en spatel användes. Detta kan ha berott på att när pulvret hälldes ur burken kom en större andel stora partiklar med och när spateln användes erhöles en mer välblandad storleksfördelning. Vidare

kan resultatskillnader bero på att utrustningen blev varmare ju fler försök som genomfördes och att trycket inte blev exakt samma vid varje försök.

6. Diskussion

I detta avsnitt kommer de resultat som framkommit av litteraturstudien, genomgången av regelverk och de praktiska försöken diskuteras. Tankar och synpunkter som uppkommit under arbetets gång kommer belysas och reflekteras kring.

6.1. Kunskapsläget

För att ta fram en översiktlig bild av kunskapsläget, vilket var ett av målen med denna rapport, genomfördes en mindre litteraturstudie. För att få en rimlig resultatmängd vid litteratursökningen avgränsades denna till de senaste 10 årens publikationer. Detta innebär givetvis att resultatet blir begränsat och risken finns att viktiga studier utelämnas. Samtidigt var det nödvändigt med avgränsningar både för att arbetet skulle bli färdigt i tid och eftersom att litteraturstudien bara utgör en del av flera i arbetet.

Litteraturstudien som genomfördes ger endast en bild av det vetenskapliga kunskapsläget. Något som är minst lika viktigt är vilka kunskaper som finns inom de industrier som producerar och hanterar metalldamm. Det kan misstänkas att de industrier som producerar metalldamm har relativt god kunskap om explosionsriskerna medan de som erhåller olika typer av metalldamm som restprodukt vid till exempel blästring eller slipning kanske inte har samma förståelse för vilka risker som faktiskt finns. Att undersöka detta har inte rymts inom ramarna för detta arbete men det skulle vara intressant att studera detta område vidare. Även kunskapsläget inom landets räddningstjänster hade varit intressant att undersöka.

Ytterligare en del i att öka kunskapen och förståelsen för dammexplosionsrisker kan vara att skapa ett tydligare och mer samordnat statistikverktyg för inträffade olyckor. Detta för att få en tydligare bild av hur ofta dammexplosioner inträffar och vad det blir för konsekvenser. Den svenska statistik som har använts i denna rapport kommer framförallt från Arbetsmiljöverket. Vid kontakt med MSB framkom att det i dagsläget finns varken explosion eller dammexplosion med som fast alternativ på de insatsrapporter som räddningstjänsterna fyller i och skickar till MSB. Detta leder till att det blir svårt för MSB att föra statistik över inträffade olyckor som lett till räddningstjänstinsats.

Vidare har det konstaterats att brandingenjörstudenterna på LTH får en föreläsning om dammexplosioner inklusive en video från CSB i USA som på ett illustrativt sätt beskriver problematiken med brännbart damm. Det är väl kanske så att det räcker med en föreläsning för att övergripande täcka in ämnet dammexplosioner, men för att öka förståelsen och kunskapen om riskerna med brännbart damm hade det kanske varit lämpligt att komplettera föreläsningen och videon med en laboration eller i alla fall en kort demonstration av en dammexplosion. För att kunna gå in ännu djupare på ämnet dammexplosioner kan ett alternativ vara att hålla en kurs på avancerad nivå.

Enligt BBR kommer lokaler där lättantändligt material tillverkas eller där lättantändligt damm kan anhopas gå under verksamhetsklass 6. Det finns dock inte särskilt tydliga krav på hur sådana lokaler ska utformas. Det hänvisas till MSB och LBE, men som tidigare nämnts klassas oftast inte brännbart damm som brandfarlig eller explosiv vara vilket innebär att risker med brännbart damm faller mellan stolarna.

6.2. Resultat från försök

Vad gäller resultaten från de praktiska försök som genomfördes var det främst två saker som var förvånande. Dels att magnesium inte reagerade så kraftigt som väntat och dels att det

aluminium som köptes in av LTH knappt reagerade alls i jämförelse med aluminiumpulvret från Carlfors Bruk. Magnesium förväntades reagera kraftigt då det har en högre förbränningsentalpi än till exempel aluminium. Då aluminiumpulvret från Carlfors Bruk testades före det köpta pulvret och gav en kraftig reaktion var det förvånande att det köpta aluminiumpulvret inte reagerade på samma sätt.

Anledningen till att magnesium och det köpta aluminiumpulvret inte reagerade så kraftigt som förväntat kan vara att partikelstorleken och därmed även den specifika ytan har stor påverkan på resultatet. När partiklarna studerades i mikroskop kunde det konstateras att magnesiumpartiklarna var betydligt större än övriga material. Även formen skiljde sig. Vad gäller aluminiumpartiklarna var skillnaden mellan det köpta pulvret och pulvret från Carlfors inte lika tydlig. En anledning till att de reagerade olika kan vara att det köpta pulvret hade hunnit oxideras under transport och lagring.

Om det hade gått att mäta tryck och dammkoncentration vid försöken hade fler faktorer kunnat jämföras. Exempel på sådana faktorer kan vara K_{st} , P_{max} och undre explosionsgräns.

7. Slutsats och behov av vidare forskning

I detta avsnitt presenteras de slutsatser som har dragits utifrån diskussionen i kapitel 8. Det ges även förslag till vidare studier.

En av de slutsatser som har kunnat dras av detta arbete är att det behövs mer kunskap och forskning om dammexplosioner. Det är viktigt att ta hänsyn till att det kan inträffa en explosion, speciellt för verksamheter där metalledamm förekommer. Partiklarnas utformning, storlek och vilket material det är har stor betydelse. Det finns många regelverk att följa men det är ibland otydligt vilka metallpulver går under eftersom brännbart damm inte omfattas av regler för explosiva varor då ämnena i ren form inte är explosiva.

Frågor att analysera och studera vidare utifrån detta är generellt mer kunskap om dammexplosioner. Det finns mycket att testa och ta reda på. Fler försök skulle kunna göras och det skulle vara möjligt att mäta till exempel tryck under försöken. Vidare undersökning kring kunskapsläget av dammexplosioner där det faktiskt händer och räddningstjänsten behövs. Det skulle kunna göras en avancerad extern kurs på universitetsnivå för både konsulter och studenter och personal från räddningstjänsten. Eventuellt en avancerad valfri kurs på LTH för framtida studenter. Alternativt en större del av dammexplosioner i befintliga kurser.

Vad gäller BBR skulle det kunna förtydligas att lokaler och verksamheter där det kan förekomma explosioner, framförallt dammexplosioner, skulle ingå i verksamhetsklass 6. Det skulle även kunna införas tydligare riktlinjer för dimensionering av sådana lokaler.

Vidare skulle MSB kunna se över om inte brännbart damm borde inkluderas som ett explosivt ämne. Detta för att det med hjälp av LBE ska gå att ställa krav på verksamheter där sådant damm eller pulver hanteras. Idag omfattas inte brännbart damm av LBE då ämnena i ren form inte är explosiva. MSB skulle kunna skriva en föreskrift om just dammexplosioner med inriktning på metall för att öka kunskapsläget.

MSB skulle även kunna föra in dammexplosion eller i alla fall explosion som fast alternativ på de insatsrapporter som räddningstjänsterna fyller i och skickar in.

Referenser

- Amyotte, P., Khan, F., & Dastidar, A. (2003, Oktober). Reduce dust explosions the inherently safer way. *Chemical engineering progress*, pp. 36-43.
- Andersson, M. (2017, Oktober 16). Kommunikation med Aston Carlsson via mail.
- Arbetsmiljöverket. (2003). *Arbete i explosionsfarlig miljö, AFS 2003:3*.
- Aston Carlsson AB. (2017, November 11). Retrieved from Aston Carlsson AB:
<http://www.astoncarlsson.se/index.php?route=common/home>
- Bengt Dahlgren; LTH; Brandskyddslaget. (2014). *Brandskyddshandboken*. Lund: Avdelningen för brandteknik, Lunds Tekniska Högskola.
- Björklund, S. (2017, November 1). Technique and Maintenance. (A. Fast, & S. Dufva, Interviewers)
- Choi, K., Sakasai, H., & Nishimura, K. (2015, Maj). Experimental study on ignitability of pure aluminum powders due to electrostatic discharges and Nitrogen's effect. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 232-235.
- Choi, K., Sakasai, H., & Nishimura, K. (2016, Maj). Minimum ignition energies of pure magnesium powders due to electrostatic discharges and nitrogen's effect. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 144-146.
- CSB. (2006). *Combustible Hazard Study*. U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD.
- Drysdale, D. (2011). *An introduction to fire dynamics*. Chichester: Wiley.
- Eckhoff, R. K. (2003). *Dust explosions in the process industries*. Burlington, MA.
- Eckhoff, R. K. (2012, Maj). Does the dust explosion risk increase when moving from μm -particle powders to powders of nm-particles? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 448-459.
- Ekberg, J. (2017, Oktober 12). Kommunikation med MSB via mail.
- Europaparlamentet. (1999). *Europaparlamentets och Rådets direktiv 1999/92/EG*.
- Europeiska kommissionen. (2003). *Handbok av icke-bindande natur för god praxis med avseende på genomförandet av direktiv 1999/92/EG*. Luxemburg: Byrån för Europeiska gemenskapernas officiella publikationer.
- Hayden, D. K. (2004, November). Secondary dust explosions. *Professional Safety*, 27-30.
- Höganäs AB. (2017, November 13). *Insikt*. Retrieved from Höganäs:
<http://www.hoganas.com/en/insikt/blog-posts/2017/april/en-snabbkurs--i-metallpulver/>
- Keown, D. (2016, September). Aluminium metal combustible dust explosion from improper design, construction and use of dust collector system sends two employees by life flight to burn centers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, pp. D135-D137.

- Li, G., Yang, H., Yuan, C., & Eckhoff, R. (2016, Januari). A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China. *Journal of loss prevention in the process industries*, p. 121.130.
- Lunds universitet. (2017, Oktober 19). *Vad är LUBsearch?* Retrieved from LUBsearch & elektroniska resurser:
<http://libguides.lub.lu.se/lubsearchochelektroniskaresurser/lubsearch>
- Mittal, M. (2014, Januari). Explosion characteristics of micron- and nano-size magnesium powders. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 55-64.
- MSB. (2017, November 14). *Lagen om brandfarliga och explosiva varor*. Retrieved from Myndigheten för samhällsskydd och beredskap:
<https://www.msb.se/sv/Forebyggande/Brandfarligt--explosivt/Lagen-brandfarliga-och-explosiva-varor/>
- Nationalencyklopedin. (2017, 09 28). *Nationalencyklopedin, explosion*. Retrieved from
<http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/enkel/explosion>
- Nessvi, K., & Nilsson, U. (2011). *Dammexplosioner - åtgärder för att förhindra och lindra effekterna*. Intresseföreningen för processsäkerhet.
- NFPA. (2012). *NFPA 484 Standard for Combustible Metals*. National Fire Protection Association.
- NFPA. (2017, Oktober 19). *NFPA Overview*. Retrieved from National Fire Protection Association: <http://www.nfpa.org/overview>
- Osika, A., Lavesson, A., & Svegborn, J. (2015). *Additiv tillverkning i metall Analys och jämförelse av metoderna*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
- Progressive surface. (2017, Oktober 19). *What is shot peening*. Retrieved from Progressive surface: <http://www.progressivesurface.com/shotpeening/process.htm>
- Sandvik AB. (2017, November 11). Retrieved from Sandvik: <https://www.home.sandvik/se/>
- Svenska Brandförsvarsföreningen. (1994). *Dammexplosioner*. Västervik: AB C O Ekblad & Co.
- SVT. (2017, Augusti 30). *SVT Nyheter*. Retrieved from
<https://www.svt.se/nyheter/lokalt/stockholm/flera-skadade-efter-explosion-vid-en-arbetsplats-i-trangsund>
- SVT. (2017, augusti 30). *SVT Nyheter*. Retrieved from
<https://www.svt.se/nyheter/utrikes/explosion-vid-fabrik-i-kina>
- U.S. Chemical Safety and Hazard investigation board. (2005). *Investigation report Aluminum dust explosion*. U.S. Chemical Safety and Hazard investigation board.
- van Hees, P. (2015). *Kravbild för explosioner i byggnader*. Lund: Lunds Tekniska Högskola.
- Van Wingerden, K., & Scott, G. (2014). Unknown aspects of metal dust explosions.

- Wu, H.-C., Chang, R.-C., & Hsiao, H.-C. (2009, Januari). Research of minimum ignition energy for nano titanium powder and nano iron powder. *Journal of loss prevention in the process industries*, pp. 21-24.
- Wu, H.-C., Ou, H.-J., Hsiao, H.-C., & Shih, T.-S. (2010, Februari). Explosion Characteristics of Aluminum Nanopowders. *AEROSOL AND AIR QUALITY RESEARCH*, pp. 38-42.
- Yan, X.-Q., & Yu, J.-L. (2012, Juni). Dust explosion incidents in China. *Process Safety Progress*, pp. 187-189.

Bilaga A

Nedan i Tabell 7 redovisas sammanställningen av litteratursökningen.

Tabell 7: Sammanställning av litteratursökning.

Titel	Författare	År	Beskrivning
Maximum blast pressure of aerosols of metal and alloy powders	Babaitsev, I. V.; Mogilevtseva, M. A.; Presnakova, O. A.; Urshankij, M. A.	2007	Maximalt explosionstryck för Al, B, Mg, Si, Zn, Ti, Cr, Mn, V, Sn, Fe, Zr, Ca-Si, Fe-Mn, Fe-Ti framtagna i 4 dm ³ testkärl.
Explosion temperatures and pressures of metals and other elemental dust clouds	Cashdollar, Kenneth L.; Zlochower, Isaac A.	2007	Experiment med damm av ett stort antal ämnen. Tryck- och temperaturdata, samband mellan koncentration och temperatur, tryck, K_{st} .
Electrostatic spark ignition of sensitive dust clouds	Eckhoff, Rolf K.; Randeberg, Erlend	2007	Diskussion om att vissa typer av damm kan ha väldigt låg MIE. Vid bedömning av risker med statisk elektricitet är föremåls kapacitans en viktig faktor, om MIE är låg kan det innebära att föremål med låg kapacitans medför en risk.
Ignitability characteristics of aluminium and magnesium dusts that are generated during the shredding of post-consumer wastes	Nifuku, M; Koyanaka, S; Ohya, H; Barre, C; Hatori, M; Fujiwara, S; Horiguchi, S; Sochet, I.	2007	Undersökning av användbarhet för aluminium- och magnesiumdamm producerat vid fragmentering av avfall. Samband mellan lägsta explosionskoncentration, MIE, antändningstemperatur m.m.
Reducing aluminum dust explosion hazards: Case study of dust inerting in an aluminum buffing operation	Myers, Timothy J.	2008	Beskrivning av en metod för att invertera aluminiumdamm med hjälp av flamskyddsmedel. Antyder att explosionsrisker är väl kända av de som producerar damm/pulver, men kanske inte lika väl hos de som får damm/pulver som biprodukt. Resultat: metoden fungerar. Effekten tydligast på MIE och antändningstemperatur.
Dense-Phase Pneumatic Conveying Technology for Highly Explosive Metal Powders	Wypych, P. W.	2008	Sammanfattning av ett projekt för att ta fram en säker pneumatisk teknik för att transportera explosiva metallpulver. Ett slutet system med inertgas föreslås.
Characterisation of oxidised aluminium powder: Validation of a new anodic oxidation bench	Gascoin, Nicolas; Gillard, Philippe; Baudry, Guillaume	2009	Metod för att oxidera pulver till en viss grad för att kunna göra pålitliga och upprepbara test av MIE. MIE är kopplad till hur mycket pulvret oxiderats.
Method of evaluating the danger of fire and explosion posed by operations performed in the production of metal and alloy powders	Toleshov, A. K.	2009	Beskrivning av en metod för att uppskatta och utvärdera brand- och explosionsrisker vid produktion av metallpulver.
Research of minimum ignition energy for nano Titanium powder and nano Iron powder	Wu, Hong-Chun; Chang, Ri-Cheng; Hsiao, Hsiao-Chi	2009	Studie i vilken MIE har uppmäts för Ti- och Fe-pulver med partikelstorlek mellan 15 nm och 150 µm. Alla mätningar av nanopulvren var under 1 mJ vilket tyder på att dessa pulver är väldigt explosionsbenägna. Mätningarna av mikropulvren var alla över 10 mJ vilket tyder på dessa är mindre explosionsbenägna än nanopulvren.

Statistical method for the determination of the ignition energy of dust cloud-experimental validation	Bernard, Stéphane; Lebecki, Kazimierz; Gillard, Philippe; Youinou, Loïc; Baudry, Guillaume	2010	Beskrivning av en statistisk metod för att bestämma MIE. Med 20 försök kan en energi bestämmas för vilken sannolikheten för antändning är 0,5. Testen görs i en Hartmanbomb.
Ignitability of aluminous coating powders due to electrostatic spark	Choi, Kwangseok; Sakurai, Nobuyasu; Yanagida, Kenzo; Itoh, Haruki	2010	Studie av statisk elektricitet som antändningskälla av aluminiumpulver som används till pulverbeläggningar. Försök i Hartmanbomb för att bestämma MIE för ett antal olika aluminiumpulver. Resultat: de testade pulvren antändes av gnistor med en energi på 10 mJ. Partikelstorleken hade stor påverkan på antändligheten.
The effect of surface modification of aluminum powder on its flowability, combustion and reactivity	Jallo, Laila J.; Schoenitz, Mirko; Dreizin, Edward L.; Dave, Rajesh N.; Johnson, Curtis E.	2010	Studie av hur förändringar av ytegenskaper för aluminiumpulver påverkar flödes- och förbränningsegenskaper. Resultat: ytegenskaper påverkar förbränningsegenskaper genom att förmågan att aggregera minskar.
Triboelectric charging of powders: A review	Matsuyama, Tatsushi; Maruyama, Hiroyuki; Matsusaka, Shuji; Matsusaka, S.; Maruyama, H.; Matsuyama, T.; Ghadiri, M.	2010	Beskrivning av grunderna kring triboelektrisk laddning. Triboelektrisk laddning kan medföra gnistbildning som kan fungera som antändningskälla av till exempel metalldamm.
Experimental investigation and modelling of aluminum dusts explosions in the 20 L sphere	Thomas, Dominique; Thomas, Dominique; Traore, Mamadou; Dufaud, O.; Traore, M.; Perrin, L.; Chazelet, S.; Thomas, D.	2010	Experimentell studie av hur dammkoncentration, partikelstorlek och storleksfördelning samt form på partiklarna och fukttinnehåll påverkar explosionsegenskaper för dammexplosioner med aluminiumdamm. Resultat: särskilt partikelstorleken har särskilt stor påverkan på explosionsegenskaper såsom tryckstegringshastighet.
Explosion Characteristics of Aluminum Nanopowders	Wu, Hong-Chun; Ou, Hsin-Jung; Hsiao, Hsiao-Chi; Shih, Tung-Sheng	2010	Experimentellt framtagna värden på MIE, P_{max} , K_{st} och minsta explosionskoncentration för aluminiumpulver med tre olika partikelstorlekar, 35 nm, 100 nm och 40 μ m. Resultat: pulvret med medelpartikelstorlek på 100 nm gav högst värden på P_{max} och K_{st} . MIE för de båda nanopulvren var mindre än 1 mJ.
Experiment-based investigations of magnesium dust explosion characteristics	Kuai, Niansheng; Li, Jianming; Chen, Zhi; Huang, Weixing; Yuan, Jingjie; Xu, Wenqing	2011	Experimentell studie av explosionsegenskaper för magnesiumdamm. Påverkan av dammkoncentration, partikelstorlek, tändningsenergi, initialt tryck och inertering. Resultat: mindre partiklar ger kraftigare reaktion.

Dammexplosioner: åtgärder för att förhindra och lindra effekterna	Nessvi, Ken; Nilsson, Ulrika	2011	Handbok för hur dammexplosionsrisker kan bedömas och vilka åtgärder som kan vidtas för att minska dem.
Explosion characteristics of nano-aluminum powder-air mixtures in 20 L spherical vessels	zhai, cheng; Li, Qingzhao; Lin, Baiquan; Li, Wenxia; Zhai, Cheng; Zhu, Chuanjie	2011	Experimentell studie av explosionsegenskaper för aluminiumdamm med nano-storlek på partiklarna. Resultat: P_{max} och K_{st} beror till största del av dammkoncentrationen. P_{max} ökar gradvis upp till en damkoncentration på ca. 1000 g/m ³ . Partikelstorleken hade inte särskilt stor påverkan.
Does the dust explosion risk increase when moving from μ m-particle powders to powders of nm-particles?	Eckhoff, Rolf K.	2012	Diskussion kring huruvida partikelstorlekar på mindre än 1 μ m är mer antändningskänsliga. Slutsats: det är nödvändigtvis inte fallet eftersom: 1) Det är väldigt svårt att få till moln av så små partiklar på grund av starka interpartikulära krafter. 2) Om tillräcklig dispersion mot förmodan skulle uppnås skulle partiklarna nästan omedelbart koagulera till större agglomerat.
Risk assessment of the ignitability and explosivity of aluminum nanopowders	Vignes, A.; Muñoz, F.; Bouillard, J.; Dufaud, O.; Perrin, L.; Laurent, A.; Thomas, D.	2012	Studie av explosionsegenskaper hos aluminium-nanopulver. En metod för att analysera riskerna med sådana pulver samt tillämpliga åtgärder har också tagits fram. Resultat: MIE och explosionskraften hos aluminium-nanopulver beror på flera olika parametrar såsom förtändning, grad av agglomerering och vilken halt aluminium dammet har.
Dust explosion incidents in China	Yan, Xing-Qing; Yu, Jian-Liang	2012	Sammanställning av inträffade dammexplosioner i Kina mellan åren 1986 och 2011. Slutsats: 10 % av de inträffade olyckorna hade med metalldamm att göra. Statisk elektricitet, svetsning, höga temperaturer, friktions- och elektriska gnistor är vanliga antändningskällor. Explosioner kan förebyggas genom att utveckla riktlinjer och standarder för hur brännbart damm ska hanteras och utbilda personalen i vilka risker som finns.
Ignition temperature of magnesium powder clouds: A theoretical model	Yuan, Chunmiao; Li, Chang; Li, Gang; Zhang, Peihong	2012	Beskrivning av en teoretisk metod för att bestämma minsta antändningstemperatur för dammoln av magnesium. Beräknade värden stämmer överens med experimentellt framtagna.
Explosibility of micron- and nano-size titanium powders	Boilard, Simon P.; Amyotte, Paul R.; Khan, Faisal I.; Dastidar, Ashok G.; Eckhoff, Rolf K.	2013	Experimentell studie av explosionsegenskaper hos titanpulver av både mikro- och nanostorlek. MIE, MEC, K_{st} , P_{max} och MIT har uppmätts. Resultat: antändningskänsligheten ökar med minskad partikelstorlek.
Experimental determination of dust cloud deflagration parameters of selected hydrogen storage materials: Complex metal hydrides, chemical hydrides, and adsorbents	Khalil, Y. F.	2013	Experimentellt framtagna värden på P_{max} , K_{st} , MIE, MEC, MIT för olika metallhydrider.

The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminum dust	Castellanos, Diana; Carreto-Vazquez, Victor H.; Mashuga, Chad V.; Trottier, Remi; Mejia, Andres F.; Mannan, M. Sam	2014	Experimentell studie av hur partikelstorleksfördelningen påverkar explosionsrisken för aluminiumdamm. En blandning med stor spridning på partikelstorleken gav högre P_{max} än en mer homogen blandning.
Self ignition of layers of metal powder mixtures	Corriou, Jean-Pierre; Dufaud, Olivier; Corriou, Jean-Pierre; Perrin, Laurent; Bideau, David; Le Guyadec, Fabienne; Caleyron, Audrey	2014	Studie av hur självantändningstemperatur kan beräknas för pulver av Zr och Ta och blandningar av dessa.
Hybrid H_2/Al dust explosions in Siwek sphere	Denkevits, A.; Hoess, B.	2014	Studie av explosionsegenskaper för Al/H_2 blandningar. Dessa kan ske som antingen en- eller tvåstegsreaktioner. När reaktionen sker i ett steg förbränns en liten del av vätgasen vilken antänder Al -pulvret som brinner upp helt. Tvåstegsreaktionen innebär att vätgasen i princip brinner upp helt och efter det antänds Al -pulvret och brinner i det syre som finns kvar.
Industry specific dust explosion likelihood assessment model with case studies	Hassan, Junaid; Khan, Faisal; Amyotte, Paul; Ferdous, Refaul	2014	Beskrivning av ett ramverk för att bedöma sannolikheten för dammexplosion i en viss process eller för en hel anläggning. Baserat på vad som framkommer i bedömningen kan åtgärder vidtas för att minska risken.
Explosion characteristics of micron- and nano-size magnesium powders	Mittal, Manju	2014	Studie av explosionsegenskaper för magnesiumpulver med partikelstorlek på 125, 74, 38, 22, 10 och 1 μm samt 400, 200, 150, 100, 50, och 30 nm. P_{max} , maximal tryckstegringshastighet, K_{st} , MEC, MIE, MIT och begränsande syrekoncentration har uppmätts. Resultat: P_{max} ökar med minskande partikelstorlek ned till 400 nm varefter det minskar med minskande partikelstorlek. MEC följer ett liknande mönster. MIE minskar från 120 till 2 mJ när partikelstorleken minskar från 125 till 1 μm , för mindre partikelstorlekar är den ≤ 1 mJ. Pulver av nanostorlek exploderar mindre kraftigt än det av mikrostorlek.
Dynamic approach to risk management: Application to the Hoeganaes metal dust accidents	Paltrinieri, Nicola; Khan, Faisal; Amyotte, Paul; Cozzani, Valerio	2014	Beskrivning av en metod för riskanalys för att förebygga dammexplosioner.

Dust Explosion Characteristics of Aluminum, Titanium, Zinc, and Iron-Based Alloy Powders Used in Cold Spray Processing	Sakata, K.; Tagomori, K.; Sugiyama, N.; Sasaki, S.; Shinya, Y.; Nanbu, T.; Kawashita, Y.; Narita, I.; Kuwatori, K.; Ikeda, T.; Hara, R.; Miyahara, H.	2014	Experimentellt framtagna värden på MEC, MIE, P_{max} och K_{st} för Al-, Ti-, Zn-, och Fe-baserade pulver.
Experimental study on the influence of the nitrogen concentration in the air on the minimum ignition energies of combustible powders due to electrostatic discharges	Choi, Kwangseok; Choi, Kwansu; Nishimura, Koujirou	2015	Kvantitativ analys av huruvida MIE beror av kvävehalten i luften. Resultat: MIE ökade för alla analyserade pulver när kvävehalten ökade, specifikt kvävehalter över 84 % innebar att MIE för samtliga pulver hamnade över 100 mJ.
Experimental study on ignitability of pure aluminum powders due to electrostatic discharges and Nitrogen's effect	Choi, K.; Sakasai, H.; Nishimura, K.	2015	Experimentell studie av antändligheten hos aluminiumpulver. Värden på MIE till följd av elektrostatiske urladdning har tagits fram och inertering med kväve har undersökts. Resultat: Den lägsta statiska antändningsenergin var 5 mJ. Partikelstorleken hade påverkan på resultatet. När kvävekoncentrationen översteg 90 % blev MIE över 1000 mJ.
Correlation of p_{max} and K_{st} to specific surface area and calorific value of a dust	Gerhold, Malte; Stahmer, Klaus-Werner	2015	Undersökning av huruvida det finns ett samband mellan P_{max} och K_{st} samt förbränningsentalpi och den specifika yta. Resultat: K_{st} och P_{max} i princip korrelerar med förbränningsentalpi och specifik yta. En metod för att beräkna K_{st} och P_{max} utifrån förbränningsentalpi och specifik yta har tagits fram. Den är dock inte tillämpbar på vissa ämnen så som metaller då det är svårt att bestämma förbränningsentalpi för dessa.
Explosion behaviour of metallic nano powders	Krietsch, Arne; Scheid, Marc; Schmidt, Martin; Krause, Ulrich	2015	Experimentell studie av Explosionsegenskaper för damm/pulver av nanostorlek. Resultat: Generellt reagerar inte nanopulver annorlunda än pulver av den lägre mikroskalan. Koppas blir dock brännbart med mindre partikelstorlekar. Hur reaktiviteten påverkas av att materialet exponeras för luft innan det testas undersöktes också. Där blev resultatet att kontakt med luft i flera minuter inte påverkade reaktiviteten, vilket innebär att nuvarande testmetoder är tillräckliga.
Thermal Radiation Contribution to Metal Dust Explosions	Moussa, Rim Ben; Guessasma, Mohamed; Proust, Christophe; Saleh, Khashayar; Fortin, Jérôme	2015	Studie av värmeöverföring mellan partiklar i en dammexplosion och användning. Resultat: Förbränningshastigheten beror på dammkoncentrationen och minskar när partikelstorleken ökar.
Suppression of metal dust deflagrations	Taveau, Jérôme; Vingerhoets, Jim; Snoeys, Jef; Going, John; Farrell, Thomas	2015	Översikt av försök med släckning av metall-deflagrationer. Slutsatser: släckning av metall-deflagrationer är möjligt och kan skydda industrier som hanterar metalledamm.

Minimum ignition energies of pure magnesium powders due to electrostatic discharges and nitrogen's effect	Choi, Kwangseok; Sakasai, Hitoshi; Nishimura, Koujirou	2016	Experimentell studie av MIE för magnesiumpulver och effekten av inertering med kväve. Resultat: Det pulver som var mest antändningskänsligt hade MIE på 4 mJ, partikelstorlek 28,1 µm. MIE ökade med ökad kvävekonzentration, speciellt med kvävehalt 97 % översteg MIE 200 mJ vilket inte förekommer ofta i processindustrier. Vid kvävehalt 98 % eller mer förekom ingen explosion.
Aluminum metal combustible dust explosion from improper design, construction and use of dust collection system sends two employees by life flight to burn centers	Keown, D.	2016	Utredning av en dammexplosion på ett företag som tillverkar aluminiumskyltar.
A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China	Li, G.; Yang, H. X.; Yuan, C. M.; Eckhoff, R. K.	2016	Beskrivning av en av de värsta dammexplosionsolyckorna genom tiderna.
Explosion severity of micro-sized aluminum dust and its flame propagation properties in 20 L spherical vessel	Li, Qingzhao; Wang, Ke; Zheng, Yuannan; Mei, Xiaoning; Lin, Baiquan	2016	Experimentell studie av explosionsegenskaper för 6 olika typer av aluminiumdamm. Påverkan av dammkonzentration, partikelstorlek, och specifik yta har undersökts. Resultat: Optimal koncentration 500 g/m ³ . Samband mellan olika parametrar.
Ignition characteristics of metal dusts generated during machining operations in the presence of calcium carbonate	Miao, Nan; Zhong, Shengjun; Yu, Qingbo	2016	Studie av hur inertering med kalciumkarbonat påverkar MIE och MIT för Al, Mg, Fe-Al-legeringar och Al-Mg-legeringar. Att tillsätta kalciumkarbonat är generellt inte tillräckligt för att minimera sannolikheten för antändning.
Quantification of the thermal hazard from metallic and organic dust flash fire	Stern, Michael C.; Rosen, J.; Ibarreta, A.; Ogle, R.; Myers, T.	2016	Jämförande studie av hur dammexplosioner med metalledamm och organiskt damm beter sig vad gäller flamutbredning och temperatur.
Numerical and Experimental Analysis of Particle Dispersion in dust Explosions	Christiansen, Mari G.; Berg, Ann Elin; Balakin, Boris V.; Kosinski, Pawel	2017	Studie av hur dammpartiklar rör sig i en Hartmannbomb med hjälp av CFD-simuleringar.
Flame propagation behaviours in nano-metal dust explosions	Gao, Wei; Zhang, Xinyan; Zhang, Dawei; Peng, Qingkui; Zhang, Qi; Dobashi, Ritsu	2017	Studie av flamutbredning i dammexplosioner med Ti-, Al- och Fe-damm med partikelstorlek 40 nm med hjälp av höghastighetsfotografering. Resultat: flamman breder ut sig sfäriskt och karakteriseras av små glödande partiklar. Förbränningsreaktionen sker i vätskefas för Ti, i gasfas för Al och i fast fas för Fe.
Mitigating fire and explosion hazards of powdered metals	Ibarreta, Alfonso F.; Myers, Timothy J.	2017	Allmänt om dammexplosioner med metalledamm.
Process Safety & Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B	Marmo, Luca; Riccio, Daniela; Danzi, Enrico	2017	Undersökning av brännbarheten för olika typer av spilldamm från metallindustriprocesser genom användning av en snabb testmetod. Klassning av 14 olika sorters spilldamm i "Certainly explosible", "Possibly explosible" och "Not Explosible". Resultaten jämfördes med standardtestmetoder. Slutsats: Testmetoden kan användas för att klassificera metalledamm och som ett snabbt sätt att bedöma vilka sorters damm som medför explosionsrisk.