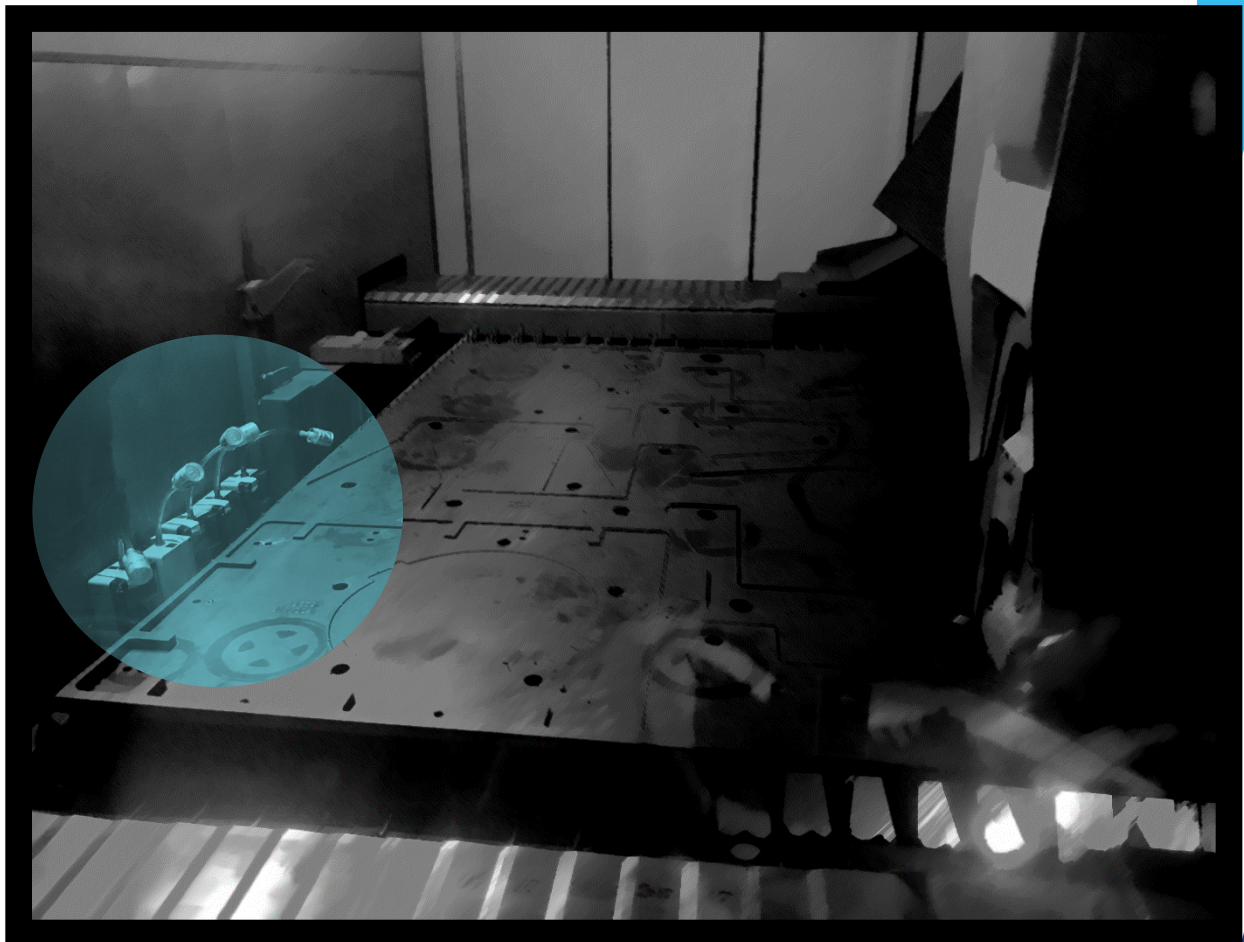


Laserskjæring av metallplater

- Karakterisering av partikler som dannes ved laserskjæring av metallplater



Forord

Prosjektet «Partikkelkarakterisering – laserskjæring av metaller» startet i 2020 som et videre arbeid etter at det fem år lange «Partikkelprosjektet» ble avsluttet (<https://stami.no/prosjekt/undersokelse-av-partikkelstorrelsesfordeling-morfologisk-og-kjemisk-sammensetning-av-partikulaer-uorganisk-forurensning-i-utvalgte-arbeidsmiljoer/>). I «Partikkelprosjektet» ble det utført innledende karakterisering av partikler i arbeidsluften som dannes ved laserskjæring. Arbeidet er videreført i dette prosjektet ved at luftbårne partikler ved laserskjæring av ulike metaller har blitt nøyere undersøkt. Prosjektet er finansiert av STAMI i samarbeid med Norges Miljø og Biovitenskapelige Universitet (NMBU) ved gjennomføring av en masteroppgave med tittel: *“Exposure assessment and particle characterization of workplace aerosols in Norwegian metal laser-cutting industry”*.

Seks bedrifter som informerte om at de utfører laserskjæring av metaller ble invitert til å delta i prosjektet. Siden prosjektet har pågått under korona-pandemien er antallet deltakende bedrifter noe begrenset. Tre bedrifter deltok i prosjektet.

Prosjektgruppen har bestått av:

Stine Eriksen Hammer, Torunn Ervik, Pål Graff, Kari Dahl, Jon Hovik, Yngvar Thomassen og Nils Petter Skaugset, samt masterstudent Johanne Østereng Halvorsen fra NMBU.

Statens arbeidsmiljøinstitutt, 2022

Stine Eriksen Hammer

Prosjektleder

Innholdsfortegnelse	
Sammendrag	4
Forkortelser	5
Innledning	6
Metoder	7
Innsamling av partikulært materiale	8
Filterprøver	9
Direktevisende partikkeltellere	9
Personbåren prøvetaking	9
Partikkelkarakterisering	10
Gravimetri	10
Grunnstoffbestemmelse	10
Bestemmelse av fase	10
Resultat og diskusjon	11
Partikulært materialet samlet inn på innsiden av laserskjærerkabinettet	11
Partikulært materiale i arbeidsluften	15
Konklusjon	16
Referanseliste	17

Sammendrag

Laserskjæring brukes i metallbearbeiding og benytter en høyenergi laser som skjærer stål og andre metalliske legeringer. Eksponeringen i norske laserskjæringsbedrifter ved slikt arbeid har tidligere ikke blitt karakterisert.

Ved laserskjæring vil noe av materialet fordampes for deretter å kondenseres som ultrafine partikler. I dette prosjektet ble kjemisk sammensetning, morfologi og fase til partikler som dannes under laserskjæring av ulike metallplater undersøkt. I tillegg ble konsentrasjonen av partikulær masse og utvalgte grunnstoff i arbeidsluften til arbeidere som arbeidet med laserskjæring bestemt. Innsamling av prøver ble utført i tre ulike bedrifter som anvendte åpne- og/ eller innebygde laserskjærere. Det ble skåret på ulike stål- og aluminiumplater samt en titanplate, med tykkelser fra 0,5 til 15 mm. Respirabelt støv ble samlet i innåndingssonen til totalt fem arbeidstakere og bestemt gravimetrisk, mens grunnstoffer ble bestemt ved induktivt koblet plasma massespektrometri (ICP-MS). Partikler som ble dannet under laserskjæringen ble undersøkt med skanning elektronmikroskop (SEM). Fasen til enkeltpartikler ble bestemt med tilleggsdetektorer i SEM, hvor energidispersiv røntgendetektor og Electron Backscatter Diffraction detektor gir hhv. kjemisk sammensetning og krystallstruktur. Fasen ble i tillegg verifisert i noen filterprøver med røntgendiffraktometri. Partikkelstørrelsesfordeling og partikkelantall ble undersøkt i sanntid med direktevisende partikkeltellere som bestemte størrelser underveis i laserskjæringen.

Partikler dannet ved laserskjæring var hovedsakelig ca. 15 nm og opp til ca. 300 nm i mobilitetsdiameter (d_{mob}). Disse forekom oftest som kjedelignende agglomerater/aggregater. Partikkelstørrelsesfordelingen var avhengig av hvilket materiale som ble skåret på og luftkonsentrasjonen i de lukkede laserskjærerne økte med minkende platetykkelse. Den kjemiske sammensetningen av partiklene var avhengig av opphavsmaterialet og besto hovedsakelig av oksider av hovedkomponentene, jern, aluminium eller titan.

Konsentrasjonen av respirabel partikulær masse i innåndingssonen hos arbeiderne var meget lav (median 0,05 mg/m³). Alle målte luftkonsentrasjoner unntatt bly var langt under gjeldene grenseverdier for forurensninger i arbeidsatmosfæren (Forskrift om tiltaksverdier og grenseverdier, FOR-2011-12-06-1358).

Forkortelser

CO ₂ -laser	Karbondioksid-laser
DG	Deteksjonsgrense
d _{mob}	Mobilitetsdiameter
EBSD	fra engelsk: « <i>Electron backscatter diffraction</i> »
EDS	Energidispersiv røntgendetektor
ICP-MS	Induktivt koblet plasma massespektrometri
PVC	Polyvinylklorid
SEM	Skanning elektronmikroskopi
STAMI	Statens arbeidsmiljøinstitutt
TEM	Transmisjonselektronmikroskopi
SMPS	fra engelsk « <i>Scanning mobility particle sizer spectrometer</i> »
XRD	Røntgendiffraktometri

Innledning

I Norge er det flere bedrifter som utfører laserskjæring på metallplater som består av for eksempel rustfritt og syrefast stål, aluminium og titan. Platene kan ha tykkelse opp til 25 mm (for stål) og være flere kvadratmeter store.

Den partikulære forurensningen i arbeidsluft bestemmes av prosessene forurensningen dannes fra, som for eksempel hvilke materialer som bearbeides, temperatur og tilleggsgass som brukes under bearbeidingen. Den kjemiske sammensetningen og morfologien til partikler er med å bestemme biotilgjengeligheten. Partikulær forurensning dannet i prosesser ved høy temperatur kan være en risikofaktor for utvikling av sykdommer i lunger, nerve- og hjertekarsystemet (Donaldson et al., 2005). Partiklers fysiske egenskaper og kjemisk sammensetning har betydning for mulig utvikling av sykdom (Braakhuis et al., 2014). Studier av ulike sveiseteknikker viser at det er store forskjeller i den kjemiske sammensetningen av sveiserøyken avhengig av sveiseteknikk (Berlinger et al., 2009, Gonser et al., 2010, Berlinger et al., 2011). Det er derfor av interesse å kartlegge den partikulære forurensningen i arbeidsluften under andre industrielle prosesser ved varmt arbeid. Det finnes i dag ingen spesifikke grenseverdier knyttet til forurensninger som dannes ved laserskjæring, men Arbeidstilsynet klassifiserer den partikulære forurensning som andre partikler dannet ved varmt arbeid på metall, f.eks. sveising (<https://www.arbeidstilsynet.no/tema/kjemikalier/varmt-arbeid/>). Med bakgrunn i den kjemiske sammensetningen undersøkt i partikkelprosjektet, som omhandlet laserskjæring på metall utført av STAMI i 2019 (<https://stami.no/prosjekt/undersokelse-av-partikkelstorrelsesfordeling-morfologisk-og-kjemisk-sammensetning-av-partikulaer-uorganisk-forurensning-i-utvalgte-arbeidsmiljoer/>), kan partikler fra laserskjæring sammenliknes med sveising, men dette må kartlegges bedre. Luftkonsentrasjonene av partiklene som ble målt i «Partikkelprosjektet» (samlet opp med «totalstøvkassett» i pustesonen til arbeidere som jobbet med laserskjæring) var langt under (< 3 %) gjeldene grenseverdiene for uspesifikk sveiserøyk. Selv om luftkonsentrasjonene av partikler var under gjeldene grenseverdi, er det likevel av interesse å kartlegge denne typen arbeidsmiljø da størrelsesfordelingen viste at partiklene var relativt små (< 75 nm) slik at partikkelantallet er høyt selv om totale massen er liten.

ORDFORKLARING:

Biotilgjengelighet

beskriver hvor tilgjengelig metallpartiklene er til å absorberes i kroppen.

I dette prosjektet ble partikler dannet ved laserskjæring på ulike metall-legeringer undersøkt for å besvare følgende spørsmål:

1. Hva er den kjemiske sammensetningen av partikulær forurensning som dannes under laserskjæring av ulike metallplater?
2. Hva er størrelsesfordelingen til partiklene som dannes under laserskjæring av ulike metallplater?
3. Hva er den kjemiske eksponeringen normalisert til en arbeidsdag for de som jobber med laserskjæring?

Metoder

Partikulær forurensning i luften ble samlet inn både i åpen og lukket laserskjærer, nærmest mulig skjæringspunktet, og ved personbårne prøvetakere blant arbeidere som arbeidet med laserskjæring.

Bedriftene som deltok i prosjektet benyttet enten fiber- eller CO₂-lasere i åpent miljø eller lukket inn med egen ventilasjon. Det ble utført prøvetaking og målinger ved laserskjæring av tolv ulike metallplater med forskjellig tykkelse, inkludert fire ulike platetyper av rustfritt stål, to ulike typer stålplater, en type galvanisert stålplate, to typer aluminiumplater, en titanplate samt rør og en platetype av svartstål (Tabell 1). For noen av platene varte skjæringen så kort (<1 min – 4 min) at det ikke var hensiktsmessig å samle inn partikulær masse til grunnstoffbestemmelse (ICP-MS) og fasebestemmelse (XRD), dette gjaldt for 0,5 mm aluminium, 4 mm titan, 2,3 mm svartstål, 3 mm rustfritt stål og 2 mm stål.

Tabell 1: Liste over metallplatene som ble skåret på med tykkelse og legeringsdetaljer

Plate	Platetykkelse	Hovedelement (belegg)	Maksimalt innhold av legeringsmetall (%)
Aluminium	10 mm	Aluminium	Fe (0,4), Si (0,25), Cu (0,05), Zn (0,07), Mg (0,05), Ti (0,05), Mn (0,01)
Aluminium	0,5 mm	Aluminium	Mg (3,6), Mn (0,5), Si (0,4), Fe (0,4), Cr (0,3), Zn (0,2), Ti (0,15) og Cu (0,1)
Rustfritt stål	5 mm og 6 mm	Jern	Cr (19,5), Ni (10,5), Mn (2,0), Si (1,0), C (\leq 0,7), P (0,045) og S (0,03)
Rustfritt stål	15 mm og 3 mm	Jern	Cr (18), Ni (13), Mo (3), Mn (2,0), Si (0,75), N (0,1), P (0,04), S (0,03) og C (0,03)
Svartstål	2,3 mm	Jern, (teflon og bly)	Antatt likt som svartstål 3,2 mm
Svartstål	3,2 mm	Jern	Mn (1,6), Ni (1,5), Cr (1,4), Si (0,70), Mo (0,6), C (0,26), P (0,025), S (0,01), B (0,005)
Galvanisert stål	1,5 mm	Jern (sink)	Mn (1,20), Si (0,50), Ti (0,30), C (0,18), P (0,12), S (0,045),
Stål	2 mm	Jern (olje)	Mn (0,6), C (0,12), P (0,045), S (0,045)
Stål	3 mm	Jern	Mn (1,5), Si (0,5), V (0,2), Ti (0,15), C (0,12), P (0,025), S (0,02), Al (0,015), Nb (0,09)
Titanplate	4 mm	Titan	Fe (0,5), C (0,08), N (0,05)

Innsamling av partikulært materiale

Partikler som ble dannet under laserskjæring ble samlet opp både på polyvinylkloridfiltre (PVC) og transmisjonselektronmikroskopgitre (TEM-gitre), samtidig som partikkelantallet og størrelse til partiklene ble undersøkt med bruk av en direktevisende partikkelteller (SMPS).

Filterprøver

Det ble benyttet 3-delte plastkassetter («totalstøvkassetter») med PVC-filtre (porestørrelse 5 μm). Batteridrevne PS103 pumper (STAMI) koblet til «totalstøvkassetter» ble plassert parallelt på en side inne i laserskjærerne og innstilt med en luftgjennomstrømning på 2 L/min. For syv av platene ble det skåret lenge nok til å samle nok partikulær forurensing for grunnstoff- og fasebestemmelse.

Prøver for partikkelkarakterisering med SEM ble samlet inn på TEM-gitre, fiksert i midten av PVC-filter i åpne «totalstøvkassetter». Prøvetakingstiden var begrenset av at TEM-gitteret ikke måtte bli overbelastet av partikler slik at de kan skilles visuelt fra hverandre når de undersøkes i elektronmikroskopet. For å minke sannsynligheten for overbelastning ble det prøvetatt tre prøver per materiale med varierende prøvetakingstider fra 1 til 11 minutter.

Direktevisende partikkeltellere

En partikkelteller (TSI Incorporated Scanning Mobility Particle Sizer) som teller partikkel-antall og bestemmer partikkelstørrelser mellom 11 og 615 nm (mobilitetsdiameter, d_{mob}) ble plassert utenfor laserskjæreren med en silikonslange festet på innsiden av veggen. Partikkeltelleren registrerte størrelsen og antallet partikler i luften inne i det lukkede området til laserskjæreren gjennom arbeidsdagen. I en av bedriftene ble SMPS plassert mellom to ulike typer CO₂-lasere, en åpen og en lukket, omtrent 2-3 meter fra hver.

ORDFORKLARING:

Mobilitetsdiameter (d_{mob})

betyr at størrelsen på partiklene er bestemt etter hastigheten partiklene beveger seg i et elektrisk felt.

Personbåren prøvetaking

Respirabelt partikulært materiale ble samlet inn ved bruk av Higgins-Dewell sykkloner (JS Holdings, UK) med 37 mm 5,0 μm PVC filter (Millipore Corp., Billerica, MA, USA) plassert i pustesonen til fem arbeidstakere som håndterte laserskjærere. Bærbare pumper (GSA SG5200 Messgerätebau, Ratingen, Germany) ble benyttet ved en konstant luftgjennomstrømning på 2.2 L/min, målt før og etter prøvetaking.

Partikkelkarakterisering

Morfologi, grunnstoffsammensetning og fase av enkeltpartikler ble undersøkt med et SU6600 skanning elektronmikroskop (Hitachi High Technologies, Tokyo, Japan) utstyrt med en Quantax 200 energidispersiv røntgendetektor (Bruker Nano GmbH, Berlin, Germany) og en Electron Backscatter Diffraction (EBSD) detektor (NORDIF, Trondheim Norway).

Gravimetri

Totalmassen av partikulært materiale ble bestemt gravimetrisk. Filtrene ble kondisjonert før veiing i minst 24 timer på et klimakontrollert veierom (temperatur $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ og fuktighet $40\% \pm 2\%$). Statisk elektrisitet ble fjernet fra filtrene ved bruk av en radioaktiv kilde (^{210}Po -emitter, Staticmaster[®], NRD LLC, Grand Island, NY, USA) før veiing på en Sartorius MC5 semi-mikro vekt (Sartorius AG, Göttingen, Germany). Den gravimetriske bestemmelsesgrensen (DG) var 0,005 mg/ filter.

Grunnstoffbestemmelse

Filtrene med partikulær forurensning fra syv av metallplatene (10 mm Aluminium, 3,2 mm svartstål, 1,5 mm galvanisert stål, 3 mm stål og 15 mm, 6 mm og 5 mm rustfritt stål) ble syredekompontert (salpetersyre, saltsyre og fluss-syre) før anvendelse av et Agilent 8800 induktiv koplet plasma massespektrometer (Agilent Technologies, SC, USA).

Bestemmelse av fase

Fasen i det partikulære materiale fra de samme syv metallplatene som for grunnstoffbestemmelse ble undersøkt med et X'Pert³ røntgendiffraktometer (XRD) (Malvern Panalytical, Malvern, UK).

ORDFORKLARING:

Fasen kan bestemmes i SEM av den krystallinske strukturen (EBSD) til mineralet og den kjemiske sammensetningen (EDS), eller med XRD.

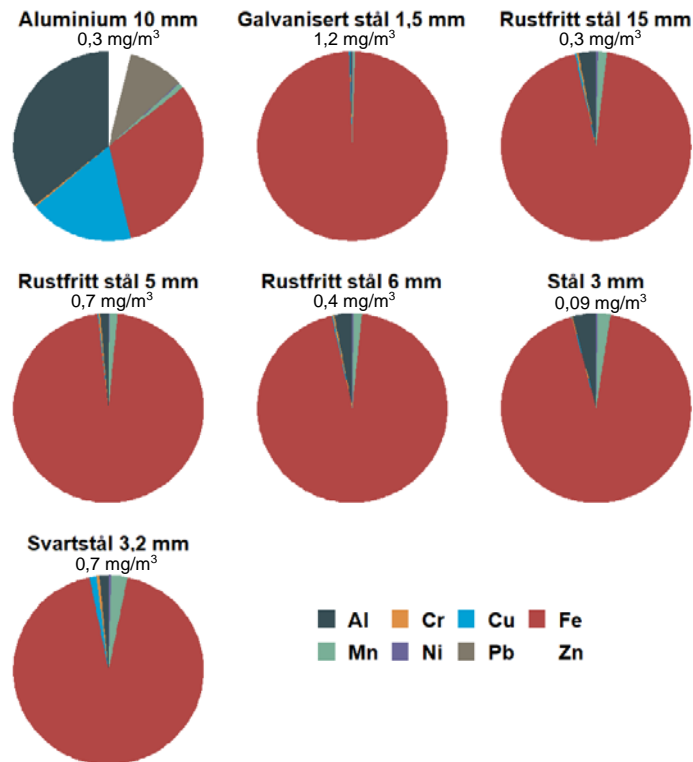
Alle mineraler vil gi opphav til et unikt mønster ved bruk av XRD. Det er lettere å finne riktig fase om man også kjenner den kjemiske sammensetningen.

Resultat og diskusjon

Partikulært materialet samlet inn på innsiden av laserskjærerkabinettet

Partiklene dannet ved skjæring på 10 mm aluminiumplaten inneholdt hovedsakelig aluminium og jern, men også relativt mye kobber og bly (Figur 2). Siden hverken jern eller bly er en del av legeringsmetallene i den opprinnelige metallplaten tyder dette på at luftbårne partikler kan ha blitt tilført fra andre nærliggende kilder. Jern kan komme fra stålet platene ligger på under skjæring, og bly kan komme fra laserskjæring av metallrør dekt med bly som ble utført samtidig bare noen få meter unna. Resultatene fra SEM-EDS/EBSD tyder på at det hovedsakelig er hercynite, et aluminium-jern-oksid som dannes, men dette kunne ikke verifiseres med XRD. Ved skjæring på aluminiumsplater 0,5 mm ble det funnet hovedsakelig aluminium og oksygen i enkeltpartikler analysert i SEM.

Den partikulære forurensingen fra skjæring på stålplater var dominert av jern (Figur 1). Avhengig av typen stållegeringen som ble skåret på var det også innslag av andre grunnstoff i partiklene som f.eks. krom, mangan og nikkell. I tillegg til jern vises den relative sammensetningen av mangan, aluminium, kobber, krom og nikkell i Figur 1. Partikler dannet ved skjæring på stål, herunder rustfritt stål, svartstål og galvanisert stål, bestod hovedsakelig av jern og oksygen. Enkeltpartikler analysert med EBSD komplementert med EDS viste kun jernoksidfasen magnetitt (Fe_3O_4) for skjæring på stållegeringer og denne fasen ble verifisert med XRD. I tillegg ble det med XRD også påvist metallisk α -Fe ved skjæring på rustfritt stål og svartstål.



Figur 1: Relativ kjemisk sammensetning av partikulær forurensning som ble dannet under laserskjæring av ulike metallplater. Konsentrasjonen av den totale massen i luft (mg/m^3) under laserskjæring er gitt for hvert materiale.

Partikler dannet ved skjæring på titanplater inneholdt hovedsakelig titan og oksygen, men prøven hadde også noen partikler som bestod av jern. De jernholdige partiklene kan allerede ha vært tilstede i luften fra tidligere laserskjæring eller blitt dannet fra gitteret metallplaten støttes på under skjæring. Enkeltpartikler analysert med EBSD og EDX viste faser av oksidene TiO_2 og Ti_2O_3 , men dette kunne ikke verifiseres med XRD da det ikke ble skåret lenge nok på denne platen til å samle inn nok partikulært materiale.

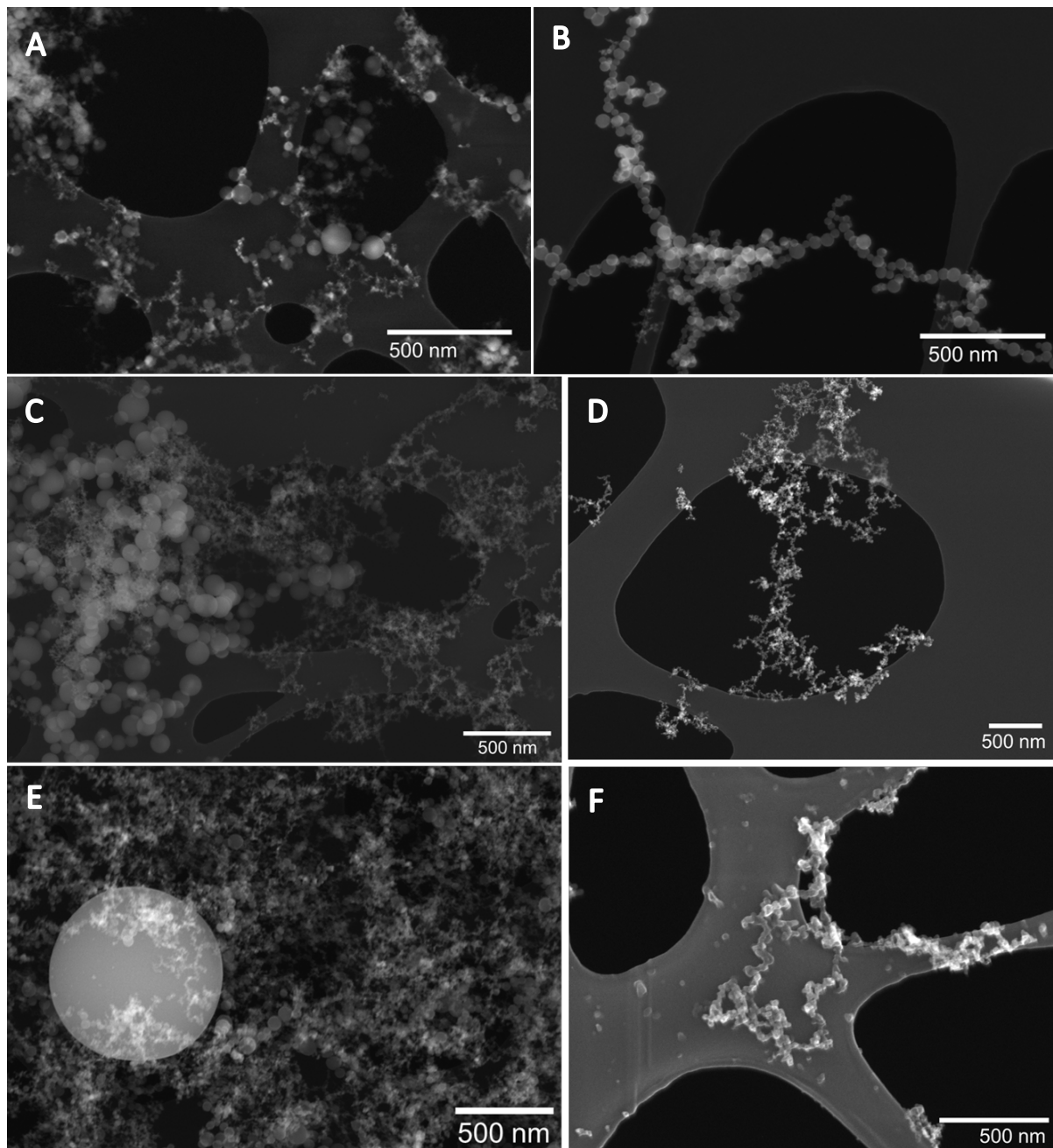
Morfologien til partikler som ble dannet under laserskjæring på de ulike metallplatene var små primærpartikler bundet sammen som agglomerater/ aggregater (Figur 2). I all hovedsak hadde primærpartiklene diametere fra 5 nm til 100 nm. Større primærpartikler ble også observert (Figur 2E), noe som sannsynligvis kommer av at partiklene kan ha gjennomgått en sekundær nedsmelting pga. diffusjon tilbake til lasersonen til større partikler (Eggersdorfer and Pratsinis, 2014). Morfologisk

ORDFORKLARING:

Agglomerat er en partikkel bestående av primærpartikler som er bundet sammen med svake bindinger.

Aggregat er en partikkel bestående av primærpartikler bundet i sterke bindinger.

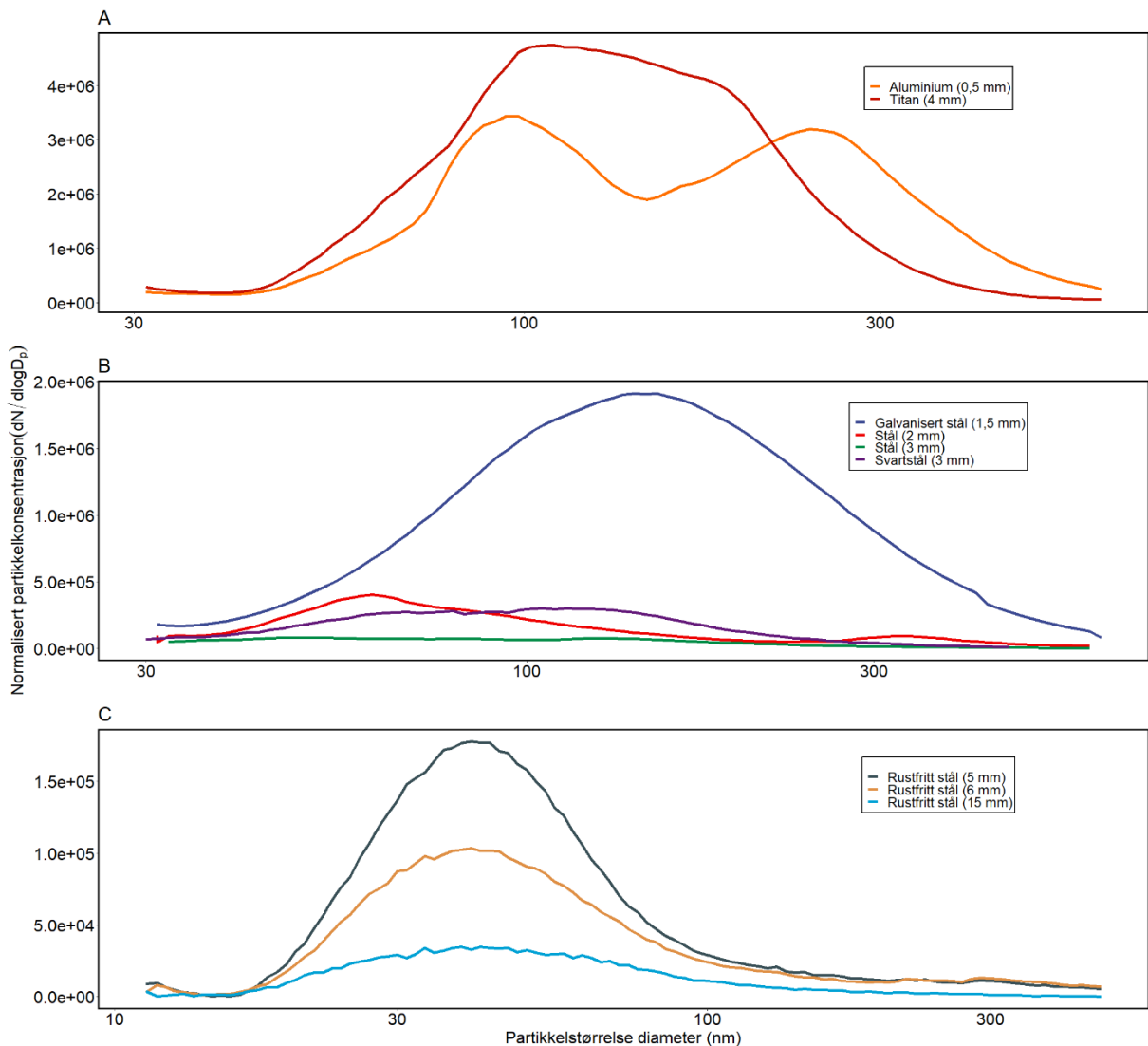
likner partiklene som dannes ved laserskjæring på partikler som dannes ved sveising (Berlinger et al., 2011) og 3D-printing av metaller (Ljunggren et al., 2019, Noskov et al., 2020).



Figur 2: Eksempel på enkeltpartikler, agglomerater og aggregater som ble dannet ved laserskjæring av ulike typer metallplater (A: Stål, B: Aluminium, C: Rustfritt stål, D: Galvanisert stål, E: Titan, F: Svartstål).

Størrelsesfordeling og konsentrasjon av partikler som ble dannet under laserskjæring varierte med tykkelse på metallplate og type materiale. Eksempler på dette er vist i Figur 3. Øverst i figuren presenteres partikkelstørrelse og antallet partikler som dannes under skjæring av tynne aluminiumplater (0,5 mm) og en titanplate (4 mm). Skjæringen av disse platene resulterte i det

høyeste antallet partikler i luften ved laserskjæreren. I midten vises partiklene som dannes under skjæring av ulike stålplater (hhv. galvanisert stål, stål av to ulike tykkelser og svartstål), Figur 3B. Partiklene som ble dannet ved skjæring av aluminium-, titan-, og stålplatene er generelt større enn partikler som dannes ved skjæring av rustfritt stål (Figur 3C). Skjæring av stålplatene som hadde et tynt oljelag (stål 2 mm) resulterte også i dannelse av partikler av mindre størrelse (~75 nm). Skjæring av den tynneste platen av rustfritt stål resulterte i det høyeste partikkelantallet sammenliknet med tykkere plater av rustfritt stål.



Figur 2: Partikkelstørrelse og -antall under skjæring på ulike metallplater, A: Aluminium og titan*, B: Galvanisert stål, to tykkelser av stål og svartstål og C: tre ulike tykkelser av rustfritt stål. (Merk at x-aksen er logaritmisk). *Merk at det er kort skjæring (< 4 min) på disse to og derfor større usikkerhet knyttet til størrelsefordelingskurvene

Partikulært materiale i arbeidsluften

Tabell 2 viser et sammendrag av prøvene av partikulært respirabelt materiale i pustesonen til arbeidstakere som jobber med laserskjæring. Prøvetakingstiden varierte fra 265 min til 483 min per arbeidsdag. Konsentrasjonene som er oppgitt er normaliserte til 8-timers arbeidsdag for å kunne sammenliknes med gjeldene grenseverdi. Generelt er den tidsnormerte eksponeringen av partikulær masse ved laserskjæring lav (1 %) ift. gjeldene grenseverdi for sjenerende støv (Forskrift om tiltaksverdier og grenseverdier, FOR-2011-12-06-1358, §5-1). For grunnstoffene som ble bestemt i dette prosjektet er også konsentrasjonene i arbeidsatmosfæren langt under gjeldende grenseverdier. Ved laserskjæring av blyholdige materialer bør metalleksponeringen følges opp i henhold til forskrift om utførelse av arbeid (FOR-2021-04-15-1163, §3-25). Variasjonen mellom prøvene var relativt høy, spesielt for kobber og bly (minimum og maksimum verdiene i tabell 2). Dette kan forklares av at de er samlet inn fra forskjellige bedrifter som skar på ulike materialer, samt at det er både åpne og lukkede lasere med i studien.

Tabell 2: Partikulær masse og metallkonsentrasjon [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] målt i respirable personbårne prøver normalisert til 8-timer for sammenlikning til gjeldene grenseverdier.

	Partikulær masse	Jern	Aluminium	Mangan	Krom	Nikkel	Kobber	Bly
Median	48	5	2	0,08	0,07	0,04	0,03	0,007
Minimum	29	1	0,5	0,01	<0,002	0,005	0,01	0,002
Maksimum	63	8	2	0,2	0,08	0,08	13	7
Grenseverdi*	5000 ^a	3000	5000 ^b	50	500	50	100	50

*konvertert til $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ^{a)} uspesifisert sveiserøyk, ^{b)} aluminium sveiserøyk

Det ble funnet en forskjell i støvkonsentrasjon ved åpne (n=1) og lukkede laserskjærere (n=3). Konsentrasjonen av respirabelt partikulært materiale målt i pustesonen til arbeidstaker ved åpne laserskjærere (0,12 mg/m^3 , n=1) var omtrent dobbelt så høy som ved lukkede laserskjærere (0,05 mg/m^3 , n=4).

Konklusjon

I denne studien ble partikler som dannes under laserskjæring av ulike metallplater med ulike legeringer undersøkt. Resultatene viser at størrelsen av partiklene som dannes er hovedsakelig mindre enn 300 nm d_{mob} . Dette betyr at partiklene er respirable og kan penetrere ned i det alveolære området av lungene. Morfologisk likner partiklene på partikler som dannes ved andre arbeidsoperasjoner med høytemperaturprosessering av metall som sveising og 3D-printing, med agglomerater/ aggregater av små primærpartikler. Generelt reflekterer grunnstoffsammensetningen av det partikulære materialet innholdet i platene det ble skåret på, men siden prøvene også inneholder andre grunnstoff enn det platene bestod av kan det tyde på at det også var andre kilder av metaller som eksempelvis stål som understøttet platene inne i laserskjæreren eller innblanding av partikulært materiale i luft fra andre arbeidsoperasjoner i lokalet. Partikler som ble dannet ved laserskjæring på ulike typer stål bestod hovedsakelig av jernoksid. Fasen magnetitt ble funnet i større primærpartikler (> 50 nm) med SEM-EDX/EBSD og i bulkprøver av det partikulære materialet analysert med XRD. Laserskjæring av aluminiumplater dannet partikulært materiale som bestod av relativt like mengder jern og aluminium i tillegg til mindre mengder kobber, bly og sink. Partikkelanalysen i SEM viste at de fleste partiklene inneholdt både jern, aluminium og oksygen og at fasen sannsynligvis er et aluminium-jern-oksid. I denne studien ble det i tillegg funnet en sammenheng mellom tykkelsen på metallplaten og antallet partikler som ble generert under laserskjæring, ved at skjæring av tynnere plater gav høyere partikkelkonsentrasjon enn tykkere plater. Størrelsesfordelingen av partiklene som ble dannet ved laserskjæringen var avhengig av materialet det ble skåret på.

Eksponeringskartleggingen blant operatørene viste at eksponeringen er lav og langt under gjeldene grenseverdier for støv og aktuelle metaller.

I prosjektet er det skrevet en masteroppgave med tittel “*Exposure assessment and particle characterization of workplace aerosols in Norwegian metal laser-cutting industry*” (Halvorsen, 2021).

Referanseliste

- BERLINGER, B., BENKER, N., WEINBRUCH, S., L'VOV, B., EBERT, M., KOCH, W., ELLINGSEN, D. G. & THOMASSEN, Y. 2011. Physicochemical characterisation of different welding aerosols. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 399, 1773-1780.
- BERLINGER, B., NÁRAY, M., SAJÓ, I. & ZÁRAY, G. 2009. Critical Evaluation of Sequential Leaching Procedures for the Determination of Ni and Mn Species in Welding Fumes. *Annals of Work Exposures and Health*, 53, 333-340.
- BRAAKHUIS, H. M., PARK, M. V. D. Z., GOSENS, I., DE JONG, W. H. & CASSEE, F. R. 2014. Physicochemical characteristics of nanomaterials that affect pulmonary inflammation. *Particle and Fibre Toxicology*, 11, 18.
- DONALDSON, K., TRAN, L., JIMENEZ, L. A., DUFFIN, R., NEWBY, D. E., MILLS, N., MACNEE, W. & STONE, V. 2005. Combustion-derived nanoparticles: A review of their toxicology following inhalation exposure. *Particle and Fibre Toxicology*, 2, 10.
- EGGERSDORFER, M. L. & PRATSINIS, S. E. 2014. Agglomerates and aggregates of nanoparticles made in the gas phase. *Advanced Powder Technology*, 25, 71-90.
- GONSER, M., LIPPOLD, J., DICKINSON, D., SOWARDS, J. & RAMIREZ, A. 2010. Characterization of welding fume generated by high-Mn consumables. *Weld J*, 89, 25s-33s.
- HALVORSEN, J. Ø. 2021. Exposure assessment and particle characterization of workplace aerosols in Norwegian metal laser-cutting industry. *Master's thesis*, Norwegian University of Life Sciences, Ås.
- LJUNGGREN, S. A., KARLSSON, H., STÅHLBOM, B., KRAPI, B., FORNANDER, L., KARLSSON, L. E., BERGSTRÖM, B., NORDENBERG, E., ERVIK, T. K. & GRAFF, P. 2019. Biomonitoring of Metal Exposure During Additive Manufacturing (3D Printing). *Safety and Health at Work*, 10, 518-526.
- NOSKOV, A., ERVIK, T. K., TSIVILSKIY, I., GILMUTDINOV, A. & THOMASSEN, Y. 2020. Characterization of ultrafine particles emitted during laser-based additive manufacturing of metal parts. *Scientific Reports*, 10, 20989.