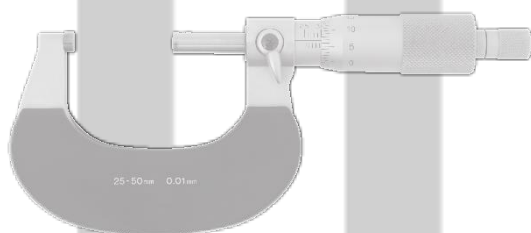


MÅLING AF PARTIKLER I RØGGAS FRA FORBRÆN- DINGSPROCESSER

UNDERVISNINGSELEMENT

02

—
UNDERVISNING
I MÅLETEKNIK

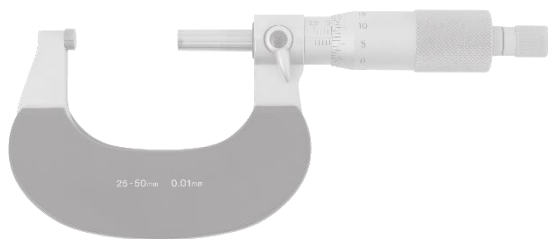


metrologi.dk

MÅLING AF PARTIKLER I RØGGAS FRA FORBRÆNDINGSPROCESSER

Af Lars K. Gram og Karsten Fuglsang, FORCE Technology

1. udgave – oktober 2018



Copyright © 2017 metrologi.dk – Materialet må ikke anvendes til kommercielt brug, uden tilladelse fra metrologi.dk.

Metrologi.dk er finansieret af Styrelsen for Forskning og Innovation i perioden 2016 – 2018. Materiale er udarbejdet i et samarbejde mellem GTS-institutterne DFM A/S, FORCE Technology og DELTA - a part of FORCE Technology.

Læs mere om projektet på www.metrologi.dk.

Parterne i Metrologi.dk kan ikke gøres ansvarlig for fejl og mangler i indholdet af undervisningsmaterialet eller i indholdet på websitet, samt indholdet i de eksterne dokumenter og websites, der linkes til, medmindre andet følger af dansk rets almindelige regler.

Grafisk design af: Henriette Schäfer Høyrup og David Balslev-Harder.

Indholdsfortegnelse

1 Indledning	1	2.7 Gennemførelse	6
Boks 1: Ordet "emission"	1	2.7.1 Før målingen.....	6
1.1 Grænseværdier, måleresultater og usikkerheder		2.7.2 Under målingen.....	6
1		2.7.3 Efter målingen	7
1.1.1 Forskel på fejl og usikkerhed	1	2.7.4 Vejning.....	7
Boks 2: Europæiske standarder	1	Boks 5: Partikelmålinger i udeluft, arbejdsmiljø	
1.1.2 En case.....	2	og indeklime	7
Boks 3: Partiklers egenskaber - masse eller		2.8 Beregninger	7
antal?	2	2.9 Hjelpeparametre.....	8
2 Måling af partikler	2	3 Usikkerheder og sporbarhed	8
2.1 Målestedet.....	2	3.1 Usikkerhed	8
2.2 Målingen	2	3.2 Sporbarhed	8
2.3 Enheder og grænseværdier	2	4 Opsummering	9
2.4 Målested og isokinetik	3	4.1 Læringsudbytte	9
2.5 Planlægning	4	4.2 Læringssspørgsmål	9
2.6 Måleudstyr.....	5	4.3 Niveau og omfang	9
Boks 4: Partikelmålinger - Måling af størrelse ..	6		

1 Indledning

Udslip af partikler fra virksomheder sker blandt andet gennem afkast fra energiproduktion. Vi vil i det følgende undervisningselement beskrive, hvordan man måler emissionen af partikler fra forbrændingsprocesser. Måleprincipperne er principielt ikke forskellige fra andre typer partikelmålinger. Der skal dog tages højde for, at temperaturen og vandindholdet i røggas er væsentligt forhøjet i forhold til den omgivende luft.

Emissionsmålinger for partikler benyttes til at afgøre, om en grænseværdi er overholdt, eller til at kalibrere en partikelmåler i skorstenen. Andre formål kan være optimering af forbrændingsprocessen, eller dimensionering af et partikelfilter.

1.1 Grænseværdier, måleresultater og usikkerheder

Grænseværdier for emissioner til luften bør af myndighederne altid fastsættes sammen med krav, der kan besvare disse spørgsmål til målingens udførelse:

Hvilke produktionsforhold skal målingen udføres under?

- Hvor mange enkeltmålinger skal der foretages, og over hvor lang tid?
- Er det gennemsnit eller den højeste enkeltmåling, der skal bruges til sammenligning med grænseværdien?
- Hvordan skal måleusikkerheden bruges i forhold til sammenligningen med grænseværdien?

I Danmark er grundreglen, at der skal udtages tre prøver af hver en times varighed ved normal maksimal produktion. Kontrolreglen er, at gennemsnittet af de tre måleresultater sammenholdes med grænseværdien uden hensyntagen til usikkerheden på måleresultatet.

Større anlæg har via EU direktiver krav om kontinuerlig måling af partikler vha. en såkaldt AMS (Automatisk Målende System). En AMS skal måle alle timer, hvor anlægget er drift. En AMS skal kvalitetssikres og

Boks 1: Ordet "emission"

Emission betyder egentlig "udsendelse". I daglig tale anvendes "udslip" ofte i stedet for "emission". Emissionen kan beregnes ud fra en målt koncentration af fx partikler og en målt volumenstrøm (flow) i skorstenen.

Koncentration er et mål for stofmængden pr. m³ luft. Koncentration gange volumenstrøm giver emissionen i stofmængde pr. tidsenhed.

kalibreres med manuelle partikelmålinger som beskrevet i dette modul. Virksomheder med AMS kan fratrække usikkerheden fra måleresultatet inden rapportering til myndighederne.

1.1.1 Forskel på fejl og usikkerhed

Usikkerheden på en måling er et udtryk for hvor præcist det enkelte måleresultat er. Ved feltmålinger i skorstene er der en række påvirkninger af måleresultatet, som ikke indgår i usikkerheden. Det kan f.eks. være reelle variationer i emissionen, der forekommer over tid pga. ændringer i virksomhedens produktionsforhold.

Målinger udføres ofte under beskidte forhold højt oppe i en skorsten, hvor målingerne kan påvirkes af vejret, og der kan være risiko for at forurene prøven. Den strømmende gas i skorstenen kan være roterende eller pulserende. Dette kan i visse tilfælde betyde, at det ikke er muligt at udføre en korrekt måling.

I den ideelle situation udføres målingen korrekt i henhold til standarden [1] og kontrolreglen: I praksis vil der dog i større eller mindre grad være risiko for, at måleresultatet påvirkes af de nævnte faktorer, som man ikke kan sætte tal på, og som ikke indgår i et usikkerhedsbudget.

Et usikkerhedsbudget for en partikelmåling tager derfor udgangspunkt i optimale måleforhold uden fejl.

Boks 2: Europæiske standarder

Partikelmålinger, der udføres i EU, skal følge de standarder som udgives af CEN, der er EU's standardiseringsorgan. I teksten refereres der til standarderne der kan ses i litteraturlisten sidst i modulet.

For at illustrere betydningen af formål, usikkerheder og fejl kommer her en lille fortælling om en partikel-måleopgave.

1.1.2 En case

En virksomhed skal dokumentere, at de kan overholde grænseværdien i afkastet fra en biomassefyret kedel. Pga. pladsproblemer i bygningen slår kanalen et par knæk inden den føres ud af bygningen gennem taget. Målestedet er placeret et par kanaldiametre efter sidste knæk, hvor gassen roterer i kanalen pga. de mange knæk. Der har været målt her i årevis og grænseværdien er normalt overholdt. Kommunen har bedt virksomheden om at sørge for at målestedet bliver bragt i orden, så der ikke er roterende gas. Dette opnås ved at installere et "kryds" (dvs. plader på langs inde i kanalen efter rørbøjningen, og før målestedet), som hjælper med at stoppe rotationen. Ved næste måling viser det sig at partikelemissionen er 20% højere end tidligere år, og at grænseværdien er overskredet, selvom der ikke er foretaget ændringer i hverken kedel eller brændsel. Årsagen til dette er sandsynligvis, at den roterende gas gjorde det vanskeligt at opsamle de største partikler korrekt, da de slynges forbi prøvetagningssondens dyseåbning, og dermed ikke bliver opsamlet på filteret, og resultatet bliver for lavt. I dette eksempel har virksomheden udskudt udgifter til partikelfilter i mange år pga. et målested, der ikke opfylder standardens [1] krav. I afsnit 2.4 forklares det hvorfor roterende gas kan give forkerte måleresultater.

2 Måling af partikler

2.1 Målestedet

Når man skal måle partikelemissionen, skal man finde et langt lige kanalstykke uden bøjninger eller andre ting der kan forstyrre gassens strømning. Du kan læse mere om flowforstyrrelser i UE-F1. Der skal derudover være adgang til kanalen via måleporte, så man kan nå et passende antal målepunkter i kanalen vha. en sonde.

2.2 Målingen

Selve målingen foregår ved, at man suger et kendt volumen af røggas igennem et filter. Filteret vejes før og

efter målingen, og differensen er et mål for den opsamlede mængde partikler på filteret. Filteret placeres under målingen i en filterholder, som monteres på en sonde, der er påmonteret en dyse med et kendt tværsnitsareal. Sonden placeres i kanalen så dyseåb-

Boks 3: Partiklers egenskaber - masse eller antal?

Luftbårne partikler kan, afhængig af den proces der skaber dem, have meget forskellige størrelsesfordelinger. I en røggas fra en forbrændingsmotor vil der således være en meget stor antalsmæssig andel af ultrafine partikler (dvs. partikler $< 0,1 \mu\text{m}$).

Ultrafine partikler vil stort set ikke bidrage til et resultat, der måles i mg/m^3 . Massen af partiklerne domineres af de partikler, der er $> 0,1 \mu\text{m}$. De ultrafine partikler har imidlertid et stort overfladeareal, og fordi kan trænge igennem lungehinderne ved indånding, kan de udgøre en særlig sundhedsrisiko. Det diskuteres derfor i øjeblikket, om de massebaserede grænseværdier i mg/m^3 skal suppleres med grænseværdier for antal partikler/ m^3 .

ningen peger mod gassens strømningsretning. Der suges nu gas ud via dyse, sonde og gennem filteret. Sonde og filter skal være opvarmet for at undgå kondens, som kan forstyrre målingen. Udsugningshastigheden i dyseåbningen skal være identisk med røggassens hastighed i kanalen i samme punkt for at opnå en såkaldt isokinetisk udsugning. Der suges gas ud i et antal minutter i hvert af de udvalgte punkter i kanalen, så den samlede måletid bliver f.eks. en time. Når målingen standses aflæses den udsugede gasmængde på et gasur (dvs. et instrument, der måler det samlede, udsugede gasvolumen i m^3 eller liter). Partikelkoncentrationen er den afvejede partikelmængde delt med den udsugede gasmængde i f.eks. mg/m^3 .

2.3 Enheder og grænseværdier

En varm gas fylder mere end en kold gas, og derfor vil koncentrationen målt i mg/m^3 være mindre i en varm gas end i en kold gas. Grænseværdier for partikelkoncentrationer i emissioner til atmosfæren er af samme grund altid opgivet i $\text{mg}/\text{m}^3(\text{n},\text{t})$ eller for røggas $\text{mg}/\text{m}^3(\text{n},\text{t},\text{ref.O}_2)$. (n) betyder normalttilstand, og det

angiver den koncentration, der ville være ved temperaturen 0°C og trykket 1 atmosfære. (t) angiver at koncentrationen angives som tør gas, dvs. koncentrationen er her korrigeret for indholdet af vand i røggassen. "Ref. O_2 " angiver, at man omregner til en såkaldt reference iltprocent (ref. O_2). Disse omregninger skal sikre, at måleresultatet kan sammenlignes direkte med grænseværdien.

Eksempel: I en kedel, der fremstiller varmt vand og damp, afbrændes et brændsel ved at kulstof og brint i brændslet ilt, og der dannes kuldioxid og vand. Derfor er koncentrationen i røggas lavere for ilt og højere for kuldioxid og vand end i omgivende luft.

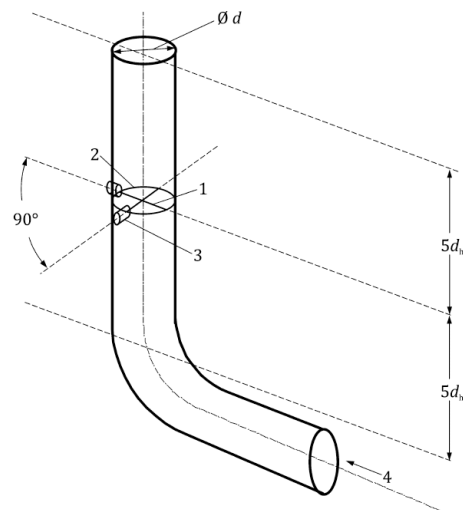
Hvis der tilføres meget luft til forbrændingsprocessen, siger man at der er et stort luftoverskud. Jo større luftoverskud, jo lavere bliver partikkelkoncentrationen, idet den fortyndes af overskudsluften. Ud fra iltkoncentrationen i røggassen kan partikkelkoncentrationen omregnes til en bestemt reference iltkoncentration. På den måde sikres det, at man ikke kan fortynde sig til en lavere koncentration, som måske ville kunne overholde grænseværdien.

Ved en partikelmåling i røggas er det nødvendigt også at måle gassens temperatur og tryk i gasuret og at måle ilt-koncentrationen i skorstenen.

2.4 Målested og isokinetik

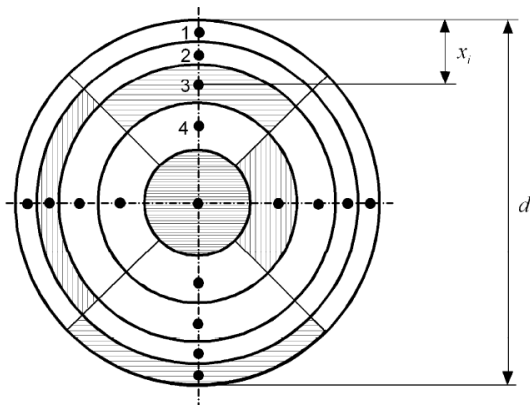
Partikler kan variere i størrelse, massefylde og form. Hertil kommer, at partikelstørrelsesfordeling og koncentration kan variere over måletværsnittet, og over tid. For at udtage en repræsentativ prøve fra en skorsten er det derfor nødvendigt med visse forholdsregler, som også kræves i standarden [1]:

- Målestedet skal placeres og indrettes således, at der er en jævn hastighedsprofil, en jævn fordeling af partikler over måletværsnittet, og en gas som ikke roterer. For at opnå dette anbefales det at placere målestedet minimum 5 gange kanaldiameteren nedstrøms efter sidste forstyrrelse og minimum 5 gange kanaldiameteren opstrøms fra skorstenstoppen. En sådan placering af målestedet giver dog ikke en garanti for at målestedet er egnet.



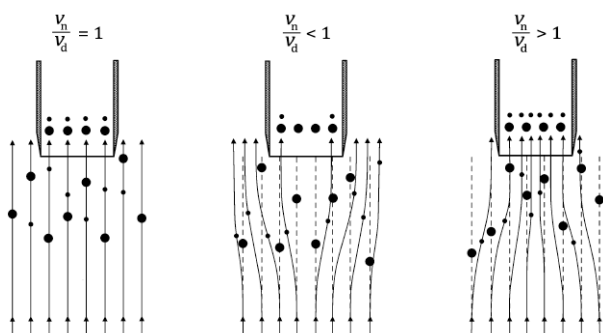
Figur 1 Generel skitse som beskriver indretning af målested [1]. 1: målelinie; 2: måletværsnit; 3: måleport; 4: strømningsretning.

- Ved enhver partikelmåling bør der indledningsvis gennemføres en test af målestedets egnethed til partikelmåling. Testen udføres ved hastighedsmålingen, og der ses bl.a. på hastighedsforskelle over tværsnittet og om gassen roterer. Hvis målestedet ikke findes egnet, bør et nyt egnet målested udpeges, eller målestedet skal indrettes, sådan at målestedet kan foretages uden risiko for målefejl pga. flowforholdene.
- Prøvetagning udføres som en såkaldt traversering. Dvs. at der måles i lige lang tid i et antal punkter, der som vist på Figur 2, er repræsentativt fordelt over kanaltværsnittet. Antal af punkter og deres placering afhænger af kanalens størrelse og udformning. Traverseringsmåling sikrer, at den samlede partikelmåling er repræsentativ for den gennemsnitlige partikkelkoncentration i afkastet.



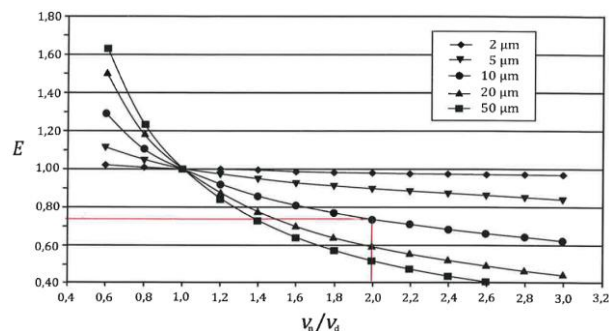
Figur 2 Eksempel på placering af målepunkter i en cirkulær kanal. Hvert punkt repræsenterer et lige stort areal i tværsnittet.

- I hvert punkt skal der udføres isokinetisk udsugning: Udsugningshastigheden i indsugningsdysen skal være identisk med lufthastigheden i samme punkt i kanalen. Målefejl fra ikke-isokinetisk prøvetagning kan forekomme som vist i Figur 3 og Figur 4.



Figur 3 Illustration af fejl ved ikke-isokinetisk udsugning.

- $v_n/v_d=1$. Korrekt isokinetisk udsugning: Hastigheden i dysen (v_n) er identisk med hastigheden i kanalen (v_d)
- $v_n/v_d<1$. For lav udsugningshastighed medfører, at større og tungere partikler pga. deres inertie kan slynges ind i dyseåbningen og dermed bliver overrepræsenteret i måleresultatet
- $v_n/v_d>1$. For høj udsugningshastighed medfører, at større og tungere partikler ikke kan "suges" ind i dyseåbningen pga. af deres inertie og dermed bliver underrepræsenteret i måleresultatet.



Figur 4 Illustration af fejlen (E) ved for høj og for lav udsugningshastighed for forskellige partikelstørrelser [1].

Eksempel: For partikler med en diameter på $10\text{ }\mu\text{m}$, hvor hastigheden i dysen er halvt så stor som hastigheden i kanalen ($v_n/v_d=2,0$) bliver kun ca. 73% (aflest som 0,73 på figuren) af partiklerne i kanalen suget ind gennem dysen. Det ses tydeligt, at partikler $< 2\text{ }\mu\text{m}$ er meget lidt påvirket af ikke-isokinetisk udsugning.

En stor andel af store partikler, høj kanalhastighed og for lille dyseåbning øger fejlen.

For at opnå korrekt isokinetisk udsugning er det nødvendigt at kende hastigheden i det enkelte punkt i kanalen. Hastigheden måles normalt med et pitotrør i forbindelse med et differenstrykmanometer [2]. Pitotrør og flowmåling i gasser bliver yderlige uddybet i UE-F3.

2.5 Planlægning

For at sikre, at en partikelmåling udføres korrekt, skal en partikelmåling planlægges omhyggeligt:

- Målestedet skal være placeret korrekt i forhold til gassens strømningsforhold, og med sikre adgangsforhold for måletekniker.
- Måleporte skal give adgang til de krævede traverseringspunkter i kanalen.
- Virksomhedens produktion skal være stabil i måleperioden og skal passe med formålet med målingen.
 - En ustabil produktion kan f.eks. give varierende hastighed i kanalen. Dette kan øge usikkerheden på en partikelmåling betragteligt.
 - F.eks. er et typisk vilkår i en miljøgodkendelse at målingen skal udføres ved maksimal emission.

- Forventet temperatur i kanalen samt koncentrationsniveau af partikler, vand og evt. O₂, bør være kendt.
 - Grænseværdien kan give en ide om den forventede partikelkoncentration. Oplysninger om virksomhedens drift, f.eks. hvad og hvor meget der produceres og evt. hvilket brændsel der benyttes, kan give relevant information om temperatur, vandindhold mv. i kanalen.

2.6 Måleudstyr

I det følgende beskrives hvilket udstyr der skal benyttes til selve partikelmålingen:

- Udvalg af dyser i forskellige størrelser.
- Opvarmet sonde af en længde, så alle målepunkter i røggaskanalen kan nås.
- Opvarmet filterholder, med konisk indløb.
- Dyse, sonde og filterholder skal være af passende materiale, der ikke kan reagere med gassen. Typisk anvendes rustfrit stål, titan, kvarts eller glas.



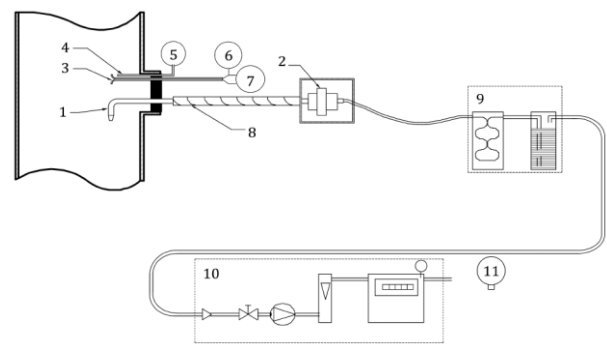
Figur 5 Eksempel på planfilterholder i glas.

- Forvejede filtre af kvartsfiber eller andre egnede materialer.
 - Planfiltre til alm. forekommende koncentrationer med en effektivitet på 99,5 % for 0,3 µm partikler eller

99,9 % for 0,6 µm partikler. Anvendes typisk ved måling på emissioner efter røggasrensning.

- Dybdefilter til meget høje koncentrationer. Et dybdefilter kan være enten et fingerbøl-lignende filter, eller pakket af kvartsuld i en beholder med net i bunden. Dybdefiltre har en meget større overflade end et planfilter og kan derfor opsamle en større mængde partikler. Anvendes typisk ved måling på emissioner før røggasrensning (rågas).

- Tørreenhed til at fjerne vand fra den udsugede luft.
- Gastæt pumpe.
- Flowmeter og ventil til at indstille til isokinetisk udsugning.
- Kalibreret gasur.



- | | |
|-----------------------|--------------------------------------|
| 1 Dyse | 7 Dynamisk tryk |
| 2 Filterholder | 8 Sonderør |
| 3 Pitotrør | 9 Køle- og tørresystem |
| 4 Temperaturføler | 10 Ventil, pumpe, flowmeter og gasur |
| 5 Temperaturindikator | 11 trykmåler |
| 6 Statisk tryk | |

Figur 6 Principskitse af partikelmåleudstyr [1].

Flere kombinationer af udstyr er tilladt i standarden [1]:

- Filteret kan placeres i kanalen (in stack måling) eller uden for kanalen (out of stack måling).
- Med separat hastighedsmåling eller hastighedsmåling indbygget i sonden.

Der findes kommercielt tilgængeligt udstyr med indbygget hastighedsmåleudstyr i sonden og automatisk regulering til isokinetisk udsugning.

Ud over det beskrevne udstyr til partikelmålingen skal der anvendes udstyr til måling af hastighed, vandindhold, ilt, tryk og temperatur.

Boks 4: Partikelmålinger - Måling af størrelse

Cyklon: Hvis man f.eks. ønsker at måle mængden af partikler der er mindre end f.eks. 10 μm i diameter (PM10), kan denne måling udføres ved at man suger den partikelholdige gas igennem en såkaldt cyklon. I cyklonen roteres gassen på en måde, så de store partikler slynges ud af luftstrømmen og opsamles i et bæger. De små partikler bliver i luftstrømmen og kan opsamles på et filter.

Kaskadeimpaktor: Partiklestørrelsesfordelingen kan bestemmes med en kaskadeimpaktor, hvor gassen passerer en række trin, hvor gassen afbøjes med stigende hastighed for hvert trin. Ved afbøjningen i første trin vil de tungeste partikler blive slynget ud af luftstrømmen og afsat på en forvejet plade. Ved næste trin øges hastigheden via en reduceret dysestørrelse, og lidt mindre partikler slynges ud og afsættes på dette trin. Sådan fortsættes der i et antal trin, der hver for sig repræsenterer en partikelstørrelsesgruppe. Det sidste trin er normalt et filter, som tilbageholder de mindste partikler, der er sluppet igennem kaskadeimpaktoren. Efter målingen vejes pladerne igen, og differensen er et mål for den opsamlede mængde partikler på hvert trin.



2.7 Gennemførelse

I det følgende beskrives en partikelmåling med filter uden for kanalen og med separat hastighedsmåleudstyr.

2.7.1 Før målingen

Antal og placering af målepunkter bestemmes ud fra kanalens dimensioner.

Tværsnitsareal m^2	Diameter m	Minimum antal målelinier	Minimum antal målepunkter pr. tværsnitsareal ^c
< 0,1	< 0,35	2 ^a	4 ^a
0,1 – 1,0	0,35 – 1,1	2	4
1,1 – 2,0	1,1 – 1,6	2	8
> 2,0	> 1,6	2	4 pr. m^2 , dog mindst 12 ^b
^a Ved partikelmålinger er det tilstrækkeligt med eet målepunkt i små kanaler. ^b Ved store kanaler er 20 målepunkter normalt tilstrækkeligt. ^c Ved cirkulært måletværsnit skal antallet af målepunkter være deleligt med 4.			

Figur 7 Minimum antal målepunkter i cirkulære kanaler [3].

Mål hastighed og temperatur i de udvalgte punkter i kanaltværsnittet og beregn passende isokinetisk udsugningshastighed og dysestørrelse.

Saml udstyret med et forvejet filter i filterholderen og start opvarmningen af sonde og filterholder.

Udfør en læktest.

Aflæs og noter gasur.

Placer udstyret i første målepunkt.

2.7.2 Under målingen

Når sonde og filterholder er opvarmet til den ønskede temperatur (fx 120°C), kan pumpen startes og udsugningen reguleres til isokinetisk udsugning.

Noter starttidspunktet for målingen.

Når måleperioden for første punkt er færdig, flyttes sonden til næste punkt og reguleres igen til isokinetisk udsugning. Dette gentages indtil sonden skal flyttes til næste måleport. Ved skift til anden måleport lukkes ventilen, og sonden flyttes til første målepunkt i næste måleport og proceduren gentages.

Temperaturen i gasuret aflæses og noteres med jævne mellemrum i hele måleperioden.

Når målingen er slut standses pumpen og ventilen lukkes.

2.7.3 Efter målingen

Noter sluttidspunkt for målingen.

Noter aflæsningen af gasuret.

Udstyret tages ud af kanalen og filteret tages ud og lægges i en filterkassette med angivelse af filterets nummer. Filteret kan nu transporteres til laboratoriet til vejning.

2.7.4 Vejning

Før måling:

Filteret tørres i en ovn ved 180°C, hvorefter det køles i en eksikkator. Dette kaldes konditionering af filteret. Filteret tages ud af eksikkatoren, og vejes inden for kort tid, således at det optager mindst mulig fugt fra luften i vejerummet.

Efter måling:

Filteret tørres i en ovn ved 160°C, hvorefter det køles i en eksikkator. Filteret tages direkte fra eksikkatoren og lægges straks herefter på vægten. Vægten aflæses tre gange: 1, 2 og 3 minutter efter at filteret er lagt på vægten. Vejetallet findes ved ekstrapolering til tiden nul minutter, for at undgå, at vand som partiklerne suger til sig fra luften, indgår i vejeresultatet.

Den opsamlede partikelmængde på filteret måles som differensen mellem vejeresultatet før og efter måling.

2.8 Beregninger

Den målte partikelkoncentration beregnes i $\text{mg}/\text{m}^3(n,t)$ ud fra følgende ligning:

Ligning 1 Beregning af den målte partikelkoncentration.

$$C_{\text{partikler}} = \frac{(M_{\text{efter}} - M_{\text{før}})}{\Delta V_{\text{gasur}} \cdot \frac{273}{(273 + t_{\text{gasur}})} \cdot \frac{P_{\text{gasur}}}{1013}},$$

hvor

$$C_{\text{partikler}} = \text{partikelkoncentrationen} \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3(n,t)} \right]$$

$M_{\text{før}}$ = vejeresultat før måling [mg]

M_{efter} = vejeresultat efter måling [mg]

ΔV_{gasur} = udsuget luftmængde, aflæst på gasur

P_{gasur} = tryk i gasur [mbar]

t_{gasur} = temperaturen i gasur [°C]

Korrektion til reference ilt beregnes ud fra følgende ligning:

Ligning 2 Beregning af korrektion til reference iltkoncentration.

$$C_{\text{partikler,ref.}} = C_{\text{partikler}} \cdot \frac{(21 - O_{2,\text{reference}})}{(21 - O_{2,\text{målt}})}$$

hvor

$C_{\text{partikler,ref.}}$

= partikelkonc. ved reference ilt $\left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3(n,t,\text{ref})} \right]$

$C_{\text{partikler}}$

= partikelkonc. ved normalt tilstand, tør $\left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3(n,t)} \right]$

21 = atmosfærens iltkoncentration [vol%]

$O_{2,\text{reference}}$ = reference iltkoncentration [vol%]

Boks 5: Partikelmålinger i udeluft, arbejdsmiljø og indeklime

Beskrivelsen af partikelmåling er i dette undervisnings-element begrænset til måling i røggas. Der udføres partikelmålinger i luft i mange andre sammenhænge og med andre metoder:

I udeluft udføres der partikelmålinger, f.eks. på gaderne i København eller omkring større virksomheder.

På arbejdspladser udføres der målinger af, hvor stor en mængde partikler medarbejdernes udsættes for.

I indeklime udføres der partikelmålinger for at se på virkningen af f.eks. åbne ildsteder eller anvendelsen af stearinlys i boliger.

Da måling af partikler i ovenstående tilfælde udføres i omgivende luft, er isokinetisk prøvetagning ikke relevant. Der er heller ikke behov for korrektion for iltkoncentrationen. Men i princippet anvendes i udeluft, indeklime og arbejdsmiljø principielt den samme metode til partikelmåling: Prøvetagning på et filter med efterfølgende vejning i laboratoriet.

$O_{2,\text{målt}}$ = den målte iltkoncentration [vol%]

2.9 Hjelpeparametre

En partikelmåling i en røggas udføres altid ved samtidig måling af hjelpeparametrene hastighed [2], ilt [4], tryk og temperatur.

Måling af disse hjelpeparametre beskrives ikke i dette modul, men for hastighed og ilt henvises der til standarderne [2] og [4].

3 Usikkerheder og sporbarhed

3.1 Usikkerhed

Som det fremgår af Ligning 1 og Ligning 2, består en partikelmåling af en række delmålinger, som alle bidrager til usikkerheden på målingen:

- Vejningen af filteret
- Målingen af den udsugede gasmængde aflæst på et gasur
 - måling af tryk og temperatur i gasuret
- Måling af ilt i kanalen

Standarden [1] foreskriver, at isokinetikken skal ligge mellem 90 og 115% af den "sande" isokinetiske udsugning. Afvigelsen fra isokinetik betragtes ikke som en usikkerhed, men som en fejl. Derfor medregnes den ikke i usikkerheden. Det er heller ikke muligt at estimere fejlen, da den afhænger af partikelstørrelsesfordelingen som man kun kender hvis den måles samtidigt. Det vides dog, at måler man lave partikel-emissioner f.eks. efter et posefilter, så er andelen af store partikler lille og fejlen bliver uden den store betydning.

Usikkerheden på vejningen af filteret kan bestemmes ud fra UE-M1.

Af praktiske årsager vælges det normalt at fastsætte acceptgrænser for fejlvisningen på gasuret, termometeret og trykmåleren, som så kontrolleres ved den årlige kalibrering. Hvis fejlvisningen er inden for acceptgrænsen godkendes måleudstyret og aflæsninger på måleudstyret anvendes uden korrektion. Dermed kan usikkerhedsbidraget fastsættes til den øvre acceptgrænse delt med kvadratrodd 3 grundet stepfordeling

[5]. Korrigeres der for fejlvisning bliver måleresultatet mere præcist og usikkerhedsbidraget bliver mindre.

Usikkerheden på iltmålingen bestemmes ud fra standarden for iltmåling [4].

Med udgangspunkt i usikkerheden på de enkelte delbidrag og formlerne i afsnit 2.8 kan den samlede usikkerhed på et måleresultat beregnes efter principperne i GUM [5].

Usikkerhedsbudgetter viser, at det typisk er usikkerheden på differensvejningen, gasuret og iltmålingen, der har størst betydning for den samlede usikkerhed. Temperatur og tryk i gasmåleren har en mindre betydning. Som det ses i Ligning 1 sker temperaturkorrektionen i forhold til 273°K og trykkorrektionen i forhold til 1013 mbar. Da temperaturen og trykket måles med en usikkerhed på ca. 2 grader henholdsvis ca. 4 mbar bliver deres usikkerhedsbidrag lille.

Usikkerheden på en partikelmåling, der udføres over en time i en partikelkoncentration som er 10 gange højere end kvantifikationsgrænsen (LoQ), vil ligge omkring 11% af måleresultatet (95 % konfindensinterval, $k=2$).

3.2 Sporbarhed

Ved en akkrediteret partikelmåling skal der være sporbarhed på alle de målinger der indgår i det samlede resultat:

- Sporbarhed på vægten opnås ved sporbar kalibrering og hyppige kontroller med sporbart kalibrerede lodder.
- Sporbarhed på gasuret opnås ved kalibrering fx med en vådgasmåler, hvor vandmængden kan vejes sporbart.
- Sporbarhed på trykmåling i gasuret opnås ved, at trykmåleren kalibreres sporbart.
- Sporbarheden på temperaturmålingen i gasuret opnås ved en kontrol af termoføleren overfor en husnormal, der er sporbart kalibreret.

Ovenstående kalibreringer udføres tilbagevendende - typisk en gang om året.

4 Opsummering

I dette modul beskrives formålet med at måle partikler i røggas, og målemetoden beskrives i detaljer. Betydningen af isokinetisk udsugning, herunder traversering beskrives og forklares. Udstyr og filtertyper til partikelmåling gennemgås. Vigtigheden af at konditionere filtre og proceduren for at kompensere for vandoptagelsen på filtre i forbindelse med vejningen gennemgås. Formlerne til beregning af måleresultatet gennemgås og ud fra formlerne forklares det hvilke delelementer der har størst betydning for den samlede usikkerhed.

Endvidere nævnes eksempler på andre målemetoder til partikelmåling – herunder partikelantal og partikelstørrelse. I en case demonstreres målestedets betydning for måleresultat.

4.1 Læringsudbytte

Metoden til emissionsmålinger i røggas adskiller sig fra metoden til måling i udeluft ved at der skal tages særlig hensyn til at partikelkoncentrationer, temperaturer og luftfugtighed i gassen kan være meget større end i udeluften. Gassen skal udtages ved isokinetisk prøvetagning, og prøvetagningen skal foretages varmt, så kondensation af vand i sonde og filterholder undgås. Vandindholdet skal reduceres i prøvetagningssystemet i et køle- og tørresystem, sådan at det er tør gas, der trækkes gennem pumpen og gasuret. Filteret, som partiklerne opsamles på, vejes i laboratoriet efter en konditionering før og efter prøvetagningen. Ved emission fra forbrændingsprocesser skal partikelkoncentrationen korrigeres til en referenceiltkoncentration.

Indretning og placering af målestedet i skorstenen har stor betydning for kvaliteten af måleresultatet.

4.2 Læringsspørgsmål

Gennem brug af dette kompendium vil den studerende kunne besvare følgende spørgsmål:

- Hvorfor måles partikelkoncentrationen?
- Hvad er isokinetisk udsugning?
- Hvordan sikres det, at prøven er repræsentativ for partikelindholdet i skorstenen?

- Hvilken betydning har isokinetisk udsugning for måleresultatet?
- Hvad vil det sige at prøvetagningen udføres ved traversering?
- Hvorfor skal en partikelmåling traverseres?
- Hvilke måleparametre indgår der i en partikelmåling?
- Hvilke måleparametre har størst betydning for usikkerheden på måleresultatet?
- Hvad er en differensvejning?
- Hvorfor skal man aflæse vægten flere gange ved vejning af filteret?

4.3 Niveau og omfang

Materialet i dette kompendium kræver kendskab til simple formler og til afbildning med grafer, men ikke avanceret matematik.

Basal viden om sporbarhed og usikkerhedsberegninger er en fordel.

Litteraturliste

- [1] EN 13284-1: 2017 Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Part 1: manual gravimetric method.
- [2] EN ISO 16911-1:2013 Stationary source emissions - Manual and automatic determination of velocity and volume flow rate in ducts - Part 1: Manual reference method.
- [3] EN 15259: 2007 Air quality - Measurement of stationary source emissions - Requirements for measurement sections and sites and for the measurement objective, plan and report.
- [4] EN 14789: 2017 Stationary source emissions - Determination of volume concentration of oxygen - Standard reference method: Paramagnetism.
- [5] Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), 2008.

