



Referencelaboratoriet for måling af emissioner til luften

Titel	Om våde røggasser i relation til OML-beregning
Undertitel	-
Forfatter	Lars K. Gram
Arbejdet udført, år	2015
Udgivelsesdato	6. august 2015
Revideret, dato	Januar 2022

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	2
1.1	Formål.....	2
2	Dråber i røggassen	2
2.1	Hvordan dannes dråber i røggassen ?.....	2
2.2	Hvordan vurderer man, om der er dråber ved skorstenstop ?.....	3
2.2.1	Visuel vurdering	3
2.2.2	Målinger af vandindhold og dråber.....	3
2.2.2.1	Hvad sker der fra målested til skorstenstop ?	4
2.3	Beregning af vandindhold og "dråbekorrigeret temperatur"	5
3	Konklusion	5
	Bilag A Bilag A fra DS/EN 14790 (vandbestemmelse). Oversigt over sammenhængen mellem gastemperatur og vandindhold ved vandmættet gas.	7

1 Indledning

Mange danske energianlæg er kondenserende med henblik på at udnytte den sidste energi i røggassen. I praksis betyder dette relativt lave røggastemperaturer og røggasser, der er meget tæt på og i nogle tilfælde under gassens vanddugpunkt (indeholder dråber). Ydermere kan der forekomme medrivning af dråber (enten fra skrubberen eller fra det kondenserede vand som løber ned ad indersiden af skorstenen).

Er der dråber til stede, når røggassen forlader skorstenen, vil dråberne fordampe senere på røgfanens vej, hvilket betyder, at røgfanen afkøles. Denne proces tages der ikke hensyn til i OML. Problemstillingen er kun til stede, hvis dråberne er dannet inden de forlader skorstenen.

DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet - har udarbejdet et notat om OML-beregninger¹ på våde røgfaner. I dette notat beskrives problemstillingen mere detaljeret, og der gives en metode til at nedjustere den beregningsmæssige temperatur af røggassen i OML, når der er en begrænset mængde af dråber i røggassen, således at spredningen af røgfaner kan beregnes med OML (inden for visse grænser, der også defineres i notatet).

[Link til DCE's notat](http://www.ref-lab.dk), som også kan findes på www.ref-lab.dk.

Nærværende notat beskriver

- i hvilke situationer der kan forventes dråber i skorstenstoppe
- hvordan vandindholdet, herunder dråbeindholdet, kan bestemmes ved målinger eller beregninger

1.1 Formål

Formålet med notatet er at skabe et grundlag for at vurdere, beregne eller måle dråbeindholdet i våde røggasser, således at korrekt brug af "dråbekorrigeret røggastemperatur" i OML-beregning i henhold til DCE's notat kan udføres.

2 Dråber i røggassen

2.1 Hvordan dannes dråber i røggassen ?

Dråber i røggassen forekommer i følgende situationer og i kombinationer af dem:

1. Mættet røggas med dråber ved temperaturer under 100°C
 - a. Hvis gassen mættes i en skrubber eller en kondenserende enhed og derefter køles yderligere på vej gennem rør og skorsten vil gassen ikke kunne holde på al vandet og det vil kondensere ud som dråber. Dette sker normalt på kolde overflader som gassen passerer, men det kan også ske i den strømmende gas.
 - i. Når røggassen passer en sugetræksblæser, tilføres der normalt lidt energi i form af varme, og det er ikke unormalt, at temperaturen stiger et par grader ved passage af sugetræksblæseren. Ved stigning i temperaturen kan dråberne fordampe igen.

¹ OML: Operationel meteorologisk Luftkvalitetsmodel. OML-modellen er beskrevet i Luftvejledningen (Miljøstyrelsens vejledning nr. 2 2001) afsnit 4.2. OML modellen skal benyttes på alle afkast for at afgøre om immissionskoncentrationsbidraget er lavere end B-værdien for alle de udledte forureningsparametre.

- b. Især ved uisolerede skorstene og røgrør vil meget fugtige gasser afgive vand ved kondensering på de kolde flader. Dette vand løber nedad på indersiden af kanalen og samles, når det ikke kan løbe videre. En del af dette vand fordamper igen, men kan også medrives som dråber fra overflader eller vandsamlinger, når røggasstrømmen passerer.
2. Medrivning af dråber fra skrubber eller kondenserende enhed.
 - a. Røggasstrømmen igennem en skrubber vil helt naturligt medrive dråber af skrubbevand. Disse fanges normalt igen i et dråbefang eller en demister, men der vil altid være en lille mængde dråber efter en skrubber. Hvis gassen ikke er mættet fordamper dråberne igen, og dråberne vil også fordampe, hvis temperaturen stiger en lille smule i røggassen fx ved passage af sugetræksblæser. Hvis der er store mængder dråber, kan de ikke nå at fordampe og vil følge gassen ud til skorstenstoppen.
 - b. Samme princip gælder for kondenserende enheder

2.2 Hvordan vurderer man, om der er dråber ved skorstenstop ?

2.2.1 Visuel vurdering

I DCE's notat anføres det, at en normal røggfane først bliver synlig et stykke efter, at den har forladt skorstenstoppen, hvorimod en dråbeholdig røggfane burde være synlig helt ned til skorstenstoppen. Det sidste er dog ikke altid tilfældet, da det kan være vanskeligt at se små dråbekoncentrationer i den smalle røggfane. Endvidere vil medrivning af store dråber muligvis ikke kunne ses fra jorden.

Under alle omstændigheder er en synlig røggfane helt ned til skorstenstoppen et tydeligt bevis på dråber.

Store dråber (fra medrivning) vil kunne opleves som "regnen" i tørvej og er en god indikator på en dråbeholdig røggas. Det kan dog ikke udelukkes, at "regnen" skyldes en hurtig nedkøling af røggassen og ikke medrevne dråber.

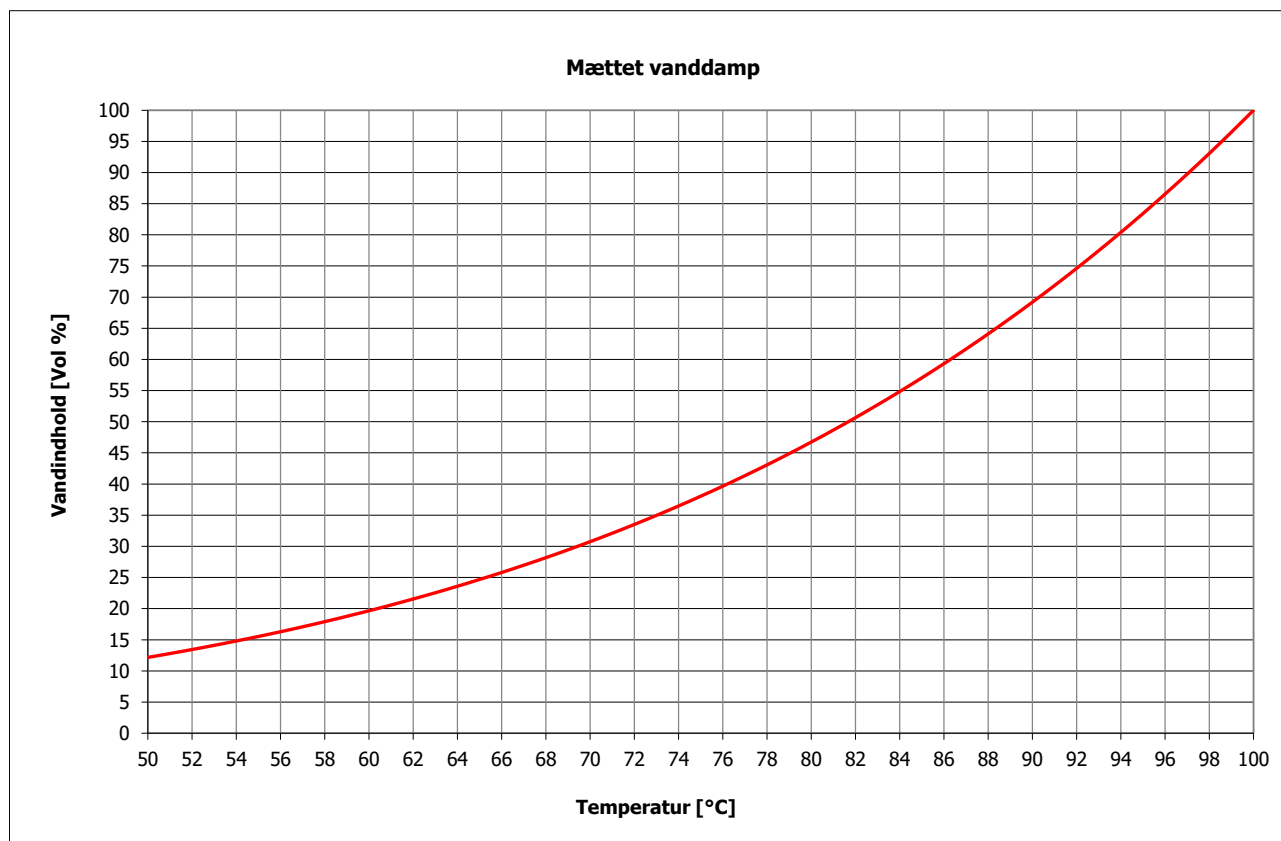
2.2.2 Målinger af vandindhold og dråber

Ved almindelige emissionsmålinger bestemmes vandindholdet i røggassen altid. I de fleste tilfælde bestemmes vandindholdet sammen med støvmålingen ved isokinetisk udsugning og eventuelle dråber vil blive medbestemt som vand. Er der ikke udført isokinetisk udsugning ved vandbestemmelsen, kan den del af vandindholdet som stammer fra dråber være over- eller underestimeret (sandsynligvis underestimeret).

Målingen giver resultatet som summen af vanddamp og eventuelle dråber i enheden vol %, som er uafhængig af temperaturen. Vandindhold kan også gives i enhederne g/m^3 tør luft eller g/m^3 våd luft ved en bestemt temperatur. DCE's notat giver mulighed for at tage udgangspunkt i alle tre enheder.

Det kan forekomme, at der er dråber i røggassen, selvom det totale vandindhold (dråber + damp) indikerer, at røggassen er umættet. Dette forekommer dog sjældent og kræver en voldsom medrivning af dråber fra fx en skrubber.

Et vandindhold, der er bestemt som summen af damp og dråber, kan hurtigt sammenholdes med temperaturen og det kan afgøres, om den er umættet, mættet eller indeholder dråber. Følgende Figur 1 (og tabellen i Bilag A) viser sammenhængen mellem vandindhold og temperatur for vandmættet luft. Hvis vandindholdet er over kurven, indeholder luften dråber, og hvis det er under kurven, er det umættet.



Figur 1 Vandmættet gas. Vandindhold ved forskellige temperaturer. Er det målte vandindhold større end vandindholdet i figuren ved en given temperatur, indeholder gassen dråber. (Se endvidere tabeloversigt i Bilag A)

Emissionsmålinger foretages i et målepunkt som af praktiske årsager er placeret langt fra skorstenstoppen. Der vil være et temperaturfald fra målestedet og til skorstenstoppen, som naturligvis er større ved uisoleerede skorstene.

I skorstene, hvor der opleves problemer med "regn", kan der endvidere være monteret et dråbefang eller lign. ved skorstenstoppen. Det opsamlede vand fra dråbefanget kan drænes væk fra skorstenen eller blot løbe ned ad indersiden på skorstenen.

Det er altså muligt både at have en større og en mindre mængde dråber i skorstenstop end emissionsmålingen antyder.

2.2.2.1 Hvad sker der fra målested til skorstenstop ?

Dråber, der dannes ved et temperaturfald i skorstenen, vil kondensere ud på indersiden af skorstenen og enten medrives igen eller løbe ned til skorstensbund, hvor de kan drænes ud. Det kan være vanskeligt at afgøre, i hvilket omfang dette forekommer. Hvis der ikke er dræn i bunden af skorstenen, er det sandsynligt at dråberne ender i røgfanen.

Den lidt lavere temperatur i skorstenstoppen er væsentlig at kende, når der er tale om vandmættet røggas, idet dråbedannelsen kan være betydelig ved selv små temperaturfald. Temperaturfaldet i sig selv har ikke

Rapport 69B

Om våde røggasser i relation til OML beregninger

den store effekt på røgfaneløftet, mens de dannede dråber har en betydeligt større effekt på røgfaneløftet. Både temperaturfaldet og dråberne mindsker løftet og medfører derfor dårligere spredning.

I praksis skal der således tages udgangspunkt i det målte vandindhold ved målestedet og den målte eller estimerede temperatur i skorstenstoppen. Der bør være sammenhæng mellem vandmålingen og skorstenstoptemperaturen, hvilket taler for at man undersøger, hvor stort temperaturfaldet er, og benytter den temperatur der altid måles samtidig med vandmålingen og fratrækker temperaturforskellen.

Det er ikke muligt at estimere præcis hvor meget temperaturen i en vandmættet gas falder fra målested til skorstenstop, da det afhænger af temperaturen inde i og uden for skorstenen, isolering, hastighed og diameter mv. Temperaturtabet fra målested til skorstenstop er dog ganske lavt og kan estimeres til maksimalt 1°C². Da et højt temperaturtab giver en worstcase OML-beregning anbefales at bruge temperaturen målt i målestedet fratrukket 1°C, når det ikke er muligt at måle temperaturen i skorstenstoppen.

2.3 Beregning af vandindhold og "dråbekorrigeret temperatur"

Når følgende betingelser er opfyldt, kan vandindholdet i skorstenstoppen beregnes:

- at røggassen har været mættet på et tidspunkt i processen (fx efter en skrubber eller en kondenseringsenhed)
- at temperaturer ved mætningspunktet og i skorstenstoppen kendes
- at der ikke tilføres eller fjernes vand eller luft fra røggassen efter det sted i processen, hvor gassen er mættet
- at det antages, at der ikke forekommer medrivning af dråber ved det sted i processen, hvor gassen er mættet

Vandindholdet i gassen kan derefter aflæses på Figur 1 eller i tabellen i Bilag A ud fra temperaturen ved mætningspunktet. Med disse to oplysninger kan den "dråbekorrigerede temperatur" som skal anvendes ved OML beregning beregnes vha. DCE's notat.

3 Konklusion

DCE har udarbejdet et notat, som anviser, hvordan man ud fra det totale vandindhold (dråber + damp) og temperaturen i skorstenstoppen kan beregne en "dråbekorrigeret røggastemperatur", der kan benyttes i OML-modellen. Ved denne fremgangsmåde vil OML-modellen beregne korrekt ved dråbeholdige røggasser.

Emissionsmålinger, der udføres på anlæg, vil normalt indeholde information om det totale vandindhold (dråber + damp) og røggastemperaturen målt i det normale målested (altså ikke i skorstenstoppen).

Dråbefang i skorstenstop mv. mv., som forekommer efter målestedet, kan betyde, at det målte totale vandindhold i målestedet ikke er det samme som i skorstenstoppen. Det vurderes dog, at man i de fleste situationer kan benytte det målte totale vandindhold, men det mest korrekte vil være at måle vandindhold og temperatur i skorstenstoppen. Et dråbefang i skorstenstoppen vil reducere mængden af dråber i forhold til de

² Grundlaget for dette estimat er beregninger af temperaturtabet for et typisk affaldsforbrændingsanlæg med våd røggas ved et par forskellige scenarier (temperatur, isoleringsgrad, afstand mellem målested og skorstenstop etc.).

Rapport 69B

Om våde røggasser i relation til OML beregninger

målte totale vandindhold, hvilket resulterer i en konservativ betragtning ved brug af den "dråbekorrigerede temperatur" i OML-beregningen.

I visse situationer kan det totale vandindhold beregnes ud fra temperaturmålinger.

Da temperaturfaldet fra målested til skorstenstop kan have betydning for OML-beregningen ved vandmættede røggasser, er det nødvendigt at kende temperaturen i skorstenstoppen. Temperaturtabet fra målested til skorstenstop kan estimeres til maksimalt 1°C for alle praktiske forhold.

Når skorstenstoptemperaturen vurderes lavere end den reelt er, bliver OML-beregningen en "worst case" beregning.

Bilag A Bilag A fra DS/EN 14790 (vandbestemmelse). Oversigt over sammenhængen mellem gastemperatur og vandindhold ved vandmættet gas.

Determination of water vapour concentration for water saturated gas, at $P_{std} = 101,325 \text{ kPa}$

Temperature T of gas in duct	Vapour pressure	Water vapour concentration	Water vapour concentration at T and P_{std}	Water vapour concentration at T and P_{std}	Water vapour concentration
°C	k Pa	g/kg wet air	g/m ³ of wet gas	g/m ³ of dry gas	% volume of wet gas
0	0,614	3,78	4,87	4,90	0,61
1	0,660	4,06	5,22	5,25	0,65
2	0,709	4,36	5,59	5,63	0,70
3	0,761	4,69	5,98	6,02	0,75
4	0,817	5,03	6,39	6,44	0,81
5	0,876	5,40	6,83	6,89	0,86
6	0,939	5,79	7,30	7,36	0,93
7	1,006	6,20	7,79	7,87	0,99
8	1,078	6,64	8,31	8,40	1,06
9	1,153	7,11	8,86	8,96	1,14
10	1,234	7,61	9,44	9,56	1,22
11	1,319	8,13	10,06	10,19	1,30
12	1,409	8,69	10,71	10,86	1,39
13	1,505	9,29	11,40	11,57	1,48
14	1,606	9,92	12,12	12,32	1,58
15	1,713	10,58	12,89	13,11	1,69
16	1,827	11,29	13,70	13,95	1,80
17	1,947	12,04	14,55	14,83	1,92
18	2,074	12,83	15,44	15,76	2,05
19	2,208	13,67	16,38	16,75	2,18
20	2,350	14,55	17,38	17,79	2,32
21	2,499	15,49	18,42	18,89	2,47
22	2,657	16,47	19,52	20,04	2,62
23	2,824	17,52	20,67	21,26	2,79
24	2,999	18,62	21,88	22,55	2,96
25	3,185	19,78	23,15	23,91	3,14
26	3,379	21,01	24,49	25,34	3,34
27	3,585	22,30	25,89	26,84	3,54

Rapport 69B

Om våde røggasser i relation til OML beregninger

Temperature T of gas in duct	Vapour pressure	Water vapour concentration	Water vapour concentration at T and P _{std}	Water vapour concentration at T and P _{std}	Water vapour concentration
°C	k Pa	g/kg wet air	g/m ³ of wet gas	g/m ³ of dry gas	% volume of wet gas
28	3,801	23,67	27,36	28,43	3,75
29	4,028	25,10	28,90	30,10	3,98
30	4,267	26,62	30,52	31,86	4,21
31	4,519	28,21	32,21	33,71	4,46
32	4,783	29,89	33,98	35,66	4,72
33	5,060	31,66	35,83	37,71	4,99
34	5,351	33,52	37,77	39,87	5,28
35	5,657	35,47	39,80	42,15	5,58
36	5,978	37,53	41,92	44,54	5,90
37	6,314	39,69	44,13	47,07	6,23
38	6,667	41,97	46,45	49,72	6,58
39	7,036	44,35	48,86	52,51	6,94
40	7,423	46,86	51,39	55,45	7,33
41	7,828	49,50	54,02	58,54	7,73
42	8,253	52,27	56,77	61,80	8,14
43	8,697	55,17	59,63	65,23	8,58
44	9,161	58,23	62,62	68,84	9,04
45	9,647	61,43	65,73	72,65	9,52
46	10,155	64,79	68,97	76,66	10,02
47	10,685	68,31	72,35	80,88	10,55
48	11,239	72,01	75,87	85,33	11,09
49	11,818	75,89	79,52	90,02	11,66
50	12,422	79,96	83,33	94,97	12,26
51	13,052	84,22	87,29	100,19	12,88
52	13,710	88,69	91,40	105,71	13,53
53	14,395	93,38	95,68	111,52	14,21
54	15,110	98,29	100,12	117,67	14,91
55	15,855	103,44	104,74	124,17	15,65
56	16,631	108,84	109,53	131,04	16,41
57	17,439	114,50	114,51	138,31	17,21
58	18,281	120,43	119,67	146,01	18,04
59	19,157	126,64	125,03	154,18	18,91
60	20,068	133,16	130,58	162,83	19,81
61	21,016	139,98	136,34	172,02	20,74
62	22,002	147,14	142,31	181,78	21,71

Rapport 69B

Om våde røggasser i relation til OML beregninger

Temperature T of gas in duct	Vapour pressure	Water vapour concentration	Water vapour concentration at T and P _{std}	Water vapour concentration at T and P _{std}	Water vapour concentration
°C	k Pa	g/kg wet air	g/m ³ of wet gas	g/m ³ of dry gas	% volume of wet gas
63	23,027	154,63	148,50	192,17	22,73
64	24,092	162,49	154,90	203,22	23,78
65	25,199	170,73	161,54	215,01	24,87
66	26,348	179,37	168,41	227,59	26,00
67	27,541	188,42	175,52	241,03	27,18
68	28,780	197,91	182,87	255,42	28,40
69	30,065	207,87	190,48	270,85	29,67
70	31,399	218,31	198,35	287,42	30,99
71	32,781	229,27	206,48	305,24	32,35
72	34,215	240,76	214,89	324,45	33,77
73	35,701	252,83	223,58	345,21	35,23
74	37,241	265,49	232,55	367,69	36,75
75	38,837	278,79	241,81	392,10	38,33
76	40,489	292,76	251,38	418,68	39,96
77	42,199	307,44	261,25	447,71	41,65
78	43,970	322,87	271,43	479,52	43,39
79	45,801	339,09	281,94	514,51	45,20
80	47,696	356,16	292,77	553,16	47,07
81	49,656	374,12	303,94	596,04	49,01
82	51,682	393,03	315,45	643,86	51,01
83	53,776	412,95	327,31	697,48	53,07
84	55,940	433,95	339,52	758,00	55,21
85	58,175	456,09	352,10	826,80	57,41
86	60,483	479,46	365,05	905,65	59,69
87	62,865	504,13	378,38	996,87	62,04
88	65,325	530,21	392,09	1103,56	64,47
89	67,862	557,79	406,19	1229,95	66,97
90	70,479	586,97	420,70	1381,95	69,56
91	73,178	617,89	435,61	1568,12	72,22
92	75,960	650,67	450,93	1801,33	74,97
93	78,827	685,46	466,67	2101,78	77,80
94	81,781	722,42	482,84	2503,25	80,71
95	84,823	761,74	499,44	3066,66	83,71
96	87,955	803,61	516,48	3914,24	86,81
97	91,179	848,25	533,96	5332,65	89,99

Rapport 69B

Om våde røggasser i relation til OML beregninger

Temperature T of gas in duct	Vapour pressure	Water vapour concentration	Water vapour concentration at T and P_{std}	Water vapour concentration at T and P_{std}	Water vapour concentration
°C	k Pa	g/kg wet air	g/m ³ of wet gas	g/m ³ of dry gas	% volume of wet gas
98	94,496	895,91	551,90	8189,39	93,26
99	97,909	946,88	570,29	16914,52	96,63
100	-	-	-	-	-