

**Referencelaboratoriet for måling af emissioner til luften**

Titel:	Beregning af SO₂ emission fra fyringsanlæg
Undertitel	
Forfatter	Ole Schleicher
Arbejdet udført, år	2015
Udgivelsesdato	Januar 2016
Revideret, dato	-

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	2
1.1	Formål.....	2
1.2	Resume og anbefaling til beregning af SO ₂ emission.....	3
2	Beregning af SO ₂ emissioner	4
2.1	Beregning af den støkiometriske røggasmængde	4
2.1.1	Beregning af røggasmængde ud fra brændselsanalyse	5
2.1.2	Beregning af røggasmængde ud fra brændværdi	6
2.1.3	Beregning af røggasmængde ud fra brændselsfaktoren S	7
2.2	Beregning af røggasmængde ud fra formlerne i luftvejledningen.....	8
2.2.1	Naturgas og LPG	9
2.2.2	Gasolie.....	9
2.2.3	Fuelolie.....	9
2.2.4	Kul	9
2.2.5	Træ.....	10
2.2.6	Halm.....	10
2.3	Vurdering og anbefaling for beregning af røggasmængde.....	10
3	Beregning af SO ₂ koncentration i røggas	11
3.1	Korrektion til reference O ₂ %	12
4	Indbinding af SO ₂ i aske	13
5	Litteraturliste:	14

1 Indledning

I bilag 3, punkt 5 i Bekendtgørelsen om store fyringsanlæg anføres, at der er mulighed for at beregne SO₂ emissionen ud fra svovlindholdet i brændslet /1/. Beregningen kan være et alternativ til periodemålinger for SO₂ på anlæg, hvor der ikke er krav om AMS for SO₂.

Beregningen af SO₂ kan udføres under visse forudsætninger, som angivet i store fyr bekendtgørelsen:

5. Som alternativ til de i punkt 3 anførte målinger af SO₂ og NO_x kan der benyttes andre fremgangsmåder, som godkendelses- eller tilsynsmyndigheden har verificeret og godkendt, til at bestemme emissionen af SO₂ og NO_x. I disse fremgangsmåder skal der anvendes relevante CEN-standarde eller, hvis der ikke foreligger CEN-standarde, ISO-standarde eller nationale eller andre internationale standarde, der sikrer data af tilsvarende videnskabelig kvalitet. /1/

Det har ikke været muligt at finde en standard, der direkte beskriver, hvordan SO₂ koncentrationen kan beregnes, men selve beregningen er relativ simpel, hvis det antages, at alt svovlet i brændslet brænder til SO₂ og emitteres med røggassen. Det giver den teoretisk maksimale emission, men der er to situationer, hvor den virkelige emission vil være mindre end den beregnede emission:

1. Hvis fyringsanlægget er forsynet med røggasrensning til reduktion af SO₂ emissionen, vil den virkelige SO₂ koncentration naturligvis være mindre end den beregnede
2. Ved fyring med faste brændsler vil en del af svovlet indbindes i asken, så den virkelige SO₂ koncentration vil være mindre end den beregnede.

Med en analyse af brændslets indhold af svovl og en måling af brændselsforbruget per tidsenhed, kan SO₂ emissionen beregnes i kg/h.

Hvis der skal beregnes en SO₂ koncentration ved referenceiltprocenten, skal der foreligge enten en brændselsanalyse, som mindst skal omfatte C, O, H, N, S, aske og vandindhold eller en brændselsanalyse omfattende svovlindhold og brændværdi.

Ud fra en brændselsanalyse eller brændværdien kan røggasmængden per brændselsenhed beregnes ud fra CEN standarden EN 12952-15:2003 /2/, som kan suppleres med en beregning af SO₂ koncentrationen, ved en simpel støkiometrisk beregning. Herved kan bekendtgørelsens krav om beregning efter en standard anses for at være opfyldt.

1.1 Formål

At give anvisning for beregning af SO₂ emission, som opfylder bekendtgørelsens krav, specielt om at basere beregningerne på en CEN standard. Hermed åbnes der mulighed for at erstatte de omkostningskrævende halvårslige emissionsmålinger på visse store fyr.

Metoden vil generelt kunne bruges på fyringsanlæg, hvor der foreligger akkrediterede målinger af svovlindhold, brændsels sammensætning og/eller brændværdien på samme brændselsprøve.

1.2 Resume og anbefaling til beregning af SO₂ emission

Denne rapport anviser, hvordan man kan beregne SO₂ koncentrationen i røggassen fra fyringsanlæg ved at omregne brændslets koncentration af svovl til SO₂ og dividere det med røggasmængden. Der vises fire forskellige metoder til at beregne røggasmængden, hvoraf de to først er beskrevet i CEN standarden EN 12952-15:2003 og opfylder således kravet i store fyr bekendtgørelsen om, at der skal anvendes CEN standarder eller andre standarder, hvis SO₂ emissionen beregnes i stedet for at blive målt.

Referencelaboratoriet anbefaler, at ved beregning af SO₂ emissionen til erstatning for målinger, skal røggasmængden beregnes som beskrevet i afsnit 2.3 og SO₂ emissionen skal beregnes som angivet i afsnit 2.4.

Rapporten har været forelagt Miljøstyrelsen, som har erklæret sig enig i de anbefalede beregningsmetoder, som derfor officielt kan erstatte måling af SO₂ emissionen, som angivet i store fyr bekendtgørelsens bilag 3, punkt 5, hvis tilsyns- eller godkendelsesmyndigheden har godkendt, at de periodiske målinger af SO₂-emissionen fra fyringsanlæg kan erstattes af beregninger af SO₂-emissionen.

2 Beregning af SO₂ emissioner

Ved forbrænding af forskellige typer brændsler er der en meget stabil og veldefineret sammenhæng mellem brændslernes sammensætning, brændværdien og den mængde røggas, der udvikles ved forbrændingen. Det kan anvendes til at beregne koncentrationen i røggassen af komponenter i brændslet, som ved forbrændingen bringes på gas- eller partikelform, så hele mængden findes i røggas efter afkøling af røgen i kedlen.

Princippet for beregning af SO₂ emissionen er, at røggasmængden ved reference O₂ % beregnes ud fra en analyse af brændslets sammensætning eller brændslets brændværdi. Koncentrationen af SO₂ beregnes derefter ud fra analyseværdien for svovlindhold i brændslet, idet det forudsættes, at alt svovl brænder til SO₂ og emitteres som SO₂.

For gasformige og flydende brændsler vil det normalt gælde, at alt svovl emitteres som SO₂.

For brændsler med et væsentligt askeindhold, f.eks. kul og biomasse, vil en del af svovlet blive bundet i asken, og kun en del af svovlet vil emitteres som SO₂. Andelen af svovl, der bindes i asken, afhænger af flere faktorer, bl.a. indholdet af basiske komponenter, primært calcium, som villigt binder svovl. Det er derfor ikke muligt for faste brændsler at beregne den virkelige SO₂ emission, med mindre svovlindbindingen i asken er kendt. Når indbindingen af svovl i asken ikke er kendt, er det kun muligt at beregne den teoretisk maksimale SO₂ emission.

2.1 Beregning af den støkiometriske røggasmængde

CEN standarden DS/EN 12952-15:2003 /2/ omfatter 16 standarder med krav til konstruktion af vandrørskedler hjælpeinstallationer. Del 15 Godkendelsesprøvninger er en meget vigtigt reference for de røggasberegninger, der er nødvendige for at beregne SO₂ koncentrationen i røggasen.

Standarden anvendes ved godkendelsesprøvninger, hvor der måles og beregnes en lang række nøgletal som dokumentation for kedlens ydeevne og effektivitet. Selvom standardens titel ikke antyder det, så indeholder den anvisninger og formler til beregning af den støkiometriske røggasmængde, enten ud fra brændslets grundstofsammensætning eller ud fra brændselstypen og brændværdien.

DS/EN 12952-15:2003 giver grundlaget for beregning af SO₂ emissionen og er derfor den standard, der gør, at beregningerne opfylder betingelserne i Store fyr bekendtgørelsen for at benytte andre fremgangsmåder end måling til bestemmelse af SO₂ emissionen.

Anvisninger og formler for beregningerne af røggasmængden kan genfindes og suppleres i den tyske standard VDI 4660 Conversion factors for Specific Emissions from Energy-Conversions Systems /3/, som supplerer EN 12952-15 med formlen for beregning af den støkiometriske røggasmængde for gasformig brændsler ud fra analyse af gassens sammensætning af kulbrinter.

I rapporten Validated methods for flue gas flow rate calculation with reference to EN 12952-15 fra januar 2012, der er udarbejdet af KEMA Nederland B.V. for VGB Powertech (European technical association for power and heat generation) /4/, er der en mere detaljeret gennemgang og forklaring til beregningerne af røggasmængden. Rapporten indeholder en udførlig dokumentation for beregningerne samt beregninger af usikkerheder for de beregnede værdier. Rapporten indeholder også en validering af to beregningsmetoder i EN 12952-15 for 39 kulprøver og 85 biomasseprøver, som viser god overensstemmelse mellem beregningsresultater. Der er dog visse afvigelser, som i rapporten primært tilskrives usikkerhed på målingerne af brændselsammensætningen, som er større end usikkerheden på måling af brændværdien.

Luftvejledningens kapitel 6 om Energianlæg indeholder også formler til beregning af røggasmængde, men dels er der fejl i flere af formlerne, og dels er de ikke ret præcise, fordi de er udarbejdet på baggrund af mange analyser på de forskellige brændsler, som kan afvige meget fra sammensætningen af brændslerne i dag.

Den støkiometriske røggasmængde, er den mængde røggas, der udvikles ved forbrænding af et brændsel, hvor der netop tilføres den mængde ilt med forbrændingsluften, som er nødvendig til en fuldstændig forbrænding. O₂ koncentrationen i den støkiometriske røggasmængde er dermed nul.

Alle beregningsmetoderne for røggasmængde kan anvendes til enhver type forbrænding, dvs. også turbiner og motorer, idet de udelukkende vedrører omsætningen af brændslerne med luftens ilt, som er uafhængig af, hvilken type anlæg omsætningen sker i.

2.1.1 Beregning af røggasmængde ud fra brændselsanalyse

Den støkiometriske røggasmængde for faste og flydende brændsler kan beregnes efter formel 8.3-60 på side 42 i standarden /2/, som gengives her:

Formel 1. Beregning af den støkiometriske røggasmængde for faste og flydende brændsler

$$V_{\text{God}} = 8,8930 \cdot \gamma_C + 20,9724 \cdot \gamma_H + 3,3190 \cdot \gamma_S - 2,6424 \cdot \gamma_O + 0,7997 \cdot \gamma_N \quad [\text{m}^3(\text{n,t})/\text{kg}]$$

Hvor:

V_{God} = Støkiometrisk røggasmængde ved normalt tilstanden og 0% O₂ pr. kg brændsel
(G = røggas, o = støkiometrisk, d = tør)

γ_C , γ_H , γ_S , γ_O og γ_N er brændslets indhold af henholdsvis C, H, S, O og N i kg/kg brændsel.
(n,t) angiver tør røggas normalt tilstanden, dvs. temperaturen 0°C og trykket 101,3 kPa

De faktorer, der ganges på vægtandelen af hver grundstof, er den mængde røggas, som 1 kg af det pågældende grundstof vil producere ved fuldstændig forbrænding uden O₂ overskud.

Formlen regner konservativt med, at alt brændslets indhold af N omdannes til N₂ i forbrændingen, selvom mellem 10 og 70 % normalt brænder til NO_x, som hovedsageligt består af NO og nogle få % NO₂. Hvis alt N bliver til NO, så skulle faktoren, der ganges med, γ_N i formelen være 3,8171. Da indholdet af N i brændsler normalt er relativt lavt, dvs. mindre end 0,5 %, og det kun er en del af N, der oxideres til NO, så er det et meget lille fejl, der laves ved at regne med, at alt N bliver til N₂. Ved et indhold på 0,5 % N er fejlen mindre end 0,1 – 0,4 % af den beregnede røggasmængde, afhængigt af størrelsen af den beregnede røggasmængde V_{God} .

Rapport nr. 78

Beregning af SO₂ emission fra fyringsanlæg

Bidraget til røggasmængden fra γ_0 er negativt, fordi det O, der er i brændslet, vil indgå i det dannede CO₂ og H₂O, men da formlen beregner, hvor meget forbrændingsluft, der skal til for at forbrænde C og H, så beregnes og fratrækkes den mængde røggas, som indholdet af O i brændslet svarer til i forbrændingsluft.

Formlen medregner ikke brændslets andel af vand og aske, da der kun regnes på tør røggas uden partikler og aske. Summen af C, H, S, O og N i kg/kg brændsel giver derfor ikke 1 for brændsler, der indeholder askerest og eller vand men medregnes vand- og askeindholdet i kg/kg brændsel, skal summen være 1.

Formlen kan også anvendes til gasformige brændsler, men da man normalt analyserer sammensætningen af gasformige brændsler, dvs. med koncentrationen af kulbrinter og andre komponenter, hvor der skal anvendes grundstofsammensætningen i formlen, så anvendes den normalt ikke. I VDI 4660 /3/ standardens afsnit 3, side 7 ff. findes formlen tilpasset de normalt forekommende analyser på gasformig brændsler.

Formel 2 Beregning af den støkiometriske røggasmængde for gasformige brændsler

$$V_{\text{God}} = 1,885 \cdot \gamma_{\text{H}_2} + 2,8811 \cdot \gamma_{\text{CO}} + 8,5584 \cdot \gamma_{\text{CH}_4} + 15,342 \cdot \gamma_{\text{C}_2\text{H}_6} + 22,3251 \cdot \gamma_{\text{C}_3\text{H}_8} + 29,7579 \cdot \gamma_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + 37,6901 \cdot \gamma_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + 46,6076 \cdot \gamma_{\text{C}_6\text{H}_{14}} + \gamma_{\text{CO}_2} + \gamma_{\text{N}_2} \quad [\text{m}^3(\text{n,t})/\text{m}^3]$$

$$V_{\text{God}} = 20,9724 \cdot \gamma_{\text{H}} + 2,3040 \cdot \gamma_{\text{CO}} + 11,9286 \cdot \gamma_{\text{CH}_4} + 11,3223 \cdot \gamma_{\text{C}_2\text{H}_6} + 11,1017 \cdot \gamma_{\text{C}_3\text{H}_8} + 10,9876 \cdot \gamma_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + 10,9179 \cdot \gamma_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + 10,8709 \cdot \gamma_{\text{C}_6\text{H}_{14}} + 0,5058 \cdot \gamma_{\text{CO}_2} + 0,7997 \cdot \gamma_{\text{N}_2} \quad [\text{m}^3(\text{n,t})/\text{kg}]$$

Hvor:

V_{God} = Støkiometriske røggasmængde ved normalt tilstanden og 0 % O₂ pr. m³ eller per kg gas.

(G = røggas, o = støkiometrisk, d = tør)

γ_x er gassens indhold af komponenten x i m³/m³ eller kg/kg brændsel, hvor x er H₂, CO, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀, C₅H₁₂, C₆H₁₄, CO₂ og N₂.

(n,t) angiver tør røggas normalt tilstanden, dvs. temperaturen 0°C og trykket 101,3 kPa

Hvis et gasformigt brændsel indeholder væsentlige mængder af andre komponenter, end dem der indgår i formlerne, kan det være nødvendigt af beregne en koefficient for komponenten og medtage denne i formlen.

2.1.2 Beregning af røggasmængde ud fra brændværdi

Den støkiometriske røggasmængde V_{God} kan også beregnes ud fra brændværdien og en empirisk formel, fordi der er en meget stabil og veldefineret sammenhæng mellem brændværdi og den støkiometriske røggasmængde for forskellige typer brændsel, selvom der kan være variationer i den konkrete brændselsammensætning. De empiriske formler er udarbejdet ud fra analyser af brændselstyperne og repræsenterer derfor gennemsnitsværdier, som er mest præcise for brændsler med nogenlunde konstant sammensætning, f.eks. naturgas og olie, mens de er mere usikre, jo mere sammensætningen afviger fra gennemsnittet, hvilket specielt gælder for faste brændsler men også flydende og gasformige brændsler som f.eks. bioolie, biogas og forgasningsgas.

DS/EN 12952-15:2003 angiver formler for henholdsvis fuelolie, naturgas og faste brændsler:

Formel 3 Beregning af den støkiometriske røggasmængde for forskellige brændsler ud fra brændværdien

Fuelolie:¹

$$V_{\text{God}} = 1,76435 + 0,20060 * H_{(N)} \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

Naturgas:²

$$V_{\text{God}} = 0,64972 + 0,22553 * H_{(N)} \quad [\text{m}^3/\text{kg}],$$

eller for gasser der normalt måles i m³:

$$V_{\text{God}} = 0,199 + 0,234 * H_{(N)} \quad [\text{m}^3/\text{m}^3]$$

Faste brændsler:³

$$V_{\text{God}} = -0,06018 * (1 - \gamma_{\text{Aske}} - \gamma_{\text{H}_2\text{O}}) + 0,25437 * (H_{(N)} + 2,4425 * \gamma_{\text{H}_2\text{O}}) \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

Aske mængden har kun meget lille betydning for V_{God} , og kan i de fleste tilfælde negligeres. Hvis røggasberegningen udføres for tørt brændsel, så bliver vand fraktionen nul, og formlen kan reduceres til:

$$V_{\text{God}} = -0,06018 + 0,25437 * H_{(N)d} \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

Hvor:

V_{God} = Støkiometriske røggasmængde ved normaltilstanden og 0 % O₂ pr. kg brændsel eller pr. m³ brændsel.

(G = røggas, o = støkiometrisk, d = tør)

$H_{(N)}$ = Nedre brændværdi [MJ/kg] eller [MJ/m³]

$H_{(N)d}$ = $(H_{(N)} + 2,4425 * \gamma_{\text{H}_2\text{O}}) / (1 - \gamma_{\text{H}_2\text{O}})$

$\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ og γ_{Aske} = er brændslets indhold af henholdsvis vand og aske i kg/kg brændsel.

(n,t) angiver tør røggas normaltilstanden, dvs. temperaturen 0°C og trykket 101,3 kPa

Formlen for fuelolie kan tilnærmelsesvis også anvendes for gasolie, som dog giver knapt 1 % mere røggas.

2.1.3 Beregning af røggasmængde ud fra brændselsfaktoren S

Hvis V_{God} divideres med $H_{(N)}$, så bliver den støkiometriske røggasmængde direkte relateret til brændværdien.

Formel 4 Brændselsfaktoren S

$$S = V_{\text{God}} / H_{(N)} \quad [\text{m}^3/\text{MJ}]$$

¹ Formel nr. 3 på side 16 i /4/

² Formel nr. 4a og 4b på side 16 i /4/

³ Formel nr. 2a og 2 b på side 16 i /4/

Rapport nr. 78

Beregning af SO₂ emission fra fyringsanlæg

Brændselsfaktoren, S , er i det væsentligste en konstant for en given brændselstype. I store træk kan dette forklares med, at røggasmængden stammer fra det brændbare materiale i brændstoffet, hvor C og H udgør hovedparten. C oxideres til CO₂ og H oxiderer til H₂O. Den støkiometriske forbrænding af hver komponent kræver en bestemt mængde luft, hvor O₂ forbruges til oxidationen, og den resterende inert gas (hovedsagelig nitrogen) bidrager til røggasmængden. Tilsvarende er det kun det brændbare materiale, der bidrager til brændværdien af brændslet, der repræsenterer summen af varme fra oxidationen af de enkelte komponenter. For en klasse af brændstoffer med et givent C–H forhold, er S derfor i det væsentligste en konstant faktor.

C–H forholdet varierer dog mellem forskellige brændselstyper, og derfor varierer S også. Inden for den samme brændselstype kan der også være stor variation i C–H forholdet, således at S også kan variere inden for samme brændselstype. C–H forholdet er meget konstant for olieprodukter og naturgas, og selvom der kan være variationer afhængigt af indvindingsstedet, specielt for naturgas, kan S anvendes med stor nøjagtighed for gasolie, fuelolie og naturgas i Danmark.

Da C–H forholdet for kul kan udvise store variationer, bør man ikke anvende S for kul, med mindre man har beregnet den for en bestemt type kul.

C–H forholdet i biomasse varierer også men dog ikke så meget, som kan forekomme i kul. Her gælder det samme som for kul, at S bør kun anvendes, hvis man har beregnet den for en bestemt type biomasse, hvor C–H forholdet er nogenlunde konstant.

Brændsler som bioolie, forgasningsgas og biogas kan også variere meget i sammensætning, men hvis sammensætningen er meget konstant, kan S beregnes og anvendes.

Brændselsfaktoren S er vist i Tabel 1 for de almindeligt anvendte flydende og gasformige brændsler i Danmark, dvs. naturgas, gasolie og fuelolie.

Tabel 1 Eksempler på brændselsfaktoren S

Brændselsfaktor - S	Reference	S [m ³ (n,t)/GJ]	
		Ved ref. %	Ved 0 % O ₂
Brændsel	O ₂ %		
Naturgas	3 %	279	239
Gasolie	3 %	291	249
Fuelolie	3 %	289	247

Der vises ikke nogen faktorer for andre typer brændsler, hvor sammensætning kan variere meget, f.eks. kul, biomasse, bioolie, biogas og forgasningsgas, fordi der ikke kan beregnes en generelt gældende S faktor for disse brændselstyper.

2.2 Beregning af røggasmængde ud fra formlerne i luftvejledningen

Luftvejledningens /5/ kapitel 6 indeholder en række formler til beregning af røggasmængden for forskellige typer brændsler. Disse formler er omregnede udgaver af formler fra bogen Forbrænding teori og praksis /6/, som er udarbejdet på baggrund af mange analyser på de forskellige brændsler, og sammensætningen af nogle af brændsler har ændret sig siden dengang.

Rapport nr. 78

Beregning af SO₂ emission fra fyringsanlæg

Formlerne kan derfor kun anvendes til overslagberegninger af røggasmængderne og ikke til dokumentation i forbindelse med beregning af koncentrationen af f.eks. SO₂, selvom man kender koncentrationen af svovl i brændslet.

Der er også fejl i flere af formlerne i Luftvejledningen, så de bør slet ikke anvendes. De følgende formler er de korrigerede formler, som skulle have stået i luftvejledningen, og de kan anvendes til overslagberegning af røggasmængden og dermed også SO₂ emissionen.

2.2.1 Naturgas og LPG

Ved forbrænding af 1 kg naturgas kan røggas mængden beregnes efter Formel 5.

Formel 5 Luftvejledningens korrekte formel for beregning af røggasmængde for naturgas

eller	$\frac{240}{21 - \% O_2}$	normal m ³ tør røggas
	$2,57 + \frac{241}{21 - \% O_2}$	normal m ³ fugtig røggas

2.2.2 Gasolie

Ved forbrænding af 1 kg gasolie kan røggas mængden beregnes efter Formel 6.

Formel 6 Luftvejledningens korrekte formel for beregning af røggasmængde for gasolie

eller	$\frac{217}{21 - \% O_2}$	normal m ³ tør røggas
	$1,41 + \frac{221}{21 - \% O_2}$	normal m ³ fugtig røggas

2.2.3 Fuelolie

Ved forbrænding af 1 kg fuelolie kan røggas mængden beregnes efter Formel 7.

Formel 7 Luftvejledningens korrekte formel for beregning af røggasmængde for fuelolie

eller	$\frac{213}{21 - \% O_2}$	normal m ³ tør røggas
	$1,29 + \frac{211}{21 - \% O_2}$	normal m ³ fugtig røggas

2.2.4 Kul

Ved forbrænding af 1 kg kul med et vandindhold på 13 % kan røggas mængden beregnes efter Formel 8.

Formel 8 Luftvejledningens korrekte formel for beregning af røggasmængde for kul med 13 % vand

eller	$\frac{131}{21 - \% O_2}$	normal m ³ tør røggas
	$0,54 + \frac{132}{21 - \% O_2}$	normal m ³ fugtig røggas

2.2.5 Træ

Ved forbrænding af 1 kg træ med et vandindhold på 25 % kan røggas mængden beregnes efter Formel 9.

Formel 9 Luftvejledningens formel for beregning af røggasmængde for træ med 25 % vand

eller	$\frac{72}{21 - \% O_2}$	normal m ³ tør røggas
	$0,82 + \frac{73}{21 - \% O_2}$	normal m ³ fugtig røggas

2.2.6 Halm

Ved forbrænding af 1 kg halm med et vandindhold på 10 % kan røggas mængden beregnes efter Formel 10.

Formel 10 Luftvejledningens formel for beregning af røggasmængde for halm med 10 % vandindhold

eller	$\frac{83}{21 - \% O_2}$	normal m ³ tør røggas
	$0,72 + \frac{85}{21 - \% O_2}$	normal m ³ fugtig røggas

2.3 Vurdering og anbefaling for beregning af røggasmængde

Der er vist fire forskellige metoder til at beregne røggasmængden fra fyringsanlæg ud fra henholdsvis brændselsanalyse, brændværdi, brændselsfaktoren S og korrigerede formler fra luftvejledningen. Der er en vis usikkerhed på alle fire metoder, som generelt er stigende med den rækkefølge, de er præsenteret i.

Beregningsmetoderne for brændsler med meget konstant sammensætning og brændværdi kan generelt beregnes med stor nøjagtighed med de første 2 – 3 metoder, mens de brændsler, der kan variere meget i sammensætning, vandindhold og brændværdi bedst beregnes med den første metode, dvs. ud fra brændselsanalyse.

Det giver anledning til den anbefaling, at SO₂ koncentrationen kan beregnes ved at dividere koncentrationen af svovl i mg/kg brændsel (eller per m³) med det specifikke røggasvolumen omregnet til reference O₂ koncentrationen og beregnet med den første metode ud fra analyser af brændselsammensætningen.

Anvendes brændsler med meget konstant sammensætning, f.eks. gasolie, fuelolie eller naturgas, anses det for acceptabelt at beregne røggasmængden ud fra brændværdien eller brændselsfaktoren S, hvis der først udføres en validering og eventuelt korrektion af formlen eller S faktoren med beregninger ud fra analyser af brændselssammensætningen.

Der skal dog bemærkes, at der kan være områder i naturgasforsyningsområderne, hvor gassens sammensætning afviger fra den normale kvalitet af gas fra Nordsøen. Siden 2010 har der været en stigende import af naturgas fra Tyskland via Sønderjylland, og den vil stige i takt med, at udvindingen i Nordsøen falder. Naturgassen fra Tyskland har en lidt anden sammensætning end Nordsøgassen, bl.a. med lidt lavere brændværdi og densitet. Det forventes også, at opgraderet biogas i stigende grad og mængde vil blive udnyttet ved at blande det ind i naturgasnettet. Opgraderet biogas har også en lavere brændværdi, fordi det næsten udelukkende består af metan og mangler det lille indhold af højere kulbrinter, som naturgassen normalt har. Brændværdien i naturgassen forventes derfor i fremtiden at kunne variere mellem 38,48 og 44,78 MJ/Nm³. Se Energinet.dk's faktablad om fremtidige naturgaskvaliteter på: <https://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Danske%20dokumenter/Gas/Faktablad%20-%20gaskvalitet.pdf>.

Den anbefalede metode til beregning af røggasmængden kan også anvendes til andre brændsler, f.eks. kul, biomasse og bioolie, hvis der anvendes samme type brændsel, som konstant har nogenlunde samme sammensætning. Hvis der skiftes til en anden type med divergerende sammensætning, bør der udføres en fornyet validering.

3 Beregning af SO₂ koncentration i røggas

Koncentrationen af svovl i røggassen beregnes ud fra analyseværdien for svovl i brændslet og røggasmængden.

For faste og flydende brændsler anvendes den analyse af svovlindholdet, som blev anvendt til beregning af den støkiometriske røggasmængde i afsnit 2.1.1.

For gasformige brændsler angives koncentrationen af svovl normalt ikke i masse/masse, men i ppm, % eller mg/m³(n,t), som skal omregnes til masse/masse for at kunne benyttes i nedenstående formler.

Svovl (S) brænder til SO₂, og da S har molvægten 32,064 og SO₂ har molvægten 64,062, er vægten af det dannede SO₂ 1,998 (eller tilnærmelsesvis 2) gange vægten af S i brændslet.

Svovlindholdet i kg/kg omregnes til mg SO₂/kg ved at gange med 1.000.000 og med 2 svarende til at gange med 2.000.000 (eller 1.998.000).

Eksempel:

$$C_{SO_2-Fuel} \text{ [mg/kg]} = \gamma_s \text{ [kg/kg]} * 2 \text{ [molvægt: SO}_2\text{/S]} * 1.000.000 \text{ [mg/kg]}$$

Hvor:

C_{SO_2-Fuel} = Mængden af SO₂ der potentielt kan udledes til luften ved forbrænding af et kg brændsel i [mg/kg]

γ_s = svovlindholdet i brændslet i [kg/kg]

Som kan reduceres til:

$$C_{SO_2-Fuel} = \gamma_s * 2.000.000 \text{ [mg/kg]}$$

Brændsel med et svovlindhold på 0,001 kg/kg (0,1 %) vil potentielt kunne udlede 2.000 mg SO₂ til luften pr. kg brændsel.

SO₂ mængden i mg/kg divideres med den støkiometriske røggasmængde omregnet til 3 eller 6 % O₂, og resultatet er koncentrationen af SO₂ i mg/m³(n,t) ved 3 eller 6 % O₂.

Ved beregning af SO₂ koncentrationen til dokumentation for overholdelse af emissionsgrænseværdien bør røggasmængden beregnes ud fra den første metode på baggrund af analyser af brændslets sammensætning, for at få den mest præcise beregning.

Hvis der SO₂ koncentrationen beregnes ud fra en af de andre metoder, og den er langt under eller over emissionsgrænseværdien, f.eks. mere end 20 %, kan det også være en acceptabel dokumentation for, om den overholdes eller overskrides.

Hvis formålet med beregningen af SO₂ koncentrationen er at beregne den samlede SO₂ emission, f.eks. til grønt regnskab eller indberetning til myndigheder, så anbefales det at beregne den samlede mængde svovl i det anvendte brændsel, og omregne det til SO₂ frem for først at beregne koncentration og røggasvolumen. Her skal dog huskes at ved anvendelse af brændsler med aske, vil der normalt ske en vis indbinding af SO₂ i asken, så det er mindre end den teoretiske mængde, der emitteres.

3.1 Korrektion til reference O₂ %

Den beregnede støkiometriske røggasmængde ved 0 % O₂ skal korrigeres til den reference O₂ %, der gælder for det pågældende brændsel, som i store fyr bekendtgørelsen er fastsat til 6 % O₂ for faste brændsler, 3 % O₂ for flydende og gasformig brændsel, bortset for gasturbiner og motorer, hvor referencen er 15 % O₂.

Korrektion til reference O₂ % sker efter følgende formel:

$$V_{Ref} = V_{God} * (20,94 / (20,94 - O_{2-Ref}))^4$$

Korrektionsfaktoren for omregning til 3 % O₂ kan beregnes til 1,1672 og til 1,4016 for omregning til 6 % O₂.

⁴ I forskellige referencer angives forskellige konstanter for luftens koncentration af O₂. I Luftvejledningen angives 21 Vol. % og andre angiver en mere præcis værdi på 20,938 Vol. %. Nogle kilder opgiver 20,95 %, men det er mol % og her skal anvendes Vol. %. Her anbefales anvendt 20,938 Vol. %, som afrundes til 20,94, da det er værdien der angives på side 41 i CEN standarden DS/EN 12952-15:2003.

Omregningen kan derfor reduceres til:

$$V_{\text{Ref}}(3\% \text{ O}_2) = V_{\text{God}} * 1,1672$$

$$V_{\text{Ref}}(6\% \text{ O}_2) = V_{\text{God}} * 1,4116$$

$$V_{\text{Ref}}(15\% \text{ O}_2) = V_{\text{God}} * 3,5253$$

Den samlede formel for beregning af SO₂ koncentrationen i røggassen til henholdsvis 3 og 6 % O₂ bliver dermed:

Formel 11 Beregning af SO₂ koncentration ved reference O₂ %

$$C_{\text{SO}_2\text{-Røg}} [\text{mg/m}^3(\text{n,t}) \text{ ved } 3\% \text{ O}_2] = \gamma_s * 2.000.000 [\text{mg/kg}] / (V_{\text{God}} * 1,1672) \quad [\text{m}^3/\text{kg} (\text{n,t}, 3\% \text{ O}_2)]$$
$$C_{\text{SO}_2\text{-Røg}} [\text{mg/m}^3(\text{n,t}) \text{ ved } 6\% \text{ O}_2] = \gamma_s * 2.000.000 [\text{mg/kg}] / (V_{\text{God}} * 1,4116) \quad [\text{m}^3/\text{kg}(\text{n,t}, 6\% \text{ O}_2)]$$
$$C_{\text{SO}_2\text{-Røg}} [\text{mg/m}^3(\text{n,t}) \text{ ved } 15\% \text{ O}_2] = \gamma_s * 2.000.000 [\text{mg/kg}] / (V_{\text{God}} * 3,5253) \quad [\text{m}^3/\text{kg}(\text{n,t}, 15\% \text{ O}_2)]$$

Hvor:
 $C_{\text{SO}_2\text{-Røg}}$ = SO₂ koncentrationen i røggassen [mg/m³(n,t) ved 3 eller 6 % O₂]
 V_{God} = Støkiometriske røggasmængde ved normaltilstanden og 0 % O₂ pr. kg eller pr. m³ brændsel.

Ved beregning af SO₂ koncentrationen for gasformige brændsler, hvor sammensætningen er opgivet i forhold til m³ gas, og svovlindholdet typisk er opgivet i ppm, % eller mg/m³(n,t), skal Formel 11 tilpasses de aktuelle enheder.

4 Indbinding af SO₂ i aske

I faste brændsler med højt askeindhold kan der ske en betydelig indbinding af SO₂ i asken, men der findes ikke nogen anerkendte metoder til at beregne hvor meget der bindes.

Andelen af svovl, der indbindes i asken, afhænger af flere faktorer, hvor specielt indholdet af basiske komponenter (primært calcium) i asken er vigtig, fordi det villigt binder SO₂. Faste brændsler med stort indhold af calcium i asken kan derfor have en betydelig kapacitet for SO₂ reduktion. Der er eksempler på, at op mod 90 % af SO₂ fra forbrænding af tørv, er blevet bundet i asken pga. et højt indhold af calcium, men normalt vil indbindingen være betydeligt lavere.

Ved halmfyring er der på 4 anlæg målt en indbinding af SO₂ i asken på ca. 40 % svarende til, at ca. 60 % af svovlet blev emitteret med røggassen.

Beregning af SO₂ koncentrationen i røggassen fra brændsler med et væsentligt askeindhold vil derfor give den teoretisk maksimale koncentration, hvor den virkelige koncentration sandsynligvis vil være lavere pga. delvis indbinding af SO₂ i asken.

5 Litteraturliste:

- /1/ Store fyr bekendtgørelsen. Nr. 162 af 16. februar 2015. Bekendtgørelse om begrænsning af visse luftforurenende stoffer fra store fyringsanlæg.
- /2/ DS/EN 12952-15:2003. Vandrørskedler og hjælpeinstallationer – Del 15: Godkendelsesprøvninger. (Watertube boilers and auxiliary installations – Part 15: Acceptance test)
- /3/ VDI 4660 Blatt1. Conversion Factors for Specific Emissions from Energy-Conversion Systems.
- /4/ Kema. Validated methods for flue gas flow rate calculation with reference to EN 12952-15. January 31, 2012. VGB Research Project 338; Flue gas flow. https://www.vgb.org/vgbmultimedia/rp338_flue_gas.pdf
- /5/ Miljøstyrelsens Vejledning nr. 2, 2001. Luftvejledningen.
- /6/ Forbrændings teori og praksis. Bind 1. 2. udgave, 1989. Polyteknisk forlag.