

Estimering af måleusikkerhed for det samlede års-udslip af drivhusgasser.

Baggrund

Det blev pr. 1.1.2013 påkrævet at alle større forbrændingsanlæg skal kvantificere den målenøjagtighed, hvormed man bestemmer sit årlige udslip af CO₂.

Grænserne pålagt af de danske myndigheder har baggrund i det nye "KOMMISSIONENS FORORDNING (EU) Nr. 601/2012" hvor Bilag VIII foreskriver at hvis det årlige udslip af CO₂ og N₂O bestemmes ved måling skal det bestemmes med en måleusikkerhed (95% konfidensinterval) der ligger mellem 10% og 2,5% afhængig af anlæggets størrelse og beskaffenhed (styret via *Metodetrin*), jo større anlæg, jo højere præcision.

Den europæiske standardiseringsinstitution, CEN, har netop færdiggjort en standard, EN 19694:2016 der er offentliggjort d. 15-8-2016 som DS-EN19694, som er i 6 dele, men som mest behandler beregning af drivhusgasudslip fra nøglefaktorer på forbrugsmateriale eller produktionsværdi. Del 1 (DS-EN19694-1) indeholder imidlertid en forskrift for måling af drivhusgasser, samt bestemmelse af usikkerheden.

Disse retningslinjer følger i det store og hele den danske indstilling, tidligere redegjort for på denne hjemmeside.

Bestemmelse af måleusikkerheden i EN 19694-1 Annex E (normative).

Følgende er en kort beskrivelse af den metode, som EN 19694-1 angiver til bestemmelse af måleusikkerheden.

Da vi arbejder med estimat for måleusikkerhed for et års-udslip, der ofte er beregnet på over 8.000 1-times målinger eller over 17.000 ½-times målinger, hvis anlægget er i drift hele året (der er i gennemsnit 8.766 stk. timer og 17.532 stk. ½-timer i et fuldt kalenderår¹), skal bestemmelse af estimat for måleusikkerhed på årsudslip iflg. EN 19694-1 foregå som følger:

1. Ved bestemmelse koncentrationen af f.eks. CO₂ og skorstens-flow anvendes en måling, der er kalibreret med en reference-målemetode, SRM, i.h.t. EN14181² og EN16911, hvor den valgte regressionsmetode antager at al tilfældig måle-usikkerhed ligger på den kontrollerende målemetode³, SRM, og ingen på anlægsmåleren, AMS. Vi koncentrerer os derfor først om de

¹ Forordningen taler om times-værdier, men da de eneste validerede (QAL2-kalibrerede) værdier vi har i de fleste SRO-anlæg er ½-times værdier, burde beregningen nødvendigvis baseres på disse. Hvis validerede (kalibrerede) 1-times værdier findes, skal de anvendes.

² Det er p.t. ingen EN-standard for SRM for CO₂, den er under udarbejdelse og kommer sikkert snart til høring.

³ Se forskellene på valg af regressionsmetode i f.eks. "Regressionsanalyse" af Kronborg & Skovgaard, foreningen af danske lægestuderendes forlag, side 52; det er den enkleste fremstilling jeg har fundet.

tilfældige afvigelser (*random errors*), der ligger i AMS-målingen.

- a. Hvis anlægget er i drift hele året bestemmes årsudslippet således ved 17.532 gentagne ½-times målinger (hvis anlægget er ude af drift en del af året, må det samlede antal timer eller antal ½-timer bestemmes), hvor hvert enkelt måleresultat (½-times værdi) har en måleusikkerhed, der er bestemt ved sidste QAL2.
- b. Vi kan derfor bestemme 95% konfidensinterval for anlægsmåleren fra data fra sidste QAL2-måling og dividere det med $\sqrt{17532} = 132$ som estimat for målepræcisionen for årsudslippet for hver parameter, der er QAL2 reguleret (CO₂, N₂O, flow); hvis anlægget er ude af drift en del af året, må det korrekte antal ½-times målinger bestemmes og derved den rigtige divisor. Hvis der anvendes 1-times værdier, skal der divideres med $\sqrt{8766} = 93,6$.
- c. Hvis årsudslippet således bestemmes som summen af produktet af ½-times værdierne af CO₂-koncentration (mg/m³ i driftstilstand) og røggas volumeflow (m³/s i driftstilstand), vil usikkerhedsestimateret for hver ½-times værdi være kvadratroden af kvadratsummen af de 2 usikkerhedsbidrag:

$$u_i = \sqrt{u_{ci}^2 + u_{vi}^2}$$

hvor: u_i er det samlede relative usikkerhedsbidrag på ½-times målingen.
 u_{ci} er den relative usikkerhed på koncentrationen.
 u_{vi} er den relative usikkerhed på volumeflowet.

- d. u_{ci} og u_{vi} er resultaterne fra sidste QAL2-måling, idet de kan bestemmes fra spredningen og antal målinger (her i almindelighed kaldet u_{AMS}):

$$u_{AMS} = u_{QAL2} = t_{95\%, n-1} \cdot s_D$$

hvor: u_{AMS} er den relative usikkerhed af den pågældende AMS bestemt under sidste QAL2-måling

$t_{95\%, n-1}$ er studentfaktoren som anført i EN14181.

s_D er spredningen på målingerne, som anført i EN14181.

- e. Heraf ses det også, at hvis man anvender normerede målinger, omregnet til en referencestandard med temperaturen, tryk, og muligvis ilt- og vand-indhold, så må usikkerhedsbidragene fra disse målere medregnes, og deres usikkerhedsbidrag bestemmes ved kalibrering:

$$u_i = \sqrt{u_{ci}^2 + u_{vi}^2 + u_{tryk}^2 + u_{temperatur}^2 + u_{ilt}^2 + u_{vand}^2 + \dots}$$

således at alle usikkerhedsbidrag til ½-times- eller times-målingerne tages med.

2. Hertil kommer nu de systematiske usikkerhedsbidrag fra referencemetoden, og da den er uændret på alle målinger, går den direkte igennem til årsresultatet; den formindskes altså ikke med antallet

af målinger⁴.

Der er principielt 3 kilder til systematiske fejl fra SRM-målingen, nemlig

- a. **Referencemetodens interne usikkerhed.** CO₂ målingen er som SRM typisk instrumental (ikke våd-kemisk) og denne måler har sin egen usikkerhed, bestemt ved typetest i.h.t. EN15267-3, eller anden sporbar angivelse fra det kalibrerende institut.

SRM-metodens samlede usikkerhedsbidrag kan derfor beskrives som:

$$u_{SRM} = \sqrt{u_{test\ gas}^2 + s_{D-SRM}^2}$$

hvor: u_{SRM} er referencemetodens samlede usikkerhedsbidrag.
 $u_{test\ gas}$ er testgassens relative tolerance.
 s_{D-SRM} er referencemetoden "interne" usikkerhed, fra dens laboratorie-kalibrering.

Ofte er testgassens usikkerhed ganske ringe, og kan derfor ses bort fra, men det bør kontrolleres.

- b. **Usikkerheden fra kalibrering af flowmonitoren**, som bestemt efter EN 16911-1.
Hvis tidsbaseret tracer-kalibrering anvendes, opstår usikkerheden kun i afstandsmålingen og tidstagningen (systemets kvarts-ur).
- c. **Opmåling af kanalens tværsnit (areal)** hvor flowmåleren sidder.
Det har i praksis vist sig at meget få kanaler har præcist de mål, er står anført på tegningen, idet fejlupmåling i "enkelt-%" området ikke er usædvanlig, men selv en fejl på 5% betyder en del på den årlige CO₂-afgift.
EN16911 giver en række anvisninger til at bestemme det præcise areal, og anfører en maksimal usikkerhed på 2%, men hvis den samlede årstolerance er 2,5%, rækker det ikke at allokere de 2% alene til areal-bestemmelsen.
 - i. Tilstræbt cirkulære kanaler anbefales det derfor at opmåle de 2 diametre, d_1 og d_2 og hvis de ikke er ens indenfor under 1%, at beregne arealet ud fra formelen for en ellipse:
$$A = \pi \cdot \frac{1}{4} \cdot (d_1 \cdot d_2)$$
 - ii. Hvis kanalen er en tilstræbt kvadratisk kanal anbefales det at opmåle alle 4 sider, samt begge diagonaler, og hvis diagonalerne ikke er ens indenfor 1%, kan arealet bestemmes som en rhombe:
$$A = \frac{1}{2} \cdot d_1 \cdot d_2$$
, hvor d_1 og d_2 er de to diagonaler.
 - iii. Hvis kanalen er en tilstræbt rektangulær kanal er lidt mere kompliceret, idet vinklen mellem de to diagonaler, θ , kommer ind i beregningen, idet arealet beregnes som:
$$A = \frac{1}{2} d_1 \cdot d_2 \cdot \sin\theta$$

Det kan imidlertid være kompliceret at måle vinklen θ med rimelig præcision, derfor kan vedlagte diagram anvendes, idet man skal beregne følgende:
Arealet, som det ville være, hvis det var en sand rektangel, d.v.s. $\theta=90^\circ$:

⁴ Hvis f.x. CO₂-monitoren kalibreres med en fejl på 0,5% vil den altid virke i samme retning, og vil derfor påvirke årsresultatet med 0,5%

$A = \frac{1}{2} \cdot d_1 \cdot d_2$ hvor d_1 og d_2 er de to diagonaler.

Herefter beregnes forholdet "r" = d_1/d_2 og forholdet "b" = $4B^2/(d_1 \cdot d_2)$ hvor "B" hvor B er den mindste af de 2 sider i kanalen.

Hvis vi har udmålt en kanal til at have $r=0,80$ og $b=1,6$ skal kanalarealet, beregnet som "sand rektangel" reduceres med ca. 2,6%.

Det kan lyde af lidt, men på en CO₂-afgift i millionklassen bliver det til mange penge.

- d. Hvis dilution-tracer-kalibrering anvendes, bortfalder usikkerheden på arealbestemmelsen, idet volumenflow bestemmes direkte i m³/s i driftstilstand (i alle andre tilfælde, også ved hastigheds-tracer, skal arealet kontrolleres).
3. Disse usikkerhedsbidrag bæres direkte igennem til årsudslippet, fordi de er konstante og ens i "retning", derfor kan de ikke divideres med antallet af målinger.
 4. Det samlede usikkerhedsbidrag med tilfældige og systematiske fejl bliver således bestemt som følger for hver enkelt målt drivhusgas:

$$u_{annual} = \sqrt{\sum_1^{n_{AMS}} \frac{u_{AMS}^2}{n_{annual}} + \sum_1^{n_{sys}} u_{sys}^2}$$

summeret for hver AMS, der anvendes til bestemmelsen, og for hver systematiske fejlkilde, der er involveret i processen.

5. Det samlede usikkerhedsbidrag kan lidt mere detaljeret beskrives som følger for hver enkelt målt drivhusgas (GHG: Green House Gas):

$$u_{tot,GHG} = \sqrt{\frac{u_{AMS,GHG}^2 + u_{AMS,flow}^2}{n_{annual}} + u_{SRM,GHG}^2 + u_{SRM,flow}^2 + u_{Area}^2 + \frac{u_{fossil}^2}{n_{fossil}}}$$

- hvor:
- $u_{tot,GHG}$ er det samlede relative usikkerhed på årsudslippet for den valgte drivhusgas.
 - $u_{AMS,GHG}$ er det samlede relative usikkerhedsbidrag fra drivhusgasmonitoren.
 - $u_{AMS,flow}$ er det samlede relative usikkerhedsbidrag fra flowmonitoren.
 - $u_{SRM,GHG}$ er det samlede relative usikkerhedsbidrag fra gasmonitorens standard reference metode.
 - $u_{SRM,flow}$ er det samlede relative usikkerhedsbidrag fra flowmonitorens standard reference metode.
 - u_{AREA} er den samlede relative usikkerhed på bestemmelse af skorstensarealet.
 - u_{fossil} er den relative usikkerhed på bestemmelse af den fossile andel af CO₂-udslip, hvis denne bestemmes.
 - n_{fossil} er det antal bestemmelser af den fossile andel af CO₂-udslip, der er gennemført på 1 år.

Hertil kommer usikkerhedsbidrag fra normeringsværdier (tryk, temperatur etc.) hvis målinger i driftstilstand ikke anvendes.

Forenkling i EN19694-1 Annex E, afsnit E.2.4.

I dette afsnit fremføres, at hvis anlægget er i drift hele året, eller praktisk taget hele året, så bidrager den tilfældige fejl fra de enkelte målinger, der jo divideres med ca. 100, meget lidt, og de kan derfor udelades i beregningen. Standarden lægger dog op til at en beregning skal vise, at de er ubetydelige.

Dublerede målere

Hvis anlægget er udstyret med dublerede målere (se separat notat herom under fanbladet "Økonomi ved dublerede anlægsmålere") er det årlige udslip af drivhusgasser dobbeltbestemt, og derfor kan man, ifølge loven om fejls udbredelse, dividere den samlede usikkerhed med $\sqrt{2} = 1,4142$.



Martin Rørbye Angelo

Korrektion fra sand rektangel

