



Evaluering av måledata ved måling av fluidstrøm

Vedlegg 3 til veileder til måleforskriften

Innholdsfortegnelse

Innledning	1
Målefeil og usikkerhet	1
Middelverdi til målefeil	1
Tilfeldig usikkerhet til middelverdi til målefeil	1
Kombinert usikkerhet til middelverdi til målefeil	2
Evaluering av målefeil	2
Eksempel: Evaluering av avvik i avlesning fra to målere i serie	2
Kalibreringsfaktor (K-faktor) og usikkerhet	3
Middelverdi til K-faktor	3
Tilfeldig usikkerhet til middelverdi til K-faktor	4
Kombinert usikkerhet til middelverdi til K-faktor	4
Linearitet over strømningsrateområde	4

Innledning

Dette vedlegget omhandler prinsipper for å evaluere måledata ved måling av fluidstrøm. Hensikten med vedlegget er å gi en nærmere forklaring av krav som stilles ved kalibrering og verifisering av strømningsmålere. Vedlegget er i hovedsak basert på ISO 5168 (jf. vedlegg 2).

Målefeil og usikkerhet

Middelverdi til målefeil

Middelverdi til målefeil bestemmes ved hver strømningsrate som et aritmetisk gjennomsnitt bestemt ved ligningen:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (1)$$

hvor

E_i er i -te relative målefeil,

\bar{E} er midlere relativ målefeil og

n er antall målinger av samme størrelse ved én strømningsrate.

Den i -te relative målefeilen beregnes ved ligningen:

$$E_i = \frac{Q_{ind} - Q_{ref}}{Q_{ref}} \quad (2)$$

der Q_{ind} er strømningsrate målt med måler under test og Q_{ref} er strømningsrate målt med målestandard, korrigert for eventuelle termodynamiske forskjeller i fluidet ved måler under test og ved målestandard.

Tilfeldig usikkerhet til middelverdi til målefeil

Tilfeldig usikkerhet til middelverdi til målefeil bestemmes ved hver strømningsrate som en type A usikkerhet til en serie av n målinger bestemt ved ligningen:

$$U_{AM-E} = \frac{U_{AS-E}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

hvor U_{AS-E} er tilfeldig usikkerhet i enkeltmålinger (reperterbarhet til en måler) som bestemmes ved hver strømningsrate og beregnes ved ligningen:

$$U_{AS-E} = t_{95,n-1} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n-1}} = t_{95,n-1} \cdot s \quad (4)$$

og hvor s er eksperimentelt standardavvik (for en serie av n målinger av samme størrelse), $t_{95,n-1}$ er student t-fordelingsfaktor for et konfidensnivå på 95 % og $n - 1$ frihetsgrader.

Det følger av f.eks. API MPMS 13.3 at eksperimentelt standardavvik til en serie av n målinger kan approksimeres ved ligningen:

$$s \cong \frac{w_{(n)}}{d_{(n)}} \quad (5)$$

hvor $w_{(n)}$ er verdiområdet, forskjellen mellom maksimums- og minimumsverdiene for et sett med måledata, og $d_{(n)}$ er en omregningsfaktor for estimering av standardavvik for n målinger. Verdier for

$d_{(n)}$ kan f.eks. finnes i tabell E.1 i API MPMS 13.3, de kan også beregnes ut fra forventningsverdiene til forholdet $w_{(n)}/s$ for normalfordelte tilfeldige individuelle målinger. Ved å kombinere ligningene over kan en approksimasjon av usikkerheten til middelveien av en serie av n målinger uttrykkes ved ligningen:

$$U_{AM-E} \cong \frac{t_{95,n-1} \cdot w_{(n)}}{\sqrt{n} \cdot d_{(n)}} \quad (6)$$

Eksempel: $w_{(5)} = 0,05 \% \rightarrow U_{AM-E} = 0,027\%$.

Kombinert usikkerhet til middelvei til målefeil

Kombinert usikkerhet til middelvei til målefeil bestemmes ved hver strømningsrate ved ligningen:

$$U_{CM-E} = \sqrt{U_{AM-E}^2 + U_{CMC}^2} \quad (7)$$

hvor U_{CMC} er kombinert usikkerhet til kalibreringsoppsettet (CMC er forkortelse for «Calibration and Measurement Capability»), inkludert usikkerheten til målestandarden. Siden U_{AM-E} kan reduseres ved å øke antall målinger i serien, vil ofte U_{CM-E} kunne bli bare marginalt større enn U_{CMC} .

Evaluering av målefeil

Det følger av f.eks. OIML R137:2012 og ISO 17089:2019 at en målefeil med rimelighet kan anses å være innenfor en angitt feilgrense (MPE) dersom middelveien til målefeilen er innenfor akseptgrensene i tabell 1.

Tabell 1. Akseptgrenser for målefeil

Middelvei til målefeil (avvik i avlesning)	Kombinert usikkerhet til middelvei	Akseptgrense
\bar{E}	$U_{CM-E} < \frac{1}{3} \cdot MPE$	MPE
	$U_{CM-E} \in [1/3 \cdot MPE, MPE]$	$\frac{4}{3} \cdot MPE - U_{CM-E}$
	$U_{CM-E} > MPE$	Ikke definert

Dersom $U_{CM-E} > MPE$ er den kombinerte usikkerheten til middelveien for høy til at oppfyllelse av krav til MPE kan verifiseres.

Metoden og prinsippet beskrevet over er utdypet i JCGM 106:2012 og OIML G-19:2017. Disse dokumentene kan komme til nytte ved utvikling av metoder for evaluering av målefeil og for etablering av akseptgrenser ved kalibrering og verifisering (se f.eks. figur 7 i JCGM 106:2012).

Eksempel: Evaluering av avvik i avlesning fra to målere i serie

Det legges i eksempelet nedenfor til grunn at metodikken beskrevet over kan benyttes ved dobbel instrumentering der verifikasjon av overholdelse av krav til instrumentell måleusikkerhet foregår ved måling av avvik i avlesning fra to målere. Her vil typisk måleren som fungerer som

hovedmåler (måler A) være den som skal verifiseres og den andre måleren (måler B) vil være referanse. Ved en gitt strømningsrate er den i -te relative målefeilen gitt ved ligningen:

$$E_i = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A} \quad (8)$$

der Q_A er strømningsrate målt med måler A og Q_B er strømningsrate målt med måler B, korrigert for eventuelle termodynamiske forskjeller i fluidet ved måler A og B. Det følger da at middelverdien til målefeilen er bestemt ved ligningen:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (9)$$

Den kombinerte usikkerheten til middelverdien til målefeilen (relativ) kan bestemmes ved ligningen:

$$U_{CM-E} = \sqrt{U_{AM-E}^2 + U_B^2} \quad (10)$$

hvor U_B er instrumentell måleusikkerhet til måler B (verdi gitt i usikkerhetsbudsjett eller på sertifikat), eventuelt fratrukket usikkerhetsbidrag som er fullt korrelert mellom de to målerne. Det kan da antas at måler A oppfyller krav til usikkerhetsgrense for instrumentelle måleusikkerhet, U_g , dersom middelverdien til målefeilen er innenfor akseptgrensene i tabell 2.

Tabell 2. Akseptgrenser for avvik i avlesning fra to målere

Middelverdi til målefeil (avvik i avlesning)	Kombinert usikkerhet til middelverdi	Akseptgrense
\bar{E}	$U_{CM-E} < \frac{1}{3} \cdot U_g$	U_g
	$U_{CM-E} \in [1/3 \cdot U_g, U_g]$	$\frac{4}{3} \cdot U_g - U_{CM-E}$
	$U_{CM-E} > U_g$	Ikke definert

For eksempel vil en usikkerhetsgrense for instrumentell måleusikkerhet på $U_g = 0,20\%$ og en kombinert usikkerhet i middelverdi til målefeil på $U_{CM-E} = 0,15\%$ gi en akseptgrense på $0,12\%$ for middelverdien til målefeilen.

Kalibreringsfaktor (K -faktor) og usikkerhet

Middelverdi til K -faktor

Middelverdi til K -faktor bestemmes ved hver strømningsrate som et aritmetisk gjennomsnitt bestemt ved ligningen:

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \quad (11)$$

hvor

K_i er i -te absolutte K -faktor,
 \bar{K} er midlere absolutte K -faktor og

n er antall målinger av samme størrelse ved én strømningsrate.

Tilfeldig usikkerhet til middelerdi til K -faktor

Tilfeldig usikkerhet til middelerdi til K -faktor bestemmes ved hver strømningsrate som en type A usikkerhet til en serie av n målinger bestemt ved ligningen:

$$U_{AM-K} = \frac{U_{AS-K}}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

hvor U_{AS-K} er tilfeldig usikkerhet i enkeltmålinger (reperbarhet til en måler) bestemt ved ligningen:

$$U_{AS-K} = \frac{t_{95,n-1}}{\bar{K}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{n-1}} = t_{95,n-1} \cdot \frac{s}{\bar{K}} \quad (13)$$

En approksimasjon for U_{AS-K} kan finnes ved substitusjonen $s \cong w_{(n)}/d_{(n)}$ (jf. Ligning (5)).

Eksempel: $w_{(5)} = 0,05\% \rightarrow U_{AM-K} = 0,027\%$.

Kombinert usikkerhet til middelerdi til K -faktor

Kombinert usikkerhet til middelerdi til K -faktor bestemmes ved hver strømningsrate ved ligningen:

$$U_{CM-K} = \sqrt{U_{AM-K}^2 + U_{CMC}^2} \quad (14)$$

Linearitet over strømningsrateområde

Linearitet, uttrykt ved målefeil (relativ), er bestemt som:

$$\bar{E}_{MAKS} - \bar{E}_{MIN}$$

hvor \bar{E}_{MAKS} og \bar{E}_{MIN} er middelerdien til henholdsvis største og minste målefeil over strømningsrateområde.

Linearitet, uttrykt ved K -faktor (absolutt), er bestemt som:

$$\frac{\bar{K}_{MAKS} - \bar{K}_{MIN}}{\bar{K}}$$

hvor

$$\bar{K} = \frac{\sum_{j=1}^m \bar{K}_j}{m} \quad (15)$$

og m er antall målinger av samme størrelse over strømningsrateområdet. Kalibreringsfaktorene \bar{K}_{MAKS} og \bar{K}_{MIN} er middelerdien til henholdsvis største og minste K -faktor over strømningsrateområde.