

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΡΕΥΜΑ ΑΕΡΑ Η ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Νικόλαος Ορφανουδάκης¹ και Κωνσταντίνος Κράλλης²

¹ Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολογίας, ΤΕΙ Χαλκίδας, Ψαχνά Ευβοίας

² Ήρων Σύμβουλοι Μηχανικοί, Χαριλάου Τρικούπη 107, 11473 Αθήνα

e-mail: heron@tee.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σταθμική μέθοδος προσδιορισμού σωματιδίων σε ρεύμα αέρα ή καυσαερίων με ισοκινητική δειγματοληψία αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην προσπάθεια εντοπισμού και καταγραφής πηγών ρύπανσης στη βιομηχανία, βαθμονόμησης οπτικών οργάνων μέτρησης και απόδειξης της συμμόρφωσης των βιομηχανιών με τους περιβαλλοντικούς όρους και τις απαιτήσεις της νομοθεσίας (Π.Δ. 1180/1981). Η μέθοδος συνίσταται στη ζύγιση ποσότητας σωματιδίων που παρακρατούνται σε ηθμό κατά την διέλευση μετρουμένου όγκου αερίων. Η μέθοδος έχει τυποποιηθεί στο πρότυπο ISO 9096 και αναλύεται στη σειρά κανονισμών VDI 2066.

Τα αποτελέσματα της μέτρησης επηρεάζονται από αρκετές επιμέρους μετρήσεις και ενδείξεις, και συγκεκριμένα από μια μέτρηση όγκου, δυο ζυγίσεις ακριβείας, τρεις μετρήσεις πιέσεων και δυο μετρήσεις θερμοκρασιών, για το λόγο αυτό ο προσδιορισμός της επιτυγχανόμενης ακρίβειας παρουσιάζει ενδιαφέρον. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η αναγνώριση των πηγών τυχαίων σφαλμάτων λόγω γεωμετρικών παραγόντων (ευθυγράμμιση λήπτη με τη ροή κλπ).

Η παρούσα εισήγηση περιγράφει συνοπτικά τη μεθοδολογία και τις εφαρμογές της, αναλύει τις πηγές σφαλμάτων στις επιμέρους μετρήσεις και ποσοτικοποιεί τις επιπτώσεις τους στο τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον καταγράφει τις μη μετρήσιμες πηγές τυχαίων σφαλμάτων και τους τρόπους αποφυγής τους.

Λέξεις-Κλειδιά: σταθμικός προσδιορισμός σκόνης, ισοκινητική δειγματοληψία

1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η σταθμική μέθοδος προσδιορισμού σωματιδίων (σκόνης) σε ρεύμα αέρα ή αερίων αποτελεί τη μέθοδο αναφοράς με την οποία βαθμονομούνται τα οπτικά όργανα συνεχούς καταγραφής (οπασίμετρα). Η μέθοδος εφαρμόζεται συστηματικά σε εγκαταστάσεις καύσης στερεών καυσίμων (ατμοπαραγωγούς ηλεκτροπαραγωγής), στις τσιμεντοβιομηχανίες και σε συναφείς μεγάλες μονάδες. Σε σποραδική ή δειγματοληπτική βάση εφαρμόζεται σε κάθε είδους εξαγωγή αέρα και καυσαερίων και σε διατάξεις αντιρρύπανσης όπως σακκόφιλτρα, ηλεκτρόφιλτρα και πολυκυκλώνες.

Η μέθοδος συνίσταται την αναρρόφηση μετρούμενης ποσότητας καυσαερίων υπό ισοκινητικές συνθήκες, συγκράτηση των σωματιδίων σε ηθμό και ζύγιση αυτών. Το αποτέλεσμα ανάγεται σε κανονικές συνθήκες ή σε συνθήκες καπνοδόχου, επομένως πρέπει να μετράται η θερμοκρασία και η πίεση στο σημείο της ογκομέτρησης.

Η μέθοδος είναι πρότυπη σύμφωνα με την ακόλουθη τυποποίηση:

- ISO 9096:2005
- EN 13284-1:2001
- VDI 2066-1 έως -7

Τα σφάλματα της μεθόδου οφείλονται στους ακόλουθους παράγοντες:

- Ισοκινητικό σφάλμα (η ταχύτητα δειγματοληψίας δεν είναι η ίδια με την ταχύτητα των αερίων) – εξουδετερώνεται σε όλες τις μοντέρνες συσκευές μέσω κατάλληλου συστήματος παρακολούθησης της ισοκινητικής κατάστασης.
- Σφάλμα λόγω κακού προσανατολισμού δειγματολήπτη – χονδροειδές σφάλμα που οφείλεται σε αδιαφορία ή κακή εκπαίδευση. Το σφάλμα που οφείλεται σε μικρές αποκλίσεις εξουδετερώνεται μέσω κατάλληλου σχεδιασμού του ακροφυσίου.
- Σφάλματα που οφείλονται στις επιμέρους μετρήσεις (μάζας, όγκου, θερμοκρασίας, πίεσης). Η ζύγιση γίνεται με αναλυτικό ζυγό, επομένως η ακρίβεια είναι πολύ μεγάλη, αλλά η ακρίβεια περιορίζεται λόγω σφαλμάτων χειρισμού του δείγματος. Ο προσδιορισμός όγκου γίνεται με μετρητή όγκου αερίων θετικής εκτοπίσεως, ο οποίος έχει επίσης μεγάλη ακρίβεια 0.002 m^3 .

Στο παρόν άρθρο εξετάζεται η επίδραση των σφαλμάτων της τρίτης κατηγορίας.

2. ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η προσδιοριζόμενη τιμή δίνεται από τον τύπο:

$$y_N = \frac{m}{V_0} \cdot \frac{P_N}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_N} \quad \text{mg} / \text{Nm}^3$$

- y_N : συγκέντρωση σκόνης (mg/Nm^3)
- m : ζυγισθείσα μάζα σωματιδίων (mg)
- V_0 : δειγματισθείς όγκος καυσαερίων (m^3)
- T_0 : θερμοκρασία ογκομέτρησης (K), τυπικά $T_N+25 \text{ K}$
- P_0 : απόλυτη πίεση ογκομέτρησης (Pa), τυπικά $P_N-500 \text{ Pa}$
- T_N : 273 K
- P_N : 101300 Pa

Σε εγκαταστάσεις σύμφωνες με τις σύγχρονες προδιαγραφές η αναμενόμενη συγκέντρωση είναι $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, συνήθως λαμβάνεται όγκος 6 m^3 και επομένως μάζα σωματιδίων της τάξης των 300 mg .

$$\frac{\partial y_N}{\partial m} = \frac{P_N T_0}{V_0 P_0 T_N} \approx 0.183 \text{ m}^{-3}$$

$$\frac{\partial y_N}{\partial V} = -\frac{m P_N T_0}{V_0^2 P_0 T_N} \approx -9.142 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-6}$$

$$\frac{\partial y_N}{\partial P_0} = -\frac{m T_0 P_N}{V_0 P_0^2 T_N} \approx -0.000541 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

$$\frac{\partial y_N}{\partial T_0} = \frac{m P_N}{V_0 P_0 T_N} \approx 0.184 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

3. ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ

Οι αβεβαιότητες της μεθόδου είναι τύπου B και με βάση την εμπειρία από μακροχρόνια δραστηριότητά μας έχουν ως εξής:

ΖΥΓΙΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Οι αναλυτικοί ζυγοί έχουν εξαιρετικά μικρή αβεβαιότητα της τάξης του 0.2 mg [Θωμαΐδης 2001], επομένως όλη η αβεβαιότητα προέρχεται από σφάλματα χειρισμού όσον αφορά την διασφάλιση της πλήρους συλλογής του δείγματος, την ορθή ξήρανση κλπ. Δεχόμαστε τυπική Gaussian διασπορά με αβεβαιότητα 10 mg σε διάστημα εμπιστοσύνης 95%.

ΟΓΚΟΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Η μέτρηση όγκου με τους συνήθεις μετρητές αερίων έχει τετραγωνική αβεβαιότητα της τάξης των 2 lit (0.002 m³), λόγω του συστήματος ένδειξης.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η μέτρηση πίεσης με αναλογικό μανόμετρο σε συνθήκες πεδίου έχει αβεβαιότητα 500 Pa. Δεχόμαστε επίσης τυπική Gaussian διασπορά με αβεβαιότητα 10 mg σε διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Η μέτρηση θερμοκρασίας με ψηφιακό θερμομέτρο σε συνθήκες πεδίου έχει αβεβαιότητα 0.5 K, την οποία δεχόμαστε ως τριγωνική.

$$u(m) = \frac{10 \text{ mg}}{2} = 5 \text{ mg}$$

$$u(V) = \frac{0.002 \text{ m}^3}{\sqrt{3}} = 0.0012 \text{ m}^3$$

$$u(P) = \frac{500 \text{ Pa}}{2} = 250 \text{ Pa}$$

$$u(T) = \frac{0.5 \text{ K}}{\sqrt{6}} = 0.204 \text{ K}$$

4. ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ

Η συνδυασμένη αβεβαιότητα της μέτρησης δίνεται από την μέση τετραγωνική τιμή (RMS) των επιμέρους αβεβαιοτήτων, δεδομένου ότι αυτές είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες.

$$u(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial m}\right)^2 u^2(m) + \left(\frac{\partial y}{\partial V}\right)^2 u^2(V) + \left(\frac{\partial y}{\partial T}\right)^2 u^2(T) + \left(\frac{\partial y}{\partial P}\right)^2 u^2(P)}$$

$$u(y) = \sqrt{0.183^2 \cdot 5^2 + 9.142^2 \cdot 0.0012^2 + (544 \times 10^{-6})^2 \cdot 250^2 + 0.184^2 \cdot 0.2041^2}$$

$$u(y) = \sqrt{0.83685 + 0.000111 + 0.018506 + 0.001412}$$

$$u(y) \approx 0.924 \text{ mg/m}^3$$

5. ΔΙΕΥΡΥΜΕΝΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ

Για συντελεστή κάλυψης 2 (διάστημα εμπιστοσύνης 95%) η διευρυμένη αβεβαιότητα είναι:

$$U(y) = 2 \cdot u(y) = 1.85 \text{ mg/m}^3$$

Η προσδιοριζόμενη τιμή που ανακοινώνεται στον πελάτη είναι:

$$Y = y \pm 1.9 \text{ mg/Nm}^{-3}$$

(με στρογγύλευση στο πλησιέστερο ακέραιο mg).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ακρίβεια της μεθόδου της τάξης του 1.9 mg/m^3 είναι επαρκής για το σκοπό που προορίζεται (περιβαλλοντικές μετρήσεις στη βιομηχανία).

Η μεγαλύτερη συνεισφορά στην αβεβαιότητα είναι τα σφάλματα χειρισμού τα οποία επηρεάζουν την ακρίβεια προσδιορισμού της μάζας των σωματιδίων. Βελτίωση της εκπαίδευσης και της υπευθυνότητας του προσωπικού μπορεί να βελτιώσει ουσιαστικά την ακρίβεια της μέτρησης.

Μείωση της αβεβαιότητας προσδιορισμού μάζας κατά 50% έχει καθοριστική σημασία – στην περίπτωση αυτή η συνδυασμένη αβεβαιότητα είναι μόλις 0.48 mg/m^3 και η διευρυμένη αβεβαιότητα καλύτερη από 1.0 mg/m^3 .

Η επόμενη σημαντική πηγή αβεβαιοτήτων είναι η ακρίβεια ανάγνωσης του μανομέτρου, η οποία μπορεί να περιορισθεί με χρήση κατάλληλων ψηφιακών οργάνων.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] “ISO 9096:2003 Stationary source emissions – Manual determination of mass concentration of particulate matter”, 2003 .

[2] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): “VDI 2066 Messen von Partikeln”, Blat. 1 – 7, Düsseldorf, 1993.

Δρ. Ν. Σ. Θωμαΐδης: “Εκτίμηση αβεβαιότητας στις χημικές μετρήσεις”, Ημερίδα Από το EN 45001 στο ISO/IEC 17025, HellasLab, Αθήνα, 2001.

Δρ. Ε. Μαθιουλάκης: “Η αβεβαιότητα στα αποτελέσματα των δοκιμών”, Ημερίδα Από το EN 45001 στο ISO/IEC 17025, HellasLab, Αθήνα, 2001.