ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Ανδρέας Ανδρουτσόπουλος[1], Λενάντα Αναστασοπούλου[1] και Σταμάτιος Μπαμπαλής[2]
[1]Εργαστήριο Ενεργειακών Μετρήσεων, Διεύθυνση Ενεργειακής Αποδοτικότητας, ΚΑΠΕ, 19ο χλμ. Λεωφ. Μαραθώνος, 190 09 Πικέρμι, Αττική
[2]Εργαστήριο Ηλιακών & Άλλων Ενεργειακών Συστημάτων, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, Πατριάρχου Γρηγορίου Ε' & Νεαπόλεως 27, 15341 Αγία Παρασκευή
e-mail: aandr@cres.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την παρουσίαση των αποτελεσμάτων συγκριτικών δοκιμών μεταξύ δύο διατάξεων μέτρησης θερμικών ιδιοτήτων δομικών προϊόντων (διάταξη Προστατευμένης Θερμής Πλάκας), οι οποίες έχουν κατασκευαστικές διαφορές και διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Οι συγκριτικές δοκιμές που παρουσιάζονται, πραγματοποιήθηκαν μεταξύ δύο εργαστηρίων τα οποία είναι διαπιστευμένα από το Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης για τη συγκεκριμένη μέτρηση. Στο πλαίσιο της Διαπίστευσης ο έλεγχος της ποιότητας των δοκιμών αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα διασφάλισης της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Για τη διεξαγωγή των συγκριτικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν θερμομονωτικά προϊόντα της αγοράς, από εξηλασμένη πολυστερίνη και διογκωμένη πολυστερίνη τα οποία ελέγχθηκαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες δοκιμής.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι δυο διατάξεις προσφέρουν αξιόπιστα και συγκρίσιμα μεταξύ τους αποτελέσματα. Οι διαφορές κυμάνθηκαν σε επιτρεπτά όρια και δεν ξεπέρασαν το 3.5%. Η καλύτερη προσέγγιση μέτρησης βρέθηκε να είναι στους 50 ºC ενώ συνολικά το εύρος μέτρησης της εξηλασμένης πολυστερίνης παρείχε καλύτερη σύγκλιση και ως εκ τούτου μικρότερη διαφορά αποτελεσμάτων.

Abstract

The scope of the present work is to recapitulate and present the comparative test results obtained when the thermal conductivity of insulating materials was determined using two measuring devices (Guarded Hot Plate devices), having different structural characteristics and specifications. The comparative tests were carried out between two laboratories accredited, by the National Accreditation System, for the measurement of the thermal conductivity characteristics of insulating materials. Key factor for ensuring the reliability and quality of the test results between independent accredited laboratories, is their performance in interlaboratory comparative testings.

For the comparative tests, insulating products from the market, extruded polystyrene and expanded polystyrene, tested under the same test conditions, were used. The results showed that the two devices offer reliable results, comparable to each other. The differences varied within permissible limits and did not exceed 3.5%. The best

measurement approach was found to be at 50 °C while the overall range of extruded polystyrene gave better convergence and therefore less variation in results.

Λέξεις-Κλειδιά: Συγκριτική μέτρηση, συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, Διάταξη Προστατευμένης Θερμής Πλάκας

1. Εισαγωγή

Η θερμική αγωγιμότητα αποτελεί ένα βασικό θερμικό μέγεθος των μονωτικών και δομικών υλικών, το οποίο χαρακτηρίζει την ποιότητα των υλικών αυτών. Κατά συνέπεια η αξιόπιστη αποτίμησης της μονωτικής ικανότητας, μέσω του προσδιορισμού της θερμικής αγωγιμότητας, λ, καθίσταται βασική προϋπόθεση για τον τρόπο χρήσης του ως μονωτικό υλικό.

Η μέθοδος της προστατευμένης θερμής πλάκας (guarded hot plate method - GHP) αποτελεί μία διαδεδομένη και τυποποιημένη μέθοδο αποτίμησης των θερμομονωτικών ιδιοτήτων υλικών κυρίως με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της φαινομένης τιμής της θερμικής αγωγιμότητας, λ, τόσο σε αμιγώς δομικά όσο και σε μονωτικά υλικά. Η συγκεκριμένη μέθοδος αφορά μέθοδο αναφοράς που βασίζεται στον γνωστό νόμο μετάδοσης θερμότητας του Fourier. Το πρότυπο στο οποίο αναγράφονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τη διεξαγωγή της δοκιμής προσδιορισμού της θερμικής αγωγιμότητας είναι το ISO 8302/1991: “Thermal insulation – Determination of steady – state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus” (ISO 8302, 1991).

Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας διεξάγονται από συγκεκριμένα εργαστήρια, συνήθως διαπιστευμένα, τα οποία εφαρμόζουν συγκεκριμένο Σύστημα Διαχείρισης. Στο πλαίσιο της διαπιστευμένης διαδικασίας ως προς την ικανότητα διεξαγωγής μετρήσεων, τα εργαστήρια ελέγχουν την ικανότητά και επάρκειά τους αφενός μέσω τακτικών (συνήθως ετησίων) ελέγχων με υλικά αναφοράς, εγνωσμένων ιδιοτήτων και αφετέρου μέσω διεργαστηριακών - συγκριτικών δοκιμών μεταξύ ομοειδών εργαστηρίων σε ίδια και αυστηρά επιλεγμένα δείγματα (Zarr 2002, Zarr 2002, Salmon 2000). Αποτελέσματα από διεργαστηριακές - συγκριτικές δοκιμές μεταξύ εργαστηρίων εγνωσμένης επάρκειας σε συγκεκριμένα υλικά χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τα ίδια τα υλικά της δοκιμής ως υλικά αναφοράς (Quin 2000, Williams 1991).

Στην Ελλάδα δύο είναι τα διαπιστευμένα εργαστήρια για την διεξαγωγή δοκιμών προσδιορισμού της θερμικής αγωγιμότητας, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8302, σε μονωτικά και δομικά υλικά και τα οποία έχουν εν λειτουργία συσκευές προστατευμένης θερμής πλάκας (Guarded Hot Plate Apparatus). Στο πλαίσιο των απαραίτητων, από το σύστημα ποιότητας που ακολουθούν αυτά τα εργαστήρια, διεργαστηριακών - συγκριτικών δοκιμών για την διασφάλιση της επάρκειας των εργαστηρίων διεξάγονται σε τακτική βάση συγκριτικές δοκιμές με υλικά του εμπορίου και τα αποτελέσματα αναλύονται διεξοδικά. Μια σειρά από τέτοια αποτελέσματα, τα οποία ελήφθησαν στην διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

2. Υλικά και Μεθοδολογία

Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό των θερμικών χαρακτηριστικών θερμομονωτικών υλικών χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, λ, πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των Εργαστηρίων με τη χρήση διατάξεων Προστατευμένης Θερμής Πλάκας (Guarded Hot Plate). Τα Εργαστήρια που συμμετείχαν στη συγκριτική δοκιμή είναι:

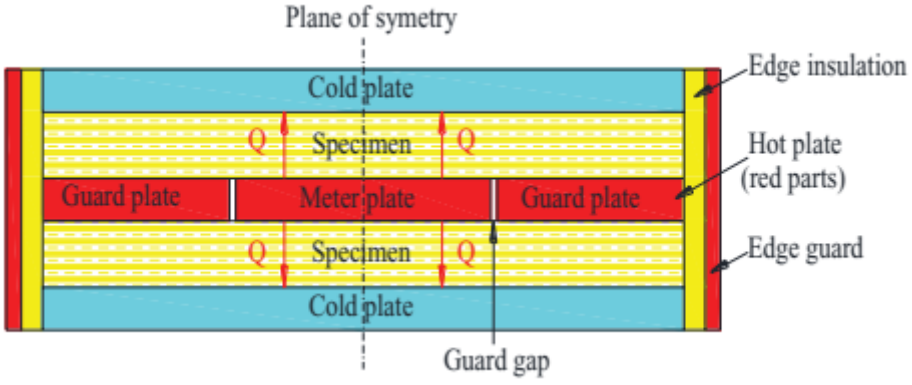
- Το Εργαστήριο Ενεργειακών Μετρήσεων (ΕΜΕ) του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) και
- Το Εργαστήριο Δοκιμών Ηλιακών & Ενεργειακών Συστημάτων (ΕΗ-ΕΣ) του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ».

Τα δύο Εργαστήρια είναι διαπιστευμένα κατά το πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ ISO/IEC 17025 από τον εθνικό φορέα διαπίστευσης (ΕΣΥΔ) για δοκιμές σε θερμομονωτικά και δομικά υλικά σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 8302.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 10 ºC έως και 50 ºC ακολουθώντας τις διαδικασίες δοκιμής των αντίστοιχων συστημάτων ποιότητας και τις απαιτήσεις του προτύπου. Σκοπός της συγκριτικής δοκιμής ήταν ο έλεγχος της δυνατότητας των Εργαστηρίων να παρέχουν αποτελέσματα τα οποία είναι συμβατά μεταξύ τους, λαμβάνοντας υπόψη τις δηλούμενες αβεβαιότητες καθώς και η συνεργασία των εργαστηρίων για τη βελτίωση της τεχνικής ικανότητάς τους.

2.1 Αρχή λειτουργίας συσκευής μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας με την μέθοδο GHP

Ο προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας διενεργήθηκε και από τα δύο εργαστήρια με συσκευές που εφαρμόζουν την μέθοδο της προστατευμένης θερμής πλάκας (GHP method) με βάση το πρότυπο ISO 8302 που υλοποιεί τον νόμο του Fourier (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Αρχή λειτουργίας της μεθόδου GHP (Manfeng Li et al. , 2012)

Η θερμική αγωγιμότητα των δειγμάτων, λ [W/(mK)], υπολογίζεται βάσει του νόμου του Fourier από τη μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμής πλάκας και των ψυχρών

πλακών, ΔT [K], την προσφερόμενη από την θερμή πλάκα θερμότητα, Q [W], την επιφάνεια της περιοχής μέτρησης, A [m^2] και το πάχος των δειγμάτων, d [m], και δίνεται από την σχέση:

$$Q = \lambda A \frac{\Delta T}{d} \qquad (1)$$

Για τον τρόπο λειτουργίας δύο δειγμάτων, η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\lambda = \frac{Q}{A\left[\left(\frac{\Delta T1}{d1}\right)+\left(\frac{\Delta T2}{d2}\right)\right]} \qquad (2)$$

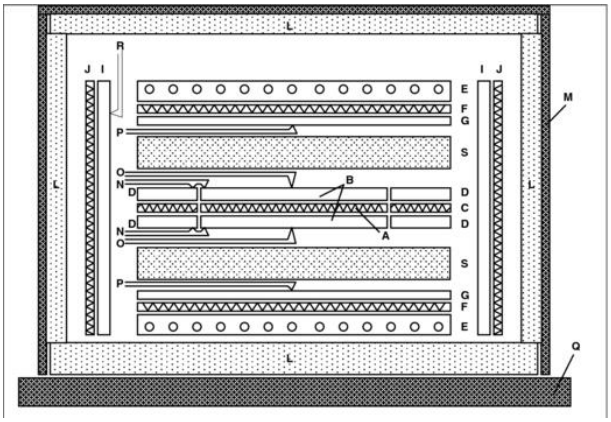
όπου ΔT_1 και ΔT_2 είναι οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των πλευρών των δύο δειγμάτων 1 και 2, [K], και d_1, d_2 είναι το πάχος των δειγμάτων 1 και 2, [m], αντίστοιχα.

Εάν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δειγμάτων καθώς και το πάχος των δειγμάτων είναι ίδια (λαμβάνονται οι μέσες τιμές), τότε ο ορισμός της θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να εκφρασθεί ως:

$$\lambda = \frac{Qd}{2A\Delta T} \qquad (3)$$

όπου ΔT είναι η μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πλευρών των δειγμάτων, [K] και d είναι το μέσο πάχος των δειγμάτων, [m].

Το σχηματικό διάγραμμα μιας τυπικής συσκευής που υλοποιεί το πρότυπο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



A Σύστημα Θέρμανσης Μετρητικής Περιοχής	L Μόνωση
B Θερμές Επιφάνειες Μετρητικής Περιοχής	M Εξωτερικό Περίβλημα Μονάδας
C Σύστημα Θέρμανσης Προστατευτικού Δακτυλίου	N Διαφορικό Σύστημα μέτρησης θερμοκρασίας
D Θερμές Επιφάνειες Προστατευτικού Δακτυλίου	O Αισθητήρες Θερμοκρασίας Μετρητικής Περιοχής
E Μονάδα Ψύξης	P Αισθητήρες Θερμοκρασίας Ψυχρών Επιφανειών
F Μονάδα Διατήρησης Σταθερής Θερμοκρασίας	Q Βάση Στήριξης
G Ψυχρές Επιφάνειες	R Αισθητήρες Θερμοκρασίας Εξωτερικού Προστατευτικού Δακτυλίου
I Εξωτερικός Προστατευτικός Δακτύλιος	S Δοκίμια Προς Έλεγχο
J Σύστημα θέρμανσης Εξωτερικού Προστατευτικού Δακτυλίου	

Σχήμα 2. Διαγραμματική παράσταση της διάταξης GHP (Salmon et al. 2009)

Και οι δύο διατάξεις των Εργαστηρίων χρησιμοποιούν τη μέθοδο Προστατευμένης Θερμής Πλάκας, είναι τύπου δύο δοκιμίων, στην οποία η ροή θερμότητας μεταδίδεται κατακόρυφα προς τα δείγματα. Η συσκευή του Εργαστηρίου του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» αποτελείται από την θερμή πλάκα (hot plate), τις δύο ψυχρές πλάκες (cold plates) και την εσωτερική και εξωτερικές πλάκες προστασίας (inner and outer guarding plates). Η συσκευή του εργαστηρίου του ΚΑΠΕ δεν διαθέτει τις εξωτερικές πλάκες προστασίας (I, και J του Σχήματος 2). Ωστόσο και στις δύο διατάξεις τα υπό μέτρηση δείγματα είναι δύο, ίδιων διαστάσεων και τοποθετούνται ανάμεσα στη θερμή και τις ψυχρές πλάκες (Σχήμα 2).

Η θερμή πλάκα αποτελείται από την περιοχή μέτρησης (metering section heater area) και από την περιμετρικά ευρισκόμενή της εσωτερική προστατευτική περιοχή (inner guarding area). Οι δύο αυτές θερμές πλάκες φέρουν εσωτερικά ενσωματωμένες ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η εσωτερική προστατευτική περιοχή καλύπτει περιμετρικά την περιοχή μέτρησης και έχει ως σκοπό την αποφυγή θερμικών απωλειών από τα πλαϊνά, δηλαδή εξασφαλίζει το μονοδιάστατο της θερμικής ροής και την ομοιομορφία της κατανομής της θερμοκρασίας στα υπό μέτρηση δείγματα, προϋπόθεση απολύτως απαραίτητη για την δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου (Flynn et al. 2005, Flynn et al. 2002, Salmon 2001, Xamán et al. 2009). Αυτή η προϋπόθεση είναι απαραίτητη για να είναι δυνατή η εφαρμογή του νόμου του Fourier. Οι δύο ψυχρές πλάκες αποτελούνται από ηλεκτρικό θερμαντήρα και μονάδα ψύξης με βασική αποστολή την επίτευξη σταθερής επιθυμητής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του προς μέτρηση δείγματος. Στη διάταξη του εργαστηρίου του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» εξωτερικά και περιμετρικά η διαμόρφωση αυτή περιβάλλεται από τέσσερις πλάκες, τις εξωτερικές προστατευτικές πλάκες (outer guard plates), με τις οποίες εξασφαλίζεται η έλλειψη περιμετρικών θερμικών απωλειών και κατά συνέπεια επιτυγχάνεται μονοδιάστατη ροή σε μεγάλο βαθμό. Η εξωτερική προστατευτική περιοχή αποτελείται από ηλεκτρικό θερμαντήρα αντίστασης και μονάδα ψύξης. Το εσωτερικό της διάταξης μετά από την τοποθέτηση των δειγμάτων πληρούται με αδρανές υλικό (περλίτη σε κόκκους) για την περαιτέρω θερμική μόνωση της διάταξης. Αντίστοιχα, στο εργαστήριο του ΚΑΠΕ η διάταξη διαθέτει ανεμιστήρες, οι οποίοι κατανέμουν ομοιόμορφα εντός του αδιαβατικού περιβλήματος τον αέρα σταθερής θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση όλων των απαραίτητων συνθηκών μέτρησης. Και στις δύο διατάξεις, οι μονάδες ψύξης είναι κλασικοί εναλλάκτες από τους σωλήνες των οποίων διέρχεται νερό που διατηρείται σε χαμηλή θερμοκρασία (≈0^{o}C) από ψύκτη νερού με προσθήκη αντιψυκτικού.

Στη διάταξη του εργαστηρίου του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται με θερμοζεύγη τύπου Κ ενσωματωμένα στις επιφάνειες των πλακών και είναι τρία για την κάθε πλευρά της περιοχής μέτρησης, τρία για την εσωτερική πλευρά των δύο ψυχρών πλακών, δύο για την κάθε πλευρά της εσωτερικής προστατευτικής περιοχής και μία για την εσωτερική πλευρά μίας εξωτερικής προστατευτικής πλάκας. Αντίστοιχα, στη διάταξη του εργαστηρίου του ΚΑΠΕ η μέτρηση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται με θερμοζεύγη τύπου Ε, τα οποία αριθμούνται σε 5 για κάθε επιφάνεια θερμής η ψυχρής πλάκας, ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δομικά υλικά υψηλής πυκνότητας χρησιμοποιούνται αντί των ενσωματωμένων στις πλάκες θερμοζευγών, 20 επιπλέον αισθητήρες τοποθετημένοι κατάλληλα στις επιφάνειες των δοκιμίων. Η θερμική ροή προσδιορίζεται από την τάση, [V], και ένταση, [A], του ρεύματος που διαρρέει την ηλεκτρική αντίσταση της περιοχής μέτρησης της θερμής πλάκας (εφόσον η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται πλήρως σε θερμότητα).

Οι κατασκευαστικές διαφορές μεταξύ των συσκευών των δύο Εργαστηρίων συνοψίζονται ως εξής:

(1) στις διαφορετικές διαστάσεις των δειγμάτων (ΕΗΕΣ 300×300 mm ενώ ΚΑΠΕ από 250×250 mm έως και 500×500 mm),
(2) στην έλλειψη εξωτερικής προστατευτικής πλάκας στην συσκευή του ΚΑΠΕ στην συσκευή του οποίου η ομοιομορφία στην μονοδιάστατη ροή θερμότητας δια μέσου των δειγμάτων διασφαλίζεται από συνεχή κυκλοφορία θερμού αέρα κατάλληλης θερμοκρασίας εντός του εξωτερικού περιβλήματος,
(3) στον διαφορετικό αριθμό και τύπο θερμοζευγών που χρησιμοποιούνται και
(4) στην ύπαρξη του μονωτικού υλικού πλήρωσης (περλίτης) στην συσκευή του ΕΗΕΣ.

2.2 Χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν

Η επιλογή των υλικών πραγματοποιήθηκε βάσει των παρακάτω κριτηρίων:

- Να είναι ομοιογενή, με σταθερές ιδιότητες, όσον αφορά στο πάχος και τη μάζα τους.
- Να είναι αντιπροσωπευτικά προϊόντα της αγοράς (χρήση ως θερμομονωτικά προϊόντα).
- Να έχουν ευρεία εφαρμογή στις οικοδομικές κατασκευές στην Ελλάδα.

Το αρχικό φύλλο υλικού διαμορφώθηκε ξεχωριστά από το κάθε Εργαστήριο στις διαστάσεις που απαιτούνται από τις αντίστοιχες διατάξεις Προστατευμένης Θερμής Πλάκας. Για το λόγο αυτό διαμορφώθηκε ένα ζεύγος δοκιμίων διαστάσεων 300 × 300 mm για τη διάταξη του Δημόκριτου και ένα ζεύγος δοκιμίων διαστάσεων 500 × 500 mm για τη διάταξη του ΚΑΠΕ. Τα φύλλα του υλικού μετά από την τελική διαμόρφωσή τους από το κάθε Εργαστήριο στις τελικές διαστάσεις, σημάνθηκαν με τον αντίστοιχο κωδικό και προσδιορίσθηκαν οι διαστάσεις και η μάζα τους από τα οποία προέκυψε η φαινομένη πυκνότητα των δοκιμίων.

Τα υλικά που επιλέχθηκαν είναι τυπικά υλικά θερμομόνωσης:

(1) Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS1), ονομαστικής πυκνότητας ρ = 28 kg/m^3 και ονομαστικού πάχους 5 cm.
(2) Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS2), ονομαστικής πυκνότητας ρ = 30 kg/m^3 και ονομαστικού πάχους 5 cm.
(3) Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS), ονομαστικής πυκνότητας ρ = 25 kg/m^3 και ονομαστικού πάχους d = 5 cm.

Τα υλικά είναι διαφορετικών κατασκευαστών, διατίθενται στο εμπόριο σε φύλλα διαστάσεων 250 cm μήκους και 60 cm πλάτους και η προμήθειά τους έγινε για μεν τα δύο πρώτα από ένα τυπικό κατάστημα οικοδομικών υλικών ενώ του τρίτου έγινε απευθείας από το εργοστάσιο παραγωγής.

2.3 Προγραμματισμός συγκριτικής δοκιμής

Οι συγκριτικές δοκιμές περιελάμβαναν τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας των δοκιμίων σε εύρος μέσων θερμοκρασιών δοκιμής το οποίο να περιέχει τις τυπικές τιμές στις οποίες εκτελούνται οι δοκιμές ρουτίνας από τα εν λόγω Εργαστήρια και έλαβαν χώρα

από το 2005 έως το 2014. Οι θερμοκρασίες που επελέγησαν είναι: 10, 20, 30, 40 και 50 ^{o}C. Ως διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πλακών των διατάξεων επελέγη αυτή των 10 ^{o}C από το Εργαστήριο του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και των 20 ^{o}C από το Εργαστήριο του ΚΑΠΕ. Τα δοκίμια, μετά την λήψη και διαμόρφωσή τους και μέχρι την έναρξη της δοκιμής, διατηρήθηκαν στα αντίστοιχα Εργαστήρια επί δύο εβδομάδες σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες (σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8302 απαιτούνται τουλάχιστον 72 ώρες μετά την κατασκευή) έτσι ώστε να σταθεροποιηθούν οι φυσικές τους ιδιότητες και δεν υπέστησαν καμία περαιτέρω προεργασία ή προετοιμασία. Καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών, ακολουθήθηκαν πιστά όλες οι απαιτήσεις της μεθόδου δοκιμών του προτύπου ISO 8302.

3. Αποτελέσματα μετρήσεων

Υλικά XPS1 και XPS2 (εξελασμένη πολυστερίνη)

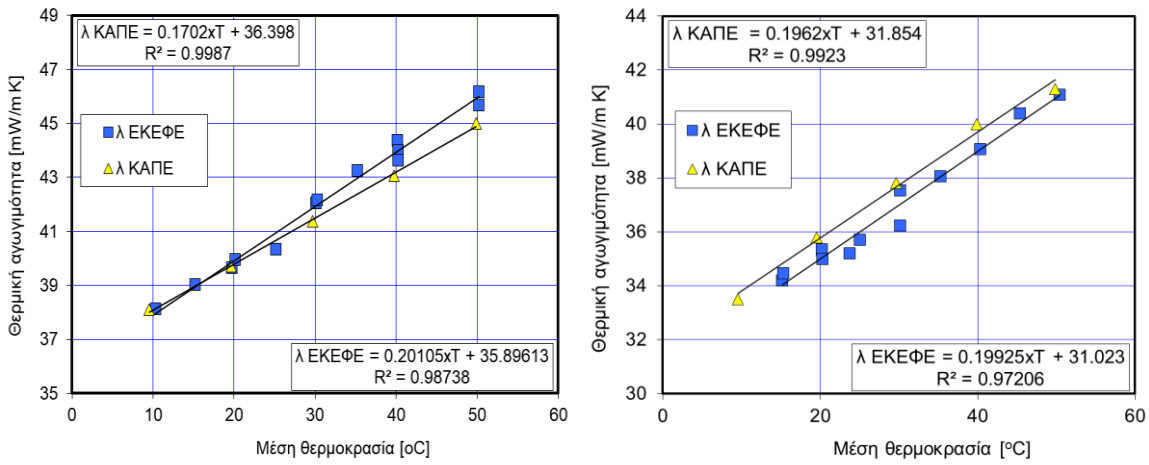
Οι θερμοκρασίες στις οποίες διενεργήθηκαν οι μετρήσεις έχουν ως ακολούθως:

- Το ΕΜΕ του ΚΑΠΕ πραγματοποίησε δοκιμές σε 10, 20, 30, 40 και 50 ^{o}C διατηρώντας σταθερή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πλακών 20 ^{o}C.
- Το ΕΗ-ΕΣ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» πραγματοποίησε δοκιμές σε 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 και 50 ^{o}C. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πλακών διατηρήθηκε σταθερή 10 ^{o}C.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται συνολικά στον Πίνακα 1 και σε γραφική μορφή στα Σχήματα 3(α) και 3(β).

Πίνακας 1. Αποτελέσματα δοκιμών για τα υλικά XPS1 και XPS2.

	XPS1		**XPS2**	
	Μέση θερμοκρασία δοκιμής [^{o}C]	**Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [mW m^{-1} K^{-1}]**	**Μέση θερμοκρασία δοκιμής [^{o}C]**	**Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [mW m^{-1} K^{-1}]**
ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος	*10.29*	*38.136*		
	15.20	*39.042*	*15.15*	*34.189*
	19.77	*39.653*	*15.31*	*34.459*
	20.10	*39.967*	*20.21*	*35.357*
	25.18	*40.348*	*20.26*	*35.000*
	30.11	*42.057*	*23.73*	*35.209*
	30.29	*42.177*	*25.03*	*35.701*
	35.20	*43.262*	*30.12*	*37.542*
	40.17	*44.388*	*30.17*	*36.231*
	40.20	*43.985*	*35.24*	*38.052*
	40.26	*43.640*	*40.32*	*39.061*
	50.18	*45.676*	*45.38*	*40.392*
	50.23	*46.182*	*50.39*	*41.078*
ΚΑΠΕ	*9.54*	*38.10*	*9.56*	*33.50*
	19.61	*39.72*	*19.56*	*35.80*
	29.73	*41.38*	*29.66*	*37.81*
	39.77	*43.06*	*39.86*	*40.00*
	49.87	*45.01*	*49.87*	*4130*



(α) (β)

Σχήμα 3. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων υλικών (α) XPS1 και (β) XPS2 των δύο εργαστηρίων.

Βάσει των αποτελεσμάτων υπολογίσθηκε, με γραμμική παρεμβολή, η σχέση μεταξύ του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και της μέσης θερμοκρασίας δοκιμής. Έτσι, για το υλικό XPS1 υπολογίσθηκαν οι κάτωθι σχέσεις:

$$\lambda\ \text{ΕΚΕΦΕ} = 0.2010 \times T_{mean}\,[^oC] + 35.896$$

$$\lambda\ \text{ΚΑΠΕ} = 0.1702 \times T_{mean}\,[^oC] + 36.398$$

Ενώ για το υλικό XPS2, υπολογίσθηκαν οι κάτωθι σχέσεις:

$$\lambda\ \text{ΕΚΕΦΕ} = 0.1992 \times T_{mean}\,[^oC] + 31.023$$

$$\lambda\ \text{ΚΑΠΕ} = 0.1962 \times T_{mean}\,[^oC] + 31.854$$

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο Εργαστηρίων των προσδιοριζόμενων μεγεθών χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω σχέσεις σε προκαθορισμένες θερμοκρασίες, ήτοι 10, 20, 30, 40 και 50 ºC και υπολογίσθηκαν οι επί τις εκατό διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων για κάθε μια θερμοκρασία (Πίνακας 2). Η γραφική απεικόνιση των σχέσεων αυτών φαίνεται με συνεχή γραμμή στα Σχήματα 3(α) και 3(β).

Πίνακας 2. Σύγκριση υπολογιζόμενων συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας.

	XPS1		**XPS2**	
Θερμοκρασία (ºC)	**Διαφορά λ ($mWm^{-1}K^{-1}$)**	**Διαφορά (%)**	**Διαφορά λ ($mWm^{-1}K^{-1}$)**	**Διαφορά (%)**
10	*0,18*	*0.45*	*0.80*	*2.43*
20	*0.11*	*0.28*	*0.77*	*2.21*
30	*0.41*	*0.97*	*0.75*	*2.02*
40	*0.70*	*1.59*	*0.72*	*1.85*
50	*0.99*	*2.16*	*0.69*	*1.69*

Υλικό EPS (Διογκωμένη πολυστερίνη)

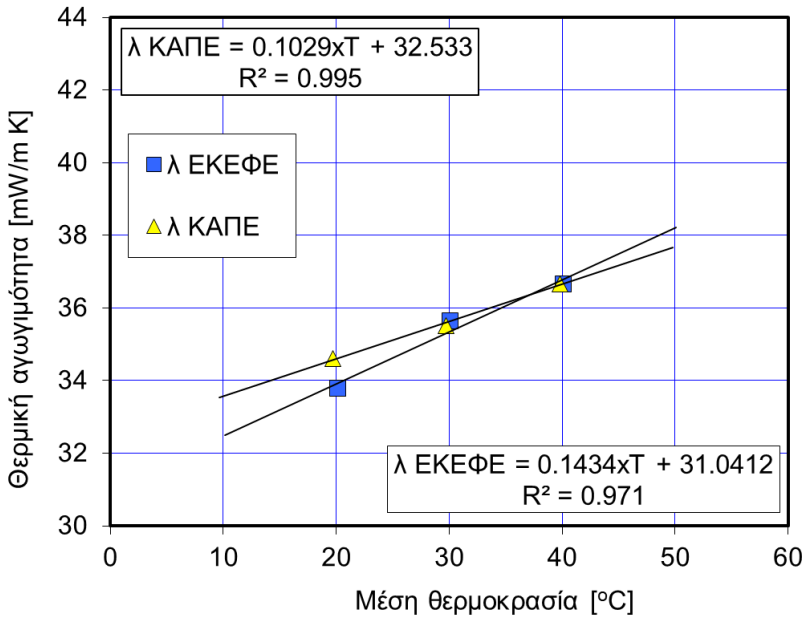
Οι θερμοκρασίες στις οποίες διενεργήθηκαν οι μετρήσεις έχουν ως ακολούθως:

- Το εργαστήριο ΕΜΕ του ΚΑΠΕ πραγματοποίησε δοκιμές σε 20, 30, και 40 ºC διατηρώντας σταθερή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πλακών 12 ºC.
- Το εργαστήριο ΕΗ-ΕΣ του Δημόκριτου πραγματοποίησε δοκιμές σε 20, 30, και 40 ºC. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πλακών διατηρήθηκε σταθερή 10 ºC.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται συνολικά στον Πίνακα 3. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σε γραφική μορφή στο Σχήμα 4.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα δοκιμών διεργαστηριακής σύγκρισης για υλικό EPS.

Εργαστήριο	**Μέση θερμοκρασία δοκιμής [ºC]**	**Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [mW /(mK)]**
ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος	*20.14*	*33.79*
	30.10	*35.65*
	40.11	*36.65*
ΚΑΠΕ	*19.68*	*34.60*
	29.72	*35.51*
	39.79	*36.67*



Σχήμα 4. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων υλικού EPS των δύο εργαστηρίων.

Βάσει των αποτελεσμάτων με γραμμική παρεμβολή υπολογίσθηκε η σχέση μεταξύ του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και της μέσης θερμοκρασίας δοκιμής. Έτσι, υπολογίσθηκαν οι κάτωθι σχέσεις:

$$\lambda \text{ ΕΚΕΦΕ} = 0.1434 \times \text{Tmean } [^{o}\text{C}] + 31.041$$

$$\lambda \text{ ΚΑΠΕ} = 0.1029 \times \text{Tmean } [^{o}\text{C}] + 32.533$$

Για τη σύγκριση των προσδιοριζόμενων μεγεθών χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω σχέσεις σε προκαθορισμένες θερμοκρασίες, ήτοι 10, 20, 30, 40 και 50 ^{o}C (των οποίων η γραφική απεικόνιση φαίνεται στο Σχήμα 4). Στη συνέχεια υπολογίσθηκαν οι επί τις εκατό διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων για κάθε μια θερμοκρασία (Πίνακας 4).

Πίνακας 4. Σύγκριση υπολογιζόμενων συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας για υλικό EPS.

Θερμοκρασία (^{o}C)	**Διαφορά λ ($mWm^{-1}K^{-1}$)**	**Διαφορά (%)**
10	*1.087*	*3.4*
20	*0.683*	*2.0*
30	*0.279*	*0.8*
40	*0.126*	*0.3*
50	*0.530*	*1.4*

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 2, για τα υλικά XPS1 και XPS2 από εξελασμένη πολυστερίνη, η διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ των Εργαστηρίων κυμαίνεται από 0.286 % μέχρι 2.43 %. Από τον Πίνακα 4 προκύπτει ότι, για το υλικό EPS από διογκωμένη πολυστερίνη (φελιζόλ) η διαφορά των αποτελεσμάτων κυμαίνεται από 0.3% μέχρι 3.4 %. Και στις τρείς περιπτώσεις οι αποκλίσεις ως ποσοστό ευρίσκονται εντός των γενικών ορίων συμφωνίας η οποία αναμένεται σύμφωνα με την τυπική μέθοδο υπολογισμού του λ με τη διάταξη Προστατευμένης Θερμής Πλάκας ($\leq \pm 5\%$ για μέσες θερμοκρασίες στην περιοχή των θερμοκρασιών περιβάλλοντος).

4. Συμπεράσματα

Ο στόχος της εργασίας είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των συγκριτικών δοκιμών μεταξύ δύο ίδιων διατάξεων μέτρησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε θερμομονωτικά προϊόντα της αγοράς. Τα εργαστήρια που έλαβαν μέρος στη συγκριτική δοκιμή είναι διαπιστευμένα από το Εθνικό Συμβούλιο Διαπίστευσης κατά ΕΝ ISO/IEC 17025.

Για το σκοπό της συγκριτικής δοκιμής χρησιμοποιηθήκαν δοκίμια από εξηλασμένη και διογκωμένη πολυστερίνη, προερχόμενα αντίστοιχα από το ίδιο φύλλο παραγωγής, προσαρμοσμένα στις διαστάσεις της εκάστοτε διάταξης και υπό τις ίδιες ελεγχόμενες συνθήκες αποθήκευσης και ελέγχου.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων βρίσκονται σε σύνολο εντός των αναμενόμενων αποκλίσεων, δεδομένων τόσο των κατασκευαστικών διαφορών μεταξύ των δύο διατάξεων Προστατευμένης Θερμής Πλάκας όσο και της μεθόδου γραμμικής παρεμβολής κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Βάσει αυτών, τόσο η μέγιστη απόκλιση της τάξεως των 3.4%, θερμοκρασία δοκιμής 10 ^{o}C, όσο και η ελάχιστη (0.3% σε θερμοκρασία δοκιμής 40 ^{o}C) μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο εργαστηριακών διατάξεων, εμφανίζεται για το υλικό της διογκωμένης πολυστερίνης. Αντίστοιχα η επεξεργασία των μετρήσεων για την εξηλασμένη πολυστερίνη παρουσίασε αφενός, καλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων συνολικά και αφετέρου, μικρότερο εύρος διακύμανσης των αποτελεσμάτων.

Η καλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων της εξηλασμένης πολυστερίνης σε σύγκριση με αυτά της διογκωμένης πολυστερίνης πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι η εξηλασμένη πολυστερίνη είναι ένα κυψελοειδές μονωτικό που παρουσιάζει εξαιρετική ομοιομορφία στην δομή του σε όλο το μήκος και πλάτος του χρησιμοποιούμενου φύλλου. Σε αντίθεση με αυτό η διογκωμένη πολυστερίνη αποτελείται από σύμπακτους κόκκους τεχνητά διογκωμένης πολυστερίνης γεγονός το οποίο δεν αποκλείει πιθανές εσωτερικές διαφοροποιήσεις στην ομοιομορφία εντός του ίδιου φύλλου.

Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι η διενέργεια διεργαστηριακών – συγκριτικών δοκιμών αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο ώστε τα εργαστήρια να συγκρίνουν τα αποτελέσματα των δοκιμών τους στα ίδια πεδία μετρήσεων, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία και η διασφάλιση της ποιότητας των παρεχομένων υπηρεσιών δοκιμών τους.

5. Βιβλιογραφία

Flynn, D. R., Healy, W. M., Zarr, R. R., “High-Temperature Guarded Hot Plate Apparatus – Control of Edge Heat Loss”. Proceedings of the Thermal Conductivity 28: Thermal Expansion 16: Joint Conferences: June 26-29, 2005, St. Andrews-by-the-Sea. New Brunswick, Canada.

Flynn, D. R., Zarr, R. R., Hahn, M. H., and Healy, W. M., “Design Concepts for a New Guarded Hot Plate Apparatus for Use Over an Extended Temperature Range”, Insulation Materials: Testing and Applications: 4Ih Volume, ASTM STP 1426,A. 0.Desjarlais and R. R. Zarr, Eds., ASTM International, 2002, West Conshohocken, PA.

ISO 8302/1991, “Thermal insulation – Determination of steady – state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus”.

Manfeng Li, Hua Zhang, and Yonglin Ju, “Design and construction of a guarded hot plate apparatus operating down to liquid nitrogen temperature”, Review of Scientific Instruments 83, 2012.

Quin, S., Venut, G., De Ponte, F., Lamberty, A., “Certification of a Resin-Bonded Glass Fibre Board (IRMM-440) for Thermal Conductivity between – 10 ºC and + 50 ºC”. Report EUR 19572 EN, 2000.

Salmon, D., (2001). “Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials”, Meas. Sci. Technol. 12, 2001, pp. R89–R98.

Salmon, D., R,. Tye R P and N Lockmuller, “A critical analysis of European standards for thermal measurements at high temperatures: I. History and technical background”. Meas. Sci. Technol. 20, 2009.

Salmon, D., R,. Tye R P, “An intercomparison of heat flow meter apparatus within the United Kingdom and Eire”. High Temperatures ^ High Pressures, 2000, volume 32, pages 19 -28.

Williams, I., Shawver, R., E., “Certification Report for a Pyrex reference material for thermal conductivity between – 75 ºC and + 195 ºC”, Report EUR 1358 EN, 1991.

Xamán, J., Lira, L., Arce J., “Analysis of the temperature distribution in a guarded hot plate apparatus for measuring thermal conductivity”, Applied Thermal Engineering, 29, 2009, p.p. 617–623.

Zarr, R. R. and Filliben, J. J., “An International Study of Guarded Hot Plate Laboratories Using Fibrous Glass and Expanded Polystyrene Reference Materials”, Insulation Materials: Testing and Applications: 4Ih Volume, ASTM STP 2426, A. 0. Desjarlais and R. R. Zarr, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.

Zarr, R. R. and Filliben, J. J., “International Comparison of Guarded Hot Plate Apparatus Using National and Regional Reference Materials”. NIST Technical Note 1444, 2002.