

The impact of moisture on the thermal conductivity value of stone wool based insulating materials

A.M. Papadopoulos and A. Karamanos

Laboratory of Heat Transfer and Environmental Engineering, Department of Mechanical Engineering, Aristotle University Thessaloniki, Greece

S. Hاديarakou

FIBRAN SA, Insulating Material Industry, Thessaloniki, Greece

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια από τις σημαντικότερες απειλές στις οικοδομικές κατασκευές είναι η επιδείνωση των ιδιοτήτων των δομικών υλικών που μπορεί να επέλθει από τη διείσδυση και παραμονή υγρασίας στη μάζα τους. Η προκαλούμενη ζημιά μπορεί να έχει απλά οικονομικό κόστος, όπως στην περίπτωση διάβρωσης του θερμομονωτικού υλικού ή του επιχρίσματος. Σε μερικές περιπτώσεις, ωστόσο, μπορεί να συντρέχουν και λόγοι ασφάλειας όπως στη περίπτωση της διάβρωσης του σκυροδέματος.

Στη παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της συμπεριφοράς του πετροβάμβακα υπό την επίδραση υγρασίας. Αναλυτικότερα μελετήθηκε η συμπεριφορά του συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ – των διαφόρων τύπων Πετροβάμβακα που χρησιμοποιούνται σε οικοδομικές εφαρμογές – για όλες τις περιπτώσεις διαβροχής του υλικού. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μετρήθηκε σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα που διέπουν το Ευρωπαϊκό Σήμα Ποιότητας σε δοκίμια ξηρά, καθώς και σε δοκίμια μετά από παραμονή στο νερό επί 28 ημέρες και εν συνεχεία μετά την ξήρανσή τους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκρίθηκαν με τις τιμές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και παρατηρήθηκε, με την αντίστοιχη ποσοτικοποιημένη τεκμηρίωση πως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας επιδεινώνεται όταν ο πετροβάμβακας έρθει σε επαφή με το νερό, αλλά μετά την φυσική ξήρανση του ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας επιστρέφει στην αρχική του τιμή.

ABSTRACT

One of the greatest threats for buildings is the possibility of changes in the building materials' properties because of the penetration and residence of moisture in them. In the case of insulating materials such damages may initially have an energy cost, since they reduce the insulating ability of the material. Furthermore, there may be economic consequences, like in the case of wetting the insulating material and/or the coating, with the implied partial or even total destruction of the latter, while in extreme circumstances there may occur consequences for the safety in case of corroding the subjacent concrete. Nevertheless, even in the simplest case of wetting the material, the consequences are not insignificant.

The present paper discusses the behavior of stone wool with respect to moisture. In detail, the behavior of the thermal conductivity value λ was considered for a range of various products' densities, commonly used in building applications. The thermal conductivity value has been measured according to the new EN standards that are a pre-condition for obtaining the CE sign of these materials. The tests have been performed in dry samples and in samples that have been into water for 28 days and then were allowed to dry out. The results of the measurements have been compared with the calculated values and those mentioned in literature and it was observed that the thermal conductivity factor is initially deteriorating, but after the material has been naturally dried its features return almost entirely to the original levels.

1. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Μια από τις σημαντικότερες απειλές στις οικοδομικές κατασκευές είναι η απαξίωση των δομικών υλικών που μπορεί να προέρθει από τη διείσδυση υγρασίας μέσα στη μάζα τους. Η προκαλούμενη ζημιά μπορεί να έχει απλά οικονομικό κόστος, όπως στην περίπτωση διάβρωσης του θερμομονωτικού υλικού ή του επιχρίσματος. Σε άλλες περιπτώσεις, μπορεί να συντρέχουν λόγοι ασφάλειας, με χαρακτηριστική περίπτωση τη διάβρωση του σκυροδέματος. Αν η υγρασία εισχωρήσει στο σκυροδέμα, μπορεί να μεταβληθεί η στατική αντοχή του και να μειωθεί σημαντικά η σεισμική αντοχή τους. Επομένως, η υγροπροστασία πρέπει να αποτελεί ένα από τα κυριότερα μελήματα του μελετητή – μηχανικού.

Η υγρασία μπορεί να διεισδύσει στα δομικά υλικά με δύο τρόπους:

- Άμεσα, από τα νερά της βροχής και του χιονιού και τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας.
- Έμμεσα, είτε από τον υδροφόρο ορίζοντα που σχηματίζεται από τις μεγάλες βροχοπτώσεις και την τήξη του χιονιού ή από τα υπόγεια νερά που ανέρχονται μέσω τριχοειδών ρηγματώσεων, κινούμενα αντίθετα προς τη βαρύτητα, και διαποτίζουν τα θεμέλια, φτάνοντας σε αρκετό ύψος.

2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑ

Τα θερμομονωτικά υλικά οφείλουν τη χαμηλή τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητάς τους ($\lambda < 0,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) στον αέρα που περιέχεται στη μάζα τους. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ακίνητος και σε μικρή ποσότητα αέρας είναι ένα από τα στοιχεία με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ($\lambda_{\text{αέρα}} = 0,026 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, σε συνθήκες περιβάλλοντος). Τα αέρια εν γένει έχουν χαμηλότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από τα υγρά και τα στερεά, επειδή τα μόρια τους είναι περισσότερο απομακρυσμένα και εμποδίζεται η μετάδοση θερμότητας με θερμική αγωγή. Για παράδειγμα, για το νερό, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι περίπου, $\lambda_{\text{νερού}} = 0,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, δηλαδή, κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, καθίσταται σαφές πως, αν ο αέρας που βρίσκεται εγκλωβισμένος

μέσα στη μάζα του θερμομονωτικού υλικού αντικατασταθεί από νερό, τότε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς του μεταβάλλεται σημαντικά. Επομένως, το θερμομονωτικό υλικό χάνει την θερμομονωτική του ικανότητα και αυξάνονται οι θερμικές απώλειες από το κελύφος του.

Το πρόβλημα εντοπίζεται στα θερμομονωτικά υλικά που ο περιβάλλον αέρας βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα που εμπεριέχεται στη μάζα τους, δηλαδή τα υλικά *ανοιχτής δομής*. Όλα τα ανόργανα ινώδη υλικά, και ειδικότερα ο πετροβάμβακας, ανήκουν σ' αυτήν την κατηγορία, καθώς αποτελούνται από ίνες με τον περιεχόμενο αέρα να βρίσκεται εγκλωβισμένος ανάμεσα σ' αυτές. Επομένως, η υγρασία που συγκεντρώνεται στην επιφάνειά του ή το νερό που έρχεται σε επαφή μ' αυτήν είναι ικανό να εισχωρήσει μέσα στη μάζα του, μεταβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητάς του.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προσδιοριστεί το κατά πόσο επηρεάζεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του πετροβάμβακα, όταν αυτός απορροφήσει νερό στη μάζα του. Ένα επιπλέον ενδιαφέρον ζήτημα είναι η μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στην περίπτωση που ο πετροβάμβακας διαποτιστεί με νερό και στη συνέχεια στεγνώσει, που συμβαίνει λόγω της ανοιχτής δομής του. Το τελευταίο αποτελεί συχνά πρόβλημα σε περιπτώσεις βροχόπτωσης κατά την κατασκευή.

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1 Υπολογισμός ροής υδρατμών

Η ροή μάζας του υδρατμού σε ένα δομικό δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m} = k_D S |P_i - P_a| \quad (1)$$

όπου,

\dot{m} ρυθμός ροής μάζας του υδρατμού, [kg/h]

k_D ο συντελεστής υδρατμοπερατότητας του δομικού στοιχείου, [kg/(m² h Pa)]

S επιφάνεια δομικού στοιχείου κάθετη στη ροή των υδρατμών, [m²]

P_i, P_a οι μερικές πιέσεις στην εσωτερική και

στην εξωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου αντίστοιχα, [Pa].

Για δομικό στοιχείο που αποτελείται από i στρώσεις, ο συντελεστής υδρατμοπερατότητάς του δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{k_D} = \frac{1}{\beta_i} + \sum_i \frac{l_i}{\delta_i} + \frac{1}{\beta_\alpha} \quad (2)$$

όπου,

$\frac{1}{\beta_i}, \frac{1}{\beta_\alpha}$ οι αντιστάσεις υδρατμομετάβασης

της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου, [m^2hPa/kg]

l_i το πάχος της στρώσης i , [m]

δ_i ο συντελεστής υδρατμοαγωγιμότητας της στρώσης i .

Επειδή συνήθως για τα υλικά είναι διαθέσιμη τη τιμή του συντελεστή αντίστασης σε διάχυση υδρατμών μ , υπάρχει μια σχέση που δίνει προσεγγιστικά, αλλά ικανοποιητικά το συντελεστή υδρατμοαγωγιμότητας δ , σε σχέση με το μ και ισχύει για όλα τα υλικά.

$$\delta = 636 \cdot 10^{-9} / \mu$$

Η αντικατάσταση του περιεχόμενου αέρα από υδρατμούς δεν αποτελεί πρόβλημα, αφού ο υδρατμός έχει χαμηλότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας από τον αέρα ($\lambda_{\text{υδρατμών}} < 0,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), επομένως δεν επηρεάζεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του θερμομονωτικού υλικού. Το πρόβλημα αρχίζει να υφίσταται με τη δημιουργία συμπυκνώματος, δηλαδή υγροποίησης των υδρατμών

3.2 Υπολογισμός μάζας συμπυκνώματος

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις συμπύκνωσης: Η *συμπύκνωση σε επίπεδο*, δηλαδή σε μια ευθεία της διατομής του δομικού στοιχείου, και η *συμπύκνωση σε ζώνη*, δηλαδή σε μια περιοχή (εμβαδόν) της διατομής του δομικού στοιχείου. Ας σημειωθεί πως η δημιουργία συμπυκνώματος μέσα στο δομικό στοιχείο παρατηρείται κατά τη χειμερινή περίοδο. Η διάχυση υδρατμών γίνεται από τον εσωτερικό αέρα (υψηλής μερικής πίεσης υδρατμών) προς τον εξωτερικό (χαμηλής μερικής πίεσης υδρατμών).

Για τη συμπύκνωση σε επίπεδο:

Η μάζα του συμπυκνώματος δίνεται από τη σχέση:

$$g' = \frac{\Delta P_i}{\sum_j \frac{l_j}{\delta_j}} - \frac{\Delta P_\alpha}{\sum_k \frac{l_k}{\delta_k}} \quad (3)$$

όπου,

ΔP_i η διαφορά μερικών πιέσεων υδρατμών του εσωτερικού αέρα και του σημείου όπου γίνεται η συμπύκνωση και είναι $\Delta P_i = P_i - P_A$, [Pa]

ΔP_α η διαφορά μερικών πιέσεων υδρατμών του εξωτερικού αέρα και του σημείου όπου γίνεται η συμπύκνωση και είναι $\Delta P_\alpha = P_A - P_\alpha$, [Pa]

$\sum_j \frac{l_j}{\delta_j}$ η συνολική αντίσταση υδρατμοδιαφυγής από το χώρο υψηλής μερικής πίεσης υδρατμών (εσωτερικό) μέχρι τη θέση της συμπύκνωσης, [m^2hPa/kg]

$\sum_k \frac{l_k}{\delta_k}$ η συνολική αντίσταση υδρατμοδιαφυγής από τη θέση της συμπύκνωσης μέχρι το χώρο χαμηλής μερικής πίεσης υδρατμών (εξωτερικό), [m^2hPa/kg]

Για τη συμπύκνωση σε ζώνη:

Υποθέτουμε ότι η συμπύκνωση γίνεται ανάμεσα στις θέσεις A και B, με την A πιο κοντά στον εσωτερικό αέρα και την B στον εξωτερικό.

Η μάζα του συμπυκνώματος δίνεται από τη σχέση:

$$g' = \frac{\Delta P_i}{\sum_j \frac{l_j}{\delta_j}} - \frac{\Delta P_\alpha}{\sum_k \frac{l_k}{\delta_k}} \quad (4)$$

όπου,

ΔP_i η διαφορά μερικών πιέσεων υδρατμών του εσωτερικού αέρα και του σημείου A, όπου αρχίζει να γίνεται η συμπύκνωση και είναι $\Delta P_i = P_i - P_A$,

ΔP_{α} [Pa] η διαφορά μερικών πιέσεων υδρατμών του εξωτερικού αέρα και του σημείου B, όπου σταματά να υπάρχει συμπύκνωση και είναι $\Delta P_{\alpha} = P_B - P_{\alpha}$, [Pa].

$\sum_j \frac{l_j}{\delta_j}$ η συνολική αντίσταση υδρατμοδιαφυγής από το χώρο υψηλής μερικής πίεσης υδρατμών (εσωτερικό) μέχρι τη θέση αρχής της συμπύκνωσης (σημείο A), [$m^2 hPa/kg$].

$\sum_k \frac{l_k}{\delta_k}$ η συνολική αντίσταση υδρατμοδιαφυγής από τη θέση που σταματά η συμπύκνωση (σημείο B) μέχρι το χώρο χαμηλής μερικής πίεσης υδρατμών (εξωτερικό), [$m^2 hPa/kg$].

Είναι σαφές, πως στην περίπτωση βροχοπτώσεων η χιονιού είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η ποσότητα του συμπυκνώματος, αφού αυτό εξαρτάται από διάφορα μετεωρολογικά δεδομένα.

4. ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ Λ ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑ

Αρχικά πρέπει να μελετηθεί η απορρόφηση υγρασίας από τον πετροβάμβακα και στη συνέχεια ο τρόπος μεταβολής της θερμικής του αγωγιμότητας. Οι συνθήκες υγρασίας μπορούν να εξομοιωθούν εργαστηριακά σύμφωνα με τα πρότυπα EN 1609 και EN 12087, για βραχυχρόνια και μακροχρόνια απορρόφηση νερού αντίστοιχα. Τέλος, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μετράται σύμφωνα με το πρότυπο EN 12667.

Πρότυπα EN 1609 και EN 12087

Τα δύο πρότυπα είναι όμοια σε ό,τι αφορά στην προετοιμασία και στις συνθήκες διεξαγωγής των μετρήσεών τους, με ουσιαστική διαφορά το χρονικό διάστημα της εμβάπτισης των δοκιμίων σε νερό.

Και στα δύο πρότυπα λαμβάνονται δοκίμια πετροβάμβακα διαστάσεων 20 x 20 cm, από αποθήκη υλικού με απόθεμα τουλάχιστον 10 m^3 . Τα δοκίμια εμβάπτιζονται σε νερό κατά 1 cm

του πάχους τους. Καθ' αυτόν τον τρόπο, εξομοιώνεται η προσβολή του πετροβάμβακα από την εξωτερική υγρασία και τις καιρικές συνθήκες, αφού και στην πραγματικότητα η υγρασία εισχωρεί από τη μία μόνο επιφάνειά του. Κατά το πρώτο πρότυπο το δοκίμιο παραμένει σε αυτές στις συνθήκες για 24 ώρες, ενώ κατά το δεύτερο για 28 ημέρες. Στη συνέχεια, μετράται το βάρος των δοκιμίων πριν και μετά την εμβάπτιση, για να υπολογιστεί η ποσότητα νερού που απορροφήθηκε.

Πρότυπο EN 12667

Για την μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιείται η βαθμονομημένη και διαπιστευμένη συσκευή Lambda 2300V, που πραγματοποιεί μετρήσεις του λ , βάσει του προτύπου EN 12667. Το δοκίμιο τοποθετείται ανάμεσα σε δύο πλάκες, μια ψυχρή στους 0 °C και μια θερμή στους 20 °C. Υπολογίζεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, έχοντας ως δεδομένη τη διαφορά θερμοκρασίας, το πάχος του δοκιμίου και τη θερμορροή ανάμεσα στις δύο επιφάνειες. Η θερμορροή αυτή μεταφράζεται σε ηλεκτρική τάση στη συσκευή για την σχετική επεξεργασία του σήματος. Το δοκίμιο πρέπει να είναι διαστάσεων 30 x 30 cm. Η συσκευή μετρά τη θερμορροή στο κέντρο του δοκιμίου, σε μια επιφάνεια 10 x 10 cm. Αυτό γίνεται, για να απαλειφθεί η ερμμορροή προς τα πλάγια του υλικού (οριζόντια θερμορροή), ώστε το μετρούμενο μέγεθος να είναι πράγματι μονοδιάστατο. Υπό αυτήν την έννοια, η υπόλοιπη μάζα υλικού, πλην του κεντρικού τμήματος του δοκιμίου, χρησιμεύει για να εμποδίζει την θερμορροή προς τα πλάγια.

Στις μετρήσεις που έγιναν επιλέχθηκαν δοκίμια πετροβάμβακα πυκνότητας 50, 75, 100 και 175 kg/m^3 και πάχους 50 και 80mm για τις πρώτες τρεις πυκνότητες και τεμάχια 30 και 50mm για την τελευταία. Λαμβάνονται δύο δοκίμια για τα πειράματα της εμβάπτισης, διαστάσεων 20x20cm και δυο δοκίμια διαστάσεων 30x30cm για τα πειράματα της μέτρησης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Οι μετρήσεις διάρκεσαν 6 μήνες λόγω του χρονικού διαστήματος που απαιτούσε η μέτρηση της μακροχρόνιας απορρόφησης νερού. Τα πειράματα έγιναν κατά ομάδες πάχους του υλικού.

Πίνακας 1: Συνολικά αποτελέσματα.

Τύπος	B-570				B-001			
Lot number	50163091C				50163091A			
Πάχος	50mm				50mm			
Διαστάσεις	200x200mm		300x300mm		200x200mm		300x300mm	
Αριθ. Δειγμάτων	I	II	I	II	I	II	I	II
Μετρημένες Διαστάσεις (mm)	192x204	200x200	300x300	300x300	201x201	200x200	305x305	300x300
Μετρημένο Βάρος	163,4gr	163,0gr	370,4gr	379,7gr	203,3gr	205,0gr	500,8gr	476,5gr
Απορρόφηση νερού EN 1609	163,9gr	164,0gr	383,6gr	392,5gr	204,6gr	207,8gr	516,2gr	488,6gr
Διαφορά	0,5gr	1gr	14,2gr	12,8gr	1,3gr	2,8gr	15,4gr	12,1gr
% Απορρόφησης νερού Σύμφωνα με EN 1609 (max 1 Kg/m ²)	0,0013	0,025	0,158	0,142	0,032	0,07	0,166	0,134
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK)			0,0308	0,0310			0,0320	0,0310
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK) μετά από το EN 1609			0,604				0,712	
Απορρόφηση νερού EN 12087(gr)	190,7	188,4	396,4	404,2	235,8	239,4	530,7	502,7
Διαφορά (gr)	27,3	25,4	26	24,5	32,5	34,4	29,9	26,2
% Απορρόφησης νερού Σύμφωνα με EN 12087 (max 3 Kg/m ²)	0,68	0,64	0,28	0,27	0,83	0,86	0,33	0,29
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK) μετά από το EN 12087			0,0767	0,0741			0,0637	0,0749
Συντελεστής θερμικής Αγωγιμότητας μετά από την Ξήρανση			0,0308	0,0311			0,0318	0,0313

χους του υλικού. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε βάσει του πρωτοκόλλου παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια.

Αρχικά εξετάστηκαν δοκίμια πάχους 50mm και πυκνότητας 75 και 100kg/m³ αντίστοιχα. Τα δοκίμια ζυγίστηκαν και μετρήθηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν για 24 ώρες και στη συνέχεια ζυγίστηκαν και μετρήθηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς τους, ενώ κατόπιν τα ίδια δοκίμια τοποθετήθηκαν στο νερό για 28 ημέρες και στη συνέχεια επαναλήφθηκαν οι ίδιες μετρήσεις. Τέλος, τα δοκίμια ξηράθηκαν φυσικά, παραμένοντας σε χώρο με συνθήκες περιβάλλοντος για 7 ημέρες, και επαναλήφθηκαν οι μετρήσεις. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων για τα υπό εξέταση δοκίμια.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα δοκίμια πάχους 80mm και για πυκνότητες 75

και 100 kg/m³. Τα αποτελέσματα αυτής της ομάδας μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Ομοίως, παρουσιάζονται στον πίνακα 3 τα αποτελέσματα για τα δοκίμια πάχους 50mm και πυκνότητας 50 και 175 kg/m³. Τέλος, στον πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το σετ δειγμάτων 80mm πυκνότητας 50 kg/m³ και 50mm πυκνότητας 175 kg/m³.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το γενικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από τη σειρά πειραμάτων της παρούσας μελέτης είναι η ευαισθησία του πετροβάμβακα απέναντι στα συμπυκνώματα υγρασίας. Όπως ήταν αναμενόμενο από τη θεωρητική προσέγγιση, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς του αυξάνεται όταν συμπυκνωθεί η υγρασία μέσα στη μάζα του. Στο πείραμα μακροχρόνιας απορρόφησης νερού (EN 12087), η αύξηση που συντε-

Πίνακας 2: Αποτελέσματα για δοκίμια πάχους 80mm και για πυκνότητες 75 και 100 kg/m³.

Τύπος	B-570				B-001			
Lot number	50783169A				50923198D			
Πάχος	80mm				80mm			
Διαστάσεις	200x200mm		300x300mm		200x200mm		300x300mm	
Αριθ. Δειγμάτων	I	II	I	II	I	II	I	II
Μετρημένες Διαστάσεις (mm)	203x201	180x205	299x290	295x300	198x201	202x201	300x300	300x298
Μετρημένο Βάρος	201,6	207,0	472,0	484,0	295,7	3210,3	730,5	701,2
Απορρόφηση νερού EN 1609	208,1	213,2	497,3	501,2	301,8	326,1	743,8	715,4
Διαφορά (gr)	6,5	6,2	25,3	17,2	6,1	5,7	13,3	14,2
(max 1 Kg/m ²)	0,1625	0,155	0,28	0,191	0,1525	0,1425	0,148	0,158
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK)			0,0325	0,0322			0,0342	0,0322
Απορρόφηση νερού EN 12087(gr)	217,3	219,9	503,8	518,2	317,1	341,0	771,7	739,6
Διαφορά (gr)	15,7	12,9	31,8	34,2	21,4	20,6	41,2	38,4
(max 3 Kg/m ²)	0,3925	0,3225	0,3533	0,38	0,535	0,515	0,458	0,423
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK) μετά από το EN 12087			0,05746	0,06217			0,06196	0,05314
Συντελεστής θερμικής Αγωγιμότητας μετά από την Ξήρανση			0,03214	0,03296			0,03306	0,03279

λείται είναι αξιοπρόσεκτη και σ' αυτήν την περίπτωση ο πετροβάμβακας πρακτικά παύει να λειτουργεί ως θερμομονωτικό υλικό.

Όσον αφορά στη χρήση του πετροβάμβακα σε κατασκευές πρέπει να σημειωθούν τα παρακάτω:

Η υγρασία μπορεί να διαπερνά τη μάζα του πετροβάμβακα, αλλά δεν πρέπει σε καμιά περίπτωση να επιτρέπεται να συμπυκνωθεί μέσα στη μάζα του υλικού. Επομένως, ο πετροβάμβακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κατασκευές τοιχοποιίας, αφού, για φυσιολογικά επίπεδα εξωτερικής και εσωτερικής υγρασίας, η τελευταία διαπερνά την τοιχοποιία, χωρίς ωστόσο να εγκλωβίζεται μέσα σ' αυτήν.

Αντίθετα, σε περιπτώσεις που η υγρασία, υπό τη μορφή υδρατμών, δεν μπορεί να διαπεράσει το δομικό στοιχείο, δεν συνιστάται η χρήση του πετροβάμβακα. Σε τέτοιες περιπτώσεις η υγρασία εγκλωβίζεται στην επιφάνεια μεταξύ του μονωτικού υλικού και του σκυροδέματος και αφενός μεν προκαλεί διάβρωση του φέροντος οργανισμού και αφετέρου δε παρατηρείται το φαινόμενο της θερμογέφυρας, αφού ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του πετροβάμβακα αυξάνεται δραματικά. Το ίδιο ισχύει και

για τη χρήση του πετροβάμβακα για θερμική προστασία βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Σ' αυτήν, όμως, την περίπτωση, και επειδή η θερμομόνωση αντικαθίσταται για άλλους λόγους περιοδικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με στεγανωτική μεμβράνη που θα αποτρέψει τη διείσδυση της υγρασίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων μετά την ξήρανση του πετροβάμβακα. Χάρης στην ανοιχτή δομή του υλικού, η υγρασία που έχει εγκλωβιστεί μέσα στη μάζα του μπορεί να εξατμιστεί όταν το υλικό εκτεθεί σε ξηρό περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει γιατί η υγρασία αντικαθιστά μόνο τον περιεχόμενο αέρα του πετροβάμβακα και δεν εισχωρεί στη μάζα των ινών, υπό την προϋπόθεση ότι οι τελευταίες έχουν υποστεί την κατάλληλη ειδική επεξεργασία αδιαβροχοποίησης κατά την παραγωγή. Βέβαια, σε μακροχρόνια έκθεση στην υγρασία, υπάρχει το ενδεχόμενο να παρατηρηθεί αλλοίωση των συνδετικών ρητινών του υλικού, με συνέπεια την αποκόλληση ινών από το σώμα του υλικού. Το γεγονός αυτό επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του πετροβάμβακα, που είναι ούτως ή άλλως χαμηλές, και μπορεί υπο συνθήκες να οδηγήσει σε προβλή-

Πίνακας 3: Αποτελέσματα για δοκίμια πάχους 50mm και πυκνότητας 50 και 175 kg/m³.

Τύπος	B-050				B-571			
Lot number	51343284 ^A				51523322C			
Πάχος	50mm				50mm			
Διαστάσεις	200x200mm		300x300mm		200x200mm		300x300mm	
Αριθ. Δειγμάτων	I	II	I	II	I	II	I	II
Μετρημένες Διαστάσεις (mm)	203x201	180x205	299x290	295x300	198x201	202x201	300x300	300x298
Μετρημένο Βάρος	105,6	99,7	267,1	252,8	305,5	315,3	703,3	732,5
Απορρόφηση νερού EN 1609			283,4	266,1			725,5	754,1
Διαφορά (max 1 Kg/m ²)			16,3	13,3			22	21,6
			0,19	0,15			0,24	0,24
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK)			0,03173	0,03164			0,03477	0,03463
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK) μετά από το EN 1609			0,03807	0,03456			0,04357	0,04748
Απορρόφηση νερού EN 12087(gr)	116,4	111,3	297,1	272,7	344	348,5	780,6	809,8
Διαφορά (gr)	10,8	11,6	30	19,9	38,5	33,2	77,3	77,3
(max 3 Kg/m ²)	0,26	0,31	0,34	0,23	0,96	0,82	0,85	0,86
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK) μετά από το EN 12087			0,03772	0,03661			0,04390	0,04367
Αντοχή σε συμπίεση EN 826							15,4 kPa	18,4 kPa
Συντελεστής θερμικής Αγωγιμότητας μετά από την Ξήρανση			0,03268	0,03224			0,03282	0,03350

ματα μόνο στην περίπτωση χρήσης του πετροβάμβακα ως βάσης για σύνθετα υλικά

Με βάση αυτές τις διαπιστώσεις, δεν υπάρχει μείζον πρόβλημα αν ο πετροβάμβακας βραχεί κατά τη διάρκεια της κατασκευής, είτε κατά την εφαρμογή του, είτε στο διάστημα που είναι αποθηκευμένος, υπό την προϋπόθεση ότι εν συνεχεία θα αποθηκευτεί με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται ο επαρκής για την ξήρανση αερισμός του.

Εν κατακλείδι, η παραπάνω σειρά πειραμάτων, εστιάστηκε στο θεωρούμενο ως πλέον αδύνατο σημείο του πετροβάμβακα, που είναι η επίδραση της υγρασίας. Παρά το γεγονός ότι δεν είναι υδρόφοβο υλικό, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν, η συμπεριφορά του στην υγρασία δεν αποτελεί πρόβλημα για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Συνεκτιμώντας και τις εξαιρετικές ιδιότητες του υλικού σε ό,τι αφορά στην ηχομόνωση και στην πυραντοχή, καθώς και το χαμηλό κόστος του σε σχέση με

την εξηλασμένη πολυστερίνη, ο πετροβάμβακας αποτελεί μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα πρόταση θερμομονωτικού υλικού για ένα μεγάλο μέρος των κτιριακών εφαρμογών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Προς το Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων για τη χρηματοδότηση στα πλαίσια του προγράμματος «ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΣ» του υποψηφίου διδάκτορα Αν.Καραμάνου .

Προς τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας για τη συγχρηματοδότηση στα πλαίσια του προγράμματος ΕΠΑΝ του έργου «Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Καινοτόμων Προϊόντων Πετροβάμβακα για την Ενεργειακή Αναβάθμιση Υφιστάμενων και Νεόδμητων Κτιρίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αραβαντινός, Δ., 2000. σημειώσεις για το μάθημα Οικοδομικής ΙΙ, Η Θερμομόνωση των κτιρίων και τα θερ-

Πίνακας 4: Αποτελέσματα για δοκίμια πάχους 80mm πυκνότητας 50 kg/m³ και πάχους 50mm πυκνότητας 175 kg/m³.

Τύπος	B-050				B-571			
Lot number	51312277C				524935028			
Πάχος	80mm				30mm			
Διαστάσεις	200x200mm		300x300mm		200x200mm		300x300mm	
Αριθ. Δειγμάτων	I	II	I	II	I	II	I	II
Μετρημένες Διαστάσεις (mm)	200x200	200x200	300x300	300x300	200x200	200x200	300x300	300x300
Μετρημένο Βάρος	152.6	154	345.4	343.8	212,4	206,9	430,1	435,1
Απορρόφηση νερού EN 1609	168.30	169.70	373.60	369.9				
Διαφορά (max 1 Kg/m ²)	15.7	18.3	26.1	26.1				
	0.39	0.46	0.29	0.31				
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK)			0.0329	0.0334			0,03298	0,0399
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK) <u>μετά από το EN 1609</u>			0.03654	0.03422				
Απορρόφηση νερού EN 12087(gr)	172.2	175.1	384.0	381.1	235,0	224,9	475,3	474,1
Διαφορά (gr) (max 3 Kg/m ²)	19.6	23.7	38.6	37.3	22,6	18	45,2	39
	0.49	0.59	0.43	0.41	0,565	0,45	0,502	0,433
Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/mK) <u>μετά από το EN 12087</u>			0.0658	0.0631			0,04533	0,0414
Αντοχή σε συμπίεση EN 826							16,90	17,82
Ποσοστό της αρχικής αντοχής που χάνει							41,3%	38,70%
Συντελεστής θερμικής Αγωγιμότητας <u>μετά από την Ξήρανση</u>			0.03506	0.03523			0,0334	0,0342

μομονωτικά υλικά, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο, Θεσ/νίκη.

Καρέκος, Σ.Ι., 2001. Μετάδοση Θερμότητας – Θερμομόνωση, Αθήνα.

Κούκης, Σ.Σ., 2001. Δομική Τεχνολογία – Υλικά και εφαρμογές, Αθήνα

Evseeva, L.E. and S.A. Tanaeva, 2004. Influence of impregnation on the thermal properties of heat insulating fibrous materials, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 77, No. 2, pp.99-102.

ICAP: Κλαδική μελέτη «Μονωτικά Υλικά», 2000.

Jintu Fan, Xiaoyin Cheng, Yi-Song Chen, 2003. An experimental investigation of moisture absorption and condensation in fibrous insulations under low temperature, Experimental Thermal and Fluid Science, 27, pp.723–729.

Karamanos, A.K., A.M. Papadopoulos and D. Anastaselos, 2004. Heat transfer phenomena in fibrous insu-

lating materials, 2004 IASME/WSEAS International Conference on "HEAT AND MASS TRANSFER", Corfu 17 - 19 August, CD Rom.

Milandri, A., F. Aslanj, G. Jeandel and J.R. Roche, 2002. Heat transfer by radiation and conduction in fibrous media without axial symmetry, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 74, pp. 585-603.

Papadopoulos, A.M., 2005. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments, Energy and Buildings, Volume 37, Issue 1, pp.77-86.

WKSZ: Zeitschrift für Wärmeschutz Kälteschutz Schallschutz BrandSchutz, Neue Folge, Heft 46, 2002

Xiaoyin Cheng, Jintu Fan, 2004. Simulation of heat and moisture transfer with phase change and mobile condensates in fibrous insulation, International Journal of Thermal Sciences, 43, pp.665–676.