

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική Αξιολόγηση Θερμικών Ιδιοτήτων και
Συμπεριφοράς Μονωτικών Υλικών σε Συνθήκες Φωτιάς**

ΚΑΛΑΡΓΑΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης

Υπεύθυνη Καθηγήτρια: Κ^α Μαρία Φούντη

Αθήνα

Οκτώβριος 2013

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την καθηγήτριά μου, κυρία Μαρία Φούντη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ελένη-Μαρίνα Ασημακοπούλου, για τον χρόνο που μου αφιέρωσε, την πολύτιμη βοήθειά της, τις χρήσιμες συμβουλές και διορθώσεις της. Επίσης, ευχαριστώ τον κύριο Διονύση Κολαΐτη για τις πολύτιμες συμβουλές και διορθώσεις του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα αγαπημένα μου πρόσωπα, που με στήριξαν και με βοήθησαν όλα αυτά τα χρόνια.

Πρόλογος

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η πειραματική αξιολόγηση των θερμικών ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των μονωτικών υλικών σε συνθήκες φωτιάς. Συγκεκριμένα, με τη χρήση θερμοιδόμετρου, στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης, μετράται πειραματικά η θερμογόνος ικανότητα διάφορων μονωτικών υλικών. Στα ίδια μονωτικά υλικά μετράται πειραματικά και η θερμική αγωγιμότητα με τη χρήση της δυναμικής μεθόδου.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία εστιάζει σε δυο βασικούς άξονες: ευρωπαϊκοί κανονισμοί σχετικά με την κατηγοριοποίηση των δομικών υλικών και στην αξιολόγηση εξωτερικής θερμομόνωσης ως προς την πυρασφάλεια. Στα πλαίσια της βιβλιογραφικής αναφοράς επιχειρείται η ανάδειξη της ανάγκης εύρεσης μιας εναρμονισμένης μεγάλης κλίμακας δοκιμής προσόψεων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση στα μονωτικά υλικά. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στην κατηγοριοποίηση των μονωτικών υλικών και στις ιδιότητες των μονωτικών υλικών που εξετάστηκαν πειραματικά. Στο τέλος του κεφαλαίου, γίνεται σύγκριση στα βασικότερα χαρακτηριστικά των μονωτικών υλικών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το θερμοιδόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της θερμογόνου ικανότητας και αναλύεται εκτενώς η θεωρία που διέπει τη λειτουργία του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις της ανώτερης θερμογόνου ικανότητας που προέκυψαν στα μονωτικά υλικά, ο υπολογισμός της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται αναφορά στη δυναμική μέθοδο μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας και στον τρόπο λειτουργίας των μηχανημάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τα αντίστοιχα βιβλιογραφικά αποτελέσματα για κάθε μονωτικό υλικό. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας των εξετασθέντων μονωτικών υλικών.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, τα οποία αφορούν τις πειραματικές μετρήσεις της θερμογόνου ικανότητας και της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας.

Περιεχόμενα

1. Διεθνείς κώδικες και πρότυπα.....	1
1.1. Γενικές πληροφορίες και πεδίο εφαρμογής	1
1.2. Ευρωπαϊκοί Κανονισμοί Πυρκαγιάς.....	2
1.2.1. Κατασκευή δομικών προϊόντων (CPD).....	2
1.2.2. Το Ευρωπαϊκό σύστημα (The Euroclass system)	3
1.3. Κατηγορίες και κριτήρια	11
1.4. Μηχανική της Πυρασφάλειας (Fire Safety Engineering - FSE).....	15
1.5. Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για μονωτικά υλικά	17
1.6. Αξιολόγηση υλικών προσόψεων κτιρίων ως προς την πυρασφάλεια.....	18
1.6.1. Δοκιμές προσόψεως.....	18
1.6.2. Χαρακτηριστικά δοκιμών προσόψεως.....	19
1.7. Αξιολόγηση εξωτερικής θερμομόνωσης ως προς την πυρασφάλεια	22
1.7.1. Εισαγωγή	22
1.7.2. Μέθοδοι Δοκιμών	22
2. Μονωτικά Υλικά.....	27
2.1. Εισαγωγή.....	27
2.2. Ιδιότητες μονωτικών υλικών.....	28
2.3. Ταξινόμηση των Μονωτικών Υλικών και η Ευρωπαϊκή Αγορά	28
2.4. Αφρός Πολυουρεθάνης	29
2.4.1. Εισαγωγή	29
2.4.2. Χρήσεις του αφρού πολυουρεθάνης.....	30
2.4.3. Χαρακτηριστικά του Αφρού Πολυουρεθάνης.....	32
2.5. Πετροβάμβακας.....	36
2.5.1. Εισαγωγή	36
2.5.2. Χρήσεις του πετροβάμβακα.....	37
2.5.3. Χαρακτηριστικά του Πετροβάμβακα	38
2.6. Εξηλασμένη Πολυστερίνη	42
2.6.1. Εισαγωγή	42

2.6.2.	Χρήσεις της εξηλασμένης πολυστερίνης.....	42
2.6.3.	Χαρακτηριστικά της εξηλασμένης πολυστερίνης	43
2.7.	Διογκωμένη Πολυστερίνη.....	47
2.7.1.	Εισαγωγή	47
2.7.2.	Χρήσεις της διογκωμένης πολυστερίνης.....	48
2.7.3.	Χαρακτηριστικά της διογκωμένης πολυστερίνης.....	49
2.8.	Αξιολόγηση μονωτικών υλικών.....	54
3.	Αδιαβατικό Θερμιδόμετρο Τύπου Οβίδας Οξυγόνου	55
3.1.	Εισαγωγή.....	55
3.2.	Βασικές έννοιες.....	57
3.2.1.	Εσωτερική ενέργεια της καύσης.....	57
3.2.2.	Ενθαλπία της καύσης.....	59
3.3.	Πειραματική διάταξη θερμιδόμετρου	61
3.4.	Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων.....	62
3.5.	Υγρασιόμετρο	67
3.6.	Επεξεργασία των μετρήσεων	68
3.7.	Πειραματικές μετρήσεις.....	69
3.7.1.	Αφρός Πολυουρεθάνης.....	69
3.7.2.	Πετροβάμβακας	75
3.7.3.	Εξηλασμένη πολυστερίνη.....	78
3.7.4.	Διογκωμένη πολυστερίνη	82
3.8.	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	86
4.	Μέτρηση Θερμικής Αγωγιμότητας	89
4.1.	Εισαγωγή.....	89
4.2.	Μηχάνημα CT metre	90
4.2.1.	Χαρακτηριστικά του μηχανήματος CT metre	90
4.2.2.	Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων	92
4.3.	Μηχάνημα ISOMET model 2104	94
4.3.1.	Χαρακτηριστικά του μηχανήματος ISOMET model 2104.....	94
4.3.2.	Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων	95
4.4.	Φούρνοι.....	96

4.5.	Πειραματικές Μετρήσεις	98
4.5.1.	Πετροβάμβακας	98
4.5.2.	Αφρός Πολυουρεθάνης.....	108
4.5.3.	Εξηλασμένη Πολυστερίνη	113
4.5.4.	Διογκωμένη Πολυστερίνη.....	119
4.6.	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	125
5.	Γενικά Συμπεράσματα	127

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές ακουστότητας, EN ISO 1182	4
1.2	Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές του προσδιορισμού της θερμαντικής αξίας, EN ISO 1716.....	5
1.3	SBI δοκιμή, σχηματική αναπαράσταση.....	6
1.4	SBI δοκιμή, φωτογραφία κατά τη διάρκεια της δοκιμής, EN 13823.....	7
1.5	Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές της αναφλεξιμότητας, EN ISO 11925-2.	9
1.6	Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές της συμπεριφοράς των δαπέδων σε καύση, EN ISO 9239-1.....	10
1.7	Διαδικασία μηχανικής ασφάλειας της φωτιάς (FSE).....	16
1.8	Διάδοση πυρκαγιάς.	18
1.9	Διάγραμμα δοκιμής ISO 13785-2.	19
1.10	Δοκιμή ISO 13785-2.....	19
1.11	Δοκιμή DIN 4102-20	20
1.12	Δοκιμή BS 8414.....	20
1.13	Δοκιμή Onorm B 3800-5.....	21
1.14	Δοκιμή SP Fire 105.....	21
1.15	Δοκιμή BS 8414-1.....	23
1.16	Δοκιμή DIN E 4102-20.	24
2.1	Στέγη μονωμένη με αφρό πολυουρεθάνης.....	31
2.2	Τοξικοί Παράγοντες Κινδύνου του αφρού πολυουρεθάνης.	33
2.3	Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας για τον αφρό πολυουρεθάνης.	34
2.4	Δωμάτιο μονωμένο με πετροβάμβακα.....	37

2.5	Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας για τον πετροβάμβακα.	40
2.6	Μόνωση κατοικιών με εξηλασμένη πολυστερίνη.....	43
2.7	Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας για την εξηλασμένη πολυστερίνη.....	45
2.8	Σφαιρίδια διογκωμένης πολυστερίνης διαμέτρου περίπου 2 χιλιοστών.....	48
2.9	Μόνωση κατοικίας με διογκωμένη πολυστερίνη.....	49
2.10	Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας για την εξηλασμένη πολυστερίνη.....	51
3.1	Θερμιδόμετρο 6200 της Parr Instrument Company.....	56
3.2	Εσωτερική διάταξη των επιμέρους στοιχείων που αποτελούν το θερμιδόμετρο οβίδας οξυγονου.....	56
3.3	Τυπική μορφή θερμοκρασιακής διακύμανσης για την υπόδειξη εύρεσης των χαρακτηριστικών θερμοκρασιών T_i , T_a , T_b , T_c και T_f	58
3.4	Οβίδα οξυγόνου 1108P της εταιρείας Parr Instrument Company.....	61
3.5	Βασική πειραματική διάταξη.....	62
3.6	Διάταξη πειραματικής διάταξης στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης.....	62
3.7	Ψυκτική εγκατάσταση και σύστημα τροφοδότησης νερού 6510 της εταιρείας Parr Instrument Company.....	63
3.8	Πρέσα 2811 της εταιρείας Parr Instrument Company για τη δημιουργία δισκίων.....	64
3.9	Ψηφιακή ζυγαριά AB265-S/FACT της Mettler Toledo.....	64
3.10	Τοποθέτηση του σύρματος ανάφλεξης.....	65
3.11	Πλήρωση της οβίδας με οξυγόνο.....	65
3.12	Τοποθέτηση της οβίδας και εισαγωγή των ηλεκτροδίων.....	66
3.13	Παρουσίαση των τριών χαρακτηριστικών περιόδων κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης.....	67
3.14	Υγρασιόμετρο MJ33 της Mettler Toledo.....	67

3.15	Αφρός πολυουρεθάνης της DEN BRAVEN.	70
3.16	Αφρός πολυουρεθάνης κατά τη διάρκεια της διόγκωσης και στερεοποίησης.	71
3.17	Αφύγρανση του αφρού πολυουρεθάνης.....	72
3.18	Αφρός πολυουρεθάνης σε μορφή δισκίου.	72
3.19	Τοποθέτηση του σύρματος ανάφλεξης.	73
3.20	Διάγραμμα αφρού πολυουρεθάνης (Μέτρηση PUR4).....	74
3.21	Πετροβάμβακας.....	75
3.22	Αφύγρανση του πετροβάμβακα.	76
3.23	Πετροβάμβακας σε μορφή δισκίου.	76
3.24	Τοποθέτηση του σύρματος ανάφλεξης.	77
3.25	Το δείγμα στο τέλος του πειράματος.	77
3.26	Το δείγμα με χρήση βενζοϊκού οξέος.	78
3.27	Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS).	78
3.28	Αφύγρανση της εξηλασμένης πολυστερίνης.	79
3.29	Εξηλασμένη πολυστερίνη σε μορφή δισκίου.....	79
3.30	Τοποθέτηση του σύρματος ανάφλεξης.	80
3.31	Διάγραμμα XPS (Μέτρηση XPS1).	81
3.32	Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS).	82
3.33	Αφύγρανση της διογκωμένης πολυστερίνης.....	82
3.34	Διογκωμένη πολυστερίνη σε μορφή δισκίου.	83
3.35	Τοποθέτηση του σύρματος ανάφλεξης.	83
3.36	Διάγραμμα EPS (Μέτρηση EPS7).	85
3.37	Διάγραμμα για την ανώτερη θερμογόνο δύναμη των μονωτικών υλικών. ..	86
3.38	Διάγραμμα για την κατώτερη θερμογόνο δύναμη των μονωτικών υλικών. ..	86

4.1	Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή λ (W/mK) για διάφορα υλικά.	89
4.2	Συσκευή CT metre.	90
4.3	Συρμάτινος ανιχνευτής.....	91
4.4	Εσωτερικό ανιχνευτή.....	91
4.5	Τοποθέτηση του ανιχνευτή.	92
4.6	Μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήση του χρόνου (πειραματικά σημεία).	93
4.7	Μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήση του λογάριθμου του χρόνου (πειραματικά σημεία).	93
4.8	Συσκευή ISOMET model 2104.....	94
4.9	Επιφανειακός ανιχνευτής API 210411.....	95
4.10	Τοποθέτηση μονωτικού υλικού σε πλαστική μεμβράνη.....	96
4.11	Φούρνος Carbolite.....	97
4.12	Φούρνος Nabertherm.	97
4.13	Δείγμα πετροβάμβακα.....	98
4.14	Αλλαγή χρώματος πετροβάμβακα.	100
4.15	Υπολείμματα πετροβάμβακα στον δίσκο..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
4.16	Σύγκριση πετροβάμβακα σε συνθήκες περιβάλλοντος (αριστερά) και πετροβάμβακα στους 600°C (δεξιά).....	101
4.17	Τοποθέτηση πετροβάμβακα σε πλαστική μεμβράνη.	101
4.18	Στιγμιότυπο από τη μέτρηση του πετροβάμβακα.	102
4.19	Θερμική αγωγιμότητα του πετροβάμβακα συναρτήση της θερμοκρασίας.	103
4.20	Θερμική αγωγιμότητα του πετροβάμβακα συναρτήση της θερμοκρασίας.	104
4.21	Σύγκριση θερμικής αγωγιμότητας 1 ^{ης} και 2 ^{ης} μεθόδου.....	105
4.22	Αδιαστατοποιημένη θερμική αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας.	107
4.23	Δείγμα αφρού πολυουρεθάνης.	98

4.24	Αλλαγή χρώματος αφρού πολυουρεθάνης στους 150°C..	100
4.25	Αλλαγή χρώματος αφρού πολυουρεθάνης στους 200°C ... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
4.26	Στιγμιότυπο από τη μέτρηση του αφρού πολυουρεθάνης.....	102
4.27	Θερμική αγωγιμότητα του αφρού πολυουρεθάνης συναρτήση της θερμοκρασίας.	103
4.28	Αδιαστατοποιημένη θερμική αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας.	107
4.29	Δείγμα εξηλασμένης πολυστερίνης.	98
4.30	Αλλαγή μεγέθους εξηλασμένης πολυστερίνης στους 110°C.....	100
4.31	Αλλαγή μεγέθους εξηλασμένης πολυστερίνης στους 120°C Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
4.32	Συρρίκνωση εξηλασμένης πολυστερίνης στους 150°C. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
4.33	Στιγμιότυπο από τη μέτρηση της εξηλασμένης πολυστερίνης	102
4.34	Θερμική αγωγιμότητα της εξηλασμένης πολυστερίνης συναρτήση της θερμοκρασίας.	103
4.35	Αδιαστατοποιημένη θερμική αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας.	107
4.36	Δείγμα διογκωμένης πολυστερίνης.....	98
4.37	Αλλαγή μεγέθους διογκωμένης πολυστερίνης στους 120°C..	100
4.38	Αλλαγή μεγέθους διογκωμένης πολυστερίνης στους 150°C Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
4.39	Στιγμιότυπο από τη μέτρηση της διογκωμένης πολυστερίνης.....	102
4.40	Θερμική αγωγιμότητα της διογκωμένης πολυστερίνης συναρτήση της θερμοκρασίας.	103
4.41	Αδιαστατοποιημένη θερμική αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας.	107
4.42	Θερμική αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας.	103

Κατάλογος πινάκων

1.1	Κατηγορίες των ευρωπαϊκών κατηγοριών με ενδεικτικές περιγραφές και σενάρια φωτιάς.....	11
1.2	Κατηγορίες των δομικών προϊόντων σε σχέση με τη φωτιά.....	12
1.3	Κατηγορίες των προϊόντων που χρησιμοποιούνται στα δάπεδα σε σχέση με τη φωτιά.....	14
1.4	Σύγκριση Ευρωπαϊκού και Γερμανικού Συστήματος Κατηγοριοποίησης δομικών υλικών.	14
1.5	Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για συγκεκριμένα μονωτικά υλικά.	17
1.6	Διαδεδομένα τεστ προσόψεως σε φωτιά.....	19
1.7	Χαρακτηριστικά δοκιμών μεγάλης κλίμακας.	21
2.1	Ταξιμόμηση μονωτικών υλικών βάσει της χημικής ή φυσικής δομής τους.	29
2.2	Χαρακτηριστικές τιμές της Πυκνότητας και της Θερμικής Αγωγιμότητας του αφρού πολουρεθάνης.	32
2.3	Κατάσταση τοξικών συστατικών για τον αφρό πολουρεθάνης.	32
2.4	Χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας του αφρού πολουρεθάνης.	33
2.5	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του αφρού πολουρεθάνης.....	34
2.6	Βαθμονόμηση της αντοχής του αφρού πολουρεθάνης.	35
2.7	Χαρακτηριστικά αφρού πολουρεθάνης.....	35
2.8	Χαρακτηριστικές τιμές της Πυκνότητας και της Θερμικής Αγωγιμότητας του πετροβάμβακα.	38
2.9	Κατάσταση τοξικών συστατικών για τον πετροβάμβακα.....	39
2.10	Χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας του πετροβάμβακα.....	39
2.11	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του πετροβάμβακα.	40
2.12	Βαθμονόμηση της αντοχής του πετροβάμβακα.	41

2.13	Χαρακτηριστικά πετροβάμβακα.	41
2.14	Χαρακτηριστικές τιμές της Πυκνότητας και της Θερμικής Αγωγιμότητας της εξηλασμένης πολυστερίνης.	44
2.15	Τοξικά συστατικά που περιέχονται στην εξηλασμένη πολυστερίνη.	44
2.16	Χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας της εξηλασμένης πολυστερίνης.	45
2.17	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξηλασμένης πολυστερίνης.	46
2.18	Βαθμονόμηση της αντοχής της εξηλασμένης πολυστερίνης.	46
2.19	Χαρακτηριστικά της της εξηλασμένης πολυστερίνης.	47
2.20	Χαρακτηριστικές τιμές της Πυκνότητας και της Θερμικής Αγωγιμότητας της διογκωμένης πολυστερίνης.	50
2.21	Τοξικά συστατικά που περιέχονται στην διογκωμένη πολυστερίνη.	50
2.22	Χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας της διογκωμένης πολυστερίνης.	51
2.23	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διογκωμένης πολυστερίνης.	52
2.24	Βαθμονόμηση της αντοχής της διογκωμένης πολυστερίνης.	52
2.25	Χαρακτηριστικά της διογκωμένης πολυστερίνης.	53
2.26	Σύγκριση μονωτικών υλικών.	54
3.1	Προσδιορισμός της πυκνότητας.	71
3.2	Πειραματικές Θ.Ι μετρήσεις αφρού πολυουρεθάνης σε μορφή δισκίου.	73
3.3	Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για τον αφρό πολυουρεθάνης.	75
3.4	Προσδιορισμός της πυκνότητας.	75
3.5	Πειραματικές μετρήσεις εξηλασμένης πολυστερίνης σε μορφή δισκίου. ...	80
3.6	Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για την εξηλασμένη πολυστερίνη.	81
3.7	Πειραματικές μετρήσεις διογκωμένης πολυστερίνης σε μορφή δισκίου.	84
3.8	Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για την διογκωμένη πολυστερίνη.	85
3.9	Πειραματικές μετρήσεις των μονωτικών υλικών που εξετάστηκαν.	87

4.1	Προδιαγραφές της συσκευής CT metre.	91
4.2	Τύποι και προδιαγραφές ανιχνευτών.	94
4.3	Ακρίβεια των μετρήσεων.	95
4.4	Μεταβολή των πυκνοτήτων των δειγμάτων.	99
4.5	Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας για τον πετροβάμβακα (διαφορετικά δείγματα).	102
4.6	Μεταβολή των πυκνοτήτων των δειγμάτων.	103
4.7	Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας για τον πετροβάμβακα (ίδια δείγματα).	104
4.8	Αδιαστατοποιημένες βιβλιογραφικές τιμές.....	106
4.9	Αδιαστατοποιημένες τιμές της 1 ^{ης} μεθόδου.	106
4.10	Χαρακτηριστικά των αδιαστατοποιημένων καμπυλών του πετροβάμβακα.	107
4.11	Μεταβολή των πυκνοτήτων των δειγμάτων.	108
4.12	Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας του αφρού πολυουρεθάνης.	110
4.13	Αδιαστατοποιημένες βιβλιογραφικές τιμές.....	106
4.14	Αδιαστατοποιημένες τιμές της πειραματικής μεθόδου.....	106
4.15	Χαρακτηριστικά των αδιαστατοποιημένων καμπυλών του αφρού πολυουρεθάνης.	107
4.16	Μεταβολή των πυκνοτήτων των δειγμάτων.	114
4.17	Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας της εξηλασμένης πολυστερίνης.	116
4.18	Αδιαστατοποιημένες βιβλιογραφικές τιμές.....	106
4.19	Αδιαστατοποιημένες τιμές της πειραματικής μεθόδου.....	106
4.20	Χαρακτηριστικά των αδιαστατοποιημένων καμπυλών της εξηλασμένης πολυστερίνης.	107
4.21	Μεταβολή των πυκνοτήτων των δειγμάτων.	120
4.22	Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας της διογκωμένης πολυστερίνης.	121

4.23	Αδιαστατοποιημένες βιβλιογραφικές τιμές.....	106
4.24	Αδιαστατοποιημένες τιμές της πειραματικής μεθόδου.....	106
4.25	Χαρακτηριστικά των αδιαστατοποιημένων καμπυλών της διογκωμένης πολυστερίνης.....	107

Πίνακας Συμβόλων

t_f	Χρόνος παρατήρησης φλόγας [s]
Δm	Απώλεια μάζας του δοκιμίου [%]
ΔT	Άνοδος της θερμοκρασίας του κλιβάνου [$^{\circ}\text{C}$]
PCS	Θερμογόνος δύναμη [MJ/kg ή MJ/m^2]
HRR	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας [kW]
SPR	Ρυθμός εξαγωγής καπνού [m^2/s]
FIBRA	Δείκτης ρυθμού ανάπτυξης της φωτιάς [W/s]
$\text{THR}_{600\text{s}}$	Συνολική έκλυση θερμότητας [MJ]
SMOGRA	Ρυθμός αύξησης του καπνού [m^2/s^2]
$\text{TSP}_{600\text{s}}$	Συνολική παραγωγή καπνού [MJ]
t	Ο χρόνος που έχει παρέλθει από την έναρξη της δοκιμής [s]
F_s	Εξάπλωση της φλόγας σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα [mm]
CHF	Κρίσιμη ροή θερμότητας [kW/m^2]
λ	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
ρ	Πυκνότητα [kg/m^3]
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα [$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$]
HHV	Ανώτερη θερμογόνος δύναμη [kJ/kg ή kcal/kg]
LHV	Κατώτερη θερμογόνος δύναμη [kJ/kg ή kcal/kg]
$H_{c.k.}$	Θερμογόνος δύναμη του καυσίμου [cal/g]
$H_{c.s.a.}$	Θερμογόνος δύναμη του σύρματος ανάφλεξης [cal/g]
U	Εσωτερική ενέργεια [J]
p	Πίεση [Pa]
m_k	Μάζα του καυσίμου [g]
$m_{s.a.}$	Μάζα σύρματος ανάφλεξης [g]
T_a	Θερμοκρασία τη χρονική στιγμή της έναυσης της καύσης [$^{\circ}\text{C}$]

T_c	Θερμοκρασία τη χρονική στιγμή της ολοκλήρωσης της καύσης [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	Θερμοκρασία τη χρονική στιγμή του τέλους της μέτρησης [$^{\circ}\text{C}$]
a	Χρονική στιγμή έναυσης της καύσης [min]
c	Χρονική στιγμή εμφάνισης της μέγιστης θερμοκρασίας [min]
i	Αρχή μέτρησης [min]
f	Τέλος μέτρησης [min]
r_1	Διορθωτική παράμετρος
r_2	Διορθωτική παράμετρος
H	Ενθαλπία [J]
ΔH	Μεταβολή της ενθαλπίας [J]
ΔT_{β}	Παρατηρούμενη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την βαθμονόμηση [$^{\circ}\text{C}$]
$m_{\beta.o.}$	Μάζα του βενζοϊκού οξέος [g]
$H_{c,\beta.o.}$	Θερμογόνος δύναμη του βενζοϊκού οξέος [cal/g]
R	Παγκόσμια σταθερά των αερίων [J/mol · K]
n	Αριθμός των moles
$m_{\alpha.\delta.}$	Μάζα αρχικού δείγματος [g]
$m_{\xi.\delta.}$	Μάζα του ξηρού δείγματος [g]
MC	Ποσοστό υγρασίας του περιέχεται στο δείγμα [%]
μ_{H_2O}	Μάζα του υδρατμού ανά μονάδα μάζας καιόμενου καυσίμου
r_{H_2O}	Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του υδρατμού [kJ/kg]
x_i	Μετρούμενες τιμές
N	Αριθμός των τιμών
x	Τυπική απόκλιση
R	Αντίσταση [Ω]
I	Ένταση του ρεύματος [A]
L	Μήκος του σύρματος [m]

1. Διεθνείς κώδικες και πρότυπα

1.1. Γενικές πληροφορίες και πεδίο εφαρμογής

Η πορεία μιας πυρκαγιάς σε ένα κτίριο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυραντοχή των δομικών στοιχείων της κατασκευής αλλά και της εξωτερικής τοιχοποιίας. Η πυραντοχή ορίζεται ως η ικανότητα ενός δομικού στοιχείου ή μιας κατασκευής να αντιστέκεται στην πυρκαγιά ικανοποιητικά χωρίς να μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του/της.

Έχουν θεσπιστεί πολλές διατάξεις, κανονισμοί, κώδικες και πρότυπα στην ελληνική, ευρωπαϊκή και παγκόσμια νομοθεσία προκειμένου να θεσμοθετηθεί η πυραντοχή των υλικών κατασκευής. Τα κριτήρια ακεραιότητας και θερμομόνωσης ορίζουν μέχρι τότε η απρόσβλητη από φωτιά μεριά του δομικού στοιχείου δεν επιτρέπει στα προϊόντα καύσης την είσοδο. Τα κριτήρια αυτά είναι απαραίτητα για την εκτίμηση προϋποθέσεων λειτουργικότητας και φραγμών φωτιάς στις δομικές κατασκευές όταν προσβληθούν από πυρκαγιά. Με βάση αυτά τα κριτήρια επιλέγεται η πυραντοχή τοιχομάτων και δαπέδων [3].

Η σύνθεση των κύριων στοιχείων του εξωτερικού περιβλήματος των κτιρίων καθώς και των πιο αδύνατων σημείων των δομικών κατασκευών (παράθυρα, πόρτες) καθορίζεται από την ακεραιότητά τους όταν εκτίθενται φλόγες, καυσαέρια και την θερμομόνωσή τους.

Το κριτήριο της ευστάθειας αναφέρεται στην ικανότητα ενός δομικού στοιχείου να μην παραμορφώνεται πέρα από ορισμένο όριο όταν εκτεθεί σε πυρκαγιά και είναι φορτισμένο σε ένα μέγιστο φορτίο. Συνεπώς, η ευστάθεια των δοκών, πλακών, στύλων κ.τ.λ. πρέπει να είναι τέτοια ώστε σε περίπτωση εμφάνισης πυρκαγιάς να μην παραμορφωθούν πέρα από κάποιο ορισμένο όριο. Υπάρχουν κανονισμοί οι οποίοι επιβάλλουν τον ελάχιστο βαθμό πυραντοχής για διάφορα δομικά στοιχεία ανάλογα με το μέγεθος και τη χρήση των δομικών κατασκευών.

Οι κανονισμοί για τη πυρασφάλεια των κτιρίων αφορούν την αντίσταση στη φωτιά (Fire Resistance), την αντίδραση στη φωτιά (Reaction-to-Fire) και τη διάδοση της φωτιάς (Fire Propagation). Η αντίσταση στη φωτιά σχετίζεται με την ακεραιότητα του κτιρίου (μόνωση, σταθερότητα της κατασκευής) υπό την επίδραση πυρκαγιάς. Ενώ η αντίδραση στη φωτιά ενός υλικού ασχολείται με χαρακτηριστικά, όπως η ανάφλεξη, εξάπλωση της φλόγας, ρυθμός έκλυσης θερμότητας, ρυθμός παραγωγής καπνού και αερίου, η εμφάνιση σταγονιδίων και καμμένων κομματιών του υλικού [2].

1.2. Ευρωπαϊκοί Κανονισμοί Πυρκαγιάς

1.2.1. Κατασκευή δομικών προϊόντων (CPD)

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε στις 21 Δεκεμβρίου του 1988 την οδηγία 89/106/ΕΟΚ-CPD (Construction Products Directive) που αφορά τα προϊόντα δομικών κατασκευών, για να προωθήσει το ελεύθερο εμπόριο των οικοδομικών προϊόντων εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των χωρών εκτός της Ευρωπαϊκής Ένωσης που υπακούν στην οδηγία (89/106/ΕΟΚ-CPD) όπως η Νορβηγία.

Η οδηγία περιλαμβάνει έξι βασικές απαιτήσεις:

- Μηχανική αντοχή και ευστάθεια
- Ασφάλεια σε περίπτωση πυρκαγιάς
- Ασφάλεια κατά τη χρήση
- Προστασία κατά του θορύβου
- Εξοικονόμηση ενέργειας και συγκράτηση της θερμότητας
- Φιλικά προς το περιβάλλον

Πράγματι, το σύνολο των ευρωπαϊκών δραστηριοτήτων που αφορούν την ταξινόμηση και τυποποίηση για την παραγωγή προϊόντων στηρίζεται στην βασική απαίτηση της ασφάλειας σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Για να προσδιοριστεί εάν ένα δομικό προϊόν πληρεί τις προδιαγραφές της οδηγίας 89/106/ΕΟΚ-CPD, έχει θεσπιστεί το ευρωπαϊκό πρότυπο (European Committee for Standardization-CEN). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης ανέπτυξε έγγραφα ταξινόμησης (ISO) σύμφωνα με την Συμφωνία της Βιέννης που υπεγράφη στις 27 Ιουνίου του 1991.

Η επίπτωση της οδηγίας είναι ότι τα δομικά προϊόντα πρέπει να έχουν ταξινομηθεί με βάση την αντιστάση στη φωτιά με τα ίδια πρότυπα σε όλη την Ευρώπη. Το Ευρωπαϊκό πρότυπο ταξινόμησης προσδιορίζει την απόδοση του προϊόντος αλλά δεν κάνει κανένα σχόλιο σχετικά με το τί απόδοση θα έπρεπε να έχει. Το επίπεδο ασφάλειας ενός προϊόντος που χρησιμοποιείται σε ένα κτίριο καθορίζεται από τους όρους δόμησης που έχουν θεσπιστεί στο συγκεκριμένο κράτος μέλος.

Ένα κράτος μέλος που ρυθμίζει ένα ορισμένο επίπεδο ασφάλειας θα είναι σε θέση να προσδιορίσει τις ιδιότητες της φωτιάς σε ένα δομικό προϊόν που αντιστοιχεί σε αυτό το επίπεδο, σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα ταξινόμησης. Τα προϊόντα που πληρούν τις βασικές απαιτήσεις της οδηγίας 89/106/ΕΟΚ-CPD φέρουν την επισήμανση "CE".

Μόλις ένα τυποποιημένο προϊόν αναπτυχθεί υπάρχει συνεχής ανάγκη για διαβεβαίωση της ποιότητας που σχετίζεται με το συγκεκριμένο πρότυπο. Η διαβεβαίωση της ποιότητας γίνεται με εκτεταμένη εφαρμογή και διαδικασίες δοκιμών του προϊόντος. Ο όμιλος του κλάδου φωτιάς (The Fire Sector Group) είναι αρμόδιος για την εξέταση των θεμάτων αυτών και τον καθορισμό λύσεων εάν προκύψουν προβλήματα [1].

1.2.2. Το Ευρωπαϊκό σύστημα (The Euroclass system)

Η ταξινόμηση ως προς την πυραντοχή των δομικών υλικών και στοιχείων γίνεται με βάση το πρότυπο EN 13501 (CEN, Μάρτιος 2002), το οποίο αποτελείται από :

- **EN 13501-1:** Ταξινόμηση σε επτά κλάσεις δεδομένων από δοκιμές αντίδρασης σε φωτιά.
- **EN 13501-2:** Ταξινόμηση βάσει δεδομένων από δοκιμές αντίδρασης σε φωτιά, με εξαίρεση των εγκαταστάσεων εξαερισμού.
- **EN 13501-3:** Ταξινόμηση βάσει δεδομένων από δοκιμές πυραντίστασης σε προϊόντα και στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε κτιριακές εγκαταστάσεις.
- **EN 13501-4:** Ταξινόμηση βάσει δεδομένων από δοκιμές πυραντίστασης σε στοιχεία συστημάτων ελέγχου καπνού.
- **EN 13501-5:** Ταξινόμηση στεγών βάσει δεδομένων από δοκιμές έκθεσης σε εξωτερική φωτιά.

Τον Μάρτιο του 2002 το ευρωπαϊκό πρότυπο (CEN) όρισε τις δοκιμές που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους, οι οποίες πρέπει να ακολουθούνται για τις διαδικασίες κατηγοριοποίησης σύμφωνα με την οδηγία 89/106/EOK-CPD [3].

1.2.2.1. Δοκιμή ακαυστότητας (Non-Combustibility test), EN ISO 1182

Ο σκοπός της δοκιμής της ακαυστότητας EN ISO 1182 είναι να προσδιορίσει τα προϊόντα που δεν θα συμβάλλουν σημαντικά ή και καθόλου σε μια πυρκαγιά. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Το δείγμα δοκιμής έχει κυλινδρικό σχήμα και εισάγεται μέσα σε ένα κατακόρυφο σωληνωτό φούρνο με θερμοκρασία περίπου 750 °C. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας που οφείλονται στην πιθανή καύση του δείγματος παρακολουθούνται με θερμοστοιχεία. Η φλόγα του δείγματος και η διάρκειά της παρατηρείται οπτικά. Μετά το τέλος της δοκιμής, προσδιορίζεται η απώλεια μάζας.



Σχήμα 1.1: Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές ακαυστότητας, EN ISO 1182.

Οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται για την κατάταξη σύμφωνα με την ευρωπαϊκή ταξινόμηση είναι η άνοδος της θερμοκρασίας του κλιβάνου (ΔT), η απώλεια μάζας του δοκιμίου (Δm) και ο χρόνος που παρατηρείται φλόγα (t_f) [1].

1.2.2.2. Δοκιμή προσδιορισμού θερμογόνου δύναμης (Bomb Calorimeter), EN ISO 1716

Η θερμογόνος δύναμη, όπως αυτή μετράται μέσω της δοκιμής EN ISO 1716 καθορίζει την εν δυνάμει μέγιστη ολική έκλυση θερμότητας ενός προϊόντος που έχει καεί πλήρως. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2. Το κονιοτροποιημένο δείγμα που χρησιμοποιείται για την δοκιμή αναφλέγεται σε ατμόσφαιρα καθαρού οξυγόνου, υπό

καθεστώς υψηλής πίεσης, μέσα σε μια θερμοδομετρική βόμβα, περιμετρικά της οποίας υπάρχει νερό. Σε αυτήν την δοκιμή αυτό που μετράται είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού κατά τη διάρκεια της καύσης.



Σχήμα 1.2: Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές του προσδιορισμού της θερμαντικής αξίας, EN ISO 1716.

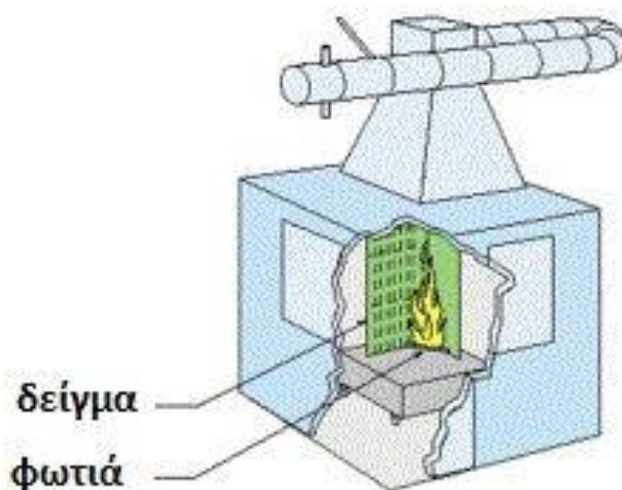
Η θερμογόνος δύναμη υπολογίζεται με βάση την μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας, της μάζας του δείγματος και τους διορθωτικούς παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με την εκάστοτε πειραματική διάταξη. Οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται για την κατάταξη σύμφωνα με την ευρωπαϊκή ταξινόμηση είναι η θερμογόνος δύναμη που μετράται σε MJ/kg ή MJ/m² ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του προϊόντος και των συστατικών του [1].

1.2.2.3. Δοκιμή προσβολής από μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο (Single Burning Item), EN 13823

Η δοκιμή προσβολής από μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο (SBI) είναι μια σχετικά νέα μέθοδος. Η δοκιμή βασίζεται στην μελέτη σεναρίων φωτιάς για την καύση ενός μεμονωμένου αντικειμένου, το οποίο τοποθετείται στην γωνία που σχηματίζουν δύο κάθετοι τοίχοι με επίστρωση κάποιου συγκεκριμένου υλικού. Η δοκιμή προσβολής από μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο χρησιμοποιείται για όλα τα προϊόντα δομικών κατασκευών, εκτός από αυτά που χρησιμοποιούνται στα δάπεδα.

Η δοκιμή SBI αναπτύχθηκε από την ομάδα ευρωπαϊκών εργαστηρίων πυρκαγιάς (group of European fire laboratories) με βάση τις προδιαγραφές που ορίζονται από την ομάδα ευρωπαϊκών ρυθμιστών αρχών πυρκαγιάς (group of European fire regulators). Οι προδιαγραφές που ορίζονται είναι για τον σχεδιασμό του πρωτοτύπου, την εγκατάσταση των πειραματικών μονάδων, τον προσδιορισμό της ακρίβειας της μεθόδου, καθώς και την παραγωγή των δεδομένων που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του συστήματος ταξινόμησης.

Για να πραγματοποιηθεί η δοκιμή SBI τοποθετείται το δείγμα στον υποδοχέα, που αποτελείται από δύο κάθετους τοίχους, οι οποίοι έχουν διαστάσεις 1.0m x 1.5m και 0,5m x 1,5m και σχηματίζουν ορθή γωνία μεταξύ τους. Το μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο τοποθετείται στη γωνία που σχηματίζουν οι τοίχοι (Σχήμα 1.3). Το αντικείμενο αυτό προσομοιώνεται από έναν καυστήρα προπανίου ισχύος 30 kW.



Σχήμα 1.3: SBI δοκιμή, σχηματική αναπαράσταση.

Η δοκιμή γίνεται σε μια περιοχή έκτασης περίπου 300 cm², όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Η συμπεριφορά των τοίχων μελετάται για χρονικό διάστημα 20 λεπτών. Στη διάρκεια αυτή, οι τοίχοι εκτίθενται σε θερμότητα περίπου 40 kW/m². Τα αέρια καύσης που παράγονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής συλλέγονται και συντάσσονται από έναν αγωγό εξαγωγής, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με αισθητήρες. Οι αισθητήρες αυτοί, έχουν την δυνατότητα να μετρούν την θερμοκρασία και το ρυθμό παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και οξυγόνου (O₂).



Σχήμα 1.4: SBI δοκιμή, φωτογραφία κατά τη διάρκεια της δοκιμής, EN 13823.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, μετράται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (HRR) βάσει της αρχής της θερμιδομετρίας κατανάλωσης οξυγόνου (oxygen consumption calorimetry). Επιπλέον, μετράται στον αγωγό εξαγωγής ο ρυθμός εξαγωγής καπνού (SPR), με βάση την εξασθένιση του φωτός. Η πτώση φλεγόμενων σωματιδίων παρατηρείται οπτικά κατά τη διάρκεια των πρώτων 10 λεπτών. Τέλος, παρατηρείται η πλευρική εξάπλωση της φλόγας και το μέγιστο ύψος που φτάνει κατά τη διάρκεια της δοκιμής [1].

Οι παράμετροι κατάταξης της δοκιμής προσβολής από μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο είναι ο δείκτης του ρυθμού ανάπτυξης της φωτιάς (FIBRA), η πλευρική εξάπλωση της φλόγας (LFS), η συνολική έκλυση θερμότητας (THR_{600s}), ο ρυθμός αύξησης του καπνού (SMOGRA) και η συνολική παραγωγή καπνού (TSP_{600s}).

Ο ρυθμος ανάπτυξης της φωτιάς (FIBRA) έχει μονάδες W/s και εκφράζεται από την εξίσωση (1.1). Ο ρυθμός αύξησης του καπνού έχει μονάδες m²/s² και δίνεται από την εξίσωση (1.2).

$$FIBRA = 1000 \cdot \max \left(\frac{HRR_{av}(t)}{t} \right) \quad (1.1)$$

$$SMOGRA = 10000 \cdot \max \left(\frac{SPR_{av}(t)}{t} \right) \quad (1.2)$$

όπου,

HRR_{av} (kW): είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας κατά μέσο όρο πάνω από 30 sec

SPR_{av} (m^2/s^2): είναι ο ρυθμός παραγωγής καπνού κατά μέσο όρο πάνω από 1 min

t (sec): είναι ο χρόνος που έχει παρέλθει από την έναρξη της δοκιμής

Η συνολική έκλυση θερμότητας (THR_{600s}) έχει μονάδες MJ και εκφράζεται από την εξίσωση (1.3). Η συνολική παραγωγή καπνού έχει μονάδες m^2 και δίνεται από την εξίσωση (1.4).

$$THR_{600s} = \frac{1}{1000} \cdot \sum_{0s}^{600s} HRR(t) \cdot \Delta t \quad (1.3)$$

$$TSP_{600s} = \sum_{0s}^{600s} SPR(t) \cdot \Delta t \quad (1.4)$$

όπου,

HRR (kW): είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας

SPR (m^2/s): είναι ο ρυθμός παραγωγής καπνού

1.2.2.4. Δοκιμή αναφλεξιμότητας (Ignitability Apparatus), EN ISO 11925-2

Στη δοκιμή αναφλεξιμότητας EN ISO 11925-2, το δείγμα υπόκειται σε απευθείας επαφή με μια μικρή φλόγα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή αναφλεξιμότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5. Το δείγμα διαστάσεων 250 mm x 90 mm συνδέεται κάθετα σε σχήμα συγκράτησης U. Μια φλόγα προπανίου με ύψος 20 mm έρχεται σε επαφή με το δείγμα σε γωνία 45°. Το σημείο εφαρμογής είναι είτε 40 mm πάνω από το κάτω άκρο της κεντρικής επιφάνειας (επιφανειακή έκθεση), είτε στο κέντρο του πλάτους του κάτω άκρου (ακριανή έκθεση). Κάτω από το δείγμα τοποθετείται χάρτινο φίλτρο για την καταγραφή των κατακρημνισμάτων.

Ανάλογα με την κατηγορία του κάθε υλικού εφαρμόζονται διαφορετικής διάρκειας δοκιμές. Η ανάλυση των κατηγοριών και τα κριτήρια γίνεται στη παράγραφο 1.3. Για δομικά υλικά κατηγορίας E, ο χρόνος εφαρμογής της φλόγας είναι 15 sec και η δοκιμή τερματίζεται 20 sec μετά την απομάκρυνση της φλόγας. Για δείγματα κατηγορίας B, C, D, ο χρόνος εφαρμογής της φλόγας είναι 30 sec και η δοκιμή τερματίζεται 60 sec μετά την απομάκρυνση της φλόγας. Η δοκιμή τερματίζεται νωρίτερα σε περίπτωση που δεν παρατηρηθεί φωτιά στο δείγμα μετά την

απομάκρυνση της πηγής της φλόγας, ή το δείγμα σταματήσει να καίγεται, ή η άκρη της φλόγας φτάσει στο ανώτερο άκρο του δείγματος [1].



Σχήμα 1.5: Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές της αναφλεξιμότητας, EN ISO 11925-2.

Τα κριτήρια ταξινόμησης των υλικών βασίζονται στις εξής παρατηρήσεις: αν η εξάπλωση της φλόγας (Fs) φτάσει τα 150 mm μέσα στο χρονικό διάστημα που μελετάται και αν το χάρτινο φίλτρο κάτω από το δείγμα αναφλέγεται λόγω φλεγόμενων κατακρημνισμάτων.

1.2.2.5. Συμπεριφορά δαπέδων σε καύση με τη χρήση πηγής ακτινοβολούμενης θερμότητας (Flooring Radiant Panel), EN ISO 9239-1

Στη δοκιμή συμπεριφοράς δαπέδων σε καύση με τη χρήση πηγής ακτινοβολούμενης θερμότητας EN ISO 9239-1 (Σχήμα 1.6), ένα δείγμα διαστάσεων 1050 mm x 230 mm τοποθετείται οριζόντια κάτω από μια κεκλιμένη κατά 30° πλάκα που ακτινοβολεί. Το δείγμα εκτίθεται σε ένα καθορισμένο πεδίο συνολικής ροής θερμότητας 11 kW/m² στο άκρο που βρίσκεται κοντά στην εκτεθειμένη πλευρά και 1 kW/m² στο άκρο που βρίσκεται στη μη εκτεθειμένη πλευρά. Για την ανάφλεξη του δείγματος, εφαρμόζεται ένα μέτωπο φλόγας στο θερμότερο άκρο.

Η πορεία του μετώπου της φλόγας καταγράφεται κατά μήκος του δείγματος προκειμένου να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται για να καλυφθούν διάφορες αποστάσεις που ορίζονται σύμφωνα με κάθε διαφορετικό τύπο δοκιμής. Η ανάπτυξη καπνού κατά τη διάρκεια της δοκιμής μετριέται στον αγωγό καυσαερίων με βάση την απόκρυψη του φωτός. Η διάρκεια της κάθε δοκιμής είναι 30 min [1].



Σχήμα 1.6: Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές της συμπεριφοράς των δαπέδων σε καύση, EN ISO 9239-1.

Το κριτήριο ταξινόμησης είναι η κρίσιμη ροή θερμότητας (CHF), η οποία ορίζεται ως η ροή ακτινοβολίας κατά την οποία εξαφανίζεται ή η φλόγα ή η ροή ακτινοβολίας μετά το πέρας των 30 min, όποια από τις δύο τιμές είναι χαμηλότερη.

1.3. Κατηγορίες και κριτήρια

Στο Ευρωπαϊκό σύστημα κατηγοριοποίησης (Euroclass System), τα οικοδομικά προϊόντα χωρίζονται σε επτά κατηγορίες με βάση την αντίδραση στη φωτιά. Στον Πίνακα 1.1 φαίνεται η περιγραφή των επιδόσεων και το σενάριο της φωτιάς για κάθε κατηγορία, καθώς και μερικά παραδείγματα υλικών, σύμφωνα με τις βασικές αρχές του ευρωπαϊκού συστήματος [9].

Κατηγορία	Περιγραφή επίδοσης	Σενάριο της φωτιάς	Έκλυση θερμότητας	Παραδείγματα υλικών
A1	Δεν συμβάλλει στη φωτιά	Πλήρως αναπτυγμένη φωτιά σε δωμάτιο	Τουλάχιστον 60 kW/m^2	Πέτρα, γυαλί, κεραμικά, χάλυβας και πολλά μεταλλικά προϊόντα
A2	Δεν συμβάλλει στη φωτιά	Πλήρως αναπτυγμένη φωτιά σε δωμάτιο	Τουλάχιστον 60 kW/m^2	Τα προϊόντα της κατηγορίας A1 που περιέχουν μικρές ποσότητες οργανικών ενώσεων
B	Πολύ περιορισμένη συμβολή στη φωτιά	Μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο σε δωμάτιο	Σε περιορισμένη περιοχή 40 kW/m^2	Γυψοσανίδες με διαφορετικές (λεπτές) επιφανειακές επενδύσεις, παράγωγα ξύλου με επιβραδυντικό φωτιάς
C	Περιορισμένη συμβολή στη φωτιά	Μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο σε δωμάτιο	Σε περιορισμένη περιοχή 40 kW/m^2	Φαινολικός αφρός, Γυψοσανίδες με διαφορετικές (παχύτερες από κατηγορία B) επιφανειακές επενδύσεις
D	Αποδεκτή συμβολή στη φωτιά	Μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο σε δωμάτιο	Σε περιορισμένη περιοχή 40 kW/m^2	Παράγωγα ξύλου με πάχος μεγαλύτερο των 10 mm και πυκνότητα μεγαλύτερη των 400 kg/m^3
E	Αποδεκτή συμβολή στη φωτιά	Μικρή φλόγα	Ύψος φλόγας 20 mm	Χαμηλής πυκνότητας ινοσανίδες, μονωτικά υλικά βασισμένα σε πλαστικά
F	Χωρίς απαιτήσεις επιδόσεων	Μικρή φλόγα	Ύψος φλόγας 20 mm	Υλικά που δεν έχουν δοκιμαστεί (χωρίς απαιτήσεις)

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες των ευρωπαϊκών κατηγοριών με ενδεικτικές περιγραφές και σενάρια φωτιάς.

Οι κατηγορίες που χωρίζονται τα δομικά προϊόντα (εκτός των προϊόντων που χρησιμοποιούνται στα δάπεδα) σε σχέση με την αντίδραση στη φωτιά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2 [9].

Κατηγορία	Μέθοδος προσδιορισμού	Κριτήρια κατηγοριοποίησης
A1	EN ISO 1182 ⁽¹⁾ Και	$\Delta T \leq 30^{\circ}\text{C}$ και $\Delta m \leq 50\%$ και $t_f = 0$
	EN ISO 1716	$\text{PCS} \leq 2.0 \text{ MJ/kg}^{(1)}$ και $\text{PCS} \leq 2.0 \text{ MJ/kg}^{(2),(2a)}$ και $\text{PCS} \leq 2.0 \text{ MJ/m}^2^{(3)}$ και $\text{PCS} \leq 2.0 \text{ MJ/kg}^{(4)}$
A2	EN ISO 1182 ⁽¹⁾ Η	$\Delta T \leq 50^{\circ}\text{C}$ και $\Delta m \leq 50\%$ και $t_f = 20 \text{ sec}$
	EN ISO 1716 Και	$\text{PCS} \leq 3.0 \text{ MJ/kg}^{(1)}$ και $\text{PCS} \leq 4.0 \text{ MJ/kg}^{(2),(2a)}$ και $\text{PCS} \leq 4.0 \text{ MJ/m}^2^{(3)}$ και $\text{PCS} \leq 3.0 \text{ MJ/kg}^{(4)}$
	EN 13823 (SBI)	$\text{FIBRA} \leq 120 \text{ W/s}$ και $\text{LFS} < \text{άκρη δείγματος}$ και $\text{THR}_{600\text{s}} \leq 7.5 \text{ MJ}$
B	EN 13823 (SBI) Και	$\text{FIBRA} \leq 120 \text{ W/s}$ και $\text{LFS} < \text{άκρη δείγματος}$ και $\text{THR}_{600\text{s}} \leq 7.5 \text{ MJ}$
	EN ISO 11925-2 ⁽⁵⁾ Έκθεση στη φλόγα 30 sec	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ σε 60 sec
C	EN 13823 (SBI) Και	$\text{FIBRA} \leq 250 \text{ W/s}$ και $\text{LFS} < \text{άκρη δείγματος}$ και $\text{THR}_{600\text{s}} \leq 15 \text{ MJ}$
	EN ISO 11925-2 ⁽⁵⁾ Έκθεση στη φλόγα 30 sec	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ σε 60 sec
D	EN 13823 (SBI) Και	$\text{FIBRA} \leq 750 \text{ W/s}$
	EN ISO 11925-2 ⁽⁵⁾ Έκθεση στη φλόγα 30 sec	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ σε 60 sec
E	EN ISO 11925-2 ⁽⁵⁾ Έκθεση στη φλόγα 15 sec	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ σε 20 sec
F	Δεν προσδιορίζεται η επίδοση	

Πίνακας 1.2: Κατηγορίες των δομικών προϊόντων σε σχέση με τη φωτιά.

όπου,

- (¹) : Για ομογενή προϊόντα και για τα κύρια συστατικά των μη ομογενών προϊόντων
 (²) : Για κάθε εξωτερικό μη κύριο συστατικό των μη ομογενών προϊόντων
 (^{2α}) : Για κάθε εξωτερικό μη κύριο συστατικό που έχει $PCS \leq 2.0 \text{ MJ/m}^2$
 (³) : Για κάθε εσωτερικό μη κύριο συστατικό των μη ομογενών προϊόντων
 (⁴) : Για ολόκληρο το προϊόν
 (⁵) : Υπό συνθήκες επιφανειακής φλόγα

Οι κατηγορίες που χωρίζονται τα προϊόντα που χρησιμοποιούνται στα δάπεδα σε σχέση με την αντίδραση στη φωτιά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3 [9].

Κατηγορία	Μέθοδο προσδιορισμού	Κριτήρια κατηγοριοποίησης
A1_{FL}	EN ISO 1182 ⁽¹⁾ και	$\Delta T \leq 30^\circ\text{C}$ και $\Delta m \leq 50\%$ και $t_f = 0$
	EN ISO 1716	$PCS \leq 2.0 \text{ MJ/kg}$ ⁽¹⁾ και $PCS \leq 2.0 \text{ MJ/kg}$ ^{(2),(2α)} και $PCS \leq 1.4 \text{ MJ/m}^2$ ⁽³⁾ και $PCS \leq 2.0 \text{ MJ/kg}$ ⁽⁴⁾
A2_{FL}	EN ISO 1182 ⁽¹⁾ ή	$\Delta T \leq 50^\circ\text{C}$ και $\Delta m \leq 50\%$ και $t_f = 20 \text{ sec}$
	EN ISO 1716 και	$PCS \leq 3.0 \text{ MJ/kg}$ ⁽¹⁾ και $PCS \leq 4.0 \text{ MJ/kg}$ ^{(2),(2α)} και $PCS \leq 4.0 \text{ MJ/m}^2$ ⁽³⁾ και $PCS \leq 3.0 \text{ MJ/kg}$ ⁽⁴⁾
	EN ISO 9239-1 ⁽⁶⁾	Critical flux $\geq 8.0 \text{ kW/m}^2$
B_{FL}	EN ISO 9239-1 ⁽⁶⁾ και	Critical flux $\geq 8.0 \text{ kW/m}^2$
	EN ISO 11925-2 ⁽⁵⁾ Έκθεση στη φλόγα 15 sec	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ σε 20 sec
C_{FL}	EN ISO 9239-1 ⁽⁶⁾ και	Critical flux $\geq 4.5 \text{ kW/m}^2$
	EN ISO 11925-2 ⁽⁵⁾ Έκθεση στη φλόγα 15 sec	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ σε 20 sec

D_{FL}	EN ISO 9239-1 ⁽⁶⁾ και	Critical flux $\geq 3.0 \text{ kW/m}^2$
	EN ISO 11925-2 ⁽⁵⁾ Έκθεση στη φλόγα 15 sec	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ σε 20 sec
E_{FL}	EN ISO 11925-2 ⁽⁵⁾ Έκθεση στη φλόγα 15 sec	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ σε 20 sec
F_{FL}	Δεν προσδιορίζεται η επίδοση	

Πίνακας 1.3: Κατηγορίες των προϊόντων που χρησιμοποιούνται στα δάπεδα σε σχέση με τη φωτιά.

όπου,

- (1) : Για ομογενή προϊόντα και για τα κύρια συστατικά των μη ομογενών προϊόντων
 (2) : Για κάθε εξωτερικό μη κύριο συστατικό των μη ομογενών προϊόντων
 (2a) : Για κάθε εξωτερικό μη κύριο συστατικό που έχει $PCS \leq 2.0 \text{ MJ/m}^2$
 (3) : Για κάθε εσωτερικό μη κύριο συστατικό των μη ομογενών προϊόντων
 (4) : Για ολόκληρο το προϊόν
 (5) : Υπό συνθήκες επιφανειακής φλόγας
 (6) : Διάρκεια δοκιμής = 30 min

Ένα άλλο σύστημα κατηγοριοποίησης των δομικών υλικών που χρησιμοποιείται ευρέως είναι το σύστημα DIN 4102. Τα αρχικά DIN προκύπτουν από τα γερμανικά "Deutsches Institut für Normung" που σημαίνει Γερμανικό ινστιτούτο προτυποποίησης. Η αντιστοίχιση του Γερμανικού συστήματος κατηγοριοποίησης δομικών υλικών (DIN 4102) με το Ευρωπαϊκό παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.4 [3].

Ευρωπαϊκό σύστημα κατηγοριοποίησης	Κατηγοριοποίηση κατά DIN 4102
A1	A1
A2	A2
B	B1
C	B1
D	B2
E	B2
F	B3

Πίνακας 1.4: Σύγκριση Ευρωπαϊκού και Γερμανικού Συστήματος Κατηγοριοποίησης δομικών υλικών.

1.4. Μηχανική της Πυρασφάλειας (Fire Safety Engineering - FSE)

Η μηχανική της πυρασφάλειας (FSE) είναι η εφαρμογή της επιστήμης και της μηχανολογίας για να προστατεύσει του ανθρώπους και το περιβάλλον από τις καταστροφικές επιδράσεις της φωτιάς και του καπνού. Ρυθμιστικοί κανονισμοί πυρασφάλειας είναι οι κανονισμοί που καθορίζουν λεπτομερώς το σχεδιασμό και την κατηγοριοποίηση των δομικών υλικών. Βάσει αυτών των κανονισμών σε ορισμένες εφαρμογές απαγορεύεται η χρήση κάποιων υλικών. Για παράδειγμα, σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις απαγορεύεται η χρήση δομικών υλικών που περιέχουν εύφλεκτες ουσίες [2].

Οι κανονισμοί πυρασφάλειας είναι δεσμευτικοί σε πολλές χώρες. Ωστόσο, η προσέγγιση με βάση τις επιδόσεις επιτρέπεται σε αρκετές χώρες. Μερικές ευρωπαϊκές χώρες έχουν ρυθμίσει τους κανονισμούς τους με βάση τις επιδόσεις των υλικών και κάποιες άλλες βάσει των επιδόσεων που στηρίζονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές [2]. Σύμφωνα με το περιοδικό FORUM [4] (The International Forum of Fire Research Directors), οι ευρωπαϊκές χώρες που ρυθμίζουν τους κανονισμούς με βάση τις επιδόσεις των υλικών είναι το Ηνωμένο Βασίλειο, η Σουηδία και οι Νορβηγία, ενώ χώρες που οι επιδόσεις στηρίζονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές είναι το Βέλγιο, η Γαλλία, η Ιταλία, το Λουξεμβούργο, η Ολλανδία, η Γερμανία, η Ιρλανδία, η Ελλάδα, η Πορτογαλία, η Ισπανία, η Αυστρία, η Φινλανδία και η Ελβετία.

Διεθνώς, η Νέα Ζηλανδία και η Αυστραλία ρυθμίζουν τους κανονισμούς με βάση τις επιδόσεις των υλικών, ενώ οι ΗΠΑ, ο Καναδάς και η Ιαπωνία στηρίζουν τις επιδόσεις σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Σε γενικές γραμμές, οι κανονισμοί με βάση τις επιδόσεις επιτρέπουν να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος σχεδιασμού για να επιτευχθεί η πυρασφάλεια σύμφωνα με το επίπεδο (της πυρασφάλειας) που έχει οριστεί από τους κανονισμούς [2].

Για τα περισσότερα κτίρια υπάρχουν δύο εναλλακτικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην απόδοση με βάση την πυρασφάλεια. Αυτές οι μέθοδοι είναι:

- Δεσμευτικός σχεδιασμός (prescriptive design)
- Αναλυτικός σχεδιασμός (analytical design)

Ο δεσμευτικός σχεδιασμός προϋποθέτει ότι πληρούνται όλες οι απαιτήσεις και οι γενικές συστάσεις για το υλικό που χρησιμοποιείται. Μια ολοκληρωμένη απαίτηση όταν χρησιμοποιείται αναλυτικός σχεδιασμός είναι ότι η πυρασφάλεια που επιτυγχάνεται σε ένα κτίριο πρέπει να είναι το ίδιο καλή ή και καλύτερη από τις περιοριστικές απαιτήσεις που ορίζονται. Ένα μειονέκτημα του αναλυτικού σχεδιασμού είναι ότι η μέθοδος αυτή απαιτεί πιο πεπειραμένο σχεδιαστή από ότι ο δεσμευτικός σχεδιασμός.

Όταν χρησιμοποιείται δεσμευτικός σχεδιασμός οι απαιτήσεις για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων είναι χαμηλές. Αυτή η μέθοδος σχεδιασμού είναι απλή, η καλή γνώση οδηγεί στις περισσότερες περιπτώσεις σε μια καλή λύση πυρασφάλειας.

Όταν χρησιμοποιείται αναλυτικός σχεδιασμός η ανάγκη για επαλήθευση των αποτελεσμάτων είναι μεγαλύτερη. Η επαλήθευση ενός αναλυτικού σχεδιασμού αφορά την επιλογή της μεθόδου, τα κριτήρια αποδοχής και τον τρόπο που οι αβεβαιότητες διαχειρίζονται [2].



Σχήμα 1.7: Διαδικασία μηχανικής ασφάλειας της φωτιάς (FSE).

1.5. Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για μονωτικά υλικά

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (CPD) [5] προδιαγράφει τις απαιτήσεις των μονωτικών υλικών που κατασκευάζονται από εργοστάσια, με ή χωρίς επικαλύψεις ή επενδύσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη θερμική μόνωση των κτιρίων. Τα προϊόντα κατασκευάζονται σε μορφή σανίδων ή ρολών ή σε αλλές προσχηματισμένες μορφές.

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο καθορίζει τα χαρακτηριστικά του προϊόντος και περιλαμβάνει τις διαδικασίες για τον έλεγχο, την αξιολόγηση, τη βαθμολόγηση και την σήμανση. Στην περίπτωση της αντίδρασης στη φωτιά η απόδοση των προϊόντων βάσει της Ευρωπαϊκής Νομοθεσίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.5 και αναφέρεται στο EN 13501-1 με πληροφορίες για τις απαιτούμενες δοκιμές.

Μονωτικό Υλικό	Ευρωπαϊκή Νομοθεσία
Διογκωμένη Πολυστερίνη (EPS)	EN 13163:2008
Εξηλασμένη Πολυστερίνη (XPS)	EN 13164:2008
Αφρός Πολυουρεθάνης (PUR)	EN 13165:2008
Ορυκτοβάμβακας (MW)	EN 13162:2008

Πίνακας 1.5: Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για συγκεκριμένα μονωτικά υλικά.

1.6. Αξιολόγηση υλικών προσόψεων κτιρίων ως προς την πυρασφάλεια

1.6.1. Δοκιμές προσόψεως

Η συμπεριφορά της πυρκαγιάς είναι δύσκολο να προβλεφθεί καθώς εξαρτάται από ασταθείς παράγοντες. Οι δοκιμές προσόψεως γίνονται για να μπορεί να προβλεφθεί η πορεία της πυρκαγιάς στα ακόλουθα πιθανά σενάρια:

- Πυρκαγιά από γειτονικό κτίριο ακτινοβολεί και προσβάλλει το εξωτερικό του κτιρίου. Το φορτίο πυρκαγιάς σε αυτή τη περίπτωση είναι χαμηλό.
- Πυρκαγιά ακριβώς δίπλα από το τοίχο, που μπορεί να προκαλείται από καιόμενο όχημα ή κάδο απορριμάτων. Σε αυτή τη περίπτωση το φορτίο πυρκαγιάς είναι μεγάλο.
- Πυρκαγιά εξελίσσεται στο εσωτερικό δωματίου, σπάει το παράθυρο και διαρρέει στην πρόσοψη. Σε αυτή τη περίπτωση το φορτίο πυρκαγιάς είναι μεγάλο. Ακόμα και με μικρή συμβολή της πρόσοψης στη πυρκαγιά η φλόγα μπορεί να διαρρεύσει στον επόμενο όροφο σπάζοντας το παράθυρο (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8: Διάδοση πυρκαγιάς.

Για το λόγο αυτό υπάρχουν πολλά δοκιμαστικά τεστ με τα οποία κατηγοριοποιούνται τα υλικά ανάλογα με τη διάδοση της πυρκαγιάς. Τα πιο διαδεδομένα τεστ προσόψεως σε φωτιά όπως ονομάζονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.6.

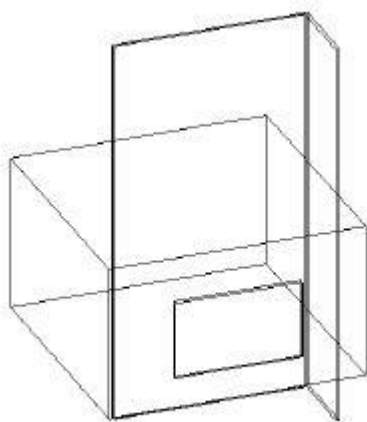
Τεστ προσόψεως σε φωτιά
ISO 13785-1
ISO 13785-2
DIN E 4102-20
LEPIR II
NFPA 285
BS 8414-1
SP FIRE 105
MSZ 14800-6
PN-90/B-02867
CAN/ULC-S134-92
GOST 31251
ONORM B 3800-5

Πίνακας 1.6: Διαδεδομένα τεστ προσόψεως σε φωτιά.

1.6.2. Χαρακτηριστικά δοκιμών προσόψεως

1.6.2.1. Δοκιμή ISO 13785-2

Η δοκιμή ISO 13785-2:2002 αξιολογεί τη συμπεριφορά της πρόσοψης σε περίπτωση διαρροής φωτιάς από παράθυρο (φλόγες εξαερισμού). Η εγκατάσταση δοκιμής αποτελείται από ένα δωμάτιο, με ένα άνοιγμα (παράθυρο) σε ένα από τα τοιχώματα και την κάθετη πρόσοψη να εκτείνεται πάνω από το άνοιγμα. Η κάθετη πρόσοψη αποτελείται από τη κύρια πρόσοψη και μια πλάγια. Το Σχήμα 1.9 παρουσιάζει το διάγραμμα μιας τυπικής πειραματικής μονάδας και το Σχήμα 1.10 τη διάταξη την ώρα της δοκιμής.



Σχήμα 1.9: Διάγραμμα δοκιμής ISO 13785-2.



Σχήμα 1.10: Δοκιμή ISO 13785-2.

Οι διαστάσεις του δωματίου δεν προσδιορίζονται στο πρότυπο. Αυτό που προσδιορίζεται είναι ο όγκος του δωματίου που πρέπει να είναι από 20 έως 100 m³. Ακόμα το πρότυπο προσδιορίζει ότι πρέπει να υπάρχει ένα μόνο άνοιγμα στην κύρια πρόσοψη διαστάσεων 2m πλάτους και 1.2m ύψους [7].

Το πρότυπο αναφέρει ότι η τυπική πηγή καυσίμου είναι το προπάνιο με παροχή 120 g/s. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα καύσιμα όπως το ξύλο σε ποσότητα 400 kg και υγρά καύσιμα [8]. Η εγκατάσταση θα πρέπει να βαθμονομηθεί έτσι ώστε για 15 λεπτά η πρόσοψη σε ύψος 0,6 m από το άνοιγμα (παραθύρο) να εκτείνεται σε 55±5 kW/m² και σε ύψος 1,6 m να εκτείνεται σε 35±5 kW/m². Η δοκιμή ορίζεται να είναι από 23 έως 27 λεπτά [7].

Βάσει του προτύπου, η πρόσοψη πρέπει να είναι εξοπλισμένη με θερμοστοιχεία και μετρητές ροής θερμότητας σε διάφορα σημεία. Συνολικά χρειάζονται 8 μετρητές ροής θερμότητας και τουλάχιστον 7 θερμοστοιχεία για να μετρούν τη θερμοκρασία σε διάφορα σημεία της πρόσοψης. Σε περίπτωση που το σύστημα τοίχου αποτελείται από πολλαπλά στρώματα τότε απαιτούνται στο ύψος των 4m πρόσθετα θερμοστοιχεία [8].

1.6.2.2. Δοκιμή εθνικών προτύπων

Σε πολλές χώρες έχουν αναπτυχθεί δοκιμές προσόψεως πυρκαγιάς, προκειμένου να εκτιμηθεί η συμβολή στην εξάπλωση της πυρκαγιάς από την πρόσοψη. Τα περισσότερα εθνικά πρότυπα βασίζονται στο σενάριο ότι πυρκαγιά διαρρέει από το άνοιγμα παραθύρου. Στον Πίνακα 1.7 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων εθνικών προτύπων [8], καθώς και εικόνες από την ώρα της δοκιμής στα Σχήματα 1.11, 1.12, 1.13 και 1.14.



Σχήμα 1.11: Δοκιμή DIN 4102-20.



Σχήμα 1.12: Δοκιμή BS 8414.



Σχήμα 1.13: Δοκιμή Onorm B 3800-5.



Σχήμα 1.14: Δοκιμή SP Fire 105.

Δοκιμή	DIN 4102-20	BS 8414	Onorm B 3800-5	SP Fire 105
Εθνικό Πρότυπο	Γερμανία	Ηνωμένο Βασίλειο	Αυστρία	Σουηδία
Καύσιμη ύλη	650 kg ξύλο ή 10 kg πετρέλαιο Diesel	380 kg ξύλο (η ανάφλεξη ξεκινάει από ίνες LD)	25 kg ξύλο ή καυστήρας αερίου (320 kW)	60 l επτάνιο
Συνολικό ύψος	5.2 m	8 m	6 m	6 m
Πλάγια πρόσοψη	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι
Παράθυρο σε σχέση με τη πηγή πυρκαγιάς	Δεν υπάρχει παράθυρο πάνω από τη πηγή φωτιάς	Δεν υπάρχει παράθυρο πάνω από τη πηγή φωτιάς	Δεν υπάρχει παράθυρο πάνω από τη πηγή φωτιάς	Δυο παράθυρα πάνω από τη πηγή φωτιάς

Πίνακας 1.7: Χαρακτηριστικά δοκιμών μεγάλης κλίμακας.

1.7. Αξιολόγηση εξωτερικής θερμομόνωσης ως προς την πυρασφάλεια

1.7.1. Εισαγωγή

Τα σύνθετα συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης που είναι γνωστά ως ETICS (External Thermal Insulation Composite System), είναι από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα θερμομόνωσης στην Ευρώπη. Τα περισσότερα θερμομονωτικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα τέτοιο σύστημα, αλλά η επάρκεια του όλου συστήματος πρέπει να επιβεβαιώνεται με Ευρωπαϊκή Τεχνική Έγκριση.

Τα σύνθετα συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης αποτελούνται από το μονωτικό υλικό το οποίο είναι καλυμμένο με κονίαμα και πλέγμα. Το μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για τα σύνθετα συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης (ETICS) είναι η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS), παρόλο που υπάρχουν ETICS και με άλλα μονωτικά υλικά όπως ο πετροβάμβακας, ο αφρός πολυουρεθάνης και ο φαινολικός αφρός [6].

Ο κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιάς στην πρόσοψη του κτιρίου οδήγησε στην εισαγωγή πυροφραγμάτων μέσα στο μονωτικό υλικό. Τα πυροφράγματα στις περισσότερες περιπτώσεις αποτελούνται από πετροβάμβακα. Οι απαιτήσεις για τη θέση και το ύψος των πυροφραγμάτων διαφέρουν από χώρα σε χώρα [6].

1.7.2. Μέθοδοι Δοκιμών

Η Ευρωπαϊκή Ένωση Κατασκευαστών Μόνωσης που είναι γνωστή και ως EURIMA (European Insulation Manufacturers Association) δεν ήταν σε θέση να δώσει απαντήσεις σχετικά με τα πυροφράγματα από πετροβάμβακα που περιέχονται στη διογκωμένη πολυστερίνη. Για το λόγο αυτό η EURIMA αποφάσισε να χρηματοδοτήσει μια σειρά από δοκιμές, ώστε μετά τις δοκιμές αυτές να είναι σε θέση να αξιολογήσει την επιρροή των πυροφραγμάτων σε περίπτωση πυρκαγιάς [6].

Οι σημερινές μέθοδοι δοκιμής που έχουν οριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση δεν είναι σε θέση να αξιολογήσουν την απόδοση της πυρκαγιάς σε συστήματα τόσο περίπλοκα όσο τα ETICS. Δυστυχώς ένα εναρμονισμένο μεγάλης κλίμακας τεστ για προσόψεις δεν έχει οριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση, έτσι, προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιδόσεις των ETICS στην επίδραση της φωτιάς πρέπει είτε να εξεταστούν υφιστάμενα εθνικά πρότυπα, είτε μεγάλης κλίμακας ISO τεστ.

Τα μεγάλης κλίμακας ISO τεστ προσόψεων δεν χρησιμοποιούνται σε καμία χώρα, οπότε υπάρχει πολύ περιορισμένη εμπειρία σε αυτή τη δοκιμή. Αντίθετα, χρησιμοποιούνται τα υφιστάμενα εθνικά πρότυπα που αξιολογούν τις επιδόσεις των ETICS, καθώς οι περισσότερες χώρες έχουν αναγνωρίσει τον κίνδυνο που συνδέεται με την γρήγορη εξάπλωση πυρκαγιάς στην πρόσοψη.

Η εξέταση όλων των εθνικών προτύπων δεν ήταν δυνατή, για αυτό το λόγο αποφασίστηκε να παρουσιαστούν το Βρετανικό τεστ BS 8414-1 (Σχήμα 1.15) και το Γερμανικό τεστ DIN E 4102-20 (Σχήμα 1.16). Οι δοκιμές αυτές επιλέχθηκαν καθώς θεωρείται ότι η δοκιμή BS 8414-1 είναι η πιο αυστηρή και η DIN E 4102-20 η πιο ήπια.



Σχήμα 1.15: Δοκιμή BS 8414-1.



Σχήμα 1.16: Δοκιμή DIN E 4102-20.

Οι αντίστοιχες εναρμονισμένες μικρής κλίμακας δοκιμές που έχουν οριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση είναι η δοκιμή αναφλεξιμότητας (Ignitability Apparatus), EN ISO 11925-2 και η δοκιμή προσβολής από μεμονωμένο καιγόμενο αντικείμενο (Single Burning Item), EN 13823.

Σύμφωνα με τη πηγή [6] όπου συγκρίνονται οι δοκιμές μικρής κλίμακας EN 13823 και EN ISO 11925-2 με της μεγάλης κλίμακας BS 8414-1 και DIN E 4102-20 προκύπτει ότι οι δοκιμές μικρής κλίμακας δεν μπορούν να διαχωρίσουν τα συστήματα που αντιδρούν θετικά σε μεγάλη κλίμακα από αυτά που αντιδρούν αρνητικά. Κατά συνέπεια, διαπιστώνεται ότι οι δοκιμές μικρής κλίμακας δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τα ETICS καθώς τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτές σε πολλές περιπτώσεις είναι λανθασμένα.

Οι δοκιμές μικρής κλίμακας δεν είναι σε θέση να δώσουν σωστά αποτελέσματα για σύνθετα συστήματα μέσης και μεγάλης κλίμακας, καθώς δεν είναι ικανά να προσομοιώσουν τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του μονωτικού υλικού, των πυροφραγμάτων, του κονιάματος και του πλέγματος.

Στην Ευρώπη η διαδικασία εύρεσης μιας εναρμονισμένης μεγάλης κλίμακας δοκιμής προσόψεων έχει ξεκινήσει εδώ και χρόνια. Οι προτάσεις που έχουν γίνει συμπεριλαμβάνουν ένα σύστημα δυο βαθμίδων. Στη πρώτη βαθμίδα θα περιλαμβάνεται ένα πρότυπο παρόμοιο με το Γερμανικό DIN E 4102-20 και στην δεύτερη ένα πρότυπο παρόμοιο με το Βρετανικό NS 8414-1.

Η ιδέα του να υπάρχουν περισσότερα κριτήρια από το αποδεκτό/μη αποδεκτό είναι κατανοητή καθώς τα ETICS χρησιμοποιούνται σε πολλούς διαφορετικούς τύπους κτιρίων. Αυτό που δεν είναι λογικό είναι γιατί να χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικές δοκιμές με διαφορετικά επίπεδα ταξινόμησης. Φαίνεται πιο λογικό να χρησιμοποιείται μια μόνο δοκιμή με διαφορετικά κριτήρια ταξινόμησης.

Λαμβάνοντας υπόψη την πιο αυστηρή δοκιμή δηλαδή την BS 8414-1, θα μπορούσε να χρησιμοποιείται μόνο αυτή αλλά με διαφορετικά κριτήρια ταξινόμησης που σχετίζονται με την πυρασφάλεια, επιθυμητά για κάθε κατηγορία [6].

2. Μονωτικά Υλικά

2.1. Εισαγωγή

Η πρωταρχική λειτουργία των περισσότερων κτιρίων είναι να παρέχει καταφύγιο από τον άνεμο και τη βροχή, καθώς και να προστατεύει τους χρήστες του κτιρίου από τις ακραίες θερμοκρασίες. Παραδοσιακά δομικά υλικά, όπως τούβλα, πέτρα και ξύλο, έχουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα να παρέχουν χαμηλό έλεγχο της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Ελαφριά δομικά υλικά, προσφέρουν βελτιωμένη θερμική μόνωση, επιτρέποντας τον αποτελεσματικότερο θερμοκρασιακό έλεγχο του εσωτερικού του κτιρίου. Αυτά τα δομικά υλικά είναι τα μονωτικά υλικά [10].

Τριάντα χρόνια μετά την καθιέρωση της υποχρεωτικής θερμικής μόνωσης στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, τα μονωτικά υλικά εξακολουθούν να αποτελούν το κύριο εργαλείο για την βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου [11].

Η επιλογή του κατάλληλου μονωτικού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το σκοπό για τον οποίο κατασκευάζεται το κτίριο. Για παράδειγμα, σε βιομηχανικές μονάδες χρησιμοποιούνται μονωτικά υλικά τα οποία δεν είναι εύφλεκτα και δεν συνεισφέρουν στην εξάπλωση της φωτιάς.

Για το σκοπό αυτό, στη συγκεκριμένη εργασία θα μελετηθεί η θερμική αγωγιμότητα και η θερμογόνος δύναμη των παρακάτω μονωτικών υλικών. Αυτά είναι:

- Αφρός Πολυουρεθάνης (PUR)
- Πετροβάμβακας (RW)
- Εξηλασμένη Πολυστερίνη (XPS)
- Διογκωμένη Πολυστερίνη (EPS)

Η θερμική αγωγιμότητα και η θερμογόνος δύναμη αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά των μονωτικών υλικών. Αρχικά, η γνώση των δυο παραπάνω χαρακτηριστικών βοηθάει στην κατηγοριοποίηση των μονωτικών υλικών όσο αναφορά τη θερμομόνωση και την αντίδραση στη φωτιά. Επιπλέον, η γνώση της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας βοηθάει στο να παραχθούν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς για τον σχεδιασμό πυρασφάλειας.

2.2. Ιδιότητες μονωτικών υλικών

Οι ιδιότητες των μονωτικών υλικών μεταβάλλονται σε περίπτωση πυρκαγιάς. Για να προσομοιωθεί η περίπτωση φωτιάς τα μονωτικά υλικά εξετάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι κύριες ιδιότητες των μονωτικών υλικών είναι:

- Η πυκνότητα (ρ)
- Η θερμική αγωγιμότητα (λ)
- Η ειδική θερμοχωρητικότητα (C_p)

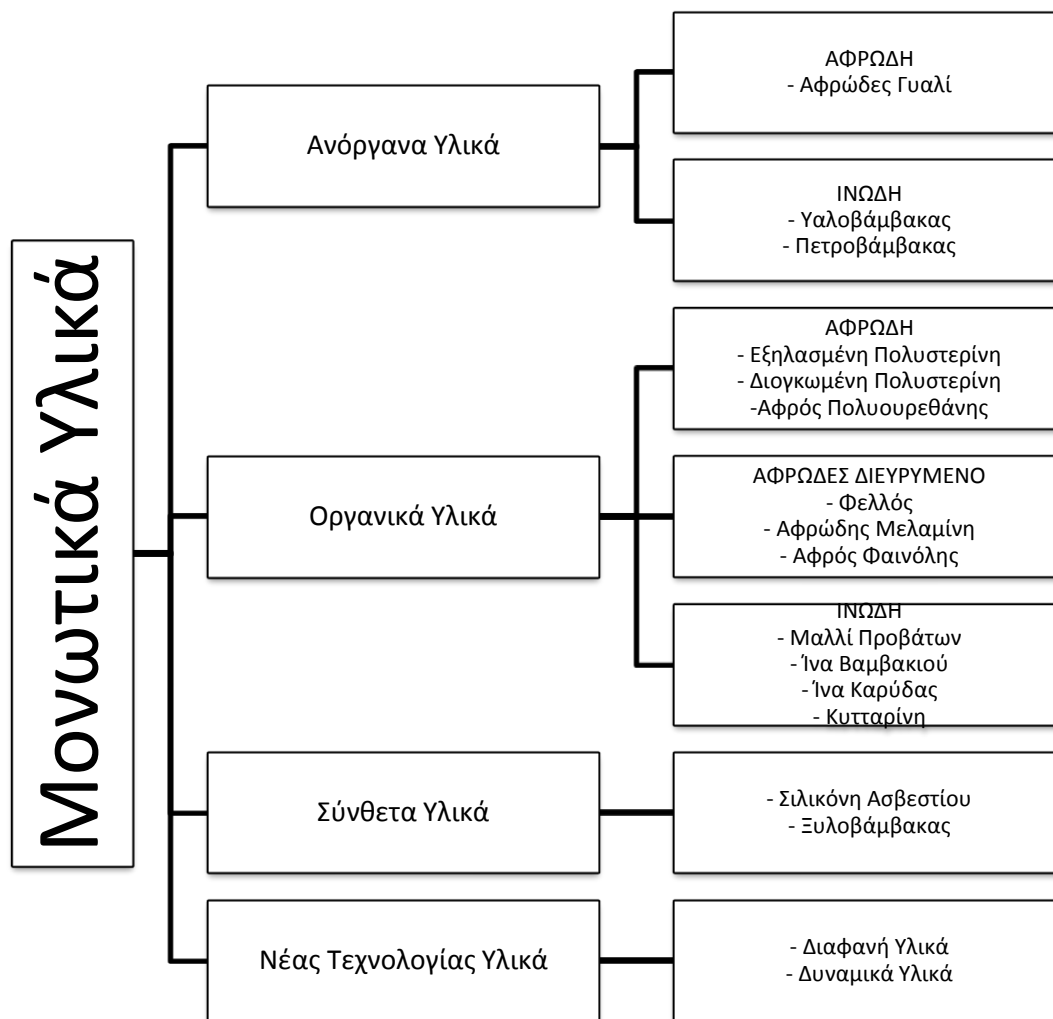
Σε επόμενο κεφάλαιο θα μελετηθεί ο συντελεστής της θερμικής αγωγιμότητας (λ) των μονωτικών υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ (W/mK) εκφράζει τη θερμική ισχύ που διέρχεται μέσα από τις απέναντι πλευρές κύβου από ομοιογενές και ισότροπο υλικό ακμής 1 (ενός) μέτρου, όταν η διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ των επιφανειών αυτών διατηρείται σταθερή και ίση με 1K. Επομένως, η θερμική αγωγιμότητα μετράει τη μονωτική ικανότητα των υλικών.

Η ειδική θερμοχωρητικότητα είναι η ενέργεια που χρειάζεται ένα σώμα για να θερμανθεί και διαφέρει από υλικό σε υλικό. Επιπλέον, ως πυκνότητα ορίζεται το βάρος ανά μονάδα όγκου και μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία.

2.3. Ταξινόμηση των Μονωτικών Υλικών και η Ευρωπαϊκή Αγορά

Τα μονωτικά υλικά μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη χημική ή τη φυσική δομή τους. Τα πιο διαδεδομένα μονωτικά υλικά μπορούν να ταξινομηθούν βάσει του Πίνακα 2.1 [11]. Η ευρωπαϊκή αγορά των μονωτικών υλικών χαρακτηρίζεται από την κυριαρχία των ανόργανων ινωδών υλικών, δηλαδή του πετροβάμβακα και του υαλοβάμβακα που αντιπροσωπεύουν το 60% της αγοράς. Ποσοστό 27% της αγοράς αντιπροσωπεύουν τα οργανικά υλικά, τα οποία είναι η διογκωμένη και η εξηλασμένη πολυστερίνη, καθώς και ο αφρός πολυουρεθάνης. Όλα τα υπόλοιπα μονωτικά υλικά αντιπροσωπεύουν μόνο το 13% της ευρωπαϊκής αγοράς [17].

Όσον αφορά τη παραγωγή των μονωτικών υλικών υπάρχουν περίπου 250 εταιρείες που παρέχουν στην αγορά τα υλικά αυτά. Από τα στοιχεία που δηλώθηκαν το 2003 προέκυψε ότι εννέα από αυτές τις εταιρείες παρέχουν το 55% των μονωτικών υλικών στην αγορά [17].



Πίνακας 2.1: Ταξιμόμηση μονωτικών υλικών βάσει της χημικής ή φυσικής δομής τους.

2.4. Αφρός Πολυουρεθάνης

2.4.1. Εισαγωγή

Η πολυουρεθάνη (PUR) είναι η ένωση δύο στοιχείων της πολυόλης ($R-(OH)_{n>2}$) και του ισοκυανικού και ανήκει στην ευρύτερη οικογένεια των πλαστικών. Αντίθετα με τις γνωστές μέχρι σήμερα πλαστικές ύλες, η πολυουρεθάνη έχει αμέτρητες εφαρμογές και χρήσεις σε πολλαπλούς κλάδους. Σήμερα, η πολυουρεθάνη είναι ένα από τα πλέον σημαντικά μέλη της οικογένειας των πλαστικών και η σύνθεσή της την κάνει πολύ εύχρηστη. Η πολυουρεθάνη βρίσκει εφαρμογή σε μια ευρεία γκάμα προϊόντων, από τη δημιουργία ειδικών καλουπιών, μέχρι τη χρήση του ως μονωτικό υλικό και τη δημιουργία μηχανημάτων και επίπλων. Επίσης χρησιμοποιείται κατά κόρον στις κατασκευές για την δημιουργία θερμομονωτικών πάνελ πολυουρεθάνης.

Η πολυουρεθάνη παρασκευάστηκε για πρώτη φορά το 1937 στο Λεβερκούζεν της Γερμανίας από τον Otto Bayer και τους συνεργάτες του [12]. Το νέο πολυμερές είχε κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τα πλαστικά που παρασκευάζονταν από πολυμερισμό ολεφινών ή με πολυσυμπύκνωση. Αρχικά η πολυουρεθάνη εφαρμόστηκε σε περιορισμένη κλίμακα. Στο Β Παγκόσμιο Πόλεμο χρησιμοποιήθηκε στην επίστρωση αεροσκαφών. Η πολυουρεθάνη έγινε εμπορικά διαθέσιμη το 1952 και η παραγωγή μαλακού αφρού πολυουρεθάνης ξεκίνησε το 1954 [15].

Ο αφρός πολυουρεθάνης είναι ένα στερεό καύσιμο που μπορεί να αναφλεχθεί αν εκτεθεί σε φλόγα. Από τη καύση του αφρού πολυουρεθάνης παράγεται κυρίως μονοξείδιο του άνθρακα, ίχνη οξειδίων του αζώτου και υδροκυάνιο [16]. Άτομα τα οποία έρχονται σε επαφή με το υλικό θα πρέπει να φορούν γάντια, προστατευτικά ματιών και μάσκες οξυγόνου καθώς έχει παρατηρηθεί από την ACGIH (Αμερικανική Συνδιάσκεψη Κρατικών Υγιεινολόγων Βιομηχανίας) ότι προκαλεί προβλήματα στο δέρμα και στο αναπνευστικό σύστημα. Τέλος, ο αφρός πολυουρεθάνης δεν πρέπει να εκτεθεί σε υψηλής ενέργειας υπεριώδη ακτινοβολία (UV), καθώς η υπεριώδης ακτινοβολία προάγει τις χημικές αντιδράσεις στον αφρό [15].

2.4.2. Χρήσεις του αφρού πολυουρεθάνης

Τα προϊόντα πολυουρεθάνης έχουν πάρα πολλές χρήσεις. Πάνω από τα τρία τέταρτα της παγκόσμιας κατανάλωσης των προϊόντων πολυουρεθάνης είναι σε μορφή αφρού. Ο αφρός πολυουρεθάνης μπορεί να είναι εύκαμπτου ή άκαμπτου τύπου και στις δύο περιπτώσεις ο αφρός είναι συνήθως πίσω από άλλες ύλες, δηλαδή δεν είναι άμεσα εκτεθειμένος.

Οι εύκαμπτοι αφροί βρίσκονται κυρίως πίσω από τα υφάσματα ταπετσαρίας σε εμπορικά και οικιακά έπιπλα, ενώ οι άκαμπτοι αφροί τοποθετούνται εντός των τείχων, μεταξύ μετάλλου και πλαστικού των περισσότερων ψυγείων και καταψυκτών. Ακόμα οι άκαμπτοι αφροί χρησιμοποιούνται για τη θερμική μόνωση επιφανειακών υλικών στο τομέα των κατασκευών [14].

Η χρήση του αφρού πολυουρεθάνης σε ενδύματα αυξάνεται συνεχώς. Ακόμα χρησιμοποιείται για καλούπια που περιλαμβάνουν κουφώματα, κολώνες, κάγκελα και αετώματα [14].

Σκευάσματα πολυουρεθάνης καλύπτουν ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα σκληρότητας, ακαμψίας και πυκνότητας. Χαρακτηριστικά παρουσιάζονται:

- Χαμηλής πυκνότητας ευέλικτο αφρώδες υλικό: χρησιμοποιείται στην ταπετσαρία αυτοκινήτων και καθίσματα φορτηγών.
- Χαμηλής πυκνότητας άκαμπτο αφρό: που χρησιμοποιείται για θερμική μόνωση.

- Μαλακά στερεά ελαστομερή: χρησιμοποιούνται για μαξιλάρια gel και κυλίνδρους εκτύπωσης.
- Χαμηλή πυκνότητα ελαστομερή: χρησιμοποιούνται στα υποδήματα.
- Σκληρά στερεά πλαστικά: χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρονικές προσόψεις οργάνων και δομικά μέρη.
- Εύκαμπτα πλαστικά: χρησιμοποιούνται ως ιμάντες και ζώνες

Αφρός πολυουρεθάνης χρησιμοποιείται ευρέως σε υψηλής ανθεκτικότητας ευέλικτα συστήματα καθισμάτων αφρού, άκαμπτα πάνελ μονωτικού αφρού, μικροσφραγίδες αφρού και παρεμβύσματα, ανθεκτικούς ελαστομερές τροχούς και ελαστικά, σε δακτύλιους αυτοκινήτων, σε ηλεκτρικές ενώσεις γλάστρες, σφραγίδες, φλάντζες, υπόστρωμα χαλί και σκληρά πλαστικά μέρη (όπως όπως τα ηλεκτρονικά μέσα) [14]. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται μόνωση στέγης με αφρό πολυουρεθάνης.



Σχήμα 2.1: Στέγη μονωμένη με αφρό πολυουρεθάνης.

2.4.3. Χαρακτηριστικά του Αφρού Πολυουρεθάνης

2.4.3.1. Εύρος Πυκνότητας και Θερμικής Αγωγιμότητας

Ανάλογα με το σκοπό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ο αφρός πολυουρεθάνης προσαρμόζεται η πυκνότητα του. Άμεση σχέση με την πυκνότητα έχει η θερμική αγωγιμότητα. Χαρακτηριστικά εύρη πυκνοτήτων και θερμικής αγωγιμότητας του αφρού πολυουρεθάνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2. Οι διαφορές στην θερμική αγωγιμότητα οφείλονται στο διαφορετικό τρόπο παρασκευής του μονωτικού υλικού.

Πηγή	Πυκνότητα (kg/m ³)		Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	
	Από	Μέχρι	Από	Μέχρι
[11]	30	80	0,02	0,027
[18]	30	80	0,029	0,041
[19]	30	100	0,024	0,03

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές τιμές της Πυκνότητας και της Θερμικής Αγωγιμότητας του αφρού πολυουρεθάνης.

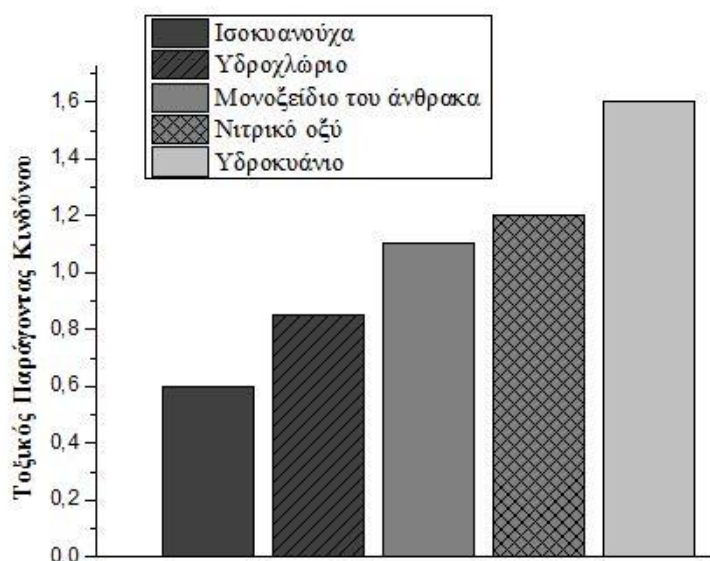
2.4.3.2. Τοξικά συστατικά και περιεχόμενο

Σε περίπτωση πυρκαγιάς τα τοξικά συστατικά εκλύονται στο περιβάλλον, συνεπώς η εύρεση αυτών των συστατικών είναι αναγκαία. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα τοξικά συστατικά όπου (+) σημαίνει ότι υπάρχει αντίδραση του τοξικού αερίου και (-) ότι δεν υπάρχει αντίδραση [20].

Τοξικό Αέριο	Αφρός Πολυουρεθάνης
CO ₂	+
CO	+
H ₂ S	-
NH ₃	-
HCHO	-
HCl	-
SO ₂	-
CH ₂ CHCN	-
NO _x	+
C ₆ H ₅ OH	-
HCN	+
HBr	-
HF	-
COCl ₂	-

Πίνακας 2.3: Κατάσταση τοξικών συστατικών για τον αφρό πολυουρεθάνης.

Οι τοξικοί παράγοντες κινδύνου του αφρού πολυουρεθάνης βάσει του NIOSH IDLH (τα στοιχεία του οποίου παρουσιάζονται στην πηγή [21]) παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2 [18].



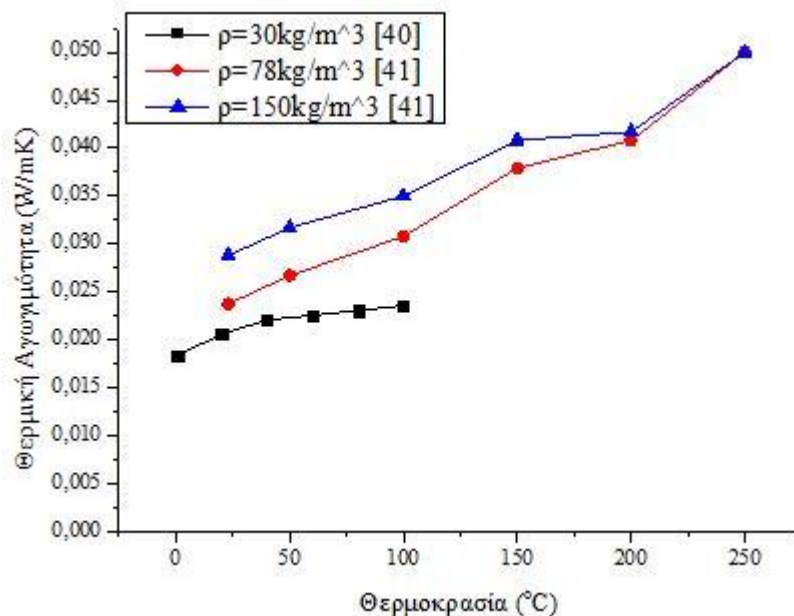
Σχήμα 2.2: Τοξικοί Παράγοντες Κινδύνου του αφρού πολυουρεθάνης.

2.4.3.3. Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας

Η θερμική αγωγιμότητα των μονωτικών υλικών αυξάνει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στην οποία είναι εκτεθειμένα. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας του αφρού πολυουρεθάνης [40,41]. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 2.3.

$\rho=30 \text{ kg/m}^3$ [40]		$\rho=78 \text{ kg/m}^3$ [41]		$\rho=150 \text{ kg/m}^3$ [41]	
Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
0,588235	0,018347	23	0,02375	23	0,0288
20	0,020579	50	0,0267	50	0,0317
40	0,022066	100	0,0308	100	0,035
60,2941	0,022562	150	0,0379	150	0,0408
80,2941	0,023058	200	0,0408	200	0,0417
99,4118	0,023554	250	0,05	250	0,05

Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας του αφρού πολυουρεθάνης.



Σχήμα 2.3: Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας για τον αφρό πολυουρεθάνης.

Οι καμπύλες που προέκυψαν είναι ανόμοιες. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στον διαφορετικό τρόπο παρασκευής του μονωτικού υλικού και στην διαφορετική αρχική πυκνότητα.

2.4.3.4. Γενικά στοιχεία του αφρού πολυουρεθάνης

Η κατασκευή ενός κτιρίου προϋποθέτει την ασφάλεια των χρηστών του και εν συνεχεία την προστασία του περιβάλλοντος. Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία του αφρού πολυουρεθάνης [11].

Χαρακτηριστικό	Αφρός Πολυουρεθάνης
Τοξικότητα σε περίπτωση πυρκαγιάς	ΝΑΙ
Επαναχρησιμοποίησιμο	ΟΧΙ
Ανακυκλώσιμο	ΟΧΙ
Πρόσθετα συστατικά για την προστασία του περιβάλλοντος	ΝΑΙ

Πίνακας 2.5: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του αφρού πολυουρεθάνης.

Ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου επιλέγεται το κατάλληλο μονωτικό υλικό. Τα τέσσερα βασικά κριτήρια και η βαθμονόμηση τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.6 [11].

Αντοχή στο/η	Αφρός Πολυουρεθάνης
Νερό	1
Υγρασία	1
Ακτινοβολία του ήλιου	4
Φωτιά	4

Πίνακας 2.6: Βαθμονόμηση της αντοχής του αφρού πολυουρεθάνης.

όπου,

- (1): πολύ καλό
- (2): καλό
- (3): κανονικό
- (4): κακό

Τα μονωτικά υλικά πέραν του ρόλου τους για τη μόνωση του κτιρίου, διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο και στην ευστάθεια του κτιρίου. Για αυτόν το λόγο ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7 είναι απαραίτητος καθώς ο κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιάς είναι πάντα υπαρκτός.

Χαρακτηριστικό	Αφρός Πολυουρεθάνης		Πηγή
Αντίδραση στη φωτιά	Από	B1	[11]
	Μέχρι	B2	
Θερμοκρασιακό εύρος χρήσης (°C)	Από	-50	[11]
	Μέχρι	120	
Εξάπλωση της φλόγας	4		[27]
Έκλυση θερμότητας κατά τη καύση	4		[27]
Παραγωγή καπνού	5		[27]
Θερμοκρασία τήξης (°C)	176		[28]
Θερμοκρασία θερμικής αποσύνθεσης (°C)	≥176		[28]
Θερμοκρασία ανάφλεξης (°C)	378		[29]

Πίνακας 2.7: Χαρακτηριστικά αφρού πολυουρεθάνης.

όπου,

- (1): πολύ καλό
- (2): καλό
- (3): κανονικό
- (4): κακό
- (5): πολύ κακό

2.5. Πετροβάμβακας

2.5.1. Εισαγωγή

Πετροβάμβακας (Rockwool) ονομάζεται ένα ινώδες μονωτικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται στις οικοδομές αλλά και σε τεχνικές εφαρμογές. Ο πετροβάμβακας αποτελείται από ίνες οξειδίου πυριτίου - αλουμινίου και έχει θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες. Είναι άκαυστος και παράγεται με τήξη πετρωμάτων στους 1550-1600 °C. Με τη βοήθεια ειδικών διατάξεων παίρνει τη μορφή ινών με διάμετρο 6-20 μm.

Υλικά με παρόμοια χαρακτηριστικά και ιδιότητες είναι οι ορυκτοβάμβακες υαλοβάμβακας και κεραμοβάμβακας, με τη διαφορά ότι ο υαλοβάμβακας αποτελείται από ίνες γυαλιού με πυριτική σύσταση και χαμηλότερη θερμοκρασία παραγωγής, ενώ ο κεραμοβάμβακας αποτελείται από κεραμικές ίνες με υψηλότερη θερμοκρασία παραγωγής και χρήσης και από τα δυο άλλα υλικά. Και τα τρία αυτά υλικά χαρακτηρίζονται με τους γενικούς όρους MMVF (Man made vitrous fibers - Ινώδη τεχνητά υαλώδη υλικά) ή τον παραπλήσιο όρο MMMF (Man made mineral fibers - Ινώδη τεχνητά υλικά από ορυκτά) [22].

Οι κύριες ιδιότητες του πετροβάμβακα είναι οι εξής:

- Θερμομονωτικές
- Ηχομονωτικές
- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες

Οι ίνες οξειδίου πυριτίου – αλουμινίου από τις οποίες αποτελείται ο πετροβάμβακας είναι αγωγοί της θερμότητας. Ο πετροβάμβακας περιέχει τόσο μεγάλο ποσοστό ελεύθερου χώρου (αέρα) που ακόμη και όταν συμπιέζονται σε ρολά ή σε πλάκες, συνεχίζει να έχει εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες.

Τα προϊόντα πετροβάμβακα έχουν χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, τον οποίο διατηρεί χαμηλό και σε ανώτερες θερμοκρασίες. Επίσης, έχει ηχομονωτικές ιδιότητες σε αντίθεση με άλλα οικοδομικά θερμομονωτικά υλικά που δεν έχουν τόσο καλές ηχομονωτικές ιδιότητες όπως η εξηλασμένη και η διογκωμένη πολυστερίνη. Είναι άκαυστος και μπορεί να αντέξει σε θερμοκρασία μέχρι 1000 °C, ενώ για υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιείται κεραμοβάμβακας. Λόγω της ιδιότητάς του αυτής ο πετροβάμβακας χρησιμοποιείται σε διατάξεις πυροπροστασίας. Αν υποβληθεί σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 1000 °C δεν καίγεται, αλλά αρχίζει και λιώνει.

Ο πετροβάμβακας κατά το χειρισμό του μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό στα μάτια, το δέρμα και το αναπνευστικό σύστημα. Ο ερεθισμός στο δέρμα είναι συγκρίσιμος με αυτόν που προκαλείται από την έκθεση του δέρματος σε υλικά όπως το άχυρο, το χόρτο ή το σανό. Η παρατεταμένη έκθεση μπορεί να έχει μακροπρόθεσμες επιπτώσεις, καθώς κάποιοι τύποι πετροβάμβακα που έχουν παραχθεί από ορισμένα ορυκτά μπορεί να είναι καρκινογόνοι. Αυτή η επίδραση εξαρτάται από τη χημική σύνθεση, τη διάμετρο και το μήκος της ίνας.

Ο Διεθνής Οργανισμός Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC) αναθεώρησε τη σχέση των τεχνητών ορυκτών ινών με την καρκινογένεση. Τον Οκτώβριο του 2002, η ομάδα έρευνας του IARC κατέληξε στο συμπέρασμα ότι μόνο οι πυρίμαχες κεραμικές ίνες που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες για μόνωση, είναι καρκινογόνες προς τον άνθρωπο. Αντίθετα, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες, δηλαδή η μόνωση υαλοβάμβακα, πετροβάμβακα και ορυκτοβάμβακα, δεν έχουν ταξινομηθεί ως καρκινογόνες για τον άνθρωπο [23].

2.5.2. Χρήσεις του πετροβάμβακα

Η κυριότερη χρήση του πετροβάμβακα είναι σαν μονωτικό υλικό στις οικοδομές, αλλά χρησιμοποιείται και σε βιομηχανικές εφαρμογές, ιδιαίτερα σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες μέχρι 1000 °C. Μια σημαντική εφαρμογή είναι στη ναυπηγική βιομηχανία. Χρησιμοποιείται επίσης ως υπόστρωμα σε υδροπονικές εφαρμογές.

Ένα πλεονέκτημα του πετροβάμβακα είναι ότι αφήνουν την υγρασία να περάσει μέσα τους (στεγνώνουν εύκολα) και δεν αναπτύσσουν μούχλα, εκτός αν παραμείνουν σε υγρό περιβάλλον. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται δωμάτιο μονωμένο με πετροβάμβακα.



Σχήμα 2.4: Δωμάτιο μονωμένο με πετροβάμβακα.

Υπάρχει ποικιλία προϊόντων πετροβάμβακα σε ρολά (μαλακά προϊόντα) και πλάκες (μορφοποιημένα, σκληρότερα προϊόντα) σε διάφορες διαστάσεις και με διαφορετική πυκνότητα, κατάλληλα για διαφορετικές εφαρμογές.

Ανάλογα με τις ανάγκες, ο πετροβάμβακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως έχει, είτε με επικάλυψη με διάφορα υλικά όπως φύλλο αλουμινίου, ασφαλτικό υλικό ή υαλούφασμα. Για να μπορεί να εφαρμοστεί σε συγκεκριμένες θέσεις, χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ειδικά προϊόντα με ενσωματωμένο γαλβανισμένο πλέγμα [24].

2.5.3. Χαρακτηριστικά του Πετροβάμβακα

2.5.3.1. Εύρος Πυκνότητας και Θερμικής Αγωγιμότητας

Ο πετροβάμβακας (RW) αποτελείται από ίνες για αυτό το λόγο η πυκνοτήτά του διαφέρει αρκετά ανάλογα με το τρόπο παρασκευής του και τη χρήση για την οποία προορίζεται. Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα του πετροβάμβακα. Στον Πίνακα 2.8 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές πυκνοτήτων και θερμικής αγωγιμότητας. Οι διαφορές στην θερμική αγωγιμότητα οφείλονται στο διαφορετικό τρόπο παρασκευής του μονωτικού υλικού.

Πηγή	Πυκνότητα (kg/m ³)		Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	
	Από	Μέχρι	Από	Μέχρι
[11]	30	180	0,033	0,045
[18]	22	180	0,033	0,045
[19]	30	200	0,033	0,042

Πίνακας 2.8: Χαρακτηριστικές τιμές της Πυκνότητας και της Θερμικής Αγωγιμότητας του πετροβάμβακα.

2.5.3.2. Τοξικά συστατικά και περιεχόμενο

Σε περίπτωση πυρκαγιάς τα τοξικά συστατικά εκλύονται στο περιβάλλον, συνεπώς η εύρεση αυτών των συστατικών είναι αναγκαία. Στον Πίνακα 2.9 παρουσιάζονται τα τοξικά συστατικά όπου (+) σημαίνει ότι υπάρχει αντίδραση του τοξικού αερίου και (-) ότι δεν υπάρχει αντίδραση [20].

Τοξικό Αέριο	Πετροβάμβακας
CO ₂	+
CO	+
H ₂ S	-
NH ₃	-
HCHO	+
HCl	-
SO ₂	-
CH ₂ CHCN	-
NO _x	+
C ₆ H ₅ OH	-
HCN	-
HBr	-
HF	-
COCl ₂	-

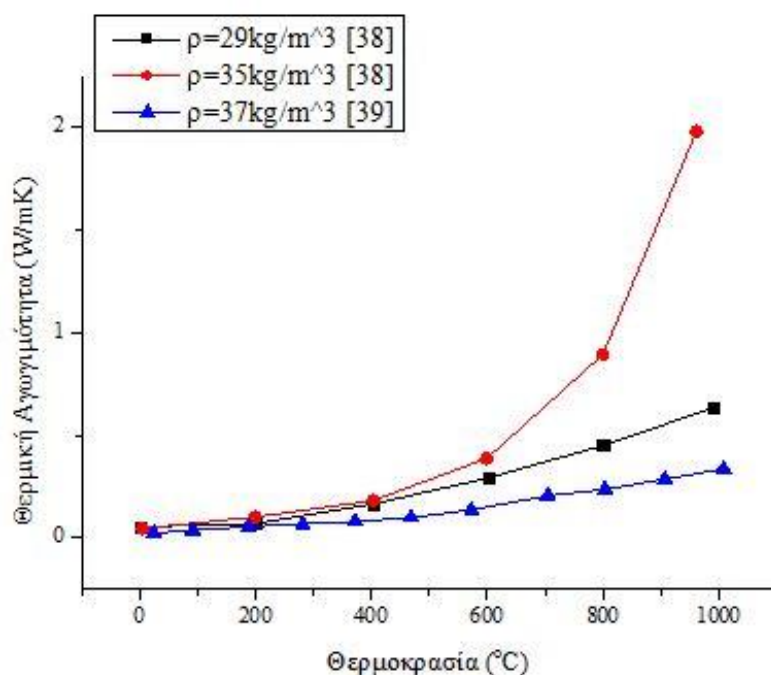
Πίνακας 2.9: Κατάσταση τοξικών συστατικών για τον πετροβάμβακα.

2.5.3.3. Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας

Η θερμική αγωγιμότητα των μονωτικών υλικών αυξάνει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στην οποία είναι εκτεθειμένα. Στον Πίνακα 2.10 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας του αφρού πολυουρεθάνης [38,39]. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 2.5.

$\rho=29 \text{ kg/m}^3$ [38]		$\rho=35 \text{ kg/m}^3$ [38]		$\rho=37 \text{ kg/m}^3$ [39]	
Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
20,66	0,0554	20,70344	0,047525	20,9124	0,025
200,17	0,0713	199,982	0,10297	92,2751	0,0375
403,19	0,1663	403,101	0,182178	188,646	0,05625
603,03	0,2931	599,472	0,388119	281,71	0,06875
799,69	0,4515	800,03	0,89505	372,437	0,08125
990,22	0,6337	961,196	1,9802	468,808	0,1
				572,766	0,1375
				704,943	0,20625
				803,256	0,2375
				906,82	0,2875
				1008,05	0,3375

Πίνακας 2.10: Χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας του πετροβάμβακα.



Σχήμα 2.5: Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας για τον πετροβάμβακα.

Οι καμπύλες που προέκυψαν είναι ανόμοιες. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στον διαφορετικό τρόπο παρασκευής του μονωτικού υλικού και στην διαφορετική αρχική πυκνότητα.

2.5.3.4. Γενικά στοιχεία του αφρού πολυουρεθάνης

Ένας από τους βασικούς παράγοντες επιλογής μονωτικού υλικού είναι η προστασία του περιβάλλοντος. Στον Πίνακα 2.11 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία του πετροβάμβακα σε σχέση με το περιβάλλον [11].

Χαρακτηριστικό	Πετροβάμβακας
Τοξικότητα σε περίπτωση πυρκαγιάς	ΝΑΙ
Επαναχρησιμοποιήσιμο	ΟΧΙ
Ανακυκλώσιμο	ΝΑΙ
Χρήση ακατέργαστων πόρων	-
Πρόσθετα συστατικά για την προστασία του περιβάλλοντος	ΟΧΙ

Πίνακας 2.11: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του πετροβάμβακα.

Υπάρχουν τέσσερα βασικά κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου μονωτικού υλικού. Τα κριτήρια αυτά και η βαθμονόμηση τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.12 [11].

Αντοχή στο/η	Πετροβάμβακας
Νερό	2
Υγρασία	1
Ακτινοβολία του ήλιου	1
Φωτιά	1

Πίνακας 2.12: Βαθμονόμηση της αντοχής του πετροβάμβακα.

όπου,

(1): πολύ καλό

(2): καλό

(3): κανονικό

(4): κακό

Η ευστάθεια του κτιρίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται. Σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς η ευστάθεια του κτιρίου μεταβάλλεται, για αυτόν το λόγο είναι σημαντικό να μελετώνται και να λαμβάνονται υπόψιν τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 2.13.

Χαρακτηριστικό	Πετροβάμβακας		Πηγή
Αντίδραση στη φωτιά	Από	A1	[11]
	Μέχρι	A2	
Θερμοκρασιακό εύρος χρήσης (°C)	Από	-240	[30]
	Μέχρι	800	
Εξάπλωση της φλόγας	1		[27]
Έκλυση θερμότητας κατά τη καύση	1		[27]
Παραγωγή καπνού	1		[27]
Θερμοκρασία τήξης (°C)	>1000		[31]
Θερμοκρασία θερμικής αποσύνθεσης (°C)	>250		[31]
Θερμοκρασία ανάφλεξης (°C)	-		-

Πίνακας 2.13: Χαρακτηριστικά πετροβάμβακα.

όπου,

(1): πολύ καλό

(2): καλό

(3): κανονικό

(4): κακό

(5): πολύ κακό

2.6. Εξηλασμένη Πολυστερίνη

2.6.1. Εισαγωγή

Η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS - Extruded polystyrene) είναι ελαφρύ, θερμομονωτικό υλικό με βάση την πολυστερίνη ((C₈H₈)_n). Το πολυστυρένιο (πολυφαινυλαιθένιο) είναι ένας αρωματικός υδρογονάνθρακας ο οποίος παράγεται από το μονομερές στυρένιο. Το πολυστυρένιο είναι στερεό σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά λιώνει όταν ζεσταθεί και ξαναγίνεται στερεό όταν κρυώσει. Ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Eduard Simon στο Βερολίνο [22].

Η παραγωγή της εξηλασμένης πολυστερίνης γίνεται με εξέλαση, κατά τη διάρκεια της οποίας γίνεται πολυμερισμός της θερμοπλαστικής πολυστερίνης. Σημαντικό μέρος του προϊόντος αποτελεί προωθητικό αέριο με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, το οποίο προσφέρει και επιβραδυντική επίδραση στη φωτιά. Το αέριο αυτό είναι ο χλωροφθοράνθρακας HCFC 142b [22].

Περίπου το 93% του βάρους της εξηλασμένης πολυστερίνης αποτελείται από πολυστυρένιο, ενώ σε μικρό ποσοστό περιέχει επίσης βελτιωτικά πρόσθετα, χρωστικές ουσίες και επιβραδυντικό φωτιάς. Οι κρύσταλλοι της πολυστερίνης αναμειγνύονται με ειδικά βελτιωτικά πρόσθετα και φιλικά προς το περιβάλλον διογκωτικά αέρια, δημιουργώντας ένα παχύρρευστο μίγμα.

Το μίγμα αυτό ομογενοποιείται υπό αυτόματες κι απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, ψύχεται και διαμορφώνεται τελικά σε πλάκα επιθυμητών προδιαγραφών. Η ομοιόμορφη διασπορά κυψελίδων σταθερού μεγέθους μέσα στη μάζα της θερμομονωτικής πλάκας, εξασφαλίζει τις θερμομονωτικές ιδιότητες της εξηλασμένης πολυστερίνης [25].

Η εξηλασμένη πολυστερίνη έχει μονωτικές ιδιότητες λόγω παγίδευσης αερίου σε κλειστές κυψελίδες. Ένα κύριο χαρακτηριστικό της είναι οι κλειστοί πόροι και η έλλειψη απορρόφησης νερού, κάτι που κάνει την εξηλασμένη πολυστερίνη κατάλληλη για εφαρμογές σε υψηλή υγρασία.

2.6.2. Χρήσεις της εξηλασμένης πολυστερίνης

Η εξηλασμένη πολυστερίνη χαρακτηρίζεται από υψηλές και διαρκούς αποτελεσματικότητας θερμομονωτικές ιδιότητες, χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ), μηδενική απορρόφηση υγρασίας και υψηλή αντοχή σε συμπίεση. Είναι πολύ ασφαλή στη χρήση και πολύ εύκολη στην επεξεργασία.

Η χαμηλή τιμή σε σχέση με εφάμιλλα μονωτικά υλικά της αγοράς καθιστούν την εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) πολύ καλή επιλογή. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται μια κατοικία μονωμένη με εξηλασμένη πολυστερίνη.



Σχήμα 2.6: Μόνωση κατοικιών με εξηλασμένη πολυστερίνη.

Η εξηλασμένη πολυστερίνη καλύπτει μεγάλο φάσμα θερμομονωτικών εφαρμογών [25]. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές είναι:

- Θερμομόνωση θερμογεφυρών.
- Θερμομόνωση πλακών από σκυρόδεμα, για τοποθέτηση στην άνω πλευρά (οροφές) ή στην κάτω πλευρά (πιοτή).
- Θερμομόνωση κεραμοσκεπής.
- Θερμομόνωση τοίχων με διάκενο.
- Κατασκευές ανεστραμμένης και συμβατικής θερμομόνωσης ταράτσας καθώς και φυτεμένου δώματος.
- Εξωτερική θερμομόνωση.

2.6.3. Χαρακτηριστικά της εξηλασμένης πολυστερίνης

2.6.3.1. *Εύρος Πυκνότητας και Θερμικής Αγωγιμότητας*

Η πυκνότητα της εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS) εξαρτάται από το τρόπο παρασκευής της. Άμεση σχέση με την πυκνότητα έχει η θερμική αγωγιμότητα. Χαρακτηριστικά εύρη πυκνοτήτων και θερμικής αγωγιμότητας της εξηλασμένης πολυστερίνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.14. Οι διαφορές στην θερμική αγωγιμότητα οφείλονται στο διαφορετικό τρόπο παρασκευής του μονωτικού υλικού.

Πηγή	Πυκνότητα (kg/m ³)		Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	
	Από	Μέχρι	Από	Μέχρι
[11]	20	80	0,025	0,035
[18]	20	80	0,025	0,035
[19]	25	45	0,032	0,04

Πίνακας 2.14: Χαρακτηριστικές τιμές της Πυκνότητας και της Θερμικής Αγωγιμότητας της εξηλασμένης πολυστερίνης.

2.6.3.2. Τοξικά συστατικά και περιεχόμενο

Σε περίπτωση πυρκαγιάς τα τοξικά συστατικά εκλύονται στο περιβάλλον, συνεπώς η εύρεση αυτών των συστατικών είναι αναγκαία. Στον Πίνακα 2.15 παρουσιάζονται τα τοξικά συστατικά όπου (+) σημαίνει ότι υπάρχει αντίδραση του τοξικού αερίου και (-) ότι δεν υπάρχει αντίδραση [20].

Τοξικό Αέριο	Εξηλασμένη πολυστερίνη
CO ₂	+
CO	+
H ₂ S	-
NH ₃	-
HCHO	+
HCl	+
SO ₂	-
CH ₂ CHCN	-
NO _x	+
C ₆ H ₅ OH	-
HCN	-
HBr	-
HF	-
COCl ₂	-

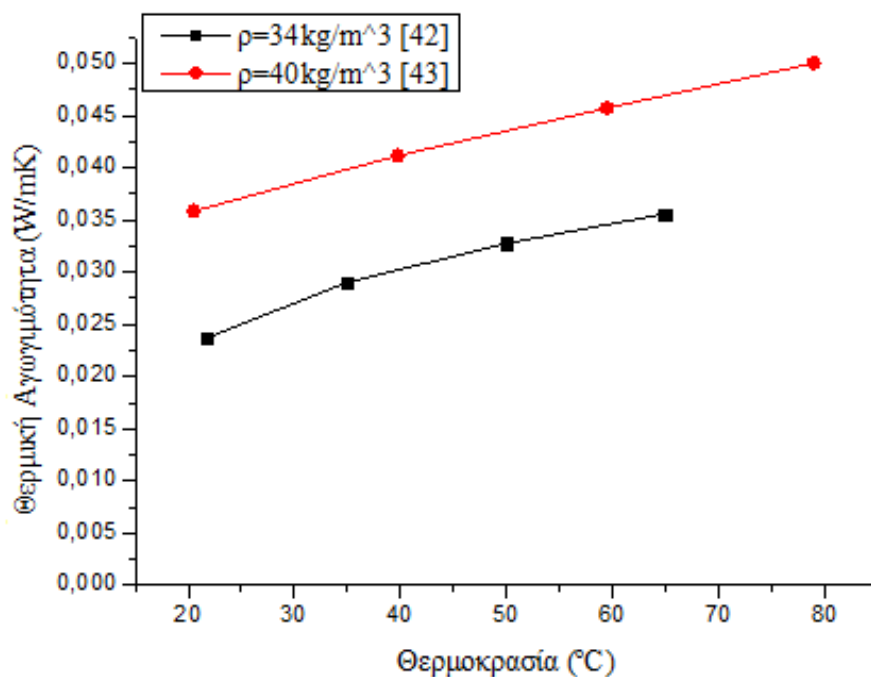
Πίνακας 2.15: Τοξικά συστατικά που περιέχονται στην εξηλασμένη πολυστερίνη.

2.6.3.3. Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας

Η θερμική αγωγιμότητα των μονωτικών υλικών αυξάνει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στην οποία είναι εκτεθειμένα. Στον Πίνακα 2.16 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας της εξηλασμένης πολυστερίνης [42,43]. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 2.7.

$\rho=34 \text{ kg/m}^3$ [42]		$\rho=40 \text{ kg/m}^3$ [43]	
Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
21,7812	0,02371	20,5	0,035823
34,8855	0,028979	39,75	0,041139
50,0254	0,032742	59,5	0,045696
64,9109	0,035565	79	0,05

Πίνακας 2.16: Χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας της εξηλασμένης πολυστερίνης.



Σχήμα 2.7: Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας για την εξηλασμένη πολυστερίνη.

Οι καμπύλες που προέκυψαν είναι ανόμοιες. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στον διαφορετικό τρόπο παρασκευής του μονωτικού υλικού και στην διαφορετική αρχική πυκνότητα.

2.6.3.4. Γενικά στοιχεία της εξηλασμένης πολυστερίνης

Η κατασκευή ενός κτιρίου προϋποθέτει την ασφάλεια των χρηστών του και εν συνεχεία τη μη μόλυνση του περιβάλλοντος. Στον Πίνακα 2.17 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της εξηλασμένης πολυστερίνης [11].

Χαρακτηριστικό	Εξηλασμένη Πολυστερίνη
Τοξικότητα σε περίπτωση πυρκαγιάς	ΝΑΙ
Επαναχρησιμοποιήσιμο	ΝΑΙ
Ανακυκλώσιμο	ΝΑΙ
Χρήση ακατέργαστων πόρων	Υδρογονάνθρακες
Πρόσθετα συστατικά για την προστασία του περιβάλλοντος	ΟΧΙ

Πίνακας 2.17: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξηλασμένης πολυστερίνης.

Ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου επιλέγεται το κατάλληλο μονωτικό υλικό. Τα τέσσερα βασικά κριτήρια και η βαθμονόμηση τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.18 [11].

Αντοχή στο/η	Εξηλασμένη Πολυστερίνη
Νερό	1
Υγρασία	1
Ακτινοβολία του ήλιου	4
Φωτιά	4

Πίνακας 2.18: Βαθμονόμηση της αντοχής της εξηλασμένης πολυστερίνης.

όπου,

(1): πολύ καλό

(2): καλό

(3): κανονικό

(4): κακό

Τα μονωτικά υλικά πέραν του ρόλου τους για τη μόνωση του κτιρίου, διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο και στην ευστάθεια του κτιρίου. Για αυτόν το λόγο ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.19 είναι απαραίτητος καθώς ο κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιάς είναι πάντα υπαρκτός.

Χαρακτηριστικό	Εξηλασμένη Πολυστερίνη		Πηγή
Αντίδραση στη φωτιά	Από	B1	[11]
	Μέχρι	B2	
Θερμοκρασιακό εύρος χρήσης (°C)	Από	-60	[11]
	Μέχρι	75	
Εξάπλωση της φλόγας	5		[27]
Έκλυση θερμότητας κατά τη καύση	5		[27]
Παραγωγή καπνού	4		[27]
Θερμοκρασία τήξης (°C)	200		[34]
Θερμοκρασία θερμικής αποσύνθεσης (°C)	≥120		[32]
Θερμοκρασία ανάφλεξης (°C)	350		[33]

Πίνακας 2.19: Χαρακτηριστικά της της εξηλασμένης πολυστερίνης.

όπου,

(1): πολύ καλό

(2): καλό

(3): κανονικό

(4): κακό

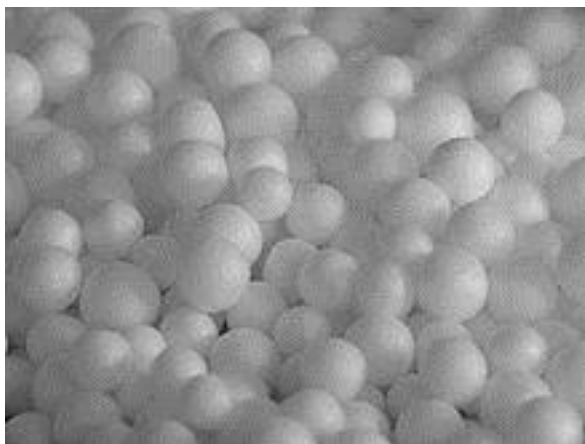
(5): πολύ κακό

2.7. Διογκωμένη Πολυστερίνη

2.7.1. Εισαγωγή

Η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS - Expanded polystyrene), γνωστή και με την ονομασία φελιζόλ, είναι ένα ελαφρύ, θερμομονωτικό υλικό με βάση την πολυστερίνη $((C_8H_8)_n)$.

Η διογκωμένη πολυστερίνη παράγεται από κόκκους πολυστυρολίου, οι οποίοι είναι θερμοπλαστικοί. Με τη διόγκωσή τους, οι κόκκοι μεγαλώνουν και γίνονται σφαιρίδια (Σχήμα 2.8), τα οποία διογκώνονται περισσότερο και κολλούν μεταξύ τους. Η διογκωμένη πολυστερίνη παράγεται σε μεγάλα μπλοκ, τα οποία κόβονται σε πλάκες. Το προωθητικό αέριο που χρησιμοποιείται για την δημιουργία της διογκωμένης πολυστερίνης είναι το πεντάνιο. Η παρουσία του πεντανίου κάνει το υλικό ιδιαίτερα εύφλεκτο [22].



Σχήμα 2.8: Σφαιρίδια διογκωμένης πολυστερίνης διαμέτρου περίπου 2 χιλιοστών.

Για την βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας προσθέτονται πληρωτικά υλικά, όπως ο γραφίτης, αλουμίνιο ή ανθρακας. Οι πλάκες από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) που περιέχουν γραφίτη έχουν χρώμα γκρι. Ο γραφίτης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη διαδικασία μεταφοράς της θερμότητας στο εσωτερικό του υλικού. Πιο συγκεκριμένα, παρεμβαίνει στη θερμότητα που διαχέεται με ακτινοβολία, μειώνοντάς την αισθητά, χάρη στις βέλτιστες ιδιότητες απορρόφησης και αντανάκλασης. Παράγονται σε διάφορες πυκνότητες ανάλογα με την χρήση τους για χαμηλή ή υψηλή αντοχή σε συμπίεση [26].

2.7.2. Χρήσεις της διογκωμένης πολυστερίνης

Η διογκωμένη πολυστερίνη λόγω των τεχνικών ιδιοτήτων της, όπως το χαμηλό βάρος, την ακαμψία, και διαμορφωσιμότητα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών εφαρμογών.

Χρησιμοποιείται για:

- Πιάτα
- Δίσκους
- Ποτήρια
- Συσκευασίες τροφίμων
- Συσκευασίες προϊόντων

Η χαμηλή τιμή σε συνδιασμό με το μικρό βάρος και τον χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, κάνουν την διογκωμένη πολυστερίνη μια πολύ καλή λύση για την μόνωση κτιρίων (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9: Μόνωση κατοικίας με διογκωμένη πολυστερίνη.

Ως μονωτικό υλικό χρησιμοποιείται για εφαρμογές [26] όπως:

- Θερμομόνωση στοιχείων φέροντος οργανισμού (υποστυλώματα, τοιχία, δοκοί).
- Θερμομόνωση θερμογεφυρών.
- Θερμομόνωση πλακών από σκυρόδεμα, για τοποθέτηση στην άνω πλευρά (οροφές) ή στην κάτω πλευρά (πυλωτή).
- Θερμομόνωση κεραμοσκεπών.
- Θερμομόνωση τοίχων με διάκενο.
- Κατασκευές ανεστραμμένης και συμβατικής θερμομόνωσης ταράτσας καθώς και φυτεμένου δώματος.
- Εξωτερική θερμομόνωση.

2.7.3. Χαρακτηριστικά της διογκωμένης πολυστερίνης

2.7.3.1. *Εύρος Πυκνότητας και Θερμικής Αγωγιμότητας*

Ο τρόπος παρασκευής της διογκωμένης πολυστερίνης καθορίζει την τελική πυκνότητα του μονωτικού υλικού. Άμεση σχέση με την πυκνότητα έχει η θερμική αγωγιμότητα. Χαρακτηριστικά εύρη πυκνοτήτων και θερμικής αγωγιμότητας της διογκωμένης πολυστερίνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.20. Οι διαφορές στην θερμική αγωγιμότητα οφείλονται στο διαφορετικό τρόπο παρασκευής του μονωτικού υλικού.

Πηγή	Πυκνότητα (kg/m ³)		Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	
	Από	Μέχρι	Από	Μέχρι
[11]	18	50	0,029	0,041
[18]	10	50	0,029	0,04
[19]	15	30	0,034	0,048

Πίνακας 2.20: Χαρακτηριστικές τιμές της Πυκνότητας και της Θερμικής Αγωγιμότητας της διογκωμένης πολυστερίνης.

2.7.3.2. Τοξικά συστατικά και περιεχόμενο

Τα τοξικά συστατικά που περιέχονται στην διογκωμένη πολυστερίνη σε περίπτωση πυρκαγιάς εκλύονται στο περιβάλλον και εισπνέονται. Συνεπώς η εύρεση αυτών των συστατικών είναι αναγκαία. Στον Πίνακα 2.21 παρουσιάζονται τα τοξικά συστατικά όπου (+) σημαίνει ότι υπάρχει αντίδραση του τοξικού αερίου και (-) ότι δεν υπάρχει αντίδραση [20].

Τοξικό Αέριο	Διογκωμένη πολυστερίνη
CO ₂	+
CO	+
H ₂ S	-
NH ₃	-
HCHO	+
HCl	+
SO ₂	-
CH ₂ CHCN	-
NO _x	+
C ₆ H ₅ OH	-
HCN	-
HBr	-
HF	-
COCl ₂	-

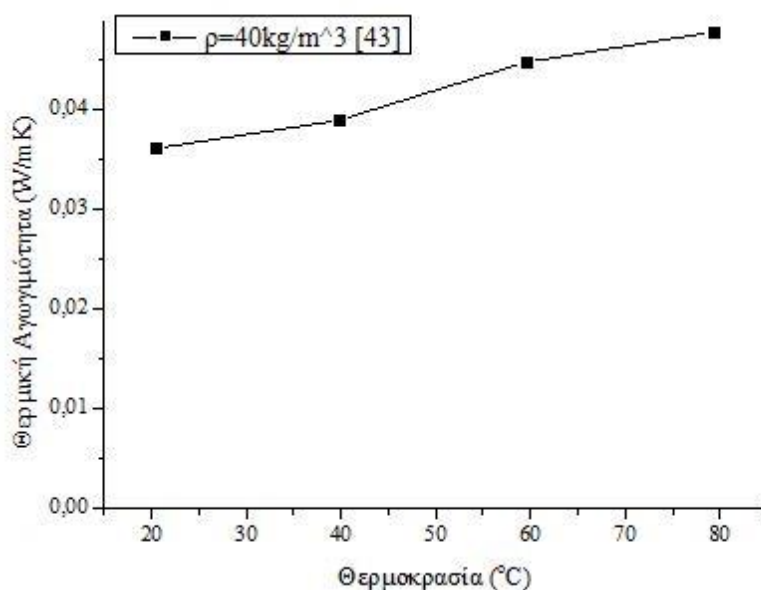
Πίνακας 2.21: Τοξικά συστατικά που περιέχονται στην διογκωμένη πολυστερίνη.

2.7.3.3. Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας

Η θερμική αγωγιμότητα των μονωτικών υλικών αυξάνει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στην οποία είναι εκτεθειμένα. Στον Πίνακα 2.22 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας της διογκωμένης πολυστερίνης [43]. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 2.10.

$\rho=40 \text{ kg/m}^3$ [43]	
Θερμοκρασία (°C)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
20,5	0,036076
39,75	0,038861
59,5	0,044684
79,25	0,047722

Πίνακας 2.22: Χαρακτηριστικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας της διογκωμένης πολυστερίνης.



Σχήμα 2.10: Θερμική Αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας για την εξηλασμένη πολυστερίνη.

2.7.3.4. Γενικά στοιχεία της διογκωμένης πολυστερίνης

Ένας από τους βασικούς παράγοντες επιλογής μονωτικού υλικού είναι η προστασία του περιβάλλοντος. Στον Πίνακα 2.23 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της διογκωμένης πολυστερίνης σε σχέση με το περιβάλλον [11].

Χαρακτηριστικό	Διογκωμένη Πολυστερίνη
Τοξικότητα σε περίπτωση πυρκαγιάς	ΝΑΙ
Επαναχρησιμοποίησιμο	ΝΑΙ
Ανακυκλώσιμο	ΝΑΙ
Χρήση ακατέργαστων πόρων	Υδρογονάνθρακες
Πρόσθετα συστατικά για την προστασία του περιβάλλοντος	ΟΧΙ

Πίνακας 2.23: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διογκωμένης πολυστερίνης.

Υπάρχουν τέσσερα βασικά κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου μονωτικού υλικού. Τα κριτήρια αυτά και η βαθμονόμηση τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.24 [11].

Αντοχή στο/η	Διογκωμένη Πολυστερίνη
Νερό	3
Υγρασία	2
Ακτινοβολία του ήλιου	4
Φωτιά	4

Πίνακας 2.24: Βαθμονόμηση της αντοχής της διογκωμένης πολυστερίνης.

όπου,

(1): πολύ καλό

(2): καλό

(3): κανονικό

(4): κακό

Η ευστάθεια του κτιρίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται. Σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς η ευστάθεια του κτιρίου μεταβάλλεται, για αυτόν το λόγο είναι σημαντικό να μελετώνται και να λαμβάνονται υπόψιν τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 2.25.

Χαρακτηριστικό	Διογκωμένη Πολυστερίνη		Πηγή
Αντίδραση στη φωτιά	Από	B1	[11]
	Μέχρι	B2	
Θερμοκρασιακό εύρος χρήσης (°C)	Από	-80	[11]
	Μέχρι	80	
Εξάπλωση της φλόγας	4		[27]
Έκλυση θερμότητας κατά τη καύση	5		[27]
Παραγωγή καπνού	4		[27]
Θερμοκρασία τήξης (°C)	160		[36]
Θερμοκρασία θερμικής αποσύνθεσης (°C)	140		[37]
Θερμοκρασία ανάφλεξης (°C)	360		[35]

Πίνακας 2.25: Χαρακτηριστικά της διογκωμένης πολυστερίνης.

όπου,

(1): πολύ καλό

(2): καλό

(3): κανονικό

(4): κακό

(5): πολύ

2.8. Αξιολόγηση μονωτικών υλικών

Στις προηγούμενες παραγράφους αναφέρθηκαν τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των τεσσάρων μονωτικών υλικών που πρόκειται να μελετηθούν πειραματικά και να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα στη συνέχεια της εργασίας. Στον Πίνακα 2.26 συγκρίνονται τα μονωτικά υλικά ως προς τα χαρακτηριστικά τους και αριθμούνται από το 1(καλύτερο) μέχρι το 4(χειρότερο).

Χαρακτηριστικά	Αφρός Πολουρεθάνης	Πετροβάμβακας	Εξηλασμένη Πολυστερίνη	Διογκωμένη Πολυστερίνη
Θερμική Αγωγιμότητα	1	4	2	3
Θερμοκρασιακό εύρος χρήσης	2	1	4	3
Αντίδραση στη φωτιά	2	1	2	2
Εξάπλωση της φλόγας	2	1	4	2
Έκλυση θερμότητας κατά τη καύση	2	1	4	3
Αντοχή στο νερό	1	3	1	4
Αντοχή στην ακτινοβολία του ήλιου	2	1	2	2
Αντοχή στη φωτιά	2	1	2	2

Πίνακας 2.26: Σύγκριση μονωτικών υλικών.

Συνεπώς, από τον παραπάνω πίνακα καταλαβαίνουμε ότι η επιλογή μονωτικού υλικού δεν είναι εύκολη υπόθεση. Ανάλογα με το σκοπό χρήσης, του κάθε κτιρίου, επιλέγεται βάσει των χαρακτηριστικών του, το καταλληλότερο μονωτικό υλικό.

3. Αδιαβατικό Θερμιδόμετρο Τύπου Οβίδας Οξυγόνου

3.1. Εισαγωγή

Η θερμογόνος δύναμη ενός καυσίμου είναι η ενέργεια που εκλύεται κατά τη πλήρη και τέλεια καύση με οξυγόνο, με τα προϊόντα και τα αντιδρώντα να βρίσκονται στους 25°C. Η θερμογόνος δύναμη σχετίζεται άρρηκτα με σημαντικά μεγέθη όπως η εσωτερική ενέργεια και η ενθαλπία μιας χημικής αντίδρασης. Η θερμογόνος δύναμη ή ικανότητα εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα μάζας (kJ/kg, kcal/kg, BTU/lb). Η θερμογόνος δύναμη διακρίνεται σε ανώτερη (HHV- Higher Heating Value), όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, και κατώτερη (LHV- Lower Heating Value), όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμός). Η θερμογόνος δύναμη που προσδιορίζεται με τη χρήση θερμιδόμετρου τύπου οβίδας αντιστοιχεί στην ανώτερη θερμογόνος δύναμη. Για τα στερεά καύσιμα, η μέτρηση πραγματοποιείται εν γένει σε δείγματα τα οποία έχουν υποστεί ξήρανση με αέρα. Εναλλακτικά, η θερμογόνος δύναμη μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά με βάση την στοιχειακή ανάλυση και τη γνώση του εμπειρικού τύπου του υπό εξέταση καυσίμου.

Η θερμότητα που απελευθερώνεται σε μία χημική αντίδραση μπορεί να μετρηθεί πειραματικά με τη χρήση ενός αδιαβατικού θερμιδόμετρου τύπου οβίδας οξυγόνου. Θα πρέπει η αντίδραση να πραγματοποιηθεί χωρίς να γίνονται παράπλευρες αντιδράσεις και επαρκώς γρήγορα έτσι ώστε η ανταλλαγή θερμότητας με τα τοιχώματα να είναι αμελητέα. Η αρχή λειτουργίας του θερμιδόμετρου τύπου οβίδας οξυγόνου βασίζεται στην μέτρηση της εκλυόμενης θερμότητας από την πλήρη καύση ενός καυσίμου σε περιβάλλον οξυγόνου. Στο θερμιδόμετρο, η αντίδραση γίνεται σε ένα ασφαλισμένο δοχείο (οβίδα) υπό σταθερό όγκο. Η οβίδα είναι εμβυθισμένη σε συγκεκριμένη ποσότητα νερού (2lt). Η οβίδα και το περιβάλλον νερό, τα οποία είναι σε άμεση θερμική επαφή, αποτελούν το σύστημα μέτρησης του θερμιδομέτρου. Για να εξασφαλιστούν αδιαβατικές συνθήκες λειτουργίας, το σύστημα μέτρησης του θερμιδομέτρου περιβάλλεται από μονωμένα τοιχώματα. Ακόμα, για να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη διάχυση της θερμότητας γύρω από την οβίδα υπάρχει συνεχής ανάδευση του νερού. Συνεπώς, η θερμότητα που εκλύεται κατά τη καύση του καυσίμου μέσα στη βόμβα μεταφέρεται στο νερό και μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της μέτρησης της αύξησης της θερμοκρασίας του νερού.

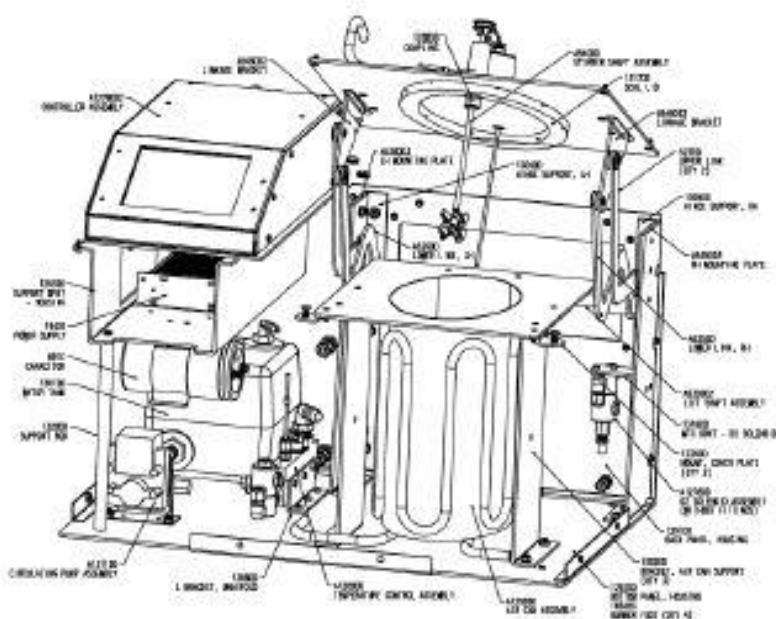
Γενικά, υπάρχουν τρεις τύποι θερμιδόμετρων:

- i. τα αδιαβατικά, στα οποία δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας μεταξύ του συστήματος μέτρησης και του περιβάλλοντος,
- ii. τα ισοπεριβολικά, στα οποία επιτρέπεται ελεγχόμενη μετάδοση θερμότητας,
- iii. τα ισόθερμα, στα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπλέον θερμότητα για να διατηρηθεί σταθερή η θερμοκρασία μέσα στο σύστημα μέτρησης.

Το θερμιδόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι το μοντέλο 6200 της εταιρείας Parr Instrument Company και είναι προτυποποιημένο με ταμπλέτες βενοϊκού οξέος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η εσωτερική διάταξη των επιμέρους στοιχείων του συγκεκριμένου θερμιδόμετρου.



Σχήμα 3.1: Θερμιδόμετρο 6200 της Parr Instrument Company.



Σχήμα 3.2: Εσωτερική διάταξη των επιμέρους στοιχείων που αποτελούν το θερμιδόμετρο οβίδας οξυγόνου.

3.2. Βασικές έννοιες

3.2.1. Εσωτερική ενέργεια της καύσης

Σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, μία μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια εξαρτάται από τη μεταφορά θερμότητας, μεταξύ του συστήματος και των τοιχωμάτων ($q_{\text{συστήματος}} < 0$ και $q_{\text{τοιχωμάτων}} > 0$), και του έργου που παράγεται στο σύστημα (w):

$$\Delta U = q_{\text{συστήματος}} + w \quad (3.1)$$

Στην περίπτωση του θερμιδόμετρου τύπου οβίδας οξυγόνου η μεταβολή είναι ισόχωρη, δηλαδή ο όγκος του συστήματος είναι σταθερός ($\Delta V=0$), συνεπώς το μηχανικό έργο είναι ίσο με μηδέν ($w=0$) όπως φαίνεται και από την εξίσωση (3.2)

$$w = -P_{\text{εξωτ}} \Delta V = 0 \quad (3.2)$$

Η $P_{\text{εξωτ}}$ υποδηλώνει την εξωτερική πίεση στην οποία αντιτίθεται το σύστημα και παράγει έργο. Αν η διαδικασία είναι αντιστρέψιμη, τότε η εσωτερική πίεση ($P_{\text{εσωτ}}$) και η εξωτερική πίεση ($P_{\text{εξωτ}}$) ταυτίζονται. Η εξίσωση (3.1) για σταθερό όγκο γίνεται:

$$\Delta U = q_{\text{συστήματος}} \quad (3.3)$$

Σε ένα αδιαβατικό θερμιδόμετρο τύπου οβίδας οξυγόνου λαμβάνει χώρα ένα πείραμα, όπου μετρούνται οι μεταβολές θερμοκρασίας στο δοχείο νερού που περιβάλλει την οβίδα όπου γίνεται η καύση. Αν το ενεργειακό ισοδύναμο (συνολική θερμοχωρητικότητα) του θερμιδόμετρου ($C_{\text{θερμιδομέτρου}}$) είναι γνωστή, το ποσό θερμότητας που απελευθερώνεται από την οβίδα λόγω της καύσης του καυσίμου και του σύρματος ανάφλεξης, δίνεται από την εξίσωση (3.4):

$$q_{\text{συστήματος}} = c_{\theta} \cdot \Delta T \Rightarrow m_{\kappa} H_{\kappa, \kappa} + m_{\sigma. \alpha.} H_{\sigma. \alpha.} = c_{\theta} \cdot \Delta T \quad (3.4)$$

όπου,

m_{κ} : η μάζα του καυσίμου [g]

$m_{\sigma. \alpha.}$: η μάζα του σύρματος ανάφλεξης [g]

$H_{\kappa, \kappa}$: η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου [cal/g]

$H_{\sigma. \alpha.}$: η θερμογόνος δύναμη του σύρματος ανάφλεξης ($H_{\sigma. \alpha.} = 1400$ cal/g)

Οπότε, σε ένα αδιαβατικό θερμιδόμετρο τύπου οβίδας οξυγόνου η εσωτερική ενέργεια καθορίζεται μέσω της μέτρησης της θερμότητας που αποβάλλεται μέσα από τα τοιχώματα της οβίδας στο νερό που την περιβάλλει.

Το ενεργειακό ισοδύναμο του θερμιδομέτρου (C_θ) μπορεί να προσδιοριστεί κατά την βαθμονόμηση του οργάνου μέσω μέτρησης της θερμογόνου δύναμης βενζοϊκού οξέος (C_6H_5COOH). Η αντίδραση καύσης του βενζοϊκού οξέος στους $25^\circ C$ είναι η ακόλουθη:



Λυοντας την εξίσωση (3.4) ως προς το ενεργειακό ισοδύναμο προκύπτει η εξίσωση (3.6)

$$C_\theta = \frac{m_{\beta.o} H_{c,\beta.o} + m_{\sigma.a.} H_{c,\sigma.a.}}{\Delta T_\beta} \quad (3.6)$$

όπου,

ΔT_β : η παρατηρούμενη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την βαθμονόμηση [$^\circ C$]

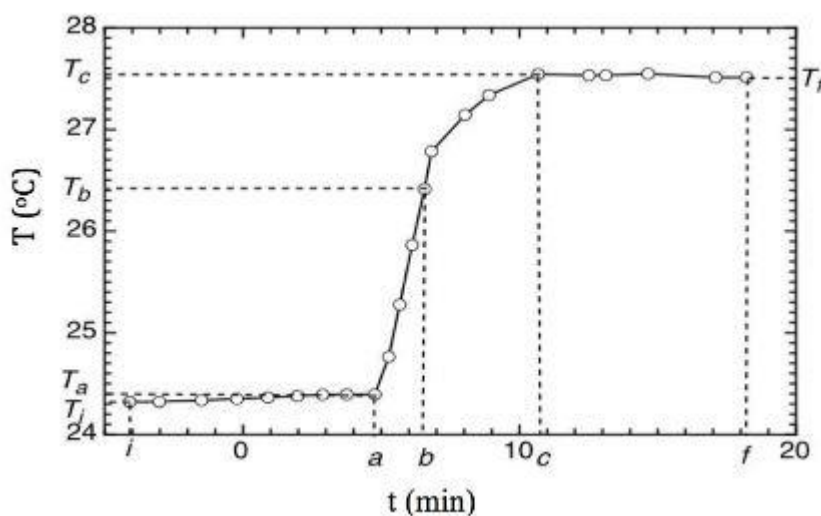
$m_{\beta.o}$: η μάζα του βενζοϊκού οξέος [g]

$H_{c,\beta.o}$: η θερμογόνος δύναμη του βενζοϊκού οξέος ($H_{c,\beta.o} = 6318 \text{ cal/g}$)

Αφού προσδιοριστεί το ενεργειακό ισοδύναμο (C_θ) μπορεί να υπολογιστεί η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου από την εξίσωση (3.4)

$$H_{c,\kappa} = \frac{c_\theta \Delta T_\kappa - m_{\sigma.a.} H_{c,\sigma.a.}}{m_\kappa} \quad (3.7)$$

όπου, ΔT_κ : η παρατηρούμενη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την καύση του καυσίμου [$^\circ C$]



Σχήμα 3.3: Τυπική μορφή θερμοκρασιακής διακύμανσης για την υπόδειξη εύρεσης των χαρακτηριστικών θερμοκρασιών T_i , T_a , T_b , T_c και T_f .

Η μεταβολή της θερμοκρασίας ΔT_{β} και ΔT_{κ} , μπορεί να υπολογιστεί από την χρονική διακύμανση της θερμοκρασίας του νερού στο μεταλλικό δοχείο του θερμιδομέτρου. Η τυπική μορφή αυτής της χρονικής μεταβολής κατά την διάρκεια ενός τυπικού πειράματος προσδιορισμού της θερμογόνου δύναμης έχει την μορφή που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Τα διάφορα σημεία που διακρίνονται αντιστοιχούν στα εξής φαινόμενα

- “a”: η χρονική στιγμή έναυσης καύσης
- “b”: η θέση στην οποία η θερμοκρασία έχει φτάσει στο 60% της συνολικής μεταβολής της
- “c”: η χρονική στιγμή εμφάνισης της μέγιστης θερμοκρασίας (ολοκλήρωση αντίδρασης)
- “i”: αρχή μέτρησης
- “f”: τέλος μέτρησης

Μία προσέγγιση για τον προσδιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας θα μπορούσε να συμπεριλαμβάνει μόνο την αρχική και τελική θερμοκρασία του νερού ($\Delta T = T_c - T_a$). Όμως, εάν η θερμοκρασία δεν παραμένει σταθερή στην αρχική ($i < t < a$) και τελική ($f > t > c$) περίοδο του πειράματος, πρέπει να εφαρμοστεί μια διορθωτικού τύπου διαδικασία. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις παραμέτρους r_1 και r_2 όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.8):

$$r_1 \cong \frac{T_a - T_i}{a - i}, r_2 \cong \frac{T_f - T_c}{f - c} \quad (3.8)$$

μπορεί να υπολογιστεί με πιο ακριβή τρόπο η θερμοκρασιακή διακύμανση βάση της εξίσωσης (3.9):

$$\Delta T = (T_c - r_2(c - b)) - (T_a - r_1(b - a)) \quad (3.9)$$

3.2.2. Ενθαλπία της καύσης

Η ενθαλπία, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι η ενθαλπία της καύσης, ορίζεται ως εξής:

$$H = U + \Delta V \quad (3.10)$$

Αντίστοιχα, για τη μεταβολή της ενθαλπίας ισχύει:

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) = \Delta U + P\Delta V + V\Delta P \quad (3.11)$$

όπου, για σταθερό όγκο ($\Delta V=0$) η εξίσωση (3.11) γίνεται:

$$\Delta H = \Delta U + V\Delta P \quad (3.12)$$

Από την εξίσωση (3.12), παρατηρείτε ότι τα μεγέθη ΔU και ΔH θα είναι παρόμοια μόνο αν η πίεση στην οβίδα παραμένει σταθερή. Αν θεωρηθεί ότι η ποσότητα των αερίων μέσα στην οβίδα παραμένει σταθερή, η πίεση P θα παραμείνει μηδέν και θα ισχύει, $\Delta U=\Delta H$. Παρόλα αυτά, στις περισσότερες αντιδράσεις καύσης, το μοριακά μεγέθη των αερίων μεταβάλλονται και για αυτό το λόγο απαιτείται η χρήση της εξίσωσης (3.12) για τον υπολογισμό του όρου $\Delta(PV)$. Αν γίνει η υπόθεση ότι τα αέρια συστατικά μέσα στην οβίδα συμπεριφέρονται σύμφωνα με το νόμο των τέλειων αερίων, τότε:

$$\Delta(PV) = R\Delta(n_{\text{αερίου}}T) = RT\Delta n_{\text{αερίου}} + Rn_{\text{αερίου}}\Delta T \quad (3.13)$$

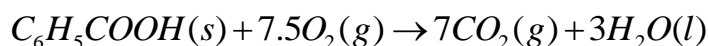
όμως, $Rn_{\text{αερίου}}\Delta T \approx 0$, οπότε η εξίσωση (3.13) γίνεται

$$\Delta(PV) \approx RT\Delta n_{\text{αερίου}} \quad (3.14)$$

όπου R είναι η σταθερά των αερίων ($8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Ο όρος που έχει χαρακτηριστεί ως μικρός ($Rn_{\text{αερίου}}\Delta T \approx 0$) μπορεί να παραλειφθεί όταν οι μεταβολές στη θερμοκρασία είναι μικρές (2 βαθμούς Κελσίου). Οι περισσότερες θερμοκρασιακές μεταβολές που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με το θερμιδόμετρο τύπου οβίδας οξυγόνου είναι έως 2 βαθμούς Κελσίου. Ας σημειωθεί ότι το μέγεθος $n_{\text{αερίου}}$ μπορεί να είναι είτε θετικό (ο αριθμός των αερίων συστατικών αυξάνεται) είτε αρνητικό (ο αριθμός των αερίων συστατικών μειώνεται).

Παράδειγμα

Η αντίδραση καύσης του βενζοϊκού οξέος στους 25°C μπορεί να γραφεί:



Σε αυτή τη περίπτωση, για ένα mole βενζοϊκού οξέος, $\Delta n_{\text{αερίου}}=7-7,5=-0,5\text{mol}$. Ως εκ τούτου, για τη καύση ενός mole βενζοϊκού οξέος έχουμε:

$$\Delta H = \Delta U + \left(-\frac{1}{2}\text{mol}\right) \cdot \left(8,31\frac{\text{J}}{\text{molK}}\right) \cdot (298\text{K}) = \Delta U - 1240\text{J} \quad (1.15)$$

3.3. Πειραματική διάταξη θερμιδόμετρου

Η πειραματική διάταξη μέτρησης του θερμιδόμετρου τύπου οβίδας αποτελείται πρωταρχικά από την οβίδα που είναι κατασκευασμένη από χάλυβα υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Στην διάταξη που έγιναν οι μετρήσεις, το μοντέλο της οβίδας που χρησιμοποιήθηκε ήταν το 1108P της εταιρείας Parr Instrument Company χωρητικότητας 350 mL και είναι κατασκευασμένη από χάλυβα υψηλής θερμικής αγωγιμότητας (Σχήμα 3.4). Στο εσωτερικό της οβίδας λαμβάνει χώρα η καύση μέσα σε ένα κυάθιο, την κάψα, η οποία στηρίζεται σε μία μεταλλική στεφάνη. Για την έναυση χρησιμοποιείται σύρμα νικελίου (Ni) του οποίου τα δύο άκρα συνδέονται με πηγή συνεχούς ρεύματος ενώ τα άλλα δύο βρίσκονται βυθισμένα στο καύσιμο. Η οβίδα ασφαλίζει με ένα καπάκι-περικόχλιο στο οποίο είναι προσαρμοσμένη μια ανεπίστροφη βαλβίδα.

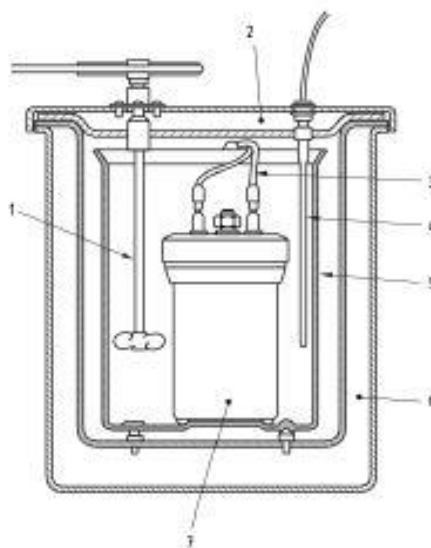


Σχήμα 3.4: Οβίδα οξυγόνου 1108P της εταιρείας Parr Instrument Company.

Η οβίδα είναι εμβαπτισμένη σε μεταλλικό δοχείο το οποίο είναι πληρωμένο με απιονισμένο νερό με σκοπό τον περιορισμό στο ελάχιστο της ανταλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον εξαιτίας της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του. Το μεταλλικό δοχείο είναι τοποθετημένο με την σειρά του σε εξωτερικό περίβλημα που έχει διπλά αδιαβατικά τοιχώματα ανάμεσα στα οποία κυκλοφορεί νερό σταθερής θερμοκρασίας με σκοπό την περαιτέρω ελαχιστοποίηση ανταλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον.

Τέλος, στη διάταξη μέτρησης χρησιμοποιείται ένας αναδευτήρας που παίρνει κίνηση από ένα ηλεκτροκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος, εκτελεί παλινδρομικές κινήσεις με στόχο την ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας του νερού εξωτερικά της οβίδας. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας αυτής χρησιμοποιείται θερμόμετρο ακρίβειας τέταρτου δεκαδικού ψηφίου. Όλη η διάταξη μέτρησης ασφαλίζει με ένα καπάκι στο οποίο είναι στερεωμένος τόσο ο αναδευτήρας όσο και το θερμόμετρο. Η βασική πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.

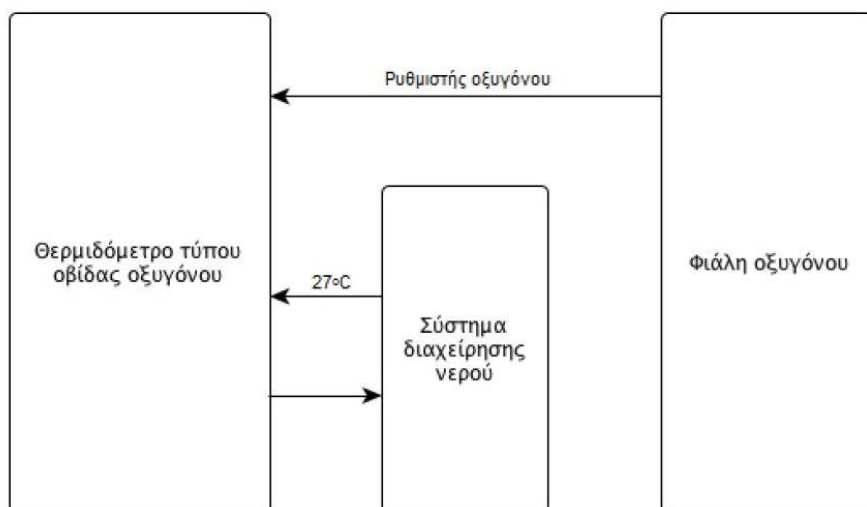
1. Αναδευτήρας
2. Καπάκι οβίδας
3. Ηλεκτρόδια έναυσης
4. Θερμόμετρο
5. Μεταλλικό δοχείο θερμομέτρου (Bucket)
6. Εξωτερικό περίβλημα (Jacket)
7. Θερμιδομετρική οβίδα



Σχήμα 3.5: Βασική πειραματική διάταξη.

3.4. Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων

Η διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων που ακολουθήθηκε ήταν βάση του προτύπου ISO 1716. Τρία δείγματα από το ίδιο υλικό μετρούνται κάθε φορά και ελέγχεται αν η απόκλιση των μετρήσεων της θερμότητας ισχύος (Θ.Ι.) είναι μεγαλύτερη από 200kJ/kg . Σε περίπτωση που η απόκλιση είναι εντός του ορίου υπολογίζεται ο μέσος όρος της θερμογόνου δύναμης που προσδιορίστηκε πειραματικά. Σε αντίθετη περίπτωση δηλαδή απόκλισης μεγαλύτερης των 200kJ/kg θα πρέπει να μετρηθούν δύο ακόμα δείγματα. Στη συνέχεια αφαιρείται η μεγαλύτερη και η μικρότερη τιμή από τις μετρήσεις και ελέγχεται αν οι τρεις μετρήσεις είναι εντός του ορίου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η απόκλιση των τριών μετρήσεων να είναι μικρότερη από 200kJ/kg . Η πειραματική διάταξη στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Διάταξη πειραματικής διάταξης στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

1. Άνοιγμα της φιάλης οξυγόνου καθαρότητας 99.5% και ρύθμισή της στα 450 psi
2. Άνοιγμα της ψυκτικής εγκατάστασης και αναμονή μέχρι η θερμοκρασία που αναγράφεται στην οθόνη ελέγχου να φτάσει τους 27°C. Η ψυκτική εγκατάσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7.

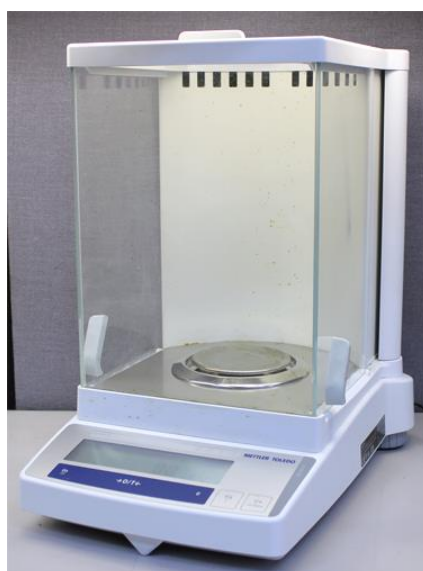


Σχήμα 3.7: Ψυκτική εγκατάσταση και σύστημα τροφοδότησης νερού 6510 της εταιρείας Parr Instrument Company.

3. Άνοιγμα του θερμιδομέτρου, επιλέγεται (calorimeter operation → Heater and Pump → ON), έτσι ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία ώστε η θερμοκρασία του περιβλήματος να γίνει σταθερή και ίση με 30°C. Σε περίπτωση που γίνεται προτυποποίηση επιλέγεται (calorimeter operation → operating mode → standardization). Προτυποποίηση γίνεται κάθε 10 μετρήσεις. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή πείραμα με οποιοδήποτε υλικό επιλέγεται (calorimeter operation → operating mode → determination). Ακόμα ανάλογα με την οβίδα που χρησιμοποιείται θα πρέπει να ρυθμίζεται και ο τύπος της στο λογισμικό του θερμιδομέτρου (Bomb 1: non halogen resistant bomb -default).
4. Προετοιμασία του δείγματος για το πείραμα. Αρχικά το δείγμα τοποθετείται στο υγρασιόμετρο (μοντέλο MJ33 της Mettler Toledo, η αρχή λειτουργίας του περιγράφεται στην επόμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου). Αφού αφαιρεθεί η υγρασία του, μπορεί να τοποθετηθεί στη κάψα ώστε να γίνει το πείραμα. Σε περίπτωση που το στερεό δείγμα έχει μικρή πυκνότητα πρέπει να υποστεί κατεργασία ώστε να αλλάξει η μορφή του. Συνήθως χρησιμοποιείται λίμα για να τριφτεί το δείγμα. Το τρίμα από το δείγμα τοποθετείται στην πρέσα (Σχήμα 3.8) και δημιουργείται το δισκίο (pellet). Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται στη κάψα και ζυγίζεται. Για το ζύγισμα χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονική ζυγαριά μοντέλο AB265-S/FACT Precision Analytical Balance Digital Scale της εταιρείας Mettler Toledo (Σχήμα 3.9) δυνατότητας μέτρησης πέντε δεκαδικών ψηφίων του γραμμαρίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ποσότητα καυσίμου πρέπει να είναι από 0.6 μέχρι 1.0 gr (μέγιστο 1.2 gr). Σε περίπτωση εντελώς άγνωστου δείγματος η συνιστώμενη ποσότητα είναι 0.2 gr. Η μέγιστη ενέργεια που επιτρέπεται να εκλυθεί είναι 8000 cal (33494.4 Joules), οπότε πρέπει να δίνεται προσοχή στην ποσότητα δείγματος που τοποθετείται μέσα στη κάψα.



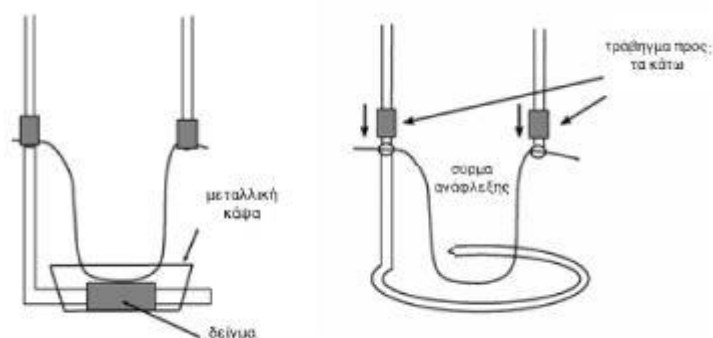
Σχήμα 3.8: Πρέσα 2811 της εταιρείας Parr Instrument Company για τη δημιουργία δισκίων.



Σχήμα 3.9: Ψηφιακή ζυγαρία AB265-S/FACT της Mettler Toledo.

5. Σε περίπτωση που το καύσιμο δεν είναι εύφλεκτο τότε τοποθετείται επιπλέον ουσία για την διευκόλυνση της έναυσης της καύσης. Η ουσία που χρησιμοποιείται πρέπει να οριστεί στο λογισμικό, συνήθως χρησιμοποιείται βενζοϊκό οξύ.
6. Προετοιμασία οβίδας (καθαρισμός της με αποσταγμένο νερό για τυχόν υπολείμματα από προηγούμενες μετρήσεις). Η οβίδα πρέπει να έχει σε κατά τη διάρκεια όλων των μετρήσεων το ίδιο περίπου ποσοστό υγρασίας.
7. Προσθήκη 2 L αποσταγμένου νερού στο μεταλλικό δοχείο όπου τοποθετείται η οβίδα. Η ποσότητα αυτή μετράται επακριβώς χρησιμοποιώντας την ειδική μετρητική διάταξη που είναι τοποθετημένη πλάγια της ψυκτικής εγκατάστασης (automatic pipet).

8. Τοποθέτηση του δείγματος στην ειδική μεταλλική κάψα (steel crucible) και τοποθέτηση της σε μεταλλική στεφάνη στο καπάκι τη οβίδας.
9. Κόψιμο σύρματος ανάφλεξης, μέτρηση του και τοποθέτησή του στους ειδικούς υποδοχείς των ηλεκτροδίων στο καπάκι της οβίδας. Η τοποθέτηση του σύρματος πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να κάνει μια «κοιλιά» πάνω στο δείγμα (crucible method), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Αν το δείγμα είναι σε μορφή δισκίου, τότε το σύρμα πρέπει ελαφρώς να ακουμπάει το δισκίο. Αν το δείγμα είναι σε μορφή σκόνης, τότε το σύρμα θα πρέπει να απέχει λίγα χιλιοστά από το δείγμα. Το σύρμα θα πρέπει να μετρηθεί και μετά το τέλος του πειράματος και να καταχωριθεί η μέτρηση στο λογισμικό ώστε να γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις.



Σχήμα 3.10: Τοποθέτηση του σύρματος ανάφλεξης.

10. Κλείσιμο της οβίδας, ασφάλιση και πλήρωση με οξυγόνο πίεσης 30 bar (Σχήμα 3.11). Η εντολή δίνεται από το λογισμικό (calorimeter operation → O₂ fill abort) και η διαδικασία διαρκεί περίπου 60 s. Η ασφαλιστική βαλβίδα στο καπάκι της οβίδας πρέπει να είναι κλειστή. Κατά το κλείσιμο θα πρέπει να ελεγχθεί αν ο αναδευτήρας κινείται ελεύθερα.



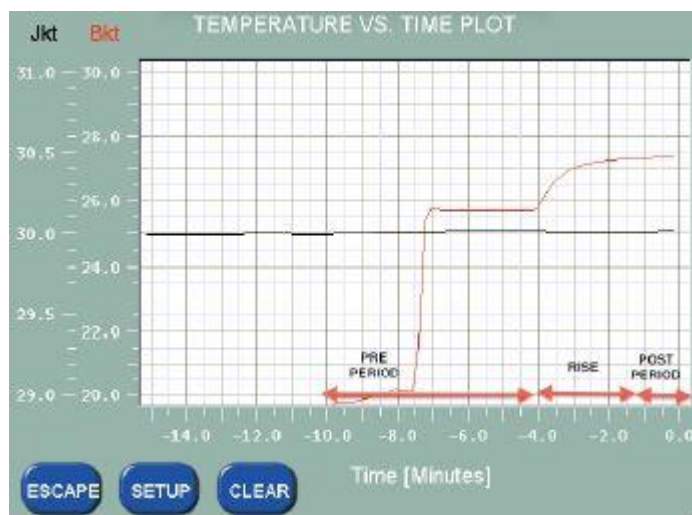
Σχήμα 3.11: Πλήρωση της οβίδας με οξυγόνο.

11. Τοποθέτηση της οβίδας μέσα στο γεμισμένο με αποσταγμένο νερό μεταλλικό δοχείο, σύμφωνα με τους ειδικούς υποδοχείς που υπάρχουν στην βάση του δοχείου. Η μεταφορά της οβίδας γίνεται με την ειδική μεταλλική μέγγενη συγκράτησης. Στη συνέχεια γίνεται η εισαγωγή των ηλεκτροδίων στην κορυφή της οβίδας και έλεγχος για μη παρουσία φυσαλίδων, καθώς σε αντίθετη περίπτωση σημαίνει ότι υπάρχουν διαρροές (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12: Τοποθέτηση της οβίδας και εισαγωγή των ηλεκτροδίων.

12. Έναρξη του πειράματος. Πιέζεται το κουμπί έναυσης, καθορίζεται το όνομα του δείγματος, το βάρος του, το βάρος της ουσίας για την διευκόλυνση της έναυσης της καύσης (αν έχει χρησιμοποιηθεί) και το βάρος του σύρματος που χρησιμοποιήθηκε. Μέχρι να επέλθει η αρχική ισορροπία στο δείγμα αναγράφεται ότι η συσκευή είναι σε κατάσταση αναμονής (PREPERIOD) και λίγο πριν γίνει η έναυση του δείγματος ακούγεται ένας προειδοποιητικός ήχος προκειμένου να απομακρυνθεί ο χρήστης από το θερμιδόμετρο (RISE PERIOD). Μετά την έναυση υπάρχει μια περίοδος μέχρι την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του νερού (POSTPERIOD). Η διάρκεια του πειράματος είναι περίπου 5 – 8 min. το διάγραμμα που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Παρουσίαση των τριών χαρακτηριστικών περιόδων κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης.

13. Μετά το τέλος της μέτρησης ανοίγεται το καπάκι και αφαιρείται η οβίδα. Αφού τοποθετηθεί στην σταθερή βάση ανοίγεται η βαλβίδα εξαέρωσης με προσοχή μέχρι να αποσυμπιεστεί η οβίδα.
14. Στη συνέχεια ξεβιδώνεται το ασφαλιστικό περικόχλιο και πραγματοποιείται καθαρισμός του εσωτερικού της οβίδας με απιονισμένο νερό και μέτρησης του τμήματος του σύρματος ανάφλεξης που δεν κάηκε, ώστε να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς.

3.5. Υγρασιόμετρο

Στη διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το υγρασιόμετρο μοντέλο MJ33 της Mettler Toledo (Σχήμα 3.14)



Σχήμα 3.14: Υγρασιόμετρο MJ33 της Mettler Toledo.

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη θέρμανση του δείγματος με σκοπό την εξάτμιση της υγρασίας και τον υπολογισμό αυτής μέσω της εξίσωσης (3.16).

$$MC(\%) = -\frac{m_{\alpha.\delta.} - m_{\xi.\delta.}}{m_{\alpha.\delta.}} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

όπου,

$m_{\alpha.\delta.}$: η μάζα του αρχικού δείγματος

$m_{\xi.\delta.}$: η μάζα του ξηρού δείγματος

Κατά τη διάρκεια της αφύγρανσης, το δείγμα ζυγίζεται συνεχώς προκειμένου να υπολογίζεται η μείωση της υγρασίας του δείγματος. Σημαντικός παράγοντας είναι ο ρυθμός θέρμανσης καθώς και η ομοιόμορφη θέρμανση στην επιφάνεια του δείγματος. Η ομοιόμορφη θέρμανση εξασφαλίζει την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Πριν γίνει η αφύγρανση, ο χρήστης ορίζει τη θερμοκρασία ξηρότητας του δείγματος (στα δείγματα των μονωτικών υλικών είχε ρυθμιστεί στους 65°C). Η υγρασία που περιέχεται σε ένα δείγμα αναγράφεται ως το ποσοστό της μάζας του αρχικού δείγματος πριν τη διαδικασία της αφύγρανσης (%MC – Moisture Content) και ο αριθμός που προκύπτει είναι αρνητικός.

3.6. Επεξεργασία των μετρήσεων

- Υπολογισμός κατώτερης θερμογόνου δύναμης (LHV)

Υπολογίζεται από τη σχέση (3.17):

$$HHV = LHV + \mu_{H_2O} r_{H_2O} \quad (3.17)$$

όπου,

μ_{H_2O} : η μάζα του υδρατμού ανά μονάδα μάζας καίόμενου καυσίμου

r_{H_2O} : η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης του υδρατμού

$$r_{H_2O} = 2260 \frac{kJ}{kg} = 539,792 \frac{cal}{g} \quad (3.18)$$

- Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων

Σε αυτή τη περίπτωση, μία απλή ανάλυση σφάλματος είναι αρκετή. Μπορεί να υπολογιστεί η μέση τιμή εξίσωση (3.19) καθώς και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων εξίσωση (3.20).

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.19)$$

$$x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n N(x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}} \quad (3.20)$$

όπου,

x_i : οι μετρούμενες τιμές

N : ο αριθμός των τιμών

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των σημείων είναι σχετικά μικρός, οπότε η εκτίμηση του σφάλματος μπορεί να μην είναι ακριβής.

3.7. Πειραματικές μετρήσεις

3.7.1. Αφρός Πολυουρεθάνης

Ο αφρός πολυουρεθάνης που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ανώτερης και κατώτερης θερμογόνου δύναμης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15. Είναι αφρός ταχείας σταθεροποίησης ενός συστατικού, με γρήγορη διόγκωση και ωρίμανση (με χρήση της ατμοσφαιρικής υγρασίας), χωρίς CFC και HCFC (δηλαδή δεν περιέχουν ουσίες που καταστρέφουν το όζον της στρατόσφαιρας). Ακόμα έχει εξαιρετική πρόσφυση και μόνωση. Επιπλέον, ανήκει στην κατηγορία B3 για φωτιά κατά DIN 4102-1. Ο αφρός δεν συνιστάται για μόνιμη εμφάνιση σε νερό και όταν πρόκειται για εξωτερική χρήση η επιφάνεια του αφρού πρέπει να είναι προστατευμένη από τις ακτίνες UV [44].



Σχήμα 3.15: Αφρός πολυουρεθάνης της DEN BRAVEN.

Οι κύριες εφαρμογές του είναι οι εξής:

- Γέμισμα αρμών σε τοίχους
- Τοποθέτηση και στερέωση κουφωμάτων
- Σφράγιση οπών καλωδίων και σωληνώσεων
- Συγκόλληση διακοσμητικών πανέλ
- Ηχομόνωση
- Θερμομόνωση
- Χρήση στην οικοδομή και τη βιομηχανία

Αρχικά αφαιρέθηκε ο αφρός πούουρεθάνης από το δοχείο (Σχήμα 3.16) και αφέθηκε μια μέρα ώστε απορροφώντας την υγρασία της ατμόσφαιρας να διογκωθεί και να ωριμάσει (στερεοποιηθεί).



Σχήμα 3.16: Αφρός πολυουρεθάνης κατά τη διάρκεια της διόγκωσης και στερεοποίησης.

Την επόμενη μέρα αφαιρέθηκαν τμήματα για τον προσδιορισμό της πυκνότητας του υλικού. Σε πολλά τμήματα του εσωτερικού μέρους του υλικού είχαν δημιουργηθεί μεγάλα κενά, οπότε η διαδικασία εύρεσης της πυκνότητας δεν ήταν εύκολη. Μετά από αρκετές μετρήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 προέκυψε ότι η πυκνότητα ισούται με $\rho=24\text{kg/m}^3$.

Μέτρηση	Πυκνότητα (kg/m^3)
1 ^η	23,91
2 ^η	24,07
3 ^η	24,02
Μ.Ο.	24,00

Πίνακας 3.1: Προσδιορισμός της πυκνότητας.

Ακολούθησε η διαδικασία της αφύγρανσης (Σχήμα 3.17). Η υγρασία που είχε αποκτήσει το υλικό μετά την στερεοποίηση και την διόγκωση ήταν ίση με 1.57%MC.



Σχήμα 3.17: Αφύγρανση του αφρού πολυουρεθάνης.

Η πυκνότητα του υλικού ήταν μικρή οπότε για να μπορέσει να τοποθετηθεί η ποσότητα του δείγματος που χρειάζεται το θερμιδόμετρο (0.6-1.0gr) έπρεπε να χρησιμοποιηθεί η πρέσα (Σχήμα 3.18) για να δημιουργηθεί δισκίο.



Σχήμα 3.18: Αφρός πολυουρεθάνης σε μορφή δισκίου.

Στη συνέχεια ζυγίστηκε η μεταλλική κάψα και το δείγμα που τοποθετήθηκε σε αυτήν. Ακολούθως τοποθετήθηκε το σύρμα ανάφλεξης ώστε να ακουμπάει το δείγμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19: Τοποθέτηση του σύρματος ανάφλεξης.

Τέλος, σφραγίστηκε η οβίδα, πληρώθηκε με οξυγόνο, τοποθετήθηκε στο θερμιδόμετρο, οπότε και δόθηκε η εντολή για την έναυση και την ολοκλήρωση του πειράματος, παίρνοντας την τελική μέτρηση της ανώτερης θερμογόνου δύναμης.

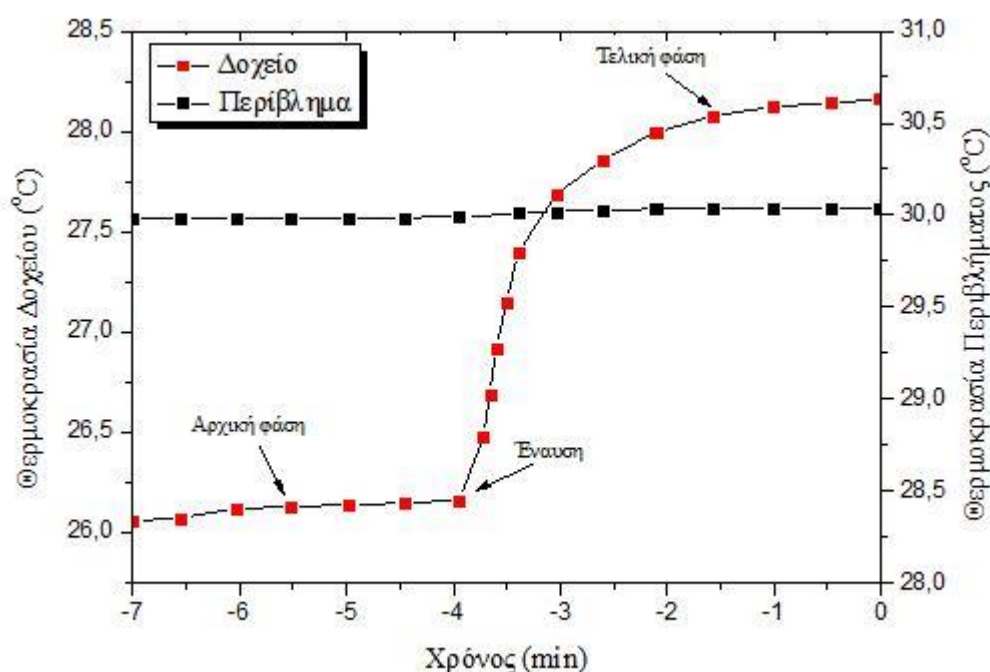
Οι τρεις μετρήσεις που προέκυψαν και είχαν απόκλιση μεταξύ τους μικρότερη των 200kJ/kg παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2:

	PUR	1 ^η Μέτρηση (PUR4)	2 ^η Μέτρηση (PUR9)	3 ^η Μέτρηση (PUR11)	
Υγρασιόμετρο	Βάρος δείγματος (πριν την αφύγρανση)	1,509 g	1,253 g	1,632 g	
	Υγρασία	1,78 %MC	1,44 %MC	1,50 %MC	
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψας	13,42912 g	13,42701 g	13,40293 g	
	Βάρος δείγματος	0,72076 g	0,70146 g	0,70352 g	
	Μήκος αρχικού σύρματος ανάφλεξης (fuse)	17 cal	17 cal	17 cal	
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος σύρματος ανάφλεξης (final fuse)	5 cal	3 cal	4 cal	
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV)	Cal/g	6601,8685	6569,0589	6574,7266
		KJ/Kg	27640,6911	27503,3239	27527,0534
	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV)	Cal/g	6592,2602	6561,2859	6566,0292
KJ/Kg		27600,4631	27470,7799	27490,6413	

Πίνακας 3.2: Πειραματικές Θ.Ι μετρήσεις αφρού πολουρεθάνης σε μορφή δισκίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά το άνοιγμα της οβίδας παρατηρήθηκε έντονη οσμή, καθώς επίσης και μαύρα υπολλείματα, δηλαδή κομμάτια του αφρού πολυουρεθάνης που δεν κάηκαν πλήρως. Από μέτρηση σε μέτρηση η ποσότητα των υπολλειμάτων που δεν καίγονταν πλήρως διέφερε, συνεπώς η θερμότητα που εκλύεται δεν ήταν σταθερή σε σχέση με το βάρος του αρχικού δείγματος. Για το λόγο αυτό χρειάστηκαν αρκετές μετρήσεις ώστε να προκύψουν τρεις με απόκλιση μικρότερη των 200 kJ/kg.

Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα θερμοκρασιών για τη μέτρηση PUR4. Τα διαγράμματα που προέκυψαν για τις μετρήσεις PUR9 και PUR11 δεν είχαν διαφορά από τη μέτρηση PUR4. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 26,1°C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει 4 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2°C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 1,8 min.



Σχήμα 3.20: Διάγραμμα αφρού πολυουρεθάνης (Μέτρηση PUR4).

Οι τιμές που προκύπτουν, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716, για την ανώτερη και τη κατώτερη θερμογόνο δύναμη καθώς οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

		Αποτελέσματα PUR	
		cal/g	kJ/kg
Μέση τιμή	LHV	6573,1918	27520,6394
	HHV	6582,218	27558,4303
Τυπική απόκλιση	LHV	16,68	69,84
	HHV	17,54	73,44

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για τον αφρό πολυουρεθάνης.

3.7.2. Πετροβάμβακας

Ο πετροβάμβακας που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ανώτερης και κατώτερης θερμογόνου δύναμης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.21. Ο πετροβάμβακας λόγω της ιδιομορφίας του (αποτελείται από ίνες) παρουσιάζει διαφορές στην πυκνότητα από τμήμα σε τμήμα. Μετά από αρκετές μετρήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4 προέκυψε ότι η πυκνότητα του πετροβάμβακα ισούται με $\rho=18,07 \text{ kg/m}^3$.



Σχήμα 3.21: Πετροβάμβακας.

Μέτρηση	Πυκνότητα (kg/m^3)
1 ^η	17,87
2 ^η	18,17
3 ^η	18
4 ^η	17,81
5 ^η	18,52
Μ.Ο.	18,07

Πίνακας 3.4: Προσδιορισμός της πυκνότητας.

Αρχικά αφαιρέθηκε η υγρασία από το δείγμα (Σχήμα 3.22). Η υγρασία που μετρήθηκε ήταν της τάξης του 2,07%MC.



Σχήμα 3.22: Αφύγρανση του πετροβάμβακα.

Ο πετροβάμβακας αποτελείται από ίνες, συνεπώς ένα μεγάλο μέρος του υλικού αποτελείται από αέρα, με αποτέλεσμα η πυκνότητά του να είναι σχετικά μικρή. Για να δημιουργηθεί ένα δείγμα με βάρος από 0,6 g μέχρι 1,0 g (ποσότητα δείγματος που χρειάζεται το θερμιδόμετρο) χρησιμοποιήθηκε η πρέσα (Σχήμα 3.23).



Σχήμα 3.23: Πετροβάμβακας σε μορφή δισκίου.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η ζυγαριά για να μετρηθεί το βάρος της μεταλλικής κάψας και του δείγματος. Έπειτα, τοποθετήθηκε το σύρμα ανάφλεξης ώστε να ακουμπάει το δείγμα (Σχήμα 3.24).



Σχήμα 3.24: Τοποθέτηση του σύρματος ανάφλεξης.

Ακολούθως, σφραγίστηκε η οβίδα, πληρώθηκε με οξυγόνο, τοποθετήθηκε στο θερμιδόμετρο, οπότε και δόθηκε η εντολή για την έναυση και την ολοκλήρωση του πειράματος, παίρνοντας την τελική μέτρηση της ανώτερης θερμογόνου δύναμης.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος το θερμιδόμετρο εμφάνισε την ένδειξη MISFIRE. Η ένδειξη αυτή, εμφανίζεται σε δυο περιπτώσεις. Πρώτη περίπτωση, όταν το σύρμα ανάφλεξης δεν ακουμπάει το δείγμα, οπότε και δεν ολοκληρώνεται το κύκλωμα ώστε να γίνει η έναυση. Δεύτερη περίπτωση, όταν η θερμοότητα που εκλύει το δείγμα που καίγεται είναι πολύ μικρή, οπότε και το θερμιδόμετρο δε μπορεί να μετρήσει την τόσο μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας στο δοχείο.

Το δείγμα του εξετάστηκε άνηκε στην δεύτερη περίπτωση, καθώς όταν ανοίχθηκε η οβίδα διαπιστώθηκε ότι το δείγμα είχε αλλάξει το χρώμα του αλλά μόνο επιφανειακά (Σχήμα 3.25), στο κάτω μέρος του δείγματος και στο εσωτερικό του είχε παραμείνει ίδιο. Το πείραμα επαναλήφθηκε αρκετές φορές καταλλήγοντας στο ίδιο αποτέλεσμα (MISFIRE).



Σχήμα 3.25: Το δείγμα στο τέλος του πειράματος.

Για την διευκόλυνση της έναυσης της καύσης χρησιμοποιήθηκε εύφλεκτη ουσία (βενζοϊκό οξύ). Το αποτέλεσμα ήταν να καεί το δείγμα επιφανειακά, αφήνοντας το εσωτερικό ανέγγιχτο (Σχήμα 3.26) και εμφανίζοντας την ένδειξη MISFIRE.



Σχήμα 3.26: Το δείγμα με χρήση βενζοϊκού οξέος.

Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ότι ο πετροβάμβακας ανήκει στην κατηγορία των άκαυστων μονωτικών υλικών, για αυτό το λόγο προτιμάται η χρήση του σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις με αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιάς.

3.7.3. Εξηλασμένη πολυστερίνη

Η εξηλασμένη πολυστερίνη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ανώτερης και κατώτερης θερμογόνου δύναμης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.27. Η πυκνότητα του υλικού ήταν ίση με 30 kg/m^3 .



Σχήμα 3.27: Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS).

Στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας αφαιρέθηκε η υγρασία από το δείγμα (Σχήμα 3.28). Η υγρασία που μετρήθηκε ήταν ίση με 0,14%MC.



Σχήμα 3.28: Αφύγρανση της εξηλασμένης πολυστερίνης.

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου η εξηλασμένη πολυστερίνη έχει πολύ μικρή πυκνότητα. Το θερμιδόμετρο χρειάζεται βάρος από 0,6 g μέχρι 1,0 g για να μπορέσει να λειτουργήσει. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε λίμα, ώστε να τριφτεί το υλικό και στη συνέχεια να δημιουργηθεί το δείγμα στη μορφή δισκίου με τη χρήση της πρέσας (Σχήμα 3.29).



Σχήμα 3.29: Εξηλασμένη πολυστερίνη σε μορφή δισκίου.

Έπειτα ζυγίστηκε η μεταλλική κάψα και το δείγμα που τοποθετήθηκε σε αυτήν. Ακόμα τοποθετήθηκε το σύρμα ανάφλεξης ώστε να ακουμπάει το δείγμα (Σχήμα 3.30).



Σχήμα 3.30: Τοποθέτηση του σύρματος ανάφλεξης.

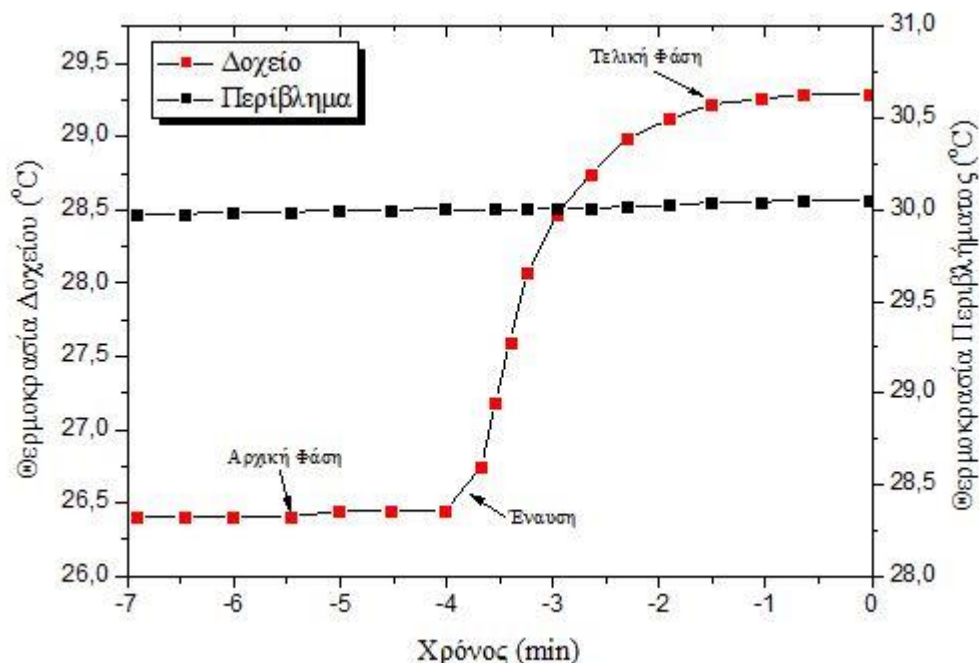
Η πειραματική διαδικασία ολοκληρώθηκε σφραγίζοντας την οβίδα, γεμίζοντάς την οξυγόνο και δίνοντας την εντολή για την έναυση στο θερμιδόμετρο.

Οι τρεις μετρήσεις που προέκυψαν και είχαν απόκλιση μεταξύ τους μικρότερη των 200kJ/kg παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5:

	XPS	1 ^η Μέτρηση (XPS1)	2 ^η Μέτρηση (XPS5)	3 ^η Μέτρηση (XPS6)	
Υγρασιόμετρο	Βάρος δείγματος (πριν την αφύγρανση)	1,923 g	1,741 g	1,325 g	
	Υγρασία	0,14 %MC	0,15 %MC	0,14 %MC	
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψουλας	13,43152 g	13,43302 g	13,43203 g	
	Βάρος δείγματος	0,83081 g	0,71103 g	0,64183 g	
	Μήκος αρχικού σύρματος ανάφλεξης (fuse)	17 cal	17 cal	17 cal	
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος σύρματος ανάφλεξης (final fuse)	4 cal	3 cal	3 cal	
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV)	Cal/g	9699,2456	9716,0876	9671,8236
		KJ/Kg	40608,8014	40679,2980	40493,9735
	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV)	Cal/g	9698,4899	9715,2779	9671,0679
KJ/Kg		40605,6199	40675,908	40490,8095	

Πίνακας 3.5: Πειραματικές μετρήσεις εξηλασμένης πολυστερίνης σε μορφή δισκίου.

Στο Σχήμα 3.31 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση XPS1. Τα διαγράμματα που προέκυψαν για τις μετρήσεις XPS5 και XPS6 δεν είχαν διαφορά από το διάγραμμα της μέτρησης XPS1. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 26,4°C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει 4 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3,1°C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 2 min.



Σχήμα 3.31: Διάγραμμα XPS (Μέτρηση XPS1).

Οι τιμές που προκύπτουν, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716, για την ανώτερη και τη κατώτερη θερμογόνο δύναμη καθώς οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6:

		Αποτελέσματα XPS	
		cal/g	kJ/kg
Μέση τιμή	LHV	9694,9452	40590,7966
	HHV	9695,7189	40594,0359
Τυπική απόκλιση	LHV	22,32	93,45
	HHV	22,75	95,25

Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για την εξηλασμένη πολυστερίνη.

3.7.4. Διογκωμένη πολυστερίνη

Η διογκωμένη πολυστερίνη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ανώτερης και κατώτερης θερμογόνου δύναμης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.32. Η πυκνότητα του υλικού μετρήθηκε και ήταν ίση με $18,66 \text{ kg/m}^3$.



Σχήμα 3.32: Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS).

Αρχικά αφαιρέθηκε η υγρασία από το δείγμα (Σχήμα 3.33). Η υγρασία του δείγματος ήταν ίση με $0,56\% \text{MC}$.



Σχήμα 3.33: Αφύγρανση της διογκωμένης πολυστερίνης.

Η διογκωμένη πολυστερίνη έχει πολύ μικρή πυκνότητα, οπότε το υλικό τρίφτηκε με λίμα, για να μπορέσει στη συνέχεια με τη βοήθεια της πρέσας (Σχήμα 3.34) να φτιαχτεί δείγμα σε μορφή δισκίου και κατάλληλο βάρος, ώστε να μετρηθεί η $\Theta.I.$ του στο θερμιδόμετρο.



Σχήμα 3.34: Διογκωμένη πολυστερίνη σε μορφή δισκίου.

Σύμφωνα με την μεθοδολογία της πειραματικής διαδικασίας ζυγίστηκε η μεταλλική κάψα και το δείγμα που τοποθετήθηκε σε αυτήν. Ακόμα, τοποθετήθηκε το σύρμα ανάφλεξης ώστε να ακουμπάει το δείγμα (Σχήμα 3.35).



Σχήμα 3.35: Τοποθέτηση του σύρματος ανάφλεξης.

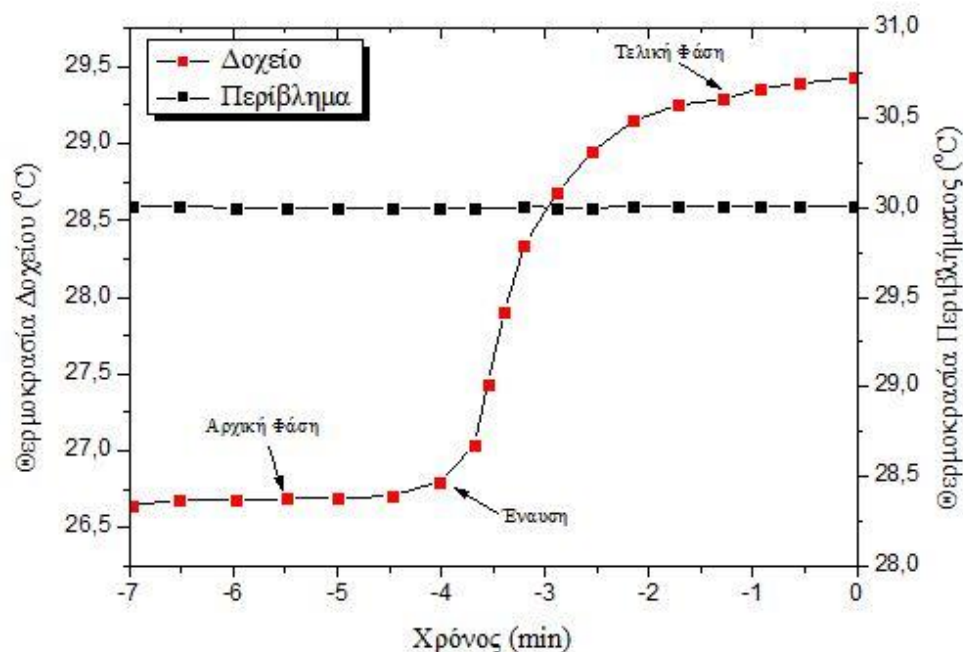
Τέλος, σφραγίστηκε η οβίδα, πληρώθηκε με οξυγόνο, τοποθετήθηκε στο θερμιδόμετρο, οπότε και δόθηκε η εντολή για την έναυση και την ολοκλήρωση του πειράματος, παίρνοντας την τελική μέτρηση της ανώτερης θερμογόνου δύναμης.

Οι τρεις μετρήσεις που προέκυψαν και είχαν απόκλιση μεταξύ τους μικρότερη των 200kJ/kg παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7:

	EPS	1^η Μέτρηση (EPS2)	2^η Μέτρηση (EPS6)	3^η Μέτρηση (EPS7)	
Υγρασιόμετρο	Βάρος δείγματος (πριν την αφύγρανση)	1,859 g	1,163 g	1,467 g	
	Υγρασία	0,73 %MC	0,44 %MC	0,52 %MC	
Προετοιμασία για τοποθέτηση δείγματος στην βόμβα	Βάρος κάψουλας	13,41548 g	13,43274 g	13,43316 g	
	Βάρος δείγματος	0,64395 g	0,70159 g	0,64204 g	
	Μήκος αρχικού σύρματος ανάφλεξης (fuse)	17 cal	17 cal	17 cal	
Τελικά αποτελέσματα	Μήκος εναπομείναντος σύρματος ανάφλεξης (final fuse)	2 cal	3 cal	2 cal	
	Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα (HHV)	Cal/g	9558,8547	9579,2677	9603,1383
		KJ/Kg	40021,0128	40106,4779	40206,4037
	Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV)	Cal/g	9554,9142	9576,8926	9600,3314
		KJ/Kg	40004,4975	40096,5167	40194,65

Πίνακας 3.7: Πειραματικές μετρήσεις διογκωμένης πολυστερίνης σε μορφή δισκίου.

Στο Σχήμα 3.36 παρουσιάζεται το διάγραμμα όπως προέκυψε για τη μέτρηση EPS7. Τα διαγράμματα που προέκυψαν για τις μετρήσεις EPS2 και EPS6 είναι όμοια με αυτό που προέκυψε από τη μέτρηση EPS7. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, στην περίοδο της αρχικής φάσης η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή περίπου στους 26,6°C. Η περίοδος της έναυσης ξεκινάει 4 min πριν ολοκληρωθεί η μέτρηση και παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2,8°C. Η περίοδος της έναυσης και της αύξησης της θερμοκρασίας (RISE PERIOD) διαρκεί περίπου 2,1 min.



Σχήμα 3.36: Διάγραμμα EPS (Μέτρηση EPS7).

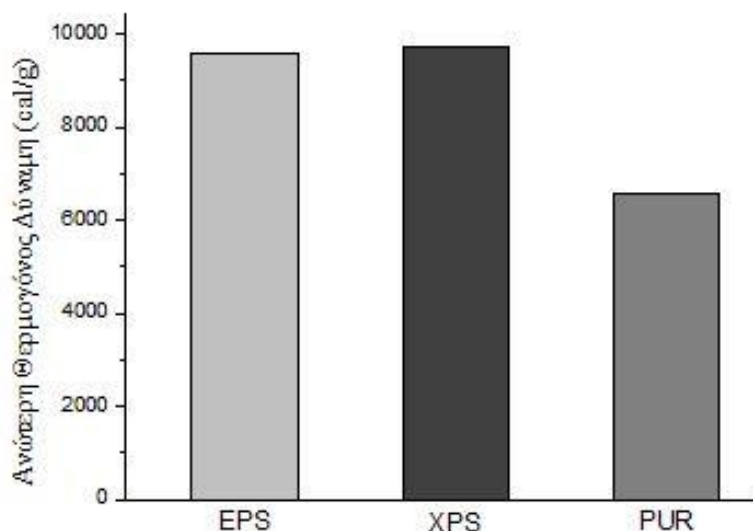
Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1716, οι τιμές που προκύπτουν για την ανώτερη και τη κατώτερη θερμογόνο δύναμη καθώς οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8:

		Αποτελέσματα XPS	
		cal/g	kJ/kg
Μέση τιμή	LHV	9577,3794	40098,5721
	HHV	9580,4203	40111,3037
Τυπική απόκλιση	LHV	22,71	95,08
	HHV	22,16	92,78

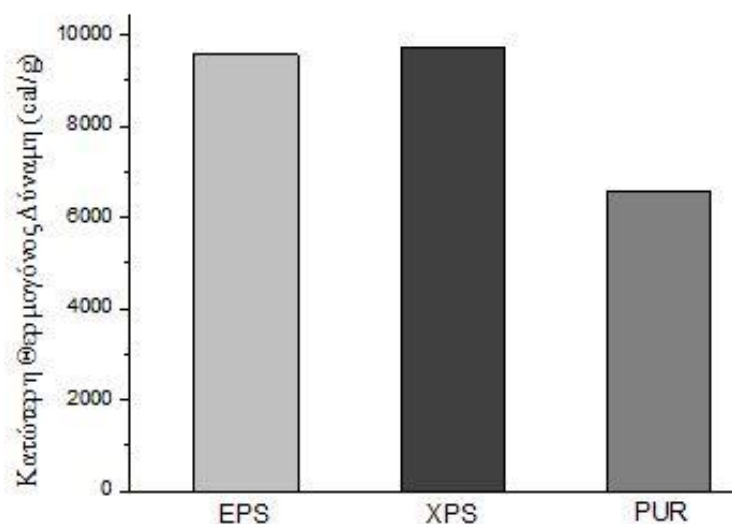
Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα θερμογόνου δύναμης για την διογκωμένη πολυστερίνη.

3.8. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στα Σχήματα 3.37 και 3.38 παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τις πειραματικές μετρήσεις των μονωτικών υλικών για την ανώτερη και την κατώτερη θερμογόνο δύναμη αντίστοιχα.



Σχήμα 3.37: Διάγραμμα για την ανώτερη θερμογόνο δύναμη των μονωτικών υλικών.



Σχήμα 3.38: Διάγραμμα για την κατώτερη θερμογόνο δύναμη των μονωτικών υλικών.

Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η υψηλότερη τιμή για την ανώτερη θερμογόνο δύναμη και την κατώτερη παρουσιάζεται για την εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS), ενώ λίγο πιο μικρές είναι οι τιμές για την διογκωμένη πολυστερίνη (EPS). Οι χαμηλότερες τιμές τόσο για την ανώτερη θερμογόνο δύναμη, όσο και για την κατώτερη εμφανίζονται για τον αφρό πολυουρεθάνης (PUR).

Παρόλα αυτά, οι τιμές της θερμογόνου δύναμης των τριών παραπάνω μονωτικών υλικών θεωρούνται υψηλές, με αποτέλεσμα να αποτελούν σημαντικό πυροφορτίο, το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε θέματα πυρασφάλειας. Σε αντίθεση με τα παραπάνω μονωτικά υλικά ο πετροβάμβακας (RW) αποτελεί πολύ μικρό πυροφορτίο, καθώς είναι άκαυστος. Οι τιμές της θερμογόνου δύναμης του πετροβάμβακα ήταν τόσο μικρές που δεν προσδιορίστηκαν (άκαυστο υλικό).

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1 υπάρχουν κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα δομικά υλικά σε σχέση με την αντίδραση στη φωτιά. Οι κατηγορίες και τα κριτήρια παρουσιάζονται στους Πίνακες 1.2 και 1.3 (για δάπεδο) του Κεφαλαίου 1. Ένα από τα πέντε κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι η δοκιμή προσδιορισμού της θερμογόνου δύναμης EN ISO 1716. Με τη χρήση του κριτηρίου της θερμογόνου δύναμης δεν μπορεί να κατηγοριοποιηθεί το υλικό, καθώς χρειάζεται και η χρήση άλλων κριτηρίων, αλλά μπορεί να αποκλιστεί μία κατηγορία αν δεν είναι εντός ορίων η μέτρηση.

Συνεπώς, ο πετροβάμβακας (RW) που είναι άκαυστος πληρεί το κριτήριο της θερμογόνου δύναμης ώστε να ανήκει στην κατηγορία A1 ($PCS \leq 2.0 \text{ MJ/kg}$) και A1_{FL} ($PCS \leq 2.0 \text{ MJ/kg}$) αλλά δεν μπορεί να κατηγοριοποιηθεί χωρίς να γίνει η δοκιμή της ακαυστότητας EN ISO 1182. Για τα υπόλοιπα τρία μονωτικά υλικά προκύπτει ότι δεν ανήκουν στις κατηγορίες A1 ($PCS \leq 2.0 \text{ MJ/kg}$), A2 ($PCS \leq 3.0 \text{ MJ/kg}$), A1_{FL} ($PCS \leq 2.0 \text{ MJ/kg}$) και A2_{FL} ($PCS \leq 3.0 \text{ MJ/kg}$), καθώς οι τιμές τους είναι πολύ μεγαλύτερες από το ανώτερο όριο που ορίζουν οι παραπάνω κατηγορίες. Οι τιμές των μονωτικών υλικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9.

Μονωτικό Υλικό	PCS (MJ/kg)
XPS	40,591
EPS	40,099
PUR	27,521

Πίνακας 3.9: Πειραματικές μετρήσεις των μονωτικών υλικών που εξετάστηκαν.

4. Μέτρηση Θερμικής Αγωγιμότητας

4.1. Εισαγωγή

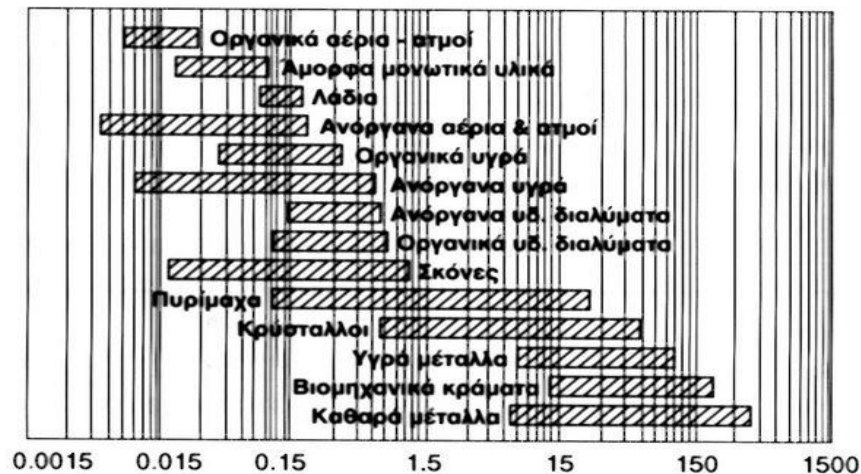
Ως θερμική αγωγιμότητα ορίζεται η χαρακτηριστική ιδιότητα της ύλης που προσδιορίζει την ευκολία ή δυσκολία διάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού. Η θερμική αγωγιμότητα συμβολίζεται με k ή λ και έχει μονάδες μέτρησης W/mK . Τα υλικά ανάλογα με τη θερμική τους αγωγιμότητα δηλαδή την ευκολία διάδοσης της θερμότητας διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- Ευθερμαγωγά: καλοί αγωγοί θερμότητας
- Δυσθερμαγωγά ή θερμομονωτικά: κακοί αγωγοί θερμότητας

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ (W/mK) εκφράζει τη θερμική ισχύ που διέρχεται μέσα από τις απέναντι πλευρές κύβου από ομοιογενές και ισότροπο υλικό ακμής 1 (ενός) μέτρου, όταν η διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ των επιφανειών αυτών διατηρείται σταθερή και ίση με 1K [30]. Η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ αποτελεί φυσική ιδιότητα κάθε υλικού και επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Δομή (πορώδες, πυκνότητα)
- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Πίεση

Η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ όσο μικρότερη είναι τόσο χειρότερη μετάδοση θερμότητας έχει το υλικό, οπότε πετυχαίνει καλύτερη μόνωση. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων υλικών [45].



Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή λ (W/mK) για διάφορα υλικά.

4.2. Μηχάνημα CT metre

4.2.1. Χαρακτηριστικά του μηχανήματος CT metre

Το μηχάνημα CT metre υπολογίζει το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ των υλικών που αποτελούνται από:

- Χώμα
- Πέτρα
- Ξύλο
- Πλαστικό
- Γυαλί

Η συσκευή CT metre αποτελείται από δυο κυρίως μέρη:

- Τη μονάδα ελέγχου, η οποία παράγει και αναλύει την καμπύλη της αύξησης της θερμοκρασίας που προκαλείται στο εσωτερικό του υλικού που δοκιμάζεται.
- Τους ανιχνευτές, οι οποίοι μεταδίδουν τη ροή θερμότητας και μετρούν τη θερμοκρασία.



Σχήμα 4.2: Συσκευή CT metre.

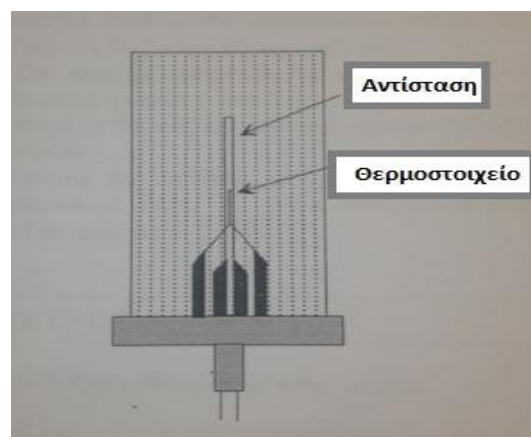
Υπάρχουν τεσσάρων ειδών ανιχνευτές:

- Οι κυλινδρικοί ανιχνευτες
- Οι δακτυλοειδεις ανιχνευτές
- Οι συρμάτινοι ανιχνευτές
- Οι σιδερένιοι ανιχνευτές

Για την μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των μονωτικών υλικών χρησιμοποιήθηκε συρμάτινος ανιχνευτής (Σχήμα 4.3). Ο συρμάτινος ανιχνευτής αποτελείται από την αντίσταση η οποία μεταδίδει τη θερμότητα (μακρύ σύρμα), το θερμοστοιχείο, το οποίο μετράει την θερμοκρασία και το πλαστικό περιτύλιγμα (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.3: Συρμάτινος ανιχνευτής.



Σχήμα 4.4: Εσωτερικό ανιχνευτή.

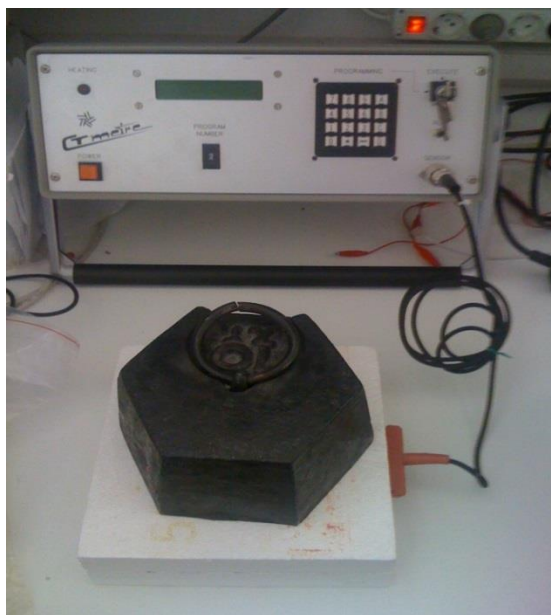
Οι προδιαγραφές της συσκευής CT metre παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 [47].

Ιδιότητα	CT metre	
	Από	Μέχρι
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	0,001	5
Θερμοκρασία (°C)	-20	80
Ακρίβεια (%)	-2	2
Επαναληψιμότητα (%)	-1	1
Διάρκεια μέτρησης (sec)	40	400
Ένταση ρεύματος (A)	0	5

Πίνακας 4.1: Προδιαγραφές της συσκευής CT metre.

4.2.2. Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων

Αρχικά τοποθετείται ο συρμάτινος ανιχνευτής (wire probe) ενδιάμεσα από τα δυο δείγματα (Σχήμα 4.5). Η μονάδα ελέγχου ξεκινάει σειρά μετρήσεων της θερμοκρασίας κάθε έξι δευτερόλεπτα για ένα λεπτό. Η έκλυση θερμότητας δε μπορεί να ξεκινήσει εάν η θερμοκρασία διαφέρει περισσότερο από $\pm 3\%$ στη διάρκεια του ενός λεπτού που γίνεται η σειρά μετρήσεων της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.5: Τοποθέτηση του ανιχνευτή.

Όταν σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία ξεκινάει η έκλυση θερμότητας από την αντίσταση. Ο χρόνος που εκλύεται η θερμότητα προκαθορίζεται πριν από την έναρξη του πειράματος από 40sec έως 400sec. Κατά τη διάρκεια του πειράματος η θερμοκρασία μετράται κάθε 1 έως 5sec, με ακρίβεια στη μέτρηση της θερμοκρασίας $0,01^{\circ}\text{C}$.

Η θερμική αγωγιμότητα υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης ΔT συναρτήση $\ln(t)$ στο ευθύγραμμο τμήμα. Η εξίσωση (4.1) μετατρέπει το Σχήμα 4.6 στο Σχήμα 4.7.

$$\Delta T = \frac{R \cdot I^2}{L} \cdot \frac{1}{4\pi \cdot \lambda} (\ln(t) + C^t) \quad (4.1)$$

όπου,

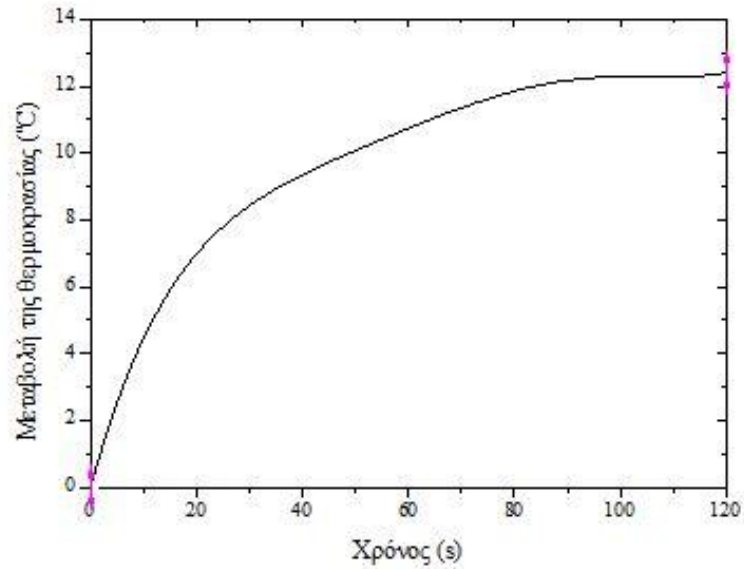
R: η αντίσταση [Ω]

I: το ρεύμα [A]

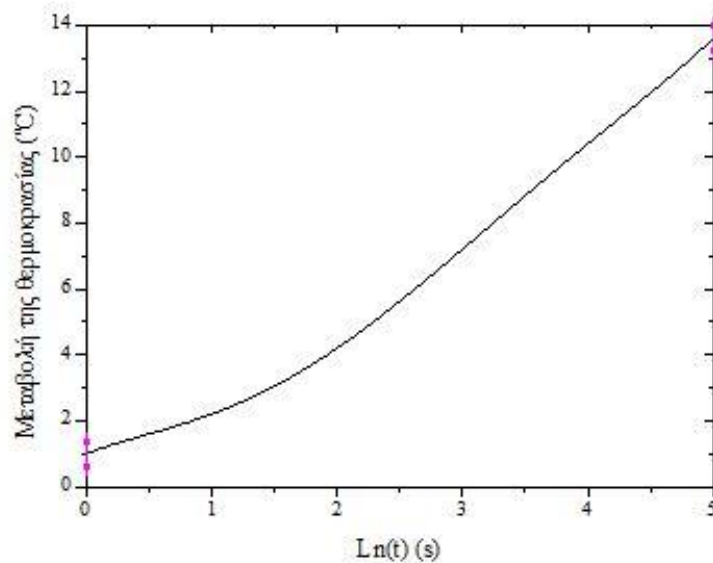
L: το μήκος του σύρματος [m]

λ : η θερμική αγωγιμότητα [W/mK]

t: ο χρόνος [s]



Σχήμα 4.6: Μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήση του χρόνου (πειραματικά σημεία).



Σχήμα 4.7: Μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήση του λογάριθμου του χρόνου (πειραματικά σημεία).

Η θερμική αγωγιμότητα υπολογίζεται αυτόματα από τη μονάδα ελέγχου. Ο αλγόριθμος υπολογίζει το συντελεστή παλινδρόμησης (regression coefficient). Αν ο συντελεστής παλινδρόμησης είναι μικρότερος από 0,98, τότε η μέτρηση πρέπει να επαναληφθεί [47].

4.3. Μηχάνημα ISOMET model 2104

4.3.1. Χαρακτηριστικά του μηχανήματος ISOMET model 2104

Η συσκευή ISOMET 2104 είναι ένα φορητό όργανο μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας. Η συσκευή ISOMET 2104 μπορεί να μετρήσει την θερμική αγωγιμότητα σχεδόν όλων των υλικών, καθώς υπάρχουν δυο τύποι ανιχνευτών. Οι ανιχνευτές τύπου βελόνας μπορούν να μετρήσουν ινώδη, πορώδη και μαλακά υλικά, ενώ οι ανιχνευτές τύπου επιφανείας μπορούν να μετρήσουν σκληρά υλικά [48].



Σχήμα 4.8: Συσκευή ISOMET model 2104.

Η συσκευή ISOMET 2104 αποτελείται από δυο κυρίως μέρη, τη κεντρική μονάδα ελέγχου και τον ανιχνευτή. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται καθώς και τα εύρη θερμικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας που μπορούν να μετρήσουν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από το μέγεθός της (Πίνακας 4.3) [48].

Τύπος	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)		Θερμοκρασία (°C)	
	Από	Μέχρι	Από	Μέχρι
Βελονοειδής API 210422	0,015	0,20	-20	70
Βελονοειδής API 210402	0,035	0,20	-20	70
Βελονοειδής API 210403	0,20	1,0	-20	70
Βελονοειδής API 210404	1,0	2,0	-20	70
Επιφανειακός API 210411	0,04	0,30	-15	50
Επιφανειακός API 210412	0,30	2,0	-15	50
Επιφανειακός API 210413	2,0	6,0	-15	50

Πίνακας 4.2: Τύποι και προδιαγραφές ανιχνευτών.

	Εύρος Μέτρησης		Ακρίβεια
	Από	Μέχρι	
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	0,015	0,050	5% της μέτρησης + 0,003 W/mK
	0,050	0,70	5% της μέτρησης + 0,001 W/mK
	0,70	6,0	10% της μέτρησης
Θερμοκρασία (°C)	-20	70	1

Πίνακας 4.3: Ακρίβεια των μετρήσεων.

4.3.2. Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων

Η μέτρηση προκύπτει από την έκλυση θερμότητας (από τον ανιχνευτή) και ανάλυση της θερμοκρασιακής αύξησης από τη μονάδα ελέγχου. Η ροή θερμότητας προκαλείται από θερμική ηλεκτρική αντίσταση που περιέχεται μέσα στον ανιχνευτή και έρχεται σε απευθείας επαφή με το δείγμα που εξετάζεται.

Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις των μονωτικών υλικών είναι ο επιφανειακός API 210411 (Σχήμα 4.9). Για να προκύψουν αποτελέσματα χωρίς σφάλματα, πρέπει το δείγμα να έχει επιφανειακή διάμετρο τουλάχιστον 60mm και ύψος μεγαλύτερο από 10 με 15mm (εξαρτάται από την αγωγιμότητα)



Σχήμα 4.9: Επιφανειακός ανιχνευτής API 210411.

Η μέτρηση βασίζεται στην δυναμική μέθοδο, για αυτό το λόγο η διάρκεια της κάθε μέτρησης κυμαίνεται από 8 έως 16 λεπτά. Ακόμα η συσκευή έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης μέχρι 1000 μετρήσεων και μεταφοράς τους σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία [48].

4.4. Φούρνοι

Οι φούρνοι χρησιμοποιήθηκαν για την θέρμανση των δοκιμίων ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά της θερμικής αγωγιμότητας των μονωτικών υλικών στις υψηλές θερμοκρασίες. Το εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας και των δυο συσκευών (CT metre και ISOMET 2104) δεν ξεπερνάει τους 80°C, για αυτό το λόγο τα μονωτικά υλικά μετά την έξοδό τους από το φούρνο σφραγίζονταν σε πλαστικές μεμβάνες για να μην απορροφήσουν υγρασία από το περιβάλλον (Σχήμα 4.10). Όταν η θερμοκρασία των μονωτικών υλικών επανερχόταν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος τότε ήταν έτοιμα για να ξεκινήσει η διαδικασία μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας.



Σχήμα 4.10: Τοποθέτηση μονωτικού υλικού σε πλαστική μεμβράνη.

Οι φούρνοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο Carbolite και ο Nabertherm. Ο Carbolite (Σχήμα 4.11) φτάνει μέχρι τους 600°C και έχει τη δυνατότητα γρήγορης αύξησης και μείωσης της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.11: Φούρνος Carbolite.

Ο Nabertherm (Σχήμα 4.12) έχει δυνατότητα αύξησης της θερμοκρασίας μέχρι τους 3000°C. Ακόμα μπορεί να ρυθμιστεί το χρονικό διάστημα της θερμοκρασιακής μεταβολής, καθώς και ο χρόνος παραμονής της μέγιστης θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.12: Φούρνος Nabertherm.

4.5. Πειραματικές Μετρήσεις

4.5.1. Πετροβάμβακας

4.5.1.1. Εισαγωγή

Για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας του πετροβάμβακα χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα CT metre. Ακολουθήθηκαν δυο μέθοδοι για την μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας.

Στη 1^η μέθοδο χρησιμοποιούνταν δυο διαφορετικά δείγματα σε κάθε μέτρηση, δηλαδή σε κάθε αύξηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνταν δείγματα τα οποία δεν είχαν υποστεί καμία μεταβολή της θερμοκρασίας. Στην 2^η μέθοδο χρησιμοποιούνταν το ίδιο ζευγάρι δειγμάτων για το προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας σε όλες τις θερμοκρασίες.

Ο λόγος που πραγματοποιήθηκαν αυτές οι δυο μέθοδοι είναι για να διαπιστωθεί αν υπάρχει διαφορά στις μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας, όταν ο πετροβάμβακας υπόκειται σε συνεχείς αλλαγές της θερμοκρασίας του.

4.5.1.2. Μέθοδος 1

Για το προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας στη 1^η μέθοδο χρησιμοποιούνται σε κάθε μέτρηση διαφορετικά δείγματα. Η θερμική αγωγιμότητα του πετροβάμβακα προέκυψε χρησιμοποιώντας το μηχάνημα CT metre. Ο πετροβάμβακας που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13. Ο πετροβάμβακας λόγω της ιδιομορφίας του (αποτελείται από ίνες) παρουσιάζει διαφορές στην πυκνότητα από τμήμα σε τμήμα. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν με τις πυκνότητες τους.



Σχήμα 4.13: Δείγμα πετροβάμβακα.

Δείγμα	Πυκνότητα (kg/m ³)		Θερμοκρασία που έφτασε (°C)
	Περιβάλλον (20°C)	Μετά από αύξηση της θερμοκρασίας	
1 ^ο	17,87	17,84	50
2 ^ο	18,17	18,15	50
3 ^ο	17,3	17,29	100
4 ^ο	15,23	15,21	100
5 ^ο	18	18,95	150
6 ^ο	19,63	20,61	150
7 ^ο	17,81	19,18	200
8 ^ο	16,76	18,04	200
9 ^ο	17,3	19,17	250
10 ^ο	15,23	16,5	250
11 ^ο	17,87	19,21	300
12 ^ο	18,17	19,5	300
13 ^ο	17,53	20,45	350
14 ^ο	16,91	20,04	350
15 ^ο	18	22,17	400
16 ^ο	19,63	24,01	400
17 ^ο	17,81	23,42	450
18 ^ο	16,76	20,66	450
19 ^ο	20,71	25,69	500
20 ^ο	18,52	23,46	500

Πίνακας 4.4: Μεταβολή των πυκνοτήτων των δειγμάτων.

Παρατηρήσεις:

- Η μικρή μείωση της πυκνότητας από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στους 50°C οφείλεται στο γεγονός ότι τα δείγματα αρχικά (στο περιβάλλον) είχαν ποσοστό υγρασίας 2,07%MC, το οποίο αφαιρέθηκε μέσα στον φούρνο, οπότε και το βάρος μειώθηκε.
- Στους 250 °C ο πετροβάμβακας αρχίζει να αποσυντίθεται και να γίνεται ψαθυρός.
- Στους 400 °C ο πετροβάμβακας γίνεται πολυ ψαθυρός και αλλάζει χρώμα, γίνεται άσπρος (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Αλλαγή χρώματος πετροβάμβακα.

- Στους 600 °C ο πετροβάμβακας έλιωσε και κόλλησε στο δίσκο (Σχήμα 4.15), ενώ η πυκνότητά του αυξήθηκε πολύ καθώς ο όγκος του μειώθηκε (Σχήμα 4.16).



Σχήμα 4.15: Υπολείμματα πετροβάμβακα στον δίσκο.



Σχήμα 4.16: Σύγκριση πετροβάμβακα σε συνθήκες περιβάλλοντος (αριστερά) και πετροβάμβακα στους 600°C (δεξιά).

Ο ανιχνευτής έχει εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας από -20 έως 80°C. Για αυτό το λόγο το μονωτικό υλικό μετά την έξοδό του από το φούρνο, τοποθετείται και σφραγίζεται μέσα σε πλαστική μεμβράνη για να μην απορροφήσει υγρασία (Σχήμα 4.17). Όταν η θερμοκρασία του πετροβάμβακα επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος τότε ξεκινάει η διαδικασία μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας.



Σχήμα 4.17: Τοποθέτηση πετροβάμβακα σε πλαστική μεμβράνη.

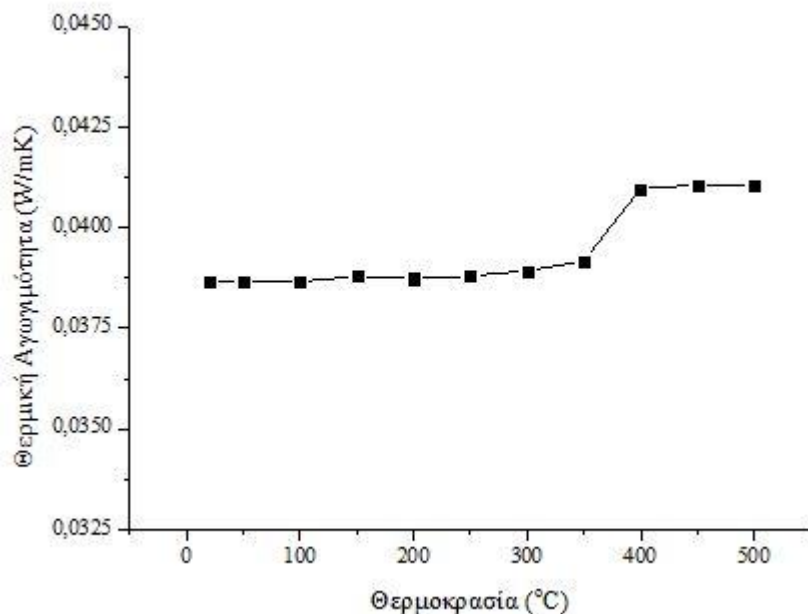
Τα δυο δείγματα τοποθετήθηκαν το ένα πάνω στο άλλο και ενδιάμεσα τους τοποθετήθηκε ο ανιχνευτής (Σχήμα 4.18). Έγιναν οκτώ μετρήσεις περιμετρικά σε κάθε δυο δείγματα. Οι μετρήσεις που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5 και γραφικά στο Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.18: Στιγμιότυπο από τη μέτρηση του πετροβάμβακα.

#	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK) ανά θερμοκρασία (°C)										
	20°C	50°C	100°C	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C
1	0,0373	0,038	0,0379	0,0392	0,0391	0,0387	0,0384	0,0392	0,0408	0,0393	0,0411
2	0,0386	0,0392	0,0379	0,0401	0,039	0,037	0,0382	0,0397	0,0423	0,0405	0,0408
3	0,039	0,0378	0,0385	0,0383	0,0379	0,0386	0,0403	0,0388	0,0392	0,0398	0,0394
4	0,0393	0,0389	0,0372	0,0394	0,0387	0,0376	0,0381	0,0383	0,0413	0,0402	0,0404
5	0,039	0,0388	0,0405	0,0377	0,0389	0,0381	0,0387	0,0389	0,0403	0,0414	0,0427
6	0,038	0,0402	0,0394	0,0394	0,0386	0,0394	0,0397	0,0396	0,0402	0,042	0,0417
7	0,0382	0,0378	0,0389	0,0385	0,0393	0,0408	0,0383	0,0396	0,0407	0,0418	0,0392
8	0,04	0,0384	0,039	0,0377	0,0384	0,0402	0,0397	0,0393	0,0429	0,0435	0,0432
M.O.	0,0387	0,0386	0,0387	0,0388	0,0387	0,0388	0,0389	0,0391	0,041	0,0411	0,0411

Πίνακας 4.5: Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας για τον πετροβάμβακα (διαφορετικά δείγματα).



Σχήμα 4.19: Θερμική αγωγιμότητα του πετροβάμβακα συναρτήση της θερμοκρασίας.

4.5.1.3. Μέθοδος 2

Ο συντελεστής της θερμικής αγωγιμότητας λ μετρήθηκε ξανά σε κάθε θερμοκρασία με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούνταν τα ίδια δείγματα σε όλες τις μετρήσεις (μέθοδος 2^η). Ο λόγος που έγινε αυτό είναι για να διαπιστωθεί αν υπάρχει διαφορά στη θερμική αγωγιμότητα όταν το ίδιο δείγμα υπόκειται σε διαφορετικές υψηλές θερμοκρασίες.

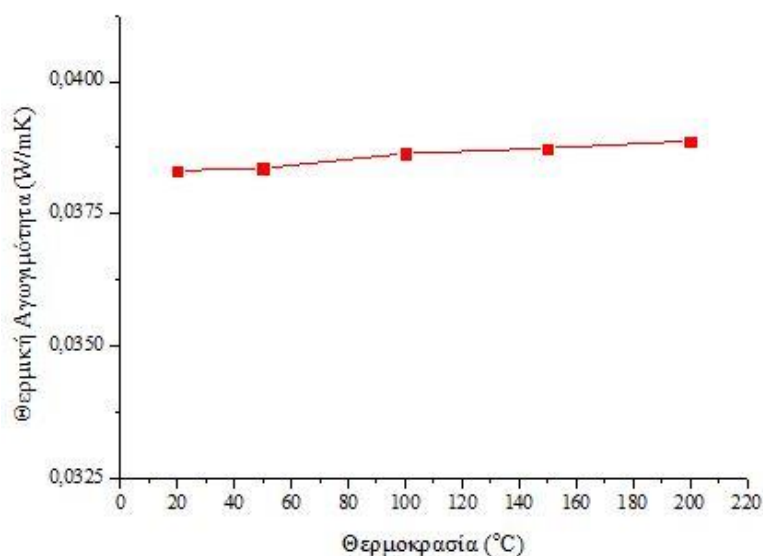
Πυκνότητα (kg/m ³)		Θερμοκρασία (°C)
Δείγμα 1* ^ο	Δείγμα 2* ^ο	
18,25	18,52	20
18,24	18,51	50
18,2	18,49	100
19,09	19,44	150
19,58	19,84	200

Πίνακας 4.6: Μεταβολή των πυκνοτήτων των δειγμάτων.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία προκύπτουν οι μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας (Πίνακας 4.7) και η γραφική απεικόνιση τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.20.

#	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK) ανά θερμοκρασία (°C)				
	20°C	50°C	100°C	150°C	200°C
1	0,038	0,0377	0,0377	0,0385	0,0382
2	0,0375	0,0368	0,0385	0,0382	0,0388
3	0,0398	0,039	0,039	0,0393	0,0381
4	0,0375	0,039	0,0387	0,0387	0,0393
5	0,0387	0,0396	0,0384	0,0388	0,0397
6	0,0384	0,0384	0,0392	0,0392	0,0383
7	0,0381	0,0378	0,0378	0,0383	0,0398
8	0,0385	0,0386	0,0398	0,0389	0,0396
Μ.Ο.	0,0383	0,0384	0,0386	0,0387	0,0389

Πίνακας 4.7: Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας για τον πετροβάμβακα (ίδια δείγματα).

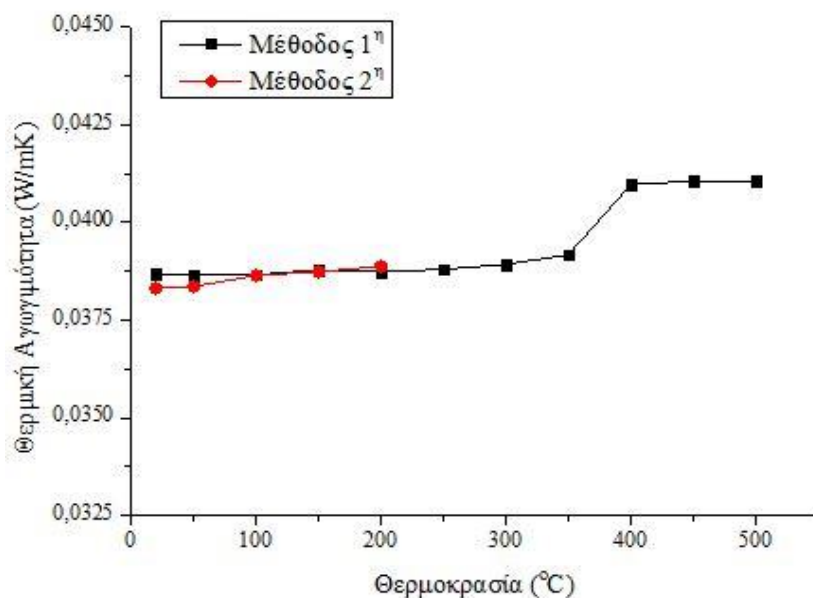


Σχήμα 4.20: Θερμική αγωγιμότητα του πετροβάμβακα συναρτήση της θερμοκρασίας.

4.5.1.4. Συμπέρασμα-Σύγκριση

Συμπεράσματα:

- Η θερμική αγωγιμότητα του πετροβάμβακα παρουσιάζει πολύ μικρή αύξηση μέχρι τους 350°C.
- Στους 400°C ο πετροβάμβακας αλλάζει χρώμα (γίνεται άσπρος) και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ αυξάνει αισθητά, χωρίς όμως να είναι ακατάλληλος για χρήση.
- Στους 600°C ο πετροβάμβακας έχει αλλοιωθεί πολύ (Σχήμα 4.16) και χρειάζεται αλλαγή.

Σύγκριση Μεθόδου 1 και 2:**Σχήμα 4.21:** Σύγκριση θερμικής αγωγιμότητας 1^{ης} και 2^{ης} μεθόδου.

Από το Σχήμα 4.21 προκύπτει ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ δεν παρουσιάζει διαφορές είτε χρησιμοποιείται η 1^η μέθοδος, είτε η 2^η.

Σύγκριση Μεθόδου 1 με βιβλιογραφικές τιμές:

Η πειραματική διαδικασία που έχει ακολουθηθεί στη 1^η μέθοδο και στις βιβλιογραφικές τιμές δεν είναι η ίδια. Η βασική διαφορά των μεθόδων είναι ότι βάσει των βιβλιογραφικών τιμών η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας γινόταν όταν ο πετροβάμβακας είχε αυξημένη θερμοκρασία.

Στη μέθοδο 1, το μονωτικό υλικό αφού θερμαινόταν στη συνέχεια αφηνόταν μέχρι να επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια γινόταν η μέτρηση. Ο λόγος που ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία είναι ότι οι ανιχνευτές δεν έχουν δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας μετά τους 80°C.

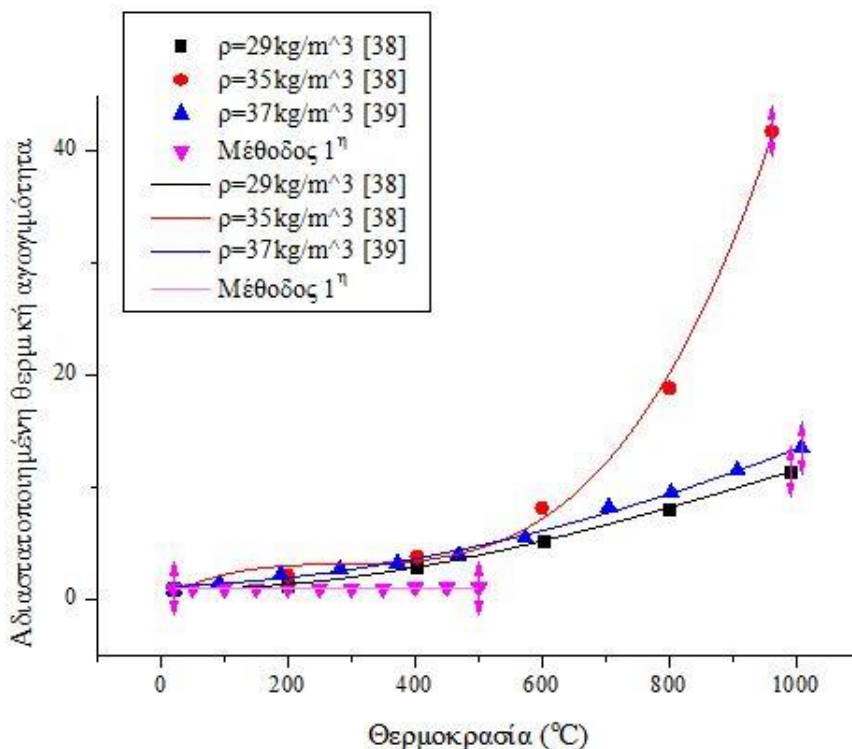
Για να μπορέσουν να συγκριθούν οι τιμές πρέπει να αδιαστατοποιηθεί η θερμική αγωγιμότητα. Οι τιμές των αδιαστατοποιημένων θερμικών αγωγιμοτήτων προκύπτουν διαιρώντας όλες τις τιμές με τη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για θερμοκρασία 20°C. Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές τιμές και στον Πίνακα 4.9 οι τιμές της 1^{ης} μεθόδου. Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζονται γραφικά συναρτήση της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια στο Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των καμπυλών που προκύπτουν από τα αδιαστατοποιημένα σημεία.

Βιβλιογραφικές τιμές					
$\rho=29\text{kg/m}^3$ [38]		$\rho=35\text{kg/m}^3$ [38]		$\rho=37\text{ kg/m}^3$ [39]	
Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές	Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές	Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές
20,66	1	20,70344	1	20,9124	1
200,17	1,28571	199,982	2,16666	92,2751	1,5
403,19	3,00001	403,101	3,83332	188,646	2,25
603,03	5,28571	599,472	8,16666	281,71	2,75
799,69	8,14286	800,03	18,83332	372,437	3,25
990,22	11,42857	961,196	41,66667	468,808	4
				572,766	5,5
				704,943	8,25
				803,256	9,5
				906,82	11,5
				1008,05	13,5

Πίνακας 4.8: Αδιαστατοποιημένες βιβλιογραφικές τιμές.

Μέθοδο 1 ^η	
$\rho=18\text{kg/m}^3$	
Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές
20	1
50	0,99897
100	0,99948
150	1,00284
200	1,00155
250	1,0031
300	1,00646
350	1,01293
400	1,05895
450	1,06153
500	1,06153

Πίνακας 4.9: Αδιαστατοποιημένες τιμές της 1^{ης} μεθόδου.



Σχήμα 4.22: Αδιαστατοποιημένη θερμική αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας.

	Βιβλιογραφικές τιμές			1 ^η Μέθοδος
	$\rho=29\text{kg/m}^3$ [38]	$\rho=35\text{kg/m}^3$ [38]	$\rho=37\text{kg/m}^3$ [39]	$\rho=18\text{kg/m}^3$
Εξίσωση	$y = B0 + B1*x + B2*x^2 + B3*x^3$			
B0	0,98144	0,0671	1,17237	1,00356
B1	-0,00109	0,03092	0,00178	$-1,12064*10^{-4}$
B2	$1,65367*10^{-5}$	$-1,04845*10^{-4}$	$1,1423*10^{-5}$	$4,97058*10^{-7}$
B3	$-4,84831*10^{-9}$	$1,21902*10^{-7}$	$-9,51413*10^{-10}$	0
Ακρίβεια (R^2)	0,99931	0,99215	0,99456	0,85488

Πίνακας 4.10: Χαρακτηριστικά των αδιαστατοποιημένων καμπυλών του πετροβάμβακα.

Οι λόγοι που ο πετροβάμβακας που μετρήθηκε στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης άντεξε μέχρι τους 500°C ενώ ο πετροβάμβακας των βιβλιογραφικών τιμών άντεξε μέχρι τους 1000°C είναι:

- Μεγάλη διαφορά αρχικής πυκνότητας.
- Διαφορά ποιότητας.
- Διαφορετικός τρόπος παρασκευής.

4.5.2. Αφρός Πολυουρεθάνης

4.5.2.1. Μέθοδος

Για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας του αφρού πολυουρεθάνης χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα ISOMET model 2104. Για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιούνταν κάθε φορά νέο δείγμα (μέθοδος 1). Ο αφρός πολυουρεθάνης που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.23. Στον Πίνακα 4.11 παρουσιάζονται τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν με τις πυκνότητες τους.



Σχήμα 4.13: Δείγμα αφρού πολυουρεθάνης.

Δείγμα	Πυκνότητα (kg/m ³)		Θερμοκρασία που έφτασε (°C)
	Περιβάλλον (20°C)	Μετά από αύξηση της θερμοκρασίας	
1 ^ο	24,94	24,83	50
2 ^ο	24,64	24,1	100
3 ^ο	24,14	23,78	150
4 ^ο	24,91	24,38	200

Πίνακας 4.11: Μεταβολή των πυκνοτήτων των δειγμάτων.

Παρατηρήσεις:

- Η μικρή μείωση της πυκνότητας από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στους 50°C, 100 °C, 150 °C και 200 °C οφείλεται στο γεγονός ότι τα δείγματα αρχικά (στο περιβάλλον) είχαν ποσοστό υγρασίας 1,57%MC, το οποίο αφαιρέθηκε μέσα στον φούρνο, οπότε και το βάρος μειώθηκε.

- Στους 150°C ο αφρός πολυουρεθάνης αλλάζει χρώμα, από πράσινο γίνεται σκούρος κίτρινος (Σχήμα 4.24).



Σχήμα 4.14: Αλλαγή χρώματος αφρού πολυουρεθάνης στους 150°C.

- Στους 200°C ο αφρός πολυουρεθάνης γίνεται πολύ σκούρος κίτρινος και πλησιάζει τη θερμοκρασία ανάφλεξης, καθώς κατά το άνοιγμα του φούρνου παρατηρήθηκε έξοδος μεγάλης ποσότητας καπνού (Σχήμα 4.25).



Σχήμα 4.15: Αλλαγή χρώματος αφρού πολυουρεθάνης στους 200°C.

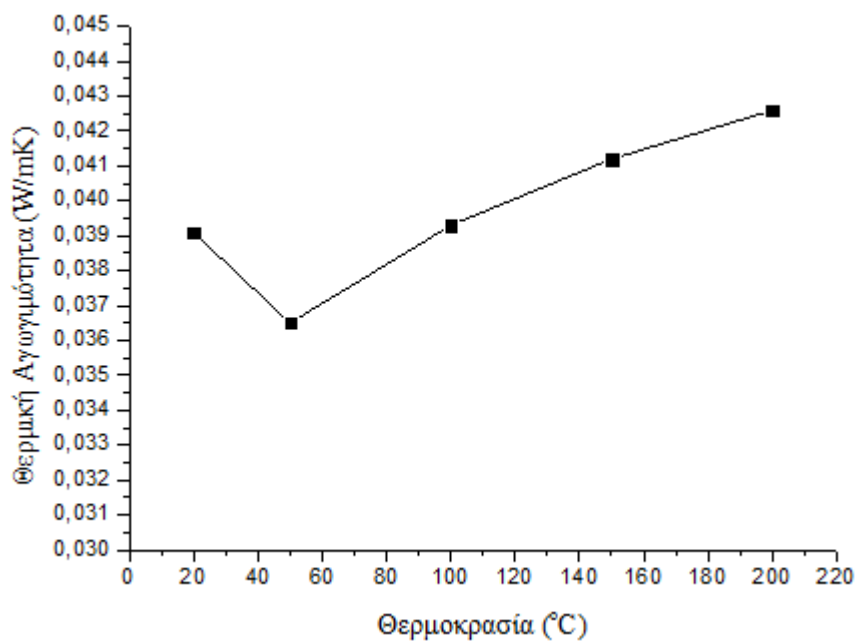
Ο ανιχνευτής έχει εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας από -15 έως 50°C. Για αυτό το λόγο το μονωτικό υλικό μετά την έξοδό του από το φούρνο, αφήνεται μέχρι να επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε να γίνει η μέτρηση. Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος του δείγματος (Σχήμα 4.26). Έγιναν τρεις μετρήσεις σε κάθε δείγμα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12, ενώ γραφικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.27.



Σχήμα 4.26: Στιγμιότυπο από τη μέτρηση του αφρού πολυουρεθάνης.

#	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK) ανά θερμοκρασία (°C)				
	20°C	50°C	100°C	150°C	200°C
1	0,0388	0,0363	0,0388	0,0403	0,0421
2	0,0394	0,0363	0,0398	0,0422	0,043
3	0,0391	0,037	0,0392	0,0412	0,0428
M.O.	0,0391	0,0365	0,0393	0,0412	0,0426

Πίνακας 4.12: Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας του αφρού πολυουρεθάνης.



Σχήμα 4.27: Θερμική αγωγιμότητα του αφρού πολυουρεθάνης συναρτήση της θερμοκρασίας.

4.5.2.2. Συμπέρασμα-Σύγκριση

Συμπεράσματα:

- Η θερμική αγωγιμότητα του αφρού πολυουρεθάνης παρουσιάζει μικρή αύξηση μέχρι τους 200°C.
- Στους 150°C ο αφρός πολυουρεθάνης αλλάζει χρώμα (γίνεται κίτρινος) και στους 200°C γίνεται σκούρος κίτρινος.
- Στους 200°C ο αφρός πολυουρεθάνης έχει αλλοιωθεί πολύ (Σχήμα 4.25) και χρειάζεται αλλαγή.

Σύγκριση πειραματικής διαδικασίας με βιβλιογραφικές τιμές:

Η πειραματική διαδικασία που έχει ακολουθηθεί στη παραπάνω μέθοδο και στις βιβλιογραφικές τιμές δεν είναι η ίδια. Η βασική διαφορά των μεθόδων είναι ότι βάσει των βιβλιογραφικών τιμών η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας γινόταν όταν ο αφρός πολυουρεθάνης είχε αυξημένη θερμοκρασία.

Στη πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, το μονωτικό υλικό αφου θερμαινόταν στη συνέχεια αφηνόταν μέχρι να επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια γινόταν η μέτρηση. Ο λόγος που ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία είναι ότι οι ανιχνευτές δεν έχουν δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας μετά τους 50°C.

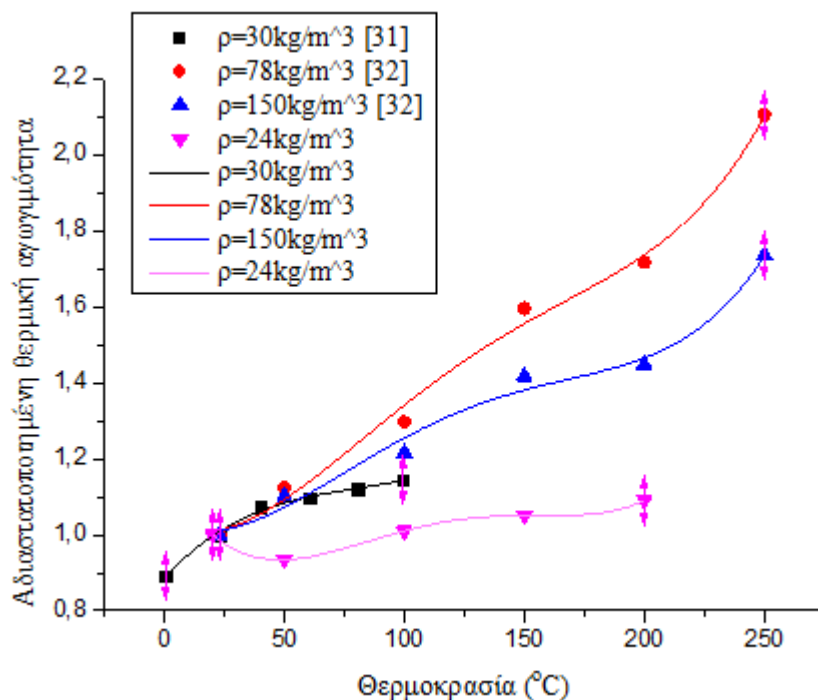
Για να μπορέσουν να συγκριθούν οι τιμές πρέπει να αδιαστατοποιηθεί η θερμική αγωγιμότητα. Οι τιμές των αδιαστατοποιημένων θερμικών αγωγιμοτήτων προκύπτουν διαιρώντας όλες τις τιμές με τη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για θερμοκρασία 20°C. Στον Πίνακα 4.13 παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές τιμές και στον Πίνακα 4.14 οι τιμές της πειραματικής διαδικασίας. Στο Σχήμα 4.28 παρουσιάζονται γραφικά συναρτήση της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια στο Πίνακα 4.15 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των καμπυλών που προκύπτουν από τα αδιαστατοποιημένα σημεία.

Βιβλιογραφικές τιμές					
$\rho=30\text{kg/m}^3$ [38]		$\rho=78\text{kg/m}^3$ [38]		$\rho=150\text{kg/m}^3$ [39]	
Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές	Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές	Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές
0,58823	0,89157	20	1	20	1
20	1	50	1,12421	50	1,10069
40	1,07229	100	1,29684	100	1,21528
60,2941	1,09639	150	1,59579	150	1,41667
80,2941	1,12048	200	1,71789	200	1,44792
99,4118	1,14458	250	2,10526	250	1,73611

Πίνακας 4.13: Αδιαστατοποιημένες βιβλιογραφικές τιμές.

Πειραματική Διαδικασία	
$\rho=24\text{kg/m}^3$	
Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές
20	1
50	0,99897
100	0,99948
150	1,00284
200	1,00155

Πίνακας 4.14: Αδιαστατοποιημένες τιμές της πειραματικής μεθόδου.



Σχήμα 4.28: Αδιαστατοποιημένη θερμική αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας.

	Βιβλιογραφικές τιμές			Πειραματική Διαδικασία
	$\rho=30\text{kg/m}^3$ [31]	$\rho=78\text{kg/m}^3$ [32]	$\rho=150\text{kg/m}^3$ [32]	$\rho=24\text{kg/m}^3$
Εξίσωση	$y = B0 + B1*x + B2*x^2 + B3*x^3 + B4*x^4$			
B0	0,88574	1,02683	1,02878	1,17023
B1	-0,00685	-0,00302	-0,00286	-0,01209
B2	$-7,333*10^{-5}$	$1,19224*10^{-4}$	$1,05183*10^{-4}$	$2,02535*10^{-4}$
B3	$3,06834*10^{-7}$	$-7,1981*10^{-7}$	$-6,79678*10^{-7}$	$-1,23277*10^{-6}$
B4	0	$1,44026*10^{-9}$	$1,39906*10^{-9}$	$2,56154*10^{-9}$
Ακρίβεια (R^2)	0,98932	0,9702	0,99456	0,9993

Πίνακας 4.15: Χαρακτηριστικά των αδιαστατοποιημένων καμπυλών του αφρού πολουρεθάνης.

4.5.3. Εξηλασμένη Πολυστερίνη

4.5.3.1. Μέθοδος

Για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας της εξηλασμένης πολυστερίνης χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα ISOMET model 2104. Για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιούταν κάθε φορά νέο δείγμα (μέθοδος 1). Η εξηλασμένη πολυστερίνη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.29. Στον Πίνακα 4.16 παρουσιάζονται τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν με τις πυκνότητες τους.



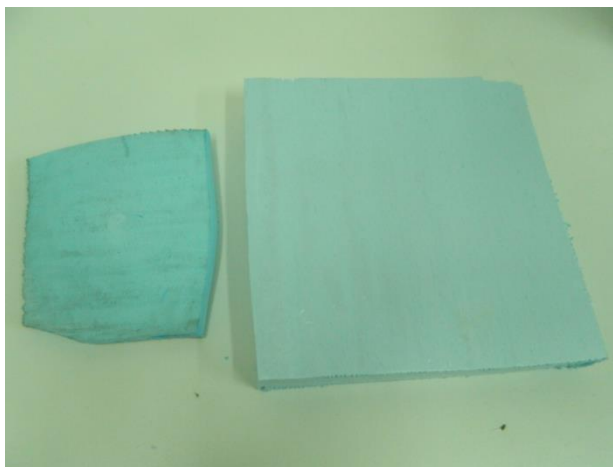
Σχήμα 4.29: Δείγμα εξηλασμένης πολυστερίνης.

Δείγμα	Πυκνότητα (kg/m ³)		Θερμοκρασία που έφτασε (°C)
	Περιβάλλον (20°C)	Μετά από αύξηση της θερμοκρασίας	
1 ^ο	30,4	30,2	50
2 ^ο	30,4	30,13	100
3 ^ο	30,4	329,73	120
4 ^ο	30,4	516,28	150

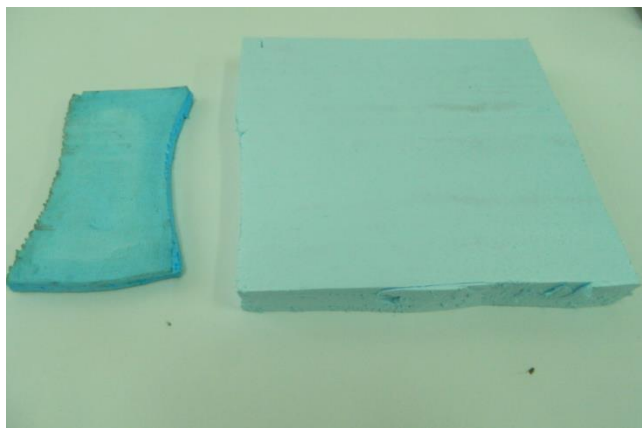
Πίνακας 4.16: Μεταβολή των πυκνοτήτων των δειγμάτων.

Παρατηρήσεις:

- Η μικρή μείωση της πυκνότητας από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στους 50°C και 100°C οφείλεται στο γεγονός ότι τα δείγματα αρχικά (στο περιβάλλον) είχαν ποσοστό υγρασίας 1,14%MC, το οποίο αφαιρέθηκε μέσα στον φούρνο, οπότε και το βάρος μειώθηκε.
- Μετά τους 110°C η εξηλασμένη πολυστερίνη αλλάζει μέγεθος, συρρικνώνεται (Σχήμα 4.30 και 4.31).



Σχήμα 4.30: Αλλαγή μεγέθους εξηλασμένης πολυστερίνης στους 110°C.



Σχήμα 4.31: Αλλαγή μεγέθους εξηλασμένης πολυστερίνης στους 120°C.

- Στους 150°C η εξηλασμένη πολυστερίνη έχει ξεπεράσει το σημείο τήξης, συνεπώς υγροποιείται (Σχήμα 4.32).



Σχήμα 4.32: Συρρίκνωση εξηλασμένης πολυστερίνης στους 150°C.

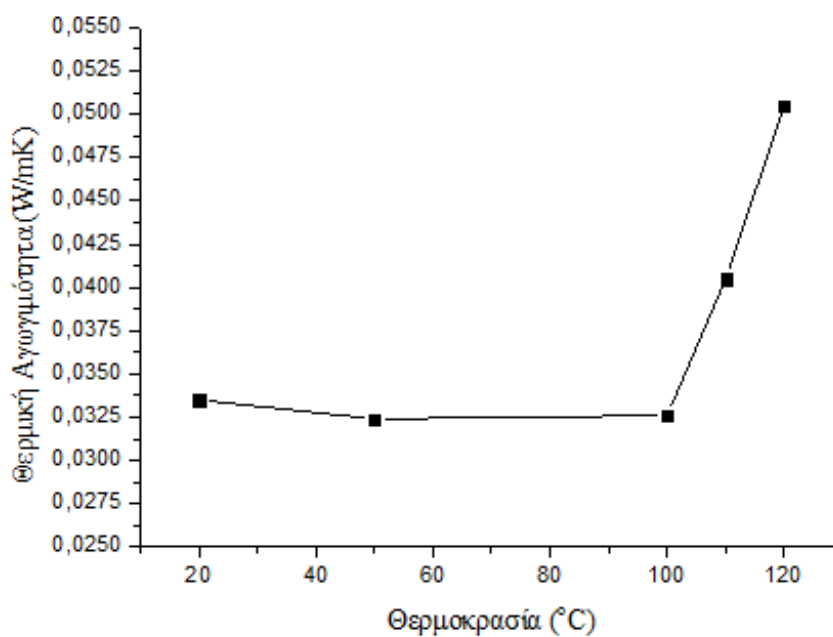
Ο ανιχνευτής έχει εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας από -15 έως 50°C. Για αυτό το λόγο το μονωτικό υλικό μετά την έξοδό του από το φούρνο, αφήνεται μέχρι να επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε να γίνει η μέτρηση. Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος του δείγματος (Σχήμα 4.33). Έγιναν τρεις μετρήσεις σε κάθε δείγμα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.17, ενώ γραφικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.34.



Σχήμα 4.33: Στιγμιότυπο από τη μέτρηση της εξηλασμένης πολυστερίνης.

#	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK) ανά θερμοκρασία (°C)				
	20°C	50°C	100°C	110°C	120°C
1	0,0336	0,0325	0,0315	0,04	0,0502
2	0,0338	0,0317	0,033	0,0412	0,0507
3	0,0332	0,033	0,0335	0,0403	0,0505
M.O.	0,0335	0,0324	0,0326	0,0405	0,0505

Πίνακας 4.17: Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας της εξηλασμένης πολυστερίνης.



Σχήμα 4.34: Θερμική αγωγιμότητα της εξηλασμένης πολυστερίνης συναρτήση της θερμοκρασίας.

4.5.3.2. Συμπέρασμα-Σύγκριση

Συμπεράσματα:

- Η θερμική αγωγιμότητα της εξηλασμένης πολυστερίνης παρουσιάζει απότομη αύξηση μετά τους 100°C.
- Μετά 100°C η εξηλασμένη πολυστερίνη συρρικνώνεται.
- Μετά 100°C η εξηλασμένη πολυστερίνη αλλοιώνεται και χρειάζεται αλλαγή.

Σύγκριση πειραματικής διαδικασίας με βιβλιογραφικές τιμές:

Η πειραματική διαδικασία που έχει ακολουθηθεί στη παραπάνω μέθοδο και στις βιβλιογραφικές τιμές δεν είναι η ίδια. Η βασική διαφορά των μεθόδων είναι ότι βάσει των βιβλιογραφικών τιμών η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας γινόταν όταν η εξηλασμένη πολυστερίνη είχε αυξημένη θερμοκρασία.

Στη πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, το μονωτικό υλικό αφού θερμαινόταν στη συνέχεια αφηνόταν μέχρι να επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια γινόταν η μέτρηση. Ο λόγος που ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία είναι ότι οι ανιχνευτές δεν έχουν δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας μετά τους 50°C.

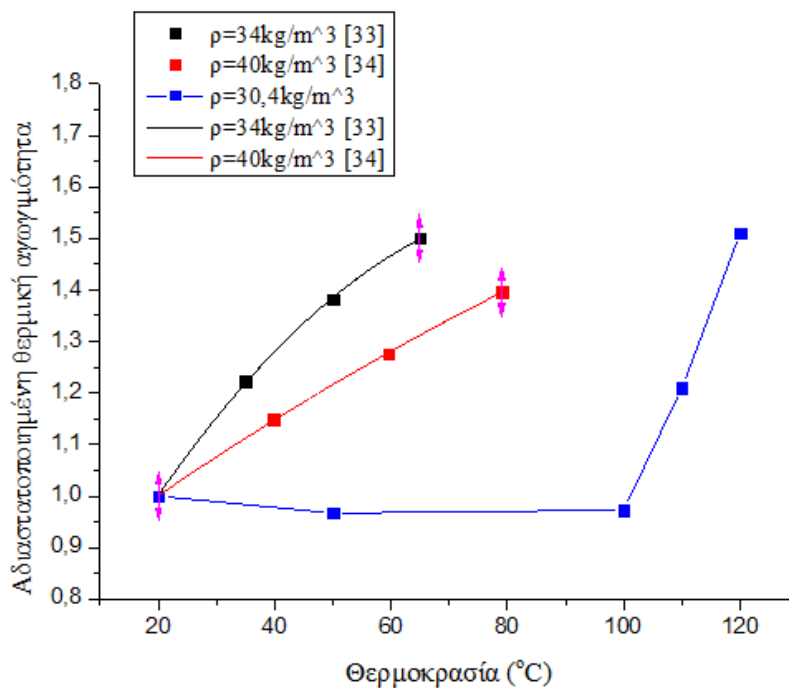
Για να μπορέσουν να συγκριθούν οι τιμές πρέπει να αδιαστατοποιηθεί η θερμική αγωγιμότητα. Οι τιμές των αδιαστατοποιημένων θερμικών αγωγιμοτήτων προκύπτουν διαιρώντας όλες τις τιμές με τη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για θερμοκρασία 20°C. Στον Πίνακα 4.18 παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές τιμές και στον Πίνακα 4.19 οι τιμές της πειραματικής διαδικασίας. Στο Σχήμα 4.35 παρουσιάζονται γραφικά συναρτήση της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια στο Πίνακα 4.20 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των καμπυλών που προκύπτουν από τα αδιαστατοποιημένα σημεία.

Βιβλιογραφικές τιμές			
$\rho=34\text{kg/m}^3$ [33]		$\rho=40\text{kg/m}^3$ [34]	
Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές	Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές
20	1	20	1
34,8855	1,22222	39,75	1,14841
50,0254	1,38095	59,5	1,27562
64,9109	1,5	79	1,39576

Πίνακας 4.18: Αδιαστατοποιημένες βιβλιογραφικές τιμές.

Πειραματική Διαδικασία	
$\rho=30,4\text{kg/m}^3$	
Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές
20	1
50	0,967
100	0,973
110	1,21
120	1,51

Πίνακας 4.19: Αδιαστατοποιημένες τιμές της πειραματικής μεθόδου.



Σχήμα 4.35: Αδιαστατοποιημένη θερμική αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας.

	Βιβλιογραφικές τιμές	
	$\rho=34\text{kg/m}^3$ [33]	$\rho=40\text{kg/m}^3$ [34]
Εξίσωση	$y = B0 + B1*x + B2*x^2$	
B0	0,63031	0,83992
B1	0,02087	0,00839
B2	$-1,15421*10^{-4}$	$1,7229*10^{-5}$
Ακρίβεια (R^2)	0,99907	0,99958

Πίνακας 4.20: Χαρακτηριστικά των αδιαστατοποιημένων καμπυλών της εξηλασμένης πολυστερίνης.

4.5.4. Διογκωμένη Πολυστερίνη

4.5.4.1. Μέθοδος

Για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας της διογκωμένης πολυστερίνης χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα ISOMET model 2104. Για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιούταν κάθε φορά νέο δείγμα (μέθοδος 1). Η διογκωμένη πολυστερίνη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.36. Στον Πίνακα 4.21 παρουσιάζονται τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν με τις πυκνότητες τους.



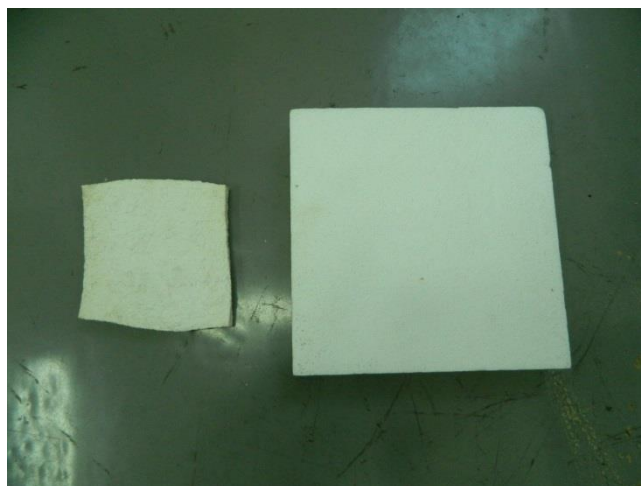
Σχήμα 4.36: Δείγμα διογκωμένης πολυστερίνης.

Δείγμα	Πυκνότητα (kg/m ³)		Θερμοκρασία που έφτασε (°C)
	Περιβάλλον (20°C)	Μετά από αύξηση της θερμοκρασίας	
1 ^ο	18,66	18,59	50
2 ^ο	18,32	18,3	100
3 ^ο	17,82	179,06	120
4 ^ο	18,4	427,37	150

Πίνακας 4.21: Μεταβολή των πυκνοτήτων των δειγμάτων.

Παρατηρήσεις:

- Μετά τους 100°C η διογκωμένη πολυστερίνη αλλάζει μέγεθος, συρρικνώνεται (Σχήμα 4.37 και 4.38).



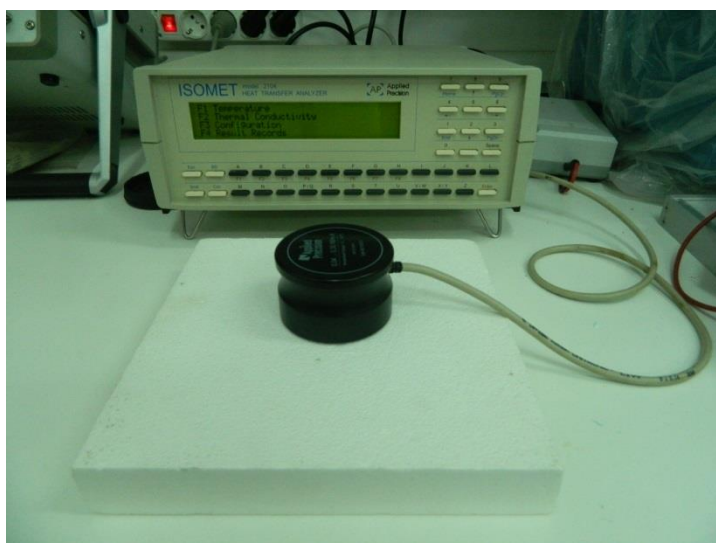
Σχήμα 4.37: Αλλαγή μεγέθους διογκωμένης πολυστερίνης στους 120°C.



Σχήμα 4.38: Αλλαγή μεγέθους διογκωμένης πολυστερίνης στους 150°C.

- Στους 150°C η διογκωμένη πολυστερίνη αλλάζει χρώμα (Σχήμα 4.38).

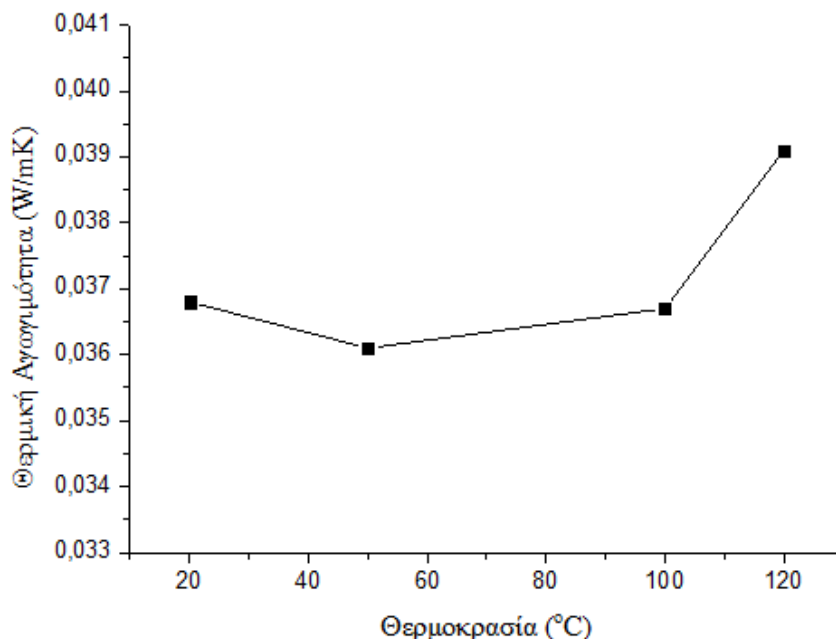
Ο ανιχνευτής έχει εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας από -15 έως 50°C. Για αυτό το λόγο το μονωτικό υλικό μετά την έξοδό του από το φούρνο, αφήνεται μέχρι να επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε να γίνει η μέτρηση. Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος του δείγματος (Σχήμα 4.39). Έγιναν τρεις μετρήσεις σε κάθε δείγμα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.22, ενώ γραφικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.40.



Σχήμα 4.39: Στιγμιότυπο από τη μέτρηση της διογκωμένης πολυστερίνης.

	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK) ανά θερμοκρασία (°C)			
#	20°C	50°C	100°C	120°C
1	0,0373	0,0349	0,0365	0,0395
2	0,0368	0,0369	0,0365	0,0386
3	0,0363	0,0365	0,0371	0,0391
M.O.	0,0368	0,0361	0,0367	0,0391

Πίνακας 4.22: Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας της διογκωμένης πολυστερίνης.



Σχήμα 4.40: Θερμική αγωγιμότητα της διογκωμένης πολυστερίνης συναρτήση της θερμοκρασίας.

4.5.4.2. Συμπέρασμα-Σύγκριση

Συμπεράσματα:

- Η θερμική αγωγιμότητα της διογκωμένης πολυστερίνης παραμένει σταθερή μέχρι τους 100°C.
- Μετά 100°C η διογκωμένη πολυστερίνη συρρικνώνεται.
- Μετά 100°C η διογκωμένη πολυστερίνη αλλοιώνεται και χρειάζεται αλλαγή.

Σύγκριση πειραματικής διαδικασίας με βιβλιογραφικές τιμές:

Η πειραματική διαδικασία που έχει ακολουθηθεί στη παραπάνω μέθοδο και στις βιβλιογραφικές τιμές δεν είναι η ίδια. Η βασική διαφορά των μεθόδων είναι ότι βάσει των βιβλιογραφικών τιμών η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας γινόταν όταν η διογκωμένη πολυστερίνη είχε αυξημένη θερμοκρασία.

Στη πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, το μονωτικό υλικό αφού θερμαινόταν στη συνέχεια αφηνόταν μέχρι να επανέλθει στη θερμοκρασία

περιβάλλοντος και στη συνέχεια γινόταν η μέτρηση. Ο λόγος που ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία είναι ότι οι ανιχνευτές δεν έχουν δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας μετά τους 50°C.

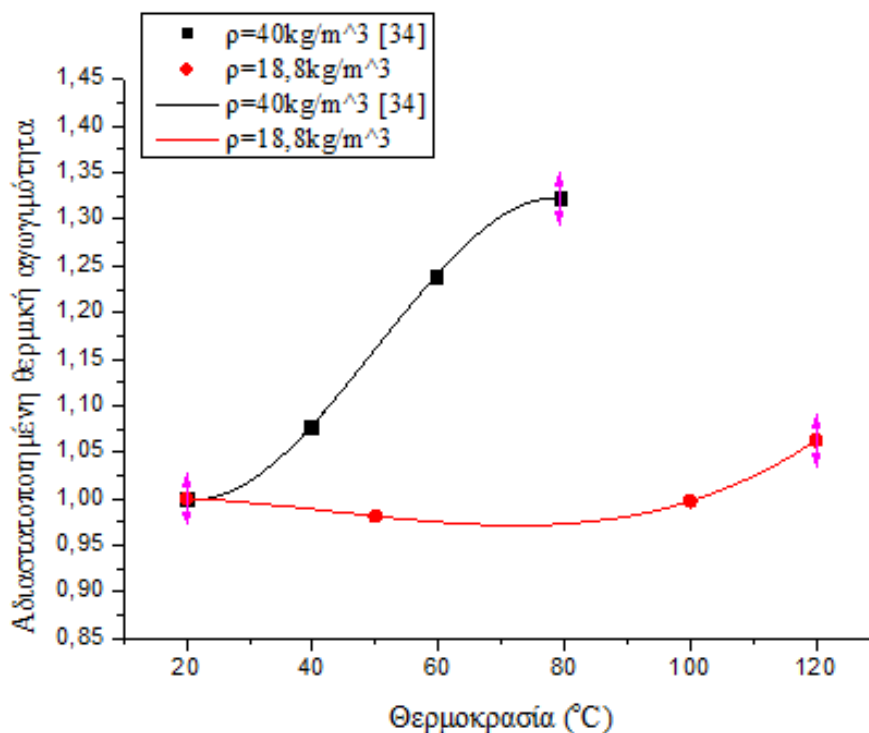
Για να μπορέσουν να συγκριθούν οι τιμές πρέπει να αδιαστατοποιηθεί η θερμική αγωγιμότητα. Οι τιμές των αδιαστατοποιημένων θερμικών αγωγιμοτήτων προκύπτουν διαιρώντας όλες τις τιμές με τη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για θερμοκρασία 20°C. Στον Πίνακα 4.23 παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές τιμές και στον Πίνακα 4.24 οι τιμές της πειραματικής διαδικασίας. Στο Σχήμα 4.41 παρουσιάζονται γραφικά συναρτήση της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια στο Πίνακα 4.25 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των καμπυλών που προκύπτουν από τα αδιαστατοποιημένα σημεία.

Βιβλιογραφικές τιμές	
$\rho=40\text{kg/m}^3$ [34]	
Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατο-ποιημένες τιμές
20	1
39,75	1,0772
59,5	1,2386
79,25	1,32281

Πίνακας 4.23: Αδιαστατοποιημένες βιβλιογραφικές τιμές.

Πειραματική Διαδικασία	
$\rho=18,8\text{kg/m}^3$	
Θερμοκρασία (°C)	Αδιαστατοποιημένες τιμές
20	1
50	0,98098
100	0,99728
120	1,0625

Πίνακας 4.24: Αδιαστατοποιημένες τιμές της πειραματικής μεθόδου.



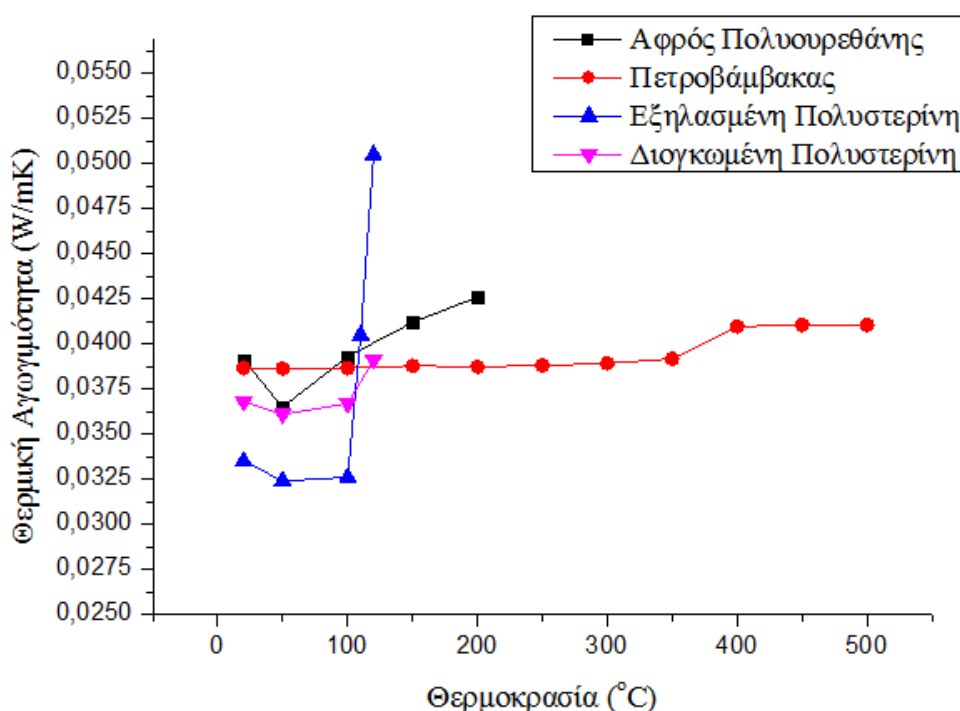
Σχήμα 4.41: Αδιαστατοποιημένη θερμική αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας.

	Βιβλιογραφικές τιμές	Πειραματική Διαδικασία
	$\rho=40\text{kg/m}^3$ [34]	$\rho=18,8\text{kg/m}^3$
Εξίσωση	$y = B0 + B1*x + B2*x^2 + B3*x^3$	
B0	1,17281	0,99476
B1	-0,01773	$9,19708*10^{-4}$
B2	$5,24327*10^{-4}$	$-3,88684*10^{-5}$
B3	$-3,49172*10^{-6}$	$2,99237*10^{-7}$
Ακρίβεια (R^2)	0,9998	0,9987

Πίνακας 4.25: Χαρακτηριστικά των αδιαστατοποιημένων καμπυλών της διογκωμένης πολυστερίνης.

4.6. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στο Σχήμα 4.42 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις των μονωτικών υλικών για τη θερμική αγωγιμότητα.



Σχήμα 4.42: Θερμική αγωγιμότητα συναρτήση της θερμοκρασίας.

Από το Σχήμα 4.42 φαίνεται ότι την χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα μέχρι του 100°C παρουσιάζει η εξηλασμένη πολυστερίνη. Η διογκωμένη πολυστερίνη παρουσιάζει την δεύτερη καλύτερη θερμική αγωγιμότητα μέχρι τους 100°C.

Από τους 100°C μέχρι τους 200°C ικανοποιητική θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζει ο αφρός πολυουρεθάνης και ο πετροβάμβακας. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 200°C ο πετροβάμβακας είναι το μόνο μονωτικό υλικό από τα εξετασθέντα, το οποίο ανταπεξέρχεται ικανοποιητικά. Όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 350°C ο πετροβάμβακας αποσυντίθεται οπότε και η θερμική του αγωγιμότητα αυξάνει. Τέλος για θερμοκρασία μεγαλύτερα των 500°C, ο πετροβάμβακας καταστρέφεται.

Όπως είναι κατανοητό η επιλογή του κατάλληλου μονωτικού υλικού, δεν εξαρτάται μόνο από το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που θα προσφέρει στη κατασκευή, αλλά κατά κύριο λόγο από τη χρήση για την οποία προορίζεται η

κατασκευή. Για παράδειγμα, σε μια βιομηχανική εγκατάσταση δε μπορεί να γίνει αποδεκτή η χρήση εξηλασμένης πολυστερίνης, καθώς είναι πολύ εύφλεκτο μονωτικό υλικό. Αντιθέτως, η επιλογή του πετροβάμβακα επιβάλλεται.

5. Γενικά Συμπεράσματα

Η αντίδραση των μονωτικών υλικών στη φωτιά αποτελεί έναν τομέα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, καθώς απαιτείται έλεγχος της πυραντοχής τους πριν από την χρησιμοποίηση στη κατασκευή τους. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ορίσει μεθόδους δοκιμής καθώς και κριτήρια αξιολόγησης για συστήματα μικρής κλίμακας.

Οι μέθοδοι μικρής κλίμακας αδυνατούν να προσομοιώσουν και να αξιολογήσουν σύνθετα συστήματα, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας όπως είναι τα ETICS. Συνεπώς, θεωρείται επιτακτική ανάγκη η εύρεση μιας εναρμονισμένης μεγάλης κλίμακας δοκιμής προσόψεων. Η κυρίαρχη πρόταση συμπεριλαμβάνει ένα σύστημα δυο βαθμίδων, όπου στη πρώτη βαθμίδα θα περιλαμβάνεται ένα σύστημα παρόμοιο με το Γερμανικό DIN E 4102-20 (ήπιο) και στη δεύτερη ένα σύστημα παρόμοιο με το Βρετανικό NS 8414-1 (αυστηρό).

Όσον αφορά το πειραματικό μέρος, οι μετρήσεις της θερμογόνου ικανότητας των μονωτικών υλικών οδήγησαν σε πολύ ουσιαστικά αποτελέσματα. Στα Σχήματα 3.37 και 3.38 παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τις πειραματικές μετρήσεις των μονωτικών υλικών τόσο για την ανώτερη (Σχήμα 3.37) όσο και για την κατώτερη (Σχήμα 3.38) θερμογόνο δύναμη. Η εξηλασμένη πολυστερίνη παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανώτερη και κατώτερη θερμογόνο δύναμη, ενώ ακολουθεί η διογκωμένη πολυστερίνη με λίγο μικρότερη τιμή και ο αφρός πολυουρεθάνης με αρκετά μικρότερη τιμή. Τέλος, είναι ο πετροβάμβακας ο οποίος είναι άκαυστος και για αυτόν το λόγο δεν προέκυψαν τιμές κατά τη μέτρηση.

Το βασικότερο συμπέρασμα είναι ότι σε κατασκευές οι οποίες παρουσιάζουν αυξημένες πιθανότητες παρουσίασης πυρκαγιάς, ο αφρός πολυουρεθάνης, η εξηλασμένη και η διογκωμένη πολυστερίνη είναι απαγορευτικές καθώς αποτελούν σημαντικό πυροφορτίο και θα βοηθήσουν τα μέγιστα στην εξάπλωσή της πυρκαγιάς. Αντίθετα, η χρήση του πετροβάμβακα αποτελεί πολύ καλή επιλογή, καθώς το πυροθερμικό φορτίο του είναι μηδενικό.

Οι μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήση της θερμοκρασίας των μονωτικών υλικών παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.42. Από το διάγραμμα συμπερένονται τα εξής:

- Για κατασκευές οι οποίες έχουν θερμοκρασιακή διακύμανση από 0 έως 100°C συνιστάται η χρήση της εξηλασμένης πολυστερίνης καθώς σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος έχει τη μικρότερη θερμική αγωγιμότητα.
- Για κατασκευές οι οποίες υπόκειται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100°C, ο πετροβάμβακας αποτελεί την καλύτερη επιλογή μεταξύ των εξετασθέντων υλικών.

Βιβλιογραφία

- [1] EN 13501-1: 2007 + A1 2009. Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire tests.
- [2] Per Blomqvist, Margaret Simonson McNamee, and Per Thureson. Compilation of International Building Regulations Relevant EPS/XPS. October 2010.
- [3] Ελένη-Μαρίνα Ασημακοπούλου. Υπολογιστική Προσομοίωση Διάδοσης Φωτιάς σε Κτίριο με Συστήματα Ξηράς Δόμησης και με Υλικά Αλλαγής Φάσης. February 2011.
- [4] NIST Special Publication 1061. Forum Workshop on Establishing the Scientific Foundation for Performance-Based Fire Codes: Proceedings. December 2006.
- [5] European standards, Construction products (CPD/CPR). <http://ec.europa.eu/enterprise/policies/european-standards/harmonised-standards/construction-products/>. last accessed: 30 September 2013.
- [6] Birgitte Messerschmidt and Jacob Fellman. Fire testing of ETICS a comparative study. *Interflam*:1269-1276, 2013.
- [7] Exova Warringtonfire Aus Pty Ltd.. Fire Safety Engineering Design of Combustible Façades, Forest & Wood Products Australia. December 2011.
- [8] Edith Antonatus. Facades – Fire safety aspects in the context of increasing use of thermal insulation. *Interflam*:1291-1301, 2013.
- [9] Euroclass System, <http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateoftheart/database/euroclass/euroclass.html>, last accessed: 12 June 2012.
- [10] Anna A. Stec and T. Richard Hull. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials. *Energy and Buildings*, 43:498-506, 2011.
- [11] A.M. Papadopoulos. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37:77-86, 2005.
- [12] Otto Bayer. "Das Di-Isocyanat-Polyadditionsverfahren (Polyurethane)" *Angewandte Chemie*. 1947.
- [13] Raymond B. Seymour and George B. Kauffman. Polyurethanes: A Class of Modern Versatile Materials. *Journal of Chemical Education*, 69:256-265, 1992.

- [14] GNU Free Documentation License. Chart of basic Polyurethane properties. August 2007.
- [15] Safety and Health Committee. Health Alert: Polyurethane exposure. July 2004.
- [16] Dernehl CU. Health Hazards Associated with Polyurethane. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 1966.
- [17] A.M. Papadopoulos, et al. Design and Development of Innovative Stone-wool Products for the Energy Upgrading of Existing and New Buildings. Project Interim Report, Thessaloniki, 2004 (in Greek).
- [18] Richard Hull. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials, *Energy and Buildings*, 43:498-506, 2011.
- [19] SP04 – Jansson.
- [20] Han-Hsi Liang and Ming-Chin Ho. Toxicity characteristics of commercially manufactured insulation materials for building applications in Taiwan, *Construction and Building Materials*, 21:1254-1261, 2007.
- [21] P. Blomqvist, T. Hertzberg, M. Dalene, and G. Skarping. Isocyanates, aminoisocyanates, and amines from fires – a screening of common materials found in buildings. *Fire and Materials*, 27:275–294, 2003.
- [22] Bjorn Petter Jelle. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43:2549-2563, 2011.
- [23] IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 81, 2002.
- [24] Competition Commission, Alternatives to Glass Mineral Wool, <http://www.competition-commission.org.uk/>, last accessed: 3 July 2001.
- [25] Fibrotermica, http://www.fibrotermica.gr/gr/fibroster_xps.php, last accessed: 13 July 2013.
- [26] Technomorfi, <http://www.technomorfi.gr/ell/product/Neopor>, last accessed: 7 June 2013.
- [27] Lu TR. Assessment and qualification of fire safety for finishing materials, architecture & building research of the ministry of interior of Taiwan. Taipei, Taiwan, 2001.
- [28] Foamex International, Inc. Material Safety Data Sheet, March, 2004.

- [29] Handbook of Building Materials for Fire Protection. Harper, 2004.
- [30] Mohammad S. Al-Homoud. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40:353-366, 2005.
- [31] Rockwool Firesafe Insulation, http://download.rockwool.no/media/244476/rockwool_and_sustainability_ROCKWOOL.pdf, last accessed: 15 November 2012.
- [32] Juan C. De Jesus, Ismael González, Angel Quevedo, and Tito Puerta. Thermal decomposition of nickel acetate tetrahydrate: an integrated study by TGA, QMS and XPS techniques. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 228:283-291, March 2005.
- [33] Ru-shi Han, Guo-qing Zhu, and Guo-wei Zhang. Experiment Study on the Ignition Point of XPS Foam Plastics. *Procedia Engineering*, Volume 52, 2013.
- [34] Ying Zhang, Xinjie Huang, Qingsong Wang, Jie Ji, Jinhua Sun, and Yi Yin. Experimental study on the characteristics of horizontal flame spread over XPS surface on plateau. *Journal of Hazardous Materials*, 189:34-39, 2011.
- [35] European Manufacturers of EPS. Behaviour of EPS in case of fire. August 2002.
- [36] Pravin Kannan, Joseph J. Biernacki, Donald P. Visco Jr., and William Lambert. Kinetics of thermal decomposition of expandable polystyrene in different gaseous environments. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84:139-144, 2009.
- [37] Feng Xue, Daisuke Takeda, Takao Kimura, and Masahiro Minabe. Effect of organic peroxides on the thermal decomposition of expanded polystyrene with the addition of *o*-methylstyrene. *Polymer Degradation and Stability*, 83:461-466, 2004.
- [38] P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. L. P. Cruster, J. R. Hall, and J. M. Watts. *S.F.P.E. Handbook for Fire Engineering, 3rd Edition*. National Fire Protection Association, U.S.A., 2002.
- [39] Benichou Noureddine and Mohamed. A. Sultan. Thermal properties of lightweight-framed construction components at elevated temperatures. *Fire and Materials*, 29:165-179, 2005.
- [40] Takeda H. A model to predict fire resistance of non-load bearing wood-stud walls. *Fire and Materials*, 27:307-315, 2003.
- [41] Michael L. Hobbs and Gordon H. Lemmon. Polyurethane foam response to fire in practical geometries. *Polymer Degradation and Stability*, 84:183-197, 2004.

- [42] Saleh A. Al-Ajlan. Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Applied Thermal Engineering*, 26:2184-2191, 2006.
- [43] F. Ochs and H. Müller-Steinhagen. Temperature and Moisture Dependence of the Thermal Conductivity of Insulation Materials. Cesme, 2005.
- [44] Επίσημη ιστοσελίδα της Den Braven, <http://www.denbraven.nl/en/product-range/pu-foam/zwaluw-pu-foam>, last accessed: 1 September 2013.
- [45] TektoHellas, http://www.tekto.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=635&Itemid=357, last accessed: 12 August 2013.
- [46] CT Metre Thermal Conductivity, http://www.smee.fr/fr/accueil_ctmetre.htm, last accessed: 13 September 2010.
- [47] CSTB, Determination of thermal conductivity dynamic method, CT metre, user's guide.
- [48] Applied Precision, ISOMET model 2104, user's guide.