

**13<sup>ο</sup> ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ  
ΔΑΣΟΛΟΓΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ**

**ΘΕΜΑ: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΡΕΙΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ**  
Πρακτικά – Τόμος β'

ΟΡΓΑΝΩΤΗΣ  
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΑΣΟΛΟΓΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ

Καστοριά 7-10 Οκτωβρίου 2007  
Κτήριο ΕΔΗΚΑ  
Περιοχή Χλόη Καστοριάς

## Η θερμική τροποποίηση του ξύλου

**Νικόπουλος Φώτιος, Μπαρμπούτης Ιωάννης**

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος,

Εργαστήριο Δασικής Τεχνολογίας, 54124 Θεσσαλονίκη

Email: fotis\_nikopoulos@yahoo.gr, jbarb@for.auth.gr

### Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια άρχισε η ανάπτυξη βιομηχανιών ξύλου για την παραγωγή θερμικά τροποποιημένου ξύλου. Πρόκειται για ξύλο του οποίου τα κυτταρικά τοιχώματα υπόκεινται σε τροποποίηση αποκλειστικά και μόνο με επίδραση υψηλής θερμοκρασίας και χωρίς προσθήκη χημικών ουσιών. Σημαντικό πλεονέκτημα του είναι η αύξηση της ανθεκτικότητάς του σε βιολογικές αλλοιώσεις και η βελτίωση της υγροσκοπικής του συμπεριφοράς. Επί πλέον το χρώμα του ξύλου μπορεί να επηρεασθεί με τον χειρισμό και να επιτευχθεί μια ιδιαίτερη εμφάνιση. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξωτερικούς ή εσωτερικούς χώρους όπου υπάρχει υψηλή και συχνή επίδραση υγρασίας. Η μείωση της μηχανικής αντοχής του και το υψηλό κόστος της παραγωγής του είναι τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του. Οι έρευνες επικεντρώνονται στην βελτίωση των ιδιοτήτων του, τον έλεγχο της καταλληλότητας των διαφόρων ειδών και την μείωση του κόστους παραγωγής.

**Αέξεις κλειδιά:** θερμικά τροποποιημένο ξύλο, ιδιότητες, εφαρμογές.

### Εισαγωγή

Η προστασία του ξύλου από βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες, ειδικά όταν αυτό προορίζεται για εξωτερική χρήση, ήταν πάντοτε και είναι και σήμερα μείζονος σημασίας. Κατά τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα άρχισε η διεξαγωγή επιστημονικών ερευνών πάνω στην επίδραση της θερμότητας στη δομή του ξύλου και, ως εκ τούτου, στις ιδιότητές του. Έτσι αναπτύχθηκε ένα νέο προϊόν, το θερμικά τροποποιημένο ξύλο (Homan κ.ά. 2000).

Με τον όρο «θερμική τροποποίηση του ξύλου» εννοούμε την τροποποίηση του κυτταρικού τοιχώματος σε μοριακό επίπεδο με κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες ( $170 - 240^{\circ}\text{C}$ ), για χρονικό διάστημα που ποικίλει ανάλογα με τη μέθοδο (μέχρι και 36 ώρες) και χωρίς πρόσθετες ουσίες (Ohlmeier και Lukowsky 2004). Σε γενικές γραμμές, στο θερμικά τροποποιημένο ξύλο παρατηρείται αύξηση της ανθεκτικότητας στη σήψη, μείωση της περιεχόμενης υγρασίας, μείωση της θερμικής αγωγιμότητας, απομάκρυνση της ρητίνης, ομοιόμορφος χρωματισμός της μάζας του, αύξηση της σταθερότητας, μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό και μικρή μείωση της αντοχής σε κάμψη (Jämsä και Viitaniemi 1998).

### Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιαστούν οι μέχρι τώρα εξελίξεις στην τεχνολογία παραγωγής του θερμικά τροποποιημένου ξύλου, καθώς και οι ιδιότητες και χρήσεις του, ώστε να καταστεί δυνατή η εξάπλωση των εφαρμογών του και η ορθολογικότερη αξιοποίησή του.

### Διαδικασία παραγωγής

Διάφοροι μέθοδοι παραγωγής έχουν αναπτυχθεί από χώρες όπως η Γερμανία, η Ολλανδία, η Φιλανδία, η Ρωσία και άλλες.

Η ολλανδική μέθοδος παραγωγής συνδυάζει διαδοχικά ένα στάδιο υδροθερμόλυσης με ένα στάδιο ξήρανσης. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η χρήση της υπάρχουσας άφθονης υγρασίας στο ξυλώδες κυτταρικό τοίχωμα κατά τη διάρκεια της υδροθερμόλυσης, προκαλώντας αυξημένη δραστικότητα των συστατικών του κυτταρικού τοιχώματος κάτω από

σχετικά χαμηλή θερμοκρασία. Με σκοπό να επιτευχθεί ένας επιλεκτικός βαθμός αποπολυμερισμού της ημικυτταρίνης κατά την υδροθερμόλυση, σχετικά ήπιες συνθήκες μπορούν να εφαρμοστούν περιορίζοντας ανεπιθύμητες πλευρικές αντιδράσεις, που μπορούν να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες αρνητικά. Η διαδικασία κυρίως αποτελείται από δύο στάδια με έναν ενδιάμεσο χειρισμό ξήρανσης. Στο πρώτο στάδιο (υδροθερμόλυση), χλωρό ή ξηραμένο στον αέρα ξύλο, κατεργάζεται σε θερμοκρασίες 160°C με 190°C κάτω από αυξημένη πίεση (υπερατμοσφαιρική πίεση). Μια συμβατική διαδικασία ξήρανσης ξύλου χρησιμοποιείται για την ξήρανση του κατεργασμένου ξύλου σε ένα χαμηλό περιεχόμενο υγρασίας (10%). Στο δεύτερο στάδιο (τελική επεξεργασία) το ξηρό ενδιάμεσο προϊόν θερμαίνεται ξανά σε θερμοκρασίες τυπικά μεταξύ 170°C και 190°C. Η διαδικασία γενικά έχει ως εξής: 1. Θερμόλυση (4-5 ώρες), 2. στάδιο ξήρανσης (3-5 μέρες), 3. στάδιο τελικής επεξεργασίας (14-16 ώρες), 4. ρύθμιση (2-3 μέρες) (Militz και Tjeerdsma 2000).

Επίσης μια βαθμιδωτή διαδικασία θερμικής κατεργασίας του ξύλου έχει αναπτυχθεί από το VTT σε συνεργασία με τη Φιλανδική βιομηχανία προϊόντων ξύλου. Αυτή, η φινλανδική μέθοδος, μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κύριες φάσεις (Σχήμα 1):

#### -Φάση 1. Αύξηση της θερμοκρασίας - ξήρανση σε υψηλή θερμοκρασία

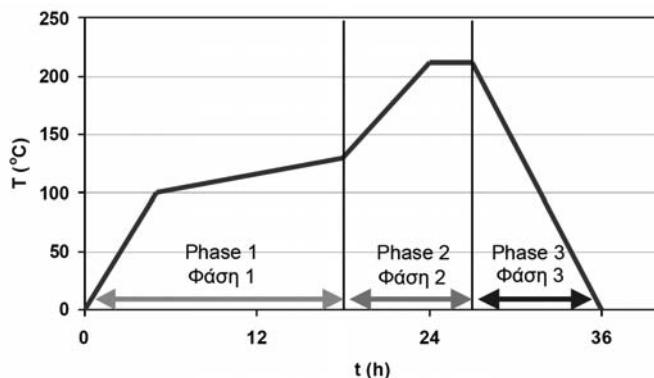
Χρησιμοποιώντας θερμότητα και ατμό, η θερμοκρασία του κλίβανου ανυψώνεται απότομα περίπου στους 100°C. Υστερα, η θερμοκρασία αυξάνεται σταθερά στους 130°C, και σ' αυτό το διάστημα λαμβάνει τόπο η ξήρανση σε υψηλή θερμοκρασία και η υγρασία του ξύλου μειώνεται σχεδόν στο μηδέν.

#### -Φάση 2. Θερμική κατεργασία

Όταν πραγματοποιηθεί η ξήρανση σε υψηλή θερμοκρασία, η θερμοκρασία μέσα στον κλίβανο αυξάνεται μεταξύ των 185°C και 215°C. Όταν έχει επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο, η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή για 2-3 ώρες ανάλογα με την τελική χρήση.

#### -Φάση 3. Ψύξη και ρύθμιση υγρασίας

Στο τελικό στάδιο μειώνεται η θερμοκρασία χρησιμοποιώντας συστήματα ψεκασμού νερού. Όταν η θερμοκρασία έχει φτάσει τους 80-90°C, πραγματοποιείται προσθήκη υγρασίας για να έρθει η υγρασία του ξύλου σε ένα χρησιμοποίησμα επίπεδο, 4-7% (Mayes και Oksanen 2002).



Σχήμα 1. Διάγραμμα της διαδικασίας παραγωγής του θερμικά τροποποιημένου ξύλου.

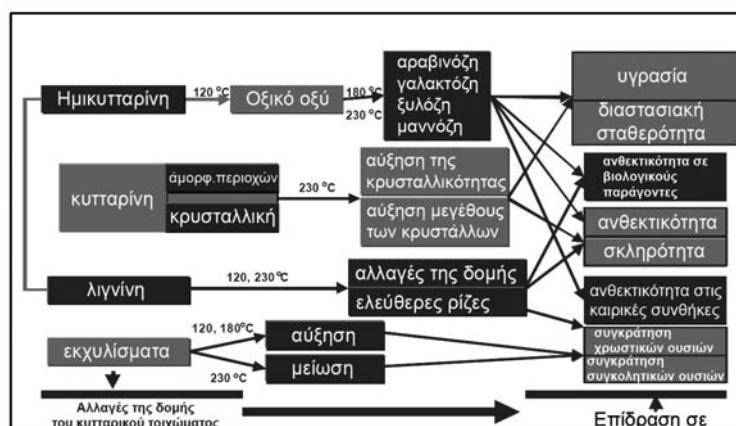
Figure 1. Diagram of the production process of thermal modified wood.

#### Ιδιότητες του θερμικά τροποποιημένου ξύλου

Η θέρμανση του ξύλου σε υψηλές θερμοκρασίες αλλάζει μόνιμα πολλές από τις χημικές και φυσικές του ιδιότητες, λόγω κυρίως της θερμικής αποικοδόμησης των ημικυτταρινών. Άλλαγές εμφανίζονται ήδη από τους 150°C περίπου, και συνεχίζουν καθώς η θερμοκρασία αυξάνει (Metsä-Kortelainen 2006). Μεταβάλλοντας το ύψος της θερμοκρασίας και τη διάρκεια της κατεργασίας, μεταβάλλονται ανάλογα και οι ιδιότητες του ξύλου.

### Χημικές ιδιότητες

Σε θερμοκρασίες μέχρι 300°C, ο βαθμός πολυμερισμού της κυτταρίνης ελαττώνεται, το νερό απομακρύνεται, και δημιουργούνται ελεύθερες ρίζες, καρβονυλικές, καρβοξυλικές και ομάδες υδρο-υπεροξειδίου, καθώς και μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και χημικά ενεργός ξυλάνθρακας (Σχήμα 2). Καθώς το ξύλο θερμαίνεται, οξικό οξύ σχηματίζεται από την ημικυτταρίνη με υδρόλυση. Το οξύ που ελευθερώνεται λειτουργεί ως καταλύτης στην υδρόλυση των ημικυτταρινών προς διαλυτά σάκχαρα. Επιπλέον, το οξικό οξύ αποπολυμερίζει τα μικροϊνίδια της κυτταρίνης στις άμορφες περιοχές. Μετά τη θερμική κατεργασία, η ποσότητα των ευπαθών στους μύκητες συστατικών είναι αισθητά μικρότερη, με αποτέλεσμα το θερμικά τροποποιημένο ξύλο να παρουσιάζει αυξημένη ανθεκτικότητα στους σηπτικούς μύκητες. Με τη διάσπαση των ημικυτταρινών, η συγκέντρωση των ομάδων υδροξυλίων που προσροφούν νερό μειώνεται και η διαστασιακή σταθερότητα του τροποποιημένου ξύλου αυξάνεται. Η θερμοκρασία διάσπασης των ημικυτταρινών είναι περίπου 200-260°C, και η αντίστοιχη θερμοκρασία για την κυτταρίνη είναι περίπου 240-350°C. Εφόσον η ποσότητα των ημικυτταρινών είναι μεγαλύτερη στα πλατύφυλλα είδη, η διάσπαση είναι επίσης ευκολότερη σε αυτά. Παρ' όλ' αυτά, η διάσπαση μιας ημικυτταρινικής αλυσίδας δεν μειώνει τόσο την ισχύ του ξύλου όσο η διάσπαση των κυτταρινικών αλυσίδων. Αντ' αυτού, βελτιώνει τη συμπιεσιμότητα του ξύλου και μειώνει τη δημιουργία τάσεων.



Σχήμα 2. Μηχανισμοί αντιδράσεων του θερμικά τροποποιημένου ξύλου (πηγή: VTT).  
Figure 2. Reaction mechanisms of heat-treated wood (source: VTT).

Η μάζα της λιγνίνης αρχίζει να μειώνεται μόνο μετά τους 200°C, όταν οι β-αιθερικοί δεσμοί αρχίζουν να διασπώνται. Σε υψηλές θερμοκρασίες, οι περιεχόμενες μονάδες –O-CH<sub>3</sub> της λιγνίνης μειώνονται και κάποιες μονάδες της λιγνίνης, που δε συμπυκνώνονται, μετατρέπονται σε μονάδες C<sub>13</sub>H<sub>12</sub>. Η συμπύκνωση του C<sub>13</sub>H<sub>12</sub> είναι η πιο συνήθης αντίδραση σε θερμοκρασίες μεταξύ 120-220°C. Αυτή η αντίδραση έχει επιδρά σε ιδιότητες της λιγνίνης, όπως το χρώμα της, η δραστικότητα και η διαλυτότητα (Funaoka κ.ά. 1990).

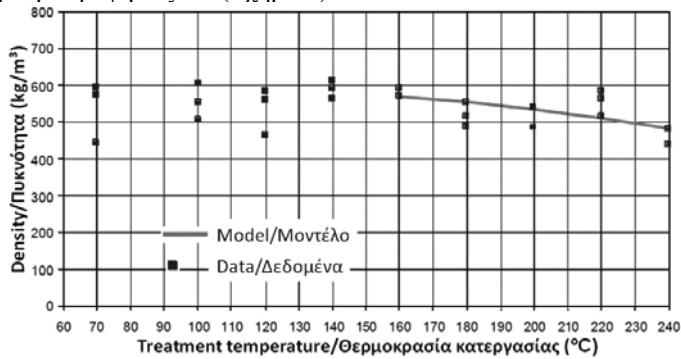
Τα εκχυλίσματα αποτελούν λιγότερο από το 5% του ξύλου και περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, τερπένια, λίπη, κηρούς και φαινολικές ενώσεις. Τα εκχυλίσματα είναι ετερογενούς φύσεως στα διάφορα είδη ξύλου, και ο αριθμός των ενώσεων είναι πολύ μεγάλος. Τα εκχυλίσματα δεν είναι δομικά συστατικά του ξύλου, και οι περισσότερες ενώσεις εξατμίζονται εύκολα κατά τη θερμική κατεργασία (Mayes και Oksanen 2002).

### Φυσικές ιδιότητες

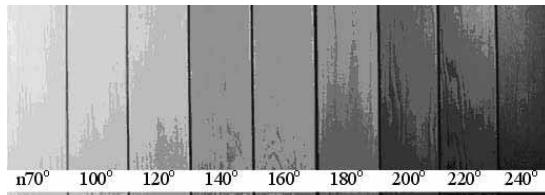
Το θερμικά τροποποιημένο ξύλο έχει μικρότερη πυκνότητα από ότι το ξύλο που δεν έχει κατεργαστεί θερμικά. Αυτό κυρίως οφείλεται στις αλλαγές στη μάζα του ξύλου κατά την

κατεργασία όπου το ξύλο χάνει βάρος. Η πυκνότητα μειώνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία κατεργασίας που χρησιμοποιείται (Mohebby και Sanaei 2005) (Σχήμα 3).

Το χρώμα των θερμικά τροποποιημένου ξύλου επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και το χρόνο κατεργασίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία που εφαρμόζεται, τόσο πιο σκούρα εμφάνιση έχει το ξύλο. Το χρώμα εξαρτάται από την πυκνότητα και επίσης από το αν έχει χρησιμοποιηθεί πρώτο ή όψιμο ξύλο (Σχήμα 4).



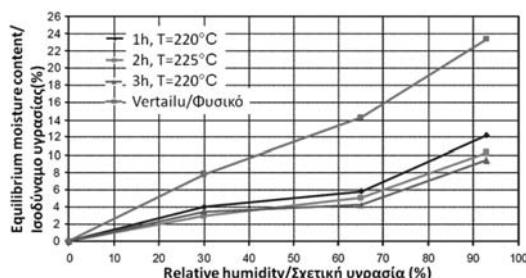
Σχ. 3. Επίδραση της θερμοκρασίας κατεργασίας στην πυκνότητα πεύκης(πηγή: VTT).  
Figure 3. The effect of treatment temperature on the density of pine (source: VTT).



Σχήμα 4. Χρώμα θερμικά τροποποιημένης πεύκης. Θερμοκρασίες κατεργασίας στους 70°C και από 100 έως 240°C με ενδιάμεσα διαστήματα των 20°C (φωτογραφία: VTT).

Figure 4. The colour of heat-treated pine. Treatment temperatures at 70°C and from 100 to 240°C at 20°C intervals (photo: VTT).

Η θερμική κατεργασία μειώνει καθαρά το ισοδύναμο υγρασίας του ξύλου, και σε υψηλές θερμοκρασίες (220°C) το ισοδύναμο υγρασίας είναι περίπου το μισό σε σχέση με το μη κατεργασμένο ξύλο. Η διαφορά στις τιμές υγρασίας του ξύλου είναι μεγαλύτερη όταν η σχετική υγρασία είναι μεγαλύτερη (Σχήμα5).

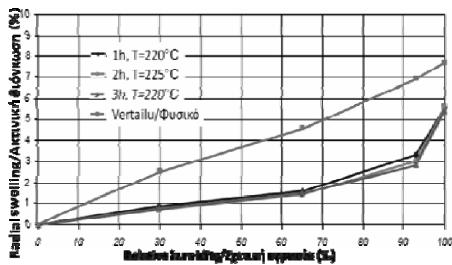


Σχήμα 5. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας στο ισοδύναμο υγρασίας θερμικά κατεργασμένης ερυθρελάτης (πηγή: VTT).  
Figure 5. The effect of relative humidity on moisture content of heat-treated spruce (source: VTT).

Η θερμική κατεργασία μειώνει σημαντικά την εφαπτομενική και ακτινική διόγκωση (Σχήμα 6).

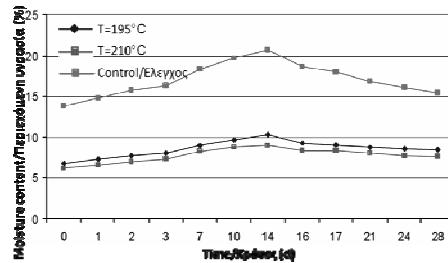
6). Επιπλέον η ρίκνωση είναι πολύ μικρή.

Δοκιμές (CTBA και VTT) έχουν δείξει ότι η θερμική τροποποίηση του ξύλου μειώνει σημαντικά τη διαπερατότητά του (Σχήμα 7) σε σχέση με μη κατεργασμένο ξύλο ή ξύλο που έχει ξηραθεί σε απλά ξηραντήρια (Mayes και Oksanen 2002).



Σχήμα 6. Ακτινική διόγκωση ερυθρελάτης (πηγή: VTT).

Figure 6. The radial swelling of spruce (source: VTT).



Σχήμα 7. Επίδραση της θερμικής κατεργασίας στη διαπερατότητα από ατμό(πηγή:VTT).

Figure 7. The effect of heat treatment on steam permeability (source: VTT).

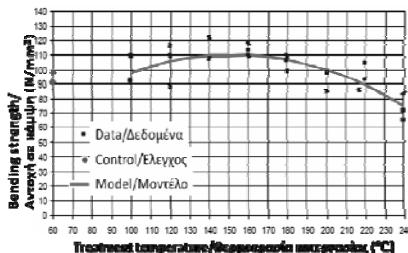
### Μηχανικές ιδιότητες

Η αντοχή γενικά του ξύλου έχει άμεση σχέση με την πυκνότητα. Ως εκ τούτου, το θερμικά τροποποιημένο ξύλο σε ορισμένες περιπτώσεις έχει μικρότερη αντοχή. Η αντοχή του ξύλου επίσης εξαρτάται άμεσα από την περιεχόμενη υγρασία και το επίπεδο της κάτω από το σημείο ινοκόρου. Το θερμικά τροποποιημένο ξύλο μπορεί να πλεονεκτεί λόγω του χαμηλότερου ισοδύναμου υγρασίας του (Tjeerdsma 2006).

Η αντοχή σε κάμψη του θερμικά τροποποιημένου ξύλου μειώνεται, αλλά η ουσιαστική απώλεια αντοχής αρχίζει σε θερμοκρασίες πάνω από τους 220°C (Σχήμα 8). Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η θερμική κατεργασία δεν επηρεάζει σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας του ξύλου (Σχήμα 9).

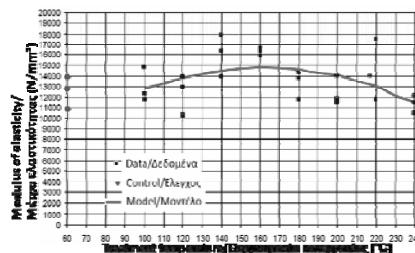
Η επίδραση στην ικανότητα συγκράτησης βίδας οφείλεται περισσότερο στις γενικές διαφορές στην πυκνότητα του ξύλου παρά στην ίδια τη θερμική κατεργασία.

Σε δοκιμές που έγιναν (VTT), βρέθηκε ότι με κατεργασία σε υψηλότερες θερμοκρασίες (στους 23°C για 4 ώρες) η αντοχή σε διάτηση μειώθηκε ακτινικά από 1 έως 25% και εφαπτομενικά από 1 έως 40%. Κατεργασία σε μικρότερες θερμοκρασίες (στους 190°C) είχε



Σχήμα 8. Η επίδραση της θερμοκρασίας κατεργασίας στην αντοχή σε κάμψη της πεύκης, μέσης πυκνότητα 560 kg/m³ (πηγή: VTT).

Figure 8. The effect of heat treatment temperature on the bending strength of pine, average density 560 kg/m<sup>3</sup> (source: VTT).

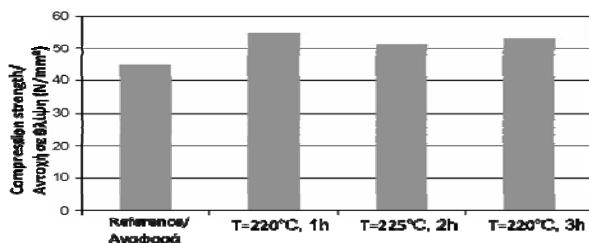


Σχ. 9. Επίδραση της θερμοκρασίας κατεργασίας στο μέτρο ελαστικότητας της πεύκης, μέση πυκνότητα 560 kg/m³ (πηγή: VTT).

Figure 9. Effect of heat treatment temperature on the modulus of elasticity of pine, average density 560 kg/m<sup>3</sup> (source: VTT)

πολύ μικρή επίδραση στην πεύκη, παρόλο που η ερυθρελάτη έδειξε μια μείωση 1%-20% και στις ακτινικές και στις εφαπτομενικές δοκιμές.

Οι τιμές της αντοχής σε θλίψη είναι καλύτερες από ότι στο μη κατεργασμένο ξύλο ακόμα κι όταν εφαρμόζονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες κατεργασίας. Δοκιμές (VTT) έδειξαν (Σχήμα 10) ότι όταν εφαρμόζεται το μέγιστο φορτίο, τα δείγματα σπάζουν σε μικρότερα κομμάτια αλλά δεν κάμπτονται όπως το ξύλο που έχει ξηραθεί σε απλά ξηραντήρια. Αυτό δείχνει ότι το θερμικά κατεργασμένο ξύλο δεν είναι τόσο ελαστικό όσο το ξύλο που έχει ξηραθεί σε απλά ξηραντήρια.



Σχήμα 10. Η αντοχή σε θλίψη ( $\text{N/mm}^2$ ) ερυθρελάτης. Μέση πυκνότητα  $420 \text{ kg/m}^3$   
(πηγή: VTT).

Figure 10. The compression strength ( $\text{N/mm}^2$ ) of spruce. Average density  $420 \text{ kg/m}^3$  (source: VTT).

Η αντοχή σε κρούση του θερμικά τροποποιημένου ξύλου είναι μικρότερη από ότι του ξύλου που έχει ξηραθεί σε απλά ξηραντήρια.

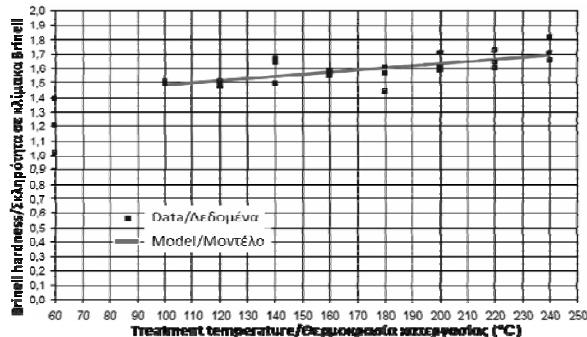
Δοκιμές για την αντοχή σε σχίση (YTI) σε ερυθρελάτη, πεύκη και σημύδα έδειξαν ότι η αντοχή σε σχίση μειώνεται κατά 30-40% και η μείωση της αντοχής μεγαλώνει σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

Δοκιμές έχουν δείξει ότι η σκληρότητα αυξάνει καθώς αυξάνει η θερμοκρασία κατεργασίας. Η σχετική αλλαγή είναι μικρή, και ως εκ τούτου δεν έχει επίδραση στην πράξη. Η σκληρότητα εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα (Mayes και Oksanen 2002).

#### Θερμικές ιδιότητες

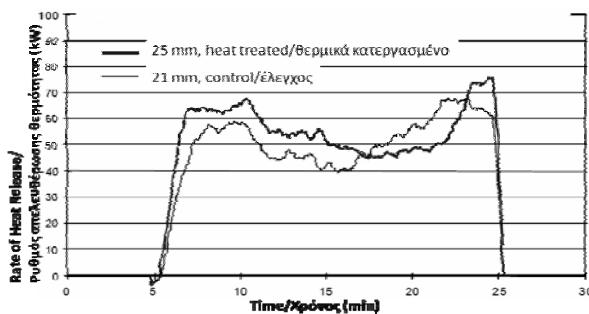
Δοκιμές έχουν δείξει ότι η θερμική αγωγιμότητα του θερμικά κατεργασμένου ξύλου μειώνεται κατά 20-25% όταν συγκρίνεται με μη κατεργασμένα κωνοφόρα.

Η θερμική κατεργασία μειώνει ελαφρώς την αντίσταση του ξύλου στη φωτιά. Ο χρόνος ανάφλεξης μειώνεται περίπου κατά 30% σε σχέση με ξύλο που δεν έχει κατεργαστεί θερμικά. Παρ' όλ' αυτά, η γενικότερη συμπεριφορά του θερμικά κατεργασμένου ξύλου δε φαίνεται να διαφέρει ιδιαίτερα από του απλού ξύλου (Mayes και Oksanen 2002).



Σχήμα 11. Επίδραση της θερμικής κατεργασίας στη σκληρότητα σε κλίμακα Brinell της πεύκης. Χρόνος κατεργασίας 3 ώρες (πηγή: VTT).

Figure 11. The effect of heat treatment on the Brinell hardness of pine.  
Treatment time of 3 hours (source: VTT).



Σχήμα 12. Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας δειγμάτων πεύκης με και χωρίς θερμική κατεργασία. Το πάχος των δειγμάτων ήταν 21 και 25 mm για τα φυσικά και τα θερμικά κατεργασμένα αντίστοιχα.

Figure 12. Rate of heat release of pine specimens with (2/1) and without (3/1) heat treatment. The specimen thickness was 21 and 25 mm for untreated and heat-treated pine boards, respectively.

#### Διάρκεια ζωής

Έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές (VTT) με τους μύκητες *Coniophora puteana* και *Poria placenta*. Το θερμικά τροποποιημένο ξύλο απαιτούσε υψηλότερη θερμοκρασία κατεργασίας ώστε να αποκτήσει μέγιστη αντίσταση στο *Poria placenta* σε σύγκριση με το *Coniophora puteana*. Η δοκιμές αυτές αποκάλυψαν πολύ καλή ανθεκτικότητα σε βιολογικούς παράγοντες που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το χρόνο κατεργασίας.

Δοκιμές με έντομα έχουν διεξαχθεί από το CTBA στη Γαλλία. Τα *Cerambycidae* συναντώνται στο σομφό ξύλο των κωνοφόρων. Το *Anobium punctatum* προσβάλει ειδικά το ξύλο πλατυφύλλων. Το *Lycus Bruneus* συναντάται σε κάποια πλατύφυλλα είδη. Οι δοκιμές έδειξαν ότι το θερμικά τροποποιημένο ξύλο ήταν ανθεκτικό στα παραπάνω έντομα.

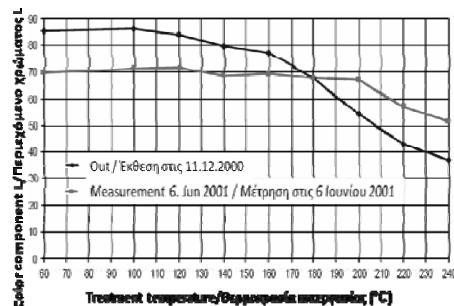
Δοκιμές που έγιναν στο Πανεπιστήμιο του Κυορίου επίσης απέδειξαν ότι το θερμικά τροποποιημένο ξύλο έχει καλή ανθεκτικότητα στα *Cerambycidae*. Η αναφορά καταλήγει ότι τα σκαθάρια αναγνωρίζουν την πεύκη από τις εκπομπές τερπενίων και εναποθέτουν τα αυγά τους. Επειδή οι εκπομπές τερπενίων στο θερμικά τροποποιημένο ξύλο μειώνονται δραστικά, τα σκαθάρια επιλέγουν το απλό ξύλο, όπου είναι δυνατό.

Όπως τα περισσότερα φυσικά υλικά, έτσι και το θερμικά τροποποιημένο ξύλο δε μπορεί να αντισταθεί στην υπεριώδη ακτινοβολία. Σαν αποτέλεσμα, το χρώμα αλλάζει μετά από μια

χρονική περίοδο από το φυσικό καφέ σε ένα φαιό φθαρμένο χρώμα όταν εκτίθεται απευθείας στο ηλιακό φως (Σχήμα 13).

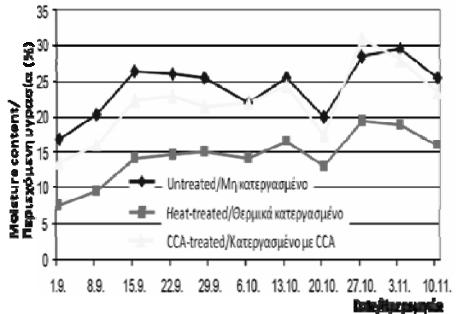
Η υπεριώδης ακτινοβολία προκαλεί επιφανειακές ρωγμές στο θερμικά τροποποιημένο ξύλο αν δεν επικαλύψει με κάποιο προστατευτικό. Τα επίπεδα των επιφανειακών ρωγμών στο θερμικά τροποποιημένο ξύλο έδειξαν σημάδια βελτίωσης όταν εφαρμόστηκαν υψηλότερες θερμοκρασίες κατεργασίας.

Το θερμικά τροποποιημένο ξύλο παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή στη φυσική φθορά. Δείγματα που είχαν κατεργαστεί στους 225°C για 6 ώρες είχαν περίπου τη μισή υγρασία από μη κατεργασμένο ξύλο (Σχήμα 14). Αυτή η διαφορά παραμένει και ύστερα από πέντε χρόνια έκθεσης στις καιρικές συνθήκες (Mayes και Oksanen 2002).



Σχήμα 13. Επίδραση της θερμοκρασίας της θερμικής κατεργασίας στην αλλαγή χρώματος εξαιτίας της εξωτερικής έκθεσης. Πεύκη, χρόνος κατεργασίας 3 ώρες (πηγή: VTT).

Figure 13. The effect of heat treatment temperature on colour changes due to outdoor exposure. Pine, treatment time 3 hours (source: VTT).



Σχήμα 14. Περιεχόμενη υγρασία πλανισμένης ξυλείας πεύκης κατά την έκθεση στους φυσικούς παράγοντες, 1994 (πηγή: VTT).

Figure 14. The moisture content of planed pine panels during natural exposure, 1994 (source: VTT)

### Δασοπονικά είδη που χρησιμοποιούνται

Τα κυριότερα είδη που χρησιμοποιούνται στη θερμική τροποποίηση του ξύλου είναι η δασική πεύκη (*Pinus sylvestris*), η ερυθρελάτη (*Picea abies*), η σημύδα (*Betula verrucosa/pubescens*) και η λεύκη (*Populus tremula*). Εκτός από αυτά, και διάφορα άλλα είδη τροποποιούνται θερμικά, ορισμένα από τα οποία είναι η ακτινωτή πεύκη (*Pinus radiata*), ο φράξος (*Fraxinus excelsior*), λάρικα (*Larix sibirica*), η κλήθρα (*Alnus glutinosa*), η οξιά (*Fagus silvatica*) και ο ευκάλυπτος (*Eucalyptus sp.*). Η διαδικασία της θερμικής τροποποίησης διαφέρει στο κάθε είδος και το τελικό αποτέλεσμα είναι διαφορετικό λόγω της διαφορετικής χημικής σύστασης και κυνταρικής δομής.

Η ποιότητα του ξύλου το οποίο πρόκειται να τροποποιηθεί θερμικά πρέπει να είναι καλή. Οι ρόζοι αποτελούν πρόβλημα αν ξηραθούν και αποκολλώνται ή σπάζουν. Επίσης ξύλο προσβεβλημένο από σήψη μπορεί να προκαλέσει χρωματικές διαφορές μετά την κατεργασία. Το τελικό αποτέλεσμα επίσης εξαρτάται από τον τρόπο που θα κοπεί ο κορμός. Η συμβατική κοπή μπορεί να προκαλέσει αποκόλληση των ετησίων δακτυλίων. Άν το ξύλο κοπεί έτσι ώστε οι ετήσιοι δακτύλιοι να είναι τουλάχιστον σε γωνία 45° με την επιφάνεια, η παραμόρφωση θα είναι μικρότερη, η σκληρότητα της επιφάνειας θα είναι μεγαλύτερη και η γενική όψη μετά τη θερμική τροποποίηση καλύτερη (Syrjänen και Oy 2001).

## **Εφαρμογές**

Τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά του θερμικά τροποποιημένου ξύλου προσφέρουν στη βιομηχανία προϊόντων ξύλου πολλές πιθανές και ελκυστικές νέες ευκαιρίες. Η σημαντικότερη ιδιότητα σε σύγκριση με το μη τροποποιημένο ξύλο είναι ότι το ισοδύναμο υγρασίας του θερμικά τροποποιημένου ξύλου μειώνεται και σαν αποτέλεσμα η ρίκνωση και η διόγκωση του ξύλου επίσης μειώνονται. Είδη ξύλου χωρίς ιδιαίτερη εμπορική αξία μπορούν να τροποποιηθούν θερμικά και με αυτό τον τρόπο να βρεθούν νέες χρήσεις για αυτά τα είδη.

Η θερμικά τροποποιημένη πεύκη και ερυθρελάτη χρησιμοποιείται κυρίως σε εξωτερικές κατασκευές, για παράδειγμα έπιπλα κήπων, παράθυρα, πόρτες και σανίδωμα για τοίχους ή φράχτες. Όταν είναι επιθυμητή μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στους κλιματικούς παράγοντες και τη σήψη, οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία θερμικής τροποποίησης πρέπει να είναι μεγαλύτερες από 200°C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες η μηχανική αντοχή μειώνεται. Παρόλο που η ανθεκτικότητα σε σήψη βελτιώνεται όταν το ξύλο κατεργάζεται ισχυρά, δεν συνίσταται η χρήση του θερμικά τροποποιημένου ξύλου σε επαφή με το έδαφος.

Η θερμικά τροποποιημένη σημύδα και λεύκη χρησιμοποιείται σε εσωτερικούς χώρους, με σημαντικότερη ιδιότητα τη διαστασιακή σταθερότητα, αλλά επίσης και τις πολύ όμορφες και ρυθμιζόμενες αποχρώσεις χρωμάτων που ποικίλουν από ανοιχτό καφέ έως σχεδόν μαύρο. Για εσωτερική χρήση οι θερμοκρασίες κατεργασίας είναι κάτω από τους 200°C. Η σημύδα και η λεύκη χρησιμοποιούνται για έπιπλα, έπιπλα κουζίνας, παρκέτα, ξύλινες επενδύσεις και επίπλωση σάουνας (Syijänen και Oy 2001).

## **Συμπεράσματα**

Το θερμικά τροποποιημένο ξύλο παράγεται σε βιομηχανικό επίπεδο στην Ευρώπη εδώ και περίπου μια δεκαετία. Αυτό το προϊόν αποκτά μεγαλύτερη ανθεκτικότητα από το μη κατεργασμένο ξύλο. Επιπλέον μπορεί το χρώμα του ξύλου να επηρεαστεί κατά την κατεργασία και να επιτευχθεί το επιθυμητό οπτικό αποτέλεσμα. Συνεχώς εμφανίζονται νέες αγορές για εσωτερική και εξωτερική χρήση. Το θερμικά τροποποιημένο ξύλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάσταση διαφόρων τροπικών πλατυφύλλων ειδών από φθηνότερα κοινά είδη (π.χ. οξιά, φλαμουριά, δρυς, ελάτη). Έτσι δίνεται η δυνατότητα ευρύτερης εφαρμογής και μεγαλύτερων πωλήσεων (Listmann και Ohnesorge 2006).

Ως μειονέκτημα μπορεί να αναφερθεί το υψηλό κόστος του που προκύπτει σαν αποτέλεσμα του σχετικά υψηλού κόστους παραγωγής. Ιδιαίτερα σημαντικό θέμα θεωρείται η ανάπτυξη νέων οικονομικότερων μεθόδων με μικρότερο ενεργειακό κόστος, με έμφαση όμως στο ερώτημα αν αυτές αποφέρουν τις ίδιες ιδιότητες στο ξύλο με τις προηγούμενες.

Τέλος, μεγάλο πλεονέκτημα της διαδικασίας της θερμικής κατεργασίας του ξύλου αποτελεί η φυλικότητα προς το περιβάλλον, καθώς στη διαδικασία καμία πρόσθετη χημική ουσία δε χρησιμοποιείται, ενώ η όποια αύξηση της ανθεκτικότητας του ξύλου προέρχεται μόνο από την τροποποίηση της δομής του κυτταρικού τοιχώματος (Brooks 2006).

## **Βιβλιογραφία**

- Brooks, D., 2006. Thermal modification adds value to wood and conceals blue stain – Link, Vol. 8, No. 1: 15.
- Funaoaka, M., Kako, T., ja Abe, I., 1990. Condensation of lignin during heating of wood, Wood Sci. Technol., 24:277-288.
- Homan, W., Tjeerdsma, B., Beckers, E., Jorissen, A., 2000. Structural and other properties of modified wood. Congress WCTE, Whistler, Canada.
- Jämsä, S., Viitaniemi, P., 1998. Heat treatment of wood in Finland - state of the art. Heat treatment of wood - Better durability without chemicals. Technical Research Centre of Finland Building Technology.
- Listmann, C., Ohnesorge, D., 2006. Wood properties of thermal treated timber. Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft – Jahresbericht 2005/2006. p. 49-50.

Mayes and Oksanen, 2002. ThermoWood® Handbook. Finnish Thermowood Association, Helsinki, Finland.

Metsä-Kortelainen, S., 2006. Thermally Modified Timber as Durable Wood for Exterior Applications – Background and Properties. VTT Technical Research Center of Finland.

Militz, H., Tjeerdsma, B., 2000. Heat treatment of wood by the Plato-process: Proceedings of Seminar “Production and development of heat treated wood in Europe”, Nov. 2000, Helsinki, Stokholm, Oslo.

Mohebby, B., Sanaei, I., 2005. Influences of the hydro-thermal treatment on physical properties of beech wood (*Fagus orientalis*). The international research group on wood protection. Section 4: Processes and properties. Paper prepared for 36<sup>th</sup> Annual Meeting, Bangalore, India, 24-28 April 2005.

Ohlmeyer, M., Lukowsky, D., 2004. Wood-Based Panels produced from Thermal Treated Material: Properties and Perspectives. In: Proc. \_Wood frame housing durability and disaster issues conference\_, Las Vegas, 04.-06.10.2004. Madison: Forest Products Society 2005, p. 127-131.

Syrjänen, T., Oy, K., 2001. Production and classification of heat treated wood in Finland, Review on heat treatments of wood. In: Proceedings of the special seminars held in Antibes, France, 2001.

Tjeerdsma, B., 2006. Heat treatment of wood - thermal modification -. SHR Timber Research, Wageningen, The Netherlands.

### **The thermal modification of wood**

#### **Nikopoulos Fotios, Barboutis Ioannis**

Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Forestry and Natural Environment

Laboratory of wood technology, 54124 Thessaloniki

Email: fotis\_nikopoulos@yahoo.gr, jbarb@for.auth.gr

#### **Abstract**

Recently, a great interest appeared, from the wood industries, for the development of a new product named thermal modified wood. The main characteristic of this product is that the wooden cell walls are exclusively modified by high temperature treatment, without any additional chemical components. A significant benefit of this product is the improved durability of wood against biological degradation and its decreased hygroscopicity. Additionally, the wood color can be affected by this treatment achieving a better appearance. Thermal modified wood is mainly used in both internal and external places with high moisture. The decreased mechanical strength and the high cost demanded for the production are significant disadvantages of this product. The research is concentrated on the improvement of wood properties, the suitability of various wood species for this product and the cost reduction during the production process.

**Key words:** thermal modified wood, properties, applications.