

ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΙΓΝΟΚΥΤΤΑΡΙΝΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΟ ΛΕΒΗΤΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ & ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

Θ. Μπαλωμένος^{1,*},  **Γ. Νταλός¹, Κ. Κατσούλης², Δ. Κουτσιανίτης¹, Α. Μητάνη¹, Κ. Νινίκας¹**

¹Τμήμα Δασολογίας, Επιστημών Ξύλου & Σχεδιασμού, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Καρδίτσα, Ελλάδα

²Τμήμα Κτηνιατρικής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Καρδίτσα, Ελλάδα

(*tbalomenos@uth.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τεχνικές προεπεξεργασίας του καύσιμου υλικού λιγνοκυτταρινικής βιομάζας, μεμονωμένα αλλά και σωρευτικά, επιχειρούν την αναβάθμιση των ιδιοτήτων της καύσιμης ύλης, τον περιορισμό της παραγόμενης ποσότητας τέφρας, την τροποποίηση τη σύσταση της, την αύξηση των θερμοκρασιών τήξης της, με στόχο την αποφυγή του φαινομένου της εναπόθεσης της με όλα τα συνεπακόλουθα προβλήματα. Η κοσκίνιση, η έκπλυση αλλά και ο προσθετικός συνδυασμός τους δημιουργεί τις προηγούμενες συνθήκες, ωστόσο, περαιτέρω μελέτη με χρήση πρόσθετων υλικών αναμένεται να βελτιστοποιήσει τη θερμοχημική μετατροπή της εν λόγω βιομάζας.

Δείγματα λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας, διαφορετικής σύστασης, λήφθηκαν από εν λειτουργία μονάδα συμπαράγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού με καύση βιομάζας, εγκατεστημένης ισχύος 1 MW, στη Δυτική Μακεδονία, και μελετήθηκαν προκειμένου να προταθούν επιστημονικά και τεχνικά εφαρμόσιμες λύσεις περιορισμού του φαινομένου εναπόθεσης τέφρας στις λειτουργικές επιφάνειες του λέβητα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Κοσκίνιση, έκπλυση, πρόσθετα, εναπόθεση-σύντηξη τέφρας, διάβρωση

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα τον 21ο αιώνα. Η ανάγκη για καθαρή ενέργεια είναι εξίσου σημαντική με την ανάγκη για αποτελεσματικές μεθόδους επεξεργασίας και διάθεσης μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων, τα οποία αποτελούν απειλή για την ποιότητα του περιβάλλοντος, παρά το γεγονός ότι πρόκειται για σημαντικούς ανανεώσιμους πόρους ενέργειας^[1]. Οι εξελίξεις των τελευταίων δεκαετιών έχουν βελτιώσει σημαντικά τις διαδικασίες μετατροπής, οδηγώντας σε πιο πράσινες λύσεις, αλλά υπάρχουν ακόμη πεδία που πρέπει να μελετηθούν και να εφαρμοστούν στην πράξη. Το κλείσιμο του κύκλου ανάκτησης απορριμμάτων βιομάζας είναι απαραίτητο για την επίτευξη μιας πραγματικά κυκλικής βιοοικονομίας^[2-4].

Η βιομάζα είναι ευρέως αναγνωρισμένη ως άφθονη και εύκολα προσβάσιμη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Σε αντίθεση με πολλές άλλες ανανεώσιμες πηγές, η βιομάζα προσφέρει σταθερή και προβλέψιμη παραγωγή ενέργειας χωρίς σημαντικές ανησυχίες για τις ενεργειακές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η παραγωγή ενέργειας μέσω της καύσης στερεών βιοκαυσίμων είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία για τη μετατροπή βιομάζας σε άμεση θερμική και έμμεση ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, η τέφρα, ως προϊόν καύσης, προκαλεί προβλήματα λειτουργικότητας της εγκατάστασης. Ανάλογα με την προέλευση και τα χημικά χαρακτηριστικά της βιομάζας, την τεχνολογία και τις συνθήκες καύσης, καθώς και τη θερμοκρασία τήξης της τέφρας, δυνητικά σχηματίζονται πυροσυσσωματώσεις και σκωρίες, με αρνητικό αποτέλεσμα τη ρύπανση και τη διάβρωση των τοιχωμάτων και των εξαρτημάτων του λέβητα, που οδηγεί στη μείωση του βαθμού

απόδοσης της μονάδας, στην απώλεια εργατωρών και παραγωγής ενέργειας αλλά και στη φθορά του μηχανολογικού εξοπλισμού^[5-10].

Σκοπός της εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της προεπεξεργασίας βιομάζας -μέσω της κοσκίνισης, έκπλυσης και του προσθετικού συνδυασμού τους- για την αναβάθμιση των ιδιοτήτων της, ώστε να περιοριστούν τα φαινόμενα σκωρίασης και διάβρωσης εντός του λέβητα.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οκτώ διαφορετικά δείγματα λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας (πίνακας 1), διαφορετικής χωρικής προέλευσης, λήφθηκαν^[11] σε συνθήκες περιβάλλοντος ($T_{\text{περ.}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=48\%$), από εν λειτουργία μονάδα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού υψηλής απόδοσης (ΣΗΘΥΑ) με καύση βιομάζας, εγκατεστημένης ισχύος 1 MW, στη Δυτική Μακεδονία. Τα υλικά των δειγμάτων αποτελούν τους κύριους πόρους καύσης για τη λειτουργία της συγκεκριμένης μονάδας ΣΗΘΥΑ.

Πίνακας 1. Τυποποίηση και περιγραφή δειγμάτων.

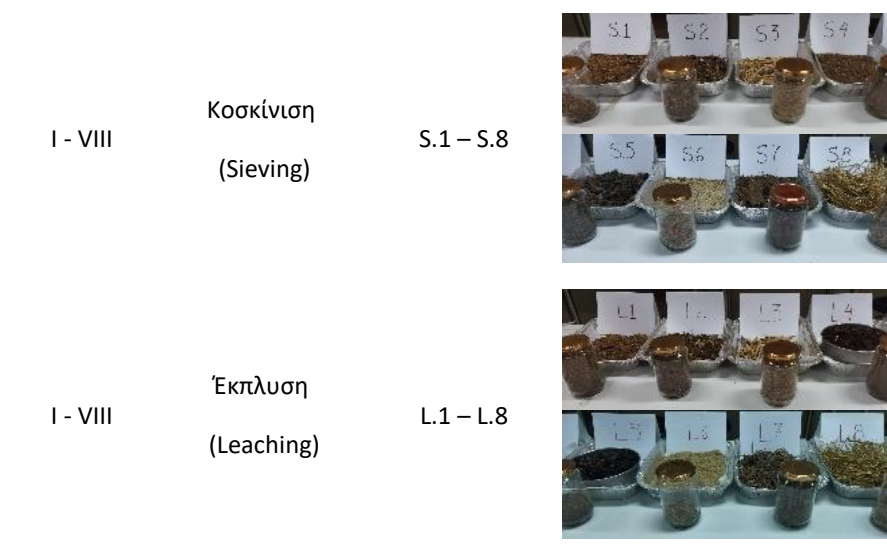
Δείγμα	Είδος καύσιμης βιομάζας
I	Δασικά υπολείμματα
II	Υπολείμματα παραγωγής μοριοσανίδων και ινοσανίδων Alfa Wood
III	Σπασμένη παλέτα & wood chips
IV	Ρίζες δέντρων & κλαδέματα
V	Επεξεργασμένη βιομάζα
VI	Πριονίδι και θρυμματισμένο ξύλο
VII	Μίγμα βιομάζας
VIII	Άχυρο δημητριακών

Τα αρχικά δείγματα (R.1-R.8) υποβλήθηκαν σε προεπεξεργασία κοσκίνισης, για 3 min, μέσω κόσκινου 2mm. Τα υπολείμματα από την κοσκίνιση απορρίφθηκαν, ενώ τα εναπομείναντα δείγματα (S.1-S.8) υποβλήθηκαν σε προεπεξεργασία έκπλυσης με απιονισμένο νερό θερμοκρασίας 20 °C, εντός λουτρού όγκου 5 l, για 3 min υπό ανάδευση και στη συνέχεια αποστράγγιση για 12 h και ξήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 120 h (L.1 – L.8). Ακολούθως, όλα τα δείγματα υπέστησαν τεμαχισμό σε σφυρόμυλο βιομάζας, μέσω κόσκινου 8 mm, και άλεση σε μύλο για την παραγωγή σκόνης διαμέτρου 1 mm^[12].

Πίνακας 2. Προ-επεξεργασία και τυποποίηση δειγμάτων.

Δείγμα	Προ-επεξεργασία	Τυποποίηση
I - VIII	Ακατέργαστο υλικό (Raw material)	R.1 – R.8





Ποσότητες όλων των δειγμάτων, βάρους 1g περίπου, ζυγίστηκαν με τη βοήθεια ηλεκτρονικού ζυγού ακρίβειας 4 δεκαδικών, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσεγγιστική τους ανάλυση.

Πίνακας 3. Πρότυπα ^[11-15] και συσκευές επεξεργασίας και μετρήσεων

Πρότυπο (EN ISO)	Περιγραφή	Συσκευές επεξεργασίας και μετρήσεων
18135:2017	Στερεά βιοκαύσιμα — Δειγματοληψία	Χειρωνακτικά
14780:2017	Στερεά βιοκαύσιμα — Προετοιμασία δείγματος	Κοσκίνισης FRITSCH analysette 3 Σφυρόμυλος βιομάζας 8 mm Μύλος άλεσης CULATTI Ηλεκτρονικός Ζυγός SALTER-AND ER 180
18134-3:2023	Στερεά βιοκαύσιμα — Προσδιορισμός περιεχόμενης υγρασίας. Μέρος 3: Υγρασία στο δείγμα γενικής ανάλυσης	Κλίβανος ξήρανσης MEMMERT Ξηραντήρας εργαστηρίου Ηλεκτρονικός ζυγός
18122:2022	Στερεά βιοκαύσιμα – Προσδιορισμός περιεχομένης τέφρας	Πυριαντήριο PROTHERM Ξηραντήρας εργαστηρίου Ηλεκτρονικός ζυγός
18125:2017	Στερεά βιοκαύσιμα – Προσδιορισμός θερμογόνου δύναμης	Θερμιδόμετρο οβίδας SUNDY SDC 313

Με βάση τα πρότυπα του Πίνακα 3, προσδιορίστηκαν τα ποσοστά της περιεχόμενης υγρασίας και τέφρας των δειγμάτων σε ξηρή βάση (dry basis, db), με όριο επαναληψιμότητας $\leq 2\%$, καθώς και η θερμιδική τους αξία, με όριο επαναληψιμότητας $\leq 33,5$ cal/g (Πίνακας 4, 5, 6).

Πίνακας 4. Προσεγγιστική ανάλυση [% Wt, dry basis (db)] και θερμογόνος δύναμη δειγμάτων L [GCV, dry basis (db)].

Δείγμα	R.1	R.2	R.3	R.4	R.5	R.6	R.7	R.8
Υγρασία (% Wt)^{db}	12,69	7,69	6,95	22,20	8,04	6,68	12,88	8,13
Τέφρα (% Wt)^{db}	20,60	11,41	8,42	28,69	18,81	5,08	7,52	11,00
Ακαθάριστη Θερμογόνος Δύναμη (Kcal/g)^{db}	4479	4266	4587	4184	4124	4742	4673	4304

Πίνακας 5. Προσεγγιστική ανάλυση [% Wt, dry basis (db)] και θερμογόνος δύναμη δειγμάτων L [GCV, dry basis (db)].

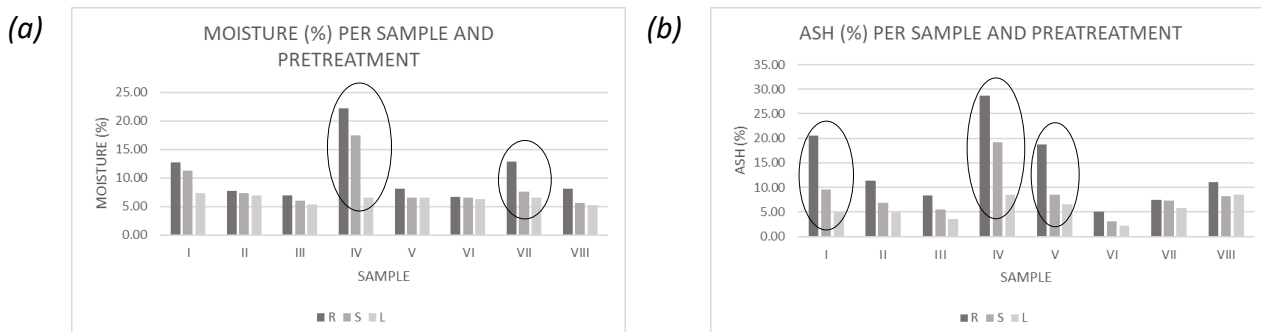
Δείγμα	S.1	S.2	S.3	S.4	S.5	S.6	S.7	S.8
Υγρασία (% Wt) ^{db}	11,24	7,26	6,04	17,42	6,58	6,48	7,54	5,65
Τέφρα (% Wt) ^{db}	9,60	6,81	5,53	19,25	8,57	3,17	7,30	8,28
Ακαθάριστη Θερμογόνος Δύναμη (Kcal/g) ^{db}	4595	4605	4489	3655	4492	4758	4535	4108

Πίνακας 6. Προσεγγιστική ανάλυση [% Wt, dry basis (db)] και θερμογόνος δύναμη δειγμάτων L [GCV, dry basis (db)].

Δείγμα	L.1	L.2	L.3	L.4	L.5	L.6	L.7	L.8
Υγρασία (% Wt) ^{db}	7,33	6,94	5,27	6,57	6,49	6,19	6,47	5,14
Τέφρα (% Wt) ^{db}	4,91	4,95	3,49	8,55	6,56	2,16	5,82	8,54
Ακαθάριστη Θερμογόνος Δύναμη (Kcal/g) ^{db}	3870	4563	4301	4580	4561	4517	4380	4227

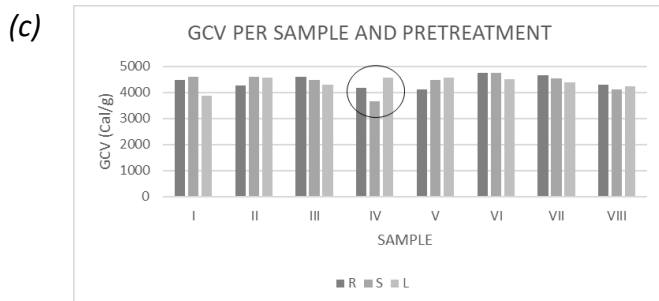
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δειγμάτων, για κάθε προεπεξεργασία καύσιμης βιομάζας, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 1(α) το ποσοστό υγρασίας των δειγμάτων, μετά τις προ επεξεργασίες κοσκίνισης (S) και έκπλυσης (L), εμφανίζει αισθητή μείωση έναντι των δειγμάτων των αρχικών υλικών (R). Αξιοσημείωτη είναι η βελτίωση του δείγματος IV - χαρακτηρισμένο ως ρίζες δέντρων και κλαδέματα- όπου η περιεχόμενη υγρασία 22,2% του αρχικού υλικού μειώθηκε σε 17,42%, λόγω κοσκίνισης και απόρριψης υγρών ανόργανων υλικών. Επιπλέον, για το ίδιο δείγμα, η προεπεξεργασία της έκπλυσης δείχνει ευεργετική ως προς το ποσοστό υγρασίας, διότι μετά την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων, προς καύση, υλών και την περαιτέρω φυσική ξήρανση του βελτιώνει το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας. Παρόμοια εικόνα εμφανίζεται στο δείγμα VII - χαρακτηρισμένο ως μίγμα βιομάζας- πιθανά λόγω υποβαθμισμένης αρχικής καύσιμης ύλης και τη βελτίωση της ιδιότητας της μετά την προεπεξεργασία της κοσκίνισης και της έκπλυσης.

**Σχήμα 1.** Υγρασία (Wt % ^{db}) και Τέφρα (Wt % ^{db}), ανά δείγμα και προεπεξεργασία.

Σημαντική είναι η μείωση του ποσοστού της περιεχόμενης τέφρας [Σχήμα 2 (b)] σχεδόν σε όλα τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε κοσκίνιση και έκπλυση, επιβεβαιώνοντας έτσι την ανομοιογένεια των υλικών των δειγμάτων αλλά και την πρόσμιξη τους με ανόργανα υλικά. Χαρακτηριστικές είναι

οι περιπτώσεις των δειγμάτων I, IV και V -χαρακτηρισμένα ως δασικά υπολείμματα, ρίζες δέντρων & κλαδέματα και επεξεργασμένη βιομάζα, αντίστοιχα- όπου εμφανίζουν ιδιαίτερα μειωμένη περιεκτικότητα σε τέφρα λόγω της απομάκρυνσης των άκαυστων ανόργανων υλών. Τα τελευταία ευθύνονται για την ατελή καύση εντός του θαλάμου, για την επιφόρτιση της εστίας κινούμενων σχαρών και γενικότερα για τη διαχείριση της ιπτάμενης τέφρας και της τέφρας πυθμένα.



Σχήμα 2. Ακαθάριστη θερμογόνο δύναμη (Cal/g), ανά δείγμα και προεπεξεργασία.

Η ακαθάριστη θερμογόνο δύναμη των δειγμάτων κυμάνθηκε από $3,65 \div 4,75$ Kcal/g, η οποία συμφωνεί με την επιστημονική βιβλιογραφία [16-20]. Οι τιμές των μετρήσεων κάνουν διακριτή την ετερογένεια της καύσιμης ύλης όπου διαφορετικά υλικά εμφανίζουν παρόμοιο θερμιδικό περιεχόμενο ή καύσιμα υλικά υποβαθμισμένης ποιότητας έχουν αυξημένες θερμιδικές τιμές, πιθανά, λόγω προσμίξεων με τεχνητά οργανικά υλικά. Ωστόσο, βελτιωμένη παρουσιάζεται η τάση των τιμών του μετρούμενου μεγέθους μετά την κοσκίνιση και την έκπλυση. Αυτό οφείλεται στην απομάκρυνση των άκαυστων ανόργανων υλών και στην επίτευξη καθαρότερου και περισσότερο ομογενούς καύσιμου υλικού, ανά μονάδα μάζας.

Συμπερασματικά, η προεπεξεργασία της λιγνοκυτταρινικής βιομάζας, με κοσκίνιση και έκπλυση, βελτιώνει σημαντικά τις ιδιότητες της. Η καθαρότερη βιομάζα συμβάλει σημαντικά και στην αύξηση της θερμογόνο δύναμης ανά μονάδα μάζας λόγω της απομάκρυνσης των περιεχόμενων άκαυστων ανόργανων υλικών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια εκπόνησης διδακτορικής διατριβής και αποτελεί μέρος της, με σκοπό την προ-ανακοίνωση των αποτελεσμάτων της. Οι συγγραφείς θα ήθελαν να αναγνωρίσουν την υποστήριξη των μελών του Ινστιτούτου Ξύλου, Επίπλου & Ξύλινης Συσκευασίας και του ερευνητικού προσωπικού του Εργαστηρίου Τεχνολογίας & Ποιοτικού Ελέγχου Επίπλων και Ξυλοκατασκευών του τμήματος Δασολογίας Επιστημών Ξύλου και Σχεδιασμού του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τα πολύτιμα σχόλια τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Balomenos T., Dalos G., Mitani A., Koutsianitis D., Ninikas K., (2023). 'Comparative study of methods and technologies for the removal, capture, use and storage of carbon dioxide (CO₂), for the mitigation of climate change.', παρουσιάστηκε στο 21st Panhellenic Forestry Conference, Hellenic Forestry Society (H.F.S), σσ. 426–435.
- [2] K. Calvin κ.ά., 'IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.'
- [3] K. Calvin κ.ά., (2021) 'Bioenergy for climate change mitigation: Scale and sustainability', *GCB Bioenergy*, τ. 13, τχ. 9, σσ. 1346–1371.

- [4] M. Casau, M. F. Dias, J. C. O. Matias, και L. J. R. Nunes, (2022). 'Residual Biomass: A Comprehensive Review on the Importance, Uses and Potential in a Circular Bioeconomy Approach', *Resources*, τ. 11, τχ. 4.
- [5] H. Ghazidin κ.ά., (2023) 'A comprehensive evaluation of slagging and fouling indicators for solid fuel combustion', *Thermal Science and Engineering Progress*, τ. 40, σ. 101769.
- [6] J. Lachman, M. Baláš, M. Lisý, H. Lisá, P. Milčák, και P. Elbl, (2021). 'An overview of slagging and fouling indicators and their applicability to biomass fuels', *Fuel Processing Technology*, τ. 217, σ. 106804.
- [7] Y. Niu, Y. Zhu, H. Tan, S. Hui, Z. Jing, και W. Xu, (2014). 'Investigations on biomass slagging in utility boiler: Criterion numbers and slagging growth mechanisms', *Fuel Processing Technology*, τ. 128, σσ. 499–508.
- [8] C. Chen, Y. Bi, Y. Huang, και H. Huang, (2021). 'Review on slagging evaluation methods of biomass fuel combustion', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, τ. 155, σ. 105082.
- [9] Z. Ge κ.ά., (2022) 'The sintering analysis of biomass waste ash based on the in-situ exploration and thermal chemical calculation in the gasification process', *Combustion and Flame*, τ. 245, σ. 112381.
- [10] J. L. Míguez, J. Porteiro, F. Behrendt, D. Blanco, D. Patiño, και A. Dieguez-Alonso, (2021). 'Review of the use of additives to mitigate operational problems associated with the combustion of biomass with high content in ash-forming species', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τ. 141, σ. 110502.
- [11] *BS EN ISO 18135:2017, Solid Biofuels — Sampling.*
- [12] *BS EN ISO 14780:2017+A1:2019, Solid biofuels — Sample preparation.*
- [13] *BS EN ISO 18134-3:2023, Solid biofuels — Determination of moisture content — Part 3: Moisture in general analysis sample.*
- [14] *BS EN ISO 18122:2022, Solid biofuels - Determination of ash content.*
- [15] *BS EN ISO 18125:2017, Solid biofuels - Determination of calorific value.*
- [16] L. J. R. Nunes, J. C. O. Matias, και J. P. S. Catalão, (2016). 'Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τ. 53, σσ. 235–242.
- [17] C. de F. F. Carraro, A. C. Martins, A. C. da S. Faria, και C. C. A. Loures, (2020). 'Agroenergy from Residual Biomass: Energy Perspective', στο *Biotechnological Applications of Biomass*, T. P. Basso, T. O. Basso, και L. C. Basso, Επιμ., Rijeka: IntechOpen.
- [18] B. M. Jenkins, L. L. Baxter, T. R. Miles, και T. R. Miles, (1998). 'Combustion properties of biomass', *Fuel Processing Technology*, τ. 54, τχ. 1, σσ. 17–46.
- [19] R. García, C. Pizarro, A. Álvarez, A. G. Lavín, και J. L. Bueno, (2015). 'Study of biomass combustion wastes', *Fuel*, τ. 148, σσ. 152–159.
- [20] I. Gravalos, P. Xyradakis, D. Kateris, T. Gialamas, D. Bartzialis, και K. Giannoulis, (2016). 'An Experimental Determination of Gross Calorific Value of Different Agroforestry Species and Bio-Based Industry Residues', *Natural Resources*, τ. 07, σσ. 57–68.