

Ενεργειακή αξιοποίηση παλαιάς και απορριπτόμενης ξυλείας.

των **Περίληψη.**

Εμμ. Κακαρά,
αναστ. καθηγητή
Τμ. Μηχ/γων
Μηχ/ων ΕΜΠ
Παν. Βουρλιώτη,
διδακτ. Μηχ/γου
Μηχ/κού ΕΜΠ
Παν. Γραμμέλη,
διπλ. Μηχ/γου
Μηχ/κού ΕΜΠ

Στην εισήγηση αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών συνδυασμένης καύσης απορριπτόμενης ξυλείας και λιγνίτη σε ατμοπαραγωγό, ισχύος 13.8 MW_{th}. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, μετρήθηκαν η συγκέντρωση O₂ στο καυσαέριο και οι εκπομπές CO, SO₂ και NO, ενώ καταγράφηκαν τα λειτουργικά στοιχεία της εγκατάστασης και συλλέχθησαν δείγματα τέφρας. Με βάση τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, ακολούθησε μακρόχρονη δοκιμή καύσης του βέλτιστου μίγματος στον ατμοπαραγωγό, το οποίο αποτελείται από υπολείμματα ινοσανίδων (MDF), λιγνίτη και φυσική ξυλεία. Η μέτρηση των εκπεμπόμενων ρύπων καθώς και ο έλεγχος των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας για το σχηματισμό επικαθίσεων τέφρας, απέδειξαν ότι, κατά τη συστηματική καύση του μίγματος, δεν θα χρειασθεί επιπρόσθετο κόστος, τόσο για τον καθαρισμό των καυσαερίων όσο και για τη συντήρηση του μηχανολογικού εξοπλισμού του ατμοπαραγωγού.

Λέξεις κλειδιά: απορριπτόμενη ξυλεία, συνδυασμένη καύση, ατμοπαραγωγός κινητής κλιμακωτής εσχάρας.

1. Εισαγωγή.

Ως "απορριπτόμενη ξυλεία", ορίζεται κάθε προϊόν ξυλείας που έχει χρησιμοποιηθεί εμπορικά, τουλάχιστον, μια φορά και παραμένει ως απόβλητο για απόθεση ή ανακύκλωση / επαναχρησιμοποίηση. Αποτελείται, κυρίως, από κατάλοιπα της βιομηχανίας ξύλου, ρηπασμένη ξυλεία κατεδαφίσεως, παλαιά ή κατεστραμμένα έπιπλα, κουτιά και παλέτες, ξυλεία που βρίσκεται σε στερεά απόβλητα, παλαιούς στύλους της ΔΕΗ και τραβέρσες [1]. Κάθε είδος απορριπτόμενης ξυλείας, έχει επεξεργαστεί με διαφορετικές μηχανικές και χημικές διεργασίες.

Έτσι, οι πρακτικές διάθεσης ή ανακύκλωσής της, παρουσιάζουν διάφορους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ποσότητες απορριπτόμενης ξυλείας είναι σημαντικές στην Ευρώπη [2], [3], η απόθεσή τους παραμένει ένα σημαντικό πρόβλημα. Ειδικά για την Ελλάδα, εκτιμάται ότι, οι διαθέσιμες ποσότητες ετησίως, είναι: (α) 1.070.000 m³/έτος (~ 640.000 ton/ έτος), με προέλευση από την απορριπτόμενη ξυλεία και (β) 4.3 10⁶ tons (ξηρού υλικού), που προέρχονται από δασικές εκτάσεις, υπολείμματα δασικής ξυλείας και υλοτομίας [4]. Κατ' αυτό τον τρόπο, ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί τα τελευταία χρόνια, είτε στην ανάκτηση υλικών από απόβλητα ή στην ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων. Συγκεκριμένα, η απορριπτόμενη ξυλεία, μπορεί να ανακυκλωθεί θερμικά σε έναν κλιβανο καύσης απορριμάτων ή σε βιομηχανικούς λέβητες, υποκαθιστώντας ένα μέρος των συμβατικών καυσίμων. Η τελευταία εφαρμογή είναι μια ιδιαίτερα οικονομικά ελκυστική λύση για την ενεργειακή εκμετάλλευση μεγάλων ποσοτήτων απορριπτόμενης ξυλείας, προσφέροντας παράλληλα, αρκετά περιβαλλοντικά ωφέλη, όπως είναι η μείωση των εκπομπών CO₂ και πιθανά οικονομικά κέρδη από την ελαχιστοποίηση της ανάγκης απόθεσης των αποβλήτων, ταυτόχρονα με τη μείωση της κατανάλωσης εισαγόμενων καυσίμων.

Στα πλαίσια της παραπάνω ανάλυσης, διερευνήθηκαν οι προσπάθειες της θερμικής ανακύκλωσης απορριπτόμενης ξυλείας, σε συνδυασμό με στερεά συμβατικά καύσιμα. Τα αποτελέσματα από την συνδυασμένη καύση διαφόρων ειδών απορριπτόμενης ξυλείας με λιγνίτη Πτολεμαΐδας σε έναν ατμοπαραγωγό βιομηχανικής κλίμακας, παρουσιάζονται στην εισήγηση. Η εγκατάσταση ανήκει στη βιομηχανία παρα-

γωγής ινοσανίδων 'MDF' της εταιρίας Πίνδος Α.Ε., που βρίσκεται στη Β.Δ. Ελλάδα. Κύριος στόχος των πειραμάτων, ήταν να αποδειχθεί ότι τα ήδη υπάρχοντα συστήματα καύσης με κινούμενη εσχάρα, που βρίσκονται κυρίως στη Ν.Α. Ευρώπη, μπορούν να ανακυκλώσουν θερμικά απορριπτόμενη ξυλεία, σε συνδυασμό με υπάρχοντα τοπικά καύσιμα, σε ένα σημαντικό ποσοστό στο καύσιμο μίγμα.

Κατά την διάρκεια των δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω:

(α) διερεύνηση της λειτουργίας του ατμοπαραγωγού κατά την συνδυασμένη καύση απορριπτόμενης ξυλείας με λιγνίτη χαμηλής ποιότητας,

(β) προσδιορισμός των εκπομπών CO, SO₂, NO, διοξινίων και φουρανίων (PCDD/F) και βαρέων μετάλλων,

(γ) σύγκριση των εκπομπών αυτών με εκείνες της συνδυασμένης καύσης φυσικής ξυλείας και λιγνίτη, και

(δ) συσχετισμός των εκπομπών αερίων ρύπων, με τις ιδιότητες των καυσίμων μιγμάτων.

2. Περιγραφή εγκατάστασης.

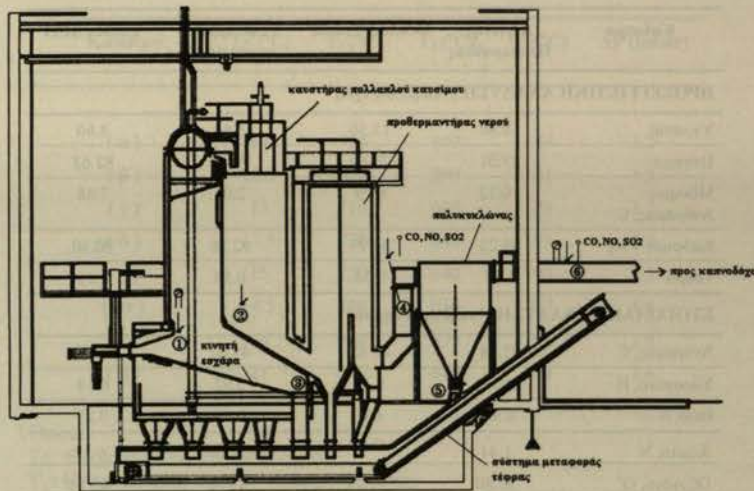
Ο ατμοπαραγωγός έχει συνολική προσδιδόμενη θερμική ισχύ 13,8 MW_{th} και παράγει ατμό 16 ton/h πίεσης 21 bar. Αποτελείται από δύο θαλάμους καύσης, τον προθερμαντήρα νερού, τον πολυκυκλώνα και το σύστημα αποκομιδής και απομάκρυνσης της τέφρας (Σχήμα 1). Ο πρώτος θάλαμος καύσης έχει κλιμακωτή εσχάρα, με δεκαεπτά σειρές από νανούμενα και σταθερά, εναλλάξ, εσχάρα. Το σύστημα της κινητής εσχάρας, λειτουργεί με πριονίδα και καλύπτει 50-60% της συνολικής προσδιδόμενης ισχύος. Ο πρωτεύων αέρας, διανέμεται μέσω τεσσάρων αγωγών, κάτω από κινητή εσχάρα, ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται και ως ψυκτικό μέσο των εσχάρων. Ο δευτερεύων αέρας, τροφοδοτείται ακριβώς πάνω από την είσοδο του καυσίμου στην εστία. Η θέση της φλόγας είναι

τέτοια ώστε, να καλύπτει 1/3 με 1/2 της επιφάνειας της κινητής εσχάρας και υπάρχει αρκετός χρόνος για την ξήρανση του καυσίμου και την απομάκρυνση της τέφρας στην αρχή και στο τέλος της εσχάρας, αντίστοιχα [5]. Ένας καυστήρας πολλαπλού καυσίμου, βρίσκεται στο πάνω μέρος του δευτέρου θαλάμου καύσης και μπορεί να λειτουργήσει με αργό πετρέλαιο (μαζούτ), ελαφρύ πετρέλαιο (ντήζελ), προιονίδη, ή συνδυασμό προιονιδίου και ντήζελ. Η έναυση του καυστήρα επιτυγχάνεται με ντήζελ και ο αέρας ρυθμίζεται αυτόματα, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Πέρα από την αύξηση του παραγόμενου θερμικού φορτίου, ο ρόλος του καυστήρα είναι να βελτιώνει το βαθμό απόδοσης καύσης της όλης εγκατάστασης.

3. Προγραμματισμός των πειραμάτων και μεθοδολογία μετρήσεων.

Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές συνδυασμένης καύσης ήταν λιγνίτης από τα κοιτάσματα της Πτολεμαΐδας και απορριπτόμενη ξυλεία, η οποία διακρίνεται σε φυσικά επαβεβαρημένη και ρυπαρομένη ξυλεία. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τρία διαφορετικά είδη ξυλείας, τα οποία είναι η φυσική ξυλεία (πέυκο), τα υπολείμματα ΙΝΟΣΑΝΙΔΩΝ από την παραγωγική διαδικασία του εργοστασίου και στύλοι της ΔΕΗ. Η επεξεργασία όλων των ειδών ξυλείας πριν την καύση τους, έλαβε χώρα στον υπάρχοντα εξοπλισμό του εργοστασίου. Τα μίγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της συνδυασμένης καύσης, δίδονται στον Πίνακα Ι. Πριν από κάθε πείραμα, πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική εκτίμηση της τάσης της τέφρας, για τον σχηματισμό επικαθήσεων, χρησιμοποιώντας κατάλληλους δείκτες. Με βάση τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, ακολούθησε μια επδεικτική δοκιμή συνδυασμένης καύσης, με το βέλτιστο μίγμα καυσίμων.

Τόσο κατά τη διάρκεια των δοκιμών συνδυασμένης καύσης όσο και στην επδεικτική φάση, η παρακολούθηση και ο έλεγχος της συγκέντρωσης του οξυγόνου στο καυσαέριο και των εκπομπών CO, SO₂, NO ήταν συνεχείς. Δείγματα καυσαερίου ελήφθησαν από τον αγωγό που βρίσκεται μετά τον πολυκυκλώνα και πριν τον ανεμοστρα



Καταγραφή εκπομπών: 4, 6 Διαφορική πίεση: 1 - 6
Μέτρηση θερμοκρασίας: 1, 2, 4, 6 Δειγματοληψία τέφρας: 3, 5
Δειγματοληψία βαρέων μετάλλων, διοξινίων και φουρανίων: 6

Σχήμα 1: Θέσεις δειγματοληψίας στον ατμοπαραγωγό κινητής κλιμακωτής εσχάρας της εταιρίας «ΠΙΝΑΟΣ».

ελκυσμού, με σκοπό να ανιχνευθεί η ύπαρξη διοξινίων / φουρανίων (PCDD/F) και βαρέων μετάλλων. Επιπλέον, η καταγραφή των λειτουργικών στοιχείων του ατμοπαραγωγού ήταν συνεχής, ενώ δείγματα τέφρας συλλέχθησαν από τον πρώτο θάλαμο καύσης και την βάση του πολυκυκλώνα. Όλες οι θέσεις μετρήσεων στον ατμοπαραγωγό, απεικονίζονται στο Σχήμα 1.

4. Χημικές αναλύσεις καυσίμων και τέφρας.

Ο χαρακτηρισμός της πρώτης ύλης για καθένα από τα δείγματα καυσίμων,

πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα πρότυπα της ASTM. Τα αποτελέσματα της προσεγγιστικής και στοιχειακής ανάλυσης των καυσίμων και η θερμογόνος ικανότητά τους, φαίνονται στον Πίνακα ΙΙ. Η πιο σημαντική διαφορά διαπιστώθηκε στην περιεκτικότητα των καυσίμων σε υγρασία, καθώς ο λιγνίτης Πτολεμαΐδας έχει την υψηλότερη τιμή 58.8 (%κ.β.), ενώ τα είδη απορριπτόμενης ξυλείας και ειδικότερα τα υπολείμματα ινοσανιδίων, παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Το γεγονός αυτό επηρεάζει σημαντικά την καύσιμη ύλη και

Καύσιμο μίγμα	Σύμβολο	(% κ.β.)	(% προσδι- δόμενη Θ.Ι.)
Φυσική ξυλεία - Λιγνίτης	(α)	80 / 20	88.4 / 11.6
Φυσική ξυλεία - Λιγνίτης	(β)	60 / 40	74.1 / 25.9
Φυσική ξυλεία	(γ)	100	100
Υπολείμματα ινοσανιδίων	(δ)	100	100
Υπολείμματα MDF - Λιγνίτης	(ε)	80 / 20	90.7 / 9.3
Φυσική ξυλεία - Λιγνίτης - Στύλοι ΔΕΗ	(στ)	60 / 20 / 20	64.1 / 11.2 / 24.7
Φυσική ξυλεία - Λιγνίτης - MDF	(ζ)	60 / 20 / 20	62.6 / 10.9 / 26.5
Υπολείμματα MDF - Λιγνίτης - Στύλοι ΔΕΗ	(η)	60 / 20 / 20	69.4 / 9.5 / 21.1

Πίνακας Ι: Μίγματα καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις δοκιμές συνδυασμένης καύσης στην κινητή εσχάρα.

Καύσιμο	Λιγνίτης Πτολεμαΐδας	Φυσική Ξυλεία	Υπολείμματα ινοσανίδων	Στόλοι ΔΕΗ
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ [%κ.β., ως έχει]				
Υγρασία	58.80	17.30	6.60	8.60
Πτητικά	25.01	75.69	90.80	82.63
Μόνιμος Άνθρακας, C	10.22	6.29	2.05	7.68
Καύσιμη Ύλη	35.23	81.97	92.86	90.30
Τέφρα	5.97	0.73	0.54	1.10
ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ [%κ.β., επί ξηρού]				
Άνθρακας, C	47.78	42.42	45.07	50.02
Υδρογόνο, H	4.54	5.33	5.92	6.14
Θείο, S	0.94	0.0	0.25	0.27
Άζωτο, N	1.44	0.18	3.16	0.18
Οξυγόνο, O ¹	30.80	51.19	45.02	42.19
ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ [ως έχει]				
Ανωτέρα Θ.Ι., Ha [kJ/kg]	8160	15475	18519	20160
Κατώτερα Θ.Ι., Hu [kJ/kg]	6314	14081	17142	18716

(1) Εκτίμηση δ' αραρίσεως.

Πίνακας II: Προσεγγιστική και στοιχειακή ανάλυση (%κ.β.) και θερμογόνο ικανότητα των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές συνδυασμένης καύσης, στον Α/Π με κινητή εσχάρα.

την θερμογόνο ικανότητα των καυσίμων. Η καύσιμη ύλη είναι περίπου 82 (%κ.β., ως έχει) για την φυσική ξυλεία και ξεπερνάει το 90 (%κ.β., ως έχει) για την ρυπασμένη ξυλεία, φτάνοντας το 99 (%κ.β.) σε ξηρή βάση και υποδεικνύοντας την καλή ποιότητα αυτών των καυσίμων. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, όλα τα δείγματα εμφανίστηκαν να έχουν παρόμοια κατώτερη θερμογόνο ικανότητα, που κυμαίνονταν από 14081 έως 18716 kJ/kg. Σε σχέση με τα δείγματα ξυλείας, ο λιγνίτης Πτολεμαΐδας έχει σημαντικά χαμηλότερη συγκέντρωση καύσιμης ύλης, περίπου 25% (κ.β., ως έχει) και συνεπώς χαμηλότερη κατώτερη θερμογόνο ικανότητα, ίση με 6314 kJ/kg. Όλα τα δείγματα ξυλείας έχουν υψηλότερη συγκέντρωση πτητικών, ενώ ο λιγνίτης έχει πολύ χαμηλότερη συγκέντρωση πτητικών και σχετικά υψηλή συγκέντρωση μόνιμου άνθρακα. Επιπλέον, τα δείγματα απορριπτόμενης ξυλείας χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη συγκέντρωση τέφρας, που κυμαίνεται από 0.5 έως 1.1 %κ.β. και οι οποίες είναι συνήθεις τιμές. Ο λιγνίτης Πτολεμαΐδας έχει αρκετά μεγαλύτερη περιεκτικότητα τέφρας, ίση με 5.97% κ.β., που είναι όμως αρκετά χαμηλότε-

ρη του εξεταζόμενου κοιτάσματος, γεγονός που οφείλεται στην υψηλή ποιότητα του συγκεκριμένου δείγματος.

Σύμφωνα με τις στοιχειακές αναλύσεις (Πίνακας II) και συγκριτικά με τον λιγνίτη, η απορριπτόμενη ξυλεία έχει σημαντικά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο σε ξηρή βάση, η οποία είναι ασήμαντη στην περίπτωση της φυσικής ξυλείας. Τα υπολείμματα ινοσανίδων περιέχουν τη μεγαλύτερη, συγκέντρωση αζώτου, που είναι μία

τάξη μεγέθους μεγαλύτερη, σε σχέση με τα άλλα δύο είδη απορριπτόμενης ξυλείας. Επίσης, η βιομάζα εμφανίζεται να έχει σημαντικά υψηλότερη συγκέντρωση οξυγόνου, που αναμένεται να επιταχύνει τη διεργασία καύσης.

Οι χημικές αναλύσεις τέφρας του λιγνίτη και των ειδών απορριπτόμενης ξυλείας, όσον αφορά τα οξειδία, δίδονται στον Πίνακα III, όπως αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των δεικτών σχηματισμού επικαθίσεων της τέφρας. Το CaO βρέθηκε να έχει την υψηλότερη συγκέντρωση σε όλα τα δείγματα, υπερβαίνοντας το 50% κ.β. για την απορριπτόμενη ξυλεία, ενώ η παρουσία του SiO₂ ήταν έντονη, κυρίως στο λιγνίτη. Αυξημένα ποσοστά οξειδίων των αλκαλίων, ανιχνεύθηκαν στα δείγματα απορριπτόμενης ξυλείας, φτάνοντας έως και 10.04% κ.β. K₂O στη φυσική ξυλεία και 4.5% κ.β. Na₂O στα υπολείμματα ινοσανίδων. Το συνολικό ποσοστό οξειδίων των αλκαλίων, δεν υπερβαίνει το 1% κ.β. στην τέφρα του λιγνίτη. Αυτή η κατανομή των αλκαλικών μετάλλων και τα χαμηλότερα ποσοστά ενώσεων πυριτίου και αργιλίου, αναμένεται ότι θα οδηγήσουν στη μείωση της θερμοκρασίας τήξης της τέφρας της απορριπτόμενης ξυλείας [6].

5. Ποιοτική εκτίμηση της τάσης της τέφρας για σχηματισμό επικαθίσεων.

Σύμφωνα με τις χημικές αναλύσεις της τέφρας των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές συνδυασμένης καύσης (Πίνακας III), υπολογίστηκαν διάφοροι δείκτες, με σκοπό να

Ανάλυση τέφρας % κ.β.	Λιγνίτης Πτολεμαΐδας	Φυσική Ξυλεία	Υπολείμματα ινοσανίδων	Στόλοι ΔΕΗ
SiO ₂	32.08	14.45	3.01	13.43
Al ₂ O ₃	9.30	2.71	1.59	2.50
Fe ₂ O ₃	7.18	1.61	0.00	4.50
MgO	6.67	8.00	10.00	5.60
K ₂ O	0.36	10.04	1.69	1.75
Na ₂ O	0.00	0.17	4.50	0.74
CaO	40.00	51.30	63.50	57.45
P ₂ O ₅	0.64	2.82	4.50	0.88
SO ₃	2.06	-	-	-
Υπόλοιπο	1.71	8.90	11.21	13.15

Πίνακας III: Χημικές αναλύσεις της τέφρας (%κ.β.) των καυσίμων.

εκτιμηθεί ποιοτικά η τάση της τέφρας για τον σχηματισμό επικαθήσεων. Οι εξισώσεις των περισσότερων σημαντικών δεικτών επικαθήσεων, έχουν ως εξής:

Λόγος Βασικών / Ώξιων συστατικών της τέφρας (Base / Acid, B/A):

$$(B/A) = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{Al_2O_3 + SiO_2 + TiO_2} \quad (1)$$

Ολική ποσότητα Αλκαλικών ενώσεων (Total Alkalis, TA):

$$TA = Na_2O + K_2O \quad (2)$$

και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα IV. Παρ' όλο που δύο ή και περισσότερα δείγματα τέφρας των καυσίμων, μπορεί να έχουν τον ίδιο λόγο (B/A), τα βασικά συστατικά τους, είναι αυτά που καθορίζουν την τάση για τον σχηματισμό τηγμένων επικαθήσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι τιμές του λόγου B/A σε μια περιοχή μεταξύ 0.4 και 0.7, υποδεικνύουν την τάση των μετάλλων που περιέχονται στην τέφρα, να σχηματίσουν άλατα χαμηλού σημείου τήξης, κατά την διάρκεια της καύσης και επομένως, μια υψηλή τάση για τηγμένες επικαθήσεις. Το αντίθετο συμβαίνει, όταν αυτή η αναλογία είναι εκτός ορίων. Οι τιμές όλων των δειγμάτων τέφρας είναι υψηλότερες από την τιμή 0.7 που δείχνει χαμηλή τάση για τον σχηματισμό επικαθήσεων. Παρά ταύτα, τα αλκαλικά μέταλλα Νάτριο (Na) και Κάλιο (K), μπορούν να σχηματίσουν ενώσεις με χαμηλό σημείο τήξης, αλλάζοντας σημαντικά τις επιδράσεις της αναλογίας των βασικών προς όξιων συστατικών. Η αύξηση των ολικών αλκαλίων, υποδηλώνει τέφρα χαμηλού σημείου τήξης και συνεπώς, η καύση της απορριπτόμενης ξυλείας, αναμένεται να προκαλέσει σοβαρότερα προβλήματα εναπόθεσης τέφρας, από την καύση του λιγνίτη.

6. Αποτελέσματα των δοκιμών συνδυασμένης καύσης.

6.1. Συνθήκες λειτουργίας του ατμοπαραγωγού.

Η ανάμιξη της απορριπτόμενης ξυλείας με τον λιγνίτη και η εκκένωση του μίγματος στην δεξαμενή καυσίμου, λάμβανε χώρα σε κάθε δοκιμή συνδυα-

Καύσιμο	To (°C)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	ΔP (mbar)
(α)	19	725	640	188	3.2
(β)	12.5	700	590	183	4.5
(γ)	13	710	640	198	3.7
(δ)	17.5	720	640	193	4.1
(ε)	15	720	640	190	3.5
(στ)	14.5	700	650	192	4.8
(ζ)	16	690	650	188	3.9
(η)	21	730	640	189	3.6

Όπου:

To: Θερμοκρασία περιβάλλοντος.

T₁: Θερμοκρασία στον α' θάλαμο καύσης.

T₂: Θερμοκρασία στον β' θάλαμο καύσης.

T₃: Θερμοκρασία καυσαερίων.

ΔP: Διαφορική πίεση μεταξύ του α' θαλάμου καύσης και της καπνοδόχου.

Πίνακας V: Λειτουργικά στοιχεία του Α/Π όπως μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών συνδυασμένης καύσης.

σμένης καύσης. Η τροφοδοσία του μίγματος στην κινητή εσχάρα, γινόταν μέσω μιας ανέμης, ενός αλυσομεταφορέα και ενός τροφοδότη. Δύο ραδιοστοιχεία που ανηγνύουν τη στάθμη του καυσίμου στην ενδιάμεση χοάνη υποδοχής και στην κινητή εσχάρα αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση της τροφοδοσίας του καυσίμου. Οι εκπεμπόμενοι ρύποι και η ατμοπαραγωγή, ήσαν υπό συνεχή έλεγχο και οι πειραματικές μετρήσεις ξεκινούσαν όταν ο λέβητας λειτουργούσε υπό σταθερές συνθήκες. Υπήρξε μέτρηση της τροφοδοσίας του καυσίμου στον πρώτο θάλαμο καύσης και του ρινοιδίου στον καυστήρα.

Η προσδιδόμενη θερμική ισχύς, διατηρήθηκε σταθερή σε όλες τις δοκιμές και ίση με 4 MW_{th} για την κινητή εσχάρα και 6 MW_{th} για τον καυστήρα. Επιπροσθέτως, ελήφθησαν τιμές για την θερμοκρασία στον πρώτο και στον

δεύτερο θάλαμο καύσης, πριν τον πολυκυκλώνα και στην έξοδο των καυσαερίων, καθώς επίσης, και για την διαφορική πίεση μεταξύ του πρώτου θαλάμου καύσης και της καπνοδόχου. Τα αποτελέσματα όλων αυτών των μετρούμενων μεγεθών, φαίνονται στον Πίνακα V.

Για τις διαφορετικές συνθήκες καύσης των δοκιμών, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις, παρά μόνο μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας στον πρώτο θάλαμο καύσης, όταν χρησιμοποιήθηκαν τα υπολείμματα ινοσανίδων ως βασικό καύσιμο. Η καύση του MDF, είτε μόνο του ή σε συνδυασμό με άλλα καύσιμα, είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης της καύσης, την ταχεία επίτευξη σταθερών συνθηκών λειτουργίας και την αύξηση του παραγόμενου ωφέλιμου έργου.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της λειτουργίας του καυστήρα

Δείκτες επικαθήσεων	Λιγνίτης	Φυσική ξυλεία	Υπολείμματα ινοσανίδων	Στόλοι ΔΕΗ
Βασικά / Ώξινα συστατικά της τέφρας	1.310	4.145	4.397	17.324
Ολικά αλκάλια	0.360	10.210	2.490	6.190

Πίνακας IV: Δείκτες επικαθήσεων της τέφρας για καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές συνδυασμένης καύσης.

CO	SO ₂	NO
	mg/m ³ N dry, 6% O ₂	
311	54	785

Πίνακας VI: Εκπομπές CO, SO₂ και NO κατά την διάρκεια της λειτουργίας του καυστήρα πολλαπλού καυσίμου μόνο με προιονίδι.

πολλαπλού καυσίμου στα πειραματικά αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά την καύση προιονιδίου, μόνο στον δευτερο θάλαμο καύσης και χωρίς τροφοδοσία καυσίμου πάνω στην εσχάρα. Οι τιμές εκπομπών ρύπων που καταγράφηκαν, δίδονται στον Πίνακα VI και όπως φαίνεται, η εκπομπή του NO αυξήθηκε εξαιτίας του σημαντικά υψηλότερου λόγου αέρα καύσης.

6.2. Εκπομπές και απόδοση της καύσης.

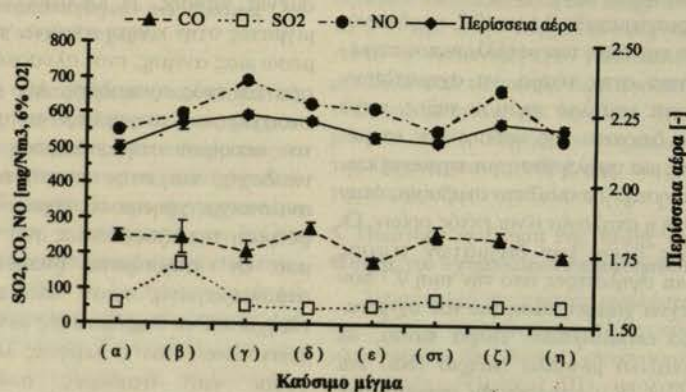
Η εκτίμηση της συμπεριφοράς της καύσης κατά τη διάρκεια των δοκιμών, έγινε με βάση τις εκπομπές CO, NO και SO₂ και την περιεκτικότητα των δειγμάτων τέφρας σε άκαυστα. Οι τιμές των εκπομπών CO, NO και SO₂ που μετρήθηκαν στην καπνοδόχο, μετατράπηκαν σε [mg/Nm³, dry, 6% O₂] και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 1, ως συνάρτηση του λόγου αέρα καύσης. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την περιεκτικότητα σε άκαυστα των δειγμάτων τέφρας που συλλέχθηκαν από τον πρώτο θάλαμο καύσης και τον κυκλώνα, φαίνονται στο Διάγραμμα 2.

Οι εκπομπές CO διατηρήθηκαν στο ίδιο επίπεδο κατά τη διάρκεια της καύσης των διαφορετικών μιγμάτων καυσίμων. Η αύξηση του ποσοστού του λιγνίτη στο καύσιμο μίγμα (β) σε 40% κ.β., δεν είχε σοβαρή επίδραση στην εκπομπή CO (Διάγραμμα 1), ενώ η περιεκτικότητα των ακαύστων μειώθηκε για την ίδια δοκιμή (Διάγραμμα 2). Αυτό οφείλεται στον μεγαλύτερο χρόνο παραμονής που απαιτείται για την καύση λιγνίτη στην εσχάρα, εξαιτίας της υψηλότερης περιεκτικότητάς του σε υγρασία. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις εκπομπές του CO και των ακαύστων για τα μίγματα (α) και (ε), αποδείχθηκε ότι η χρήση του MDF στο καύσιμο μίγμα, σε αντίθεση με τη φυσική ξυλεία, επιφέρει μια μικρή βελτίωση

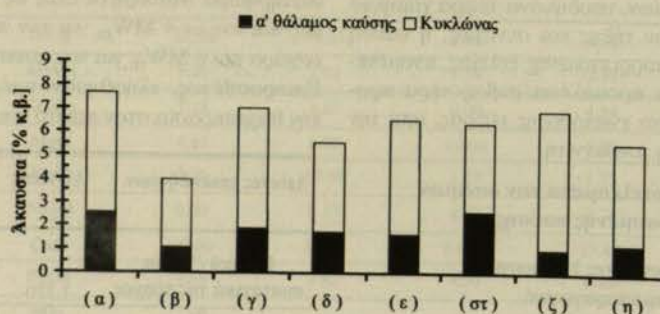
στην απόδοση της καύσης (Διάγραμμα 1). Το ίδιο αποτέλεσμα προέκυψε και από τη σύγκριση των καυσίμων μπιγμάτων (στ), (ζ) και (η), όταν το MDF χρησιμοποιήθηκε στο μέγιστο ποσοστό του, 60%κ.β.

Η συνολική περιεκτικότητα των δειγμάτων τέφρας όλων των καυσίμων μιγμάτων, ήταν αρκετά υψηλή και μεγαλύτερη από 92 (% κ.β.), υποδηλώνοντας τη βελτιωμένη απόδοση της καύσης. Όπως βρέθηκε σε παρόμοιες περιπτώσεις, οι μέγιστες τιμές της περιεκτικότητας σε άκαυστα, ανιχνεύθηκαν στα ιπτάμενα σωματίδια του κυκλώνα. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην ταχεία πυρόλυση των σωματιδίων ξύλου, που επηρεάζει σημαντικά το χρόνο παραμονής τους στο θάλαμο καύσης [7].

Σε όλες τις δοκιμές, οι τιμές της εκπομπής NO, επηρεάστηκαν από τις συνθήκες λειτουργίας και ελάχιστα από την περιεκτικότητα του αζώτου στο καύσιμο. Αυτή η παρατήρηση ισχύει ακόμη και για την περίπτωση του MDF, παρ' όλη την υψηλή περιεκτικότητά του σε άζωτο. Οι υψηλότερες τιμές NO, καταγράφηκαν στην καύση των μιγμάτων (γ) και (ζ), όπου ο λόγος αέρα καύσης είχε την μέγιστη τιμή του (Διάγραμμα 1). Οι χαμηλότερες τιμές NO, παρατηρήθηκαν για τα μίγματα (α) και (στ) ακολουθώντας τη διακύμανση του λόγου αέρα καύσης. Επιπλέον κατά τις δοκιμές συνδυασμένης καύσης, μετρήθηκαν χαμηλές εκπομπές SO₂ (Διάγραμμα 1). Η μικρή αύξηση του SO₂ κατά την διάρκεια της καύσης του μίγματος (β) με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε λιγνίτη, οφείλεται στη μεγάλη ποσότητα θείου στο καύσιμο.



Διάγραμμα 1: Εκπομπές CO, SO₂ και NO, όπως μετρήθηκαν κατά την διάρκεια των δοκιμών συνδυασμένης καύσης στην καπνοδόχο, ως συνάρτηση του λόγου αέρα καύσης.



Διάγραμμα 2: Περιεκτικότητα σε άκαυστα των δειγμάτων τέφρας που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια των δοκιμών συνδυασμένης καύσης, από τον α' θάλαμο καύσης και τον κυκλώνα.

7. Επιδεικτική δοκιμή συνδυασμένης καύσης στον Α/Π.

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, ακολούθησε εξαμηνιαία δοκιμή καύσης του βέλτιστου μίγματος στον ατμοπαραγωγό, το οποίο αποτελείται από υπολείμματα MDF, λυγνίτη και φυσική ξυλεία, σε αναλογία 60/20/20 (% κ.β.). Οι εκπομπές CO, SO₂ και NO, καταγράφηκαν σε τακτά χρονικά διαστήματα και οι μέσες τιμές τους σε [mg/Nm³, dry, 6% O₂] ήταν ίσες με 249, 40 και 600, αντίστοιχα.

Αυτές οι τιμές είναι χαμηλότερες από εκείνες που προβλέπει η νομοθεσία και συνεπώς, κατά την συστηματική καύση του μίγματος, δεν αναμένεται να χρειασθεί επιπρόσθετο κόστος για τον καθαρισμό των καυσαερίων.

Επιπλέον, η επιτήρηση των επιφανειών συναλλαγής θερμοότητας, δεν έδειξε σημαντικές μεταβολές στον σχηματισμό επικαθήσεων της τέφρας, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι το κόστος συντήρησης του μηχανολογικού εξοπλισμού του ατμοπαραγωγού, θα παραμείνει το ίδιο.

8. Συμπεράσματα και σχόλια.

Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές συνδυασμένης καύσης και από την επιδεικτική φάση, έδειξαν ότι η συνδυασμένη καύση απορριπτόμενης ξυλείας με λυγνίτη, είναι τεχνικά εφικτή σε Α/Π με κινήτη εσχάρα.

Πιο συγκεκριμένα, η χρήση MDF αντί για φυσική ξυλεία, σε συνδυασμό με φυσικό λυγνίτη, επιφέρει βελτίωση στις εκπομπές και στην απόδοση της καύσης, υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Η ύπαρξη λυγνίτη σε υψηλά ποσοστά στο καύσιμο μίγμα, οδηγεί σε μείωση της ωφέλιμης ισχύος, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του καυσίμου σε υγρασία. Σε όλες τις δοκιμές συνδυασμένης καύσης, οι εκπομπές των διοξινών / φουρανίων (PCDD/F) στο καυσαέριο, ήταν χαμηλότερες από το νομοθετικό όριο, δηλαδή από 100

pg/Nm³ (ισοδύναμου TEQ).

Συγκεκριμένα, οι τιμές τους διαεμάνθησαν μεταξύ 3 pg/Nm³, για το μίγμα υπολειμμάτων ινοσανίδων/λυγνίτη, σε αναλογία 80/20 (%κ.β.) έως και 97.3 pg/Nm³ για την καύση του μίγματος φυσικής ξυλείας / λυγνίτη σε 80 / 20 (%κ.β.).

Επιπλέον, οι εκπομπές των βαρέων μετάλλων Sn, Zn, Pb, Cd, Co, Ni, Mn, Cr, V, and Cu, ήταν χαμηλότερες από 0.5 mg/g, τόσο για τα δείγματα της υπτάμενης τέφρας όσο και για εκείνα που συλλέχθηκαν από τον α' θάλαμο καύσης. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων, παρουσιάζονται εκτενώς σε άλλη εισήγηση [8].

Λαμβάνοντας υπόψη όλα όσα σημειώθηκαν παραπάνω και την τάση της ελληνικής ενεργειακής πολιτικής να προωθήσει την ανάπτυξη περιφερειακών μονάδων παραγωγής ενέργειας, που χρησιμοποιούν βιομάζα, συμπεραίνεται ότι η απορριπτόμενη ξυλεία προσφέρεται ως κύριο καύσιμο σε βιομηχανικούς λέβητες. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τους βιομηχανίες επεξεργασίας ξύλου.

Επιπροσθέτως, η θερμική ανακύκλωση της απορριπτόμενης ξυλείας, πρόκειται να αναπτυχθεί ακόμη περισσότερο, με την δημιουργία εταιρειών διαχειρισμού στερεών απόβλητων, που θα συλλέγουν και θα μετατρέπουν την απορριπτόμενη ξυλεία, σε ένα εύρηστο καύσιμο για τους υπάρχοντες λέβητες στερεών καυσίμων.

Ευχαριστίες.

Η παρούσα εργασία έχει χρηματοδοτηθεί μερικώς από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Thermie Action A, με τίτλο "Low emission co-combustion of different waste wood species and lignite derived products in industrial power plants". Οι συγγραφείς θέλουν να εκφράσουν τις ιδιαίτερες ευχαριστίες τους στο προσωπικό της ΠΙΝΔΟΣ ΑΕ, χωρίς τη συμμετοχή του οποίου, η υλοποίηση του έργου θα

ήταν αδύνατη.

Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Marutzky R. (1997), Energiegewinnung aus Rest- und Gebraucht-holz, "Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzaffallen", Springer-VDI-Verlag, pp. 1-21.

2. Meyrahn H., (2000), Low emissions co-combustion of different waste wood species and lignite derived products in industrial power plants, THERMIE Type A-Action, Final Report.

3. Nussbaumer, T., (1996), Anlagentechnik und Wirtschaftlichkeit der thermischer Verwertung von Altholz, BWK, vol 48, Nr 11/12, November/Dezember, pp. 61-65.

4. Kakaras E., Pavloudakis F., Karlopoulos E. (26-29 June 2000), The use of wood waste for energy production - Technical aspects and management issues, Renewable Technologies for Sustainable Development, Madeira/ Portugal.

5. Παπαγεωργίου Ν., Ατμοπαραγωγοί Ι - Γενικές Αρχές, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1991.

6. Singer G. (Editor). (1981), Combustion fossil Power Systems, Combustion Engineering Inc.

7. Meschbiz A., Kakaras E., Krumbeck M. (1995), Combined Combustion of Biomass and Brown Coal in a Pulverized Fuel and Fluidized Bed Combustion Plant, 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Lisbon/ Portugal.

8. Kakaras E., P. Vourliotis, P. Grammelis, G. Sakellariopoulos, P. Samaras, G. Skodras (1999), Co-combustion of biomass/waste wood/lignite blends in an industrial steam boiler, THERMIE type A Workshop on "Co-combustion of Waste Wood, Biomass and Lignite in Industrial Boilers - Possibilities-Perspectives", Thessaloniki, GREECE, November 1999.