



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου • ΤΗΛ.:7723572, FAX: 7723571

Αρ.Πρωτ.: 2610

Αθήνα, 21/2/2014

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχανολόγων
Μηχανικών

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του κ. **Βορριά Ηλία**, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ, που θα πραγματοποιηθεί την Τετάρτη 26 Φεβρουαρίου 2014, ώρα 14:00, στην αίθουσα διαλέξεων του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων & Λεβήτων (κτίριο «Ο» -1^{ος} όροφος) Τομέας Θερμότητας, Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Το Θέμα της Διδακτορικής Διατριβής είναι:

«Δέσμευση CO₂ από λέβητες ΑΗΣ με καύση σε συνθήκες υψηλής περιεκτικότητας σε O₂»

Επισυνάπτεται περίληψη της παραπάνω Διδακτορικής Διατριβής.

Ο ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ



Η. ΤΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η αξιολόγηση μέσω θερμοδυναμικών υπολογισμών και η οικονομοτεχνική ανάλυση της εφαρμογής προηγμένων τεχνολογιών δέσμευσης CO₂ σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής καύσης στερεών καυσίμων αλλά και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας όπως είναι η τσιμεντοβιομηχανία.

Η πρώτη προηγμένη τεχνολογία δέσμευσης που εξετάστηκε είναι η τεχνολογία στην οποία η καύση γίνεται σε περιβάλλον αυξημένης συγκέντρωσης σε οξυγόνο (partial-oxyfuel) ώστε να παράγεται καυσαέριο μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε CO₂ σε σχέση με την καύση με ατμοσφαιρικό αέρα. Στη συνέχεια το CO₂ δεσμεύεται μέσω ενός κλασικού μετά καύσης συστήματος δέσμευσης είτε με χημική απορρόφηση από αμίνες είτε μέσω διαχωρισμού του από τα λοιπά συστατικά του καυσαερίου μέσω της διέλευσης του από κατάλληλες μεμβράνες.

Η δεύτερη τεχνολογία είναι η μετά καύσης δέσμευση του CO₂ με χρήση της τεχνολογίας ασβεστοποίησης-ανθρακοποίησης. Εδώ η δέσμευση του CO₂ επιτυγχάνεται σε έναν αντιδραστήρα ανακυκλοφορούσας ρευστοποιημένης κλίνης ενανθράκωσης (Carbonator), όπου το CO₂ αντιδρά με στερεά σωματίδια του CaO προς σχηματισμό στερεού CaCO₃. Η αντίστροφη διεργασία της ασβεστοποίησης λαμβάνει χώρα σε έναν άλλο αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης (Calciner) όπου το παραγόμενο CaCO₃ διασπάται σε αέριο CO₂ και στερεό CaO το οποίο επιστρέφει στον ανθρακοποιητή.

Επιπρόσθετα, εξετάστηκε η δυνατότητα συνδυασμένης λειτουργίας μιας τσιμεντοβιομηχανίας με μια βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής με κοινή δέσμευση του CO₂ που παράγεται και από τις δύο διεργασίες. Η τεχνολογία δέσμευσης που επιλέχθηκε σε αυτήν την περίπτωση είναι η τεχνολογία ασβεστοποίησης-ανθρακοποίησης. Σε αυτήν την περίπτωση το CaO που δημιουργείται στον ασβεστοποιητή του συστήματος δέσμευσης του CO₂ και παράγεται από το make-up CaCO₃ χρησιμοποιείται από την τσιμεντοβιομηχανία για την παραγωγή του κλίνγκερ. Το πλεονέκτημα της προτεινόμενης διαδικασίας δέσμευσης του CO₂ είναι ότι οι δύο βιομηχανίες μπορούν να λειτουργήσουν μαζί αλλά και μεμονωμένα με και χωρίς δέσμευση του CO₂.

Για τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε κατά βάση το εμπορικό πρόγραμμα προσομοίωσης διεργασιών IPSE_PRO. Για την εκτέλεση των υπολογισμών απαιτήθηκε ο εμπλουτισμός της υπολογιστικής βιβλιοθήκης του προγράμματος με τη δημιουργία νέων υπολογιστικών στοιχείων, τα οποία δημιουργήθηκαν με χρήση του προγράμματος MDK.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται οι βασικές τεχνολογίες που έχουν προταθεί για τη δέσμευση του CO₂. Επιπρόσθετα περιγράφονται οι επιπτώσεις του στο περιβάλλον και για ποιο λόγο κρίνεται επιτακτική η μείωση των εκπομπών του και περιγράφονται δυνατοί τρόποι μεταφοράς και αποθήκευσης αυτού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφονται οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς καθώς και τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται ο σταθμός αναφοράς που επιλέχθηκε για τους υπολογισμούς ενώ αναφέρονται τα αποτελέσματα άλλων εργασιών που αφορούν στην εφαρμογή ως περιπτώσεις μετασκευής των θεμελιωδών τεχνολογιών μετά την καύση δέσμευσης του CO₂ από αμίνες και καύσης σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου (oxyfuel) στον σταθμό αναφοράς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διερεύνηση της τεχνολογίας καύσης σε περιβάλλον αυξημένης συγκέντρωσης σε οξυγόνο (partial oxyfuel) και που προέκυψαν από πειράματα που διεξήχθησαν σε πειραματική μονάδα που έχει εγκαταστήσει η RWE Npower εντός του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής που βρίσκεται πλησίον της πόλης Didcot στην Οξφόρδη της Μεγάλης Βρετανίας. Στα υπόψη πειράματα συμμετείχε ο συγγραφέας της παρούσας διατριβής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται η εφαρμογή της τεχνολογίας καύσης σε περιβάλλον αυξημένης συγκέντρωσης σε οξυγόνο (partial oxyfuel), που αποτελεί και τη βασική πρωτοτυπία της παρούσας εργασίας, ως περίπτωση μετασκευής σε έναν λιγνιτικό και σε έναν λιθανθρακικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα των βασικών τεχνολογιών δέσμευσης. Η μετά την καύση δέσμευση του CO₂ γίνεται με χημική απορρόφηση με χρήση αμινών αλλά και μέσω διαχωρισμού με χρήση μεμβρανών.

Στο έκτο κεφάλαιο εξετάζεται η μετά την καύση δέσμευση του CO₂ με χρήση της τεχνολογίας ασβεστοποίησης-ανθρακοποίησης τόσο ως περίπτωση μετασκευής ενός υπάρχοντος όσο και ως περίπτωση ενός νεοσχεδιασμένου σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με χρήση καυσίμου στον ασβεστοποιητή ελληνικού λιγνίτη της περιοχής της Φλώρινας. Εδώ εξετάστηκαν διάφορα σενάρια λειτουργίας όπως η χρήση ανακυκλοφορίας ψυχρού CO₂ στον ασβεστοποιητή, η εγκατάσταση ενός ενδιάμεσου εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ των στερεών ρευμάτων, η χρήση προξηραμένου καυσίμου για την καύση στον ασβεστοποιητή και η τροφοδοσία με make-up CaCO₃ στον ανθρακοποιητή αντί τον ασβεστοποιητή με σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης εφαρμογής της τεχνολογίας αυτής.

Στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζεται η δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας μιας βιομηχανίας ηλεκτροπαραγωγής και μιας βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου με κοινή δέσμευση του CO₂ με χρήση της τεχνολογίας ανθρακοποίησης-ασβεστοποίησης. Και αυτή αποτελεί βασική πρωτοτυπία της παρούσας εργασίας. Κυρίαρχο πλεονέκτημα μιας τέτοιας κοινής λειτουργίας των δύο βιομηχανιών είναι ότι μεγάλος μέρος της χαμένης θερμότητας που προέρχεται τόσο από την τσιμεντοβιομηχανία όσο και από το σύστημα μετά δέσμευσης του CO₂ μπορεί να ανακτηθεί προς παραγωγή επιπρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται μια οικονομοτεχνική ανάλυση όλων των υπό εξέταση τεχνολογιών με σκοπό να προσδιοριστούν οι οικονομικές επιπτώσεις που έχει η εφαρμογή της καθεμιάς. Ως κύρια συγκριτικά οικονομοτεχνικά μεγέθη επιλέχθηκαν το κόστος ηλεκτροπαραγωγής και το κόστος αποφυγής του CO₂. Επιπρόσθετα

γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με αντίστοιχα αποτελέσματα που υπάρχουν διαθέσιμα στη βιβλιογραφία.

Το ένατο κεφάλαιο αποτελεί έναν γενικό επίλογο όπου συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς.

Στο δέκατο κεφάλαιο αναφέρεται η συμβολή της παρούσας εργασίας στην επιστήμη και την τεχνολογία καθώς και οι πρωτοτυπίες που αυτή περιλαμβάνει.

Στο παράρτημα Α περιγράφονται όλα τα βασικά βοηθητικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη δέσμευση του CO₂ ενώ στο παράρτημα Β περιγράφονται τα νέα στοιχεία προσομοίωσης που δημιουργήθηκαν και εμπλούτισαν τη βιβλιοθήκη του προγράμματος IPSE_PRO.

Τέλος, αναφέρεται όλη η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή πληροφοριών για την εκτέλεση των υπολογισμών αλλά και της συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Η μελέτη των υπό εξέταση τεχνολογιών δέσμευσης του CO₂ αποσκοπεί στην αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης της όλης εγκατάστασης και στην ελαχιστοποίηση των ενεργειακών καταναλώσεων που οφείλονται στην εγκατάσταση της τεχνολογίας δέσμευσης. Αυτό, μεταξύ άλλων, επιτυγχάνεται με τη βέλτιστη αξιοποίηση της χαμένης θερμότητας του συστήματος δέσμευσης του CO₂ μέσω της ενσωμάτωσής της στο κύκλωμα νερού-ατμού.

Η περίπτωση της ταυτόχρονης λειτουργίας ενός συστήματος μετά την καύση δέσμευσης του CO₂ και καύσης σε περιβάλλον υψηλής συγκέντρωσης οξυγόνου, αποτελεί μια καινοτομία της παρούσας εργασίας καθώς κάτι παρόμοιο δεν έχει ανερευρεθεί σε παρόμοια ερευνητική εργασία. Για την τεχνολογία καύσης σε περιβάλλον αυξημένης συγκέντρωσης οξυγόνου (partial-oxyfuel) πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στον συνολικό αέρα καύσης, εξετάστηκε η δέσμευση του CO₂ με χρήση αμινών και μεμβρανών ενώ εξετάστηκε η εφαρμογή της τεχνολογίας σε έναν τυπικό σύγχρονο ελληνικό λιγνιτικό σταθμό καθώς και σε έναν σταθμό με χρήση καυσίμου υψηλής θερμογόνου ικανότητας, όπως ο λιθάνθρακας. Επιπρόσθετα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση πειραμάτων συναφών με τη συγκεκριμένη τεχνολογία δέσμευσης του CO₂.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας ασβεστοποίησης-άνθρακοποίησης ως περίπτωση μετά την καύση δέσμευσης του CO₂ έχει απασχολήσει αρκετά την επιστημονική κοινότητα και υπάρχουν αρκετές σχετικές δημοσιεύσεις στη βιβλιογραφία. Εδώ όμως εξετάζεται η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας αυτής σε έναν ελληνικό λιγνιτικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με χρήση μάλιστα του λιγνίτη και ως δευτερεύον καύσιμο στον ασβεστοποιητή σε αντίθεση με υπάρχουσες εργασίες όπου το καύσιμο είναι πάντα κάποιο υψηλής θερμογόνου ικανότητας, όπως ο λιθάνθρακας. Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση του δευτερεύοντος θερμοδυναμικού κύκλου, ενώ εξετάστηκαν οι δυνατότητες αύξησης του συνολικού βαθμού απόδοσης μέσω της εγκατάστασης ενός εναλλάκτη συναλλαγής θερμότητας μεταξύ των στερεών ρευμάτων, της χρήσης προξηραμένου καυσίμου στον ασβεστοποιητή και της ανάγκης ή όχι ανακυκλοφορίας ψυχρού CO₂ σε αυτόν. Για την

τεχνολογία αυτή εξετάστηκε η δυνατότητα εφαρμογής της τόσο ως περίπτωση μετασκευής ενός υπάρχοντα σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (retrofit case) όσο και ως περίπτωση ανέγερσης ενός νέου σταθμού (new build case).

Η περίπτωση συνδυασμένης λειτουργίας μιας βιομηχανίας ηλεκτροπαραγωγής και μιας βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου με ταυτόχρονη δέσμευση του CO₂ που προέρχεται και από τις δύο διεργασίες αποτελεί επίσης μια καινοτομία της παρούσας εργασίας. Εδώ η εφαρμογή της γίνεται σε μια τυπική τσιμεντοβιομηχανία και σε μια βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ελληνικού λιγνίτη. Επιπρόσθετα ο λιγνίτης χρησιμοποιείται και ως καύσιμο στον ασβεστοποιητή του συστήματος δέσμευσης του CO₂ με χρήση της τεχνολογίας ασβεστοποίησης-ανθρακοποίησης, ο οποίος αποτελεί ταυτόχρονα και τον ασβεστοποιητή για την παραγωγή του CaO της τσιμεντοβιομηχανίας. Επίσης εξετάστηκε η δυνατότητα βελτίωσης του συνολικού βαθμού απόδοσης της όλης εγκατάστασης μέσω της εγκατάστασης ενός εναλλάκτη συναλλαγής θερμότητας μεταξύ των στερεών ρευμάτων και της χρήσης προξηραμένου καυσίμου στον ασβεστοποιητή.

Για όλες τις παραπάνω εξεταζόμενες τεχνολογίες δέσμευσης του CO₂ πραγματοποιήθηκε οικονομοτεχνική ανάλυση με σκοπό τον υπολογισμό του κόστους εγκατάστασης των συστημάτων δέσμευσης, του κόστους ηλεκτροπαραγωγής και του κόστους δέσμευσης του CO₂.

Τέλος τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκρίνονται με αντίστοιχα παρόμοια αποτελέσματα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, στις περιπτώσεις που αυτά ήταν διαθέσιμα.