

ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΥΠΟΥ ΡΕΜ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μ. Ουζουνίδου¹, Δ. Ιψάκης^{1,2}, Σ. Παπαδοπούλου^{1,3}, Σ. Βουτετάκης¹

¹ Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών (ΕΚΕΤΑ/ΙΤΧΗΔ) Τ.Θ. 361, 57001 Θέρμη, Θεσσαλονίκη

² Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Τ.Θ. 1517, 54124 Θεσσαλονίκη

³ Τμήμα Αυτοματισμού, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης (Α.Τ.Ε.Ι.Θ.), Τ.Θ. 141, 57400 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη συγκεκριμένη εργασία, θα παρουσιασθεί μία συνδυασμένη μελέτη που αφορά την πειραματική λειτουργία μίας μονάδας παραγωγής υδρογόνου μέσω αυτόθερμης αναμόρφωσης της μεθανόλης και παράλληλα τη χρήση του παραγόμενου υδρογόνου σε κυψέλη καυσίμου, καθώς και τη θεωρητική ανάλυση των θερμικών αναγκών της. Μεθανόλη, αέρας και νερό τροφοδοτούνται στον αντιδραστήρα αναμόρφωσης (autothermal reformer) για παραγωγή υδρογόνου. Η κυψέλη τύπου ΡΕΜ απαιτεί την ελαχιστοποίηση του ποσού του CO στο ρεύμα του H₂, καθώς δεσμεύει τα ενεργά κέντρα του καταλύτη της [1]. Η διεργασία μείωσης της συγκέντρωσης του CO σε επιτρεπτά όρια (<50 ppm) γίνεται στον αντιδραστήρα εκλεκτικής οξειδωσης (PROX) με σκοπό τη διοχέτευση του ρεύματος εξόδου του αντιδραστήρα PROX σε κυψέλη καυσίμου. Η διεργασία παραγωγής υδρογόνου μέσω αυτόθερμης αναμόρφωσης στο ΕΚΕΤΑ/ΙΤΧΗΔ. Η θεωρητική ανάλυση αφορά την ανάπτυξη τριών σεναρίων λειτουργίας για παραγωγή ισχύος 1kW με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Aspen Plus[®], κατά την οποία καταγράφονται οι θερμικές ανάγκες της μονάδας, καθώς και οι πιθανοί τρόποι κάλυψης των με χρήση εναλλακτών και ρευμάτων της διεργασίας. Στόχος της μελέτης αποτελεί η διερεύνηση των σχεδιαστικών επιλογών που οδηγούν στην αυτονομία του συστήματος με την ελαχιστοποίηση των βοηθητικών παροχών στους εναλλάκτες.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία του υδρογόνου απασχολεί εκτεταμένα την παγκόσμια έρευνα, αλλά και τις κυβερνήσεις, ως μία παράμετρος που προβλέπεται να μεταβάλει δραματικά την ενεργειακή και περιβαλλοντική κατάσταση. Η αύξηση των ενεργειακών αναγκών, η επιτάχυνση της εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων και η συνεχής υποβάθμιση του περιβάλλοντος στρέφουν εθνικούς και υπερεθνικούς φορείς στην προοπτική του H₂, η ενεργειακή αξιοποίηση του οποίου προσφέρει εξαιρετικά υψηλές αποδόσεις μετατροπής ενέργειας (κυψέλες καυσίμου) καθώς και τη δυνατότητα μηδενικής ρύπανσης. Παρά τα πλεονεκτήματα που φέρει το υδρογόνο, υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά την απευθείας τροφοδοσία του στις διάφορες εφαρμογές [2]. Η αναβάθμιση των μεθόδων αναμόρφωσης από ορυκτούς ή μη υδρογονάνθρακες βρίσκεται στο επίκεντρο της έρευνας για την παραγωγή H₂ [3].

Για να επιτευχθεί ο στόχος ενός αυτόνομου συστήματος παραγωγής ισχύος θα πρέπει το υδρογόνο να παράγεται από καύσιμα που μπορούν να μεταφερθούν εύκολα και να μπορούν τελικά να τροφοδοτηθούν σε αυτόνομα συστήματα. Καύσιμα που προορίζονται για τις διεργασίες παραγωγής ισχύος είναι το φυσικό αέριο, οι υδρογονάνθρακες χαμηλού MB, η αιθανόλη, η μεθανόλη, υδρογονάνθρακες μεγάλου MB και διμεθυλαιθέρας (DME) [4,5]. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε μεθανόλη ως καύσιμο για την παραγωγή ισχύος. Η μεθανόλη έχει υψηλό λόγο H:C και δεν αναπτύσσει δεσμούς C:C με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται ο σχηματισμός αιθάλης [6]. Ένα άλλο πλεονέκτημα της μεθανόλης είναι ότι μπορεί να παραχθεί από βιομάζα (βιομεθανόλη) [7]. Η παρούσα εργασία θα εστιασθεί στη

δοκιμαστική λειτουργία μιας συστοιχίας αντιδραστήρων αποτελούμενη από αντιδραστήρα αναμόρφωσης και αντιδραστήρα μερικής οξειδωσης, καθώς και στη θεωρητική ανάλυση τριών πιθανών σεναρίων λειτουργίας που αφορούν την κάλυψη συγκεκριμένων θερμικών αναγκών της μονάδας. Τα προτεινόμενα σχήματα λειτουργίας αφορούν παραγωγή ισχύος 1kW από κυψέλη καυσίμου τύπου PEM. Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται αποτελούν τη βάση για ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό σχεδιασμό ενός αυτόνομου συστήματος.

Σε μία ολοκληρωμένη μονάδα παραγωγής ισχύος, ιδιαίτερη βαρύτητα έχει το ζήτημα της κάλυψης των θερμικών αναγκών της. Δύο πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης μονάδας που απαιτούν ιδιαίτερη μελέτη σχετικά με τις θερμικές ανάγκες, αποτελούν η εξάτμιση και η προθέρμανση των αντιδρώντων, καθώς και η ψύξη των εξόδων των δύο αντιδραστήρων.

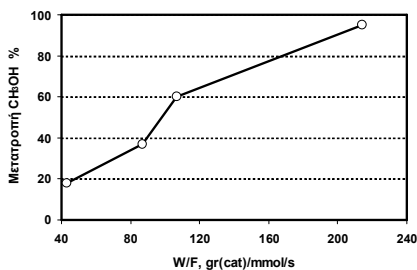
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στον αντιδραστήρα αναμόρφωσης είναι συνδυασμός ενδόθερμων και εξώθερμων αντιδράσεων. Η μερική οξείδωση της μεθανόλης επιβάλλεται εξαιτίας της υψηλής θερμικής απαίτησης της αντίδρασης της αναμόρφωσης, έτσι ώστε να δώσει στο σύστημα την απαραίτητη θερμότητα. Με την κατάλληλη επιλογή του λόγου O_2/CH_3OH η διεργασία στον αντιδραστήρα αναμόρφωσης καθίσταται αδιαβατική [6,8]. Οι άλλες δύο αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι η αντίδραση μετάθεσης νερού (water gas shift reaction) και η αποσύνθεση της μεθανόλης [8]. Με τη βοήθεια δοσομετρικών αντλιών, μεθανόλη και νερό (υγρή φάση) μεταφέρονται στον προθερμαντήρα για τη μετάβασή τους στην αέρια φάση. Το ρεύμα εξόδου του προθερμαντήρα πριν την εισαγωγή στον αντιδραστήρα αναμόρφωσης αναμιγνύεται με το ρεύμα του αέρα, δημιουργώντας ένα νέο ρεύμα, έτσι ώστε η διεργασία να γίνει αυτόθερμη.

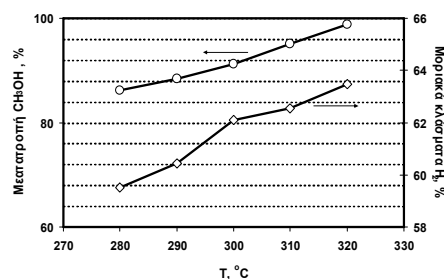
Ο αντιδραστήρας αναμόρφωσης είναι σταθερής κλίνης (fixed bed) ($L=15\text{ cm}$, $ID=10\text{ cm}$) εφοδιασμένος με καταλύτη του τύπου Cu-MnO (90.7 gr) κατάλληλου για την παραγωγή ρεύματος εξόδου από τον αντιδραστήρα αναμόρφωσης αποτελούμενου από 55-65% H_2 , 15-25% CO_2 , 12-18% N_2 , 1-3% CO επί ξηρής βάσης. Ο αντιδραστήρας εκλεκτικής οξειδωσης ($L=10\text{ cm}$, $ID=10\text{ cm}$) χρησιμοποιείται για τη μείωση της συγκέντρωσης του CO και είναι εφοδιασμένος με καταλύτη της μορφής CuO-CeO₂ (43 gr). Η κατασκευή των αντιδραστήρων και η σύνθεση των καταλυτών έγινε στο ΙΤΕ/ΕΙΧΗΜΥΘ [9,10]. Για τη μείωση της συγκέντρωσης του CO μελετήθηκε η επίδραση της παραμέτρου $\lambda=2[O_2]/[CO]$, που λαμβάνει υπόψη την στοιχειομετρική ποσότητα του O_2 που απαιτείται για την οξείδωση του CO . Η ανάλυση των ρευμάτων εξόδου των αντιδραστήρων αναμόρφωσης και εκλεκτικής οξειδωσης έγινε σε αέριο χρωματογράφο (HP-6890 Series GC System).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε μια σειρά πειραμάτων μελετήθηκε η επίδραση του λόγου W/F_{CH_3OH} για το εύρος 43.2-214.1 $\text{gr}/\text{mmol}/\text{s}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Οι λόγοι H_2O/CH_3OH και O_2/CH_3OH είναι ίσοι με 1.5 και 0.1 αντίστοιχα.



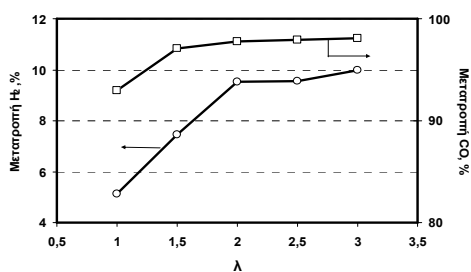
Σχήμα 1: Επίδραση του λόγου W/F_{CH_3OH} στο βαθμό μετατροπής της μεθανόλης στη θερμοκρασία των 300°C .



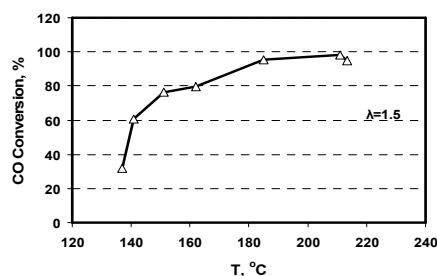
Σχήμα 2: Επίδραση της θερμοκρασίας στο βαθμό μετατροπής της μεθανόλης και στην παραγωγή του υδρογόνου (%mole).

Όπως είναι φανερό από το Σχήμα 1 κατά τη μείωση της τροφοδοσίας της μεθανόλης ο βαθμός μετατροπής αυξάνεται και για $W/F_{\text{CH}_3\text{OH}} = 214.1 \text{ gr(cat)/mmol/s}$ στη θερμοκρασία των $300 \text{ }^\circ\text{C}$ επιτυγχάνεται βαθμός μετατροπής ίσος με 95%. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη διεξαγωγή πειραμάτων όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στον βαθμό μετατροπής της μεθανόλης και στην παραγωγή του υδρογόνου. Στη θερμοκρασία των $320 \text{ }^\circ\text{C}$ επιτυγχάνεται ο μέγιστος βαθμός μετατροπής (98.9%) για $Q_{\text{CH}_3\text{OH}} = 1.013 \text{ ml/min}$. Στις ίδιες συνθήκες η μέγιστη παραγωγή υδρογόνου ανέρχεται στο 63 %.

Η σειρά των πειραμάτων για τη μείωση της συγκέντρωσης του CO πραγματοποιήθηκε στον αντιδραστήρα PROX. Μελετήθηκε η επίδραση του λόγου $\lambda = 2[\text{O}_2]/[\text{CO}]$ στη μείωση της συγκέντρωσης του CO. Η παράμετρος του λ κυμαίνεται από 1.0 έως 3.0. Στο Σχήμα 3 φαίνεται η επίδραση του λόγου λ στον βαθμό μετατροπής % του CO και του H_2 . Η απόδοση του αντιδραστήρα PROX μελετήθηκε στο θερμοκρασιακό εύρος $137\text{-}213.3^\circ\text{C}$ (Σχήμα 4). Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως αποδείχτηκε πειραματικά μειώνεται ο βαθμός απόδοσης της μετατροπής του CO και αυξάνονται οι απώλειες του H_2 .



Σχήμα 3: Επίδραση του λ στο βαθμό μετατροπής του CO, H_2 . $Q_{\text{CH}_3\text{OH}} = 1.013 \text{ ml/min}$, $T = 200.2^\circ\text{C}$.



Σχήμα 4: Επίδραση της θερμοκρασίας στο βαθμό μετατροπής του CO για $\lambda = 1.5$, $Q_{\text{CH}_3\text{OH}} = 1.013 \text{ ml/min}$, $T = 211^\circ\text{C}$.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 3 με την αύξηση της παραμέτρου λ αυξάνεται ο βαθμός μετατροπής του CO καθώς επίσης και του H_2 . Για $\lambda = 3$ επιτεύχθηκε η μέγιστη μετατροπή του CO (98%), ενώ ταυτόχρονα υπήρχαν απώλειες H_2 κατά 10%. Η βέλτιστη θερμοκρασία για τη μείωση της συγκέντρωσης του CO είναι $T = 211^\circ\text{C}$ (Σχήμα 4). Για $\lambda = 1.5$ ο βαθμός μετατροπής του CO ανέρχεται στο 98%.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΤΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ASPEN PLUS®

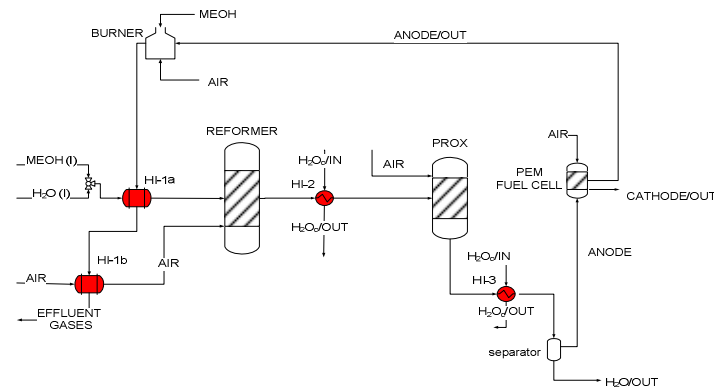
Στη συγκεκριμένη μελέτη, θα παρουσιαστούν τρεις πιθανοί τρόποι κάλυψης των θερμικών αναγκών. Οι συστάσεις των εξόδων των δύο αντιδραστήρων προσομοιώνουν τις αντίστοιχες της πραγματικής μονάδας. Παράλληλα, μέσω αναζήτησης της βιβλιογραφίας και θερμοδυναμικών υπολογισμών [8,11], βρέθηκε πως ο βέλτιστος λόγος $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_3\text{OH}$ για να επιτευχθεί χαμηλό ποσοστό CO, είναι μεταξύ 1.5-1.7. Επομένως, επιλέγοντας λόγο $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_3\text{OH}$ ίσο με 1.5, το σύστημα δεν επιβαρύνεται με μεγάλα θερμικά φορτία για την εξάτμιση του νερού (σε σχέση με μεγαλύτερους λόγους) και άρα μπορεί πλέον να προσδιορισθεί ο λόγος $\text{O}_2/\text{CH}_3\text{OH}$ που οδηγεί σε αδιαβατικές συνθήκες εντός του αντιδραστήρα αναμόρφωσης. Για τις συνθήκες λειτουργίας που εμφανίζονται παρακάτω, ο λόγος $\text{O}_2/\text{CH}_3\text{OH}$ προσδιορίστηκε στην τιμή 0.12.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΡΟΗΣ

Γενικά αναφέρεται για όλα τα διαγράμματα ροής, πως μεθανόλη και νερό αναμιγνύονται και το υγρό ρεύμα εξατμίζεται και προθερμαίνεται με χρήση των απαερίων ενός φούρνου στον εναλλάκτη HI-1a, ενώ το ίδιο ρεύμα απαερίων χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα στον εναλλάκτη HI-1b πριν την είσοδο του αντιδραστήρα αναμόρφωσης. Το ρεύμα εξόδου του αντιδραστήρα αναμόρφωσης ψύχεται στον εναλλάκτη HI-2 και εισάγεται στο δεύτερο

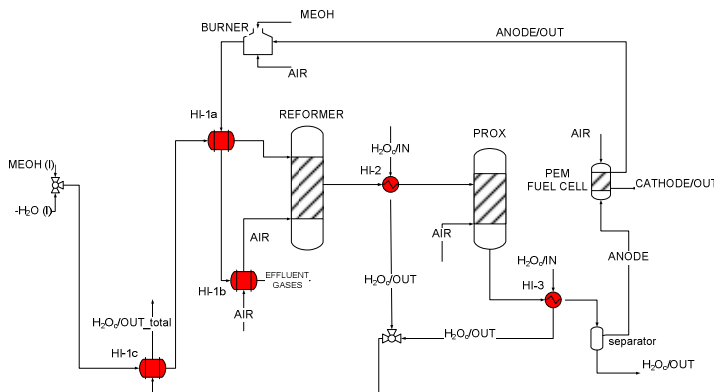
αντιδραστήρα για τη διαδικασία της εκλεκτικής οξειδωσης, όπου επίσης το ρεύμα εξόδου του αντιδραστήρα εκλεκτικής οξειδωσης ψύχεται (το νερό έχει απομακρυνθεί) στον εναλλάκτη HI-3 και εισάγεται στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου. Το μίγμα αερίων που δεν αντέδρασε στην κυψέλη καυσίμου, εισάγεται στο φούρνο, όπου επιπλέον ποσότητα μεθανόλης και αέρα χρησιμοποιείται για να δώσει την κατάλληλη θερμότητα (αέρια καύσης) που απαιτείται για την προθέρμανση των αντιδρώντων του αντιδραστήρα αναμόρφωσης. Οι θερμικές ανάγκες της κυψέλης καυσίμου δεν λαμβάνονται υπόψη σε αυτή τη μελέτη, αλλά τονίζεται πως σε μεγαλύτερες δυναμικότητες, η ψύξη της κυψέλης καυσίμου πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη. Οι συνθήκες λειτουργίας της μονάδας για την θεωρητική ανάλυση είναι: Θερμοκρασία αντιδραστήρα αναμόρφωσης 300°C, θερμοκρασία αντιδραστήρα εκλεκτικής οξειδωσης 200°C, λόγοι O₂/CH₃OH 0.12, H₂O/CH₃OH 1.5, O₂/CO 1.5 (μετατροπή CO 98% και H₂ 3%), ενώ οι συστάσεις είναι προσδιορισμένες με βάση τα πειραματικά δεδομένα. Η μετατροπή του υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου είναι 80%, όπως επιβεβαιώνεται από τις περισσότερες κατασκευαστικές εταιρίες και πειραματικά αποτελέσματα.

Το σχήμα 5 παρουσιάζει το πρώτο διάγραμμα ροής, όπου οι έξοδοι των αντιδραστήρων ψύχονται με χρήση νερού στους εναλλάκτες HI-2 και HI-3 αντίστοιχα και η προθέρμανση των αντιδρώντων πραγματοποιείται σε ένα στάδιο (HI-1a,b) με χρήση των απαερίων του φούρνου.



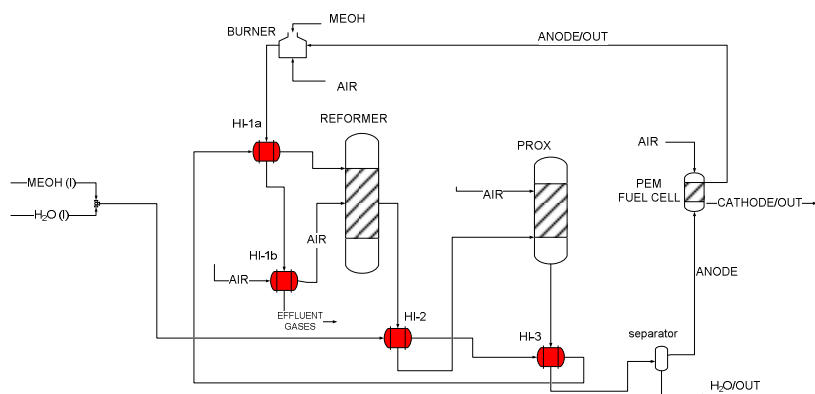
Σχήμα 5: Περιγραφή του πρώτου σεναρίου κάλυψης θερμικών αναγκών

Με στόχο τη βελτίωση του πρώτου σεναρίου, τα θερμά ρεύματα του νερού (~90-95°C) των εναλλακτών HI-2 και HI-3, αναμιγνύονται και χρησιμοποιούνται για την θέρμανση (1^ο στάδιο) του μίγματος μεθανόλη/νερό στον εναλλάκτη HI-1c, ενώ στη συνέχεια το μίγμα θερμαίνεται περαιτέρω με τα απαέρια του φούρνου σε HI-1a (Σχήμα 6).



Σχήμα 6: Περιγραφή του δευτέρου σεναρίου κάλυψης θερμικών αναγκών

Για το τρίτο σενάριο λειτουργίας, χρησιμοποιούνται τρία στάδια για την προθέρμανση των αντιδρώντων, ενώ δεν χρησιμοποιείται ψυκτικό νερό στους εναλλάκτες σε κανένα σημείο της μονάδας (Σχήμα 7). Στο πρώτο στάδιο, η θερμή έξοδος του αντιδραστήρα αναμόρφωσης χρησιμοποιείται για την προθέρμανση των αντιδρώντων στον HI-2, που στη συνέχεια θερμαίνονται περαιτέρω με την επίσης θερμή έξοδο του αντιδραστήρα εκλεκτικής οξειδωσης στον HI-3. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο, τα απαέρια του φούρνου χρησιμοποιούνται για την τελική θέρμανση στον HI-1a. Για την υλοποίηση των σεναρίων στην πράξη τονίζεται, πως στην περίπτωση που τα ρεύματα της διεργασίας που χρησιμοποιούνται για την προθέρμανση των αντιδρώντων δεν είναι διαθέσιμα (κυρίως στην έναρξη λειτουργίας της μονάδας), ο φούρνος θα λειτουργεί με περισσότερη ποσότητα μεθανόλης και αέρα, ενώ θα απαιτείται και η παρουσία εναλλακτών στα σημεία που πραγματοποιείται θερμική αξιοποίηση ρευμάτων (έξοδος αντιδραστήρων κυρίως στο τρίτο σενάριο).



Σχήμα 7: Περιγραφή του τρίτου σεναρίου κάλυψης θερμικών αναγκών

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΤΡΙΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο αντιδραστήρας αναμόρφωσης εμφανίζει μηδενικό θερμικό φορτίο (αδιαβατικές συνθήκες) και ο αντιδραστήρας εκλεκτικής οξειδωσης έκλυση θερμότητας $\sim 100\text{Watt}$. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι θερμικές απαιτήσεις για κάθε σημείο που εμφανίζεται ψύξη ή θέρμανση στα τρία σενάρια λειτουργίας και όπως παρατηρείται, η ίδια απαίτηση ψύξης για τις εξόδους των αντιδραστήρων εμφανίζεται και στα τρία σενάρια. Με τη θερμική αξιοποίηση ρευμάτων στο τρίτο σενάριο λειτουργίας, απαιτείται μικρότερο ποσό θερμότητας για την εξάτμιση και προθέρμανση του μίγματος μεθανόλη/νερό (408.6Watt) από ότι στα δύο πρώτα σενάρια (557.5 Watt).

Πίνακας 1. Θερμικές απαιτήσεις στα σημεία ψύξης/θέρμανσης της ολοκληρωμένης μονάδας για τα τρία σενάρια λειτουργίας

	1 ^ο Σενάριο	2 ^ο Σενάριο	3 ^ο Σενάριο
Q, HI-1a, Watt	557.5	408.6	408.6
Q, HI-1b, Watt	13	13	13
Q, HI-1c, Watt	-	148.8	-
Q, HI-2, Watt	67.6	67.6	67.6
Q, HI-3, Watt	81	81	81
Q, burner, Watt	3300 (εξώθερμη)	2380 (εξώθερμη)	2380 (εξώθερμη)
Q_{anode} , Watt	700	700	700
$Q_{\text{MEOH+AIR}}$, Watt	2600	1680	1680

Επιπλέον, η μικρότερη ποσότητα μεθανόλης και αέρα που είναι απαραίτητη στην είσοδο του φούρνου για το 2^ο και 3^ο σενάριο λειτουργίας (πίνακας 2) συντελεί σε μείωση κατά 28%

της απαιτούμενης συνολικά θερμότητας από τον φούρνο (πίνακας 1). Τονίζεται ότι η Q_{anode} αφορά τη θερμότητα που παράγεται από τα απαέρια που εξέρχονται από την κυψέλη καυσίμου και η $Q_{\text{MEOH+AIR}}$ τη θερμότητα από τις βοηθητικές παροχές. Όπως παρατηρείται, η Q_{anode} αντιστοιχεί στο 21% (1^ο σενάριο) και 29% (2^ο και 3^ο σενάριο) της συνολικής θερμότητας από το φούρνο.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα για τις βοηθητικές παροχές κατά τη λειτουργία των τριών πιθανών σεναρίων κάλυψης θερμικών αναγκών της μονάδας

	Φούρνος		Εναλλάκτες	
	Μεθανόλη, mol/min	Αέρας, mol/min	Νερό (H1-2), mol/min	Νερό (H1-3), mol/min
1 ^ο Σενάριο	0.288	2.7	0.78	0.9
2 ^ο Σενάριο	0.186	1.92	0.78	0.9
3 ^ο Σενάριο	0.186	1.92	-	-

Ειδικότερα, μπορεί να παρατηρηθεί πως το δεύτερο και τρίτο σενάριο λειτουργίας συντελούν σε μείωση της χρήσης της μεθανόλης κατά 35% και του αέρα κατά 29% στην είσοδο του φούρνου σε σχέση με το πρώτο σενάριο λειτουργίας. Βέβαια, το πρώτο και δεύτερο σενάριο λειτουργίας έχουν το πλεονέκτημα της λειτουργίας της μονάδας σε αναπάντεχες ενάρξεις/παύσεις της λειτουργίας (απλά αυξάνεται η ποσότητα μεθανόλης/αέρα στην είσοδο του φούρνου), ενώ το τρίτο σενάριο παρόλο που θεωρείται ως πλεονέκτημα η εξάλειψη της χρήσης του νερού, υστερεί στη λειτουργία σε περίπτωση αναπάντεχων ενάρξεων/παύσεων της μονάδας. Παρόλα αυτά όμως το πρώτο σενάριο λειτουργίας απορρίπτεται, καθώς δεν εμφανίζεται εκμετάλλευση των θερμών και ψυχρών ρευμάτων της διεργασίας με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάγκη για αυξημένη ποσότητα μεθανόλης και αέρα στην είσοδο του φούρνου και μειωμένη απόδοση λειτουργίας. Παράλληλα, μπορεί να ειπωθεί πως το τρίτο σενάριο λειτουργίας είναι το πιο αποδοτικό για τη λειτουργία μίας αυτόνομης μονάδας, εφόσον όμως εναλλάκτες θερμότητας τοποθετηθούν στην πράξη ώστε να λειτουργούν όταν δεν θα είναι διαθέσιμα τα θερμά ρεύματα της διεργασίας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη όσον αφορά στην απόδοση του αντιδραστήρα αναμόρφωσης και του αντιδραστήρα εκλεκτικής οξειδωσης. Στον αντιδραστήρα αυτόθερμης αναμόρφωσης για θερμοκρασία $T=320^{\circ}\text{C}$ παρατηρήθηκε μετατροπή της μεθανόλης κατά 98.9%. Κατά τη μελέτη του αντιδραστήρα PROX η συγκέντρωση το CO μειώθηκε στα 71ppm για $T=211^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1.5$. Ταυτόχρονα παρατηρούνται απώλειες υδρογόνου κατά 10%. Το επόμενο βήμα είναι η λειτουργία της πιλοτικής μονάδας ως ένα αυτόνομο σύστημα με την ενσωμάτωση της κυψέλης καυσίμου με τροφοδοσία του ρεύματος εξόδου του αντιδραστήρα PROX για την παραγωγή ισχύος.

Με βάση τα αποτελέσματα της σύστασης των ρευμάτων εξόδου από την πειραματική μονάδα, η προκαταρκτική ανάλυση για το σχεδιασμό της βέλτιστης κάλυψης των θερμικών αναγκών της ολοκληρωμένης μονάδας προσδιόρισε τα κυριότερα σημεία θέρμανσης και ψύξης με κύριο στόχο την ελαχιστοποίηση της χρήσης των βοηθητικών παροχών, καθώς και τη δυνατότητα αυτονομίας του συστήματος. Όπως διαπιστώθηκε, απαιτείται η παρουσία ανακυκλώσεων και θερμικών ολοκληρώσεων για την επίτευξη των στόχων, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την δυναμική ανάλυση του συστήματος στα επόμενα βήματα της μελέτης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγκεκριμένη εργασία διεξήχθη στα πλαίσια του επιχειρησιακού προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα». Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον Ερευνητή του Ι.Τ.Ε./Ε.Ι.ΧΗ.Μ.Υ.Θ Δρ. Θ. Ιωαννίδη για την κατασκευή των αντιδραστήρων και την προετοιμασία των καταλυτών καθώς και το Υπουργείο Ανάπτυξης για την οικονομική υποστήριξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Gubler L., G.G. Scherer, A. Wokaun, Phys. Chem. Chem. Phys. **3**:325 (2003).
- [2]. Kamarudin S.K., Daud W.R.W., Som A.Md., Takriff M.S., Mohammad A.W., Loke Y.K., Che. Eng. Journal. **104**:7 (2004).
- [3]. Hydrogen Energy and Fuel Cells – A Vision of our Future, Summary Report, High Level Group for Hydrogen and Fuel Cells, June 2003.
- [4]. Boettner D.D., Moran M.J.. Energy. **29**:2317 (2004).
- [5]. Barelli L., Bidini G., Gallorini F., Servili S. A review. Energy. **33**:554 (2008).
- [6]. Lindström B. and Petterson L.J, Int. J. of Hydrogen Energy. **26**:923 (2001).
- [7]. Dauenhauer P.J., Salge J.R., Schmidt L.D., J. of Catal., **244**:238 (2006).
- [8]. Ouzounidou M., Ipsakis D., Voutetakis S., Papadopoulou S. and P. Seferlis, submitted in Energy (Special Issue for PRES08), unpublished
- [9]. Avgouropoulos G., Ioannides Th., Appl. Catal. A: General. **244**:155 (2003).
- [10]. Papavasiliou J., Avgouropoulos G., Ioannides Th., Catal. Commun. **5**: 231 (2004).
- [11]. Chan S.H., Wang H.M., J. of Power Sources. **126**:8 (2004).