



Τεχνολογικό
Πανεπιστήμιο
Κύπρου

Τμήμα Χημικών
Μηχανικών

Πτυχιακή εργασία

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

Λίζα Στυλιανού, 21382

Λεμεσός, Μάιος 2024

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Πτυχιακή εργασία

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

της

Λίζας Στυλιανού

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Πέτρος Σάββα

Λεμεσός, Μάιος 2024

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Λίζα Στυλιανού, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Χημικών Μηχανικών του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Σχεδιασμός και τεχνοοικονομική μελέτη μονάδας παραγωγής πράσινου υδρογόνου» εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024 στα πλαίσια του εκπαιδευτικού προγράμματος του τμήματος Χημικών Μηχανικών του ΤΕΠΑΚ.

Σε αυτό το σημείο, εκμεταλλευόμενη την ευκαιρία θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμείωτη υποστήριξη και κατανόηση καθ' όλη τη διάρκεια της ταυτόχρονης φοίτησης μου στο τμήμα Χημικών Μηχανικών του ΤΕΠΑΚ και της εργασίας μου ως Αξιωματικός της Πολεμικής Αεροπορίας Κύπρου. Σε αυτούς οφείλω ότι έχω επιτύχει έως σήμερα, αφού η παρότρυνση και η άμεση στήριξη τους μου έδιναν δύναμη να κάνω τα όνειρα μου πραγματικότητα.

Ακόμη θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και στον κ. Πέτρο Σάββα, επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, ο οποίος μου παρείχε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα που με ενδιέφερε. Το άριστο κλίμα συνεργασίας αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για την πραγματοποίηση της εργασίας. Τον ευχαριστώ για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές, το ενδιαφέρον και το χρόνο που αφιέρωσε εγκάρδια για την επίλυση ερωτημάτων που είχαν προκύψει.

Τέλος, ευχαριστώ τον σύντροφο μου, Σωκράτη, ο οποίος δεν έπαψε ποτέ να πιστεύει σε εμένα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, οι σημαντικές επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και την ανθρώπινη υγεία οι οποίες έχουν προκληθεί από τις μη ελεγχόμενες εκπομπές αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα έχουν οδηγήσει την παγκόσμια κοινότητα στην εξεύρεση νέων μεθόδων παραγωγής ενέργειας. Το υδρογόνο αποτελεί ένα από τους πιο υποσχόμενους φορείς ενέργειας και μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Στο πρώτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του υδρογόνου. Δίνονται πληροφορίες για την χρήση του και στοιχεία κατανάλωσης του. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην Ευρωπαϊκή οδηγία για την κλιματική ουδετερότητα και περιγράφεται το πώς αναμένεται να χρησιμοποιηθεί το υδρογόνο στο μέλλον.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα είδη, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Έπειτα δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις μεθόδους παραγωγής υδρογόνου και αποθήκευσης του. Τέλος περιγράφονται οι αντλίες υδρογόνου και γίνεται αναφορά στα λεωφορεία υδρογόνου και στις μεθόδους αποθήκευσης πλεονάζουσας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση του έργου παραγωγής πράσινου υδρογόνου. Αναφέρεται η γεωγραφική θέση, υπολογίζεται η ισχύς της εγκατάστασης και υπολογίζεται η ημερήσια παραγωγή υδρογόνου της μονάδας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η οικονομική πτυχή της υλοποίησης της μονάδας παραγωγής πράσινου υδρογόνου και πραγματοποιείται μια αξιολόγηση της βιωσιμότητάς της μέσα στα πλαίσια της επιχορήγησης από Ευρωπαϊκά και κρατικά προγράμματα.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής καθώς και προτάσεις για μελλοντικές πτυχιακές εργασίες.

Λέξεις κλειδιά: Πράσινο υδρογόνο, PEM, ηλεκτρόλυση νερού, φωτοβολταϊκά συστήματα.

ABSTRACT

In recent years, significant impacts on both the environment and human health caused by uncontrolled emissions of air pollutants into the atmosphere have led the global community to seek new methods of energy production. Hydrogen is one of the most promising clean energy carriers and can significantly contribute to the improvement of air quality.

In the first chapter, a generic description of the physicochemical properties of hydrogen is presented followed by information on its use and consumption data. Reference is then made to the European directive on climate neutrality and how hydrogen is expected to be used in the future.

In the second chapter, photovoltaic systems are discussed, including their types, advantages, and disadvantages. Special emphasis is given on methods of hydrogen production and storage. Additionally, information of hydrogen pumps, hydrogen buses, and methods of storing surplus electricity generated by photovoltaic systems are presented.

The third chapter provides a detailed analysis of the green hydrogen production project, including its geographical location, the power of the installation, and the daily hydrogen production of the plant.

In the fourth chapter, the economic aspect of implementing the green hydrogen production unit is analyzed, as well as an assessment of its sustainability, particularly within the framework of funding from European and government programs.

Finally, the fifth chapter presents the conclusions of the present study, as well as proposals for further research topics.

Keywords: Green hydrogen, PEM (Proton Exchange Membrane) electrolysis, water electrolysis, photovoltaic systems.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT.....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	xi
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xiv
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά στοιχεία για το υδρογόνο	1
1.2 Χρήσεις υδρογόνου.....	4
1.3 Ευρωπαϊκές οδηγίες για την κλιματική ουδετερότητα	5
1.4 Στοιχεία κατανάλωσης.....	8
1.5 Λεωφόροι υδρογόνου	11
1.6 Πως αναμένεται να επεκταθεί η χρήση του υδρογόνου	14
2 Θεωρητικό Μέρος.....	15
2.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα	15
2.1.1 Δομή φωτοβολταϊκών πάνελ	16
2.1.2 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	17
2.1.3 Πλεονεκτήματα από τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων	18
2.1.4 Μειονεκτήματα από τη χρήση φωτοβολταϊκών:	19
2.1.5 Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων	19
2.2 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου	20
2.2.1 Αλκαλική ηλεκτρόλυση νερού (AWE):.....	22
2.2.2 Ηλεκτρόλυση τύπου πολυμερικής μεμβράνης (PEM).....	23

2.2.3	Ηλεκτρόλυση μεμβράνης ανταλλαγής ανιόντων (AEM)	24
2.2.4	Σύγκριση μεθόδων αλκαλικής ηλεκτρόλυσης, τύπου πολυμερικής μεμβράνης και ηλεκτρόλυσης του νερού με μεμβράνη ανταλλαγής ανιόντων.	25
2.3	Αποθήκευση υδρογόνου	27
2.3.1	Ως συμπιεσμένο αέριο σε κυλίνδρους υψηλής πίεσης (μέχρι 800 bar)..	29
2.3.2	Ως υγρό σε κρυογενείς δεξαμενές (21K, 2-4 bar).	30
2.3.3	Προσροφημένο σε υλικά με μεγάλη ειδική επιφάνεια	31
2.3.3.1	Ανθρακας	32
2.3.3.2	Νανოსωλήνες άνθρακα	33
2.3.3.3	Ζεόλιθοι	35
2.3.4	Ως αέριο χαμηλής πίεσης σε μέταλλα και κράματα μετάλλων.	36
2.4	Αντλίες υδρογόνου	37
2.4.1	Μηχανικοί συμπιεστές	37
2.4.1.1	Παλινδρομικοί συμπιεστές	37
2.4.1.2	Συμπιεστής διαφράγματος	39
2.4.1.3	Συμπιεστές υγρού	40
2.4.1.4	Συμπιεστές ιοντικών υγρών	41
2.4.2	Μη - μηχανικοί συμπιεστές	42
2.4.2.1	Κρυογενείς συμπιεστές	42
2.5	Λεωφορεία υδρογόνου	43
2.6	Μέθοδοι αποθήκευσης πλεονάζουσας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά για χρήση κατά τις νυχτερινές ώρες	45
3	Περιγραφή Έργου	50
3.1	Γεωγραφική θέση έργου	51
3.2	Προέλευση νερού	52
3.3	Ισχύς εγκατάστασης	53

3.3.1	Υπολογισμός αριθμού φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα τοποθετηθούν	53
3.3.1.1	Βέλτιστη γωνία κλίσης φωτοβολταϊκών πλαισίων	54
3.3.1.2	Βέλτιστη απόσταση στοιχειοσειρών	55
3.3.1.3	Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων.	56
3.3.2	Ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο	59
3.3.3	Ισχύς εγκατάστασης.....	59
3.3.4	Αριθμός εναλλάκτων	61
3.4	Παραγωγή υδρογόνου.....	61
3.5	Υπολογισμός αποθηκευόμενης ενέργειας	62
3.6	Δυναμικότητα μονάδας παραγωγής υδρογόνου	63
4	Οικονομική Ανάλυση	64
4.1	Μηχανολογικός εξοπλισμός μονάδας.....	64
4.2	Εργασίες κτιριακών εγκαταστάσεων	65
4.3	Ειδικές εγκαταστάσεις και εξοπλισμός για μέτρα ασφαλείας.....	65
4.4	Μελέτη βιωσιμότητας.....	66
4.5	Ευκαιρίες επιχορήγησης	66
5	Συμπεράσματα – Προτάσεις	69
5.1	Συμπεράσματα	69
5.2	Προτάσεις – Εισηγήσεις για μελλοντικές μελέτες.....	70
	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	71
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας I: Συγκριτικός πίνακας των τριών μεθόδων ηλεκτρόλυσης του νερού	27
Πίνακας II: Τιμές μέσης ημερήσιας και μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας (kWh/m ²) [50].	59
Πίνακας III: Μέση Μηνιαία και ετήσια παραγόμενη ενέργεια σε kWh.....	60
Πίνακας IV: Μέσος όρος παραγόμενης ενέργειας σε kWh.....	62
Πίνακας V: Κόστος μηχανολογικού εξοπλισμού μονάδας.....	64
Πίνακας VI: Κόστος κτιριακών εγκαταστάσεων.....	65
Πίνακας VII: Κόστος ειδικών εγκαταστάσεων και εξοπλισμού για μέτρα ασφαλείας..	65
Πίνακας VIII: Συνολικό κόστος δημιουργίας μονάδας παραγωγής πράσινου υδρογόνου	66

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου κατηγοριοποιημένες σε οξειδωτικές και μη οξειδωτικές διεργασίες.	2
Διάγραμμα 2: Η διαδικασία ηλεκτρόλυσης υδατικού διαλύματος για την παραγωγή υδρογόνου [4].	3
Διάγραμμα 3: Συνθετικά καύσιμα - Προέλευση τους από την ατμόσφαιρα [10].....	7
Διάγραμμα 4: Χρήση υδρογόνου ανά κατηγορία και περιοχή, από το 2019 μέχρι σήμερα και προβλέψεις μέχρι το 2050 [11]......	9
Διάγραμμα 5: Χρήση του υδρογόνου στη βιομηχανία ανά κατηγορία και περιοχή, ιστορικά και στο σενάριο μηδενικών εκπομπών το 2050 [11]......	9
Διάγραμμα 6: Χρήση του υδρογόνου στις μετακινήσεις ανά κατηγορία οχήματος και περιοχή για τα έτη 2020-2022 [11]......	10
Διάγραμμα 7: Σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου ανά περιοχή και ο λόγος των αυτοκινήτων υδρογόνου προς τους σταθμούς ανεφοδιασμού για το διάστημα 2019 - Ιούνιος 2023 [11].	11
Διάγραμμα 8: Διαμόρφωση αυτοκινήτου κυψέλης υδρογόνου [12].	12
Διάγραμμα 9: Παγκόσμιοι σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου που βρίσκονται σε λειτουργία [14]......	13
Διάγραμμα 10: Λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων [15].	16
Διάγραμμα 11: Δομή φωτοβολταϊκών πάνελ [16]......	17
Διάγραμμα 12: Βασικά στοιχεία εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συνδεδεμένης στο δίκτυο [17].	18
Διάγραμμα 13: Υβριδικό σύστημα [17].	18
Διάγραμμα 14: Παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου [21]......	21
Διάγραμμα 15: Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου [20].	22
Διάγραμμα 16: Αλκαλική ηλεκτρόλυση νερού [22]......	23
Διάγραμμα 17: Ηλεκτρόλυση τύπου πολυμερικής μεμβράνης (PEM) [22]......	24

Διάγραμμα 18: Ηλεκτρόλυση νερού με μεμβράνη ανταλλαγής ανιόντων [22].	25
Διάγραμμα 19: Μεθόδοι αποθήκευσης υδρογόνου [27].	28
Διάγραμμα 20: Κρυογενής δεξαμενή αποθήκευσης υγροποιημένου υδρογόνου [30].	31
Διάγραμμα 21: Εσωτερική δομή σωματιδίου άνθρακα [31].	32
Διάγραμμα 22: Γραφίτης και γραφένιο [30].	33
Διάγραμμα 23: Μονοφλοιώδης νανοσωλήνας άνθρακα (αριστερά) και πολυφλοιώδης νανοσωλήνας άνθρακα (δεξιά) [32].	34
Διάγραμμα 24: Α) Συμμετρική πυκνή διαμόρφωση αποθήκευσης υδρογόνου, Β) Ασύμμετρη πυκνή διαμόρφωση αποθήκευσης υδρογόνου [33].	35
Διάγραμμα 25: Κατανομή ατόμων υδρογόνου μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα ενός μετάλλου, κατά την προσρόφηση τους από αυτό [29].	37
Διάγραμμα 26: Σχηματική απεικόνιση παλινδρομικού συμπιεστή [38].	38
Διάγραμμα 27: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροστατικού συμπιεστή διαφράγματος [38].	40
Διάγραμμα 28: Σχηματική απεικόνιση υγρού συμπιεστή [38].	41
Διάγραμμα 29: Δομή συμπιεστή 5 σταδίων [37].	42
Διάγραμμα 30: Σχηματική απεικόνιση κρυογενικής συμπίεσης [38].	43
Διάγραμμα 31: Παγκόσμια χρήση λεωφορείων υδρογόνου για το έτος 2023 [40].	44
Διάγραμμα 32: Τυπικό λεωφορείο υδρογόνου: Οι δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου βρίσκονται συνήθως μπροστά και πάνω ενώ οι κυψέλες καυσίμου και το ηλεκτρικό μοτέρ στο πίσω μέρος του λεωφορείου [42].	45
Διάγραμμα 33: Διάγραμμα λειτουργίας μπαταρίας redox [44].	48
Διάγραμμα 34: Διάγραμμα ροής παραγωγής πράσινου υδρογόνου σε τεμάχια της κοινότητας Παλώδιας.	51
Διάγραμμα 35: Τοπογραφικό τεμαχίου όπου θα εγκατασταθεί η μονάδα παραγωγής πράσινου υδρογόνου.	52
Διάγραμμα 36: Σημείο τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων.	54

Διάγραμμα 37: Διάγραμμα βέλτιστου λόγου ύψους στοιχειοσειρών προς την απόστασή τους σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος [48].	55
Διάγραμμα 38: Διάγραμμα χωροθέτησης φ/β συστοιχιών σε κεκλιμένο επίπεδο [48].	55
Διάγραμμα 39: Μήκος και πλάτος στοιχειοσειρών οι οποίες απέχουν 3 μέτρα από την περίφραξη [49].	57
Διάγραμμα 40: Επιφάνεια στην οποία θα τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (κίτρινο) και διάδρομοι ανάμεσα των στοιχειοσειρών (μαύρο).	57
Διάγραμμα 41: Διάταξη των στοιχειοσειρών.	58