ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. : 38590
Αθήνα, 16/7/18

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής της Υ.Δ. **κας ΝΤΑΒΟΥ Έρικας** που εκπόνησε στον Τομέα Ρευστών, διπλωματούχος **ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ** του ΕΜΠ, η οποία θα πραγματοποιηθεί την *Τρίτη 24 Ιουλίου 2018*, ώρα *12:30μ.μ.* στην αίθουσα Τηλεδιάσκεψης 1 της Κεντρικής Βιβλιοθήκης του ΕΜΠ - Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής :

«Αριθμητική προσομοίωση και εργαστηριακός έλεγχος υβριδικού ενεργειακού συστήματος αφαλάτωσης. Διαστασιολόγηση και καθορισμός παραμέτρων για βέλτιστη λειτουργία»

Και ο Αγγλικός τίτλος ως εξής:

« **Simulation, Development and Experimental Investigation of a Hybrid energy desalination system. Dimensioning and Parameters Specification for optimum operation** »

Ο Αναπληρωτής Κοσμήτορα της Σχολής

Γ.Χ. Βοσνιάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου • ΤΗΛ.: 210-7723492, FAX: 210-7723571

Περίληψη

Ένα «υβριδικό ενεργειακό σύστημα αφαλάτωσης» είναι ένα δυναμικό σύστημα επεξεργασίας νερού που επιδεικνύει τόσο συνεχή όσο και διακριτή δυναμική συμπεριφορά, περιλαμβάνοντας ένα ευρύτερο σύνολο συστημάτων εντός της δομής του, επιτρέποντας μεγαλύτερη ευελιξία στη μοντελοποίηση δυναμικών φαινομένων. Στην παρούσα διατριβή και με σκοπό τη συμβολή στην εξελισσόμενη προσπάθεια προώθησης της έρευνας στον τομέα της αφαλάτωσης με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης συνδυασμένης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, διεξάγεται μια εκτενής έρευνα που απευθύνεται σε όλες τις βασικές πτυχές που σχετίζονται με το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία ενός υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση. Το υπό έρευνα σύστημα είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα που αποτελείται από τρείς πανομοιότυπες μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης οι οποίες θα λειτουργούν με την παραγόμενη ενέργεια από την σχεδιασμένη, κατασκευασμένη, εγκατεστημένη και ελεγμένη στα πλαίσια της παρούσας διατριβής διβάθμιας θερμικής μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine. Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προσομοιώσει και να ερευνήσει πειραματικά τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης σε μεταβλητό ενεργειακό φορτίο, σαν αυτό που προκύπτει από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως για παράδειγμα οι ηλιακοί συλλέκτες. Η διβάθμια μηχανή Rankine που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί θερμότητα για να παράξει ηλεκτρική ενέργεια βασισμένη στο θερμοδυναμικό κύκλο Rankine και η ηλεκτρική αυτή ενέργεια θα τροφοδοτεί τις μονάδες της αφαλάτωσης.

Η παρούσα έρευνα αποτελεί συνέχεια προηγούμενης ερευνητικής εργασίας που σχετιζόταν με το σχεδιασμό και την πειραματική αξιολόγηση ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης με ηλιακό Οργανικό Κύκλο Rankine για λειτουργία σε θερμοκρασιακό εύρος από 60 έως 80 °C. Το παρόν σύστημα έχει σκοπό να προχωρήσει την έρευνα ένα βήμα μπροστά αυξάνοντας το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας στους 130 °C, με τη χρήση μιας διβάθμιας μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine, για τη διερεύνηση της βελτίωσης της απόδοσης και με τη χρήση πολυβάθμιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης για λειτουργία σε ένα ευρύτερο πεδίο ενεργειακού φορτίου και την παραγωγή καθαρού νερού ακόμη και σε χαμηλό φορτίο. Οι τρεις βασικές συνιστώσες του πειραματικού συστήματος είναι: ο ηλεκτρικός θερμαντήρας ικανότητας 100 kW_{th} ο οποίος χρησιμοποιείται σαν πηγή θερμότητας προσομοιάζοντας το πεδίο των ηλιακών συλλεκτών για παράδειγμα (μεταβλητό φορτίο θερμότητας), η σχεδιασμένη και κατασκευασμένη διβάθμια μηχανή Οργανικού Κύκλου Rankine που μετατρέπει τη θερμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της εκτόνωσης ενός προηγουμένως συμπιεσμένου οργανικού ρευστού και τέλος οι τρεις όμοιες υπομονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού αντίστροφης ώσμωσης που θα δεχθούν την ηλεκτρική ενέργεια από τη μηχανή Οργανικού Κύκλου Rankine και θα παράξουν φρέσκο πόσιμο νερό από θαλασσινό για ένα ευρύ πεδίο λειτουργίας.

Η ενδελεχής προσομοίωση όλων των υποσυστημάτων οδηγεί στο λεπτομερή και προσεκτικό σχεδιασμό τους. Κατ' αρχάς, η πλέον κατάλληλη διαμόρφωση διβάθμιου Οργανικού Κύκλου Rankine αναλύεται και υιοθετείται, και το πιο αποδοτικό οργανικό ρευστό (ψυκτικό) διαλέγεται ανάμεσα σε διάφορα υποψήφια. Οι ελικωειδείς εκτονωτές (τύπου scroll) της συγκεκριμένης εφαρμογής σχεδιάζονται με ιδιαίτερη έμφαση στα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά καθώς θα προκύψουν από τροποποίηση ελικωειδών συμπιεστών. Με αυτά, ο τελικός σχεδιασμός της

μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine ολοκληρώνεται. Η προσομοίωση του θερμικού κυκλώματος επιλέγεται να γίνει με τη χρήση ενός ηλεκτρικού θερμαντήρα κατάλληλης δυναμικότητας για την εφαρμογή ενώ παράλληλα επιλέγεται και το κατάλληλο ρευστό για τη μετάδοση της θερμότητας που προκύπτει να είναι η μεθυλενογλυκόλη (MEG). Ακολουθεί ο σχεδιασμός της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης βασισμένος στην αναμενόμενη παραγωγή ενέργειας από τη μηχανή Οργανικού Κύκλου Rankine.

Όλες οι συνιστώσες των υποσυστημάτων επιλέγονται κατόπιν ενδελεχούς έρευνας και εκτίμησης και πραγματοποιείται η κατασκευή και συναρμολόγησή τους. Οι υπομονάδες της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης είναι μονάδες αφαλάτωσης ίδιας δυναμικότητας, διαθέσιμες στο εμπόριο οι οποίες εγκαθιστώνται και συνδέονται στο εργαστήριο κατάλληλα μεταξύ τους. Η μηχανή Οργανικού Κύκλου Rankine κατασκευάζεται από το μηδέν, σε κοινό πλαίσιο που περιλαμβάνει όλο τον επιλεγμένο εξοπλισμό (αντλία, ατμοποιητή, συμπυκνωτή κτλ). Ειδικά οι ελικοειδείς εκτονωτές τροποποιούνται στο μηχανουργείο από διαθέσιμους στο εμπόριο ελικοειδείς συμπιεστές ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις τις συγκεκριμένης εφαρμογής. Η εγκατάσταση ηλεκτροβάνας ανάμεσα στους δυο εκτονωτές επιτρέπει την πλήρη παράκαμψη του πρώτου εκτονωτή ώστε η μηχανή να τίθεται σε μονοβάθμια λειτουργία. Όταν και τα δυο υποσυστήματα τοποθετούνται στο εργαστήριο, το πρωτότυπο- δοκίμιο είναι έτοιμο προς διερεύνηση.

Η πειραματική αξιολόγηση ξεκινά με τον εργαστηριακό έλεγχο της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης. Οι τρεις υπομονάδες συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο και λειτουργούν σε μεταβλητό φορτίο (ρυθμίζοντας την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας υψηλής πίεσης της κάθε μιας), σε διάφορες αλατότητες νερού τροφοδοσίας προσομοιάζοντας υφάλμυρο, βαρύ υφάλμυρο και θαλασσινό νερό και σε διαφορετικές θερμοκρασίες νερού. Διεξήχθη επίσης, θεωρητική έρευνα σχετικά με τη λειτουργία της επιλεγμένης πολυβάθμιας διαμόρφωσης της μονάδας αφαλάτωσης, που τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα διαφόρων ικανοτήτων, σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου για μια τυπική χειμερινή και καλοκαιρινή ημέρα και συγκρίνεται με μια συμβατική μονοβάθμια αφαλάτωσης. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας σκοπεύουν να αποδείξουν την προσφερόμενη ευελιξία ενός τέτοιου συστήματος.

Η μηχανή Οργανικού Κύκλου Rankine που αναπτύχθηκε εξετάζεται σε ακόμη μεγαλύτερο βάθος σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας με σκοπό να αξιολογηθεί η συμπεριφορά της και η προσφερόμενη ευελιξία από τη διβάθμια διαμόρφωση. Η μηχανή εξετάζεται με ρεύμα δικτύου για χαμηλή θερμοκρασία (70 με 95°C) με νερό σαν εργαζόμενο μέσο στο θερμικό κύκλωμα για μονοβάθμια και διβάθμια λειτουργία σε μεταβαλόμενο θερμικό φορτίο ρυθμίζοντας τη συχνότητα της αντλίας και των εκτονωτών. Ακολουθεί η διερεύνηση για υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας (110 με 130 °C), με μεθυλαινογλυκόλη ως εργαζόμενο μέσο στο θερμικό κύκλωμα. Η παραγόμενη ισχύς οδηγείται σε ηλεκτρικά φρένα και καταναλίσκεται σε μια θερμική αντίσταση. Η λειτουργία των δυο εκτονωτών εξετάζεται ξεχωριστά καθώς αυτές οι συνιστώσες του συστήματος είναι τροποποιημένες και απαιτούν χάραξη των καμπυλών λειτουργίας τους για να αξιολογηθεί η συμπεριφορά τους. Τα αποτελέσματα πολυάριθμων δοκιμών σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας προσφέρουν μια πολύ ξεκάθαρη και ακριβή εικόνα της συμπεριφοράς της μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine.

Τέλος, παρουσιάζεται επίσης θεωρητική διερεύνηση του ολοκληρωμένου συστήματος της μηχανής Οργανικού Κύκλου Rankine με τη μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης, που βασίζεται στα πειραματικά αποτελέσματα των ελέγχων

κάθε υποσυστήματος που διεξήχθησαν. Η καθαρή παραγόμενη ισχύς από τη μηχανή Οργανικού Κύκλου Rankine για λειτουργία στους 120 και 130 °C (σημείο σχεδιασμού) οδηγείται στη μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με σκοπό να εξεταστεί η παραγωγή καθαρού νερού υψηλής αλατότητας και η λειτουργία των υπομονάδων.

Η διαδικασία του πλήρους σχεδιασμού, της κατασκευής και αξιολόγησης των υποσυστημάτων και του ολοκληρωμένου συστήματος ορίζει ξεκάθαρα τα πλεονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων αφαλάτωσης. Επίσης, η τεχνογνωσία που αποκτήθηκε επιτρέπει την αναγνώριση και την αποτελεσματική διαχείριση των τεχνικών θεμάτων που σχετίζονται με τέτοια συστήματα. Συμπερασματικά, το σύστημα που αναπτύχθηκε αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο πρωτότυπο που παρουσιάζει επαρκή και αποδοτική λειτουργία στις πλείστες των συνθηκών στις οποίες εκτέθηκε και ασφαλώς αποτελεί ένα εξαιρετικό εφαλτήριο για μελλοντική έρευνα στον τομέα της αφαλάτωσης νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ολοκληρώνοντας την παρούσα διατριβή, προτείνονται συστάσεις για μελλοντική έρευνα καθώς και προτάσεις για περαιτέρω ενίσχυση της αποδοτικής λειτουργίας εφαρμογών υβριδικών συστημάτων αφαλάτωσης νερού.

Summary

A "hybrid energy desalination system" refers to a dynamical water treatment system that exhibits both continuous and discrete dynamic behavior, encompassing a larger class of systems within its structure, allowing more flexibility in modeling dynamic phenomena. In the current thesis, in order to contribute to the ongoing effort for promoting research in the area of reverse osmosis desalination combined to renewable energy sources, an investigation that addresses all the main aspects related to design, manufacturing and operation of a hybrid reverse osmosis desalination system is conducted. The investigated system is an integrated system that consists of three identical seawater reverse osmosis desalination units which intend to operate with energy from a designed, developed, installed and tested in the scope of the present thesis two- stage Organic Rankine Cycle heat-to-power engine. The main target of the present dissertation is to simulate and investigate experimentally the operation of the reverse osmosis units in variable power input, as the one deriving from solar collectors or other similar renewable energy source. The developed two- stage Organic Rankine Cycle engine uses heat to produce electrical power, based on the thermodynamic Rankine cycle and this electricity is intended to feed the reverse osmosis units.

The present work is the sequel of another research that referred to the design and experimental investigation of an autonomous reverse osmosis desalination system with solar Organic Rankine Cycle engine operating at a temperature range of 60 to 80°C. The present system intents to bring the research a step forward by increasing the operation temperature range up to 130°C, using a two- stage Organic Rankine Cycle engine, in order to investigate the efficiency amelioration and with the use of three reverse osmosis desalination units, in order to operate at a wide load range and produce fresh water even at low power input. The three main components of the integrated test- rig are: the electrical heater of a capacity of 100 kW_{th} used as the thermal source simulating for instance the solar collectors' field (variable heat load), the designed and built two- stage Organic Rankine Cycle engine that convert the heat into electricity through the expansion of a previously compressed organic fluid and finally the three identical seawater reverse osmosis desalination units that will receive the electric power from the Organic Rankine Cycle engine and produce fresh potable water from water of high salinity in a wide operational range.

A thorough simulation of all the sub- units of the integrated system leads to the detailed and careful design of each sub- system. First, the two- stage most appropriate configuration of the Organic Rankine Cycle engine is analyzed and adopted and the most efficient organic fluid (refrigerant) is selected among several candidates. The scroll expanders for the current application are carefully designed as they will be manufactured by scroll compressors' modification, and the whole Organic Rankine Cycle Engine design is finalized. The heat cycle simulation is selected to be an electric heater of appropriate capacity for the current application and the heat transfer fluid is thoroughly investigated resulting in Methylene Glycol (MEG) to be the most suitable and efficient. The reverse osmosis unit layout is then specified based on the expected power production of the Organic Rankine Cycle Engine.

All the components of each sub- system are then carefully selected and the construction and assembly of each one is realized. The reverse osmosis sub- units are market available desalination units of the same capacity and they are connected accordingly at the laboratory. The Organic Rankine Cycle engine is constructed from scratch on a common skid, including all the selected equipment (pump, evaporator, condenser etc.). Especially the scroll expanders are modified in a machine shop from market available scroll compressors in order to suit the current engine requirements. An electro- valve installed in between their connection, permits the by- pass of the first expander in order for the engine to operate at single- stage mode. When both sub- systems are installed at the laboratory, the test rig is ready for investigation.

The experimental evaluation starts with the experimental testing of the reverse osmosis desalination unit. The three sub- units operate connected to the grid, for different power input (by regulating the high-pressure pump's rotational speed), in different water salinities simulating brackish, heavy brackish and seawater quality and in different water temperatures. Case- studies of the operation of the developed reverse osmosis desalination unit consisting of several sub- units, powered by a PV system of different capacities in different locations for winter and summer and the comparison to a conventional single unit are also examined. The results of these studies intend to verify the offered flexibility of such a system.

The constructed Organic Rankine Cycle engine is then thoroughly tested in many different operation conditions in order to evaluate its performance and offered flexibility of the two- stage configuration. The engine is tested connected to the grid for low operating temperature (70 to 95°C) with water as the heat transfer fluid for single and two- stage operation in several thermal power input values, regulated by the pump's and expander(s)'s rotational speed. Then, an investigation for higher operating temperatures (110 to 130 °C) with MEG on the heat cycle is conducted. The power produced is driven to electric brakes and consumed on a thermal resistance. The two scroll expanders' operation is separately evaluated since these components are modified and require the plotting of operation curves for reference purposes. The results of multiple tests in different operation conditions provide a very clear and precise picture of the Organic Rankine Cycle engine performance.

Finally, a theoretical investigation of the integrated system operation based on the experimental results of the sub- systems is also presented. The net power production of the Organic Rankine Cycle engine both in single and two- stage operation at 120 and 130 °C (design point) is driven to the RO unit in order to examine the fresh water production from high feed water salinity and the sub-units' operation.

The complete design, construction and evaluation procedure of the sub- systems and the integrated system clearly defines the advantages of hybrid desalination systems. Moreover, the know- how gained permits the recognition and effective treatment of the technical aspects associated with such systems. Overall, the system developed is a very promising prototype which presents a sufficient and efficient operation under most of the operation conditions it is exposed to, and it is certainly an excellent springboard for further research in the field of water desalination through renewable energy sources. Recommendations for future research are provided as well as suggestions to further enhance the efficient operation of the hybrid desalination applications.