



ΕΘΝΙΚΟ  
ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. : 10343  
Αθήνα 25/2/25

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Π ρ ο ς  
τα μέλη ΔΕΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

### Π Ρ Ο Σ Κ Λ Η Σ Η

Παρακαλείστε να παρευρεθείτε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής που εκπόνησε στον Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ ο Υποψήφιος Διδάκτορας κ. ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΗΣ Αντώνιος του Δημοσθένη, διπλωματούχος της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Παρασκευή 7 Μαρτίου 2025 και ώρα 11:30 - 14:30 δια ζώσης στο Αμφιθέατρο Πολυμέσων του κτηρίου Βιβλιοθήκης του ΕΜΠ με δυνατότητα και διαδικτυακής μετάδοσης.

Ο τίτλος της διδακτορικής του διατριβής είναι:

Στην ελληνική γλώσσα:

«Ανάπτυξη και πειραματική διερεύνηση καινοτόμων και πλήρως αυτοματοποιημένων συστημάτων αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας/οργανικού κύκλου Rankine για τριπαραγωγή και αποθήκευση ενέργειας»

Στην αγγλική γλώσσα:

«Development and experimental investigation of innovative fully automated reversible heat pump/organic Rankine cycle systems for trigeneration and energy storage»

Ο Κοσμήτορας  
  
Ι. Αντωνιάδης  
Καθηγητής ΕΜΠ

## Summary

The increasing penetration of renewable power generation into the global energy mix, coupled with the significant demand for heating (both space heating and domestic hot water) and cooling, necessitates the electrification of the heating and cooling sectors alongside advancements in electricity storage solutions. Concurrently, the rising electricity demand gives prominence to decentralized power production for electricity self-consumption. Within the framework of heat pumps emerging adoption, reversible heat pump/ORC (RHP/ORC) systems constitute a promising technology to address these objectives, as both thermal (heating or cooling) and electrical power can be provided by a single system.

In energy storage applications, the RHP/ORC system utilizes excess renewable electricity to generate and store high-temperature heat through heat pump operation. During peak electricity demand periods, this stored heat is discharged via ORC operation, facilitating peak shaving services. Regarding trigeneration, the system functions as a heat pump for heating or cooling provision when thermal demand exists, while low-grade heat (below 120 °C) can be converted into electricity when power is requested.

Despite the theoretical advantages highlighted in literature, experimental research is scarce, particularly in energy storage. Moreover, reported RHP/ORC systems are mainly experimental and therefore employ basic automation and control. In this perspective, the present thesis investigates the development of innovative, fully automated reversible heat pump/organic Rankine cycle systems for energy storage and trigeneration applications.

The first part of the thesis (Chapter 2) centers on the experimental characterization of the first known proof of concept of RHP/ORC for electricity storage. The 2 kW<sub>e</sub>/10 kWh<sub>th</sub> prototype was designed and built by the Thermodynamics Laboratory of the University of Liège, Belgium. The system underwent testing in both charging and discharging modes, exploring the effect of low-grade heat integration across a wide range of operating conditions. The experimental evaluation confirmed the feasibility of thermally integrated RHP/ORC technology for pumped thermal energy storage, achieving a power-to-power efficiency of 70.9%, thanks to thermal integration, which enabled high efficiency in heat pump mode, reaching a maximum coefficient of performance (COP) of 14.2 at a temperature lift of 8 K.

The second part of the thesis focuses on the development of fully automated RHP/ORC trigeneration systems for integration with multiple heat sources and heat sinks, including an adsorption chiller for improved cooling performance.

The initial step towards this direction involves the development of a small-scale vapor compression chiller utilizing the environmentally friendly refrigerant R1234ze(E) to validate the suitability of the selected refrigerant for low-capacity cooling outputs and demonstrate the feasibility of cascade coupling with an adsorption chiller (Chapter 3). The chiller was tested under different heat sink conditions, simulating both cascade and stand-alone chiller operation. Overall, the system exhibited stable performance, successfully mitigating fluctuations associated with the adsorption chiller, and achieved a maximum energy efficiency ratio (EER) of 5.9.

After verifying the validity of cascade chiller operation, two fully automated small-scale (5 kW<sub>th</sub>/1 kW<sub>e</sub>) RHP/ORC trigeneration prototypes were designed and constructed. Chapter 4 introduces the system's design specifications and emphasizes the design process and automation and control features. Subsequently, laboratory tests were conducted to characterize the system in all operating modes, including stand-alone heat pump, cascade chiller and ORC modes (Chapter 5). Maximum heating and cooling outputs of 6.6 kW and 5.5 kW were recorded, with respective COP and EER values of 5.1 and 4.5, while adsorption chiller integration enhanced EER to 5.5 under moderate heat sink temperatures. In ORC mode, net electrical ORC efficiencies up to 2.65% were attained. A dedicated analysis highlighted the

importance of induction motor sizing for efficient compressor and expander operation in all modes, whereas a cavitation assessment revealed a correlation between cavitation and subcooling degree, specifying a lower subcooling threshold of 5 K for stable pump operation.

Fully automated RHP/ORC operation necessitates proper switching between all operating modes. However, the different refrigerant charge required in each case poses a major challenge. This issue is addressed in Chapter 6 with the development of a novel, automated active charge regulation system that dynamically controls system's refrigerant charge based on a dedicated charge control strategy. This configuration was embedded into the RHP/ORC prototypes, and experimental investigation of the integrated system demonstrated its effectiveness in facilitating smooth mode transitions and stable system operation.

The comprehensive investigation of the RHP/ORC prototypes entails field testing within an extended renewables-based trigeneration system. In this context, an automated pilot system integrating multiple renewable thermal systems such as evacuated tube solar collectors, a biomass boiler, and an adsorption chiller was developed, along with a low energy demand pilot building where heating, cooling, and electricity are provided. Chapter 7 presents the design and structure of the overall system and details the automation architecture and control strategy.

The complete system was evaluated over a four-month timeframe and the key operating modes are discussed in Chapter 8. The global system successfully met its design specifications, covering all thermal demands. The experimental evaluation showcased the seamless integration and operation of all subsystems under the supervisory controller. Focusing on the RHP/ORC, sufficient performance was achieved with a seasonal COP (SCOP) and seasonal EER (SEER) of 3.23 and 2.98, respectively, while cascade chiller operation exhibited limited benefits under high ambient temperatures.

Finally, Chapter 9 presents simulations of a scaled-up global system for multi-family buildings across five European cities, using calibrated models based on laboratory and field test data. The simulation outcomes include the optimal system sizing in each case and highlight its potential, achieving total energy coverage of up to 72.1% in locations with high heating demands and low cooling needs. However, despite its advantages, the system's electricity generation is limited due to the prioritization of thermal demands, indicating the need for alternative layouts and control strategies for its further uptake.

In summary, this research provides a comprehensive, experimental overview of RHP/ORC systems for both energy storage and trigeneration and establishes experimentally validated control strategies and charge regulation techniques for their full automation. The main conclusions of the present thesis and future work recommendations are summarized in Chapter 10.

## Σύνοψη

Η αυξανόμενη διείσδυση της ανανεώσιμης παραγωγής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα, σε συνδυασμό με τη σημαντική ζήτηση για θέρμανση χώρου, ζεστό νερό χρήσης και ψύξη, καθιστά αναγκαίο τον εξηλεκτρισμό τους, παράλληλα με προηγμένες λύσεις αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Συγχρόνως, η αυξανόμενη ηλεκτρική κατανάλωση αναδεικνύει την αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για ιδιοκατανάλωση. Στο πλαίσιο της επεκτεινόμενης χρήσης των αντλιών θερμότητας, τα συστήματα αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας/οργανικού κύκλου Rankine (RHP/ORC) αποτελούν μια υποσχόμενη τεχνολογία για την επίτευξη αυτών των στόχων, χάρη στη συνδυασμένη παραγωγή θερμικής, ψυκτικής και ηλεκτρικής ενέργειας από ένα μόνο σύστημα.

Σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, το σύστημα RHP/ORC εκμεταλλεύεται την πλεονάζουσα ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή και αποθήκευση θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας μέσω λειτουργίας αντλίας θερμότητας. Κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, αυτή η αποθηκευμένη θερμότητα αξιοποιείται μέσω λειτουργίας ORC για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Στην περίπτωση της τριπαραγωγής, το σύστημα λειτουργεί ως αντλία θερμότητας για την παροχή θέρμανσης ή ψύξης όταν υπάρχει θερμική ζήτηση, ενώ θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας (κάτω από 120 °C) μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια όταν υφίσταται σχετική απαίτηση.

Παρά τα θεωρητικά πλεονεκτήματα που επισημαίνονται στη βιβλιογραφία, η πειραματική έρευνα είναι περιορισμένη, ιδιαίτερα στο πεδίο της αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, τα αναφερόμενα συστήματα RHP/ORC είναι κυρίως πειραματικά και επομένως εφαρμόζουν βασικές διατάξεις αυτοματισμού και ελέγχου. Υπό αυτό το πρίσμα, η παρούσα διατριβή διερευνά την ανάπτυξη καινοτόμων, πλήρως αυτοματοποιημένων συστημάτων αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας/οργανικού κύκλου Rankine για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας και τριπαραγωγής.

Το πρώτο μέρος της διατριβής (Κεφάλαιο 2) επικεντρώνεται στον πειραματικό χαρακτηρισμό του πρώτου πειραματικού συστήματος RHP/ORC για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρωτότυπο σύστημα (2 kW<sub>e</sub>/10 kWh<sub>th</sub>) σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το Εργαστήριο Θερμοδυναμικής του Πανεπιστημίου της Λιέγης στο Βέλγιο. Το σύστημα υποβλήθηκε σε δοκιμές τόσο σε λειτουργία φόρτισης (αντλία θερμότητας) όσο και εκφόρτισης (ORC), διερευνώντας την επίδραση της επιπρόσθετης αξιοποίησης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (θερμική ενσωμάτωση) σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Η πειραματική αξιολόγηση επιβεβαίωσε τη λειτουργικότητα του συστήματος RHP/ORC για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω θερμότητας, επιτυγχάνοντας λόγο απόδοσης 70.9%, χάρη στην θερμική ενσωμάτωση, η οποία επέτρεψε αποδοτική λειτουργία αντλίας θερμότητας, με μέγιστο συντελεστή απόδοσης (COP) ίσο με 14.2 για θερμοκρασιακή ανύψωση 8 K.

Το δεύτερο μέρος της διατριβής επικεντρώνεται στην ανάπτυξη πλήρως αυτοματοποιημένων συστημάτων RHP/ORC για τριπαραγωγή, για την αξιοποίηση πολλαπλών πηγών πρόσδοσης και απόρριψης θερμότητας, συμπεριλαμβανομένου ενός ψύκτη προσρόφησης για βελτιωμένη ψυκτική λειτουργία.

Το αρχικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός ψύκτη μηχανικής συμπίεσης ατμών μικρής κλίμακας με εργαζόμενο μέσο το φιλικό προς το περιβάλλον οργανικό ρευστό R1234ze(E). Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η επικύρωση της καταλληλότητας του επιλεγμένου ψυκτικού μέσου για την παραγωγή ψύξης σε χαμηλή κλίμακα και η επιβεβαίωση της λειτουργικότητας της σειριακής σύνδεσης (cascade) με τον ψύκτη προσρόφησης (Κεφάλαιο 3). Ο ψύκτης δοκιμάστηκε κάτω από διαφορετικές συνθήκες απόρριψης θερμότητας, προσομοιώνοντας τόσο τη μεμονωμένη λειτουργία όσο και τη συνδυασμένη λειτουργία με τον ψύκτη προσρόφησης. Συμπερασματικά, το σύστημα παρουσίασε σταθερή λειτουργία, αποσβένοντας μεταβατικά φαινόμενα που σχετίζονται με τον ψύκτη προσρόφησης, και πέτυχε μέγιστο δείκτη ενεργειακής απόδοσης (EER) ίσο με 5.9.

Αφότου επιβεβαιώθηκε η λειτουργικότητα της συνδυασμένης ψυκτικής διάταξης, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός και η κατασκευή δύο πλήρως αυτοματοποιημένων πρωτότυπων συστημάτων RHP/ORC μικρής κλίμακας ( $5 \text{ kW}_{\text{th}}/1 \text{ kW}_{\text{e}}$ ) για τριπαραγωγή. Στο Κεφάλαιο 4 ορίζονται οι προδιαγραφές σχεδιασμού του συστήματος και αναλύονται η διαδικασία σχεδιασμού και τα χαρακτηριστικά του συστήματος αυτομάτου ελέγχου. Στη συνέχεια, διεξήχθησαν εργαστηριακές δοκιμές για τον χαρακτηρισμό του συστήματος σε όλες τις λειτουργίες, όπως μεμονωμένη λειτουργία αντλίας θερμότητας, συνδυασμένη ψυκτική λειτουργία με ψύκτη προσρόφησης και λειτουργία ORC (Κεφάλαιο 5). Αναφορικά με τη λειτουργία αντλίας θερμότητας, το σύστημα απέδωσε έως  $6.6 \text{ kW}$  θερμικής και  $5.5 \text{ kW}$  ψυκτικής ισχύος, με αντίστοιχες τιμές COP και EER 5.1 και 4.5, ενώ η ενσωμάτωσή του ψύκτη προσρόφησης αύξησε τον EER σε 5.5 υπό ενδιάμεσες θερμοκρασίες απόρριψης θερμότητας. Σε λειτουργία ORC, επιτεύχθηκε μέγιστος καθαρός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης ίσος με 2.65%. Περαιτέρω διερεύνηση ανέδειξε τη σπουδαιότητα της σωστής διαστασιολόγησης του κινητήρα για την αποδοτική λειτουργία του συμπιεστή και του εκτονωτή σε όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας, ενώ ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σχετικά με τη σπηλαιώση της ογκομετρικής αντλίας του ORC ανέδειξε τη συσχέτιση μεταξύ της σπηλαιώσης και του βαθμού υπόψυξης στην είσοδο της αντλίας, προσδιορίζοντας ένα κατώτερο όριο υπόψυξης  $5 \text{ K}$  για την ευσταθή λειτουργία της αντλίας.

Η πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία του αντιστρεπτού συστήματος απαιτεί ομαλές εναλλαγές μεταξύ λειτουργίας αντλίας θερμότητας και ORC. Ωστόσο, η διαφορετική ποσότητα ψυκτικού μέσου που απαιτείται σε κάθε περίπτωση δυσχεραίνει αυτή τη μετάβαση. Αυτό το ζήτημα αντιμετωπίζεται στο Κεφάλαιο 6 με την ανάπτυξη ενός καινοτόμου, αυτοματοποιημένου ενεργητικού συστήματος που ρυθμίζει δυναμικά την ποσότητα του ψυκτικού μέσου εντός του συστήματος, βάσει εξειδικευμένης στρατηγικής ελέγχου. Αυτή η διάταξη ενσωματώθηκε στα πρωτότυπα RHP/ORC συστήματα και η πειραματική διερεύνηση του ολοκληρωμένου συστήματος απέδειξε την αποτελεσματικότητά της με την εξασφάλιση ομαλών εναλλαγών λειτουργίας και ευσταθούς συμπεριφοράς του συστήματος.

Επιπρόσθετα, η διερεύνηση των πρωτότυπων συστημάτων περιλαμβάνει δοκιμές υπό πραγματικές συνθήκες εντός ενός ευρύτερου συστήματος τριπαραγωγής με βάση ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο, αναπτύχθηκε ένα αυτοματοποιημένο πιλοτικό σύστημα που ενσωματώνει πολλαπλά ανανεώσιμα θερμικά συστήματα, όπως ηλιακούς συλλέκτες κενού, λέβητα βιομάζας και ψύκτη προσρόφησης, καθώς και ένα πιλοτικό κτίριο χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης στο οποίο παρέχονται η παραγόμενη θέρμανση, ψύξη και ηλεκτρική ενέργεια. Ο σχεδιασμός και η δομή αυτού του συστήματος παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7, σε συνδυασμό με την περιγραφή του συστήματος αυτοματισμού και της στρατηγικής ελέγχου του συστήματος.

Το ολοκληρωμένο σύστημα δοκιμάστηκε για τέσσερις μήνες και τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται στο Κεφάλαιο 8. Οι προδιαγραφές σχεδιασμού επιτεύχθηκαν, με την κάλυψη του συνόλου των θερμικών απαιτήσεων. Η πειραματική αξιολόγηση ανέδειξε την ομαλή ενσωμάτωση και λειτουργία όλων των υποσυστημάτων υπό το συνολικό σύστημα ελέγχου. Εστιάζοντας στο σύστημα RHP/ORC, σημειώθηκε ικανοποιητική λειτουργία με εποχιακό συντελεστή απόδοσης (SCOP) 3.23 και εποχιακό δείκτη ενεργειακής απόδοσης (SEER) 2.98, ενώ η συνδυαστική λειτουργία με τον ψύκτη προσρόφησης παρουσίασε περιορισμένα οφέλη υπό υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 9, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις του συνολικού συστήματος για πολυκατοικίες σε πέντε ευρωπαϊκές πόλεις, χρησιμοποιώντας βαθμονομημένα μοντέλα με βάση τις εργαστηριακές και πιλοτικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης περιλαμβάνουν τη βέλτιστη διαστασιολόγηση του συστήματος σε κάθε περίπτωση και αναδεικνύουν την προοπτική του, επιτυγχάνοντας συνολική ενεργειακή κάλυψη έως 72.1% σε τοποθεσίες με υψηλές απαιτήσεις σε θέρμανση και χαμηλές ανάγκες ψύξης. Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματά του, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος είναι περιορισμένη λόγω της προτεραιότητας που δίνεται στην κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων,

υποδεικνύοντας έτσι την ανάγκη για εναλλακτικές διατάξεις και στρατηγικές ελέγχου για την περαιτέρω υιοθέτησή του.

Συνοψίζοντας, η παρούσα έρευνα παρέχει μια εκτενή, πειραματική επισκόπηση συστημάτων RHP/ORC τόσο για αποθήκευση ενέργειας όσο και για τριπαραγωγή και ορίζει πειραματικά διακριβωμένες στρατηγικές ελέγχου και τεχνικές ρύθμισης της ποσότητας του εργαζόμενου μέσου για την πλήρη αυτοματοποίησή τους. Τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας διατριβής και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα συνοψίζονται στο Κεφάλαιο 10.