



Α.Π. : 20800  
Αθήνα, 22/5/2020

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

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

### ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του **Υ.Δ. κ. ΠΑΛΛΗ Πλάτωνα**, κατόχου Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού, την οποία εκπόνησε στον Τομέα **Θερμότητας**. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Τρίτη 2 Ιουνίου 2020, ώρα 12:00 το μεσημέρι με τηλεδιάσκεψη. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής :

*«Πειραματική Διερεύνηση και οικονομική αξιολόγηση πλήρως αυτοματοποιημένης μονάδας Οργανικού Κύκλου Rankine για εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας από το κύκλωμα ψύξης ναυτικού κινητήρα »*

Και ο Αγγλικός ως εξής:

*«Experimental investigation and economic assessment of a fully automated ORC for waste heat recovery from marine engine jacket cooling water»*

Ο Κοσμήτορας της Σχολής

**N. Μαρμαράς**  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

## Περίληψη

Η χρήση ενέργειας σε ένα εμπορικό πλοίο καλύπτει τις ανάγκες κυρίως για την πρόωσή του και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα συστήματά του, οι οποίες καλύπτονται εξ ολοκλήρου από ειδικά σχεδιασμένους ναυτικούς κινητήρες ντίζελ (κύριους και βοηθητικούς αντίστοιχα). Σε μεγάλα πλοία, το κόστος καυσίμου αποτελεί περίπου το 30-55% του συνολικού λειτουργικού κόστους, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου. Υπάρχουν ισχυρά κίνητρα στον τομέα της ναυτιλίας για τη μείωση του κόστους καυσίμου και τη συμμόρφωση με όλο και πιο αυστηρότερους κανονισμούς απόδοσης. Παρόλο που η τεχνολογία πετρελαιοκινητήρων είναι πολύ αποδοτική, οι μεγάλοι ναυτικοί κινητήρες ντίζελ θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλοι για σύνδεσή τους με ένα σύστημα αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας (Waste Heat Recovery, WHR), καθώς ο κινητήρας απορρίπτει μεγάλο μέρος της χημικής ενέργειας καυσίμου στο περιβάλλον, κυρίως μέσω των καυσαερίων (έως 27% της χημικής ενέργειας καυσίμου) και μέσω του νερού ψύξης του χιτωνίου του (έως και 25% της χημικής ενέργειας καυσίμου). Λόγω των παραπάνω, η παρούσα διατριβή επικεντρώθηκε στην αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας κινητήρων εσωτερικής καύσης και πιο συγκεκριμένα από το κύκλωμα νερού ψύξης του χιτωνίου. Η εργασία επικεντρώθηκε στην κατασκευή, την πειραματική αξιολόγηση και την πλήρη αυτοματοποίηση ενός συστήματος αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας με τη χρήση οργανικού κύκλου Rankine, ειδικά σχεδιασμένο για το κύκλωμα ψύξης του χιτωνίου ενός ναυτικού βοηθητικού πετρελαιοκινητήρα.

Στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζεται μια γενική επισκόπηση του κλάδου της ναυτιλίας. Επιπλέον, περιγράφεται το υφιστάμενο και το μελλοντικό κανονιστικό πλαίσιο, καθώς είναι ζωτικής σημασίας οι ενδιαφερόμενοι να έχουν μια σαφή άποψη προκειμένου να λάβουν τις σωστές επιχειρηματικές αποφάσεις. Επίσης, παρουσιάζονται όλοι οι σημαντικοί παγκόσμιοι και περιφερειακοί κανονισμοί που θα επηρεάσουν τη ναυτιλία τις επόμενες δεκαετίες. Επιπλέον, γίνεται ειδική αναφορά στην κατάσταση των εκπομπών από τη ναυτιλία. Τέλος, γίνεται μια ολοκληρωμένη περιγραφή των τεχνολογικών εξελίξεων, προκειμένου να μετριάσουν οι απώλειες ενέργειας και να βελτιωθεί η συνολική απόδοση ενός πλοίου. Υπό το φως όλων των προαναφερθέντων, συζητείται ο σκοπός και οι στόχοι της παρούσας μελέτης, η οποία είναι η ανάκτηση θερμότητας από κινητήρες εσωτερικής καύσης και πιο συγκεκριμένα από το κύκλωμα νερού ψύξης του χιτωνίου.

Στο Κεφάλαιο 2, δίδεται η περιγραφή όλου του επιμέρους εξοπλισμού που συνθέτει την πρώτη έκδοση της εργαστηριακής εγκατάστασης οργανικού κύκλου Rankine. Η επιλογή όλων των επιμέρους εξαρτημάτων, που συνθέτουν την εργαστηριακή εγκατάσταση οργανικού κύκλου Rankine, τεκμηριώνεται με βάση παραμέτρους όπως η χωρητικότητα / ισχύ, η απόδοση, το υλικό κατασκευής ή οποιουσδήποτε άλλος ειδικός όρος / περιορισμός. Παρουσιάζονται όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά για κάθε επιμέρους εξοπλισμό / εξάρτημα.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που διενεργήθηκαν σε δύο χρονικές περιόδους / καμπάνιες. Επίσης, επισημαίνονται, η σημαντική γνώση που αποκομίσθηκε σχετικά με τη συμπεριφορά, τις παραμέτρους που επηρεάζουν (π.χ. φαινόμενα σπηλαίωσης στην τροφοδοτική αντλία εργαζόμενου μέσου, την απόδοση των εκτονωτών και την επίδραση της υπερθέρμανσης και της υποψύξης) αλλά και βελτιώσεις που θα αυξήσουν τη συνολική απόδοση του συστήματος οργανικού κύκλου Rankine. Τεκμηριώνεται η σημασία της απόδοσης της

τροφοδοτικής αντλίας και της λειτουργίας χωρίς φαινόμενα σπηλαιώσης, ειδικά για μονάδες οργανικού κύκλου Rankine μικρής κλίμακας. Ως αποτελέσματα της 2<sup>ης</sup> πειραματικής εκστρατείας, συνοψίζονται αρκετά σημαντικά συμπεράσματα. Ειδικά σχεδιασμένες δοκιμές σπηλαιώσης αποκάλυψαν ότι ένα καθαρό ύψος κεφαλής αναρρόφησης (available Net Positive Suction Head, NPSHa) μεγαλύτερο από 7 mH<sub>2</sub>O σε μερικό φορτίο και ένα καθαρό ύψος κεφαλής αναρρόφησης (available Net Positive Suction Head, NPSHa) μεγαλύτερο από 9 mH<sub>2</sub>O σε πλήρες φορτίο είναι απαραίτητα για τη διασφάλιση της σταθερότητας λειτουργίας της εγκατάστασης. Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του εκτονωτή, ο εκτονωτής απαιτείται να λειτουργεί με τις υψηλότερες δυνατές ταχύτητες περιστροφής. Τα αποτελέσματα των πειραματικών εκστρατειών, έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία εξέλιξης της στρατηγικής ελέγχου και αυτοματισμού της εγκατάστασης που πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια και περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η τελική ανάπτυξη του πρωτοτύπου συστήματος αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας με τη χρήση οργανικού κύκλου Rankine. Περιγράφονται όλες οι απαιτούμενες ενέργειες για τη λειτουργία του πρωτοτύπου συστήματος αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας με τη χρήση οργανικού κύκλου Rankine σε πραγματικό μηχανοστάσιο ως αυτόνομη εγκατάσταση χωρίς φυσική επίβλεψη. Πιο συγκεκριμένα, η εκτίμηση επικινδυνότητας / κινδύνου, η εκτεταμένη ανακατασκευή και των τριών κυκλωμάτων (θερμό νερό, εργαζόμενο μέσο, θαλασσινό νερό), πλήρως λειτουργικός αυτοματισμός & έλεγχος, η εγκατάσταση πλατφόρμας διεπαφής ανθρώπου-μηχανής (Human Machine Interface, H.M.I.), πιστοποιητικό συμμόρφωσης με τους κανόνες του νηογνώμονα DNV GL για εγκατάσταση σε πλοία (DNVGL rules for ships Pt.4 Cr.6 piping systems), είναι τα πιο σημαντικά. Τέλος, επιδεικνύονται τα εντυπωσιακά λειτουργικά χαρακτηριστικά του ναυτικού πρωτοτύπου συστήματος αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας με τη χρήση οργανικού κύκλου Rankine, όπως η αυτόνομη εκκίνηση και τερματισμός λειτουργίας και η επιτυχημένη συμπεριφορά σε συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου / θερμοκρασίας του νερού ψύξης του χιτωνίου (ως προσομοίωση της μεταβολής φορτίου μιας ναυτικής μηχανής εσωτερικής καύσης). Τέλος, παρουσιάζονται οι τρέχουσες εξελίξεις συστημάτων αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας με τη χρήση οργανικού κύκλου Rankine για ναυτικές εφαρμογές. Ενώ παρουσιάζεται συνοπτικά μια ανασκόπηση σε θεωρητικό, ερευνητικό και εμπορικό επίπεδο.

Στο Κεφάλαιο 5, αξιολογείται η οικονομική απόδοση και η βιωσιμότητα ενός συστήματος αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας με τη χρήση οργανικού κύκλου Rankine. Εξετάζεται μια επιδεικτική εφαρμογή που αποτελείται από ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (13.6000 TEU, Twenty-foot Equivalent Unit), το οποίο κινείται από δίχρονο ναυτικό κινητήρα ντίζελ με μέγιστη ισχύς (Maximum Continuous Rating, MCR) 72,240 kW. Αξιολογούνται δύο εναλλακτικές θαλάσσιες διαδρομές και εκτιμάται η καθαρή ηλεκτρική ισχύς αλλά και η συνολική καθαρή ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια του έτους που παράγεται από το σύστημα αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας με τη χρήση οργανικού κύκλου Rankine. Επίσης, υπολογίζονται διάφοροι οικονομικοί δείκτες, όπως η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης, το ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy, LCOE) του συστήματος αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας με τη χρήση οργανικού κύκλου Rankine. Τέλος, στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης ευαισθησίας, αξιολογούνται οι παράμετροι που επηρεάζουν τους οικονομικούς δείκτες και κατ'επέκταση τις οικονομικές επιδόσεις, όπως οι ώρες λειτουργίας, το επιτόκιο αναγωγής και το κεφάλαιο επένδυσης.

Στο τελευταίο κεφάλαιο 6, αναφέρονται τα κύρια συμπεράσματα και επιτεύγματα της παρούσας διατριβής, ακολουθούμενα από τις καινοτόμες πτυχές της. Στην τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου, παρέχονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική εργασία.

## Summary

The energetic consumption of a commercial ship mainly consists of propulsion and internal consumption electricity needs, which are entirely covered by specially designed marine diesel engines (main and auxiliary respectively). For large ships, the fuel expenses constitute about 30-55% of the total operational costs, depending on the type of vessel. Strong motivation exists within the marine sector to reduce fuel expenses and to comply with even stricter efficiency regulations. Although, the Diesel process is highly efficient, large marine diesel engines are particularly well suited to be coupled with a WHR system, as the engine loses a large part of the fuel energy to the environment, mainly with the exhaust gases (up to 27% of the input energy) and the jacket water (up to 25% of the input energy). In this perspective, the present work focused on the recovery of heat from the internal combustion marine engines and more specifically from their jacket water cooling circuit. This research focused on the construction, experimental evaluation and full automation of an ORC WHR system, specially designed for the jacket water of a marine auxiliary diesel engine.

In Chapter 1, a general overview of the ship industry is presented. In addition, the existing and future regulatory framework is described, since it is crucial to have a clear view in order to assist stakeholders to make the right business decisions. All major global and regional regulations that will impact on shipping in the coming decades are also presented. Furthermore, special reference is made on the status of emissions from shipping. Finally, a comprehensive description of technological developments is made, in order to mitigate energy losses and improve overall performance. In light of all previous mentioned, the scope and objectives of the present study are discussed which is the recovery of heat from the internal combustion marine engines and more specifically from their jacket water cooling circuit.

In Chapter 2, the description of all components consisting the first version of the experimental Organic Rankine Cycle test rig is given. The selection of all components, compiling the experimental ORC system, is justified in regards to capacity /power, performance, material or any other special conditions / restrictions. All technical characteristics are presented, for each component.

In Chapter 3, the results of the two experimental campaigns are presented. Significant knowledge on the behavior, influencing parameters (i.e. cavitation phenomena on the ORC feed pump, the performance of the scroll expanders and the effect of superheating and subcooling) and improvements that would increase the overall performance of the ORC system are highlighted. The importance of the feed pump performance and free cavitation operation is justified, especially for small scale ORC units. As a result of the 2<sup>nd</sup> experimental campaign, several important conclusions are summarized. Specific cavitation tests revealed that a  $NPSH_a > 7 \text{ mH}_2\text{O}$  at partial load and a  $NPSH_a > 9 \text{ mH}_2\text{O}$  at full load are necessary to guarantee operation stability. Another important conclusion is, in order to maximize expander's isentropic efficiency, that the expander is required to operate at the highest possible rotational speeds. The results of experimental campaigns, played an important role in the evolution process of the automation & control strategy which was realized in the following chapter.

In Chapter 4, the final development of the WHR ORC prototype is presented. All required actions so as to operate the experimental ORC prototype in a real engine room as a standalone facility without any physical supervision are described. Namely, hazard / risk assessment, extensive reconstruction of all three circuits (hot water, working fluid, sea water), fully functional automation & control, Human

Machine Interface in corporation, certificate of compliance to DNVGL rules for ships Pt.4 Cp.6 piping systems, are the most important ones. Finally, marine ORC prototype's impressive operational features such as autonomous startup and shut down and a successful rump down and rump up behavior during the HT temperature variation (ICE load variation) are demonstrated. Finally, the current status of Organic Rankine Cycle marine applications is presented. A theoretical, research and market based review is described, briefly.

In Chapter 5, the economic performance and viability of a jacket water WHR ORC unit is assessed. A show case is examined which consists of a 13,6000 TEU containership, which is powered by a two-stroke marine Diesel engine with a Maximum Continuous Rating (MCR) of a 72,240 kW. Two alternative sea routes are evaluated and the electrical output and the total net electrical energy over the year are estimated, respectively. Ultimately, several economic indexes, such as Net Present Value of investment, Internal Rate of Return, Levelized Cost of Energy (LCOE) of the WHR ORC unit are calculated. Finally, in the frames of a comprehensive sensitivity analysis, parameters affecting the economic indexes and thus the economic performance, such as running hours, interest rate and capital investment, are evaluated.

In final Chapter 6, the main conclusions and achievements of the present thesis are briefly mentioned, followed by its innovative aspects. In the last section of this chapter, some recommendations for future work are provided.