



Α.Π. : 47398  
Αθήνα, 19/9/19

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

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

### ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. κ. Γ. Δόγκα του Δημητρίου, διπλωματούχου του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ, την οποία εκπόνησε στον Τομέα **Θερμότητας**. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Πέμπτη 26 Σεπτεμβρίου 2019, ώρα 12:00 το μεσημέρι στην αίθουσα Σεμιναρίων στο Υπόγειο των Εργαστηρίων του Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών - Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής :

«Θερμοδυναμική Ανάλυση Θερμαντλιών Vuilleumier»

και ο Αγγλικός Τίτλος ως εξής:

«Thermodynamic Analysis of Vuilleumier Heat Pumps»

Ο Κοσμήτορας της Σχολής



Ν. Μαρμαράς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

## ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΑΝΤΛΙΩΝ VUILLEUMIER

Οι αντλίες θερμότητας Vuilleumier είναι μηχανές οι οποίες λειτουργούν χρησιμοποιώντας θερμότητα σε υψηλή θερμοκρασία σαν πηγή ενέργειας και αντλούν θερμότητα από χαμηλή θερμοκρασία προς μία μέτρια. Η διακύμανση της πίεσης του εργαζόμενου αερίου πραγματοποιείται χωρίς την κατανάλωση έργου, αλλά θερμικά. Οι μηχανές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση και ψύξη κτηρίων ή για ψύξη σε πολύ χαμηλές (κρυογονικές) θερμοκρασίες.

Η εξέλιξη των μηχανών Vuilleumier γίνεται διαρκώς από την πρώτη πατέντα του Rudolph Vuilleumier το 1918 και σκοπό έχει την σχεδίαση αποδοτικών αντλιών θερμότητας και κρυογονικών ψυκτών. Αρχικά, η έρευνα πραγματοποιούταν στις ΗΠΑ για την παραγωγή κρυογονικών ψυκτών για διαστημικές εφαρμογές. Αργότερα, η έρευνα επικεντρώθηκε σε θερμαντλίες Vuilleumier για κτήρια και πολλές πειραματικές μονάδες κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν. Παρόλο που πολλά πρωτότυπα έχουν σχεδιαστεί όλα αυτά τα χρόνια, οι μηχανές Vuilleumier ακόμα παρουσιάζουν χαμηλή θερμική ισχύ για τον όγκο τους λόγω έμφυτων θερμοδυναμικών και αεροδυναμικών απωλειών. Είναι απαραίτητη μία ακριβής περιγραφή και η κατανόηση αυτών των πολύπλοκων φαινομένων προκειμένου να κατασκευαστούν ανταγωνιστικές μηχανές για σύγχρονες εφαρμογές.

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται τα θεμελιώδη τμήματα των αναγεννητικών μηχανών, ο θερμικός και ο μηχανικός συμπιεστής οι οποίοι αν συνδυαστούν σχηματίζουν μια αντλία θερμότητας Stirling. Έπειτα, εξηγείται η λειτουργία της ίδιας μηχανής Stirling σαν εργοπαραγωγός, σαν θερμαντλία ή σαν ψύκτης και ακολουθεί παρουσίαση της ένωσης μεταξύ δύο μηχανών Stirling για τον σχηματισμό θερμαντλίας που λειτουργεί με θερμότητα, παρόμοια με την μηχανή Vuilleumier. Παρουσιάζονται επιπλέον αρκετές διαμορφώσεις και τύποι μηχανών Vuilleumier, μαζί με την λειτουργία τους και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Ακόμα, πραγματοποιήθηκε μία εκτενής παρουσίαση της εξέλιξης των μηχανών Vuilleumier από την πρώτη πατέντα μέχρι σήμερα. Αναφέρονται όλες οι διαθέσιμες εργασίες, πατέντες, βιβλία και αναφορές τόσο για θερμαντλίες όσο και για κρυογονικούς ψύκτες. Το έργο κάθε ερευνητή συζητείται σύντομα. Η θεωρητική ή πειραματική επίδοση διαφόρων κρυογονικών ψυκτών και θερμαντλιών Vuilleumier συνοψίζεται σε πίνακες καθώς επίσης και όλες οι σχετικές με μηχανές Vuilleumier αμερικανικές πατέντες.

Έπειτα, παρουσιάζονται οι τύποι υπάρχοντων μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των επιδόσεων κινητήρων Stirling μαζί με μονοδιάστατα θερμοδυναμικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διατριβής ειδικά για μηχανές Vuilleumier. Στην αρχή, παρουσιάζεται η ανάπτυξη του ιδανικού ισοθερμοκρασιακού μοντέλου. Ακολουθεί, το ιδανικό αδιαβατικό μοντέλο και ο θερμοδυναμικός χωρισμός της μηχανής σε όγκους ελέγχου όπου έργο μετατρέπεται σε θερμότητα και αντίστροφα. Στην συνέχεια συζητείται η εφαρμογή αυτού του μοντέλου σε πραγματικές μηχανές καθώς και τα αποτελέσματα από μία σύγκριση μεταξύ των δύο ιδανικών μοντέλων. Περιλαμβάνεται επίσης η περιγραφή πολλών απωλειών που εμφανίζονται σε μηχανές Vuilleumier και η φυσική πίσω από την παραγωγή εξισώσεων που υπολογίζουν τις τιμές των απωλειών. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία τεκμηρίωση του κώδικα υπολογιστή που αναπτύχθηκε σύμφωνα με τα θερμοδυναμικά μοντέλα μέσω σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα.

Επιπλέον, έγινε μία πλήρης τριδιάστατη CFD (Computational Fluid Dynamics) προσομοίωση μιας μηχανής Vuilleumier που σχεδιάστηκε για αυτόν τον σκοπό, σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες λειτουργίας. Αρχικά, παρουσιάζονται οι υπάρχουσες CFD εργασίες πάνω σε κινητήρες Stirling και έπειτα μία αναλυτική περιγραφή της σχεδιασμένης μηχανής, των συνοριακών συνθηκών που εφαρμόστηκαν, του υπολογιστικού πλέγματος και όλων των εξισώσεων που χρειάστηκαν για την δημιουργία του αριθμητικού μοντέλου. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικό λογισμικό CFD. Τα αποτελέσματα της

προσομοίωσης παρουσιάζονται στην συνέχεια και παρέχουν λεπτομέρειες για την κατανομή θερμοδυναμικών και ρευστομηχανικών μεγεθών σε κάθε χώρο της μηχανής καθώς και της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Δίνονται ακόμα χρήσιμες τριδιάστατες αναπαραστάσεις της θερμοκρασίας, της πίεσης και της ταχύτητας. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της μεταφοράς θερμότητας και έργου μεταξύ της μηχανής και του περιβάλλοντος και για τις τρεις ταχύτητες λειτουργίας. Στην συνέχεια, παρήχθησαν συντελεστές μεταφοράς θερμότητας σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds της ροής. Τέλος, η απόδοση της σχεδιασμένης μηχανής Vuilleumier υπολογίστηκε και συγκρίθηκε με πειραματικά δεδομένα.

## THEMODYNAMIC ANALYSIS OF VUILLEUMIER HEAT PUMPS

Vuilleumier heat pumps are machines that operate using heat at high temperature as energy input and they pump heat from a low to a moderate temperature level. The pressure fluctuation of the working gas is realized without the use of work, but thermally. They can be used for building heating and cooling or as refrigerators at very low (cryogenic) temperatures.

The development of the Vuilleumier machines has been an ongoing process since the first patent of Rudolph Vuilleumier in 1918, aiming at the design of efficiently operating heat pumps and cryogenic refrigerators. At first, the research was performed in USA for the production of cryogenic refrigerators for space use. Later, the research was focused on Vuilleumier heat pumps for buildings and many experimental units were built and tested. Although many prototypes have been designed during all these years, Vuilleumier machines still exhibit low volumetric specific heat power due to inherent thermodynamic and aerodynamic losses. An accurate description and understanding of these complicated phenomena is required in order to build competitive machines for modern applications.

In the present PhD thesis, the fundamental parts of regenerative machines, the thermal and mechanical compressor are presented, which coupled form a Stirling heat pump. Then, the operation of the same Stirling machine as a prime mover, as a heat pump or as a refrigerator is explained and it follows a presentation of the connection between two Stirling machines to form a heat actuated heat pump like a Vuilleumier machine. Several configurations and types of the Vuilleumier machines are presented together with their operation and their benefits and disadvantages.

Furthermore, an extensive presentation of the evolution of Vuilleumier machines from their first patent until now is conducted. All available studies, patents, books and reports are cited for both heat pumps and cryogenic refrigerators and the work of each researcher is briefly discussed. The theoretical or experimental performance of various Vuilleumier cryogenic refrigerators and heat pumps is summarized in corresponding tables and also all the Vuilleumier related US patents.

Next, the types of existing models that are used for the prediction of the performance of Stirling engines are presented together with one-dimensional thermodynamic models generated, in the context of this dissertation, especially for Vuilleumier machines. At first, the development of the ideal isothermal model is presented. It follows the ideal adiabatic model and the thermodynamic segmentation of the machine into work-heat converting control volumes. Then the application of this model on real machines is discussed and the results of a comparison between the two ideal models are also presented. It is included in addition, the description of several losses inherent in a Vuilleumier machine and the physics behind the derivation of equations that calculate their values. Finally, a validation of the developed computer codes according to the thermodynamic models is conducted by comparison with experimental data.

Moreover, there is a comprehensive three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of a Vuilleumier machine that was designed for this purpose at three different operating speeds. At first, existing CFD studies on Stirling engines are presented and then there is an analytical description of the designed machine, the boundary conditions applied, the computational grid used and all the equations that were utilized for the generation of this numerical model. For the simulation, a commercial CFD software was used. The results from the simulation are presented next, providing details about the thermodynamic and fluid mechanics quantities distribution in every space of the machine and the interaction between them. Useful 3D illustrations of the temperature, the pressure and the velocity are given too. Moreover, calculation of heat and work transfer between the machine and the surrounding is performed for all three speeds. Then, heat transfer coefficients are derived in relationship with the Reynolds number of the flow. Finally, the efficiency of the designed Vuilleumier machine is calculated and it is compared against experimental data.