



## Κοινοπραξία έργου

Ανάπτυξη Θερμικής Μηχανής  
Βασισμένης στον Τριγωνικό  
Κύκλο (TFC) για  
μεγιστοποίηση της απόδοσης  
μετατροπής θερμότητας σε  
ηλεκτρισμό από  
χαμηλής θερμοκρασίας  
απορριπτόμενη θερμότητα



**CERTH**  
CENTRE FOR  
RESEARCH & TECHNOLOGY  
HELLAS



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS



**ΗΛΕΚΤΩΡ**  
ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΤΟΥ ΟΜΛΟΓΟΥ ΕΛΛΑΔΑΚΤΩΡ



Marine Refrigeration & Air Conditioning



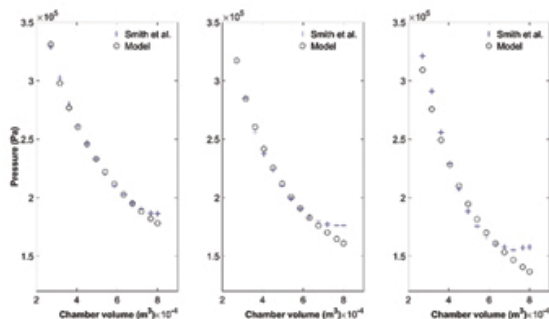
Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Διαρθρωτικό  
και Επενδυτικό Ταμείο

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ  
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑΣ  
ΕΣΠΑ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΣΠΑ & ΤΕ  
ΕΘΝ. ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΣΠΑΣ

ΕΠΑΝΕΚ 2014-2020  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ

ΕΣΠΑ  
2014-2020  
ανάπτυξη - εργασία - αλληλεγγύη

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



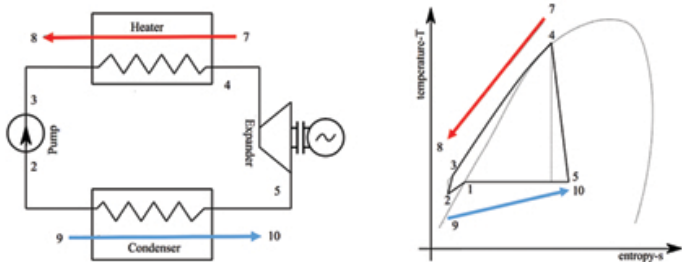
## Βασικά στοιχεία του έργου

Το ερευνητικό έργο TRI-MAX έχει ως κύριο αντικείμενο την ανάπτυξη, κατασκευή και πειραματική αξιολόγηση σε πραγματικό περιβάλλον μιας θερμικής μηχανής που βασίζεται στον Τριγωνικό Κύκλο (Trilateral Flash Cycle, TFC), ο οποίος αποτελεί κύκλο παραγωγής ισχύος εκμεταλλευόμενος απορριπτόμενη θερμότητα. Ο TFC αποτελείται από τα ίδια επιμέρους τμήματα με τον ORC, με βασική διαφορά την διεργασία της ατμοποίησης που λαμβάνει χώρα σε κατάσταση κορεσμένου υγρού και αντιστοιχεί στη διεργασία προθέρμανσης του ORC. Η εκτόνωση του οργανικού ρευστού από την κατάσταση κορεσμού συνοδεύεται από ακαριαία αλλαγή φάσης (flashing process), μειώνοντας σημαντικά τις αναντιστρεπτότητες της ενδιάμεσης διαδικασίας.

Ο σχεδιασμός του κύκλου θα πραγματοποιηθεί για χαμηλές λειτουργίες (ως 130 °C), ενώ η παραγόμενη ισχύς του κύκλου αναμένεται να είναι 10-15 kW. Στόχος του ερευνητικού έργου αποτελεί η βελτίωση της απόδοσης μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική έως και 20% σε σχέση με τις κλασικές τεχνολογίες ORC που χρησιμοποιούνται σήμερα και έχουν χαμηλές αποδόσεις για ανάκτηση θερμότητας πηγών χαμηλών θερμοκρασιών (5-6%). Αυτός ο στόχος θα επιτευχθεί, αξιοποιώντας δύο βασικά χαρακτηριστικά του TFC, ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του κύκλου σύμφωνα με τον 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Νόμο:

- Αποφυγή της διεργασίας ισοθερμοκρασιακής ατμοποίησης.
- Προσαρμογή του σημείου ανάσχεσης (pinch-point) κατά την θέρμανση του ρευστού.

Αρχικά αποτελέσματα κατά την μοντελοποίηση της διφασικής εκτόνωσης και του κύκλου. Στα πλαίσια του έργου αναπτύχθηκε θερμοδυναμικό μοντέλο προσομοίωσης της διφασικής εκτόνωσης σε εκτονωτή τύπου twin screw. Το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί για την μελέτη της διφασικής εκτόνωσης σε όλους τους τύπους ογκομετρικών εκτονωτών όπως φαίνεται στη παρακάτω σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διάφορες συνθήκες λειτουργίας εκτονωτή τύπου twin screw.



Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στο εργαλείο Aspen plus και μελετήθηκαν τόσο συμβατικά (HFCs) όσο και τέταρτης γενιάς (HFOs) χαμηλού περιβαλλοντικού αντικτύπου ψυκτικά. Συγκεκριμένα αξιολογήθηκαν τα HFO-1234yf, HFO-1234ze(E), HFO-1233zd(E), HFC-245fa και HFC-245fa, ως προς τα:

- Παραχθέν έργο του τριγωνικού κύκλου
- Παραχθέν έργο του εκτονωτή του τριγωνικού κύκλου
- Θερμικός βαθμός απόδοσης βάσει του εκτονωτή
- Θερμικός βαθμός απόδοσης του τριγωνικού κύκλου
- Εκτίμηση επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας εναλλάκτη
- UA του εναλλάκτη
- Βαθμός εξεργειακής απόδοσης του τριγωνικού κύκλου
- Βαθμός εξεργειακής απόδοσης ανά επιμέρους στοιχείο του τριγωνικού κύκλου
- Ενδεικτικός δείκτης βιωσιμότητας του κύκλου
- Καταστροφή εξεργειας

Τα HFOs απέδειξαν είτε καλύτερες είτε ανταγωνιστικές και παραπλήσιες επιδόσεις με τα HFCs. Συγκεκριμένα για τα HFO-1234yf και HFO-1234ze(E) σημειώθηκαν τιμές έργου στον εκτονωτή ίσες με 18,6 kW και 16 kW αντίστοιχα.

## Επόμενοι στόχοι

Οι επιμέρους στόχοι που αναμένεται να επιτευχθούν προς την ολοκλήρωση του ερευνητικού έργου είναι:

- Βελτιστοποίηση υπολογιστικού εργαλείου προσομοίωσης διφασικής εκτόνωσης ώστε να εκτιμηθεί συστηματικά η επίδρασή του φαινομένου στην απόδοση της μηχανής TFC.
- Ανάλυση των επί μέρους διεργασιών του κύκλου ισχύος με στόχο την βέλτιστη διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων της μηχανής TFC. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στην επιλογή τύπου και μεγέθους εκτονωτή κατάλληλου να ανταποκριθεί σε μεταβαλλόμενα θερμικά φορτία.
- Λεπτομερής σχεδιασμός της μηχανής TFC με ονομαστική ισχύ 10-15 kW και δοκιμαστική της λειτουργία.
- Βελτιστοποίηση γεωμετρικής διάταξης επιμέρους συσκευών του κύκλου μέσω EDR προσομοιώσεων
- Εργαστηριακές πειραματικές δοκιμές για τη λειτουργία του συστήματος.
- Δοκιμές της μηχανής σε πραγματικό περιβάλλον.
- Τεχνοοικονομική αξιολόγηση του κύκλου TFC και συγκριτική ανάλυση με ανταγωνιστικές τεχνολογίες.

## Εταίροι του έργου

Το πρόγραμμα «Ανάπτυξη Θερμικής Μηχανής Βασισμένης στον Τριγωνικό Κύκλο(TFC) για μεγιστοποίηση της απόδοσης μετατροπής θερμότητας σε ηλεκτρισμό από χαμηλής θερμοκρασίας απορριπτόμενη θερμότητα» (TRI-MAX – Κωδικός έργου: T2ΕΔΚ-00351) έχει λάβει χρηματοδότηση από τη Δράση Εθνικής Εμβέλειας «Ερευνά-Δημιουργώ- Καινοτομώ» του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα- Επιχειρηματικότητα- Καινοτομία» (ΕΠΙΛΕΚ 2014-2020)