



## Σχεδιασμός και κατασκευή συστήματος τριπαραγωγής με αξιοποίηση βιομάζας και εφαρμογή των τεχνολογιών ORC και VCC

Κωνσταντίνος Μπραϊμάκης<sup>α</sup>, Τρύφων Ρουμπεδάκης<sup>α</sup>, Στέφανος Κωστούλας<sup>α</sup>, Σωτήριος Καρέλλας<sup>α</sup>

<sup>α</sup>Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου, 15780, Ελλάδα

### Περίληψη

Το έργο BioTRIC συνίσταται στο σχεδιασμό και την κατασκευή ενός καινοτόμου συστήματος βιο-τριπαραγωγής μέσω της συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρισμού, θέρμανσης και ψύξης με αξιοποίηση της βιομάζας. Το σύστημα βασίζεται στη συνδυασμένη λειτουργία ενός υπερκρίσιμου κύκλου Rankine Οργανικού Μέσου (ORC) κι ενός ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμού (VCC), οι οποίοι συνδέονται μέσω ενός κοινού συμπυκνωτή. Στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας γίνεται αναλυτική περιγραφή του συστήματος με τα υποσυστήματα που το απαρτίζουν ενώ παρουσιάζονται οι θερμοδυναμικές αρχές λειτουργίας του. Κατόπιν, γίνεται η περιγραφή του υπολογιστικού μοντέλου που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση των δύο κύκλων και του ολοκληρωμένου συστήματος καθώς και η διαδικασία θερμοδυναμικής βελτιστοποίησής του με στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσής του. Η βελτιστοποίηση αφορά αφενός τον προσδιορισμό των βασικών θερμοδυναμικών παραμέτρων (πιέσεις, θερμοκρασίες) λειτουργίας του συστήματος και την εκλογή του κατάλληλου οργανικού ρευστού που χρησιμοποιείται σαν εργαζόμενο μέσο στην εγκατάσταση, το οποίο και είναι το ψυκτικό R227ea. Στο τρίτο μέρος της εργασίας, παρουσιάζεται η διαδικασία εκλογής του κατάλληλου μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του συστήματος, με την παράθεση των τεχνικών προδιαγραφών των βασικών επιμέρους στοιχείων του.

**Λέξεις-κλειδιά:** τριπαραγωγή, ORC, VCC, βιομάζα, υπερκρίσιμος κύκλος, πειραματική εγκατάσταση



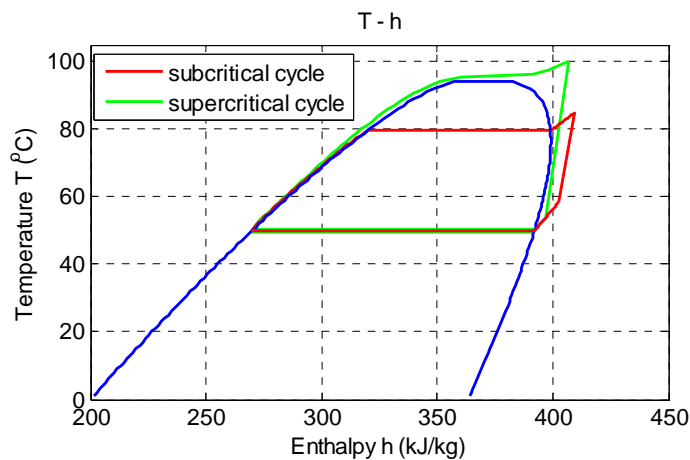
## 1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον έχει δοθεί σε συστήματα πολυπαραγωγής που αποσκοπούν στη μετατροπή μίας πρωτογενούς ενεργειακής πηγής (ορυκτά καύσιμα, ηλιακή ακτινοβολία, απορριπτόμενη θερμότητα) σε ηλεκτρική ενέργεια, ψύξη και θέρμανση. Αυτή η τάση υπαγορεύεται εν μέρει από το γεγονός ότι τα παραδοσιακά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής έχουν περιορισμένο βαθμό απόδοσης –περί το 30-40 % (Cho, Mago et al., 2009, Martins, Fábrega et al., 2012)-, με αποτέλεσμα μια μεγάλη ποσότητα της αρχικής θερμότητας να απορρίπτεται στο περιβάλλον ανεκμετάλλευτη. Παράλληλα, λόγω των παγκοσμίως ακολουθούμενων πολιτικών προκειμένου να αυξηθεί η συνολική απόδοση των διαφόρων ενεργειακών συστημάτων και να περιοριστούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHGs), ιδιαίτερη προσοχή εστιάζεται στο σχεδιασμό οικονομικά ανταγωνιστικών συστημάτων συμπαραγωγής και συνδυασμένης ψύξης, θέρμανσης και παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Σε αυτό το πλαίσιο, έχουν έρθει στο προσκήνιο μικρής-οικιακής κλίμακας συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής που αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς έχουν τη δυνατότητα να συνεισφέρουν στη μείωση των εκπομπών, εξασφαλίζοντας παράλληλα βιωσιμότητα και ανεξαρτησία από εξωτερικές ενεργειακές πηγές και ορυκτά καύσιμα.

Ο κύκλος Rankine οργανικού μέσου (ORC) είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία στο πεδίο της παραγωγής ενέργειας από πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η γεωθερμία και η απορριπτόμενη θερμότητα. Ο συμβατικός κύκλος Rankine νερού-ατμού, ο οποίος βρίσκει εφαρμογή στους παραδοσιακούς θερμικούς σταθμούς υψηλής θερμοκρασίας δεν προτείνεται για εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας και μικρής κλίμακας (Rayegan and Tao, 2011). Για αυτού του είδους τις εφαρμογές, ο ORC παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τον κύκλο νερού-ατμού, όπως η δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας λόγω του χαμηλού σημείου βρασμού των οργανικών εργαζόμενων μέσων, το μικρότερο μέγεθος -και συνεπώς το χαμηλότερο κόστος- του εξοπλισμού καθώς και τη χρησιμοποίηση μηχανών εκτόνωσης που μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Quoilin, Broek et al., 2013). Επιπλέον, λόγω της θετικής κλίσης της καμπύλης κορεσμένου ατμού στο διάγραμμα T-s μεγάλου πλήθους οργανικών ουσιών, είναι δυνατή η χρήση τους χωρίς να είναι αναγκαία η υπερθέρμανσή τους (Pei, Li et al., 2010), καθώς η εκτόνωσή τους διεξάγεται στη μονοφασική περιοχή του υπέρθερμου ατμού.

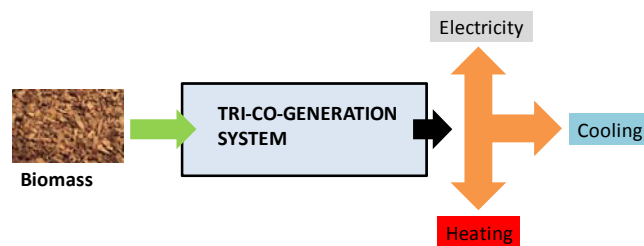
Στον υπερκρίσιμο ORC, το εργαζόμενο μέσο συμπιέζεται σε υπερκρίσιμη πίεση πριν εισέλθει στον εναλλάκτη ατμοποίησής του. Έτσι, αντί της σταδιακής ατμοποίησής του και μετάβασης από την υγρή στην αέρια φάση, το εργαζόμενο μέσο μετατρέπεται σε υπερκρίσιμο ρευστό όταν η θερμοκρασία του υπερβεί την κρίσιμη τιμή της (**Σχήμα 1**) (Roumpedakis, Braimakis et al., 2015). Η υπερκρίσιμη λειτουργία έχει

παρατηρηθεί πως μπορεί να αυξήσει το θερμικό και τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος (Mikielewicz and Mikielewicz, 2010, Schuster, Karellas et al., 2010, Vetter, Wiemer et al., 2013).



Σχήμα 1 Υποκρίσιμος και υπερκρίσιμος κύκλος ORC

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην υπολογιστική μοντελοποίηση και την πειραματική διερεύνηση μιας εγκατάστασης του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, η οποία συνδυάζει τις τεχνολογικές τάσεις που περιγράφηκαν. Η εγκατάσταση αποτελείται από έναν υπερκρίσιμο ORC ο οποίος βρίσκεται σε σύζευξη με έναν κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμού (VCC) μέσω ενός κοινού συμπυκνωτή. Η θερμότητα παρέχεται στην εγκατάσταση με ένα λέβητα βιομάζας. Τα δύο υποσυστήματα έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρισμό, ψύξη και θέρμανση, όπως μπορεί να φανεί και στο απλοποιημένο **Σχήμα 2**.



Σχήμα 2 Απλοποιημένο σχήμα της εγκατάστασης ORC-VCC



## 2. Περιγραφή του συστήματος

Το υπό μελέτη και κατασκευή σύστημα αποτελείται από τρία κύρια υποσυστήματα, το υποσύστημα ORC, το υποσύστημα VCC καθώς και το κύκλωμα λέβητα βιομάζας-θερμικού ελαίου που προσδίδει θερμότητα στον ORC.

### 2.1. Τα υποσυστήματα ORC και VCC

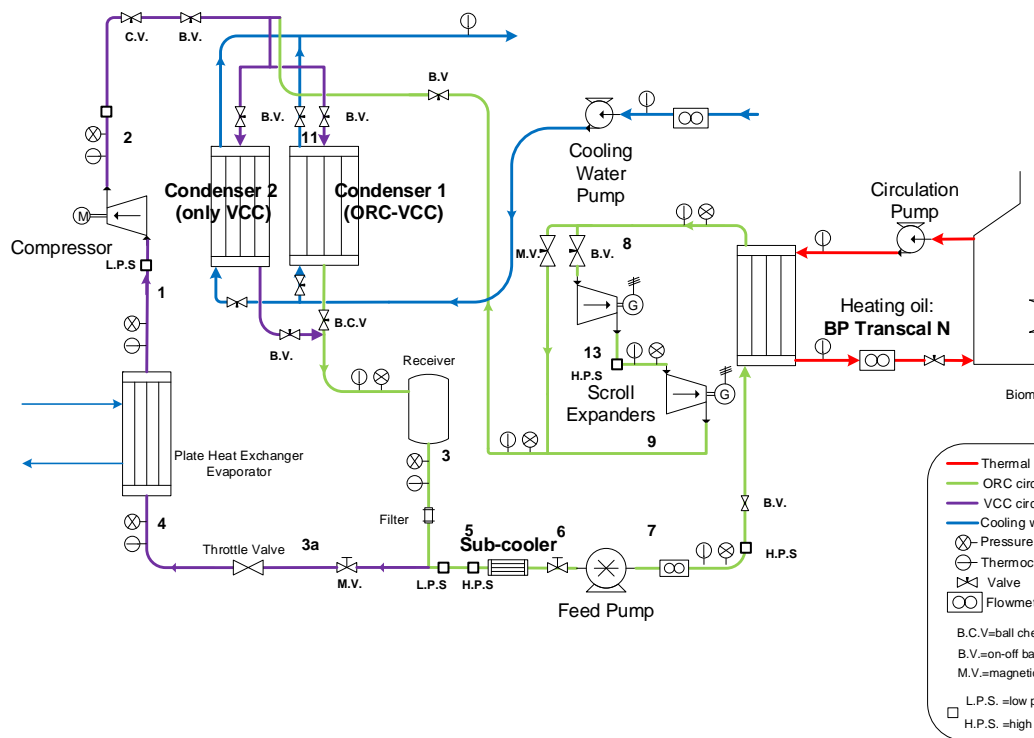
Τα συστήματα ORC και VCC είναι συνδεδεμένα έχοντας ένα κοινό συμπυκνωτή και διαρρέονται από το ίδιο εργαζόμενο μέσο. Ο ORC περιλαμβάνει την αντλία καθώς και διάφορους εναλλάκτες θερμότητας, για τη θέρμανση ή την ψύξη του εργαζόμενου μέσου. Η αντλία συμπιέζει το εργαζόμενο μέσο στη μέγιστη, υπερκρίσιμη πίεση λειτουργίας. Δύο εκτονωτές σε σύνδεση εν σειρά χρησιμοποιούνται για την εκτόνωση του οργανικού ρευστού μετά τη θέρμανσή του στη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας στον εναλλάκτη θέρμανσης και την παραγωγή ωφέλιμης ισχύος. Το αποτονωμένο ρευστό κατόπιν αναμιγνύεται με το ρευστό στην έξοδο του συμπιεστή του VCC και το μίγμα διέρχεται από τον κοινό υδρόψυκτο συμπυκνωτή του συστήματος, για την μεταφορά θερμότητας από το οργανικό μέσο προς το νερό ψύξης. Μετά το διαχωρισμό τους, το ρεύμα που αντιστοιχεί στον κύκλο ORC οδηγείται σε έναν εναλλάκτη υπόψυξης όπου η θερμοκρασία του μειώνεται περαιτέρω προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα σπηλαιώσης στην αντλία.

Εκτός από το συμπιεστή, ο VCC αποτελείται από μία εκτονωτική βαλβίδα, στην οποία στραγγαλίζεται αδιαβατικά και έναν ατμοποιητή, όπου απορροφά θερμότητα με στόχο την παραγωγή ψύξης.

Το σύστημα είναι σχεδιασμένο ώστε να είναι δυνατή η αυτόνομη λειτουργία των δύο υποσυστημάτων. Κατ' αυτό τον τρόπο, είναι εφικτή η απομόνωση του κύκλου VCC (όταν το ψυκτικό φορτίο είναι μηδενικό) αλλά και του ORC, όταν υπάρχει μόνο ανάγκη για ψύξη. Αυτό επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση διαφόρων βαλβίδων, παράλληλα όμως καθιστά αναγκαία την ύπαρξη ενός μικρού συμπυκνωτή ειδικά για τον ψυκτικό κύκλο, λόγω της πολύ μικρής ονομαστικής παροχής του. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ολοκληρωμένη εγκατάσταση είναι ευέλικτη, έχοντας τη δυνατότητα να εναλλάσσει τη λειτουργία της μεταξύ τριπαραγωγής, συμπαραγωγής και απομονωμένης παραγωγής ψύξης.

Το μονογραμμικό σχέδιο της εγκατάστασης απεικονίζεται στο **Σχήμα 3** που ακολουθεί.

### Bio-TRIC



Σχήμα 3 Μονογραμμικό διάγραμμα της εγκατάστασης BioTRIC

## 2.2. Το υποσύστημα λέβητα βιομάζας-θερμικού ελαίου

Η πρόσδοση θερμότητας στον ORC γίνεται μέσω της καύσης βιομάζας. Ο λέβητας βιομάζας συνδέεται με ένα ελαιόθερμο κύκλωμα. Το θερμικό έλαιο παραλαμβάνει τη θερμότητα από την καύση της βιομάζας και τα παραγόμενα θερμά καυσαέρια και στη συνέχεια την προσδίδει στο εργαζόμενο μέσο του ORC δια μέσου του υπερκρίσιμου εναλλάκτη θερμότητας. Στη συνέχεια, το ψυχρό θερμικό έλαιο επιστρέφει στο λέβητα για να αυξηθεί και πάλι η θερμοκρασία του και να επανεκκινήσει ο κύκλος.

## 3. Προσομοίωση του συστήματος και βελτιστοποίηση

### 3.1. Προσομοίωση

Το πρώτο βήμα για το σχεδιασμό της πειραματικής εγκατάστασης είναι η θερμοδυναμική της προσομοίωση, η οποία και επιτρέπει τη βελτιστοποίηση διαφόρων βασικών παραμέτρων λειτουργίας. Η προσομοίωση εκτελείται θεωρώντας σταθερές συνθήκες λειτουργίας στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της μονάδας (steady state operation) και επιλύοντας ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά των στοιχείων εξοπλισμού. Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης, οι απώλειες

πίεσης και θερμότητας στους αγωγούς και στα διάφορα εξαρτήματα θεωρούνται αμελητέες. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του οργανικού ρευστού, του θερμικού ελαίου και του νερού σε κάθε σημείο υπολογίζονται με τη βάση δεδομένων CoolProp (Bell, Wronski et al.). Οι βασικοί δείκτες απόδοσης που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της μονάδας είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης του ORC, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του ολοκληρωμένου συστήματος καθώς και ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP) του ψυκτικού κύκλου. Οι τρεις αυτοί δείκτες περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\eta_{th,ORC} = \frac{P_{turb} - P_{pump}}{Q_{ORC,in}} \quad (1)$$

$$\eta_{el,sys} = \frac{P_{el,net,sys}}{Q_{ORC,in}} \quad (2)$$

$$COP = \frac{Q_{cool}}{P_{el,comp}} \quad (3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις τα σύμβολα  $P_{turb}$  και  $P_{pump}$  αναφέρονται στην μηχανική ισχύ που παράγεται και καταναλώνεται από τον εκτονωτή και την αντλία του ORC αντίστοιχα, το  $\dot{Q}_{ORC,in}$  αντιστοιχεί στη θερμική ισχύ που προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο στον υπερκρίσιμο εναλλάκτη θερμότητας,  $P_{el,net,sys}$  είναι η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από την εγκατάσταση (αφαιρώντας την κατανάλωση του συμπιεστή του VCC),  $\dot{Q}_{cool}$  η ψυκτική ισχύς του VCC και  $P_{el,comp}$  η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται από το συμπιεστή.

Οι παραδοχές που γίνονται σχετικά με τη λειτουργία του συστήματος και τις τεχνικές προδιαγραφές του εξοπλισμού καθώς και οι συνοριακές συνθήκες επίλυσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης του κύκλου συνοψίζονται στον Πίνακα 1.



Κύκλωμα λέβητα βιομάζας-θερμικού ελαίου

Βαθμός απόδοσης λέβητα	82.9 %
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη βιομάζας	16920 kJ/kg
Θερμική ισχύς λέβητα	85 kW <sub>th</sub>
Θερμικό έλαιο	BP Transcal N
Μέγιστη θερμοκρασία θερμικού ελαίου	120 °C
Θερμοκρασιακή διαφορά θερμικού ελαίου στο λέβητα	15 K

---

Υποσύστημα ORC

Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά εναλλάκτη θέρμανσης	10 K
Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά συμπυκνωτή	5 K
Μέγιστη πίεση εργαζόμενου μέσου	40 bar
Μέγιστη θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου	110 °C
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης αντλίας	50 %
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης εκτονωτών	65 %
Ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης	85 %
Θερμοκρασία ψυκτικού νερού στο συμπυκνωτή	
Καλοκαίρι	30 °C
Χειμώνας	20 °C
Ελάχιστη θερμοκρασία ψυκτικού νερού στην έξοδο του συμπυκνωτή	40 °C

---

Υποσύστημα VCC

Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον ατμοποιητή	5 K
Ονομαστική ψυκτική ισχύς	4 kW <sub>th</sub>
Θερμοκρασία ατμοποίησης	10 °C
Θερμοκρασία συμπύκνωσης	50 °C
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	75 %

Πίνακας 1 Παραδοχές λειτουργίας της εγκατάστασης

### 3.2. Βελτιστοποίηση

Η επιλογή του καταλληλότερου οργανικού ρευστού για την εγκατάσταση είναι ο πρώτος στόχος της θερμοδυναμικής βελτιστοποίησης. Για την παρούσα εγκατάσταση στο πρώτο στάδιο εκλογής ακολουθήθηκε η μέθοδος διαλογής, η οποία και χρησιμοποιείται ευρέως στη σχετική βιβλιογραφία. Τα δύο βασικά κριτήρια που λήφθηκαν αρχικά υπόψιν είναι η κρίσιμη θερμοκρασία και η κρίσιμη πίεση των οργανικών ρευστών. Βάσει του λειτουργικού εύρους των μεγεθών αυτών για τη μονάδα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1, σχηματίστηκε μία λίστα από 11 υποψήφια εργαζόμενα μέσα (Πίνακας 2).

Εργαζόμενο μέσο	Κρίσιμη θερμοκρασία °C	Κρίσιμη πίεση (bar)	ODP (United States Environmental Protection Agency)	GWP (United States Environmental Protection Agency)	Κατηγορία ασφάλεια κατά ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2000)
R125	66.02	36.18	0	3500	A1
R134a	101.06	40.59	0	1430	A1
R143a	72.71	37.61	0	4470	A2L
R1234yf	94.70	33.82	0	4	A2L
R227ea	101.75	29.25	0	3220	A1
Propylene	92.42	46.65	0	1.8	A3
R41	44.13	58.97	0	92	---
N-Propane	96.70	42.48	0	3.3	A3
R161	102.22	47.02	0	12	--
R410a	72.80	48.60	0	2088	A1
R404a	72.07	37.32	0	3300	A1

Πίνακας 2 Πρωταρχική επιλογή εργαζόμενων μέσων ( $P_{crit} < 40 \text{ bar}$ ,  $T_{crit} < 110 \text{ °C}$ )

Τα αποτελέσματα της θερμοδυναμικής βελτιστοποίησης του συστήματος με βάση το θερμικό βαθμό απόδοσης του ORC για το R227ea, το R125 και το R404a δίνονται στον Πίνακα 3



Μέγεθος (μονάδες)	R125	R404a	R227ea
$P_{\max}$ (bar)	40	40	30.4
$T_{\max}$ (°C)	110	110	110
$T_{\text{cond}}$ (°C)	50	50	50
$T_{\text{cool}}$ (°C)	10	10	10
$\eta_{\text{th,ORC}}$	2.16	2.81	4.92
$\eta_{\text{el,net,sys}}$ (QC=0)	0.71	1.17	2.72
$\eta_{\text{el,net,sys}}$ (QC=1)	0.23	0.73	2.30
COP	3.24	3.57	3.78

Πίνακας 4 Αποτελέσματα θερμοδυναμικής βελτιστοποίησης του ORC για τρία εργαζόμενα μέσα

Όπως μπορεί να φανεί και στον Πίνακα 5, το R227ea παρουσιάζει τόσο το μέγιστο βαθμό απόδοσης για τον ORC όσο και τον υψηλότερο COP μεταξύ των εξεταζόμενων μέσων. Παράλληλα, βρίσκεται στην υψηλότερη κατηγορία ασφαλείας της ASHRAE και έχει μηδενικό δυναμικό μείωσης του όζοντος (ODP). Το μόνο του μειονέκτημα είναι το σχετικά υψηλό του δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης (GWP). Το ρευστό αυτό έχει διερευνηθεί θεωρητικά στη βιβλιογραφία (Delgado-Torres and García-Rodríguez, 2010, Quoilin, Declaye et al., 2011, Rayegan and Tao, 2011), ωστόσο δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εμπορικές ή πειραματικές εφαρμογές, ενώ η διαθεσιμότητά του είναι μικρή και το κόστος του πολύ υψηλό συγκριτικά με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα ρευστά σε αντίστοιχες εγκαταστάσεις.

#### 4. Κατασκευή και εγκατάσταση

##### 4.1. Μηχανολογικός εξοπλισμός

Στον Πίνακα 6 συνοψίζονται τα λειτουργικά δεδομένα στο ονομαστικό λειτουργίας της μονάδας για το εργαζόμενο μέσο R227ea.

Υποσύστημα ORC	
Παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου	0.699 kg/s
Μέγιστη πίεση/θερμοκρασία	30.4 bar/110 °C
Πίεση/θερμοκρασία συμπύκνωσης	9.16 bar/50 °C
Πίεση/θερμοκρασία μετά τους εκτονωτές	9.16 bar/68 °C
Καθαρή ηλεκτρική ισχύς ORC	2.40 kW <sub>e</sub>
Καθαρή ηλεκτρική ισχύς συστήματος	0.99 kW <sub>e</sub>
Υποσύστημα VCC	
Παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου	0.056 kg/s
Πίεση/θερμοκρασία ατμοποίησης	2.79 bar/10 °C
Πίεση/θερμοκρασία συμπύκνωσης	9.16 bar/50 °C
Πίεση/θερμοκρασία μετά το συμπιεστή	9.16 bar/50 °C
Ονομαστική ψυκτική ισχύς	4 kW <sub>th</sub>
Ψυκτικό σύστημα	

---

Θερμοκρασία εισόδου νερού ψύξης για καλοκαίρι	30 °C/20 °C
Θερμοκρασία ζεστού νερού	45 °C
Παροχή μάζας ζεστού νερού	0.730 kg/s
Ονομαστική θερμική ισχύς	85.8 kW <sub>th</sub>
Σύστημα θέρμανσης	

---

Θερμοκρασία εισόδου θερμικού ελαίου	120 °C
Θερμοκρασία εξόδου θερμικού ελαίου	105 °C
Παροχή μάζας θερμικού ελαίου	3.12 kg/s

---

Πίνακας 6 Λειτουργικά δεδομένα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης σε λειτουργία τριπαραγωγής

---

#### 4.1.1 Κύκλωμα λέβητα-θερμικού ελαίου

Το σύστημα λέβητα βιομάζας-θερμικού ελαίου της εγκατάστασης αποτελείται από τον καυστήρα πέλλετ, διαθέτει όμως τη δυνατότητα και χρήσης φυσικού αερίου ως καύσιμο, προκειμένου να διασφαλίζεται η ευελιξία του συστήματος και η ταχεία απόκρισή του σε μεταβαλλόμενα φορτία. Ο καυστήρας αερίου αποτελείται από δύο βαθμίδες, ενώ η θερμική του ισχύς μπορεί να τροποποιείται μεταξύ 65 και 85 kW<sub>th</sub>, καθώς η μέγιστη παροχή καυσίμου κυμαίνεται μεταξύ 6.5 και 18.9 Nm<sup>3</sup>/h. Η θερμοκρασία των καυσαερίων του λέβητα είναι γύρω στους 220 και 230 °C. Ο καυστήρας πέλλετ λειτουργεί μεταξύ 40 και 80 kW<sub>th</sub>, με αντίστοιχη παροχή μάζας μεταξύ 8 και 20 kg/h. Τα πέλλετ του καυστήρα πρέπει να έχουν μέγεθος μεταξύ 6-8 mm.

Το κύκλωμα του θερμικού ελαίου περιλαμβάνει μία φυγόκεντρη αντλία σταθερής περιστροφικής ταχύτητας. Επιπλέον, περιλαμβάνει και μία δεξαμενή με χωρητικότητα 250 λίτρων. Ο αυτόματος έλεγχος του κυκλώματος επιτυγχάνεται με ειδικό ηλεκτρολογικό πίνακα. Η βασική παράμετρος λειτουργίας που επιλέγεται από το χρήστη είναι η μέγιστη θερμοκρασία του θερμικού ελαίου. Λόγω της σχετικά σταθερής παροχής του ελαίου, η θερμοκρασία ελέγχεται μέσα από την έναρξη και την παύση της λειτουργίας των καυστήρων, ανάλογα με το σήμα που δίνει ο θερμοστάτης. Με κατάλληλες τροποποιήσεις στους καυστήρες, είναι δυνατή η αλλαγή της θερμικής τους ισχύος, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά του συστήματος σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας.

#### 4.1.2 Εναλλάκτες θερμότητας

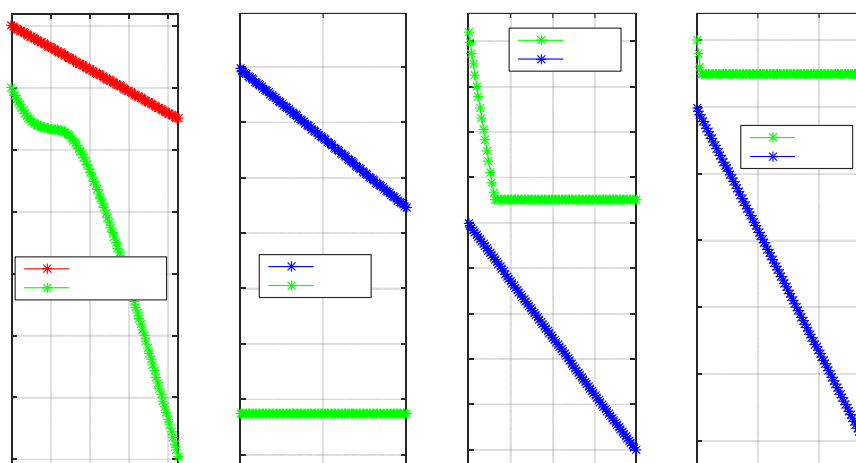
Το σύστημα περιλαμβάνει πέντε εναλλάκτες θερμότητας: τον υπερκρίσιμο εναλλάκτη θέρμανσης του ORC, δύο συμπυκνωτές, τον ατμοποιητή του VCC καθώς και έναν ακόμα εναλλάκτη υπόψυξης για τον ORC. Όλοι οι εναλλάκτες της μονάδας είναι πλακοειδούς τύπου, μιας και οι εναλλάκτες αυτοί παρουσιάζουν μία σειρά από πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλους τύπους (πχ αυλών-κελύφους) για το λειτουργικό εύρος της συγκεκριμένης εγκατάστασης. Αυτά περιλαμβάνουν την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας εξαιτίας

της ανάπτυξης υψηλών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων αλλά και τον υψηλό λόγο επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας προς τον όγκο που καταλαμβάνουν και το σχετικά μικρό τους κόστος.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εναλλακτών του συστήματος, πλην του εναλλάκτη υπόψυξης, συνοψίζονται στον **Πίνακα 6**.

Εναλλάκτης	Υπερκρίσιμος εναλλάκτης ORC		Ατμοποιητής VCC		Συμπυκνωτής (ORC-VCC) 1		Συμπυκνωτής (VCC) 2	
	Θερμό	Ψυχρό	Θερμό	Ψυχρό	Θερμό	Ψυχρό	Θερμό	Ψυχρό
Ρευστό	BP Transcal N	R227ea	Νερό	R227ea	R227ea	Νερό	R227ea	Νερό
Παροχή μάζας (kg/s)	3.12	0.699	0.382	0.0522	0.643	0.737	0.067	0.062
Πίεση εισόδου (bar)	5.5	30.4	1.013	2.58	9.115	1.013	9.126	1.013
Πτώση πίεσης (bar)	-	-	0.0073	0.007	0.062	0.026	0.0051	0.007
Θερμοκρασία εισόδου (°C)	120	53	20	8.48 (x=0.4)	66.7	20	50	20
Θερμοκρασία εξόδου (°C)	105	110	17.5	7.5	47.336	45	47.407	45
Θερμική ισχύς (kW <sub>th</sub> )	85		4		77		6.5	

Πίνακας 7 Τεχνικά χαρακτηριστικά εναλλακτών θερμότητας της εγκατάστασης



Σχήμα 4 Q-T διαγράμματα των ψυχρών και των θερμών ρευμάτων στους τέσσερις εναλλάκτες της εγκατάστασης

#### 4.1.3 Εκτονωτές ORC και συμπιεστής VCC

Οι εκτονωτές του ORC καθώς και ο συμπιεστής του VCC είναι ελικοειδούς τύπου. Οι εκτονωτές αυτοί είναι μηχανές θετικής μετατόπισης και έχουν συστηματικά προταθεί στη βιβλιογραφία ως ιδανικοί για μηχανές ORC κλίμακας από μερικές εκατοντάδες Watt μέχρι και 10 kW.

Ο πρώτος εκτονωτής λειτουργεί σε υψηλότερη πίεση από το δεύτερο. Βάσει της θερμοδυναμικής προσομοίωσης της μονάδας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας των εκτονωτών συνοψίζονται στον Πίνακα 8.

	Πίεση/ Θερμοκρασία εισόδου (bar/°C)	Πίεση/ Θερμοκρασία εξόδου (bar/°C)	Λόγος πίεσης	Λόγος παροχής όγκου	Ισχύς (kW)
Εκτονωτής υψηλής πίεσης	30.4/110	15.8/84.1	1.92	2.47	2.86
Εκτονωτής χαμηλής πίεσης	15.8/84	9.2/70	1.71	1.90	2.89
Συμπιεστής	2.8/10	9.2/50	3.29	3.52	1.35

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των εκτονωτών και του συμπιεστή στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας τους

#### 4.2. Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός

Ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός της εγκατάστασης περιλαμβάνει στοιχεία που δε συμμετέχουν άμεσα στις θερμοδυναμικές διεργασίες που επιτελούνται αλλά σχετίζονται περισσότερο με τη σύζευξη του μηχανολογικού εξοπλισμού με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και τα ηλεκτρονικά συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου της μονάδας. Στη συνέχεια αναλύονται τα κυριότερα στοιχεία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, παρουσιάζεται ο ρόλος τους και τα βασικά τους τεχνικά χαρακτηριστικά.

#### 4.2.1 Γεννήτριες/κινητήρες εκτονωτών

Οι γεννήτριες των εκτονωτών και της αντλίας που επιλέχθηκαν και για τις οποίες έγινε προμήθεια, βάσει των απαιτήσεων λειτουργίας της εγκατάστασης, μαζί με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά απεικονίζονται στον Πίνακα 9.

	Γεννήτρια 1 (εκτονωτής 1)	Γεννήτρια 2 (εκτονωτής 2)	Κινητήρας (αντλία)
Τάση (V)	400-Δ / 690-Υ	400-Δ / 690-Υ	230-Δ / 400-Υ
Ισχύς (kW)	4	4	3
Ρεύμα (A)	8.31	7.31	6.5
Βαθμός απόδοσης (%)	84	85	81.3
Συντελεστής ισχύος ( $\Lambda 8\phi$ )	0.82	0.93	0.82
Αριθμός πόλων	4	2	4
Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	1441	2868	1410
Ολίσθηση (%)	4.018	4.406	5.095
Ροπή (Nm)	26.53	13.33	20

Πίνακας 9 Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών και του κινητήρα του SORC

Οι δύο γεννήτριες συνδέονται με τους αντίστοιχους εκτονωτές μέσω ιμάντα με σχέση μετάδοσης στροφών 1:1. Η γεννήτρια 2 επιλέχθηκε να είναι διπολική, με αυξημένη ταχύτητα περιστροφής, καθώς η αύξηση του ειδικού όγκου του ρευστού στη έξοδο του 1<sup>ου</sup> εκτονωτή οδηγεί σε αυξημένη απαίτηση ογκομετρικής παροχής στον 2<sup>ο</sup> εκτονωτή. Συνεπώς ο 2<sup>ος</sup> εκτονωτής θα περιστρέφεται με μεγαλύτερο αριθμό στροφών, ομοίως και η γεννήτρια στην οποία θα αποδίδει μηχανική ισχύ. Ο κινητήρας της αντλίας είναι ενσωματωμένος στην κατασκευή της.

#### 4.2.2 Inverters

Οι inverters χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των κινητήρων και των γεννητριών της εγκατάστασης με το δίκτυο παραγωγής ενέργειας. Επίσης μέσω αυτών επιτυγχάνεται η ρύθμιση στροφών των εκτονωτών. Στην εγκατάσταση χρησιμοποιούνται τρεις inverters, δύο για τις γεννήτριες των εκτονωτών κι ένας για τον κινητήρα της αντλίας. Για τον κινητήρα του συμπιεστή του ψυκτικού κύκλου δε χρησιμοποιείται ρύθμιση στροφών, καθώς αυτός είναι σχεδιασμένος να εργάζεται σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας, αλλά ένας ομαλός εκκινητής (soft starter). Οι inverters που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατάλληλοι για τυπικά φορτία (αντλίες, μεταφορικές ταινίες, συμπιεστές κλπ.), έχουν μικρό χρόνο απόκρισης, μέγιστη απόδοση σε κάθε επίπεδο στροφών και παρέχουν την δυνατότητα ελέγχου της λειτουργίας τους τόσο τοπικά, από ενσωματωμένο πάνελ, όσο και απομακρυσμένα από κάποιο κεντρικό σύστημα ελέγχου.

#### 4.2.3 Προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC)

Στην εγκατάσταση τριπαραγωγής χρησιμοποιείται προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής ο οποίος εκτελεί την λειτουργία συλλογής των δεδομένων, ψηφιακών και αναλογικών, από τα επιμέρους στοιχεία της εγκατάστασης. Τα δεδομένα φτάνουν στο PLC, αφού υποστούν την απαραίτητη επεξεργασία και κατόπιν αποστέλλονται μέσω σύνδεσης Ethernet σε υπολογιστή ο οποίος εκτελεί το HMI λογισμικό της εφαρμογής Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA). Μέσα από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής μπορούμε ελέγχουμε την λειτουργία των επιμέρους στοιχείων της εγκατάστασης, ενώ, σε συνεργασία με το PLC, μας παρέχεται και η δυνατότητα εποπτείας της λειτουργίας της καθώς και καταγραφής των επιθυμητών δεδομένων.

Το σύστημα PLC της εγκατάστασης αποτελείται κατ' αρχάς από τη μονάδα τροφοδοσίας και την κεντρική μονάδα επεξεργασίας, η οποία διαθέτει 24 κανάλια ενσωματωμένων ψηφιακών εισόδων, 16 κανάλια ενσωματωμένων εξόδων, 5 κανάλια ενσωματωμένων αναλογικών εισόδων και 2 κανάλια ενσωματωμένων αναλογικών εξόδων. Στις ψηφιακές εισόδους εισέρχονται τα σήματα κατάστασης λειτουργίας και σφάλματος των επιμέρους συστημάτων της εγκατάστασης καθώς και τα σήματα από του αισθητήρες υποπίεσης/υπερπίεσης και αξιοποιούνται για την εποπτεία λειτουργίας της εγκατάστασης από την HMI εφαρμογή και την προστασία της από το πρόγραμμα ελέγχου του PLC. Στις ψηφιακές εξόδους συνδέονται μικρορελέ που καθορίζουν την λειτουργία των επιμέρους συστημάτων της εγκατάστασης καθώς και λυχνίες ένδειξης σφάλματος υποπίεσης/ υπερπίεσης.

Στις 4 ενσωματωμένες αναλογικές εισόδους τάσης/ρεύματος εισέρχονται τα σήματα από τους μορφομετατροπείς μετρητικών θερμοκρασίας, τα οποία μετά την κατάλληλη επεξεργασία (scaling) στέλνονται στην HMI εφαρμογή όπου γίνεται εφικτή η online και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση και καταγραφή των μεταβολών των μεγεθών. Στις 2 ενσωματωμένες αναλογικές εξόδους στέλνουμε τα σήματα ρύθμισης της συχνότητας της αντλίας και της γεννήτριας 1, προς τους αντίστοιχους inverter. Η τιμή της συχνότητας επιλέγεται από τον χρήστη στο γραφικό περιβάλλον και στέλνεται στο PLC, όπου μετά την κατάλληλη επεξεργασία (unscaling) μεταφράζεται σε μορφή σήματος (0-10 V) κατανοητή από το κύκλωμα ελέγχου του inverter.

Επειδή στην εγκατάσταση υπάρχουν συνολικά 24 αισθητήρες μέτρησης μαζί με αντίστοιχους μορφομετατροπείς, καθώς η κεντρική μονάδα έχει μόνο 4 κανάλια, χρησιμοποιούνται επιπλέον 3 κάρτες αναλογικών εισόδων με 8 εισόδους η κάθε μία. Παράλληλα, εγκαταστάθηκε μία κάρτα αναλογικών εξόδων με 2 κανάλια εξόδου, καθώς η κεντρική μονάδα έχει μόνο 2 ενσωματωμένες αναλογικές εξόδους, ενώ απαιτούνται συνολικά τρεις (η αντλία και οι δύο γεννήτριες των εκτονωτών).

### 4.3. Λογισμικό παρακολούθησης και ελέγχου

Ένα σύστημα SCADA (Supervision Control And Data Acquisition) συλλέγει πληροφορίες από διάφορες διεργασίες και χρησιμοποιείται για τον εποπτικό έλεγχο αυτών, δηλαδή είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση, την καταγραφή και τον έλεγχο ενός πλήθους βασικών μεταβλητών και παραμέτρων τους. Οι μεταβλητές μπορεί να είναι η ροή ενός υγρού, η πίεση ενός αερίου καθώς και θερμοκρασίες, τάσεις, ρεύματα, σημάσεις και στάθμες υγρών.

Η εγκατάσταση τριπαραγωγής που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία αποτελεί ένα πειραματικό σύστημα. Η ορθή αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος κρίνει αναγκαία την μελέτη της συμπεριφοράς του σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή σε συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου, λόγω διαβάθμισης των φορτίων θερμότητας και ψύξης, και μεταβαλλόμενης παροχής θερμότητας από την πηγή. Συνεπώς πρέπει να υπάρχει η απαραίτητη υποδομή που θα επιτρέπει τον έλεγχο των επιμέρους στοιχείων της εγκατάστασης (λειτουργία μηχανών, ρύθμιση στροφών κινητήρων, κατάσταση βαλβίδων κλπ.) ώστε να μπορεί να δοκιμαστεί σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Ο έλεγχος θα μπορούσε να γίνεται χειροκίνητα μέσω μπουτόν στην πρόσοψη ενός ηλεκτρολογικού πίνακα, ωστόσο αυτή η προσέγγιση αποτελεί μια δύσχρηστη επιλογή για τον χειριστή της εγκατάστασης, η οποία υστερεί σημαντικά στον τομέα εποπτείας της λειτουργίας και καθιστά την πειραματική διαδικασία λιγότερο ασφαλή. Επιπλέον δεν καλύπτει την ανάγκη συλλογής και καταγραφής δεδομένων για τα διάφορα μεγέθη (θερμοκρασία, πίεση κλπ.), η επεξεργασία των οποίων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Το σύστημα SCADA της εγκατάστασης έχει την παρακάτω δομή:

- Χρήση αισθητηρίων με τους κατάλληλους μορφομετατροπείς, από όπου προκύπτουν τα δεδομένα για τις μεταβλητές της εγκατάστασης (πίεση, θερμοκρασία, παροχή)
- Συλλογή των δεδομένων, υπό μορφή αναλογικών και ψηφιακών σημάτων, από PLC με την χρήση των κατάλληλων καρτών εισόδου
- Εποπτεία λειτουργίας της εγκατάστασης καθώς και προβολή και καταγραφή των δεδομένων από HMI εφαρμογή που θα αναπτυχθεί με την χρήση του πακέτου λογισμικού Labview. Το HMI σύστημα επικοινωνεί με το PLC μέσω δικτύου Ethernet (TCP/IP).
- Έλεγχος λειτουργίας της εγκατάστασης μέσω της συνεργασίας του HMI συστήματος και του PLC. Από το γραφικό περιβάλλον του SCADA ρυθμίζονται οι τιμές των μεταβλητών ελέγχου της εγκατάστασης (εκκίνηση/σταμάτημα μηχανών, ρύθμιση συχνότητας inverter, άνοιγμα /κλείσιμο βαλβίδων) και μέσω του PLC φτάνουν στον πραγματικό εξοπλισμό, υπό μορφή αναλογικών και ψηφιακών σημάτων, μέσω των κατάλληλων καρτών εξόδου.

## 5. Συμπεράσματα

Η πειραματική μονάδα που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο πλαίσιο του έργου «BioTRIC» αποτελεί μία καινοτόμα εφαρμογή, καθώς συνδυάζει την τεχνολογία του υπερκρίσιμου κύκλου ORC και του ψυκτικού κύκλου VCC σε μία ενιαία διεργασία, με στόχο τη δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης. Η μονάδα αποτελεί ένα προϊόν εκτεταμένων εργασιών που περιλαμβάνουν αφενός σημαντικό θεωρητικό και υπολογιστικό μέρος για την προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση του συστήματος για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος του ORC. Ένα μεγάλο μέρος των εργασιών που διεξήχθησαν στα πλαίσια του έργου αφορά τη διαστασιολόγηση του απαιτούμενου εξοπλισμού καθώς και την έρευνα αγοράς/προμήθειας των διαφόρων στοιχείων του. Μέσω των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν συγκεντρώθηκε σημαντική τεχνογνωσία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για την κατασκευή αντίστοιχων μονάδων.

Οι πειραματικές μετρήσεις που θα διεξαχθούν στη συνέχεια του έργου πρόκειται να βοηθήσουν σημαντικά τόσο στη λεπτομερειακή μελέτη της λειτουργίας κύκλων ORC σε υπερκρίσιμες συνθήκες και στην αξιολόγηση της πραγματικής του απόδοσης, η οποία δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς, βάσει της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας. Παράλληλα, μέσα από τις μετρήσεις θα διερευνηθεί η απόδοση των επιμέρους στοιχείων εξοπλισμού του κύκλου κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες. Τα συμπεράσματα που θα προκύψουν αναμένεται να έχουν καταλυτική σημασία καθώς η λειτουργία κάτω από μη σταθερές παραμέτρους είναι πολύ συνήθης σε μονάδες πολύ-παραγωγής, όπου υφίσταται εκ των πραγμάτων μεταβολή των θερμικών και των ψυκτικών φορτίων που πρέπει να καλυφθούν.

## 6. Ευχαριστίες

Οι εργασίες σχεδιασμού, βελτιστοποίησης και κατασκευής της πειραματικής εγκατάστασης που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία διεξήχθησαν στα πλαίσια του έργου «Λεπτομερής διερεύνηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας και του σχεδιασμού ενός υβριδικού βιο-συστήματος τρι-παραγωγής με τη χρήση ενός υπερκρίσιμου οργανικού κύκλου Rankine», το οποίο χρηματοδοτείται από τη δράση «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II» της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση».





## 7. Βιβλιογραφία

National Institute of Standards and Technology REFPROP

American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2000). Addenda to Designation and Safety Classifications of Refrigerants. Atlanta, GA 30329.

Bell, I. H., et al. CoolProp Database.

Cho, H., et al. (2009). Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme. *Applied Energy* 86(12) 2540-2549.

Delgado-Torres, A. M. and L. García-Rodríguez (2010). Analysis and optimization of the low-temperature solar organic Rankine cycle (ORC). *Energy Conversion and Management* 51(12) 2846-2856.

Martins, L. N., F. M. Fábrega and J. V. H. d'Angelo (2012). Thermodynamic Performance Investigation of a Trigeneration Cycle Considering the Influence of Operational Variables. *Procedia Engineering* 42(0) 1879-1888.

Mikielewicz, D. and J. Mikielewicz (2010). A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP. *Applied Thermal Engineering* 30(16) 2357-2362.

Pei, G., J. Li and J. Ji (2010). Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering* 30(8-9) 998-1004.

Quoilin, S., et al. (2013). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22(0) 168-186.

Quoilin, S., et al. (2011). Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles. *Applied Thermal Engineering* 31(14-15) 2885-2893.

Rayegan, R. and Y. X. Tao (2011). A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs). *Renewable Energy* 36(2) 659-670.



Roumpedakis, T., K. Braimakis and S. Karellas (2015). Investigation and efficiency maximization of the operation and design of a small scale experimental trigeneration system powered by a supercritical ORC. *3rd International Seminar on ORC Power Systems*. Brussels, Belgium.

Schuster, A., S. Karellas and R. Aumann (2010). Efficiency optimization potential in supercritical Organic Rankine Cycles. *Energy* 35(2) 1033-1039.

United States Environmental Protection Agency. *Official Website of the United States Environmental Protection Agency*, <http://www.epa.gov>, Accessed on August 19th, 2014 [online] [Accessed August 19 2014].

Vetter, C., H.-J. Wiemer and D. Kuhn (2013). Comparison of sub- and supercritical Organic Rankine Cycles for power generation from low-temperature/low-enthalpy geothermal wells, considering specific net power output and efficiency. *Applied Thermal Engineering* 51(1–2) 871-879.