

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ RANKINE**Γ. Αντίοχου, Β. Κουλοχέρης*, Γ. Παππά, Ε. Βουτσάς**

Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Φαινομένων Μεταφοράς, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα

(*vkoul@chemeng.ntua.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που απορρέουν από τη χρήση ορυκτών καυσίμων και η ανάγκη για συνετή αξιοποίηση των διαθέσιμων αποθεμάτων τους επιβάλλουν τη μελέτη και ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης ενέργειας χαμηλής ποιότητας. Μία τέτοια τεχνολογία είναι και τα οργανικά κύκλα Rankine (Organic Rankine Cycle – ORC). Η χρήση, ως εργαζόμενων μέσων, οργανικών ουσιών με πολύ μεγαλύτερη πτητικότητα σε σχέση με το νερό επιτρέπει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας, που μπορεί να παρέχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η γεωθερμική ενέργεια και η αεριοποίηση της βιομάζας, ή από θερμικά υπόλοιπα βιομηχανικών μονάδων και μηχανών εσωτερικής καύσης. Η επιλογή των κατάλληλων οργανικών ουσιών ως εργαζόμενων μέσων σε ένα ORC περιλαμβάνει την εξέταση πολλών παραγόντων όπως της απόδοσης, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, του κόστους και των συνθηκών λειτουργίας. Επίσης, πέρα από την επιλογή του κατάλληλου εργαζόμενου μέσου, για την ενίσχυση της αποδοτικότητας του συστήματος, έχουν προταθεί και διάφορες παραλλαγές της απλής διάταξης του οργανικού κύκλου Rankine.

Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι η προσομοίωση και θερμοδυναμική βελτιστοποίηση (ενεργειακή και εξεργειακή) ενός οργανικού κύκλου Rankine με χρήση του λογισμικού Aspen HYSYS. Εξετάζονται 11 διαφορετικά εργαζόμενα μέσα, 9 καθαρά ρευστά και 2 μίγματα ορισμένων εξ' αυτών, και δύο πηγές θερμότητας, γεωθερμική ενέργεια και απορριπτόμενη θερμότητα καυσαερίων, οι οποίες καλύπτουν το θερμοκρασιακό εύρος 90-450°C. Για τη βελτίωση της ενεργειακής και της εξεργειακής απόδοσης του κύκλου, διερευνάται η χρήση υπερκρίσιμων λειτουργικών συνθηκών στον εξατμιστήρα, η προσθήκη ενός επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας που αξιοποιείται για εσωτερική ανάκτηση και η αναγέννηση, μέσω απομάστευσης ενός μέρους του εργαζόμενου μέσου σε μία ενδιάμεση πίεση. Για τη μοντελοποίηση του συστήματος χρησιμοποιείται το θερμοδυναμικό μοντέλο REFPROP, του οποίου η ακρίβεια αξιολογείται μέσω σύγκρισης των προβλέψεών του με πειραματικά δεδομένα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Οργανικό Κύκλο Rankine, Προσομοίωση, Ενεργειακή Βελτιστοποίηση, Εξεργειακή Βελτιστοποίηση, Αξιοποίηση Θερμότητας Χαμηλής Θερμοκρασίας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δραστική αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης σε συνδυασμό με τα πρόσφατα γεωπολιτικά γεγονότα έχουν οδηγήσει όχι μόνο σε σημαντική αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων, αλλά και στην εμφάνιση και επιδείνωση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Για τον μετριασμό της αναδυόμενης κλιματικής κρίσης, η Συμφωνία του Παρισιού επιτάσσει την έντονη μείωση των εκπεμπόμενων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου, με στόχο τον περιορισμό της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας στον 1.5°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Στην πορεία προς μια οικονομία μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν τεχνολογίες που χρησιμοποιούν χαμηλής ποιότητας ενέργεια. Μία τέτοια τεχνολογία είναι και τα οργανικά κύκλα Rankine (ORC), που εκμεταλλεύονται θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας^[1,2].

Η διαφορά μεταξύ οργανικών και συμβατικών κύκλων Rankine είναι ότι ως λειτουργούν μέσο χρησιμοποιείται μία οργανική ουσία αντί για νερό^[1]. Τα χαμηλότερα σημεία ζέσεως των οργανικών ρευστών σε σχέση με το νερό επιτρέπουν την αξιοποίηση θερμότητας σημαντικά χαμηλότερης θερμοκρασίας, που μπορεί να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως την ηλιακή, τη γεωθερμική και την ενέργεια της βιομάζας, ή να αποτελεί απορριπτόμενη θερμότητα από άλλες βιομηχανικές διεργασίες ή μηχανές εσωτερικής καύσης^[2].

Λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων και χαρακτηριστικών κάθε εφαρμογής των ORCs, δεν υπάρχει κάποιο καθολικά βέλτιστο ρευστό^[3,4]. Συνήθως χρησιμοποιούνται υδρογονάνθρακες και ψυκτικά ρευστά επιτρεπόμενα από το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, όπως υδροφθοράνθρακες και υδροφθοροολεφίνες^[2,4]. Έχουν μελετηθεί και ζεοτροπικά οργανικά μίγματα, καθώς η θερμοκρασιακή ολίσθηση στους εναλλάκτες θερμότητας επιτρέπει καλύτερο συνδυασμό του θερμοκρασιακού προφίλ του εργαζόμενου μέσου με την πηγή θερμότητας και το ψυκτικό μέσο^[1,2]. Για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος προτείνονται διάφορες τροποποιήσεις της διάταξης του κύκλου, με χαρακτηριστικές την εφαρμογή υπερκρίσιμων λειτουργικών συνθηκών στον εξατμιστήρα (transcritical ORC) και την προσθήκη επιπλέον συσκευών, όπως ενός εναλλάκτη εσωτερικής ανάκτησης θερμότητας (recuperator)^[2]. Η αυξημένη απόδοση του συστήματος είναι σημαντικό να αντισταθμίζει το επιπλέον κόστος και την πολυπλοκότητα των πιο προηγμένων διατάξεων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση ενός οργανικού κύκλου Rankine. Εξετάζονται διαφορετικές πηγές θερμότητας και εργαζόμενα μέσα (καθαρά ρευστά και μίγματά τους), εφαρμόζονται υπερκρίσιμες λειτουργικές συνθήκες και εναλλακτικές διατάξεις και ποσοτικοποιείται η επίδραση αυτών στην ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του συστήματος.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Ένα βασικό κριτήριο επιλογής εργαζόμενων μέσων για το οργανικό κύκλο Rankine είναι τα ρευστά να είναι φιλικά προς το περιβάλλον, δηλαδή να χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) και αμελητέο δυναμικό καταστροφής του όζοντος (ODP). Επίσης, σημαντικό είναι τα ρευστά να είναι ασφαλή, δηλαδή μη τοξικά και μη εύφλεκτα, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της Αμερικανικής Εταιρείας Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού ASHRAE. Βέβαια, εύφλεκτα ρευστά (κατηγορία 3 κατά ASHRAE) όπως οι υδρογονάνθρακες δεν μπορούν να αποκλειστούν. Η κρίσιμη πίεση των ρευστών δεν πρέπει να είναι ιδιαίτερα υψηλή, καθώς αυτό θα αύξανε σημαντικά το πάγιο κόστος της εγκατάστασης λόγω αυξημένης αντοχής των υλικών, και ο ειδικός όγκος της ατμώδους φάσης πρέπει να έχει χαμηλές τιμές, ώστε οι διαστάσεις των διατάξεων να είναι μικρές. Είναι, επίσης, προτιμητέο, τα ρευστά να είναι ξηρά ή ισεντροπικά, δηλαδή η καμπύλη κορεσμένου ατμού στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας να έχει θετική κλίση ή να είναι κάθετη αντίστοιχα, προκειμένου να μην είναι απαραίτητη η μεγάλη υπερθέρμανση στον εξατμιστήρα με κίνδυνο διάβρωσης των μεταλλικών τμημάτων του στροβίλου. Τα οργανικά ρευστά που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία μαζί με τις βασικές τους ιδιότητες καταγράφονται στον Πίνακα 1.

Εκτός από τις καθαρές ουσίες, μελετώνται ως εργαζόμενα μέσα και δύο δυαδικά ζεοτροπικά μίγματα, σύστασης R1234yf/iC4 10/90 %wt. (Μίγμα 1) και R1234yf/R1233zd(E) 10/90 %wt. (Μίγμα 2). Οι συστάσεις αυτές επιλέχθηκαν καθώς μεγιστοποιούν την ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του κύκλου.

Για τη μοντελοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το θερμοδυναμικό μοντέλο REFPROP, που έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των ΗΠΑ (NIST) και εκτιμά τις θερμοφυσικές ιδιότητες της πλειοψηφίας των ρευστών μέσω θεμελιωδών καταστατικών εξισώσεων ανεπτυγμένων με όρους ενέργειας Helmholtz^[7]. Για την αξιολόγηση του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα τάσης ατμών, γραμμομοριακού όγκου κορεσμένου υγρού και ατμού, γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου υγρού και ατμού και

ενθαλπίας εξάτμισης για θερμοκρασίες από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο των επιλεγμένων ρευστών και υπολογίστηκε η μέση απόλυτη σχετική απόκλιση (AARD) των εκτιμήσεων του REFPROP από τα δεδομένα αυτά μέσω της εξίσωσης 1.

$$\%AARD = \frac{1}{ND} \sum_i \left| \frac{x_i^{exp} - x_i^{calc}}{x_i^{exp}} \right| * 100\% \quad (1)$$

όπου ND ο αριθμός των πειραματικών δεδομένων για κάθε ιδιότητα, x η εξεταζόμενη ιδιότητα, exp η πειραματική τιμή και calc η εκτίμηση του μοντέλου.

Πίνακας 1. Βασικές ιδιότητες επιλεγμένων οργανικών ρευστών^[3,5,6].

Ρευστό	P _c (bar)	T _c (°C)	Τύπος	ODP	GWP	Κατηγορία ASHRAE
iC4	42.2	134.66	Ξηρό	0	4	A3
iC5	33.7	187.20	Ξηρό	0	4	A3
Τολουόλιο	41.3	318.64	Ξηρό	0	20	A3
R152a	45.2	113.26	Υγρό	0	124	A2
R134a	40.6	101.06	Υγρό	0	1370	A1
R161	50.9	102.20	Υγρό	0	12	A3
R1234yf	33.8	94.70	Ισεντροπικό	0	4	A2L
R1233zd(E)	36.2	166.45	Ισεντροπικό	0	1	A1
Μεθανόλη	82.2	240.25	Υγρό	- ^a	- ^a	- ^a

^a Μη διαθέσιμα δεδομένα

Το μέγιστο σφάλμα του REFPROP, ως μέση τιμή για όλα τα ρευστά, ισούται με 1.51% και αφορά την πρόβλεψη της θερμοχωρητικότητας της υγρής φάσης. Για τις υπόλοιπες ιδιότητες, οι τιμές του AARD είναι χαμηλότερες από 1%, ειδικά στην πρόβλεψη της τάσης ατμών (0.14%) και του γραμμομοριακού όγκου υγρής (0.05%) και ατμώδους φάσης (0.003%). Συμπεραίνεται ότι οι προβλέψεις του REFPROP είναι πολύ κοντινές στα πειραματικά δεδομένα, δηλαδή επιβεβαιώνεται η ακρίβεια του μοντέλου.

Τα οργανικά κύκλα Rankine προσομοιώνονται στο λογισμικό Aspen HYSYS v11. Οι πηγές θερμότητας επιλέγονται να είναι γεωθερμικό νερό χαμηλής και μέσης ενθαλπίας (90-250°C), το οποίο μοντελοποιείται μέσω πινάκων ατμού ("NBS Steam"), όπως και το νερό ψύξης, καθώς και απορριπτόμενα καυσαέρια διαθέσιμα στους 300, 350, 400 και 450°C, τα οποία μοντελοποιούνται μέσω του REFPROP. Οι βασικές παραδοχές που πραγματοποιούνται είναι η επίτευξη μόνιμης κατάστασης, η ταύτιση της εξέργειας με τη φυσική εξέργεια, η προσομοίωση των γεωθερμικού ρευστού ως καθαρού νερού και των καυσαερίων ως ξηρού αέρα τυπικής σύστασης (O₂/N₂ 21%/79% vol.). Επιπλέον, αγνοούνται οι πτώσεις πίεσης και οι απώλειες θερμότητας, ενώ το εργαζόμενο μέσο θεωρείται ότι εισέρχεται στην αντλία ως κορεσμένο υγρό. Πέρα από αυτές τις παραδοχές, τίθενται και κάποιες προδιαγραφές σχεδιασμού που καταγράφονται στον Πίνακα 2. Η επιλογή των λειτουργικών συνθηκών γίνεται με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής και της ολικής εξεργειακής (εξίσωση 2) απόδοσης του κύκλου, που εξετάζονται ως δύο ξεχωριστά κριτήρια.

$$n_{ex,tot} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{source} * e_{f_{in,source}}} \quad (2)$$

όπου \dot{W}_{net} η καθαρή ισχύς, \dot{m}_{source} η μαζική παροχή της πηγής θερμότητας και $e_{f_{in,source}}$ η αρχική εξέργεια της πηγής θερμότητας.

Πίνακας 2. Προδιαγραφές σχεδιασμού εξεταζόμενων ORCs.

Μέγιστη πίεση στα υποκρίσιμα συστήματα	$P_c - 5 \text{ bar}$, αν $T \geq T_c$
	P_{sat} , αν $T < T_c$
Μέγιστη πίεση στα transcritical συστήματα	$P_c + 5 \text{ bar}$
Θερμοκρασία συμπύκνωσης εργαζόμενου μέσου	30°C
Μαζική παροχή γεωθερμικού ρευστού/καυσαερίων	5 kg/s
Πίεση γεωθερμικού ρευστού	$P_{\text{sat}} + 0.5 \text{ bar}$
Πίεση καυσαερίων	1.013 bar
Πίεση νερού ψύξης	1.013 bar
Αρχική θερμοκρασία νερού ψύξης	20°C
Ισεντροπική απόδοση στροβίλου	70%
Ισεντροπική απόδοση αντλίας	65%
Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτήρα	5°C
Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστήρα και στον εναλλάκτη εσωτερικής ανάκτησης θερμότητας	10°C
Ενδιάμεση πίεση στο κύκλο με αναγέννηση	$\sqrt{P_{\text{εξατμ.}} * P_{\text{συμπ.}}}$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

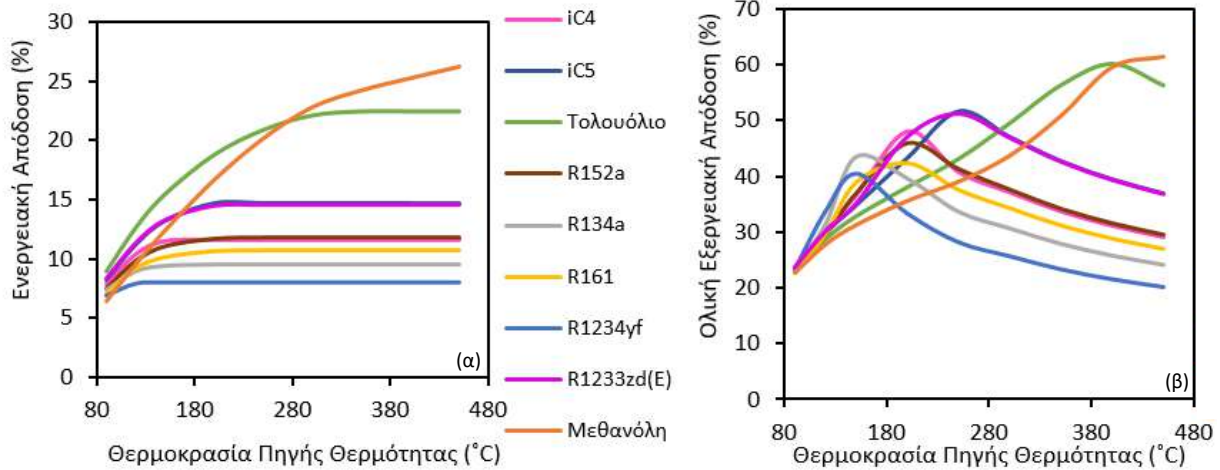
Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται ο θερμικός και ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης του κύκλου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας της παρεχόμενης θερμότητας στον εξατμιστήρα. Η επιλογή των λειτουργικών συνθηκών επιφέρει την εμφάνιση πλατό στο θερμικό βαθμό απόδοσης. Για υψηλές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας ($\geq 200^\circ\text{C}$), η χρήση του τολουολίου και της μεθανόλης οδηγεί σε ενεργειακές αποδόσεις της τάξης 20-25%, συγκρίσιμες με αυτές των συμβατικών κύκλων Rankine με ατμό. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να αντισταθμίζεται το κόστος δημιουργίας και διατήρησης κενού στον συμπυκνωτήρα, καθώς η τάση ατμών των δύο αυτών ρευστών στη θερμοκρασία συμπύκνωσης είναι αρκετά χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική πίεση.

Ικανοποιητική θερμική απόδοση επιτυγχάνεται με τη χρήση του ισοπεντανίου (μέγιστη τιμή ίση με 14.7%), του R1233zd(E) (14.6%), του R152a (11.8%), του ισοβουτανίου (11.6%) και του R161 (10.7%), με τις τιμές αυτές να περιλαμβάνονται στο τυπικό εύρος αποδόσεων των οργανικών κύκλων Rankine (10-15%). Η βέλτιστη απόδοση με χρήση του R134a ισούται με 9.6%, ενώ το R1234yf δεν επιφέρει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, με την ενεργειακή απόδοση να μην ξεπερνά το 8%. Το ισοπεντάνιο και το R1233zd(E), όπως και το ισοβουτάνιο με το R152a οδηγούν σε πολύ κοντινές αποδόσεις ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας.

Σε αντίθεση με το θερμικό βαθμό απόδοσης, ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης δεν εμφανίζει μονότονη αύξουσα τάση με την αύξηση της θερμοκρασίας της παρεχόμενης θερμότητας. Καθένα από τα ρευστά παρουσιάζει μία μέγιστη εξεργειακή απόδοση για διαφορετική θερμοκρασία της πηγής. Τα ρευστά χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, δηλαδή το R1234yf και το R134a, συνδυάζονται αποδοτικότερα με πηγές θερμοκρασίας 150°C. Ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται με χρήση του ισοβουτανίου, του R152a και του R161 όταν η θερμότητα παρέχεται περίπου στους 200°C και με χρήση του ισοπεντανίου και του R1233zd(E) στους 250°C. Από την άλλη μεριά, το τολουόλιο και η μεθανόλη παρουσιάζουν τη μέγιστη εξεργειακή απόδοση σε θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας 400 και 450°C αντιστοίχως.

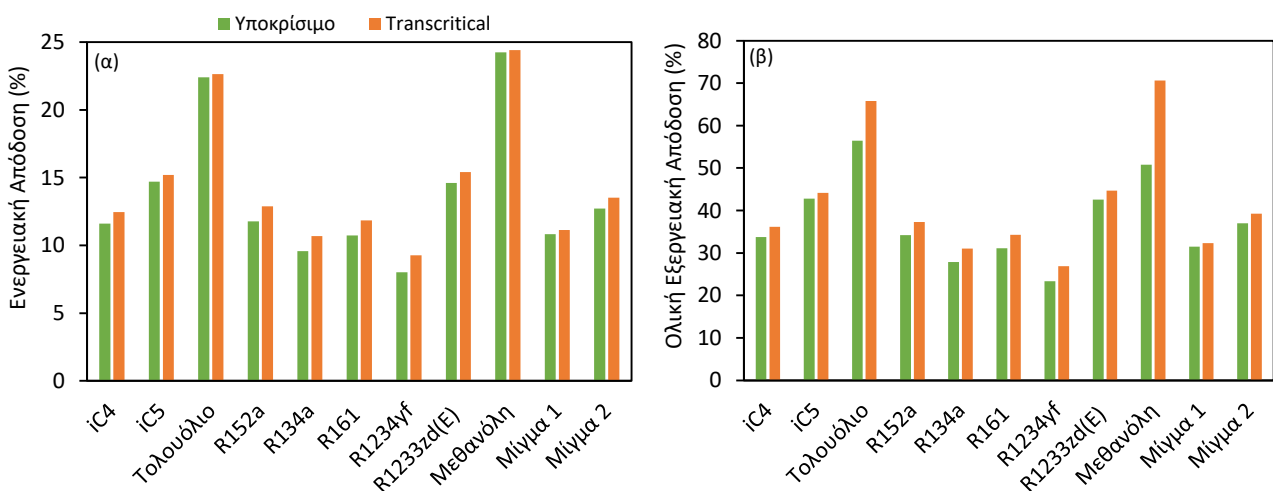
Από θερμοδυναμική σκοπιά, το ισοπεντάνιο και το R1233zd(E), όπως και το τολουόλιο με τη μεθανόλη υπό την προϋπόθεση δημιουργίας κενού στον συμπυκνωτήρα, δηλαδή οργανικά ρευστά σχετικά υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, αποτελούν ικανοποιητικές επιλογές εργαζόμενου μέσου σε ένα ORC. Επιπλέον, απαιτείται προσεκτικός συνδυασμός του οργανικού ρευστού και της

Θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.



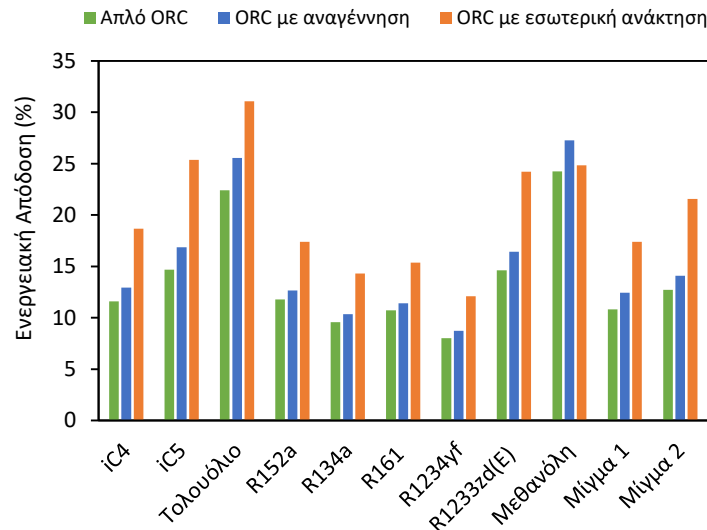
Σχήμα 1. (α) Θερμικός βαθμός απόδοσης και (β) ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης για το υποκρίσιμο ORC συναρτήσει της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.

Από τον Πίνακα 1 γίνεται κατανοητό ότι δεν είναι εφικτή η λειτουργία σε υπερκρίσιμες συνθήκες με πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Συνεπώς, τα βασικά αποτελέσματα παρουσιάζονται για απορριπτόμενη θερμότητα στους 350°C, δεδομένης της κρίσιμης θερμοκρασίας του τολουολίου (>300°C). Από το Σχήμα 2 προκύπτει ότι η εφαρμογή υπερκρίσιμων συνθηκών στον εξατμιστήρα οδηγεί σε αύξηση τόσο της ενεργειακής όσο και της εξεργειακής απόδοσης του κύκλου για όλα τα εργαζόμενα μέσα, αντισταθμίζοντας έτσι το επιπλέον πάγιο κόστος λόγω της εφαρμογής υψηλότερων πιέσεων. Η μέγιστη αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης παρατηρείται στις περιπτώσεις των λιγότερο αποδοτικών ρευστών (R1234yf, R161, R134a) και η ελάχιστη στη μεθανόλη και στο τολουόλιο. Αντίθετα, τα δύο αυτά ρευστά παρουσιάζουν τη μέγιστη αύξηση του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης στο transcritical κύκλο σε σχέση με το υποκρίσιμο. Αμελητέα αύξηση σημειώνεται στην περίπτωση του ισοπεντανίου και του R1233zd(E). Από το ίδιο σχήμα προκύπτει ότι η χρήση ενός ζεοτροπικού μίγματος οδηγεί σε ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση υψηλότερη συγκριτικά με αυτή που παρουσιάζεται με χρήση του πιο πτητικού από τα συστατικά του (R1234yf) και χαμηλότερη ως προς το λιγότερο πτητικό συστατικό (iC4 και R1233zd(E) αντιστοίχως).



Σχήμα 2. (α) Θερμικός βαθμός απόδοσης και (β) ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης για το transcritical και το υποκρίσιμο ORC αξιοποιώντας απορριπτόμενη θερμότητα στους 350°C.

Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του κύκλου μελετάται η προσθήκη ενός εσωτερικού εναλλάκτη θερμότητας (recuperator), στον οποίο προθερμαίνεται η είσοδος του εξατμιστήρα και προψύχεται η είσοδος του συμπυκνωτήρα, επιτυγχάνοντας εσωτερική ανάκτηση θερμότητας. Επιπλέον, μελετάται το κύκλο με αναγέννηση, μέσω απομάστευσης ενός μέρους του ατμού από τον στρόβιλο σε ένα ενδιάμεσο επίπεδο πίεσης και τροφοδοσίας αυτού σε έναν θερμαντήρα ανοιχτού τύπου, όπου αναμειγνύεται με την έξοδο της αντλίας που διαδέχεται τον συμπυκνωτήρα. Στην έξοδο του θερμαντήρα υπάρχει δεύτερη αντλία για την συμπίεση του κορεσμένου υγρού στην πίεση του εξατμιστήρα, στον οποίο το οργανικό ρευστό εισάγεται σε υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το απλό κύκλο. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η ενεργειακή απόδοση των τριών διατάξεων όταν αξιοποιείται απορριπτόμενη θερμότητα στους 350°C.



Σχήμα 3. Θερμικός βαθμός απόδοσης για το απλό ORC, το ORC με αναγέννηση και το recuperated ORC αξιοποιώντας απορριπτόμενη θερμότητα στους 350°C.

Με εξαίρεση τη μεθανόλη η οποία επιφέρει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και με χρήση της απλής διάταξης, η προσθήκη του recuperator οδηγεί σε σημαντική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου τόσο για καθαρές ουσίες όσο και για μίγματα, ειδικά για το Μίγμα 1, που ξεπερνά και το καθαρό ισοβουτάνιο (21.3% έναντι 18.7%). Οι τιμές της απόδοσης αυτής στην συγκεκριμένη διάταξη με το τολουόλιο (31.1%), το ισοπεντάνιο (25.4%), τη μεθανόλη (24.8%) και το R1233zd(E) (24.2%) προσεγγίζουν τα όρια του συμβατικού κύκλου Rankine με ατμό. Αντίθετα, η διεργασία της αναγέννησης επιφέρει αρκετά μικρότερη αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, εξαιρώντας και πάλι τη μεθανόλη (μέση, για όλα τα ρευστά, απόλυτη αύξηση ίση με 1.6%). Τα αποτελέσματα αυτά επιδεικνύουν τη σημασία του προσεκτικού συνδυασμού εργαζόμενου μέσου και πηγής θερμότητας, προκειμένου μία πιο περίπλοκη διάταξη του οργανικού κύκλου Rankine να είναι αποδοτική.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Lecompte S, et al. (2015). *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 47, 448-461.
- [2] Aghahosseini S, Dincer I. (2013). *Appl. Therm. Eng.*, 54, 35-42.
- [3] Arjunan P, et al. (2022). *Int. J. Energy Res.*, 46, 20573-20599.
- [4] González J, et al. (2022). *Energy*, 254, 124191.
- [5] Qyyum MA, et al. (2022). *Energy Conves. Manag.*, 252, 115055.
- [6] Bell IH, et al. (2014). *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 2498-2508.
- [7] Huber ML, et al. (2022). *Ind. Eng. Chem. Res.*, 61, 15449-15472.