

Συγκριτική Ανάλυση Ομοιομορφίας Θερμοκρασίας και Απόδοσης σε Συστήματα Ψύξης Χαμηλών Θερμοκρασιών Ερμητικού Συμπιεστή, Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και Πολυσυμπιεστών

Χρήστος Κυπραίου

Οικονομολόγος και Μεταπτ. Φοιτητής ΔΙΠ, ΕΑΠ

std160636@ac.eap.gr

Θεόδωρος Βαρζάκας

ΙΑτρική Μικροβιολογία και Βιοχημεία και Μέλος

ΣΕΠ ΔΙΠ

theodoros.varzakas@ac.eap.gr

Περίληψη – Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια συγκριτική ανάλυση της ομοιομορφίας θερμοκρασίας και της απόδοσης σε συστήματα ψύξης χαμηλής θερμοκρασίας, εξετάζοντας συγκεκριμένα ερμητικούς συμπιεστές, κινητήρες ελεύθερων εμβόλων και μηχανές πολυσυμπιεστών. Μέσω ενός συνδυασμού πειραματικών δοκιμών – συμπεριλαμβανομένης της 24ωρης παρακολούθησης θερμοκρασίας, προσομοιώσεων ανοίγματος θυρών, εκτιμήσεων διακοπής ρεύματος και δοκιμών πήξης – και οικονομετρικής μοντελοποίησης χρησιμοποιώντας παλινδρόμηση δεδομένων πίνακα, αυτή η έρευνα διερευνά τους κρίσιμους παράγοντες απόδοσης κάθε συστήματος. Τα βασικά ζητήματα περιλαμβάνουν τη σταθερότητα της θερμοκρασίας, την απόδοση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, στο πλαίσιο των σχετικών κανονιστικών πλαισίων και των βιομηχανικών προτύπων. Η μελέτη αποκαλύπτει σημαντικές διαφοροποιήσεις στην απόδοση και τη θερμοκρασία μεταξύ των διαφορετικών τύπων κατασκευών. Ο ερμητικός συμπιεστής παρουσίασε τη μεγαλύτερη σταθερότητα και την καλύτερη ικανότητα να διατηρεί χαμηλές θερμοκρασίες σε συνθήκες διακοπής ρεύματος και κατά τη διάρκεια της πήξης, ενώ οι πολυσυμπιεστές, παρά την ανωτερότητά τους σε κάποιες παραμέτρους, εμφάνισαν μεγαλύτερους χρόνους διακοπής εκτός προδιαγραφών. Η μηχανή ελεύθερου εμβόλου είχε ταχεία απόδοση σε διαδικασίες πήξης αλλά και πρόσβαση σε θερμοκρασίες που απαιτούν προσοχή. Αυτή η έρευνα ενημερώνει τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων για την επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών ψύξης σε βιοϊατρικές, φαρμακευτικές και άλλες ευαίσθητες εφαρμογές αποθήκευσης, τονίζοντας την ανάγκη εξισορρόπησης των χαρακτηριστικών απόδοσης με τους στόχους βιωσιμότητας και τους περιορισμούς κόστους. Τα αποτελέσματα συμβάλλουν στη βαθύτερη κατανόηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας του συστήματος ψύξης, υποστηρίζοντας τελικά βελτιωμένες πρακτικές για τη διατήρηση πολύτιμων υλικών.

Λέξεις-Κλειδιά: Ομοιομορφία θερμοκρασίας, Συστήματα ψύξης, Ερμητικοί συμπιεστές, Κινητήρες ελεύθερων εμβόλων, Μηχανές πολυσυμπιεστών, Σταθερότητα θερμοκρασίας, Κανονιστικά πλαίσια, Βιομηχανικά πρότυπα, Βιοϊατρικές εφαρμογές, Φαρμακευτικές εφαρμογές, Διατήρηση υλικών

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα ψύξης είναι θεμελιώδη για τον σύγχρονο τρόπο ζωής και διαβίωσης, διαδραματίζοντας εξαιρετικά σημαντικό ρόλο σε διάφορες βιομηχανίες με την αποτελεσματική διαχείριση του ελέγχου θερμοκρασίας (Lim et al., 2016; Xu et al., 2023). Η σημασία της ψύξης σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες έχει καταστεί περισσότερο ιδιαίτερα επιτακτική από το 2020, με την έλευση της πανδημίας COVID-19, η οποία έθεσε νέες και περίπλοκες προκλήσεις και απαιτήσεις για την αποθήκευση εμβολίων σε θερμοκρασίες έως και -70°C ($\pm 10^{\circ}\text{C}$) (Xu et al., 2023). Οι απαιτήσεις κατέστησαν αναγκαία την υιοθέτηση πιο εξειδικευμένων λύσεων στην τεχνολογία της ψύξης (Phcbi, 2021). Πολλές τεχνολογίες καλύπτουν τις σύγχρονες απαιτήσεις, με την επιλογή να εξαρτάται από την επιδιωκόμενη θερμοκρασία και τις λειτουργικές ανάγκες (Ahamed et al. 2011; Barbosa et al., 2011). Έτσι, Η ζήτηση έχει προωθήσει τις τεχνολογίες ψύξης, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση και επιτυγχάνοντας χαμηλότερες θερμοκρασίες (Phcbi, 2021).

Τα παραδοσιακά συστήματα ψύξης, όπως τα συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμού (Vapor Compression Refrigeration - VCR), έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως, αλλά αντιμετωπίζουν σημαντικούς περιορισμούς λόγω των υψηλών αναλογιών πίεσης συμπιεστή (Ahamed et al. 2011; Barbosa et al., 2011). Αντίθετα, οι στροβιλομηχανές (TIR) προτιμώνται για μεγάλες εφαρμογές χάρη στην υψηλή αποτελεσματικότητά τους, μετατρέποντας την ενέργεια ρευστού σε μηχανική ισχύ για ψύξη ή ηλεκτροπαραγωγή (Zhao et al., 2009). Οι στροβιλομηχανές μετατρέπουν την ενέργεια ενός ρευστού, όπως ο αέρας ή ο ατμός, σε μηχανική ισχύ, η οποία χρησιμοποιείται για ψύξη ή ηλεκτροπαραγωγή (Zhao et al., 2009; Gondrand et al., 2014).

Για μικρότερες εφαρμογές, οι συμπιεστές με έμβολο προτιμώνται για την αξιοπιστία, την οικονομική απόδοση και την ικανότητά τους να παρέχουν υψηλή πίεση με χαμηλό κόστος (Park et al., 2020; Saravacos & Kostaropoulos, 2016; Saravacos & Kostaropoulos, 2016).

Επιπλέον, προσφέρουν καλή απόδοση σε διάφορες συνθήκες, καθιστώντας τους δημοφιλείς σε οικιακές και εμπορικές εφαρμογές. Αποτελούνται από κύλινδρο και έμβολο, το οποίο κινείται μπρος-πίσω για τη συμπίεση του αερίου (Park et al., 2020; Saravacos & Kostaropoulos, 2016).

Μεταξύ αυτών των συστημάτων, οι καταψύκτες Ultra-Low Temperature (ULT) απομακρύνουν θερμότητα με ελάχιστη ενεργειακή δαπάνη, μεγιστοποιώντας την απόδοση (Mota-Babiloni et συν., 2020; Getie et al., 2020). Είναι απαραίτητοι σε τομείς όπως η βιοϊατρική, η επιστημονική έρευνα, η ηλεκτρονική και η χημεία, διασφαλίζοντας σταθερότητα και ακεραιότητα ευαίσθητων υλικών (Lim et al., 2016; Xu et al., 2023; Getie et al., 2020). Για να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες των καταψυκτών ULT, η σωστή συντήρηση και λειτουργία είναι ζωτικής σημασίας (Evans, 2022; Lim et al., 2016). Η τήρηση των βέλτιστων πρακτικών διασφαλίζει τη μακροζωία και την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων, ενισχύοντας τα ερευνητικά αποτελέσματα και συμβάλλοντας στην δημιουργία και συσσώρευση πολύτιμων δεδομένων που οδηγούν την επιστημονική πρόοδο (Lim et al., 2016).

Για την επίτευξη των χαμηλών θερμοκρασιών που απαιτεί η τεχνολογία ULT στους καταψύκτες, υπάρχουν δύο κύριες τεχνολογίες: το σύστημα ψύξης Cascade δύο σταδίων (CRS) και το ψυγείο Stirling (ελεύθερο έμβολο-free piston engine) (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021). Το CRS είναι μια αποτελεσματική λύση που χρησιμοποιεί δύο κύκλους συμπίεσης για την επίτευξη των επιθυμητών θερμοκρασιών, συνδυάζοντας διαφορετικά ψυκτικά μέσα για να πετύχει άριστη θερμοδυναμική απόδοση (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021). Από την άλλη, το ψυγείο Stirling προσφέρει εξειδικευμένα πλεονεκτήματα όπως η σχετική ήσυχη λειτουργία και η δυνατότητα επίτευξης εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών με υψηλή απόδοση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που το καθιστά ελκυστική επιλογή σε εφαρμογές όπου η ενεργειακή αποδοτικότητα και η αξιοπιστία είναι κρίσιμες (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021). Και τα δύο συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να επιτυγχάνουν χαμηλές θερμοκρασίες αλλά μέσω διαφορετικών μηχανισμών και εφαρμογών (Hajagos, 2021).

Συνολικά, η επιστημονική κοινότητα έχει αναγνωρίσει τη σημασία των καταψυκτών εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας, όχι μόνο ως μηχανισμός αποθήκευσης, αλλά και ως εργαλείο που ενισχύει την έρευνα και την καινοτομία (Hajagos, 2021; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023; Xu et al., 2023; Getie et al., 2020). Στο σύνολό τους, οι καταψύκτες ULT συνδυάζουν την επιστήμη με την υγειονομική και κοινωνική ευθύνη, ανοίγοντας τον δρόμο για μια καλύτερη και υγιέστερη κοινωνία (Berchowitz & Kwon, 2012; Getie et al., 2020). Η δέσμευση στην καινοτομία και η διαρκής απόδοση στην υγειονομική περίθαλψη καθιστούν απαραίτητη τη συνεχιζόμενη επένδυση στην τεχνολογία αποθήκευσης (Hajagos, 2021; Saeed et al., 2023; Xu et al., 2023; Getie et al., 2020). Η συνεργασία, η κανονιστική συμμόρφωση και η υπεύθυνη διαχείριση θα υποστηρίξουν την πρόοδο προς μια υγιέστερη ανθρωπότητα και μια πιο βιώσιμη επιστημονική έρευνα (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023; Xu et al., 2023; Getie et al., 2020).

Επομένως, η πυχιακή εργασία έχει ως σκοπό τη διερεύνηση της ομοιομορφίας θερμοκρασίας και της απόδοσης σε τρία διαφορετικά συστήματα ψύξης

χαμηλών θερμοκρασιών: τον ερμητικό συμπίεστή, τη μηχανή ελεύθερου εμβόλου και το σύστημα πολυσυμπίεστων. Παρά το γεγονός ότι κάθε μοντέλο προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα και προκλήσεις, η πλήρης κατανόηση της συγκριτικής τους απόδοσης δεν έχει εξεταστεί εκτενώς μέχρι σήμερα.

Η μελέτη εστιάζει στην κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διατήρηση σταθερών θερμικών συνθηκών σε εφαρμογές που απαιτούν ακριβή θερμική διαχείριση, σε ένα περιβάλλον που αυξάνει τη ζήτηση για εξοικονόμηση ενέργειας και βιωσιμότητα. Με την εφαρμογή οργανωμένων μεθόδων έρευνας, η εργασία στοχεύει να προσφέρει μια λεπτομερή εικόνα για τις διαθέσιμες τεχνολογίες και τις βέλτιστες πρακτικές στη διαχείριση των συστημάτων ψύξης.

Οι ευρήματα της εργασίας έχουν σκοπό να συμβάλουν στη βελτίωση της κατανόησης των μηχανισμών και των αναδυόμενων τεχνολογιών στον τομέα της ψύξης, ανταγωνιζόμενα τις τρέχουσες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι επιστήμονες και οι βιομηχανικοί επαγγελματίες. Συνολικά, η εργασία αναμένεται να προσφέρει κρίσιμες γνώσεις για την επιλογή και αναβάθμιση εξοπλισμού, προωθώντας την αριστεία και την καινοτομία στην επιστήμη και την τεχνολογία.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία αυτής της εργασίας περιλαμβάνει δύο βασικά μέρη: την πειραματική ανάλυση των συστημάτων ψύξης χαμηλών θερμοκρασιών και την ανάλυση ιστορικών δεδομένων μέσω τεχνικών παλινδρόμησης. Η συλλογή δεδομένων έγινε με τη χρήση βαθμονομημένων αισθητήρων υψηλής ακρίβειας, τοποθετημένων στρατηγικά εντός των θαλάμων ψύξης. Οι ελεγχόμενες θερμοκρασίες (-40°C και -70°C) επιλέχθηκαν για τη διατήρηση βιολογικών δειγμάτων και φαρμάκων. Αναλύθηκαν τρία συστήματα ψύξης: ερμητικός συμπίεστής, μηχανή ελεύθερου εμβόλου και σύστημα πολυσυμπίεστων, υπό πλήρες φορτίο. Δοκιμές ανοιχτής πόρτας και διακοπής ρεύματος αξιολόγησαν τη θερμική σταθερότητα και την ταχύτητα αποκατάστασης θερμοκρασίας. Η στατιστική ανάλυση περιλάμβανε επεξεργασία δεδομένων, περιγραφική στατιστική και παλινδρόμηση πάνελ, εξετάζοντας τη σταθερότητα και απόδοση των συστημάτων ψύξης. Παράγοντες όπως η μηνιαία μέση θερμοκρασία και η σχετική υγρασία ενσωματώθηκαν για πληρέστερη αξιολόγηση. Η σύγκριση των συστημάτων ανέδειξε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ως προς την απόδοση, την κατανάλωση ενέργειας και την ασφάλεια. Τα ευρήματα συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης θερμοκρασίας, ενισχύοντας την απόδοση των ULT καταψυκτών και τη διατήρηση ευαίσθητων δειγμάτων σε επιστημονικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η συγκριτική ανάλυση των τριών τύπων καταψυκτών ULT αποκαλύπτει ευδιάκριτες διαφορές στην απόδοση και την ομοιομορφία τους τόσο στις ρυθμίσεις -40°C όσο και στους -70°C κατά την δοκιμή παρακολούθησης της θερμοκρασίας για τουλάχιστον 24 ώρες με και χωρίς φορτίο. Τα αποτελέσματα από τη δοκιμή 24ωρης συνεχούς μέτρησης θερμοκρασίας δείχνουν τη διαχείριση και απόδοση τριών διαφορετικών τύπων καταψυκτών σε δύο θερμοκρασίες ρύθμισης (-40°C και -70°C) και σε δύο διαφορετικές καταστάσεις (κενός και γεμάτος θάλαμος). Στο επίπεδο -40°C, η μηχανή ελεύθερου εμβόλου παρουσίασε την πιο χαμηλή θερμοκρασία στους γεμάτους θαλάμους (-43,75°C) με την ελάχιστη μεταβλητότητα (0,08°C), υποδεικνύοντας καλή σταθερότητα, ενώ οι

άλλοι τύποι καταψυκτών είχαν ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες και μεγαλύτερη διακύμανση.

Στην περίπτωση της ρύθμισης -70°C , παρατηρείται ότι η μηχανή ελεύθερου εμβόλου ξανά εμφάνισε την πιο χαμηλή θερμοκρασία ($-73,46^{\circ}\text{C}$) και την πιο χαμηλή μεταβλητότητα στα δεδομένα της μέτρησης, ένδειξη εντυπωσιακής απόδοσης. Ο ερμητικός συμπίεστής και η μηχανή πολυσυμπιεστών παρέχουν επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα, αν και με ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτές οι πληροφορίες μπορεί να είναι χρήσιμες για την επιλογή του κατάλληλου τύπου καταψύκτη ανάλογα με τις απαιτήσεις αποθήκευσης και τη σταθερότητα θερμοκρασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

Δοκιμή 24ωρης Συνεχής Μέτρησης Θερμοκρασίας

Σημείο ρύθμισης	Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	μ	σ
-40°C	Ερμητικός Συμπιεστής	Κενός Θάλαμος	$-42,28^{\circ}\text{C}$	$1,54^{\circ}\text{C}$
		Φορτωμένος Θάλαμος	$-42,31^{\circ}\text{C}$	$1,40^{\circ}\text{C}$
	Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Κενός Θάλαμος	$-44,03^{\circ}\text{C}$	$0,32^{\circ}\text{C}$
		Φορτωμένος Θάλαμος	$-43,75^{\circ}\text{C}$	$0,08^{\circ}\text{C}$
	Μηχανή Πολυσυμπιεστών	Κενός Θάλαμος	$-42,20^{\circ}\text{C}$	$1,28^{\circ}\text{C}$
		Φορτωμένος Θάλαμος	$-42,26^{\circ}\text{C}$	$1,24^{\circ}\text{C}$
-70°C	Ερμητικός Συμπιεστής	Κενός Θάλαμος	$-70,57^{\circ}\text{C}$	$0,98^{\circ}\text{C}$
		Φορτωμένος Θάλαμος	$-70,80^{\circ}\text{C}$	$0,97^{\circ}\text{C}$
	Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Κενός Θάλαμος	$-72,23^{\circ}\text{C}$	$0,63^{\circ}\text{C}$
		Φορτωμένος Θάλαμος	$-73,46^{\circ}\text{C}$	$0,23^{\circ}\text{C}$

Η ανάλυση της **Δοκιμής Ανοίγματος Πόρτας** δείχνει ότι και οι τρεις τύποι καταψύκτη δυσκολεύονται περισσότερο στους -70°C σε σύγκριση με τους -40°C , με τον Ερμητικό Συμπιεστή να παρουσιάζει τη σημαντικότερη μείωση στην απόδοση. Στη ρύθμιση -40°C , παρατηρείται ότι η μηχανή πολυσυμπιεστών υπερτερεί σε ταχύτητα επιστροφής στη σταθερή θερμοκρασία, με μέσο χρόνο 5,67-5,6 δευτερόλεπτα για άδειο και φορτωμένο θάλαμο αντίστοιχα. Αυτή η ταχύτητα επιτρέπει στον καταψύκτη να διατηρήσει καλύτερα τη χαμηλή θερμοκρασία κατά την διάρκεια της διαδικασίας. Στην περίπτωση της ρύθμισης -70°C , η κατάσταση είναι παρόμοια, με τη μηχανή πολυσυμπιεστών να συγκρατεί την πιο χαμηλή μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία, γεγονός που υποδεικνύει και σε αυτή την περίπτωση αποτελεσματική απόδοση. Οι θερμοκρασίες που παρατηρούνται στους άλλους τύπους καταψυκτών είναι υψηλότερες, κάτι που μπορεί να προκαλέσει ανησυχία σχετικά με την ασφάλεια των προϊόντων που αποθηκεύονται, ιδιαίτερα όταν η πόρτα είναι ανοιχτή. Συνολικά, η μηχανή ελεύθερου εμβόλου και ο ερμητικός συμπίεστής αποδείχθηκαν επίσης αποτελεσματικοί, αν και με λιγότερη ταχύτητα επιστροφής και ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙ

Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας

Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Χρόνος επιστροφής εντός των προδιαγραφών		Μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία κατά τη δοκιμή ανοιχτής πόρτας	
		μ	σ	μ	σ
-40°C					
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος	13	3,13	-21,97°C	4,50°C
	Φορτωμένος Θάλαμος	13,8	2,25	-22,38°C	3,81°C
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος	11	2,45	-23,73°C	3,20°C
	Φορτωμένος Θάλαμος	12	2,61	-23,58°C	3,09°C
Μηχανή Πολυσυμπιεστών	Άδειος Θάλαμος	5,67	1,14	-26,97°C	8,02°C
	Φορτωμένος Θάλαμος	5,6	1,36	-27,12°C	7,97°C
-70°C					
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος	12,6	3,72	-37,38°C	5,51°C
	Φορτωμένος Θάλαμος	12,1	3,18	-37,72°C	5,34°C
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος	11,5	2,8	-39,15°C	5,72°C
	Φορτωμένος Θάλαμος	12,8	2,52	-39,73°C	6,11°C

Η ανάλυση των **δοκιμών διακοπής ρεύματος** στους τρεις τύπους καταψυκτών παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την ομοιομορφία και την απόδοση της θερμοκρασίας. Στη ρύθμιση -40°C , η μηχανή πολυσυμπιεστών εμφανίζει την μεγαλύτερη διάρκεια πριν ξεφυγεί από τις προδιαγραφές με 307,27 δευτερόλεπτα για άδειο θάλαμο, υποδεικνύοντας έτσι την καλή ανθεκτικότητα σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος. Παράλληλα, η μηχανή ελεύθερου εμβόλου χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να επανέλθει εντός προδιαγραφών (26,9 δευτερόλεπτα για τον άδειο θάλαμο), συγκριτικά με άλλους τύπους. Αντίστοιχα, στη ρύθμιση -70°C , οι χρόνοι είναι συγκρίσιμοι, με τον ερμητικό συμπίεστή να έχει μικρές αποκλίσεις στα αποτελέσματα, αλλά η μηχανή ελεύθερου εμβόλου και πάλι διατηρεί υψηλότερους χρόνους επιστροφής στη σταθερότητα. Αυτά τα δεδομένα υποδεικνύουν ότι οι καταψύκτες πρέπει να επιλέγονται ανάλογα με τις απαιτήσεις αποθήκευσης και την αντοχή τους σε διακοπές ρεύματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ

Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος

Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Μέσος Χρόνος για βγει εκτός προδιαγραφών μετά την απενεργοποίηση της παροχής ρεύματος	Μέσος Χρόνος επιστροφής εντός των προδιαγραφών κατά την ενεργοποίηση της παροχής ρεύματος
-40°C			
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος	106	32,1
	Φορτωμένος Θάλαμος	107,9	30,1
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος	119,7	26,9
	Φορτωμένος Θάλαμος	118,8	27,8
Μηχανή Πολυσυμπιεστών	Άδειος Θάλαμος	307,27	31,33
	Φορτωμένος Θάλαμος	305,8	33,47
-70°C			
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος	109,9	30,6
	Φορτωμένος Θάλαμος	104	31,7
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος	119,3	27,3
	Φορτωμένος Θάλαμος	116,8	27,2

Η **δοκιμή ψύξης** έδωσε σημαντικά δεδομένα προς ανάλυση. Τα συστήματα ελεύθερου εμβόλου εμφανίζουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία, οι οποίες μπορεί να θεωρηθούν αποτέλεσμα του ταχύτερου ρυθμού μεταβολής προς την επιθυμητή θερμοκρασία. Σε γενικές γραμμές, οι μέσες θερμοκρασίες στη φάση 1 δείχνουν ότι ο πολυσυμπιεστής είχε την πιο θερμή απόδοση με μέση τιμή $14,82^{\circ}\text{C}$ και τη μικρότερη διάρκεια στα 154 λεπτά, υποδεικνύοντας ταχύτερη απελευθέρωση θερμότητας. Αντίθετα, ο ερμητικός συμπίεστής κατάφερε να διατηρεί τη θερμοκρασία με σταθερότητα, καθώς παρουσιάζει τις μικρότερες διακυμάνσεις σωστά καταναεμημένες, όπως αποτυπώνεται στους συντελεστές διακύμανσης. Στη φάση 3, παρατηρείται ότι οι μέσες θερμοκρασίες είναι υποτονικές (αρνητικές) σε όλους τους τύπους καταψυκτών, με τον ερμητικό συμπίεστή να επιτυγχάνει τη χαμηλότερη μέση τιμή ($-0,57^{\circ}\text{C}$) και την πιο σταθερή απόδοση βάση της τυπικής απόκλισης και του συντελεστή διακύμανσης. Αυτό υποδηλώνει ότι ο ερμητικός συμπίεστής είναι πιο αποδοτικός στη διαδικασία πήξης των μπουκαλιών. Στη φάση 5, οι θερμοκρασίες είναι επίσης αρκετά χαμηλές, με τον ερμητικό και τον ελεύθερο έμβολο να κρατούν πιο σταθερές θερμοκρασίες, δείχνοντας μία πιο πολυδιάστατη απόδοση κατά τη διάρκεια της εφαρμογής. Αυτά τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αξία της επιλογής του κατάλληλου τύπου καταψύκτη ανάλογα με τις ανάγκες διατήρησης και πήξης προϊόντων.

ΠΙΝΑΚΑΣ IV

Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών

Φάση	Ράφι	Μεταβλητές Ανάλυσης	Ερμητικός Συμπίεστής	Ελεύθερο Έμβολο	Πολυσυμπιεστές
1	Κάτω	Μέση Τιμή	14,12	14,50	14,82
		Τυπική Απόκλιση	6,30	6,55	6,57
		Συντελεστής Διακύμανσης	44,6%	45,2%	44,3%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	225	231	154
		Μέση Τιμή	14,6	12,6	13,5
	Επάνω	Τυπική Απόκλιση	5,6	7,9	7,6
		Συντελεστής Διακύμανσης	38,1%	62,4%	56,8%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	197	235	168
		Μέση Τιμή	14,36	13,54	14,14
		Τυπική Απόκλιση	5,93	7,20	7,11
	Μέσος Όρος	Συντελεστής Διακύμανσης	41,3%	53,8%	50,6%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	211,00	233,00	161,00
		Μέση Τιμή	-0,40	-0,31	-0,45
		Τυπική Απόκλιση	0,04	0,07	0,08
		Συντελεστής Διακύμανσης	10,3%	22,9%	16,8%
3	Κάτω	Διάρκεια (σε λεπτά)	698	364	207
		Μέση Τιμή	-0,73	-0,26	-0,27
		Τυπική Απόκλιση	0,08	0,12	0,11
		Συντελεστής Διακύμανσης	11,7%	44,5%	41,3%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	587	329	114
	Επάνω	Μέση Τιμή	-0,57	-0,28	-0,36
		Τυπική Απόκλιση	0,06	0,09	0,09
		Συντελεστής Διακύμανσης	11,0%	33,7%	29,0%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	642,50	346,50	160,50
		Μέση Τιμή	-27,88	-26,85	-22,83
	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκλιση	16,39	15,54	15,92
		Συντελεστής Διακύμανσης	58,8%	57,9%	69,7%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	1528	1833	1356
		Μέση Τιμή	-33,24	-26,46	-23,75
		Επάνω			

Οι Πίνακες V, VI και VII περιλαμβάνουν στατιστικά αποτελέσματα για τρεις τύπους καταψυκτών: τον ερμητικό συμπίεστή, τον ελεύθερο έμβολο και τους πολυσυμπιεστές, εστιάζοντας στις σημαντικές μεταβλητές που σχετίζονται με τις επιδόσεις τους. Στον Πίνακα V, οι στατιστικές αναλύσεις της μεταβλητής του ερμητικού συμπίεστή δείχνουν ότι ο μηνιαίος αριθμός φορών ανοίγματος θυρών έχει θετική και στατιστικά σημαντική επίδραση ($p<0.01$) στην απόδοση, με μία μέση τιμή 0,187 που υποδηλώνει αυξημένη ευαισθησία στην θερμοκρασία.

Στον Πίνακα VI, οι δικές του μεταβλητές περιλαμβάνουν χρονική υστέρηση μέσης τιμής, που επισημαίνει τη σημασία του χρόνου στην αλλαγή θερμοκρασίας, δείχνοντας θετική και στατιστικά σημαντική επίδραση ($p<0.01$). Επιπλέον, η επιρροή της μηνιαίας μέσης θερμοκρασίας του χειμώνα και του φθινοπώρου είναι επίσης αξιοσημείωτη, ιδιαίτερα στο πλαίσιο αλλαγών στις συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας.

Στον Πίνακα VII, οι πολυσυμπιεστές αποκαλύπτουν ότι η χρονική υστέρηση μέσης τιμής έχει θετική αλλά λιγότερο σημαντική ($p<0.1$) επίδραση. Η μηνιαία μέση σχετική υγρασία του χειμώνα έχει επίσης αρνητική, αλλά σημαντική επίδραση ($p<0.05$). Αυτές οι διαδοχικές αναλύσεις επισημαίνουν τη σημασία των περιβαλλοντικών παραμέτρων και του τρόπου διαχείρισης της θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία των καταψυκτών, υποδεικνύοντας ότι η κατανόηση αυτών των παραγόντων είναι κρίσιμη για την αποδοτικότητα και τη λειτουργία τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ V

Ερμητικός Συμπίεστής

VARIABLES	Mean Εξίσωση 4	StDev Εξίσωση 5	CoefVar Εξίσωση 6
Constant	-91.30***	-62.74	-1.281
Μηνιαίος αριθμός φορών ανοίγματος θυρών	0.187***	0.337***	0.00688***
Observations	216	216	216
Number of groups	9	9	9

Standard errors in parentheses | *** $p<0.01$, ** $p<0.05$, * $p<0.1$

ΠΙΝΑΚΑΣ VI

Ελεύθερο Έμβολο

VARIABLES	Mean Εξίσωση 4	StDev Εξίσωση 5	CoefVar Εξίσωση 6
Constant	-22.86**	-4.741*	-0.0952*
Χρονική Υστέρηση Μέσης Τιμής	0.531***		
Μηνιαίος αριθμός φορών ανοίγματος θυρών	0.0779***	0.213***	0.00556***
Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Χειμώνας	0.0659	0.345**	0.00696**
Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Ανοιξη	0.161	0.216**	0.00443**
Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Καλοκαίρι	0.218	0.205	0.00385
Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Φθινόπωρο	-0.113	0.187*	0.00427*
Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία - Χειμώνας	0.0192	-0.0666**	-0.00131**
Observations	239	239	239
Number of groups	10	10	10

Standard errors in parentheses | *** $p<0.01$, ** $p<0.05$, * $p<0.1$

ΠΙΝΑΚΑΣ VII

Πολυσυμπιεστές

VARIABLES	Mean Εξίσωση 4	StDev Εξίσωση 5	CoefVar Εξίσωση 6
Constant	-44.45***	-10.86	-0.325
Χρονική Υστέρηση Μέσης Τιμής	0.0311*		
Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία - Χειμώνας	-0.0982**	0.0679	0.00169
Observations	88	88	88
Number of groups	4	4	4

Standard errors in parentheses | *** $p<0.01$, ** $p<0.05$, * $p<0.1$

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος για εγκαταστάσεις αποθήκευσης είναι κρίσιμη, ιδιαίτερα η ικανότητα σταθερού ελέγχου θερμοκρασίας και προσαρμοστικότητας σε διαφορετικές συνθήκες φορτίου.

Ο καταψυκτής με κινητήρα ελεύθερου εμβόλου ξεχωρίζει για την αποτελεσματική του απόδοση, καθώς προσφέρει τη χαμήλωση τυπικής απόκλισης και μεταβλητότητας κατά τη διάρκεια δοκιμών, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα θερμοκρασίας σε κρίσιμες εφαρμογές. Αντίθετα, οι ερμητικοί συμπίεστές, αν και αποδοτικοί, παρουσιάζουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις θερμοκρασίας, ειδικά κατά τις αλλαγές φορτίου. Το σύστημα πολλαπλών συμπίεστών διακρίνεται για τη σταθερότητα και την ικανότητά του να διατηρεί χαμηλές θερμοκρασίες κατά τις διακοπές ρεύματος, αν και η συνολική του απόδοση είναι περιορισμένη από την ανάγκη μεγαλύτερης κατανάλωσης ενέργειας.

Η αντοχή στην απώλεια ενέργειας αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για την αξιολόγηση των καταψυκτών ULT. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου παρουσιάζει χαμηλότερες αποκλίσεις θερμοκρασίας σε περίπτωση διακοπής ρεύματος, αλλά οι πολλαπλοί συμπίεστές υπερτερούν στην απόδοση ανάκαμψης. Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι τα περιβαλλοντικά ζητήματα επηρεάζουν την επιλογή της τεχνολογίας, με την αναγκαιότητα χρήσης βιώσιμων ψυκτικών να αναδεικνύεται ως προτεραιότητα για τη μελλοντική ανάπτυξη των συστημάτων.

Τέλος, η μελέτη αναγνωρίζει τους περιορισμούς της, όπως η ανάγκη επαγγελματικής συντήρησης των κινητήρων ελεύθερου εμβόλου και οι περιορισμένες συνθήκες δοκιμής. Για το μέλλον, προτείνεται η χρήση έξυπνων τεχνολογιών για την παρακολούθηση και ρύθμιση των καταψυκτών, καθώς και η διερεύνηση στρατηγικών που επιτρέπουν τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Οι προτάσεις αυτές έχουν ως στόχο την ενίσχυση της λειτουργικής απόδοσης και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, επιδιώκοντας παράλληλα τη βελτίωση της ασφάλειας και της ποιότητας των αποθηκευμένων υλικών.

Αυτή η συζήτηση υπογραμμίζει τους συμβιβασμούς μεταξύ ομοιομορφίας θερμοκρασίας, ενεργειακής απόδοσης και ανθεκτικότητας ισχύος μεταξύ διαφορετικών συστημάτων ψύξης ULT. Το σύστημα πολλαπλών συμπίεστών αναδεικνύεται ως η πιο σταθερή

και ανθεκτική επιλογή, ιδιαίτερα σε εφαρμογές αποθήκευσης υψηλής ασφάλειας. Ωστόσο, η υψηλότερη ζήτηση ενέργειας απαιτεί βιώσιμες επιλογές ψυκτικού μέσου για ευθυγράμμιση με τα ρυθμιστικά πλαίσια. Οι κινητήρες ελεύθερου εμβόλου παρουσιάζουν μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για εφαρμογές με γνώμονα την ενέργεια, αλλά απαιτούν περαιτέρω βελτιστοποίηση στην απόδοση ανάκτησης.

Τελικά, η επιλογή της τεχνολογίας ψύξης ULT εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής, την εξισορρόπηση του κόστους, της αποδοτικότητας και των περιβαλλοντικών ζητημάτων. Η συνεχής καινοτομία στο σχεδιασμό συμπιεστών, στην επιλογή ψυκτικού μέσου και στις έξυπνες τεχνολογίες παρακολούθησης θα διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος των λύσεων αποθήκευσης ULT, διασφαλίζοντας τόσο την επιχειρησιακή αριστεία όσο και τη βιωσιμότητα στις βιοαποθετήριες και φαρμακευτικές βιομηχανίες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον καθηγητή Βαρζάκα Θεόδωρο για την καθοδήγηση και την υποστήριξη του καθόλη τη διάρκεια αυτού του έργου. Η τεχνογνωσία και η ενθάρρυνσή του υπήρξαν ανεκτίμητες για την ολοκλήρωση αυτής της έρευνας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ajmani, P. S. (2020). Storage of blood. In *Immunohematology and blood banking* (pp. 1-15). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8435-0_4

Annaratone, L., De Palma, G., Bonizzi, G., Sapino, A., Botti, G., Berrino, E., et al. (2021). Basic principles of biobanking: From biological samples to precision medicine for patients. *Virchows Archiv*, 479(2), 233–246.

Arshad, M. O., Azam, Q., Ahmad, S. T. I., Khan, F., & Wahid, M. A. (2021). Analysis of vapour compression refrigeration system with R-12, R-134a and R-22: An exergy approach. *Materials Today: Proceedings*, 46(Part 15), 6748–6752. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.278>

Babushok, V. I., & Linteris, G. T. (2024). Air humidity influence on combustion of R-1234yf (CF₃CFCH₂), R-1234ze(E) (trans-CF₃CHCHF), and R-134a (CH₂FCF₃) refrigerants. *Combustion and Flame*, 262, 113352. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113352>

Butt, S. S., Perera, U. A., Miyazaki, T., Thu, K., & Higashi, Y. (2024). Energy, exergy, and environmental (3E) analysis of low GWP refrigerants in cascade refrigeration system for low temperature applications. *International Journal of Refrigeration*, 160, 373–389. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.12.020>

Bychkov, E., Yakovlev, V., & Saakyan, N. (2024). Experimental investigation and regression analysis on the characteristics of the JT refrigerator operating with natural refrigerant mixtures. *Thermal Science and Engineering Progress*, 48, 102410. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102410>

Calleja-Anta, D., Martínez-Ángeles, M., Nebot-Andres, L., Sánchez, D., & Llopis, R. (2024). Optimizing R152a/R600 and R290/R600 mixtures for superior energy performance in vapor compression systems: Promising alternatives to Isobutane (R600a). *Applied Thermal Engineering*, 247, 123070. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123070>

Caramaschi, M., Jensen, J. K., Poppi, S., Østergaard, K. K., Ommen, T. S., Kærn, M. R., Madani, H., & Elmegaard, B. (2024). Natural refrigerant mixtures in low-charge heat pumps: An analysis of the potential for performance enhancements. *International Journal of Refrigeration*, 165, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.04.016>

Dhiman, P., & Kumar, A. (2023). A situational based reliability indices estimation of ULT freezer using preventive maintenance under fuzzy environment. *International Journal of Mathematical Engineering and Management Sciences*. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2023.8.3.0xx>

Dhiman, P., & Kumar, A. (2023). A situational-based reliability indices estimation of ULT freezer using preventive maintenance under fuzzy environment. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 8(3), xxx–xxx. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2023.8.3.0xx>

European Commission. (2015). Guidelines of 19 March 2015 on principles of good distribution practice of active substances for medicinal products for human use (Text with EEA relevance) (2015/C 95/01). Retrieved from URL [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015XC0321\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015XC0321(01))

Fabris, F., Fabrizio, M., Marinetti, S., Rossetti, A., & Minetto, S. (2024). Evaluation of the carbon footprint of HFC and natural refrigerant transport refrigeration units from a life-cycle perspective. *International Journal of Refrigeration*, 159, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.12.018>

Graham, M., Samuel, G., & Farley, M. Roadmap for low-carbon ultra-low temperature storage in biobanking. *J Transl Med* 22, 747 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12967-024-05383-5>

Graham, M., Samuel, G., & Farley, M. (2024). Roadmap for low-carbon ultra-low temperature storage in biobanking. *Journal of Translational Medicine*, 22, 747. <https://doi.org/10.1186/s12967-024-05383-5>

Ha, S.-J., & Lee, J.-H. (2024). Heat transfer characteristics of R-1234yf, an eco-friendly alternative refrigerant, in condenser for semiconductor chiller. *Applied Thermal Engineering*, 239, 122106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122106>

Human Tissue Authority. (2023). How licensing works under the Human Tissue Quality and Safety Regulations. Human Tissue Authority. <https://www.hta.gov.uk/guidance-professionals/licences-roles-and-fees/licensing/how-licensing-works-under-human-tissue>

International Society for Biological and Environmental Repositories (ISBER). (2008). Collection, storage, retrieval, and distribution of biological materials for research. *Cell Preservation Technology*, 6(1). <https://doi.org/10.1089/cpt.2008.9997>

ISPE. (2016). Good practice guide: Controlled temperature chamber mapping and monitoring. International Society for Pharmaceutical Engineering.

ISPE. (2019). Commissioning and Qualification. Volume 5, 2nd Edition. International Society for Pharmaceutical Engineering.

Jeon, S., Ko, J., Lee, H., & Jeong, J. H. (2025). Advanced model for a non-adiabatic capillary tube considering both subcooled liquid and non-equilibrium two-phase states of R-600a. *International Journal of Refrigeration*, 169, 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.10.031>

Kanbur, B. B., Kriezi, E. E., Markussen, W. B., Kærn, M. R., Busch, A., & Kristófersson, J. (2025). Framework for prediction of two-phase R-744 ejector performance based on integration of thermodynamic models with multiphase mixture CFD simulations. *Applied Thermal Engineering*, 258(Part C), 124888. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124888>

Kumar, A., Lakshmi, B. J., Yang, S.-Y., & Wang, C.-C. (2024). Effect of viscosity grade (POE) on the smooth-tube pool boiling performance with R-1234ze(E) refrigerant. *Applied Thermal Engineering*, 241, 122328. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122328>

Leehey, M. H., Kujak, S., & Collins, C. (2024). Chemical stability of HFO and HCO refrigerants. In *International Refrigeration and Air Conditioning Conference (Paper 2555)*. Purdue University. <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/2555>

Liu, J., Yu, J., & Yan, G. (2024). Experimental study on Joule-Thomson refrigeration system with R1150/R290/R601a for ultra-low temperature medical freezer. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124015>

Miyawaki, K., & Shikazono, N. (2024). Experimental evaluation of NIR spectroscopic characteristics of liquid R32, R1234yf, and R454C refrigerants. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 156, 107633. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107633>

Six, P., Valtz, A., Zhou, Y., Yang, Z., & Coquelet, C. (2024). Experimental measurements and correlation of vapor–liquid equilibrium data for the difluoromethane (R32) + 1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)) binary system from 254 to 348 K. *Fluid Phase Equilibria*, 581, 114072. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2024.114072>