



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παραμετρική ανάλυση ψυκτικών ρευστών και η εφαρμογή  
τους σε οικιακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις**

**Φοιτητής: Καμέσης Παναγιώτης ΑΜ:51204201**

**Επιβλέπων καθηγητής: Σαρρής Ιωάννης**

Αθήνα 2021

## **Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής**

**1. Ι. Σαρής**

**2. Ε. Προεστάκης**

**3. Α. Γκούντας**


## Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Καμέσης Παναγιώτης του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 51204201 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολογίας, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



## Πίνακας Περιεχομένων

Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	7
Κατάλογος Πινάκων .....	8
Εισαγωγή .....	11
Στόχος της Εργασίας.....	13
Θεωρητικό Πλαίσιο .....	13
Ψύξη και Ψυκτικά Ρευστά .....	13
Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις της Ψύξης .....	21
Ρυθμιστικές Πολιτικές .....	26
Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ .....	26
Η Συμφωνία των Παρισίων .....	28
Φθοριούχα Ψυκτικά Ρευστά .....	29
Δεδομένου ότι πολλές ουσίες και μείγματα αυτών έχουν προταθεί ως ψυκτικά για κύκλους ψύξης με συμπίεση ατμών, αυτό το κεφάλαιο συνοψίζει τους κανόνες αρίθμησης και χαρακτηρισμού για φθοριούχες ενώσεις που χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά. ....	29
Μονοσυστατικά Ψυκτικά.....	29

Ψυκτικά Μείγματα.....	31
Προθέματα προσδιορισμού.....	32
Νέες Εφαρμογές των Ψυκτικών Ρευστών .....	33
Εκτίμηση των Νέων Ψυκτικών Ρευστών.....	33
Φυσικά Ψυκτικά Ρευστά.....	40
Μονά Ψυκτικά Ρευστά.....	42
Μείγματα Ψυκτικών Ρευστών .....	43
Χημική Σταθερότητα και Υλική Συμβατότητα των Ψυκτικών Ρευστών .....	48
Εφαρμογές Ψυκτικών Ρευστών .....	54
Φθοριούχα αέρια που χρησιμοποιούνται στην ΕΕ .....	54
Επιπτώσεις που επιβάλλονται από τον κανονισμό F-gas .....	58
Απαγόρευση υπηρεσίας .....	59
Τομεακές απαγορεύσεις POM .....	60
Πρόγραμμα σταδιακής κατάργησης .....	63
Ομάδες νέων ψυκτικών.....	64
Νέες εναλλακτικές λύσεις για τα R404A, R134a και R410A .....	68
Συμπεράσματα .....	84

Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....	88
Βιβλιογραφία .....	90

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Ιστορικές και προβλεπόμενες εκπομπές (a) και ακτινοβολητική πίεση (b) από εναλλακτικές λύσεις ODS, HFC και HFC.....	24
Διάγραμμα 2 Ο δομικός τύπος των R1234yf και R1234ze (E) .....	52

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Πρωτόκολλο Μόντρεαλ Μείωση του HFC για χώρες μέλη της ΕΕ .....	26
Πίνακας 2 Ορισμός επιλεγμένων ισομερών σειράς προπενίου .....	30
Πίνακας 3 Χημικές ονομασίες και GWP των υγρών.....	33
Πίνακας 4 Αριθμός αναφορών βιβλιογραφικών αναφορών από ομοτίμους .....	38
Πίνακας 5 Συντελεστής απόδοσης και ογκομετρική ικανότητα επιλεγμένων πιθανών υγρών χαμηλής υπερθέρμανσης του πλανήτη. ....	40
Πίνακας 6 Νέα ψυκτικά συστατικά. ....	42
Πίνακας 7 Νέα ζεοτροπικά μείγματα.....	45
Πίνακας 8 Νέα αζεοτροπικά μείγματα .....	48
Πίνακας 9 Συμβατότητα των πολυμερών και ψυκτικών που ερευνήθηκαν. ....	53
Πίνακας 10 Τυπικά ψυκτικά που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικούς τομείς εφαρμογής στην ΕΕ.....	56
Πίνακας 11 Σύνθεση σε ποσοστό μάζας ψυκτικών HFC που χρησιμοποιούνται συνήθως .....	56
Πίνακας 12 Κύριες ιδιότητες των τυπικών ψυκτικών που χρησιμοποιούνται .....	58



Πίνακας 13 Εφαρμογές στόχου και όρια GWP εναλλακτικών ψυκτικών που προκύπτουν από τα αποτελέσματα του κανονισμού F-gas. ....	62
Πίνακας 14 Ποσό μείωσης HFC που μεταφράζεται σε εκπομπές ισοδύναμων CO <sub>2</sub> .....	64
Πίνακας 15 Θερμοκρασίες βρασμού κοινών ψυκτικών HFC .....	65
Πίνακας 16 Νέα ψυκτικά με GWP <2500 ομαδοποιημένα σύμφωνα με τις θερμοκρασίες του σημείου βρασμού, την κατηγορία ασφαλείας και το GWP .....	66
Πίνακας 17 Σύνθεση εναλλακτικών μειγμάτων R404A και A1.....	70
Πίνακας 18 Σύνθεση του R404A και των εύφλεκτων εναλλακτικών του μειγμάτων.....	71
Πίνακας 19 Θεωρητική επισκόπηση των παραμέτρων λειτουργίας των εναλλακτικών R404A (-35/35 ° C μέση εξάτμιση / μέση θερμοκρασία συμπύκνωσης).....	74
Πίνακας 20 Θεωρητική επισκόπηση των παραμέτρων λειτουργίας των εναλλακτικών R404A (-5/35 ° C μέση εξάτμιση / μέση θερμοκρασία συμπύκνωσης.).....	75
Πίνακας 21 Σύνθεση εναλλακτικών μειγμάτων R134a A1.....	78
Πίνακας 22 NBP, σημεία φουσαλίδων και δρόσου σε κανονικές συνθήκες εναλλακτικών R134a A1. ....	78
Πίνακας 23 Σύνθεση εναλλακτικών μειγμάτων R134a A2L.....	78
Πίνακας 24 Σύνθεση του R410A και των εναλλακτικών μειγμάτων του .....	80

Πίνακας 25 Θεωρητική επισκόπηση των παραμέτρων λειτουργίας των εναλλακτικών  
λύσεων R410A (10/40 ° C μέσος όρος εναρ./ μέση θερμοκρασία.)..... 82

## Εισαγωγή

Αναγνωρίζεται ότι η επίτευξη και των 17 στόχων αειφόρου ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών θα εξαρτηθεί από την ανάπτυξη τεχνολογιών ψύξης χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Ωστόσο, εκτιμάται ότι περίπου 1,1 δισεκατομμύρια άνθρωποι αντιμετωπίζουν κινδύνους που σχετίζονται με την έλλειψη πρόσβασης στην ψύξη. Αυτός ο κίνδυνος μπορεί να μειωθεί με τη βελτίωση της πρόσβασης σε βιώσιμη ψύξη και είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των στόχων των αναπτυξιακών πολιτικών. Οι σύγχρονες τεχνολογίες ψύξης αποτελούν επίσης σημαντική πηγή εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (ΕΑΘ) με συνολικές εκπομπές ισοδυνάμου CO<sub>2</sub> (ισοδύναμα CO<sub>2</sub>) από τον τομέα της ψύξης (συμπεριλαμβανομένων ψύξης, κλιματισμού, αντλιών θερμότητας (RACHP) και κρυογονικής) που αντιπροσωπεύουν το 7,8% στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Kasaeianetal, 2018).

Λαμβάνοντας υπόψη την αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για ψύξη, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι σίγουρο αυξηθούν. Κατά συνέπεια, υπάρχουν προβλέψεις για την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που προκαλούνται από τον τομέα της ψύξης, οι οποίες θα μπορούσαν να φτάσουν τα 1.596 εκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub>-eq. έως το 2030, σχεδόν πενταπλάσια αύξηση από την παγκόσμια αξία το 2010. Εν τω μεταξύ, οι συνολικές αθροιστικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου οδήγησαν σε μια παγκόσμια αλλαγή της μέσης θερμοκρασίας. Ως αποτέλεσμα, τα τελευταία πέντε χρόνια είναι συλλογικά τα θερμότερα έτη που έχουν καταγραφεί στη σύγχρονη εποχή ενώ ανιχνεύθηκε παγκόσμια μέση αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0,83 ° C το 2018. Οι

ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αναγνωρίζονται ως κύρια αιτία της παρατηρούμενης κλιματικής αλλαγής (Abasetal, 2018).

Έτσι, εγκρίθηκε πρόσφατα μια συμφωνία για την ενίσχυση της παγκόσμιας ανταπόκρισης στην απειλή της κλιματικής αλλαγής, καθορίζοντας ένα παγκόσμιο σχέδιο δράσης ώστε να υπάρξει μια συντονισμένη προσπάθεια για την αποφυγή επικίνδυνων κλιματικών αλλαγών, περιορίζοντας την υπερθέρμανση του πλανήτη σε επίπεδα κάτω των 2 ° C. Αυτή η παγκόσμια συμφωνία είναι γνωστή ως Συμφωνία του Παρισιού (Cocpmlpv. 2-19\_.

Δεδομένης της αυξανόμενης ζήτησης για ψύξη και λαμβάνοντας υπόψη τον αντίκτυπο της υπερθέρμανσης του πλανήτη που σχετίζεται με τις τεχνολογίες ψύξης, επιτεύχθηκε μια διεθνής συμφωνία για τον περιορισμό της παγκόσμιας κατανάλωσης φθοριούχων αερίων, τα οποία είναι ισχυρά αέρια θερμοκηπίου που χρησιμοποιούνται συχνά ως ψυκτικά μέσα σε συστήματα ψύξης συμπίεσης ατμών. Το αποτέλεσμα της συμφωνίας είναι μια τροποποίηση του πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ που τέθηκε σε ισχύ από την 1η Ιανουαρίου 2019 και θέτει το πλαίσιο για μια παγκόσμια σταδιακή κατάργηση της κατανάλωσης ουσιών υδροφθοράνθρακα (HFC) (McLindenetal, 2020).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν θεσπίσει τον κανονισμό αριθ. 517/2014 σχετικά με τα φθοριούχα αέρια θερμοκηπίου (κανονισμός F-gas) με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος με τη μείωση των εκπομπών φθοριούχων αερίων θερμοκηπίου. Ειδικότερα, ο παρών κανονισμός καθορίζει ποσοτικά όρια για τη διάθεση στην αγορά (POM) HFC και ελέγχει

την POM ψυκτικού εξοπλισμού που περιέχει φθοριούχα ΑΘ, μεταξύ άλλων σχετικών μέτρων.

## **Στόχος της Εργασίας**

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της διατριβής είναι η διερεύνηση νέων ψυκτικών μέσων στο πλαίσιο των απαιτήσεων που επιβάλλονται από τον κανονισμό F-gas και των στόχων της Συμφωνίας των Παρισίων, προκειμένου να εντοπιστούν νέα ψυκτικά ρευστά για οικιακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

## **Θεωρητικό Πλαίσιο**

### **Ψύξη και Ψυκτικά Ρευστά**

Σύμφωνα με τους ορισμούς που παρέχονται από το Διεθνές Ινστιτούτο Ψύξης (IIR), «η ψύξη» μπορεί να οριστεί ως «αφαίρεση θερμότητας, συνήθως με αποτέλεσμα χαμηλότερη θερμοκρασία και/ή αλλαγή φάσης», ενώ ο «κλιματισμός» είναι «ψύξη χώρου, ουσίας ή συστήματος για μείωση και/ή διατήρηση της θερμοκρασίας του κάτω από το περιβάλλον (η θερμότητα που αφαιρείται απορρίπτεται σε υψηλότερη θερμοκρασία)». Το πρώτο σύστημα ψύξης που χρησιμοποίησε έναν κύκλο ψύξης συμπίεσης ατμών αποδίδεται στον Jacob Perkins το 1834. Η κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας διάταξη που περιλαμβάνει έναν εξατμιστή, συσκευή συμπίεσης, συμπυκνωτή και συσκευή διαστολής χρησιμοποιούσε πτητικά υγρά σε κλειστό κύκλο με σκοπό την κατάψυξη ή ψύξη υγρών. Έτσι, η παρουσιαζόμενη διάταξη είναι ένα παράδειγμα ενός βασικού συστήματος ψύξης με συμπίεση ατμών, το οποίο είναι μια κοινή τεχνολογία ψύξης (μερικές φορές με μικρές τροποποιήσεις).

Αρκετές τεχνολογίες ψύξης έχουν αναπτυχθεί ως εναλλακτικές λύσεις για την ψύξη συμπίεσης ατμών (οι λεγόμενες τεχνολογίες ψύξης «όχι-σε είδος (NIK)»). Οι τεχνολογίες απορρόφησης και θερμοηλεκτρικής ψύξης είναι καθιερωμένες τεχνολογίες και διεξάγονται ερευνητικές δραστηριότητες σε άλλους τύπους ψύξης NIK. Ωστόσο, η τεχνολογία ψύξης με συμπίεση ατμών παραμένει η κυρίαρχη τεχνολογία ψύξης, ενώ η χρήση συστημάτων ψύξης NIK περιορίζεται σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Το ψυκτικό είναι ένα σημαντικό συστατικό ενός συστήματος ψύξης με συμπίεση ατμών. Απορροφά τη θερμότητα και τη μεταφέρει σε υψηλότερη θερμοκρασία και υψηλότερη πίεση, συνήθως με αλλαγή φάσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές ουσίες ως ψυκτικά μέσα σε έναν κύκλο ψύξης με συμπίεση ατμών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που εμφανίζονται φυσικά στο περιβάλλον (τα λεγόμενα «φυσικά ψυκτικά»), καθώς και συνθετικές ουσίες (αποκαλούμενες «συνθετικά ψυκτικά»). Διαφορετικές ουσίες μπορούν να αναμιχθούν και να σχηματίσουν ένα ψυκτικό μείγμα. Εκτός εάν αναφέρεται διαφορετικά, και τα δύο συστατικά ψυκτικά και τα μείγματά τους αναφέρονται ως «ψυκτικά» σε αυτήν την εργασία.

Η ανάπτυξη ψυκτικού σε όλη την ιστορία, πραγματοποιήθηκε για διαφορετικούς λόγους, όπως ασφάλεια, σταθερότητα, ανθεκτικότητα, οικονομικά ή περιβαλλοντικά ζητήματα, δημιουργώντας έτσι νέες έρευνες και βελτίωση εξοπλισμού από άποψη ασφάλειας και αποτελεσματικότητας. Τα ψυκτικά μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικές γενιές που αναφέρονται παρακάτω:

## *Ψυκτικά μέσα πρώτης γενιάς*

Οι αρχές της μηχανικής ψύξης, που ξεκινούν από τις αρχές του 19ου αιώνα, χαρακτηρίστηκαν από τη χρήση φυσικών ψυκτικών. Τα ψυγεία που κατασκευάστηκαν στα τέλη του 1800 έως το 1929 χρησιμοποίησαν ψυκτικά μέσα πρώτης γενιάς όπως μεθυλοχλωρίδιο, αμμωνία και διοξείδιο του θείου. Τα κοινά ψυκτικά για τα πρώτα εκατό χρόνια περιελάμβαναν ό, τι λειτούργησε και ό, τι ήταν διαθέσιμο. Σχεδόν όλα τα ψυκτικά της πρώτης γενιάς ήταν εύφλεκτα, τοξικά ή και τα δύο και μερικά ήταν επίσης πολύ αντιδραστικά. Τα χαρακτηριστικά ορισμένων από τα ψυκτικά μέσα πρώτης γενιάς συζητούνται παρακάτω.

Το νερό είναι ένα από τα παλαιότερα ψυκτικά που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ψύξης μέχρι περίπου την κατάψυξη του νερού. Όταν το νερό συνδυάζεται με προστατευτικά διαλύματα για την αποφυγή της κατάψυξης (π.χ. προπυλένιο ή αιθυλενογλυκόλη), μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολύ κάτω από το κανονικό σημείο πήξης του νερού σε εφαρμογές όπως οι πολτοί πάγου. Το νερό είναι εύκολα διαθέσιμο και έχει εξαιρετικές θερμοδυναμικές και χημικές ιδιότητες. Εκτός από αυτά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν τεχνικές προκλήσεις που προκύπτουν από τον υψηλό ειδικό όγκο του σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτές οι προκλήσεις περιλαμβάνουν υψηλή αναλογία πίεσης σε όλο τον συμπιεστή και υψηλές θερμοκρασίες εξόδου συμπιεστή.

Η αμμωνία χαρακτηρίζεται ως R717 και είναι επίσης ένα πολύ παλιό ψυκτικό που χρησιμοποιείται σε συστήματα ψύξης συμπίεσης ατμού και απορρόφησης. Τα πλεονεκτήματα του R717 είναι ότι έχουν χαμηλότερο μοριακό βάρος, μεγάλο εύρος θερμοκρασίας εργασίας λόγω του υψηλού κρίσιμου σημείου, της υψηλής λανθάνουσας

θερμότητας ατμού και της εύκολης ανίχνευσης διαρροών. Ωστόσο, το R717 έχει επίσης κάποια μειονεκτήματα. Είναι πολύ τοξικό, πολύ ερεθιστικό και εύφλεκτο. Η αμμωνία έχει υψηλή συγγένεια με το νερό, επομένως είναι δύσκολο να διατηρηθεί η αμμωνία ξηρή.

#### Ιδιότητες ψυκτικών

Ουσία	Αριθμός R	M (kg/ kmol)	NBP ( οC)	ODP	GWP
Διοξείδιο του άνθρακα	R-744	44.01	-55.6	0	1
Αμμωνία	R-717	17.03	-33.3	0	0
Διοξείδιο του θείου	R-764	64.06	-10.0	0	0
Αιθυλαιθέρας	R-610	74.12	35	0	0
Διμεθυλαιθέρας	R-170	46.07	-25	0	0
Χλωριούχο μεθύλιο	R-40	50.49	24.2	0.02	16

Όταν περιέχει νερό είναι διαβρωτικό για τον χαλκό και τα περισσότερα κράματα χαλκού.

Σε υψηλές θερμοκρασίες εκκένωσης που παράγονται από αμμωνία, έχει την τάση να



αποσυντίθεται δίνοντας άζωτο και υδρογόνο. Όταν αυτά τα αέρια εισέρχονται στο συμπυκνωτή, οι πιέσεις τους προστίθενται στην πίεση συμπύκνωσης αυξάνοντας έτσι τη συνολική κεφαλή πίεσης και την κατανάλωση ισχύος.

Το διοξείδιο του θείου είναι ένα από τα πιο χρησιμοποιούμενα ψυκτικά μέσα στη δεκαετία του 1920 και του 1930, αντικαταστάθηκε πρώτα από μεθυλοχλωρίδιο και αργότερα από πιο επιθυμητά ψυκτικά μέσα φθοράνθρακα. Είναι πολύ τοξικό αλλά μη εκρηκτικό και μη εύφλεκτο. Είναι μη διαβρωτικό σε καθαρή κατάσταση, αλλά όταν συνδυάζεται με υγρασία σχηματίζει θειικά οξέα και θειικά οξέα που είναι πολύ διαβρωτικά.

Το μεθυλοχλωρίδιο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1878. Το μεθυλοχλωρίδιο είναι ένα άχρωμο εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο με ελαφρώς γλυκιά οσμή. Το μεθυλοχλωρίδιο είναι ένας αλογονάνθρακας της σειράς μεθανίου και έχει πολλές από τις επιθυμητές ιδιότητες σε ένα ψυκτικό, το οποίο εξηγεί την ευρεία χρήση του στο παρελθόν τόσο σε οικιακές όσο και σε εμπορικές εφαρμογές. Το μεθυλοχλωρίδιο είναι διαβρωτικό για το αλουμίνιο, τον ψευδάργυρο, το μαγνήσιο και τις ενώσεις που σχηματίζονται σε συνδυασμούς με αυτά τα υλικά. Παρουσία υγρασίας, το μεθυλοχλωρίδιο σχηματίζει ένα ασθενές υδροχλωρικό οξύ, το οποίο είναι διαβρωτικό τόσο στα σιδηρούχα όσο και στα μη σιδηρούχα μέταλλα. Είναι επίσης εκρηκτικό. Υπήρξαν πολλά θανατηφόρα ατυχήματα που συνέβησαν στη δεκαετία του 1920 όταν διαρροή μεθυλοχλωριδίου από ψυγεία. Αυτό οδήγησε στην ανακάλυψη ψυκτικών μέσων επόμενης γενιάς. Λίγα ψυκτικά μέσα πρώτης γενιάς και οι ιδιότητές τους έχουν δειχθεί στον παραπάνω πίνακα.

### ***Ψυκτικά μέσα δεύτερης γενιάς***

Τα ψυκτικά μέσα δεύτερης γενιάς διακρίθηκαν από τη μετάβαση σε χημικές ουσίες χλωροφθορο για ασφάλεια και αντοχή. Ο Thomas Midgley και οι συνεργάτες του μελέτησαν τους πίνακες ιδιοκτησίας στοιχείων του περιοδικού πίνακα. Παραβλέπουν ενώσεις που είναι ασταθείς, τοξικές, αποδίδοντας ανεπαρκή πτητικότητα και αδρανή αέρια με βάση το χαμηλό σημείο βρασμού τους. Το 1928, ο Midgley και οι συνεργάτες του έκαναν κριτική παρατηρήσεις σχετικά με την ευφλεκτότητα και την τοξικότητα των ενώσεων που περιέχουν στοιχεία όπως άνθρακα, άζωτο, οξυγόνο, θείο, υδρογόνο, φθόριο, χλώριο και βρώμιο. Η πρώτη δημοσίευσή τους αφορούσε ψυκτικό φθοροχλωράνθρακα και έδειξε πώς η διακύμανση της χλωρίωσης και του φθορίσματος των υδρογονανθράκων επηρεάζει το σημείο βρασμού, την αναφλεξιμότητα και την τοξικότητα των ψυκτικών. Έτσι, τα ψυκτικά CFC έκαναν τη δεύτερη γενιά ψυκτικών. Το CFC είναι ένα μη τοξικό, μη εύφλεκτο αέριο με σχετικά υψηλή μάζα. Είναι ένα καλό ψυκτικό, επειδή μπορεί να συμπιεστεί εύκολα στο υγρό και μεταφέρει πολύ θερμότητα όταν εξατμίζεται. Είναι πολύ σταθερό ότι μόνο οι ακτίνες UV μπορούν να το διαλύσουν. Στην πραγματικότητα, ταιριάζει σε μια ποικιλία εφαρμογών επειδή δεν αντιδρά με τίποτα. λειτουργεί καλά ως διαλύτης, διογκωτικό, πυροσβεστικό μέσο και προωθητικό αερολύματος. Επειδή είναι ένα μόριο, όχι ένα μείγμα, δεν διαχωρίζεται σε διαφορετικές πιέσεις ή θερμοκρασίες. Μερικά από τα ψυκτικά αυτής της γενιάς παρουσιάζονται εδώ μαζί με τις θερμοδυναμικές τους ιδιότητες και εφαρμογές.

Το R-11 θεωρείται ασφαλές ψυκτικό μέσο καθώς δεν είναι εύφλεκτο και μη εκρηκτικό. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως κλιματισμός μικρών κτιρίων, εργοστασίων, πολυκαταστημάτων, θεάτρων κ.λπ. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπου το

φορτίο ψύξης κυμαίνεται από 150 έως 2000 τόνους μαζί με τον φυγοκεντρικό συμπιεστή. Το ψυκτικό R-11 χρησιμοποιείται επίσης ως διαλύτης και ως δευτερεύον ψυκτικό. Τα προβλήματα που έχουν περιορίσει τη χρήση αυτού του ψυκτικού είναι οι χαμηλές πιέσεις λειτουργίας και οι υψηλές δυνατότητες εξάντλησης της στιβάδας του όζοντος. Δεδομένου ότι το R11 έχει το υψηλότερο δυναμικό να προκαλέσει την εξάντληση της στιβάδας του όζοντος, σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, η χρήση και η παραγωγή του έπρεπε να σταματήσουν εντελώς. Το R-11 αντικαθίσταται τώρα από άλλα φιλικά προς το περιβάλλον ψυκτικά, εκ των οποίων το πιο κοινό είναι το R-123.

Το R-12 είναι ένα πολύ ευέλικτο ψυκτικό που χρησιμοποιείται για ευρύ φάσμα εφαρμογών ψύξης και κλιματισμού. Το ψυκτικό R12 χρησιμοποιείται σε οικιακά ψυγεία και καταψύκτες, ψυκτικά υγρά, αφυγραντήρες, παγομηχανές, ψύκτες νερού, σιντριβάνια και ψυκτικά μέσα μεταφοράς. Το R12 είναι μη τοξικό, μη εύφλεκτο και μη εκρηκτικό. Αυτό το καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλές για τις εγχώριες καθώς και τις εμπορικές εφαρμογές. Το R12 είναι πολύ σταθερό CFC και δεν αποσυντίθεται ακόμη και υπό τις ακραίες συνθήκες λειτουργίας. Δυστυχώς, είναι CFC και έχει υψηλές πιθανότητες να προκαλέσει την εξάντληση της στιβάδας του όζοντος. Το R12 αντικαθίσταται από άλλα ψυκτικά και μερικά από τα προτεινόμενα ανταλλακτικά για το R12 είναι: R-134a, R-401a, R-401b.

Στη δεκαετία του 1970, μετά από δεκαετίες πετάγματος περίπου ενός εκατομμυρίου τόνων ουσιών στον αέρα κάθε χρόνο, οι επιστήμονες έμαθαν ότι το CFC δεν είναι τελικά αβλαβές. Το 1973 ο καθηγητής James Lovelock ανακάλυψε ότι το Freon είναι επιβλαβής για τη στιβάδα του όζοντος. Τα μόρια CFC καταστρέφονται από τις υπεριώδεις ακτίνες του ήλιου στη στρατόσφαιρα τα άτομα χλωρίου παρασύρονται.

Ιδιότητες δεύτερης γενιάς ψυκτικών

Ουσία	Αριθμός R	M (kg/ kmol)	NBP ( °C)	ODP	GWP
Τριγλωρο φθορο μεθάνιο	R-11	137.4	23.71	1	4000
Διγλωρο διφθορο μεθάνιο	R-12	120.91	-29.75	1	8500
Χλωρο τριφθορο μεθάνιο	R-13	104.5	-81.3	1	11700
Χλωρο διφθορο μεθάνιο	R-22	86.47	-40.8	0.05 5	1700
R-22/R115	R-502	111.6	-45.3	0.33	5600

Διασπώνται ασταθή μόρια όζοντος (O<sub>3</sub>) σε μόρια οξυγόνου (O<sub>2</sub>). Το χλώριο δεν καταναλώνεται στην αντίδραση, συνεπώς συνεχίζει να καταστρέφει το όζον για χρόνια. Αυτό είναι μεγάλη υπόθεση, επειδή το στρατοσφαιρικό όζον είναι η ασπίδα που

προστατεύει όλα τα ζωντανά πλάσματα στον πλανήτη από την υπερϊώδη ακτινοβολία του Ήλιου. Το 1987, το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ περιορίζει την παραγωγή και την κατανάλωση CFC. Ο Ιανουάριος 2010 σηματοδότησε το τέλος της παγκόσμιας παραγωγής CFC βάσει του Πρωτοκόλλου. Το 2009 το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ επικυρώθηκε παγκοσμίως από 196 έθνη. Λίγα ψυκτικά μέσα δεύτερης γενιάς και οι ιδιότητές τους έχουν δειχθεί στον παραπάνω πίνακα.

### ***Ψυκτικά μέσα τρίτης γενιάς***

Ήταν ως επί το πλείστον χαμηλά ψυκτικά ψυκτικά δυναμικά. Οι ιδιότητες διαφορετικών ψυκτικών τρίτης γενιάς παρατίθενται στον πίνακα III. Αναπτύχθηκε μια άλλη νέα κατηγορία ψυκτικών φθοράνθρακα που ονομάζεται υδροφθορο-ολεφίνη (HFO) με δυνατότητα μειωμένης GWP. Το πρωταρχικό τους πλεονέκτημα, εκτός από το χαμηλό GWP τους, είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν με υπάρχοντες σχεδιασμούς συστήματος ψύξης. Αυτό είναι καλό για τη βιομηχανία και τους πελάτες τους, αλλά εξακολουθεί να είναι φθοριούχο αέριο. Υπάρχει αυξανόμενη πολιτική πίεση για να το ρυθμίσει από την παραγωγή και να αναγκάσει τη βιομηχανία να αναπτύξει μια τεχνολογία ψύξης ακόμη χαμηλότερου αντίκτυπου.(Pavkovic, 2013).

## **Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις της Ψύξης**

Η πρώτη μεγάλη ανησυχία σχετικά με τις δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις της τεχνολογίας ψύξης προέκυψε από τα αποτελέσματα της επιστημονικής μελέτης των Rowland και Molina, που κατέδειξαν την επίδραση ορισμένων ενώσεων,

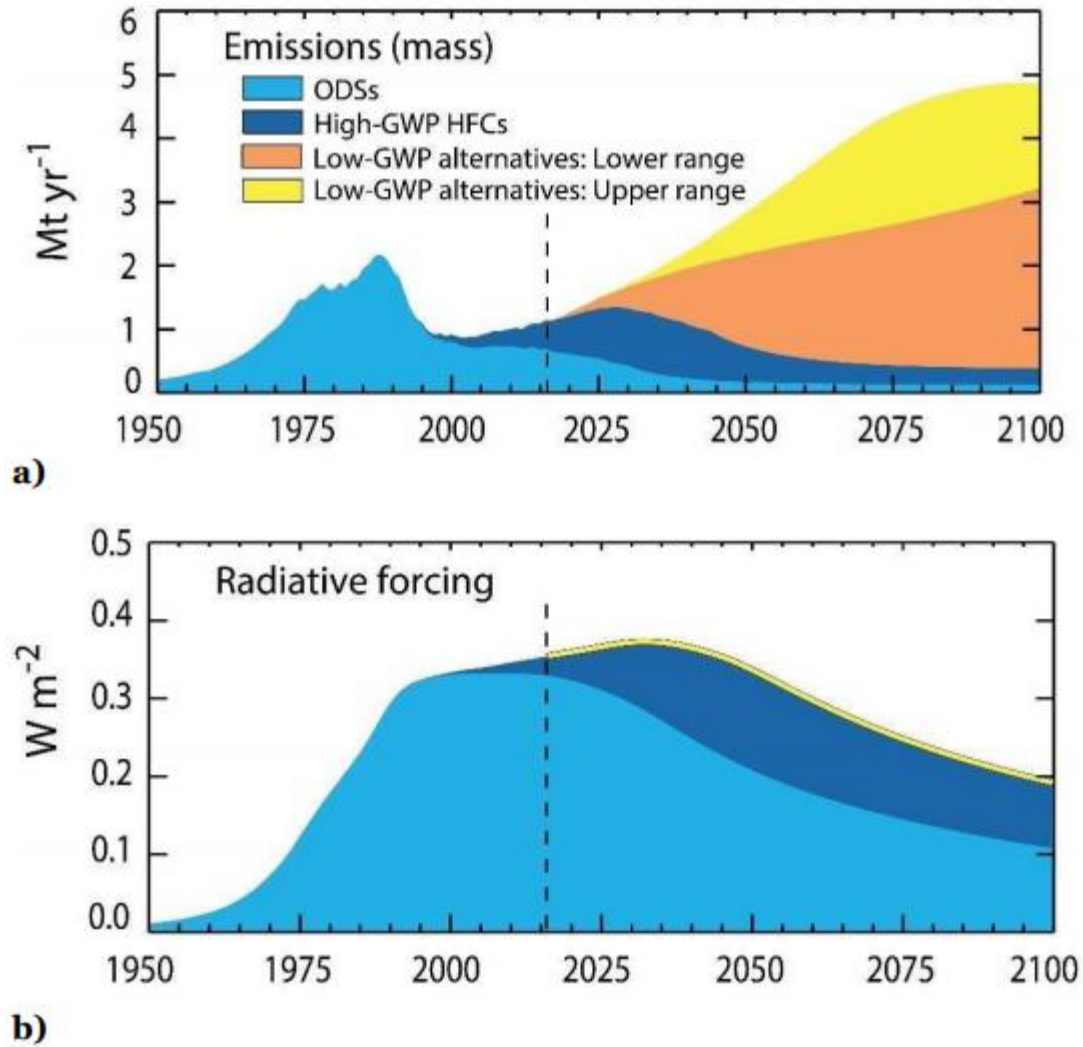
συμπεριλαμβανομένων των χλωριωμένων ψυκτικών R11 και R12, στην καταστροφή του στρώματος του όζοντος. Η μελέτη επεσήμανε επίσης την καθυστέρηση μεταξύ της εισαγωγής της χλωριωμένης ένωσης στο επίπεδο του εδάφους και της φωτοδιάσπασής της στη στρατόσφαιρα. Επομένως, απαιτήθηκαν επείγοντα μέτρα για τον περιορισμό της εκπομπής χλωριωμένων ουσιών στην ατμόσφαιρα προκειμένου να αποφευχθεί η εξάντληση της στιβάδας του όζοντος (Gantz, 2015).

Το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ για τις ουσίες που καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος έγινε τελικά μια διεθνής συμφωνία που πυροδότησε την αντικατάσταση ουσιών που καταστρέφουν το όζον, συμπεριλαμβανομένων των ψυκτικών, και οδήγησε στην έναρξη της ανάκτησης του στρατοσφαιρικού όζοντος.

Το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ τόνισε επίσης την ανάπτυξη ψυκτικών φθοροχλωράνθρακων (HCFC) και υδροφθορανθράκων (HFC) που αντικατέστησαν τους φθοροχλωράνθρακες CFC σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς. Τα HFC χρησιμοποιούνται ευρέως ως εναλλακτικές λύσεις που δεν καταστρέφουν το όζον έναντι των CFC και των HCFC. Αν και οι τρέχουσες εκπομπές HFC ανέρχονται περίπου στο 1,5% των συνολικών εκπομπών, εκφραζόμενες σε ισοδύναμα CO<sub>2</sub>, αυξήθηκαν κατά 23% από το 2012 έως το 2016 και έχουν αναφερθεί προβλέψεις για σημαντική μελλοντική ανάπτυξη. Μια παγκόσμια συμφωνία, που ορίζεται στην τροποποίηση του Κιγκάλι στο Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, επιτεύχθηκε για τον περιορισμό των εκπομπών ουσιών HFC. Περιφερειακοί κανονισμοί για τον έλεγχο ουσιών HFC έχουν εισαχθεί σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένων των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Guiot&Cramer, 2016).

Οι απαιτήσεις των κανονισμών διεγείρουν την αντικατάσταση ουσιών HFC με εναλλακτικές λύσεις που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές δυναμικού αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη (GWP) (μεταξύ άλλων χαρακτηριστικών που απαιτούνται για ψυκτικά). Έτσι, οι μελλοντικές εκπομπές εναλλακτικών χαμηλών GWP προβλέπεται να αυξηθούν, αν και η συνολική συμβολή των αλογονωμένων αερίων στην υπερθέρμανση του πλανήτη, θα μειωθεί σταδιακά, αποφεύγοντας έτσι την άμεση συμβολή των εκπομπών ψυκτικού στην αύξηση του παγκόσμιου μέσου όρου θερμοκρασίας (Arpagausetal, 2018).

Διάγραμμα 1 Ιστορικές και προβλεπόμενες εκπομπές (a) και ακτινοβολήση (b) από εναλλακτικές λύσεις ODS, HFC και HFC



Η παρατηρούμενη και προβλεπόμενη ακτινοβολική πίεση (RF) από αλογονωμένες ουσίες, Σχήμα 2β, είναι το αποτέλεσμα της επιμονής αυτών των ουσιών στην ατμόσφαιρα. Η RF παρέχει ένα άμεσο μέτρο των επιπτώσεων στο κλίμα της συσσώρευσης αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Οι τιμές RF προέρχονται από τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των συμβάλλοντων αερίων και την ακτινοβολία τους



και δεν εξαρτώνται από το GWP τους. Για παράδειγμα, μια σημαντική ποσότητα Rf προκαλείται από ουσίες ODP που παραμένουν στην ατμόσφαιρα και εξακολουθούν να εκπέμπονται.

Έχει εκτιμηθεί η ακτινοβολική πίεση των κύριων συνθετικών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050, υποθέτοντας ότι εφαρμόζονται πρόσφατα σχέδια για τη σταδιακή κατάργηση των HFC, οι τρέχουσες υποχρεώσεις του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ και οι εκπομπές SF<sub>6</sub> και NF<sub>3</sub> δείχνουν μόνο μέτρια ανάπτυξη. Σε αυτήν την περίπτωση, αναμένεται ότι μακροπρόθεσμα, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το 2050 θα είναι υπεύθυνες για περίπου 9,4 του συνολικού φαινομένου του θερμοκηπίου που προκαλείται από αυτές τις ουσίες και CO<sub>2</sub>, με το R12 να συνεισφέρει σχεδόν το ήμισυ αυτού του αποτελέσματος (Qianetal, 2016).

Αν και οι εκπομπές HFC αναμένεται να μειωθούν στο μέλλον, η αύξηση της τεχνητής ψύξης θα αυξήσει δραστικά τις ενεργειακές απαιτήσεις και θα μπορούσε να οδηγήσει στην εκπομπή υψηλών επιπέδων CO<sub>2</sub>, τα οποία διαφορετικά θα έπρεπε να είχαν μετριαστεί. Οι τρέχουσες εκτιμήσεις δείχνουν ότι οι συνολικές εκπομπές από τον τομέα ψύξης κυριαρχούνται από έμμεσες εκπομπές. Σε παγκόσμιο επίπεδο, το 70,3% των συνολικών εκπομπών είναι έμμεσες εκπομπές από τον τομέα ψύξης που προκύπτουν από τη χρήση ενέργειας και το αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής ενέργειας (Domanskietal, 2017).

Συμπερασματικά, απαιτείται ένας σύνθετος μετασχηματισμός του τομέα ψύξης. Ένα χαμηλό GWP στα ψυκτικά και η υψηλή ενεργειακή απόδοση είναι ένα απαραίτητο βήμα προς φιλικά προς το περιβάλλον ψυκτικά συστήματα. Άλλα βήματα θα μπορούσαν να

περιλαμβάνουν μείωση της ζήτησης ψύξης (π.χ. με παθητική ψύξη). Οι κανονισμοί που ενσωματώνουν μια προσέγγιση συστημάτων κατά τον καθορισμό απαιτήσεων για συστήματα ψύξης είναι απαραίτητοι προκειμένου να διευκολυνθεί η μετάβαση στην τεχνολογία ψύξης που συμβάλλει σε χαμηλά ποσοστά στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Το επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζει μια ανασκόπηση του ισχύοντος κανονιστικού πλαισίου που σχετίζεται με τη βιομηχανία RACHP στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

## **Ρυθμιστικές Πολιτικές**

### *Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ*

Το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ σχεδιάστηκε αρχικά το 1987 για τη θέσπιση μέτρων ελέγχου για τη μείωση της παραγωγής και της κατανάλωσης των ελεγχόμενων ουσιών που καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος. Με αυτόν τον τρόπο, επέτρεψε τη σταδιακή κατάργηση του ODS. Η πιο πρόσφατη τροποποίηση του πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ (τροποποίηση Kigali που εγκρίθηκε το 2016) συμπεριέλαβε επίσης τα αέρια HFC στον κατάλογο των ελεγχόμενων ουσιών (βλ. Παράρτημα Γ για έναν κατάλογο των ελεγχόμενων HFC). Αυτό συνεπάγεται ότι η παραγωγή και η κατανάλωση ελεγχόμενων ουσιών HFC, πολλές από τις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ψυκτικό ή ως συστατικό σε ένα ψυκτικό μείγμα, θα πρέπει να μειωθεί σταδιακά παγκοσμίως. Το χρονοδιάγραμμα σταδιακής κατάργησης, όπως ορίζεται για διαφορετικές κατηγορίες χωρών σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ και με τις εξαιρέσεις του άρθρου 5 του πρωτοκόλλου, παρατίθεται στο Πρωτόκολλο και, για τις χώρες μέλη της ΕΕ, συνοψίζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Πρωτόκολλο Μόντρεαλ Μείωση του HFC για χώρες μέλη της ΕΕ

Χώρες	Τα περισσότερα από τα μέρη που δεν αναφέρονται στο άρθρο 5, συμπεριλαμβανομένων των χωρών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης	
Βάση	Μέση παραγωγή/κατανάλωση HFC από το 2011-2013 συν 15% της βασικής παραγωγής/κατανάλωσης HCFC	
Βήματα μείωσης	Έτος	Μείωση από τη βάση, %
Βήμα 1	2019	10
Βήμα 2	2024	40
Βήμα 3	2029	70
Βήμα 4	2034	80
Βήμα 5	2036	85

### ***Ο κανονισμός F-gas***

Ο κανονισμός F-gas καθιέρωσε μια νομική απαίτηση για μια σταδιακή μείωση κατά 79% των HFC (μετρούμενη σε ισοδύναμα CO<sub>2</sub>) που μπορούν να διατεθούν στην αγορά της

ΕΕ από το μέσο ετήσιο ποσό που τοποθετήθηκε από το 2009-2012, το οποίο καθορίστηκε ως το βασικό σημείο αναφοράς. Η μείωση ξεκίνησε το 2015, αν και η πρώτη σημαντική μείωση πραγματοποιήθηκε το 2018, μειώνοντας από 93% σε 63% των επιτρεπόμενων ουσιών HFC, ενώ η επόμενη μείωση το 2021 θα θέσει το όριο στο 45%. Καθιερώθηκε ένα σύνολο τομεακών απαγορεύσεων διάθεσης στην αγορά (POM) για τη διευκόλυνση της μείωσης των αερίων F που επιτρέπεται να υπάρχουν στην αγορά της ΕΕ.

### *Η Συμφωνία των Παρισίων*

Η Συμφωνία του Παρισιού είναι η συμφωνία που εγκρίθηκε στις 12 Δεκεμβρίου 2015 μεταξύ των μελών της Σύμβασης-πλαisiού των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή, η οποία αποσκοπεί στην ενίσχυση της παγκόσμιας ανταπόκρισης στην απειλή της κλιματικής αλλαγής, κρατώντας την αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας πολύ κάτω από 2 ° C πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα και συνεχίζοντας τις προσπάθειες για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας στους 1,5 ° C πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα, αναγνωρίζοντας ότι αυτό θα μείωνε σημαντικά τους κινδύνους και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Καλεί για αύξηση της ικανότητας προσαρμογής στις αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και ενίσχυση της ανθεκτικότητας του κλίματος και της ανάπτυξης χαμηλών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, με τρόπο που δεν απειλεί την παραγωγή τροφίμων. Οι χρηματοοικονομικές ροές θα πρέπει να είναι συνεπείς με την πορεία προς χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και στην φιλική προς το κλίμα ανάπτυξη. Προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι, τα μέλη της Συμφωνίας του Παρισιού στοχεύουν να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το συντομότερο δυνατό και θα πρέπει συνεπώς να

προσπαθήσουν να διαμορφώσουν μακροπρόθεσμες στρατηγικές ανάπτυξης χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η φιλοδοξία για περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας στους 1,5 ° C απαιτεί επείγοντα μέτρα, καθώς αποδείχθηκε ότι το όριο αυτό είναι πιθανό να επιτευχθεί μεταξύ 2030 και 2050, εάν η ανθρωπογενής υπερθέρμανση του πλανήτη συνεχίσει να αυξάνεται με τον τρέχοντα ρυθμό (Milleretal, 2018).

### **Φθοριούχα Ψυκτικά Ρευστά**

Δεδομένου ότι πολλές ουσίες και μείγματα αυτών έχουν προταθεί ως ψυκτικά για κύκλους ψύξης με συμπίεση ατμών, αυτό το κεφάλαιο συνοψίζει τους κανόνες αρίθμησης και χαρακτηρισμού για φθοριούχες ενώσεις που χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά (Peters, 2018).

#### ***Μονοσυστατικά Ψυκτικά***

Οι κανόνες αρίθμησης και χαρακτηρισμού για ψυκτικά μέσα τυποποιούνται από το πρότυπο ANSI/ASHRAE 34-2016. Η χημική σύνθεση των αλογονανθράκων του μεθανίου, αιθανίου, προπανίου, βουτενίου και κυκλοβουτανίου μπορεί να προσδιοριστεί ρητά από τον αριθμό αναγνώρισής τους. Ο αριθμός αναγνώρισης εκχωρείται με τέτοιο τρόπο ώστε το πρώτο ψηφίο στα δεξιά να αντιστοιχεί στον αριθμό των ατόμων φθορίου στην ένωση. Το δεύτερο ψηφίο είναι ένα περισσότερο από τον αριθμό των ατόμων υδρογόνου. Το τρίτο ψηφίο από τα δεξιά είναι ένα μικρότερο από τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στην ένωση (μπορεί να παραλειφθεί εάν είναι μηδέν). Και το τέταρτο ψηφίο στα δεξιά ισούται με τον αριθμό των ακόρεστων δεσμών άνθρακα-άνθρακα (μπορεί να παραλειφθεί εάν είναι μηδέν).

Τα άτομα, που προσδιορίζονται από τους προαναφερθέντες κανόνες, μπορούν να ενωθούν μαζί με διαφορετικούς τρόπους. Ως εκ τούτου, τα ισομερή των μορίων διαφοροποιούνται από το πρότυπο, εκχωρώντας γράμματα μετά τον αριθμό ψυκτικού, όπως αναφέρεται λεπτομερώς στο πρότυπο.

Για παράδειγμα, για ισομερή σειράς προπενίου, τα ισομερή διακρίνονται με αντιστοίχιση δύο πεζών γραμμάτων, όπου το πρώτο (x, y ή z) δείχνει την αντικατάσταση του αντικειμένου άνθρακα με το μεγαλύτερο άθροισμα συνημμένων ατομικών μαζών και το δεύτερο (a, c, c, d, e ή f) προσδιορίζει την υποκατάσταση στον τερματικό άνθρακα μεθυλενίου όπως ορίζεται από το πρότυπο ANSI/ASHRAE 34-2016. Προστίθεται ένα πρόσθετο κεφαλαίο γράμμα (E ή Z) για την αναγνώριση ενός τύπου στερεοϊσομερούς, εάν υπάρχει. Ένα παράδειγμα χαρακτηρισμού ισομερών σειράς προπενίου δίνεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2 Ορισμός επιλεγμένων ισομερών σειράς προπενίου

Ισομερές	1 <sup>ο</sup> γράμμα	2ο γράμμα	Χημική Φόρμουλα	Στερεοϊσομερές
R1270			C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	
R1234yc	-F	=CF <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> F-CF=CF <sub>2</sub>	
R1234zc	-H	=CF <sub>2</sub>	CHF <sub>2</sub> -CH=CF <sub>2</sub>	

R1234ye(E)	-F	=CHF	CHF2-CF=CHF	CHF2-CF=CHF E
R1234ye(Z)	-F	=CHF	CHF2-CF=CHF	Zusammen
R1234ze(E)	-H	=CHF	CF3-CH=CHF	Entgegen
R1234ze(Z)	-H	=CHF	CF3-CH=CHF	Zusammen
R1234yf	-F	=CF2	CF3-CF=CH2	

### ***Ψυκτικά Μείγματα***

Το πρότυπο ANSI / ASHRAE 34-2016 ταξινομεί τα μείγματα ψυκτικών σε δύο κατηγορίες, ζεότροπα και αζεότροπα, με βάση την ικανότητά τους να αλλάζουν τις ογκομετρικές συνθέσεις και τις θερμοκρασίες κορεσμού καθώς εξατμίζονται ή συμπυκνώνονται σε σταθερή πίεση. Τα ζεότροπα έχουν σειριακό αριθμό αναγνώρισης στη σειρά R400, με έναν μοναδικό αριθμό που αποδίδεται σε κάθε ομάδα ψυκτικών στο μείγμα. Προκειμένου να γίνει διάκριση μεταξύ διαφορετικών ζεοτρόπων με τα ίδια ψυκτικά αλλά διαφορετικής σύνθεσης, ένα κεφαλαίο γράμμα (A, B, C ...) προστίθεται μετά τον αριθμό. Αυτό ισχύει επίσης για αζεότροπα στη σειρά R500.

Για παράδειγμα, σε ένα μείγμα ψυκτικών R125, R143a και R134a αποδίδεται ο αριθμός R404. και εάν αυτά τα ψυκτικά αναμειγνύονται στην ονομαστική σύνθεση των 44/52/4

για R-125 / 143a / 134a αντίστοιχα, το μείγμα αναγνωρίζεται ως R404A. Εάν αναμιχθεί ένα άλλο σύνολο ψυκτικών, στο μείγμα αποδίδεται διαφορετικός αριθμός. Για παράδειγμα, όλα τα μείγματα ψυκτικών R32, R125 και R134a αντιστοιχούν στην ομάδα ψυκτικών R407 και υπάρχουν οκτώ διαφορετικές συνθέσεις (Α έως Η) αυτών των ψυκτικών που αναγνωρίζονται από την Αμερικανική Εταιρεία Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (ASHRAE).

### ***Προθέματα προσδιορισμού***

Πριν από τους αριθμούς αναγνώρισης ψυκτικού υπάρχει το γράμμα "R", η λέξη "Refrigerant" (ψυκτικό) ή, εάν όχι στο πλαίσιο χρήσης σε πινακίδες εξοπλισμού ή σε προδιαγραφές, το εμπορικό σήμα του κατασκευαστή. Τα προθέματα σύνθεσης-χαρακτηρισμού χρησιμοποιούνται συχνά για να δείξουν τη σύνθεση ενώσεων σε μη τεχνικές δημοσιεύσεις στις οποίες αξιολογείται η περιβαλλοντική επίπτωση των ψυκτικών. Το πρόθεμα σχηματίζεται από ένα σύνολο γραμμάτων, όπου το γράμμα προς την άκρα δεξιά "C" σημαίνει άνθρακα. Αυτό το γράμμα πρέπει να αντικατασταθεί με ένα «E» για ουσίες που περιέχουν αιθέρα ή να αντικατασταθεί από το «O» για αλογονωμένες ολεφίνες. Τα γράμματα "B", "C" και "F" αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα βρώμιο, χλώριο και φθόριο. και το γράμμα «H» που τοποθετείται πριν από τα γράμματα που αναφέρονται παραπάνω δείχνει την παρουσία υδρογόνου. Για παράδειγμα, τα ακόλουθα προθέματα μπορούν να αναφέρονται σε αλογονωμένα ψυκτικά μέσα που δεν μειώνουν τη στιβάδα του όζοντος: υδροφθοράνθρακες (HFC), υδροφθοροαιθέρες (HFEs) και υδροφθοροολεφίνες (HFOs). Για μίγματα, τα προθέματα συστατικών συνδέονται μεταξύ τους (π.χ. μίγματα HFC/HFO).



## Νέες Εφαρμογές των Ψυκτικών Ρευστών

### *Εκτίμηση των Νέων Ψυκτικών Ρευστών*

Ένας κατάλογος πιθανών φιλικών προς το περιβάλλον ψυκτικών για συστήματα RACHP έχει προσδιοριστεί ελέγχοντας πάνω από 60 εκατομμύρια χημικές δομές και φιλτράροντάς τις βάσει πολλαπλών κριτηρίων. Έτσι, επιλέχθηκαν μόνο μόρια που περιλαμβάνουν τα στοιχεία C, H, F, Cl, Br, O, N ή S και ο μέγιστος αριθμός ατόμων σε ένα μόριο περιορίστηκε σε 18. Περαιτέρω περιορισμοί του GWP κάτω από 1.000 και κρίσιμη θερμοκρασία εντός ενός εύρους 320 και 420 K οδήγησε σε 138 υγρά. Μετά το φιλτράρισμα πολύ τοξικών και ασταθών υγρών, η διαλογή οδήγησε σε πολλά υγρά που θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ψυκτικά μέσα κατάλληλα για ένα ενιαίο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτά αναφέρονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3 Χημικές ονομασίες και GWP των υγρών

Όνομα υγρού	ΠροσδιορισμόςASHRAE	GWP
Υδρογονάνθρακες καιδιμεθυλαιθέρας		
Αιθάνιο	R170	6
Προπένιο (προπυλένιο)	R1270	2
Προπάνιο	R290	3

Μεθοξυμεθάνιο (διμεθυλαιθέρας)	RE170	1
Κυκλοπροπάνιο	RC270	86*
Φθοριούχα αλκάνια (HFC)		
Φθορομεθάνιο	R41	92
Διφθορομεθάνιο	R32	675
Φθοροαιθάνιο	R161	12
1,1-διφθοροαιθάνιο	R152a	124
1,1,2,2-τετραφθοροαιθάνιο	R134	1,100
Φθοριούχα αλκένια (HFOs) και αλκόνια		
Φθοροαιθένιο	R1141	<1^
1,1,2-Τριφθοροαιθένιο	R1123	3*
3,3,3-Trifluoroprop-1-yne		1.4*
2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1- ene	R1234yf	4

E) -1,2-Διφθοροαιθέριο	R1132(E)	1*
3,3,3-Trifluoroprop-1-ene	R1243zf	<1^
1,2-Difluoroprop-1-ene	R1252ye	2*
(E)-1,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene	R1234ze(E)	7
(Z)-1,2,3,3,3-Pentafluoro-prop-1-ene	R1225ye(Z)	<1^
1-Fluoroprop-1-ene	R1261ze	1*
Φθωριωμένα οξυγονωτικά		
Τριφθορο (μεθοξυ) μεθάνιο	RE143a	756
2,2,4,5-τετραφθορο-1,3- διοξόλη		1*
Φθωριωμένες ενώσεις αζώτου και θείου		
N, N, 1,1- Τετραφθορομεθαναμίνη		20*
Διφθορομεθανοθειόλη		1*
Τριφθορομεθανοθειόλη-		1*

Ανόργανες ενώσεις		
Διοξείδιο του άνθρακα	R744	1
Αμμωνία	R717	0

\* Τιμές GWP όπως εκτιμάται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Kazakov

^ Τιμές GWP όπως αναφέρονται στο IPCCAR5

Ενώ τα περισσότερα από τα αναγνωρισμένα υγρά έχουν τιμές GWP όχι μεγαλύτερες από 150, τρία υγρά έχουν τιμές GWP έως και 1.100. Παρόλο που ένα GWP 150 και άνω μπορεί να θεωρηθεί αρκετά υψηλό για την ικανοποίηση των μελλοντικών απαιτήσεων της ισχύουσας νομοθεσίας που ρυθμίζει τη χρήση φθοριούχων αερίων, έχουν επίσης συμπεριληφθεί καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστατικό ψυκτικών μειγμάτων. Έχουν αναγνωριστεί μόνο δύο μη εύφλεκτα ψυκτικά: CO<sub>2</sub> και R1225ye (Z). Ενώ το CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται ευρέως ως ψυκτικό, το R1225ye (Z) έχει εκτιμώμενη ικανότητα ψύξης που είναι περίπου τέσσερις φορές χαμηλότερη από το R410A και αναμένεται να ταξινομηθεί ως τοξικό.

Τα ψυκτικά συχνά αξιολογούνται ως προς την καταλληλότητά τους για χρήση σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Για να είναι χρήσιμη ως ψυκτικό μέσο, μια ουσία (ή ένα μείγμα ουσιών) πρέπει να πληροί ένα σύνολο διαφορετικών κριτηρίων. Πρώτον, πρέπει να έχει κατάλληλες χημικές, φυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες για ένα συγκεκριμένο σύστημα και συνθήκες εργασίας. Δεύτερον, θα πρέπει να είναι ασφαλές στη χρήση,

συμπεριλαμβανομένης της περιβαλλοντικής ασφάλειας. Όταν πληρούνται αυτά τα δύο πρώτα κριτήρια, μπορούν να εφαρμοστούν και άλλα κριτήρια, όπως για παράδειγμα καλή ενεργειακή απόδοση (υψηλή απόδοση και κατάλληλη χωρητικότητα).

Η ενεργειακή απόδοση ενός συστήματος συμπίεσης ατμών που χρησιμοποιεί ένα συγκεκριμένο ψυκτικό μέσο μπορεί να αξιολογηθεί πειραματικά (σε μια ειδικά σχεδιασμένη μελέτη) ή θεωρητικά (με αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούν ιδιότητες ψυκτικού). Η αξιολόγηση των νέων ψυκτικών γίνεται πιο συχνά χρησιμοποιώντας αριθμητικά μοντέλα λόγω των πολυπλοκότητας που εμπλέκονται στο σχεδιασμό πειραματικών μελετών. Τα δεδομένα ιδιοτήτων ψυκτικού που χρησιμοποιούνται σε τέτοια αριθμητικά μοντέλα υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη εξίσωση κατάστασης (EoS).

Πειραματικά προσδιορισμένα δεδομένα αρκετών σημαντικών θερμοδυναμικών και μεταφορικών ιδιοτήτων ψυκτικών HFO και HCFO και τα μείγματά τους επανεξετάστηκαν πρόσφατα. Το συμπέρασμα της μελέτης είναι ότι μόνο τα R1234yf και R1234ze (E) έχουν διερευνηθεί εκτενώς όσον αφορά και τις δύο θερμοδυναμικές ιδιότητες (κρίσιμο σημείο (CP), κορεσμένη πίεση, πίεση, θερμοκρασία και όγκος (PVT) σε μονοφασικές περιοχές, ισοβαρική ειδική θερμότητα ( $c_p$ ) και άκεντρος παράγοντας ( $\omega$ )), και ιδιότητες μεταφοράς (θερμική αγωγιμότητα ( $\lambda$ ), δυναμικό / κινηματικό ιξώδες ( $\mu / \nu$ ) και επιφανειακή τάση,  $\sigma$ ). Αυτά είναι επίσης τα συστατικά των μιγμάτων, που περιέχουν HCFO και / ή HFO, για τα οποία είναι διαθέσιμα τα δεδομένα ιδιοτήτων πειραματικά μετρημένα.

Πίνακας 4 Αριθμός αναφορών βιβλιογραφικών αναφορών από ομοτίμους

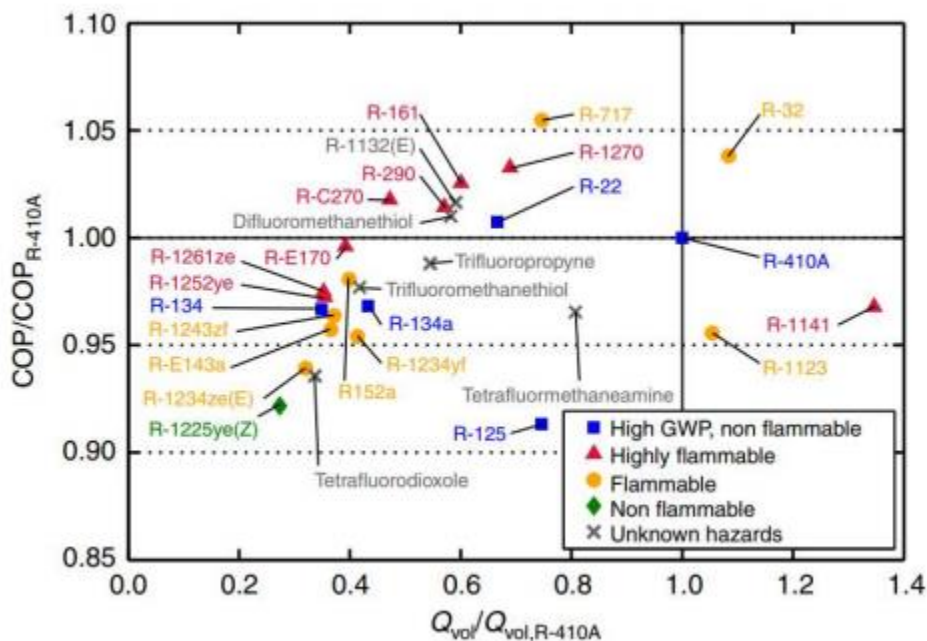
ANSI/ASHRAE designation	Thermodynamic properties					Transport properties		
	CP	P <sub>sat</sub>	PVT	c <sub>p</sub>	ω	λ	μ/ν	σ
R1123	2	2	2	-	-	-	-	-
R1141	-	-	-	-	-	-	-	-
R1132(E)	-	-	-	-	-	-	-	-
R1234yf	2	11	10	5	4	1	7	2
R1243zf	1	2	1	-	-	-	-	1
R1234ye(E)	-	-	-	-	-	-	-	-
R1234ze(E)	2	13	14	6	4	2	4	3
R1225ye(Z)	-	1	1	-	-	-	-	-
R1132(Z)	-	-	-	-	-	-	-	-
R1225ye(E)	-	-	-	-	-	-	-	-
R1234ze(Z)	1	8	7	-	1	1	2	1
R1233zd(E)	1	4	5	1	2	-	1	2
R1336mzz(E)	1	1	1	-	-	-	-	-
R1336mzz(Z)	1	4	1	-	1	-	-	-
R1354mzy(E)	1	1	3	-	-	-	-	-
R1354myf(E)	-	-	1	-	-	-	-	-

*\*προσδιορισμός ANSI/ASHRAE – Θερμοδυναμικές ιδιότητες – Ιδιότητες μεταφοράς*

Τα ψυκτικά μέσα που εντοπίστηκαν σε μια μελέτη διαλογής, συγκρίθηκαν με αρκετά συμβατικά ψυκτικά μέσα όσον αφορά την ενεργειακή τους απόδοση σε έναν κύκλο συμπίεσης ατμών (υποδεικνύεται βάση COP) και το φαινόμενο ψύξης ανά μονάδα όγκου ψυκτικού ατμού που εισέρχεται στον συμπιεστή (ογκομετρική ικανότητα ψύξης,  $Q_{vol}$ ). Όπου ήταν διαθέσιμα, τα δεδομένα ιδιότητας ψυκτικού υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το λεπτομερές EoS που εφαρμόστηκε στη βάση δεδομένων REFPROP, αν και για την πλειονότητα των υγρών χρησιμοποιήθηκε το EoS που απαιτούσε λιγότερα δεδομένα λόγω του περιορισμένου αριθμού πειραματικά διαθέσιμων δεδομένων για νέα υγρά.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τα COP και  $Q_{vol}$  επιλεγμένων ψυκτικών που λειτουργούν σε έναν βασικό κύκλο συμπίεσης ατμών, μαζί με τα χαρακτηριστικά ασφαλείας των ψυκτικών. Ενώ μια μικρή διακύμανση COP μπορεί να φανεί στις διαμορφωμένες συνθήκες, η αναμενόμενη ικανότητα ψύξης ποικίλλει σημαντικά μεταξύ ψυκτικών.

Πίνακας 5 Συντελεστής απόδοσης και ογκομετρική ικανότητα επιλεγμένων πιθανών υγρών χαμηλής υπερθέρμανσης του πλανήτη.



\*υψηλό GWP, μη εύφλεκτο – άκρως εύφλεκτο – εύφλεκτο – μη εύφλεκτο – άγνωστοι κίνδυνοι

### Φυσικά Ψυκτικά Ρευστά

Το CO<sub>2</sub> είναι ψυκτικό μέσο χαμηλότερης τοξικότητας που χρησιμοποιείται κυρίως σε αντλίες θερμότητας θέρμανσης νερού οικιακής χρήσης και σε εμπορικές εφαρμογές ψύξης. Η κρίσιμη θερμοκρασία στους 31 ° C είναι μάλλον χαμηλή και χρησιμοποιείται σε συστήματα RACHP που λειτουργούν σε διακριτικούς κύκλους και σε σημαντικά υψηλά επίπεδα πίεσης.

Το CO<sub>2</sub> είναι ένα μη εύφλεκτο, χαμηλού GWP ψυκτικό που είναι κατάλληλο για εκτεταμένη χρήση σε εφαρμογές ψύξης και αντλίας θερμότητας. Έτσι, θα διαδραματίσει τον ρόλο του στην εκπλήρωση του κανονισμού για τα αέρια και των στόχων της συμφωνίας των Παρισίων. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι τα σύγχρονα συστήματα



ψύξης CO<sub>2</sub> σε σούπερ μάρκετ είναι επίσης ενεργειακά αποδοτικά, λαμβάνοντας ιδίως υπόψη τις προσπάθειες δημιουργίας ολοκληρωμένων συστημάτων CO<sub>2</sub>, καθώς και βελτιστοποίηση του συστήματος και των συστατικών του.

Οι υδρογονάνθρακες (π.χ. προπάνιο, ισοβουτάνιο) είναι γνωστά ψυκτικά μέσα με ιδιότητες που έχουν ως αποτέλεσμα την αποτελεσματική λειτουργία τους σε κύκλους συμπίεσης ατμών. Το ισοβουτάνιο κυριαρχεί στην εγχώρια αγορά ψύξης στην ΕΕ και το προπάνιο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως αντλίες θερμότητας και μικρές εμπορικές εφαρμογές. Λαμβάνοντας υπόψη την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για αποδοτικά ψυκτικά μέσα με χαμηλό GWP, οι υδρογονάνθρακες έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές στις οποίες η υψηλή αναφλεξιμότητά τους (κατηγορία ασφαλείας A3) δεν συνεπάγεται κινδύνους για την ασφάλεια.

Για να εξασφαλιστεί η ασφαλής χρήση εύφλεκτων ψυκτικών, ο αριθμός τους περιορίζεται ανάλογα με την εφαρμογή και την προβλεπόμενη θέση ενός τέτοιου συστήματος. Η ελαχιστοποίηση του φορτίου ψυκτικού σε ένα σύστημα συμπίεσης ατμών είναι μια προσέγγιση για την ευρεία υιοθέτηση εύφλεκτων ψυκτικών. Για παράδειγμα, αποδείχθηκε ότι με τη σκόπιμη σχεδίαση του συστήματος, είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα σύστημα αντλίας θερμότητας ικανό να παρέχει χωρητικότητα θέρμανσης 10 kW με μόλις 100 g προπανίου φορτισμένο στο σύστημα, υποδεικνύοντας έτσι ότι είναι δυνατόν να εκπληρωθεί σημαντικό φορτίο ψύξης με χαμηλή ποσότητα προπανίου. Επιπλέον, το όριο φόρτισης ψυκτικού των 500 g, που καθορίζεται από το πρόσφατα ενημερωμένο πρότυπο που ορίζει απαιτήσεις για εμπορικές ψυκτικές συσκευές και παγομηχανές, θα επιτρέψει την περαιτέρω επέκταση της χρήσης διαλυμάτων υδρογονανθράκων.

Η αμμωνία, ένα φυσικό ψυκτικό μέσο υψηλής τοξικότητας και χαμηλότερης αναφλεξιμότητας που χρησιμοποιείται σε συστήματα συμπίεσης ατμών από το 1870, χρησιμοποιείται ευρέως σε εμπορικές και βιομηχανικές ψυκτικές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας. Ενώ η αμμωνία έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό ψυκτικό σε βιομηχανικές εφαρμογές, υπάρχει ακόμη η ευκαιρία να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα χαμηλής φόρτισης.

### ***Μονά Ψυκτικά Ρευστά***

Από τα υγρά που έχουν ταυτοποιηθεί σε μια διαδικασία διαλογής, μόλις έξι προστέθηκαν πρόσφατα στη λίστα ψυκτικών που αναφέρονται στο πρότυπο ANSI / ASHRAE 34 και μπορούν να θεωρηθούν νέα ψυκτικά για τους σκοπούς αυτής της μελέτης.

Η παρουσία χλωρίου στα R1224yd (Z), R1233zd (E) και R1130 (E) δείχνει την πιθανότητα εξάντλησης του όζοντος και ως εκ τούτου δεν ικανοποιεί το κριτήριο μηδενικού ODP που ορίζεται στους περιορισμούς αυτής της μελέτης. Τα υπόλοιπα τρία ψυκτικά αναφέρονται στον Πίνακα 5 μαζί με το GWP και το κανονικό σημείο βρασμού.

Πίνακας 6 Νέα ψυκτικά συστατικά.

Ψυκτικό	GWP	Κανονικό σημείο βρασμού
---------	-----	-------------------------

R1132a	<1	-86.7
R1336mzz(E)	16	7.4
R1336mzz(Z)	2	33.4

### ***Μείγματα Ψυκτικών Ρευστών***

Διάφορα μείγματα ψυκτικών έχουν προταθεί από διάφορες χημικές εταιρείες. Ο αριθμός των προτεινόμενων μειγμάτων αυξάνεται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Ο κατάλογος των γνωστών επί του παρόντος ψυκτικών μειγμάτων περιλαμβάνει περισσότερα από εκατό μίγματα και αναπτύσσεται συνεχώς.

Τα ψυκτικά μείγματα έχουν αναπτυχθεί για να επεκτείνουν τη μεταβολή των ιδιοτήτων των προκύπτοντων ψυκτικών μειγμάτων. Η μείωση του GWP αλλά η διατήρηση χαμηλής ή καθόλου αναφλεξιμότητας είναι μια τυπική τάση της τρέχουσας ανάπτυξης των ψυκτικών μειγμάτων. Άλλες επιθυμητές ιδιότητες περιλαμβάνουν αύξηση της ογκομετρικής ικανότητας ψύξης και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Όλα τα μίγματα που αναπτύχθηκαν πρόσφατα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τις ιδιότητές τους. Ομαδοποιούνται εδώ σύμφωνα με το κανονικό σημείο βρασμού (NBP) (για αζεοτροπικά μείγματα) ή την τιμή σημείου φουσαλίδας σε κανονικές συνθήκες (για ζεοτροπικά μείγματα). Για όλα εκτός από ένα από τα μείγματα που αναπτύχθηκαν πρόσφατα, αυτή η τιμή κυμαίνεται από -58,4 ° C έως -18,0 ° C, γεγονός που επιτρέπει

στις πιέσεις λειτουργίας σε ένα τυπικό σύστημα RACHP να παραμένουν πάνω από την ατμοσφαιρική πίεση. Ένα μείγμα έχει διαμορφωθεί με NBP 29,0 ° C με ανάμιξη δύο νέων ψυκτικών συστατικών R1336mzz (Z) και R1130 (E). Αυτό το μείγμα, που ονομάζεται R514A, είναι κατάλληλο για εφαρμογές αντλίας θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας και ως υγρό λειτουργίας σε οργανικούς κύκλους Rankine, αν και η λειτουργία του σε τυπικές εφαρμογές RACHP θα περιλαμβάνει λειτουργικές πιέσεις κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση. Η παρουσία χλωρίου στη σύνθεσή του υποδηλώνει ένα συγκεκριμένο ODP σε αυτό το μείγμα.

Η σύνθεση των νέων μειγμάτων παρατίθεται στο Παράρτημα Β. Τα σημεία φουσαλίδων και δρόσου, η κατηγορία ασφαλείας ASHRAE, οι τιμές GWP και η προβλεπόμενη εφαρμογή των νέων ζεοτροπικών μιγμάτων φαίνονται στον Πίνακα 6. Οι NBP, κλάση ασφαλείας ASHRAE, τιμές GWP και η προβλεπόμενη εφαρμογή των νέων αζεοτροπικών μιγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Αν και ένας σημαντικός αριθμός μιγμάτων παρατίθεται στον Πίνακα 6 και στον Πίνακα 7, η ανάπτυξη πρόσθετων μιγμάτων συνεχίζεται. Μεταξύ των μιγμάτων που αναλύθηκαν πρόσφατα είναι, για παράδειγμα, 22 εναλλακτικές λύσεις έναντι του R134a, οι οποίες εκτιμάται ότι δεν είναι εύφλεκτες και ένα μείγμα των R32, R125 και R131I (49, 11,5 και 39,5% σε σύνθεση, κατά μάζα, αντίστοιχα) που είναι ένα προτεινόμενο μη εύφλεκτο υποκατάστατο του R410A. Το συστατικό R131I, μια ένωση ιωδίου που χρησιμοποιείται κυρίως ως κατασταλτικό της φωτιάς, συμβάλλει στη μειωμένη αναφλεξιμότητα του μείγματος και το προκύπτον GWP είναι κάτω από 750. Έτσι, το προτεινόμενο μείγμα είναι η χαμηλότερη μη εύφλεκτη εναλλακτική λύση GWP έναντι του R410A, αν και οι λεπτομέρειες των ιδιοτήτων του παραμένουν άγνωστες γενικότερα.

Πίνακας 7 Νέα ζεοτροπικά μείγματα

Refr.	Bubble point	Dew point	Safety class	GWP	Intended application
407G	-29.2	-27.2	A1	1,463	similar to R134a with higher capacity
407H	-44.7	-37.6	A1	1,495	medium and low temperature commercial refrigeration
407I	-39.8	-33.0	A1	1,459	not provided
444B	-44.6	-34.9	A2 L	296	replacement for R22/R407C
446A	-49.4	-44.0	A2 L	461	replacement for R410A in stationary air conditioners
447A	-49.3	-44.2	A2 L	583	replacement for R410A in stationary air conditioners
447B	-50.1	-46.0	A2 L	741	replacement for R410A in stationary air conditioners
448A	-45.9	-39.8	A1	1,387	non-flammable replacement for R404A in low and medium temperature commercial and transport refrigeration
449A	-46.0	-39.9	A1	1,397	non-flammable replacement for R404A in low and medium temperature commercial and transport refrigeration
449B	-46.1	-40.2	A1	1,412	non-flammable replacement for R404A in low and medium temperature commercial and transport refrigeration
449C	-44.6	-38.1	A1	1,251	non-flammable replacement for R404A
450A	-23.4	-22.8	A1	605	non-flammable replacement for R134a in medium temperature commercial refrigeration
451A	-30.8	-30.5	A2 L	149	replacement for R134a
451B	-31.0	-30.6	A2 L	164	replacement for R134a
452A	-47.0	-43.2	A1	2,140	non-flammable replacement for R404A in low and medium temperature commercial and transport refrigeration
452B	-51.0	-50.3	A2 L	698	replacement for R410A in chillers
452C	-47.5	-44.2	A1	2,220	non-flammable replacement for R404A in low and medium temperature commercial refrigeration

<b>Refr.</b>	<b>Bubble point</b>	<b>Dew point</b>	<b>Safety class</b>	<b>GWP</b>	<b>Intended application</b>
453A	-42.2	-35.0	A1	1,765	non-flammable retrofit replacement for R22 for air conditioning and refrigeration applications
454A	-48.4	-41.6	A2L	239	replacement for R404A in low and medium temperature commercial refrigeration
454B	-50.9	-50.0	A2L	466	replacement for R410A
454C	-46.0	-37.8	A2L	148	replacement for R404A in low and medium temperature commercial refrigeration (hermetic units)
455A	-51.6	-39.1	A2L	148	replacement for R404A in low and medium temperature commercial refrigeration (hermetic units)
456A	-30.4	-25.6	A1	687	non-flammable replacement for R134a in medium temperature commercial refrigeration
457A	-42.7	-35.5	A2L	139	replacement for R404A in low and medium temperature commercial refrigeration
458A	-39.8	-32.4	A1	1,650	non-flammable replacement for R22
459A	-50.3	-48.6	A2L	460	replacement for R410A
459B	-44.0	-36.1	A2L	145	replacement for R404A in low and medium temperature commercial refrigeration
460A	-44.6	-37.2	A1	2,103	non-flammable replacement for R404A in low and medium temperature commercial refrigeration
460B	-45.2	-37.1	A1	1,352	non-flammable replacement for R404A in low and medium temperature commercial refrigeration
460C	-29.2	-26.0	A1	766	non-flammable replacement for R134a
461A	-42.0	-37.0	A1	2,767	not provided
462A	-42.6	-36.6	A2	2,249	replacement for R22
463A	-58.4	-46.9	A1	1,494	non-flammable replacement for R410A

<b>Refr.</b>	<b>Bubble point</b>	<b>Dew point</b>	<b>Safety class</b>	<b>GWP</b>	<b>Intended application</b>
464A	-46.5	-36.9	A1	1,323	non-flammable replacement for R404A
465A	-51.8	-40.0	A2	145	replacement for R404A

## Πίνακας 8 Νέα αζεοτροπικά μείγματα

Refr.	NBP, °C	Safety class	GWP	Intended application
513A	-29.2	A1	631	non-flammable replacement for R134a in medium temperature commercial refrigeration and chillers
513B	-29.2	A1	596	non-flammable replacement for R134a in medium temperature commercial refrigeration and chillers
514A	29.0	B1	<1 <sup>^</sup>	high temperature heat pumps
515A	-18.0	A1	393	non-flammable replacement for R134a, proposed for flooded chillers
516A	-29.4	A2L	142	replacement for R134a in medium temperature commercial refrigeration

### *Χημική Σταθερότητα και Υλική Συμβατότητα των Ψυκτικών Ρευστών*

Η τυποποιημένη μέθοδος για τη δοκιμή των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ψύξης περιγράφεται στο πρότυπο ANSI / ASHRAE 97, το οποίο θεωρείται ως ένα εργαλείο επιτάχυνσης διαλογής που μπορεί να προσφέρει πολύτιμη εικόνα της χημικής σταθερότητας των υλικών του συστήματος.



Σε πραγματικά συστήματα ψύξης, διαφορετικά υλικά εκτίθενται σε ψυκτικό για εκτεταμένες χρονικές περιόδους και σε διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις. Το πρότυπο προτείνει μια προσέγγιση για την επιτάχυνση της αλληλεπίδρασης υλικών με ψυκτικά και λάδια με τη γήρανση ψυκτικών και υλικών σε σφραγισμένους σωλήνες σε αυξημένες θερμοκρασίες για μια ορισμένη περίοδο. Ενώ ο πειραματιστής επιλέγει τη θερμοκρασία και το χρόνο, χρησιμοποιείται συνήθως ένα τυπικό εύρος θερμοκρασίας 100-200 ° C. Ένα παράδειγμα μιας συνήθως χρησιμοποιούμενης χρονικής περιόδου που χρησιμοποιείται σε δοκιμές σταθερότητας λιπαντικού είναι 14 ημέρες, αν και έχουν αναφερθεί περίοδοι έως και ενός έτους ή περισσότερο.

Το τελικό στάδιο της διαδικασίας εξέτασης είναι η ανάλυση των αποτελεσμάτων της γήρανσης. Η ανάλυση περιλαμβάνει συχνά μια οπτική επιθεώρηση στην οποία τα περιεχόμενα του σωλήνα ελέγχονται οπτικά και αναλύονται. Άλλες μέθοδοι ανάλυσης που εκτελούνται συχνά περιλαμβάνουν χρωματογραφία αερίου, φασματοσκοπία μάζας και άλλες.

Καθώς η μέθοδος του σφραγισμένου γυάλινου σωλήνα βοηθά στην αξιολόγηση της συμβατότητας των υλικών και των ψυκτικών ουσιών που γήρονται κάτω από στατικές συνθήκες, αποτυγχάνει να εντοπίσει την επίδραση εξωτερικών τάσεων, όπως μηχανική δόνηση και κίνηση ψυκτικού που πιθανότατα υπάρχουν σε ένα πραγματικό σύστημα κατά τη λειτουργία του. Έτσι, η συμβατότητα των υλικών μπορεί επιπλέον να αξιολογηθεί σε επίπεδο συστατικού ή συστήματος.

Μια εκτεταμένη μελέτη έχει διεξαχθεί από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Κλιματισμού, Θέρμανσης και Ψύξης (AHRI) στο Έργο Συμβατότητας Υλικών και Λιπαντικών για το

Ψυκτικό Χαμηλού GWP, το οποίο πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση του έργου επικεντρώθηκε στη θερμική και χημική σταθερότητα ψυκτικών χαμηλού GWP με λιπαντικά. Τα μείγματα ψυκτικών R1234ze (E), R1234yf και 50/50 R32 / R1234yf αναλύθηκαν σε συνδυασμό με δύο διαφορετικά λιπαντικά ελαίου πολυολικού εστέρα (POE) και πολυβινυλαιθέρα (PVE), καθώς και ένα σύνολο μολυσματικών ουσιών (αέρας, νερό και συνδυασμός και των δύο). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με δείγματα ελέγχου και επίσης με τα βασικά ψυκτικά R134a και R410A. Αποδείχθηκε ότι παρατηρήθηκαν μικρές αλλά ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις ιόντων φθορίου σε δείγματα που παρασκευάστηκαν με R1234yf (συμπεριλαμβανομένου του μίγματος R32 / R1234yf), ενώ δεν ανιχνεύθηκαν ιόντα φθορίου χρησιμοποιώντας δείγματα με τα βασικά R134a και R410A. Η παρουσία αέρα και νερού έχει αποδειχθεί ότι έχει δυσμενείς επιπτώσεις στη σταθερότητα των ψυκτικών HFO και παρατηρήθηκαν διαφορές στη σταθερότητα του ψυκτικού μεταξύ ψυκτικών R1234ze (E) και R1234yf, ενώ το R1234ze (E) ήταν πιο σταθερό από το R1234yf όταν δοκιμάστηκε με διαφορετικά λιπαντικά έλαια (μικτό οξύ και διακλαδισμένο οξύ POE και έλαιο PVE).

Το έργο συνεχίστηκε με τη δεύτερη φάση που διερεύνησε τη συμβατότητα υλικών ψυκτικών χαμηλών GWP με υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τυπικών συστημάτων ψύξης [42]. Η μελέτη συμβατότητας υλικού έχει πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας R1234yf, R1234ze (E) και το μείγμα τριών συστατικών τους με R32. Ένα σύνολο υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση περιελάμβανε διαφορετικούς τύπους ελαστομερών, πολυμερών και άλλων υλικών και περιλήφθηκαν στην έκθεση του έργου. Ενώ έχουν αναφερθεί ανησυχίες σχετικά με τη συμβατότητα υλικών των αναλυθέντων ψυκτικών με συγκεκριμένα ελαστομερή, παρεμβύσματα και πολυμερή, τα

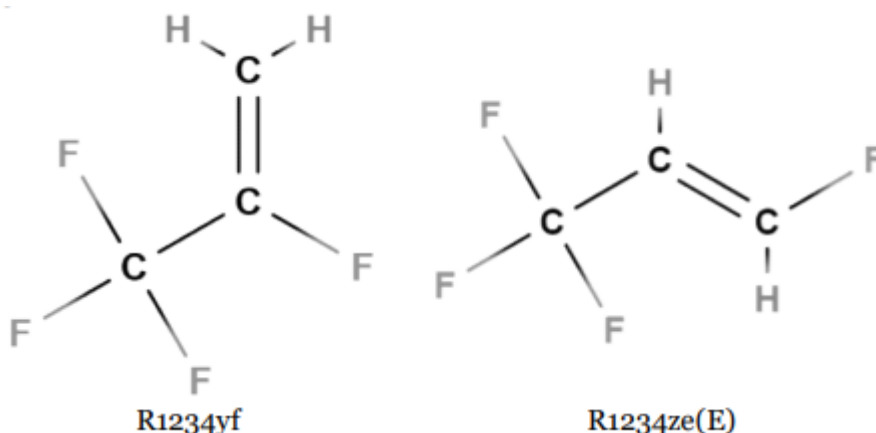
αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι πολλά υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στεγανοποιητικά και δομικά πολυμερή είναι κατάλληλα για χρήση με τα R1234yf και R1234ze (E), αν και αλληλεπιδράσεις μεταξύ εστέρα- βασισμένων υλικών και του R1234ze (E) απαιτούν πρόσθετη έρευνα.

Η πιο πρόσφατη μελέτη σχετικά με τη συμβατότητα υλικού είναι μια δημοσίευση που διερευνά τη συμβατότητα υλικού μεταξύ ψυκτικών και πολυμερών R1234yf, R1234ze (E) και R1233zd (E) με ψυκτικά R134a και R245fa που χρησιμοποιούνται ως βασική γραμμή. Επιπλέον, τα μίγματα R1234yf και R1234ze (E) με R134a (R450A και R513A, αντίστοιχα) έχουν αναλυθεί. Στη δημοσίευση, οι συγγραφείς συζήτησαν διαφορετικούς μηχανισμούς για την αλληλεπίδραση ρευστού πολυμερούς που μπορούν να συμβούν σε ένα σύστημα ψύξης. Εκτός από ένα σύνολο χημικών διεργασιών (π.χ. διάλυση εξωτερικών πλαστικοποιητών μέσα στο ρευστό, χημική απορρόφηση του υγρού εντός της μήτρας πολυμερούς), συζητήθηκαν τα αποτελέσματα των φυσικών μηχανισμών (π.χ. απορρόφηση, διείσδυση και προσκόλληση ψυκτικού εντός της μήτρας πολυμερούς επιπτώσεις πίεσης και θερμοκρασίας).

Έτσι, η μελέτη παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση των διαδικασιών που επηρεάζουν τη συμβατότητα των ψυκτικών με διαφορετικά υλικά. Για παράδειγμα, η πολικότητα του ψυκτικού υγρού λέγεται ότι έχει μεγάλη σημασία. Έτσι, η ηλεκτρική ροπή διπόλου R1234yf είναι σχεδόν δύο φορές μεγαλύτερη από την ηλεκτρική ροπή διπόλου R1234ze (E). Αυτό συμβαίνει παρά τα δύο μόρια που έχουν τα ίδια άτομα και είναι αποτέλεσμα της διαφορετικής δομής τους, στην οποία το R1234yf έχει διπλό δεσμό άνθρακα με όλα τα άτομα φθορίου που βρίσκονται στη μία πλευρά, σε σύγκριση με το

R1234ze (E), στο οποίο μπορούν να βρεθούν άτομα φθορίου και οι δύο πλευρές του διπλού δεσμού άνθρακα.

Διάγραμμα 2 Ο δομικός τύπος των R1234yf και R1234ze (E)



Ο Πίνακας 8 δείχνει τα αποτελέσματα της μελέτης συμβατότητας υλικού δύο συνθέσεων φθοριούχου καουτσούκ (FKM), δύο συνθέσεων ελαστικού αιθυλενοπροπυλενίου-διενίου (EPDM), ελαστικού χλωρο-βουταδιενίου (CR), καουτσούκ νιτριλίουβουταδιενίου (NBR), πολυτετραφθοροαιθυλενίου (PTFE) και πολυπροπυλένιο (PP). Έχει διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικών μηχανισμών αλληλεπίδρασης ρευστού-πολυμερούς.

Όσον αφορά τα R1234yf, R1234ze (E), R450A και R450A, δεν έχουν εντοπιστεί σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά συμβατότητάς τους σε σύγκριση με το R134a. Ωστόσο, το R1233zd (E) (ένα ψυκτικό που χρησιμοποιείται σε φυγοκεντρικά ψυκτικά συγκροτήματα και σε οργανικά συστήματα κύκλου Rankine χαμηλής θερμοκρασίας) παρουσιάζει σημαντικά διαφορετικά χαρακτηριστικά συμβατότητας υλικού από το βασικό ψυκτικό R245fa (βλ. Πίνακα 8), παρόλο που έχει προταθεί ως εναλλακτική.

Πίνακας 9 Συμβατότητα των πολυμερών και ψυκτικών που ερευνήθηκαν.

Polymer	R245fa	R1233zd(E)	R134a	R450A	R513A	R1234yf	R1234ze(E)	POE
FKM 1	x	x	x	x	x	x	x	+
FKM 2	x	x	x	x	x	x	x	+

\**polymer* - πολυμερές

Polymer	R245fa	R1233zd(E)	R134a	R450A	R513A	R1234yf	R1234ze(E)	POE
EPDM 1	—	x	—	—	—	—	—	x
EPDM 2	+	—	+	+	+	+	+	+
CR	—	—	—	—	—	—	—	—
NBR	+	—	—	—	—	—	—	—
PTFE	+	+	+	+	+	+	+	+
PP	—	x	+	+	+	+	+	+

+ - good compatibility, — - limited compatibility, x - poor compatibility

\*+καλή συμβατότητα, - περιορισμένη συμβατότητα, x κακή συμβατότητα

Έτσι, η συμβατότητα των υλικών με ψυκτικά είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που επιτρέπει σε ένα ψυκτικό σύστημα να λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η αποτυχία των ψυκτικών να πληρούν τις απαιτήσεις συμβατότητας υλικών μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση του υλικού, η οποία μπορεί να οδηγήσει, για παράδειγμα, σε

διαρροές ψυκτικού και βραχυκυκλώματα ηλεκτρικού ρεύματος και συνεπώς αποτελεί πρόβλημα ασφάλειας. Η χημική σύνθεση των νέων ψυκτικών διαφέρει μεταξύ τους και με τη χημική σύνθεση των συμβατικών ψυκτικών HFC. Έτσι, αναμένεται διαφορά στις ιδιότητες συμβατότητας υλικού. Συχνά, παρατηρείται μόνο μια μικρή διαφορά αν και αυτό δεν εμποδίζει τη χρήση νέων ψυκτικών μέσων αντί των συμβατικών ψυκτικών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η παρατηρούμενη διαφορά στη συμβατότητα είναι σημαντική. Είναι επομένως απαραίτητο να επιβεβαιωθεί η συμβατότητα υλικών των νέων ψυκτικών πριν χρησιμοποιηθούν με υλικά στο σύστημα ψύξης.

## **Εφαρμογές Ψυκτικών Ρευστών**

### ***Φθοριούχα αέρια που χρησιμοποιούνται στην ΕΕ***

Ο κανονισμός F-gas ορίζει τα φθοριούχα αέρια του θερμοκηπίου ως υδροφθοράνθρακες, υπερφθοράνθρακες, εξαφθοριούχο θείο και άλλα αέρια θερμοκηπίου που περιέχουν φθόριο, που απαριθμούνται στο παράρτημα I του κανονισμού F-gas, ή μείγματα που περιέχουν οποιαδήποτε από αυτές τις ουσίες. Σύμφωνα με τις στατιστικές που παρουσίασε ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, το 75% των αερίων F που παρέχονται στην ΕΕ προορίζονται για χρήση σε εφαρμογές RACHP. Τα εναπομείναντα αέρια F χρησιμοποιήθηκαν σε αφρούς, αερολύματα, ηλεκτρικό εξοπλισμό και άλλες εφαρμογές. Τα επιδιωκόμενα πρότυπα χρήσης διαφορετικών αερίων F, όπως αναγνωρίζονται από τις στατιστικές του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, υποδηλώνουν ότι τα HFC χρησιμοποιούνται επί του παρόντος κυρίως ως ψυκτικά και, σε μικρότερο βαθμό, σε αερολύματα και ως παράγοντες εμφύσησης αφρού.

Τα πιο διαδεδομένα HFC που παρέχονται, από την άποψη των ισοδυνάμων CO<sub>2</sub>, είναι τα R125, R134a, R143a και R32, που αντιπροσωπεύουν το 92% του συνολικού εφοδιασμού HFC της ΕΕ, εκ των οποίων το R134a είναι το κυρίαρχο ψυκτικό μέσο στην ΕΕ (παρέχονται 40,8 τόνοι). Το υπόλοιπο 8% προήλθε από R23 (1%), R227ea (3%) και μερικές άλλες ουσίες HFC.

Διάφορα αέρια F χρησιμοποιούνται σε καθαρή μορφή, καθώς επίσης χρησιμοποιούνται ως συστατικά ενός ψυκτικού μείγματος. Τα τυπικά ψυκτικά HFC που χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς εφαρμογής παρουσιάζονται στον Πίνακα 13. Επιπλέον, η σύνθεση των μειγμάτων φαίνεται στον Πίνακα 14. Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα τυπικά ψυκτικά μέσα περιλαμβάνουν τα τέσσερα πιο παρεχόμενα αέρια F στην ΕΕ, εάν μετρηθούν σε ισοδύναμα CO<sub>2</sub>.

Όλα τα ψυκτικά μέσα που παρέχονται σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ως αποτέλεσμα της αντικατάστασης ψυκτικών μέσων που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί και είχαν ως αποτέλεσμα την καταστροφή του όζοντος. Όλα τα ψυκτικά ταξινομούνται σύμφωνα με το πρότυπο ANSI / ASHRAE 34. Το R134a είναι ψυκτικό που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μέσης θερμοκρασίας. Έχει NBP -26,1 ° C και η κρίσιμη θερμοκρασία 101,1 ° C επιτρέπει τη χρήση του σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων εφαρμογών με υψηλές θερμοκρασίες συμπύκνωσης. Έχει υιοθετηθεί ως αντικατάσταση του R12 που καταστρέφει το όζον, παρά το γεγονός ότι ήταν γνωστές περισσότερες ενεργειακά αποδοτικές επιλογές με χαμηλότερο GWP τη στιγμή της υιοθέτησης.

Πίνακας 10 Τυπικά ψυκτικά που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικούς τομείς εφαρμογής στην ΕΕ.

Τομέας εφαρμογής	Ψυκτικό HFC που χρησιμοποιείται
Αντλίες θερμότητας	R134a, R407C, R410A
Εμπορική & βιομηχανική ψύξη - κεντρικά συστήματα & μονάδες συμπύκνωσης	R134a, R404A, R407A, R507A
Αυτοτελή συστήματα (ερμητικά σφραγισμένα)	R404A
Κλιματισμός	R410A, R407C
Ψύξη σε μεταφορές	R404A

Πίνακας 11 Σύνθεση σε ποσοστό μάζας ψυκτικών HFC που χρησιμοποιούνται συνήθως

	R404A	R407A	R407C	R410A	R507A
R134a	4	40	52	0	0



R125	44	40	25	50	50
R143a	52		0	0	50
R32	0	20	23	50	0

Τα R410A και R407C έχουν αναπτυχθεί για να αντικαταστήσουν το R22 σε εξοπλισμό κλιματισμού, αντλίες θερμότητας και ψύξης μικρού και μεσαίου μεγέθους. Ενώ το R407C έχει σχεδιαστεί για να είναι κατάλληλο για μετασκευές συστημάτων R22, το R410A έχει προταθεί για νέα σχεδιασμένα συστήματα. Πολλά νέα μείγματα ψυκτικών έχουν διατυπωθεί ως εναλλακτικές λύσεις έναντι του R410A, ενώ το ενδιαφέρον για τη διαμόρφωση εναλλακτικών του R407C είναι χαμηλό.

Τα R404A και R507A κυριαρχούν στις εμπορικές εφαρμογές ψύξης και ψύξης σε μεταφορές. Αυτά τα ψυκτικά έχουν αντικαταστήσει το μείγμα που καταστρέφει το όζον R502 σε συστήματα που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επί του παρόντος, χρησιμοποιούνται επίσης σε συστήματα μέσης θερμοκρασίας και εμπορικά χρησιμοποιούμενα ερμητικά σφραγισμένα αυτόνομα συστήματα. Το R407A έχει χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση του R404A στην εμπορική ψύξη με μειωμένο GWP. Ωστόσο, η χρήση του είναι περιορισμένη και προτείνονται νέες εναλλακτικές λύσεις για το R404A με χαμηλότερο GWP. Όσον αφορά τις ομοιότητες στις κύριες ιδιότητες μεταξύ R404A και R507A, νέα ψυκτικά που διαμορφώνονται ως εναλλακτικά

για το R404A μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως εναλλακτικά του R507A. Οι κύριες ιδιότητες αυτών των ψυκτικών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 12 Κύριες ιδιότητες των τυπικών ψυκτικών που χρησιμοποιούνται

	R134a	R404A	R507A	R407A	R407C	R410A
NBP/bubble point at 1 atm, °C	-26.1	-46.2	-46.7	-45.0	-43.6	-51.4
T <sub>crit</sub> , °C	101.1	72.1	70.6	82.3	86.2	71.3
P <sub>crit</sub> , MPa	4.06	3.73	3.70	4.51	4.63	4.90
GWP	1,430	3,922	3,985	2,107	1,774	2,088

### *Επιπτώσεις που επιβάλλονται από τον κανονισμό F-gas*

Για την επίτευξη του στόχου του κανονισμού F-gas για την προστασία του περιβάλλοντος με τη μείωση των εκπομπών F-gas, αυτός ο κανονισμός:

- θεσπίζει κανόνες για τον περιορισμό, τη χρήση, την ανάκτηση και την καταστροφή των αερίων F, καθώς και σχετικά συναφή βοηθητικά μέτρα
- επιβάλλει όρους για τη διάθεση στην αγορά (POM) συγκεκριμένων προϊόντων και εξοπλισμού που περιέχουν, ή των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε, F-gas (τομεακές απαγορεύσεις POM) •
- επιβάλλει όρους σε συγκεκριμένες χρήσεις των αερίων F και
- καθορίζει ποσοτικά όρια για το POM των HFC (πρόγραμμα σταδιακής κατάργησης).

### *Απαγόρευση υπηρεσίας*

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις που ορίζονται στον κανονισμό F-gas, η χρήση ψυκτικών μέσων με GWP 2.500 και άνω για συντήρηση ψυκτικού εξοπλισμού με μέγεθος φόρτισης 40 τόνων ισοδύναμων CO<sub>2</sub> ή περισσότερα θα απαγορευτούν από τις αρχές του 2020 (περαιτέρω χαρακτηρίζεται ως «απαγόρευση υπηρεσίας»).

Μεταξύ των κοινώς χρησιμοποιούμενων ψυκτικών, τα R404A (GWP 3922) και R507A (GWP 3985) υπόκεινται σε απαγόρευση λειτουργίας. Λαμβάνοντας υπόψη το όριο των 40 τόνων ισοδύναμου CO<sub>2</sub>, η απαγόρευση υπηρεσίας ισχύει επομένως για εξοπλισμό με φόρτιση περίπου 10 kg ή περισσότερο. Έτσι, είναι αντιπροσωπευτικό του μεγαλύτερου εμπορικού εξοπλισμού με υψηλά φορτία ψύξης (π.χ. ψύξη σούπερ μάρκετ).

Τα φυσικά απαντώμενα υγρά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ψυκτικά σε εμπορικά ψυκτικά συστήματα και βιομηχανικά συστήματα ψύξης. Ωστόσο, αυτά πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συστήματα σχεδιασμένα για χρήση με φυσικά ψυκτικά, λόγω της τοξικότητας ή των χαρακτηριστικών ευφλεκτότητάς τους ή των υπερβολικών πιέσεων λειτουργίας στα όρια θερμοκρασίας που παρατηρούνται σε τέτοιες εφαρμογές.

Δεδομένης της ημερομηνίας έναρξης της «απαγόρευσης λειτουργίας» και λαμβάνοντας υπόψη την τυπική λειτουργική ζωή τέτοιων συστημάτων, πολλά από τα συστήματα που επηρεάζονται από αυτήν την απαγόρευση θα εξακολουθούν να λειτουργούν το 2020. Επομένως, θα ήταν επιθυμητό να αντικατασταθούν αυτά τα ψυκτικά με εναλλακτικές λύσεις με GWP κάτω των 2.500 χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις που διαφορετικά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε επιπλέον κόστος.

### ***Τομεακές απαγορεύσεις POM***

Έχει θεσπιστεί ένα σύνολο τομεακών απαγορεύσεων POM για τη διευκόλυνση της μείωσης των αερίων F που επιτρέπονται στο POM της ΕΕ. Διάφορες εξαιρέσεις από τις απαγορεύσεις POM (συμπεριλαμβανομένων, αλλά χωρίς περιορισμό, εξαίρεσης για στρατιωτικό εξοπλισμό ή όπου η χρήση τεχνικά εφικτών και ασφαλών εναλλακτικών λύσεων θα συνεπαγόταν δυσανάλογο κόστος) εφαρμόζονται στον κανονισμό.

Αρκετές απαγορεύσεις POM αντιμετωπίζονται σχετικά με διαφορετικούς τύπους εμπορικών συστημάτων ψύξης στα οποία έχουν καθοριστεί όρια GWP 2.500, 1.500, 750 και 150 από τις αρχές του 2020 ή του 2022. Τα ψυκτικά μέσα R134a / R404A / R407A / R507A επηρεάζονται από αυτές τις απαιτήσεις.

Απαγορεύεται η χρήση R404A και R507A σε σταθερό ψυκτικό εξοπλισμό για POM στην ΕΕ από το 2020 (εάν δεν προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για ψύξη προϊόντων σε θερμοκρασίες κάτω των  $-50^{\circ}\text{C}$ ). Επιπλέον, από το 2020, αυτά τα ψυκτικά δεν θα επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται σε ερμητικά σφραγισμένα ψυγεία και καταψύκτες για εμπορική χρήση.

Από τις αρχές του 2022, έχει οριστεί επίσης ένα όριο 150 GWP για κεντρικά ψυκτικά συστήματα πολλαπλών συσκευασιών για εμπορική χρήση με ονομαστική χωρητικότητα 40 kW ή μεγαλύτερη στο δευτερεύον κύκλωμα. Οι απαιτήσεις για το πρωτεύον ψυκτικό κύκλωμα των συστημάτων έχουν μειωθεί και εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν αέρια F με GWP μικρότερο από 1.500. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερο αριθμό πιθανών ψυκτικών, όπως R404A / R507 μη εύφλεκτες εναλλακτικές λύσεις με GWP μικρότερο από 1.500.

Η τιμή GWP ενός ψυκτικού που χρησιμοποιείται στον εξοπλισμό κλιματισμού σε ένα ερμητικά σφραγισμένο δωμάτιο, το οποίο είναι κινητό μεταξύ των δωματίων από τον τελικό χρήστη, περιορίζεται επίσης σε κάτω από 150. Αυτά τα συστήματα είναι γενικά συστήματα με χαμηλή φόρτιση. Έτσι, η χρήση φυσικών ψυκτικών ουσιών δεν θα θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια. Αυτός ο περιορισμός πιθανότατα θα επιτευχθεί με τη χρήση ψυκτικών υδρογονανθράκων.

Τέλος, ψυκτικά με GWP 750 και άνω δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κλιματισμό μεμονωμένου διαχωρισμού που διατίθεται στην αγορά της ΕΕ από τις αρχές του 2025. Αυτή η απαγόρευση, η οποία ισχύει για συστήματα που περιέχουν λιγότερο από 3 kg φθοριούχων αερίων θερμοκηπίου, δεν θα επιτρέπει τα ψυκτικά μέσα R410A και R407C, τα οποία χρησιμοποιούνται συμβατικά σε τέτοιες εφαρμογές.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα όρια GWP, τα R134a, R404A, R407A, R507A και R410A είναι τα ψυκτικά που τώρα επηρεάζονται κυρίως από τον κανονισμό F-gas λόγω της ευρείας εφαρμογής τους στα συστήματα ψύξης στην ΕΕ. Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις που ορίζονται από τον κανονισμό, η παροχή τους μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας ψυκτικά μέσα με χαμηλές τιμές GWP σε πρόσφατα σχεδιασμένα συστήματα. Μεταξύ των εναλλακτικών (GWP κάτω από 10) τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν CO<sub>2</sub>, αμμωνία, υδρογονάνθρακες και HFOs, R1234yf και R1234ze (E) κυριαρχούν. Χρησιμοποιούνται επίσης R32 (GWP 675) και R152a (GWP 124). Μια σημαντική ζήτηση για νέα ψυκτικά μπορεί να σχετίζεται με τη ζήτηση για υπάρχουσα συντήρηση εξοπλισμού RACHP. Αυτό το ποσοστό των παρεχόμενων ψυκτικών μπορεί να μειωθεί μειώνοντας τη διαρροή ψυκτικού και αντικαθιστώντας τα χρησιμοποιούμενα ψυκτικά με εναλλακτικά με χαμηλότερο GWP.

Οι τρέχουσες παρατηρούμενες τάσεις στην ανάπτυξη νέων ψυκτικών μέσων συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 13 Εφαρμογές στόχου και όρια GWP εναλλακτικών ψυκτικών που προκύπτουν από τα αποτελέσματα του κανονισμού F-gas

<b>GWP</b>	<b>Intended use</b>	<b>Comment</b>
<2500	To service or maintain systems, charge > 40 tonnes CO <sub>2</sub> -eq. from 2020	A1 alternatives to R404A and R507A for retrofit of existing equipment; compatibility with existing system is required, non-flammable
	New stationary refrigeration equipment from 2020	Commercial availability and approval from the component manufacturer by 2020, preferably non-flammable
<1500	New primary refrigerant circuit of commercial refrigeration, cascade systems, 40 kW and more	A1 alternatives to R404A and R507A, commercial availability and approval from the component manufacturer by 2020, preferably non-flammable
<750	New split air conditioning with <3 kg of F-gas	R32 is a possible alternative; new mixtures with varying properties developed. Although the ban starts in 2025, there is ongoing demand due to limited availability as a result of the phase down
<150	New stationary refrigeration equipment (hermetically sealed)	Focus on A2 and A2L alternatives, since R290 can be used in the A3 group, but A1 new refrigerants are not available with GWP<1251
	Multipack centralised refrigeration systems with rated capacity of 40 kW	Low interest due to the already developed HFO alternatives and natural refrigerants in this sector
	Hermetically sealed room AC	Low interest due to the already existing alternatives and small refrigerant charge

\*GWP – προοριζόμ

ενη χρήση - σχόλια

### *Πρόγραμμα σταδιακής κατάργησης*

Ο κανονισμός F-gas καθορίζει επίσης ποσοτικά όρια για τα POM των HFC (πρόγραμμα σταδιακής κατάργησης). Το χρονοδιάγραμμα σταδιακής κατάργησης που καθορίζεται

από τον κανονισμό F-gas μπορεί να μεταφραστεί σε ποσότητα ισοδύναμων CO<sub>2</sub> η οποία επιτρέπεται να διατίθενται στην αγορά της ΕΕ, δεδομένων των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων. Έτσι, η ποσοστώση 100% είναι 183,1 MT ισοδύναμων CO<sub>2</sub>. Οι τιμές των ποσοστώσεων για το 2019 και το μέλλον εμφανίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 14 Ποσό μείωσης HFC που μεταφράζεται σε εκπομπές ισοδύναμων CO<sub>2</sub>.

Year	15	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Quota, %	100	63	63	45	45	45	31	31	31	24	24	24	21
POM, MT CO <sub>2</sub> -eq.	183.1	115.4	115.4	82.4	82.4	82.4	56.8	56.8	56.8	43.9	43.9	43.9	38.5

Τα ψυκτικά που διατίθενται στην αγορά χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν το ίδιο ψυκτικό που αφαιρέθηκε από ένα σύστημα (π.χ. λόγω διαρροής) ή για χρήση σε συστήματα που τέθηκαν σε λειτουργία. Έτσι, τα ήδη ενεργοποιημένα ή εγκατεστημένα συστήματα θα δημιουργήσουν μια μελλοντική ζήτηση για ψυκτικά HFC, εκτός εάν έχουν τοποθετηθεί εκ νέου ή δεν τεθούν σε λειτουργία.

### ***Ομάδες νέων ψυκτικών***

Τα συμβατικά ψυκτικά που προσδιορίζονται στην Ενότητα 5.1 παρατίθενται στον Πίνακα μαζί με τις θερμοκρασίες NBP (στην περίπτωση των R134a και R507A) και τις



θερμοκρασίες σημείου δρόσου και φυσαλίδων σε κανονική πίεση (στην περίπτωση των ζεοτροπικών μειγμάτων).

Πίνακας 15 Θερμοκρασίες βρασμού κοινών ψυκτικών HFC

<b>Refrigerant</b>	<b>Bubble point, °C</b>	<b>Dew point, °C</b>
R404A	-46.6	-45.8
R407A	-45.2	-38.7
R507A	NBP of -46.7 °C	
R410A	-51.6	-51.5
R134a	NBP of -26.0 °C	

*\*ψυκτικό – σημείο φυσαλίδας – σημείο δρόσου*

Τα νέα ψυκτικά μέσα ενός συστατικού δεν προορίζονται για χρήση σε εφαρμογές RACHP όπου χρησιμοποιούνται τα συμβατικά ψυκτικά HFC που παρουσιάζονται στον Πίνακα 18. Το NBP του R1132a είναι -86,7 ° C και η κρίσιμη θερμοκρασία του είναι 51,1 ° C. Μια χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία περιορίζει το πιθανό εύρος θερμοκρασιών συμπύκνωσης αφού η λειτουργία σε τιμές κοντά σε κρίσιμη θερμοκρασία επιδεινώνει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος συμπίεσης ατμών. Επιπλέον, αναφέρθηκε ότι είναι δυνητικά ασταθές, γεγονός που θα μπορούσε να περιορίσει τη μελλοντική του χρήση σε συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμών.

Άλλα νέα ψυκτικά μέσα που δεν καταστρέφουν το όζον είναι τα R1336mzz (E) και 1336mzz (Z). Χαρακτηρίζονται από υψηλότερο NBP και κρίσιμη θερμοκρασία (130,3 ° C και 171,4 ° C, για R1336mzz (E) και 1336mzz (Z), αντίστοιχα). Έτσι, θεωρούνται κατάλληλα για εφαρμογές αντλίας θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας.

Μεταξύ των νέων προτεινόμενων μειγμάτων ψυκτικών, εκείνα με GWP<2500 μπορούν να διαχωριστούν σε ομάδες (G1 έως G7) σύμφωνα με το εύρος θερμοκρασίας NBP ή σημείου φυσαλίδας, την εκχωρημένη τυπική κατηγορία ασφαλείας ANSI / ASHRAE 34 και τις τιμές GWP. Το ψυκτικό R462A (κλάση A2, GWP 2249, σημείο φυσαλίδας -42,6 ° C) έχει αποκλειστεί από περαιτέρω ανάλυση καθώς έχουν προταθεί πολλά άλλα ψυκτικά με παρόμοιο σημείο φυσαλίδας και χαμηλότερη αναφλεξιμότητα ή χαμηλότερο GWP.

Η ομάδα G1 περιλαμβάνει 14 νέα ψυκτικά που μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω σε δύο κατηγορίες: αυτά τα μείγματα με θερμοκρασίες βρασμού -47,5 ° C ή περισσότερο και R463A με θερμοκρασία βρασμού -58,4 ° C.

Πίνακας 16 Νέα ψυκτικά με GWP<2500 ομαδοποιημένα σύμφωνα με τις θερμοκρασίες του σημείου βρασμού, την κατηγορία ασφαλείας και το GWP

NBP/bubble point temp. range, °C	Group	ASHRAE safety class	GWP range	New refrigerants
-58.4 to -39.8	G1	A1	1,251 to 2,220	bubble point -58.4°C
				R463A
				bubble point =>-47.5 °C
				R407H, R407I, R452A, R452C, R448A, R449A, R449B, R449C, R453A, R458A, R460A, R460B, R464A
	G2	A2L	239 to 741	R444B, R446A, R447A, R447B, R452B, R454A, R454B, R459A

NBP/bubble point temp. range, °C	Group	ASHRAE safety class	GWP range	New refrigerants
	G3	A2L	139 to 148	R454C, R455A, R457A, R459B
	G4	A2	145	R465A
-31.0 to -23.4	G5	A1	1,463	R407G
	G6	A1	393 to 766	R450A, R456A, R460C, R513A, R513B, R515A
	G7	A2L	142 to 164	R451A, R451B, R516A

*\*NBP/εύρος θερμοκρασίας σημείου φυσαλίδας – ομάδα – Κατηγορίας ασφάλειας ASHRAE –εύρος GWP–νέα ψυκτικά*

Τα μείγματα ψυκτικών στην ομάδα G1 πληρούν το όριο GWP των 2.500 που επιβάλλεται από τον κανονισμό F-gas για συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα περισσότερα ψυκτικά μέσα στην G1 έχουν αναπτυχθεί ως αντικατάσταση A1 για το R404A σε χαμηλής και μεσαίας θερμοκρασίας ψύξη και εμπορική ψύξη, ενώ τα R453A και R458A διαμορφώθηκαν για να αντικαταστήσουν το R22 και το R463A για να αντικαταστήσουν το R410A. Τα μείγματα ψυκτικών στην ομάδα G3 και G4 έχουν διαμορφωθεί ως αντικαταστάτες για το R404A και ικανοποιούν το κριτήριο του GWP<150. Αυτές οι

εναλλακτικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των απαιτήσεων που έχουν οριστεί για νέο σταθερό ψυκτικό ερμητικά σφραγισμένο εξοπλισμό αντικαθιστώντας το R404A.

Σε αντίθεση με τα μείγματα ψυκτικών στην ομάδα G3 και G4, τα μείγματα ψυκτικών στην ομάδα G2 δεν ικανοποιούν την απαίτηση GWP<750. Αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως εναλλακτικές λύσεις για χρήση σε νέα συστήματα κλιματισμού split και έχουν αναλυθεί περαιτέρω σε σύγκριση με το R410A. Τα μείγματα ψυκτικών στην ομάδα G5 – G7 προτείνονται ως εναλλακτικές λύσεις έναντι του R134a. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι εξελίξεις επικεντρώθηκαν στη διαμόρφωση μη εύφλεκτων μειγμάτων με μειωμένο GWP. Το GWP του R407G είναι μεγαλύτερο από αυτό του R134a και έχει αποκλειστεί από περαιτέρω ανάλυση. Τα εύφλεκτα υγρά τυποποιήθηκαν με GWP<150 (R451 και R516A) και R451B.

Στις ακόλουθες ενότητες, πρόσφατα εισαγόμενα μείγματα ψυκτικών που διατυπώνονται ως εναλλακτικές λύσεις για τα R404A, R134a και R410A αναλύονται περαιτέρω στο πλαίσιο των κινήτρων που ορίζει ο κανονισμός F-gas και σε σχέση με ένα αντίστοιχο εναλλακτικό HFC.

### ***Νέες εναλλακτικές λύσεις για τα R404A, R134a και R410A***

#### ***R404A***

#### ***R404A***

Τα συνθετικά μείγματα ψυκτικών που έχουν προταθεί ως πιθανές αντικαταστάσεις στο R404A διαφέρουν ως προς τη σύνθεση και, κατά συνέπεια, στις ιδιότητές τους και στην

αναμενόμενη απόδοση στα συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμών. Το NBP, η κορεσμένη τάση ατμών στους 0 ° C και η κατηγορία ασφαλείας ANSI / ASHRAE των συστατικών, η σύνθεση των μειγμάτων, τα σημεία δρόσου και φυσαλίδων των μειγμάτων και οι τιμές GWP μη εύφλεκτων χαμηλών τοξικών ψυκτικών (A1 ASHRAE 34 τυπική κατηγορία ασφαλείας ) παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα καθώς και εύφλεκτα χαμηλά τοξικά ψυκτικά (κατηγορία A2L).

Πίνακας 17 Σύνθεση εναλλακτικών μειγμάτων R404A και A1.

Refrigerant	R143a	R32	R125	R1234yf	R134a	R1234ze(E)	R227ea	GWP	Bubble point, °C	Dew point, °C
NBP, °C	-47.2	-51.8	-48.1	-29.5	-26.1	-19.0	-15.6			
GWP	4,470	675	3,500	4	1,430	7	3,220			
P <sub>sat.vap.</sub> at 0 °C, MPa	0.62	0.81	0.67	0.32	0.22	0.20	0.62			
ASHRAE safety class	A2L	A2L	A1	A2L	A1	A2L	A1			
	Mass in composition, %									
R404A	52		44		4			3,922	-46.6	-45.8
R407A		20	40		40			2,107	-45.2	-38.7
R407H		32.5	15.0		52.5			1,495	-44.7	-37.6
R407I		19.5	8.5		72.0			1,459	-39.8	-33.0
R448A		26.0	26.0	20.0	21.0	7.0		1,387	-45.9	-39.8
R449A		24.3	24.7	25.7	25.3			1,397	-46.0	-39.9
R449B		25.2	24.3	23.2	27.3			1,412	-46.1	-40.2
R449C		20.0	20.0	31.0	29.0			1,251	-44.6	-38.1
R460B		28.0	25.0		20.0	27.0		1,352	-45.2	-37.1
R452A		11.0	59.0	30.0				2,140	-47.0	-43.2
R452C		12.5	61.0	26.5				2,220	-47.5	-44.2
R460A		12.0	52.0		14.0	22.0		2,103	-44.6	-37.2
R464A		27	27			40	6	1,323	-46.5	-36.9

\*ψυκτικό – GWP – σημείο φουσαλίδας – σημείο δρόσου – κλάση ασφάλειας ASHRAE – μάζα κατά τη σύνθεση

Πίνακας 18 Σύνθεση του R404A και των εύφλεκτων εναλλακτικών του μειγμάτων.

Refrigerant	R32	R1234ze(E)	R1234yf	R744	R152a	R290	GWP	ASHRAE 34 class	Bubble point, °C	Dew point, °C
NBP, °C	-51.8	-19.0	-29.4	-78	-24	-42				
GWP	675	7	4	1	124	3*				
P <sub>sat.vap.</sub> at 0 °C, MPa	0.81	0.20	0.32	3.49	0.26	0.47				
ASHRAE safety class	A2L	A2L	A2L	A1	A2	A3				
	Mass in composition, %									
R454C	21.5		78.5				148	A2L	-46.0	-37.8
R455A	21.5		75.5	3.0			148	A2L	-51.6	-39.1
R457A	18		70		12		139	A2L	-42.7	-35.5
R459B	21	10	69				145	A2L	-44.0	-36.1
R465A	21.0		71.1			7.9	145	A2	-51.8	-40.0

\* value tabulated in the F-gas Regulation [8]

*\*ψυκτικό – GWP – σημείο φουσαλίδας – σημείο δρόσου – κλάση ασφάλειας ASHRAE – μάζα κατά τη σύνθεση*

Όσον αφορά τη σύνθεση εναλλακτικών υγρών, όλα τα εναλλακτικά ψυκτικά δεν περιλαμβάνουν το R143a (το συστατικό υψηλής πίεσης του R404A με την υψηλότερη τιμή GWP 4,470). Το συστατικό R125, το οποίο χρησιμοποιείται στο μείγμα R404A για την καταστολή της ευφλεκτότητας των συστατικών A2L, παραμένει σε όλα τα προτεινόμενα μείγματα. Επιπλέον, το συστατικό καταστολής της ευφλεκτότητας R227es χρησιμοποιείται σε ένα νέο μείγμα. Τα ψυκτικά μέσα R32, R1234yf, R1234ze (E) και

R227ea είναι νέα συστατικά σε νέα μη εύφλεκτα μείγματα ψυκτικών (ανάλογα με το μείγμα). Η παρουσία υψηλής πίεσης R32 συμβάλλει στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και της ικανότητας ψύξης λόγω της υψηλής θεωρητικής COP και  $Q_{vol}$  αυτού του υγρού, σε σύγκριση με άλλα συστατικά.

Σε πολλά νέα μίγματα η παρουσία μη εύφλεκτου συστατικού R134a έχει αυξηθεί από 4% (βάση μάζας) σε 72% για να συμβάλει στα μη εύφλεκτα χαρακτηριστικά του νέου υγρού και να μειώσει το GWP μειώνοντας την αναλογία του συστατικού R125. Για περαιτέρω μείωση του GWP, προστέθηκαν ψυκτικά HFO σε ορισμένα νέα μείγματα. Η παρουσία αυξημένης ποσότητας ρευστών χαμηλής πτητικότητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των νέων μιγμάτων (δηλαδή την απόλυτη τιμή της διαφοράς μεταξύ των θερμοκρασιών έναρξης και λήξης μιας διαδικασίας αλλαγής φάσης από ένα ψυκτικό μέσα σε ένα συστατικό ενός ψυκτικού συστήματος). Η επίδραση της μετατόπισης θερμοκρασίας στην απόδοση του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί επωφελώς σε ένα σύστημα, αλλά μπορεί επίσης να έχει αρνητικές συνέπειες ανάλογα με τον τρόπο βελτιστοποίησης του συστήματος για να ληφθεί υπόψη η ολίσθηση της θερμοκρασίας.

Λαμβάνοντας υπόψη τις εύφλεκτες εναλλακτικές λύσεις, το σκεύασμά τους δεν έχει ομοιότητα με το R404A και τα μίγματα περιέχουν R32 αναμεμιγμένα με R1234yf (R454C) και ένα μικρό ποσοστό R1234ze (E) (R459B), R152a (R457A), R290 (R465A) ή CO<sub>2</sub> (R455A). Η αναλογία των συστατικών υψηλής πίεσης μειώνεται, σε σύγκριση με τα νέα μείγματα A1, και η αναλογία εύφλεκτων ψυκτικών με χαμηλότερη GWP και χαμηλότερη πτητικότητα αυξάνεται. Οι εναλλακτικές λύσεις που συζητήθηκαν έχουν μοντελοποιηθεί περαιτέρω σε έναν βασικό κύκλο συμπίεσης ατμών υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει μια ισεντροπική απόδοση συμπίεσης 0,7, χωρίς απώλειες ογκομετρικής



συμπύεσης, η ισεντροπική διαδικασία εξετάζεται στη βαλβίδα διαστολής και η μεταφορά θερμότητας στο περιβάλλον και οι πτώσεις πίεσης παραμελούνται. Τα δεδομένα ιδιοτήτων ψυκτικού έχουν ληφθεί από το REFPROP 10. Διαμορφώθηκαν δύο επίπεδα θερμοκρασίας εξάτμισης:  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέση θερμοκρασία εξάτμισης (επίπεδο MT) και  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέση θερμοκρασία εξάτμισης (επίπεδο LT). Άλλες συνθήκες μοντελοποίησης παρέμειναν οι ίδιες τόσο για τα επίπεδα θερμοκρασίας εξάτμισης:  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέση θερμοκρασία συμπύκνωσης,  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  υπερθέρμανση και βαθμός ψύξης. Τα αποτελέσματα μοντελοποίησης σχετικά με την πυκνότητα ατμών ψυκτικού στο σημείο εισόδου συμπύεσης, τη θερμοκρασία ψυκτικού στο σημείο εκφόρτισης συμπύεσης, την ογκομετρική ικανότητα ψύξης ( $Q_{vol}$ ) και το COP, σε σχέση με τις τιμές που υπολογίστηκαν για το R404A, συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες. Παρουσιάζονται επίσης οι τιμές ολίσθησης θερμοκρασίας στον εξατμιστή και τον συμπυκνωτή.

Πίνακας 19 Θεωρητική επισκόπηση των παραμέτρων λειτουργίας των εναλλακτικών R404A ( $-35/35\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέση εξάτμιση / μέση θερμοκρασία συμπύκνωσης)..

Refr.	GWP	Vapour density, kg/m <sup>3</sup>	COP, -	$Q_{vol}$ , kJ/m <sup>3</sup>	Temp. disc., °C	Temp. glide in evap. /cond., °C	
R404A	3,922	8.5	1.59	909	67.1	0.5	0.4
<b>A1, GWP&lt;2500, values in relation to R404A</b>							
R407A	2,107	-27%	+6.5%	-3.5%	88.7	4.2	4.6
R407H	1,495	-39%	+9.2%	-1.3%	103.0	4.7	5.2
R407I	1,459	-48%	+10.1%	-20.9%	94.0	3.8	5.2
R448A	1,387	-26%	+6.7%	+1.0%	89.0	4.2	4.9
R449A	1,397	-26%	+6.6%	-0.3%	87.5	3.7	4.5
R449B	1,412	-26%	+6.8%	+0.4%	88.8	3.8	4.5
R449C	1,251	-30%	+6.8%	-8.3%	83.9	3.7	4.9
R460B	1,352	-34%	+8.1%	-4.3%	94.4	6.1	6.8
R452A	2,140	-1%	+1.2%	-1.4%	69.6	2.4	3.5
R452C	2,220	+2%	+1.2%	+2.5%	70.9	2.2	3.2

Refr.	GWP	Vapour density, kg/ms	COP, -	$Q_{vol}$ , kJ/m <sup>3</sup>	Temp. disc., °C	Temp. glide in evap. /cond., °C	
R460A	2,103	-25%	+4.6%	-13.2%	78.1	5.2	6.1
R464A	1,323	-34%	+7.4%	-7.8%	90.8	7.9	8.7
<b>A2L and A2, GWP&lt;150</b>							
R454C	246	-29%	+6.1%	-11.1%	78.6	4.9	7.0
R455A	148	-25%	+5.5%	-1.6%	83.8	6.3	10.2
R457A	139	-40%	+8.0%	-18.5%	80.6	3.8	6.3
R459B	145	-32%	+6.5%	-13.8%	79.0	5.0	7.2
R465A	145	-25%	+4.3%	-0.6%	80.1	6.3	8.3

Πίνακας 20 Θεωρητική επισκόπηση των παραμέτρων λειτουργίας των εναλλακτικών R404A (-5/35 ° C μέση εξάτμιση / μέση θερμοκρασία συμπύκνωσης.)

Refr.	GWP	Vapour density, kg/m <sup>3</sup>	COP, -	$Q_{vol.}$ , kJ/m <sup>3</sup>	Temp. disc., °C	Temp. glide in evap. /cond., °C	
R404A	3,922	19.85	3.87	3159	52.7	0.4	0.4
<b>A1, GWP&lt;2500, values in relation to R404A</b>							
R407A	2,107	-22%	+3.5%	+0.3%	63.8	4.5	4.6
R407H	1,495	-33%	+4.8%	+1.1%	70.6	5.1	5.2
R407I	1,459	-41%	+6.1%	-15.4%	66.2	4.6	5.2
R448A	1,387	-22%	+3.5%	+2.7%	64.1	4.6	4.9
R449A	1,397	-21%	+3.5%	+1.5%	63.2	4.2	4.5
R449B	1,412	-22%	+3.6%	+2.0%	63.9	4.2	4.5
R449C	1,251	-25%	+3.9%	-5.2%	61.5	4.3	4.9
R460B	1,352	-29%	+4.4%	-1.1%	67.0	6.6	6.8
R452A	2,140	+1%	+0.8%	+1.2%	54.7	3.0	3.5
R452C	2,220	+4%	+0.6%	+4.4%	55.2	2.7	3.2
R460A	2,103	-18%	+3.1%	-7.3%	59.1	5.8	6.1
R464A	1,323	-28%	+4.3%	-3.6%	65.8	8.5	8.7
<b>A2L and A2, GWP&lt;150</b>							
R454C	246	-26%	+3.9%	-8.6%	59.6	6.0	7.0
R455A	148	-21%	+2.9%	+0.8%	63.1	8.1	10.2
R457A	139	-36%	+5.1%	-15.7%	60.2	5.0	6.3
R459B	145	-28%	+4.2%	-10.7%	59.8	6.2	7.2
R465A	145	-23%	+2.5%	+0.3%	60.8	7.5	8.3

Μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων R404A, όλα τα ψυκτικά (εκτός των R452A και R452C) χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη πυκνότητα ατμών στο σημείο αναρρόφησης συμπίεσης σε συνθήκες μοντέλου. Ως αποτέλεσμα, η ροή μάζας ψυκτικού θα μειωθεί αναλογικά, λαμβάνοντας υπόψη τον ίδιο όγκο σάρωσης συμπίεσης και ογκομετρική απόδοση συμπίεσης. Όλες οι εναλλακτικές έχουν αυξημένη θερμοκρασία ολίσθησης στον εξατμιστή και τον συμπυκνωτή, οπότε αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη (όσον αφορά την επιλογή εξαρτημάτων και άλλες επιπτώσεις). Όσον αφορά τις διαμορφωμένες τιμές COP, όλα τα ψυκτικά δείχνουν υψηλότερες τιμές COP. Βελτιώσεις έως 6% / 10% είναι

δυνατές σε συνθήκες μοντελοποίησης MT / LT και σε όλα τα ψυκτικά. Γενικά, οι βελτιώσεις στο COP είναι μεγαλύτερες σε συνθήκες LT.

Το R32 συνέβαλε στην αύξηση της θερμοκρασίας εκφόρτισης του συμπιεστή που έχει παρατηρηθεί σε όλες τις εναλλακτικές λύσεις. Επομένως, πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι δεν θα υπερβεί το όριο που έχει οριστεί από τον κατασκευαστή του συμπιεστή. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μειωμένες θερμοκρασίες εξάτμισης, αυξημένες θερμοκρασίες συμπύκνωσης και υψηλές τιμές βαθμού υπερθέρμανσης, καθώς αυτές αυξάνουν τη θερμοκρασία εκκένωσης. Όλες οι εναλλακτικές λύσεις έχουν χαμηλότερο GWP και επομένως θα μπορούσαν να συμβάλουν στις απαιτήσεις του κανονισμού F-gas όσον αφορά την επίτευξη των στόχων σταδιακής κατάργησης του HFC, καθώς και την ικανοποίηση ενός ορίου GWP (2.500 και 150, ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση και εφαρμογή). Εντοπίστηκε αντιστάθμιση μεταξύ της GWP και της ευφλεκτότητας. Όλα τα ψυκτικά με  $GWP < 150$  έχουν σχεδιαστεί με εύφλεκτα χαρακτηριστικά. Έτσι, οι απαιτήσεις που έχουν καθοριστεί για τη χρήση εύφλεκτων ψυκτικών θα πρέπει να πληρούνται κατά τη χρήση τέτοιων υγρών. Νέα συνθετικά μείγματα ψυκτικών που έχουν προταθεί ως πιθανές εναλλακτικές λύσεις έναντι του R404A έχουν αναλυθεί ως προς τα χαρακτηριστικά τους όταν χρησιμοποιούνται σε έναν βασικό κύκλο συμπίεσης ατμών. Σε σύγκριση με το R404A, και τα 16 μείγματα αυξάνουν το COP, αν και το  $Q_{vol}$  ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες και την επιλογή του μείγματος. Η υψηλότερη μείωση του  $Q_{vol}$  έχει παρατηρηθεί για το ψυκτικό με την υψηλότερη αύξηση COP. Έτσι, είναι δυνατή η ανταλλαγή μεταξύ  $Q_{vol}$  και COP για ορισμένα νέα ψυκτικά. Πρέπει επίσης να δοθεί προσοχή στις μεταβολές στην ολίσθηση της θερμοκρασίας και στην πυκνότητα

των ατμών, ιδιαίτερα στις συνθήκες της μετασκευής ψυκτικού μέσου, όταν η ενδεχόμενη αλλαγή των εξαρτημάτων του συστήματος δεν είναι η προτιμώμενη επιλογή.

Τέλος, τα νέα ψυκτικά που προτείνονται ως εναλλακτικά του R404A χαρακτηρίζονται από μια ποικιλία συστατικών και τις αναλογίες ανάμειξής τους. Η προκύπτουσα παραλλαγή των ιδιοτήτων τους οδηγεί σε ένα ευρύ φάσμα εναλλακτικών λύσεων, ενώ οι αντισταθμίσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών τους πρέπει να γίνονται κατά την επιλογή ενός μείγματος για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

### *R134a*

Τα συνθετικά μείγματα ψυκτικών που έχουν προταθεί ως πιθανές αντικαταστάσεις στο R134a διαφέρουν ως προς τη σύνθεση και, κατά συνέπεια, στις ιδιότητές τους και στην αναμενόμενη απόδοση στα συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμών. Το NBP, η κορεσμένη τάση ατμών στους 0 ° C και η κατηγορία ασφαλείας ANSI / ASHRAE των συστατικών, η σύνθεση των μειγμάτων, τα σημεία δρόσου και φυσαλίδων των μιγμάτων και οι τιμές GWP μη εύφλεκτων χαμηλών τοξικών ψυκτικών (A1 ASHRAE 34 τυπική κατηγορία ασφαλείας ) αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα, καθώς και εύφλεκτα ψυκτικά χαμηλής τοξικότητας (κλάση A2L).

Πίνακας 21 Σύνθεση εναλλακτικών μειγμάτων R134aA1.

Refrigerant	GWP	R134a	ze*	yf^	R32	R125	R227ea
NBP, °C		-26.1	-19.0	29.4	-51.7	-48.1	-15.6
P <sub>sat.vap.</sub> at 0 °C, MPa		0.22	0.20	0.32	0.81	0.67	0.62
ASHRAE safety class		A1	A2L	A2L	A2L	A1	A1
GWP		1430	7	4	675	3500	3220
Mass in composition, %							
R450A	605	42.0	58.0				
R456A	687	45.0	49.0		6.0		
R460C	766	46.0	49.0		2.5	2.5	
R513A	631	44.0		56.0			
R513B	596	41.5		58.5			
R515A	393		88				12

\*ze stands for R1234ze(E)

^yf stands for R1234yf

Πίνακας 22 NBP, σημεία φουσαλίδων και δρόσου σε κανονικές συνθήκες εναλλακτικών

R134aA1.

Refrigerant	R450A	R456A	R460C	R513A	R513B	R515A
NBP, °C				-29.2	-29.2	-18.0
Bubble point, °C	-23.4	-30.4	-29.2			
Dew point, °C	-22.8	-25.6	-26.0			

Πίνακας 23 Σύνθεση εναλλακτικών μειγμάτων R134aA2L.

Refrigerant	GWP	R134a	R1234yf	R152a	Bubble/dew point, °C
NBP, °C		-26.1	-29.4	-24	
GWP		1430	4	124	
P at 0 °C, MPa		0.22	0.32	0.26	
ASHRAE safety class		A1	A2L	A2	
Mass in composition, %					
R451A	149	10.2	89.8		-30.8/-30.5
R451B	164	11.2	88.8		-31.0/-30.6
R516A	142	8.5	77.5	14.0	NBP: -29.4 °C

\*ψυκτικό – GWP – σημείο φουσαλίδας – σημείο δρόσου – κλάση ασφάλειας ASHRAE –  
μάζα κατά τη σύνθεση

Επί του παρόντος, τα περισσότερα από τα προτεινόμενα μείγματα περιέχουν R134a αναμεμιγμένο με εύφλεκτο HFO (R1234yf ή R1234ze (E)). Άλλα πρόσθετα συστατικά είναι τα R152a, R32 και R125. Το R515A δεν περιέχει R134a και είναι μείγμα R1234ze (E) με R227ea..

### *R410A*

Νέα μείγματα ψυκτικών που έχουν προταθεί ως πιθανές αντικαταστάσεις στο R410A διαφέρουν ως προς τη σύνθεση και, κατά συνέπεια, στις ιδιότητές τους και στην αναμενόμενη απόδοση στα συστήματα ψύξης συμπίεσης ατμών. Ο NBP, η κορεσμένη τάση ατμών στους 0 ° C και η κατηγορία ασφαλείας ANSI / ASHRAE των συστατικών, η σύνθεση των μειγμάτων, τα σημεία δρόσου και φουσαλίδων των μειγμάτων και οι τιμές GWP παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 24 Σύνθεση του R410A και των εναλλακτικών μειγμάτων του

Refr.	R32	R125	R1234yf	R1234ze(E)	other	GWP	Bubble point, °C	Dew point, °C
NBP, °C	-51.7	-48.1	-29.5	-19.0				
GWP	675	3500	4	7				
P <sub>sat,vap.</sub> at 0 °C, MPa	0.81	0.67	0.32	0.20				
ASHRAE safety class	A2L	A1	A2L	A2L				
R410A	50	50					-51.6	-51.5
R32	100					675	NBP of -52 °C	
R463A	36.0	30	14		6% R744 (A1, NBP of -78 °C) 14% R134a (A1, NBP of -26 °C)	1494	-58.4	-46.9
R446A	68.0			29.0	3.0% R600 (A3, NBP of 0 °C)	461	-49.4	-44.0
R447A	68.0	3.5		28.5		583	-49.3	-44.2
R447B	68.0	8.0		24.0		741	-50.1	-46.0
R452B	67.0	7.0	26.0			698	-51.0	-50.3
R454B	68.9		31.1			466	-50.9	-50.0
R459A	68.0		26.0	6.0		460	-50.3	-48.6

\*ψυκτικό – GWP – σημείο φυσαλίδας – σημείο δρόσου – κλάση ασφάλειας ASHRAE – μάζα κατά τη σύνθεση

Όσον αφορά τη σύνθεση εναλλακτικών υγρών, το R32 είναι ένα σημαντικό συστατικό σε όλα τα υγρά. Για το μη εύφλεκτο R463A, το R32 αντιπροσωπεύει το 36% με μικρότερες αναλογίες άλλων ψυκτικών να προστίθενται για τη μείωση της ευφλεκτότητας και του GWP. Λόγω της μεγάλης διακύμανσης της πτητικότητας των συστατικών του μείγματος,



το R463A χαρακτηρίζεται από μεγάλη ολίσθηση θερμοκρασίας ( $11,5 \text{ }^\circ \text{C}$  σε κανονικές συνθήκες).

Όλα τα εύφλεκτα μίγματα βασίζονται σε  $68 \pm 1\%$  του R32 αναμεμιγμένο με ένα ή δύο άλλα συστατικά που προστίθενται για τη μείωση της αναφλεξιμότητας και του GWP των μιγμάτων. Ως αποτέλεσμα, παρέχουν τη μεγαλύτερη μείωση στο GWP και έχουν προταθεί μίγματα με GWP το οποίο μπορεί να φτάσει μέχρι και 460. Συγκρίνοντας τα σημεία βρασμού των αναλυθέντων ψυκτικών, όλα τα μίγματα A2L έχουν υψηλότερες τιμές, ενώ η εναλλακτική A1 έχει χαμηλότερη τιμή  $7 \text{ }^\circ \text{C}$ . Τα επίπεδα ολίσθησης θερμοκρασίας είναι χαμηλότερα στην ομάδα A2L από ό, τι στην εναλλακτική A1, και έχουν προταθεί μίγματα με θερμοκρασία ολίσθησης χαμηλότερα από  $1 \text{ }^\circ \text{C}$ .

Οι εναλλακτικές λύσεις που συζητήθηκαν έχουν μοντελοποιηθεί περαιτέρω σε έναν βασικό κύκλο συμπίεσης ατμών υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει μια ισεντροπική απόδοση συμπίεσης 0,7, χωρίς απώλειες ογκομετρικής συμπίεσης, η ισενταλλική διαδικασία εξετάζεται στη βαλβίδα διαστολής και η μεταφορά θερμότητας στο περιβάλλον και οι πτώσεις πίεσης παραμελούνται. Τα δεδομένα ιδιοτήτων ψυκτικού έχουν ληφθεί από το REFPROP 10. Οι συνθήκες μοντελοποίησης ήταν  $10 \text{ }^\circ \text{C}$  μέση εξάτμιση και  $40 \text{ }^\circ \text{C}$  μέσες θερμοκρασίες συμπύκνωσης,  $5 \text{ }^\circ \text{C}$  υπερθέρμανση και βαθμός ψύξης.

Τα αποτελέσματα μοντελοποίησης σχετικά με την πυκνότητα ατμών ψυκτικού στο σημείο εισόδου συμπίεσης, τη θερμοκρασία ψυκτικού στο σημείο εκφόρτισης συμπίεσης,  $Q_{\text{vol}}$  και COP, σε σχέση με τις τιμές που υπολογίστηκαν για το R410A, συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 25 Θεωρητική επισκόπηση των παραμέτρων λειτουργίας των εναλλακτικών λύσεων R410A (10/40 ° C μέσος όρος εναρ./ μέση θερμοκρασία.)

Refr.	GWP	Vapour density, kg/m <sup>3</sup>	COP, -	Q <sub>vol.</sub> , kJ/m <sup>3</sup>	Temp. disc., °C	Temp. glide in evap. /cond., °C	
R410A	2,088	40.4	5.46	6990	65.1	0.1	0.1
values in relation to R410A:							
R32	675	-27.8%	+1.5%	+7.7%	77.9	-	-
A1 ASHRAE safety class							
R463A	1,494	-2.9%	-0.7%	-0.5%	68.8	6.9	7.7
A2L ASHRAE safety class							
R446A	461	-30.7%	+2.5%	-9.6%	72.1	4.2	4.1
R447A	583	-28.6%	+2.4%	-8.7%	72.5	3.9	3.7
R447B	741	-26.3%	+2.1%	-6.8%	72.1	3.3	3.2
R452B	698	-18.8%	+1.4%	-3.1%	69.4	1.0	1.1
R454B	466	-21.1%	+1.6%	-4.0%	69.9	1.2	1.3
R459A	460	-22.6%	+1.8%	-5.3%	70.1	1.7	1.8

Μεταξύ των εναλλακτικών R410A, όλες χαρακτηρίζονται από συγκρίσιμο (απόκλιση 1%) ή υψηλότερο COP, αλλά το Q<sub>vol</sub> μειώνεται για όλες τις εναλλακτικές, εκτός από το R32. Η μοντελοποιημένη θερμοκρασία εκφόρτισης του συμπιεστή αυξάνεται κατά τη

χρήση των εναλλακτικών (αύξηση τουλάχιστον 4 ° C), ενώ η αύξηση είναι η υψηλότερη για το R32. Το R463A είναι η μόνη μη εύφλεκτη εναλλακτική λύση, αλλά χαρακτηρίζεται με σημαντική ολίσθηση θερμοκρασίας, η οποία είναι η υψηλότερη για τις εναλλακτικές λύσεις που αναλύθηκαν.

## Συμπεράσματα

Ο τρέχων και ο προβλεπόμενος αντίκτυπος των φθοριούχων ουσιών στην αλλαγή του κλίματος προκάλεσε τη μετάβαση σε πιο φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις. Στον τομέα RACHP, αυτό ξεκίνησε τη μετάβαση σε εναλλακτικά ψυκτικά μέσα με μειωμένες τιμές GWP. Η μετάβαση υποστηρίζεται από τις απαιτήσεις του κανονισμού F-gas, του πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ και της συμφωνίας των Παρισίων.

Αναγνωρίζοντας τους στόχους της συμφωνίας του Παρισιού, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου πρέπει να μειωθούν σημαντικά. Όσον αφορά την ψύξη που χρησιμοποιεί συστήματα συμπίεσης ατμών, η μείωση μπορεί να επιτευχθεί αντιμετωπίζοντας τόσο τις άμεσες εκπομπές (π.χ. μειώνοντας το GWP των χρησιμοποιημένων ουσιών) όσο και τις έμμεσες εκπομπές (π.χ. βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση λειτουργίας ενός συστήματος) από ένα σύστημα RACHP. Τα ψυκτικά μέσα καθορίζουν τις κλιματικές επιπτώσεις ενός συστήματος RACHP επηρεάζοντας τόσο τις άμεσες όσο και τις έμμεσες εκπομπές. Δεδομένου ότι τα συστήματα RACHP με χαμηλό αντίκτυπο στο κλίμα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, είναι απαραίτητη η επιλογή ψυκτικού μέσου που αντιμετωπίζει τόσο τις άμεσες όσο και τις έμμεσες εκπομπές.

Ο κανονισμός F-gas παρέχει κίνητρα για τη χρήση ψυκτικών με μειωμένο GWP. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι άμεσες εκπομπές από τα συστήματα RACHP αναμένεται να μειωθούν. Ωστόσο, όπως αποδεικνύεται σε αυτή την εργασία αυτό δεν οδηγεί απαραίτητα στη μείωση των κλιματικών επιπτώσεων, εκφραζόμενη ως τιμή LCCP. Επομένως, η αξιολόγηση LCCP μπορεί να είναι απαραίτητη προκειμένου να ληφθεί

υπόψη ο συνολικός αντίκτυπος ενός συστήματος κατά την επιλογή ενός εναλλακτικού ψυκτικού. Η πρόκληση σχετικά με την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου LCCP είναι η αβεβαιότητά της, η οποία προέρχεται από διαφορετικά επίπεδα (π.χ. ελλιπή ή μη αντιπροσωπευτικά δεδομένα εισόδου, αβέβαιη μοντελοποίηση). Αυτές οι αβεβαιότητες πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τον υπολογισμό του LCCP ενός συστήματος RACHP.

Ενώ οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με ένα σύστημα RACHP θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν προκειμένου να μετριαστεί η υπερθέρμανση του πλανήτη και να επιτευχθούν οι στόχοι της Συμφωνίας των Παρισίων, οι απαιτήσεις του κανονισμού F-gas παρέχουν κίνητρα για χρήση ψυκτικών με μειωμένο GWP και έχουν καθοριστεί συγκεκριμένα όρια GWP για επιλεγμένους τύπους εξοπλισμού RACHP. Αυτό προκάλεσε τη χρήση ψυκτικών ουσιών με χαμηλό GWP, κυρίως στους τομείς που επηρεάζονται από την απαγόρευση παροχής υπηρεσιών και τις τομεακές απαγορεύσεις POM του κανονισμού F-gas.

Τρία νέα ψυκτικά μέσα ενός συστατικού που δεν καταστρέφουν το όζον και πολλά μίγματα ψυκτικών έχουν διατυπωθεί τα τελευταία χρόνια και έχουν εγκριθεί από την ASHRAE για δημοσίευση στο πρότυπο ANSI / ASHRAE 34-2016. Αυτά τα νέα μείγματα παρέχουν μια σειρά ιδιοτήτων και υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ του GWP, της ευφλεκτότητας, της ικανότητας ψύξης και της ενεργειακής απόδοσης κατά τη σύγκριση των μειγμάτων με τα συμβατικά χρησιμοποιούμενα ψυκτικά HFCR134a, R404A και R410A.

Το R134a είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο ψυκτικό στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Οι νέες εναλλακτικές λύσεις του έχουν αξιολογηθεί σε αυτή την εργασία. Η χρήση νέων

εναλλακτικών θα μπορούσε να είναι επωφελής λόγω της παρούσας διακύμανσης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων, η οποία θα μπορούσε να προσφέρει περιβαλλοντικά οφέλη, καλύτερη ενεργειακή απόδοση και αυξημένη ικανότητα ψύξης. Ωστόσο, εάν αυτές οι εναλλακτικές λύσεις λαμβάνονται υπόψη για την ανακαίνιση υπαρχόντων συστημάτων, δεν έχουν εντοπιστεί πλήρως συμβατές εναλλακτικές λύσεις. Οι πιο αξιοσημείωτες διαφορές βρέθηκαν στη μεταβολή του ρυθμού ροής μάζας ψυκτικού και στις μεταβολές στην ογκομετρική ικανότητα ψύξης, οι οποίες, υπό τις διαμορφωμένες συνθήκες, παραμένουν παρόμοιες (απόκλιση  $\pm 2\%$ ) ή μειώθηκαν (μείωση έως 26,8%) κατά τη χρήση νέων μιγμάτων. Όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, όλα τα νέα μείγματα έχουν ελαφρώς χαμηλότερη COP (μείωση έως 3,1%)

Τα R450A και R513A είναι βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις έναντι του R134a στο σύστημα ψύξης μικρής χωρητικότητας που αναλύθηκε. Από τις εναλλακτικές λύσεις, το R513A είναι ένα μείγμα αζεοτροπών που αποδείχθηκε ότι λειτουργεί με COP παρόμοιο με το R134a, και μπορεί να παρέχει υψηλότερη ικανότητα ψύξης. Ωστόσο, η χρήση του R513A θα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά υψηλότερη ροή μάζας ψυκτικού σε συνθήκες μετασκευής του συστήματος R134a. Επομένως, οι επιπτώσεις αυτής της αλλαγής θα πρέπει να εξεταστούν πριν από την αποδοχή του R513A ως εναλλακτικού στο R134a. Ωστόσο, το R450A αποδείχθηκε λιγότερο ενεργειακά αποδοτικό από το R134a και είχε χαμηλότερη ικανότητα ψύξης.

Το R404A είναι ψυκτικό που επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον κανονισμό για τα αέρια-F, καθώς χρησιμοποιείται συνήθως στην εμπορική ψύξη, αλλά σύντομα δεν θα επιτρέπεται να διατίθεται στην αγορά της ΕΕ, είτε για χρήση σε νέα συστήματα είτε για σέρβις. Αν και ο κανονισμός παρέχει μερικές εξαιρέσεις από αυτήν την απαίτηση, θέτει

κίνητρα για την ανάπτυξη εναλλακτικών ψυκτικών με GWP κάτω από 2.500 και με GWP κάτω από 150, προκειμένου να πληρούνται οι απαιτήσεις που θα τεθούν σε ισχύ από το 2020 και το 2022, αντίστοιχα. Η χρήση νέων εναλλακτικών μπορεί να είναι επωφελής λόγω της παρούσας διακύμανσης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων που θα μπορούσαν να προσφέρουν περιβαλλοντικά οφέλη και καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Ωστόσο, εάν αυτές οι εναλλακτικές λύσεις λαμβάνονται υπόψη για την ανακαίνιση υπαρχόντων συστημάτων, δεν έχουν εντοπιστεί πλήρως συμβατές εναλλακτικές λύσεις. Οι πιο αξιοσημείωτες διαφορές βρέθηκαν στην αύξηση της θερμοκρασίας συμπίεσης, στην αλλαγή της ροής μάζας ψυκτικού και στην ολίσθηση υψηλής θερμοκρασίας.

Στη μελέτη ενός έμμεσου εξοπλισμού σούπερ μάρκετ R404A με R449A, η ενεργειακή απόδοση (εκφραζόμενη σε COP) παρέμεινε συγκρίσιμη με εκείνη του R404A, αλλά η ικανότητα ψύξης μειώθηκε. Άλλες αξιοσημείωτες διαφορές παρατηρήθηκαν στην αύξηση της θερμοκρασίας ολίσθησης ατμών (+4,9 ° CR449A στα 0,1 MPa) που είχε ως αποτέλεσμα τη μειωμένη ροή μάζας ψυκτικού και την αύξηση της θερμοκρασίας εκφόρτισης του συμπιεστή, η οποία ήταν εντός των ορίων που έθεσε ο κατασκευαστής του συμπιεστή, αλλά θα μπορούσε να επιτύχει υψηλότερες τιμές εάν το R449A εφαρμόζεται σε συστήματα ψύξης χαμηλής θερμοκρασίας ή συστήματα στα οποία διατηρείται υψηλή υπερθέρμανση.

Το R410A είναι ένα ψυκτικό που επηρεάζεται από τον κανονισμό F-gas λόγω του υψηλού GWP του. Αν και έχει απαγορευτεί η χρήση του από το 2025 σε συστήματα κλιματισμού μεμονωμένου διαχωρισμού που περιέχουν λιγότερο από 3 kg φθοριούχων αερίων θερμοκηπίου, η διαθεσιμότητά του για συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος έχει ήδη αμφισβητηθεί ως συνέπεια της καθιερωμένης απαίτησης σταδιακής κατάργησης

HFC. Εναλλακτικές λύσεις για το R410A έχουν εντοπιστεί μόνο στο R32, το οποίο αποτελεί συστατικό του R410A, και επτά νέα μείγματα ψυκτικών. Η μόνη νέα μη εύφλεκτη εναλλακτική λύση R410A χαρακτηρίζεται από σημαντική ολίσθηση θερμοκρασίας και υψηλή GWP, και οι δύο είναι η υψηλότερη μεταξύ των νέων εναλλακτικών R410A. Σημειώθηκε αύξηση της θερμοκρασίας εκφόρτισης συμπίεσης για όλες τις εναλλακτικές λύσεις.

Συνολικά, νέα ψυκτικά κατάλληλα για χρήση στον τομέα RACHP διαμορφώθηκαν ως μείγματα, όπου η επιλογή συστατικών και οι αναλογίες ανάμειξης παρέχουν μεταβλητότητα στις ιδιότητές τους. Η μείωση του GWP αλλά η διατήρηση χαμηλής ή καθόλου αναφλεξιμότητας είναι μια τυπική τάση της τρέχουσας ανάπτυξης ψυκτικών μειγμάτων. Άλλες επιθυμητές ιδιότητες περιλαμβάνουν την αύξηση του Qvol και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Μια χαμηλή τιμή GWP ενός ψυκτικού μέσου συχνά δίνεται προτεραιότητα κατά την επιλογή ενός νέου ψυκτικού, καθώς συμβάλλει στην ικανοποίηση των απαιτήσεων που ορίζονται στον κανονισμό F-gas και πραγματοποιείται ανταλλαγή μεταξύ άλλων ιδιοτήτων ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση ενός ψυκτικού. Ενώ το GWP παρέχει μια εκτίμηση του άμεσου αντίκτυπου ενός ψυκτικού στην αλλαγή του κλίματος, οι στόχοι της Συμφωνίας του Παρισιού μπορούν να επιτευχθούν κατά την επιλογή ενός ψυκτικού που οδηγεί σε συνολικά χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ενός συστήματος RACHP.

### **Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα**

Δεδομένου ότι νέες εναλλακτικές λύσεις για το R410A με GWP κάτω από 1,494 είναι εύφλεκτα ψυκτικά, υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για μια μη εύφλεκτη εναλλακτική λύση



για το R410A με χαμηλότερο GWP. Το R13I1 που περιέχει ιώδιο έχει προταθεί πρόσφατα ως συστατικό ενός μη εύφλεκτου μίγματος με GWP κάτω από 700. Είναι επομένως ενδιαφέρον να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις της χρήσης πρόσφατα προτεινόμενων μιγμάτων.

Αρκετά νέα ψυκτικά είναι υγρά με μικρές πιθανές τιμές εξάντλησης του όζοντος. Αυτά εξετάζονται για χρήση σε συστήματα RACHP παρά το ODP τους. Απαιτείται περαιτέρω ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους για να διασφαλιστεί μακροπρόθεσμη ασφαλής για το περιβάλλον χρήση τέτοιων ψυκτικών.

Η έλλειψη αποτελεσματικών μεθόδων εκτίμησης των επιπτώσεων στο σύστημα ψύξης εμποδίζει την ανάπτυξη κατάλληλων πολιτικών που μπορούν να οδηγήσουν σε μετάβαση προς συστήματα RACHP φιλικά προς το περιβάλλον. Η μέτρηση LCCP μπορεί να αναπτυχθεί περαιτέρω για να διευκολύνει την αναγνώριση και τη λογιστική καταγραφή των συνολικών κλιματικών επιπτώσεων των συστημάτων RACHP. Προτείνεται ότι οι μέθοδοι και οι τεχνικές που έχουν ήδη αναπτυχθεί σε άλλους τομείς γνώσης, π.χ. LCA, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό.

Η ποσότητα των πρόσφατα εισαγόμενων ψυκτικών είναι σημαντική. Αναλύθηκε εκτενώς μόνο ένας περιορισμένος αριθμός ψυκτικών. Απαιτείται επομένως περαιτέρω ανάλυση, συμπεριλαμβανομένου μεγαλύτερου αριθμού πειραματικών μελετών. Οι προτεινόμενοι τομείς εστίασης για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις της μετατόπισης της θερμοκρασίας των νέων ψυκτικών, ζητήματα ασφάλειας, αξιολόγηση χημικής σταθερότητας και συμβατότητας υλικών, ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, περαιτέρω ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

## Βιβλιογραφία

- Abas, N., Kalair, A.R., Khan, N., Haider, A., Saleem, Z. and Saleem, M.S., 2018. Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, pp.557-569.
- Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J. and Bertsch, S.S., 2018. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy*, 152, pp.985-1010.
- Ciconkov, R., 2018. Refrigerants: There is still no vision for sustainable solutions. *International Journal of Refrigeration*, 86, pp.441-448.
- Domanski, P.A., Brignoli, R., Brown, J.S., Kazakov, A.F. and McLinden, M.O., 2017. Low-GWP refrigerants for medium and high-pressure applications. *International Journal of Refrigeration*, 84, pp.198-209.
- European Parliament, Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006 Text with EEA relevance, vol. 150. 2014.
- Gantz, C., 2015. *Refrigeration: a history*. McFarland.
- Guiot, J. and Cramer, W., 2016. Climate change: The 2015 Paris Agreement thresholds and Mediterranean basin ecosystems. *Science*, 354(6311), pp.465-468.

- Kasaeian, A., Hosseini, S.M., Sheikhpour, M., Mahian, O., Yan, W.M. and Wongwises, S., 2018. Applications of eco-friendly refrigerants and nanorefrigerants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, pp.91-99.
- McLinden, M.O. and Huber, M.L., 2020. (R) Evolution of refrigerants. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 65(9), pp.4176-4193.
- McLinden, M.O., Brown, J.S., Brignoli, R., Kazakov, A.F. and Domanski, P.A., 2017. Limited options for low-global-warming-potential refrigerants. *Nature Communications*, 8(1), pp.1-9.
- Miller, A., Becque, R., Hartley, B., Uwamaliya, A. and Fleming, P., 2018. Chilling prospects: providing sustainable cooling for all.
- Peters, T., 2018. A Cool World: Defining the energy conundrum of cooling for all. *Technical Report. Birmingham Energy Institute, The Institute for Global Innovation*.
- Qian, S., Nasuta, D., Rhoads, A., Wang, Y., Geng, Y., Hwang, Y., Radermacher, R. and Takeuchi, I., 2016. Not-in-kind cooling technologies: A quantitative comparison of refrigerants and system performance. *International journal of refrigeration*, 62, pp.177-192.