



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θερμότητας

Θερμοδυναμική και Εξεργειακή Ανάλυση Κύκλων Απορρόφησης

Διπλωματική Εργασία

Γιαννόπουλος Μπάλος Κωνσταντίνος

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Κορωνάκη Ειρήνη, Επίκουρος Καθηγήτρια, ΕΜΠ

Αθήνα, 2018

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με στήριξαν και με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της ενασχόλησης μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια κυρία Ειρήνη Κορωνάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και τη βοήθεια που παρείχε όποτε τη χρειάστηκα.

Ακόμα, είμαι ευγνώμων για την υποστήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν οι φίλοι και οι συμφοιτητές μου κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου οι οποίοι είναι πάντα δίπλα μου και με στηρίζουν με κάθε δυνατό τρόπο.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα Εικόνων.....	1
Περιεχόμενα Πινάκων.....	2
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων	2
Περίληψη.....	4
Abstract	5
Κατάλογος Συμβόλων.....	6
Κύρια σύμβολα.....	6
Δείκτες.....	6
Κεφάλαιο 1: Ενεργειακό πρόβλημα.....	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Το φαινόμενο του Θερμοκηπίου και η κλιματική αλλαγή.....	8
1.3 Η Κλιματική Αλλαγή	11
1.4 Τα Αίτια της Κλιματικής Αλλαγής	11
1.5 Οι Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής	13
1.6 Η Καταπολέμηση της Κλιματικής Αλλαγής	14
Κεφάλαιο 2: Ψύξη με Απορρόφηση.....	15
2.1 Εισαγωγή	15
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	15
2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΣΤΙΣ ΜΕΡΕΣ ΜΑΣ.....	16
2.4 Αρχή Λειτουργίας	18
2.5 Απόδοση Απορροφητή ενός Ψύκτη Απορρόφησης με Εργαζόμενο Μέσο H ₂ O/LiBr ..	19
2.6 Ψύκτες Απορρόφησης Άμεσης - Έμμεσης Θέρμανσης (Direct-Indirect Fired Absorption Chillers).....	21
2.6.1 Άμεσης Θέρμανσης (Gas Fired Absorption Chillers) :	21
2.6.2 Έμμεσης Θέρμανσης (Steam / Hot Water Fired Absorption Chillers) :	22
2.7 Κρυσταλλοποίηση	23
2.8 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Ψύξης με Απορρόφηση	24
2.8.1 Πλεονεκτήματα	24
2.8.2 Μειονεκτήματα:	25
2.9 Σύγκριση: Συστήματα Ψύξης με Απορρόφηση – Συστήματα Ψύξης με Συμπύεση.....	25
2.9.1 Διαφορές:	25
2.9.2 Ομοιότητες:	26
2.10 Διαφορετικοί Κύκλοι Ψύξης με Απορρόφηση	26
2.10.1 Μονοβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση:	26
2.10.2 Πολυβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση:	27

2.10.3 Σύστημα ψύξης με απορρόφηση με GAX:	30
2.10.4 Κύκλος ψύξης με απορρόφηση που χρησιμοποιεί ανάκτηση θερμότητας από τον απορροφητή.....	31
2.10.5 Κύκλος ψύξης με απορρόφηση μισού σταδίου	31
2.10.6 Συνδυασμένος κύκλος απορρόφησης - συμπίεσης ατμού	32
2.10.7 Σύστημα ψύξης με απορρόφηση διπλού κύκλου	34
2.10.8 Συνδυασμένος κύκλος ψύξης ψεκαστήρα – απορρόφησης.....	35
2.10.9 Κύκλος απορρόφησης με οσμωτική μεμβράνη	38
2.10.10 Σύστημα απορρόφησης αυτόνομης κυκλοφορίας με χρήση H ₂ O/ LiBr.....	39
2.10.11 Ψυκτικό Σύστημα Διάχυσης-Απορρόφησης (DAR)	40
Κεφάλαιο 3: Εργαζόμενα Μέσα	42
3.1 Εισαγωγή	42
3.2 Κύρια και Δευτερεύοντα Ψυκτικά Μέσα	42
3.3 Κριτήρια Επιλογής Εργαζόμενου Μέσου	43
3.3.1 Θερμοδυναμικές και Θερμοφυσικές Ιδιότητες.....	43
3.3.2 Περιβαλλοντικές Ιδιότητες και Ιδιότητες Ασφάλειας	45
3.3.3 Οικονομικά Χαρακτηριστικά	46
Κεφάλαιο 4: Εξέργεια.....	47
4.1 Εισαγωγή στην Εξέργεια	47
4.2 Ορισμός της Έννοιας της Εξέργειας	47
4.3 Εξέργεια, Ύλη και Ποιότητα.....	49
4.4 Θερμοδυναμική Προσέγγιση της Εξέργειας	51
4.5 Φορείς Εξέργειας	55
4.6 Διαφορές Ανάμεσα στην Περιγραφή της Εξέργειας και της Ενέργειας.....	57
4.7 Εξεργειακή Ανάλυση	59
4.8 Χημική Εξέργεια	60
4.9 Φυσική Εξέργεια	61
4.10 Εξέργεια Ανάμιξης.....	61
4.11 Ο Εξεργειακός Ισολογισμός.....	62
4.12 Η Έννοια της Αποδοτικότητας.....	62
Κεφάλαιο 5: Ανάλυση Κύκλων Απορρόφησης.....	65
5.1 Μαθηματικό Μοντέλο (Βασικές Εξισώσεις)	65
5.1.1 Διατήρηση Μάζας	65
5.1.2 Ενεργειακή Ανάλυση (1 ^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος).....	65
5.1.3 Εξεργειακή Ανάλυση (1 ^{ος} και 2 ^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος).....	65
5.2 Θερμοδυναμικές Ιδιότητες Εργαζόμενων Μέσων	66

5.2.1 H ₂ O/LiBr	66
5.2.2 NH ₃ /H ₂ O	69
5.2.3 NH ₃ /LiNO ₃	70
5.2.4 NH ₃ /NaSCN	71
5.3 Θερμοδυναμική και Εξεργειακή Ανάλυση	72
5.3.1 Μονοβάθμιος Κύκλος.....	72
5.3.1.1 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του μονοβάθμιου κύκλου.....	73
5.3.1.2 Παραδοχές και υποθέσεις κατά την μοντελοποίηση του συστήματος.....	74
5.3.1.3 Αποτελέσματα ανάλυσης μονοβάθμιου κύκλου για διαφορετικά εργαζόμενα μέσα.....	74
5.3.1.4 Συμπεράσματα	77
5.3.2 Διβάθμιος Κύκλος.....	78
5.3.2.1 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του διβάθμιου κύκλου.....	79
5.3.2.2 Παραδοχές και υποθέσεις κατά την μοντελοποίηση του συστήματος.....	81
5.3.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης διβάθμιου κύκλου για διαφορετικά εργαζόμενα μέσα.....	81
5.3.2.4 Συμπεράσματα	84
5.3.3 Κύκλος GAX (Generator Absorber Heat Exchanger):	85
5.3.3.1 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του κύκλου GAX.....	86
5.3.3.2 Παραδοχές και υποθέσεις κατά την μοντελοποίηση του συστήματος.....	88
5.3.3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου GAX για διαφορετικά εργαζόμενα μέσα ..	88
5.3.3.4 Συμπεράσματα	92
5.3.4 Κύκλος HGAX (Hybrid Generator Absorber Heat Exchanger):	92
5.3.4.1 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του κύκλου HGAX.....	93
5.3.4.2 Παραδοχές και υποθέσεις κατά την μοντελοποίηση του συστήματος.....	95
5.3.4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου HGAX για διαφορετικά εργαζόμενα μέσα	95
5.3.4.4 Συμπεράσματα	99
5.4 Σύγκριση των κύκλων απορρόφησης ανά εργαζόμενο μέσο	100
5.4.1 NH ₃ /H ₂ O	100
5.4.2 NH ₃ /LiNO ₃	102
5.4.3 NH ₃ /NaSCN:	104
5.4.4 H ₂ O/ LiBr	106
5.4.5 Συμπεράσματα	107
Βιβλιογραφία	108

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1 Αύξηση του πληθυσμού της γης συναρτήσει του χρόνου.	7
Εικόνα 2 Αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας σε συνάρτηση με το χρόνο.	8
Εικόνα 3 Λειτουργία του Φαινομένου του Θερμοκηπίου.	9
Εικόνα 4 Λειτουργία του Φαινομένου του Θερμοκηπίου.	10
Εικόνα 5 Συμμετοχή των ανθρωπογενών ρύπων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.	10
Εικόνα 6 Στοιχεία της Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας για την εξέλιξη των εκπομπών αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.	12
Εικόνα 7 Σχηματικό διάγραμμα ψύκτη απορρόφησης με εργαζόμενο μέσο H ₂ O/LiBr.	17
Εικόνα 8 (a) Στο δεξί δοχείο λαμβάνει χώρα η διαδικασία της απορρόφησης προκαλώντας το φαινόμενο της ψύξης στο αριστερό. (b) Στο δεξί δοχείο λαμβάνει χώρα η διαδικασία διαχωρισμού του ψυκτικού μέσου ως αποτέλεσμα της θερμότητας που τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή.	18
Εικόνα 9 Κύκλος ψύξης με απορρόφηση, που αποτελείται από δύο διαδικασίες όπως παρουσιάστηκαν νωρίτερα.	19
Εικόνα 10 Ψύκτης άμεσης θέρμανσης.	22
Εικόνα 11 Αναπαράσταση της γραμμής κρυσταλλοποίησης στον Ψυχομετρικό Χάρτη.	23
Εικόνα 12 Πιθανό σημείο κρυσταλλοποίησης σε ψύκτη απορρόφησης.	24
Εικόνα 13 Μονοβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση που λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο H ₂ O/LiBr και περιλαμβάνει εναλλάκτη θερμότητας διαλύματος που βοηθά στη μείωση εισροής θερμότητας στον αναγεννητή.	26
Εικόνα 14 Διβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση που λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο H ₂ O/LiBr. Η θερμότητα, που αποβάλλεται από τη συμπύκνωση του ατμού του ψυκτικού μέσου, χρησιμοποιείται ως θερμότητα τροφοδοσίας στον αναγεννητή II. Αυτός ο κύκλος λειτουργεί σε τρία διαφορετικά επίπεδα πίεσης, την υψηλή, τη μέτρια και τη χαμηλή.	28
Εικόνα 15 Διβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση που λειτουργεί σε δύο επίπεδα πίεσης. Η θερμότητα απορρόφησης από τον απορροφητή II τροφοδοτεί τον αναγεννητή I για τη διαδικασία διαχωρισμού του ψυκτικού μέσου.	29
Εικόνα 16 Διβάθμιος κύκλος ψύξης με απορρόφηση H ₂ O/LiBr. Η θερμότητα που απελευθερώνεται από τη συμπύκνωση του ατμού του ψυκτικού μέσου χρησιμοποιείται σαν θερμότητα τροφοδοσίας στον δεύτερο αναγεννητή.	29
Εικόνα 17 Σύστημα ψύξης με απορρόφηση με GAX. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το δευτερεύον υγρό που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας από το τμήμα υψηλής θερμοκρασίας του απορροφητή στο τμήμα χαμηλής θερμοκρασίας του αναγεννητή.	30
Εικόνα 18 Ο κύκλος με ανάκτηση θερμότητας από τον απορροφητή χρησιμοποιεί θερμότητα από τον απορροφητή για να προθερμάνει το ρεύμα που κινείται από τον απορροφητή προς τον αναγεννητή.	31
Εικόνα 19 Ο κύκλος ψύξης με απορρόφηση μισού σταδίου είναι συνδυασμός δύο μονοβάθμιων κύκλων ψύξης με απορρόφηση που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα πίεσης.	32
Εικόνα 20 Συνδυασμένος κύκλος απορρόφησης-συμπίεσης ατμού.	33
Εικόνα 21 Διβάθμιος κύκλος απορρόφησης- συμπίεσης που λειτουργεί σαν αντλία θερμότητας. Η θερμότητα απορρόφησης στο πρώτο στάδιο θα τροφοδοτηθεί στο δεύτερο στάδιο για το διαχωρισμό του ψυκτικού μέσου.	33
Εικόνα 22 Ο συνδυασμένος κύκλος που προτάθηκε από τον Cacciola και περιλαμβάνει δύο συνδυασμούς εργαζόμενων μέσων. Το rectifier απουσιάζει και η μέγιστη πίεση έχει μειωθεί.	34
Εικόνα 23 Διπλός κύκλος απορρόφησης που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια και χρειάζεται δύο διαφορετικά εργαζόμενα μέσα όπως NH ₃ /H ₂ O και H ₂ O /LiBr. Η θερμότητα από την απορρόφηση και τη συμπύκνωση από τον κύκλο NH ₃ /H ₂ O παρέχονται στον αναγεννητή του κύκλου H ₂ O/LiBr.	35
Εικόνα 24 Τροποποιημένος συνδυασμένος κύκλος ψύξης ψεκαστήρα-απορρόφησης που δεν περιλαμβάνει συμπυκνωτή.	36
Εικόνα 25 Συνδυασμένο σύστημα ψεκαστήρα/απορρόφησης που χρησιμοποιεί DMETEG/R22 και DMETEG/R21 ως εργαζόμενα ρευστά. Το πλούσιο διάλυμα από τη γεννήτρια λειτουργεί ως πρωτεύον ρευστό και ο ψυκτικός ατμός από τον ατμοποιητή ως δευτερεύον ρευστό.	36
Εικόνα 26 Συνδυασμένος κύκλος ψεκαστήρα/απορρόφησης που προτάθηκε από τους Arhorrnratana and Eames. Υψηλής πίεσης ψυκτικός υδρατμός από τον αναγεννητή εισέρχεται στον ψεκαστήρα ως κινούν ρευστό για να μεταφέρει τον ψυκτικό υδρατμό από τον ατμοποιητή.	37
Εικόνα 27 Συνδυασμένος κύκλος που προτάθηκε από τους Eames και Wu. Η υψηλότερη θερμοκρασία κυκλώματος διαλύματος διατηρείται περίπου στους 80°C και, ως εκ τούτου, περιορίζεται το πρόβλημα της διάβρωσης.	38

Εικόνα 28 Ο κύκλος απορρόφησης με οσμωτική μεμβράνη απαιτεί θερμότητα για το διαχωρισμό του ψυκτικού μέσου και την παραγωγή διαφοράς πίεσης εντός του συστήματος.	38
Εικόνα 29 Στο σχήμα φαίνεται η αντλία φυσαλίδας σε ένα μοντέλο αναγεννητή. Η πρόσδοση θερμότητας στον αναγεννητή χρησιμοποιείται και για την κυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου και για την ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου.....	40
Εικόνα 30 Σχηματικό διάγραμμα ψύκτη απορρόφησης διάχυσης (DAR). Αυτή η διάταξη έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως οικιακό ψυγείο καθώς δεν χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία του. NH ₃ / H ₂ O βοηθητικό αέριο προσδίδεται στη μηχανή ως εργαζόμενο μέσο.	41
Εικόνα 31 Ροή ενέργειας ή ύλης σε ένα σύστημα.	50
Εικόνα 32 Αλληλεπίδραση ενός συστήματος με το περιβάλλον του.	52
Εικόνα 33 Δύο συστήματα και το περιβάλλον.....	54
Εικόνα 34 Ροές εξέργειας και ενέργειας σε σταθμό ηλεκτροπαραγωγής.	58
Εικόνα 35 Ροές εξέργειας για διαφορετικά καύσιμα και συστήματα.	63
Εικόνα 36 Σχηματικό διάγραμμα του μονοβάθμιου συστήματος ψύξης με απορρόφηση.....	73
Εικόνα 37 Σχηματικό διάγραμμα του διβάθμιου συστήματος ψύξης με απορρόφηση.....	79
Εικόνα 38 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ψύξης με απορρόφηση με GAX.	86
Εικόνα 39 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ψύξης με συμπίεση-απορρόφηση με GAX.	93

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1 Δυναμικά που χρησιμοποιούνται στη θερμοδυναμική.....	54
Πίνακας 2 Περιεχόμενο σε εξέργεια για διάφορες μορφές ενέργειας.	55
Πίνακας 3 Περιεχόμενο σε εξέργεια διαφόρων υλικών.	56
Πίνακας 4 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.1.1.	66
Πίνακας 5 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.1.2.	67
Πίνακας 6 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.1.3.	67
Πίνακας 7 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.1.4.	68
Πίνακας 8 Συντελεστές των εξισώσεων 5.2.1.6.	68
Πίνακας 9 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.2.2.	69
Πίνακας 10 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.2.4.	70
Πίνακας 11 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του μονοβάθμιου κύκλου.....	73
Πίνακας 12 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του διβάθμιου κύκλου.....	79
Πίνακας 13 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του κύκλου GAX.....	86
Πίνακας 14 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του κύκλου HGAX.	93

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	75
Διάγραμμα 2 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	75
Διάγραμμα 3 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	76
Διάγραμμα 4 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	76
Διάγραμμα 5 Μεταφορά θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	77
Διάγραμμα 6 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	82
Διάγραμμα 7 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	82
Διάγραμμα 8 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	83
Διάγραμμα 9 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	83
Διάγραμμα 10 Μεταφορά θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	84
Διάγραμμα 11 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	89
Διάγραμμα 12 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	89
Διάγραμμα 13 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	90
Διάγραμμα 14 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	90
Διάγραμμα 15 Μεταφορά θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	91
Διάγραμμα 16 Διαθέσιμη θερμότητα του απορροφητή (Q _{available}), θερμότητα που απαιτείται από τον desorber (Q _{required}) και θερμότητα τροφοδοσίας στον αναγεννητή (Q _{g_in}) συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	91
Διάγραμμα 17 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	96

Διάγραμμα 18 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	96
Διάγραμμα 19 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	97
Διάγραμμα 20 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	97
Διάγραμμα 21 Μεταφορά θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	98
Διάγραμμα 22 Διαθέσιμη θερμότητα του απορροφητή ($Q_{available}$), θερμότητα που απαιτείται από τον desorber ($Q_{required}$) και θερμότητα τροφοδοσίας στον αναγεννητή (Q_{g_in}) συναρτήσει της θερμότητας του αναγεννητή.	98
Διάγραμμα 23 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	100
Διάγραμμα 24 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	100
Διάγραμμα 25 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	101
Διάγραμμα 26 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	101
Διάγραμμα 27 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	102
Διάγραμμα 28 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	102
Διάγραμμα 29 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	103
Διάγραμμα 30 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	103
Διάγραμμα 31 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	104
Διάγραμμα 32 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	104
Διάγραμμα 33 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	105
Διάγραμμα 34 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	105
Διάγραμμα 35 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	106
Διάγραμμα 36 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	106
Διάγραμμα 37 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	107
Διάγραμμα 38 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.	107

Περίληψη

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η θερμοδυναμική και εξεργειακή ανάλυση διαφορετικών κύκλων απορρόφησης, χρησιμοποιώντας διαφορετικά εργαζόμενα μέσα, και η μεταξύ τους σύγκριση. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία πρόκειται να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης τεσσάρων κύκλων απορρόφησης, του μονοβάθμιου, του διβάθμιου, του κύκλου απορρόφησης με σύστημα GAX και του κύκλου απορρόφησης-συμπίεσης με σύστημα GAX. Η ανάλυση κάθε κύκλου έχει γίνει με εργαζόμενα μέσα τα $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$, NH_3/NaSCN και $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, εκτός από τους κύκλους με σύστημα GAX στους οποίους δε χρησιμοποιήθηκε ως εργαζόμενο μέσο το $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην κλιματική αλλαγή. Ειδικότερα, το μείζον αυτό πρόβλημα καταδεικνύει την ανάγκη για περιορισμό της καταστροφής του περιβάλλοντος εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας. Οι εναλλακτικοί τρόποι ψύξης, λοιπόν, μπορούν να αποτελέσουν μέρος της λύσης του προβλήματος.

Έτσι, στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των συστημάτων ψύξης με απορρόφηση. Οι κύκλοι αυτοί χρησιμοποιούν θερμότητα αντί για ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσουν. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, γίνεται σύγκριση με τους συμβατικούς κύκλους συμπίεσης ατμού και, τέλος, γίνεται αναφορά σε διάφορα συστήματα ψύξης με απορρόφηση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα εργαζόμενα μέσα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα ψύξης με απορρόφηση. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται τα κριτήρια που πρέπει να πληροί ένα εργαζόμενο μέσο, ώστε να μπορεί χρησιμοποιηθεί. Τέλος, περιγράφονται αναλυτικά τα κριτήρια δίνοντας έμφαση στην περιβαλλοντική πλευρά τους.

Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής αναφορά στην έννοια της εξέργειας στο κεφάλαιο 4. Αρχικά, παρουσιάζεται ο ορισμός και η φυσική ερμηνεία της εξέργειας και στη συνέχεια προσεγγίζεται με όρους θερμοδυναμικής. Τέλος, επισημαίνονται οι διαφορές μεταξύ της εξέργειας και της ενέργειας και παρουσιάζεται ο επιμερισμός της εξέργειας στις επιμέρους συνιστώσες της.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση των συστημάτων που μελετήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο και οι ιδιότητες των εργαζόμενων μέσων που χρησιμοποιήθηκαν και στη συνέχεια, για κάθε σύστημα που μελετήθηκε, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Τέλος, τα διαφορετικά συστήματα ψύξης που μελετήθηκαν συγκρίνονται για ίδιο εργαζόμενο μέσο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Abstract

The subject of this diploma thesis is the thermodynamic and exergy analysis of different absorption cycles, using different working fluids, and the comparison between them. More specifically, in the present thesis are presented the results of the analysis of four absorption cycles, one-stage, two-stage, GAX-absorption cycle and GAX-absorption-compression cycle. The analysis of each cycle has been done with working fluids $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$, NH_3/NaSCN and $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, except for GAX system cycles where $\text{H}_2\text{O} / \text{LiBr}$ was not as a working fluid.

The first chapter refers to the greenhouse effect and the climate change. In particular, this major problem demonstrates the need to limit the destruction of the environment due to human activity. Therefore, alternative cooling can be part of the problem's solution.

Thus, in the second chapter, are described the characteristics of the absorption cooling systems. These circles use heat instead of electricity in order to operate. In more detail, their advantages and disadvantages are presented, the absorption cycles are being compared with conventional steam compression cycles, and, finally, reference is made to various absorption cooling systems.

Then, there is an extensive reference to the concept of exergy in Chapter 4. Initially, the definition and the physical interpretation of the exergy are presented, and then exergy is approached in terms of thermodynamics. Finally, the differences between energy and exergy are highlighted and the division of the exertion into the individual components is presented.

The fifth and final chapter presents the energy and exergy analysis of the systems studied. More specifically, the mathematical model and the properties of the working fluids used are described, and then, for each system, the results are presented and the corresponding conclusions are drawn. Finally, the different cooling systems studied were compared for the same working fluid, the results are presented and the corresponding conclusions are drawn.

Κατάλογος Συμβόλων

Κύρια σύμβολα

COP: συντελεστής συμπεριφοράς

Q: ροή θερμότητας (kW)

W: μηχανικό έργο (kW)

m: παροχή μάζας (kg/s)

E: εξέργεια (kW)

E_d: καταστροφή εξέργειας (kW)

e_x: ειδική εξέργεια (kJ/kg)

η_{ex}: εξεργειακός βαθμός απόδοσης

p: πίεση (Pa)

T: θερμοκρασία (°C)

h: ενθαλπία (kJ/kg)

s: εντροπία (kJ/kgK)

ρ: πυκνότητα (kg/m³)

x: κλάσμα μάζας (%)

D_x: βαθμός απαερίωσης

Δείκτες

a: απορροφητής

g: αναγεννητής

e: ατμοποιητής

c: συμπυκνωτής

p: αντλία

O: τιμή αναφοράς

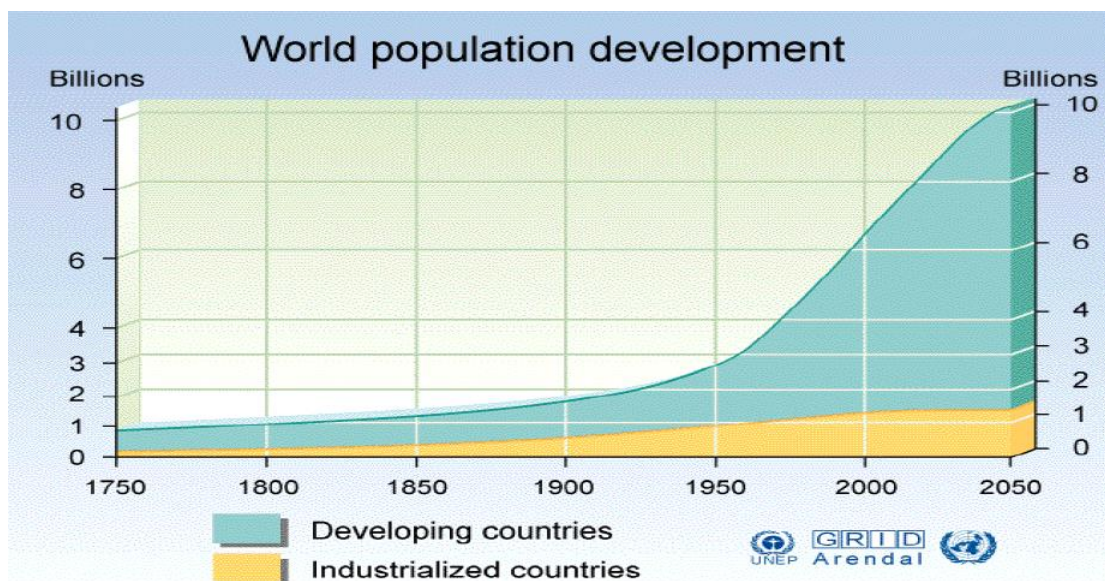
Κεφάλαιο 1: Ενεργειακό πρόβλημα

1.1 Εισαγωγή

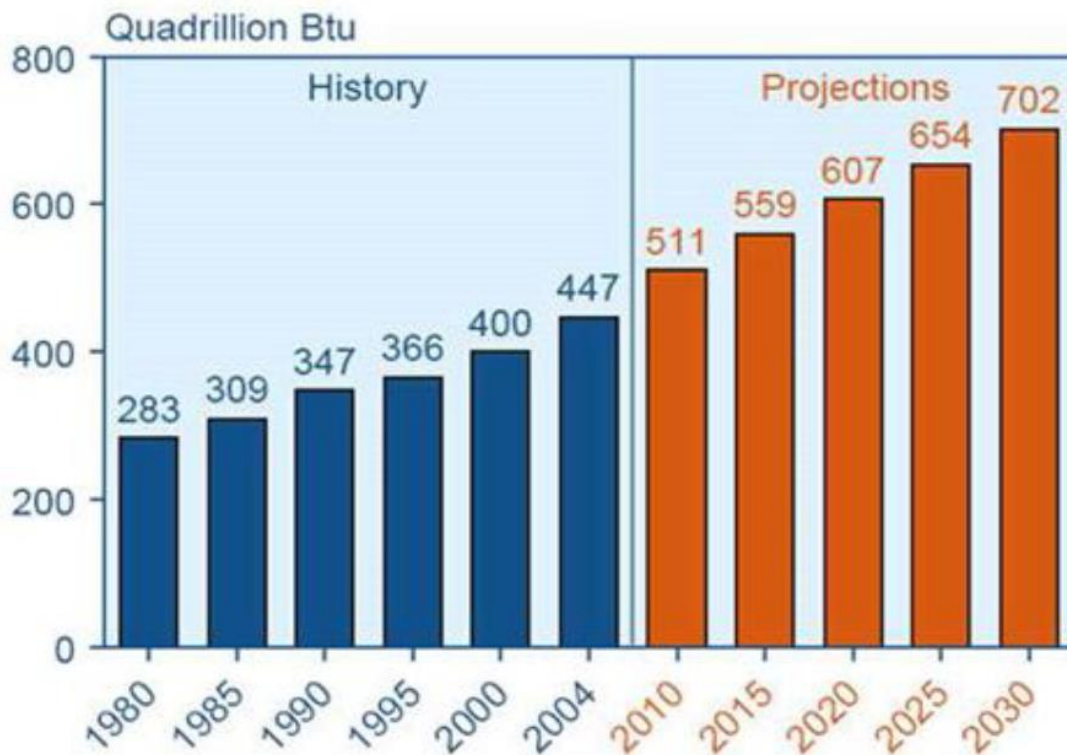
Το ενεργειακό πρόβλημα στις μέρες μας , δηλαδή η συσχέτιση των ενεργειακών αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων που διαρκώς μειώνονται, με τις απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας που διαρκώς αυξάνονται , εμφανίζεται οξύτερο από ποτέ. Η σημασία της αύξησης της ενέργειας, που καταναλώνεται, γίνεται εύκολα αντιληπτή αν αναλογιστούμε το πλήθος των ηλεκτρικών συσκευών που χρησιμοποιεί μία μέση οικογένεια, σήμερα, σε σχέση με τις συσκευές που χρησιμοποιούσε μία μέση οικογένεια πριν 50 χρόνια ή τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων αυτοκινήτων σήμερα σε σχέση με τότε. Στο ίδιο συμπέρασμα θα καταλήξουμε αν παρατηρήσουμε τις ενεργοβόρες εγκαταστάσεις ενός σύγχρονου κτιρίου (πχ νοσοκομείου με κεντρική εγκατάσταση κλιματισμού, δίκτυο υπολογιστών, ιατρικό εξοπλισμό) και τις συγκρίνουμε με ένα ανάλογο κτίριο που κατασκευάστηκε πριν μερικές δεκαετίες.

Το ενεργειακό πρόβλημα ήταν πάντα στην επικαιρότητα τις τελευταίες δεκαετίες και πολλές φορές υπήρξε το αίτιο για μεγάλες στρατιωτικο-πολιτικο-οικονομικές ανακατατάξεις στον παγκόσμιο χάρτη. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα και με δεδομένο ότι κάποιοι από τους φυσικούς πόρους είναι πεπερασμένοι (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) ο ανταγωνισμός για τον έλεγχο της αγοράς ενέργειας έχει γίνει ακόμα πιο έντονος.

Είναι προφανές ότι όσο αυξάνεται ο πληθυσμός της τόσο περισσότερη ενέργεια θα καταναλώνεται. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει τεράστια αύξηση στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, κάτι που είναι αποτέλεσμα της προσπάθειας των αναπτυσσόμενων χωρών να εγκαταστήσουν περισσότερη ισχύ, ώστε να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες. Παρ' όλ' αυτά, η παραγωγή ισχύος θα πρέπει να συνδυαστεί με λύσεις βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον.



Εικόνα 1 Αύξηση του πληθυσμού της γης συναρτήσει του χρόνου.



Εικόνα 2 Αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας σε συνάρτηση με το χρόνο.

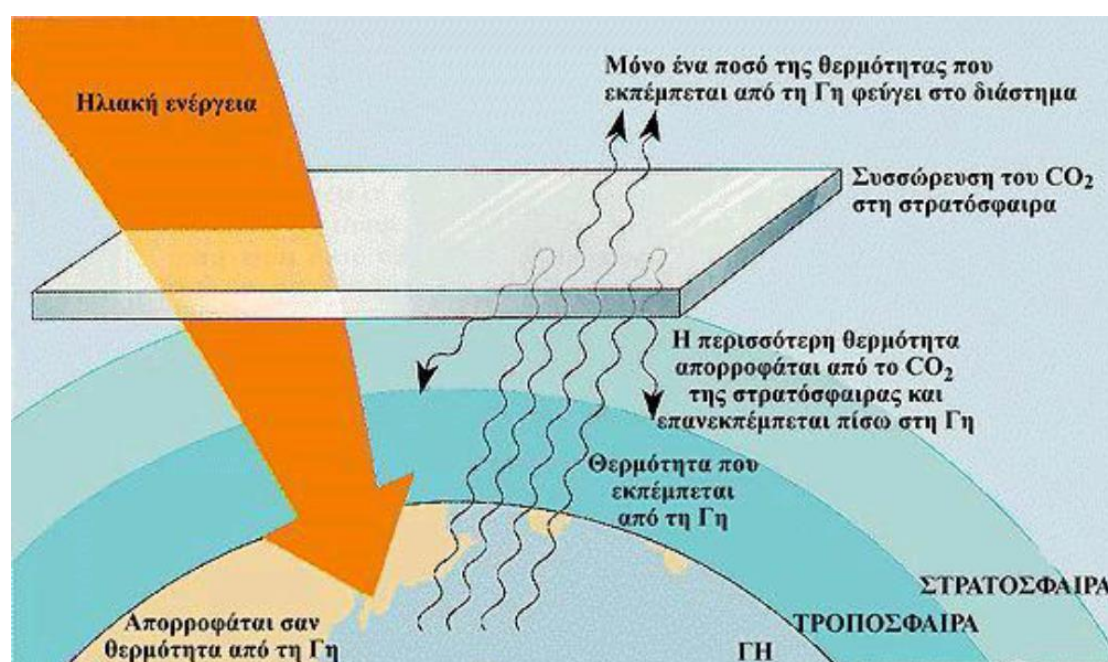
Σημείωση: 1 quadrillion BTU = $1,05505 \times 10^{18}$ Joules

1.2 Το φαινόμενο του Θερμοκηπίου και η κλιματική αλλαγή

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια φυσική διαδικασία η οποία είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της γης σε επίπεδα κατάλληλα για τη ζωή και την ανάπτυξη. Χωρίς αυτό, η γη θα ήταν ένα αφιλόξενο περιβάλλον, ακατάλληλο για την ανάπτυξη ζωής με θερμοκρασία γύρω στους -18°C . Αντιθέτως, χάρη στο φαινόμενο αυτό, η μέση θερμοκρασία της γης διατηρείται περίπου στους 15°C .

Η Γη δέχεται μεγάλα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας. Στην απορρόφηση της ακτινοβολίας παίζει σημαντικό ρόλο ένα στρώμα από αέρια, τα λεγόμενα αέρια του θερμοκηπίου (αυτά περιλαμβάνουν υδρατμούς, διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, χλωροφθοράνθρακες (CFCs) κλπ). Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από το έδαφος και την ατμόσφαιρα, ενώ το υπόλοιπο διαφεύγει στο διάστημα. Κατά την είσοδο της, η ακτινοβολία, περνά αναλλοίωτη στην ατμόσφαιρα, φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους και ακτινοβολείται προς τα πάνω με μεγαλύτερο μήκος κύματος. Ένα μέρος αυτής απορροφάται εκ νέου από την ατμόσφαιρα, τη θερμαίνει και επανεκπέμπεται στην επιφάνεια του εδάφους. Το στρώμα των αερίων, λοιπόν, επιτρέπει τη διέλευση της ακτινοβολίας, αλλά ταυτόχρονα την εγκλωβίζει, μοιάζει δηλαδή με τη λειτουργία ενός θερμοκηπίου και γι' αυτό το λόγο ο Γάλλος μαθηματικός Fourier έδωσε στη διαδικασία αυτή τον ορισμό «Φαινόμενο Θερμοκηπίου» το 1822.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου αποτελεί μια φυσική διεργασία που εξασφαλίζει στη Γη μια σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους γύρω στους 15 °C. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, η έννοια “Φαινόμενο του Θερμοκηπίου” δεν αναφέρεται στη φυσική διεργασία, αλλά στην έξαρση αυτής, λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η καύση ορυκτών καυσίμων έχει οδηγήσει στην αύξηση του ποσού του διοξειδίου του άνθρακα, αλλά και άλλων αερίων όπως το μεθάνιο και οξείδια του αζώτου, που εκλύονται στην ατμόσφαιρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την πρόκληση ανισορροπίας στο σύνθετο αυτό σύστημα, προξενώντας την παγκόσμια άνοδο της θερμοκρασίας.[1]



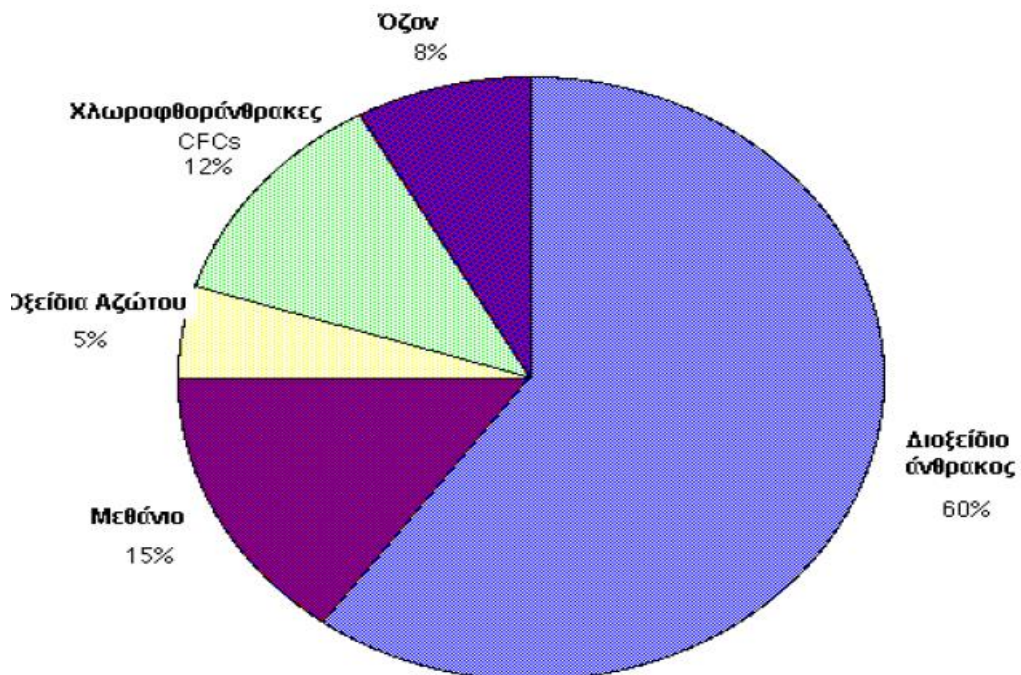
Εικόνα 3 Λειτουργία του Φαινομένου του Θερμοκηπίου.

Τα τελευταία χρόνια, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανίες, αυτοκίνητα κ.ά.) έχουν αυξήσει σημαντικά τις συγκεντρώσεις των αερίων των κατώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας (αέρια θερμοκηπίου) με αποτέλεσμα την αύξηση της απορροφούμενης ακτινοβολίας και την επακόλουθη θερμοκρασιακή μεταβολή. Υπολογίζεται ότι η μέση θερμοκρασία της Γης έχει αυξηθεί κατά 0,5 με 0,6 °C από το 1880, λόγω της έξαρσης του φαινομένου και μέχρι το έτος 2100, εάν δεν ληφθούν μέτρα, η αύξηση της θερμοκρασίας θα είναι από 1,5 έως 4,5 °C. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες όχι μόνο εκπέμπουν υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, αλλά βλάπτουν και την ικανότητα της γης να απορροφά το διοξείδιο του άνθρακα και να το ενσωματώνει στους φυσικούς κύκλους ροής ενέργειας και ύλης, με την καταστροφή των δασών και του φυτοπλαγκτού των ωκεανών. [2]



Εικόνα 4 Λειτουργία του Φαινομένου του Θερμοκηπίου.

ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ



Εικόνα 5 Συμμετοχή των ανθρωπογενών ρύπων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

1.3 Η Κλιματική Αλλαγή

Οι κλιματικές συνθήκες στη Γη καθορίζονται από μια συνεχή ροή ενέργειας από τον ήλιο. Η θερμική ενέργεια του ήλιου, διαπερνά την ατμόσφαιρα της Γης και θερμαίνει την επιφάνεια της. Όσο αυξάνει η θερμοκρασία της επιφάνειας, η Γη στέλνει, υπό τη μορφή υπερυθρης ακτινοβολίας, θερμική ενέργεια πίσω στην ατμόσφαιρα. Ένα μέρος αυτής της ενέργειας απορροφάται από αέρια (τα λεγόμενα 'αέρια του θερμοκηπίου'), όπως το διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου και υδρατμοί, παγιδεύοντας έτσι την ενέργεια και διατηρώντας τη μέση θερμοκρασία της Γης στους περίπου 15°C. Αυτά τα επίπεδα θερμοκρασίας είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της ζωής για ανθρώπους, φυτά και ζώα. Δίχως αυτά τα αέρια, η θερμοκρασία της Γης θα έφτανε στους -18°C, 'παγώνοντας' τις περισσότερες μορφές ζωής.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι το πιο σημαντικό από τα αέρια που διατηρούν τα επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας στη Γη. Οι διεργασίες εκπομπής και απορρόφησης CO₂ που προκύπτουν στη φύση αποτελούν τον φυσικό κύκλο του αερίου και είναι υπεύθυνες για τη διατήρηση της ισορροπημένης συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα. Μέσω της αποσύνθεσης φυτών, ηφαιστειακών εκρήξεων, της αναπνοής ζωικών οργανισμών, ελευθερώνεται CO₂ στην ατμόσφαιρα το οποίο απορροφάται εκ νέου μέσω της φωτοσύνθεσης και της διάλυσης του στο νερό (π.χ. στους ωκεανούς).

Η φύση έχει προνοήσει για την σχεδόν τέλεια διατήρηση της ισορροπίας εκπεμπόμενου CO₂ και της αντίστοιχης ποσότητας που απορροφάται. Ακόμα, όμως, και μικρές αλλαγές οφειλόμενες σε ανθρώπινες δραστηριότητες είναι δυνατό να επηρεάσουν αυτήν την εύθραυστη ισορροπία.[3],[4]

1.4 Τα Αίτια της Κλιματικής Αλλαγής

Η αιτία της κλιματικής αλλαγής είναι η υπερβολική χρήση ορυκτών πόρων, όπως είναι ο άνθρακας και ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, η καύση των οποίων απελευθερώνει τεράστιες ποσότητες CO₂ στην ατμόσφαιρα. Με αυτό τον τρόπο η 'κουβέρτα' των αερίων του θερμοκηπίου που καλύπτει τη Γη συγκρατεί ολόένα και περισσότερη ενέργεια η οποία, με τη σειρά της, αυξάνει την μέση θερμοκρασία του πλανήτη.

Η ανθρώπινη παρέμβαση στον φυσικό κύκλο του CO₂ τα τελευταία 150 χρόνια έχει υπάρξει καθοριστική. Η απερίσκεπτη καύση ορυκτών καυσίμων αλλά και οι κτηνοτροφικές δραστηριότητες που συμβάλουν στην εκπομπή μεθανίου, σε συνδυασμό με την αποψίλωση των δασών τα οποία απορροφούν τα αέρια του θερμοκηπίου, έχουν διαταράξει ανεπανόρθωτα τις ισορροπίες στον κύκλο του CO₂.

Η μεγάλη ποσότητα CO₂ που πλέον συγκεντρώνεται στην ατμόσφαιρα, έχει συμβάλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, ενώ η ταχύτητα με την οποία συντελείται αυτή η αύξηση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από οποιαδήποτε φυσική διεργασία. Το αποτέλεσμα είναι η αδυναμία των φυσικών συστημάτων να προσαρμοστούν στα νέα δεδομένα.

Καύση καυσίμων:

Πάνω από τα τρία τέταρτα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου οφείλονται στις καύσεις. Αυτό περιλαμβάνει την καύση καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, την παραγωγή αγαθών, την κατασκευή κτιρίων και υποδομών, καθώς και την κυκλοφορία εμπορευμάτων και προσώπων. Η καύση ορυκτών καυσίμων είναι ο μεγαλύτερος παράγοντας που συμβάλλει στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου από αυτή την πηγή, αλλά η καύση άλλων καυσίμων, όπως τα απόβλητα, παράγει επίσης εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Συνολικά, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μειώνονται, και αυτό ισχύει και για τους περισσότερους τομείς-πηγές. Ωστόσο, υπάρχει μια εξαίρεση. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τις μεταφορές, συμπεριλαμβανομένης της διεθνούς αεροπορίας, αυξήθηκαν κατά 172 εκατομμύρια τόνους ή κατά 20% σε σύγκριση με το 1990. Πάντως, οι συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από την καύση καυσίμων έχουν μειωθεί περισσότερο από 850 εκατομμύρια τόνους, ακόμη και με την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στις μεταφορές.

Ανά οικονομική δραστηριότητα, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατανέμονται ως εξής: Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, αερίου, ατμού και κλιματισμού: 26%, Βιομηχανία: 19%, Νοικοκυριά: 19%, Γεωργία, αλιεία, δασοκομία: 12%, Μεταφορές και αποθήκευση: 11%, Άλλες υπηρεσίες, παροχή νερού και κατασκευές: 11%, Ορυχεία και λτομέια: 2%. [3],[4]



Εικόνα 6 Στοιχεία της Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας για την εξέλιξη των εκπομπών αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Συμβολή των νοικοκυριών της ΕΕ στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα:

Το 2016, τα νοικοκυριά στην ΕΕ δημιούργησαν περίπου το ένα τέταρτο των συνολικών άμεσων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται στην ΕΕ και ανέρχονται σε 1,7 τόνους ανά άτομο. Η χαμηλότερη τιμή καταγράφηκε στη **Βουλγαρία** (0,3 t / άτομο) και η υψηλότερη στο **Λουξεμβούργο** (2,9 t / άτομο).

Πώς όμως παράγονται αυτές οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα; Περισσότερο από το ήμισυ (55%) των εκπομπών CO₂ των νοικοκυριών της ΕΕ το 2016 προήλθε από δραστηριότητες μεταφορών, όπως η μετακίνηση με το αυτοκίνητο στην εργασία ή το αεροπλάνο για διακοπές. Ένα επιπλέον 44% προκλήθηκε από τα νοικοκυριά, όταν ζεσταίνουν το σπίτι τους. Το υπόλοιπο 1% δημιουργήθηκε από άλλες δραστηριότητες, όπως εκπομπές από διάφορα σπρέι και ηλεκτρικές χλοοκοπτικές μηχανές.

Με τον τρόπο αυτόν **κάθε πολίτης συμβάλλει άμεσα** - μέσα από τις δικές του δραστηριότητες - **στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα**. Όμως μπορεί να συμβάλει και έμμεσα, καθώς ό,τι αγοράζει, είτε πρόκειται για ένα λίτρο γάλακτος είτε για έναν καναπέ, πρέπει προηγουμένως να παραχθεί και κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας δημιουργούνται εκπομπές CO₂.

Είναι σαφές πως η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας δε σημαίνει απαραίτητα πιο ζεστό κλίμα για όλους, σε όλες τις περιοχές του κόσμου. Καθώς ο πλανήτης θερμαίνεται, μεταβάλλει το κλιματικό σύστημα, συμβάλλοντας στην αύξηση εμφάνισης ακραίων και απρόβλεπτων καιρικών φαινομένων. Το αποτέλεσμα; Άλλες περιοχές θα είναι πιο ζεστές, άλλες πιο κρύες, ενώ ανάλογα θα επηρεαστούν και τα επίπεδα υγρασίας του πλανήτη –άλλοτε δημιουργώντας συνθήκες ξηρασίας, άλλοτε υπερβολικά μεγάλες ποσότητες βρόχουπτωσης. [3],[4]

1.5 Οι Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής

Ο περιορισμός της αύξησης της θερμοκρασίας στους 2°C, έχει αναγνωριστεί από το σύνολο της επιστημονικής κοινότητας, αλλά και από την Ευρωπαϊκή Ένωση, ως απαραίτητη προϋπόθεση για να αποφύγουμε τις χειρότερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Ήδη παρατηρούμε σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και στους ανθρώπινους πληθυσμούς – όπως η τήξη των θαλάσσιων πάγων στην Αρκτική – ακόμα και με τη σημερινή αύξηση της θερμοκρασίας στους 0,8 °C σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Αυτές θα μπορούσαν να προκαλέσουν θετικές ανατροφοδοτήσεις που θα επιφέρουν ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας και περαιτέρω δραματικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα του πλανήτη.

Η 4η Έκθεση Αξιολόγησης (AR4) της IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) προβλέπει επιπλέον:

- Μέσα στις επόμενες δεκαετίες, τα αποθέματα νερού που είναι αποθηκευμένα στους παγετώνες και στις χιονισμένες περιοχές θα μειωθούν προκαλώντας ελλείψεις νερού σε περισσότερο από 1 δις ανθρώπους

- Το 20% με 30% όλων των ζωντανών οργανισμών στον πλανήτη θα αντιμετωπίζουν αυξημένο κίνδυνο εξαφάνισης, αν η άνοδος της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας ξεπεράσει τους 1,5-2,5°C.
- Σε χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη, και κυρίως σε ξηρές και τροπικές περιοχές, ακόμα και μικρές αυξήσεις της θερμοκρασίας της τάξης των 1°C - 2°C, αναμένεται να αυξήσουν τον κίνδυνο λιμών
- Μετά το 2080 πολλά εκατομμύρια ανθρώπων αναμένεται να επηρεαστούν από πλημμύρες στα σπίτια και τις επιχειρήσεις τους εξαιτίας της ανόδου της στάθμης της θάλασσας κάθε χρόνο. Σε ιδιαίτερο κίνδυνο βρίσκονται πυκνοκατοικημένες περιοχές, καθώς και περιοχές που βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο με περιορισμένες ικανότητες προσαρμογής. [3],[4]

1.6 Η Καταπολέμηση της Κλιματικής Αλλαγής

Η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας πρέπει να συγκρατηθεί κάτω από τους 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, ώστε να αποφευχθούν οι χειρότερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να υπάρξει μια νέα παγκόσμια συμφωνία που θα βασίζεται σε μια επιστημονικά ορισμένη ποσότητα άνθρακα που μπορεί να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα και θα προβλέπει ότι οι παγκόσμιες εκπομπές θα κορυφωθούν την περίοδο 2013-2020, για να αρχίσουν να μειώνονται αισθητά στη συνέχεια. Τα κομβικά σημεία μιας καλής συμφωνίας για το κλίμα θα πρέπει απαραίτητα να περιλαμβάνουν τα εξής:

- Μείωση των παγκόσμιων εκπομπών κατά τουλάχιστον 80% μέχρι το 2050, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.
- Ελάχιστη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των ανεπτυγμένων κρατών κατά 40% έως το 2020, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.
- Ετήσια χρηματοδότηση των αναπτυσσόμενων κρατών ύψους €115 δις έως το 2020, για δράσεις μείωσης των εκπομπών, προσαρμογής και τερματισμού της αποδάσωσης.
- Επίτευξη μηδενικού ισοζυγίου δάσωσης και αποδάσωσης έως το 2020 [3],[4]

Κεφάλαιο 2: Ψύξη με Απορρόφηση

2.1 Εισαγωγή

Η αποτελεσματική χρήση της ενέργειας με σκοπό την αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης του πλανήτη και γενικότερα της κλιματικής αλλαγής, καθώς και των διαφόρων ενεργειακών προβλημάτων αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Την ίδια στιγμή, η συνεχώς αυξανόμενη επιθυμία των ανθρώπων για άνεση στην καθημερινότητα και στο περιβάλλον διαβίωσής τους καταδεικνύει την ανάγκη ύπαρξης κλιματισμού. Ως εκ τούτου, η ζήτηση για κλιματιστικά καλύτερης απόδοσης έχει γίνει γίνεται εντονότερη χρόνο με το χρόνο.

Το μεγαλύτερο μέρος των βιομηχανικών διεργασιών χρησιμοποιεί πολλή θερμική ενέργεια καίγοντας ορυκτά καύσιμα και παράγοντας ατμό ή θερμότητα για το σκοπό αυτό. Μετά το πέρας των διεργασιών, η θερμότητα αποβάλλεται στον περιβάλλοντα χώρο. Η θερμότητα που αποβάλλεται, αντί να χαθεί, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ψύξης μέσω ενός συστήματος παραγωγής ψύξης, το οποίο λειτουργεί με τη χρήση θερμότητας. Ένα τέτοιο σύστημα ψύξης είναι ένα σύστημα ψύξης που λειτουργεί με απορρόφηση. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να μειωθεί και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των συμβατικών συστημάτων ψύξης συμπίεσης ατμού. Επίσης, η χρήση συστημάτων ψύξης με απορρόφηση βοηθούν στη μείωση των προβλημάτων που σχετίζονται με το περιβάλλον, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπου λόγω της μείωσης της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνονται και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα, ψύκτες απορρόφησης είναι τα συστήματα ψύξης τα οποία λειτουργούν με θερμότητα η οποία παρέχεται από πηγή θερμότητας χαμηλής ενθαλπίας. Είναι οι πιο κατάλληλοι ψύκτες όσον αφορά την αποτελεσματική χρήση ενέργειας με σκοπό την παραγωγή ψύξης εκμεταλλευόμενοι την απορριπτόμενη θερμότητα από ηλεκτρογεννήτριες ή άλλες εγκαταστάσεις. Η εισαγωγή μεγάλων συστημάτων απορρόφησης σε αστικές περιοχές, όπου τα φορτία κλιματισμού είναι μεγαλύτερα, για την τηλεθέρμανση και την ψύξη είναι ένας πολύ καλός τρόπος για την επίτευξη αποτελεσματικής θέρμανσης και ψύξης. Οι μεγάλης κλίμακας ψύκτες απορρόφησης παίζουν πλέον σημαντικό ρόλο όσον αφορά τα συστήματα τηλεθέρμανσης και ψύξης.[5]

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι κύκλοι απορρόφησης άρχισαν να αναπτύσσονται τον 18^ο αιώνα. Ήταν γνωστό ότι μπορούσε να παραχθεί πάγος από την εξάτμιση καθαρού νερού από ένα δοχείο που περιέχεται μέσα σε ένα κενό δοχείο παρουσία θειικού οξέος. Το 1810, μπορούσε να παραχθεί πάγος από νερό που βρισκόταν μέσα σε ένα δοχείο, το οποίο ήταν συνδεδεμένο σε ένα άλλο δοχείο, που περιείχε θειικό οξύ. Καθώς το οξύ απορροφούσε υδρατμούς, προκαλώντας μείωση της θερμοκρασίας, στην επιφάνεια του νερού σχηματίζονταν στρώματα πάγου. Τα κύρια προβλήματα αυτού του συστήματος ήταν η διάβρωση και η

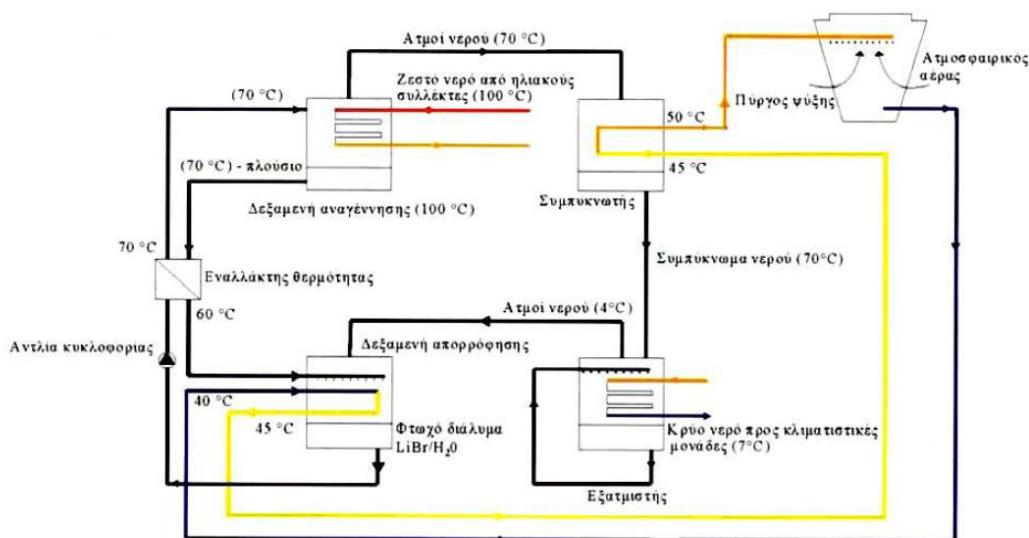
διαρροή αέρα μέσα στο δοχείο κενού. Το 1859, ο Ferdinand Carre παρουσίασε μία νέα μηχανή που χρησιμοποιούσε νερό/αμμωνία ως εργαζόμενο μέσο. Η μηχανή αυτή έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής το 1860. Οι μηχανές που βασίστηκαν στην παραπάνω ευρεσιτεχνία χρησιμοποιήθηκαν για να πάγο και να αποθηκεύουν τρόφιμα.

Τη δεκαετία του 1950, ένα σύστημα, που χρησιμοποιούσε βρωμιούχο λίθιο/νερό ως εργαζόμενο μέσο, παρουσιάστηκε για βιομηχανικές εφαρμογές. Μερικά χρόνια αργότερα, παρουσιάστηκε ένα διβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση και έκτοτε χρησιμοποιείται ως βιομηχανικό πρότυπο για έναν υψηλής απόδοσης κύκλο ψύξης που λειτουργεί με εισαγωγή θερμότητας. [5]

2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΣΤΙΣ ΜΕΡΕΣ ΜΑΣ

Οι ψύκτες απορρόφησης είναι πολύ διαδεδομένοι ψύκτες παγκοσμίως. Η θερμική συμπίεση του ψυκτικού μέσου επιτυγχάνεται με τη χρήση υγρού διαλύματος ψυκτικού μέσου/μέσου απορρόφησης και πηγής θερμότητας, αντικαθιστώντας με αυτόν τον τρόπο την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ενός μηχανικού συμπιεστή. Για ψυχρό νερό άνω των 0°C, όπως απαιτείται στον κλιματισμό, τυπικά χρησιμοποιείται ένα υγρό διάλυμα H₂O/LiBr, με το νερό ως ψυκτικό μέσο.

Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν εσωτερική αντλία για το διάλυμα, καταναλώνοντας όμως μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης H₂O/LiBr, η κρυσταλλοποίηση του διαλύματος πρέπει να αποφευχθεί με εσωτερικό έλεγχο της θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας στη μηχανή. Τα κύρια σημεία ενός ψύκτη απορρόφησης παρουσιάζονται στην εικόνα 6. Η ψύξη βασίζεται στην ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου (νερό) στον ατμοποιητή σε πολύ χαμηλές πιέσεις. Το ατμοποιημένο ψυκτικό μέσο απορροφάται από τον απορροφητή, αραιώνοντας το διάλυμα H₂O/LiBr (για να καταστεί η διαδικασία απορρόφησης αποδοτική, απαιτείται ψύξη σε αυτό το στάδιο της διεργασίας). Το διάλυμα αντλείται συνεχώς στον αναγεννητή (γεννήτρια ατμού), όπου επιτυγχάνεται η αναγέννηση του διαλύματος χρησιμοποιώντας θερμότητα (θερμότητα αναγέννησης/ τροφοδοσίας) (π.χ. ζεστό νερό από ηλιακά). Το ψυκτικό μέσο στη συνέχεια, συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή και κυκλοφορεί με τη βοήθεια μιας στραγγαλιστικής /εκτονωτικής βαλβίδας πάλι στον ατμοποιητή. Η ονομαστική ψυκτική ικανότητα των ψυκτών απορρόφησης είναι της τάξης αρκετών εκατοντάδων kW. Τροφοδοτούνται κυρίως μέσω κεντρικής θέρμανσης, απορριπτόμενης θερμότητας ή θερμότητας από συμπαραγωγή. Η απαιτούμενη θερμοκρασία της θερμικής πηγής είναι συνήθως πάνω από 80°C για τις μηχανές μονής βαθμίδας ενώ ο COP είναι της τάξης του 0,6 έως 0,8. Διβάθμιες μηχανές με δύο στάδια συμπίεσης, απαιτούν θερμοκρασία άνω των 100°C, αλλά ο COP μπορεί να επιτύχει τιμές μέχρι και 1,2.



Εικόνα 7 Σχηματικό διάγραμμα ψύκτη απορρόφησης με εργαζόμενο μέσο $H_2O/LiBr$.

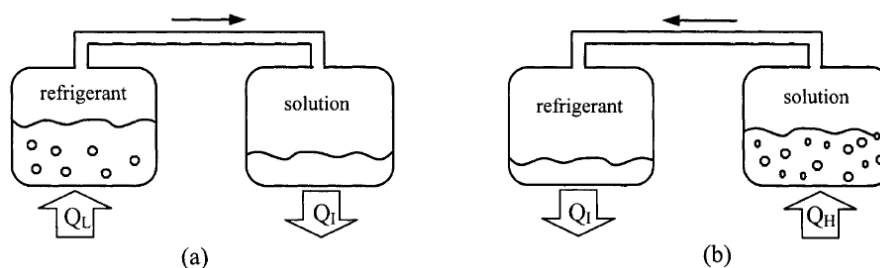
Επίσης, υπάρχουν ψύκτες απορρόφησης ψυκτικής ισχύος κάτω των 50 kW. Τέτοιες μικρές μονάδες χρησιμοποιούνται συχνά στα συστήματα ηλιακού κλιματισμού με ψύκτες απορρόφησης. Ένας πρόσφατα αναπτυγμένος τύπος ψυκτών, μικρής ισχύος, επιτρέπει λειτουργία μερικού φορτίου με μειωμένη ψυκτική ισχύ σε θερμοκρασίες αναγέννησης 65°C και με COP περίπου 0,7. Αυτό δείχνει πως υπάρχει περαιτέρω δυνατότητα για βελτίωση της απόδοσης των ψυκτών απορρόφησης.

Τα ηλιακά κλιματιστικά βασίζονται σε συνεχείς κύκλους απορρόφησης, που βασίζουν την λειτουργία τους σε ηλιακούς συλλέκτες. Ο κλιματισμός με την μέθοδο της απορρόφησης, έχει αποδειχθεί ότι είναι οικονομικά βιώσιμος, όταν υπάρχει μια φθηνή πηγή ενέργειας στο εύρος των θερμοκρασιών από 100 έως 200 °C. Επίσης μηχανές απορρόφησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αναγεννητές, σε τυπικά κλιματιστικά μηχανήματα, με παραγωγή ψυχρού νερού. Έρευνες σε συστήματα που χρησιμοποιούν την μέθοδο της απορρόφησης, στηριζόμενα σε επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, για οικιακή χρήση, έχουν σαν στόχο την βελτίωση της προσαρμογής αυτών των τύπων. Επιστήμονες χρησιμοποιώντας τον συνδυασμό νερού-βρωμιούχου λιθίου, αναζήτησαν το βέλτιστο ψυκτικό μέσο, ανάμεσα σε αρκετά υποψήφια. Ο μέγιστος COP του ψυκτικού κύκλου για την χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας των συλλεκτών, επιτυγχάνεται με την χρήση του συνδυασμού νερού-βρωμιούχου λιθίου. Έχουν μελετηθεί και άλλα ψυκτικά μέσα, αλλά χωρίς να έχουν παρατηρηθεί ουσιαστικά πρακτικά αποτελέσματα.

2.4 Αρχή Λειτουργίας

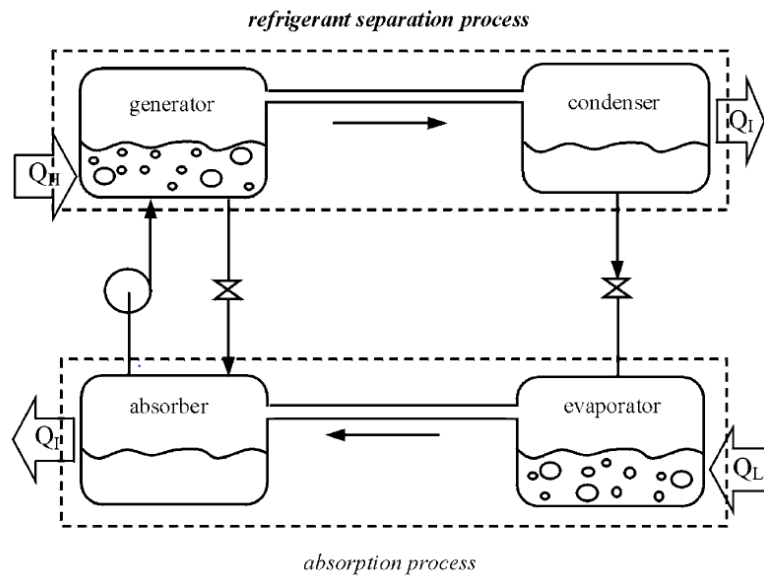
Το εργαζόμενο μέσο σε ένα σύστημα ψύξης με απορρόφηση είναι ένα μίγμα δύο συστατικών, το ψυκτικό μέσο και το μέσο απορροφήσεως. Στην εικόνα 7(a) δύο κενά δοχεία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους. Το αριστερό δοχείο περιέχει υγρό ψυκτικό μέσο, ενώ το δεξί δοχείο περιέχει μίγμα ψυκτικού μέσου/μέσου απορροφήσεως. Το μίγμα στο δεξί δοχείο θα απορροφήσει ατμό ψυκτικού μέσου από το αριστερό δοχείο προκαλώντας πτώση πίεσης. Καθώς ο ατμός του ψυκτικού μέσου απορροφάται, η θερμοκρασία του εναπομείναντος ψυκτικού μέσου μειώνεται ως αποτέλεσμα της ατμοποίησης του. Η παραπάνω διαδικασία οδηγεί στην παρουσίαση του φαινομένου της ψύξης εντός του αριστερού δοχείου. Την ίδια στιγμή, το μίγμα που βρίσκεται εντός του δεξιού δοχείου γίνεται πιο αραιό λόγω της μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε ψυκτικό μέσο που απορροφάται. Η παραπάνω διαδικασία είναι η διαδικασία της απορρόφησης. Κανονικά, αυτή η διαδικασία είναι μία εξώθερμη διεργασία και, ως εκ τούτου, πρέπει να αποβάλλει θερμότητα στο περιβάλλον, έτσι ώστε να διατηρήσει την ικανότητα απορρόφησης.

Όποτε το μίγμα δε μπορεί να συνεχίσει τη διαδικασία απορρόφησης, εξαιτίας του κορεσμού του ψυκτικού μέσου, το ψυκτικό μέσο πρέπει να διαχωριστεί από το αραιωμένο μίγμα. Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με την εισαγωγή θερμότητας στο δεξί δοχείο. Η θερμότητα αυτή ατμοποιεί το ψυκτικό μέσο από το μίγμα όπως φαίνεται στην εικόνα 7(b). Ο ατμός του ψυκτικού μέσου θα συμπυκνωθεί μεταφέροντας θερμότητα στο περιβάλλον. Το φαινόμενο της ψύξης, λοιπόν, μπορεί να εμφανιστεί χρησιμοποιώντας θερμική ενέργεια, σύμφωνα με τις παραπάνω διεργασίες.



Εικόνα 8 (a) Στο δεξί δοχείο λαμβάνει χώρα η διαδικασία της απορρόφησης προκαλώντας το φαινόμενο της ψύξης στο αριστερό. (b) Στο δεξί δοχείο λαμβάνει χώρα η διαδικασία διαχωρισμού του ψυκτικού μέσου ως αποτέλεσμα της θερμότητας που τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή.

Ένας κύκλος ψύξης με απορρόφηση είναι συνδυασμός των δύο διεργασιών που περιεγράφηκαν παραπάνω και φαίνονται στην εικόνα 8. Καθώς η διαδικασία διαχωρισμού του κορεσμένου ψυκτικού μέσου από το αραιωμένο διάλυμα λαμβάνει χώρα σε υψηλότερη πίεση από τη διαδικασία απορρόφησης, απαιτείται μία αντλία κυκλοφορίας για να κυκλοφορεί το μίγμα. [5]



Εικόνα 9 Κύκλος ψύξης με απορρόφηση, που αποτελείται από δύο διαδικασίες όπως παρουσιάστηκαν νωρίτερα.

2.5 Απόδοση Απορροφητή ενός Ψύκτη Απορρόφησης με Εργαζόμενο Μέσο H₂O/LiBr

Είναι γνωστό ότι ο απορροφητής είναι ένα από τα σημαντικότερα συστατικά ενός ψύκτη απορρόφησης, ο οποίος μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του ψύκτη, το κόστος της επένδυσης και της συντήρησης. Το μέγεθος του απορροφητή είναι κανονικά μεγαλύτερο επειδή οι συντελεστές της μεταφοράς θερμότητας και μάζας του απορροφητή για τον ψύκτη απορρόφησης βρωμιούχου λιθίου (LBAC) είναι χαμηλοί. Επομένως, πολλές έρευνες, που ψάχνουν τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας και μάζας του υδατινού διαλύματος βρωμιούχου λιθίου (LiBr), έχουν γίνει για να βελτιώσουν την απόδοση του απορροφητή. Ο απορροφητής σε LBAC χρησιμοποιεί ένα κέλυφος-σωλήνα εναλλάκτη θερμότητας και μάζας, όπου το υδατινό διάλυμα LiBr επιπλέει στο μέρος του κελύφους ενώ το μέσο ψύξης στους σωλήνες. Ο απορροφητής μπορεί να επιτύχει υψηλή απόδοση μεταφοράς θερμότητας και μάζας:

- 1) Αυξάνοντας την πίεση απορρόφησης και τη συγκέντρωση εισαγωγής στον LBAS ή μειώνοντας την θερμοκρασία εισαγωγής ύδατος ψύξης .
- 2) Συγκεντρώνοντας την προσοχή σε ένα μονού σωλήνα ή πολλαπλών σωλήνων απορροφητή οριζόντιο ή κάθετο εντός του απορροφητή για να βελτιώσει τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και μάζας στον LBAS .
- 3) Προσθήκη μερικών μέσων απολύμανσης στο LBAS για να εντείνει τη μεταφορά μάζας.

Η αρχή της απορρόφησης υδάτινου διαλύματος LiBr :

Το ποσό υδρατμού (που χρησιμοποιείται ως ψυκτική ουσία) από τον ατμοποιητή αποφασίζει την ψυκτική ικανότητα του LBAC και εξαρτάται από την απορροφητική δυνατότητα του απορροφητή. Εντούτοις, η απορροφητική ικανότητα του LBAC είναι μια λειτουργία της μεταφοράς μάζας που όχι μόνο εξαρτάται από τη θερμοκρασία, συγκέντρωση του διαλύματος, αλλά και επηρεάζεται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ του κορεσμένου υδρατμού που γεμίζει του απορροφητή και την μερική πίεση υδρατμού της διεπαφής του συγκεντρωμένου υδάτινου διαλύματος LiBr, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta p = p_a - p_c \quad (2.5.1)$$

όπου το p_c είναι η μερική πίεση υδρατμού της διεπαφής του διαλύματος, και το p_a είναι η πίεση κορεσμένου υδρατμού από τον ατμοποιητή.

Η εξίσωση (2.5.1) δείχνει ότι η αποδοτικότητα απορρόφησης του απορροφητή θα μπορούσε να βελτιωθεί με την αύξηση του Δp . Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί είτε με την αύξηση της p_a είτε με τη μείωση της p_c . Η τιμή του p_a είναι συνήθως ίση με την πίεση εξάτμισης, και εκείνο το p_c είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης κολλοειδούς διαλύματος όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$p_c = f(t, \xi) \quad (2.5.2)$$

όπου το t είναι η θερμοκρασία διαλύματος ($^{\circ}\text{C}$) και ξ είναι η συγκέντρωση του διαλύματος (%).

Με βάση την ιδιότητα του διαλύματος βρωμιούχου λιθίου, η τιμή του p_c μπορεί να μειωθεί με τη μείωση του t κρατώντας τη συγκέντρωση σταθερή ή αυξάνοντας το ξ όταν η θερμοκρασία είναι αμετάβλητη.

Επομένως, φαίνεται ότι η απορροφητική δυνατότητα του απορροφητή και η απόδοση του LBAC μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος βρωμιούχου λιθίου. Εντούτοις, δεν έχει πάντα αποτέλεσμα στο συντελεστή της απόδοσης (COP) με την αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος επειδή το ποσό θερμότητας αυξάνεται επίσης με την αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος και η θερμοκρασία παραγωγής ανεβαίνει. Είναι, επομένως, απαραίτητο να ερευνηθεί σχέση μεταξύ του COP του ψύκτη με τη συγκέντρωση του διαλύματος και τον μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας και μάζας της μεμβράνης του απορροφητή.

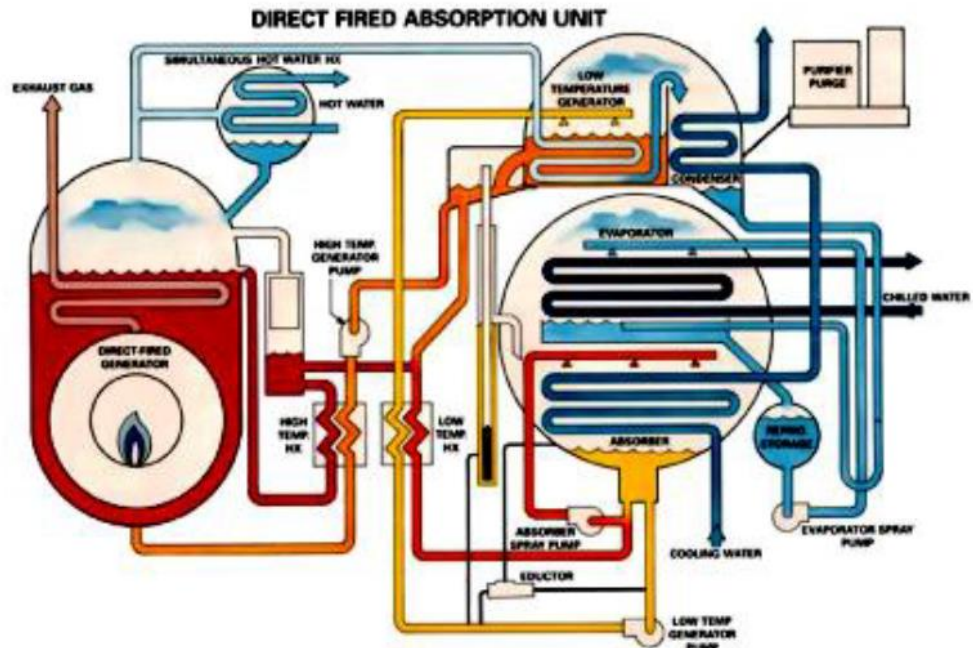
2.6 Ψύκτες Απορρόφησης Άμεσης - Έμμεσης Θέρμανσης (Direct-Indirect Fired Absorption Chillers)

2.6.1 Άμεσης Θέρμανσης (Gas Fired Absorption Chillers) :

Οι ψύκτες απορρόφησης άμεσης θέρμανσης που διατίθενται στο εμπόριο έχουν ονομαστική ισχύ που ξεκινούν από τα 105 KW (30 RT) και φθάνουν τα 3800 KW (1080 RT).

Έχουν τα εξής βασικά χαρακτηριστικά :

- 1) Χρησιμοποιούν ως κύρια πηγή ενέργειας Φυσικό Αέριο ή LPG
- 2) Μειωμένο κόστος λειτουργίας λόγω της ανταγωνιστικής τιμολογιακής πολιτικής για το Φυσικό Αέριο.
- 3) Η χρησιμοποίηση Φυσικού Αερίου αντί ηλεκτρισμού πρακτικά μηδενίζει την απαιτούμενη ηλεκτρική εγκατάσταση για κλιματισμό εφόσον η απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύς κυμαίνεται από 1.2 έως 2.3 KW.
- 4) Η λειτουργία τους στηρίζεται στον ψυκτικό κύκλο H₂O-LiBr με διπλό κέλυφος.
- 5) Οι ψύκτες άμεσης θέρμανσης χρειάζονται 1 BTU (1.055 KJ) από το καύσιμο αέριο (ισχύς καυσίμου) για κάθε BTU ψυκτικής ισχύος που παράγουν (COP = 1.0). Με την κατασκευή όμως διπλού κελύφους καθώς και την χρησιμοποίηση πιεστικού καυστήρα επιτυγχάνεται υψηλός συντελεστής συμπεριφοράς (COP ~ 1.5 για ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας) και μείωση της κατανάλωσης καυσίμου έως και 40% σε σχέση με μονοβάθμιες εγκαταστάσεις.
- 6) Επίσης λόγω του διβάθμιου ψυκτικού κύκλου μειώνεται η απορριπτόμενη θερμότητα και επομένως το μέγεθος του Πύργου Ψύξης κατά 20% σε σχέση με τις μονοβάθμιες μονάδες.
- 7) Έχουν ταυτόχρονη δυνατότητα παραγωγής νερού ψύξης και θερμού νερού (κοντά στους 80 °C).
- 8) Έχουν λειτουργικό σχεδιασμό με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η εγκατάσταση και συντήρησή τους.
- 9) Διαθέτουν καυστήρα χαμηλών εκπομπών NO_x (< 30 ppm).
- 10) Έχουν αντλία διαλύματος LiBr με μετατροπέα (inverter) : Βέλτιστη απόδοση στο μερικό φορτίο.
- 11) Τέλος διαθέτουν ενσωματωμένο χειριστήριο με μικροεπεξεργαστή για τον έλεγχο, προγραμματισμό και την διάγνωση λειτουργίας ή βλαβών.



Εικόνα 10 Ψύκτης άμεσης θέρμανσης.

2.6.2 Έμμεσης Θέρμανσης (Steam / Hot Water Fired Absorption Chillers) :

Η ονομαστική ισχύς των μονοβάθμιων εγκαταστάσεων κυμαίνεται από 400 KW (110 RT) έως 6000 KW (1705 RT) ενώ των διβάθμιων κυμαίνεται από 1400 KW (400 RT) έως 4300 KW (1220 RT).

Οι ψύκτες αυτού του είδους παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά :

- 1) Βελτιωμένος Ψυκτικός Κύκλος :
 - Χρησιμοποίηση θερμού νερού θερμοκρασίας 130 °C περίπου ή υπέρθερμου ατμού πίεσης κοντά στο 1 bar ως κύριας πηγή ενέργειας.
 - Εξοικονόμηση ενέργειας με χρήση της θερμικής ενέργειας ατμού χαμηλής πίεσης που οδηγείται για απόρριψη για την παραγωγή ψυκτικής ισχύος.
 - Παραγωγή Ψύξης σε Μονάδες Τρι-Παραγωγής (Trigeneration Plants) ή σε Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου.
 - Μεγιστοποίηση του συνολικού βαθμού απόδοσης.
- 2) Ελάχιστα κινούμενα μέρη : Ερμητικά κλειστός συμπιεστής που ψύχεται με αποσταγμένο ψυκτικό μέσο (νερό).
 - Αμελητέες μηχανικές απώλειες . Μηδαμινές απαιτήσεις συντήρησης.

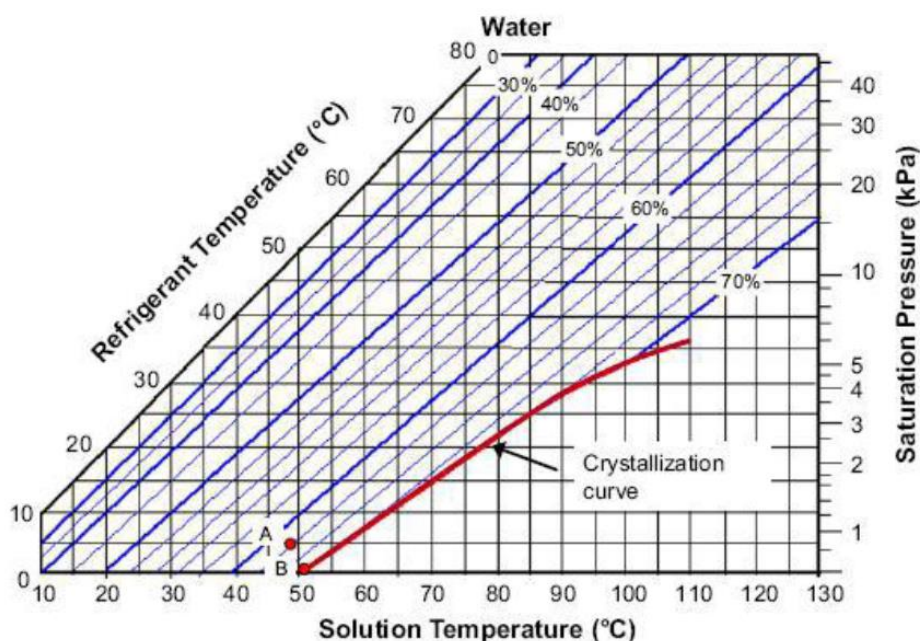
2.7 Κρυσταλλοποίηση

Το φαινόμενο αυτό, κατά το οποίο δημιουργείται κρυσταλλοποίηση των αλάτων, όπως είναι το βρωμιούχο λίθιο, παρουσιάζεται στον αναγεννητή. Οι επιπτώσεις αυτού του φαινομένου, που ευτυχώς είναι αναστρέψιμο, οδηγούν στη μείωση της απόδοσης της μηχανής χωρίς όμως να της προκαλεί ζημιές ή φθορές.

Αίτια που το προκαλούν:

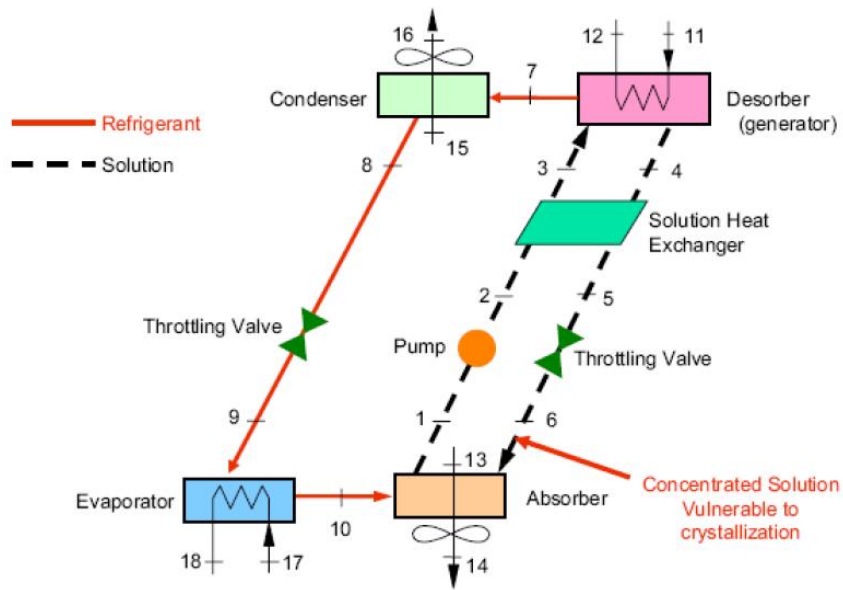
- Χαμηλή θερμοκρασία του ψυχρού ρεύματος κατά τη συμπύκνωση
- Απώλεια κενού
- Απότομη διακοπή λειτουργίας λόγω διακοπής ηλεκτρικού ρεύματος
- Υπερφόρτωση
- Εισροή μη υγραποιούμενων ρευστών στο κύκλωμα σε ποσότητες μεγαλύτερες από την ικανότητα εξαέρωσης
- Μεγαλύτερη από την επιτρεπόμενη συγκέντρωση LiBr στο διάλυμα

Στους ψύκτες απορρόφησης με LiBr η γραμμή κρυσταλλοποίησης βρίσκεται πολύ κοντά στις συγκεντρώσεις του διαλύματος που λειτουργεί ο ψύκτης. Από την εικόνα 10 βλέπουμε πως αν η συγκέντρωση είναι αρκετά υψηλή ή η θερμοκρασία του διαλύματος μειωθεί αρκετά, τότε το σημείο A πλησιάζει το B που ανήκει στην γραμμή κρυστάλλωσης. [6],[7]



Εικόνα 11 Αναπαράσταση της γραμμής κρυσταλλοποίησης στον Ψυχομετρικό Χάρτη.

Η θέση στην οποία είναι πιο πιθανή η κρυσταλλοποίηση είναι στο σημείο από όπου εισέρχεται το πλούσιο διάλυμα στον απορροφητή και φαίνεται στην εικόνα 11. [6],[7]



Εικόνα 12 Πιθανό σημείο κρυσταλλοποίησης σε ψύκτη απορρόφησης.

2.8 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Ψύξης με Απορρόφηση

2.8.1 Πλεονεκτήματα

- Για τη λειτουργία τους χρειάζεται τροφοδοσία θερμότητας, η οποία αποτελεί ενέργεια χαμηλής ποιότητας (δηλαδή ενέργεια που μετατρέπεται δύσκολα σε άλλη μορφή ενέργειας).
- Οι ψύκτες απορρόφησης έχουν ελάχιστα κινούμενα μέρη. Αυτό σημαίνει ότι κάνουν λιγότερο θόρυβο, έχουν λιγότερες δονήσεις από τους μηχανικούς ψύκτες και έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (περίπου 20 χρόνια πριν από την πρώτη γενική επισκευή).
- Το κόστος της παραγόμενης ψύξης είναι πολύ χαμηλό, η ψύξη παράγεται σχεδόν δωρεάν.
- Οι ψύκτες απορρόφησης τυπικά χρησιμοποιούν μόνο το 2 - 9% της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται συνήθως για τους μηχανικούς ψύκτες. Αυτό σημαίνει ότι οι εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να αποφύγουν τις αιχμές ζήτησης και τα υψηλά ποσοστά ηλεκτρικής κατανάλωσης (εάν είναι σε αυτό το είδος ηλεκτρικού χρονοδιαγράμματος).
- Η ψύξη πραγματοποιείται χωρίς τη χρήση ψυκτικών μέσων που περιέχουν χλώριο και, γενικότερα, χωρίς ψυκτικά μέσα που καταστρέφουν το όζον.
- Ελαχιστοποιεί τη συνολική επίπτωση στο περιβάλλον καθώς μειώνεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και, συνεπώς, τα αέρια που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την υπερθέρμανση του πλανήτη.

2.8.2 Μειονεκτήματα:

- Οι ψύκτες απορρόφησης έχουν χαμηλή απόδοση σε σύγκριση με τους μηχανικούς ψύκτες. Οι μονοβάθμιοι ψύκτες, οι οποίοι τείνουν να χρησιμοποιούν θερμότητα χαμηλότερης θερμοκρασίας, είναι λιγότερο αποδοτικοί από τους διβάθμιους ψύκτες, αλλά οι διβάθμιοι ψύκτες απαιτούν συνήθως ατμό αντί για ζεστό νερό.
- Όσον αφορά το κόστος, μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί αποτελεσματική εγκατάσταση του νέου εξοπλισμού, ανάλογα με τα υπάρχοντα ποσοστά χρησιμότητας και την εκτιμώμενη εξοικονόμηση ενέργειας.
- Οι περισσότεροι υπάλληλοι εγκαταστάσεων και οι τοπικοί συντηρητές εξοπλισμού δεν είναι τόσο εξοικειωμένοι με τη συντήρηση των ψυκτών απορρόφησης όσο και με τους μηχανικούς ψύκτες. Πολλές φορές χρειάζεται μια σύμβαση συντήρησης με τον κατασκευαστή του ψύκτη απορρόφησης για την τακτική συντήρηση του εξοπλισμού.
- Μεγάλο μέγεθος εγκατάστασης, καθώς τώρα πρέπει να εγκατασταθούν απορροφητής, αντλία και αναγεννητής.

2.9 Σύγκριση: Συστήματα Ψύξης με Απορρόφηση – Συστήματα Ψύξης με Συμπύεση

2.9.1 Διαφορές:

- Σε αντίθεση με το σύστημα ψύξης με συμπύεση, το σύστημα απορρόφησης επιτυγχάνει το φαινόμενο ψύξης με χρήση θερμικής ενέργειας.
- Ο κύκλος ψύξης με συμπύεση χρησιμοποιεί συμπιεστή, αλλά το σύστημα ψύξης απορρόφησης χρησιμοποιεί αντλία υγρού για να παράγει τη διαφορά πίεσης μεταξύ συμπυκνωτή και ατμοποιητή. Μια αντλία υγρών είναι πολύ πιο εύκολη στο χειρισμό και φθηνότερη από τη συμπύεση ενός αερίου, με αποτέλεσμα να χρειάζεται λιγότερη εισροή έργου. Ωστόσο, το σύστημα ψύξης απορρόφησης αντικαθιστά την είσοδο έργου στο συμπιεστή με μια αντλία θερμότητας στη γεννήτρια.
- Τα συστήματα απορρόφησης χρησιμοποιούν διαφορετικά ψυκτικά μέσα από τα συστήματα συμπύεσης που δεν έχουν κακή επίδραση στο περιβάλλον, όπως για παράδειγμα εξάντληση του όζοντος κ.λπ.
- Οι ψύκτες απορρόφησης έχουν πολύ λίγα κινούμενα μέρη σε σύγκριση με το σύστημα συμπύεσης, με αποτέλεσμα να έχουν λιγότερους θορύβους, λιγότερους κραδασμούς και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση, μειώνοντας το απαιτούμενο κόστος συντήρησης.
- Οι ψύκτες απορρόφησης δεν εξαρτώνται πάρα πολύ από την υπερθέρμανση του ατμοποιητή και δεν επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις του φορτίου.
- Οι ψύκτες απορρόφησης έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος λόγω της χρήσης χαμηλής ποιότητας θερμότητας. Ο συντελεστής συμπεριφοράς ($COP = \text{load} / \text{input}$) είναι χαμηλότερος σε σύγκριση με το σύστημα συμπύεσης.

2.9.2 Ομοιότητες:

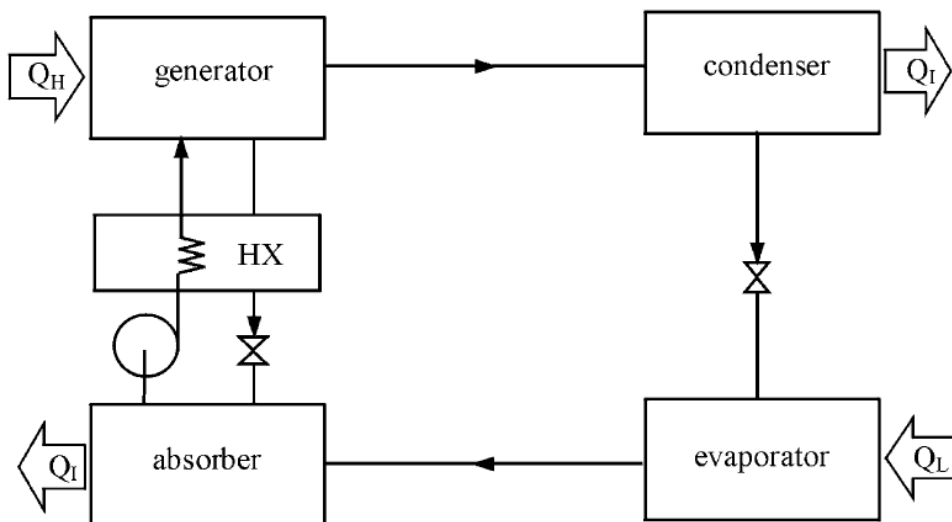
- Και τα δύο συστήματα μεταφέρουν θερμότητα μεταξύ δύο υγρών με κυκλοφορία ψυκτικού μέσα στο ψυκτικό συγκρότημα.
- Και στα δύο συστήματα, ο συμπυκνωτής συμπυκνώνει τους ατμούς του ψυκτικού μέσου σε χαμηλή πίεση και θερμοκρασία, απορρίπτοντας τη θερμότητα στο περιβάλλον.
- Και στα δύο συστήματα, με την απορρόφηση θερμότητας από το παγωμένο νερό, ο ατμός του ψυκτικού μέσου εξατμίζεται σε χαμηλή θερμοκρασία και πίεση.

Συμπερασματικά, αν και τα συστήματα ψύξης με απορρόφηση φαίνεται να έχουν πολλά πλεονεκτήματα, τα συστήματα ψύξης με συμπίεση κυριαρχούν ακόμα σε όλους τους τομείς της αγοράς. Για να διαδοθεί η χρήση των συστημάτων απορρόφησης, απαιτείται περισσότερη έρευνα, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση και να μειωθεί το κόστος τους.

2.10 Διαφορετικοί Κύκλοι Ψύξης με Απορρόφηση

2.10.1 Μονοβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση:

Το μονοβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση είναι το πιο απλό και το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο σύστημα. Υπάρχουν δύο εκδοχές του μονοβάθμιου συστήματος ανάλογα με το εργαζόμενο μέσο που χρησιμοποιείται. Η εικόνα 12 δείχνει ένα μονοβάθμιο σύστημα που χρησιμοποιεί ένα μη πτητικό μέσο απορρόφησης όπως το βρομιούχο λίθιο (LiBr).



Εικόνα 13 Μονοβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση που λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο H₂O/LiBr και περιλαμβάνει εναλλάκτη θερμότητας διαλύματος που βοηθά στη μείωση εισροής θερμότητας στον αναγεννητή.

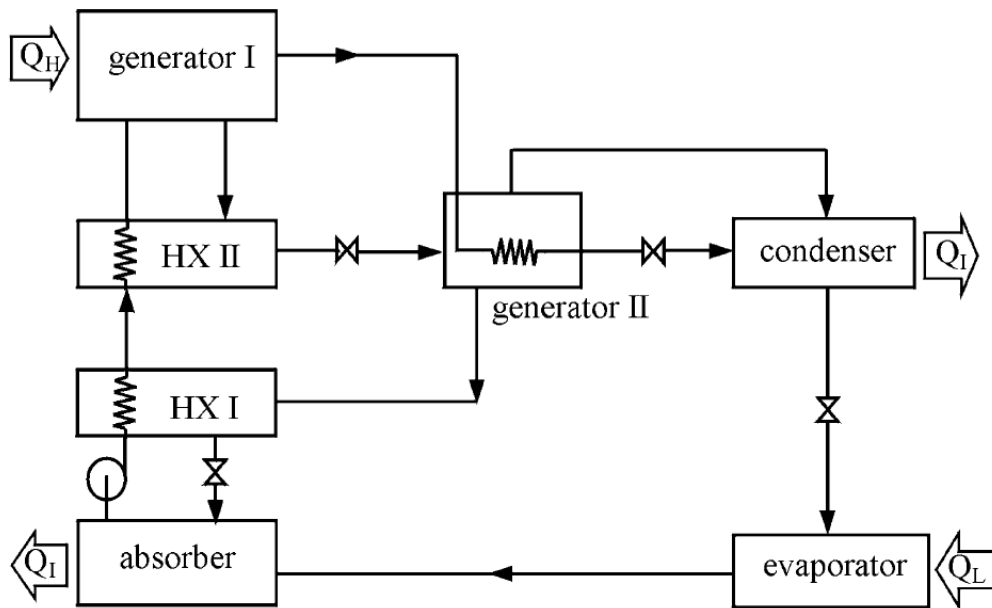
Η θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας που δίνεται στον αναγεννητή χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του ψυκτικού μέσου από το διάλυμα (θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω του συμπυκνωτή) και για τη θέρμανση του διαλύματος που μπαίνει στον απορροφητή (θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω του απορροφητή). Συνεπώς, στον συμπυκνωτή και στον απορροφητή, χάνεται θερμότητα η οποία δεν χρησιμοποιείται ξανά κάπου στο σύστημα. Για να μειωθεί η απώλεια θερμότητας προστίθεται στο σύστημα ένας εναλλάκτης θερμότητας διαλύματος όπως φαίνεται στην εικόνα 12. Ο εναλλάκτης θερμότητας επιτρέπει στο διάλυμα που κατευθύνεται από τον απορροφητή προς τον αναγεννητή να προθερμανθεί πριν μπει στη γεννήτρια. Συνεπώς, ο συντελεστής συμπεριφοράς βελτιώνεται, αφού η θερμότητα με την οποία τροφοδοτείται ο αναγεννητής, μειώνεται. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς μπορεί να αυξηθεί ως και 60%, όταν χρησιμοποιείται εναλλάκτης θερμότητας. Σημαντικό, επίσης, είναι και το γεγονός ότι, λόγω της μικρότερης αποβολής θερμότητας από τον απορροφητή, μπορεί να μειωθεί το μέγεθός του επιδρώντας θετικά στη μείωση του κόστους του συστήματος.

Όταν χρησιμοποιείται πτητικό μέσο απορρόφησης, όπως το νερό (H_2O), το σύστημα χρειάζεται την εισαγωγή ενός rectifier, το οποίο θα καθαρίσει το ψυκτικό μέσο πριν μπει στον συμπυκνωτή. Αυτό χρειάζεται, γιατί το νερό είναι πτητικό και θα εξατμιστεί μαζί με το ψυκτικό υγρό (π.χ. την αμμωνία). Χωρίς το rectifier, το νερό θα συμπυκνωθεί και θα συσσωρευτεί μέσα στον ατμοποιητή, προκαλώντας μείωση της απόδοσης.[5]

2.10.2 Πολυβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση:

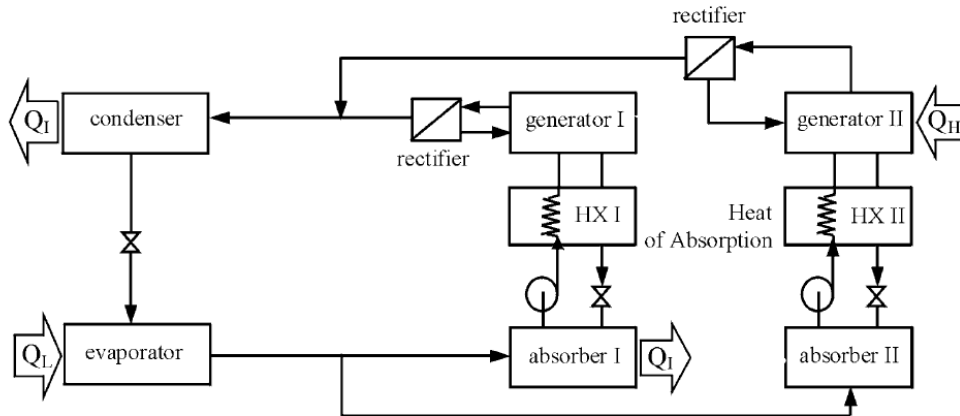
Ο κύριος σκοπός ενός πολυβάθμιο συστήματος ψύξης είναι να αυξήσει την απόδοση του συστήματος, όταν είναι διαθέσιμη θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας. Με τον όρο «πολυβάθμιο», εννοούμε ότι ο κύκλος πρέπει να σχεδιαστεί με τρόπο τέτοιο, ώστε η θερμότητα που αποβάλλεται από ένα στάδιο υψηλής θερμότητας να χρησιμοποιείται ως θερμότητα τροφοδοσίας σε ένα στάδιο χαμηλής θερμότητας. Έτσι, θα υπάρχει παραγωγή επιπρόσθετης ψύξης στο στάδιο χαμηλής θερμοκρασίας.

Το διβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση παρουσιάστηκε το 1956-1958. Στην εικόνα 13 φαίνεται ένα διβάθμιο σύστημα που χρησιμοποιεί H_2O (ψυκτικό μέσο)/LiBr (μέσο απορρόφησης). Ο αναγεννητής του πρώτου σταδίου τροφοδοτείται με θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας από εξωτερική πηγή. Το ατμοποιημένο ψυκτικό μέσο, που φεύγει από την αναγεννητή, συμπυκνώνεται σε υψηλή πίεση στον αναγεννητή του δεύτερου σταδίου. Η θερμότητα που απορρίπτεται χρησιμοποιείται για την παραγωγή επιπρόσθετου ατμού ψυκτικού μέσου από το μίγμα που έρχεται από τον πρώτο αναγεννητή. Ο τρόπος σχεδίασης αυτού του διβάθμιου συστήματος χαρακτηρίζεται ως διβάθμιο σύστημα ροής σε σειρά.



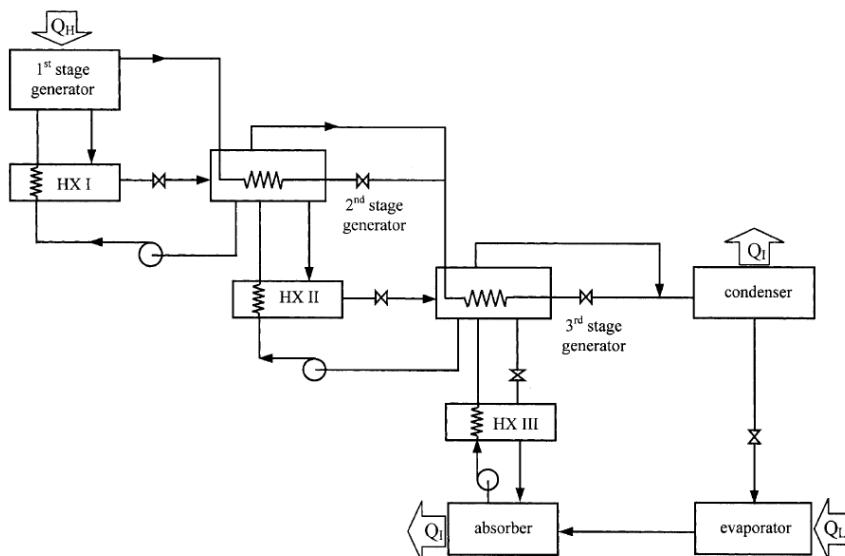
Εικόνα 14 Διβάρθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση που λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο $H_2O/LiBr$. Η θερμότητα, που αποβάλλεται από τη συμπύκνωση του ατμού του ψυκτικού μέσου, χρησιμοποιείται ως θερμότητα τροφοδοσίας στον αναγεννητή II. Αυτός ο κύκλος λειτουργεί σε τρία διαφορετικά επίπεδα πίεσης, την υψηλή, τη μέτρια και τη χαμηλή.

Αν το μίγμα $H_2O/LiBr$ αντικατασταθεί με το μίγμα NH_3/H_2O , τότε η μέγιστη πίεση στον αναγεννητή πρώτου σταδίου θα είναι πάρα πολύ υψηλή. Στην εικόνα 14 φαίνεται ένα διβάρθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση με εργαζόμενο μέσο το μίγμα H_2O/NH_3 . Σε αντίθεση με το σύστημα $H_2O/LiBr$, αυτό το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός δύο ξεχωριστών μονοβάρθμιων κύκλων. Ο ατμοποιητής και οι συμπυκνωτές των δύο κύκλων μπορούν να θεωρηθούν ως μία μεμονωμένη μονάδα όπως φαίνεται στην εικόνα 15. Έτσι, υπάρχουν μόνο δύο επίπεδα πίεσης σε αυτό το σύστημα και η μέγιστη πίεση μπορεί να περιοριστεί σε ένα αποδεκτό όριο. Μόνο ο δεύτερος αναγεννητής (generator II) τροφοδοτείται με θερμότητα από εξωτερική πηγή. Ο απορροφητής II μπορεί να λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία και να αποβάλει θερμότητα στον αναγεννητή I. Ο τρόπος σχεδίασης αυτού του διβάρθμιου συστήματος χαρακτηρίζεται ως διβάρθμιο σύστημα ροής εν παραλλήλω.



Εικόνα 15 Διβάρθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση που λειτουργεί σε δύο επίπεδα πίεσης. Η θερμότητα απορρόφησης από τον απορροφητή II τροφοδοτεί τον αναγεννητή I για τη διαδικασία διαχωρισμού του ψυκτικού μέσου.

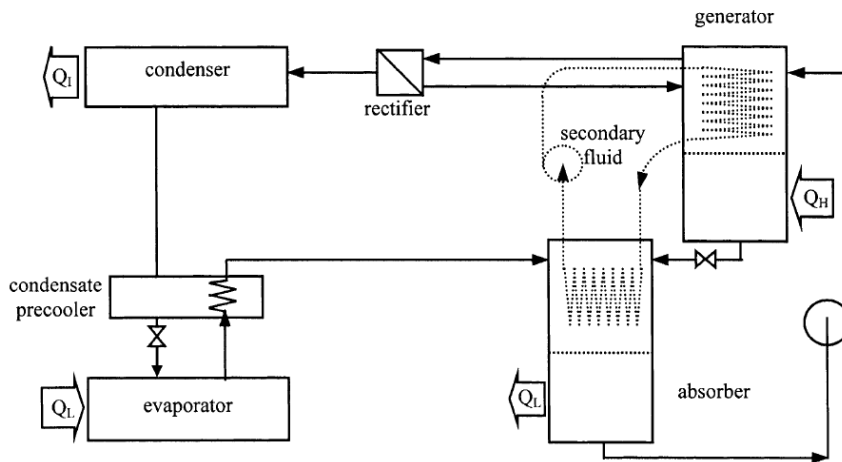
Έχουν μελετηθεί διάφοροι τύποι πολυβάθμιων κύκλων απορρόφησης, όπως ο τριβάθμιος και ο τετραβάθμιος. Ωστόσο, η βελτίωση του συντελεστή συμπεριφοράς δεν συνδέεται αναλογικά με την αύξηση των βαθμίδων του συστήματος, αλλά όσο περισσότερες είναι οι βαθμίδες τόσο μικρότερη είναι η βελτίωση που επιτυγχάνεται για τον συντελεστή συμπεριφοράς. Συνεπώς, λόγω και της πολυπλοκότητας της συνδεσμολογίας του συστήματος, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνονται οι βαθμίδες, το διβάθμιο σύστημα ψύξης είναι αυτό που χρησιμοποιείται για εμπορικούς σκοπούς. [5]



Εικόνα 16 Διβάρθμιος κύκλος ψύξης με απορρόφηση $H_2O/LiBr$. Η θερμότητα που απελευθερώνεται από τη συμπύκνωση του ατμού του ψυκτικού μέσου χρησιμοποιείται σαν θερμότητα τροφοδοσίας στον δεύτερο αναγεννητή.

2.10.3 Σύστημα ψύξης με απορρόφηση με GAX:

GAX είναι τα αρχικά του generator/absorber heat exchanger, δηλαδή εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ του απορροφητή και του αναγεννητή. Μερικές φορές αναφέρεται ως DAHX, που είναι τα αρχικά του desorber/absorber heat exchanger, δηλαδή εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ του απορροφητή και του διαχωριστή. Στόχος του GAX είναι να απλοποιήσει το διβάθμιο κύκλο ψύξης με απορρόφηση χωρίς να μειώσει την απόδοση. Η ιδέα του GAX παρουσιάστηκε το 1911 από τους Altenkirch και Tenckhoff. Η απλοποιημένη σχεδίαση φαίνεται στην εικόνα 16.



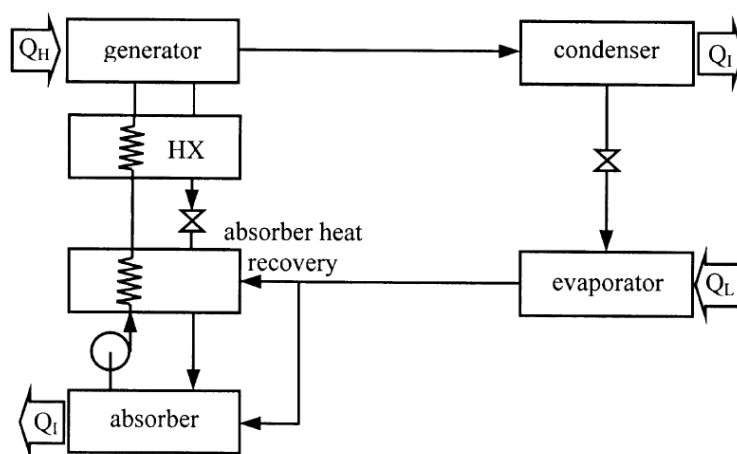
Εικόνα 17 Σύστημα ψύξης με απορρόφηση με GAX. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το δευτερεύον υγρό που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας από το τμήμα υψηλής θερμοκρασίας του απορροφητή στο τμήμα χαμηλής θερμοκρασίας του αναγεννητή.

Ο απορροφητής και ο αναγεννητής μπορούν να θεωρηθούν ως ένας εναλλάκτης αντιρροής όπως φαίνεται στην εικόνα 16. Η θερμότητα που παράγεται κατά τη διαδικασία απορρόφησης πρέπει να απορριφθεί, ώστε να διατηρηθεί η ικανότητα του απορροφητή να απορροφά του ατμούς του ψυκτικού μέσου. Στο επάνω τμήμα, η θερμότητα απορρίπτεται σε υψηλή θερμοκρασία. Στο κάτω τμήμα, το διάλυμα απορροφά περαιτέρω ψυκτικό μέσο, ενώ ψύχεται απορρίπτοντας θερμότητα στο περιβάλλον. Στο επάνω τμήμα του αναγεννητή, το ψυκτικό μέσο ατμοποιείται και διαχωρίζεται από το διάλυμα, καθώς θερμαίνεται από τη θερμότητα που απορρίφθηκε από το επάνω τμήμα του απορροφητή. Στο κάτω τμήμα του αναγεννητή, το διάλυμα θερμαίνεται ακόμα περισσότερο καθώς τροφοδοτείται με θερμότητα από εξωτερική πηγή.[5]

2.10.4 Κύκλος ψύξης με απορρόφηση που χρησιμοποιεί ανάκτηση θερμότητας από τον απορροφητή.

Έχει ήδη αναφερθεί νωρίτερα ότι η χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας διαλύματος βελτιώνει το COP του συστήματος. Το πλούσιο διάλυμα από τον απορροφητή μπορεί να προθερμανθεί πριν να εισέλθει στον αναγεννητή μέσω του θερμού φτωχού διαλύματος που φεύγει από αυτόν. Χρησιμοποιώντας ανάκτηση θερμότητας του απορροφητή η θερμοκρασία του φτωχού διαλύματος μπορεί να αυξηθεί περισσότερο.

Όπως και στο σύστημα GAX, ο απορροφητής χωρίζεται σε δύο τμήματα. Η θερμότητα απορρίπτεται σε μια διαφορετική θερμοκρασία. Το τμήμα με τη χαμηλότερη θερμοκρασία απορρίπτει τη θερμότητα στο περιβάλλον ως συνήθως. Όμως το τμήμα με την υψηλότερη θερμοκρασία χρησιμοποιείται για να προθερμάνει το πλούσιο διάλυμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 17. Συνεπώς, η θερμότητα τροφοδοσίας στον αναγεννητή ελαττώνεται προκαλώντας αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς. Αυτό το σύστημα μελετήθηκε θεωρητικά χρησιμοποιώντας διάφορα εργαζόμενα μέσα όπως τα $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ και $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ και βρέθηκε ότι μπορεί να βελτιώσει τον συντελεστή συμπεριφοράς ως και 10%. Παρ' όλ' αυτά δεν έχει κατασκευαστεί ακόμα μηχανή με τέτοιο σχεδιασμό απορροφητή.[5]

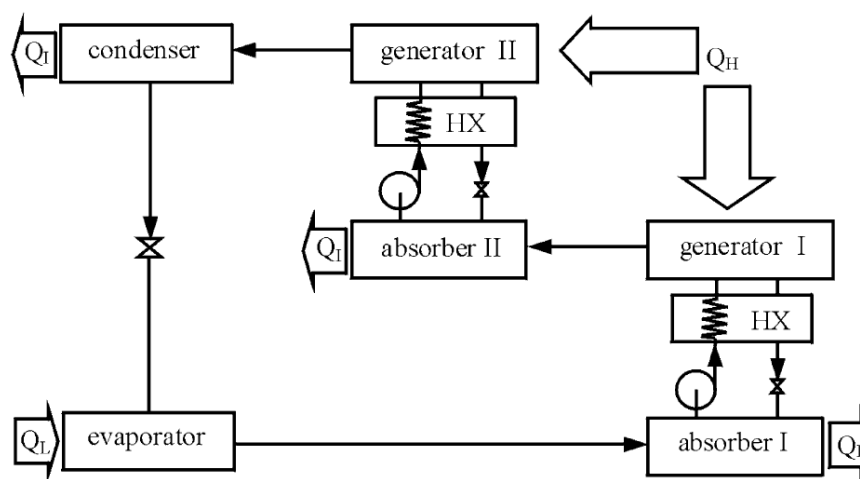


Εικόνα 18 Ο κύκλος με ανάκτηση θερμότητας από τον απορροφητή χρησιμοποιεί θερμότητα από τον απορροφητή για να προθερμάνει το ρεύμα που κινείται από τον απορροφητή προς τον αναγεννητή.

2.10.5 Κύκλος ψύξης με απορρόφηση μισού σταδίου

Πρέπει να σημειωθεί ότι οποιοδήποτε σύστημα ψύξης με απορρόφηση μπορεί να λειτουργήσει μόνο όταν το διάλυμα στον απορροφητή είναι πιο πλούσιο σε ατμό ψυκτικού μέσου απ' ότι αυτό στον αναγεννητή. Όταν η αυξάνεται θερμοκρασία ή μειώνεται η πίεση, η σύσταση του διαλύματος σε ψυκτικό μέσο μειώνεται, και αντίστροφα. Όταν η θερμοκρασία του αναγεννητή μειώνεται, η αναλογία του διαλύματος που ανακυκλοφορεί αυξάνεται, προκαλώντας πτώση του συντελεστή συμπεριφοράς. Αν αυτός είναι πολύ χαμηλός, το σύστημα δεν μπορεί πλέον να λειτουργήσει.

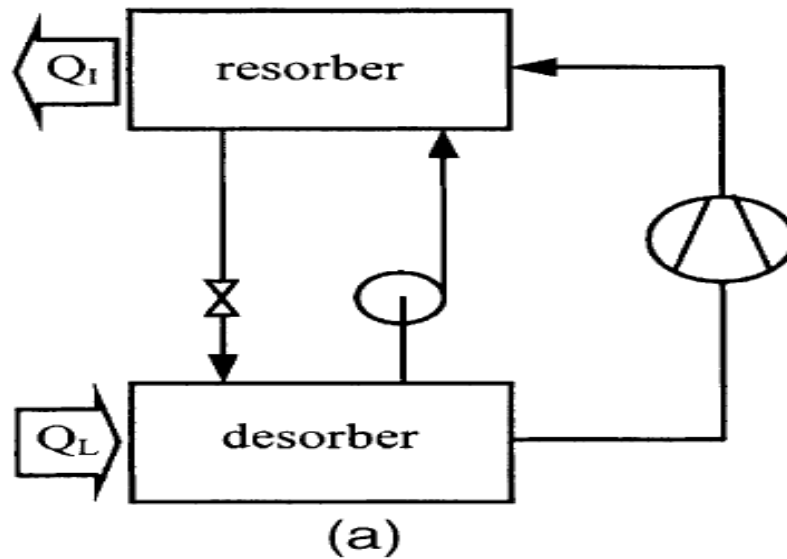
Το σύστημα απορρόφησης μισού σταδίου δημιουργήθηκε για μια εφαρμογή με σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας πηγή θερμότητας. Η εικόνα 18 δείχνει ένα διάγραμμα ενός κύκλου ψύξης με απορρόφηση μισού σταδίου. Η διαμόρφωση του συστήματος είναι ακριβώς η ίδια με ένα διβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση που χρησιμοποιεί $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ (όπως φαίνεται στην εικόνα 14), αλλά οι κατευθύνσεις ροής της θερμότητας είναι διαφορετικές. Σύμφωνα με την εικόνα 18, θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας μεταφέρεται από μια εξωτερική πηγή και στους δύο αναγεννητές. Και οι δύο απορροφητές απορρίπτουν θερμότητα στο περιβάλλον. Ο απορροφητής II και ο αναγεννητής I λειτουργούν σε μια ενδιάμεση πίεση. Συνεπώς, ο βαθμός ανακυκλοφορίας μεταξύ του αναγεννητή I και του απορροφητή I, και του αναγεννητή II και του απορροφητή II μπορούν να διατηρηθούν σε αποδεκτά επίπεδα. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς του συστήματος ψύξης με απορρόφηση μισού σταδίου είναι σχετικά χαμηλός, αφού απορρίπτει περίπου 50% περισσότερη θερμότητα από το μονοβάθμιο σύστημα ψύξης με απορρόφηση. Παρ' όλ' αυτά μπορεί να λειτουργήσει με, σχετικά, χαμηλής θερμοκρασίας πηγή θερμότητας. [5]



Εικόνα 19 Ο κύκλος ψύξης με απορρόφηση μισού σταδίου είναι συνδυασμός δύο μονοβάθμιων κύκλων ψύξης με απορρόφηση που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα πίεσης.

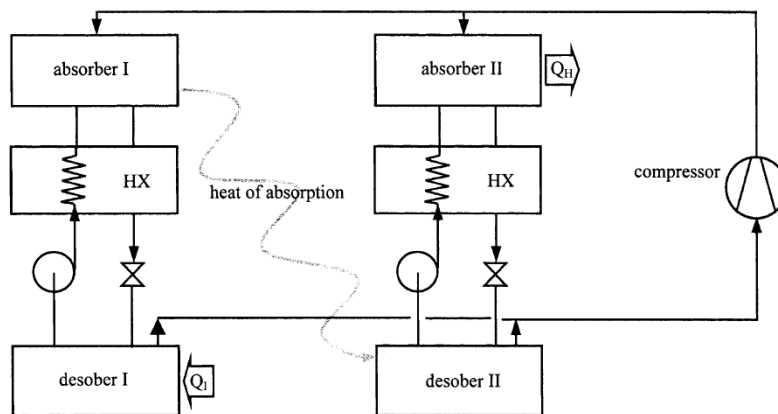
2.10.6 Συνδυασμένος κύκλος απορρόφησης - συμπίεσης ατμού

Αυτό το σύστημα είναι γνωστό ως σύστημα απορρόφησης - συμπίεσης. Ένα τυπικό σύστημα απορρόφησης/συμπίεσης παρουσιάζεται στην εικόνα 19. Όπως φαίνεται, ο συμπυκνωτής και ο ατμοποιητής ενός συμβατικού συστήματος συμπίεσης ατμού έχουν αντικατασταθεί με έναν αναρροφητή (απορροφητή ατμού) και έναν εκροφητή (γεννήτρια ατμού). Για δεδομένη θερμοκρασία περιβάλλοντος και θερμοκρασία ψύξης, η διαφορά πίεσης στο συμπιεστή είναι πολύ χαμηλότερη σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα συμπίεσης ατμού. Έτσι, ο συντελεστής συμπεριφοράς αναμένεται να είναι καλύτερος από αυτόν ενός συμβατικού συστήματος συμπίεσης ατμού. Ο Altenkirch έκανε την πρώτη έρευνα το 1950 και πρότεινε μια λύση για εξοικονόμηση ενέργειας. Ο κύκλος μπορεί να ρυθμιστεί σαν ένας κύκλος αντλίας θερμότητας.



Εικόνα 20 Συνδυασμένος κύκλος απορρόφησης-συμπίεσης ατμού.

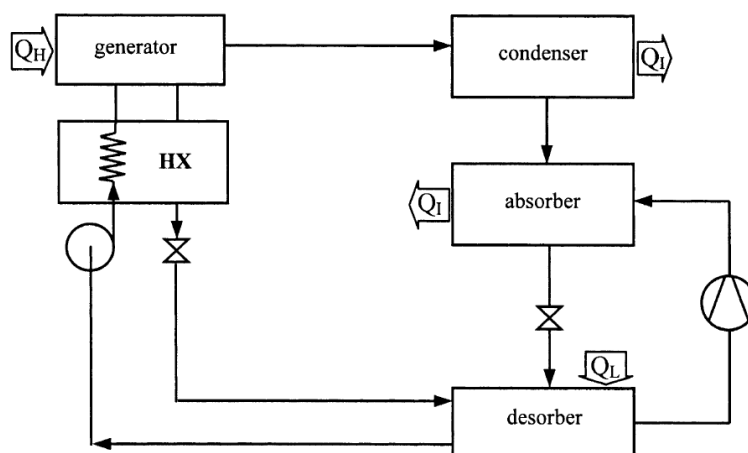
Μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή είναι ο διβάθμιος κύκλος απορρόφησης / συμπίεσης όπως φαίνεται στην εικόνα 20. Η απορριπτόμενη θερμότητα του απορροφητή κατά το πρώτο στάδιο χρησιμοποιείται ως θερμότητα τροφοδοσίας στον αναγεννητή του δευτέρου σταδίου. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται εσωτερικά πράγμα που υπερνικά τη μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά στην ενδιάμεση πίεση. Αυτή η ιδέα έχει αποδειχτεί επιτυχημένη από διάφορες μελέτες.



Εικόνα 21 Διβάθμιος κύκλος απορρόφησης- συμπίεσης που λειτουργεί σαν αντλία θερμότητας. Η θερμότητα απορρόφησης στο πρώτο στάδιο θα τροφοδοτηθεί στο δεύτερο στάδιο για το διαχωρισμό του ψυκτικού μέσου.

Μια ακόμη τροποποίηση του κύκλου απορρόφησης/συμπίεσης ατμού, η οποία προτάθηκε από τον Cacciola, παριστάνεται στην εικόνα 21 και περιλαμβάνει δύο συνδυασμούς εργαζόμενων μέσων, $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ και $\text{H}_2\text{O}/\text{KHO}$. Αυτός είναι ένας συμβιβασμός των κύκλων νερού/ NH_3 και KHO / νερού. Η μέγιστη πίεση του συστήματος μειώνεται και το

rectifier του συστήματος NH₃/H₂O παραλείπεται. Ο κύκλος αυτός μπορεί να λειτουργήσει με θερμοκρασία περιβάλλοντος χαμηλότερη των 0 °C χωρίς προβλήματα παγετού και κρυσταλλοποίησης.



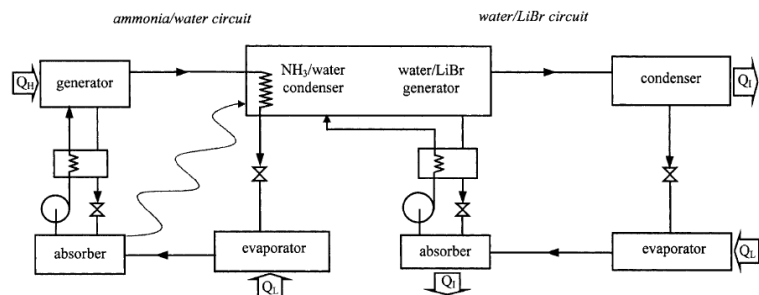
Εικόνα 22 Ο συνδυασμένος κύκλος που προτάθηκε από τον Cacciola και περιλαμβάνει δύο συνδυασμούς εργαζόμενων μέσων. Το rectifier απουσιάζει και η μέγιστη πίεση έχει μειωθεί.

Τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα ενός κύκλου απορρόφησης/συμπύεσης με άμεση εναλλαγή θερμότητας ανάμεσα στον εκροφητή και τον απορροφητή παρουσιάστηκαν από τους Groll και Radermacher. Αυτό είναι ένα τροποποιημένο σχέδιο από ένα διβάθμιο κύκλωμα διαλύματος που προτάθηκε από τους Rane και Radermacher και. Αυτή η τεχνολογία αποτέλεσε τη βάση για τη μελέτη του κύκλου GAX στη σύγχρονη εποχή.

Στις μέρες μας, έχουν παρουσιαστεί διάφοροι σχεδιασμοί συνδυασμένων κύκλων απορρόφησης / συμπύεσης, οι οποίοι μπορούν να παράγουν ελκυστικά υψηλούς συντελεστές συμπεριφοράς. Παρ' όλ' αυτά, είναι πολύπλοκοι και η ενέργεια με την οποία πρέπει να τροφοδοτηθούν είναι σε μορφή μηχανικού έργου. Έτσι, δεν μπορούν να θεωρηθούν ως ένα σύστημα λειτουργίας με θερμότητα.[5]

2.10.7 Σύστημα ψύξης με απορρόφηση διπλού κύκλου

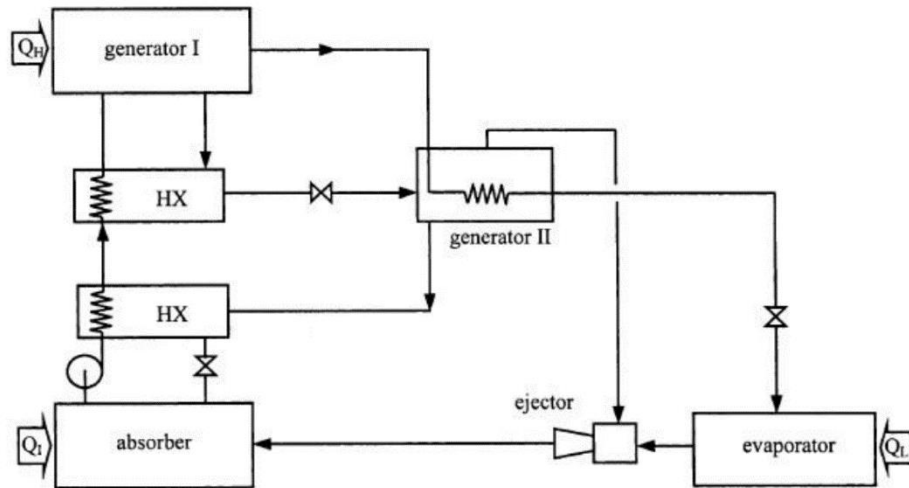
Η ιδέα του συστήματος ψύξης με απορρόφηση διπλού κύκλου είναι όμοια με αυτή ενός διβάθμιου συστήματος ψύξης με απορρόφηση εν παραλλήλω, όμως το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο εντελώς ξεχωριστούς κύκλους που χρησιμοποιούν διαφορετικά είδη εργαζόμενων μέσων. Ο Hanna εφηύρε ένα σύστημα διπλού κύκλου ψύξης με απορρόφηση και αντλία θερμότητας όπως φαίνεται στην εικόνα 22. Αυτό το σύστημα αποτελείται από δύο μονοβάθμιους κύκλους απορρόφησης που χρησιμοποιούν NH₃/H₂O και H₂O/ LiBr. Το σύστημα της αμμωνίας τροφοδοτείται από θερμότητα που εξασφαλίζεται από μια εξωτερική πηγή θερμότητας. Η θερμότητα, που απορρίπτεται από τον απορροφητή και τον συμπυκνωτή του συστήματος αμμωνίας, χρησιμοποιείται για να τροφοδοτηθεί το σύστημα H₂O/LiBr. Το σύστημα H₂O/LiBr απορρίπτει θερμότητα στο περιβάλλον από το συμπυκνωτή και τον απορροφητή ως συνήθως. Ψύξη επιτυγχάνεται και στους δύο ατμοποιητές.[5]



Εικόνα 23 Διπλός κύκλος απορρόφησης που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια και χρειάζεται δύο διαφορετικά εργαζόμενα μέσα όπως $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ και $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$. Η θερμότητα από την απορρόφηση και τη συμπύκνωση από τον κύκλο $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ παρέχονται στον αναγεννητή του κύκλου $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$.

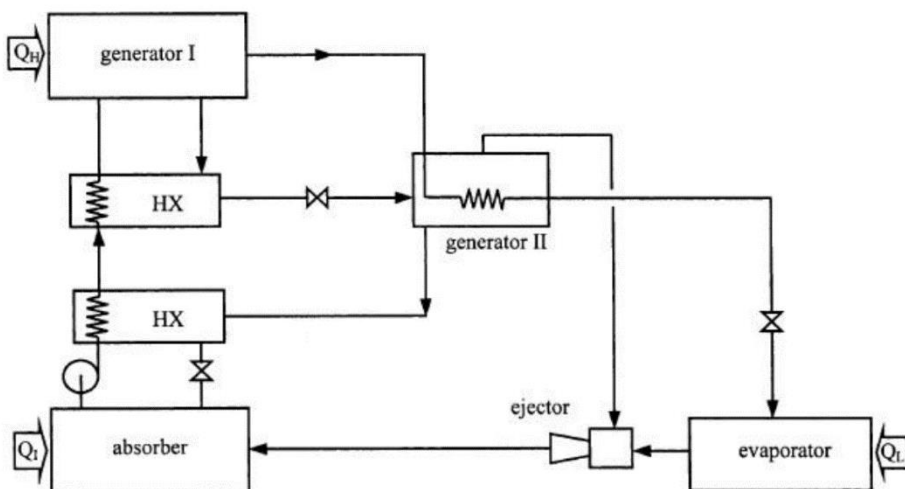
2.10.8 Συνδυασμένος κύκλος ψύξης ψεκαστήρα – απορρόφησης

Ένας ψεκαστήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την απόδοση ενός συστήματος ψύξης με απορρόφηση. Μια αξιοσημείωτη προσέγγιση, που επινοήθηκε από τον Kuhlenschmidt, φαίνεται στην εικόνα 23. Σκοπός είναι να αναπτυχθεί ένα σύστημα απορρόφησης το οποίο χρησιμοποιεί εργαζόμενο μέσο, που να βασίζεται σε απορροφητικό μέσο άλατος, ικανό να λειτουργήσει σε χαμηλές θερμοκρασίες ατμοποιητή και αερόψυκτο απορροφητή. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί δύο αναγεννητές, όμοιους με αυτούς που χρησιμοποιεί ένα διβάθμιο σύστημα απορρόφησης. Ωστόσο, σε αντίθεση με ένα συμβατικό διβάθμιο σύστημα απορρόφησης, ο χαμηλής πίεσης ατμός ψυκτικού μέσου, που φεύγει από το δεύτερο αναγεννητή, χρησιμοποιείται ως κινούν ρευστό για τον ψεκαστήρα στον οποίο εισέρχεται ατμός ψυκτικού μέσου από τον ατμοποιητή. Ο ψεκαστήρας εκτονώνεται στον απορροφητή, προκαλώντας έτσι αύξηση της πίεσης του απορροφητή κατά ένα επίπεδο μεγαλύτερο από τη πίεση του ατμοποιητή. Ως εκ τούτου, η συγκέντρωση του διαλύματος μέσα στον απορροφητή μπορεί να αποτρέψει την κρυσταλλοποίηση, όταν το σύστημα πρέπει να λειτουργήσει με χαμηλή θερμοκρασία ατμοποιητή ή με υψηλή θερμοκρασία απορροφητή (όπως σε μια αερόψυκτη μονάδα). Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει συμπυκνωτής στο σύστημα, καθώς ο ατμός του ψυκτικού μέσου που βρίσκεται σε υψηλή πίεση συμπυκνώνεται στο δεύτερο αναγεννητή και ο ατμός του ψυκτικού μέσου, που βρίσκεται σε χαμηλή πίεση, χρησιμοποιείται σαν το κινούν ρευστό για τον ψεκαστήρα. Παρά την απουσία θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων γι' αυτό το σύστημα, αναμένεται ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς αυτού του συστήματος δεν θα είναι υψηλότερος από αυτόν ενός μονοβάθμιου συστήματος ψύξης με απορρόφηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα μέρος του ατμού ψυκτικού μέσου πηγαίνει απ' ευθείας στον απορροφητή χωρίς να παράγει ψυκτικό έργο. Επιπλέον, ο απορροφητής που χρησιμοποιείται πρέπει να έχει μια πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα απορρόφησης σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο σύστημα απορρόφησης με την ίδια ψυκτική ικανότητα.



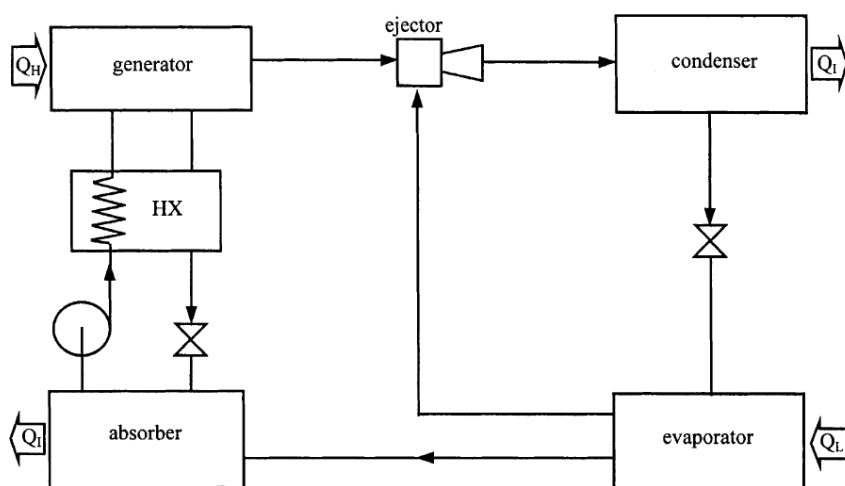
Εικόνα 24 Τροποποιημένος συνδυασμένος κύκλος ψύξης ψεκαστήρα-απορρόφησης που δεν περιλαμβάνει συμπυκνωτή.

Μια άλλη προσέγγιση της χρήσης ψεκαστήρα με σύστημα απορρόφησης παρουσιάστηκε από τους Chung και Chen και φαίνεται στην εικόνα 24. Όμοια με τον Kuhlenschmidt, ένας ψεκαστήρας χρησιμοποιείται για να διατηρεί την πίεση του απορροφητή ένα επίπεδο πάνω από την πίεση του ατμοποιητή. Σε αντίθεση με το προηγούμενο σύστημα, το κινούν ρευστό για τον ψεκαστήρα είναι το υψηλής πίεσης υγρό διάλυμα από τον αναγεννητή. Γι' αυτό το λόγο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ψυκτικό μέσο υψηλής πίεσης και πυκνότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί ένας ψεκαστήρας που τροφοδοτείται με υγρό δεν είναι κατάλληλος να λειτουργεί με χαμηλής πυκνότητας ατμό όπως ο ατμός του νερού, όπως στην περίπτωση των συστημάτων που χρησιμοποιούν $H_2O/LiBr$. Πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι χρησιμοποιώντας $DMETEG/R22$ και $DMETEG/R21$ σαν εργαζόμενα μέσα, η αναλογία πίεσης μεταξύ του απορροφητή και του ατμοποιητή ήταν 1.2. Η αύξηση στην πίεση του απορροφητή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κυκλοφορίας του διαλύματος χαμηλότερα από αυτή ενός συμβατικού συστήματος κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Έτσι, αναμένεται βελτίωση στο συντελεστή συμπεριφοράς.



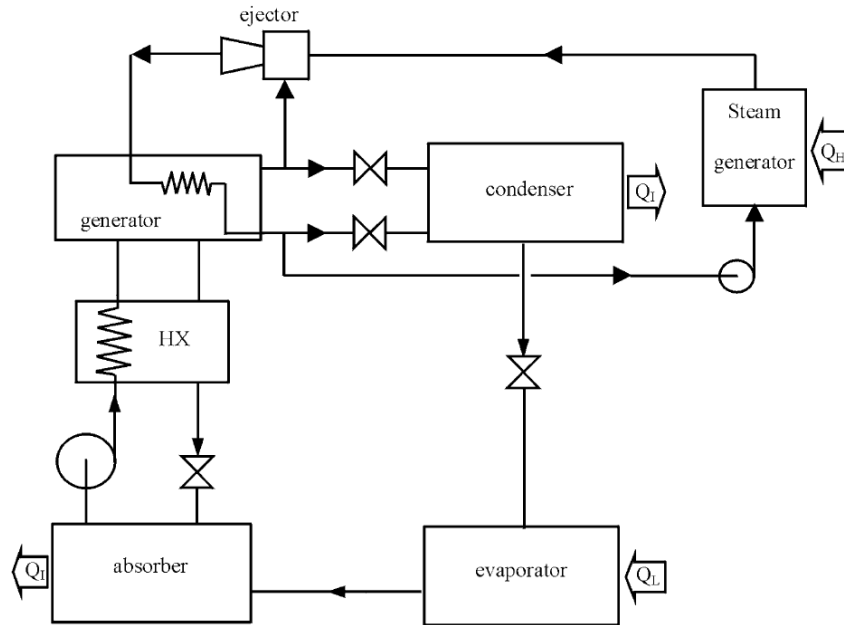
Εικόνα 25 Συνδυασμένο σύστημα ψεκαστήρα/απορρόφησης που χρησιμοποιεί $DMETEG/R22$ και $DMETEG/R21$ ως εργαζόμενα ρευστά. Το πλούσιο διάλυμα από τη γεννήτρια λειτουργεί ως πρωτεύον ρευστό και ο ψυκτικός ατμός από τον ατμοποιητή ως δευτερεύον ρευστό.

Μια άλλη προσέγγιση που προτάθηκε από τους Arhonoratana και Eames φαίνεται στην εικόνα 25. Ένας ψεκαστήρας τοποθετείται μεταξύ του αναγεννητή και του συμπυκνωτή ενός μονοβάθμιου συστήματος απορρόφησης. Σαν εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται $H_2O/LiBr$. Ο ψεκαστήρας χρησιμοποιεί υψηλής πίεσης υδρατμό από τον αναγεννητή σαν κινούν υγρό. Έτσι ο αναγεννητής λειτουργεί σε μια πίεση υψηλότερη του συμπυκνωτή. Αυτό επιτρέπει στη θερμοκρασία του διαλύματος να αυξηθεί χωρίς κίνδυνο κρυσταλλοποίησης. Αν η θερμοκρασία και η πίεση αυξηθούν ταυτόχρονα, η συγκέντρωση του διαλύματος παραμένει σταθερή και μόνο η θερμότητα εισόδου στην ατμογεννήτρια αυξάνεται ελαφρώς. Ο ψεκαστήρας εισάγει ατμό ψυκτικού μέσου από τον ατμοποιητή και έτσι παράγεται περισσότερη ψύξη. Ο συντελεστής συμπεριφοράς αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα μονοβάθμιας απορρόφησης. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι προκύπτουν υψηλοί συντελεστές συμπεριφοράς, από 0.86 έως 1.04. Το σύστημα αυτό πρέπει να λειτουργεί με μια υψηλής θερμοκρασίας πηγή θερμότητας ($190\text{ }^\circ\text{C}$ έως $210\text{ }^\circ\text{C}$) και αποδεκτή θερμοκρασία περιβάλλοντος, όμως η θερμοκρασία του αναγεννητή είναι υψηλή και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα διάβρωσης των υλικών κατασκευής.



Εικόνα 26 Συνδυασμένος κύκλος ψεκαστήρα/απορρόφησης που προτάθηκε από τους Arhonoratana and Eames. Υψηλής πίεσης ψυκτικός υδρατμός από τον αναγεννητή εισέρχεται στον ψεκαστήρα ως κινούν ρευστό για να μεταφέρει τον ψυκτικό υδρατμό από τον ατμοποιητή.

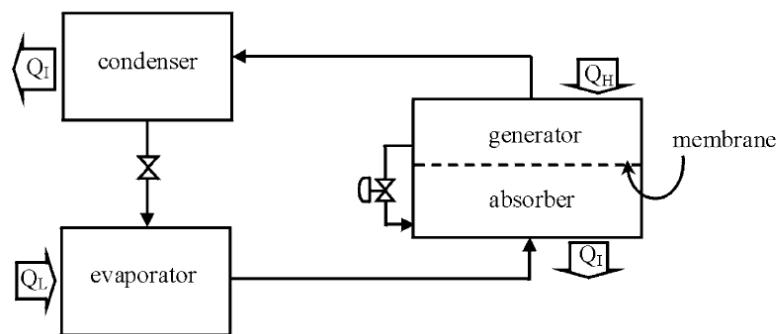
Η προσέγγιση που προτάθηκε από τους Eames και Wu φαίνεται στην εικόνα 26. Πρόκειται για ένα συνδυασμένο κύκλο μεταξύ μιας αντλίας θερμότητας με ψεκαστήρα ατμού και ενός μονοβάθμιου κύκλου απορρόφησης. Η αντλία θερμότητας τροφοδοτεί με θερμότητα τον αναγεννητή του συστήματος απορρόφησης. Ο ατμός ψυκτικού μέσου που παράγεται στον αναγεννητή παρασύρεται από τον ψεκαστήρα ατμού και υγροποιείται με τον κινούν ατμό του ψεκαστήρα απορρίπτοντας θερμότητα στο διάλυμα στον αναγεννητή. Σε αυτό το σύστημα το πρόβλημα της διάβρωσης εξαλείφεται καθώς η μέγιστη θερμοκρασία του διαλύματος διατηρείται στους $80\text{ }^\circ\text{C}$. Η θερμότητα τροφοδοσίας (από εξωτερική πηγή) είναι της τάξεως των $200\text{ }^\circ\text{C}$. Ο πειραματικός COP του συστήματος έχει βρεθεί 1.03.[5]



Εικόνα 27 Συνδυασμένος κύκλος που προτάθηκε από τους Eames και Wu. Η υψηλότερη θερμοκρασία κυκλώματος διαλύματος διατηρείται περίπου στους 80°C και, ως εκ τούτου, περιορίζεται το πρόβλημα της διάβρωσης.

2.10.9 Κύκλος απορρόφησης με οσμωτική μεμβράνη

Αυτό το σύστημα όπως, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 27, προτάθηκε από τον Zerweck. Το σύστημα αποτελείται από ένα συμπυκνωτή και έναν ατμοποιητή, ως συνήθως. Το πλούσιο ψυκτικό διάλυμα στον απορροφητή και το αραιό ψυκτικό διάλυμα στον αναγεννητή διαχωρίζονται το ένα από το άλλο με τη χρήση μιας οσμωτικής μεμβράνης. Η οσμωτική μεμβράνη επιτρέπει μόνο στο ψυκτικό μέσο να περάσει. Συνεπώς, το ψυκτικό μέσο από τον απορροφητή μπορεί να μεταφερθεί στον αναγεννητή με μία οσμωτική διάχυση μέσω της μεμβράνης χωρίς καμία μηχανική αντλία.



Εικόνα 28 Ο κύκλος απορρόφησης με οσμωτική μεμβράνη απαιτεί θερμότητα για το διαχωρισμό του ψυκτικού μέσου και την παραγωγή διαφοράς πίεσης εντός του συστήματος.

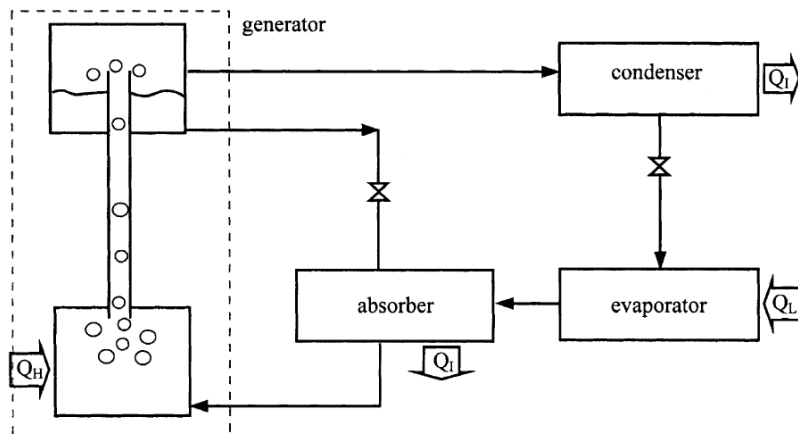
Η διαφορά πίεσης μέσα στον αναγεννητή και τον ατμοποιητή εξαρτάται επίσης από τον τύπο της μεμβράνης που χρησιμοποιείται. Κανονικά, η μεμβράνη δεν είναι τέλεια, το μέσο απορρόφησης από τον απορροφητή μπορεί να διαχυθεί μαζί με το ψυκτικό μέσο στον αναγεννητή. Συνεπώς, χρειάζεται μια βαλβίδα εξαέρωσης για να διατηρείται η συγκέντρωση του αραιού διαλύματος στον απορροφητή. Στην πραγματικότητα η μεμβράνη πρέπει να είναι ικανή να αντιμετωπίσει όλες τις συνθήκες λειτουργίας: πίεση, θερμοκρασία και εργαζόμενο μέσο. Η μεμβράνη θα πρέπει να ελαχιστοποιεί τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του αναγεννητή και του απορροφητή. Επιπλέον, μια βαλβίδα μπορεί να χρειαστεί για να διατηρηθεί η συγκέντρωση του αραιού διαλύματος στον απορροφητή αν η μεμβράνη έχει ατέλειες.[5]

2.10.10 Σύστημα απορρόφησης αυτόνομης κυκλοφορίας με χρήση H₂O/ LiBr

Ακόμη και αν η πρωταρχική ενέργεια για ένα σύστημα ψύξης με απορρόφηση είναι στη μορφή θερμότητας, εξακολουθεί να απαιτείται λίγη ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία της αντλίας κυκλοφορίας. Υπάρχουν μερικά συστήματα ψύξης με απορρόφηση που δεν χρειάζονται κάποια αντλία κυκλοφορίας. Σε ένα τέτοιο σύστημα, το εργαζόμενο μέσο κυκλοφορεί με φυσικό τρόπο λόγω επίδρασης του θερμοσίφωνα που είναι γνωστός ως αντλία φυσαλίδας.

Η Ιαπωνική Yazaki Inc. παρουσίασε ένα σύστημα ψύξης με απορρόφηση αυτόνομης κυκλοφορίας, που βασίζεται σε μονοβάθμιο σύστημα H₂O/ LiBr. Χρησιμοποιώντας το νερό ως ψυκτικό μέσο, η διαφορά πίεσης μεταξύ του συμπυκνωτή και του ατμοποιητή είναι πολύ χαμηλή και μπορεί να διατηρείται χρησιμοποιώντας την αρχή της υδροστατικής πίεσης. Το διάλυμα από τον απορροφητή μπορεί να κυκλοφορεί στον αναγεννητή από μια αντλία φυσαλίδας. Το φτωχό διάλυμα επιστρέφει με τη βοήθεια της βαρύτητας πίσω στον απορροφητή. Ένα σχηματικό διάγραμμα αυτού του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Λόγω επίδρασης της αντλίας φυσαλίδας, το διάλυμα θερμαίνεται και κυκλοφορεί την ίδια στιγμή. Οι Smith και Khahra διεξήγαγαν μία μελέτη σχετικά με τις επιδόσεις του ψύκτη απορρόφησης CH-900-B Yazaki με ψυκτικό μέσο το νερό, ο οποίος λειτουργεί με αέριο προπανίου.

Οι Eriksson και Jernqvist, ανέπτυξαν έναν μετατροπέα θερμότητας με απορρόφηση αυτόνομης κυκλοφορίας 10 kW χρησιμοποιώντας NaOH/H₂O. Λόγω της μεγάλης διαφοράς πίεσης και θερμοκρασίας μεταξύ του συμπυκνωτή και του ατμοποιητή, ο απορροφητής και ο ατμοποιητής βρίσκονται στα 7 και 10 μέτρα πιο κάτω από τον συμπυκνωτή και τον αναγεννητή, αντίστοιχα. Το πιο χαμηλό από το πιο υψηλό σημείο αυτής της μηχανής είναι 14 μέτρα που ισοδυναμεί με τη διαφορά πίεσης 1 bar εντός του συστήματος.



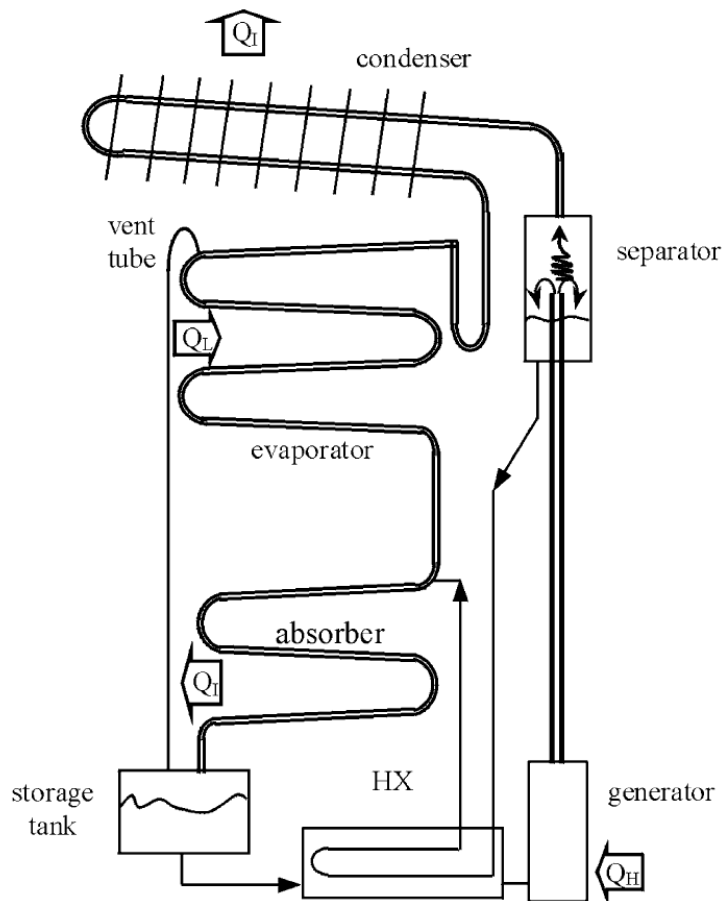
Εικόνα 29 Στο σχήμα φαίνεται η αντλία φυσαλίδας σε ένα μοντέλο αναγεννητή. Η πρόσδοση θερμότητας στον αναγεννητή χρησιμοποιείται και για την κυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου και για την ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου.

2.10.11 Ψυκτικό Σύστημα Διάχυσης-Απορρόφησης (DAR)

Το DAR είναι ένας άλλος τύπος συστήματος απορρόφησης με αυτόνομη κυκλοφορία που χρησιμοποιεί $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$. Η αμμωνία είναι το εργαζόμενο μέσο, ενώ η διαφορά πίεσης μεταξύ του συμπυκνωτή και του ατμοποιητή είναι πολύ μεγάλη για να αντιμετωπιστεί από την αντλία φυσαλίδας. Η ιδέα του DAR προτάθηκε από τους Platen και Munters, φοιτητές στο Royal Institute of Technology της Στοκχόλμης. Στην εικόνα 29 φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα αυτού του συστήματος. Ένα βοηθητικό αέριο προσδίδεται στον ατμοποιητή και τον απορροφητή. Επομένως, δεν υπάρχει διαφορά στην πίεση και δεν χρειάζεται αντλία φυσαλίδας. Η ψυκτική επίδραση λαμβάνεται με βάση την αρχή της μερικής πίεσης. Επειδή το βοηθητικό αέριο προσδίδεται στον ατμοποιητή και τον απορροφητή, η μερική πίεση της αμμωνίας τόσο στον ατμοποιητή όσο και στον απορροφητή διατηρείται αρκετά χαμηλή ώστε να ανταποκρίνεται με τη θερμοκρασία που απαιτείται στο εσωτερικό του ατμοποιητή. Το βοηθητικό αέριο πρέπει να είναι μη συμπυκνώσιμο όπως το υδρογόνο και το ήλιο.

Μια εξαιρετική δυνατότητα αυτού του συστήματος είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει σε χώρους όπου δεν υπάρχει διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Έχει χρησιμοποιηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα σε οικιακά ψυγεία. Δεν περιέχει κινητά μέρη, πράγμα που σημαίνει ότι δεν χρειάζεται συντήρηση και παράγει μικρότερο θόρυβο κατά τη λειτουργία του. Ωστόσο, στα παραδοσιακά μοντέλα, η ψυκτική του ικανότητα είναι πολύ μικρή, λιγότερο από 50 W. Με την ψυκτική αυτή ικανότητα, είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί ως ψυγείο σε δωμάτιο ξενοδοχείου ή σε οχήματα αναψυχής και δεν επαρκεί για εφαρμογές ψύξης χώρων.

Στις μέρες μας έχουν πραγματοποιηθεί τροποποιήσεις του παραδοσιακού μοντέλου όπως για παράδειγμα η ενίσχυση της απόδοσης του λέβητα, αλλάζοντας το βοηθητικό αέριο σε ήλιο. Το αρχικό DAR χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως βοηθητικό αέριο. Είναι γνωστό πως το υδρογόνο μπορεί να προκαλέσει κίνδυνο, εάν υπάρξει διαρροή. Το ήλιο είναι ένα εναλλακτικό βοηθητικό αέριο που παρουσιάστηκε για να αντικαταστήσει το υδρογόνο. [5]



Εικόνα 30 Σχηματικό διάγραμμα ψύκτη απορρόφησης διάχυσης (DXR). Αυτή η διάταξη έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως οικιακό ψυγείο καθώς δεν χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία του. NH_3/H_2O βοηθητικό αέριο προσδίδεται στη μηχανή ως εργαζόμενο μέσο.

Κεφάλαιο 3: Εργαζόμενα Μέσα

3.1 Εισαγωγή

Η θερμοδυναμική απόδοση ενός ψυκτικού συστήματος εξαρτάται κυρίως από τις θερμοκρασίες λειτουργίας του. Ωστόσο, σημαντικά πρακτικά ζητήματα όπως ο σχεδιασμός του συστήματος, το μέγεθος, το αρχικό και το λειτουργικό κόστος, η ασφάλεια, η αξιοπιστία και η δυνατότητα συντήρησης κ.λπ. εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του εργαζόμενου μέσου που επιλέγεται για μια δεδομένη εφαρμογή. Λόγω αρκετών περιβαλλοντικών ζητημάτων, όπως η εξάντληση του στρώματος του όζοντος, η υπερθέρμανση του πλανήτη και η σχέση τους με τα διάφορα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται, η επιλογή κατάλληλου εργαζόμενου μέσου έχει γίνει, πλέον, ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα. Η αντικατάσταση ενός υπάρχοντος εργαζόμενου μέσου από ένα εντελώς νέο, για οποιοδήποτε λόγο, είναι μια ακριβή πρόταση, καθώς μπορεί να απαιτήσει αρκετές αλλαγές στον σχεδιασμό και την κατασκευή ψυκτικών συστημάτων. Ως εκ τούτου, είναι πολύ σημαντικό να κατανοήσουμε τα ζητήματα που σχετίζονται με την επιλογή και τη χρήση εργαζόμενων μέσων.[7]

3.2 Κύρια και Δευτερεύοντα Ψυκτικά Μέσα

Τα υγρά, που είναι κατάλληλα για ψυκτικούς σκοπούς, μπορούν να ταξινομηθούν σε κύρια και δευτερεύοντα ψυκτικά μέσα. Τα κύρια ψυκτικά είναι αυτά τα υγρά, τα οποία χρησιμοποιούνται άμεσα ως εργαζόμενα υγρά, παραδείγματος χάριν σε συστήματα συμπίεσης ατμών και συστήματα ψύξης απορρόφησης ατμών. Όταν χρησιμοποιούνται σε συστήματα συμπίεσης ή απορρόφησης, αυτά τα υγρά παρέχουν ψύξη με την πραγματοποίηση μιας διαδικασίας αλλαγής φάσης στον ατμοποιητή. Όπως υποδηλώνει το όνομα, τα δευτερεύοντα ψυκτικά είναι εκείνα τα υγρά, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας από τη μια θέση στην άλλη. Τα δευτερεύοντα ψυκτικά είναι επίσης γνωστά υπό την ονομασία άλμη ή αντιψυκτικό. Φυσικά, εάν οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι πάνω από 0°C, τότε, ως δευτερογενές ψυκτικό, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί καθαρό νερό, όπως για παράδειγμα σε μεγάλα συστήματα κλιματισμού. Τα αντιψυκτικά ή η άλμη χρησιμοποιούνται, όταν απαιτείται ψύξη σε θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν. Σε αντίθεση με τα κύρια ψυκτικά μέσα, τα δευτερεύοντα ψυκτικά δεν υφίστανται αλλαγή φάσης καθώς μεταφέρουν ενέργεια από μια θέση σε άλλη. Μια σημαντική ιδιότητα ενός δευτερογενούς ψυκτικού μέσου είναι το σημείο πήξης του. Γενικά, το σημείο πήξης άλμης θα είναι χαμηλότερο από το σημείο πήξης των συστατικών του. Η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η πήξη της άλμης εξαρτάται από τη συγκέντρωσή της. Η συγκέντρωση στην οποία μπορεί να επιτευχθεί η χαμηλότερη θερμοκρασία χωρίς στερεοποίηση καλείται ως ευτηκτικό σημείο. Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα δευτερεύοντα ψυκτικά είναι τα διαλύματα ύδατος και αιθυλενογλυκόλης, προπυλενογλυκόλης ή χλωριούχου ασβεστίου. Αυτά τα διαλύματα είναι γνωστά με τη γενική ονομασία των άλμewν.[7]

3.3 Κριτήρια Επιλογής Εργαζόμενου Μέσου

Η επιλογή ψυκτικού μέσου για μία συγκεκριμένη εφαρμογή βασίζεται στα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- i. Θερμοδυναμικές και θερμοφυσικές ιδιότητες. [7]
- ii. Περιβαλλοντικές ιδιότητες και ιδιότητες ασφάλειας. [7]
- iii. Οικονομικά χαρακτηριστικά. [7]

3.3.1 Θερμοδυναμικές και Θερμοφυσικές Ιδιότητες

Οι προϋποθέσεις είναι [7]:

- a) Πίεση αναρρόφησης: Σε μια δεδομένη θερμοκρασία εξατμιστή, η πίεση κορεσμού πρέπει να είναι πάνω από την ατμοσφαιρική, ώστε να προλαμβάνεται η εισροή αέρα ή υγρασίας στο σύστημα και να διευκολύνεται η ανίχνευση διαρροών. Η υψηλότερη πίεση αναρρόφησης είναι επιθυμητή, καθώς οδηγεί σε μικρότερη μετατόπιση του συμπιεστή.
- b) Πίεση κατάθλιψης: Σε δεδομένη θερμοκρασία συμπυκνωτή, η πίεση κατάθλιψης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη ώστε να επιτρέπει την ελαφριά κατασκευή του συμπιεστή, του συμπυκνωτή κλπ.
- c) Λόγος πίεσης: Πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος για υψηλή ογκομετρική απόδοση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.
- d) Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης: Πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ώστε η απαιτούμενη παροχή μάζας ανά μονάδα ψυκτικής ικανότητας να είναι μικρή.

Οι παραπάνω απαιτήσεις είναι κάπως αντιφατικές, καθώς οι πιέσεις λειτουργίας, οι θερμοκρασίες και η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως σχετίζονται με την εξίσωση Clausius-Clapeyron:

$$\ln(P_{sat}) = -\frac{h_{fg}}{RT} + \frac{s_{fg}}{R}$$

Στην παραπάνω εξίσωση, το P_{sat} είναι η πίεση κορεσμού (σε atm.) σε θερμοκρασία T (σε Kelvin), h_{fg} και s_{fg} είναι η ενθαλπία και η εντροπία εξατμίσεως και το R είναι η σταθερά του αερίου. Δεδομένου ότι η μεταβολή στην εντροπία εξατμίσεως είναι σχετικά μικρή, από την παραπάνω εξίσωση μπορεί να δειχτεί ότι:

$$\frac{P_c}{P_e} = \exp\left[\frac{h_{fg}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_c}\right)\right]$$

Στην παραπάνω εξίσωση, οι P_c και P_e είναι οι πιέσεις συμπυκνωτή και ατμοποιητή, T_c και T_e είναι θερμοκρασίες συμπυκνωτή και ατμοποιητή. Από την παραπάνω εξίσωση, φαίνεται ότι για δεδομένες θερμοκρασίες συμπυκνωτή και ατμοποιητή, καθώς αυξάνεται η λανθάνουσα

θερμότητα εξατμίσης, αυξάνεται και ο λόγος πίεσης. Ως εκ τούτου απαιτείται ανταλλαγή μεταξύ της λανθάνουσας θερμότητας εξατμίσεως και του λόγου πίεσης.

Επί προσθέτως, οι ακόλουθες ιδιότητες είναι επίσης σημαντικές [7]:

- e) Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπίεστή: Θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος, έτσι ώστε η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη συμπίεση να είναι μικρή.
- f) Ειδική θερμότητα υγρού: Πρέπει να είναι μικρή, ώστε ο βαθμός υποψύξεως να είναι μεγάλος και να οδηγεί σε μικρότερη ποσότητα αερίου έκπλυσης στην είσοδο του ατμοποιητή.
- g) Ειδική θερμότητα ατμού: Πρέπει να είναι μεγάλη, ώστε ο βαθμός υπερθέρμανσης να είναι μικρός.
- h) Θερμική αγωγιμότητα: Η θερμική αγωγιμότητα τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια φάση θα πρέπει να είναι υψηλή για να οδηγεί σε υψηλότερους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας.
- i) Συνεκτικότητα: Η συνεκτικότητα πρέπει να είναι μικρή και στην υγρή και στην αέρια φάση για μικρότερη πτώση πίεσης λόγω τριβής.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες αλληλοσυνδέονται και εξαρτώνται κυρίως από το φυσιολογικό σημείο βρασμού, την κρίσιμη θερμοκρασία, το μοριακό βάρος και τη δομή.

Το κανονικό σημείο βρασμού υποδεικνύει τα χρήσιμα επίπεδα θερμοκρασίας καθώς σχετίζεται άμεσα με τις πιέσεις λειτουργίας. Μια υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία αποδίδει υψηλότερο COP λόγω της μικρότερης υπερθέρμανσης του συμπίεστή και των μικρότερων απωλειών αερίου έκπλυσης. Από την άλλη πλευρά, εφόσον η τάση ατμών είναι χαμηλή όταν η κρίσιμη θερμοκρασία είναι υψηλή, η ογκομετρική χωρητικότητα θα είναι χαμηλότερη για τα εργαζόμενα μέσα με υψηλές κρίσιμες θερμοκρασίες. Αυτό για άλλη μια φορά δείχνει την ανάγκη για αντιστάθμιση μεταξύ του υψηλού COP και της υψηλής ογκομετρικής χωρητικότητας. Παρατηρείται ότι για την πλειονότητα των εργαζόμενων μέσων η αναλογία του κανονικού σημείου βρασμού σε κρίσιμη θερμοκρασία κυμαίνεται από 0,6 έως 0,7. Έτσι, το κανονικό σημείο βρασμού είναι ένας καλός δείκτης της κρίσιμης θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου.

Οι σημαντικές ιδιότητες όπως η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης και η ειδική θερμότητα εξαρτώνται από το μοριακό βάρος και τη δομή του μορίου. Ο νόμος του Trouton δείχνει ότι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης θα είναι υψηλή για τα εργαζόμενα με μικρότερο μοριακό βάρος. Η ειδική θερμότητα του εργαζόμενου μέσου σχετίζεται με τη δομή του μορίου. Εάν η ειδική θερμότητα των ατμών του εργαζόμενου μέσου είναι χαμηλή τότε το σχήμα της καμπύλης ατμού θα είναι τέτοιο ώστε η διαδικασία συμπίεσης που αρχίζει με ένα κορεσμένο σημείο να τερματίζεται στην υπερθερμασμένη ζώνη (δηλ. Η διαδικασία συμπίεσης θα είναι ξηρή). Ωστόσο, μια μικρή τιμή ειδικής θερμότητας ατμού υποδεικνύει υψηλότερο βαθμό υπερθέρμανσης. Εφόσον οι ειδικές θερμότητες υγρού και ατμού συσχετίζονται, μια μεγάλη τιμή ειδικής θερμότητας ατμού έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη τιμή ειδικής θερμότητας υγρού, η οποία οδηγεί σε υψηλότερες απώλειες αερίου έκπλυσης. Οι μελέτες δείχνουν ότι γενικά η βέλτιστη τιμή της ειδικής θερμότητας του μοριακού ατμού κυμαίνεται από 40 έως 100 kJ / kmol.K.

Το σημείο πήξης του εργαζόμενου μέσου πρέπει να είναι χαμηλότερο από τη χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου για να αποφευχθεί η απόφραξη των αγωγών του εργαζόμενου μέσου.

3.3.2 Περιβαλλοντικές Ιδιότητες και Ιδιότητες Ασφάλειας

Μετά τις θερμοδυναμικές και θερμοφυσικές ιδιότητες, οι ιδιότητες περιβάλλοντος και ασφάλειας είναι πολύ σημαντικές. Στην πραγματικότητα, επί του παρόντος η φιλικότητα του εργαζόμενου μέσου προς το περιβάλλον είναι ένας σημαντικός παράγοντας για να αποφασιστεί η χρησιμότητα ενός συγκεκριμένου εργαζόμενου μέσου. Οι σημαντικές ιδιότητες περιβάλλοντος και ασφάλειας είναι[7]:

Ozone Depletion Potential (ODP): Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, το ODP των εργαζόμενων μέσων θα πρέπει να είναι μηδενικό, δηλ. Θα πρέπει να είναι ουσίες που δεν καταστρέφουν το όζον. Τα εργαζόμενα μέσα που έχουν μη μηδενικό ODP είτε έχουν ήδη καταργηθεί (π.χ. R11, R12) είτε θα καταργηθούν σταδιακά στο εγγύς μέλλον (π.χ. R22). Δεδομένου ότι το ODP εξαρτάται κυρίως από την παρουσία χλωρίου ή βρωμίου στα μόρια, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εργαζόμενα μέσα με χλωρίνη (δηλ. CFC και HCFC) ή βρώμιο στα πλαίσια των νέων κανονισμών

Global Warming Potential (GWP): Τα εργαζόμενα μέσα θα πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν χαμηλότερη τιμή GWP για να ελαχιστοποιηθεί το πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Τα εργαζόμενα μέσα με μηδενική ODP αλλά υψηλή τιμή GWP (π.χ. R134a) είναι πιθανό να ρυθμιστούν στο μέλλον.

Total Equivalent Warming Index (TEWI): Ο παράγοντας TEWI αφορά τόσο την άμεση (λόγω της έκλυσης στην ατμόσφαιρα) όσο και την έμμεση (μέσω της κατανάλωσης ενέργειας) συνεισφορά των εργαζόμενων μέσων στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Φυσικά, τα εργαζόμενα μέσα με χαμηλή τιμή TEWI είναι προτιμότερα από την άποψη της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Τοξικότητα: Ιδανικά, τα εργαζόμενα μέσα που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα ψύξης δεν πρέπει να είναι τοξικά. Ωστόσο, όλα τα άλλα υγρά, εκτός από τον αέρα, μπορούν να χαρακτηριστούν ως τοξικά καθώς προκαλούν ασφυξία όταν η συγκέντρωσή τους είναι αρκετά μεγάλη. Επομένως, η τοξικότητα είναι ένας σχετικός όρος, ο οποίος αποκτά νόημα μόνο όταν καθορίζεται ο βαθμός συγκέντρωσης και ο χρόνος έκθεσης που απαιτείται για την παραγωγή επιβλαβών επιδράσεων. Ορισμένα υγρά είναι τοξικά ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις. Ορισμένα υγρά είναι ήπια τοξικά, δηλαδή είναι επικίνδυνα μόνο όταν η συγκέντρωση και η διάρκεια της έκθεσης είναι μεγάλες. Ορισμένα εργαζόμενα μέσα όπως τα CFC και τα HCFC είναι μη τοξικά όταν αναμειγνύονται με τον αέρα σε κανονικές συνθήκες. Ωστόσο, όταν έρθουν σε επαφή με μια ανοικτή φλόγα ή ένα ηλεκτρικό στοιχείο θέρμανσης, αποσυντίθενται σχηματίζοντας πολύ τοξικά στοιχεία (π.χ. φωσγένιο-COCl₂). Γενικά ο βαθμός κινδύνου εξαρτάται από:

- Ποσότητα χρησιμοποιούμενου εργαζόμενου μέσου έναντι του συνολικού χώρου.
- Τύπος χρήσης.
- Παρουσία ανοιχτών φλογών.
- Οσμή εργαζόμενου μέσου.

- Συνθήκες συντήρησης.

Έτσι, όσον αφορά την τοξικότητα, η χρησιμότητα ενός συγκεκριμένου εργαζόμενου μέσου εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή.

Αναφλεξιμότητα: Τα εργαζόμενα μέσα θα πρέπει, κατά προτίμηση, να είναι μη εύφλεκτα και μη εκρηκτικά. Για εύφλεκτα εργαζόμενα μέσα πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις για την αποφυγή ατυχημάτων.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, η ASHRAE έχει κατατάξει τα εργαζόμενα μέσα σε έξι ομάδες ασφαλείας (A1 έως A3 και B1 έως B3). Τα εργαζόμενα μέσα που ανήκουν στην ομάδα A1 (π.χ. R11, R12, R22, R134a, R744, R718) είναι λιγότερο επικίνδυνα, ενώ τα εργαζόμενα μέσα που ανήκουν στην ομάδα B3 (π.χ. R1140) είναι πιο επικίνδυνα.

Άλλες σημαντικές ιδιότητες είναι [7]:

Χημική σταθερότητα: Τα εργαζόμενα μέσα θα πρέπει να είναι χημικά σταθερά, εφόσον βρίσκονται μέσα στο σύστημα ψύξης.

Συμβατότητα με κοινά υλικά κατασκευής (τόσο μέταλλα όσο και μη μέταλλα).

Αναμειξιμότητα με λιπαντικά έλαια: Εάν το εργαζόμενο μέσο δεν είναι αναμίξιμο με λιπαντικό λάδι (π.χ. αμμωνία) πρέπει να χρησιμοποιούνται διαχωριστές λαδιού. Τα εργαζόμενα μέσα που είναι εντελώς αναμίξιμα με έλαια είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμα (π.χ. R12). Ωστόσο, για εργαζόμενα μέσα με περιορισμένη διαλυτότητα (π.χ. R 22) πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις κατά το σχεδιασμό του συστήματος ώστε να εξασφαλιστεί η επιστροφή του ελαίου στον συμπιεστή.

Διηλεκτρική αντοχή: Αυτή είναι μια σημαντική ιδιότητα για τα συστήματα που χρησιμοποιούν ερμητικούς συμπιεστές. Για τα συστήματα αυτά, τα εργαζόμενα μέσα θα πρέπει να έχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή.

Ευκολία ανίχνευσης διαρροών: Σε περίπτωση διαρροής ψυκτικού από το σύστημα, θα πρέπει να είναι εύκολο να εντοπιστούν οι διαρροές.

3.3.3 Οικονομικά Χαρακτηριστικά

Το χρησιμοποιούμενο εργαζόμενο μέσο θα πρέπει να είναι φθινό και εύκολα διαθέσιμο [7].

Στη βιβλιογραφία προτείνονται πολλά εργαζόμενα μέσα. Μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε σχετικά με τα απορροφητικά μέσα που προμηθεύει η Marcriss έδειξε ότι υπάρχουν 40 χημικές ενώσεις ψυκτικών μέσων και 200 χημικές ενώσεις μέσων απορρόφησης. Ωστόσο, τα πιο κοινά εργαζόμενα μέσα είναι τα NH₃(ψυκτικό μέσο) / H₂O(μέσο απορρόφησης) και H₂O(ψυκτικό μέσο) / LiBr (μέσο απορρόφησης).

Κεφάλαιο 4: Εξέργεια

4.1 Εισαγωγή στην Εξέργεια

Όπου υπάρχει υπολογισμός ενεργειακών μεγεθών, υπάρχει παράλληλα μεγάλη σύγχυση στα μεγέθη που πρέπει να μετρηθούν και να εκτιμηθούν. Πολύ συχνά η λύση επιδιώκεται να δοθεί με νέες μονάδες μέτρησης όπως η Wh και οι τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου (Τ.Ι.Π.). Όμως και έτσι δημιουργούνται προβλήματα που έχουν να κάνουν με τη σύγχυση που προκαλείται από τις διαφορετικές μονάδες που μετρούν το ίδιο μέγεθος. Επιπλέον υπάρχει διαφοροποίηση των μονάδων από χώρα σε χώρα ανάλογα με το σύστημα που χρησιμοποιείται. Για διεργασίες που αφορούν μετατροπές ενέργειας πολλές φορές προκύπτουν έννοιες απόδοσης λανθασμένες που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Ο βασικός λόγος είναι ότι τέτοιες έννοιες δεν έχουν θεμελιώδη σύνδεση με το φυσικό περιβάλλον. Εντούτοις σε πολλές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στη θέρμανση ενός χώρου, το περιβάλλον παίζει το καθοριστικό ρόλο.

Η σχέση ανάμεσα στις φυσικές πρώτες ύλες και τις κοινωνικές και οικονομικές δομές συχνά παραμελείται από τους επιστήμονες, τους ερευνητές και τους οικονομολόγους. Από την άλλη μεριά, όσοι ασχολήθηκαν με τις φυσικές πρώτες ύλες δεν έδειξαν ενδιαφέρον στη σχέση αυτών με την κοινωνία και την οικονομία γενικά.

Υπάρχουν εντούτοις και εξαιρέσεις. Μερικοί έλαβαν υπό όψιν φυσικούς αλλά και κοινωνικό-οικονομικούς παράγοντες. Επιπλέον αναλύσεις που αφορούν οικολογικά θέματα έγιναν ιδιαίτερα διαδεδομένες τα τελευταία χρόνια. Πολλά εξαιρετικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα έχουν προκύψει από τις έρευνες αυτές. Είναι απαραίτητη η κατανόηση των διεργασιών μετατροπής ενέργειας και υλικών σε κάθε σχεδιασμό που αφορά το μέλλον. Το ενδιαφέρον σε τέτοια θέματα είναι σχετικά πρόσφατο. Για τη σωστή επιλογή ανάμεσα σε διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις και για μια αειφόρο ανάπτυξη χρειάζεται όλα αυτά να ληφθούν υπό όψιν. Κι αυτό γιατί οι ίδιες οι λειτουργίες της κοινωνίας είναι άμεσα συσχετισμένες με τις μετατροπές ενέργειας και ύλης στη φύση.[8]

4.2 Ορισμός της Έννοιας της Εξέργειας

Η εξέργεια είναι ένας όρος σχετικά πρόσφατος και είναι πιο συχνός στην τεχνική ορολογία. Αντιπροσωπεύει το διαθέσιμο προς εκμετάλλευση ποσό ενέργειας ενός συστήματος από το περιβάλλον, για παράδειγμα το ποσό του έργου που μπορεί να παράγει ένα μηχανικό σύστημα στο περιβάλλον του. Η έννοια της εξέργειας πηγάζει από την έννοια της εντροπίας.

Σε ένα σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εξάτμιση ρευστού και κίνηση στροβίλου, υπάρχουν μεγάλες διαφορές στη μεταβολή της ενέργειας και της εξέργειας. Τέτοιες θεωρήσεις μπορούν να γενικευτούν ακόμη και για τις ενεργειακές μετατροπές σε

μια κοινωνία. Η ανθρώπινη κοινωνία σήμερα, εξαρτάται από τις ροές εξέργειας των πεπερασμένων αποθεμάτων εξέργειας που βρίσκονται στη Γη και πιο συγκεκριμένα, σε πετρώματα, καύσιμα, άλλα κυρίως στις ανανεώσιμες πηγές εξέργειας όπως τα δάση που μετατρέπουν και εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια. Το κάθε άτομο, η κάθε ομάδα και όλη η κοινωνία εξαρτάται άμεσα από τις ροές αυτές.

Από τη φυσική περιγραφή της κοινωνίας μπορούν να γίνουν εκτιμήσεις της αποδοτικότητας και να συγκριθούν μεταξύ τους τα διάφορα αποτελέσματα που θα προκύψουν.

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της διεργασίας κάτω από κάποιους περιορισμούς. Όσον αφορά τη σχεδίαση ενός θερμικού συστήματος αυτό σημαίνει βελτιστοποίηση της μετατροπής και χρήση της ενέργειας και ως εκ τούτου ελαχιστοποίηση των απωλειών. Κρίσιμης σημασίας στη προσπάθεια αυτή είναι η συνειδητοποίηση του ότι :

1. Η ενέργεια χαρακτηρίζεται όχι μόνο από ποσότητα αλλά και από *ποιότητα*, δηλαδή ικανότητα ενός ποσού ενέργειας να παράγει χρήσιμο έργο, και
2. Κατά τις μετατροπές συχνά η ενέργεια υποβαθμίζεται, δηλαδή η ικανότητα παραγωγής χρήσιμου έργου από την ίδια ποσότητα ενέργειας μειώνεται. Μέρος της ικανότητας αυτής έχει καταστραφεί για πάντα, παρ' όλο που η ίδια ποσότητα ενέργειας εξακολουθεί, σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, να υπάρχει κάπου (είτε στο σύστημα είτε στο περιβάλλον).

Γενικά υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες μορφών: *διατεταγμένες* και *αδιάτακτες* μορφές. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η δυναμική ενέργεια και η διατεταγμένη κινητική ενέργεια (περιστρεφόμενος σφόνδυλος, δέσμη ιδανικού ρευστού). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν η εσωτερική ενέργεια, η χημική ενέργεια, η θερμική ακτινοβολία, η ενέργεια ρευστού σε τυρβώδη κίνηση. Οι διατεταγμένες μορφές ενέργειας έχουν τα ακόλουθα γνωρίσματα [8]:

- Πλήρης μετατροπή της μιας μορφής ενέργειας σε άλλη, αν η διεργασία είναι αντιστρεπτή.
- Η μεταφορά διατεταγμένης μορφής ενέργειας από ένα σύστημα σε ένα άλλο παρουσιάζεται σαν αλληλεπίδραση έργου και όχι θερμότητας.
- Κατά την αντιστρεπτή μεταφορά διατεταγμένης ενέργειας μεταξύ συστημάτων, οι εντροπίες των συστημάτων δε μεταβάλλονται. Η ανάλυση μπορεί να στηριχθεί στο πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, χωρίς τη χρήση του δεύτερου.
- Δεν απαιτούνται οι παράμετροι του περιβάλλοντος για τον υπολογισμό της διατεταγμένης ενέργειας που μεταφέρεται μεταξύ συστημάτων.

Μια αδιάτακτη μορφή ενέργειας είναι δυνατό να μετατραπεί σε διατεταγμένη μορφή με τη χρήση μιας μηχανής (πχ μια θερμική μηχανή). Τα συμπεράσματα τα οποία έχουν εξαχθεί για τη μεγιστοποίηση της μετατροπής αδιάτακτης σε διατεταγμένη μορφή ενέργειας είναι ότι :

- Οι χρησιμοποιούμενες διεργασίες πρέπει να είναι πλήρως αντιστρεπτές.

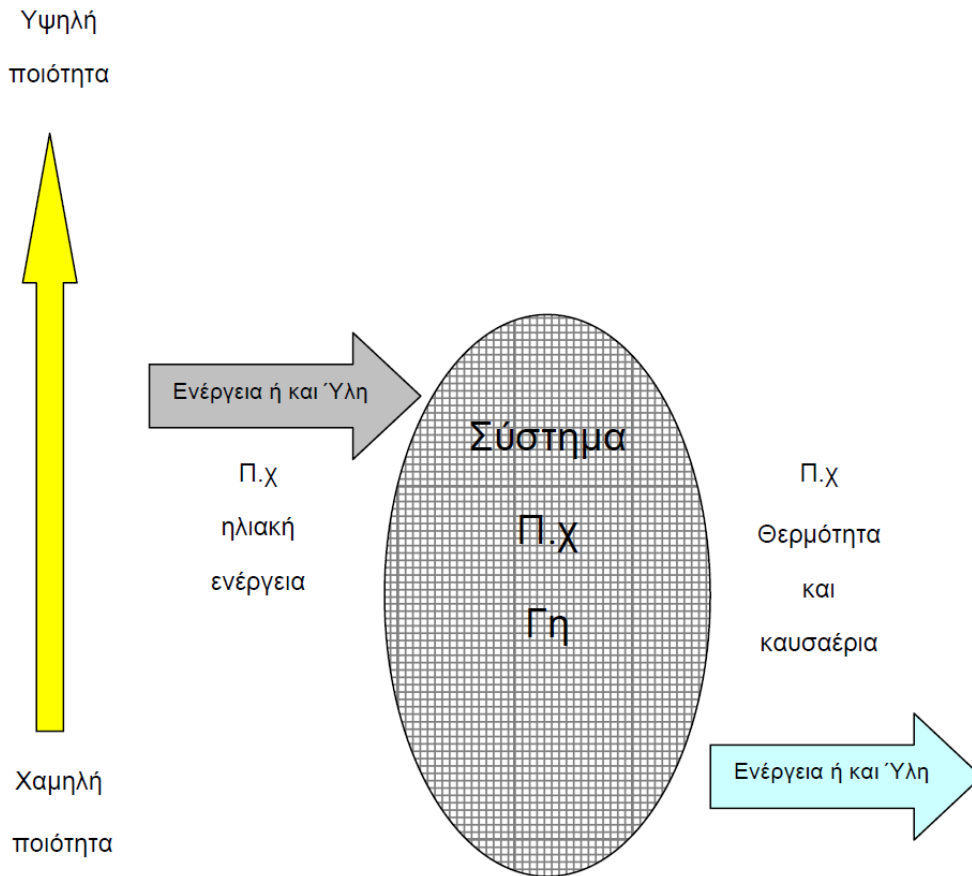
- Το ανώτατο όριο της μετατροπής εξαρτάται από θερμοδυναμικές παραμέτρους τόσο του συστήματος (στο οποίο είναι αποθηκευμένη η ενέργεια) όσο και του περιβάλλοντος.
- Η ανάλυση των διεργασιών απαιτεί τη χρήση του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου.
- Η μετατροπή συνοδεύεται, εν γένει, από αλλαγές στις εντροπίες των συστημάτων που συμμετέχουν.

4.3 Εξέργεια, Ύλη και Ποιότητα

Η ενέργεια και η ύλη δεν δημιουργούνται και δεν καταστρέφονται. Αυτός είναι ένας θεμελιώδης νόμος της φύσης. Δεν υπάρχουν δηλαδή πηγές ή καταβόθρες για την ενέργεια και την ύλη. Απλώς μπορούν να μετασχηματίζονται σε διαφορετικές μορφές. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της υποβάθμισης της ποιότητας. Τοπικά η ποιότητα μπορεί να βελτιώνεται αλλά αυτό μπορεί να συμβεί μόνο τη μεγαλύτερη υποβάθμιση της ποιότητας κάπου αλλού. Συνολικά είναι ένα θέμα συνεχούς υποβάθμισης της ποιότητας. Αυτό είναι επίσης θεμελιώδης νόμος της φύσης.

Η ροή ύλης και ενέργειας (εικόνα 30) σε ένα σύστημα οδηγείται σε συνεχή ελάττωση της ποιότητας. Η ροή πρέπει να ορίζεται επακριβώς στο χρόνο και στο χώρο. Καθώς υπάρχει ροή, μόνο ένα μικρό μέρος του μέσου εγκλωβίζεται στο σύστημα. Η κινητήριος δύναμη της ροής ενέργειας ή ύλης μέσα από το σύστημα είναι η ποιότητα. Αυτή συνεχώς χειροτερεύει καθώς πραγματοποιείται η ροή. Η ενέργεια και η ύλη απλώς υπηρετούν ως φορείς ποιότητας και είναι η τελευταία αυτή που καταναλώνεται κατά τη μετατροπή τους από τη μια μορφή στην άλλη. Σύμφωνα με αυτήν την οπτική πλευρά είναι εσφαλμένο να γίνεται λόγος για κατανάλωση και παραγωγή ενέργειας ή ύλης. Διότι είναι μόνο η ποιότητα αυτή που παράγεται ή καταναλώνεται. Για παράδειγμα αν ένα αυτοκίνητο μένει ακάλυπτο και σκουριάζει είναι η ποιότητα που καταστρέφεται και όχι η ύλη, γιατί αυτή παραμένει, θα συνδυαστεί με το περιβάλλον σε νέες χημικές ενώσεις, π.χ. σκουριά. Από οικονομικής πλευράς, η αξία του υλικού φθίνει και τελικά μηδενίζεται.

Ροές ενέργειας και ύλης μπορούν να θεωρηθούν ως διαφορετικά φαινόμενα που μεταφέρουν ποιότητα. Η διαφοροποίηση μεταξύ τους είναι συχνά ασαφής και προσεγγιστική. Μια ροή είναι συχνά ροή και ύλης και ενέργειας. [8]



Εικόνα 31 Ροή ενέργειας ή ύλης σε ένα σύστημα.

Η υποβάθμιση της ποιότητας είναι ισοδύναμη ουσιαστικά με την αύξηση εντροπίας. Σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο οι μετατροπές ενέργειας και ύλης πρέπει να γίνονται από μια κατάσταση χαμηλής θερμοδυναμικής πιθανότητας προς μια κατάσταση υψηλότερης. Η ενέργεια και η ύλη τείνουν να κατανεμηθούν προς ένα συνεχώς αυξανόμενο αριθμό πιθανών καταστάσεων. Παράδειγμα αυτού είναι μια ψυχρή και μια θερμή ροή αέρα που συναντώνται και όπου η ποιότητα και η αντίθεση καθορίζονται από τις διαφορές στη θερμοκρασία οι οποίες στη συνέχεια μηδενίζονται για μια ομοιόμορφη ροή. Η ομοιόμορφη ροή δεν έχει διαφορές θερμοκρασιών και ως εκ τούτου, χαμηλότερη ποιότητα από τις αρχικές ροές. Αυτό εκφράζεται ποσοτικά με στατιστική μηχανική ως μια αύξηση της εντροπίας του συστήματος. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τις ροές εισόδου και εξόδου και από τις διατάξεις μετατροπής που βρίσκονται ανάμεσά τους.

Η εντροπία που συμβολίζεται με S ισούται με:
$$S = k \cdot \sum_1^{\Omega} P_i \cdot \ln P_i$$

όπου με k συμβολίζεται η σταθερά του Boltzmann και δείχνει τον αριθμό των επιτρεπτών καταστάσεων του συστήματος και με P_i η πιθανότητα για κάθε επιτρεπτή κατάσταση,

τέτοια ώστε το άθροισμα να ισούται με 1:
$$S = k \cdot \sum_1^{\Omega} P_i = 1$$

Η πιθανότητα για μια κατάσταση μπορεί να συγκριθεί με τη γνώση του συνολικού συστήματος. Αν υπάρχει βεβαιότητα ότι το σύστημα είναι σε μια καθορισμένη κατάσταση,

η πιθανότητα για αυτήν την κατάσταση είναι ίση με 1. Η πιθανότητα για τις άλλες καταστάσεις είναι ίση με 0. Η γνώση της εντροπίας του συστήματος είναι τότε πλήρης και τότε αυτή είναι 0 ($S = 0$). Στην αντίθετη περίπτωση αν δεν υπήρχε καμία πληροφορία για το σύστημα τότε όλες οι δυνατές καταστάσεις θα ήταν ισοπίθανες. Ο αριθμός τους είναι Ω . Η πιθανότητα για κάθε μια θα είναι $1/\Omega$. Η εντροπία του συστήματος ισούται με $S = k \cdot \ln \Omega$. Αυτή είναι η μέγιστη εντροπία για κάθε σύστημα και δείχνει την πλήρη αταξία.

Η μετατροπή ενέργειας και ύλης που λαμβάνει χώρα σε έναν πεπερασμένο ρυθμό, αναπόφευκτα οδηγεί σε παραγωγή εντροπίας. Ο ρυθμός παραγωγής της αυξάνεται όσο αυξάνεται ο βαθμός μετατροπής. Μια μετατροπή που μπορεί να αντιστραφεί ονομάζεται αντιστρεπτή. Αυτή είναι απειροστά αργή αλλά δεν περιλαμβάνει απώλειες. Έτσι δεν παράγεται εντροπία. Είναι δυνατόν να υπάρχουν τοπικές μεταβολές της εντροπίας αλλά η συνολική παραγωγή είναι μηδενική. Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι σε μια αντιστρεπτή μεταβολή δεν υπάρχει συγκεκριμένη κατεύθυνση και ως εκ τούτου αυτή δεν ολοκληρώνεται ποτέ. Αντιστρεπτές μεταβολές δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα, παρά μόνο θεωρητικά. Όλες οι μεταβολές είναι μη αντιστρεπτές, που σημαίνει ότι πραγματοποιούνται με απώλειες. Έτσι, αυτές είναι αναπόφευκτες και ως ένα βαθμό, απαραίτητες. Κάθε επιθυμητή μεταβολή πρέπει να έχει κάποιες απώλειες όσο το δυνατόν μικρότερες. [8]

Μπορεί εδώ να δοθεί ένας ορισμός της εξέργειας ως εξής: **Η εξέργεια είναι το τμήμα της ενέργειας που είναι μετατρέψιμο σε όλες τις άλλες μορφές ενέργειας.** [8]

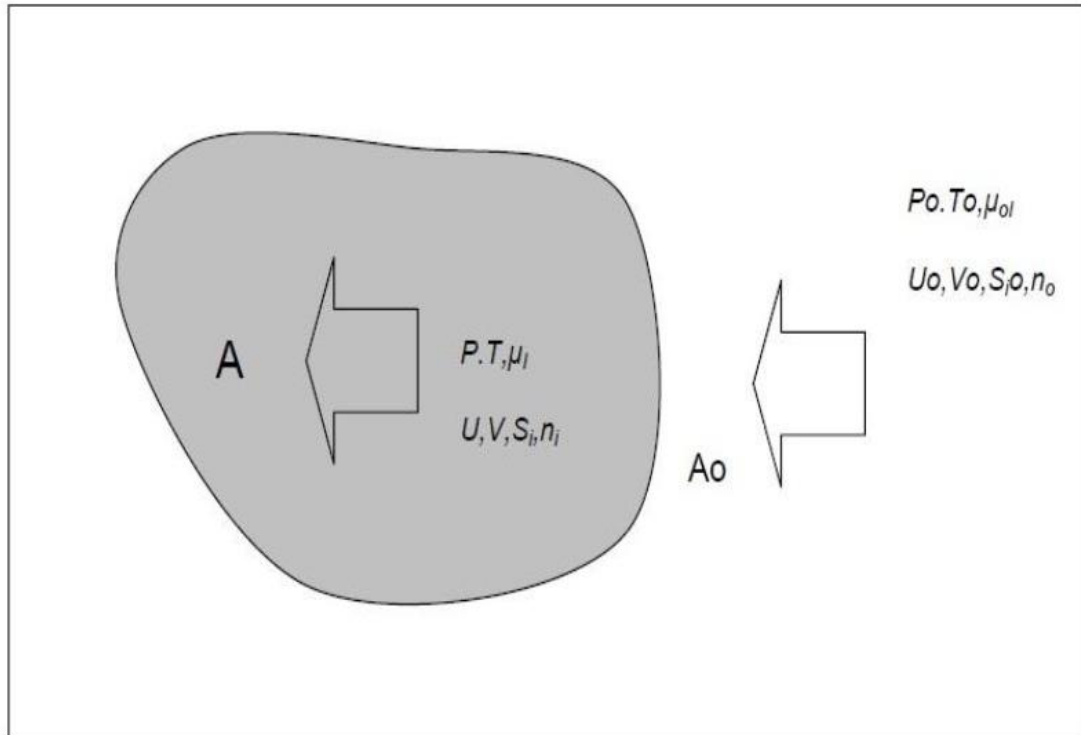
Η εξέργεια ενός συστήματος σε συγκεκριμένο περιβάλλον είναι η ποσότητα του μέγιστου μηχανικού έργου που μπορεί να αποβληθεί από το σύστημα σε αυτό το περιβάλλον. Μερικά παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι π.χ. συγκεκριμένη ποσότητα καυσίμου σε μια δεξαμενή ή ο θερμός αέρας που βρίσκεται μέσα σε ένα κτίριο το χειμώνα.

Ο ορισμός αυτός είναι πολύ γενικός και μπορεί να επεκταθεί για να συμπεριλάβει και την ύλη. Μια τέτοια επέκταση είναι πλήρως δικαιολογημένη. Μια συνηθισμένη μπαταρία παράδειγμα αποτελεί παράδειγμα μετατροπών ύλης από τη μια μορφή στην άλλη μέσω χημικών αντιδράσεων προσδίδοντας εξέργεια υπό τη μορφή ηλεκτρικού φορτίου.

Η εντροπία έχει αρνητική έννοια καθώς δείχνει έλλειψη ποιότητας. Μπορεί επομένως να δοθεί ο ορισμός της αρνητικής εντροπίας (negentropy) η οποία θα έχει θετική έννοια. Η αρνητική εντροπία γίνεται έτσι μονάδα μέτρησης της ποιότητας. Ελαττώνεται μαζί με την ποιότητα.

4.4 Θερμοδυναμική Προσέγγιση της Εξέργειας

Έστω το σχήμα στην εικόνα 31 στο οποίο φαίνονται το σύστημα A και το περιβάλλον A_0 , το οποίο θεωρείται ομογενές και πολύ μεγαλύτερο από το A. Το περιβάλλον A_0 , χαρακτηρίζεται από τα εντατικά μεγέθη T_0 , p_0 , και μ_0 , (θερμοκρασία, πίεση και χημικό δυναμικό). Οι αντίστοιχες παράμετροι για το A είναι τα U , V , S , και η_i , (εσωτερική ενέργεια, όγκος, εντροπία και αριθμός των moles των διαφόρων χημικών στοιχείων) και τα αντίστοιχα για το A_0 , είναι U_0 , V_0 , S_0 , και η_{i0} και υποτίθεται ότι είναι επίσης πολύ μεγαλύτερα από του A.



Εικόνα 32 Αλληλεπίδραση ενός συστήματος με το περιβάλλον του.

Το συνδεδεμένο σύστημα που αποτελείται από το A και το A₀ θεωρείται μονωμένο.

Έτσι λαμβάνεται μόνο έργο W και A και ισχύει:

$$dU + dU_0 + dW = 0$$

$$dV + dV_0 = 0$$

$$dn_i + dn_{i0}$$

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του A και του A₀ μπορεί να λάβει χώρα με έναν ελεγχόμενο τρόπο μέσα στο A. Αφού το A είναι μικρό, δεν αλλάζουν τα εντατικά μεγέθη του A₀.

Επομένως:

$$dT_0 = 0$$

$$dp_0 = 0$$

$$d\mu_{i0} = 0$$

Το διαφορικό της εντροπίας του περιβάλλοντος A₀ είναι:

$$dS_0 = \frac{dU_0 + p_0 \cdot dV_0 - \sum_i \mu_{i0} \cdot dn_{i0}}{T_0} = \frac{dU + p_0 \cdot dV - \sum_i \mu_{i0} \cdot dn_i}{T_0} - \frac{dW}{T_0}$$

Το συνολικό διαφορικό της εντροπίας και για το σύστημα και για το περιβάλλον είναι:

$$dS_{\text{ολ}} = dS + dS_0 = -\frac{1}{T_0} \cdot (dU + p_0 \cdot dV - \sum_i \mu_{i0} \cdot dn_i) - \frac{dW}{T_0}$$

Η τελευταία σχέση μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$dS_{ολ} = -\frac{1}{T_0} \cdot (dE + dW)$$

όπου εισάγεται η εξέργεια E και ισχύει:

$$E = S \cdot (T - T_0) - V \cdot (p - p_0) + \sum_i n_i \cdot (\mu_i - \mu_{i0})$$

η οποία δείχνει ότι η εξέργεια μηδενίζεται στην κατάσταση ισορροπίας ($T = T_0$, $p = p_0$, $i=i_0$).

Ας υποθέσουμε ότι ο A μεταβάλλεται προς την ισορροπία με το A_0 χωρίς να παράγει έργο ($dW=0$). Η εξέργεια μεταβάλλεται από E προς 0 και η συνολική εντροπία αλλάζει από $S_{ολ}$ προς $S_{ισ}^{ολ}$ (το ολ για ολικό και το ισ για την ισορροπία).

Χρησιμοποιώντας και την $S = k \cdot \sum_i P_i = 1$ λαμβάνει:

$$S_{ισ}^{ολ} - S^{ολ} = -\frac{(-E)}{T_0}$$

$$\text{Και έτσι: } E = T_0 \cdot (S_{ισ}^{ολ} - S^{ολ})$$

Αν οριστεί η αρνητική εντροπία Σ ως η διαφορά: $\Sigma = S_{ισ}^{ολ} - S^{ολ}$

τότε προκύπτει ότι: $\Sigma = T_0 \cdot \Sigma \geq 0$

Η εξέργεια του A επομένως είναι T_0 πολλαπλασιασμένη με την αρνητική εντροπία του A και του περιβάλλοντος του A_0 . Παρατηρεί κανείς ότι στον ορισμό της εξέργειας E μόνο τα εντατικά μεγέθη του A εμφανίζονται.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στην οποία επιτυγχάνεται ισορροπία, η εξέργεια μεταβάλλεται κατά -E. Έστω ότι η αύξηση της ολικής εντροπίας είναι $\Delta S_{ολ}$ και το έργο που λαμβάνεται είναι W.

Η ολοκληρωμένη έκφραση της $dS_{ολ} = -\frac{1}{T_0} \cdot (dE + dW)$

$$\text{Θα είναι: } \Delta S^{ολ} = -\frac{1}{T_0} \cdot (E + W)$$

$$\text{Ή ομοίως: } W = E - T_0 \cdot \Delta S^{ολ}$$

Καθώς $\Delta S^{ολ} \geq 0$

και με την ισότητα να ισχύει μόνο για αντιστρεπτή διαδικασία, λαμβάνεται: $W \leq E$

δηλαδή, η εξέργεια E είναι το μέγιστο ποσό έργου που μπορεί να απαλειφθεί από το A στη διαδικασία κατά την οποία θα πραγματοποιηθεί η ισορροπία με το περιβάλλον A_0 .

Από τη σχέση: $E = U + p_0 \cdot V + \sum_i \mu_{i0} \cdot dn_i$

μπορεί να αφαιρεθεί η αντίστοιχη σχέση της ισορροπίας. Καθώς το E εξαφανίζεται στην ισορροπία, βρίσκεται ότι:

$$E = (U - U^{i\sigma}) + p_0 \cdot (V - V_{i\sigma}) - T_0 \cdot (S - S_{i\sigma}) + \sum_i \mu_{i0} \cdot (\eta_i - \eta_{is})$$

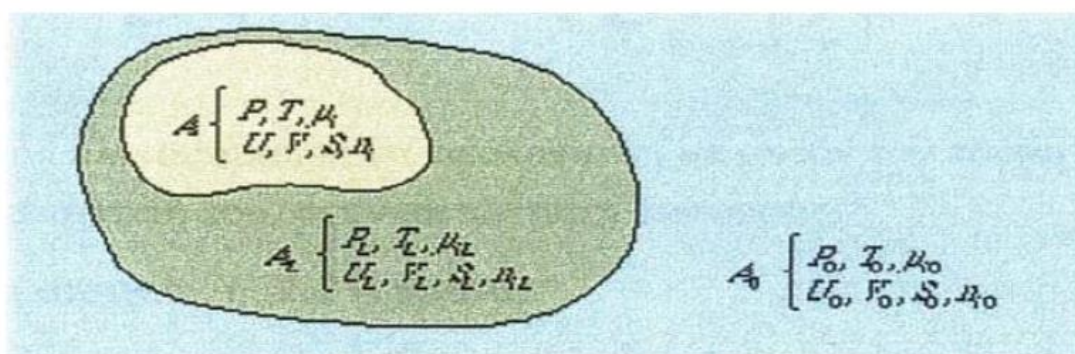
που είναι μια χρήσιμη σχέση για πρακτικούς ορισμούς της εξέργειας.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, διαφορές εξέργειας σχετίζονται με άλλα πιο γνωστά, από τη θερμοδυναμική, δυναμικά, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 Δυναμικά που χρησιμοποιούνται στη θερμοδυναμική.

Περίπτωση	$\Delta E = \Delta X$	Ορισμός του X	Συνήθης ονομασία
$\Delta n_i = 0$	$\Delta E = \Delta G_0$	$G_0 = U + p_0 V - T_0 S$	
$\Delta n_i = 0, \Delta F = 0$	$\Delta E = \Delta F_0$	$F_0 = U - T_0 S$	
$\Delta n_i = 0, \Delta S = 0$	$\Delta E = \Delta H_0$	$H_0 = U + p_0 V$	
$\Delta n_i = 0, p = p_0$	$\Delta E = \Delta G$	$G = U + pV - TS$	Ελεύθ. ενέργεια
$\Delta n_i = 0, \Delta F = 0$	$\Delta E = \Delta F$	$F = U - TS$	Ελεύθ. ενέργεια
$\Delta n_i = 0, \Delta S = 0$	$\Delta E = \Delta H$	$H = U + pV$	Ενθαλπία

Θα ήταν ίσως ενδιαφέρον να εξεταστεί και η περίπτωση ενός συστήματος A που βρίσκεται μέσα σε ένα τοπικό περιβάλλον A_τ , το οποίο με τη σειρά του είναι περικυκλωμένο από ένα περιβάλλον A_0 (όπως φαίνεται στην εικόνα 32).



Εικόνα 33 Δύο συστήματα και το περιβάλλον.

Τότε ορίζεται μία 'τοπική' εξέργεια: $E = U + p_\tau \cdot V - T_\tau \cdot S - \sum_i \mu_{i\tau} \cdot \eta_i$

που σχετίζεται με την ολική, με τη σχέση: $E = U + p_0 \cdot V - T_0 \cdot S - \sum_i \mu_{i0} \cdot \eta_i$

μέσω της: $E = E_{\tau 0} + E_\tau$

όπου ο παράγοντας δείχνει τη συνεισφορά της εξέργειας εξαιτίας της απόκλισης του τοπικού περιβάλλοντος από το συνολικό. Ισχύει:

$$E = S \cdot (T_\tau - T_0) - V \cdot (p_\tau - p_0) - \sum_i n_i \cdot (\mu_{\tau i} - \mu_{i0})$$

που είναι η έκφραση της εξέργειας η αντίστοιχη με τη $E = U + p_0 \cdot V - T_0 \cdot S - \sum_i \mu_{i0} \cdot \eta_i$

και με τα εντατικά μεγέθη του A_τ να αντικαθιστούν αυτά του A . [8]

4.5 Φορείς Εξέργειας

Η ποιότητα της ενέργειας μπορεί να εκφραστεί ως η ποσότητα της αρνητικής εντροπίας ανά μονάδα ενέργειας του εξεταζόμενου συστήματος. Οι πιο καθαρές μορφές ενέργειας είναι η μηχανική και η ηλεκτρική για τις οποίες η αρνητική εντροπία είναι μηδέν. Αντίθετα η ενέργεια με τη μορφή θερμότητας έχει τη χαμηλότερη ποιότητα. Η ποιότητα χειροτερεύει με τη θερμοκρασία (εφόσον αυτή είναι υψηλότερη από αυτήν του περιβάλλοντος). Στον πίνακα που ακολουθεί οι διάφορες μορφές ενέργειας κατατάσσονται ανάλογα με την ποιότητα από την πιο υψηλή στην πιο χαμηλή. Ο δείκτης του πίνακα 2 δείχνει το περιεχόμενο σε εξέργεια ως ποσοστό του περιεχομένου του υλικού σε ενέργεια. [8]

1. π.χ. τεχνητή λίμνη σε υδροηλεκτρικό σταθμό
2. π.χ. υδατόπτωση
3. π.χ. η ενέργεια σε πυρηνικό καύσιμο
4. π.χ. πετρέλαιο, λιγνίτης κ.ά.

Πίνακας 2 Περιεχόμενο σε εξέργεια για διάφορες μορφές ενέργειας.

Ποιότητα	Μορφή ενέργειας	Δείκτης ποιότητας
Άριστη	Δυναμική ενέργεια	100
	Κινητική ενέργεια	100
	Ηλεκτρική ενέργεια	100
Εξαιρετική	Πυρηνική ενέργεια	σχεδόν 100
	Ηλιακή ενέργεια	95
	Χημική ενέργεια	95
	θερμός ατμός	60
	Τηλεθέρμανση	30
Κατώτερη	Απώλειες θερμότητας	5
Άχρηστη	Θερμότητα ως ακτινοβολία	0

Εντούτοις, φορείς εξέργειας δεν είναι μόνο τα συστήματα που φέρουν ενέργεια. Αν ένα σύστημα στερείται ενέργεια (και έτσι διαφοροποιείται από το περιβάλλον) τότε είναι φορέας εξέργειας. Για παράδειγμα ένας κύβος πάγου που βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου είναι φορέας εξέργειας. Όταν ο πάγος λιώνει παίρνει ενέργεια από τον

περιβάλλοντα αέρα. Αν παρεμβληθεί μια αντλία θερμότητας μπορεί να παραχθεί ωφέλιμο έργο. Αυτό καθιστά τον πάγο πηγή ενέργειας. Αντίστοιχα ένα κενό δοχείο εφόσον μπορεί να γεμίσει με αέρα είναι φορέας εξέργειας.

Ανάλογα με την ποιότητα της ενέργειας, η ποιότητα ενός υλικού μπορεί να εκφραστεί από την εξέργεια του υλικού. Η πιο αγνή μορφή ύλης είναι αυτή που περιέχει μόνο γνωστά στοιχεία για τα οποία η εντροπία είναι μηδέν. Διαλυμένα ή αναμειγμένα υλικά έχουν μια υψηλότερη εντροπία και ως εκ τούτου χαμηλότερη ποιότητα. Η ποιότητα μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η διάλυση και η ανάμειξη. Ένα πέτρωμα καθαρό έχει τη μέγιστη περιεκτικότητα σε εξέργεια. Καθώς εξορύσσεται και διανέμεται στο περιβάλλον, το περιεχόμενο σε εξέργεια μειώνεται. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται κάποια υλικά ταξινομημένα συναρτήσει της μείωσης της ποιότητας τους. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει ευδιάκριτη διαφορά ανάμεσα στα υλικά που βρίσκονται ψηλά στη στήλη και σε αυτά που βρίσκονται χαμηλά.

Η ποιότητα της μορφής του υλικού εκφράζεται από ένα δείκτη που δίνει το προσεγγιστικό περιεχόμενο σε ενέργεια ως ποσοστό της ποσότητας του υλικού. Ο ορισμός του δείκτη είναι ανάλογος με τον ορισμό για τον προηγούμενο πίνακα. Από τον ακόλουθο πίνακα προκύπτει ότι μόνο ένα μέρος, που δίνεται από την εξέργεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανακτηθεί καθαρό υλικό, εφόσον βέβαια δεν καταναλωθεί εξωτερική ποσότητα εξέργειας. Όταν εκτιμάται το περιεχόμενο σε εξέργεια για το εξεταζόμενο υλικό χρησιμοποιείται η εξίσωση

$$E = U + p_0 \cdot V - T_0 \cdot S - \sum_i \mu_{i0} \cdot \eta_i$$

Καθώς η εξέργεια δεν διαφοροποιείται ανάμεσα σε ανώτερη και κατώτερη ή σε αυτήν της ύλης και αυτήν της ενέργειας, υπάρχει σαφής σύνδεση ανάμεσα στους δύο τελευταίους φορείς. Η μαθηματική διατύπωση της θεωρίας της σχετικότητας ($E = m c^2$) είναι επίσης μια θεμελιώδης αρχή. Καθώς καθαρίζεται ένα ορυκτό από τις προσμείξεις, ουσιαστικά ανταλλάσσεται ενέργεια υψηλής ποιότητας με εξέργεια που βρίσκεται στην ύλη του.

Πίνακας 3 Περιεχόμενο σε εξέργεια διαφόρων υλικών.

Μορφή της ύλης	Δείκτης ποιότητας
Ύλη σε ταξινομημένη κατάσταση ¹	100
Ύλη στη μορφή του εμπορίου ²	σχεδόν 100
Μείγματα στοιχείων	περίπου 90
Πλούσια αποθέματα ορυκτών ⁴	50-80
Ορυκτά	50
Φτωγά αποθέματα ορυκτών ⁵	20-50
Ορυκτά διαλυμένα στο έδαφος	περίπου 0

1. π.χ. κάρβουνο ως διαμάντι
2. π.χ. σίδηρος, χρυσός, ή μόλυβδος

3. π.χ. χάλυβας, κράματα, ή πλαστικά
4. π.χ. λεμονίτης
5. π.χ. βωξίτης

Από τον πίνακα 3 συμπεραίνεται ότι υλικά τα οποία είναι ακριβά έχουν μεγάλο περιεχόμενο σε εξέργεια. Αντιθέτως, υλικά τα οποία είναι αναμειγμένα (π.χ. άμμος) έχουν μικρό περιεχόμενο σε εξέργεια.

Συστήματα πλούσια σε εξέργεια όπως για παράδειγμα υλικά, χημικές ενώσεις μπορούν στην πράξη να χρησιμοποιηθούν ως συστήματα μετασχηματισμού ηλεκτρικής σε χημική και αντίστροφα.

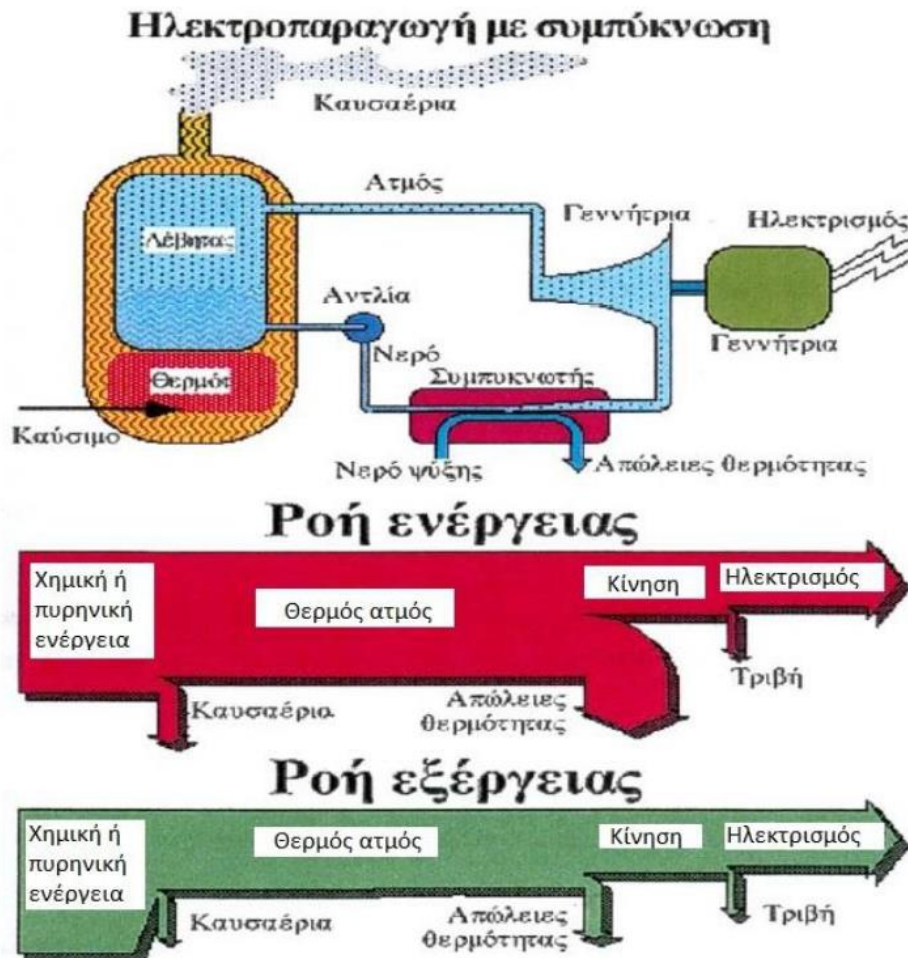
4.6 Διαφορές Ανάμεσα στην Περιγραφή της Εξέργειας και της Ενέργειας

Όσοι ασχολούνται με τις διάφορες μορφές ενέργειας πρέπει να λαμβάνουν υπό όψιν ότι σε κάθε σύστημα υπάρχουν είτε ως τελικά, είτε ως ενδιάμεσα, ποικίλα προϊόντα και οι πολλές μεταβολές που πραγματοποιούνται μειώνουν τη συνολική διαθέσιμη εξέργεια.

Μπορεί να ληφθεί για παράδειγμα η λειτουργία ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (εικόνα 32). Το πάνω μέρος του σχήματος δείχνει ένα λέβητα όπου θερμαίνεται νερό μέχρις εξατμίσεως. Πηγή ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας μπορεί να είναι οποιοδήποτε καύσιμο (κάρβουνο, πετρέλαιο ή ακόμη και ουράνιο). Ο ατμός που παράγεται περιστρέφει ένα στρόβιλο που θέτει σε κίνηση ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Όταν ο ατμός περνάει ανάμεσα από τον στρόβιλο μεταδίδει εξέργεια στη γεννήτρια. Μετά από εκεί, ψύχεται σε έναν συμπυκνωτή προς υγρό και επανοδηγείται στο λέβητα. Αυτή η ψύξη είναι απαραίτητη για να βελτιώσει τη μετάδοση ενέργειας στο στρόβιλο καθώς τότε έχουμε μέγιστη απολαβή έργου.

Η χημική ενέργεια στο κάρβουνο και το πετρέλαιο, ή και το πυρηνικό καύσιμο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, όχι χωρίς απώλειες. Οι απώλειες αυτές είναι μεγάλες: σε ένα σταθμό πετρελαίου τουλάχιστον 60% ενώ σε έναν πυρηνικό, φτάνει ακόμα και το 70%. Μετρώντας το σύστημα συνολικά, για την προετοιμασία της πρώτης ύλης για την ενέργεια, μέχρι και τη διαχείριση των απορριμμάτων της καύσης υπάρχουν πολύ μεγαλύτερες απώλειες από την ωφέλιμη.

Στο κάτω μέρος του διαγράμματος απεικονίζονται δύο ροές, τα διαγράμματα Sankey. Στο άνω εκ των δύο, το πλάτος της ροής είναι ανάλογο με το περιεχόμενο σε ενέργεια για την εκάστοτε μορφή ενέργειας, ενώ στο κάτω το πλάτος είναι ανάλογο του περιεχομένου σε εξέργεια. Παρατηρείται ότι τα πλάτη είναι σχεδόν ίσα. Αυτό οφείλεται στο ότι τόσο οι εισροές όσο και οι εκροές είναι ενέργειες υψηλής μορφής.



Εικόνα 34 Ροές εξέργειας και ενέργειας σε σταθμό ηλεκτροπαραγωγής.

Στην ηλεκτρική ενέργεια το περιεχόμενο εξέργειας είναι εξίσου μεγάλο με το περιεχόμενο σε ενέργεια. Οι απώλειες εντούτοις είναι διαφορετικές. Υπάρχουν απώλειες στην καύση. Η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω εναλλακτών ενέργειας η θερμότητα προσδίδεται στο βραστό νερό. Η πίεση είναι υψηλή οπότε ο βρασμός πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες (μεγαλύτερες από 300 °C). Η θερμότητα επίσης οδηγείται μέσω των αγωγών μεταφοράς και των τοιχωμάτων στο περιβάλλον, όπου χάνεται. Επίσης ενέργεια χάνεται λόγω της υψηλής ενθαλπίας των καυσαερίων. Αυτές οι απώλειες είναι ένα μικρό ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας.

Εντούτοις στο διάγραμμα Sankey φαίνεται ότι η πιο δραστική απώλεια εξέργειας είναι οι απώλειες αυτές. Έτσι στο σημείο αυτό χάνεται περισσότερο από το 1/3 της διαθέσιμης εξέργειας. Επιπλέον χάνεται στην ίδια τη διαδικασία. Ένα μικρό μόνο μέρος αυτής φεύγει στο περιβάλλον. Έτσι η ροή εξέργειας γίνεται στενότερη και παράγεται μεγάλη ποσότητα εντροπίας. Αυτό οφείλεται στο ότι ο ατμός που φεύγει από το λέβητα έχει χαμηλότερη θερμοκρασία και πίεση από αυτές που θα έπρεπε. Ο λόγος αυτού είναι οι φυσικοί περιορισμοί όλων των υλικών που συμμετέχουν στις διεργασίες, κυρίως στο λέβητα. Σε έναν πυρηνικό σταθμό περισσότερη από τη μισή εξέργεια χάνεται σε αυτό το σημείο της διεργασίας.

Το πλάτος των ροών της θερμικής ενέργειας και της εξέργειας του θερμού ατμού δείχνουν τη μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στη ροή της ενέργειας και της εξέργειας. Αυτό είναι επίσης μια τελείως διαφορετική θεώρηση του πώς συμβαίνουν οι απώλειες στις διάφορες διεργασίες. Σε ένα διάγραμμα ροών ενέργειας οι απώλειες είναι μεγαλύτερες στο συμπυκνωτή. Όμως η απώλεια συμβαίνει από ένα μέσο το οποίο έχει χαμηλή θερμοκρασία και έτσι οι απώλειες σε εξέργεια είναι μικρές. Αυτό φαίνεται στο διάγραμμα των απωλειών της εξέργειας. Κατά την αλλαγή από μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική - που και οι δυο έχουν εξεργειακό περιεχόμενο 100% - δημιουργούνται μικρές απώλειες εξαιτίας της τριβής.

Τέτοιες απώλειες είναι εξίσου μικρές και στα δυο διαγράμματα. Μέρος των απωλειών οφείλεται και στην κόπωση των υλικών και κυρίως της φτερωτής και του άξονα μετάδοσης της κίνησης.

Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης προσφέρει ένα μέτρο της συμπεριφοράς (απόδοσης) ενός συστήματος, αλλά δεν μπορεί να αποτελέσει κριτήριο της αποδοτικότητας ή τελειότητας ενός συστήματος ή μιας διεργασίας. Στην γενική περίπτωση ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης δεν δείχνει πόσο μια διεργασία απέχει από την ιδανική, π.χ. την αντιστρεπτή.

Συχνά η τιμή του ενεργειακού βαθμού απόδοσης είναι αρκετά κάτω από τη μονάδα ακόμη και για «τέλειες» διεργασίες. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να αποτελέσει ορθολογικό κριτήριο της αποδοτικότητας ή τελειότητας. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μιας ιδανικής διεργασίας είναι ίσος με τη μονάδα. [8]

4.7 Εξεργειακή Ανάλυση

Το εξεργειακό περιεχόμενο ενός προϊόντος δεν ανταποκρίνεται στην εξέργεια που καταναλώθηκε για την παραγωγή του. Για να πραγματοποιηθεί ένας υπολογισμός είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη όλες οι ποσότητες εξέργειας που προσδίδονται κατά τη διεργασία. Ο υπολογισμός αυτός ονομάζεται ενεργειακή ανάλυση και ως μέτρο χρησιμοποιείται η ελεύθερη ενέργεια Gibbs.

Η εξεργειακή ανάλυση έχει κατακριθεί από πολλές μεριές. Συνήθως μετριέται μόνο ένα μέγεθος, η πηγή ενέργειας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη και οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που συμμετέχουν στη διεργασία. Αυτό οφείλεται στα περιορισμένα όρια της έννοιας της ενέργειας. Αντιθέτως, χρησιμοποιώντας την έννοια της εξέργειας, μερικώς ξεπερνιούνται αυτοί οι περιορισμοί. Εντούτοις, κάποιοι γενικοί κανόνες πρέπει να εισαχθούν. Αυτός ο τρόπος υπολογισμού ονομάζεται εξεργειακή ανάλυση.

Όταν εφαρμόζεται η εξεργειακή ανάλυση σε μια διαδικασία παραγωγής, δεν πρέπει αυτή να περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο μέρος της διαδικασίας, αλλά η συνολική διαδικασία να λαμβάνεται και να αναλύεται ως ένα σύνολο. Η εξεργειακή ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και στη μελέτη κοινωνικών φαινομένων και μεγεθών, όπως είναι οι μεταφορές.

Για να γίνει μια εξεργειακή ανάλυση πρέπει πρώτα να διασφαλιστούν κλειστά υλικά και ενεργειακές ισορροπίες. Ασφαλώς κλειστή μαζική ισορροπία περιλαμβάνει κλειστή ατομική ισορροπία σε περίπτωση μη πυρηνικών αντιδράσεων. Στην ακόλουθη

μελέτη ξεχωρίζουμε τρεις τρόπους μεταφοράς εξέργειας: μεταφορά εξέργειας με έργο και με θερμική αλληλεπίδραση και εξέργεια που συνδέεται με ροή μάζας. Άλλα στοιχεία εξεργειακής μεταφοράς είτε αγνοούνται, όπως δυναμική και κινητική εξέργεια, είτε αποκλείονται, όπως πυρηνικές επιδράσεις .

Στην ενεργειακή ανάλυση, που βασίζεται στον 1ο θερμοδυναμικό νόμο, όλες οι μορφές ενέργειας θεωρούνται να είναι ισοδύναμες. Η απώλεια της ποιότητας της ενέργειας δεν λαμβάνεται υπόψη . Για παράδειγμα, η αλλαγή της ποιότητας της θερμικής ενέργειας καθώς μεταφέρεται από μια υψηλότερη σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία δεν μπορεί να εξηγηθεί στην ενεργειακή ανάλυση. Δείχνει την ροή ενέργειας να είναι συνεχόμενη. Μια εξεργειακή ανάλυση, που βασίζεται στον 2ο θερμοδυναμικό νόμο, δείχνει την θερμοδυναμική ατέλεια μιας διαδικασίας, περιλαμβάνοντας όλες τις ποιοτικές απώλειες των υλικών και της ενέργειας, περιλαμβάνοντας και αυτή που μόλις αναφέρθηκε.

Μια ενεργειακή ισορροπία είναι πάντα κλειστή όπως αναφέρει ο 1ος θερμοδυναμικός νόμος. Εκεί δεν μπορεί να υπάρξει ποτέ ενεργειακή απώλεια, μόνο ενεργειακή μεταφορά στο περιβάλλον στην οποία κατάσταση είναι άχρηστη . Για να εντοπίσουμε και να ποσοτικοποιήσουμε τις αντιστρεπτότητες πρέπει να εκτελεστεί μια εξεργειακή ανάλυση.

Η βασική εξεργειακή εξίσωση για ένα kg ουσίας σε ανοιχτά συστήματα, αγνοώντας όρους κινητικής και δυναμικής εξέργειας είναι

$$E_x = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)$$

Συχνά γίνεται μια υποδιαίρεση σε φυσική, χημική και εξέργεια ανάμειξης . Στον υπολογισμό της εξεργειακής ροής , οι όροι της εξέργειας πολλαπλασιάζονται με την ροή

$$E_{x_{tot}} = F \cdot (E_{x_{chem}} + E_{x_{phys}} + \Delta_{mix} \cdot E_x)$$

Για να υπολογιστεί η εξέργεια , κάθε όρος της πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστά . [8]

4.8 Χημική Εξέργεια

Η χημική εξέργεια $E_{x_{chem}}$ σε πίεση P_0 μπορεί να υπολογιστεί φέρνοντας το καθαρό συστατικό σε χημική ισορροπία με το περιβάλλον. Για καθαρά συστατικά αναφοράς, που υπάρχουν επίσης στο περιβάλλον, η χημική εξέργεια αποτελείται από την εξέργεια που μπορεί να αποκτηθεί με διάχυση των συστατικών στην συγκέντρωση αναφοράς P_{ref} . Όταν θεωρούμε τον νόμο ιδανικών αερίων ισχύει η ακόλουθη εξίσωση

$$E_{x_{chemref-i}}^0 = R \cdot T_0 \cdot (\ln \frac{P_0}{P_{ref-i}})$$

Όταν μια ουσία δεν υπάρχει στο περιβάλλον αναφοράς , πρέπει πρώτα να αντιδράσει στις ουσίες αναφοράς έτσι ώστε να πάει σε ισορροπία με το περιβάλλον . Η εξέργεια αντίδρασης στις συνθήκες αναφοράς ισούται με την σταθερή ενέργεια αλλαγής του Gibbs

$$\Delta_r G^0 = \Delta_r \cdot H^0 - T_0 \cdot \Delta_r \cdot S^0$$

Έτσι ο συνολικός όρος της χημικής εξέργειας γίνεται

$$E_{x_{chemref-i}}^0 = \sum_{j=1}^n V_j \cdot E_{x_{chemref-i}}^0 - \Delta_r \cdot G_i^0$$

Εφόσον η τιμή της εξέργειας είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες της διαδικασίας, η τιμή της χημικής εξέργειας μπορεί να αποθηκευτεί σε μια βάση δεδομένων, που συνδέεται με τον εξομοιωτή ροής. [8]

4.9 Φυσική Εξέργεια

Εφόσον ο υπολογισμός της φυσικής εξέργειας συμπληρώνεται από την εξέργεια ανάμειξης, οι υπολογισμοί της τροχιάς από P, T σε P₀, T₀ υπολογίζουν μόνο τις ενθαλπίες και εντροπίες των καθαρών συστατικών της ροής υλικού. Εφόσον μπορεί να συμβούν αλλαγές στην σύνθεση σε αστραπιαίους υπολογισμούς, πρέπει να γίνουν ξεχωριστοί υπολογισμοί για την φάση εξάτμισης και την φάση υγροποίησης. [8]

Για ένα kg ουσίας, η εξίσωση για το εξεργειακό περιεχόμενο δίνει

$$E_{x_{phys}} = \Delta_{actual-0} \cdot [L \cdot (\sum_{i=1}^n x_i \cdot H_i^L - T_0 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot S_i^L) + V \cdot (\sum_{i=1}^n x_i \cdot H_i^V - T_0 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot S_i^V)]$$

4.10 Εξέργεια Ανάμειξης

Η εξέργεια ανάμειξης αντιπροσωπεύει την εξέργεια που χάνεται όταν καθαρές ουσίες αναμιγνύονται. Έτσι η εξέργεια ανάμειξης, που συχνά ενσωματώνεται στην χημική εξέργεια, έχει πάντα μια αρνητική τιμή. Η εξέργεια ανάμειξης μπορεί να υπολογιστεί με την χρησιμοποίηση αλγορίθμων για την ενθαλπία και την εντροπία της ανάμειξης, που είναι ευρέως διαθέσιμα σε χαρτιά εξομοίωσης ροής. [8]

$$E_{x_{mix}} = \Delta_{mix} \cdot H - T_0 \cdot \Delta_{mix} \cdot S$$

Για ιδανικά αέρια (με την ενθαλπία ανάμειξης ίση με μηδέν) για παράδειγμα, η εξέργεια ανάμειξης είναι

$$E_{x_{mix}} = -R \cdot T_0 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \ln x_i$$

4.11 Ο Εξεργειακός Ισολογισμός

Μια διεργασία ή ένα σύστημα τροφοδοτείται με εξέργεια και παράγει ένα ή περισσότερα χρήσιμα προϊόντα που μπορούν γενικά να εκφραστούν σε εξέργεια. Ένα μέρος της εξέργειας με την οποία τροφοδοτείται το σύστημα καταστρέφεται εξαιτίας εσωτερικά μη αντιστρεπτών διεργασιών (εσωτερική αναντιστρεπτότητα). Επίσης από το φυσικό όριο του συστήματος αποβάλλονται ποσά θερμότητας και μάζας που περιέχουν εξέργεια. Η εξέργεια αυτή αποτελεί απώλεια για το σύστημα και εάν δεν ανακτηθεί κάπου αλλού διασκορπίζεται στο περιβάλλον και τελικά καταστρέφεται, οπότε χαρακτηρίζεται ως εξωτερική αναντιστρεπτότητα. Επομένως ο εξεργειακός ισολογισμός του συστήματος μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\dot{\varepsilon}_F = \dot{\varepsilon}_p + \dot{\varepsilon}_L + \dot{I}$$

Όπου

- $\dot{\varepsilon}_F$: η ολική εξέργεια με την οποία τροφοδοτείται το σύστημα
- $\dot{\varepsilon}_p$: το σύνολο των προϊόντων εκφρασμένο σε εξέργεια
- $\dot{\varepsilon}_L$: εξεργειακές απώλειες του συστήματος
- \dot{I} : εσωτερική αντιστρεψιμότητα του συστήματος

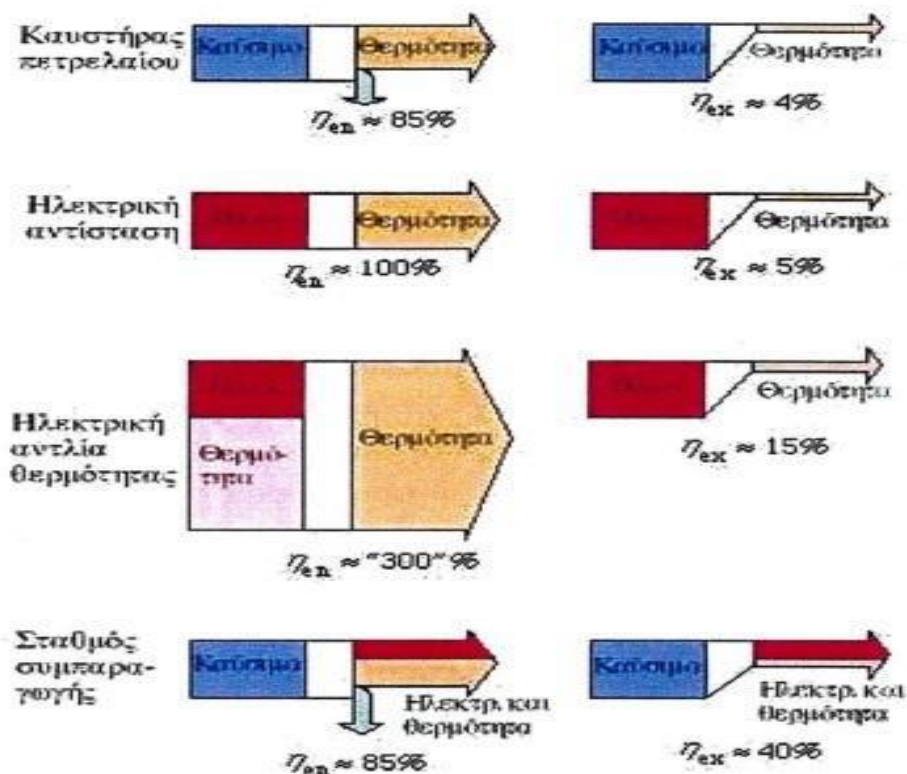
4.12 Η Έννοια της Αποδοτικότητας

Αντίστοιχα με τις έννοιες της ενέργειας και της εξέργειας μπορούμε να ορίσουμε δύο έννοιες της απόδοσης στις μετατροπές ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη:

- 1) Η ενέργεια στο επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα διαιρεμένη με την εισροή ενέργειας. Ονομάζεται ενεργειακός βαθμός απόδοσης και συμβολίζεται με n_{ev} .
- 2) Η εξέργεια στο επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα διαιρεμένη με την εισροή εξέργειας. Ονομάζεται εξεργειακός βαθμός απόδοσης και συμβολίζεται με n_{ex} .

Σε μετατροπές ενέργειας ανάμεσα σε διάφορες μορφές υπάρχουν πάντα απώλειες. Επειδή το φυσικό περιβάλλον των μετατροπών αυτών συχνά παραμελείται, ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης μπορεί να είναι και μεγαλύτερος της μονάδας ($n_{ev} > 1$). Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι πάντοτε μικρότερος του 1. Αυτό συμβαίνει βέβαια, γιατί δεν γίνεται να δημιουργηθεί εξέργεια, καθώς αυτή είτε καταναλώνεται, είτε καταστρέφεται. Η εικόνα 34 δείχνει τις διαφορές ανάμεσα στις ροές εξέργειας και ενέργειας και ως εκ τούτου της απόδοσης, για 4 συστήματα μετατροπής: έναν καυστήρα πετρελαίου, μια ηλεκτρική αντίσταση, μια ηλεκτρική αντλία θερμότητας, και μια μονάδα συμπαραγωγής θερμού νερού και ηλεκτρισμού. Επίσης, φαίνεται η μετατροπή του καυσίμου σε θερμότητα σε έναν τυπικό καυστήρα. Ο βαθμός απόδοσης περιορίζεται στο 85% κυρίως εξαιτίας των απωλειών από τα καυσαέρια. Η χαμηλή τιμή στον εξεργειακό βαθμό απόδοσης οφείλεται στο ότι η

πτώση της θερμοκρασίας από τους 1000 °C της φλόγας στους 60 °C του νερού, δεν χρησιμοποιείται. [8]



Εικόνα 35 Ροές εξέργειας για διαφορετικά καύσιμα και συστήματα.

Η παραγωγή θερμότητας από μια ηλεκτρική αντίσταση έχει βαθμό απόδοσης 100%. Αυτό, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα δεν είναι το μέγιστο που μπορεί να επιτευχθεί στη μετατροπή καυσίμου σε θερμότητα. Μια αντλία θερμότητας μπορεί να συνδεθεί με μια μηχανή εσωτερικής καύσης και να λειτουργεί με καύσιμο. Επίσης μπορεί με αυτόν τον τρόπο να αντικαταστήσει έναν συμβατικό καυστήρα και να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων.

Αν αμεληθεί το περιβάλλον, η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας ή καυσίμων σε θερμότητα, μπορεί να υπερβεί και το 100%. Όμως, σε ότι αφορά την εξέργεια, τα πράγματα αλλάζουν. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης για τη θέρμανση είναι 5% και για την αντλία θερμότητας, 15%.

Στην εικόνα 34 έγινε σύγκριση ροών ενέργειας και εξέργειας διαμέσου ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ατμού. Η απόδοση ήταν η ίδια είτε εξετάστηκε η εξέργεια, είτε η ενέργεια. Αυτό συνέβη γιατί η εισροή καυσίμων και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχουν υψηλή ποιότητα και επομένως υψηλό εξεργειακό περιεχόμενο. Στο τελευταίο σχήμα παρατηρείται επίσης ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι περίπου ο ίδιος για έναν σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με συμπυκνωμένο ρευστό με αυτόν ενός σταθμού συμπαραγωγής.

Αυτό γίνεται πιο εύκολα κατανοητό αν εξεταστεί η κατανομή των απωλειών εξέργειας στον σταθμό που χρησιμοποιεί ατμό. Η μεγαλύτερη απώλεια εξέργειας συνέβη στη μετατροπή καυσίμου σε θερμότητα μέσα στο λέβητα. Καθώς η μετατροπή είναι η ίδια ανάμεσα σε αυτούς τους δύο σταθμούς ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης θα είναι επίσης κοινός, περίπου ίσος με 40%. Όταν εξετάζεται η ενέργεια, οι συνθήκες είναι αρκετά διαφορετικές. Σπάνια αναφέρεται ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι 300% και όχι 100%.

Σήμερα δεν υπάρχουν βαθμοί απόδοσης για τις μετατροπές των υλικών. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχει τρόπος μέτρησης. Για παράδειγμα στη γεωργία η απόδοση ορίζεται ως η προσδιδόμενη ενέργεια διαιρεμένη από την αποδιδόμενη ενέργεια. Σε ότι αφορά τα δάση, ακόμη και αυτή η προσέγγιση δεν υπάρχει. Το μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνότερα είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs. Μαζί με δεδομένα για τις κανονικές συνθήκες των ουσιών που συμμετέχουν στο εξεταζόμενο σύστημα, προκύπτουν αποτελέσματα του εξεργειακού βαθμού απόδοσης για αυτό.

Η έννοια του εξεργειακού βαθμού απόδοσης σχετίζεται ξεκάθαρα με την πρακτική χρήση της ενέργειας. Σύμφωνα όμως με το 2^ο θερμοδυναμικό αξίωμα, απόδοση 100% μπορεί να επιτευχθεί μόνο με αντιστρεπτή διαδικασία που διαρκεί άπειρο χρόνο. Γενικά ορίζεται ένας μέγιστος εξεργειακός βαθμός απόδοσης $\eta_{εξ-max}$ ο οποίος εξαρτάται από το ρυθμό της διεργασίας. Επίσης ορίζεται ένας σχετικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης $\eta_{εξ-σχ}$ που συνδέει τον μέγιστο με τον πραγματικό, με τη σχέση:

$$\eta_{εξ} = \eta_{εξ-σχ} \cdot \eta_{εξ-max}$$

Κεφάλαιο 5: Ανάλυση Κύκλων Απορρόφησης

5.1 Μαθηματικό Μοντέλο (Βασικές Εξισώσεις)

5.1.1 Διατήρηση Μάζας

Η διατήρηση μάζας περιλαμβάνει το ισοζύγιο μάζας της συνολικής μάζας και κάθε συστατικού του διαλύματος. Οι εξισώσεις διατήρησης μάζας και συστατικού για μόνιμη κατάσταση και ροή είναι [9]:

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = 0$$
$$\sum m_{in} \cdot x_{in} - \sum m_{out} \cdot x_{out} = 0$$

όπου m είναι η παροχή μάζας και x είναι το κλάσμα μάζας του LiBr (για διάλυμα H₂O/LiBr) ή του NH₃ (για διαλύματα NH₃/H₂O, NH₃/LiNO₃, NH₃/NaSCN) στο διάλυμα. Το κλάσμα μάζας του μείγματος σε διάφορα σημεία του το σύστημα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα δεδομένα θερμοκρασίας και πίεσης.

5.1.2 Ενεργειακή Ανάλυση (1^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος)

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής δίνει το ενεργειακό ισοζύγιο του κάθε συστατικού (κάθε συστατικό μπορεί να αντιμετωπιστεί ως όγκος ελέγχου με ρεύματα εισόδου και εξόδου, μεταφορά θερμότητας και αλληλεπιδράσεις έργου) του συστήματος απορρόφησης ως εξής [9]:

$$(\sum m_{in} \cdot h_{in} - \sum m_{out} \cdot h_{out}) + (\sum Q_{in} - \sum Q_{out}) + W = 0$$

5.1.3 Εξεργειακή Ανάλυση (1^{ος} και 2^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος)

Η εξεργειακή ανάλυση είναι ο συνδυασμός του πρώτου και του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής και ορίζεται ως η μέγιστη ποσότητα έργου που μπορεί να παραχθεί από ένα ρεύμα ή ένα σύστημα καθώς έρχεται σε ισορροπία με ένα περιβάλλον αναφοράς. Η συνολική πραγματική μεταβολή της εξέργειας που συμβαίνει μεταξύ των εισόδων και εξόδων του όγκου ελέγχου, δηλαδή το άθροισμα των αναστρέψιμων και των μη αναστρέψιμων συνεισφορών στη συνολική πραγματική μεταβολή της εξέργειας, μπορεί να υπολογιστεί με την παρακάτω εξίσωση [9]:

$$\Delta E = (\sum_i m_i \cdot ex_i)_{in} - (\sum_i m_i \cdot ex_i)_{out}$$

Ο πρώτος όρος στη δεξιά πλευρά της παραπάνω εξίσωσης είναι η πραγματική συνολική εξέργεια όλων των ρευμάτων που εισέρχονται στον όγκο ελέγχου και ο δεύτερος όρος είναι η πραγματική συνολική εξέργεια όλων των ρευμάτων που απομακρύνονται από τον όγκο ελέγχου. Οι εξέργειες της μεταφοράς θερμότητας και έργου περιλαμβάνονται ήδη στην αφαίρεση του δεύτερου όρου από τον πρώτο όρο στη δεξιά πλευρά.

Όταν παραμελείται η μεταβολή της κινητικής ενέργειας και της δυνητικής ενέργειας και επειδή δεν υπάρχει απόκλιση χημικών ουσιών από τον κύκλο στο περιβάλλον, η χημική εξέργεια είναι μηδέν. Η ειδική εξέργεια «ex» υπολογίζεται από την εξίσωση [9]:

$$ex = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης (ορθολογική απόδοση) μπορεί να υπολογιστεί ως ο λόγος μεταξύ της καθαρής εξέργειας που παράγεται από τον ατμοποιητή (επιθυμητή εξέργεια εξόδου) και της εξέργειας εισόδου στον αναγεννητή συν το μηχανικό έργο της αντλίας διαλύματος [9]:

$$\eta_{energy} = \frac{Q_{ev} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{ev}}\right)}{[Q_g \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) + W_p]}$$

Όπου T_{ev} και T_g είναι οι θερμοκρασία του ατμοποιητή και αναγεννητή, αντίστοιχα.

5.2 Θερμοδυναμικές Ιδιότητες Εργαζόμενων Μέσων

5.2.1 H₂O/LiBr

Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας σημείου δρόσου (που αντιπροσωπεύει την πίεση κορεσμού) T_d (°F), συγκέντρωσης βρωμιούχου λιθίου X_a (%) και θερμοκρασίας διαλύματος T (°F) μπορεί να βρεθεί ως εξής [10],[11],[12]:

$$T_d(T, X_a) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^2 a_{ij} X_a^i T^j \quad (5.2.1.1)$$

Οι συντελεστές στην εξίσωση (5.2.1.1) δίνονται στον Πίνακα 4. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι θερμοκρασίες στην εξίσωση (5.2.1.1) είναι σε Fahrenheit και είναι εύκολο να τις μετατρέψουμε σε Κελσίου.

Πίνακας 4 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.1.1.

i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}
0	0	-1.313448×10^{-1}	0	1	9.967944×10^{-1}	0	2	1.978788×10^{-5}
1	0	1.820914×10^{-1}	1	1	1.778069×10^{-3}	1	2	-1.779481×10^{-5}
2	0	-5.177356×10^{-2}	2	1	-2.215597×10^{-4}	2	2	2.002427×10^{-6}
3	0	2.827426×10^{-3}	3	1	5.913618×10^{-6}	3	2	-7.667546×10^{-8}
4	0	-6.380541×10^{-5}	4	1	-7.308556×10^{-8}	4	2	1.201525×10^{-9}
5	0	4.340498×10^{-7}	5	1	2.788472×10^{-10}	5	2	-6.64171×10^{-12}

Η εξίσωση για τη συγκέντρωση βρωμιούχου λιθίου X_a (%), τη θερμοκρασία T ($^{\circ}\text{C}$) και την ενθαλπία (kJ / kg) διαλύματος $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ μπορεί να βρεθεί εξής (οι συντελεστές δίνονται στον πίνακα 5) [10],[11],[12]:

$$h(T, X_a) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^2 a_{ij} X_a^i T^j \quad (5.2.1.2)$$

Πίνακας 5 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.1.2.

i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}
0	0	1.134125	0	1	4.124891	0	2	5.743693×10^{-4}
1	0	-4.80045×10^{-1}	1	1	-7.643903×10^{-2}	1	2	5.870921×10^{-5}
2	0	-2.161438×10^{-3}	2	1	2.589577×10^{-3}	2	2	-7.375319×10^{-6}
3	0	2.336235×10^{-4}	3	1	-9.500522×10^{-5}	3	2	3.277592×10^{-7}
4	0	-1.188679×10^{-5}	4	1	1.708026×10^{-6}	4	2	-6.062304×10^{-9}
5	0	2.291532×10^{-7}	5	1	-1.102363×10^{-8}	5	2	3.901897×10^{-11}

Η σχέση μεταξύ της πυκνότητας διαλύματος ρ (kg / m^3), της θερμοκρασίας T ($^{\circ}\text{C}$) και της συγκέντρωσης βρωμιούχου λιθίου X_a (%) είναι η ακόλουθη (οι συντελεστές δίνονται στον πίνακα 6) [10],[11],[12]:

$$\rho(T, X_a) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^2 a_{ij} X_a^i T^j \quad (5.2.1.3)$$

Πίνακας 6 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.1.3.

i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}
0	0	9.939006×10^{-1}	0	1	-5.631094×10^{-4}	0	2	1.392527×10^{-6}
1	0	1.046888×10^{-2}	1	1	1.633541×10^{-5}	1	2	-2.801009×10^{-7}
2	0	-1.667939×10^{-4}	2	1	-1.110273×10^{-6}	2	2	1.734979×10^{-8}
3	0	5.332835×10^{-6}	3	1	2.882292×10^{-8}	3	2	$-4.232988 \times 10^{-10}$
4	0	-3.440005×10^{-8}	4	1	$-2.523579 \times 10^{-10}$	4	2	3.503024×10^{-12}

Στην εξίσωση (5.2.1.1), η θερμοκρασία του σημείου δρόσου είναι η θερμοκρασία κορεσμού του ατμού T (K), η οποία σχετίζεται με την πίεση κορεσμού του ατμού P (MPa) ως εξής (οι συντελεστές δίνονται στον πίνακα 7) [10],[11],[12]:

$$P(T) = \exp\left(-\frac{3986.06}{T-39.5736} + \sum_i^9 a_i T^i\right) \quad (5.2.1.4)$$

Ή

$$T(P) = 42.6776 - \frac{3892.7}{\ln(P) - 9.48654}, \quad \text{για } P < 12.33 \text{ MPa} \quad (5.2.1.5\alpha)$$

$$T(P) = -387.592 - \frac{12587.5}{\ln(P) - 15.2578}, \quad \text{για } P > 12.33 \text{ MPa} \quad (5.2.1.5\beta)$$

Πίνακας 7 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.1.4.

i	a_i	i	a_i
0	1.04592×10^1	5	8.6531×10^{-13}
1	-4.04897×10^{-3}	6	9.03668×10^{-16}
2	-4.1752×10^{-5}	7	-1.9969×10^{-18}
3	3.6851×10^{-7}	8	7.79287×10^{-22}
4	-1.0152×10^{-9}	9	1.91482×10^{-25}

Το ψυκτικό μέσο στο σύστημα LiBr / H₂O είναι το νερό. Οι σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας κορεσμού T (K) και της ενθαλπίας H (kJ / kg) δίνονται ως εξής (οι συντελεστές δίνονται στον πίνακα 8) [10],[11],[12]:

$$T_R = \frac{647.3 - T}{647.3} \quad (5.2.1.6\alpha)$$

Για νερό κορεσμένο υγρό [10],[11],[12]:

$$h(T) = 2099.3 \cdot (a_i + \sum_{i=2}^8 a_i T_R^i) \quad (5.2.1.6\beta)$$

Για νερό κορεσμένο ατμό [10],[11],[12]:

$$h(T) = 2099.3 \cdot (1 + b_1 T_R^{1/3} + b_2 T_R^{5/6} + b_3 T_R^{7/8} + \sum_{i=4}^8 b_i T_R^{i-3}) \quad (5.2.1.6\gamma)$$

Πίνακας 8 Συντελεστές των εξισώσεων 5.2.1.6.

i	a_i equation (8b)	b_i equation (8c)
1	$8.839230108 \times 10^{-1}$	$4.57874342 \times 10^{-1}$
2	-2.67172935	5.08441288
3	6.22640035	-1.48513244
4	-1.31789573×10^1	-4.81351884
5	-1.91322436	2.69411792
6	6.87937653×10^1	-7.39064542
7	-1.24819906×10^2	1.04961689×10^1
8	7.21435404×10^1	-5.46840036

5.2.2 NH₃/H₂O

Η σχέση μεταξύ πίεσης και θερμοκρασίας κορεσμού ενός μίγματος αμμωνίας-νερού δίνεται ως εξής [13]:

$$\log(P) = A - \frac{B}{T} \quad (5.2.2.1\alpha)$$

Όπου:

$$A = 7.44 - 1.767 \cdot X + 0.9823 \cdot X^2 + 0.3627 \cdot X^3 \quad (5.2.2.1\beta)$$

$$B = 2013.8 - 2155.7 \cdot X + 1540.9 \cdot X^2 - 194.7 \cdot X^3 \quad (5.2.2.1\gamma)$$

Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας, συγκέντρωσης και ενθαλπίας έχει ως εξής (οι συντελεστές δίνονται στον πίνακα 9) [13]:

$$h(T, \bar{X}) = 100 \sum_{i=1}^{16} a_i \left(\frac{T}{273.15} - 1 \right)^{m_i} \cdot \bar{X}^{n_i} \quad (5.2.2.2)$$

όπου \bar{X} είναι το γραμμομοριακό κλάσμα αμμωνίας και δίδεται ως εξής [13]:

$$\bar{X} = \frac{18.015 \cdot X}{18.015 \cdot X + 17.03 \cdot (1 - X)} \quad (5.2.2.3)$$

Πίνακας 9 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.2.2.

i	m_i	n_i	a_i	i	m_i	n_i	a_i
1	0	1	-7.61080×10^0	9	2	1	2.84179×10^0
2	0	4	2.56905×10^1	10	3	3	7.41609×10^0
3	0	8	-2.47092×10^2	11	5	3	8.91844×10^2
4	0	9	3.25952×10^2	12	5	4	-1.61309×10^3
5	0	12	-1.58854×10^2	13	5	5	6.22106×10^2
6	0	14	6.19084×10^1	14	6	2	-2.07588×10^2
7	1	0	1.14314×10^1	15	6	4	-6.87393×10^0
8	1	1	1.18157×10^0	16	8	0	3.50716×10^0

Η σχέση μεταξύ ειδικού όγκου, θερμοκρασίας και συγκέντρωσης προκύπτει από δεδομένα πηγής που λαμβάνονται από το εγχειρίδιο ASHRAE και δίνεται ως εξής (οι συντελεστές δίνονται στον πίνακα 10) [13]:

$$v(T, X) = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 a_{ij} (T - 273.15)^i X^j \quad (5.2.2.4)$$

Πίνακας 10 Συντελεστές της εξίσωσης 5.2.2.4.

i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}	i	j	a_{ij}
0	0	9.9842×10^{-4}	0	1	3.5489×10^{-4}	0	2	-1.2006×10^{-4}	0	3	3.2426×10^{-4}
1	0	-7.8161×10^{-8}	1	1	5.2261×10^{-6}	1	2	-1.0567×10^{-5}	1	3	9.8890×10^{-6}
2	0	8.7601×10^{-9}	2	1	-8.4137×10^{-8}	2	2	2.4056×10^{-7}	2	3	-1.8715×10^{-7}
3	0	-3.9076×10^{-11}	3	1	6.4816×10^{-10}	3	2	-1.9851×10^{-9}	3	3	1.7727×10^{-9}

*Standard error = 4.058×10^{-6} , mean deviation = 2.195×10^{-3} .

5.2.3 NH₃/LiNO₃

Η σχέση μεταξύ πίεσης και θερμοκρασίας κορεσμού ενός μίγματος αμμωνίας-νιτρικού λιθίου δίνεται ως εξής [13]:

$$\ln(P) = A + \frac{B}{T} \quad (5.2.3.1)$$

Όπου:

$$A = 16.29 + 3.859 \cdot (1 - X)^3 \quad (5.2.3.1\beta)$$

$$B = -2802 - 4192 \cdot (1 - X)^3 \quad (5.2.3.1\gamma)$$

Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας, συγκέντρωσης και ενθαλπίας έχει ως εξής [13]:

$$h(T, X) = A + B \cdot (T - 273.15) + C \cdot (T - 273.15)^2 + D \cdot (T - 273.15)^3 \quad (5.2.3.2\alpha)$$

Όπου:

$$A = -215 + 1570 \cdot (0.54 - X)^2, \text{ για } X < 0.54 \quad (5.2.3.2\beta)$$

$$A = -215 + 689 \cdot (X - 0.54)^2, \text{ για } X > 0.54 \quad (5.2.3.2\gamma)$$

$$B = 1.15125 + 3.382678 \cdot X \quad (5.2.3.2\delta)$$

$$C = 10^{-3} \cdot (1.099 + 2.3965 \cdot X) \quad (5.2.3.2\epsilon)$$

$$D = 10^{-5} \cdot (3.933333 \cdot X) \quad (5.2.3.2\sigma\tau)$$

Η πυκνότητα του διαλύματος σχετίζεται με τη συγκέντρωση και τη θερμοκρασία ως εξής [13]:

$$\rho(T, X) = 2046.222 - 1409.653 \cdot \sqrt{X} - 1.3463 \cdot (T - 273.15) - 0.0039 \cdot (T - 273.15)^2 \quad (5.2.3.3)$$

5.2.4 NH₃/NaSCN

Η σχέση μεταξύ πίεσης και θερμοκρασίας κορεσμού ενός μίγματος αμμωνίας-θειοκυανικού νατρίου δίνεται ως εξής [13]:

$$\ln(P) = A + \frac{B}{T} \quad (5.2.4.1\alpha)$$

Όπου:

$$A = 15.7266 - 0.298628 \cdot X \quad (5.2.4.1\beta)$$

$$B = -2548.65 - 2621.92 \cdot (1 - X)^3 \quad (5.2.4.1\gamma)$$

Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας, συγκέντρωσης και ενθαλπίας έχει ως εξής [13]:

$$h(T, X) = A + B \cdot (T - 273.15) + C \cdot (T - 273.15)^2 + D \cdot (T - 273.15)^3 \quad (5.2.4.2\alpha)$$

Όπου:

$$A = 79.72 - 1072 \cdot X + 1287.9 \cdot X^2 - 295.67 \cdot X^3 \quad (5.2.4.2\beta)$$

$$B = 2.4081 - 2.2814 \cdot X + 7.9291 \cdot X^2 - 3.5137 \cdot X^3 \quad (5.2.4.2\gamma)$$

$$C = 10^{-2} \cdot (1.255 \cdot X - 4 \cdot X^2 + 3.06 \cdot X^3) \quad (5.2.4.2\delta)$$

$$D = 10^{-5} \cdot (-3.33 \cdot X + 10 \cdot X^2 - 3.33 \cdot X^3) \quad (5.2.4.2\epsilon)$$

Η πυκνότητα του διαλύματος σχετίζεται με τη συγκέντρωση και τη θερμοκρασία ως εξής [13]:

$$\rho(T, X) = A + B \cdot (T - 273.15) + C \cdot (T - 273.15)^2 \quad (5.2.4.3\alpha)$$

$$A = 1707.519 - 2400.4348 \cdot X + 2256.5083 \cdot X^2 - 930.0637 \cdot X^3 \quad (5.2.4.3\beta)$$

$$B = -3.6341 \cdot X + 5.4552 \cdot X^2 - 3.1674 \cdot X^3 \quad (5.2.4.3\gamma)$$

$$C = 10^{-3} \cdot (5.1 \cdot X - 3.6 \cdot X^2 - 5.4 \cdot X^3) \quad (5.2.4.3\delta)$$

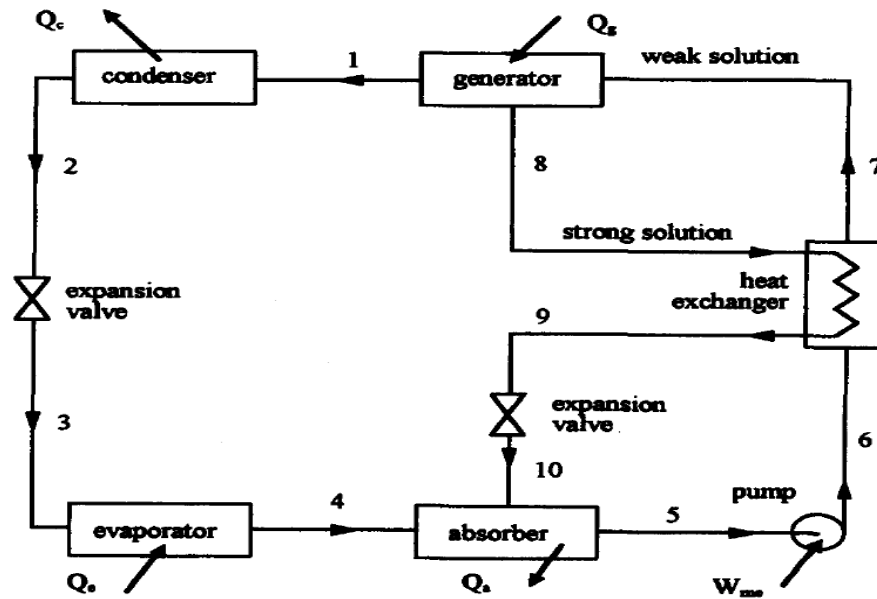
5.3 Θερμοδυναμική και Εξεργειακή Ανάλυση

Με σκοπό να αναλυθούν και να συγκριθούν τα διάφορα συστήματα ψύξης με απορρόφηση, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε περιβάλλον matlab, το οποίο βασίστηκε στο μαθηματικό μοντέλο και στις θερμοδυναμικές ιδιότητες των εργαζόμενων μέσων που περιγράφηκαν προηγουμένως.

5.3.1 Μονοβάθμιος Κύκλος

Η εικόνα 35 απεικονίζει τα κύρια “συστατικά” του μονοβάθμιου κύκλου ψύξης με απορρόφηση. Το ψυκτικό υγρό υψηλής πίεσης (2) περνάει από τον συμπυκνωτή προς τον ατμοποιητή (4) μέσω μιας βαλβίδας εκτόνωσης (3) που μειώνει την πίεση του ψυκτικού μέσου στη χαμηλή πίεση που υπάρχει στον ατμοποιητή. Το υγρό ψυκτικό μέσο (3) εξατμίζεται στον ατμοποιητή απορροφώντας θερμότητα από το ψυχόμενο υλικό και ο ατμός χαμηλής πίεσης, που προκύπτει, (4) περνά στον απορροφητή, όπου απορροφάται από το ισχυρό (ή ασθενές) διάλυμα που προέρχεται από τη γεννήτρια (8) μέσω της βαλβίδας εκτόνωσης βαλβίδα εκτόνωσης (10) και σχηματίζει το ασθενές (ή ισχυρό) διάλυμα (5). Η πίεση του ασθενούς (ή ισχυρού) διαλύματος (5) αυξάνεται μέχρι την πίεση της γεννήτριας (7), μέσω της αντλίας, και το ψυκτικό μέσο, που περιέχεται σε αυτό, βράζει και διαχωρίζεται στον αναγεννητή. Το υπόλοιπο διάλυμα (8) ρέει πίσω στον απορροφητή και, συνεπώς, ολοκληρώνει τον κύκλο. Με τον όρο ασθενές διάλυμα (ή ισχυρό διάλυμα) εννοείται ότι η ικανότητα του διαλύματος να απορροφά τους ατμούς ψυκτικού μέσου είναι ασθενής (ή ισχυρή), σύμφωνα με τον ορισμό της ASHRAE. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος, στον κύκλο έχει προστεθεί ένας εναλλάκτης θερμότητας διαλύματος. Εάν ο κύκλος λειτουργεί με $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, πρέπει να προστεθεί ένας αναλυτής και ένας ανορθωτής για να απομακρυνθούν οι υδρατμοί από το μείγμα ψυκτικού που εγκαταλείπουν τον αναγεννητή πριν φτάσουν στον συμπυκνωτή. [13]

Σημειώνεται ότι αν το εργαζόμενο μέσο είναι $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, τότε στα σημεία (8), (9), (10) ρέει ισχυρό διάλυμα και στα σημεία (5), (6), (7) ρέει ασθενές, ενώ αν το εργαζόμενο μέσο είναι $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ή $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ ή NH_3/NaSCN τότε στα σημεία (8), (9), (10) ρέει ασθενές διάλυμα και στα σημεία (5), (6), (7) ρέει ισχυρό διάλυμα.



Εικόνα 36 Σχηματικό διάγραμμα του μονοβάθμιου συστήματος ψύξης με απορρόφηση.

5.3.1.1 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του μονοβάθμιου κύκλου

Πίνακας 11 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του μονοβάθμιου κύκλου.

	$\sum m = \text{σταθ}$
Απορροφητής	$m_5 = m_4 + m_{10}$
Αναγεννητής	$m_7 = m_1 + m_8$
Συμπυκνωτής	$m_1 = m_2$
Ατμοποιητής	$m_3 = m_4$
	$\sum m \cdot x = \text{σταθ}$
Απορροφητής	$m_5 \cdot x_5 = m_4 \cdot x_4 + m_{10} \cdot x_{10}$
Αναγεννητής	$m_7 \cdot x_7 = m_1 \cdot x_1 + m_8 \cdot x_8$
Συμπυκνωτής	$m_1 \cdot x_1 = m_2 \cdot x_2$
Ατμοποιητής	$m_3 \cdot x_3 = m_4 \cdot x_4$
	Ενεργειακό Ισοζύγιο
Απορροφητής	$Q_a = m_4 \cdot h_4 + m_{10} \cdot h_{10} - m_5 \cdot h_5$

Αναγεννητής	$Q_g = m_1 \cdot h_1 + m_8 \cdot h_8 - m_7 \cdot h_7$
Συμπυκνωτής	$Q_c = m_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot h_2$
Ατμοποιητής	$Q_e = m_4 \cdot h_4 - m_3 \cdot h_3$
	Εξεργειακό Ισοζύγιο (Καταστροφή Εξέργειας)
Απορροφητής	$Ed_a = E_4 + E_{10} - E_5 - Q_a \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right)$
Αναγεννητής	$Ed_g = E_7 - E_1 - E_8 + Q_g \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right)$
Συμπυκνωτής	$Ed_c = E_1 - E_2 - Q_c \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right)$
Ατμοποιητής	$Ed_e = E_3 - E_4 + Q_e \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_e}\right)$

5.3.1.2 Παραδοχές και υποθέσεις κατά την μοντελοποίηση του συστήματος

1. Η ανάλυση λαμβάνει χώρα υπό σταθερές συνθήκες.
 2. Το ψυκτικό μέσο στην έξοδο του συμπυκνωτή είναι κορεσμένο υγρό.
 3. Το ψυκτικό μέσο στην έξοδο του ατμοποιητή είναι κορεσμένος ατμός.
 4. Το διάλυμα στις εξόδους του απορροφητή και του αναγεννητή βρίσκεται σε συνθήκες ισορροπίας και στις αντίστοιχες θερμοκρασίες των συσκευών.
 5. Οι απώλειες πίεσης στους αγωγούς και στον εναλλάκτη θερμότητας είναι αμελητέες.
 6. Με εξαίρεση τον αναγεννητή, τον ατμοποιητή, τον συμπυκνωτή και τον απορροφητή, δε μεταφέρεται θερμότητα μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος.
 7. Ο βαθμός απόδοσης της αντλίας διαλύματος θεωρείται 0.95.
 8. Η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη θερμότητας διαλύματος θεωρείται 0.8.
 9. Οι συνθήκες περιβάλλοντος ορίζονται ως 25 °C (θερμοκρασία) και 1 atm (πίεση).
 10. Η κινητική, η δυναμική και η χημική εξέργεια των ρευμάτων αμελούνται.
- [9],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19],[20]

5.3.1.3 Αποτελέσματα ανάλυσης μονοβάθμιου κύκλου για διαφορετικά εργαζόμενα μέσα

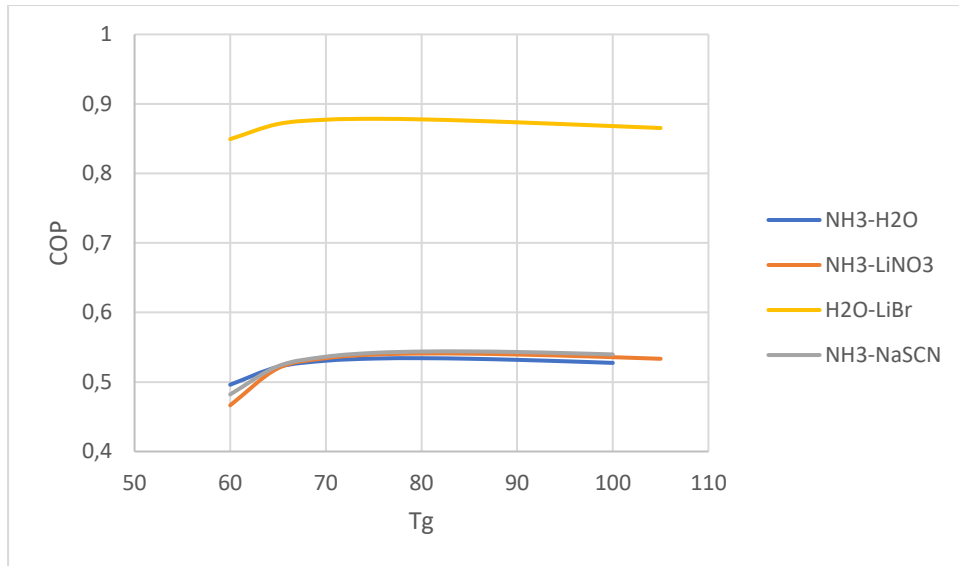
Τα παρακάτω διαγράμματα έχουν γίνει για μεταβλητή θερμοκρασία στον αναγεννητή από 60°C μέχρι 105 °C με βήμα 5 °C και με δεδομένα τα παρακάτω:

Tc=25 °C

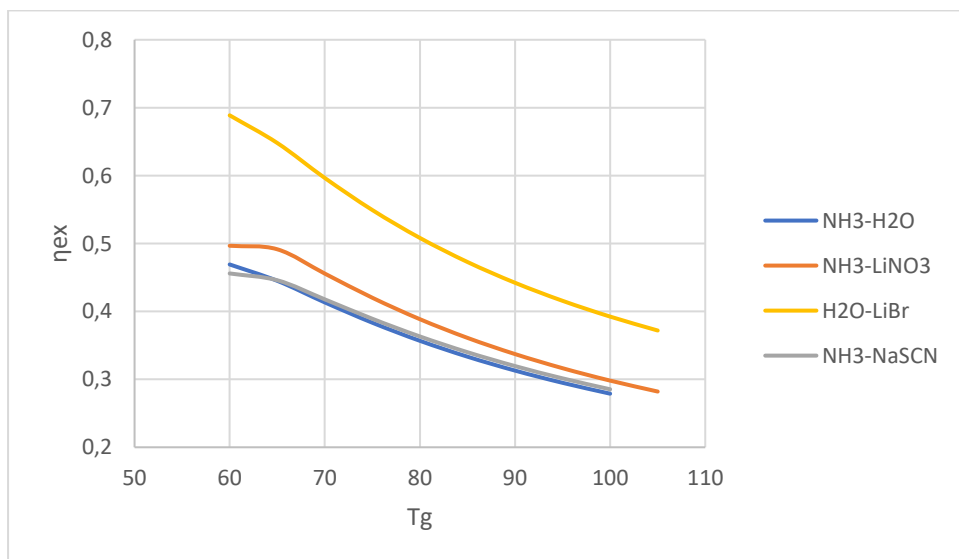
$T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$

$T_e=-5\text{ }^\circ\text{C}$ (Για εργαζόμενο μέσο $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ $T_e=0\text{ }^\circ\text{C}$)

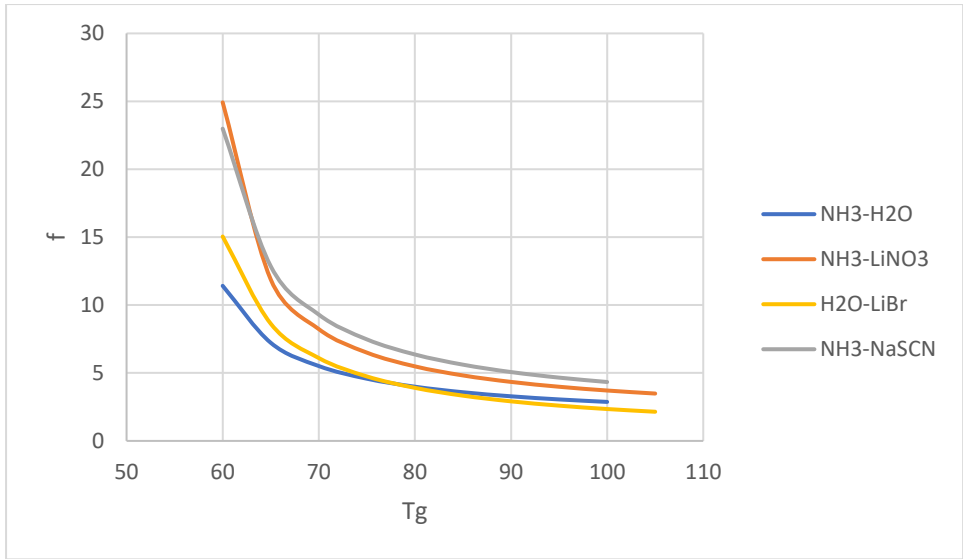
$Q_e=20\text{ kW}$



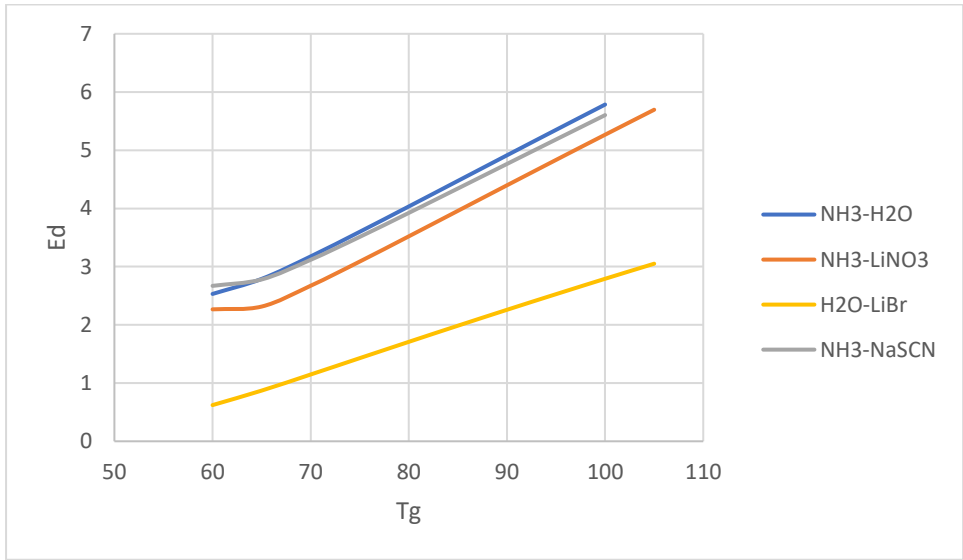
Διάγραμμα 1 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



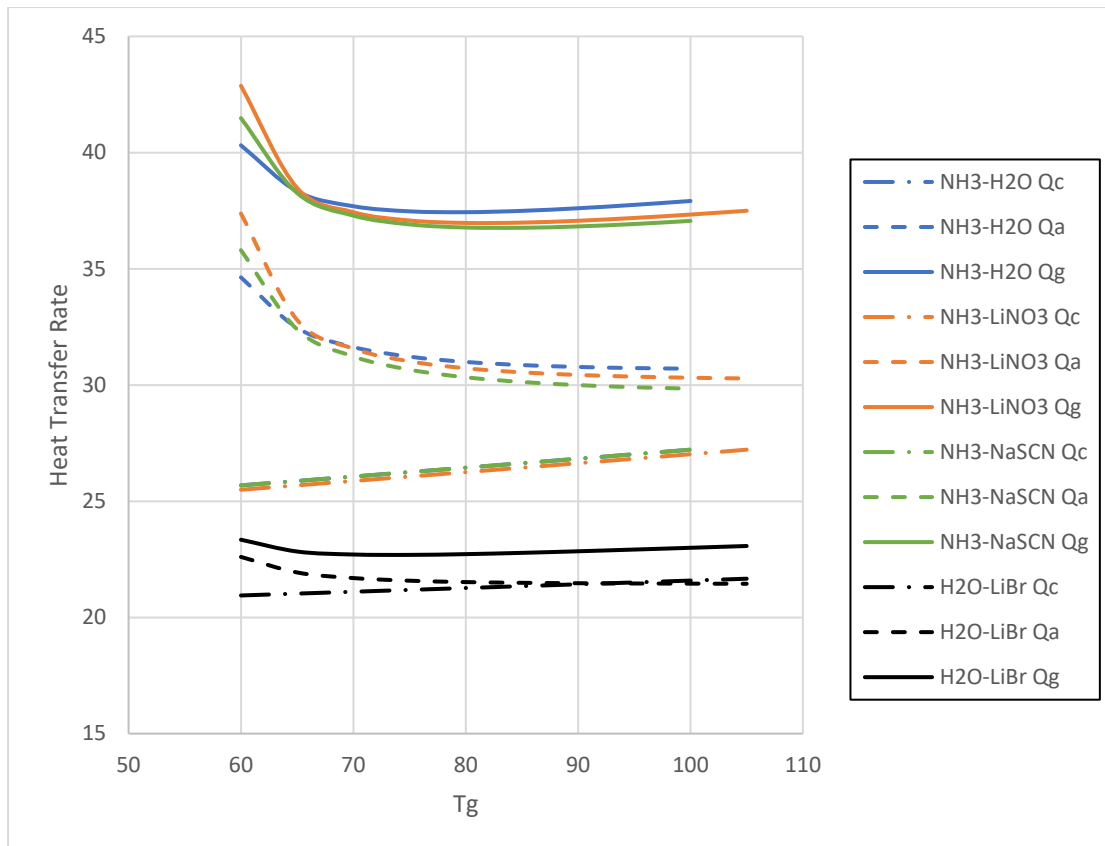
Διάγραμμα 2 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 3 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 4 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 5 Μεταφορά θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

5.3.1.4 Συμπεράσματα

- Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 1 ο συντελεστής συμπεριφοράς αρχικά αυξάνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή και μετά μένει σχεδόν σταθερός για όλα τα εργαζόμενα μέσα. Φαίνεται επίσης ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς για H₂O/LiBr είναι αρκετά μεγαλύτερος απ' ότι είναι στα άλλα εργαζόμενα μέσα. Βέβαια αυτό, εν μέρει, οφείλεται και στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του ατμοποιητή είναι 0°C για εργαζόμενο μέσο H₂O/LiBr, ενώ για τα άλλα είναι -5°C. Κατά τ' άλλα από τους 65°C και μετά τον καλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς δίνει το εργαζόμενο μέσο NH₃/NaSCN και μετά το NH₃/LiNO₃.
- Από το διάγραμμα 2 συμπεραίνουμε ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή. Όπως και με τον συντελεστή συμπεριφοράς έτσι και τώρα καλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης δίνει το εργαζόμενο μέσο H₂O/LiBr. Ωστόσο, όσον αφορά τα άλλα εργαζόμενα μέσα, σε αυτή την περίπτωση από τους 65°C και μετά τον καλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης δίνει το NH₃/LiNO₃ και μετά το NH₃/NaSCN.
- Από το διάγραμμα 3 συμπεραίνουμε ότι ο λόγος ανακυκλοφορίας μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή. Φαίνεται ότι ο λόγος ανακυκλοφορίας του NH₃/NaSCN είναι μεγαλύτερος απ' ότι των άλλων εργαζόμενων μέσων. Αυτό σημαίνει ότι είτε η αντλία διαλύματος πρέπει να κινείται με περισσότερες στροφές είτε χρειάζεται μία μεγαλύτερη αντλία. Όσο μειώνεται η θερμοκρασία του

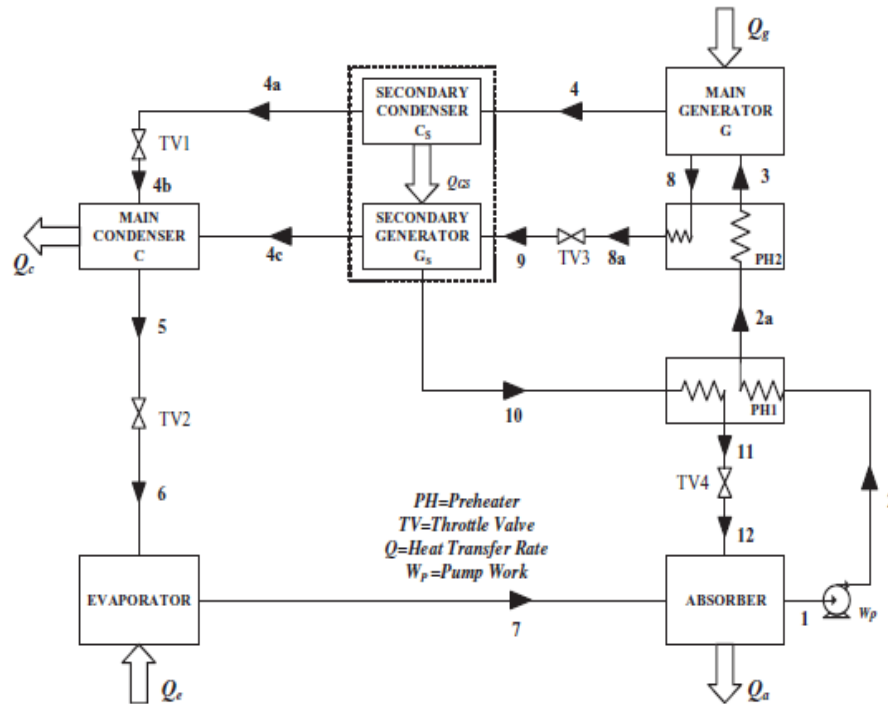
αναγεννητή, ο λόγος ανακυκλοφορίας αυξάνεται δραματικά. Συνεπώς, δεν είναι καθόλου πρακτικό για ένα τέτοιο σύστημα να λειτουργεί σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες αναγεννητή.

- Στο διάγραμμα 4 φαίνεται η καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αναγεννητή τόσο αυξάνεται και η καταστροφή εξέργειας. Φαίνεται ότι η υψηλότερη καταστροφή εξέργειας συμβαίνει για εργαζόμενο μέσο το $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ και η χαμηλότερη και εργαζόμενο μέσο το $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$.
- Στο διάγραμμα 5 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή, η θερμότητα τροφοδοσίας του αναγεννητή και η θερμότητα που αποβάλλει ο απορροφητής αρχικά μειώνονται και στη συνέχεια η θερμότητα τροφοδοσίας του αναγεννητή έχει μία μικρή ανοδική τάση και η θερμότητα που αποβάλλει ο απορροφητής έχει μία μικρή καθοδική τάση, ενώ η θερμότητα που απορρίπτει ο συμπυκνωτής αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή. Παρατηρούμε ότι ο μέγιστος COP επιτυγχάνεται εκεί που έχουμε τη μικρότερη θερμότητα τροφοδοσίας στον αναγεννητή.

5.3.2 Διβάθμιος Κύκλος

Το σχηματικό διάγραμμα ενός διβάθμιου κύκλου ψύξης με απορρόφηση φαίνεται στην εικόνα 36. Αποτελείται από δύο αναγεννητές, έναν κύριο αναγεννητή (G) και έναν δευτερεύων αναγεννητή (Gs) και δύο συμπυκνωτές, έναν δευτερεύοντα συμπυκνωτή (Cs) και έναν κύριο συμπυκνωτή (C). Θερμότητα αποβάλλεται από τον κύριο συμπυκνωτή στο περιβάλλον. Ο κύριος αναγεννητής (G) και ο δευτερεύων συμπυκνωτής (Cs) λειτουργούν σε υψηλή πίεση ($P_3 = P_g = P_{cs}$) ενώ ο δευτερεύων αναγεννητής (Gs) και ο κύριος συμπυκνωτής (C) λειτουργούν σε μέτρια πίεση ($P_2 = P_c = P_{gs}$). Ο ατμοποιητής και ο απορροφητής λειτουργούν σε χαμηλή πίεση ($P_1 = P_e = P_a$). Σε αυτό το σύστημα, το ασθενές (ή ισχυρό) διάλυμα στην κατάσταση 1 αντλείται από τον απορροφητή στον κύριο αναγεννητή (G) μέσω δύο εναλλακτών θερμότητας (δηλ. PH1 και PH2). Το διάλυμα $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ στον κύριο αναγεννητή θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία για να διαχωριστούν οι ατμοί του ψυκτικού μέσου από το διάλυμα. Έτσι, ο κύριος ατμός, από το G, πηγαίνει στον δευτερεύοντα συμπυκνωτή (Cs). Η θερμότητα συμπύκνωσης από αυτό το Cs χρησιμοποιείται από τον δευτερεύοντα αναγεννητή (Gs). Το ισχυρό (ή ασθενές) διάλυμα που απελευθερώνεται από τον κύριο αναγεννητή στην κατάσταση 8 ρέει στον δευτερεύοντα αναγεννητή μέσω του PH2 όπου το διάλυμα ψύχεται σε κάποιο βαθμό με την ανταλλαγή θερμότητας με το ασθενές (ή ισχυρό) διάλυμα. Στην έξοδο του Gs παράγεται δευτερεύων ατμός, ο οποίος μαζί με τους συμπυκνωμένους υδρατμούς από τον δευτερεύοντα συμπυκνωτή ρέουν στον κύριο συμπυκνωτή. Έτσι, η συνολική ποσότητα ψυκτικού υγρού που εξέρχεται από τον κύριο συμπυκνωτή είναι το άθροισμα ψυκτικού που προέρχεται από τις γεννήτριες G και Gs. Το ψυκτικό υγρό από αυτόν τον συμπυκνωτή ρέει στον ατμοποιητή μέσω μιας βαλβίδας στραγγαλισμού. Μετά την εξαγωγή της θερμότητας από το ψυχόμενο μέσο, το ψυκτικό μέσο εξατμίζεται και στη συνέχεια περνά στον απορροφητή όπου απορροφάται από το ισχυρό (ή ασθενές) διάλυμα που προέρχεται από τον δευτερεύοντα αναγεννητή (Gs) μέσω ενός προθερμαντήρα PH1. Τότε, το προκύπτον ασθενές διάλυμα στον απορροφητή αντλείται στον κύριο αναγεννητή και ο κύκλος ολοκληρώνεται. [9],[14],[15],[16]

Σημειώνεται ότι αν το εργαζόμενο μέσο είναι H₂O/LiBr, τότε στα σημεία (8), (8a), (9) ρέει ισχυρό διάλυμα, στα σημεία (10), (11), (12) ρέει δευτερεύον ισχυρό διάλυμα και στα σημεία (1), (2), (2a), (3) ρέει ασθενές διάλυμα, ενώ αν το εργαζόμενο μέσο είναι NH₃/H₂O ή NH₃/LiNO₃ ή NH₃/NaSCN τότε στα σημεία (8), (8a), (9) ρέει ασθενές διάλυμα, στα σημεία (10), (11), (12) ρέει δευτερεύον ασθενές διάλυμα και στα σημεία (1), (2), (2a), (3) ρέει ισχυρό διάλυμα.



Εικόνα 37 Σχηματικό διάγραμμα του διβάθμιου συστήματος ψύξης με απορρόφηση.

5.3.2.1 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του διβάθμιου κύκλου

Πίνακας 12 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του διβάθμιου κύκλου.

	$\sum m = \text{σταθ}$
Απορροφητής	$m_1 = m_7 + m_{12}$
Αναγεννητής	$m_3 = m_8 + m_4$
Συμπυκνωτής	$m_5 = m_{4b} + m_{4c}$
Ατμοποιητής	$m_7 = m_6$
Δευτερεύον Συμπυκνωτής	$m_4 = m_{4a}$

Δευτερεύον Αναγεννητής	$m_9 = m_{10} + m_{4c}$
	$\sum m \cdot x = \text{σταθ}$
Απορροφητής	$m_1 \cdot x_1 = m_7 \cdot x_7 + m_{12} \cdot x_{12}$
Αναγεννητής	$m_3 \cdot x_3 = m_8 \cdot x_8 + m_4 \cdot x_4$
Συμπυκνωτής	$m_5 \cdot x_5 = m_{4b} \cdot x_{4b} + m_{4c} \cdot x_{4c}$
Ατμοποιητής	$m_7 \cdot x_7 = m_6 \cdot x_6$
Δευτερεύον Συμπυκνωτής	$m_4 \cdot x_4 = m_{4a} \cdot x_{4a}$
Δευτερεύον Αναγεννητής	$m_9 \cdot x_9 = m_{10} \cdot x_{10} + m_{4c} \cdot x_{4c}$
	Ενεργειακό Ισοζύγιο
Απορροφητής	$Q_a = m_7 \cdot h_7 + m_{12} \cdot h_{12} - m_1 \cdot h_1$
Αναγεννητής	$Q_g = m_4 \cdot h_4 + m_8 \cdot h_8 - m_3 \cdot h_3$
Συμπυκνωτής	$Q_c = m_{4c} \cdot h_{4c} + m_{4b} \cdot h_{4b} - m_5 \cdot h_5$
Ατμοποιητής	$Q_e = m_7 \cdot h_7 - m_6 \cdot h_6$
Δευτερεύον Συμπυκνωτής	$Q_{cs} = m_4 \cdot h_4 - m_{4a} \cdot h_{4a}$
Δευτερεύον Αναγεννητής	$Q_{gs} = m_{4c} \cdot h_{4c} + m_{10} \cdot h_{10} - m_9 \cdot h_9$
	Εξεργειακό Ισοζύγιο (Καταστροφή Εξέργειας)
Απορροφητής	$Ed_a = E_7 + E_{12} - E_1 - Q_a \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right)$
Αναγεννητής	$Ed_g = E_3 - E_4 - E_8 + Q_g \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right)$
Συμπυκνωτής	$Ed_c = E_{4b} + E_{4c} - E_5 - Q_c \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right)$
Ατμοποιητής	$Ed_e = E_6 - E_7 + Q_e \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_e}\right)$

Δευτερεύον Συμπυκνωτής	$Ed_{cs} = E_4 - E_{4a} - Q_{cs} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{cs}}\right)$
Δευτερεύον Αναγεννητής	$Ed_{gs} = E_4 - E_{15} - E_8 - Q_{gs} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{cs}}\right)$

5.3.2.2 Παραδοχές και υποθέσεις κατά την μοντελοποίηση του συστήματος

1. Η ανάλυση λαμβάνει χώρα υπό σταθερές συνθήκες.
 2. Το ψυκτικό μέσο στην έξοδο του συμπυκνωτή είναι κορεσμένο υγρό.
 3. Το ψυκτικό μέσο στην έξοδο του ατμοποιητή είναι κορεσμένος ατμός.
 4. Το διάλυμα στις εξόδους του απορροφητή και των αναγεννητών βρίσκεται σε συνθήκες ισορροπίας και στις αντίστοιχες θερμοκρασίες των συσκευών.
 5. Οι απώλειες πίεσης στους αγωγούς και σε όλους τους εναλλάκτες θερμότητας είναι αμελητέες.
 6. Με εξαίρεση τον κύριο αναγεννητή, τον ατμοποιητή, τον κύριο συμπυκνωτή και τον απορροφητή, δε μεταφέρεται θερμότητα μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος.
 7. Υποθέτουμε ότι η θερμοκρασία του δευτερεύοντος αναγεννητή είναι 5 βαθμούς κελσίου μικρότερη από τη θερμοκρασία του δευτερεύοντος συμπυκνωτή.
 8. Ο βαθμός απόδοσης της αντλίας διαλύματος θεωρείται 0.95.
 9. Η αποτελεσματικότητα των εναλλακτών θερμότητας διαλύματος θεωρείται 0.8.
 10. Οι συνθήκες περιβάλλοντος ορίζονται ως 25 °C (θερμοκρασία) και 1 atm (πίεση).
 11. Η κινητική, η δυναμική και η χημική εξέργεια των ρευμάτων αμελούνται.
- [9],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19],[20]

5.3.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης διβάθμιου κύκλου για διαφορετικά εργαζόμενα μέσα

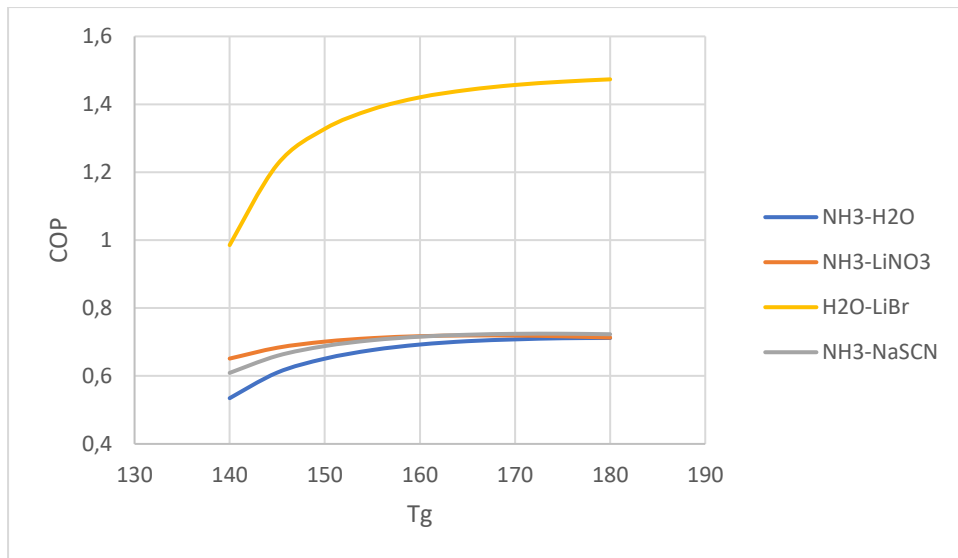
Τα παρακάτω διαγράμματα έχουν γίνει για μεταβλητή θερμοκρασία στον αναγεννητή από 140°C μέχρι 180 °C με βήμα 5 °C και με δεδομένα τα παρακάτω:

$T_c=40^\circ\text{C}$

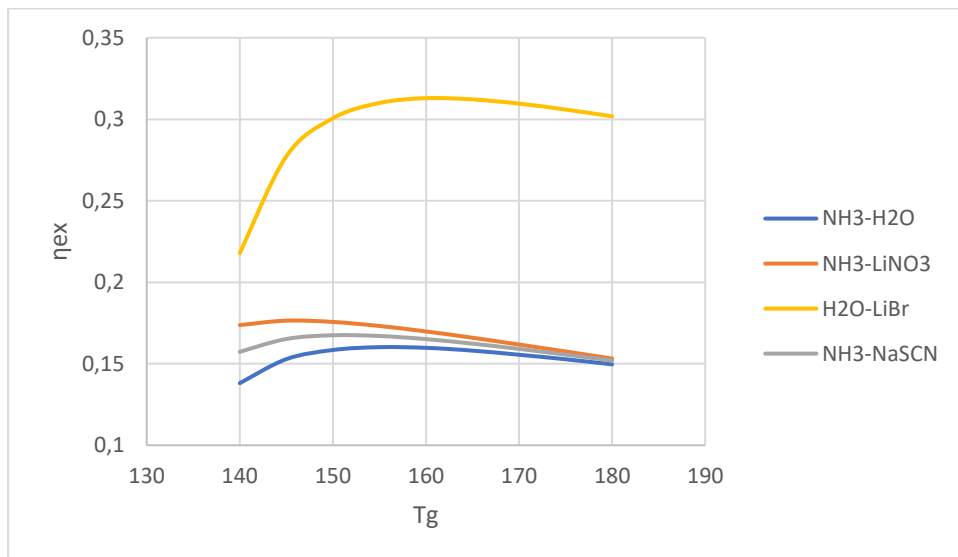
$T_a=40^\circ\text{C}$

$T_e=5^\circ\text{C}$

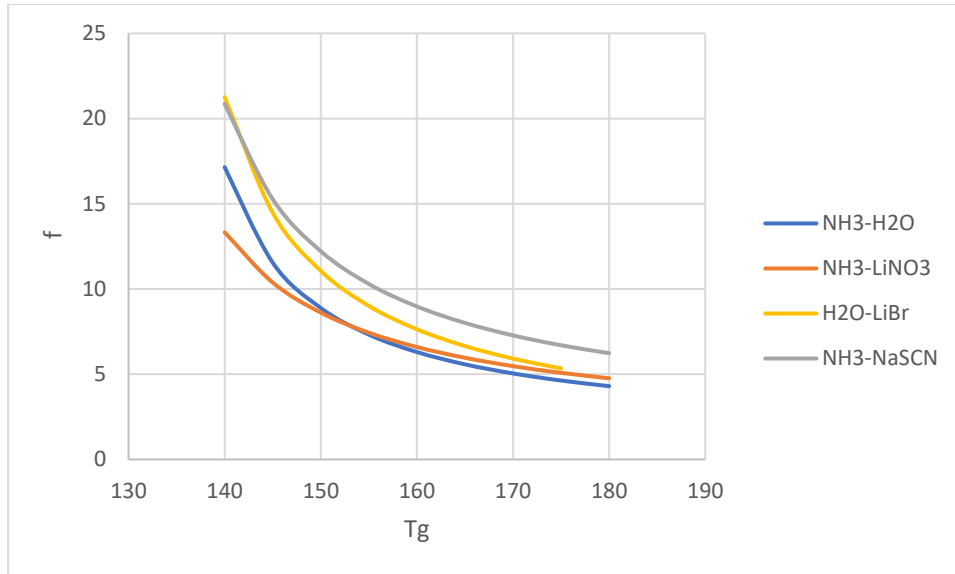
$Q_e=15\text{ kW}$



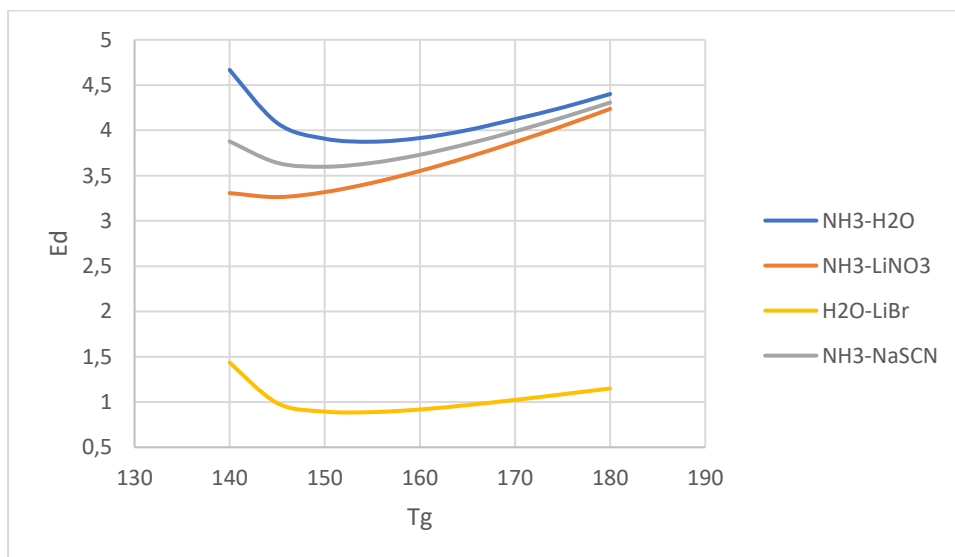
Διάγραμμα 6 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



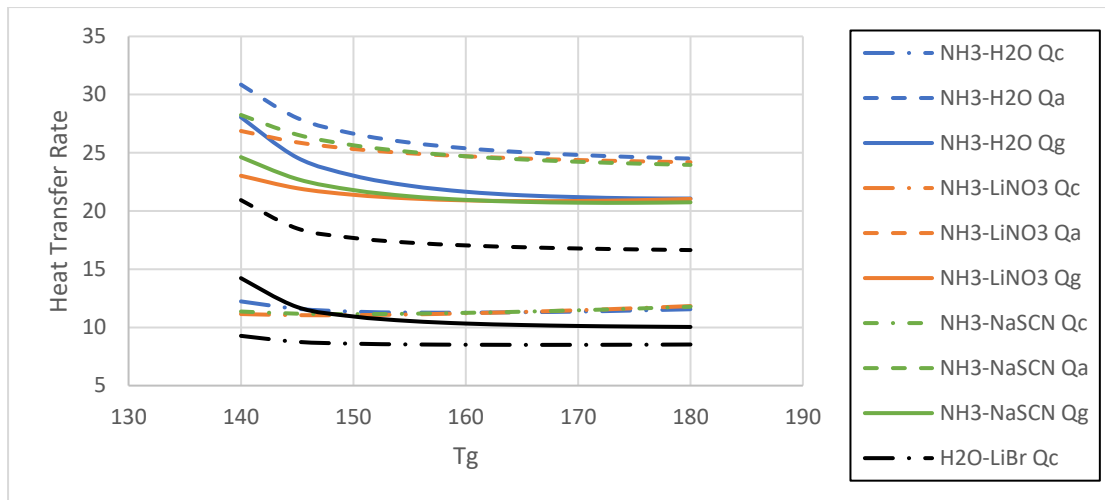
Διάγραμμα 7 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 8 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 9 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 10 Μεταφορά θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

5.3.2.4 Συμπεράσματα

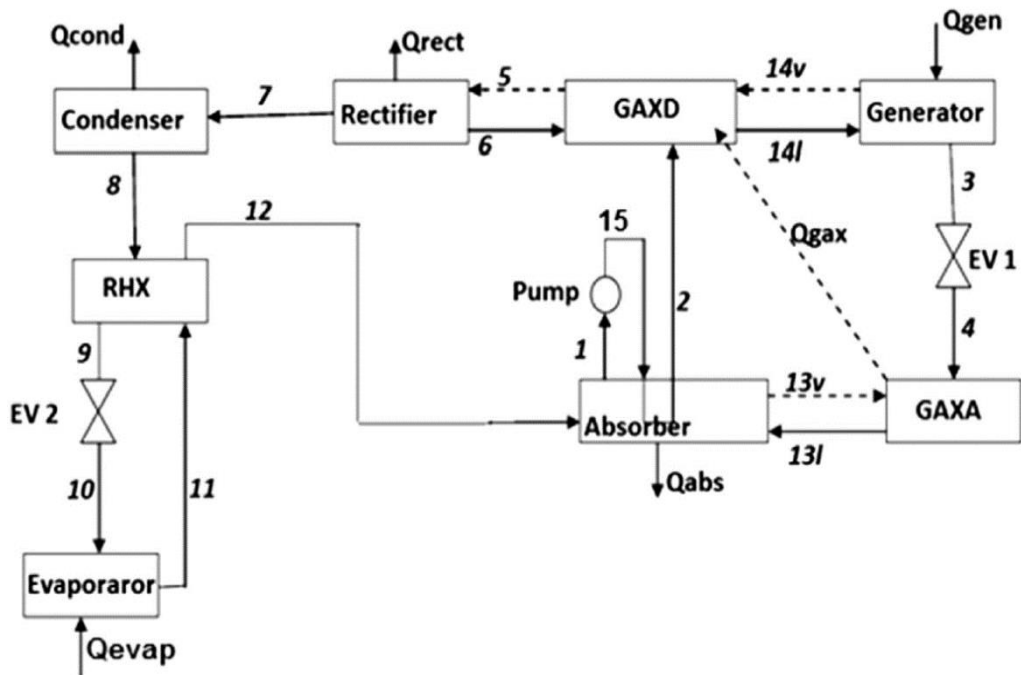
- Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 6 ο συντελεστής συμπεριφοράς αρχικά αυξάνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή και μετά μένει σχεδόν σταθερός για όλα τα εργαζόμενα μέσα. Φαίνεται επίσης ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς για H₂O/LiBr είναι αρκετά μεγαλύτερος απ' ό τι είναι στα άλλα εργαζόμενα μέσα. Κατά τ' άλλα, όσον αφορά τα άλλα εργαζόμενα μέσα, τον καλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς από τους 160°C και μετά δίνει το εργαζόμενο μέσο NH₃/ NaSCN και μετά το NH₃/ LiNO₃.
- Από το διάγραμμα 7 συμπεραίνουμε ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αυξάνεται μέχρι ένα σημείο και στη συνέχεια μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή. Όπως και με τον συντελεστή συμπεριφοράς έτσι και τώρα καλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης δίνει το εργαζόμενο μέσο H₂O/LiBr. Ωστόσο, όσον αφορά τα άλλα εργαζόμενα μέσα, σε αυτή την περίπτωση τον καλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης δίνει το NH₃/LiNO₃ και μετά το NH₃/NaSCN.
- Από το διάγραμμα 8 συμπεραίνουμε ότι ο λόγος ανακυκλοφορίας μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή. Φαίνεται ότι ο λόγος ανακυκλοφορίας του NH₃/NaSCN είναι μεγαλύτερος απ' ό τι των άλλων εργαζόμενων μέσων. Αυτό σημαίνει ότι είτε η αντλία διαλύματος πρέπει να κινείται με περισσότερες στροφές είτε χρειάζεται μία μεγαλύτερη αντλία. Όσο μειώνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή, ο λόγος ανακυκλοφορίας αυξάνεται αρκετά, αλλά όχι όσο αυξάνεται στο μονοβάθμιο σύστημα. Συνεπώς, είναι πιο λογικό για ένα διβάθμιο σύστημα να λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες απ' ό τι για ένα μονοβάθμιο.
- Στο διάγραμμα 9 φαίνεται η καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αναγεννητή η καταστροφή εξέργειας αρχικά μειώνεται μέχρι ένα σημείο και στη συνέχεια αυξάνεται. Φαίνεται ότι η υψηλότερη καταστροφή εξέργειας συμβαίνει για εργαζόμενο μέσο το NH₃/H₂O και η χαμηλότερη και εργαζόμενο μέσο το H₂O/LiBr.
- Στο διάγραμμα 10 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή, η θερμότητα τροφοδοσίας του αναγεννητή και η θερμότητα που αποβάλλει ο

απορροφητής αρχικά μειώνονται και στη συνέχεια η θερμότητα τροφοδοσίας του αναγεννητή έχει μία μικρή ανοδική τάση και η θερμότητα που αποβάλλει ο απορροφητής έχει μία μικρή καθοδική τάση, ενώ η θερμότητα που απορρίπτει ο συμπυκνωτής αυξάνεται ελάχιστα, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή. Παρατηρούμε ότι ο μέγιστος COP επιτυγχάνεται εκεί που έχουμε τη μικρότερη θερμότητα τροφοδοσίας στον αναγεννητή.

5.3.3 Κύκλος GAX (Generator Absorber Heat Exchanger):

Τα κύρια συστατικά του κύκλου ψύξης με απορρόφηση με GAX απεικονίζονται στην εικόνα 37. Το κορεσμένο ισχυρό διάλυμα (ισχυρό σε αμμωνία) αντλείται σε υψηλή πίεση (15) και στη συνέχεια διέρχεται μέσω του τμήματος υψηλής θερμοκρασίας του απορροφητή στο τμήμα χαμηλής θερμοκρασίας του αναγεννητή (2), ώστε να ανακτηθεί θερμότητα εσωτερικά. Το τμήμα υψηλής θερμοκρασίας του απορροφητή ονομάζεται GAXA (GAXA) και το τμήμα χαμηλής θερμοκρασίας του αναγεννητή είναι γνωστό ως GAX desorber (GAXD). Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ GAXA και GAXD επιτρέπει την εσωτερική ανάκτηση θερμότητας. Στον αναγεννητή παρέχεται εξωτερική θερμότητα που διαχωρίζει το ψυκτικό μέσο και το υπόλοιπο κορεσμένο ασθενές διάλυμα (3) ρέει πίσω στον απορροφητή. Το κορεσμένο ψυκτικό υγρό που εξέρχεται από τον συμπυκνωτή (8) ψύχεται από τον προψύκτη συμπυκνώματος (RHX) ενώ ο κορεσμένος ατμός αμμωνίας (11) προθερμαίνεται προτού εισέλθει στον απορροφητή (12). Η πίεση του υπόψυκτου ψυκτικού μέσου (9) μειώνεται μέχρι την πίεση του ατμοποιητή (10) πριν εισέλθει στον ατμοποιητή όπου παράγεται η ψύξη. Οι ατμοί της αμμωνίας (12) απορροφώνται από το ασθενές διάλυμα (4) για να σχηματίσουν ισχυρό διάλυμα αμμωνίας και νερού (1). Έτσι ολοκληρώνεται ο κύκλος. [17],[18],[19],[20]

Σημειώνεται ότι στον κύκλο ψύξης με απορρόφηση με GAX χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα εργαζόμενα μέσα: $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$, NH_3/NaSCN .



Εικόνα 38 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ψύξης με απορρόφηση με GAX.

5.3.3.1 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του κύκλου GAX

Πίνακας 13 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του κύκλου GAX.

	$\sum m = \text{σταθ}$
Απορροφητής	$m_1 + m_2 = m_{12} + m_4 + m_{15}$
Desorber	$m_2 + m_6 = m_5 + m_3$
Συμπυκνωτής	$m_7 = m_8$
Ατμοποιητής	$m_{10} = m_{11}$
GAXA	$m_{13l} = m_{13v} + m_4$
GAXD	$m_2 + m_6 + m_{14v} = m_5 + m_{14l}$
rectifier	$m_5 = m_6 + m_7$
	$\sum m \cdot x = \text{σταθ}$
Απορροφητής	$m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 = m_{12} \cdot x_{12} + m_4 \cdot x_4 + m_{15} \cdot x_{15}$
Desorber	$m_2 \cdot x_2 + m_6 \cdot x_6 = m_5 \cdot x_5 + m_3 \cdot x_3$

Συμπυκνωτής	$m_7 \cdot x_7 = m_8 \cdot x_8$
Ατμοποιητής	$m_{10} \cdot x_{10} = m_{11} \cdot x_{11}$
GAXA	$m_{13l} \cdot x_{13l} = m_{13v} \cdot x_{13v} + m_4 \cdot x_4$
GAXD	$m_2 \cdot x_2 + m_6 \cdot x_6 + m_{14v} \cdot x_{14v} = m_5 \cdot x_5 + m_{14l} \cdot x_{14l}$
rectifier	$m_5 \cdot x_5 = m_6 \cdot x_6 + m_7 \cdot x_7$
	Ενεργειακό Ισοζύγιο
Απορροφητής	$Q_a = m_{12} \cdot h_{12} + m_4 \cdot h_4 + m_{15} \cdot h_{15} - m_1 \cdot h_1 - m_2 \cdot h_2$
Desorber	$Q_g = m_5 \cdot h_5 + m_3 \cdot h_3 - m_2 \cdot h_2 - m_6 \cdot h_6$
Συμπυκνωτής	$Q_c = m_8 \cdot h_8 - m_7 \cdot h_7$
Ατμοποιητής	$Q_e = m_{10} \cdot h_{10} - m_{11} \cdot h_{11}$
GAXA	$Q_{available} = m_{13v} \cdot h_{13v} + m_4 \cdot h_4 - m_{13l} \cdot h_{13l}$
GAXD	$Q_{required} = m_5 \cdot h_5 + m_{14l} \cdot h_{14l} - m_2 \cdot h_2 - m_6 \cdot h_6 - m_{14v} \cdot h_{14v}$
recifier	$Q_{rectifier} = m_5 \cdot h_5 - m_6 \cdot h_6 - m_7 \cdot h_7$
	Εξεργειακό Ισοζύγιο (Καταστροφή Εξέργειας)
Απορροφητής	$Ed_a = E_{12} + E_4 + E_{15} - E_1 - E_2 - Q_a \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right)$
Desorber	$Ed_g = E_5 + E_3 - E_2 - E_6 + Q_g \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right)$
Συμπυκνωτής	$Ed_c = E_7 - E_8 - Q_c \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right)$
Ατμοποιητής	$Ed_e = E_{10} - E_{11} + Q_e \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_e}\right)$
GAXA	
GAXD	
recifier	$Ed_{rectifier} = E_5 - E_6 - E_7 - Q_{rec} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{rec}}\right)$

5.3.3.2 Παραδοχές και υποθέσεις κατά την μοντελοποίηση του συστήματος

1. Η ανάλυση λαμβάνει χώρα υπό σταθερές συνθήκες.
2. Το ψυκτικό μέσο στην έξοδο του συμπυκνωτή είναι κορεσμένο υγρό.
3. Το ψυκτικό μέσο στην έξοδο του ατμοποιητή είναι κορεσμένος ατμός.
4. Το διάλυμα στις εξόδους του απορροφητή, των αναγεννητών, του GAXA και του GAXD βρίσκεται σε συνθήκες ισορροπίας και στις αντίστοιχες θερμοκρασίες των συσκευών.
5. Οι απώλειες πίεσης στους αγωγούς και σε όλους τους εναλλάκτες θερμότητας είναι αμελητέες.
6. Η θερμοκρασία προσέγγισης σε κάθε άκρο του εναλλάκτη θερμότητας GAX θεωρείται ότι είναι 0 K.
7. Με εξαίρεση τον αναγεννητή, τον ατμοποιητή, τον συμπυκνωτή, τον απορροφητή και το rectifier, δε μεταφέρεται θερμότητα μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος.
8. Ο βαθμός απόδοσης της αντλίας διαλύματος θεωρείται 0.95.
9. Η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη θερμότητας θεωρείται 0.8.
10. Οι συνθήκες περιβάλλοντος ορίζονται ως 25 °C (θερμοκρασία) και 1 atm (πίεση).
11. Η κινητική, η δυναμική και η χημική εξέργεια των ρευμάτων αμελούνται. [9],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19],[20]

5.3.3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου GAX για διαφορετικά εργαζόμενα μέσα

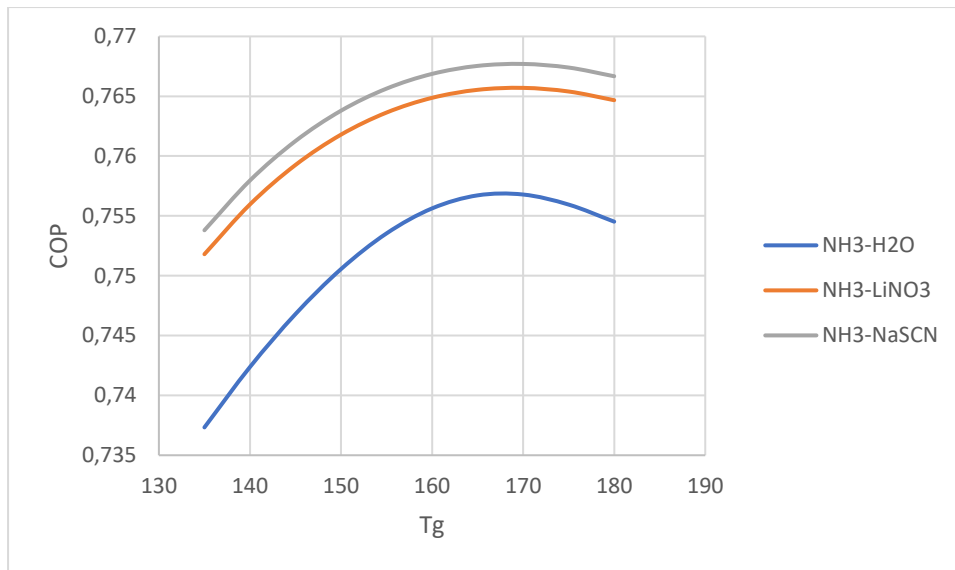
Τα παρακάτω διαγράμματα έχουν γίνει για μεταβλητή θερμοκρασία στον αναγεννητή από 135°C μέχρι 180 °C με βήμα 5 °C και με δεδομένα τα παρακάτω:

$$T_c=30\text{ }^{\circ}\text{C}$$

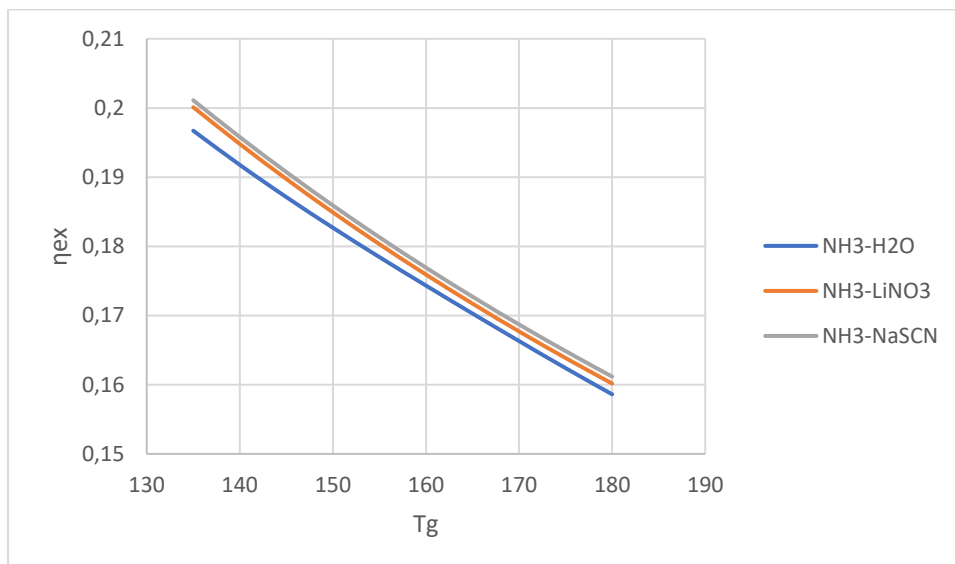
$$T_e=5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_e=15\text{ kW}$$

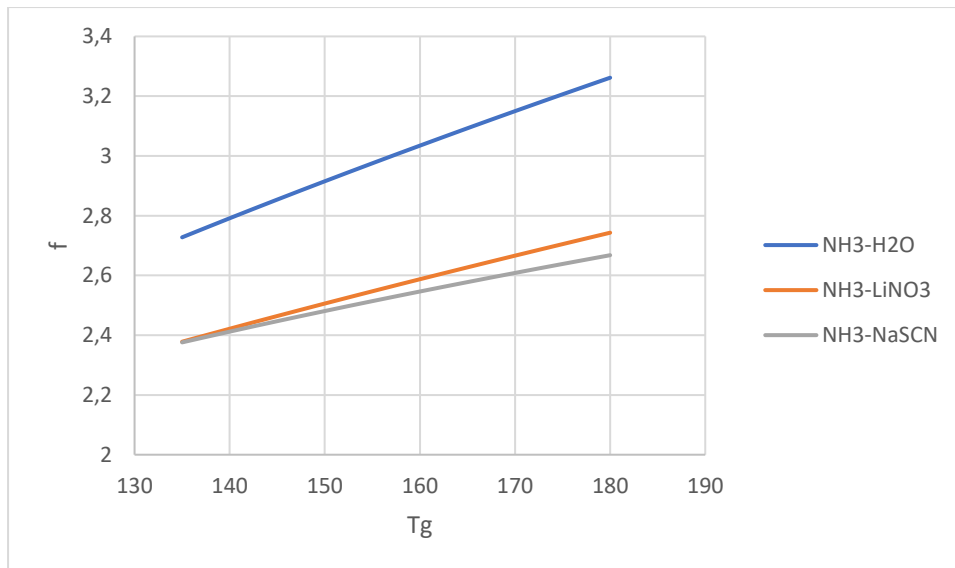
$$D_x=0.3$$



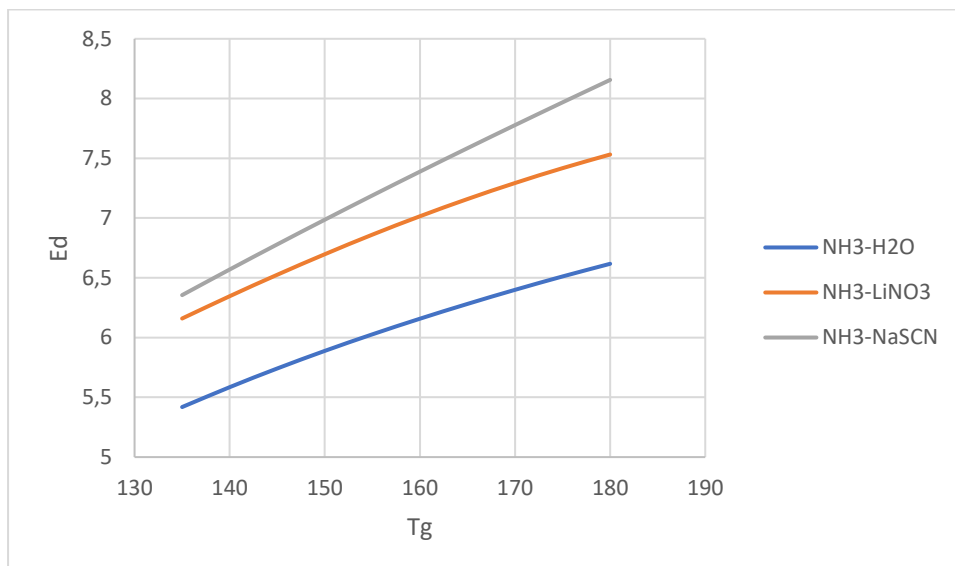
Διάγραμμα 11 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



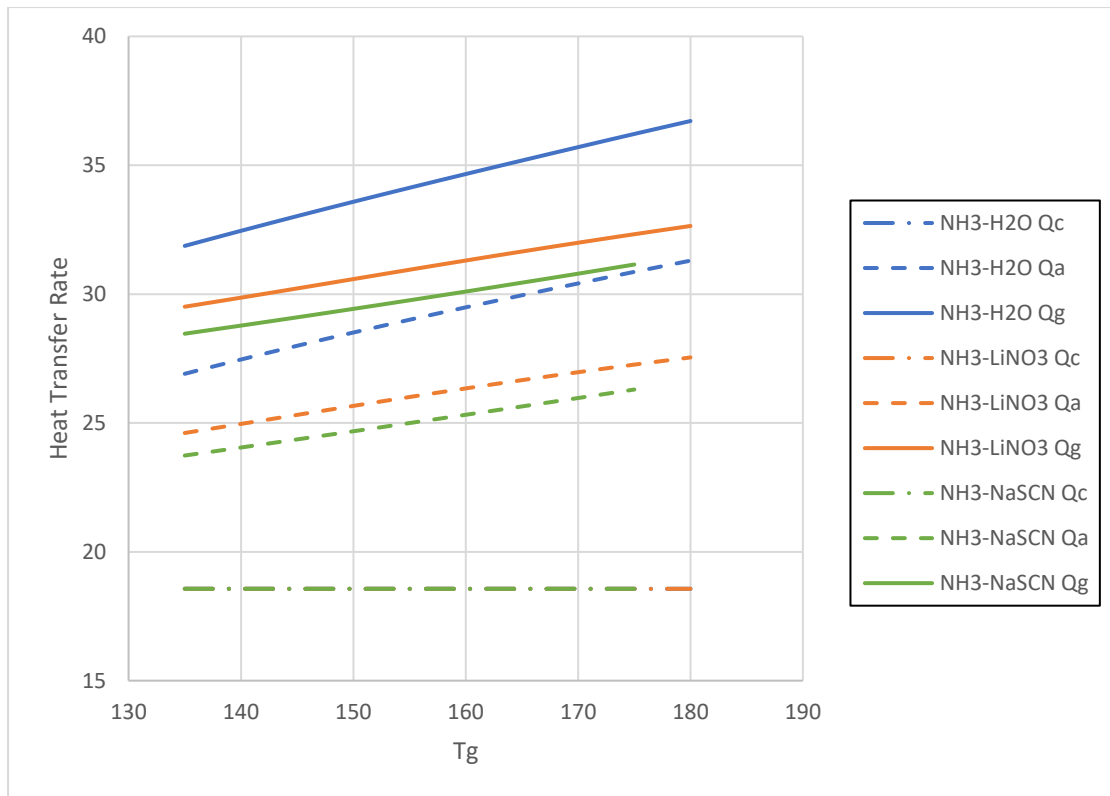
Διάγραμμα 12 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



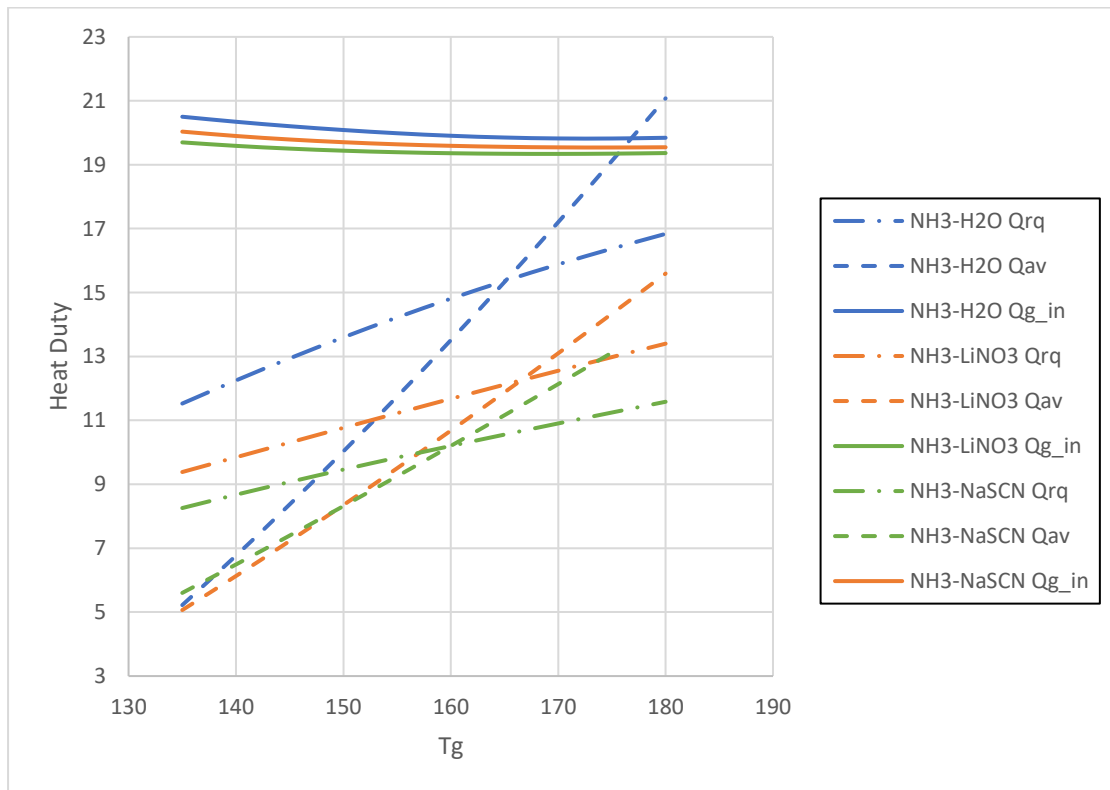
Διάγραμμα 13 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 14 Καταστροφή ενέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 15 Μεταφορά θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 16 Διαθέσιμη θερμότητα του απορροφητή ($Q_{available}$), θερμότητα που απαιτείται από τον desorber ($Q_{required}$) και θερμότητα τροφοδοσίας στον αναγεννητή (Q_{g_in}) συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

5.3.3.4 Συμπεράσματα

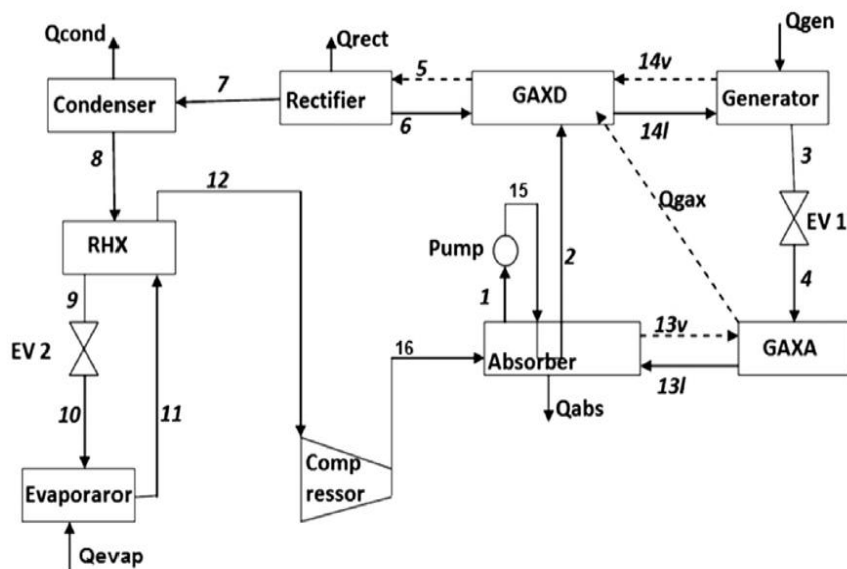
- Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 11 ο συντελεστής συμπεριφοράς αρχικά αυξάνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή και μετά μειώνεται ελάχιστα για όλα τα εργαζόμενα μέσα. Τον καλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς δίνει το εργαζόμενο μέσο NH_3/NaSCN και μετά το $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$.
- Από το διάγραμμα 12 συμπεραίνουμε ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή. Σε αυτή την περίπτωση τον καλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης δίνει το $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ και μετά το NH_3/NaSCN .
- Από το διάγραμμα 13 συμπεραίνουμε ότι ο λόγος ανακυκλοφορίας αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή. Φαίνεται ότι ο λόγος ανακυκλοφορίας του $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ είναι μεγαλύτερος απ' ό,τι των άλλων εργαζόμενων μέσων. Αυτό σημαίνει ότι είτε η αντλία διαλύματος πρέπει να κινείται με περισσότερες στροφές είτε χρειάζεται μία μεγαλύτερη αντλία.
- Στο διάγραμμα 14 φαίνεται η καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αναγεννητή η καταστροφή εξέργειας αυξάνεται. Φαίνεται ότι η υψηλότερη καταστροφή εξέργειας συμβαίνει για εργαζόμενο μέσο το NH_3/NaSCN και η χαμηλότερη και εργαζόμενο μέσο το $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$.
- Στο διάγραμμα 15 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή, η θερμότητα τροφοδοσίας του αναγεννητή και η θερμότητα που αποβάλλει ο απορροφητής αυξάνονται, ενώ η θερμότητα που απορρίπτει ο συμπυκνωτής μένει σταθερή, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή.
- Στο διάγραμμα 16 παρατηρούμε ότι, στο σημείο που η διαθέσιμη θερμότητα στον απορροφητή είναι ίση με την απαιτούμενη θερμότητα από τον GAXD, ο συντελεστής συμπεριφοράς μεγιστοποιείται και η θερμότητα τροφοδοσίας ελαχιστοποιείται.

5.3.4 Κύκλος HGAX (Hybrid Generator Absorber Heat Exchanger):

Τα κύρια συστατικά του κύκλου ψύξης με συμπύεση-απορρόφηση με GAX απεικονίζονται στην εικόνα 38. Το κορεσμένο ισχυρό διάλυμα (ισχυρό σε αμμωνία) αντλείται σε υψηλή πίεση (15) και στη συνέχεια διέρχεται μέσω του τμήματος υψηλής θερμοκρασίας του απορροφητή στο τμήμα χαμηλής θερμοκρασίας του αναγεννητή (2), ώστε να ανακτηθεί θερμότητα εσωτερικά. Το τμήμα υψηλής θερμοκρασίας του απορροφητή ονομάζεται GAXA (GAXA) και το τμήμα χαμηλής θερμοκρασίας του αναγεννητή είναι γνωστό ως GAX desorber (GAXD). Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ GAXA και GAXD επιτρέπει την εσωτερική ανάκτηση θερμότητας. Στον αναγεννητή παρέχεται εξωτερική θερμότητα που διαχωρίζει το ψυκτικό μέσο και το υπόλοιπο κορεσμένο ασθενές διάλυμα (3) ρέει πίσω στον απορροφητή. Το κορεσμένο ψυκτικό υγρό που εξέρχεται από τον συμπυκνωτή (8) ψύχεται από τον προψύκτη συμπυκνώματος (RHX) ενώ ο κορεσμένος

ατμός αμμωνίας (11) προθερμαίνεται προτού εισέλθει στον απορροφητή (12). Η πίεση του υπόψυκτου ψυκτικού μέσου (9) μειώνεται μέχρι την πίεση του ατμοποιητή (10) πριν εισέλθει στον ατμοποιητή όπου παράγεται η ψύξη. Ο συμπιεστής αυξάνει την πίεση και τη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου (16). Ο συμπιεστής επιτρέπει στον απορροφητή να λειτουργεί σε σχετικά υψηλή πίεση και θερμοκρασία, γεγονός που με τη σειρά του επιτρέπει μεγαλύτερη ανάκτηση θερμότητας από τον κανονικό κύκλο GAX. Μία χαμηλή τιμή της θερμοκρασίας απορροφητή στον κύκλο απορρόφησης είναι ένα μειονέκτημα επειδή η ψύξη του απορροφητή θα απαιτήσει ένα ψυκτικό μέσο διαφορετικό από τον αέρα περιβάλλοντος. Οι ατμοί της αμμωνίας (16) απορροφώνται από το ασθενές διάλυμα (4) για να σχηματίσουν ισχυρό διάλυμα αμμωνίας και νερού (1). Έτσι ολοκληρώνεται ο κύκλος. [17],[18],[19],[20]

Σημειώνεται ότι στον κύκλο ψύξης με συμπίεση-απορρόφηση με GAX χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα εργαζόμενα μέσα: NH₃/H₂O, NH₃/LiNO₃, NH₃/NaSCN.



Εικόνα 39 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ψύξης με συμπίεση-απορρόφηση με GAX.

5.3.4.1 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του κύκλου HGAX

Πίνακας 14 Εξισώσεις των επιμέρους συσκευών του κύκλου HGAX.

	$\sum m = \text{σταθ}$
Απορροφητής	$m_1 + m_2 = m_{16} + m_4 + m_{15}$
Desorber	$m_2 + m_6 = m_5 + m_3$

Συμπυκνωτής	$m_7 = m_8$
Ατμοποιητής	$m_{10} = m_{11}$
GAXA	$m_{13l} = m_{13v} + m_4$
GAXD	$m_2 + m_6 + m_{14v} = m_5 + m_{14l}$
rectifier	$m_5 = m_6 + m_7$
	$\sum m \cdot x = \sigma\tau\alpha\theta$
Απορροφητής	$m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 = m_{16} \cdot x_{16} + m_4 \cdot x_4 + m_{15} \cdot x_{15}$
Desorber	$m_2 \cdot x_2 + m_6 \cdot x_6 = m_5 \cdot x_5 + m_3 \cdot x_3$
Συμπυκνωτής	$m_7 \cdot x_7 = m_8 \cdot x_8$
Ατμοποιητής	$m_{10} \cdot x_{10} = m_{11} \cdot x_{11}$
GAXA	$m_{13l} \cdot x_{13l} = m_{13v} \cdot x_{13v} + m_4 \cdot x_4$
GAXD	$m_2 \cdot x_2 + m_6 \cdot x_6 + m_{14v} \cdot x_{14v} = m_5 \cdot x_5 + m_{14l} \cdot x_{14l}$
rectifier	$m_5 \cdot x_5 = m_6 \cdot x_6 + m_7 \cdot x_7$
	Ενεργειακό Ισοζύγιο
Απορροφητής	$Q_a = m_{16} \cdot h_{16} + m_4 \cdot h_4 + m_{15} \cdot h_{15} - m_1 \cdot h_1 - m_2 \cdot h_2$
Desorber	$Q_g = m_5 \cdot h_5 + m_3 \cdot h_3 - m_2 \cdot h_2 - m_6 \cdot h_6$
Συμπυκνωτής	$Q_c = m_8 \cdot h_8 - m_7 \cdot h_7$
Ατμοποιητής	$Q_e = m_{10} \cdot h_{10} - m_{11} \cdot h_{11}$
GAXA	$Q_{available} = m_{13v} \cdot h_{13v} + m_4 \cdot h_4 - m_{13l} \cdot h_{13l}$
GAXD	$Q_{required} = m_5 \cdot h_5 + m_{14l} \cdot h_{14l} - m_2 \cdot h_2 - m_6 \cdot h_6 - m_{14v} \cdot h_{14v}$
rectifier	$Q_{rectifier} = m_5 \cdot h_5 - m_6 \cdot h_6 - m_7 \cdot h_7$
	Εξεργειακό Ισοζύγιο (Καταστροφή Εξέργειας)
Απορροφητής	$Ed_a = E_{16} + E_4 + E_{15} - E_1 - E_2 - Q_a \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right)$
Desorber	$Ed_g = E_5 + E_3 - E_2 - E_6 + Q_g \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right)$

Συμπυκνωτής	$Ed_c = E_7 - E_8 - Q_c \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right)$
Ατμοποιητής	$Ed_e = E_{10} - E_{11} + Q_e \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_e}\right)$
GAXA	
GAXD	
recrifier	$Ed_{rectifier} = E_5 - E_6 - E_7 - Q_{rec} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{rec}}\right)$

5.3.4.2 Παραδοχές και υποθέσεις κατά την μοντελοποίηση του συστήματος

1. Η ανάλυση λαμβάνει χώρα υπό σταθερές συνθήκες.
2. Το ψυκτικό μέσο στην έξοδο του συμπυκνωτή είναι κορεσμένο υγρό.
3. Το ψυκτικό μέσο στην έξοδο του ατμοποιητή είναι κορεσμένος ατμός.
4. Το διάλυμα στις εξόδους του απορροφητή, των αναγεννητών, του GAXA και του GAXD βρίσκεται σε συνθήκες ισορροπίας και στις αντίστοιχες θερμοκρασίες των συσκευών.
5. Οι απώλειες πίεσης στους αγωγούς και σε όλους τους εναλλάκτες θερμότητας είναι αμελητέες.
6. Η θερμοκρασία προσέγγισης σε κάθε άκρο του εναλλάκτη θερμότητας GAX θεωρείται ότι είναι 0 K.
7. Με εξαίρεση τον αναγεννητή, τον ατμοποιητή, τον συμπυκνωτή, τον απορροφητή και το rectifier, δε μεταφέρεται θερμότητα μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος.
8. Ο βαθμός απόδοσης της αντλίας διαλύματος θεωρείται 0.95.
9. Η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη θερμότητας θεωρείται 0.8.
10. Οι συνθήκες περιβάλλοντος ορίζονται ως 25 °C (θερμοκρασία) και 1 atm (πίεση).
11. Η κινητική, η δυναμική και η χημική εξέργεια των ρευμάτων αμελούνται. [9],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19],[20]

5.3.4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου HGAX για διαφορετικά εργαζόμενα μέσα

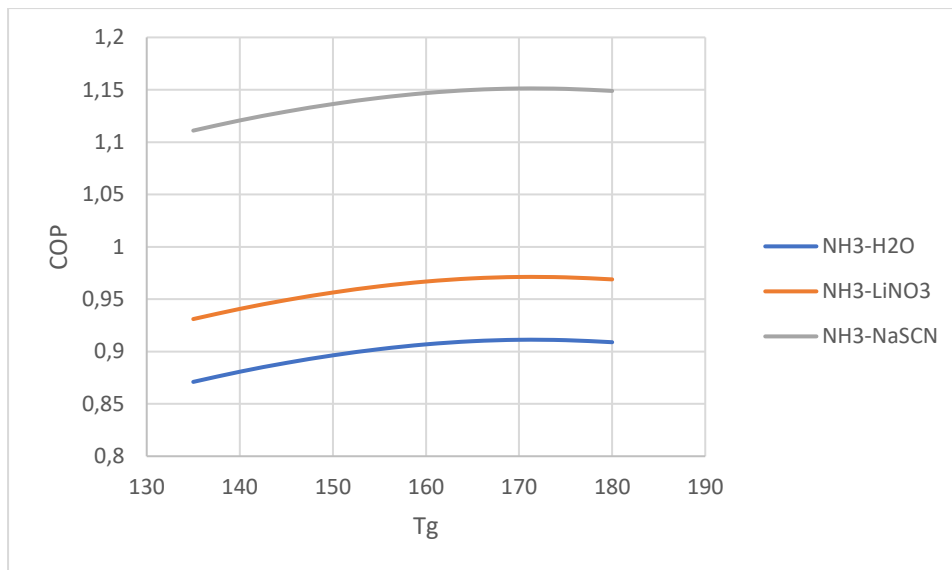
Τα παρακάτω διαγράμματα έχουν γίνει για μεταβλητή θερμοκρασία στον αναγεννητή από 135°C μέχρι 180 °C με βήμα 5 °C και με δεδομένα τα παρακάτω:

$T_c=30^\circ\text{C}$

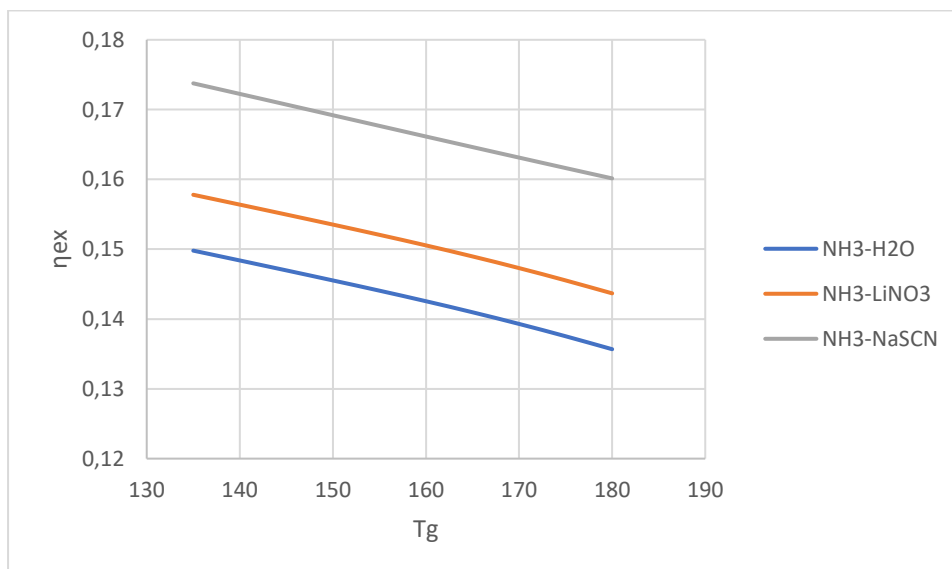
$T_e=5^\circ\text{C}$

$Q_e=15\text{ kW}$

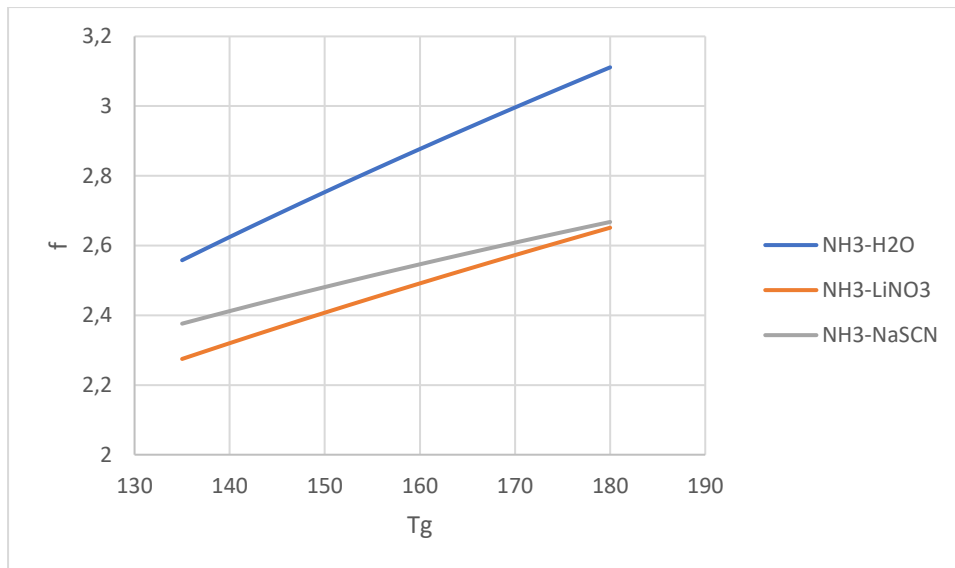
$Dx=0.3$



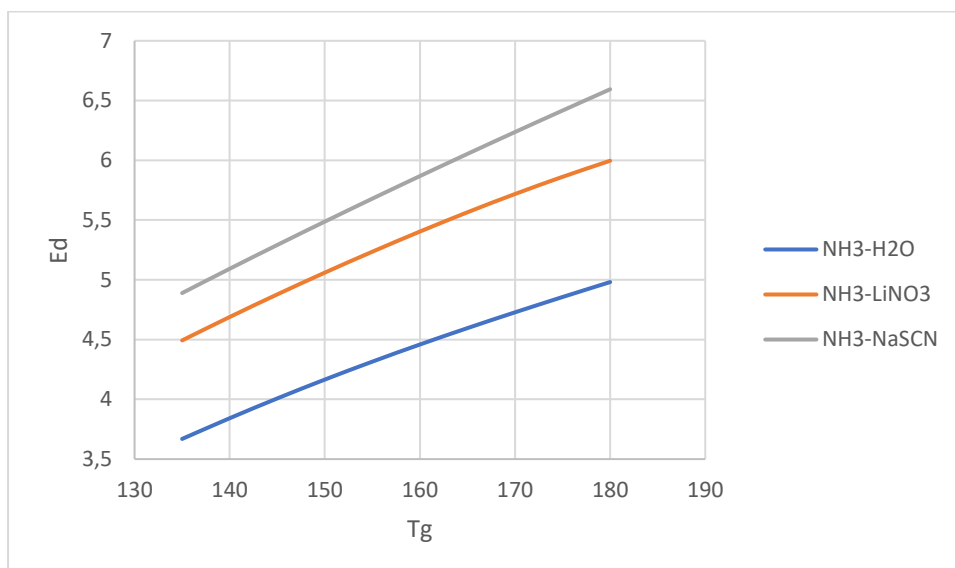
Διάγραμμα 17 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



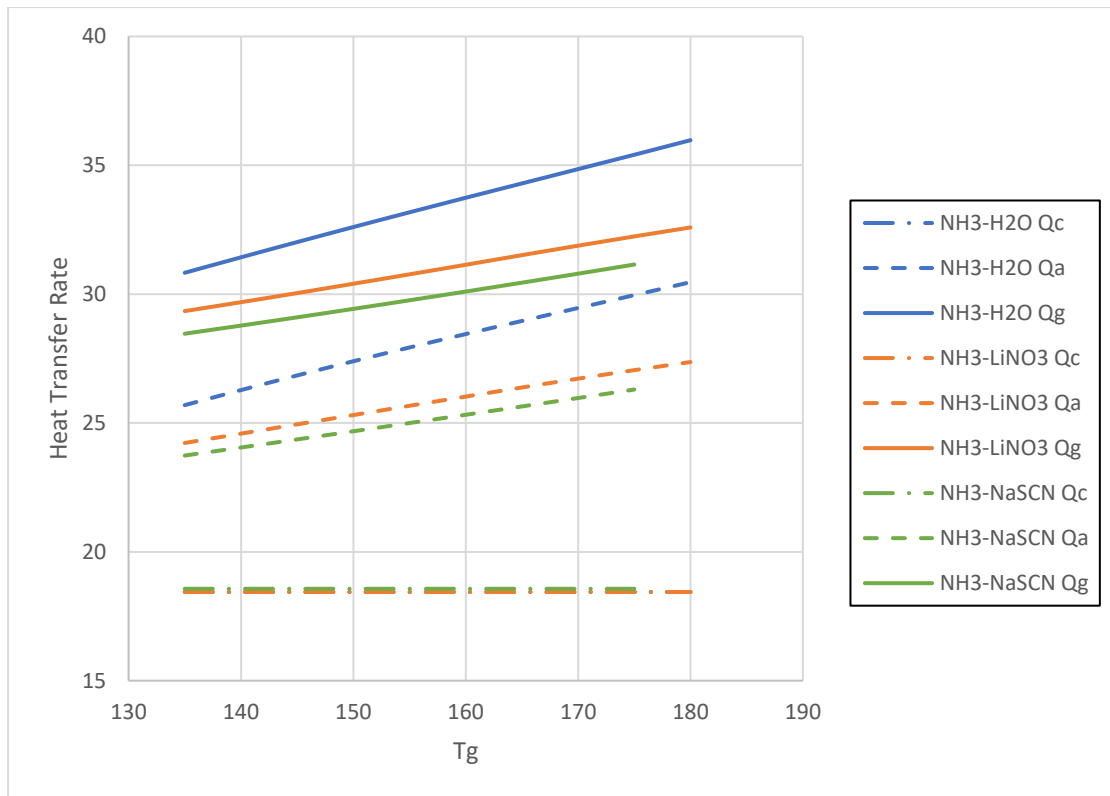
Διάγραμμα 18 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



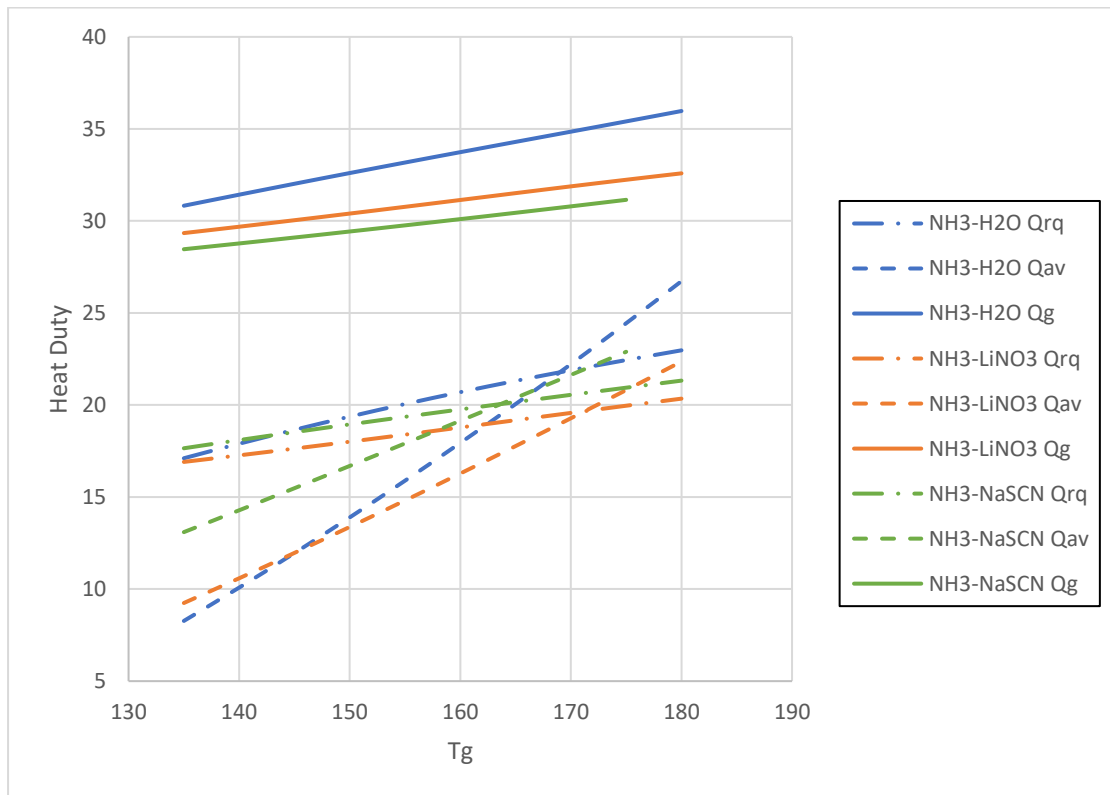
Διάγραμμα 19 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 20 Καταστροφή ενέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 21 Μεταφορά θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



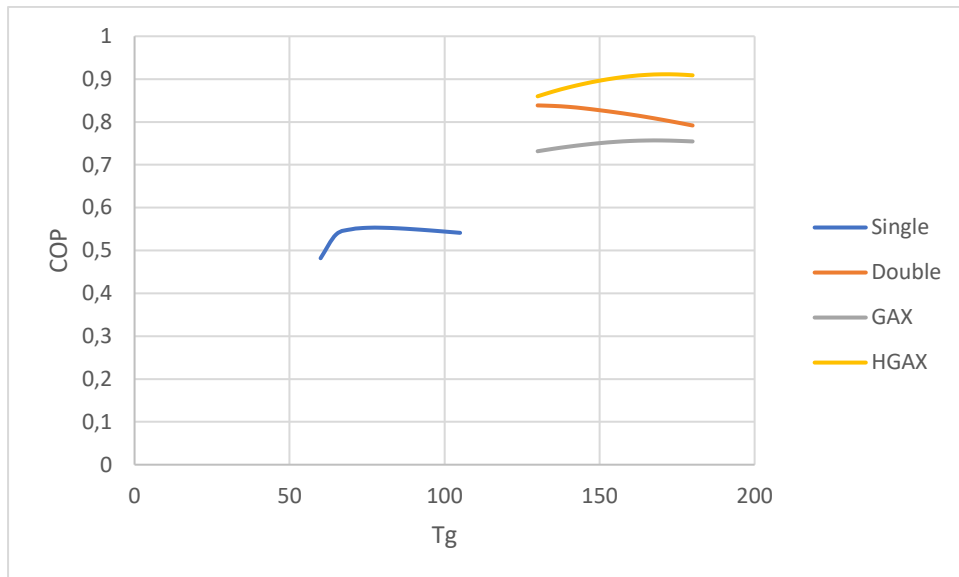
Διάγραμμα 22 Διαθέσιμη θερμότητα του απορροφητή ($Q_{available}$), θερμότητα που απαιτείται από τον desorber ($Q_{required}$) και θερμότητα τροφοδοσίας στον αναγεννητή (Q_{g_in}) συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

5.3.4.4 Συμπεράσματα

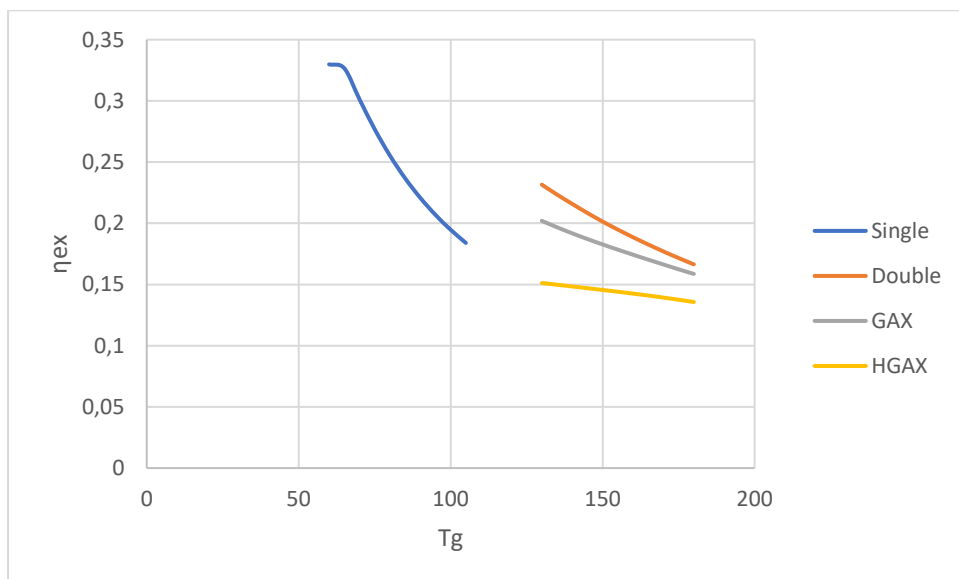
- Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 17 ο συντελεστής συμπεριφοράς αρχικά αυξάνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή και μετά μειώνεται ελάχιστα για όλα τα εργαζόμενα μέσα. Τον καλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς δίνει το εργαζόμενο μέσο NH_3/NaSCN και μετά το $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$.
- Από το διάγραμμα 18 συμπεραίνουμε ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή. Σε αυτή την περίπτωση τον καλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης δίνει το NH_3/NaSCN και μετά το $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$.
- Από το διάγραμμα 19 συμπεραίνουμε ότι ο λόγος ανακυκλοφορίας αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή. Φαίνεται ότι ο λόγος ανακυκλοφορίας του $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ είναι μεγαλύτερος απ' ό τι των άλλων εργαζόμενων μέσων. Αυτό σημαίνει ότι είτε η αντλία διαλύματος πρέπει να κινείται με περισσότερες στροφές είτε χρειάζεται μία μεγαλύτερη αντλία.
- Στο διάγραμμα 20 φαίνεται η καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αναγεννητή η καταστροφή εξέργειας αυξάνεται. Φαίνεται ότι η υψηλότερη καταστροφή εξέργειας συμβαίνει για εργαζόμενο μέσο το NH_3/NaSCN και η χαμηλότερη και εργαζόμενο μέσο το $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$.
- Στο διάγραμμα 21 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή, η θερμότητα τροφοδοσίας του αναγεννητή και η θερμότητα που αποβάλλει ο απορροφητής αυξάνονται, ενώ η θερμότητα που απορρίπτει ο συμπυκνωτής μένει σταθερή, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του αναγεννητή.
- Στο διάγραμμα 22 παρατηρούμε ότι, στο σημείο που η διαθέσιμη θερμότητα στον απορροφητή είναι ίση με την απαιτούμενη θερμότητα από τον GAXD, ο συντελεστής συμπεριφοράς μεγιστοποιείται.

5.4 Σύγκριση των κύκλων απορρόφησης ανά εργαζόμενο μέσο

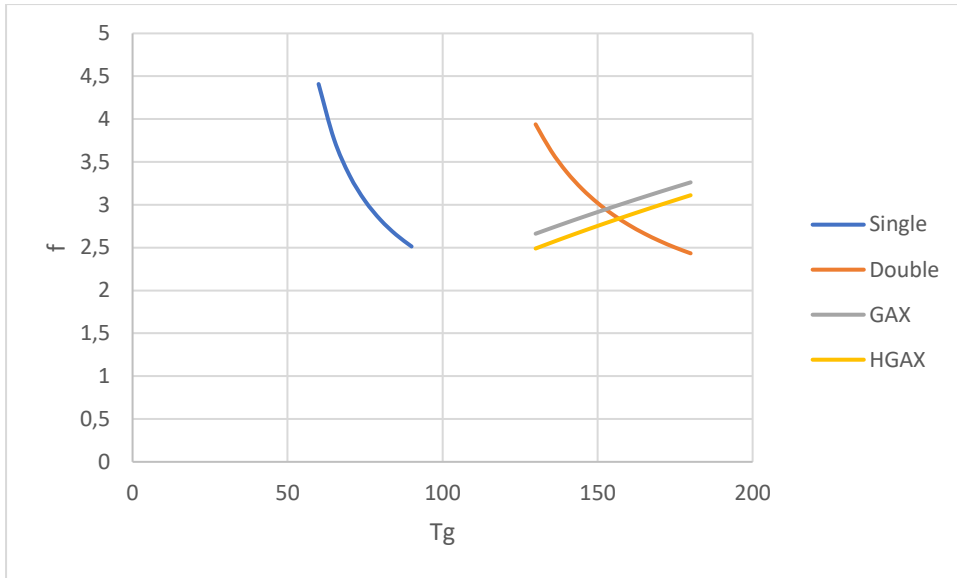
5.4.1 NH₃/H₂O



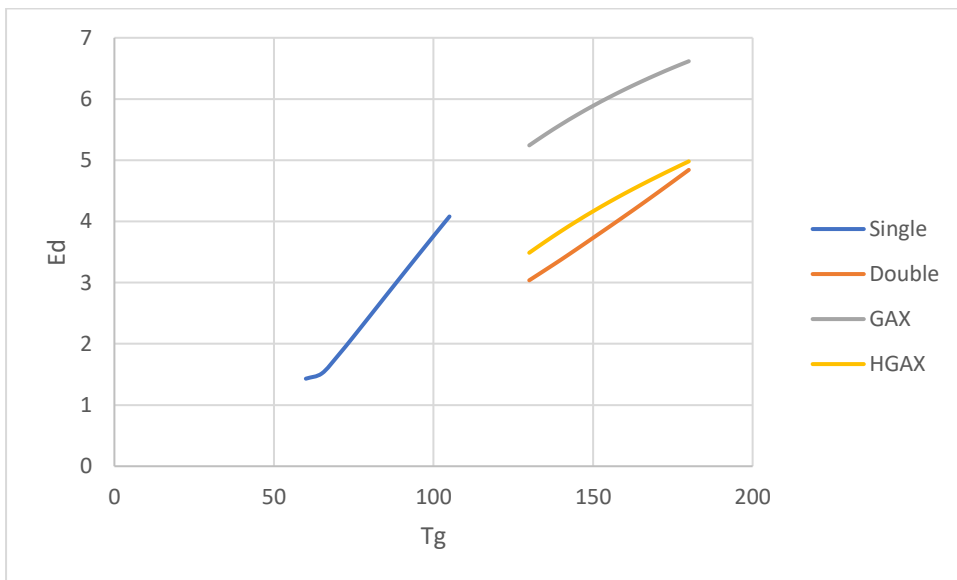
Διάγραμμα 23 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 24 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

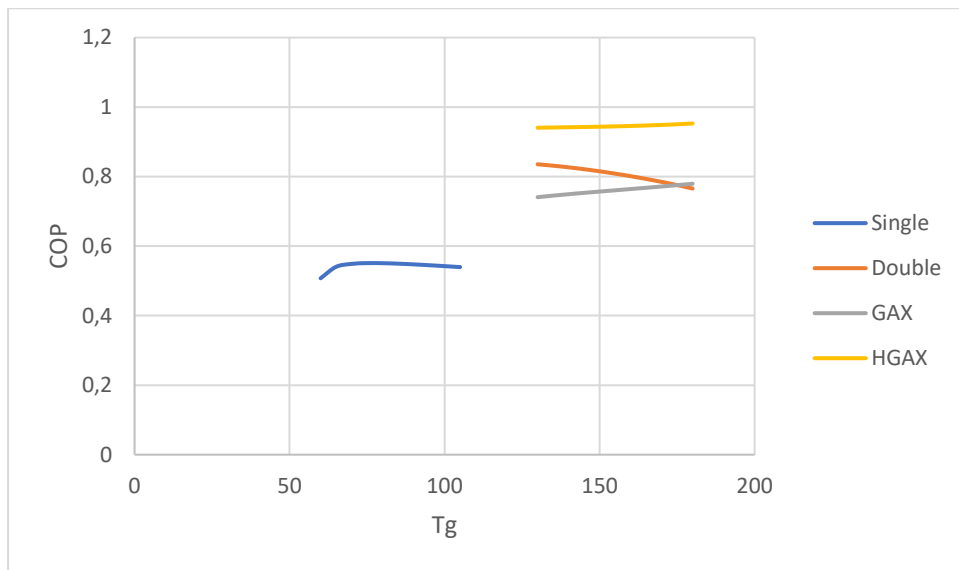


Διάγραμμα 25 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

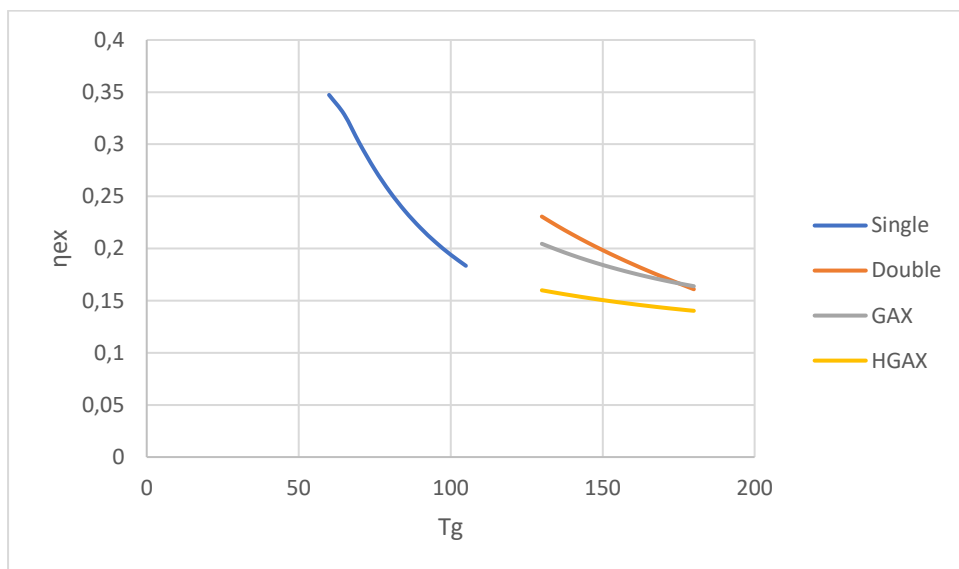


Διάγραμμα 26 Καταστροφή ενέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

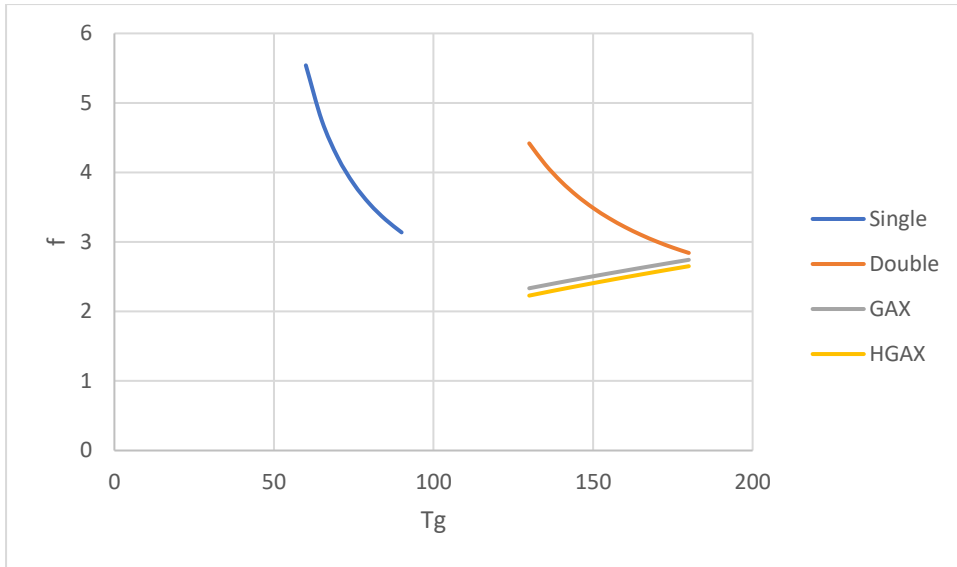
5.4.2 NH₃/LiNO₃



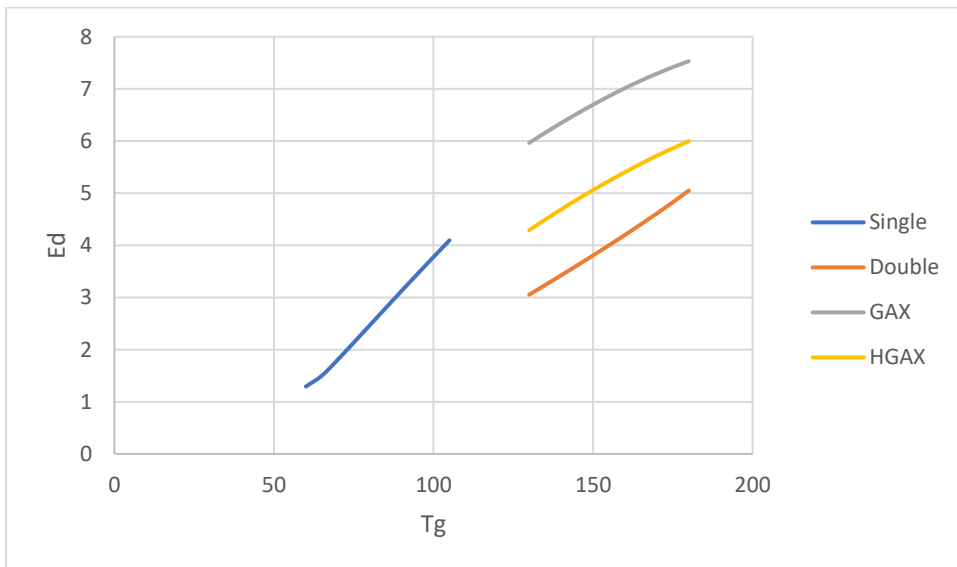
Διάγραμμα 27 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 28 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

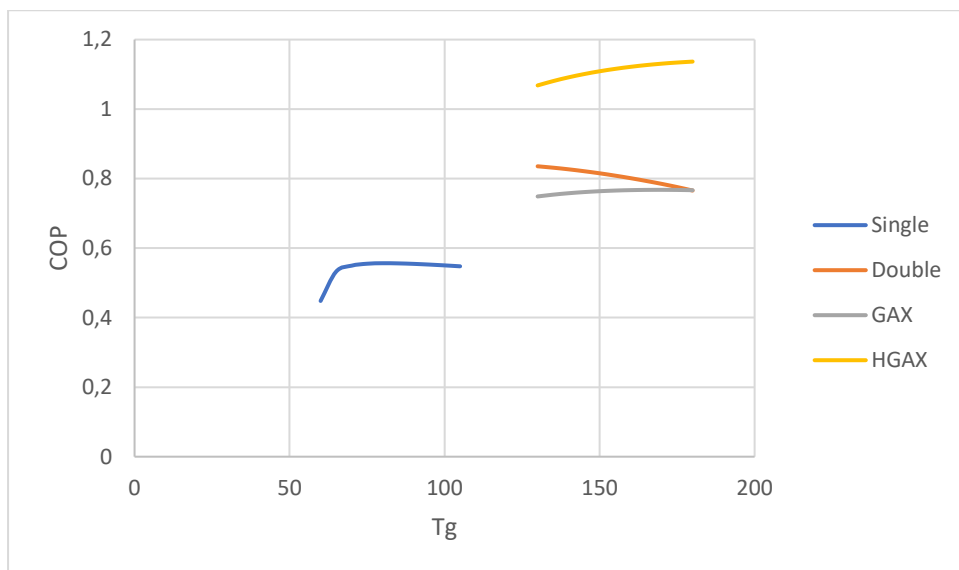


Διάγραμμα 29 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

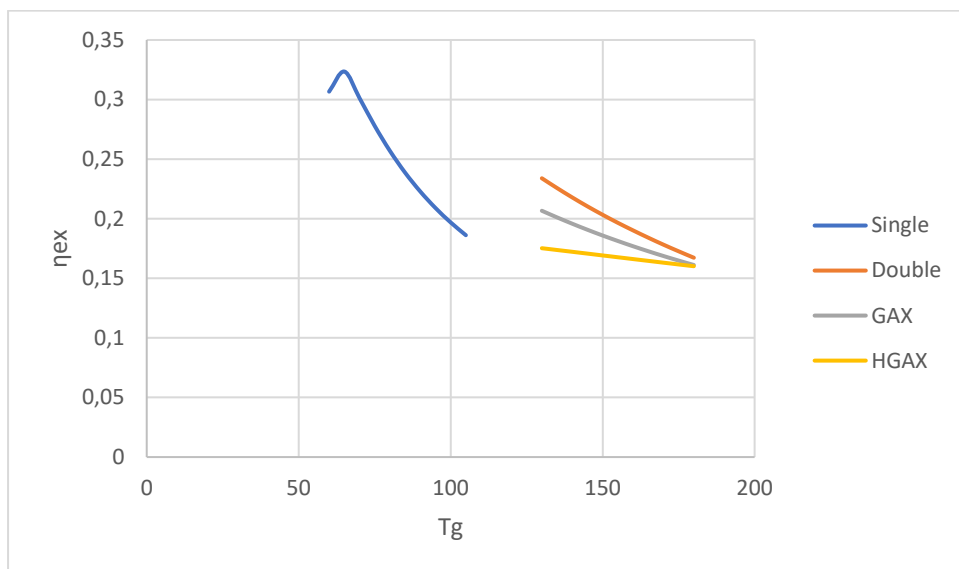


Διάγραμμα 30 Καταστροφή ενέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

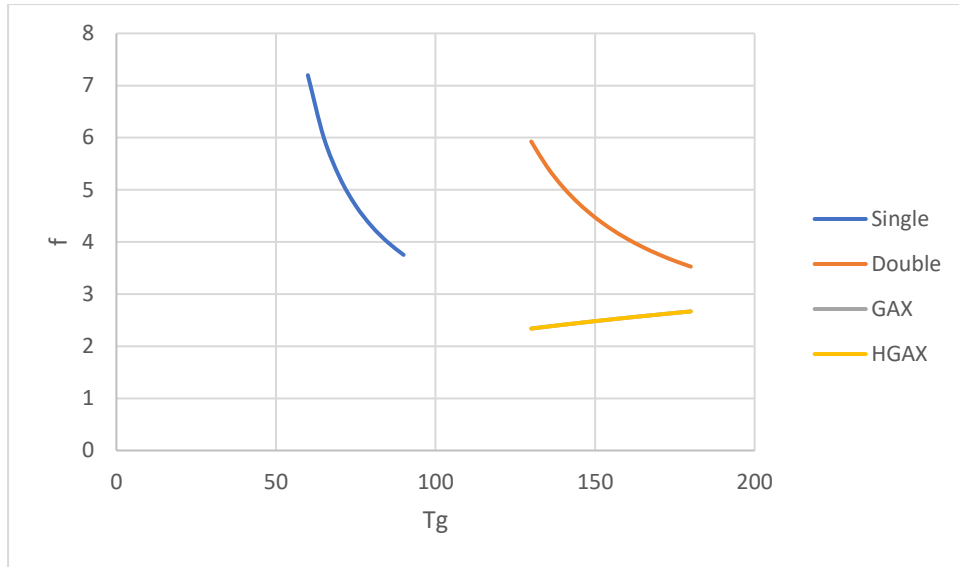
5.4.3 NH₃/NaSCN:



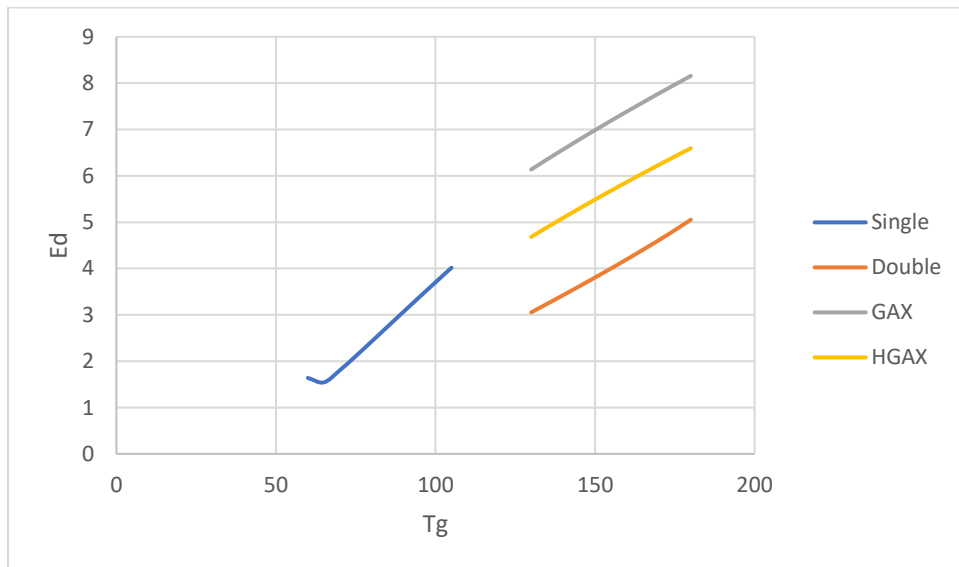
Διάγραμμα 31 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 32 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

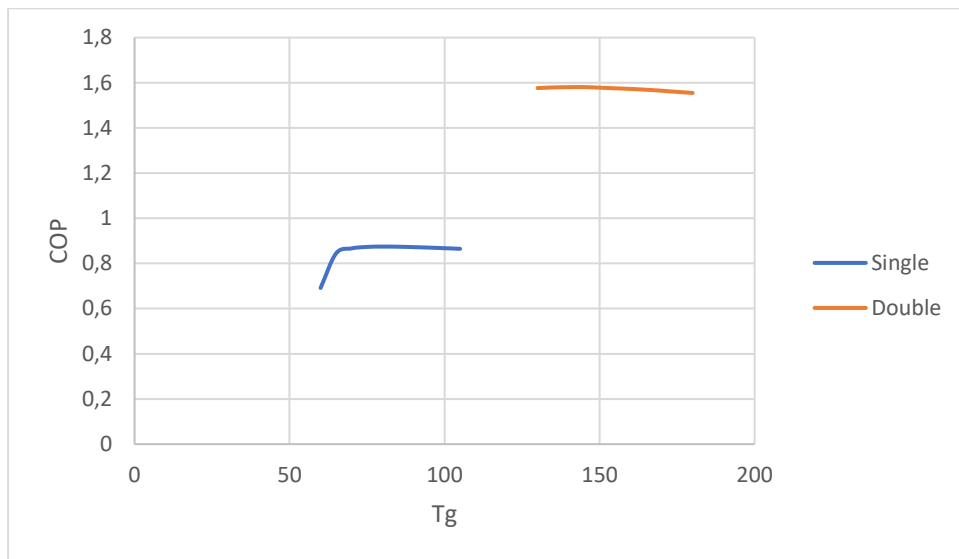


Διάγραμμα 33 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

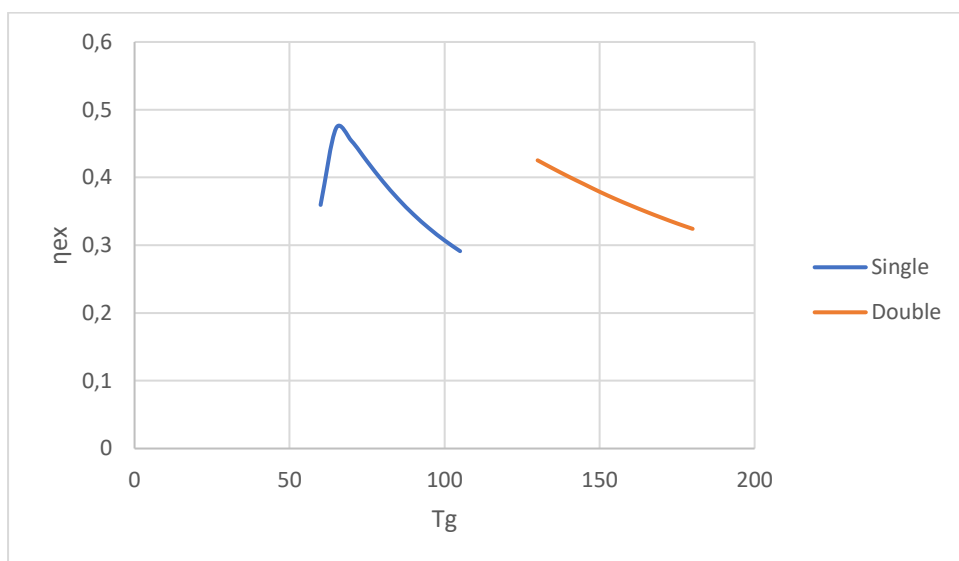


Διάγραμμα 34 Καταστροφή ενέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

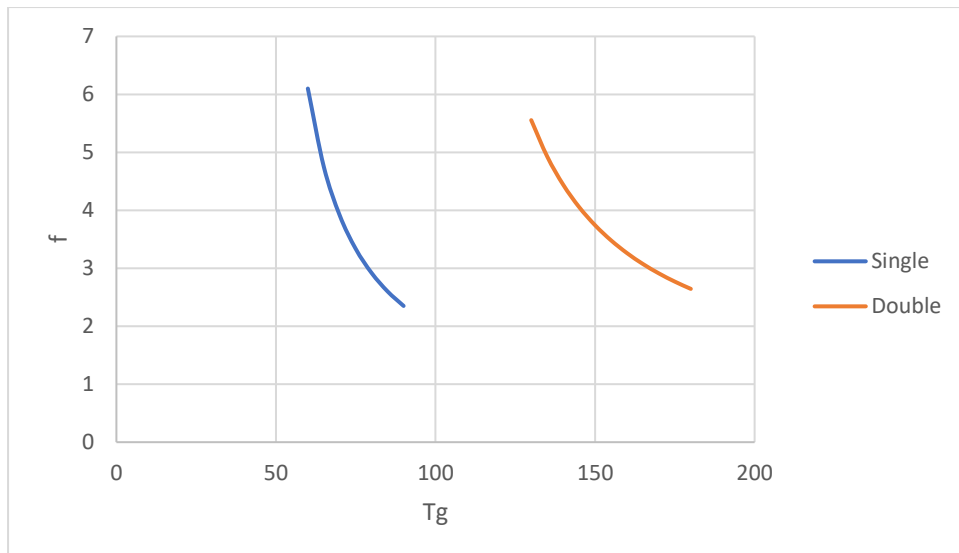
5.4.4 H₂O/ LiBr



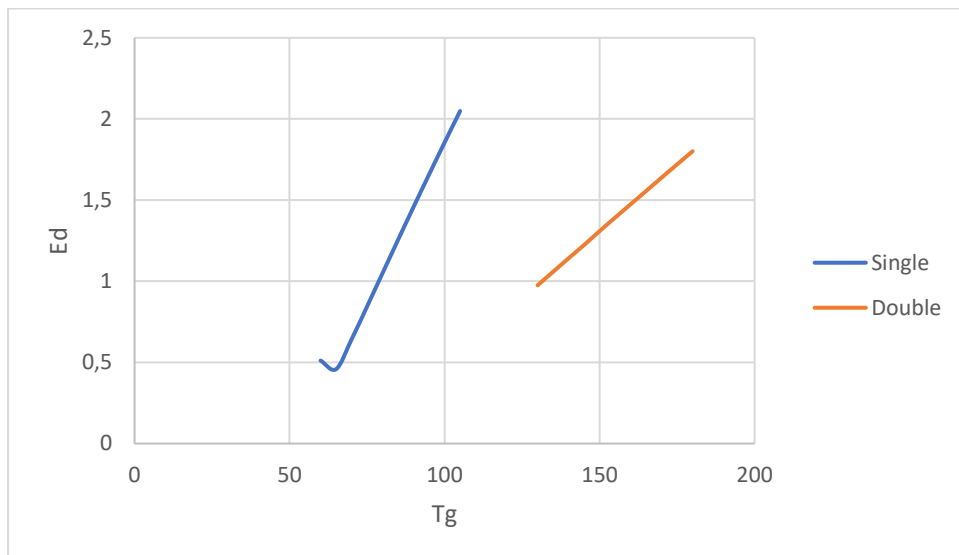
Διάγραμμα 35 Συντελεστής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 36 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 37 Λόγος ανακυκλοφορίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.



Διάγραμμα 38 Καταστροφή εξέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αναγεννητή.

5.4.5 Συμπεράσματα

- Στα διαγράμματα COP- T_g παρατηρούμε ότι τον καλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς παρουσιάζει ο κύκλος απορρόφησης HGAX, ενώ συγκεκριμένα μεταξύ μονοβάθμιου και διβάθμιου κύκλου καλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς παρουσιάζει ο διβάθμιος.
- Στα διαγράμματα η_{ex} - T_g παρατηρούμε ότι τον καλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης παρουσιάζουν ο μονοβάθμιος και ο διβάθμιος κύκλος απορρόφησης.
- Στα διγράμματα f - T_g παρατηρούμε ότι το μικρότερο λόγο ανακυκλοφορίας παρουσιάζουν οι κύκλοι απορρόφησης GAX και HGAX.
- Στα διγράμματα E_d - T_g παρατηρούμε ότι την μικρότερη καταστροφή εξέργειας παρουσιάζουν ο μονοβάθμιος και ο διβάθμιος κύκλος απορρόφησης.

Βιβλιογραφία

- [1] “Το φαινόμενο του θερμοκηπίου.” [Online]. Available: <http://www1.aegean.gr/gympeir/thermokipio.htm>. [Accessed: 11-Jun-2018].
- [2] “Τι είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου,” *coolweb.gr*. [Online]. Available: <http://coolweb.gr/fainomeno-thermokipiou-ti-einai/>. [Accessed: 11-Jun-2018].
- [3] “ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.” [Online]. Available: <http://www.wwf.gr/sustainable-economy/clean-energy/climate-change>. [Accessed: 11-Jun-2018].
- [4] Newsroom, “Κλιματική αλλαγή: Οι στόχοι της ΕΕ και ο παράγοντας... άνθρωπος,” *CNN.gr*, 11-Apr-2018. [Online]. Available: <http://www.cnn.gr/news/perivallon/story/125315/klimatiki-allagi-oi-stoxoi-tis-ee-kai-o-paragontas-anthropos>. [Accessed: 11-Jun-2018].
- [5] J. Sun, L. Fu, and S. Zhang, “A review of working fluids of absorption cycles,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 1899–1906, May 2012.
- [6] M. Azhar and M. A. Siddiqui, “Energy and Exergy Analyses for Optimization of the Operating Temperatures in Double Effect Absorption Cycle,” *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 211–218, Mar. 2017.
- [7] V. H. F. Flores, J. C. Román, and G. M. Alpiárez, “Performance Analysis of Different Working Fluids for an Absorption Refrigeration Cycle,” *Am. J. Environ. Eng.*, p. 10, 2014.
- [8] “APE-kef7-10.pdf.” .
- [9] R. Gomri, “Second law comparison of single effect and double effect vapour absorption refrigeration systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 5, pp. 1279–1287, May 2009.
- [10] D.-W. Sun, “Thermodynamic design data and optimum design maps for absorption refrigeration systems,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 211–221, Mar. 1997.
- [11] D. Miao, “Simulation model of a single-stage lithium bromide - water absorption cooling unit,” p. 45.
- [12] Y. Kaita, “Thermodynamic properties of lithium bromide–water solutions at high temperatures,” *Int. J. Refrig.*, vol. 24, no. 5, pp. 374–390, Aug. 2001.
- [13] D.-W. Sun, “Comparison of the performances of NH₃-H₂O, NH₃-LiNO₃ and NH₃-NaSCN absorption refrigeration systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 39, no. 5, pp. 357–368, Mar. 1998.
- [14] L. Garousi Farshi, S. M. S. Mahmoudi, M. A. Rosen, M. Yari, and M. Amidpour, “Exergoeconomic analysis of double effect absorption refrigeration systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 65, pp. 13–25, Jan. 2013.
- [15] M. Azhar and M. A. Siddiqui, “Energy and Exergy Analyses for Optimization of the Operating Temperatures in Double Effect Absorption Cycle,” *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 211–218, Mar. 2017.

- [16] J. A. Hernández-Magallanes, W. Rivera, and A. Coronas, "Comparison of single and double stage absorption and resorption heat transformers operating with the ammonia-lithium nitrate mixture," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 125, pp. 53–68, Oct. 2017.
- [17] M. Dixit, A. Arora, and S. C. Kaushik, "Thermodynamic analysis of GAX and hybrid GAX aqua-ammonia vapor absorption refrigeration systems," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 40, no. 46, pp. 16256–16265, Dec. 2015.
- [18] Y. Shi, Q. Wang, D. Hong, and G. Chen, "Thermodynamic analysis of a novel GAX absorption refrigeration cycle," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, no. 7, pp. 4540–4547, Feb. 2017.
- [19] A. Ramesh Kumar and M. Udayakumar, "Simulation studies on GAX absorption compression cooler," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 9, pp. 2604–2610, Sep. 2007.
- [20] M. Yari, A. Zarin, and S. M. S. Mahmoudi, "Energy and exergy analyses of GAX and GAX hybrid absorption refrigeration cycles," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 7, pp. 2011–2020, Jul. 2011.