

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



«Τεχνολογία συστημάτων ψύξης με προσρόφηση»

Διπλωματική εργασία

Υπεύθυνη Καθ. : **Κορωνάκη Ειρήνη**
Επίκουρος Καθ.

Βασίλειος Τάσσης 02110006

ΑΘΗΝΑ 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρακάτω αναλυτική έκθεση αφορά στα συστήματα ψύξης με προσρόφησης, στις τεχνολογίες που αναπτύσσονται γύρω από αυτά καθώς και στις εφαρμογές που βρίσκουν τα συγκεκριμένα συστήματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται την εισαγωγή στη τεχνολογία συστημάτων ψύξης με προσρόφηση καθώς και μελετάμε την ιστορική τους αναδρομή. Οι νέες αυτές τεχνολογίες αποτελούν κρίσιμο πεδίο για τους ερευνητές καθώς συνάδουν με τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις του ανθρώπινου πολιτισμού.

Στο επόμενο κεφάλαιο συγκαταλέγονται τα εργαζόμενα μέσα που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ψύξης με προσρόφηση και αναλύονται οι επιδράσεις που έχουν στην επίδοση των συστημάτων καθώς και στην εφαρμογή. Ορισμένα από αυτά είναι τα ζεύγη ενεργοποιημένος άνθρακας-μεθανόλη, ενεργοποιημένος άνθρακας –αμμωνία, σίλικα τζελ-νερό, ζεόλιθος-νερό και χλωριούχο ασβέστιο-αμμωνία.

Στο τρίτο κεφάλαιο της παρακάτω έκθεσης περιγράφονται οι διάφοροι κύκλοι προσρόφησης. Αρχικά η ανάλυση ξεκινάει με την περιγραφή του βασικού κύκλου προσρόφησης. Στη συνέχεια περιγράφεται ο κύκλος ανάκτησης θερμότητας και ο κύκλος ανάκτησης θερμότητας και μάζας. Επίσης οι κύκλοι θερμικού κύματος και κύκλοι συναγωγής θερμικού κύματος παρουσιάζουν ενδιαφέρον στη λειτουργία τους. Τέλος το κεφάλαιο αναφέρεται σε κύκλους cascade όπου γίνεται χρήση δύο εργαζόμενων μέσων σε συνδυασμό καθώς και σε προηγμένους κύκλους που αφορούν σε περισσότερα στάδια και βαθμίδες.

Στο προτελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματεύονται οι παράμετροι που επιδρούν στη μεταφορά μάζας και θερμότητας στη βαθμίδα προσρόφησης. Η μελέτη και η ρύθμιση των παραμέτρων αυτών καθιστά χρήσιμη διαδικασία με σκοπό της βελτίωση της μεταφοράς μάζας και θερμότητας εντός των βαθμίδων στα συστήματα ψύξης με προσρόφηση.

Τελειώνοντας την έκθεση κάνουμε λόγο για τις εφαρμογές της σύγχρονης τεχνολογίας των συστημάτων προσρόφησης. Περιγράφουμε πολλά από τα ηλιακά συστήματα προσρόφησης, συστήματα που εκμεταλλεύονται την απορριπτόμενη θερμότητα καθώς και κάποιες πρακτικές εφαρμογές των σίλικα τζελ συστημάτων. Αναλύεται ο τρόπος που έχουν μελετηθεί και κατασκευαστεί τα συστήματα αυτά από τους αντίστοιχους ερευνητές.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	5
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ	6
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	11
2.ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΣΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ	12
2.1. Συστήματα ενεργοποιημένου άνθρακα – μεθανόλης	12
2.2. Συστήματα ενεργοποιημένου άνθρακα – αμμωνίας.....	17
2.3. Συστήματα ζεόλιθου – νερού.....	20
2.4. Συστήματα silica gel- νερού	24
2.5. Συστήματα χλωριούχου ασβεστίου – αμμωνίας	31
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	35
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΚΛΩΝ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ	36
3.1. Κύκλος ανάκτησης θερμότητας	37
3.2. Κύκλος ανάκτησης θερμότητας και μάζας.....	41
3.3. Κύκλος θερμικού κύματος.....	44
3.3.1 Υπολογισμός απόδοσης ενός κύκλου θερμικού κύματος (thermal wave cycle)	49
3.4. Κύκλος συναγωγής θερμικού κύματος	50
3.5. Κύκλος cascade.....	54
3.6. Προηγμένοι κύκλοι προσρόφησης.....	63
3.6.1 Σύστημα δύο σταδίων	63
3.6.2 Σύστημα τριών σταδίων	65
3.6.3 Διπλής λειτουργίας κύκλος προσρόφησης (Dual mode cycle adsorption).....	67
Συστήματα πολλαπλών βαθμίδων (multi-bed system)	67
3.6.4 Συμπεράσματα για τους προηγμένους κύκλους	70
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	73
4. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ/ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΒΑΘΜΙΔΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ	74
4.1 Αυξάνοντας την περιοχή μεταφοράς θερμότητας.....	74
4.2 Χρησιμοποιώντας σωλήνα θερμότητας για την προώθηση της μεταφοράς θερμότητας.....	77

4.3 Μειώνοντας την αντίσταση επαφής μεταξύ του τοιχώματος και του προσροφητικού.....	78
4.4 Μειώνοντας την θερμική αντίσταση του προσροφητικού.....	80
4.5 Βελτίωση της αποτελεσματικότητας της συλλογή ηλιακής ενέργειας της βαθμίδας	81
4.6 Βελτίωση του κύκλου ψύξης με προσρόφηση	82
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	85
5.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ.....	86
5.1. Εφαρμογές των συστημάτων ψύξης με προσρόφηση οδηγούμενα από αποβαλλόμενη θερμότητα.....	86
5.2. Ηλιακά συστήματα ψύξης με προσρόφηση	91
5.2.1 Απόδοση ψύξης.....	91
5.2.2. Τύπος συλλέκτη επίπεδου πιάτου (flat-plate collector)	92
5.2.3 Υδροψυκτος εκκενωμένος συλλέκτης προσρόφησης.....	94
5.2.4 Πως επηρεάζουν οι παράμετροι κατασκευής την απόδοση του συλλέκτη προσρόφησης.....	95
5.2.5 Ενιαίο ηλιακό σύστημα προσρόφησης	99
5.2.6 Ηλιακό σύστημα ψύξης με προσρόφηση με ξεχωριστά κομμάτια	104
5.2.7 Ψύκτες προσρόφησης με Σίλικα τζελ- νερό.....	111
5.2.8 Ηλιακό σύστημα ψύξης με προσρόφηση χρησιμοποιώντας παραβολικό συλλέκτη (PTC : Parabolic trough collector).....	113
5.2.9 Ηλιακό κλιματιστικό σύστημα προσρόφησης	117
5.3 Πρακτικές εφαρμογές σε συστήματα ψύξης με σίλικα τζελ.....	119
5.3.1 Πρωτότυπο σύστημα μονής βαθμίδας	119
5.3.2. Πρωτότυπο σύστημα διπλής βαθμίδας	120
5.4 Συμπεράσματα	124
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	127

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

Η αξιοποίηση της ενέργειας συνιστά ένα βασικό στοιχείο για την βελτίωση της αειφόρου ανάπτυξης των ανθρώπων και του περιβάλλοντος. Καθώς η κοινωνία αναπτύσσεται ραγδαία και η κατανάλωση της ενέργειας αυξάνεται εκθετικά με τα νέα τεχνολογικά δεδομένα, είναι κρίσιμο να τεθεί αντιμέτωπος ο άνθρωπος με την ρύπανση του περιβάλλοντος και να την αντιμετωπίσει καθοριστικά. Το να συντονίσουμε την ισορροπία μεταξύ των διαφόρων παραγόντων όπως η αξιοποίηση της ενέργειας, η ανάπτυξη της οικονομίας και η προστασία περιβάλλοντος, αποτελεί ένα από τα πιο ελκυστικά πεδία επιστημονικής έρευνας των ανθρώπων.

Το αντικείμενο της προστασίας του περιβάλλοντος εστιάζεται στη μείωση της όζονόσφαιρας από τους χλωροφθοράνθρακες (CFCs), η οποία προκαλεί ανεπαρκή παρεμπόδιση της υπεριώδους ακτινοβολίας του ήλιου και έτσι στέκεται ως απειλή στη ζωή της γης. Τα CFCs είναι πολύ σημαντικές ουσίες για την ψύξη με συμπίεση. Ως τύπος υποκατάστατης της ουσίας αυτής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs) επειδή έχουν επίσης αρνητική επίδραση στην οζονόσφαιρα. Εν τω μεταξύ, όσον αφορά τα συστήματα κεντρικής θέρμανσης, η καύση αερίων και άνθρακα απελευθερώνει CO₂ στο περιβάλλον. Ομοίως, τα CFCs παράγουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου που γίνεται όλο και περισσότερο και πιο σοβαρό καθώς η επιθυμία για άνετες συνθήκες διαβίωσης σε όλο τον κόσμο γίνεται όλο και πιο έντονη. Βρίσκοντας έναν τύπο πράσινης τεχνολογίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον κλιματισμό και στις αντλίες θερμότητας μπορούμε ξεπεράσουμε τα προβλήματα που προκαλούνται από τις παραδοσιακές τεχνολογίες ψύξης με συμπίεση.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που παρουσιάζουν τα συστήματα ψύξης και οι αντλίες θερμότητας είναι η χρήση ενέργειας. Ο παραδοσιακός τρόπος οδήγησης των συστημάτων αυτών είναι το ηλεκτρικό ρεύμα. Όσο η κοινωνία αναπτύσσεται, οι απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια αυξάνονται. Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρέχει το τμήμα ενέργειας των ΗΠΑ μεταξύ του έτους 2003 και του 2004, το ηλεκτρικό ρεύμα που καταναλώνουν τα κλιματιστικά το καλοκαίρι είναι ίσο με το 15,4% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Κίνα επίσης, για παράδειγμα, στην πόλη της Σαγκάης, η καλοκαιρινή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τον κλιματισμό έφθασε στο 45-56% σύμφωνα με τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από το 2010. Αν αναλύσουμε την ενέργεια που καταναλώνεται μέσω της διαδικασίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διαπιστώνουμε ότι η ενεργειακή απόδοση για την παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας είναι μόνο περίπου 40-50%, και υπάρχει μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται στο περιβάλλον ως απορριπτόμενη θερμότητα σε θερμοκρασίες περίπου 70-200 °C. Εν τω μεταξύ, η ηλιακή ενέργεια και η γεωθερμική θερμότητα υπάρχουν επίσης σε μεγάλες ποσότητες στο περιβάλλον ως ενέργεια χαμηλής ποιότητας. Για τους παραπάνω λόγους καθίσταται αναγκαία η ανάπτυξη τεχνολογιών ψύξης και αντλιών θερμότητας που θα οδηγούνται από μια τέτοια χαμηλής ποιότητας θερμότητα με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας.

Η τεχνολογία ψύξης με προσρόφηση και η αντλία θερμότητας, η οποία οδηγείται από χαμηλής ποιότητας θερμότητα και χρησιμοποιεί τα πράσινα ψυκτικά μέσα, συντονίζεται με τις βιώσιμες απαιτήσεις της τρέχουσας ενέργειας και τις περιβαλλοντικές εξελίξεις. Πρώτον, η τεχνολογία sorption απαιτεί λίγη ηλεκτρική ενέργεια δευτερευόντως, τα ψυκτικά μέσα για την ψύξη με ρόφηση είναι γενικά οι ουσίες του νερού, αμμωνία και μεθανόλη και ούτω καθεξής, τα οποία είναι πράσινα ψυκτικά με μηδενική ODP (Ozone depletion potential) και μηδενικό GWP (Greenhouse warming potential).

Σύμφωνα με τους διάφορους τύπους διεργασιών προσρόφησης, η προσρόφηση χωρίζεται σε φυσική προσρόφηση και χημική προσρόφηση. Η φυσική προσρόφηση οδηγείται από van der Waals δυνάμεις μεταξύ των μορίων, και γενικά συμβαίνει στην επιφάνεια των προσροφητικών μέσων. Η φυσική προσρόφηση δεν είναι επιλεκτική, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να σχηματιστεί προσρόφηση πολλαπλών στρώσεων. Τα φαινόμενα της φυσικής προσρόφησης μπορούν να αντιμετωπιστούν ως η διαδικασία συμπύκνωσης του ψυκτικού μέσα στα προσροφητικά μέσα και για τα περισσότερα προσροφητικά ενώ η θερμότητα προσρόφησης είναι παρόμοια με τη θερμότητα συμπύκνωσης του ψυκτικού μέσου. Τα μόρια για τη φυσική προσρόφηση δεν θα αποσυντεθούν στη διαδικασία εκρόφησης.

Η χημική προσρόφηση διαφέρει από τη φυσική προσρόφηση. Μια χημική αντίδραση θα συμβεί μεταξύ του προσροφητή και του προσροφητικού, και θα δημιουργηθούν νέοι τύποι μορίων στη διαδικασία προσρόφησης. Συνήθως, η μονή στοιβάδα του προσροφητικού θα αντιδράσει με το χημικό προσροφητικό μέσο και μετά από αυτή την αντίδραση τα χημικά προσροφητικά δεν θα μπορούν να απορροφήσουν περισσότερες στρώσεις των μορίων. Τα νεοσυσταθέντα μόρια θα αποσυντίθενται στη διαδικασία εκρόφησης. Η θερμότητα προσρόφησης / εκρόφησης που παράγεται θα είναι πολύ μεγαλύτερη από τη φυσική θερμότητα προσρόφησης. Η χημική

προσρόφηση είναι επιλεκτική. Για παράδειγμα, το H_2 μπορεί να απορροφηθεί από τα W, Pt και Ni, αλλά δεν μπορεί να απορροφηθεί από Cu, Ag, και Zn. Αναγνωρίζεται από τους ακαδημαϊκούς ότι η φυσική προσρόφηση θα συμβεί πριν τη χημική προσρόφηση, επειδή η πραγματική απόσταση των δυνάμεων van der Waals είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη δύναμη των 7 της απόστασης, και είναι πολύ μεγαλύτερη από την αποτελεσματική απόσταση για τη χημική αντίδραση. Έτσι, όταν τα προσροφητικά μόρια πλησιάζουν το στερεό προσροφητή η φυσική προσρόφηση θα προχωρήσει πρώτα και θα μεταφερθεί στη χημική προσρόφηση, όταν μειώνεται η απόσταση.

Η φυσική προσρόφηση / εκρόφηση εξαρτάται κυρίως από τις επιδόσεις μεταφοράς θερμότητας και μάζας των προσροφητικών μέσων. Για τη διαδικασία της εκρόφησης, επειδή η πίεση είναι υψηλή, αντίστοιχα η διαδικασία μεταφοράς μαζών θα επιταχυνθεί από την υψηλή πίεση και η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας θα είναι το κύριο κριτήριο για την απόδοση. Η απόδοση μεταφοράς θερμότητας εστιάζεται το κύριο πρόβλημα για τα συστήματα προσρόφησης δηλαδή το πόσο διαπερατό είναι το αέριο μέσα στα προσροφητικά. Γενικά, η διαπερατότητα είναι υψηλότερη όταν οι προσροφητικοί κόκκοι είναι μικρότεροι. Ο ρυθμός κινητικής αντίδρασης θα επηρεάσει επίσης την ταχύτητα προσρόφησης / εκρόφησης.

Επειδή η χημική αντίδραση συμβαίνει στη διαδικασία χημικής προσρόφησης, η χημική ουσία προσρόφησης θα επηρεαστεί επίσης από τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας και μάζας των προσροφητικών ουσιών. Όπως η διαδικασία χημικής αντίδρασης και η κινητική αντίδρασης των μορίων. Εν τω μεταξύ, η υστέρηση της προσρόφησης υπάρχει επίσης για τη χημική προσρόφηση επειδή η ενέργεια της ενεργοποιημένης προσρόφησης είναι διαφορετική από την ενέργεια της ενεργοποιημένης εκρόφησης. Η ενέργεια της ενεργοποιημένης εκρόφησης είναι πάντα πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια ενεργοποιημένης προσρόφησης επειδή είναι το άθροισμα της ενέργειας προσρόφησης και της θερμότητας προσρόφησης, και ένα τέτοιο φαινόμενο θα οδηγήσει σε μια σοβαρή υστέρηση μεταξύ προσρόφησης και εκρόφησης.

Για την ψύξη με προσρόφηση τα περισσότερα μόρια ψυκτικού είναι πολικά μοριακά αέρια που μπορούν να απορροφώνται κάτω από δυνάμεις van der Waals, όπως η αμμωνία, η μεθανόλη και οι υδρογονάνθρακες οι οποίοι μπορούν να προσροφηθούν από ενεργό άνθρακα, ζεόλιθο και σίλικα τζέλ. Η χημική προσρόφηση έχει μεγαλύτερης συγκέντρωσης κύκλο από εκείνες των φυσικών προσροφητικών μέσων, για παράδειγμα, για τη διαδικασία

προσρόφησης του CaCl_2 η ποσότητα του προσροφητικού είναι πάντα μεγαλύτερη από 0,4.

Το πλεονέκτημα της ψύξης με χημική προσρόφηση είναι η μεγαλύτερη ποσότητα προσρόφησης / εκρόφησης, που είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της ειδικής χωρητικότητας ψύξης ανά χιλιόγραμμο του προσροφητικού (SCP, ειδική ισχύ ψύξης). Αλλά η επέκταση και η συσσωμάτωση θα συμβεί στη διαδικασία της χημικής προσρόφησης και ο χώρος επέκτασης πρέπει πάντα να διατηρείται σε δύο φορές του προσροφητικού όγκου για να εξασφαλιστεί η υψηλή απόδοση μεταφοράς μάζας. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση μεταφοράς θερμότητας, καθώς και για να εξασφαλιστεί η απόδοση μεταφοράς μαζών, αναπτύσσονται τα στερεοποιημένα σύνθετα προσροφητικά, τα οποία χρησιμοποιούν το πορώδες πλέγμα για να διατηρούν τη διαπερατότητα του προσροφητικού και στη συνέχεια να βελτιωθεί η χωρητικότητα του όγκου πλήρωσης και η χωρητικότητα του όγκου ψύξης σημαντικά **[101-102]**.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[101] Zhang, Y.H. (1989) *Adsorption Functions*, Shanghai, Publishing House of Science and Technology, Shanghai, ISBN: 7805134979 (in Chinese)

[102] Wang, L.W., Wang, R.Z., Wu, J.Y. and Wang, K. (2004) Adsorption performances and refrigeration application of adsorption working pair of CaCl₂-NH₃. *Science in China, Series E*, **47**(2), 173-185.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΣΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ

Το ζεύγος εργασίας προσρόφησης είναι ένα βασικό στοιχείο για τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση και τα συστήματα αντλίας θερμότητας . Οι θερμικές ιδιότητες των εργαζόμενων μέσων έχουν μεγάλη επίδραση στον βαθμό απόδοσης του συστήματος, στην ταχύτητα αυξήσεως της θερμοκρασίας του προσροφητή. Για αποτελεσματική απόδοση ψύξης, πρέπει να επιλέγονται τα κατάλληλα ζεύγη εργασίας προσρόφησης σύμφωνα με τις θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας και τον κατάλληλο κύκλο ψύξης με προσρόφηση. Το πεδίο εφαρμογής και οι ιδιότητες είναι διαφορετικές για διαφορετικά εργαζόμενα μέσα στα συστήματα ψύξης με προσρόφηση. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα εργαζόμενα μέσα στα συστήματα ψύξης με προσρόφηση περιλαμβάνουν κυρίως: ενεργός άνθρακας με μεθανόλη, ενεργοποιημένες ίνες άνθρακα-μεθανόλη, ενεργός άνθρακας-αμμωνία, ζεόλιθος-νερό, σίλικα τζελ-νερό, χλωριούχο ασβέστιο-αμμωνία (φυσική και χημική προσρόφηση. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν επίσης ότι η σύνθετη προσρόφηση, η οποία είναι ένας τύπος αποτελεσματικής τεχνολογίας εντατικής μεταφοράς θερμότητας και μάζας για μια χημική ουσία προσροφητικού, συνιστά μια νέα προοπτική για τεχνολογία ψύξης [111-113].

2.1. Συστήματα ενεργοποιημένου άνθρακα – μεθανόλης

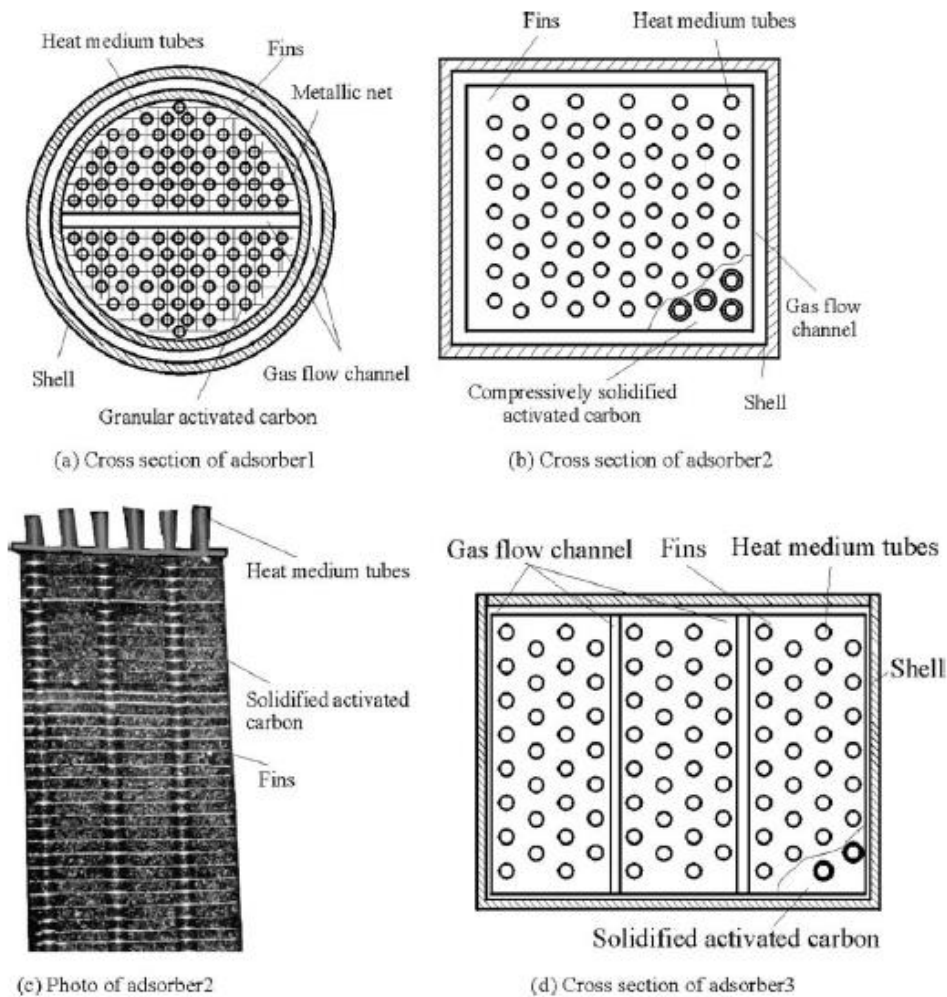
Υπάρχουν πολλοί τύποι προσροφητών. Εδώ θα μελετηθεί ο ενεργοποιημένος άνθρακας- μεθανόλη (activated carbon-methanol system. Τα προσροφητικά μέσα διαχωρίζονται σε δυο κατηγορίες τα «υδρόφιλα» και τα «υδρόφοβα».

Η Πρώτη κατηγορία έχει ιδιαίτερη σχέση με πολικές ουσίες, όπως το νερό και σε αυτά περιλαμβάνονται silica gel , ζεόλιθος (zeolite) και πορώδη ή δραστικής αλουμίνας. Η δεύτερη από την άλλη , αφορά μη πολικά προσροφητικά μέσα που έχουν περισσότερη συγγένεια με τα έλαια και τα αέρια ,παρά με το νερό , και επίσης περιλαμβάνουν ενεργοποιημένο άνθρακα, προσροφητές από πολυμερή και πυριτικό άλας.

Ο ενεργοποιημένος άνθρακας γίνεται με ανθρακοποίηση και πυρόλυση πρώτων υλών σε υψηλές θερμοκρασίες (700-800 °C), όπως κάρβουνο, λιγνίτης και συνθετικά πολυμερή. Ο ενεργός άνθρακας συναντάται σε πολλές μορφές, συμπεριλαμβανομένων μικρο-πορώδεις (micro-porus) , κοκκώδεις (granular), μοριακά κόσκινα (molecular sieves) , σκόνες (powders) και ίνες άνθρακα (carbon fibres) [1].

Οι έρευνες σχετικά με τα συστήματα προσρόφησης, που χρησιμοποιούν ενεργό άνθρακα – μεθανόλη ως εργαζόμενο μέσο, επικεντρώνονται κυρίως σε συστήματα που οδηγούνται από ηλιακή ενέργεια. Η απόδοση των εργαζόμενων μέσων όπως του ενεργοποιημένου άνθρακα με μεθανόλη, ζεόλιθου με νερό και άλλων μελετήθηκαν από τους μελετητές Robert Critorh, Thomas Vogel και Francis Meunier. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο ενεργός άνθρακας με μεθανόλη είναι ένα τέλειο εργαζόμενο μέσο για την ηλιακή ενέργεια λόγω του υψηλού συντελεστή απόδοσης (COP- coefficient of performance) και χαμηλής θερμοκρασίας γέννας (generation temperature). Σε σύγκριση με το σύστημα ενεργού άνθρακα-αμμωνίας, το σύστημα μεθανόλης- άνθρακα είναι ένα σύστημα κενού και αυτό το κάνει ασφαλέστερο από ένα σύστημα υψηλής πίεσης αν και δεν είναι τόσο αξιόπιστο αν υπάρχει διαρροή. Το σύστημα ενεργοποιημένου άνθρακα-μεθανόλη χρειάζεται χαμηλού βαθμού θερμότητα (70-120 °C). Εκτός από αυτό η μεθανόλη έχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής λανθάνουσας θερμότητας εξατμίσεως, χαμηλού σημείου πήξεως και χωρίς διάβρωση για χαλκό και χάλυβα στη θερμοκρασία εργασίας κάτω από 120 °C.

Η ακόλουθη παράγραφο αναλύει τρεις τύπους προσροφητών χρησιμοποιώντας ενεργό άνθρακα – μεθανόλη ως ζεύγος εργασίας, στην οποία οι δύο τύποι βαθμίδων που γεμίζουν με συμπιεσμένο στερεοποιημένο ενεργό άνθρακα (b, c, d) και ένα άλλο είναι γεμάτο με κοκκώδη ενεργό άνθρακα (α).



Σχήμα 2.1.1 διατομή- δομή των προσροφητών [1]

Στο σχήμα 2.1.1 φαίνεται η δομή των τριών τύπων των προσροφητών. Το μέγεθος του κυλινδρικού προσροφητή 1 $\varnothing 325 \times 1400 \text{ mm}$, ενώ ο προσροφητής 2 και ο προσροφητής 3 είναι ορθογώνια με διαστάσεις $286 \times 210 \times 2100 \text{ mm}$ και $387 \times 422 \times 1539 \text{ mm}$ αντίστοιχα. Οι παράμετροι σχετικά με τους τρεις τύπους των προσροφητών φαίνονται στον πίνακα 2.1.1. Ο λόγος θερμοχωρητικότητας μεταξύ προσροφητικού μέσου και προσροφητή είναι 0,675, 0,813, 0,84 για adsorber1, adsorber2 και adsorber3 αντίστοιχα.

Κοκκώδης ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται στον πρώτο προσροφητή, ενώ στερεοποιημένος ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται στον δεύτερο και στον τρίτο. Όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 2.1.1, τα κανάλια μεταφοράς μάζας του τρίτου προσροφητή είναι πιο λογικά τοποθετημένα από εκείνα του δεύτερου. Το νερό χρησιμοποιείται ως το θερμικό ρευστό για ψύξη και θέρμανση των τριών προσροφητών.

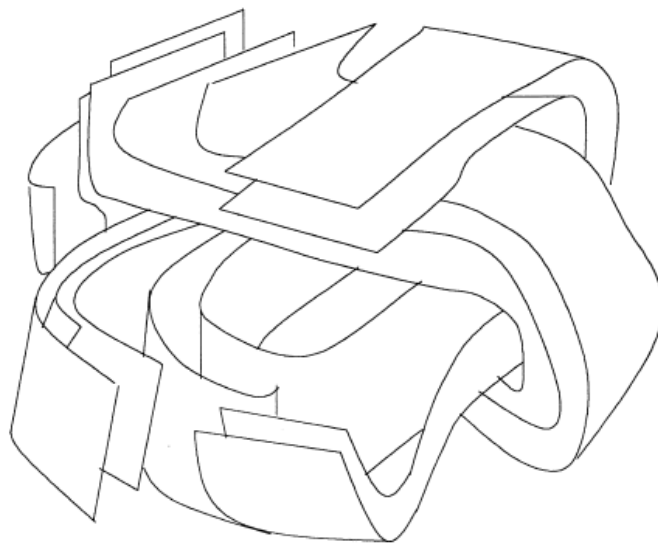
Πίνακας 2.1.1: Αποδόσεις συστημάτων

Adsorber	Item	Material	Mass(kg)	Heat capacity (kJ/°C)
Adsorber1	Thermal fluid tubes	Copper	22.5	8.686
	Fins	Aluminum	5.4	4.907
	Adsorbent	Activated carbon made by the shell of coconut	26	25.6
	Thermal fluid	Water (two-flow circuit)	10	41.8
	Metal of adsorber	Stainless steel	79.1	37.90
Adsorber2	Thermal fluid tubes	Steel	37.6	14.162
	Fins	Steel	9.1	4.205
	Adsorbent	Solidified activated carbon	41	38.13
	Thermal fluid	Water (two-flow circuit)	10.26	42.89
	Metal of adsorber	Carbon steel	111	46.9
Adsorber3	Heat fluid tubes	Steel	81.52	30.733
	Fins	Steel	5.71	2.152
	Adsorbent	Solidified activated carbon	60	55.8
	Thermal fluid	Water (four-flow circuit)	14.8	62.08
	Metal of adsorber	Carbon steel	158.51	66.384

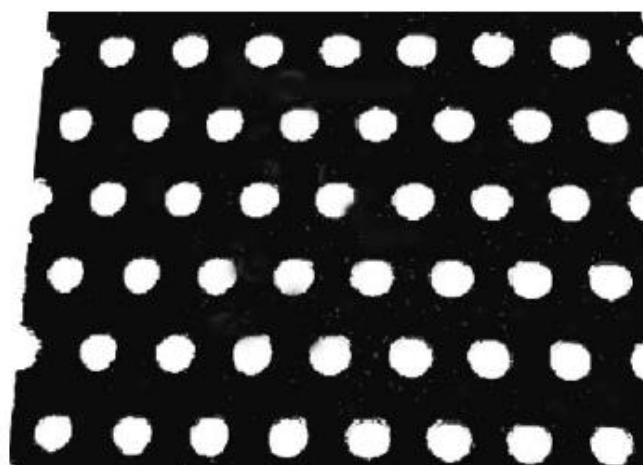
Το προσροφητικό μέσο στον δεύτερο και τρίτο προσροφητή κατασκευάζεται με την ίδια μέθοδο (όλα είναι από το μίγμα του κοκκώδους ενεργού άνθρακα το οποίο πλέγμα και συνδετικό πίσσας), έτσι τα χαρακτηριστικά τους είναι ίδια εκτός από διαφορετικές παραμέτρους. Ο συμπιεσμένος στερεοποιημένος ενεργός άνθρακας που χρησιμοποιείται στον δεύτερο τύπο έχει μέγεθος $210\text{ mm} \times 280\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, η διάμετρος των οπών σε αυτό είναι 19 mm , ενώ ο αντίστοιχος άνθρακας που χρησιμοποιείται στον τρίτο τύπο έχει μέγεθος $116\text{ mm} \times 272\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, και η διάμετρος των οπών σε αυτό είναι 17 mm . Η εγκάρσια τομή δομή του στερεοποιημένου ενεργού άνθρακα που χρησιμοποιείται στον δεύτερο προσροφητή φαίνεται στο σχήμα 2.1.3. Οι παράμετροι του κοκκώδη και του στερεοποιημένου προσροφητικού μέσου παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.2. Οι αποδόσεις των συστημάτων αυτών φαίνονται στον πίνακα 2.1.1. Αυτό δείχνει ότι η απόδοση του στερεοποιημένου ενεργού άνθρακα είναι πολύ καλύτερη από εκείνη του κοκκώδη άνθρακα.

Πίνακας 2.1.2: παράμετροι του κοκκώδη και του στερεοποιημένου άνθρακα

Parameter	Granular activated carbon bed	Solidified activated carbon bed
Density of adsorbent, kg/m^3	360	600
Heat conductivity of adsorbent, $\text{W/(m }^\circ\text{C)}$	0.017	0,27-0.34
Limiting adsorption capacity x_o , kg/kg	0.284	0.367



Σχήμα 2.1.2. μικροδομή του ενεργοποιημένου άνθρακα [1]



Σχήμα 2.1.3. δομή στερεοποιημένου άνθρακα [1]

2.2. Συστήματα ενεργοποιημένου άνθρακα – αμμωνίας

Η αμμωνία (NH_3) είναι εμφανώς μια επικίνδυνη χημική ουσία με βλαβερό χαρακτήρα για τις δύο βιομηχανικές διεργασίες και τα ανθρώπινα όντα. Η NH_3 θεωρείται επίσης ως ένα από τα πιο επικίνδυνα τοξικά βιομηχανικά χημικά προϊόντα (Toxic Industrial Chemicals- TICs) εδώ δημιουργείται μια νέα ανησυχία για την στρατιωτική χημική άμυνα. Λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας της, την ευκολία

απόκτησής της σε μεγάλες ποσότητες και την υψηλή τοξικότητα, η NH_3 θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από τρομοκρατικές οργανώσεις με σκοπό προκαλέσει καταστροφικές απώλειες και τραυματισμούς σε άμαχους πολίτες και σε στρατιωτικό προσωπικό. Για τους παραπάνω λόγους, υπάρχει σημαντική ανάγκη δημιουργίας μιας μονάδας φιλτραρίσματος του αέρα, η οποία θα απορροφά την αμμωνία αποτελεσματικά.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφοροι τύποι προσροφητικών μέσων που έχουν διερευνηθεί για την προσρόφηση της αμμωνίας. Μερικοί από αυτούς είναι ο ενεργοποιημένος άνθρακας, ζεόλιθος, αλουμίνιο, διοξείδιο του πυριτίου, οξείδια γραφενίου (GO) και μεταλλικό οργανικό πλαίσιο (MOF's). Ο ενεργός άνθρακας όμως, αναδύεται ως η πιο αποτελεσματική λύση λόγω του μεγάλου εμβαδού επιφάνειας και το χαμηλό κόστος. Δεδομένου ότι η NH_3 είναι ένα μικρό μόριο

(διαμέτρου $\sim 3 \text{ \AA}$) με πολύ υψηλή πίεση ατμών (10 atm στους 25 °C), η φυσική προσρόφηση από ενεργό άνθρακα είναι θερμοδυναμικά δυσμενής.

Ορισμένοι ερευνητές που ανήκουν στο πανεπιστήμιο του Warwick μελέτησαν συστήματα ψύξης με προσρόφηση, όπου ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιήθηκε ενεργοποιημένος άνθρακας με αμμωνία.

Παρακάτω παραθέτουμε ορισμένα πειραματικά αποτελέσματα αυτών των συστημάτων στις εξής εφαρμογές: παγομηχανή (ice-making), κλιματιστικό (air-conditioning), άντληση θερμότητας (heat pumping) [2].

Οι προσροφητές άνθρακα με ψυκτικό την αμμωνία είναι κυρίως τύποι κέλυφος καρύδας και τύποι με βάση τον άνθρακα σε διάφορες μορφές: μονολιθικός, κοκκώδης, συμπιεσμένο σε κόκκους, ίνα, συμπιεσμένη ίνα, ύφασμα, συμπιεσμένο πανί και σκόνη. Οι κύριες ιδιότητες του κάθε ζεύγους εργασίας άνθρακα-αμμωνία, οι οποίοι ονομάζονται συντελεστές Dubinin (x_0 , K, N) και την πυκνότητα (ρ) που είχαν μετρηθεί πειραματικά συνοψίζονται στους πίνακες 2.2.2,2.2.3.

Πίνακας 2.2.2: Οι καλύτερες αποδόσεις που αφορούν σε συστήματα δύο βαθμίδων, σε θερμοκρασία οδήγησης 100°C.

Samples	Ice making		Air conditioning		Heat pumping	
	q_c (MJ m ⁻³)	COP	q_c (MJ m ⁻³)	COP	q_H (MJ m ⁻³)	COP
KOH-AC (<i>monolithic</i>)	66	0.45	151	0.61	237	1.50
SRD1352/2 (<i>Granular</i>)	36	0.48	91	0.66	128	1.51
FM10/700 (<i>Fibre</i>)	27	0.48	62	0.61	97	1.47
C-2132 (<i>Powder</i>)	31	0.46	74	0.64	110	1.50
SRD1352/2 (<i>Compacted</i>)	43	0.48	108	0.66	152	1.50

Πίνακας 2.2.3: Οι καλύτερες αποδόσεις που αφορούν σε συστήματα δύο βαθμίδων, σε θερμοκρασία οδήγησης 200°C.

Samples	Ice making		Air conditioning		Heat pumping	
	q_c (MJ m ⁻³)	COP	q_c (MJ m ⁻³)	COP	q_H (MJ m ⁻³)	COP
KOH-AC (<i>monolithic</i>)	228	0.68	316	0.85	594	1.70
SRD1352/2 (<i>Granular</i>)	106	0.67	162	0.87	287	1.70
FM10/700 (<i>Fibre</i>)	86	0.63	122	0.82	235	1.69
C-2132 (<i>Powder</i>)	111	0.72	145	0.88	265	1.80
SRD1352/2 (<i>Compacted</i>)	132	0.58	192	0.87	368	1.62

Παρακάτω παρουσιάζεται η αύξηση του συντελεστή απόδοσης (COP) όταν από προσροφητής «μονής βαθμίδας» (single-bed system) μεταβαίνουμε σε σύστημα «διπλής βαθμίδας» (two- beds system)

Πίνακας 2.2.4: Η αύξηση του βαθμού απόδοσης COP (%) όταν από σύστημα μονής βαθμίδας πάμε σε σύστημα διπλής βαθμίδας.

%	Ice making	Air conditioning	Heat pumping
<i>monolithic</i>	30	40	30
<i>granular</i>	35	37	13
<i>fibre</i>	33	40	14

Τελικώς δημιουργούμε ένα πίνακα με τις θερμοκρασίες ανατροπής που μελετώνται σε αυτά τα τρία διαφορετικά συστήματα ψύξης. (πίνακας 2.2.1)

Πίνακας 2.2.1: Θερμοκρασίες ανατροπής για τις τρεις εφαρμογές

(°C)	Ice making	Air conditioning	Heat pumping
T_E	-5	10	5
T_C	35	35	40
T_1	35	35	40
$T_2=T_4$	81	62	80
T_{tip}	134	92	124

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε επιγραμματικά ορισμένα πορίσματα στα οποία κατέληξαν οι ερευνητές που μελέτησαν συστήματα προσρόφησης τα οποία χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο ενεργοποιημένο άνθρακα με αμμωνία **[3]** :

Tamon – Okazaki : Η αμμωνία είναι έντονα απορροφημένη στην επιφάνεια των οξειδίων του ενεργού άνθρακα και διαδικασία αυτή είναι μη αναστρέψιμη

Follin : ανέφερε ότι υπάρχουν τα βέλτιστα φυσικά χαρακτηριστικά ενεργού άνθρακα για να ληφθεί η καλύτερη απόδοση μιας διαδικασίας ψύξης με προσρόφηση κατά τη χρήση αμμωνίας ως ψυκτικό μέσο.

Park-Kim : Η οξύτητα του ενεργοποιημένου άνθρακα βελτιώνουν την προσρόφηση της αμμωνίας στον άνθρακα, ενώ η βασικότητα του ,από την άλλη έχει μικρή επίδραση στην ικανότητα προσρόφησης της αμμωνίας.

Xie : κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τόσο οι όξινες και όσο και οι βασικές περιοχές εισήχθησαν στην επιφάνεια του ενεργού άνθρακα από τις προεπεξεργασίες της αμμωνίας

Helminen : απέδειξαν ότι η απορρόφηση της αμμωνίας επί ενεργού άνθρακα περιγράφεται από γραμμικό μοντέλο.

Domingo- Garcia : αποκάλυψε ότι η απορρόφηση της αμμωνίας σε ενεργοποιημένους άνθρακες αποτελείται από αναστρέψιμα και μη αναστρέψιμα συστατικά.

Stoekli : έδειξε ότι η προσρόφηση της αμμωνίας με ενεργούς άνθρακες σε διαφορετικές θερμοκρασίες ακολουθείται από τη θεωρία Dubinin

Le Leuch and Badosz : αναφερθεί ότι οι ενεργοί άνθρακες με υποστηρίζοντα μέταλλα στην επιφάνειά τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση

της ρύπανσης της αμμωνία και την ικανότητά τους η οποία εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου και την οξύτητά του.

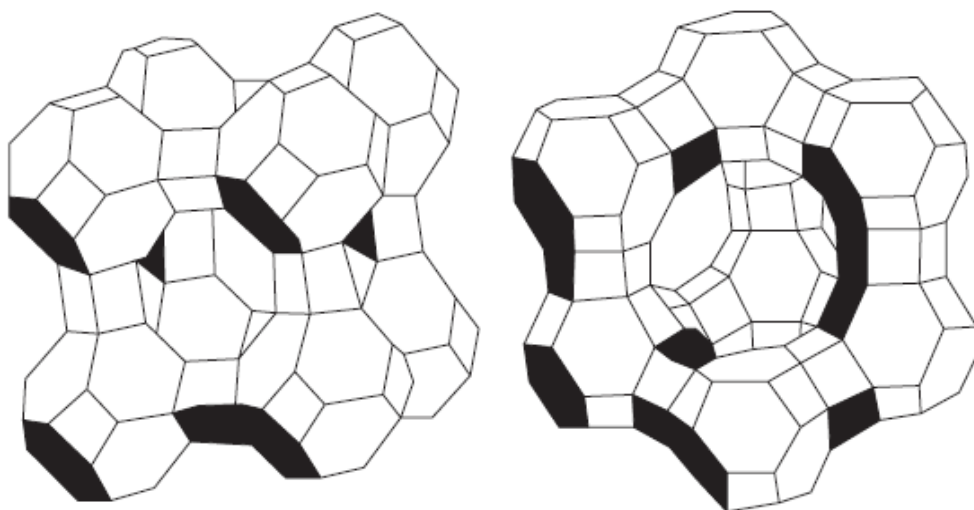
2.3. Συστήματα ζεόλιθου – νερού

Ο ζεόλιθος είναι ένας τύπος αργιλιο-πυριτικού κρυστάλλου που αποτελείται από αλκάλια. Ο χημικός τύπος του ζεόλιθου είναι:



Όπου y και m είναι όλοι ακέραιοι και m/y είναι ίσο με ή μεγαλύτερο από 1. Το n είναι το σθένος του θετικού ιόντος M και το z είναι ο αριθμός των μορίων νερού μέσα σε μια κρυσταλλική μονάδα.

Μια κρυσταλλική μονάδα κυψελών ζεόλιθου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.3.1.



Σχήμα 2.3.1. κρυσταλλική μονάδα κυψελών ζεόλιθου. α) τύπος ζεόλιθου A β) τύπος ζεόλιθου X, Y [109]

Το θετικό ιόν πρέπει να έχει ηλεκτρική φόρτιση ισοδύναμη με την ηλεκτρική φόρτιση του ατόμου του αργιλίου. Το καθαρό ηλεκτρικό φορτίο του κάθε ατόμου αργιλίου είναι -1. Το νερό μπορεί να απομακρυνθεί με θέρμανση. Το πορώδες του αργιλιο-πυριτικού πλαισίου είναι μεταξύ 0,2 και 0,5. Το πλαίσιο του αργιλιοπυριτικού έχει μια μορφή κλουβιού, και είναι συνήθως συνδεδεμένο με έξι τμήματα, τα οποία μπορούν να προσροφήσουν μία μεγάλη ποσότητα επιπλέον μορίων [109].

Έχει μετρηθεί ότι υπάρχουν περίπου 40 είδη φυσικών ζεόλιθων. Τα κύρια είδη που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ψύξης με προσρόφηση είναι ο χαμπαζίτης (chabazite), ο χαμπαζίτης νατρίου, ο τύπος cowlesite, και ο φωγιαζίτης (faujasite). Επίσης έπειτα από τεχνητή διαδικασία σύνθεσης προκύπτουν άλλα περίπου 150 είδη ζεόλιθων. Η ονομασία αυτών των τεχνητών ειδών ζεόλιθου γίνεται χρησιμοποιώντας ένα γράμμα ή μια ομάδα γραμμάτων, όπως τύπου A, τύπου X, τύπου Y, ZSM ζεόλιθοι, και ούτω καθεξής [110].

Οι τεχνητά παρασκευασμένοι ζεόλιθοι είναι πιο ακριβοί από ό, τι οι φυσικοί ζεόλιθοι, αλλά έχουν υψηλότερο ειδικό βάρος και καλύτερη απόδοση σε μεταφορά θερμότητας. Η ικανότητα προσρόφησης των ζεόλιθων εξαρτάται από την αναλογία μεταξύ του πυριτίου Si και του αργιλίου Al. Όταν η αναλογία μεταξύ αυτών των στοιχείων είναι μικρότερη τότε η ικανότητα προσρόφησης είναι υψηλότερη.

Το μέγεθος των πόρων των ζεόλιθων καθορίζει την επιλεκτικότητα της διαδικασίας της προσρόφησης, και η δομή του «κλουβιού» του μικροπόρου σημαίνει ότι η διαδικασία της προσρόφησης θα μπορούσε να προχωρήσει σε ένα μικρό εύρος.

Τα τεχνητά παρασκευασμένα μικρομόρια ζεόλιθου έχουν μικροπόρους με ομοιόμορφο μέγεθος, και διαφορετικά μεγέθη μπορούν να ληφθούν με διαφορετικές μεθόδους κατασκευής. Οι τύποι 4A, 5A, 10X, 13X των μικρομορίων του ζεόλιθου είναι τα βασικά είδη που χρησιμοποιούνται για τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση. Η θερμότητα προσρόφησης και εκρόφησης του ζεόλιθου είναι υψηλή, και η θερμοκρασία εκρόφησης είναι επίσης υψηλή, σε τιμές που κυμαίνονται περίπου 250-300 °C. Τα μικρομόρια ζεόλιθου δεν αντέχουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (σε τιμές θερμοκρασίες υψηλότερες από 600-700 °C μπορούν να καταστραφούν) . Οι ζεόλιθοι που χρησιμοποιούνται συνήθως στην στα κλιματιστικά συστήματα ψύξης με προσρόφηση έχουν μια πηγή θερμότητας μεταξύ 200 και 300 °C.

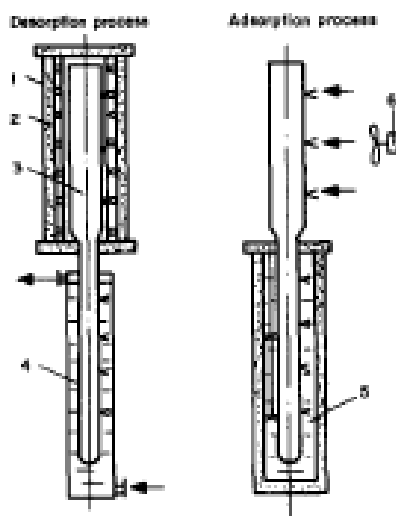
Ο ερευνητής **Ruiqi Zhu** μελέτησε ένα σύστημα ψύξης με προσρόφηση χρησιμοποιώντας ως ζεύγος εργασίας ζεόλιθο –νερό (συνθετικός ζεόλιθος 13X) . Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε σε βάρκα θαλάσσης για ψύξη-διατήρηση των προϊόντων , όπου το καυσαέριο από την πετρελαιομηχανή χρησίμευε ως πηγή θερμότητας [4].

Η μονάδα απορρόφησης αποτελείται από πολλά στοιχεία προσρόφησης με ψύξη. Κάθε στοιχείο είναι απλά ένας σωλήνας προσρόφησης. Οι σωλήνες κατασκευάζονται από κόκκινο χαλκός. Κάθε σωλήνας έχει δύο τμήματα, το ανώτερο τμήμα είναι μια προσροφητική βαθμίδα στην οποία βρίσκεται ο ζεόλιθος, και το χαμηλότερο τμήμα είναι ο συμπυκνωτής / αποστακτήρας (con-

denser/ evaporator) το οποίο περιέχει το ψυκτικό νερό. Κάθε σωλήνας φορτώνεται με 400 g ζεόλιθου 13X και 120 g καθαρού ύδατος. Το πάχος της βαθμίδας του ζεόλιθου είναι 12 mm.



Σχήμα 2.3.2. στοιχείο προσρόφησης [4]



Σχήμα 2.3.3. στοιχεία προσρόφησης . 1. electric heater 2. insulating cover 3. Adsorption tube 4. cooling water 5. cooled water 6. Fan. [4]

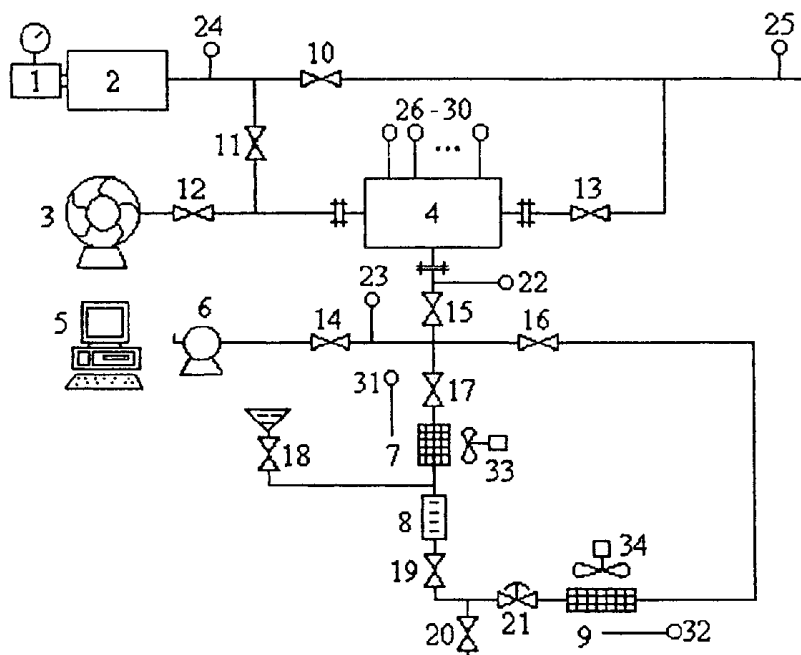
Το χρονικό διάστημα ενός κύκλου είναι τρεις ώρες (ο χρόνος εκρόφησης και ο χρόνος προσρόφησης σε ένα κύκλο είναι 1,5 ώρες αντίστοιχα). Ο ζεόλιθος θερμάνθηκε μέχρι περίπου 200°C (η διαθέσιμη θερμοκρασία των καυσαερίων από τον κινητήρα diesel) και στη συνέχεια ψύχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ενα απλό στοιχείο προσρόφησης μπορεί να ψύξει 1 kg νερού από 24 °C έως 2 °C. Η **ικανότητα ψύξης του** ήταν **92 kJ** ανά κύκλο, υπό τις παραπάνω συνθήκες που αναφέρθηκαν.

Βασιζόμενοι στα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα των στοιχείων , η μεσαίου μεγέθους πρωτότυπη μονάδα ψύξης σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ώστε να έχει ικανότητα ψύξης **3500 kJ** ανά κύκλο.

Ο ερευνητής L. Z. Zhang μελέτησε ένα σύστημα ψύξης με προσρόφηση από την απορριπτόμενη θερμότητα αυτοκινήτου σχήμα 2.3.4 [5]. Το συγκεκριμένο αυτοκίνητο φέρει ένα τετράχρονο κινητήρα diesel, υδρόψυκτο και άμεσης έγχυσης ο οποίος στρέφεται στις 1500 στροφές ανά λεπτό (1500rpm) . Γενικότερα κάθε πετρελαιοκινητήρας έχει αποδοτικότητα της τάξεως του 35% και το υπόλοιπο της εισαγόμενης ενέργειας απορρίπτεται. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου , οι ερευνητές έστρεψαν το ενδιαφέρον τους στον εκμεταλλευτούν αυτήν την ενέργεια.

Το ιδανικότερο ζεύγος εργασίας για αυτό το σύστημα ψύξης με προσρόφηση κρίνεται ο ζεόλιθος με νερό, επειδή η θερμοκρασία ανύψωσης (adsorption- evaporating temperature) υπερβαίνει τους 45 °C και επίσης είναι το πιο κατάλληλο στην περίπτωση του κλιματιστικού. Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης αυτού του προσροφητικού μέσου είναι ότι μπορεί να αντέξει τις υψηλές θερμοκρασίες αναγέννησης. Αυτό είναι σημαντικό στο συγκεκριμένο σύστημα διότι τα καυσαέρια της μηχανή είναι σχετικά υψηλή θερμοκρασία (μεγαλύτερες από 250 °C.

Ο συνολικός κύκλος έχει διάρκεια 131,5 λεπτά. Ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος (COP) είναι 0,32. Η ειδική ισχύ ψύξης (SCP) προσεγγίζει τα 25,7 W/kg . Ο συντελεστής ψύξης αποβαλλόμενης θερμότητας αποβλήτων (WCOP) 0,31.



Σχήμα 2.3.4. Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης: (1) power gage; (2) engine; (3) blower; (4) adsorber; (5) computer; (6) vacuum pump; (7) condenser; (8) graduated bottle; (9) evaporator; (10-13) valves; (14-21) vacuum valves; (22-23) pressure gages; (24-32), thermocouples; (33-34) fans.[5]

2.4. Συστήματα silica gel- νερού

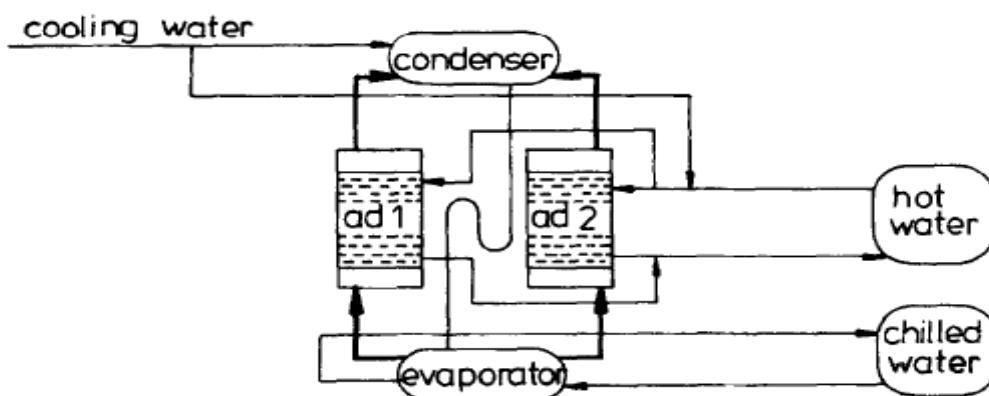
Το εργαζόμενο μέσο σίλικα τζελ – νερό στην τεχνολογία ψύξης με προσρόφηση ανθεί τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της καταλληλότητας του για χαμηλής ποιότητας πηγής θερμότητας. Κάποια από τα θετικά χαρακτηριστικά που έχει το παραπάνω εργαζόμενο μέσο, και μας παρακινεί να το μελετήσουμε είναι η χαμηλή θερμοκρασία αναγέννησης (χαμηλότερη σε σχέση με άλλα προσροφητικά μέσα) που έχει το σίλικα τζελ και η μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως του νερού . Σε σύγκριση με τη μέθοδο ψύξης με απορρόφησης, μια άλλη μέθοδος ψύξης που μπορεί να τροφοδοτείται από θερμότητα, η ψύξη με προσρόφηση με το προαναφερθέν ζεύγος δεν αντιμετωπίζει προβλήματα όπως η διάβρωση, η κρυστάλλωση και η απόσταξη. Επιπλέον αυτού, το σύστημα προσρόφησης με ζεύγος σίλικα τζελ- νερό ήταν πιο κατάλληλο για χαμηλής ποιότητας πηγής θερμότητα, η οποία επιβεβαιώθηκε τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά σε σύγκριση με το σύστημα απορρόφησης και το σύστημα αποξηραντικού αέρα. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα όπως η χαμηλή ικανότητα ψύξης , η χαμηλή ειδική ψυκτική ικανότητα (SCP) και ο μικρός συντελεστής απόδοσης (COP).

Το σίλικα τζελ προέρχεται από υδρόλυμα (hydrosol) διοξειδίου του πυριτίου αφού υποβληθούν διαδοχικά στη διαδικασία του πολυμερισμού συμπύκνωσης, την ωρίμανση και να είναι εν μέρει αφυδατωμένα . Το σίλικα τζελ είναι ένας

άμορφος σχηματισμός ατόμων διοξειδίου του πυριτίου . Άτομα πυριτίου ακανόνιστα οργανώνονται σε σίλικα τζελ. Διάφορες ομάδες στην επιφάνεια όπως ελεύθερες (ή μεμονωμένες) ομάδες σιλανόλης (silanol) , ομάδα σιλανόλης με δεσμούς υδρογόνου ,ομάδα σιλανόλης με δεσμούς υδρογόνου επιφανειακά και εσωτερική ομάδα σιλανόλης καλύπτουν την επιφάνεια των μικροπόρων του τζελ πυριτίου. Η αλληλεπίδραση σε χημικό και φυσικό επίπεδο αυτών των ομάδων μπορεί να ταξινομηθεί σε δεσμό υδρογόνου, σε πολικό και σε θέσεις προσρόφησης για ασθενή μεταφορά ηλεκτρονίων . Οι ελεύθερες ομάδες σιλανόλης είναι οι πιο ενεργοποιημένες θέσεις προσρόφησης στην επιφάνεια των μικροπόρων του αυτού μέσου για να απορροφούν τα μόρια του νερού. Επιπλέον ένας από τους πολύ σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζει την απόδοση της προσρόφησης του σίλικα τζελ σε νερό , είναι ο αριθμός των ελεύθερων ομάδων σιλανόλης. Επιπροσθέτως, τα τζελ πυριτίου εμφανίζονται σε υπό όξινο και είναι σταθερά σε μη αλκαλικό περιβάλλον. Τέλος ,η διατήρηση όξινου περιβάλλοντος και η αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ομάδων σιλανόλης, θα βελτιώσουν την προσροφητική ικανότητα των σίλικα τζελ σε νερό [6].

Από τους πρώτους ερευνητές που μελέτησε τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση, που χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο σίλικα τζελ – καθαρό νερό (silica gel – water) , είναι οι Soon- Haeng Cho και Jong-Nam Kim [7]. Αναπτύχθηκε ένας ψύκτης βασιζόμενος στην τεχνολογία προσρόφησης ο οποίος παρουσιάζει ικανότητα ψύξης ίση με 1,2 RT σε θερμοκρασία του κρύου νερού από 4-7 °C.

Το πειραματικό σύστημα αποτελείται από δυο προσροφητές συμπληρωμένους με σίλικα τζελ οι οποίοι συνδέονται με έναν απαερωτή (evaporator) και έναν συμπυκνωτή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.4.1.



Σχήμα 2.4.1. σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης [7]

Ένας ακόμα ερευνητής ο **Alam** μελέτησε την επίδραση που έχουν οι παράμετροι σχεδιασμού του εναλλάκτη θερμότητας. Οι παράμετροι αυτοί είναι επιγραμμικά ο NTU (number of transfer units), ο Bi (bed biot number), Hr (heat exchanger thickness ratio), ο Ar [8]:

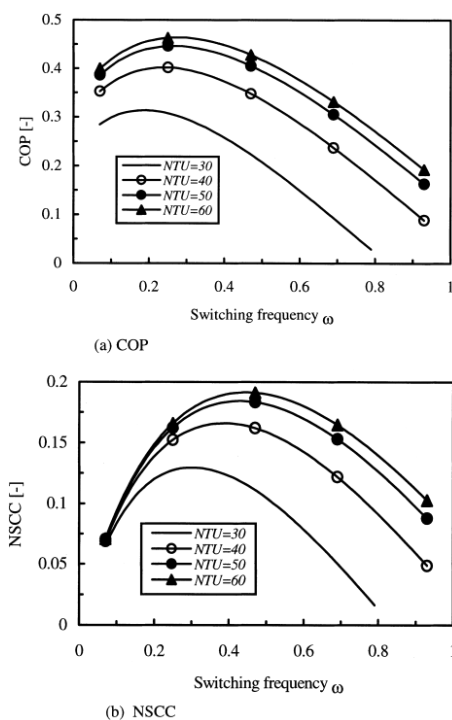
Αριθμός των μονάδων μεταφοράς (NTU)

Ο αριθμός των μονάδων μεταφοράς (NTU) είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους σχεδιασμού ενός εναλλάκτη θερμότητας. Αντιπροσωπεύει τη χαρακτηριστική μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα των συστημάτων ψύξης προσρόφησης. Ορίζεται ως λόγος μεταφοράς της θερμότητας στη διεπιφάνεια του υγρού/σωλήνα προς την οριζόντια μεταφορά της ενέργειας στο ρευστό.

Η επίδραση του NTU στην απόδοση του συστήματος είναι φαίνεται στο Σχήμα 2.4.2α και β. Από τα στοιχεία αυτά, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η απόδοση του συστήματος, δηλαδή, COP και $NSCC$ αυξάνονται, καθώς το NTU αυξάνεται. Είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο εναλλάκτης θερμότητας τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του NTU . Αλλά το ερώτημα είναι πόσο μπορεί κανείς να αυξήσει το μέγεθος ενός εναλλάκτη θερμότητας, χωρίς όριο, επειδή η πτώση πίεσης κατά πλάτος του εναλλάκτη θερμότητας αυξάνει με το μέγεθος, κάτι το οποίο θα επιδεινώσει τις αποδόσεις του συστήματος. Σχήματα 2.4.2α και β δείχνουν ότι η αύξηση του NTU οδηγεί στον ρυθμό βελτίωσης της απόδοσης των συστημάτων. Ως εκ τούτου, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι πρέπει να υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του NTU για μέγιστο COP και $NSCC$. Η βέλτιστη τιμή της NTU για τις παρούσες συνθήκες βάσης θεωρείται ως 50.

Η επίδραση της συχνότητας εναλλαγής για διαφορετικές *NTU* παρουσιάζεται επίσης στο Σχήμα 2.4.2.α και β. Από τα στοιχεία αυτά, μπορεί κανείς να δει ότι υπάρχει μια βέλτιστη συχνότητα εναλλαγής για κάθε *NTU* και αυτή τη βέλτιστη τιμή αυξάνει με την αύξηση του *NTU*. Έχει επίσης, παρατηρηθεί ότι η απόδοση του συστήματος μπορεί να επιδεινωθεί αν η συχνότητα εναλλαγής ρυθμιστεί σε μακρινή από την βέλτιστη τιμή. Οι βέλτιστες τιμές του ω κυμαίνονται από 0.2 ± 0.35 για την απαίτηση του συντελεστή απόδοσης *COP* και 0.25 ± 0.45 για την απαίτηση του *NSCC*. Για να προσδιοριστεί ο βέλτιστος χρόνος κύκλου για το σύστημα ψύξης με προσρόφηση, χρειάζεται μόνο ένα βέλτιστη σημείο συχνότητας εναλλαγής. Το τελικό βέλτιστο σημείο μπορεί να προσδιοριστεί μεταξύ των βέλτιστων σημείων του *COP* και *NSCC* ανάλογα με τις απαιτήσεις του *COP* και *NSCC*.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ NTU



Σχήμα 2.4.2 α, β . Οι βαθμοί COP και NSCC για διαφορετικά NTU σε συνάρτηση με τη συχνότητα εναλλαγής (switching frequency) ω . [8]

Αριθμός Biot των βαθμίδων (Bi)

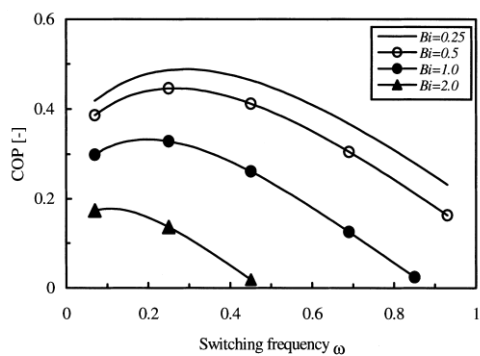
Bi είναι ένας αριθμός **Biot** μιας προσροφητικής βαθμίδας του εναλλάκτη θερμότητας, η οποία συνεπάγεται τη χαρακτηριστική μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας. Ορίζεται ως ο λόγος της αγώγιμης αντίστασης της κλίνης του προσροφητή προς την αντίσταση λόγω συναγωγής στη μεταφορά θερμότητας του υγρού. Μια αύξηση στον αριθμό Bi είναι ισοδύναμη με την αύξηση της αντίστασης λόγω αγωγής ή τη μείωση της αντίστασης λόγω συναγωγής.

Τα σχήματα 2.4.3α και β δείχνουν την επίδραση του Bi στην απόδοση του συστήματος. Από αυτά τα στοιχεία, φαίνεται ότι με την αύξηση του Bi υπόκεινται σε μείωση οι COP και $NSCC$. Ο λόγος είναι ότι ο Bi ενός προσροφητή εναλλάκτη θερμότητας δεν εξαρτάται μόνο από αντίσταση της μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής αλλά και από την αγώγιμη αντίσταση της κλίνης του προσροφητή. Όσο υψηλότερη τιμή της αγώγιμης αντίστασης στις στρώσεις του προσροφητή τόσο μικρότερη είναι η μεταφορά θερμότητας στην βαθμίδα του προσροφητή. Αυτό σημαίνει ότι η αγώγιμη αντίσταση στην κλίση του προσροφητή είναι πιο κυρίαρχη από την αντίσταση συναγωγής.

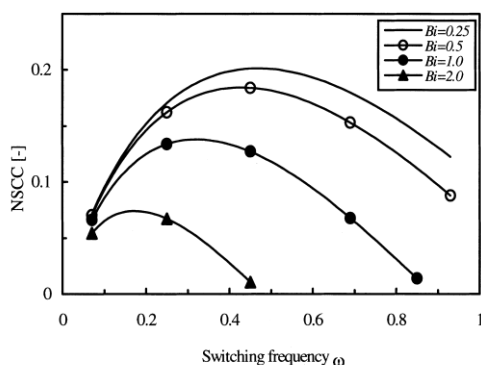
Κάποιος μπορεί επίσης να παρατηρήσει από το Σχήματα. 2.4.3α και β ότι εκεί υπάρχει μια βέλτιστη συχνότητα εναλλαγής τόσο για τον COP και $NSCC$. Αυτά τα στοιχεία δείχνουν ότι ο COP και ο $NSCC$ δεν είναι βελτιστοποιημένοι στην ίδια

συχνότητα εναλλαγής όπως παρατηρείται για την περίπτωση του NTU . Θεωρείται ότι το βέλτιστο ω αυξάνει με μειούμενο το Bi .

Διαγράμματα Bi



(a) COP



(b) NSCC

Σχημα 2.4.3α, β Οι βαθμοί COP και NSCC για διαφορετικά Bi σε συνάρτηση με τη συχνότητα εναλλαγής (switching frequency) ω . [8]

Λόγος πάχους του εναλλάκτη θερμότητας (Hr)

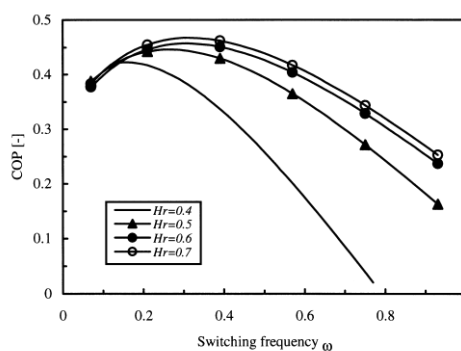
Μια αδιάστατη παράμετρος Hr ορίζεται ως ο λόγος της ακτίνας του καναλιού του ρευστού προς το πάχος της προσροφητικής βαθμίδας. Η επίδραση των διαφορετικών τιμών Hr στην απόδοση του συστήματος απεικονίζεται στα σχήματα 2.4.4 α και β. Φαίνεται ότι η αύξηση του Hr οδηγεί σε αύξηση τόσο στον COP και όσο $NSCC$. Μια αύξηση στον Hr είναι ανάλογη με μια μείωση του πάχους της προσροφητικής κλίνης ή να αποτελεί αύξηση της ακτίνας του καναλιού μεταφοράς θερμότητας του ρευστού.

Αυτό σημαίνει ότι, όσο λεπτότερη είναι η κλίνη του προσροφητή, τόσο υψηλότερη είναι η απόδοση, το οποίο είναι ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα, δεδομένου ότι είναι έχει παρατηρηθεί για την περίπτωση των διαφορετικών τιμών Bi . Μπορεί κανείς να δει ότι η ρυθμός μεταβολής τόσο του COP και όσο

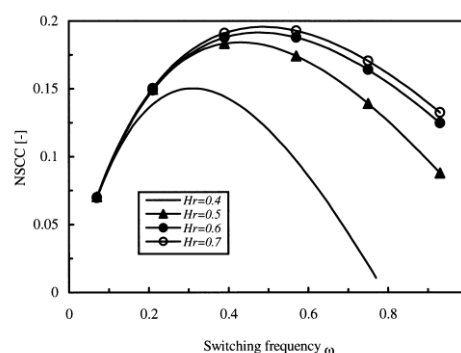
και του $NSCC$ είναι πολύ μικρός όταν η τιμή του Hr είναι μεγαλύτερη από 0.5. Όταν η Hr αυξάνεται από 0.4 έως 0.5, ο COP αυξάνεται από 0.42 σε 0.45 και $NSCC$ αυξάνεται από 0.15 σε 0.18, πράγμα που σημαίνει βελτίωση περίπου 7% του COP και 20% του $NSCC$. Ωστόσο, με αύξηση του Hr από 0.5 σε 0.6, η COP έχει βελτιωθεί από 0.45 σε 0.46 και του $NSCC$ από 0.18 σε 0.19, δηλαδή βελτίωση μόνο 0,02% του COP και 6% του $NSCC$. Επομένως, η βέλτιστη τιμή του Hr για τις παρούσες συνθήκες θεωρείται ως 0.5.

Τα σχήματα 2.4.4α και β δείχνουν επίσης ότι η βέλτιστη συχνότητα εναλλαγής ω είναι διαφορετική για COP και $NSCC$ και αυτή η βέλτιστη τιμή αυξάνεται καθώς η αδιάστατη παράμετρος Hr αυξάνεται. Η βέλτιστη τιμή ω για την απαίτηση του COP είναι κατώτερη από εκείνη για την απαίτηση του $NSCC$.

Διαγράμματα Hr



(a) COP



(b) NSCC

Σχήμα 2.4.4α,β. Οι βαθμοί COP και NSCC για διαφορετικά Hr σε συνάρτηση με τη συχνότητα εναλλαγής (switching frequency) ω . [8]

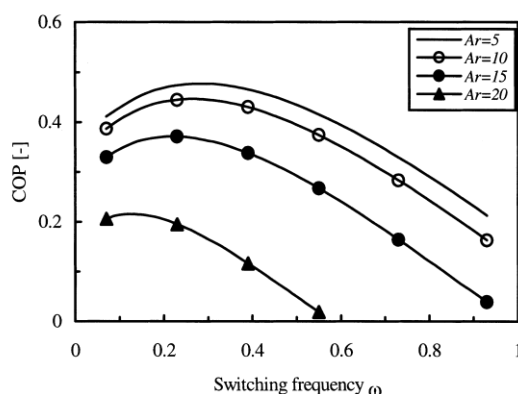
Ο λόγος των διαστάσεων του εναλλάκτη θερμότητας (Ar)

Ο λόγος διαστάσεων ενός εναλλάκτη θερμότητας ορίζεται ως ο λόγος του μήκους προς το πλάτος του εναλλάκτη θερμότητας. Η επίδραση του λόγου στον

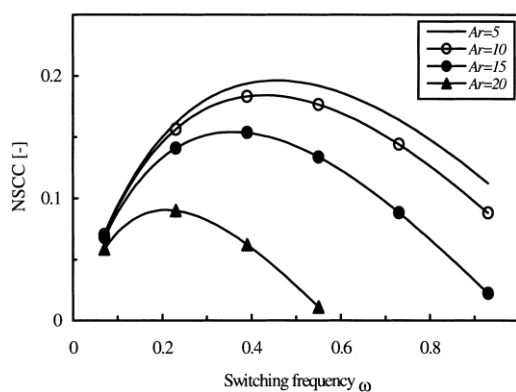
COP και στον $NSCC$ έχει παρουσιαστεί στα σχήματα 2.4.5α και β. Μπορεί να φανεί ότι ο COP , καθώς και ο $NSCC$ αυξάνεται καθώς ο Ar μειώνεται.

Τα σχήματα 2.4.5α και β δείχνουν επίσης ότι ο COP καθώς και ο $NSCC$ βελτιώνονται ελαφρώς όταν ο Ar είναι μικρότερος από 10. Όσο μειώνεται ο Ar κατά το ήμισυ από την τιμή 20 σε 10, ο COP βελτιώνεται από 0.22 σε 0.45 και ο $NSCC$ από 0.09 έως 0.18. Ωστόσο, με μείωση Ar κατά το ήμισυ από 10 σε 5, υπάρχει κέρδος στην τιμή του COP μόνο από 0.45 σε 0.48 και του $NSCC$ από 0.18 σε 0.2. Εκεί-προσκήνιο, η βέλτιστη Ar για το βασικό σενάριο τρέξιμο θεώρησης ως 10. Η αύξηση της βέλτιστης του ω έχει επίσης παρατηρηθεί όταν ο Ar μειώνεται.

Διαγράμματα Ar



(a) COP



(b) NSCC

Σχήμα 2.4.5α, β. Οι βαθμοί COP και NSCC για διαφορετικά Ar σε συνάρτηση με τη συχνότητα εναλλαγής (switching frequency) ω . [8]

2.5. Συστήματα χλωριούχου ασβεστίου - αμμωνίας

Το σύστημα χλωριούχου ασβεστίου-αμμωνία είναι ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα και συνηθέστερα εργαζόμενα μέσα που εφαρμόζονται σε

χημικά συστήματα προσρόφησης. Η χωρητικότητα του κύκλου προσρόφησης του χλωριούχου ασβεστίου με αμμωνία είναι μεγάλη: ένα γραμμομόριο χλωριούχο ασβεστίου μπορεί να απορροφηθεί από 8 moles αμμωνία από τον συνδυασμό $\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$. Τέσσερα, έξι ή οκτώ moles αμμωνίας μπορούν να εκκροφηθούν από το συνδυασμό των $8\text{NH}_3 \cdot \text{CaCl}_2$ ανάλογα με τις διαφορετικές θερμοκρασίες εκρόφησης και πιέσεις. Η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο στην παγομηχανή λόγω του χαμηλού σημείου ζέσεως αυτής. Ένα ηλιακό σύστημα προσρόφησης με εργαζόμενο μέσο χλωριούχο ασβέστιο και αμμωνία προσομοιώθηκε και δοκιμάστηκε από ερευνητές. Λόγω της επαρκούς ποσότητας της θερμότητας των αποβλήτων από τα καυσαέρια του κινητήρα και του αρκετού χώρου για εγκατάσταση, το σύστημα προσρόφησης χλωριούχου-αμμωνία ασβεστίου είναι κατάλληλο για την παγομηχανή σε αλιευτικό σκάφος. Ο ερευνητής **R.Z. Wang** έχει κάνει πολύ χρήσιμο έργο και ανέπτυξε ένα σύστημα προσρόφησης με σωλήνα θερμότητας χλωριούχου ασβεστίου-αμμωνίας για τα αλιευτικά σκάφη των οποίων η ειδική ψυκτική ισχύς SCP και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος COP είναι έως 731 W / kg και 0,38 αντίστοιχα. Ωστόσο, προβλήματα όπως η αποσύνθεση, η φθορά και η διάβρωση στο σύστημα προσρόφησης χλωριούχου ασβεστίου-αμμωνία έχουν γίνει εμπόδια για την αποτροπή αυτών των συστημάτων από εκτεταμένη αξιοποίηση.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] L.W. Wang, J.Y. Wu, R.Z. Wang *, Y.X. Xu, S.G. Wang, X.R. Li. Study of the performance of activated carbon–methanol adsorption systems concerning heat and mass transfer. *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 1605–1617
- [2] Z. Tamainot-Telto , S.J. Metcalf, R.E. Critoph, Y. Zhong., R. Thorpe Carbon-Ammonia pairs for adsorption refrigeration applications: ice making, air conditioning and heat pumping. *International Journal of Refrigeration* Volume 79, Pages 1-260 (July 2017)
- [3] Xiang-Li Long, Hua Cheng, Zhi-Ling Xin, Wen-De Xiao, Wei Li, and Wei-Kang Yuan. Adsorption of Ammonia on Activated Carbon from Aqueous Solutions. *Environmental Progress* 27(2):225 - 233 · July 2008.
- [4] Zhu RQ, Han BQ, Lin MZ, Yu YZ. Experimental investigation on an adsorption system for producing chilled water. *International Journal of Refrigeration International Journal of Refrigeration*.Volume 15, Issue 1, 1992, Pages 31-34
- [5] Zhang LZ. Design and testing of an automobile waste heat adsorption cooling system. *Applied Thermal Engineering* Volume 20, Issue 1, January 2000, Pages 103–114.
- [6] Dechang Wang, Jipeng Zhang, Xiaoliang Tian, Dawei Liu, K.Sumathy. Progress in silica gel–water adsorption refrigeration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 30, February 2014, Pages 85-104
- [7] Soon- Haeng Cho and Jong- Nam Kim. Modeling of a silica gel/water adsorption- cooling system. Korea Institute of Energy Research, P.O. Box. 5, Energy Volume 17, Issue 9, September 1992, Pages 829-839
- [8] K.C.A. Alam, B.B. Saha, Y.T. Kang , A. Akisawa, T. Kashiwagi Heat exchanger design effect on the system performance of silica gel adsorption refrigeration systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 43, Issue 24, 15 December 2000, Pages 4419-4431
- [109] Yang, R.T. (1991) *Gas separation by Adsorption Technology*, Chemical Engineering Press, Beijing
- [110] Zhang, Y.H. (1989) *Adsorption Action*, Shanghai Press of Science and Technology, Shanghai, ISBN: 7805134979, 9787805134970 (in Chinese).
- [111] Wang, L.W., Wang, R.Z., Wu, J.Y. and Wang, K. (2004) Compound adsorbent for adsorption ice maker on fishing boats. *International Journal of Refrigeration*, 27(4), 401–408.

[112] Aristov, Y.I., Restuccia, G., Caccioba, G. *et al.* (2002) A family of new working materials for solid sorption air conditioning systems. *Applied Thermal Engineering*, 22, 191–204.

[113] Mauran, S., Prades, P. and Haridon, F.L. (1993) Heat and mass transfer in consolidated reaction beds for thermochemical systems. *Heat Recovery Systems and CHP*. 13, 315–319.

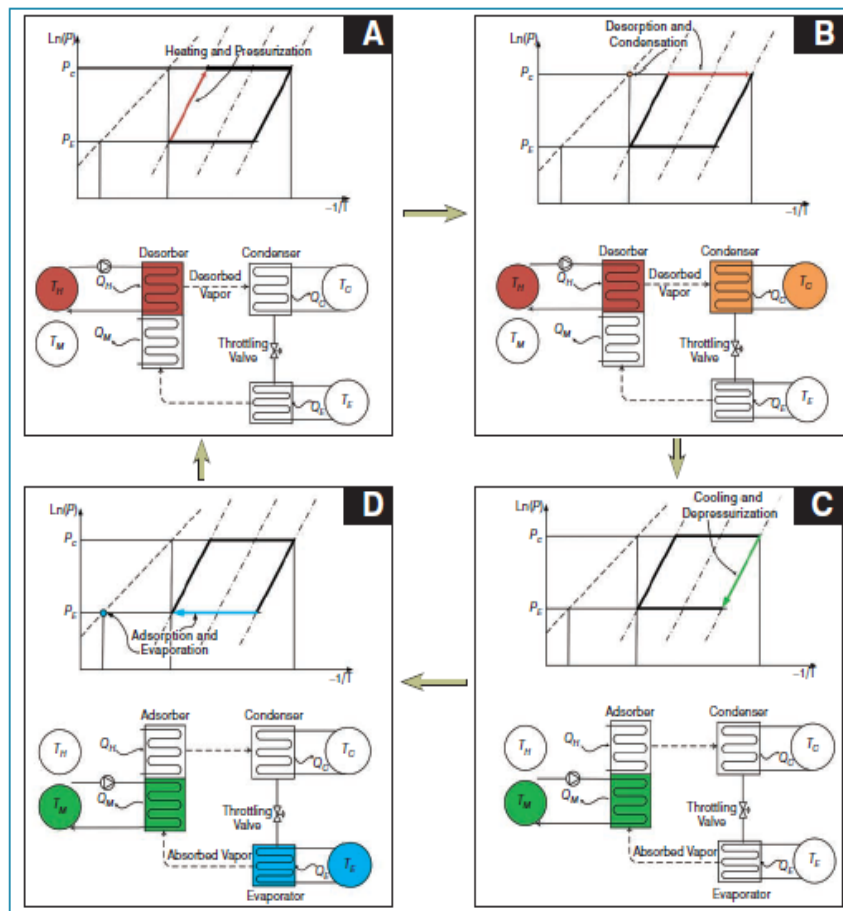
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΚΛΩΝ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

Θα ξεκινήσουμε την περιγραφή των κύκλων ψύξης με προσρόφηση αναλύοντας τις διαδικασίες ενός βασικού κύκλου ψύξης με προσρόφησης.

Ένας βασικός κύκλος προσρόφησης αποτελείται από τέσσερα στάδια (σχήμα 3.1): θέρμανση και συμπίεση, εκρόφηση και συμπύκνωση, ψύξη και αποσυμπίεση, και προσρόφηση και εξάτμιση. Στο πρώτο βήμα, ο προσροφητής θερμαίνεται από πηγή θερμότητας σε θερμοκρασία T_H . Η πίεση του προσροφητή αυξάνει από την τιμή της πίεσης εξάτμισης μέχρι την τιμή της πίεσης συμπύκνωσης, ενώ αυξάνει και η θερμοκρασία του προσροφητή. Αυτό το βήμα είναι ισοδύναμο με την «συμπίεση» στον κύκλο συμπίεσης ατμού. Στο δεύτερο στάδιο, ο προσροφητής συνεχίζει να λαμβάνει τη θερμότητα και η θερμοκρασία του αυξάνεται διαρκώς, η οποία οδηγεί στην εκρόφηση (ή αναγέννηση) του ψυκτικού ατμού από το προσροφητικό στον προσροφητή. Ο εκροφημένος ατμός είναι υγροποιημένος στον συμπυκνωτή και η συμπυκνωμένη θερμότητα απελευθερώνεται στην πρώτη δεξαμενή θερμότητας σε θερμοκρασία T_C . Αυτό το βήμα είναι ισοδύναμο με "συμπύκνωση" στον κύκλο συμπίεσης ατμών.

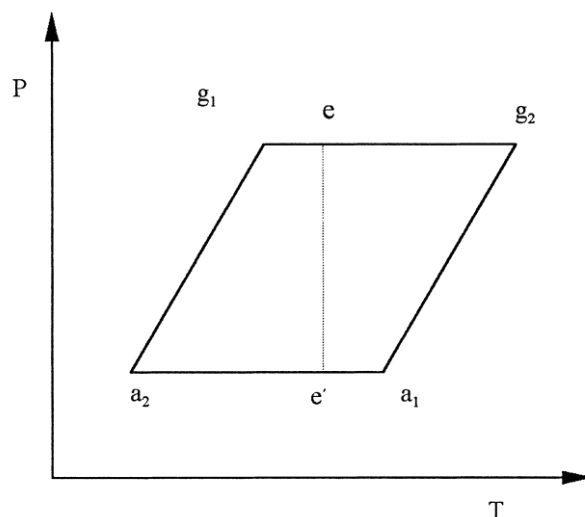
Στην αρχή του τρίτου σταδίου, ο προσροφητή έχει αποσυνδεθεί από το συμπυκνωτή. Στη συνέχεια, ψύχεται με μεταφορά θερμότητας ρευστού στην δεύτερη δεξαμενή θερμότητας θερμοκρασίας T_M . Η πίεση του προσροφητή μειώνεται από την πίεση συμπύκνωσης έως την πίεση εξάτμισης και αυτό οφείλεται στη μείωση της θερμοκρασίας του προσροφητή. Αυτό το βήμα είναι ισοδύναμο με "Επέκταση" στον κύκλο συμπίεσης ατμών. Στο τελευταίο στάδιο, ο προσροφητής λειτουργεί απελευθερώνοντας θερμότητα ενώ είναι συνδεδεμένος με τον αποστακτήρα. Η θερμοκρασία του προσροφητή συνεχίζει να μειώνεται, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα την προσρόφηση του ψυκτικού ατμού του απαεριωτή από το προσροφητικό μέσο, παράγοντας το επιθυμητό αποτέλεσμα ψύξης. Αυτό το βήμα είναι ισοδύναμο ως "εξάτμιση" στον κύκλο συμπίεσης ατμών. Ο βασικός κύκλος προσρόφησης ψύξης είναι ένα διακοπτόμενο σύστημα και η ψύξη της εξόδου δεν είναι συνεχής. Ο ελάχιστος αριθμός προσροφητών, για να υπάρχει συνεχής επίδραση ψύξης, είναι δύο (Όταν ο πρώτος προσροφητής βρίσκεται στη φάση της προσρόφησης, ο δεύτερος προσροφητής είναι στη φάση της εκρόφησης). Αυτές οι προσροφητές θα εκτελέσουν διαδοχικά την διαδικασία προσρόφησης-εκρόφησης [9].



Σχήμα 3.1. Βασικός κύκλος ψύξης με προσρόφηση. Α. Θέρμανση και Προσυμπίεση Β. Εκρόφηση και συμπύκνωση C. Ψύξη και αποσυμπίεση D. Προσρόφηση και εξάτμιση [9]

3.1. Κύκλος ανάκτησης θερμότητας

Οι διαδικασίες που συνιστούν έναν βασικό κύκλο ψύξης με προσρόφηση είναι τέσσερις, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.1.



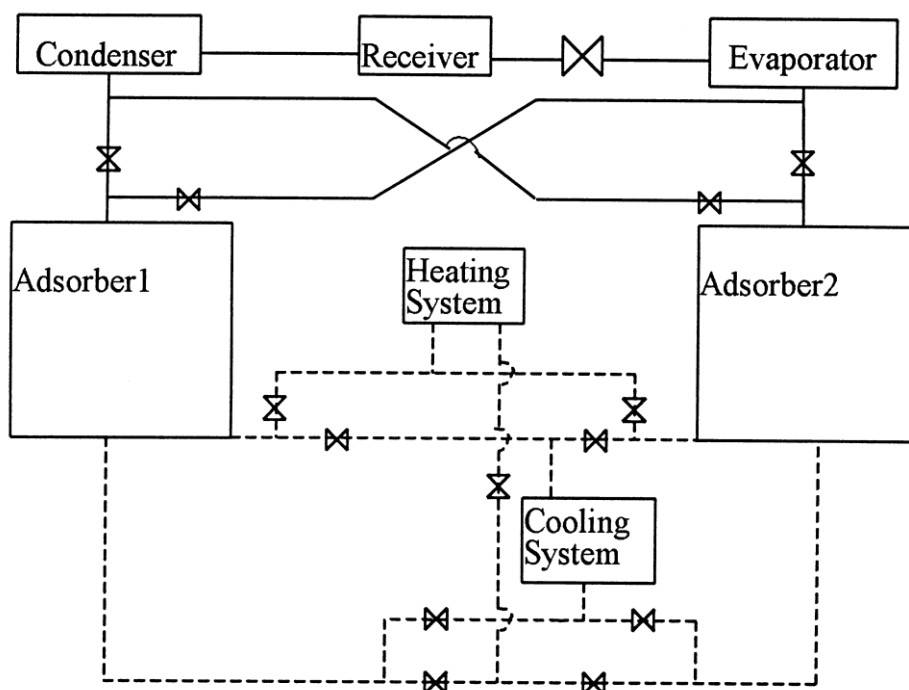
Σχήμα 3.1. 1. Διάγραμμα ενός διακοπτόμενου και με αναγέννηση θερμότητας κύκλου. [10]

Η πρώτη από αυτές a_2-g_1 , συντελείται όταν η βαθμίδα του προσροφητή δέχεται θερμότητα από υψηλής θερμοκρασίας θερμαντικό ρευστό και καταλήγει σε μία υψηλή πίεση ίση με την πίεση συμπύκνωσης. Το υψηλής θερμοκρασίας θερμικό υγρό είναι η πηγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας. Όταν η κλίνη θερμαίνεται, προκαλείται εκρόφηση του ψυκτικού, το συμπυκνώνεται σε ένα συμπυκνωτή. Η διαδικασία g_1-g_2 είναι μια ισοβαρής διαδικασία κατά την οποία το ψυκτικό απελευθερώνει θερμότητα σε μια υψηλής θερμοκρασίας δεξαμενής. Μετά από αυτό η κλίνη του προσροφητή μεταφέρει θερμότητα σε μια δεύτερη δεξαμενή θερμότητας και ψύχεται και αποσυμπιέζεται στη θέση a_1 από τα συστήματα ψύξης. Έπειτα στη διαδικασία a_1-a_2 , ξαναγίνεται προσρόφηση του ψυκτικού ατμού, η οποία προκαλεί εξάτμιση του υγρού στον αποστακτήρα. Εκεί το ψυκτικό μέσο αφαιρεί θερμότητα από την πηγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Η διαγραμματική απεικόνιση του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 3.1.2. Αυτός ο κύκλος είναι συχνά επονομαζόμενος ως διακοπτόμενος κύκλος, καθώς όπως μπορούμε να δούμε ότι η διαδικασία της εξάτμιση συμβαίνει μόνο κατά το ήμισυ της.

Όταν το σύστημα είναι διπλής βαθμίδας, μπορούμε εύκολα να τα λειτουργήσουμε εκτός φάσης. Ο συνεχής κύκλος διπλής βαθμίδας χρησιμοποιεί δύο κλίνες για να παρέχουν συνεχή ψυκτική ισχύ. Αυτές είναι στην πραγματικότητα δύο παράλληλοι βασικοί κύκλοι που λειτουργούν εκτός φάσης. Όλη η θερμική ενέργεια που παραλαμβάνεται από την κλίνη του προσροφητή παρέχεται από το σύστημα θέρμανσης. Η θερμότητα πρέπει να ανακτηθεί εσωτερικά για να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος.

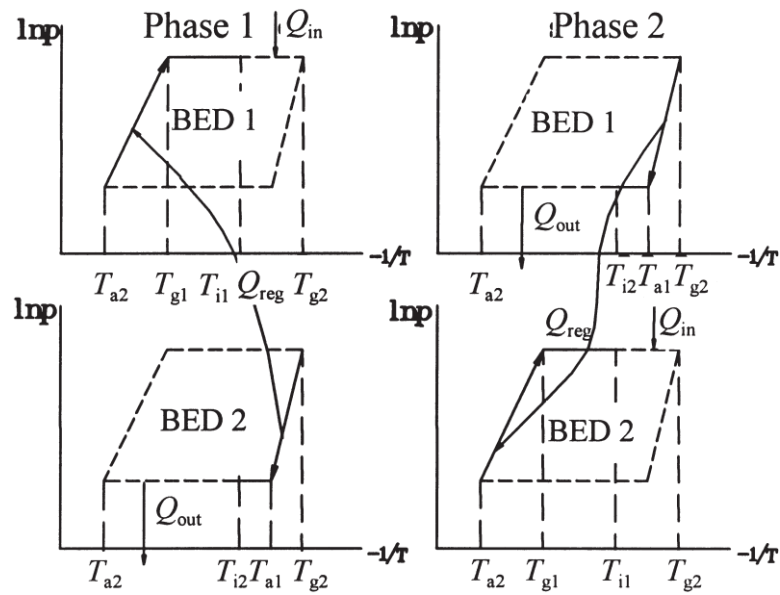
Τα συστήματα με ανάκτηση είναι δύο η περισσότερων βαθμίδων, οι οποίες λειτουργούν εκτός φάσης. Στο τέλος του κάθε μισού κύκλου, η μια βαθμίδα του

προσοροφητή είναι χαμηλής θερμοκρασίας στο σημείο a_2 και η άλλη είναι στο g_2 σε υψηλή θερμοκρασία. Η θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί εύκολα μεταξύ των δύο προσροφητικών βαθμίδων εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς. Με την κυκλοφορία του θερμού υγρού, αδιαβατικά, μεταξύ των δύο βαθμίδων, η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Σε μια ιδανική διαδικασία ανάκτησης θερμότητας, οι δύο κλίνες θα φτάσουν την ίδια θερμοκρασία, η μια στο σημείο e και η άλλη στο σημείο e' (βλ. Σχήμα 3.1.1). Κατά συνέπεια το θερμικό φορτίο για θέρμανση μπορεί να μειωθεί κατά $Q_{a_2-g_1-e}$. Αυτή είναι η ανάκτηση θερμικής ενέργειας, η οποία μπορεί να φθάσει περίπου 30% ή περίπου της συνολικής αναγκαίας θερμότητας εισόδου του βασικού κύκλου [10].

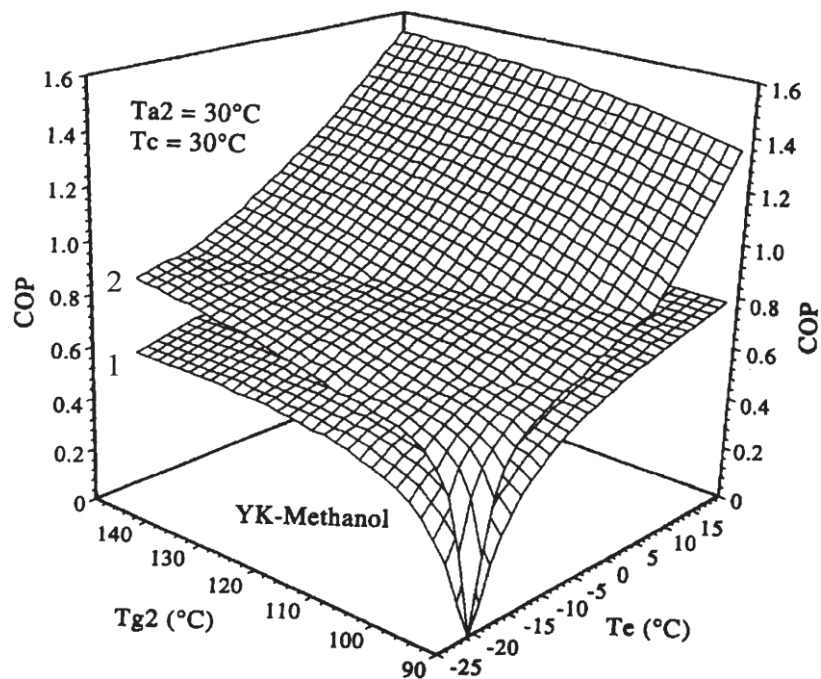


Σχήμα 3.1.2. Κύκλος ανάκτησης θερμότητας. [10]

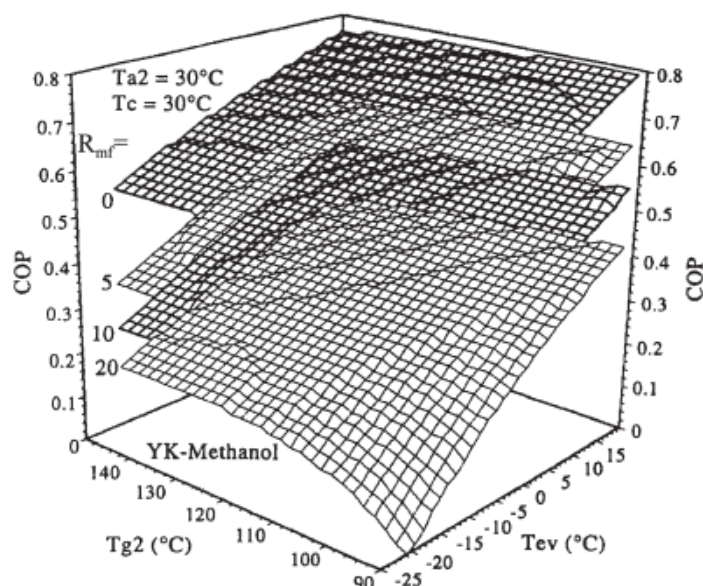
Στο παρακάτω σχήμα 3.1.3 φαίνεται σε θερμοδυναμικό διάγραμμα η επίδραση ενός συστήματος προσρόφησης δύο βαθμίδων με ανάκτηση θερμότητας. Στο επόμενο σχήμα 3.1.4 φαίνεται η απόδοση του συστήματος προσρόφησης χωρίς και με ανάκτηση θερμότητας. Ενώ στο σχήμα 3.1.5 φαίνεται ο λόγος θερμικής χωρητικότητας και ο τρόπος που επιδρά στον βαθμό απόδοσης COP του συστήματος ανάκτησης θερμότητας.



Σχήμα 3.1.3. Σύστημα προσρόφησης δύο βαθμίδων με ανάκτηση θερμότητας. Φάση 1^η: βαθμίδα 1 για θέρμανση και βαθμίδα 2 για ψύξη. Φάση 2^η βαθμίδα 1 για ψύξη και βαθμίδα 2 για θέρμανση.[32]



Σχήμα 3.1.4. Ο βαθμός απόδοσης COP με και χωρίς ανάκτηση θερμότητας. Θερμοκρασία εξάτμισης στους -10°C, 1- βασικός κύκλος, 2- κύκλος ανάκτησης θερμότητας.[32]



σχήμα 3.1.5. Ο λόγος θερμικής χωρητικότητας πως επιδρά στον βαθμό απόδοσης COP του συστήματος ανάκτησης θερμότητας.

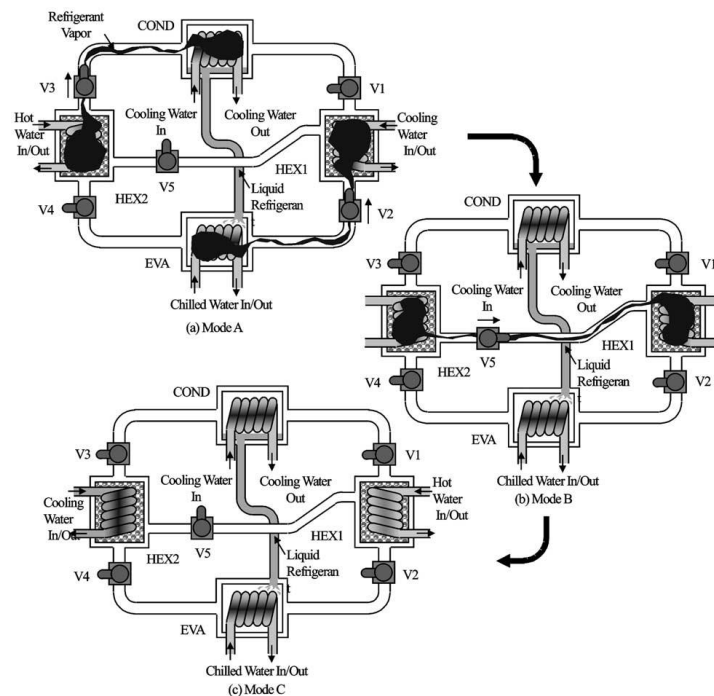
3.2. Κύκλος ανάκτησης θερμότητας και μάζας

Ο κύκλος ανάκτησης μάζας χωρίς θέρμανση και ψύξη έχει σχηματική αναπαράσταση όπως στο σχήμα 3.2.1. Ο κύκλος αυτός αποτελείται από τέσσερις εναλλάκτες θερμότητας, δηλαδή έναν αποστακτήρα (*EVA*), ένα προσροφητή (*HEX1*), ένα συμπυκνωτή (*COND*) και έναν δεύτερο προσροφητή (*HEX2*). Οι δύο προσροφητές συνδέονται μεταξύ τους με μια βαλβίδα (*V5*). Ο κάθε κύκλος έχει έξι λειτουργίες, λειτουργία *A*, *B*, *C*, *D*, *E* και *F*. Η λειτουργία *A*, που φαίνεται στο Σχ. 1 (α), οι βαλβίδες *V1*, *V4* και *V5* είναι κλειστές, ενώ οι βαλβίδες *V2* και *V3* ανοίγουν. Στη λειτουργία, το σύστημα *EVA-HEX1* βρίσκεται στην διαδικασία προσρόφησης και ενώ το σύστημα *COND-HEX2* είναι σε λειτουργία εκρόφησης. Στη διαδικασία προσρόφησης-εξάτμισης, το ψυκτικό μέσο (Νερό) εξατμίζεται στον εξατμιστήρα σε θερμοκρασία εξάτμισης, T_e , και αφαιρείται θερμότητα, Q_e από το παγωμένο νερό. Ο εξατμισμένος ατμός απορροφάται από τον προσροφητή (στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούμε ως εργαζόμενο μέσο σίλικα τζελ με νερό), στον οποίο το νερό ψύξης αφαιρεί τη θερμότητα προσρόφησης, Q_{ads} . Η διαδικασία εκρόφησης-συμπύκνωσης λαμβάνει χώρα σε πίεση (P_c). Ο εκροφητής (*HEX2*) θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία (T_{des}) από Q_{des} , παροχή από την οδηγούμενη πηγή θερμότητας. Ο ψυκτικός ατμός που προκύπτει ψύχεται σε θερμοκρασία (T_c) στο συμπυκνωτή από το νερό ψύξης, η οποία αφαιρεί τη θερμότητα, Q_c . Όταν οι συγκεντρώσεις του ψυκτικού στον προσροφητή και στον εκροφητή είναι κοντά σε επίπεδα ισορροπίας τους, ο

κύκλος συνεχίζεται με την αλλάζοντας λειτουργία και πηγαίνοντας σε ρύθμιση **B** [σχ 3.2.1. (β)].

Στη λειτουργία B, ο προσροφητής (**HEX1**) συνδέεται με τον εκροφητή (**HEX2**) μέσω της βαλβίδας **V5**. Στη λειτουργία αυτή, καμία από της βαθμίδες των προσροφητών δεν αλληλεπιδρά με τον εξατμιστή ή τον συμπυκνωτή.

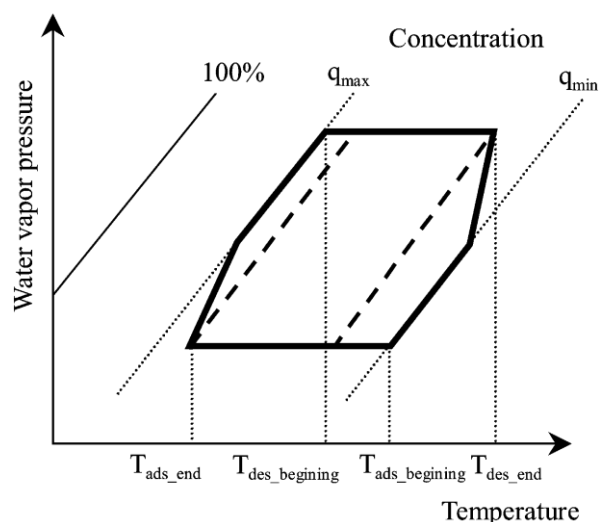
Οι πιέσεις του προσροφητή και του εκροφητή κατά την έναρξη της λειτουργίας **B** είναι ίσες με εκείνες στη λειτουργία **A**. Οι δύο βαθμίδες στην κατάσταση **A** λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα πίεσης (σχ. 3.2.2). Για παράδειγμα, ο προσροφητής συνδέεται με τον αποστακτήρα. Επομένως, η πίεση του προσροφητή είναι ίση με εκείνη του εξατμιστή. Εάν η θερμοκρασία του ατμού εξατμιστή υποτίθεται ότι είναι 10 °C, η πίεση του εξατμιστή θα είναι περίπου 1,2 kPa. Η πίεση του εκροφητή, η οποία είναι ίση με την πίεση του συμπυκνωτή, είναι περίπου 4,1 kPa, εάν η θερμοκρασία του ατμού συμπυκνωτή είναι 30 °C. Λόγω της διαφοράς πίεσεως των δυο βαθμίδων, η διαδικασία απορρόφησης/εκρόφησης θα συμβεί αυτόματα χωρίς οποιαδήποτε εφαρμογή θέρμανσης και ψύξης. Έτσι το εκροφημένο ψυκτικό μέσο από τον προσροφητή (που είναι σε λειτουργία εκρόφησης) θα κινηθεί προς τον άλλο προσροφητή (που είναι σε λειτουργία προσρόφησης). Η διαδικασία είναι γνωστό ότι είναι διαδικασία μαζικής είσπραξης των συμβατικών δύο κρεβάτια ψύκτη. Η διαδικασία θα οδηγήσει τον ψύκτη να παρέχει καλύτερες αποδόσεις.



Σχήμα 3.2.1. Κύκλος ανάκτησης θερμότητας και μάζας [11]

Η κατάσταση Γ [Σχ.3.2.1 (γ)] είναι διαδικασία προθέρμανσης. Σε αυτή τη διαδικασία, όλες οι βαλβίδες κλειστές. Ο εκροφητής (**HEX1**) θερμαίνεται με ζεστό νερό, και ο προσροφητής (**HEX2**) ψύχεται με ψύξη του νερού. Όταν οι πιέσεις του εκροφητή και του προσροφητή είναι σχεδόν ίσες με τις πιέσεις του συμπυκνωτή και του εξατμιστή, αντίστοιχα, τότε οι βαλβίδες μεταξύ προσροφητή και του εξατμιστή καθώς και οι βαλβίδες μεταξύ εκροφητή και συμπυκνωτή ανοίγονται έτσι ώστε να ρέει το ψυκτικό μέσο.

Στην κατάσταση **D**, οι βαλβίδες **V2** και **V3** είναι κλειστές, ενώ οι **V1** και **V4** είναι ανοικτές. Στη λειτουργία αυτή, το σύστημα **COND-HEX1** είναι σε διαδικασία εκρόφησης και ενώ το σύστημα **EVA-HEX2** βρίσκεται σε διαδικασία απορρόφησης. Στην κατάσταση **E**, η **V5** βαλβίδα είναι ανοικτή. Οι εναλλάκτες θερμότητας **HEX1** και **HEX2** συνδέονται μέσω της **V5** βαλβίδα. Η λειτουργία **E** είναι παρόμοια με τη λειτουργία **B**. Η λειτουργία **F** είναι διαδικασία προθέρμανσης όπως συμβαίνει και στη λειτουργία **Γ**. Στη κατάσταση αυτή, ο **HEX1** ψύχεται με νερό ψύξης, ενώ ο **HEX2** θερμαίνεται με ζεστό νερό. Η λειτουργία είναι και η τελευταία διαδικασία και μετά από αυτήν, το σύστημα επιστρέφει στην κατάσταση **A**. Ο Πίνακας 3.2.1 δείχνει την κατάσταση των βαλβίδων και την επιλογή της εφαρμογής του ζεστού νερού ή του νερού ψύξης [11].



Σχήμα. 3.2.2. Διάγραμμα Duhring για κύκλο ανάκτησης μάζας. [11]

Παρακάτω παραθέτουμε τον πίνακα 3.2.1 που μας δείχνει τη λειτουργία των βαλβίδων:

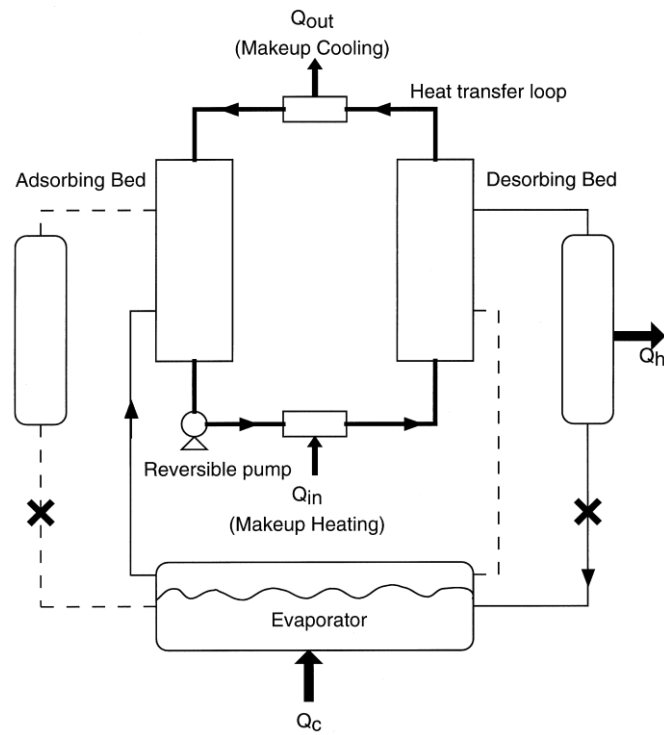
Πίνακας 3.2.1: πρόγραμμα εκμεταλλευσης ενέργειας

Mode		A	B	C	D	E	F
Valve	1	×	×	×	○	×	×
	2	○	×	×	×	×	×
	3	○	×	×	×	×	×
	4	×	×	×	○	×	×
	5	×	○	×	×	○	×
HEX	1	CW	-	HW	HW	-	CW
	2	HW	-	CW	CW	-	HW

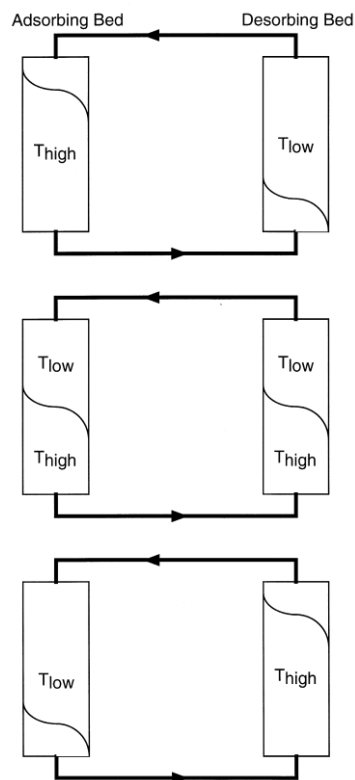
○, open; ×, closed; HW, hot water; CW, cooling water.

3.3. Κύκλος θερμικού κύματος

Το μοντέλο που θα μελετήσουμε παρακάτω αφορά ένα σύστημα διπλής βαθμίδας το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3.1. Η μεταφορά θερμότητας του ρευστού ρέει αξονικά και βρίσκεται σε θερμική επαφή με την κλίνη. Οι δύο βαθμίδες έχουν την ικανότητα να χωρίζονται σε πολλαπλά τμήματα, και βαλβίδες εισόδου και εξόδου συνδεδεμένες με τον συμπυκνωτή και τον αποστακτήρα μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε εντός της βαθμίδας. Το σχήμα 3.3.2 δείχνει πώς η «επιφανειακή» θερμοκρασία μπορεί να μεταφερθεί μέσα από τις βαθμίδες του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη την βαθμίδα που ξεκινά ως επί το πλείστον να έχει χαμηλή θερμοκρασία, η μεταφορά του ζεστού ρευστού χρησιμοποιείται για τη θέρμανση της βαθμίδας, και απελευθερώνει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς του στην μετωπική θερμοκρασία. Αυτό προκαλεί το μέτωπο να κινηθεί μέσω της βαθμίδας και τη θερμοκρασία του ρευστού που μεταφέρει θερμότητα να προσεγγίσει τη θερμοκρασία της κρύας βαθμίδας από τη στιγμή που εξέρχεται. Το αντίθετο συμβαίνει στην ψυχρή βαθμίδα. Στο σημείο όπου η μετωπική θερμοκρασία έχει φθάσει σε σημείο κορεσμού, η κατεύθυνση της ροής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας έχει αντιστραφεί, η οποία αλλάζει αποτελεσματικά τις δύο βαθμίδες [12].



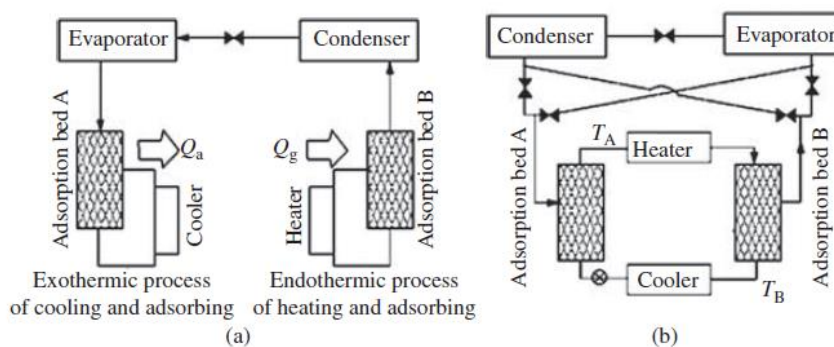
Σχήμα 3.3.1. Βασικό σχεδιάγραμμα δύο βαθμίδων προσρόφησης αντλίας θερμότητας.[12]



Σχήμα 3.3.2. Θερμικά κύματα ανάμεσα στις προσροφητικές βαθμίδες. [12]

Η χρήση των συστημάτων προσρόφησης θερμικού κύματος προτάθηκε για πρώτη φορά από τον ερευνητή **Shelton**. Ένας κύκλος θερμικού συστήματος έχει το πλεονέκτημα της μεταφοράς της θερμότητας από την υψηλής θερμοκρασίας βαθμίδα του προσροφητή στην χαμηλής θερμοκρασίας βαθμίδα εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς. Κάτι που στην διαδικασία ανάκτησης της θερμότητας δεν γίνεται ,αφότου υπάρχει περιορισμός από την θερμοκρασία των βαθμίδων .

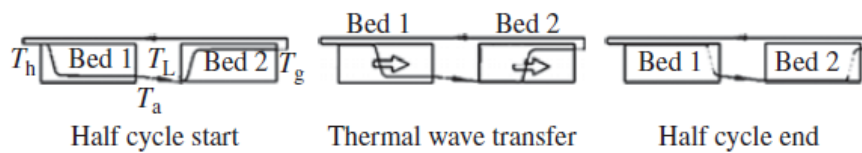
Στο Σχήμα 3.3.3 βλέπουμε τις διαφορές του βασικού συνεχούς κύκλου προσρόφησης με τον κύκλο θερμικού κύματος. Το βασικό σύστημα συνεχούς ψύξης στερεού με προσρόφηση έχει μόνο δύο βαθμίδες, και οι διαδικασίες προσρόφησης και εκρόφησης προχωρούν εναλλακτικά. Δηλαδή, όταν η μια κλίνη θερμαίνεται από την εξωτερική πηγή θερμότητας για την εκρόφηση, μία άλλη κλίνη ψύχεται από εξωτερική πηγή ψύξης για προσρόφηση. Οι διαδικασίες αυτές φαίνονται στο Σχήμα 3α. Το αντικείμενο για το σχεδιασμό ενός κύκλου θερμικού κύματος είναι να προσπαθήσει να χρησιμοποιήσει τη εξώθερμη θερμότητα Q_a πλήρως και να μειώσει τη θερμότητα Q_g ,που απαιτείται από τη διαδικασία εκρόφησης ,από την εξωτερική πηγή θερμότητας. Με αυτό τον τρόπο η διαδικασία θα μπορούσε να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος σημαντικά. Το σχήμα 3.3.3β απεικονίζει ένα τυπικό σύστημα για τον κύκλο θερμικού κύματος. Η βασική αρχή ενός τέτοιου συστήματος: η χρησιμοποίηση ενός κυκλώματος θέρμανσης και ψύξης το οποίο συνίσταται από δύο βαθμίδες προσρόφησης, το ψυγείο, και το θερμαντήρα . Το κύκλωμα αυτό του ρευστού θα μπορούσε να μεταφέρει την θερμότητα που απελευθερώνεται από την βαθμίδα προσρόφησης στην βαθμίδα εκρόφησης, και να ανακτήσει τη θερμότητα προσρόφησης για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. Το 80% της θερμότητας προσρόφησης μπορεί να ανακτηθεί για τη διαδικασία εκρόφησης σε έναν κύκλο θερμικού κύματος, και σαν ποσοστό ανάκτησης θερμότητας είναι $r = 0,8$ [13-20].



Σχήμα 3.3.3. Σχήμα ροή της θερμότητας. α) Βασικός κύκλος και β) κύκλος θερμικού κύματος [13-20]

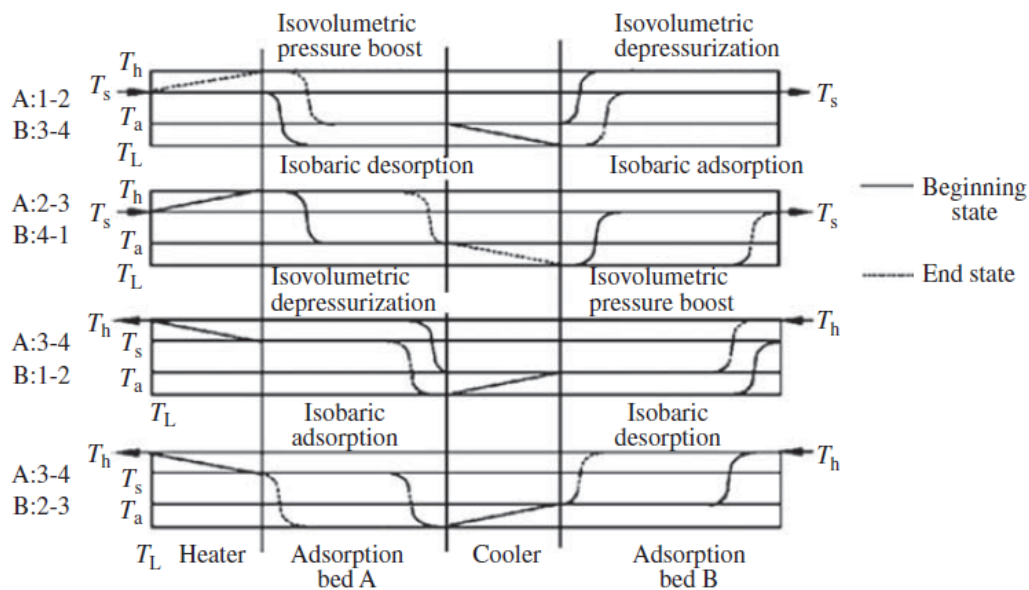
Ο κύκλος θερμικού κύματος απαιτεί την θερμοκρασία στην έξοδο (T_B) της κλίνης εκρόφησης να είναι χαμηλή, ενώ η θερμοκρασία στην έξοδο της κλίνης προσρόφησης να είναι σχετικά υψηλή. Αλλιώς, ένα μεγάλο ποσό της θερμότητας θα κυκλοφορήσει στον ψύκτη, και για μια τέτοια διαδικασία, είναι δύσκολο να ανακτηθεί η θερμότητα πίσω στο θερμοαντήρα αποτελεσματικά. Ειδικά για την κατάσταση όπου $T_A < T_B$, το είναι αδύνατο να ανακτηθεί θερμότητα. Έτσι, για έναν κύκλο θερμικού κύματος, μία μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις δύο βαθμίδες είναι απαραίτητη.

Για έναν κύκλο θερμικού κύματος, θερμικό κύμα σημαίνει ότι η θερμοκρασία του ρευστού μειώνεται ή αυξάνεται ταχύτατα στην προσροφητική βαθμίδα, σχηματίζοντας μια μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας, όπως μια απότομη κυματομορφή (φαίνεται στο σχήμα 3.3.4). Μία τέτοια διαδικασία θα μπορούσε να μεταφέρει τη θερμότητα μεταξύ δύο βαθμίδων.



Σχήμα 3.3. 4 Σχηματική ροή θερμότητας της μισής διαδικασίας κύκλου [13-20]

Σε συνδυασμό με τέσσερις βασικούς κύκλους, ένα ολόκληρος κύκλος θερμικού κύματος φαίνεται στο Σχήμα 3.3.5. Όταν η μια βαθμίδα Α θερμαίνεται για προσρόφηση και η βαθμίδα Β ψύχεται για εκρόφηση, ο κύκλος θερμικού κύματος περιλαμβάνει τις ακόλουθες δύο διαδικασίες:



Σχήμα 3.3.5. Το διάγραμμα της μεταφοράς ενέργειας ενός θερμικού κύματος [13-20]

1. Η διαδικασία αύξησης πίεσης στην κλίνη A και η διαδικασία μείωσης της κλίνης B υπό την προϋπόθεση της διατήρησης σταθερού όγκου.

Η αρχική κατάσταση της βαθμίδας A είναι κατάσταση κορεσμού προσρόφησης (T_L, p_e), η οποία είναι έτοιμη για την διαδικασία της εκρόφησης. Για την αρχική κατάσταση της κλίνης B η διαδικασία εκρόφησης (T_h, p_c) είναι πλήρης, και θα αλλάξει λειτουργία για τη διαδικασία ψύξης και προσρόφησης. Το θερμό ρευστό θερμαίνεται από τον θερμαντήρα προς μια θερμοκρασία του T_h , και στη συνέχεια ρέει στην κλίνη A για την ανταλλαγή της θερμότητας με την κλίνη B. Με αυτή τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας ένα απότομο θερμικό κύμα θα σχηματιστεί στην αριστερή πλευρά της κλίνης A, και εκτός από την αριστερή πλευρά, τα άλλα μέρη θερμαίνεται έως T_a . Στην έξοδο ένας ψύκτη θα ψύξει το ρευστό σε θερμοκρασία T_L . Μετά από αυτό το ρευστό θα ρέει μέσα στο προσροφητική κλίνη B, ομοίως με η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας στο αριστερό άκρο της κλίνης B ένα θερμικό κύμα με μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά από τα άλλα τμήματα της κλίνης θα

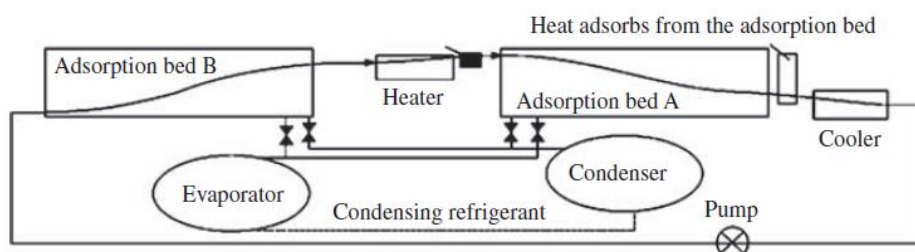
σχηματιστεί, και η κλίνη ψύχεται στη θερμοκρασία του T_s . Στη συνέχεια, το ρευστό θα ρέει πίσω προς τον θερμαντήρα να ετοιμαστεί και πάλι για τον επόμενο κύκλο. Σε αυτή τη διαδικασία, όταν η θερμοκρασία της βαθμίδας A αυξάνει, ένα μέρος του προσροφητικού θα εκροφήσει, και η πίεση στην κλίνη θα αυξηθεί έως την τιμή της πίεσης συμπύκνωσης P_c . Ομοίως για την κλίνη B η θερμοκρασίας μειώνεται, έτσι ώστε ένα τμήμα του προσροφητικού να προσροφά το ψυκτικό, και η πίεση του κρεβατιού μειώνεται σε P_e .

2. Η ισοβαρής διαδικασία εκρόφησης της κλίνης A, και η ισοβαρής διαδικασία προσρόφησης της κλίνης B. Όταν η πίεση της κλίνης A και B φτάνει σε τιμές P_c και P_e , αντίστοιχα, ανοίγει η βαλβίδα μεταξύ της κλίνης A και του συμπυκνωτή, καθώς και επίσης ανοίγει τη βαλβίδα μεταξύ της κλίνη B και του αποστακτήρα. Επειδή το θερμικό κύμα θα πάει προς τα εμπρός και κάθε μέρος της βαθμίδας A θα θερμαίνεται στη θερμοκρασία του T_h , η οποία είναι έτοιμη για την ισοβαρή εκρόφηση. Ομοίως, κάθε τμήμα της κλίνης B θα ψύχεται σε T_L , η οποία είναι έτοιμη για ισοβαρή προσρόφηση. Όταν τα θερμικά κύματα μέσα στις βαθμίδες A και B κινούνται στο δεξί άκρο των δύο προσροφητών, η εκρόφηση στην κλίνη A θα ολοκληρωθεί, και η προσρόφηση στην κλίνη B θα είναι επίσης πλήρης.

Όταν οι δύο παραπάνω διαδικασίες ολοκληρωθούν, η βαθμίδα A φθάνει στο αρχικό στάδιο της βαθμίδας B, και το η βαθμίδα B φθάνει στην αρχική κατάσταση εκκίνησης της βαθμίδας A. Στη συνέχεια, η διεύθυνση ροής του ρευστού θα είναι ενεργοποιημένη σε αντίθετη κατεύθυνση, και κατά συνέπεια θα αντιστραφούν οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στις δύο βαθμίδες του συστήματος.

3.3.1 Υπολογισμός απόδοσης ενός κύκλου θερμικού κύματος (thermal wave cycle)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.1.1, σε έναν κύκλο θερμικού κύματος η θερμάστρα με την προσροφητική βαθμίδα A, τον ψύκτη και την προσροφητική βαθμίδα B συνδέονται σε σειρά και απ' ευθείας. Η κλίση θερμοκρασίας του ρευστού διαμορφώνεται από τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των τεσσάρων αυτών στοιχείων. Το σχήμα 6 παρουσιάζει την ιδανική μεταβολή της θερμοκρασίας. Για τον ιδανικό κύκλο η θερμοκρασία εξόδου της κλίνης A είναι χαμηλή ενώ η θερμοκρασία εξόδου της κλίνης B είναι υψηλή, και από μια τέτοια σχέση το ρευστό που απελευθερώνεται από την βαθμίδα A μπορεί να απορροφήσει τη θερμότητα στη βαθμίδα B αποτελεσματικά πριν να ρεύσει πίσω στη θερμάστρα, η οποία θα μειώσει τη θερμότητα που παρέχεται από την εξωτερική πηγή θερμότητας.



Σχήμα 3.3.1.1. Η κατανομή της θερμοκρασίας και η διαδικασία μεταφοράς της θερμότητας σε έναν ιδανικό κύκλο θερμικού κύματος [13-20]

Στον κύκλο θερμικού κύματος μεταφέρεται ενέργεια μεταξύ των δύο βαθμίδων από προς τα εμπρός και αντίστροφα της ροής του κυκλώματος του ρευστού. Το ρευστό απορροφά θερμότητα Q_d στο θερμαντήρα, απελευθερώνει θερμότητα Q_c προς το περιβάλλον στον ψύκτη, και ο εκροφημένος ατμός του ψυκτικού μέσου από την υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης βαθμίδα A συμπυκνώνεται και απελευθερώνει τη θερμότητα συμπύκνωσης Q_{cond} . Η βαθμίδα B προσροφά τον ατμό που παρέχεται από την εξάτμιση στο εσωτερικό του αποστακτήρα, το οποίο παρέχει τη ψυκτική ικανότητα Q_{ref} . Το βασικό σημείο του κύκλου θερμικού κύματος είναι ότι το ρευστό μεταφέρει θερμότητα μεταξύ των βαθμίδων A και B, ανακυκλώνει την αισθητή θερμότητα και τη θερμότητα προσρόφησης της βαθμίδας B όσο το δυνατόν περισσότερο για να βελτιωθεί ο ρυθμός ανάκτησης θερμότητας.

Εάν η διαδικασία θέρμανσης για τις δυο βαθμίδες τείνει να είναι μια ιδανική διαδικασία, η θερμοκρασία θα αυξηθεί, και η θερμοκρασία στην έξοδο της βαθμίδας θα είναι υψηλή. Στην περίπτωση αυτή, μια σημαντική ποσότητα θερμότητας θα χαθεί στο το ψυγείο, προφανώς αυτό είναι κακό για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Έτσι, ο κύκλος πρέπει να σταματήσει όταν η θερμοδυναμική τελειότητα φθάσει σε μία ορισμένη τιμή, και γενικά

Θερμοδυναμική τελειότητα λαμβάνεται ως 80-85%. Εδώ οι ιδανικές θερμοδυναμικές καταστάσεις συνίστανται στην αδιάστατη μέση θερμοκρασία ολόκληρης της βαθμίδας.

Ο COP του συστήματος προσρόφησης ψύξης (COP_{ref}) και το σύστημα αντλίας θερμότητας (COP_{hp}) μπορεί να υπολογιστεί από:

$$COP_{hp} = \frac{Q_c + Q_{cond}}{Q_d}$$

$$COP_{ref} = \frac{Q_{ref}}{Q_d}$$

Η ενεργειακή πυκνότητα που αντιστοιχεί στον χρόνο του κύκλου του συστήματος είναι:

Heat pump :

$$SHP = \frac{Q_c + Q_{cond}}{t_c \cdot M_a}$$

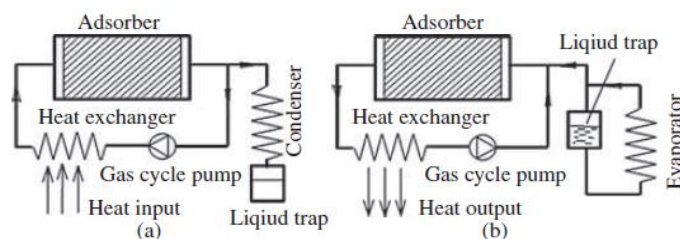
Refrigeration:

$$SCP = \frac{Q_{ref}}{t_c \cdot M_a}$$

Όπου t_c , M_a ο χρόνος του κύκλου και η μάζα του προσροφητικού.

3.4. Κύκλος συναγωγής θερμικού κύματος

Στο παρακάτω σχήμα περιγράφεται ο κύκλος συναγωγής θερμικού κύματος. Συγκεκριμένα στο σχήμα α ο εναλλάκτης θερμότητας λαμβάνει το ψυκτικό αέριο και το θερμαίνει σε ορισμένη θερμοκρασία και έπειτα εισέρχεται στην βαθμίδα του προσροφητή. Στην κλίση του προσροφητή διεξάγεται η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, μεταξύ του ψυκτικού αερίου και του στερεού προσροφητικού μέσου [21-25].



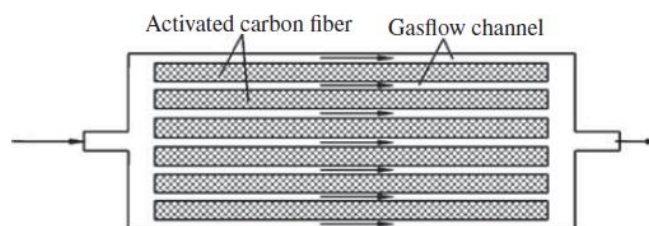
Σχήμα 3.4.1. Εξαναγκασμένος κύκλος θερμικού κύματος. α) Διαδικασία εκρόφησης και β) διαδικασία προσρόφησης [22]

Η θερμότητα που απελευθερώνει το ψυκτικό αέριο παρέχεται ως θερμότητα εκρόφησης για το προσροφητικό μέσο. Το εκροφημένο αέριο μαζί με το αέριο που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας ρέουν έξω από την προσροφητική βαθμίδα. Η θερμοκρασία για το αέριο που ρέει εκτός της προσροφητικής κλίνης μειώνεται. Το μέρος του αερίου αποστέλλεται στον εναλλάκτη θερμότητας από την αντλία αερίου και θερμαίνεται εκεί, τότε το αέριο θα εισρεύσει στην βαθμίδα του προσροφητή για την παροχή της θερμότητας εκρόφησης για το προσροφητικό και πάλι. Το άλλο μέρος του αερίου πηγαίνει στο συμπυκνωτή και συμπυκνώνεται σε υγρό που ρέει μέσα στο συσκευή συλλογής υγρού. Μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών θέρμανσης και εκρόφησης, αλλάζει η λειτουργία του συστήματος σε διαδικασία προσρόφησης, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 3.4.1 β. Η αντλία αερίου, τώρα, μεταφέρει το αέριο σε αντίθετη κατεύθυνση, με αυτόν τον τρόπο αέριο χαμηλής θερμοκρασίας εισάγεται στην κλίση του προσροφητή και ξεκινάει η διαδικασία της προσρόφησης. Η θερμότητα προσρόφησης απελευθερώνεται από το προσροφητικό κατά τη διαδικασία προσρόφησης του ψυκτικού αερίου. Η μείωση της μάζα του αερίου στην έξοδο της βαθμίδας αντισταθμίζεται από το εξατμισμένο αέριο που προέρχεται από τον απαεριωτή. Το αέριο κατά την έξοδο του από την προσροφητική κλίση ψύχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας και αποστέλλεται στη βαθμίδα του προσροφητή από την αντλία αερίου. Είτε κατά τη διαδικασία της θέρμανσης ή τη διαδικασία της ψύξης, η απότομη κλίση της θερμοκρασίας εμφανίζεται κατά μήκος της κατεύθυνσης της ροής του αερίου στην κλίση. Με τον χρόνο, η κλίση της θερμοκρασίας (θερμοκρασιακό κύμα) κινείται κατά μήκος της κατεύθυνσης της ροής του αερίου. Η κυματομορφή της θερμοκρασίας και οι τάσεις εξαρτώνται από την ταχύτητα ροής του αερίου, από της ιδιότητες ροής του αερίου, από τον συντελεστή συναγωγής της θερμότητας και από την ικανότητα θέρμανσης της βαθμίδας του προσροφητή.

Όταν οι δύο βαθμίδες λειτουργούν μαζί, η θερμότητα που εκλύεται από τον εναλλάκτη θερμότητας στην διαδικασία προσρόφησης χρησιμοποιείται για να θερμάνει το αέριο το οποίο ρέει έξω από την βαθμίδα προσροφητή στην

διαδικασία της εκρόφησης για ανάκτηση θερμότητας. Προκειμένου να ληφθεί η υψηλότερη απόδοση ανάκτησης θερμότητας, είναι απαραίτητο για τον έλεγχο της λειτουργίας των δύο βαθμίδων να ταιριάζει η διαδικασία εκρόφησης και με τη διαδικασία προσρόφησης.

Για να περιγράψουμε αναλυτικότερα το φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας εκ συναγωγής σε μια βαθμίδα του προσροφητή θα χρησιμοποιήσουμε ως ζεύγος εργασίας ενεργοποιημένο άνθρακα με αμμωνία. Στο σχήμα 3.4.2 φυλλοειδείς ίνες ενεργοποιημένου άνθρακα γεμίζουν την βαθμίδα του προσροφητή κατά μήκος της αξονικής κατεύθυνσης της βαθμίδας, η οποία αφήνει ένα σημαντικό πέρασμα για τη ροή του αερίου μεταξύ των στρωμάτων του ενεργοποιημένου ανθρακονήματος. Σε αυτό το πέρασμα λαμβάνει χώρα η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή η οποία συντελείται μεταξύ της ροής αερίου αμμωνίας μέσω του καναλιού και του ενεργοποιημένου ανθρακονήματος στο κανάλι και στις δύο πλευρές.



Σχήμα 3.4. 2. Η δομή μιας βαθμίδας ενεργοποιημένου άνθρακα σε έναν εξαναγκασμένο κύκλο θερμικού κύματος [21-25].

Η θερμότητα που μεταφέρεται από τη ροή του ρευστού στην προσροφητική βαθμίδα κατά τη διαδικασία της θέρμανσης είναι:

$$Q_h = \int_0^{t_c/2} \dot{m}_{in} (h_{in} - h_{out}) dt$$

Όπου t_c είναι ο χρόνος του συνολικού κύκλου, h είναι η ειδική ενθαλπία της ροής του αερίου. Η ενέργεια που απελευθερώνεται στο αέριο που ρέει από την κλίνη του προσροφητή κατά τη διαδικασία της ψύξης είναι:

$$Q_c = \int_0^{t_c/2} \dot{m}_{in} (h_{out} - h_{in}) dt$$

Η θερμότητα που απελευθερώνεται στον συμπυκνωτή σε μια διαδικασία ψύξης είναι:

$$Q_{cond} = \int_0^{t_c/2} (\dot{m}_{out} - \dot{m}_{in}) \cdot [h_{out} - h_L(T_{cond})] dt$$

Όπου h_L είναι η ειδική ενθαλπία του υγρού της αμμωνίας στη θερμοκρασία συμπύκνωσης.

Η παραγόμενη ψυκτική ισχύς από τον αποστακτήρα σε μια διαδικασία ψύξης είναι:

$$Q_{cond} = \int_0^{t_c/2} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \cdot h_L(T_{evp}) dt$$

Ο συντελεστής απόδοσης της ψύξης είναι:

$$COP_{ref} = \frac{Q_{ref}}{Q_h - Q_{reg}}$$

Η απόδοση της αντλίας θερμότητας είναι:

$$COP_H = \frac{Q_c - Q_{reg} + Q_{cond}}{Q_h - Q_{reg}}$$

Και τέλος η πυκνότητα ενέργειας :

$$SHP = \frac{Q_{cond} + Q_c - Q_{reg}}{\tau \cdot M_\alpha}$$

$$SCP = \frac{Q_{ref}}{\tau \cdot M_\alpha}$$

Όπου \dot{m}_{in} και \dot{m}_{out} είναι οι παροχές μάζας του εισαγόμενου και του εξαγόμενου αερίου, για θέρμανση η ψύξη της προσροφητικής βαθμίδας.

Q_{reg} είναι θερμότητα που ανακτάται ενώ τ και M_α είναι ο χρόνος θέρμανσης-ψύξης και η μάζα του προσροφητικού μέσου αντίστοιχα.

Πίνακας 3.4.1 : Παράμετροι λειτουργίας ενός κύκλου συναγωγής θερμικού κύματος

Παράμετροι	Τιμή
Θερμοκρασία της ροή αερίου για θέρμανση	165 °C
Θερμοκρασία εξάτμισης	-8 °C
Θερμότητα από θέρμανση της βαθμίδας	494.97 kJ
Θερμότητα αποβολής από συμπυκνωτή	271.73 kJ
Θερμότητα από ανάκτηση	192.904 kJ
Χρόνος για ψύξη και θέρμανση	330 s
Συντελεστής απόδοσης της ψύξης COP_{ref}	0.7872
Πυκνότητα ενέργειας του συστήματος ψύξης SCP	760 W/kg
Θερμοκρασία της ροή αερίου για ψύξη	40 °C
Θερμοκρασία συμπύκνωσης	35 °C
Θερμότητα από ψύξη της βαθμίδας	470.93 kJ

Θερμότητα προσρόφησης από εξατμιστήρα	251.60 kJ
Ποσοστό ανάκτησης της θερμότητας	40 %
Συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας COP _{hp}	1.78
Πυκνότητα ενέργειας της αντλίας θερμότητας SHP	1616 W/kg

3.5. Κύκλος cascade

Στον κύκλο cascade συναντάμε διαφορετικά ζεύγη εργασίας σε διαφορετικό εύρος θερμοκρασίας. Χρειάζονται δύο η περισσότερα ζεύγη εργασίας. Το χαρακτηριστικό που συνιστά έναν τέτοιο κύκλο είναι ότι η θερμότητα μεταφέρεται από το προσροφητικό μέσο με το υψηλότερο ισοζύγιο θερμοκρασίας προσρόφησης/εκρόφησης στο προσροφητικό μέσο με το χαμηλότερο ισοζύγιο θερμοκρασίας προσρόφησης/εκρόφησης. Ο επιμέρους κύκλος του υψηλής θερμοκρασίας προσροφητικού μέσου οδηγείται από υψηλής θερμοκρασίας πηγής θερμότητας και αυτός του χαμηλής θερμοκρασίας προσροφητικού μέσου οδηγείται από χαμηλής θερμοκρασίας πηγής θερμότητας. Ως προσροφητικά μέσα , για παράδειγμα, θα πάρουμε τα ζεύγη εργασίας ενεργοποιημένος άνθρακας- μεθανόλη και ζεόλιθος – νερό [26,27].

A) Κύκλος cascade ,διπλής επίδρασης ψύξης με προσρόφηση, σε δύο στάδια (εκμετάλλευση θερμότητας προσρόφησης)

Ο κύκλος cascade , διπλής επίδρασης ψύξης με προσρόφηση, σε δύο στάδια (χρήση της θερμότητας προσρόφησης) φαίνεται στο σχήμα 3.5.1, όπου ως προσροφητικό μέσο χρησιμοποιείται ο ζεόλιθος με νερό, για την ανάκτηση της υψηλής θερμοκρασίας/ μέσης θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας (250 °C έως 100 °C), και ο ενεργοποιημένος άνθρακας με μεθανόλη για την ανάκτηση της μεσαίας θερμοκρασίας / χαμηλής θερμοκρασίας πηγής θερμότητας (100 °C έως 35 °C). Για την βαθμίδα του προσροφητή χαμηλής θερμοκρασίας η θερμότητα οδήγησης παρέχεται εξ ολοκλήρου από την αισθητή θερμότητα και από τη θερμότητα προσρόφησης ψύχωντας τη βαθμίδα του προσροφητή υψηλής θερμοκρασίας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.1β, όταν η προσροφητική βαθμίδα του ζεόλιθου θερμανθεί από την εξωτερική πηγή θερμότητας, η βαθμίδα του ενεργοποιημένου άνθρακα είναι σε κατάσταση ψύξης από εξωτερική πηγή ψύξης , και η προσρόφηση του ενεργού άνθρακα παράγει ψύξη στην έξοδο.

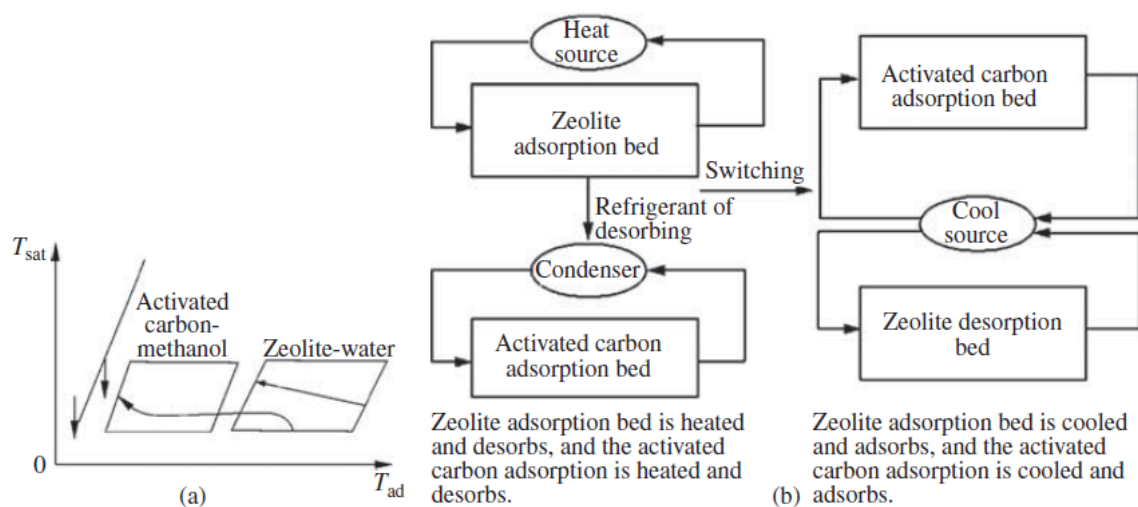
Όταν η διαδικασία εκρόφησης ολοκληρωθεί μέσα στην προσροφητική βαθμίδα του ζεόλιθου, η βαθμίδα του προσροφητή ψύχεται για την διαδικασία προσρόφησης, και σε αυτή τη διαδικασία η βαθμίδα του ζεόλιθου απελευθερώνει θερμότητα στην βαθμίδα του ενεργού άνθρακα, το οποίο παρέχει τη θερμότητα για τη διαδικασία εκρόφησης της βαθμίδας του ενεργοποιημένου άνθρακα. Κατά τη διαδικασία ψύξης της βαθμίδας του ζεόλιθου πρέπει να ελέγχεται τη θερμοκρασία εξόδου της κλίνης σε 100 °C, και στη συνέχεια επιτρέπεται η διέλευση του νερού εξόδου της βαθμίδας του ζεόλιθου στην βαθμίδα του ενεργοποιημένου άνθρακα. Σε αυτόν τον κύκλο η διπλής επίδρασης αξιοποίηση της θερμότητας περιλαμβάνει τη θερμότητα από την εξωτερική πηγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας (το πρώτο αποτέλεσμα αξιοποίησης της θερμότητας) και τη θερμότητα από την διαδικασία ψύξης για την υψηλής θερμοκρασίας βαθμίδα του προσροφητή (αισθητή θερμότητα και θερμότητα προσρόφησης) η οποία χρησιμοποιείται για την οδήγηση της κλίνης του προσροφητή χαμηλής θερμοκρασίας (το δεύτερο αποτέλεσμα αξιοποίησης της θερμότητας).

Στο σχήμα 3.5.1, ο κύκλος cascade δύο σταδίων θα μπορούσε να συνδυαστεί με τις διαδικασίες ανάκτησης θερμότητας και μάζας. Στον κύκλο των δύο τύπων μέσων προσρόφησης, δηλαδή, υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλής θερμοκρασίας προσροφητικά μέσα υιοθετούνται, και κατά το χρόνο αλλαγής, οι διαδικασίες ανάκτησης θερμότητας και ανάκτησης μάζας προχωρούν μεταξύ των δύο προσροφητικών βαθμίδων υψηλής θερμοκρασίας και των δύο χαμηλής θερμοκρασίας προσροφητικών βαθμίδων, αντίστοιχα. Μετά την ανάκτηση θερμότητας οι διεργασίες θέρμανσης και ψύξης θα λειτουργούν όπως φαίνεται στην Εικόνα 1β.

Ο συνολικός συντελεστής απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος δίνεται:

$$COP = COP_Z + COP_{AC}$$

Όπου Z απευθύνεται στη βαθμίδα του ζεόλιθου και AC στη βαθμίδα του ενεργοποιημένου άνθρακα.



Σχήμα 3.5.1. κύκλος προσρόφησης cascade , διπλής επίδρασης δύο σταδίων (εκμετάλλευση θερμότητας προσρόφησης). (α) Το διάγραμμα της θερμοκρασίας για τον κύκλο. (β) διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης των προσροφητικών βαθμίδων .[26-27]

B) Κύκλος cascade ,διπλής επίδρασης, ψύξης με προσρόφηση, σε δύο στάδια (εκμετάλλευση θερμότητας συμπύκνωσης)

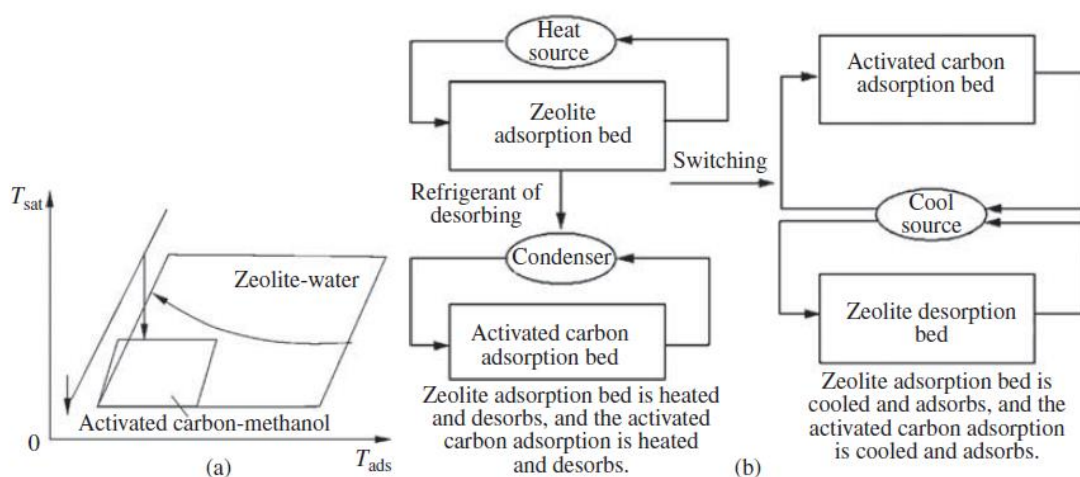
Στο παρακάτω σχήμα 3.5.2 παρουσιάζεται η βασική αρχή και το διάγραμμα ροής ενός κύκλου cascade διπλής επίδρασης , δύο σταδίων (εκμετάλλευση θερμότητας συμπύκνωσης) . Σε αυτό τον κύκλο, το ζεύγος εργασίας του ζεόλιθου με νερό λειτουργεί σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 250 °C έως 35 °C, και ο ενεργοποιημένος άνθρακας με μεθανόλη λειτουργεί σε μέσες και χαμηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 100 °C έως 35 °C. Η θερμότητα συμπύκνωσης του υγρού που εκροφάται από την βαθμίδα του προσροφητή υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για τον προσροφητή χαμηλής θερμοκρασίας. Το σχήμα 3.5.2 β μας δείχνει ότι ο ζεόλιθος θερμαίνεται από εξωτερική πηγή θερμότητας, στο ξεκίνημα της διαδικασίας. Σε αυτή τη διαδικασία το ψυκτικό που αποβάλλεται από την υψηλής θερμοκρασίας βαθμίδας θα είναι επίσης ρευστό υψηλής θερμοκρασίας και θα συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή. Με τον έλεγχο της ισορροπίας της θερμότητας συμπύκνωσης και την εξωτερική ψυχρή πηγή για το συμπυκνωτή, η θερμοκρασία για την έξοδο του συμπυκνωτή μπορεί να ρυθμίζεται σε μια τιμή κοντά στους 100 °C. Αυτή η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διαδικασία θέρμανσης και εκρόφησης της βαθμίδας του προσροφητή του ενεργοποιημένου άνθρακα. Όταν οι διαδικασίες θέρμανσης και εκρόφησης για τις βαθμίδες του ζεόλιθου και του ενεργοποιημένου άνθρακα ολοκληρωθούν η εξωτερική πηγή ψύξης θα χρησιμοποιηθεί για να ψύξει τις βαθμίδες του

ζεόλιθου και του ενεργοποιημένου άνθρακα έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία ψύξης με προσρόφηση του συστήματος. Η λειτουργία ολόκληρου του συστήματος χρειάζεται θερμότητα εισόδου που πρέπει να παρέχεται από μία εξωτερική πηγή θερμότητας (το πρώτο αποτέλεσμα) και την εσωτερική θερμότητα συμπύκνωσης του ατμού (το δεύτερο αποτέλεσμα).

Ο κύκλος cascade διπλής επίδρασης, δύο σταδίων θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για δύο προσροφητικές βαθμίδες ζεόλιθου και δύο προσφρητικές βαθμίδες ενεργοποιημένου άνθρακα, προκειμένου να επιτευχθούν οι διεργασίες ανάκτησης θερμότητας και μάζας μεταξύ των δύο προσροφητικών βαθμίδων.

Στο σχήμα 3.5.2, ας υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία εξάτμισης του συστήματος είναι T_e , η θερμοκρασία συμπύκνωσης είναι T_c , και η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας είναι T_h , τότε η COP του συστήματος δίνεται:

$$COP = COP_Z + COP_Z \times COP_{AC}$$



Σχήμα 3.5.2. κύκλος προσρόφησης cascade, διπλής επίδρασης δύο σταδίων (εκμετάλλευση θερμοκρασίας συμπύκνωσης). (α) Το διάγραμμα της θερμοκρασίας για τον κύκλο. (β) διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης των προσροφητικών βαθμίδων. [26-27]

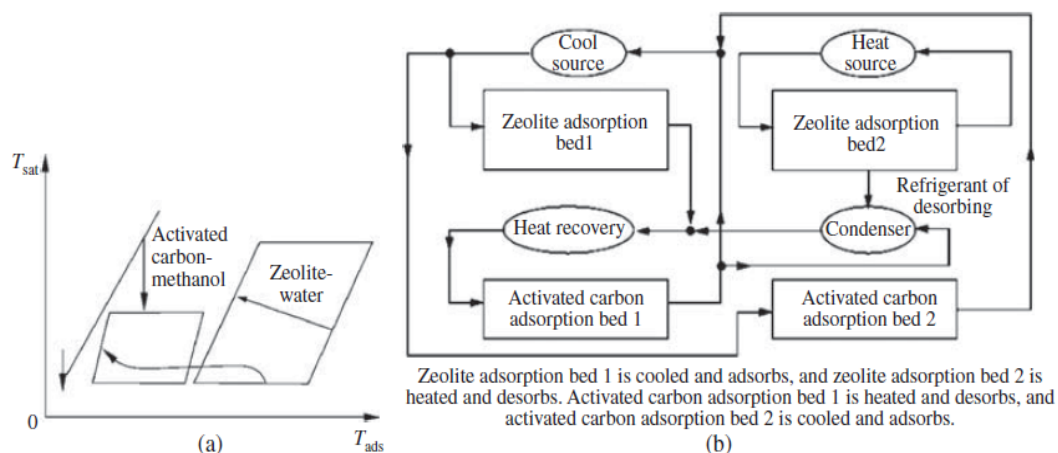
Γ) Κύκλος cascade, τριπλής επίδρασης, ψύξης με προσρόφηση, σε δύο στάδια

Το παρακάτω σχήμα 3.5.3 μας δείχνει τη διαγραμματική απεικόνιση και τη λειτουργία ενός κύκλου cascade, τριπλής επίδρασης, ψύξης με προσρόφηση σε δύο στάδια. Σε αυτόν τον κύκλο το ένα εργαζόμενο μέσο είναι ο ζεόλιθος με νερό και λειτουργεί σε υψηλές και μεσαίες θερμοκρασίες με εύρος 250 °C έως 100 °C, και το άλλο είναι ο ενεργοποιημένος άνθρακας με μεθανόλη σε μεσαίες και χαμηλές θερμοκρασιακές περιοχές της τάξεως 100 °C έως 35 °C. Για να

θεωρηθεί ο κύκλος cascade τριπλής επίδρασης απαιτούνται τέσσερις η περισσότερες προσροφητικές βαθμίδες. Ένα τέτοιο σύστημα τεσσάρων βαθμίδων με τις διαδικασίες λειτουργίας του φαίνεται στην εικόνα. Όταν η πρώτη προσροφητική βαθμίδα του ζεόλιθου βρίσκεται σε κατάσταση ψύξης και προσρόφησης και η δεύτερη προσροφητική βαθμίδα βρίσκεται σε κατάσταση θέρμανσης και εκρόφησης. Υπάρχει ένας «ανακτητής» θερμότητας ο οποίος ανακτά την αισθητή θερμότητα και την θερμότητα προσρόφησης της πρώτης προσροφητικής βαθμίδας του ζεόλιθου και την θερμότητα συμπίκνωσης της δεύτερης προσροφητικής βαθμίδας του ζεόλιθου στον συμπυκνωτή, με την οποία ο ανακτητής θα θερμάνει την πρώτη βαθμίδα του ενεργοποιημένου άνθρακα. Στο σημείο εκείνο η δεύτερη προσροφητική βαθμίδα του ενεργοποιημένου άνθρακα ψύχεται από την πηγή ψύξης. Επίσης παράγεται ψυκτική ικανότητα από τη διαδικασία προσρόφησης που επιτελείται στην πρώτη προσροφητική βαθμίδα του ζεόλιθου και στη δεύτερη βαθμίδα του ενεργοποιημένου άνθρακα. Όταν οι παραπάνω καταστάσεις λειτουργίας ολοκληρωθούν ο κύκλος αλλάζει κατάσταση. Η πρώτη προσροφητική βαθμίδα του ζεόλιθου θερμαίνεται για τη διαδικασία της εκρόφησης, η δεύτερη προσροφητική βαθμίδα του ζεόλιθου ψύχεται για τη διαδικασία της προσρόφησης, η πρώτη βαθμίδα του ενεργοποιημένου άνθρακα ψύχεται για τη διαδικασία της προσρόφησης και η δεύτερη προσροφητική βαθμίδα του ενεργοποιημένου άνθρακα θερμαίνεται για τη διαδικασία της εκρόφησης. Στη συνέχεια του κύκλου η πηγή θερμότητας που θα χρειαστεί για την δεύτερη προσροφητική βαθμίδα του ενεργοποιημένου άνθρακα παρέχεται από τη θερμότητα συμπίκνωσης της πρώτης βαθμίδας του ζεόλιθου, την αισθητή θερμότητα της δεύτερης προσροφητικής βαθμίδας του ζεόλιθου και τη θερμότητα προσρόφησης της ίδιας βαθμίδας. Έτσι για την τριπλή επίδραση στον θερμοδυναμικό κύκλο, η λειτουργία του όλου συστήματος απαιτεί μια εξωτερική πηγή θερμότητας (πρώτη επίδραση), την εξωτερική αισθητή και προσρόφησης θερμότητα από τις βαθμίδες του ζεόλιθου (δεύτερη επίδραση) και την εσωτερική θερμότητα συμπίκνωσης ατμού (Τρίτη επίδραση).

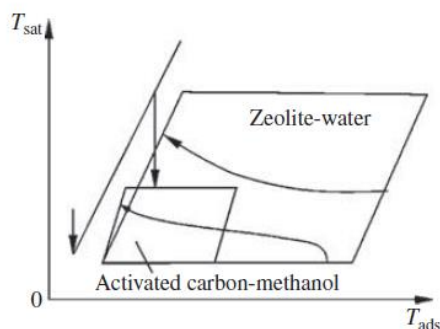
Κάνοντας την παραδοχή ότι ο κύκλος cascade των δύο σταδίων έχει την ίδια θερμοκρασία εξάτμισης, ο συντελεστής απόδοσης του κύκλου της τριπλής επίδρασης δίνεται :

$$COP = COP_Z + (1 + COP_Z)COP_{AC}$$



Σχήμα 3.5.3. κύκλος προσρόφησης cascade , τριπλής επίδρασης δύο σταδίων. (α) Το διάγραμμα της θερμοκρασίας για τον κύκλο. (β) διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης των προσροφητικών βαθμίδων .[26-27]

Σε έναν τέτοιο κύκλο ψύξης με προσρόφηση, δύο σταδίων και τριπλής επίδρασης, υπάρχει η πιθανότητα να δημιουργηθεί μια ακόμα κατάσταση που αφορά στην ατελή εκμετάλλευση της θερμότητας . Για μία τέτοια κατάσταση η σχηματική αναπαράσταση της θερμοκρασίας του κύκλου φαίνεται στο σχήμα 3.5.4. Η πηγή θερμότητας για την προσροφητική βαθμίδα χαμηλής θερμοκρασίας παρέχεται από τη θερμότητα συμπύκνωσης του εκροφημένου ψυκτικού από την υψηλής θερμοκρασίας κλίσης του προσροφητή, την αισθητής θερμότητας για την ψύξη της βαθμίδας και τη θερμότητα προσρόφησης. Η διαφορά έγκειται κυρίως για την περιοχή της θερμοκρασίας λειτουργίας για την υψηλής θερμοκρασίας προσροφητικής βαθμίδας. Η υψηλής θερμοκρασίας προσροφητικής βαθμίδας σε ένα κύκλο cascade δύο σταδίων τριπλής επίδρασης ψύξης με προσρόφησης λειτουργεί σε θερμοκρασιακή περιοχή με άκρα 250 °C και 35 °C . Στην περίπτωση αυτή, η χρησιμοποίηση της αισθητής θερμότητας και της θερμότητα προσρόφησης για την ψύξη της προσροφητικής βαθμίδας υψηλής θερμοκρασίας περιορίζεται από την περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας της προσροφητικής βαθμίδας, έτσι ώστε η εκμετάλλευση της θερμότητας της χαμηλής θερμοκρασίας της βαθμίδας δεν μπορεί να ταιριάζει τελείως με τη θερμότητα που απελευθερώνεται από την βαθμίδα υψηλής θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.5. 4. κύκλος προσρόφησης cascade , δύο σταδίων, τριπλής επίδρασης. (ατελής εκμετάλλευση θερμότητας) [26-27]

Στον κύκλο cascade αυτόν οι μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι διαδικασίες ανάκτησης θερμότητας και μάζας τόσο για την υψηλής θερμοκρασίας προσροφητικής βαθμίδας όσο και για την χαμηλής θερμοκρασίας βαθμίδα , με σκοπό να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος.

Δ) Υπολογισμός απόδοσης κύκλου cascade τριπλής επίδρασης, ανάλυση διαδικασίας λειτουργίας.

Το αναλυτικό διάγραμμα που αφορά στο σχεδιασμό ενός κύκλου cascade τεσσάρων βαθμίδων τριπλής επίδρασης φαίνεται στο σχήμα 5.

- 1 : συμπυκνωτής
- 2 : απαεριωτής
- A,B: Βαθμίδες υψηλής θερμοκρασίας (ζεόλιθος-νερό)
- C,D: Βαθμίδες χαμηλής θερμοκρασίας (πυρίτιο- νερό)
- 3 : Θερμαντήρας
- 4 : ψυγείο

Η διαδικασία της εκρόφησης στις βαθμίδες A και B απαιτεί την εξωτερική πηγή θερμότητας. Ο υψηλής θερμοκρασίας εκροφημένος ατμός από τις βαθμίδες A και B , η αισθητή θερμότητα και η θερμότητα προσρόφησης των βαθμίδων A και B συμβάλλουν στην θέρμανση των βαθμίδων C και D.

Οι διαδικασίες λειτουργίας αναλύονται παρακάτω :

α. Διαδικασίες αναγέννησης μεταξύ των βαθμίδων A και B όπως επίσης και των βαθμίδων C και D. Όταν οι διαδικασίες προσρόφησης και εκρόφησης των προσροφητών A -C και B- D φτάσουν εις πέρας τότε με τη ρύθμιση των βαλβίδων ξεκινά η διαδικασία της αναγέννησης μεταξύ των βαθμίδων. Συμβολίζουμε με T_{reg1} , τη θερμοκρασία μετά την διαδικασία της αναγέννησης που συμβαίνει μεταξύ των βαθμίδων A και B και με T_{reg2} , τη θερμοκρασία μετά τη διαδικασία της αναγέννησης των βαθμίδων C και D.

β. Μεταφορά θερμότητας μεταξύ των βαθμίδων Β και C και διαδικασία θέρμανσης της βαθμίδας C από τον εκροφημένο ατμό από την βαθμίδα A. Όπως φαίνεται και στην εικόνα η διαδικασία της προσρόφησης c-1 της βαθμίδας είναι εξώθερμη διαδικασία.

Η εξώθερμη διαδικασία συμπεριλαμβάνει την αισθητή θερμότητα και τη θερμότητα προσρόφησης του προσροφητικού, η οποία και χρησιμοποιείται στη διαδικασία θέρμανσης της βαθμίδας C. Όταν η βαθμίδα A βρίσκεται σε διαδικασία εκρόφησης, ο εκροφημένος ατμός υψηλής θερμοκρασίας ρέει εντός της βαθμίδας C. Έπειτα ο ατμός θα αναμιχθεί με τον ατμό που προέρχεται από την εκρόφηση της βαθμίδας C και το μείγμα θα μεταβεί στον συμπυκνωτή, στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η διαδικασία της εκρόφησης στη βαθμίδα B. Η εξωτερική πηγή θερμότητας παρέχει θερμότητα για την διαδικασία της εκρόφησης d-3 της βαθμίδας A. Επίσης ολοκληρώνεται και η διαδικασία προσρόφησης της βαθμίδας D και θερμότητα απελευθερώνεται στο περιβάλλον.

Οι δυο διαδικασίες τις προσρόφησης και της εκρόφησης εκτελούνται ταυτόχρονα από τις δύο ομάδες προσροφητών. Για έχουμε ροή του ατμού από την προσροφητική βαθμίδα A προς την βαθμίδα C απαιτείται η πίεση εκρόφησης της βαθμίδας A να είναι υψηλότερη της πίεσης εκρόφησης της βαθμίδας C.

Αναλύοντας τον κύκλο cascade τριπλής επίδρασης, έχοντας ως πρώτο το στάδιο χαμηλής θερμοκρασίας και ως δεύτερο το στάδιο υψηλής θερμοκρασίας, έχουμε δύο συνεχόμενους κύκλους αναγέννησης. Το πρώτο στάδιο οδηγείται από την αισθητή θερμότητα και την θερμότητα προσρόφησης του δεύτερου σταδίου του κύκλου, έπειτα από ανάκτηση θερμότητας, καθώς και την θερμότητα συμπύκνωσης του ψυκτικού. Συμβολίζουμε με COP_1 και COP_2 το βαθμό απόδοσης του πρώτου σταδίου του κύκλου και του δεύτερου αντίστοιχα.

Είναι :

$$COP_1 = \frac{Q_{ref1}}{Q_{hg1} - Q_{reg1}} \quad (\alpha)$$

$$COP_2 = \frac{Q_{ref2}}{Q_{hg2} - Q_{reg2}} \quad (\beta)$$

Όπου Q_{ref} είναι η ψυκτική ικανότητα και Q_{hg} είναι η θερμότητα που προέρχεται από την πηγή θερμότητας.

Ο συντελεστής απόδοσης COP για έναν κύκλο cascade διπλής επίδρασης :

$$COP = \frac{Q_{ref}}{Q_{hg2} - Q_{reg2}} = \frac{Q_{ref2} + Q_{ref1}}{Q_{hg2} - Q_{reg2}} = COP_2 + COP_1 \frac{Q_{hg1} - Q_{reg1}}{Q_{hg2} - Q_{reg2}} \quad (\gamma)$$

Το ενεργειακό ισοζύγιο που δημιουργείται ανάμεσα στις υψηλής θερμοκρασίας προσροφητικές βαθμίδες είναι :

$$Q_{hg2} + Q_{ref2} = Q_{ad2} + Q_2 \quad (\delta),$$

όπου Q_2 είναι η εξώθερμη θερμότητα του ψυκτικού ατμού στο στάδιο υψηλής θερμοκρασίας και Q_{ad} είναι η θερμότητα που απελευθερώνεται στο περιβάλλον κατά τη διαδικασία της προσρόφησης.

Σε ιδανικές συνθήκες η θερμότητα από τον ατμό υψηλής θερμοκρασίας προσροφητικής βαθμίδας χρησιμοποιείται εξ' ολοκλήρου για την οδήγηση των χαμηλής θερμοκρασίας βαθμίδων.

$$Q_{hg1} - Q_{reg1} = (Q_{ad2} - Q_{reg2}) + Q_2 \quad (\epsilon)$$

Οι δύο τελευταίες εξισώσεις (δ) και (ε) όταν συνδυάζονται δίνουν την παρακάτω:

$$Q_{hg1} - Q_{reg1} = Q_{hg2} - Q_{reg2} + Q_{ref2} \quad (\zeta)$$

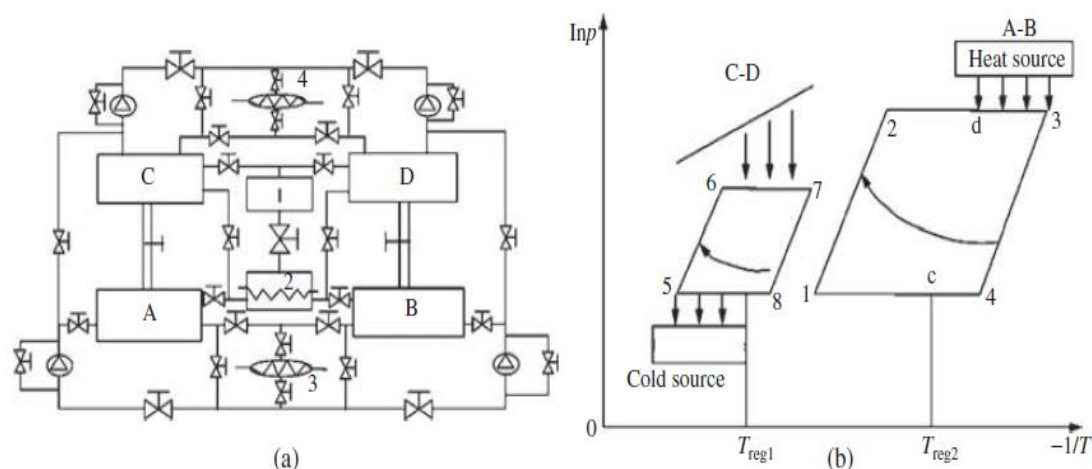
Ο συνδυασμός εξισώσεων (ζ) και (γ) θα μας δώσει :

$$COP = COP_2 + COP_1 \left(\frac{Q_{hg1} - Q_{reg1}}{Q_{hg2} - Q_{reg2}} \right) = COP_2 + COP_1 \frac{Q_{hg2} - Q_{reg2} + Q_{ref2}}{Q_{hg2} - Q_{reg2}} = COP_2 + COP_1(1 + COP_2) = COP_1 + COP_2 + COP_1 \cdot COP_2$$

Σε ένα κύκλο cascade κάτω από συνθήκες όπου η θερμοκρασία εξάτμισης είναι 5 °C, η θερμοκρασία συμπύκνωσης είναι 35 °C, ο βαθμός υπόψυξης είναι 5 °C και η πίεση συμπύκνωσης του δεύτερου σταδίου είναι η πίεση κορεσμού του νερού στους 50 °C. Αν επίσης σε αυτόν τον κύκλο χρησιμοποιείται ως εργαζόμενο μέσο ζεόλιθος με νερό, για το πρώτο στάδιο και σίλικα τζελ με νερό για το δεύτερο στάδιο, τότε για ένα κύκλο cascade διπλής επιδράσεως μπορούν να προσομοιωθούν τα αποτελέσματα της απόδοσης με χρήση υπολογιστή. Παίρνοντας μέγιστη θερμοκρασία θέρμανσης στους 200 °C και ενδιάμεση θερμοκρασία στους 100 °C, υπολογίζονται οι παρακάτω τιμές:

$$COP_1=0,65, COP_2=0,41, COP=1,2$$

Στην ιδανική περίπτωση που ο κύκλος ψύξης με προσρόφηση είναι τριπλής επιδράσεως, εάν ο βαθμός απόδοσης COP του υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας σταδίου είναι 0,6 τότε ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κύκλου cascade δύο σταδίων ξεπερνάει την τιμή 1,56.



Σχήμα 3.5.5. κύκλος προσρόφησης cascade τεσσάρων βαθμίδων διπλής/τριπλής επίδρασης. (α) σχεδιασμός συστήματος, (β) διάγραμμα Clapeyron. [26-27]

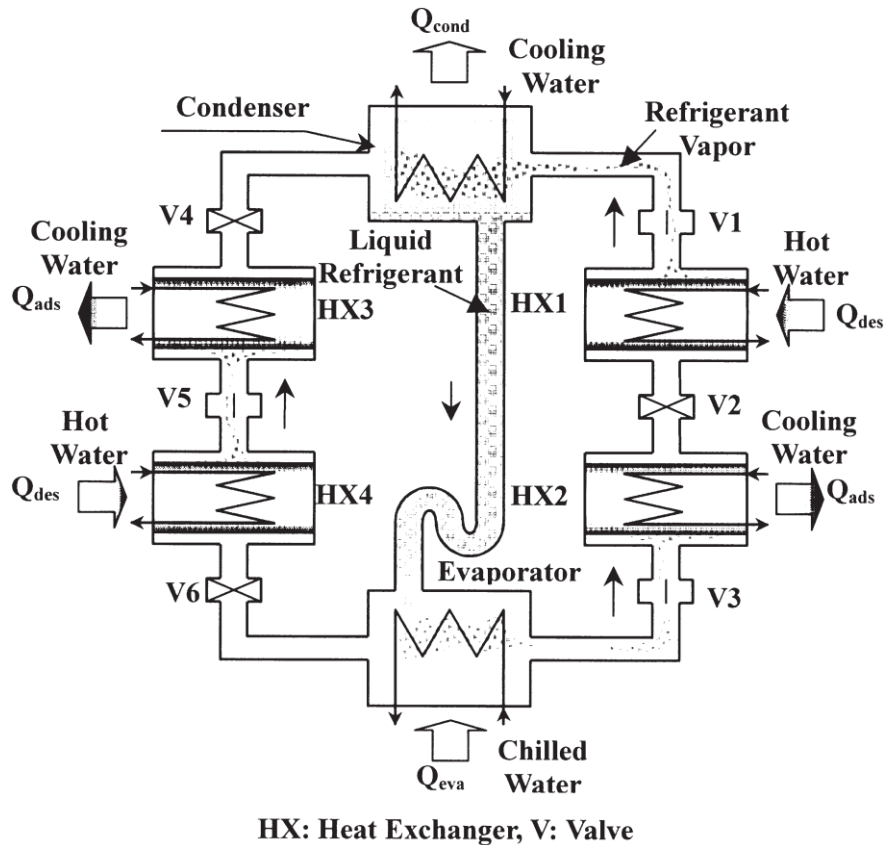
3.6. Προηγμένοι κύκλοι προσρόφησης

Προκειμένου να γίνει χρήση της χαμηλότερης θερμοκρασίας της αποβαλλόμενης θερμότητας, ιδιαίτερα κάτω από 80 °C, ορισμένοι προηγμένης μορφής κύκλοι, όπως ο κύκλος πολλαπλών βαθμίδων (multi-bed cycle), ο κύκλος πολλαπλών σταδίων (multi-stage cycle) και ο κύκλος διπλής λειτουργίας (dual-mode cycle) ,προτείνονται. Παρακάτω θα αναλύσουμε τέτοιους προηγμένους κύκλους.

3.6.1 Σύστημα δύο σταδίων

Ένας προηγμένος κύκλος δύο σταδίων, αποτελείται ουσιαστικά από έξι εναλλάκτες θερμότητας (σχήμα 3.6.1.1). Ένας ο συμπυκνωτής, ένας ο αποστακτήρας και τα δύο ζεύγη των στοιχείων προσρόφησης. Στον κύκλο αυτό, οι βαλβίδες 1, 3, 5 είναι ανοικτές για να επιτρέπουν τη ροή του ψυκτικού μέσου μεταξύ των εναλλακτών θερμότητας. Οι προσροφητές 1 και 4, που συμβολίζονται με HX1 και HX4, θερμαίνονται με θερμό νερό. Οι προσροφητές 2 και 3 που συμβολίζονται με HX2 και HX3 ψύχονται από το νερό ψύξης. Σε αυτόν τον κύκλο ψύξης το προσροφητικό μέσο που χρησιμοποιείται είναι το ζεύγος σίλικα τζελ- νερό. Τα σίλικα τζελ σε κάθε στοιχείο ρόφησης είναι στερεωμένα στο εσωτερικό του δοχείου, δηλ συσκευάζονται γύρω από τα πτερύγια στους σωλήνες μεταφοράς θερμότητας τα οποία δεν μπορούν να περιστραφούν ή να μετακινηθούν. Ως εκ τούτου, η αδιάλειπτη παροχή της ψυκτικής ενέργειας συνιστά ένα ψευδο-συνεχόμενο κύκλο, όπου η προσρόφηση και η εκρόφηση

συμβαίνουν ταυτόχρονα και οι προσροφητές εναλλάσσονται επανειλημμένα μεταξύ λειτουργίας προσρόφησης και εκρόφησης [28].



Σχήμα 3.6.1.1. Σχηματικό διάγραμμα ψυκτική προσρόφησης δύο σταδίων. [28]

Το ψυκτικό μέσο (νερό), εξατμίζεται μέσα στον απαεριωτή, μαζεύοντας θερμότητα εξατμίσεως από το παγωμένο νερό και απορροφάται από τον προσροφητή 2 μέσω της βαλβίδας 3. Το στοιχείο προσρόφησης 3 απορροφά το ψυκτικό από τον εκροφητή 4 μέσω της βαλβίδας 5. Η βαλβίδα 1 αποτελεί τη σύνδεση του εκροφητή 1 με τον συμπυκνωτή.

Ο εκροφημένος ψυκτικός ατμός συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή σε θερμοκρασία συμπύκνωσης T_{cond} ενώ το νερό ψύξης αφαιρεί τη θερμότητα συμπύκνωσης Q_{cond} . Έπειτα ο κύκλος συνεχίζεται με το συμπυκνωμένο ψυκτικό μέσο να επανέρχεται στον απαεριωτή μέσω του σωλήνα που συνδέει τον συμπυκνωτή και τον απαεριωτή. Ο σωλήνας κάμπτεται για να επιτευχθεί η κατάλληλη πτώση πίεσης με απώτερο σκοπό το ψυκτικό να καταλήξει σε υγρή φάση μέσα στον απαεριωτή. Η χρήση των παράλληλων κυκλωμάτων νερού ψύξης για τον συμπυκνωτή και τους προσροφητές 2 και 3 έχει ως αποτέλεσμα παρόμοια επίπεδα θερμοκρασίας στον συμπυκνωτή (T_{cond}) και στους προσροφητές (T_{ads}).

Όταν οι συγκεντρώσεις του ψυκτικού στους προσροφητές και στους εκροφητές είναι κοντά σε επίπεδο ισορροπίας, οι ροές του ζεστού και την ψύξη του νερού ανακατευθυνθούν με την αλλαγή των βαλβίδων έτσι ώστε οι εκροφητές να μετατρέπονται σε προσροφητές και οι προσροφητές σε εκροφητές.

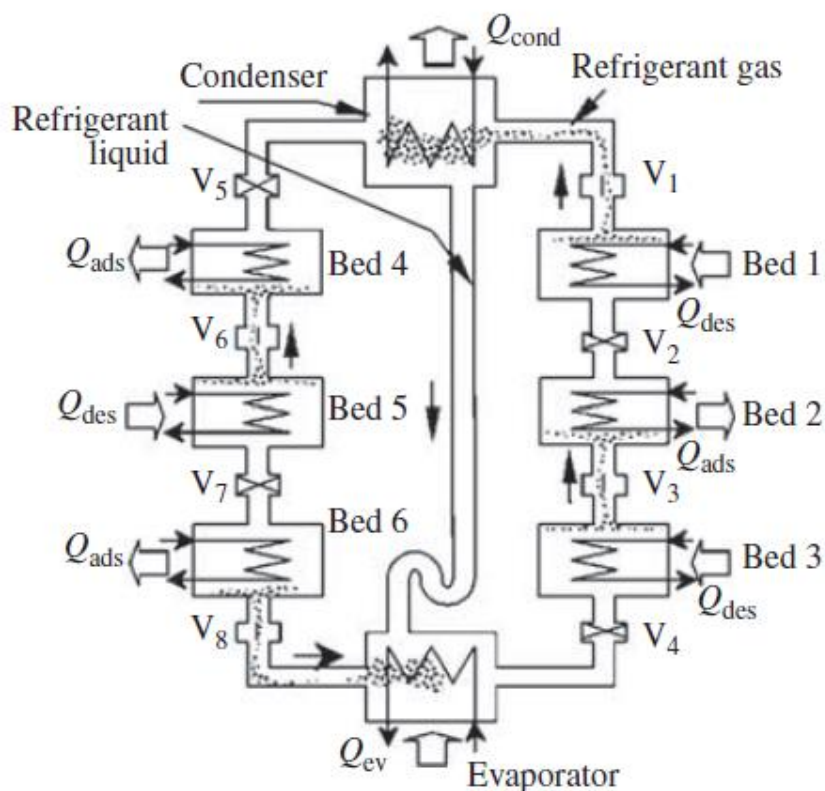
Ένα τέτοιο σύστημα ψύξης, δύο σταδίων με εργαζόμενο μέσο σίλικα τζελ με νερό, προσδίδει ψυκτική ικανότητα 1 RT (3.54 kW) και έχει συντελεστή απόδοσης COP ίσο με 0.34.

3.6.2 Σύστημα τριών σταδίων

Παρακάτω θα μελετήσουμε μια διαδικασία ψύξης με προσρόφηση, τριών σταδίων, χρησιμοποιώντας έξι προσροφητικές βαθμίδες (σχήμα 3.6.2.1). Η προσροφητική βαθμίδα 3 και η προσροφητική βαθμίδα 6 αποτελούν τις βαθμίδες ψύξης, ενώ οι υπόλοιπες βαθμίδες 1,2,4 και 5 χρησιμοποιούνται ως συμπυκνωτές. Στο παρακάτω διάγραμμα η προσροφητική βαθμίδα 1 θερμαίνεται για τη διαδικασία εκρόφησης, η οποία εκροφά το ψυκτικό στο συμπυκνωτή. Η προσροφητική βαθμίδα 2 χρησιμεύει ως συμπυκνωτής για την προσροφητική βαθμίδα 3, και σε αυτή τη διαδικασία η βαθμίδα 3 θερμαίνεται και εκροφά το ψυκτικό στην βαθμίδα 2, το οποίο ψύχεται από την εξωτερική πηγή ψύξεως και προσροφά το αποβαλλόμενο ψυκτικό από τη βαθμίδα 3. Ο απαεριωτής βρίσκεται σε σύνδεση με την βαθμίδα 6, και υποβάλλεται σε ψύξη από εξωτερική πηγή ψύξεως και προσροφά το ψυκτικό που εξατμίζεται από τον απαεριωτή. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξάγεται η ψυκτική ισχύς. Στη συνέχεια οι βαθμίδες 4 και 5 συνδέονται μεταξύ τους. Ως συμπυκνωτής για την βαθμίδα 5 χρησιμοποιείται η γειτονική 4. Η βαθμίδα 4 ψύχεται και προσροφά ενώ η βαθμίδα 5 θερμαίνεται και εκροφά. Για να χρησιμοποιήσετε τη βαθμίδα 2 ως συμπυκνωτής για τη βαθμίδα 3 στο διάγραμμα, μια τέτοια διαδικασία θα μπορούσε να μειώσει την πίεση συστολής για την βαθμίδα 3 επειδή η πίεση της βαθμίδας 2 είναι πολύ χαμηλότερη από ό,τι η πίεση συμπύκνωσης. Στη συνέχεια υπό την προϋπόθεση του ίδιου ελάχιστου ποσού προσρόφησης του κύκλου, η θερμοκρασία των πηγών θερμότητας που απαιτείται από τη βαθμίδα 3 θα μειωθεί αποτελεσματικά.

Ομοίως, για τη διαδικασία εκρόφησης της βαθμίδας 2 η βαθμίδα 1 θα χρησιμεύσει ως συμπυκνωτής, έτσι η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας που απαιτείται από τη βαθμίδα 2 για τη διαδικασία της εκρόφησης θα μειωθεί επίσης. Για τη βαθμίδα 1 εξαιτίας του ότι προσροφά τον ατμό του ψυκτικού μέσου από τη βαθμίδα 2, η οποία έχει πολύ υψηλότερη πίεση από τον απαεριωτή με απόρροια να βελτιώνεται αποτελεσματικά το μέγιστο ποσό προσρόφησης της βαθμίδας 1. Έτσι, υπό τις συνθήκες της ίδιας ποσότητας του κύκλου προσρόφησης η απαιτούμενη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας στη βαθμίδα 1 θα μειωθεί ξανά αποτελεσματικά. Στο τέλος της διαδικασίας που μόλις περιγράψαμε, ξεκινάει να ψύχεται η βαθμίδα 3 και προσροφά το ψυκτικό από τον απαεριωτή, και κατ' αυτό τον τρόπο έχουμε την εξαγόμενη ψυκτική ισχύς. Η βαθμίδα 4, από την άλλη μεριά, θα θερμανθεί και αποβάλλει το ψυκτικό διοχετεύοντας το στον συμπυκνωτή. Στη συνέχεια η προσροφητική

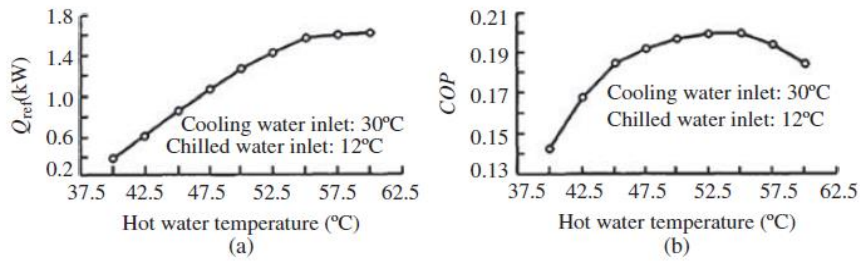
βαθμίδα 5 θα λειτουργήσει ως συμπυκνωτής για την προσροφητική βαθμίδα 6 και η προσροφητική βαθμίδα 6 θερμαίνεται για τη διαδικασία εκρόφησης. Με τον ίδιο τρόπο η προσροφητική βαθμίδα 1 θα χρησιμεύσει ως ο συμπυκνωτής για την προσροφητική βαθμίδα 2, και η βαθμίδα του προσροφητή 2 θερμαίνεται και ολοκληρώνει την διαδικασία της εκρόφησης [29-30].



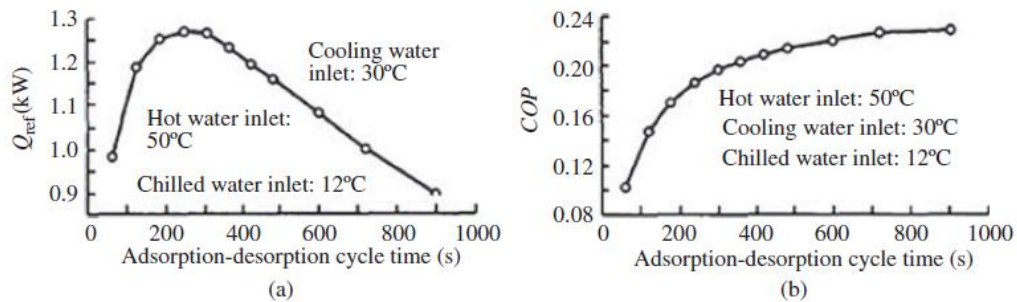
Σχήμα 3.6.2.1. Σύστημα προσρόφησης έξι βαθμίδων [29-30]

Σε μια πειραματική διαδικασία όταν η θερμοκρασία εισόδου του ζεστού νερού κυμαίνεται στους 40 και 50 °C αντίστοιχα, και η θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού νερού ελέγχεται σε 12 °C, η ικανότητα ψύξης και ο βαθμός απόδοσης COP του κύκλου πολλαπλών σταδίων απεικονίζεται στα γραφήματα (σχήμα 3.6.2.2). Όταν η θερμοκρασία του νερού ψύξης αυξάνει, η ικανότητα ψύξης μειώνεται από 2,25 σε 0,09kW, και ο COP μειώνεται από 0,22 σε περίπου 0,04. Η ικανότητα ψύξης και ο βαθμός απόδοσης COP του συστήματος προσρόφησης ήταν περίπου 1,6 kW και 0,2 υπό τις συνθήκες της θερμοκρασίας του νερού ψύξης στους 30 °C και της πηγής θερμότητας στους 55 °C. Σύμφωνα με την ικανότητα ψύξης ο βέλτιστος χρόνος κύκλου καθορίζεται από το σχήμα 4, και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν ο χρόνος κύκλου προσρόφησης-εκρόφησης είναι 300 δευτερόλεπτα, η ψυκτική ικανότητα του συστήματος φθάνει τη μέγιστη τιμή, και ο βαθμός απόδοσης COP είναι κοντά στο 0,2.

Παρακάτω φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα:



Σχήμα 3.6.2.2. επιδόσεις του κύκλου σε συνάρτηση της θερμοκρασίας του ζεστού νερού. [29-30]

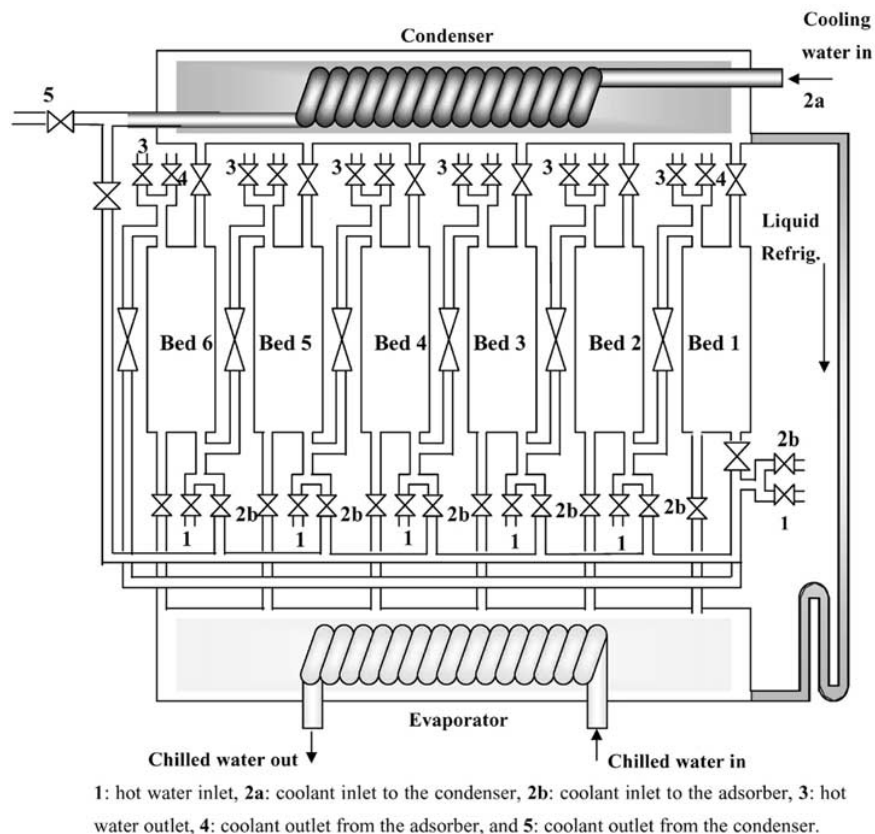


Σχήμα 3.6.2.3. επιδόσεις του κύκλου σε συνάρτηση του χρόνου του κύκλου. [29-30]

3.6.3 Διπλής λειτουργίας κύκλος προσρόφησης (Dual mode cycle adsorption)

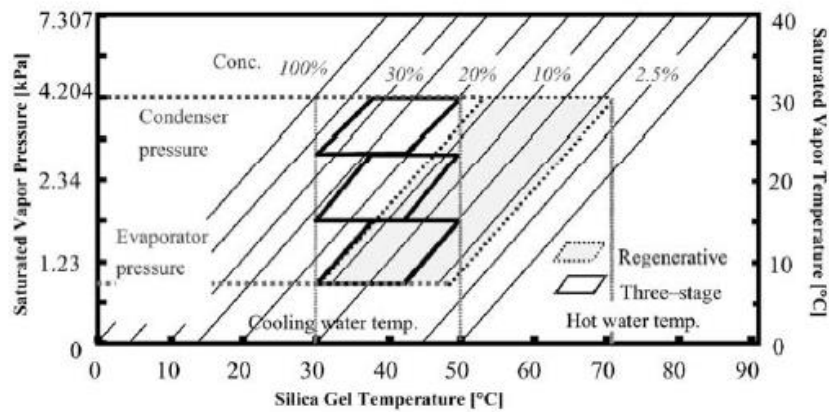
Συστήματα πολλαπλών βαθμίδων (multi-bed system)

Ο προτεινόμενος κύκλος έξι σταδίων με αναγέννηση αποτελεί ουσιαστικά μια επέκταση του συμβατικού κύκλου διπλής βαθμίδας (σχήμα 3.6.3.1) [31].



Σχήμα 3.6.3.1. Σχηματικό διάγραμμα ενός προηγμένου ψύκτη προσρόφησης έξι βαθμίδων με λειτουργία αναγέννησης της θερμότητας. [31]

Σε ένα συμβατικό σύστημα ψύξης με προσρόφηση, ο ενυπάρχων περιορισμός του αριθμού των βαθμίδων οδήγησε σε σημαντική θερμοκρασία όλων των συστατικών. Η μέγιστη θερμοκρασία της εξόδου του συμπυκνωτή που ακολουθεί σύντομα μετά αλλαγή λειτουργίας των βαθμίδων αυξάνει το στιγμιαίο φορτίο του πύργου ψύξης. Τα συστήματα πολλαπλών βαθμίδων σχεδιάζονται για δύο βασικούς λόγους. Αρχικά για να μειώσουν σημαντικά τις μέγιστες θερμοκρασίες τόσο στον απαερωτή όσο και στον συμπυκνωτή. Επιπλέον, έχουν σημαντικό σκοπό να βελτιώσουν την απόδοση ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας σε χρήσιμη ψύξη. Τέτοια χαμηλή θερμοκρασία, βιομηχανικά απορριπτόμενης θερμότητας (συνήθως κάτω από 100°C) συνήθως καθαρίζεται στο περιβάλλον. Η ενθαλπία των εν λόγω αποβλήτων θερμότητας σε σχέση με εκείνη του περιβάλλοντος αντιπροσωπεύει μια σταθερή δαπάνη ενέργειας αναμένοντας να αξιοποιηθεί για παραγωγικές χρήσεις. Ωστόσο, μια τέτοια άκαμπτη διαμόρφωση για την σειρά των συστημάτων ψύξης με προσρόφηση αντιπροσωπεύει συστήματα στα οποία ο βαθμός εκμετάλλευσης της απορριπτόμενης θερμότητας είναι χαμηλός. Το σύστημα πολλαπλών βαθμίδων



Σχήμα 3.6.3.2. Διάγραμμα Dühring προηγμένου ψύκτη προσρόφησης σε διπλή λειτουργία (dual-mode operations). [31]

οδηγεί στην εξάλειψη των παραπάνω άκαμπτων διαμορφώσεων. Θα μελετήσουμε παρακάτω ένα σύστημα έξι βαθμίδων. (six – bed mode system)

Ο Πίνακας 3.6.3.1 και το σχήμα 3.6.3.2 απεικονίζουν το χρονοδιάγραμμα τη εκμετάλλευσης της ενέργειας και τη διαμόρφωση της ροής του ψύκτη σε κατάσταση λειτουργίας έξι-βαθμίδων, αντίστοιχα. Αξιοποιώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ των τριών ζευγών των στοιχείων ρόφησης, η πηγή θερμότητας από τον πιο θερμό εκροφητή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναγεννήσει έναν άλλο εκροφητή- ψύκτη που θα λειτουργήσει ως ο εκροφητής ενδιάμεσης θερμοκρασίας. Η έξοδος του θερμού νερού από τον εκροφητή ενδιάμεσης θερμοκρασίας θα προωθήσει επιπλέον αναγέννηση στον τρίτο εκροφητή (εκροφητής χαμηλής θερμοκρασίας) πριν καθαριστεί εντός του περιβάλλοντος. Ομοίως, το ψυκτικό από τον ψυχρότερο προσροφητή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κλιμακούμενο τρόπο (έξοδος νερού ψύξης από των χαμηλότερης θερμοκρασίας προσροφητή στον ενδιάμεσης θερμοκρασίας προσροφητή από όπου η έξοδος του ψυκτικού εισέρχεται στον υψηλής θερμοκρασίας προσροφητή) προτού σταλεί πίσω στον πύργο ψύξης.

Πίνακας 3.6.3.1: εκμετάλλευση ενέργειας συστημάτων με πολλαπλές βαθμίδες

Bed 1	Sw	Ads (3)	Ads (2)	Ads (1)	Sw	Des (3)	Des (2)	Des (1)
Bed 2		Des (1)	Sw Ads (3)	Ads (2)		Ads (1)	Sw Des (3)	Des (2)
Bed 3		Des (2)	Des (1)	Sw Ads (3)		Ads (2)	Ads (1)	Sw Des (3)
Bed 4	Sw	Des (3)	Des (2)	Des (1)	Sw	Ads (3)	Ads (2)	Ads (1)
Bed 5		Ads (1)	Sw Des (3)	Des (2)		Des (1)	Sw Ads (3)	Ads (2)
Bed 6		Ads (2)	Ads (1)	Sw Des (3)		Des (2)	Des (1)	Sw Ads (3)

3.6.4 Συμπεράσματα για τους προηγμένους κύκλους

Τα κύρια συμπεράσματα είναι τα εξής:

1. Το κύριο πλεονέκτημα του καινοτόμου διπλής λειτουργίας (dual-mode) κύκλου είναι η ικανότητά του να αξιοποιήσει αποτελεσματικά χαμηλού βαθμού απορριπτόμενη θερμότητα θερμοκρασίας της τάξεως 40 °C έως 95 °C ως πηγές θερμότητας οδήγησης.
2. Ο ψύκτης στη λειτουργία τριών σταδίων είναι λειτουργικός με μία πηγή θερμότητας και διαφορά θερμοκρασίας ψύκτρας τόσο μικρή όσο 10 K.
3. Με σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες πηγής οδήγησης (Πάνω από 60°C), ο ψύκτης στην αναγεννητική λειτουργία σε συστήματα πολλαπλών βαθμίδων (multi-bed system) αποδίδει υψηλότερες επιδόσεις.
4. Ο κύκλος στους δύο τρόπους είναι πιο ευαίσθητος στη θερμοκρασία της ψύκτρας θερμοκρασία παρά στη θερμοκρασία πηγής θερμότητας.
5. Από τα παραπάνω προοπτικές, η χρήση της ανεκμετάλλευτης απορριπτόμενης θερμότητας σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να προσφέρει ελκυστικές δυνατότητες για πιο βελτιωμένες ενεργειακές επιδόσεις.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [9] By Kai Wang, Ph.D., Edward A. Vineyard, P.E . Adsorption Refrigeration , Fellow ASHRAE
- [10] T.F. Qu, R.Z. Wang*, W. Wang. Study on heat and mass recovery in adsorption refrigeration cycles. *Applied Thermal Engineering*. 21 (2001) 439-452
- [11] Akira Akahira*, K.C.A. Alam, Yoshinori Hamamoto, Atsushi Akisawa, Takao Kashiwagi. Mass recovery adsorption refrigeration cycle—improving cooling capacity. *International Journal of Refrigeration* 27, 225–234.
- [12] Brian K. Swarda, M. Douglas LeVana, Francis Meunier. Adsorption heat pump modeling: the thermal wave process with local equilibrium. *Applied Thermal Engineering* 20 (2000) 759-780
- [13] Shelton, S.V. (1990) Ramp wave analysis of the solid/vapor heat pump. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of ASME*, 112, 69–76.
- [14] Shelton, S.V., Weeper, W.J. and Miles, D.J. (1998) External fluid heating of a porous bed. *Chemical Engineering Communications*, 71, 39–52.
- [15] Yang, L.M., Wang, R.Z. and Wu, J.Y. (1997) Thermal wave's research and analysis on solid adsorption refrigeration. *Journal of Engineering Thermophysics*, 18(6), 673–676, ISSN: 0253-231X (in Chinese).
- [16] Critoph, R.E. (1996) Evolution of alternative refrigerant-adsorbent pairs for refrigeration cycles. *Applied Thermal Engineering*, 16, 891–900.
- [17] Sun, L.M., Feng, Y. and Pons, M. (1997) Numerical investigation of adsorption heat pump system with thermal wave heat regeneration under uniform-pressure conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **40**(2), 281–293.
- [18] Pons, M. and Szarzynski, S. (1999) An adsorption cooling system with heat-regeneration: experiment and numerical study. *Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference, Munich, Germany*, pp. 625-630
- [19] Pons, M. and Poyelle, F. (1999) Adsorptive machines with advanced cycles for heat pumping or cooling applications. *International Journal of Refrigeration* **22**(1), 27–37.
- [20] Willers, E. and Groll, M. (1999) Evaluation of metal hydride machines for heat pumping and cooling applications. *International Journal of Refrigeration* **22**(1), 47–58.

- [21] Zheng, W. and Worek, W.M. (1995) Effect of operating conditions on the performance of the two-bed closed cycle solid sorption heat pump system. *Journal of Solar Energy Engineering*, **117**, 171–181.
- [22] Harkonen, M. and Aittomaki, A. (1991) The principle of internal regeneration as applied to the adsorption heat pump process. *Heat Recovery Systems and CHP*, **11**(4), 239–248
- [23] Wang, R.Z., Jia, J.P., Zhu, Y.H. *et al.* (1997) Study on a new solid adsorption refrigeration pair: active carbon fiber -methanol. *Journal of Solar Engineering, the Transaction of ASME*, **119**(3), 214–218
- [24] Cheng, J. and Wang, R.Z. (1998) Analysis on the solid-sorption cycle with forced convective heat and mass transfer inside absorbent bed. *Acta Energiae Solaris Sinica*, **19**(4), 437–443, ISSN: 0254-0096 (in Chinese).
- [25] Critoph, R.E. (1994) Forced convection enhancement of adsorption cycles. *Heat Recovery Systems and CHP* **14**(4), 343–350.
- [26] Wang, R.Z. (1999) Study on a four-beds cascade adsorption refrigeration cycle capable of COP over 1.1. 20th International Congress of Refrigeration, Sydney, Australia.
- [27] Tan, Z.C. and Wang, R.Z. (1998) Research on the double effect adsorption refrigeration cycle. *Acta Energiae Solaris Sinica*. **19**(2), 156–160, ISSN: 0254-0096 (in Chinese).
- [28] B.B. Saha *, A. Akisawa, T. Kashiwagi. Solar/waste heat driven two-stage adsorption chiller: the prototype. *Renewable Energy* **23** (2001) 93–101.
- [29] Saha, B.B. and Kashiwagi, T. (1997) Experimental investigation of an advanced adsorption refrigeration cycle. *ASHRAE Transactions* **103**, 51–58.
- [30] Saha, B.B., Akisawa, A. and Kashiwagi, T. (1997) Silica gel water advanced adsorption refrigeration cycle. *Energy*. Vol.22. No. 4, pp 437 -447
- [31] B.B. Saha, S. Koyama, T. Kashiwagi, A. Akisawa, K.C. Ng, H.T. Chuac Waste heat driven dual-mode, multi-stage, multi-bed regenerative adsorption system. *International Journal of Refrigeration* , Volume 26, Issue 7, November 2003, Pages 749-757
- [32] R.Z. Wang Adsorption refrigeration research in Shanghai Jiao Tong University. *Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ/ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΒΑΘΜΙΔΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ

Μελετώντας την βελτίωση της απόδοσης της μεταφοράς θερμότητας και μάζας του προσροφητή συμπεραίνουμε ότι είναι κρίσιμο να επιταχυνθεί η διαδικασία προσρόφησης και εκρόφησης για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα της ψύξης με προσρόφησης. Η κακή επίδοση μεταφορά θερμότητας και μάζας στο σύστημα ψύξης με προσρόφησης συνιστά εμπόδιο για τα συστήματα προσρόφησης για εκτεταμένη εκμετάλλευση. Το αντικείμενο αυτό αποτελεί το επίκεντρο της τεχνολογικής έρευνας, στο πεδίο της ψύξης με προσρόφηση, για μεγάλο χρονικό διάστημα. Μπορεί να προβλεφθεί ότι το πρόβλημα θερμότητας και μεταφοράς μάζας όπου υπήρχαν στα συστήματα ψύξης δεν θα λυθεί εντελώς πρόσφατα. Υπάρχουν δύο κοινοί τρόποι για την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε συστήματα προσρόφησης: το ένα είναι η ενίσχυση του προσροφητικού, και η άλλη είναι να βελτιστοποιήσει το σχεδιασμό του προσροφητή και τον τρόπο λειτουργίας του κύκλου [32].

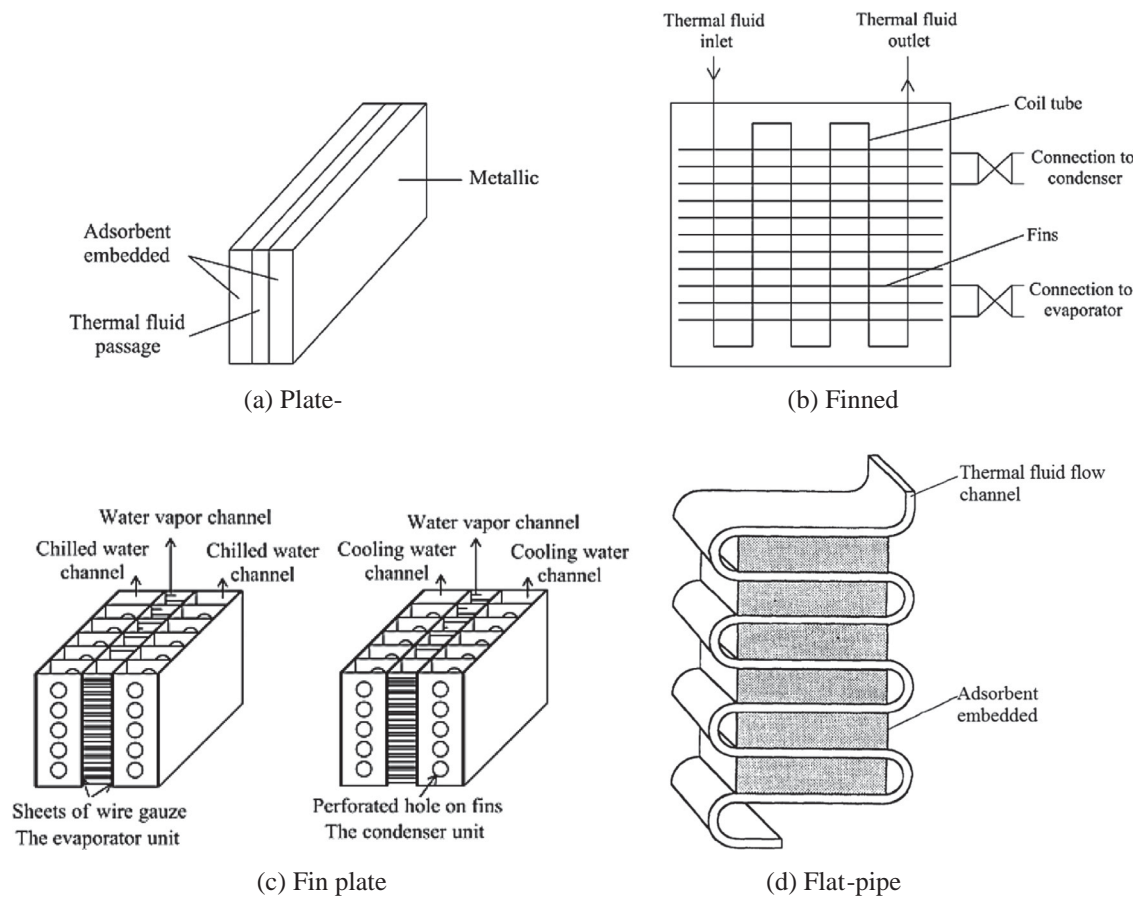
4.1 Αυξάνοντας την περιοχή μεταφοράς θερμότητας

Οι ερευνητές στρέφουν το ενδιαφέρον τους στη μελέτη νέων τύπων προσροφητικών βαθμίδων με το χαρακτηριστικό της μεγάλης περιοχής μεταφοράς. Μια μεγάλη περιοχή μεταφοράς, μαζί με τον συντελεστή μεταφοράς, θα να μειώσει σημαντικά τη συνολική θερμική αντίσταση. Παρακάτω θα δούμε τους νέους αυτούς τύπους βαθμίδων [33].

A1) βαθμίδα πλάκας με πτερύγια (plate- finned bed)

Η βαθμίδα πλάκας με πτερύγια μπορεί να πάρει μερικές διαφορετικές δομές οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα 4.1.1. Οι δομές αυτές βελτιώνουν την μεταφορά θερμότητας εντός της βαθμίδας λόγω του πτερυγίου που διευρύνει την συγκεκριμένη περιοχή μεταφοράς ανά μονάδα όγκου και συντομεύει τη διαδρομή μεταφοράς θερμότητας. Επιπρόσθετα το καλό αποτέλεσμα της μεταφοράς θερμότητας, η αυτού του τύπου βαθμίδα ενέχει το επίσης κρίσιμο πλεονέκτημα της συμπαγούς δομής και της λιγότερης απώλειας θερμότητας. Ωστόσο, ο νέος αυτός τύπος βαθμίδας ,εξαιτίας της μεγάλης αναλογίας της θερμοχωρητικότητας του μεταλλικού πτερυγίου και του σωλήνα που βρίσκεται πάνω από το υλικό προσρόφησης θα επιφέρει μια αισθητή μείωση στον βαθμό απόδοσης του συστήματος COP και στην ειδική ψυκτική του ισχύ. Τα πειραματικά αποτελέσματα των ερευνητών έδειξαν ότι η απόδοση της μηχανής με πτερύγια ήταν υψηλότερη από ότι με χωρίς πτερύγια. Η μέγιστη θερμοκρασία στον προσροφητή χωρίς πτερύγια φτάνει τους 77 °C ,ενώ η μέγιστη

Θερμοκρασία με. Η αντίστοιχη μείωση του βαθμού απόδοσης COP είναι από 0,111 σε 0,075 αντίστοιχα.

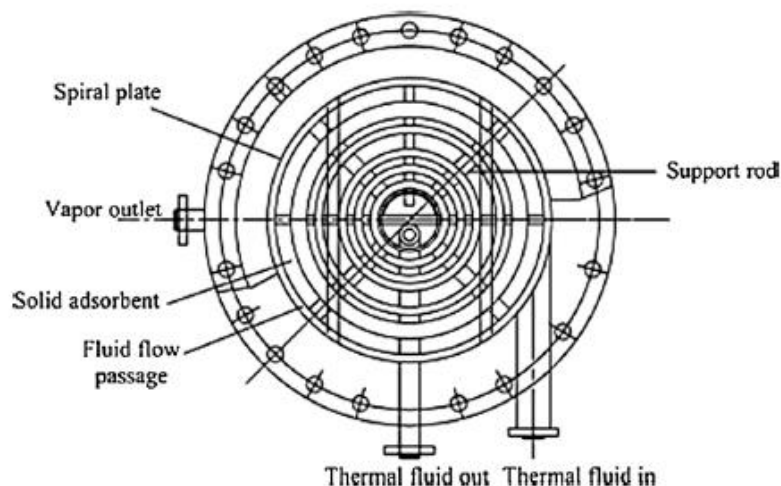


Σχήμα 4.1.1. Διαφορετικοί τύποι δομής των προσροφητικών βαθμίδων. [33]

A2) βαθμίδα πλάκας σπειροειδούς (spiral plate bed)

Η βαθμίδα πλάκας σπειροειδούς, ως ένα είδος συμπαγούς βαθμίδας προσρόφησης, είναι σημαντικό για τον αποτελεσματικό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και τον σχετικά μικρό του όγκο. Η δομή του απεικονίζεται στο σχήμα 4.1.2. Η δομή σάντουιτς έχει ως αποτέλεσμα την ομοιόμορφη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του θερμικού ρευστού και του προσροφητικού υλικού, και στη συνέχεια, δημιουργεί υψηλή ροή θερμότητας. Εξαιτίας της υψηλής αποδοτικότητας της απόδοσης, η βαθμίδα δεν απαιτεί πολύ υψηλή θερμοκρασία να οδηγηθεί όπως η συνηθισμένη βαθμίδα κάνει. Η βαθμίδα πλάκας σπειροειδούς έχει επίσης το πλεονέκτημα της απλής δομής, της χαμηλής κατασκευής κόστους, και εύκολο να κατασκευαστεί. Ωστόσο, για τέτοιες

βαθμίδες η θερμοκρασία λειτουργίας και η πίεση δεν μπορεί να είναι πολύ υψηλή.



Σχήμα 4.1.2. τύπος προσροφητή: spiral plate [33]

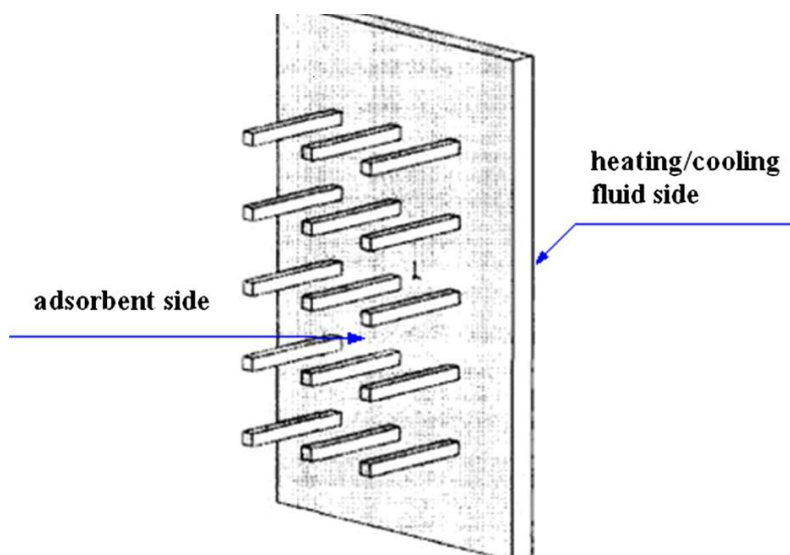
A3) Πορώδεις βαθμίδα (porous bed)

Αυτού του τύπου η βαθμίδα περιλαμβάνει πολλές συνδεδεμένες τρύπες και τούνελ για να διευκολύνεται ο ατμός προσρόφησης ατμός να ρέει μέσα, και στη συνέχεια είναι σε θέση να μειώσει την αντίσταση μεταφοράς μάζας. Έως και τις μέρες μας, έχουν μελετηθεί διάφορες μέθοδοι για την παρασκευή της πορώδους βαθμίδας. Εκείνοι οι μέθοδοι περιλαμβάνουν την πυροσυσσωμάτωση του στερεού, την στερεοποίηση του τήγματος, την απόθεση μετάλλων, και η διάβρωση του πόρου. Ένα από τα θετικά χαρακτηριστικά της πορώδους βαθμίδας είναι η υψηλή μεταφορά θερμότητας και μάζας, η χαμηλή θερμική αντίσταση επαφής με το τοίχωμα του μεταλλικού στεγανοποιητικού, και η χαμηλή ειδική θερμοχωρητικότητα. Από την άλλη μεριά, σημαντικά μειονεκτήματα αποτελούν τεχνολογία επεξεργασίας της πορώδους βαθμίδας είναι πολύπλοκη και το κόστος είναι υψηλό.

A4) Βαθμίδα πείρου πτερυγίου

Η βαθμίδα πείρου πτερυγίου σε σύγκριση με τη βαθμίδα πλάκας με πτερύγια έχει πιο διευρυμένη περιοχή. Η διευρυμένη ζώνη μειώνει τη συνολική αντίσταση μεταφοράς και βελτιώνει την ομοιομορφία του θερμοκρασιακού πεδίου. Η δομή μιας τέτοιας βαθμίδας απεικονίζεται στο σχήμα 4.1.3. Ο μηχανισμός ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας για μια τυπική βαθμίδα πείρου πτερυγίου κάνει χρήση της πλούσιας δευτερεύουσας επιφάνειας του βελονισμού για την

ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Σε σύγκριση με την βαθμίδα πλάκας με πτερύγια στα ίδια μάζα- βάρος, το εμβαδόν επιφάνειας της βαθμίδας πείρου-πτερύγιου είναι αυξημένο κατά 22,36%. Επιπλέον, η βαθμίδα πείρου πτερυγίου είναι περισσότερο συμπαγής και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το λιγότερο πρόσθετο φορτίο ψύξης / θέρμανσης της βαθμίδας. Επιπλέον, καθώς το προσροφητικό είναι ρέει εντός του χώρου βελονισμού, η πυκνότητα του προσροφητικού για ένα δεδομένο όγκο έχει επίσης βελτιωθεί ταυτόχρονα με τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας. Από την άλλη πλευρά, ταιριάζοντας τη θερμική αντίσταση και στις δύο πλευρές του τοίχου είναι σημαντικό να διατηρηθεί η θερμότητα που μεταφέρετε σε συνοχή. Ως εκ τούτου, το κανάλι για το ρευστό θέρμανσης / ψύξης στο πίσω μέρος του τοίχου θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη στο αποτέλεσμα υπέρ της ενίσχυσης.

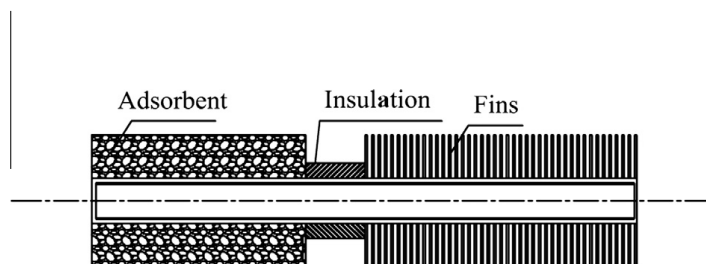


Σχήμα 4.1.3. Βασική δομή προσροφητικής βαθμίδας pin-fin. [33]

4.2 Χρησιμοποιώντας σωλήνα θερμότητας για την προώθηση της μεταφοράς θερμότητας

Η δομή ενός σωλήνα θερμότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.2.1. Ο ερευνητής **Wang** μελέτησε την αριθμητική προσομοίωση του συστήματος ψύξης με προσρόφηση που έχει ως προσροφητή σωλήνα θερμότητας. Μετά τη σύγκριση των επιδόσεων της βαθμίδας του σωλήνα θερμότητας με τη συμβατική βαθμίδα, ο ερευνητής **Pan** υποστήριξε ότι η αρχική ταχύτητα εκρόφησης/προσρόφησης θα μπορούσε να αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό με το σωλήνα θερμότητας. Κατά συνέπεια, ο χρόνος του κύκλου του συστήματος ψύξης θα μπορούσε να μειωθεί αποτελεσματικά και στη συνέχεια η ειδική ψυκτική ισχύς

SCP και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος COP να βελτιωθεί αισθητά. Ο **Wang** σχεδίασε έναν πρακτικό προσροφητή με σωλήνα θερμότητας για να χρησιμοποιηθεί σε παγομηχανή, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε τελικά σε ένα αλιευτικό σκάφος. Ο **Lu** από την άλλη κατασκεύασε ένα πολυλειτουργικό σωλήνα θερμότητας σωλήνα για ψύκτη προσρόφησης διπλής βαθμίδας. Ο ψύκτης χρησιμοποιήθηκε είτε για τον κλιματισμό στο πλοίο είτε για αποθηκευτικό χώρο ψύξης για τα θαλασσινά.



Σχήμα 4.2.1. Σχήμα ενός προσροφητή σωλήνα θερμότητας (heat pipe) [33]

4.3 Μειώνοντας την αντίσταση επαφής μεταξύ του τοιχώματος και του προσροφητικού.

Πολλοί ερευνητές έχουν δώσει προσοχή στην μέθοδο επίστρωσης για να μειωθεί η αντίσταση επαφής μεταξύ του σωματιδίου του προσροφητικού και του τοιχώματος της βαθμίδας. Στην μέθοδο αυτή το πολτοποιημένο υλικό προσρόφησης επιστρώνεται επί του στερεού τοιχώματος του σωλήνα και έτσι το υλικό μπορεί να συνδεθεί στενά με την επιφάνεια και η αντίσταση επαφής μπορεί να μειωθεί αποτελεσματικά. Η σύγκριση έδειξε ότι για το ίδιο προσροφητικό υλικό, η αγωγιμότητα του επιχρισμένου τύπου της βαθμίδας ήταν όσο 4 φορές της βαθμίδας του τύπου πλήρωσης.

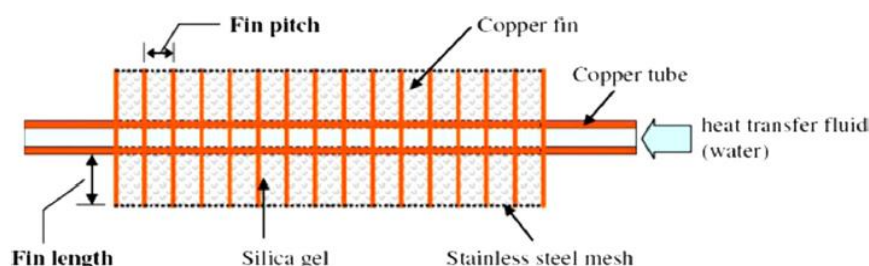
Με αυτό το θέμα της μεθόδου των επιστρώσεων έχουν ασχοληθεί οκτώ ολίγοι ερευνητές. Μεταξύ των μελετητών που έχουν ασχοληθεί ο **Schnabel** εκτέλεσε κινητικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του συντελεστή προσρόφησης σε επιστρώσεις ζεόλιθου. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος επικάλυψης Χ του ζεόλιθου που παρασκευάζεται με τη χρήση της μεθόδου θέρμανσης του υποστρώματος παρουσίασαν ελπιδοφόρες κινητικές ιδιότητες προσρόφησης. Το απευθείας κρυσταλλικό δείγμα έδειξε ότι 85% της τελικής φόρτισης είναι υψηλότερο σε σύγκριση με το δείγμα αναφοράς το οποίο ήταν κολλημένο στη μεταλλική βάση στήριξης. Ένας άλλος ερευνητής ο **Restuccia** κάποτε ανέπτυξε μια κλίμακα εργαστηρίου ψύκτη προσρόφησης, στην οποία ο εναλλάκτης finned tube είναι επικαλυμμένος με ένα στρώμα ζεόλιθου. Ο ψύκτης παράγαγε μια

ειδική ισχύς της τάξεως των 30-60 W / kg του προσροφητικού, και ο χρόνος κύκλου κυμάνθηκε μεταξύ 15 και 20 λεπτών ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας. Τα αποτελέσματα ήταν αισθητά καλύτερα από εκείνα που μετρήθηκαν στην παρόμοια συμβατική βαθμίδα. Ο ερευνητής εν ονόματι **Chang** ασχολήθηκε με το τι επίδραση έχει το πάχος του επιχρίσματος από σίλικα τζελ στη μεταφορά θερμότητας και μάζας για κλιματιστικά συστήματα προσρόφησης. Τα πειραματικά αποτελέσματα τους έδειξαν ότι η λεπτότερη ενοποιημένη στρώση από μεγαλύτερα σωματίδια των σίλικα τζελ θα μπορούσε να συμβάλλει στην καλύτερη μεταφορά μάζας. Το επικαλυμμένο στρώμα είχε ένα ταχύ ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μια σταθερή θερμοκρασία της επιφάνειας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αναγέννησης, πάρα πολύ.

Ο ερευνητής **Freni** χρησιμοποίησε σίλικα τζελ που περιέχει χλωριούχο ασβέστιο και πηλό ως επιστρωμένο προσροφητικό για την κατασκευή μιας νέας βαθμίδας προσρόφησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.1. Οι επιδόσεις μιας τέτοιας βαθμίδας όσον αφορά την ειδική ψυκτική ισχύ είναι της τάξεως 150-200 W/kg. Ο **Rezk** εξέτασε την επίδραση που είχε το μίγμα των σίλικα τζελ και τα μεταλλικά σωματίδια που είχαν επιστρωθεί σε χώρο πτερυγίου. Με τον τρόπο αυτό, σε κάποιο βαθμό θα βελτιωθεί η μεταφορά θερμότητας και μάζας της βαθμίδας.



Σχήμα 4.3.1. Επικαλυμμένη βαθμίδα με σίλικα τζελ η οποία περιέχει χλωρίδια του ασβεστίου και άργιλο [33]



Σχήμα 4.3.2. Σχηματικό διάγραμμα του fin tube τα οποία είναι γεμισμένα με σίλικα τζέλ. [33]

Αν και η επιστρωμένη βαθμίδα είναι ικανή να μειώσει την αντίσταση επαφής και να βελτιώσει τη μεταφορά θερμότητας, η παράμετρος της βαθμίδας, καθώς και η δομή πρέπει να βελτιστοποιηθεί προσεκτικά στο σχεδιασμό. Η μορφή του μεταλλικού τοιχώματος, η θερμοχωρητικότητα του υλικού του μετάλλου και το πάχος της επίστρωσης της προσρόφησης συνιστούν σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ψύξης του συστήματος. Για τους παραπάνω λόγους, η απαιτούμενη, η αλλιώς η ικανοποιητική ισχύ που θα αποδίδει το σύστημα, συμβαίνει όταν επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός των αυτών σημαντικών παραμέτρων.

4.4 Μειώνοντας την θερμική αντίσταση του προσροφητικού.

Η θερμική αντίσταση στα σωματίδια του προσροφητικού είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας μέσα στη βαθμίδα προσρόφησης. Με την πορώδη δομή, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας και μάζας του προσροφητικού σωματιδίων είναι συνήθως χαμηλός, η οποία οδηγεί σε μεγάλο χρονικό διάστημα προσρόφησης και χαμηλή ειδική ισχύ ψύξης. Για να βελτιώσουμε τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού προσρόφησης η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι να προσθέσουμε το υλικό της καλής αγωγιμότητας μέσα στο προσροφητικό έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα σύνθετο υλικό. Τέτοιου είδους σύνθετο υλικό συνιστά καλή επιλογή στο σχεδιασμό του συστήματος της ψύξης με προσρόφηση ή αφυγραντικού συστήματος που οδηγείται από την πηγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Ένας από τους ερευνητές εν ονόματι **Hu** πρότεινε ένα σύνθετο προσροφητικό μέσο ζεόλιθου / αφρού αλουμινίου με νερού που θα χρησιμοποιηθεί σε σύστημα προσρόφησης ψύξης και θα οδηγείται από τη θερμότητα των καυσαερίων του κινητήρα. Οι τιμές του βαθμού απόδοσης του συστήματος COP και της ειδικής ψυκτικής ισχύς SCP του

νέου συστήματος ήταν αρκετά υψηλότερες από αυτές του καθαρού συστήματος ζεόλιθου-νερό. Συγκεκριμένα κάτω από τις συνθήκες όπου το πάχος της στρώσης του προσροφητικού είναι ίσο με 5mm και ο χρόνος του κύκλου είναι ίσος με 8 min η ειδική ψυκτική ισχύς SCP φτάνει σε μέγιστη τιμή 641 W/kg και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος COP σε 0,24. Ο ερευνητής **Gong** μελέτησε την ψυκτική ικανότητα του σύνθετου του χλωριούχου λιθίου και σίλικα τζελ, με μεθανόλη ως ψυκτικό. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι, σε σύγκριση με τη μονάδα του σίλικα τζελ νερού, τα μεγέθη SCP και COP του σύνθετου αυξήθηκαν κατά 16,3% και 24,2% αντίστοιχα στην ίδια κατάσταση της θερμοκρασίας οδήγησης. Ο **Gong** ανέφερε μια μελέτη σχετικά με το σύνθετο προσροφητικό μέσο που εμποτίζεται το χλωριούχο λίθιο σε σίλικα τζελ με νερό ως προσρόφημα. Τα αποτελέσματά της προσομοίωσης αποκάλυψαν ότι με τη χρήση του νέου συνθέτου προσροφητή η ψυκτική ικανότητα της μονάδας θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 28,6%.

Η βαθμίδα της προσρόφησης μπορεί να βελτιωθεί στο τομέα της απόδοσης με τις διαδικασίες της ενοποίησης ή της συμπίεσης. Ο ερευνητής **Wang** κατασκεύασε μια παγομηχανή όπου χρησιμοποίησε την τεχνική της ενοποίησης του χλωριούχου ασβεστίου και του ενεργοποιημένου άνθρακα εντός της βαθμίδας του προσροφητή. Με την διαδικασία αυτή η ειδική ψυκτική πυκνότητα ψύξης αυξήθηκε κατά όγκο κατά 35%. Άλλοι μελετητές όπως ο **Dunne** και ο **Taqvi**, ο **Ron**, ο **Guilleminot**, ο **Zhu**, ο **Cong** και ο **Liu**, μελέτησαν την αγωγιμότητα διαφορετικών προσροφητικών μέσων που αναπτύχθηκαν από διαφορετικές μεθόδους κατασκευής. Από την άλλη πλευρά, αν και η τεχνική της ενοποίησης μειώνει το χάσμα μεταξύ των σωματιδίων του προσροφητή και στη συνέχεια βελτιώνει την αποτελεσματική αγωγιμότητα του υλικού, η ύπαρξη της κόλλας και του προσθέτου υλικού θα οδηγήσει στην παρεμβολή της μεταφοράς θερμότητας και τη μεταφορά μάζας. Στο ίδιο σημείο που επιτυγχάνεται η προώθηση της μεταφοράς θερμότητας, η συμπαγής δομή του προσροφητικού αυξάνει την αντίσταση της μεταφοράς μάζας, και αυτό έχει ως συνέπεια να δυσχεραίνει την διαδικασία της προσρόφησης.

4.5 Βελτίωση της αποτελεσματικότητας της συλλογής ηλιακής ενέργειας της βαθμίδας

Σε μια βαθμίδα συστήματος προσρόφησης, η υψηλή αποτελεσματικότητα της ως προς την θερμότητα συλλογής της, αποτελεί κρίσιμο πεδίο έρευνας και έχει να κάνει με το πόσο μπορεί να βελτιστοποιηθεί η δομή της αυτής βαθμίδας. Η Θερμότητα συλλέγεται στη βαθμίδα του προσροφητή με τη βοήθεια κάποιων ηλιακών συλλεκτών. Η επαρκής ποσότητα συλλογής θερμότητας εγγυάται στην βαθμίδα ότι θα εκροφηθεί το ψυκτικό από το υλικό της προσρόφησης. Στο

σημείο αυτό, αρκετή ποσότητα μάζας μεταφερόμενη στα κανάλια πρέπει να διατηρηθεί στη βαθμίδα έτσι ώστε το εκροφημένο ψυκτικό να μπορεί να συμπυκνωθεί και να απορριφθεί στον συμπυκνωτή ταχύτατα. Εκτός από την ανεπάρκεια της χαμηλής θερμοκρασιακής συλλογής, η απόδοση του επίπεδου τύπου συλλέκτη επηρεάζεται επίσης από τις καιρικές συνθήκες σημαντικά. Ο **Abu-Hamdeh** ανέπτυξε ένα σύστημα ηλιακής ψύξης με προσρόφηση χρησιμοποιώντας παραβολικό συλλέκτη αντί του επίπεδου συλλέκτη. Η χαμηλότερη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στο κουτί-ψυγείο ήταν 4 °C και ο υπολογιζόμενος μεικτός συντελεστής της απόδοσης ήταν 0.75. Ο ηλιακός συντελεστής απόδοσης του συστήματος κυμαινόταν από 0,18 έως 0,2.

Ο ερευνητής **Chekirou** παρουσίασε ένα ηλιακό συλλέκτη ο οποίος ήταν ενσωματωμένος μαζί με έναν προσροφητή πολλών σωλήνων χρησιμοποιώντας ως εργαζόμενο μέσο τον ενεργοποιημένο άνθρακα με μεθανόλη. Δύο από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της μορφής του προσροφητή ήταν η απλότητα της κατασκευής του και η ικανότητά του να αντέχει πίεση με λεπτότερο τοίχωμα. Ο βέλτιστος συντελεστής θερμικής απόδοσης και ο συντελεστής ηλιακής απόδοσης ήταν 0,424 και 0,143, αντίστοιχα, όταν η εσωτερική ακτίνα του προσροφητή ήταν 54.55 mm και η ηλιακή επιφάνεια του συλλέκτη ήταν 1 m². Επιπλέον, οι ερευνητές **Leite** και **Daguenet** πρότειναν τον τύπο του εκκενωμένου σωλήνα του συλλέκτη και τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι επιδόσεις του ήταν πολύ καλύτερες από ότι αυτές του επίπεδου τύπου. Οι **Bansal** και **Lu** μελέτησαν τα χαρακτηριστικά της βαθμίδας κενού σωλήνα στη μονάδα ψύξης η οποία οδηγείται από την ηλιακή ενέργεια. Λόγω της υψηλής της αποδοτικότητας συλλογής της ηλιακής θερμότητας, αυτός ο τύπος σωλήνα της βαθμίδας χρησιμοποιείται με επιτυχία σε ορισμένα ηλιακά συστήματα ψύξης με προσρόφηση και σήμερα. Δύο βασικά πλεονεκτήματα του τύπου του εκκενωμένου σωλήνα είναι η ικανότητα πίεσης και η συμπαγής δομή. Από την άλλη μεριά, με δύο διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας από τον κενό σωλήνα στον θερμαινόμενο αέρα και μετά στο προσροφητικό, η αποτελεσματικότητα της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας θα επηρεαστεί αρνητικά.

4.6 Βελτίωση του κύκλου ψύξης με προσρόφηση

Αυτό το θέμα καλύπτεται εκτενώς σε προηγούμενο υπο-κεφάλαιο της έκθεσης, όπου αναλύονται οι διάφοροι εξελιγμένοι κύκλοι προσρόφησης με σκοπό την καλύτερη απόδοση του συστήματος.

Οι σωλήνες θερμότητας χρησιμοποιήθηκαν στα συστήματα ψύξης με προσρόφηση βελτιώνοντας κατά πολύ την απόδοση του συστήματος. Ο **Critoph** μελέτησε τους σωλήνες θερμότητας και κατέληξε στο ότι όταν χρησιμοποιούνται

στα συστήματα ψύξης με προσρόφηση, η ειδική ψυκτική ισχύς του συστήματος φτάνει στο 1 kW/kg του προσροφητικού μέσου. Στη συνέχεια ο ερευνητής **Vasiliev** εισήγαγε τους σωλήνες θερμότητας σε συστήματα ανάκτησης θερμότητας και είχαν εμφανώς καλύτερες επιδόσεις. Επιπλέον οι προηγμένοι κύκλοι όπως ο κύκλος ανάκτησης μάζας και ο κύκλος συναγωγής θερμικού κύματος μπορούν επίσης να βελτιώσουν την μεταφορά μάζας και θερμότητας του συστήματος. Στους κύκλους συναγωγής του θερμικού κύματος, το μέσο που μεταφέρει τη θερμότητα μεταξύ της πηγής θερμότητας και του προσροφητικού είναι το ψυκτικό έτσι ώστε η εξαναγκασμένη συναγωγή να είναι η κύρια λειτουργία μεταφοράς θερμότητας αντί της αγωγιμότητας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[32] D.C. Wang, Y.H. Li , D. Li , Y.Z. Xi, J.P. Zhang . A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 1, January 2010, Pages 344-353

[33] X.H. Li, X.H. Hou, X. Zhang, Z.X. Yuan. A review on development of adsorption cooling—Novel beds and advanced cycles. Energy Conversion and Management, 94 (2015) 221-232

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

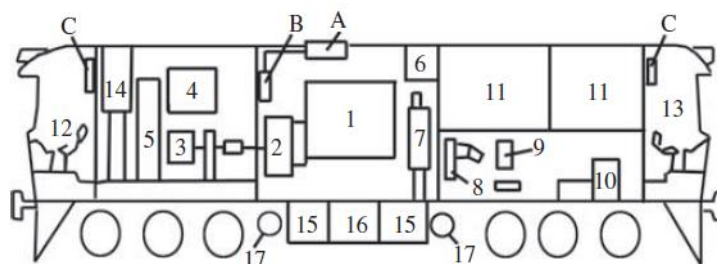
5.1. Εφαρμογές των συστημάτων ψύξης με προσρόφηση οδηγούμενα από αποβαλλόμενη θερμότητα

Εφαρμογές συστήματος προσρόφησης ζεόλιθου-νερού ως κλιματιστικό σε μηχανή αμαξοστοιχίας.



Σχήμα 5.1.1. Dongfeng 4B-2369 , diesel locomotive [34-35]

Παρακάτω θα ασχοληθούμε με τη δομή ενός τέτοιου συστήματος προσρόφησης που χρησιμοποιείται σε μηχανή τρένου. Το νέο πρωτότυπο σύστημα κλιματισμού είχε εγκατασταθεί στο μοντέλο αμαξοστοιχίας Dongfeng 4-2369 που ανήκει στο Hangzhou αμαξοστάσιο του σιδηροδρομικού Bureau της Σανγκάης (φαίνεται στο σχήμα 5.1.1). Η μηχανή της αμαξοστοιχίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την εταιρεία Dalian Locomotive τη χρονολογία 1992. Σε επόμενο σχήμα 5.1.2. φαίνεται η δομή ενός τέτοιου συστήματος [34,35].



A - Adsorber; B - Evaporator/Energy storage tank; C - Fan coil; 1 - Diesel Engine; 2 - Traction generator; 3 - Start motor; 4 - Rectifier cabinet; 5 - Electricity cabinet; 6 - Water expansion tank; 7 - Preheating boiler; 8 - Hydraulic pump; 9 - Blower; 10 - Air compressor; 11 - Cooler; 12 - First cab of driver; 13 - Second cab of the driver; 14 - Braking resistor; 15 - Battery box; 16 - Fuel tank; 17 - Air cylinder

Σχήμα 5.1.2. Το σχηματικό διάγραμμα του Dongfeng [34-35]

Τα κύρια στοιχεία ενός κλιματιστικού συστήματος προσρόφησης είναι εγκατεστημένα στο τμήμα του κινητήρα της αμαξοστοιχίας σχήμα 5.1.3

1 Προσοφητής

Ο προσοφητής βρίσκεται στο άνω μέρος του τμήματος του κινητήρα. Το κέλυφος του είναι συγκολλημένο μαζί με την οροφή του τμήματος του κινητήρα. Ένα μέρος του προσοφητή εκτίθεται εκτός της στέγης όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.3.



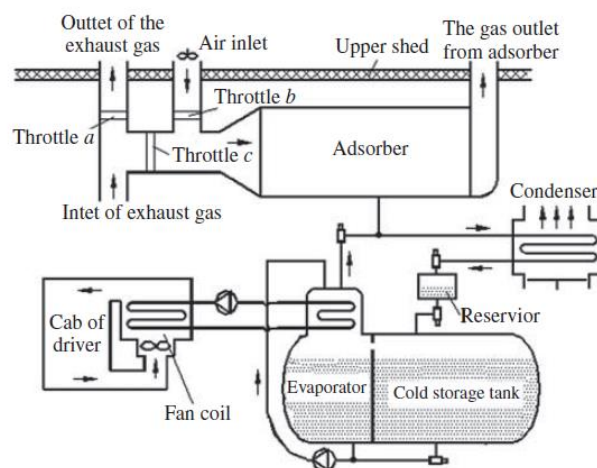
Σχήμα 5.1.3. Προσοφητής του εγκατεστημένου ,στο πάνω μέρος του σιδηροδρόμου, κλιματιστικού [34-35]

2 Συμπυκνωτής

Λόγω της ιδιαιτερότητας του περιβάλλοντος λειτουργίας της μηχανής, ο συμπυκνωτής του συστήματος κλιματισμού δεν μπορεί να ψύχεται με νερό, διότι δεν είναι βολικό. Ως εκ τούτου, το ίδιο το σύστημα ψύχεται από τον αέρα. Υπάρχουν τέσσερις ομάδες από αερόψυκτους συμπυκνωτές σε κάθε πλευρά του προσροφητή στη μηχανή, και κάθε ομάδα περιέχει οκτώ σύνθετους σωλήνες χαλκού-αλουμινίου. Οι σωλήνες μεταφοράς θερμότητας έχουν τα πτερύγια αλουμινίου εξωτερικά να ενισχύσουν την απόδοση ανταλλαγής θερμότητας του αέρα. Το μήκος του κάθε πτερυγίου σωλήνα είναι 500 mm. Η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι 16 χιλιοστά, ενώ η εξωτερική διάμετρος του πτερυγίου είναι 36 mm. Το κενό πτερυγίου είναι 3,2 mm.

3 Απαεριωτής/αναγεννητής

Ο απαεριωτής στην πρωτότυπη μηχανή είναι τύπος απαεριωτή ψεκασμού. Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι τοποθετημένοι στο πάνω μέρος του απαεριωτή. Οι διαδικασίες της εξάτμισης και της μεταφοράς θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή λαμβάνουν χώρα εκτός του εναλλάκτη θερμότητας. Ως εκ τούτου, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ψυκτικού νερού και του νερού που μεσολαβεί είναι ενισχυμένος, και συνεπώς η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υγρού ψύξης και του ψυκτικού μειώνεται. Υπάρχει ακόμα αρκετή χωρητικότητα εξόδου ψύξης όταν η θερμοκρασία εξάτμισης είναι σχετικά υψηλή. Οι μέθοδοι ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του αναγεννητή και του απαεριωτή μεταβάλλονται, η αντλία ψεκασμού είναι ενεργοποιημένη όταν το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία. Όταν ο αναγεννητής χρειάζεται να παράγει ψύξη, η ηλεκτρομαγνητική πνευματική βαλβίδα η οποία συνδέεται με την αντλία ψεκασμού υπό τον αναγεννητή θα είναι ανοιχτή, το νερό εξόδου από τον αναγεννητή και τον απαεριωτή θα αναμιχθεί και θα αρχίσει να ρέει μέσα στον τελευταίο. Όταν η στάθμη του νερού του απαεριωτή ανεβαίνει το νερό θα ξεχειλίσει μέσα στον αναγεννητή. Η ψυκτική ισχύς του ανεμιστήρα στην καμπίνα του οδηγού ορίζεται σε 5kW. Η ταχύτητα εξόδου του αέρα είναι ρυθμιζόμενη.



Σχήμα 5.1. 4. Σχηματικό διάγραμμα του κλιματιστικού προσρόφησης [34-35]

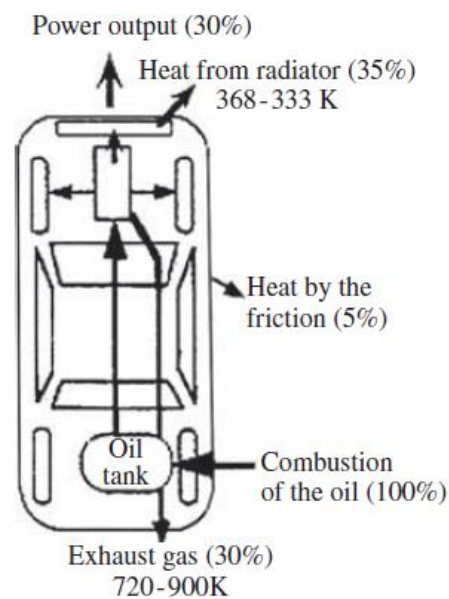
4 Συσκευή εναλλαγής αερίου/ αέρα εξάτμισης.

Όταν το σύστημα κλιματισμού λειτουργεί, τα καυσαέρια του κινητήρα και ο αέρας ψύξης εναλλάξ ρέει μέσω του προσροφητή. Ο διακόπτης λειτουργείται από μια ειδική συσκευή, η οποία είναι ένα σύστημα ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας κυλίνδρου. Το καυσαερίων εξόδου του υπερσυμπιεστή του κινητήρα εξάγονται στην ατμόσφαιρα μέσω δύο καμινάδων. Η πλευρά της καμινάδας κοντά στην καμπίνα του πρώτου οδηγού είναι συνδεδεμένη με την είσοδο του προσροφητή για καυσαέρια από μια τριοδική πνευματική βαλβίδα. Υπάρχει μια είσοδο αέρα και στις δύο πλευρές της οροφής του τμήματος κινητήρα εκτός από την καμπίνα του πρώτου οδηγού. Η περιοχή της εισόδου αέρα είναι περίπου 250 χιλιοστά × 140 χιλιοστά, και συμπεριλαμβανομένης της κεφαλής-με την περιοχή της το διάφραγμα και τις δύο πλευρές, η συνολική έκταση είναι 395 χιλιοστά × 140 mm. Ο άνεμος εισόδου της αιολικής ενέργειας πηγαίνει στο προσροφητή και ψύχει τη βαθμίδα του προσροφητικού όταν η ατμομηχανή βρίσκεται σε λειτουργία. Υπάρχει μια πνευματική βαλβίδα μεταξύ της εισόδου του αέρα και της εισόδου αερίου του προσροφητή. Στη διαδικασία θέρμανσης/εκρόφησης, ο κύλινδρος της πνευματικής βαλβίδας ανοίγει και η βαλβίδα είναι απενεργοποιημένη. Για άλλες διεργασίες ο κύλινδρος είναι κλειστός και η βαλβίδα είναι ανοικτή.

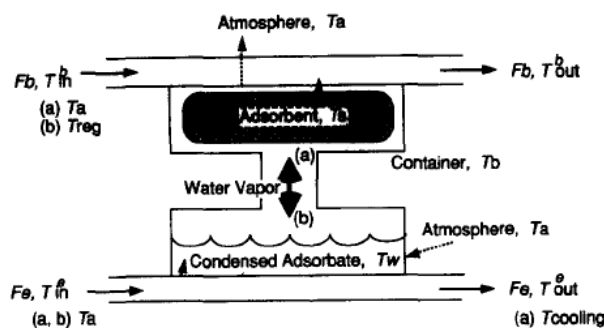
Μια άλλη εφαρμογή όπου χρησιμοποιείται η αποβαλλόμενη θερμότητα σε συστήματα προσρόφησης παρουσιάζεται παρακάτω.

Ο ερευνητής **M. Suzuki** μελέτησε την χρησιμοποίηση της αποβαλλόμενης θερμότητας από μηχανή αυτοκινήτου [36]. Ένας κινητήρας αυτοκινήτου όταν βρίσκεται σε λειτουργία, αποδίδει ισχύ εξόδου τιμές από 0-42% (ντίζελ) ή 25-30% (βενζίνη) της συνολικής ενέργειας. Η απορριπτόμενη θερμότητα στο

περιβάλλον για ένα αυτοκινούμενο όχημα κυμαίνεται σε 58-70% (ντίζελ) ή 70-75% (βενζίνη) της συνολικής ενέργειας της καύσης καυσίμων, συμπεριλαμβανομένης της θερμότητας που λαμβάνεται από το κυκλοφορούν νερό ψύξης και της θερμότητας εξάτμισης που έχει ληφθεί από τη θερμότητα καυσαερίων. Η απορριπτόμενη θερμότητα των καυσαερίων χαρακτηρίζεται από υψηλή θερμοκρασία, και αντιπροσωπεύει το 25-45% (ντίζελ) ή 30-40% (βενζίνη) της συνολικής θερμότητας καύσης. Οι θερμοκρασίες των καυσαερίων του κινητήρα κυμαίνονται σε τιμές μεταξύ των 450-550 °C. Λαμβάνοντας υπόψη το σημείο δρόσου διάβρωσης των όξινων οξειδίων στα καυσαέρια, η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή των 180 °C.



Σχήμα 5.1.5. Διάγραμμα ροής ενέργειας για βενζινοκίνητο όχημα [36]



Σχήμα 5.1.6. μοντέλο προσρόφησης του συστήματος ψύξης.

(α) βήμα προσρόφησης, (β) βήμα αναγέννησης [36]

5.2. Ηλιακά συστήματα ψύξης με προσρόφηση

Απόδοση του συλλέκτη

Για να καταφέρουμε να υπολογίσουμε την επίδοση ενός ηλιακού συλλέκτη προσρόφησης, αρκεί να γνωρίζουμε το βαθμό αποτελεσματικότητας του και την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Η αποτελεσματικότητα του ηλιακού συλλέκτη συμβολίζεται με η και ορίζεται ως ο λόγος της θερμικής ενέργειας που μετατρέπεται (η οποία συμβολίζεται με Q_{seff}) προς την πραγματική ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας (η οποία συμβολίζεται με Q_{solar}):

Απόδοση συλλέκτη:

$$\eta = \frac{Q_{seff}}{Q_{solar}}$$

Αποτελεσματική θερμική ισχύς :

$$\int_{T_1}^{T_2} M_{\alpha}(C_{pa} + xC_{pr}) + M_m C_{pm} dT + L_{ref} \Delta x M_{\alpha}$$

Ηλιακή ακτινοβολία:

$$Q_s = \int_0^t I_{(t)} A_{seff} dt$$

Όπου M_{α} είναι η μάζα του προσροφητικού μέσου, C_{pa} είναι η ειδική θερμότητα του προσροφητικού, C_{pr} είναι η ειδική θερμότητα του ψυκτικού, x είναι η ποσότητα προσρόφησης, $M_m C_{pm}$ είναι η θερμοχωρητικότητα ολόκληρου του συλλέκτη προσρόφησης εκτός από το προσροφητικό και το ψυκτικό, L_{ref} συμβολίζει τη λανθάνουσα θερμότητα του ψυκτικού, I είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, A_{seff} είναι η αποτελεσματική περιοχή του συλλέκτη και t είναι η διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας.

Από την άλλη μεριά, η θερμοκρασία του ηλιακού συλλέκτη συνιστά επίσης σημαντική παράμετρο που επηρεάζει την απόδοση του. Σχετίζεται άμεσα με το βαθμό εκρόφησης του προσροφητικού μέσου. Για να επιτύχουμε βέβαια υψηλή αποδοτικότητα στο συλλέκτη μας δεν αρκεί μόνο η θερμοκρασία του συλλέκτη να είναι υψηλή αλλά και η δομή του να είναι σωστά κανονισμένη.

5.2.1 Απόδοση ψύξης

Η απόδοση ψύξης ενός ηλιακού συστήματος προσρόφησης ψύξης μπορεί να αναγράφεται με τον συντελεστή απόδοσης (COP). Συνήθως υπάρχουν δύο συντελεστές. Ο ένας είναι συντελεστής απόδοσης ψύξης του συστήματος προσρόφησης. Μπορεί να εκφραστεί ως η αναλογία της ικανότητας ψύξης προς την αποτελεσματική ισχύ θέρμανσης που παρέχεται από τον συλλέκτη προσρόφησης:

$$COP_{ref} = \frac{Q_{ref}}{Q_{seff}}$$

Όπου Q_{ref} είναι η ψυκτική ικανότητα.

Ισχύει ότι :

$$Q_{ref} = Q_{eref} - Q_{cc}$$

Όπου Q_{eref} είναι η ψυκτική ικανότητα της εξάτμισης μέσα στον απαεριωτή, και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_{eref} = \Delta x M_{\alpha} L_{ref}$$

Όπου $\Delta x M_{\alpha}$ είναι μάζα εκρόφησης του ψυκτικού στη διαδικασία θέρμανσης του προσροφητικού. Q_{cc} είναι η αισθητή θερμότητα απελευθέρωσης από το ψυκτικό στη διαδικασία της ψύξης από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης στη θερμοκρασία εξάτμισης.

$$Q_{cc} = \int_{T_e}^{T_c} M_{\alpha} C_{pr} \Delta x dT$$

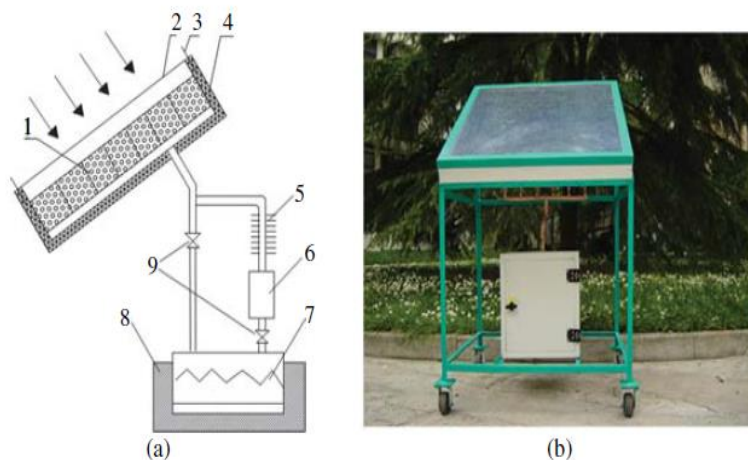
Ο Δεύτερος συντελεστής απόδοσης που καθίσταται πολύ σημαντικός είναι εκείνος της απόδοσης ψύξης από την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτός εκφράζεται ως ο λόγος της ψυκτικής ικανότητας προς την συνολική ενέργεια , λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, του συλλέκτη προσρόφησης:

$$COP = \frac{Q_{ref}}{Q_{solar}}$$

5.2.2. Τύπος συλλέκτη επίπεδου πιάτου (flat-plate collector)

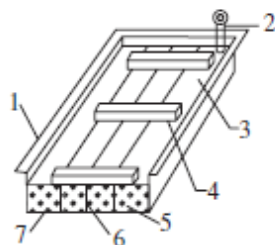
Το βασικό στοιχείο που συνθέτει ένα τέτοιου τύπου συλλέκτη είναι το επίπεδο πιάτο που είναι ο συλλέκτης. Ο συλλέκτης αποτελείται από μια επίπεδη βαθμίδα προσρόφησης , το πιάτο γυαλιού σαν επικάλυψη ,μονωτικό υλικό και μια βαλβίδα στραγγαλισμού. Η δομή του ηλιακού συλλέκτη και συγκεκριμένα της

επίπεδης ηλιακής βαθμίδας προσρόφησης φαίνεται στις παρακάτω εικόνες(σχήμα 5.2.2.1, 5.2.2.2) [37].



1-Adsorber; 2-Glass cover plate; 3-Air throttle valve of adsorption bed;
4-Thermal insulation material; 5-Condenser; 6-Liquid receiver;
7-Evaporator; 8-Refrigerator shell; 9-Vacuum valve

Σχήμα 5.2.2 1. Ηλιακός ψύκτης προσρόφησης. (α) διάγραμμα βασικών αρχών , (β) φωτογραφία του συστήματος. [37]



1 - The bottom surface of the adsorber after the back cover plate was dismantled;
2 - The inlet channel of the refrigerant;
3 - The chamber for collecting the desorbed refrigerant vapor;
4 - Strengthening rib; 5-Activated carbon; 6-Heat transfer fins;
7 - The former heat transfer plate of the adsorber

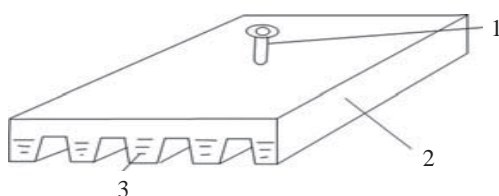
Σχήμα 5.2.2.2. ηλιακή βαθμίδα προσρόφησης τύπου "επίπεδο πιάτο" [37]

Σε αυτό το επίπεδο σύστημα προσρόφησης χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα εργαζόμενα μέσα τα οποία δουλεύουν μόνο κάτω από κατάσταση κενού διότι αυτό το σύστημα έχει χαρακτηριστικό να μην δουλεύει κάτω από καταστάσεις υψηλής πίεσης. Ορισμένα από τα προσροφητικά μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται για να πληρώσουν τη βαθμίδα της προσρόφησης είναι ο ενεργοποιημένος άνθρακας , και μικροσκοπικά μόρια ζεόλιθου. Η μεταφορά μάζας και θερμότητας αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η θερμική ισχύς που προέρχεται από την πηγή θερμότητας, δηλαδή τον ήλιο, θα πρέπει να

μεταφέρεται στον προσροφητή με τον καλύτερο δυνατό τρόπο κατά τη διαδικασία της εκρόφησης, έτσι ώστε να μπορέσει να εκροφηθεί τον ψυκτικό. Ενώ από την άλλη πλευρά, στην διαδικασία της προσρόφησης, πρέπει όσο είναι δυνατό, η λανθάνουσα θερμότητα του προσροφητή και η θερμότητα προσρόφησης, να απελευθερωθούν.

Σε ένα τέτοιο σύστημα ψύξης, με ενεργοποιημένο άνθρακα ως εργαζόμενο μέσο, οι αλλαγές πίεσης είναι μικρές και λειτουργεί κάτω από κατάσταση κενού. Στο σύστημα αυτό ως συμπιεστής είναι ο προσροφητής, ο οποίος οδηγείται από τη διαφορά πίεσης του συστήματος. Έτσι για να εξασφαλιστεί η ροή του ατμού του ψυκτικού μέσω των εξαρτημάτων του συστήματος με ευχέρεια, τα κανάλια ροής των συνιστωσών του συστήματος θα πρέπει να είναι λεία. Έτσι ο συμπυκνωτής πρέπει να χρησιμοποιεί τους σωλήνες πτερυγίων με σχετικά μεγάλη διάμετρο. Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να ενισχυθεί η διαδικασία ψύξης για τον εκροφημένο ψυκτικό ατμό και μπορεί να εξασφαλιστεί η ομαλή ροή του ατμού διαμέσου του συμπυκνωτή.

Ο σχεδιασμός του απαεριωτή πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψιν δυο βασικούς παράγοντες. Από τη μία πλευρά, η λανθάνουσα θερμότητα εξατμησης στον απαεριωτή θα πρέπει να ελευθερώνεται στο περιβάλλον γρήγορα, οπότε θα πρέπει να υπάρχει μια μεγάλη περιοχή μεταφοράς θερμότητας. Από την άλλη πλευρά, θα πρέπει να υπάρχει αρκετός χώρος για να φιλοξενήσει το υγρό ψυκτικό που εκροφάται από τον προσροφητή. Ένας τέτοιος απαεριωτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.2.2.3.



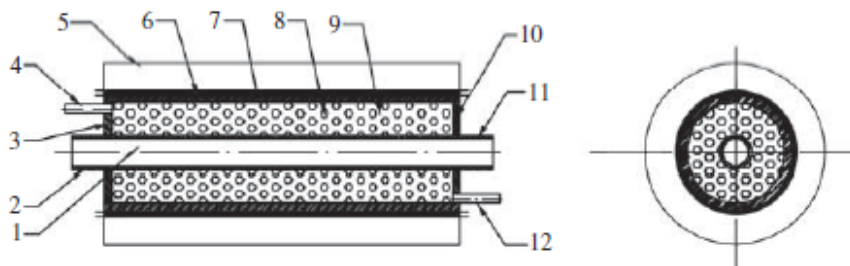
1 - The interface for the refrigerant; 2 - The shell of the evaporator; 3 - The liquid refrigerant

Σχήμα 5.2.2.3. Απαεριωτής [37]

5.2.3 Υδροψυκτος εκκενωμένος συλλέκτης προσρόφησης

Ο συλλέκτης προσρόφησης κενού προσρόφησης πάγου έχει το σχήμα ομόκεντρων κυλίνδρων. Το εξωτερικό στρώμα είναι ένας γυάλινος σωλήνας, το δεύτερο στρώμα μπορεί να είναι ένας γυάλινος σωλήνας ή ένας σωλήνας επικαλυμμένος με επίστρωση που εμείς θα επιλέξουμε. Υπάρχουν σωλήνες ψύξης νερού στο ενδιάμεσο του σωλήνα, και οι χώροι μεταξύ των σωλήνων ψύξης νερού και των εσωτερικών σωλήνων γεμίζονται με προσροφητικό μέσο το

οποίο προέρχεται από διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης. Το κανάλι μεταφοράς μάζας αντιστοιχεί στους πόρους του προσροφητικού μέσου. Οι χώροι μεταξύ των γυάλινων σωλήνων και των εσωτερικών θαλάμων εκκενώνονται. Ο γυάλινος σωλήνας επιτρέπει το ορατό φως και εμποδίζει την εσωτερική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, η οποία εγγυάται την καλή θερμική μόνωση. Το κενό βοηθάει στο σύστημά μας να αποτρέψει την απώλεια θερμότητας εκ συναγωγής μεταξύ του εξωτερικού κυλίνδρου και της γυάλινης πλάκας. Το νερό ψύξης μειώνει τη θερμότητα προσρόφησης στη διαδικασία της προσρόφησης και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ζεστό νερού για τους χρήστες. Ολόκληρος ο κύλινδρος προσρόφησης βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια η οποία μπορεί να αντανακλά το φως. Αρκετές φιάλες προσρόφησης συνδυάζονται μαζί για να συνθέσουν ένα προσροφητή. Η συνολική διαδικασία των ηλιακών συλλεκτών που αναλύσαμε παραπάνω είναι παρόμοια με τη διαδικασία των συλλεκτών που επιτυγχάνουν οι σωλήνες κενού. Ωστόσο, το προσροφητικό πρέπει να συμπληρωθεί στους σωλήνες. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασιακή συλλογή τόσο υψηλότερη μπορεί να είναι η θερμοκρασία εκρόφησης, εάν και εφόσον βέβαια οι παράμετροι που αφορούν στη δομή και η ποσότητα του προσροφητικού είναι κατάλληλα, και επίσης η απόδοση συλλογής και η κυκλοφορούσα μάζα του ψυκτικού μπορούν να βελτιωθούν, και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση του συστήματος [38].



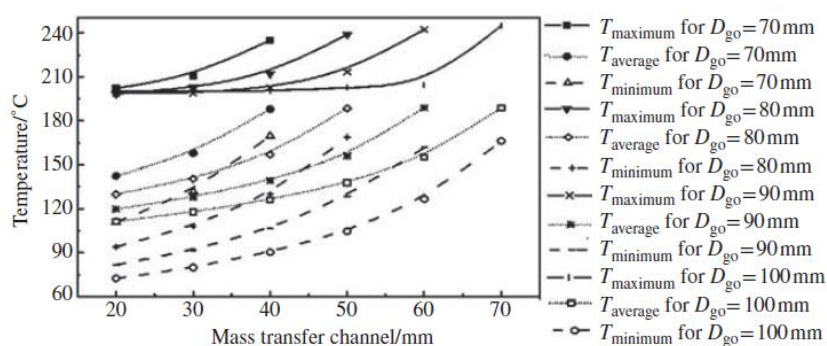
1,2 - Water inlet; 3 - The upper cover of the adsorption collector; 4 - Refrigerant inlet;
5 - External transparent glass tube; 6 - Selective coating; 7 - Inner cylinder filled with adsorbent;
8 - Adsorbent particles; 9 - Clearance among particles; 10 - Lower cover of the adsorption collector tube;
11 - Water outlet; 12 - refrigerant outlet

Σχήμα 5.2.3.1. Εκκενωμένος συλλέκτης προσρόφησης από γυαλί [300]

5.2.4 Πως επηρεάζουν οι παράμετροι κατασκευής την απόδοση του συλλέκτη προσρόφησης

1. Εκκενωμένοι σωλήνες και διάμετρος του εσωτερικού καναλιού

Κάτω από τις συνθήκες σταθερής έντασης της ακτινοβολίας του ηλίου, η μέγιστη θερμοκρασία εκρόφησης περιορίζεται από τη μάζα του προσροφητικού μέσου. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία εκρόφησης σχετίζεται με τη διάμετρο του εκκενωμένου σωλήνα και τη διάμετρο του καναλιού μεταφοράς μάζας. Οι πειραματικές καμπύλες που εικονίζονται παρακάτω μας δείχνουν ότι η αύξηση της διαμέτρου του καναλιού μεταφοράς μάζας συνεπάγεται αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας, αύξηση της μέσης θερμοκρασίας και αύξηση του ρυθμού αλλαγής της ελάχιστης θερμοκρασίας του ηλιακού συλλέκτη προσρόφησης. Όταν η διάμετρος του καναλιού μεταφοράς μάζας είναι ίση με τη διάμετρο των εκκενωμένων σωλήνων, τότε οι θερμοκρασίες των εκκενωμένων σωλήνων είναι σχεδόν σταθερές. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία του συλλέκτη και η διάμετρος του κενού σωλήνα έχουν μικρή σημασία όταν το πάχος του προσροφητή είναι το ίδιο. Τα παραπάνω παριστάνονται στο διάγραμμα (σχήμα 5.2.4.1).

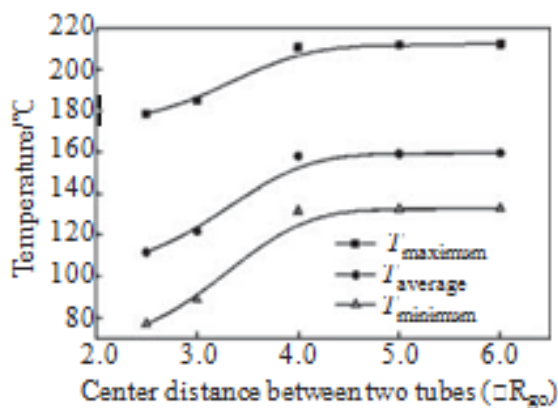


Σχήμα 5.2.4.1. Θερμοκρασιακές μεταβολές του συλλέκτη προσρόφησης σε συνάρτηση με τη μάζα μεταφοράς, τις διαμέτρους των σωλήνων και του εσωτερικού καναλιού. [38]

2. Απόσταση κέντρων γειτονικών σωλήνων

Όταν οι εκκενωμένοι σωλήνες εφαρμόζονται ως συλλέκτης προσρόφησης, λόγω του ορίου της μάζας του προσροφητικού σε ένα μόνο σωλήνα, οι σωλήνες συνήθως συνδυάζονται για να σχηματίσουν τον προσροφητή σύμφωνα με μια απαιτούμενη περιοχή. Εν τω μεταξύ, προκειμένου να αυξηθεί η μέγιστη θερμοκρασία του συλλέκτη και να μειωθεί το κόστος, η απόσταση μεταξύ των σωλήνων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την τη διάταξή τους. Υπολογίσαμε τη σχέση της απόστασης των κέντρων μεταξύ δύο γειτονικών σωλήνων και της αλλαγής θερμοκρασίας ενός συλλέκτη προσρόφησης με διάμετρο 70 mm, και καταλήξαμε στα παρακάτω αποτελέσματα τα οποία φαίνονται στο σχήμα 6. Από το σχήμα μπορούμε να δούμε ότι, όταν η απόσταση των κέντρων είναι δύο φορές μικρότερη από τη διάμετρο του σωλήνα, η μέση θερμοκρασία της προσρόφησης του συλλέκτη επηρεάζεται από την απόσταση

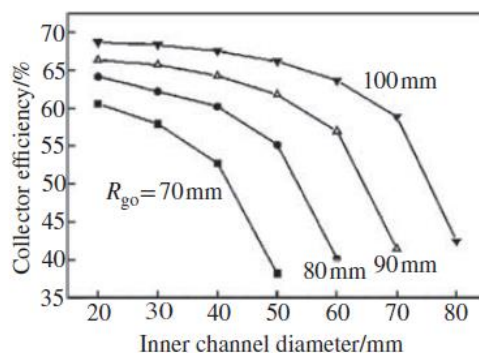
των κέντρων των σωλήνων . Όταν απόσταση κέντρων είναι ίση ή μεγαλύτερη από το διπλάσιο της διαμέτρου του σωλήνα, η μέση θερμοκρασία φτάνει στο υψηλότερο της και τείνει να είναι μία σταθερά.



Σχήμα 5.2.4.2. Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας των εκκενωμένων σωλήνων και της απόστασης των κέντρων των γειτονικών σωλήνων [38]

3. Αποδοτικότητα του συλλέκτη

Η αποδοτικότητα του συλλέκτη είναι συνήθως ένας σημαντικός δείκτης για την επίδοση του συλλέκτη. Το σημαντικότερο κομμάτι είναι το πόσο περισσότερη ακτινοβολούμενη ενέργεια θα μετατρέπεται σε θερμότητα. Ύστερα από υπολογισμούς τα αποτελέσματα της αποδοτικότητας της εκμετάλλευσης της θερμότητα από τους συλλέκτες με τέσσερα είδη εκκενωμένων σωλήνων με διαφορετικές διαμέτρους και διαφορετικές διαμέτρους των καναλιών μεταφοράς μάζας φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 5.2.4.3 .

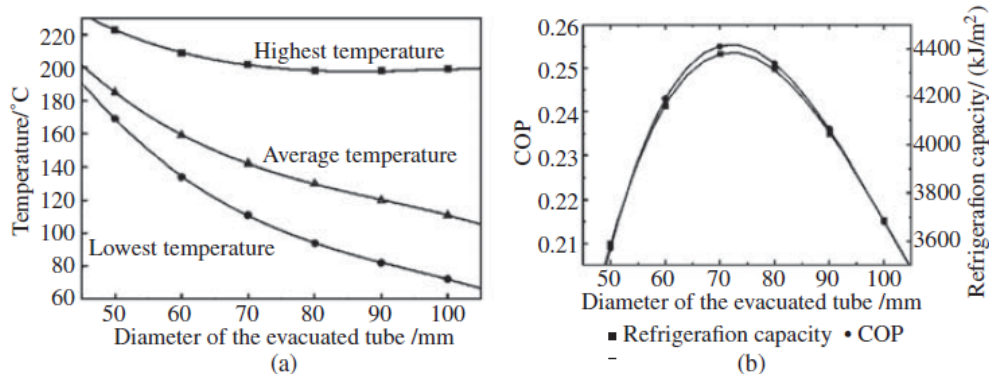


Σχήμα 5.2.4.3. Η αποδοτικότητα του συλλέκτη σε συνάρτηση με την διάμετρο του εσωτερικού καναλιού. [38]

Προφανώς, όταν η διάμετρος του καναλιού είναι σταθερή, η θερμική αποδοτικότητα θα παρουσιάσει αύξηση με την αύξηση της διαμέτρου σωλήνα ενώ όταν η διάμετρος του σωλήνα είναι σταθερή, η θερμική απόδοση θα αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου του καναλιού. Όταν η διαφορά μεταξύ των διαμέτρων των σωλήνων και των καναλιών είναι περίπου 40mm το ποσοστό μείωσης είναι σημαντικό και η θερμοκρασία αυξάνεται ταχέως. Αυτό συμβαίνει λόγω της μικρής μάζας του προσροφητικού και προσροφημένου ψυκτικού.

4. Πως επηρεάζεται η απόδοση του συστήματος

Όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σταθερή, η θερμοκρασία του προσροφητικού σχετίζεται με τη μάζα του προσροφητικού, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος, τόσο μικρότερο είναι το προσροφητικό, και τόσο υψηλότερη θερμοκρασία του προσροφητή μπορεί να επιτευχθεί, αλλά η ικανότητα ψύξης του συστήματος είναι δεν είναι πάντα η υψηλότερη. Για να πετύχουμε την καλύτερη απόδοση του συστήματος πρέπει να επιλεγεί η βέλτιστη διάμετρος. Το Σχήμα 5.2.4.4 δείχνει τις σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας του συλλέκτη, του συντελεστή απόδοσης του συστήματος COP και της ικανότητας ψύξης του ηλιακού συστήματος και της διαμέτρου του σωλήνα κατά την ψύξη όταν η διάμετρος του καναλιού μεταφοράς μάζας είναι 20 mm και η απόσταση των κέντρων των γειτονικών σωλήνων είναι διπλάσια από αυτή της διαμέτρου του σωλήνα. Όταν η διάμετρος του σωλήνα είναι μεγαλύτερη από 70 mm, η μέγιστη θερμοκρασία δεν θα αλλάξει. Όταν η διάμετρος του σωλήνα είναι 70 mm έχει επιτευχθεί ο μέγιστος βαθμός απόδοσης COP και η μέγιστη ψυκτική ικανότητα.

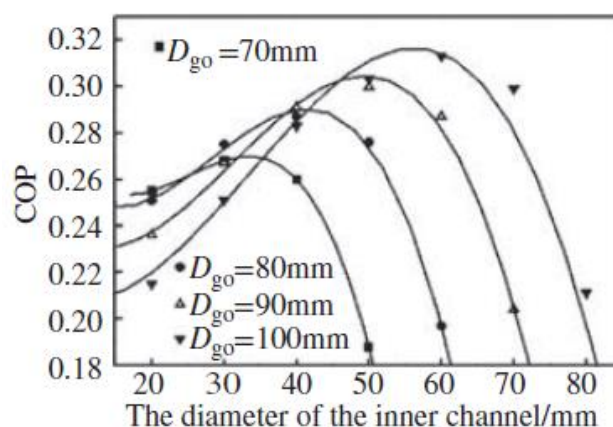


5. Πάχος του προσροφητικού μέσου

Το σχήμα 5.2.4.5 δείχνει τις αλλαγές του COP του συστήματος με τη διάμετρο του εσωτερικού καναλιού του σωλήνα όταν η διάμετρος του σωλήνα είναι διαφορετική. Εάν τα αποτελέσματα υπολογισμού των τεσσάρων διαφορετικών διαμέτρων των σωλήνων έρθουν σε σύγκριση, μπορεί να βρεθεί ότι η καλύτερη εσωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι 40 χιλιοστά μικρότερη από το διάμετρο του σωλήνα. Το πάχος του προσροφητικού μέσου είναι περίπου 30 mm. Η COP

Σχήμα 5.2.4.4. Η επιρροή της διαμέτρου του σωλήνα στην απόδοση του συστήματος. (α) διάμετρος σωλήνα συναρτήσει θερμοκρασίας, (β) διάμετρος σωλήνα συναρτήσει απόδοσης. [38]

θα αυξηθεί όταν η αυξηθεί διάμετρος του σωλήνα.

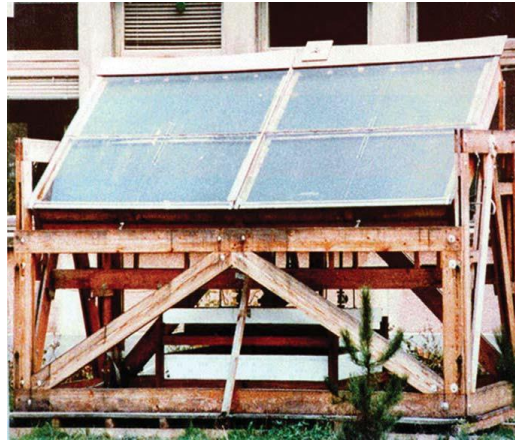


Σχήμα 5.2.4.5. COP συναρτήσει του πάχους του προσροφητικού [38]

5.2.5 Ενιαίο ηλιακό σύστημα προσρόφησης

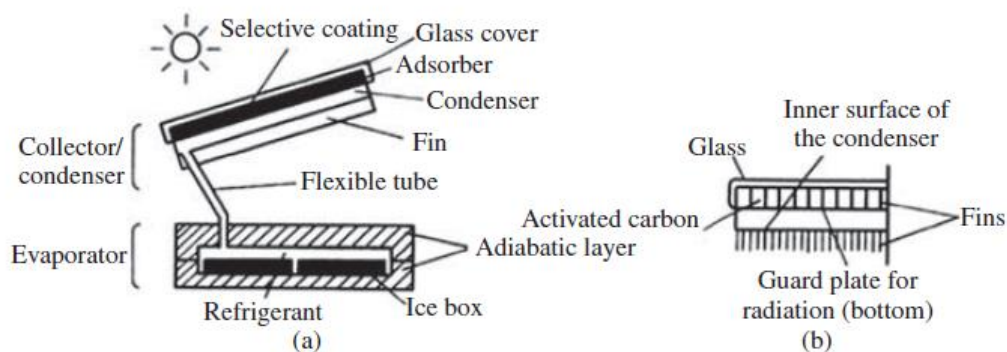
A) Παγομηχανή προσρόφησης από ηλιακό συλλέκτη επίπεδου πιάτου

Με βάση την έρευνα τους, σχετικά με την τεχνολογία ψύξης με προσρόφηση, οι ερευνητές **Pons** και **Guilleminot** θεωρούν ότι είναι εφικτό να συνδυάσουμε τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση με τα ηλιακά συστήματα. Το 1986 ανέπτυξαν ένα ηλιακό σύστημα ψύξης με προσρόφηση το οποίο χρησιμοποιούσε ως εργαζόμενο μέσο ενεργοποιημένο άνθρακα-μεθανόλη. Η δομή του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 5.2.5.1 [39,40].



Σχήμα 5.2.5.1. Παγομηχανή ηλιακής προσρόφησης επίπεδου πιάτου.[39-40]

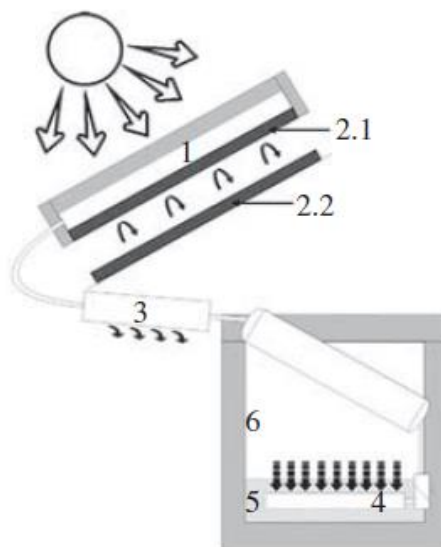
Όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι $20\text{MJ} / (\text{m}^2 \text{ ημερησίως})$, η μάζα του πάγου που παράγεται είναι περίπου $6 \text{ kg} / \text{m}^2$ του συλλέκτη. Ο συντελεστής ηλιακής ψύξης είναι περίπου ίσος με 0,12. Το σύστημα μας συνδύαζε τον συλλέκτη προσρόφησης και τον συμπυκνωτή μαζί. Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 5.2.5.2.



Σχήμα 5.2.5.2 (α) σχηματικό διάγραμμα του ice maker, (β) διατομή του συλλέκτη- συμπυκνωτή [39-40]

Ο συλλέκτης προσρόφησης – συμπυκνωτής αποτελείται από δύο κελύφη από ανοξείδωτο χάλυβα με πάχος 90 χιλιοστά, η περιοχή του συλλέκτη 1m^2 και μία γωνία 20° . Το άνω κέλυφος παίζει ένα ρόλο ως επίστρωση στον συλλέκτη με επένδυση της επιλογής μας ενώ τα εσωτερικά πτερύγια χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση της απόδοσης της μεταφοράς θερμότητας. Το κάτω κέλυφος με τα πτερύγια παίζει το ρόλο του αερόψυκτου συμπυκνωτή. Ένας απαεριοστής (η περιοχή εξάτμισης είναι 0.3m^2) τοποθετείται σε μια αδιαβατική δεξαμενή πάγου (όγκος 5,2 lt). Η ικανότητα παρασκευής πάγου είναι περισσότερο από $4 \text{ kg} / \text{m}^2$ σε 10% των ημερών σε ένα έτος. Ο ηλιακός συντελεστής ψύξης είναι περίπου 0,12. Το σχήμα 9.22 δείχνει το ηλιακό σύστημα παραγωγής πάγου με

προσρόφησης. Το εργαζόμενο μέσο, όπως είπαμε είναι ενεργοποιημένος άνθρακας-μεθανόλη. Στο πίσω μέρος του συλλέκτη έχουμε μια βαλβίδα. Ο συλλέκτης προσρόφησης είναι με μονό με γυάλινο κάλυμμα. Ο συμπυκνωτής ψύχεται με φυσική συναγωγή του αέρα. Η βαλβίδα είναι ανοιχτή το βράδυ για να εντείνει τη διασπορά θερμότητας του συλλέκτη τη νύχτα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι $22-25 \text{ MJ} / (\text{m}^2 \text{ day}^2)$, ο συντελεστής ψύξης της ηλιακής παγομηχανής είναι περίπου 0,09 έως 0,1. Ο πάγος που παράγεται τη νύχτα αποθηκεύεται στο ψυγείο. Η θερμοκρασία



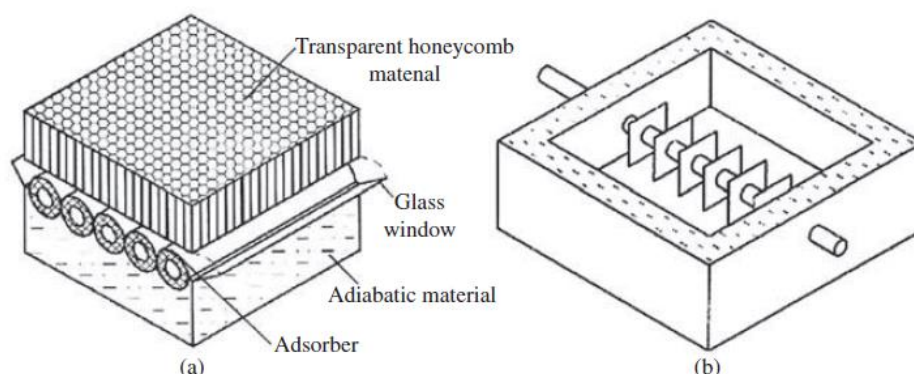
1 - Adsorber/collector; 2 - Throttle (position 1: close, and position 2: open);
3 - Condenser. 4 - Evaporator; 5 - Ice storage device; 6 - The shell of refrigerator

Σχήμα 5.2.5.3. επίπεδο πιάτο ηλιακής προσρόφησης με βαλβίδα.[39-40]

ψυγείου διατηρείται στους $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Β) Ηλιακό σύστημα ψύξης με προσρόφηση με διαφανή κυψελοειδή επικάλυψη

Ο ερευνητής **Leite** πρότεινε ένα ηλιακό ψυκτικό σύστημα προσρόφησης, με συλλέκτη επίπεδης πλάκας, με ένα κάλυμμα από διαφανές κυψελοειδές υλικό. Το ζεύγος εργασίας του είναι ενεργοποιημένος άνθρακας-μεθανόλη, και ότι λειτουργεί σε κατάσταση κενού. Τα κύρια εξαρτήματα της συσκευής που φαίνεται στο σχήμα 5.2.5.4. [41].



Σχήμα 5.2.5.4. Ηλιακός συλλέκτης προσρόφησης με αποσπώμενο κομμάτι. (α) Συμπυκνωτής, (β) απαεριωτής [41]

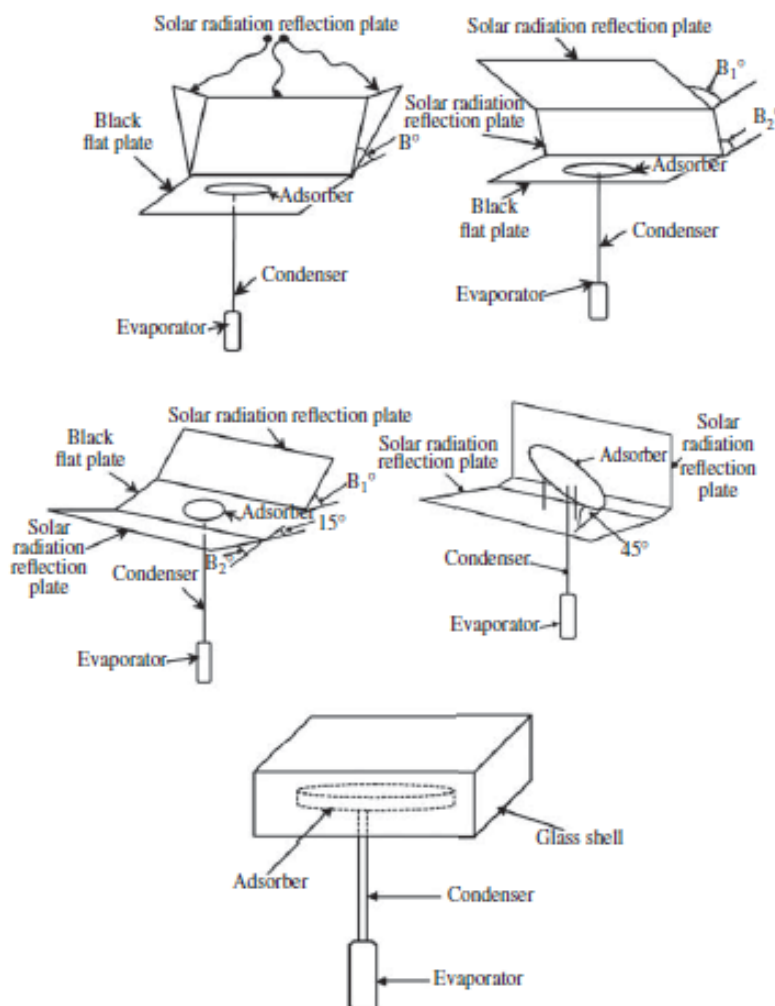
Η περιοχή του συλλέκτη προσρόφησης είναι 1m^2 . Ο συλλέκτης αποτελείται από 13 σωλήνες χαλκού με διάμετρος 76mm και μήκος 1 m. Είκοσι kg ενεργού άνθρακα είναι συσκευασμένα μέσα στο προσροφητή, και επίσης υπάρχουν κανάλια μεταφοράς μάζας στους σωλήνες. Υπάρχει μια διαφανής κερήθρα η οποία καλύπτει την επιφάνεια του συλλέκτη προσρόφησης και η κάτω επιφάνεια είναι μονωμένη. Ο συμπυκνωτής είναι ένας μεταλλικός σωλήνας (διάμετρου 50 mm, μήκους 600 mm, και 11 τετραγωνικά πτερύγια με μήκος 150 mm) και τοποθετήθηκε σε ένα θερμικά απομονωμένο δοχείο 80lt. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι $20\text{-}60\text{W} / (\text{m}^2\text{C})$. Ο απαεριωτής αποτελείται από οκτώ συνδεδεμένους οριζόντιους σωλήνες με διάμετρο 50 mm και μήκος 500 mm. Μελέτες έχουν δείξει ότι η ικανότητα ψύξης είναι περίπου $7\text{-}10\text{ kg} / (\text{m}^2\text{day})$ όταν η ακτινοβολία είναι $20\text{-}23\text{ MJ} / \text{m}^2$.

Γ) Ηλιακή προσρόφηση με ανακλώμενο πιάτο

Το σχήμα 5.2.5.5 δείχνει ένα σύστημα ηλιακής προσρόφησης ενεργού άνθρακα με μεθανόλη το οποίο παράγει πάγο. Σε αυτό το ηλιακό σύστημα προσρόφησης, ο προσροφητής τοποθετείται σε ένα γυάλινο δοχείο. Η πλάκα ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του προσροφητή. Με αυτή τη δομή, από τη μία πλευρά, το προσροφητικό μπορεί να θερμαίνεται ομοιόμορφα σε όλη την εξωτερική του επιφάνεια από την άλλη πλευρά, επειδή ο προσροφητής, συμπυκνωτής, και ο απαεριωτής τοποθετούνται σε ένα γυάλινο δοχείο, μπορεί να μειωθεί η πιθανότητα οποιασδήποτε διαρροής. Στην παγομηχανή αυτή της ηλιακής προσρόφησης, η περιοχή της κάθε ηλιακής ανακλώμενης ακτινοβολίας είναι 0.04m^2 , η διάμετρος του κυλινδρικού προσροφητή είναι 0.2m και το πάχος είναι 0.05 m. Ο ερευνητής **Khatab**

δοκίμασε την υψηλότερη θερμοκρασία εκρόφησης για διαφορετικές γωνίες της πλάκας αντανάκλασης. Επιπλέον, ο ίδιος πρότεινε τέσσερις άλλες μεθόδους για να βελτιώσει την απόδοση του προσροφητή.

Η πρώτη είναι να τυλίξει ένα μαύρο μεταλλικό πλέγμα στην εξωτερική επιφάνεια του προσροφητή, η δεύτερη είναι να τυλίξει μια μαύρη μεταλλική πλάκα στην εξωτερική επιφάνεια του προσροφητή, η τρίτη είναι η προσθήκη από μεταλλικά κοκκώδη στα προσροφητικά του ενεργοποιημένου άνθρακα, και η τελευταία είναι η στερεοποίηση των κόκκων του ενεργού άνθρακα με μεταλλικά κοκκώδη σωματίδια [42].



Σχήμα 5.2.5.5. πέντε διαφορετικές θέσεις για τον ηλιακό συλλέκτη προσρόφησης με ανακλώμενο πιάτο [42]

Ο Khattab μετά τη στερεοποίηση του ενεργού άνθρακα με μεταλλικά κοκκώδη σωματίδια, έκανε κάποιες πειραματικές δοκιμές με την τρίτο είδος της

συσκευής, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι $20\text{MJ} / \text{m}^2$, η μέση θερμοκρασία είναι $29\text{ }^\circ\text{C}$, ο συντελεστής ηλιακής ψύξης είναι υψηλότερος από 0,16, η χωρητικότητα πάγου είναι περίπου $9,4\text{ kg} / (\text{m}^2\text{ day})$, όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι $17\text{MJ} / \text{m}^2$, η μέση θερμοκρασία είναι $20\text{ }^\circ\text{C}$, ο ηλιακός συντελεστής ψύξης είναι υψηλότερη από 0,14, και η ικανότητα παραγωγής πάγου είναι περίπου $6.9\text{ kg} / (\text{m}^2\text{ day})$.

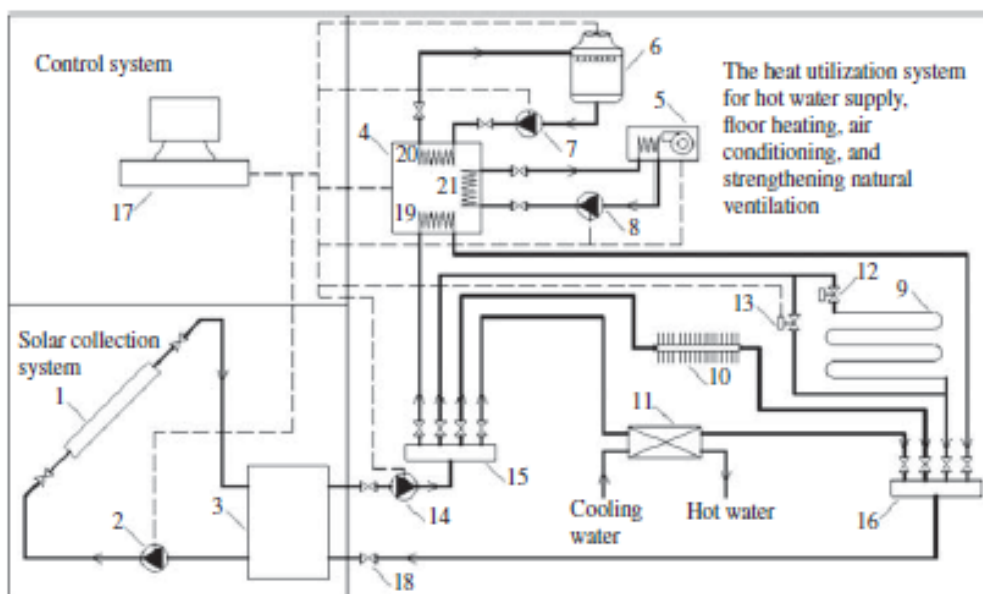
5.2.6 Ηλιακό σύστημα ψύξης με προσρόφηση με ξεχωριστά κομμάτια

Το χαρακτηριστικό ενός τέτοιου ηλιακού συστήματος ψύξης είναι ότι ο ηλιακός συλλέκτης και το σύστημα ψύξης με προσρόφηση είναι ανεξάρτητα.

A) Ηλιακό κλιματιστικό σύστημα προσρόφησης

Ο σχεδιασμός για τα ηλιακά κλιματιστικά συστήματα σε πράσινα κτίριο φαίνεται στο σχήμα 5.2.6.1. Δύο ψύκτες προσρόφησης οδηγούνται από χαμηλής θερμοκρασίας πηγή θερμότητας που χρησιμοποιούνται στο σύστημα [157].

Το ηλιακό σύστημα ενεργειακής αξιοποίησης που φαίνεται στο Σχήμα 6 αποτελείται από ένα ηλιακό σύστημα συλλογής, ένα ζεστό σύστημα παροχής νερού, ένα κύκλωμα θέρμανσης δαπέδου, ένα κύκλωμα κλιματισμού, ένα φυσικό σύστημα ενισχυμένου εξαερισμού, ένα σύστημα αξιοποίησης της θερμότητας, και ένα σύστημα ελέγχου. Τα συστήματα αυτά συνδέονται με σωλήνες και δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας, εκτός από το σύστημα του ελέγχου το οποίο ελέγχει το σύστημα του ηλιακού συλλέκτη από τη διαφορά θερμοκρασίας που μετριέται από τους αισθητήρες θερμοκρασίας



- 1 - The array of solar collectors, 2 - Circulation pump for collector, 3 - Heat storage water tank, 4 - Adsorption chiller, 5 - Fan coil, 6 - Cooling tower, 7 - Cooling water circulation pump, 8 - Chilling water circulation pump, 9 - Floor heating coil, 10 - Finned tube heat exchanger, 11 - Domestic hot water heat exchanger, 12 - Temperature control valve for floor heating, 13 - Bypass valve for floor heating, 14 - Hot water circulation pump, 15 - Bypass water tanks, 16 - Water collection tank, 17 - Industrial Personal Computer IPC, 18 - Flow control valve, 19 - Adsorbent bed, 20 - Condenser of adsorption chiller, 21 - Evaporator of adsorption chiller

Σχήμα 5.2.6.1 ηλιακά οδηγούμενο σύστημα εκμετάλλευσης ενέργειας [300]

Το ηλιακό σύστημα συλλογής στο σχήμα 5.2.6.2 περιλαμβάνει την ηλιακή σειρά συλλεκτών, την αντλία κυκλοφορίας και τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας. Το νερό στο κάτω μέρος της δεξαμενής αντλείται στην ηλιακή συστοιχία συλλεκτών από την αντλία κυκλοφορίας, και στη συνέχεια ρέει πίσω μέσα στο πάνω τμήμα της δεξαμενής αποθήκευσης της θερμότητας. Προκειμένου να αυξηθεί η θερμική απόδοση, χρησιμοποιείται η στρωματοποιημένη δεξαμενή ως δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας.

Το σύστημα αξιοποίησης θερμότητας περιλαμβάνει το υψηλής απόδοσης ψυγείο προσρόφησης, αερόψυκτους πύργους ψύξης, το πηνίο θέρμανσης, φυσικό σύστημα ενισχυμένου εξαερισμού από τον πτερυγωτό σωλήνα-εναλλάκτη θερμότητας, και από τον εναλλάκτη θερμότητας ζεστού νερού. Αποδοτικό ψυγείο προσρόφησης, πηνίο θέρμανσης, φυσικό σύστημα ενισχυμένου εξαερισμού από τον πτερυγωτό σωλήνα-εναλλάκτη θερμότητας, και εναλλάκτης θερμότητας ζεστού νερού χρήσης είναι συνδεδεμένα παράλληλα με σωλήνες. Με τον έλεγχο των βαλβίδων στους σωλήνες, ο εναλλάκτης θερμότητας ζεστού νερού τρέχει όλο το χρόνο. Ενώ οι άλλες τρεις τερματικές συσκευές λειτουργούν σύμφωνα με τις διαφορετικές απαιτήσεις για διαφορετικές εποχές.



Σχήμα 5.2.6.2. Πράσινα κτίρια [300]

Το σχήμα 5.2.6.3 δείχνει τη διαδικασία εργασίας του ηλιακού ψύκτη προσρόφησης. Πρώτον, η ηλιακή συστοιχία συλλεκτών θερμαίνει το νερό στο κάτω μέρος της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας, τότε το νερό ρέει μέσα στο άνω τμήμα της δεξαμενής και πηγαίνει στο ψύκτη προσρόφησης, και θερμαίνει την βαθμίδα εκρόφησης. Εν τω μεταξύ η άλλη βαθμίδα ψύχεται από τον πύργο ψύξης, και προσροφά τον ατμό ψυκτικού στον απαεριωτή. Η ικανότητα ψύξης παράγεται κατά τη διαδικασία εξάτμισης. Η ψύξη του νερού παρέχεται στο ψυγείο για διάφορους τομείς εφαρμογής από τους σωλήνες νερού. Στην διαδικασία εργασίας του ψυγείου ο ρυθμός ροής του νερού του ψυκτικού συγκροτήματος ελέγχεται από τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα. Όταν η θερμοκρασία του νερού στο άνω μέρος της δεξαμενής είναι μικρότερη από την επιλεγμένη θερμοκρασία του συστήματος, το ψυκτικό συγκρότημα, η αντλία κυκλοφορίας ζεστού νερού, η αντλία κυκλοφορίας του νερού ψύξης, ψύξη αντλία κυκλοφορίας νερού, και οι τερματικές συσκευές του κλιματισμού είναι όλα απενεργοποιημένα.



Σχήμα 5.2.6.3. Ηλιακές συστοιχίες σε ανατολική πλευρά [300]

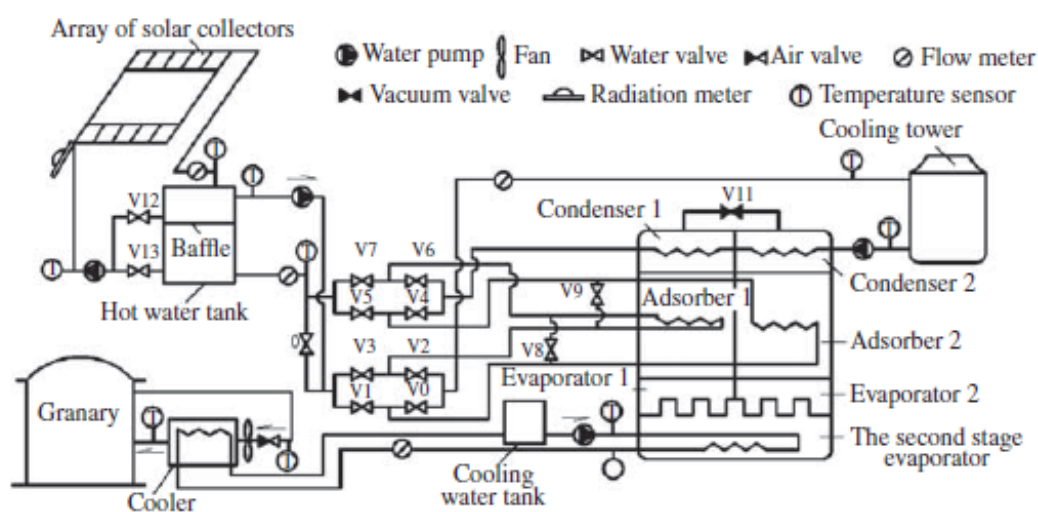
Β) Ηλιακός ψύκτης προσρόφησης σε σύστημα συγκομιδής σιτηρών

Η περίοδος συγκομιδής είναι μεγάλη και αυτό μας οδηγεί στο ότι το σύστημα συγκομιδής σιτηρών είναι ελκυστικό να συνδυαστεί με την τεχνολογία ψύξης με προσρόφηση και έτσι ο κόκκος θα διατηρείται κάτω από χαμηλή θερμοκρασία. Επιπλέον ένα τέτοιο σύστημα είναι ευνοϊκό για το ότι εμποδίζει την καλλιέργεια εντόμων και την ανάπτυξη μούχλας. Επί του παρόντος, ο εξαερισμός (μηχανικός εξαερισμός και φυσικός εξαερισμός) και οι ψύκτες συμπίεσης είναι κοινές συσκευές που χρησιμοποιούνται για το σύστημα.

Ο εξαερισμός επηρεάζεται από το περιβάλλον και οι ψύκτες συμπίεσης πρέπει να οδηγούνται από την ηλεκτρική ενέργεια, αυτό σημαίνει ότι έχουν υψηλό κόστος λειτουργίας. Η ηλιακή ενέργεια είναι καθαρή και άφθονη στο περιβάλλον. Όταν χρησιμοποιείται ως το σύστημα αποθήκευσης σιτηρών, το

μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι ότι όταν ο καιρός είναι θερμότερος, το ηλιακό σύστημα ψύξης με προσρόφηση θα έχει μεγαλύτερη ψυκτική ισχύς, και το κόστος λειτουργίας θα είναι χαμηλότερο.

Το σύστημα αποθήκευσης σιτηρών με ψύκτη προσρόφησης περιλαμβάνει το σύστημα ζεστού νερού που συλλέγει τη θερμότητα από τον εκκενωμένο σωλήνα ηλιακού συλλέκτη, τον ψύκτη προσρόφησης, τον πύργο ψύξης, και το πηνίο-ανεμιστήρας (fan coil). Το πρώτο σχήμα δείχνει το σχηματισμό του συστήματος, και η φωτογραφία του συστήματος φαίνεται στο επόμενο σχήμα 5.2.6.4.



Σχήμα 5.2.6.4. διάγραμμα ηλιακού συστήματος ψύξης με προσρόφηση για συγκομιδή σιτηρών.[300]

Οι ηλιακοί συλλέκτες σωλήνων κενού χρησιμοποιούνται συχνά και η επιφάνεια του συλλέκτη είναι 49.4m^2 . Μια αντλία κυκλοφορίας ελέγχεται από την διαφορά θερμοκρασίας. Ο συνολικός όγκος του στρωματοποιημένου δοχείου αποθήκευσης θερμότητας είναι 0.6m^3 . Στη δεξαμενή ο όγκος του τμήματος πάνω από το διάφραγμα είναι 0.24m^3 . Το πρώι πριν λειτουργήσει η ψυκτική μονάδα η βαλβίδα 13 κλείνει, η βαλβίδα 12 ανοίγει, και το νερό στο άνω τμήμα της δεξαμενής ζεστού νερού θερμαίνεται γρήγορα. Όταν η θερμοκρασία του νερού στο άνω μέρος της δεξαμενής ζεστού νερού είναι πάνω από $65\text{ }^\circ\text{C}$, η μονάδα ψύξης αρχίζει να λειτουργεί. Στη συνέχεια η βαλβίδα 13 ανοίγει, το νερό στο κάτω μέρος της δεξαμενής ζεστού νερού θερμαίνεται βαθμιαία. Το απόγευμα, όταν η θερμοκρασία του νερού στο άνω μέρος της δεξαμενής ζεστού νερού είναι κάτω από $65\text{ }^\circ\text{C}$, η μονάδα ψύξης σταματάει να λειτουργεί.



Σχήμα 5.2.6.5. Φωτογραφίες από το ηλιακό σύστημα προσρόφησης για συγκομιδή σιτηρών. (α) ψύκτης προσρόφησης, (β) ηλιακοί συλλέκτες. [300]

Το σύστημα προσρόφησης περιέχει δύο μονάδες προσρόφησης και έναν δευτερεύον απαεριωτή. Η ηλεκτρική σφαιρική βαλβίδα (V0-V10) και η βαλβίδα κενού (V11) ελέγχονται από τον Προγραμματιζόμενο Λογικό Ελεγκτή (PLC). Η μονάδα ψύξης μπορεί να λειτουργεί αυτόματα με τη διαδικασία ανάκτησης θερμότητας και μάζας. Κάθε μονάδα προσρόφησης περιέχει ένα προσροφητή, έναν συμπυκνωτή, και έναν απαεριωτή. Κάθε προσρόφησης γεμίζεται με περίπου 50 kg από σίλικα τζελ. Κάτω από τους δύο απαεριωτές της μονάδας προσρόφησης ο δευτερεύον απαεριωτής έχει ξεκινήσει. Το νερό ψύξης ρέει διαμέσου του δευτερεύοντα απαεριωτή, το ψυκτικό κάτω από το δευτερεύον απαεριωτή θερμαίνεται και εξατμίζεται, και ανταλλάσσει θερμότητα συμπύκνωσης με τον απαεριωτή της μονάδας προσρόφησης. Η ισχύς ψύξης μεταδίδεται μονόδρομα, και η χαμένη ενέργεια μειώνεται, κάτι το οποίο μας βελτιώνει την απόδοση του συστήματος. Η περιοχή μεταφοράς θερμότητας είναι 58.7m^2 , η ονομαστική δύναμη του ανεμιστήρα είναι 750W, η ονομαστική ένταση του αέρα είναι $1100\text{ m}^3/\text{h}$, και η ονομαστική παροχή του πύργου ψύξης είναι $8\text{ m}^3/\text{h}$.

Παρακάτω θα παραθέσουμε τον πίνακα 5.2.6.1 όπου παρουσιάζεται η επίδοση ενός ηλιακού συστήματος προσρόφησης σε συνάρτηση με τις διαφορετικές ώρες της ημέρας:

Πίνακας 5.2.6.1 : απόδοση του ηλιακού συστήματος προσρόφησης για αποθήκευση σιτηρών [300]

Time	Solar radiation (MJ/m ²)	Q_{ref} (kW)	COP _{cycle}
9:50–10:50	2.667	2.96	0.247
10:50–11:50	3.005	4.13	0.279
11:50–12:50	3.103	4.77	0.307
12:50–13:50	2.987	4.82	0.313
13:50–14:50	2.491	4.69	0.305
14:50–15:50	2.094	4.53	0.294
15:50–16:50	1.338	4.15	0.283
16:50–17:50	0.609	3.21	0.258

Εδώ βλέπουμε ότι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος COP μεγιστοποιείται τις πρωινές- μεσημεριανές ώρες (11:50 -15:00) όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι και μεγαλύτερης έντασης. Επίσης μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η εποχή που γίνονται οι έρευνες είναι χειμώνας λόγω της μικρής διάρκειας της ηλιοφάνειας.

Ο επόμενος πίνακας 5.2.6.2 αναφέρει ορισμένες από τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας ενός ηλιακού συστήματος προσρόφησης που χρησιμοποιείται στη συγκομιδή σιτηρών:

Πίνακας 5.2.6.2: Παράμετροι λειτουργίας για το ηλιακό σύστημα προσρόφησης για αποθήκευση σιτηρών[300]

Half cycle time (s)	Mass recovery time (s)	Heat recovery time (s)	Flow rate of hot water (m ³ /h)	Flow rate of cooling water (m ³ /h)	Flow rate of chilling water (m ³ /h)	Temperature of inlet hot water (°C)	Temperature of inlet air (°C)
900	60	60	3.6	5.1	1.8	≥ 65	14–22

Και τέλος ο επόμενος πίνακας 5.2.6.3 παρουσιάζει σε διαφορετικές περιόδους του μήνα την απόδοση ενός τέτοιου συστήματος:

Πίνακας 3: απόδοση του ηλιακού συστήματος προσρόφησης [300]

Date	Solar radiation (MJ/m ²)	Running time (min)	Coefficient of the collector	COP _{solar}	COP _{electrical}	Q_{ref} (kW)
31/07/2004	19.6	474	0.45	0.123	2.62	4.19
06/08/2004	20.3	508	0.46	0.125	2.59	4.14
09/08/2004	17.4	423	0.42	0.096	2.03	3.25
15/08/2004	19.5	474	0.45	0.131	2.77	4.43
26/08/2004	18.7	457	0.44	0.124	2.63	4.21
19/09/2004	16.2	382	0.40	0.109	2.61	4.17

5.2.7 Ψύκτες προσρόφησης με Σίλικα τζελ- νερό

Το 1999, σε ένα νοσοκομείο του Πανεπιστημίου Freiburg (Γερμανία), εγκαταστάθηκαν ηλιακά κλιματιστικά συστήματα προσρόφησης ψυκτικής ισχύς της τάξης των 70kW, η οποία φαίνεται στο σχήμα 5.2.7.1. Το ηλιακό κλιματιστικό σύστημα προσρόφησης έχει μια περιοχή του συλλέκτη εκκενωμένου σωλήνα επιφάνειας των 230m² για την παραγωγή ζεστού νερού. Το καλοκαίρι το ζεστό νερό χρησιμοποιείται για να οδηγήσει ψύκτες προσρόφησης, ενώ το χειμώνα το ζεστό νερό χρησιμοποιείται σαν μία αντλία θερμότητας. Το καλοκαίρι η αποτελεσματικότητα του εν κενώ σωλήνα- συλλέκτη είναι περίπου 32%, και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος COP είναι περίπου 0,6. Η συνολική επένδυση του παραπάνω συστήματος είναι περίπου 353 000 ευρώ και το ετήσιο κόστος λειτουργίας είναι περίπου 12 000 ευρώ.



(a)



(b)

Σχήμα 5.2.7.1. Ηλιακός ψύκτης προσρόφησης με σίλικα τζέλ που εγκαταστάθηκε στο Freiburg στη Γερμανία. (α) συλλέκτες τύπου εκκενωμένοι σωλήνες, (β) ψύκτης προσρόφησης.[300]

Επιπλέον, υπήρχε ένα ηλιακό σύστημα κλιματισμού με προσρόφηση εγκατεστημένο σε εταιρεία με καλλυντικά. Συγκεκριμένα στην Σαράντης S.A, στην Ελλάδα με έκταση δωματίου 22 000m² (130 000m³), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.7.1.



(a)



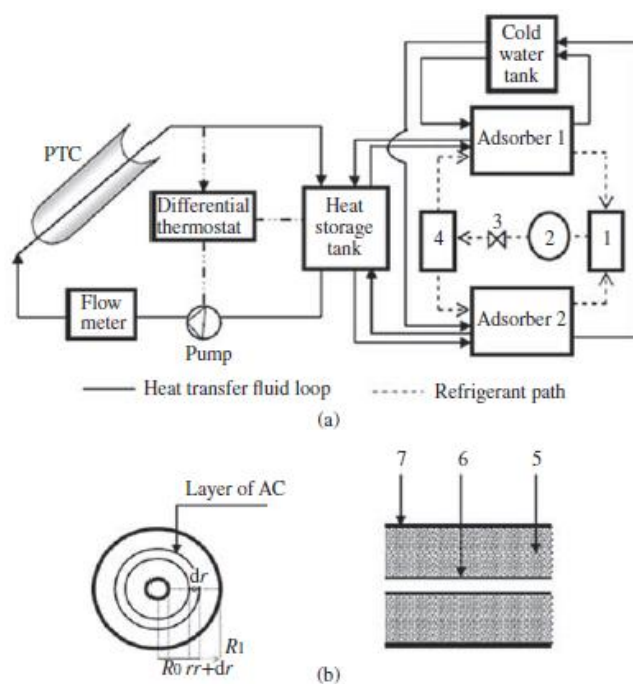
(b)

Σχήμα 5.2.7.2. Ηλιακό σύστημα προσρόφησης με σίλικα τζελ που εγκαταστάθηκε στην Ελλάδα. (α) ηλιακοί συλλέκτες επίπεδου πιάτου, (β) ψύκτης προσρόφησης.[300]

Το παραπάνω ηλιακό σύστημα προσρόφησης κλιματισμού με εμβαδόν 2700m^2 που χρησιμοποιεί επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες έχει την ικανότητα να παράγει ζεστό νερό θερμοκρασίας της τάξεως των $70\text{-}75\text{ }^\circ\text{C}$. Το καλοκαίρι το ζεστό νερό χρησιμοποιείται για την οδήγηση του ψύκτη προσρόφησης με ψυκτική ισχύ της τάξεως των 350kW , και με βαθμό απόδοσης COP να είναι περίπου 0,6. Το χειμώνα ζεστό νερό χρησιμοποιείται για τη θέρμανση ενός δωματίου. Το ηλιακό κλιματιστικό σύστημα προσρόφησης είναι εξοπλισμένο με ένα λέβητα πετρελαίου ως συμπληρωματική πηγή θερμότητας. Η θερμότητα που παρέχεται από την ηλιακή ενέργεια είναι περίπου 66% της συνολικής θερμότητας όλο το χρόνο. Το κόστος ενός ηλιακού κλιματιστικού συστήματος προσρόφησης που χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο σίλικα τζελ με νερό είναι περίπου $\$ 1.3$ εκατομμύρια ευρώ. Μπορεί να μειώσει τις ετήσιες εκπομπές CO_2 κατά περίπου 5100 τόνους.

5.2.8 Ηλιακό σύστημα ψύξης με προσρόφηση χρησιμοποιώντας παραβολικό συλλέκτη (PTC : Parabolic trough collector)

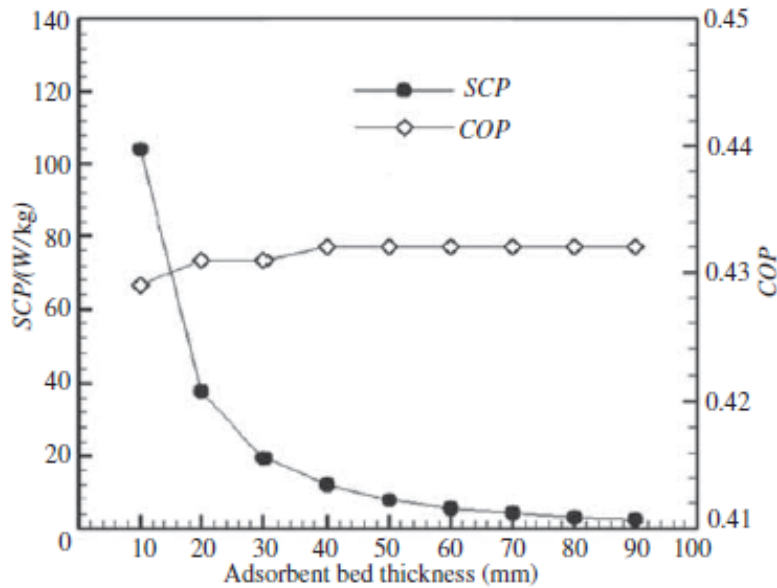
Ο ερευνητής **Fadar** μελέτησε ένα νέο σύστημα που έχει τη δυνατότητα εφαρμογής των ηλιακών συστημάτων με παραβολικούς συλλέκτες σε μια προσπάθεια να ξεπεραστούν τα χαρακτηριστικά των διακοπτόμενων κύκλων των ηλιακών συστημάτων ψύξης με προσρόφηση με στόχο τη βελτίωση των επιδόσεών τους. Έτσι μελετήθηκε ένα σύστημα συνεχόμενου ψυκτικού κύκλου προσρόφησης δύο βαθμίδων όπως διαφαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.2.8.1 [144-151].



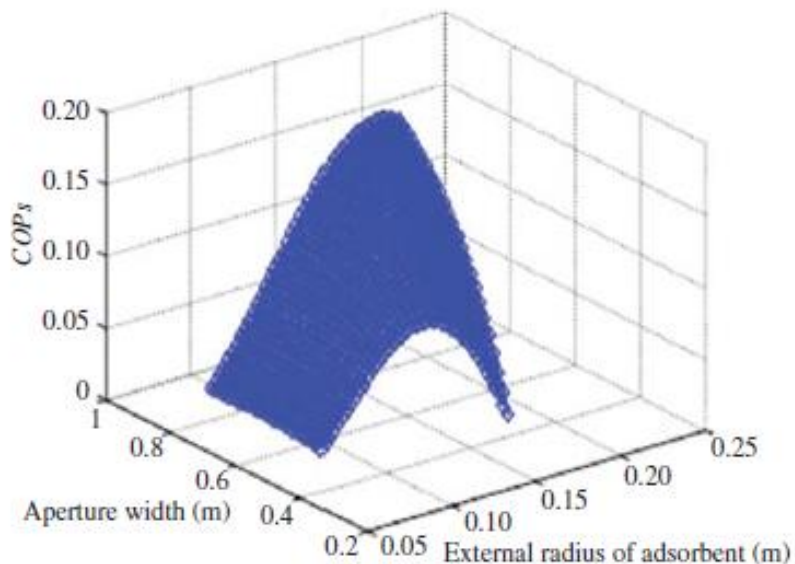
Σχήμα 5.2.8.1. (α) Σχηματικό διάγραμμα συνεχόμενου ηλιακού συστήματος προσρόφησης, (β) διατομή του προσροφητή.[146]

Για να παράγεται συνεχόμενη ψυκτική ισχύς πρέπει οι προσροφητές να τίθενται σε λειτουργία εκτός φάσης. Μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας αποθηκεύει την ηλιακή ενέργεια, καθώς και παρέχει την πηγή θερμότητας για το σύστημα ψύξης με προσρόφηση. Σε αυτό το σύστημα, το ακτινικό πάχος της προσροφητικής βαθμίδας είναι μια σημαντική παράμετρος για τη βελτιστοποίηση του συστήματος. Στο σχήμα 5.2.8.2 απεικονίζεται η επιρροή της παραπάνω παραμέτρου στην ειδική ψυκτική ισχύς SCP στον βαθμό απόδοσης του συστήματος COP. Σε διάφορα πειραματικά δεδομένα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, όταν η εξωτερική ακτίνα του προσροφητή είναι 14,5 cm και το

πλάτος ανοίγματος του συλλέκτη είναι 70 cm, τότε το σύστημα έχει βέλτιστη απόδοση COP 0,14. Στο σχήμα 5.2.8.3 απεικονίζεται ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη σε συνάρτηση με το πλάτος ανοίγματος του συλλέκτη και την εξωτερική ακτίνα του προσροφητικού.

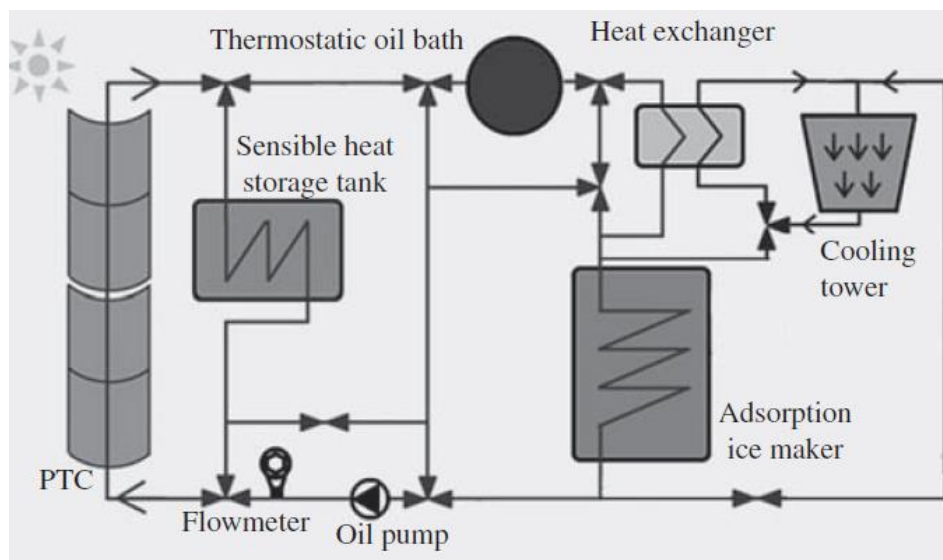


Σχήμα 5.2.8.2. Επίδραση του πάχους της προσροφητικής βαθμίδας στους παράγοντες SCP και COP. [146]



Σχήμα 5.2.8.3. Βαθμός απόδοσης του συστήματος COP συναρτήσει του πλάτους ανοίγματος και της εξωτερικής ακτίνας του προσροφητικού. [147]

Στο πανεπιστήμιο Jiao Tong της Σανγκάης ο ερευνητής Li σχεδίασε και κατασκεύασε ένα σύστημα παραγωγής ψύξης με προσρόφηση οδηγούμενο από ηλιακούς παραβολικούς συλλέκτες (PTC). Το σύστημα αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 5.2.8.4.



Σχήμα 5.2.8.4. σύστημα ηλιακής προσρόφησης με PTC [149]

Το σύστημα αυτό αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη : την παγομηχανή προσρόφησης, τους παραβολικούς συλλέκτες, δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας, ηλεκτρικό θερμοστατικό λουτρό ελαίου.

Με τον έλεγχο των τριών-δρόμων βαλβίδων , διαφορετικοί κύκλοι μπορεί να πραγματοποιηθούν και η παγομηχανή προσρόφησης ή η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας μπορεί να συνδεθεί άμεσα με την ηλιακή πηγή ενέργειας-PTC. Στα πειράματα, η μηχανή ψύξης με προσρόφηση μπορεί να είναι οδηγείται από τους παραβολικούς συλλέκτες PTC. Ο ηλεκτρικός λέβητας ελαίου συνδέθηκε σε αυτό το σύστημα για να προσομοιώσει τη σταθερή ηλιακή πηγή θερμότητας και η απόδοση της παγομηχανής δοκιμάστηκε υπό διαφορετικές θερμοκρασίες εκρόφησης δια της ρυθμίσεως της θερμοκρασίας του θερμοστατικού λουτρού ελαίου.

Ο εναλλάκτης θερμότητας νερού- λαδιού χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια σταδίου προσρόφησης για να ψύξει την προσροφητική βαθμίδα. Όταν η θερμότητα της ηλιακής ενέργειας δεν επαρκεί για να οδηγήσει το σύστημα ψύξης με προσρόφηση, τότε το θερμοστατικό λουτρό ελαίου και ο εναλλάκτης θερμότητας παρέχουν θερμότητα από την ηλεκτρική διαδικασία θέρμανσης.

Τα βήματα της συνολικής διαδικασίας όπως αναλύθηκε παραπάνω:

1.Η φάση αποθήκευσης θερμότητας:

Οι παραβολικοί συλλέκτες PTC συλλέγουν τη θερμότητα από την ηλιακή ενέργεια, και η κυκλοφορία από το κύκλωμα ελαίου που συνδέει το PTC και η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας αποθηκεύει τη θερμότητα από το PTC. Τα υλικά αποθήκευσης θερμότητας στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας είναι η άμμος και οι πέτρες.

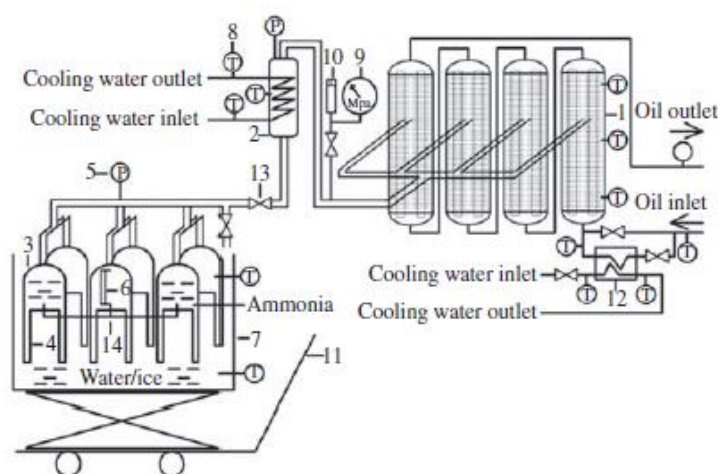
2. διεργασία της εκρόφησης των προσροφητών:

Η μηχανή παραγωγής πάγου θερμαίνεται από τους παραβολικούς συλλέκτες-PTC ή από τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας. Στη συνέχεια της διαδικασίας αυτής το ψυκτικό θα συμπυκνωθεί στον συμπυκνωτή όπως φαίνεται και στο 5.2.8.5.

3. Προσρόφηση και διαδικασία ψύξης:

Για τη διαδικασία αυτή, το σύστημα ψύχεται από τον πύργο ψύξης, και ο προσροφητής προσροφά το ψυκτικό από τον απαεριωτή (που φαίνεται στο σχήμα 5.2.8.5). Ο απαεριωτής μεταφέρει τη ψυκτική ισχύ προς το περιβάλλον.

Το κοινό ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται σε αυτό το σύστημα ψύξης είναι η αμμωνία ή η μεθανόλη ενώ το προσροφητικό συνίσταται σε χλωρίδια μετάλλου, όπως χλωρίδια ασβεστίου CaCl_2 ή ενεργοποιημένο άνθρακα. Ο συνδυασμός, βέβαια, του CaCl_2 και του ενεργού άνθρακα έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο όγκο χωρητικότητας προσρόφησης και συνήθως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μηχανών ψύξης.



1 - Adsorbent bed, 2 - Condenser, 3 - Evaporator, 4 - Ice section of evaporator, 5 - Pressure transducer, 6 - Liquid ammonia level meter, 7 - Water tank, 8 - Temperature sensor, 9 - Pressure meter, 10 - Pressure relief valve, 11 - Hydraulic elevator, 12 - Oil-water heat exchanger, 13 - Manual valve, 14 - Communicating tube for evaporator units

Σχήμα 5.2.8.5 Σχηματικό διάγραμμα ενός ice maker[148]



Σχήμα 5.2.8.6 φωτογραφία της πειραματικής διάταξης.[149]

Έπειτα από πολλά πειραματικά δεδομένα γύρω από το σύστημα ψύξης με προσρόφηση χρησιμοποιώντας παραβολικούς συλλέκτες PTC, καταλήξαμε στον παρακάτω πίνακα 5.2.8.1 (ο οποίος συντίθεται για διαφορετικά σενάρια).

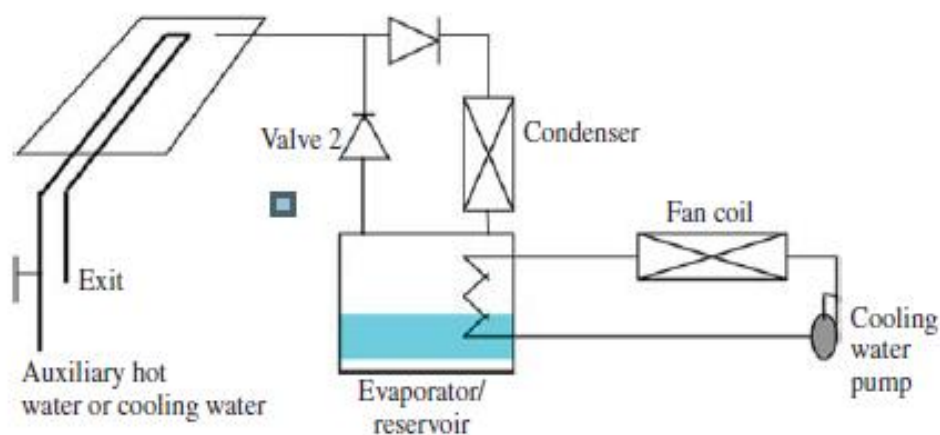
Πίνακας 5.2.8.1: η απόδοση σε διαφορετικές πειραματικές συνθήκες.[149]

Case number	Desorption temperature (°C)	Heat input (MJ)	Ice making capacity (kg)	COP	COPs
1	75	50	0	0	0
2	83	82	18	0.08	0.04
3	85	83	20	0.08	0.05
4	89	90	27	0.10	0.05
5	94	95	28	0.10	0.05
6	95	100	30	0.10	0.05
7	100	155	52	0.12	0.06
8	105	115	50	0.15	0.08

5.2.9 Ηλιακό κλιματιστικό σύστημα προσρόφησης

Ένα σημαντικό κομμάτι στα περισσότερα ηλιακά συστήματα είναι η αποθήκευση της μη χρησιμοποιημένης ενέργειας. Αυτό διότι σε αυτά τα συστήματα που μελετάμε, η παροχή ενέργειας εξαρτάται από τις εποχές και τις διαφορετικές

τοποθεσίες. Έτσι είναι προφανές ότι το ηλιακό κλιματιστικό λειτουργεί διακοπτόμενα, εξαιτίας της διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το απλούστερο πρόγραμμα για ένα κλιματιστικό είναι η χρήση του πάγου από ένα ηλιακό σύστημα προσρόφησης που παράγει πάγο. Τα μειονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος είναι ότι, πρώτον, δεν μπορεί να παρέχει συνεχώς ψυκτική ισχύ, και δεύτερον, ότι η απόδοση του είναι χαμηλή, επειδή η θερμοκρασία εξάτμισης δεν είναι τόσο υψηλή. Εάν η θερμοκρασία εξάτμισης του ηλιακού συστήματος ψύξης με προσρόφηση αυξηθεί, τότε οι συσκευές αποθήκευσης της ενέργειας μπορούν να ληφθούν ως συμπληρωματικές μέθοδοι για να υπερνικηθούν τα μειονεκτήματα της διακοπτόμενης λειτουργίας του ηλιακού συστήματος, το οποίο σημαίνει ότι το σύστημα μπορεί να εξάγει τη ψυκτική ισχύ συνεχώς [143].



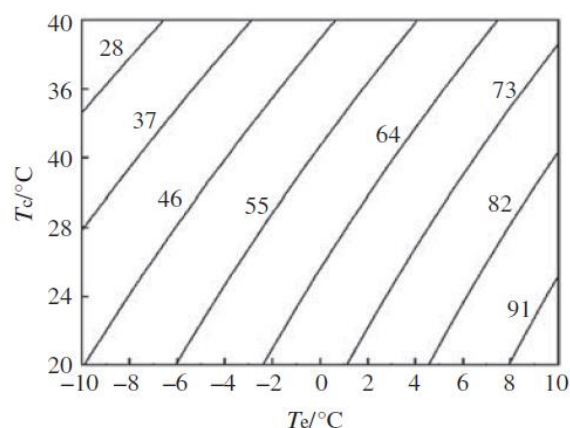
Σχήμα 5.2.9.1. Κλιματιστικό ηλιακό σύστημα προσρόφησης με αποθήκευση θερμότητας.[143]

Στο παραπάνω σχήμα 5.2.9.1 φαίνεται ένα συνεχές και σταθερό ηλιακό κλιματιστικό σύστημα με αποθήκευση ενέργειας, στο οποίο η ψύξη γίνεται με προσρόφηση και οδηγείται από την ηλιακή ενέργεια. Το σύστημα αυτό ξεπερνάει τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα και επίσης μπορεί να παράγει ζεστό νερό σε συγκεκριμένη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας τη θερμότητα προσρόφησης.

Το εργαζόμενο προσροφητικό μέσο για ένα τέτοιο ηλιακό κλιματιστικό σύστημα προσρόφησης με λειτουργία αποθήκευσης της ενέργειας, είναι ζεόλιθος με νερό, σίλικα τζελ με νερό, ή ενεργοποιημένος άνθρακας με μεθανόλη. Ο όγκος του εκάστοτε ψυκτικού είναι αυξημένος για να αποθηκεύεται η ψυκτική ικανότητα του συστήματος. Η ικανότητα ψύξης αποθηκεύεται ως η φυσική θερμότητα του υγρού στον απαεριστή/δεξαμενή. Η δυνητική ενέργεια προσρόφησης αποθηκεύεται από τη διαδικασία εκρόφησης της προσροφητικής

βαθμίδας. Μετά την εκρόφηση, η προσροφητική βαθμίδα έχει την ικανότητα προσρόφησης για ψύξη. Η δυναμική προσρόφηση διατηρείται όσο χρειαζόμαστε την ενέργεια και η ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί συνδέοντας την προσροφητική βαθμίδα με τον απαεριωτή. Το πλεονέκτημα ενός συστήματος αποθήκευσης της ενέργειας είναι ότι η εν δυνάμει ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί μακροπρόθεσμα χωρίς απώλεια θερμότητας. Όταν η εν δυνάμει ενέργεια προσρόφησης απελευθερώνεται μπορεί να παράγει τόσο ψυκτική ικανότητα και θερμότητα στο περιβάλλον .

Παρακάτω παραθέτουμε ένα διάγραμμα (σχήμα 5.2.9.2) που παρουσιάζει τις μεταβολές της ψυκτικής ικανότητας ανά τον όγκο του ψυκτικού σε συνάρτηση με τις θερμοκρασίες εξάτμισης και συμπύκνωσης. Το εργαζόμενο μέσο σε αυτή την περίπτωση είναι ο ενεργοποιημένος άνθρακας.



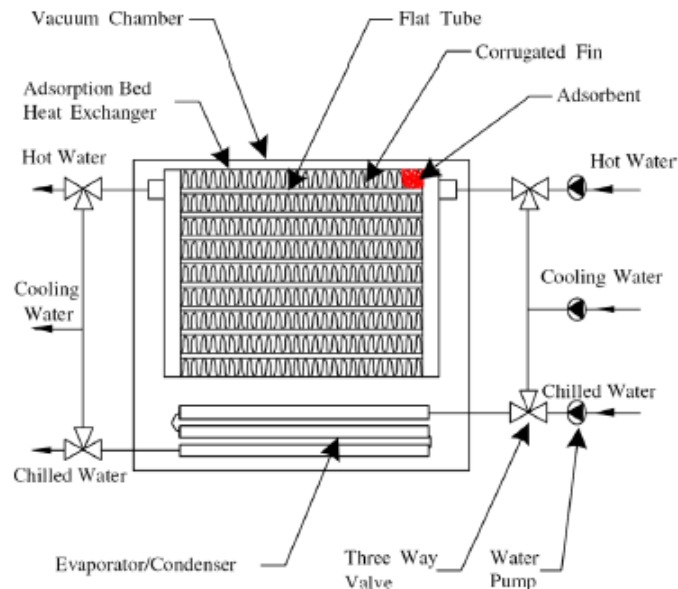
Σχήμα 5.2.9.2. Ψυκτική ικανότητα ανα κυβικό μέτρο ψυκτικού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εξάτμισης και θερμοκρασία συμπύκνωσης . (MJ/m³) [143]

5.3 Πρακτικές εφαρμογές σε συστήματα ψύξης με σίλικα τζελ [152-156]

5.3.1 Πρωτότυπο σύστημα μονής βαθμίδας

Ο ερευνητής Chang ανέπτυξε ένα απλό σύστημα προσρόφησης μονής βαθμίδας. Ένα κενό δοχείο εμπεριέχει τη βαθμίδα προσρόφησης ,έναν συμπυκνωτή και έναν απαεριωτή. Η ψυκτική ικανότητα του πρωτότυπου συστήματος αυτού είναι ίση με 4.3 Kw και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ψύξης COP είναι ίσος με 0.45 όταν οι συνθήκες θερμοκρασίας είναι :

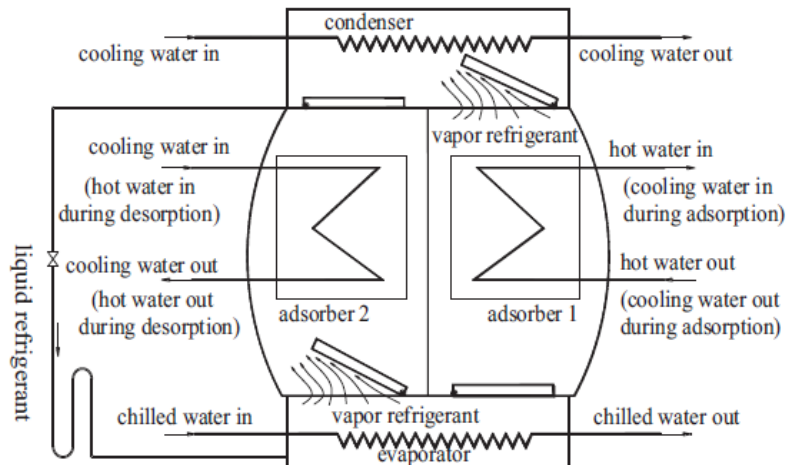
80 °C ζεστό νερό, 30 °C νερό ψύξης, 14 °C ψυχρό νερό.



Σχήμα 5.3.1.1. ψύκτης προσρόφησης μονής βαθμίδας με σίλικα τζελ [152]

5.3.2. Πρωτότυπο σύστημα διπλής βαθμίδας

Ο κύκλος ψύξης με προσρόφηση ενός συστήματος δύο βαθμίδων μπορεί να λειτουργεί συνεχώς σε αντίθεση με ένα αντίστοιχο σύστημα μονής βαθμίδας και προφανώς είναι πολύ απλούστερο από ένα σύστημα πολλαπλών βαθμίδων. Όταν χρησιμοποιείται ως εργαζόμενο μέσο σίλικα τζελ με νερό και υπάρχει σύστημα ανάκτησης της θερμότητας και της μάζας η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται. Ο ψύκτης που κατασκευάστηκε από την NACC (Nishiyodo Air Conditioning Co. Ltd.) όπως αναφέρθηκε από τον Saha και την ιστοσελίδα του HIJC USA Inc. ,έχει ικανότητα ψύξης 12,63 kW και βαθμό απόδοσης COP του ψυκτικού συγκροτήματος ίσο με 0,40 όταν η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας είναι 85 °C , η θερμοκρασία του ψυκτικού είναι 30 °C και η θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού νερού είναι 16 °C .



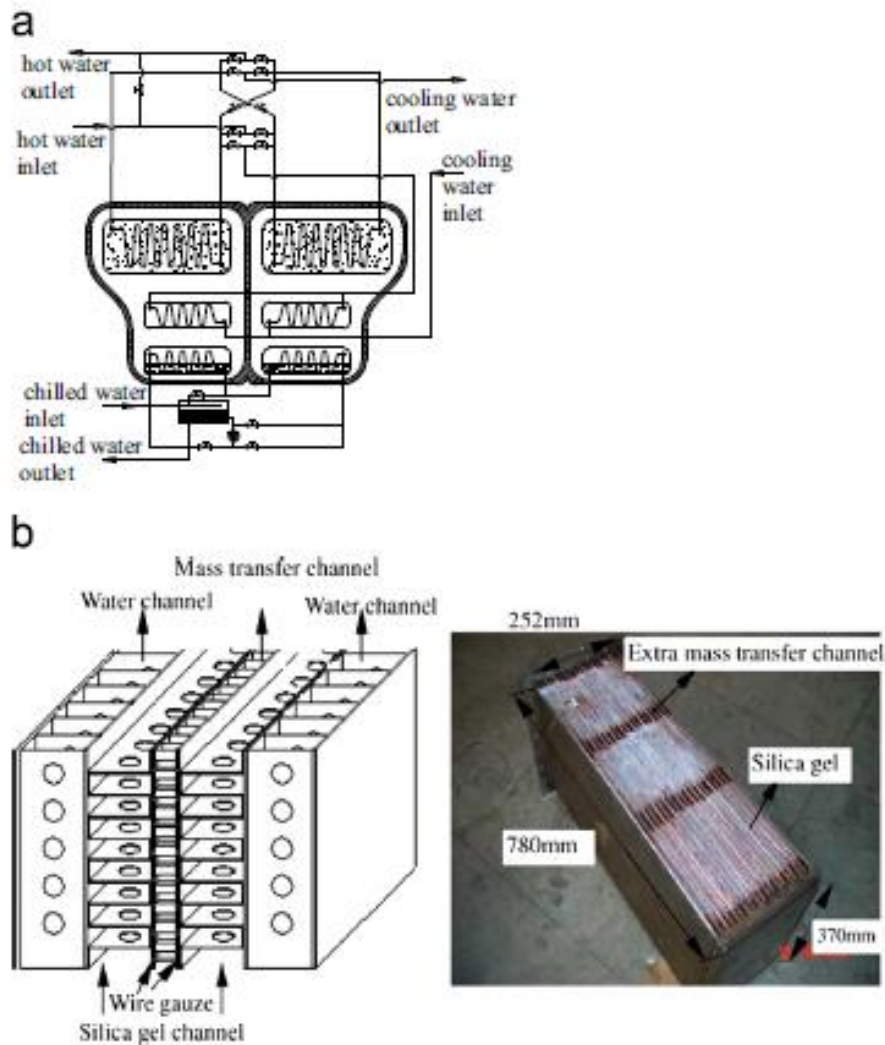
Σχήμα 5.3.2.1. Ψύκτης προσρόφησης δύο βαθμίδων με εργαζόμενο μέσο σίλικα τζελ με νερό [152-156]



Σχήμα 5.3.2.2. Ψύκτης ADCM1-180 [152-156]

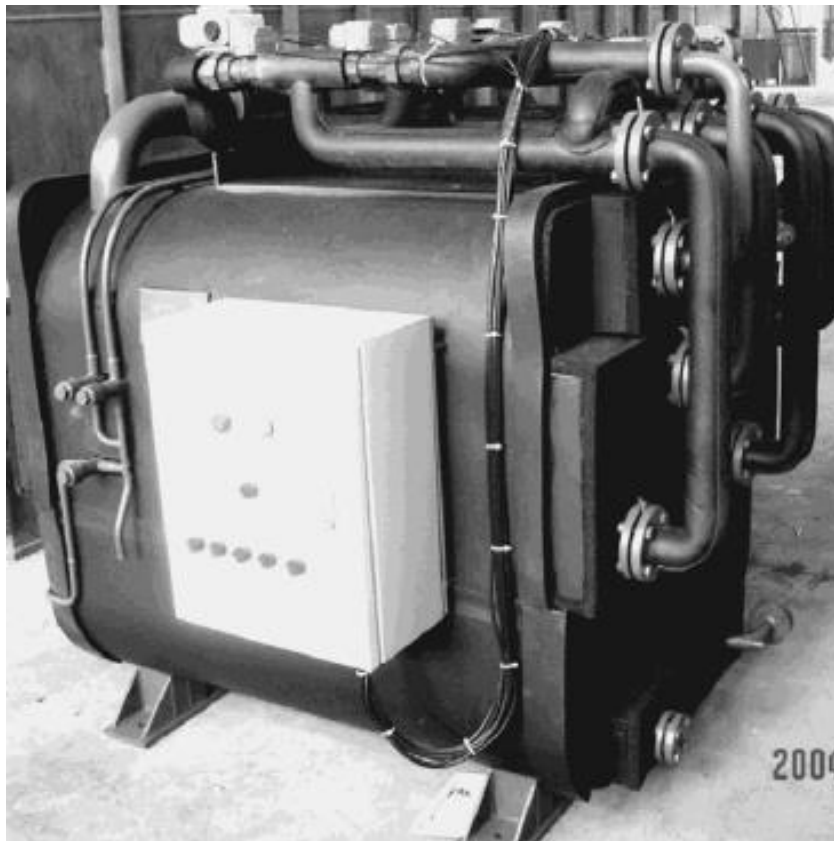
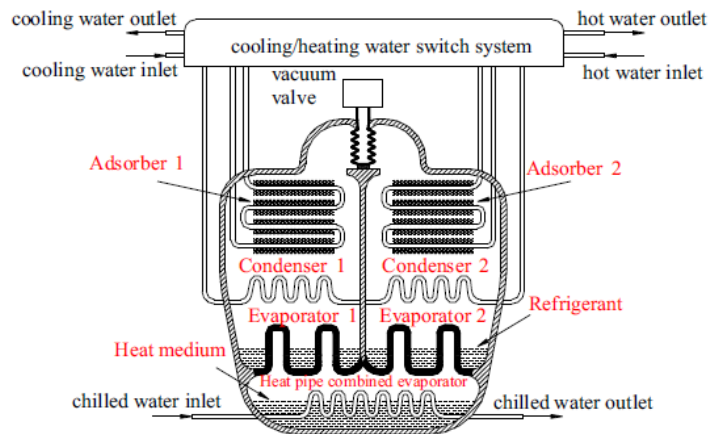
Στον παραπάνω ψύκτη ADCM1-180 που κατασκευάζεται από την HIJC USA Inc που φαίνεται στο σχήμα 5.3.2.2 (κάτω σχήμα) η ψυκτική ικανότητα είναι 150,15kW, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος COP είναι 0,70 ενώ η θερμοκρασία πηγής θερμότητας είναι 90 °C, ενώ η θερμοκρασία του ψυκτικού είναι 29,4 °C και η θερμοκρασία εισόδου κρύου νερού είναι 7 °C. Προκειμένου να απλοποιηθεί η δομή και να αφαιρεθούν οι βαλβίδες κενού, ένα νέο σύστημα ψύξης με προσρόφηση με σίλικα τζελ – νερό ως προσροφητικό μέσο δύο

βαθμίδων ,με δύο συμπυκνωτές και δύο απαερωτές αναπτύχθηκε από τον Liu όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.2.3.



Σχήμα 5.2.3.3. Ψύκτης δύο βαθμίδων - σίλικα τζελ με νερό [155]

Για να βελτιωθεί το παραπάνω σύστημα δύο θαλάμων που είχε αναπτυχθεί από τους ερευνητές **Liu, Wang** σχεδιάστηκε ένα νέο μοντέλο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 5.2.3.4. σύστημα προσρόφησης δύο βαθμίδων με σίλικα τζελ- νερό [152-156]

Το πρώτο σχήμα 5.2.3.4α απεικονίζει το σχηματικό διάγραμμα και το δεύτερο 5.2.4.4β αποδίδει την ίδια την κατασκευή ενός συστήματος ψύξης διπλής βαθμίδας με σίλικα τζελ – νερό χρησιμοποιώντας τρεις θαλάμους κενού.

Η ψυκτική ικανότητα ενός τέτοιου συστήματος είναι ίση 6 kW κάτω από συνθήκες 65 °C θερμοκρασίας ζεστού νερού , 30,5 °C θερμοκρασίας νερού ψύξης , και 17,6 °C θερμοκρασίας εξόδου του ψυχρού νερού. Ο βαθμός απόδοσης COP του συστήματος είναι ίσος με 0,37.

5.4 Συμπεράσματα

Βασιζόμενοι στη μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα για τις διάφορες εφαρμογές συστημάτων ψύξης με προσρόφηση. Παρακάτω θα παραθέσουμε τον πίνακα 5.4.1 με τα περισσότερα από τα παραπάνω συστήματα προσρόφησης για διαφορετικές εφαρμογές και τις ενεργειακές τους επιδόσεις. Αναφέρονται συστήματα για εφαρμογές παγομηχανής, παγωμένου νερού και κλιματιστικών. Οι παράγοντες όπως το εργαζόμενο μέσο και η θερμοκρασία της πηγής της θερμότητας επηρεάζουν κατά πολύ το βαθμό απόδοσης του συστήματος COP και την ειδική ψυκτική ικανότητά του SCP. Οι μετρήσεις αφορούν σε συνεχόμενη λειτουργία των συστημάτων αυτών για περίπου ένα μήνα. Συγκεκριμένα το σύστημα παγομηχανής που χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο ενεργοποιημένο άνθρακα με χλωριούχο ασβέστιο CaCl_2 και αμμωνία NH_3 και έχει ως θερμοκρασία της πηγής θερμότητας μικρότερη των $120\text{ }^\circ\text{C}$ παρατηρούμε ότι σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα παγομηχανής, έχει ιδιαίτερα υψηλό COP, ίσο με 0.41, και SCP ίση 731 W kg^{-1} . Στις εφαρμογές παγωμένου νερού με θερμοκρασία της πηγής θερμότητας $80\text{ }^\circ\text{C}$ και εργαζόμενο μέσο σίλικα τζελ με νερό έχουμε βαθμό απόδοσης COP ίσο με 0.33-0.5 ενώ η ψυκτική ικανότητα του συστήματος αγγίζει τις τιμές των $91.7\text{-}171.8\text{ W kg}^{-1}$.

Πίνακας 5.4.1: Αποδόσεις ηλιακών συστημάτων προσρόφησης για διαφορετικές εφαρμογές [158]

Εφαρμογές	Θερμοκρασία της πηγής θερμότητας	Εργαζόμενο μέσο	COP	SCP
Παγομηχανή	$20\text{ MJm}^{-3}\text{day}^{-1}$	Εν.αν.-μεθανόλη	0.12	$6\text{ Kg day}^{-1}\text{m}^{-2}$
Παγομηχανή	$105\text{ }^\circ\text{C}$	Εν.αν.-αμμωνία	0.10	35 Wkg^{-1}
Παγομηχανή	$18.1\text{-}19.2\text{ MJm}^{-3}\text{day}^{-1}$	Εν.αν.-μεθανόλη	0.12-0.14	$5.0\text{-}6.0\text{ Kg day}^{-1}\text{m}^{-2}$
Παγομηχανή	$17\text{-}20\text{ MJm}^{-3}\text{day}^{-1}$	Εν.αν.-μεθανόλη	0.13-0.15	$6.0\text{-}7.0\text{ Kg day}^{-1}\text{m}^{-2}$
Παγομηχανή	$15.4\text{ MJm}^{-3}\text{day}^{-1}$	Σίλικα τζελ-νερό	0.16	$2.05\text{ MJ day}^{-1}\text{m}^{-2}$
Παγομηχανή	$20\text{ MJm}^{-3}\text{day}^{-1}$	Εν.αν.-μεθανόλη	0.16	$9.4\text{ Kg day}^{-1}\text{m}^{-2}$
Παγομηχανή	$<120\text{ }^\circ\text{C}$	Εν.αν.-μεθανόλη	0.18	27 W kg^{-1}
Παγομηχανή	$<120\text{ }^\circ\text{C}$	Εν.αν.+ $\text{CaCl}_2\text{-NH}_3$	0.41	731 W kg^{-1}
Παγωμένο νερό	$55\text{ }^\circ\text{C}$	Σίλικα τζελ-νερό	0.36	3.2 kW unif^{-1}
Παγωμένο νερό	$100\text{ }^\circ\text{C}$	Εν.αν.-μεθανόλη	0.4	73.1 W kg^{-1}
Παγωμένο νερό	$65\text{ }^\circ\text{C}$	Σίλικα τζελ-νερό	0.28	12.0 kW unif^{-1}
Παγωμένο νερό	$75\text{-}95\text{ }^\circ\text{C}$	Σίλικα τζελ-νερό	0.35-0.6	15.0 kWm^{-3}
Παγωμένο νερό	$80\text{-}95\text{ }^\circ\text{C}$	Σίλικα τζελ-νερό	0.3-0.6	20 Wkg^{-1}
Παγωμένο νερό	$80\text{ }^\circ\text{C}$	Σίλικα τζελ-νερό	0.33-0.5	$91.7\text{-}171.8\text{ Wkg}^{-1}$
Κλιματιστικό	$232\text{ }^\circ\text{C}$	Εν.αν.-αμμωνία	0.42-1.19	-
Κλιματιστικό	$204\text{ }^\circ\text{C}$	Ζεόλιθος-νερό	0.6-1.6	$36\text{-}144\text{ Wkg}^{-1}$
Κλιματιστικό	$230\text{ }^\circ\text{C}$	Ζεόλιθος-νερό	0.41	97 Wkg^{-1}
Κλιματιστικό	$310\text{ }^\circ\text{C}$	Ζεόλιθος-νερό	0.38	25.7 Wkg^{-1}
Κλιματιστικό	$100\text{ }^\circ\text{C}$	Εν.αν.-αμμωνία	0.2	600 Wkg^{-1}
Κλιματιστικό	$230\text{-}300\text{ }^\circ\text{C}$	Ζεόλιθος-νερό	0.2-0.21	$21.4\text{-}30\text{ Wkg}^{-1}$

Στη συνέχεια παραθέτουμε τον πίνακα 5.4.2 με κάποια από τα ηλιακά συστήματα προσρόφησης που αναφέρθηκαν παραπάνω και τις αποδόσεις τους. Έπειτα από μετρήσεις ερευνητών σε ημερήσια βάση και για ένα μήνα διαπιστώνονται τα παρακάτω πορίσματα.

Αρχικά ο συλλέκτης επίπεδου πιάτου που αναλύθηκε ανωτέρω παρουσιάζει βαθμό απόδοσης του συστήματος σε τιμές που κυμαίνονται από 0.1-0.36. Η μέγιστη τιμή απόδοσης εμφανίζεται όταν η επιφάνεια του συλλέκτη είναι περίπου 5 m² ενώ χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο σίλικα τζελ με νερό. Αντίστοιχα όταν χρησιμοποιείται σίλικα τζελ με νερό αλλά η επιφάνεια του συλλέκτη είναι αρκετά μικρότερη πχ. 0.25 m² τότε ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Σε άλλα συστήματα όπου χρησιμοποιείται οποιοδήποτε άλλο προσροφητικό μέσο ο βαθμός απόδοσης COP του συστήματος είναι αρκετά χαμηλός.

Στη συνέχεια μελετάμε μια άλλη κατηγορία ηλιακού συλλέκτη τον παραβολικό συλλέκτη. Οι τιμές του βαθμού απόδοσης COP του παραβολικού συλλέκτη κυμαίνονται από 0.02-0.9. Τα ηλιακά συστήματα ψύξης με προσρόφηση με παραβολικό συλλέκτη επιφάνειας 1m² που χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο ζεόλιθο τύπου 4A με νερό εμφανίζουν μέγιστο βαθμό απόδοσης COP σε τιμές από 0.8-0.9. Από την άλλη μεριά συστήματα παραβολικού συλλέκτη αντίστοιχης επιφάνειας χρησιμοποιώντας ως εργαζόμενο μέσο ενεργοποιημένο άνθρακα με μεθανόλη εμφανίζουν τον ελάχιστο βαθμό απόδοσης της ψύξης του συστήματος COP ίσο με 0.02.

Ένας άλλος τύπος ηλιακού συλλέκτη είναι ο συλλέκτης εκκενωμένου σωλήνα. Σε αυτή την περίπτωση του ηλιακού συλλέκτη προσρόφησης οι τιμές του βαθμού απόδοσης COP του συστήματος είναι της τάξεως του 0.3-0.4. Στις περιπτώσεις που αναγράφονται στον πίνακα τα συστήματα χρησιμοποιούν διάφορα μέσα προσρόφησης όπως : άνθρακας με αμμωνία, ζεόλιθος με νερό, σίλικα τζελ με νερό καθώς και ενεργοποιημένος άνθρακας με μεθανόλη.

Πίνακας 5.4.2: Κατηγοριοποίηση ηλιακών συστημάτων προσρόφηση και οι αποδόσεις τους.
[400]

Τύπος ηλιακού συλλέκτη	Επιφάνεια (m ²)	Εργαζόμενο μέσο	COP
Συλλέκτης επίπεδου πιάτου	0.25	Σίλικα τζελ-νερό	0.2
	1	Εν. αν.-μεθανόλη	0.19
	1.5	Εν. αν.-μεθανόλη	0.193
	1	Εν. αν.-μεθανόλη	0.13-0.15
	-	Εν. αν.-αμμωνία	0.111
	-	Μονολιθ.αν.-αμμωνία	0.120
	20	Ζεόλιθος-νερό	0.10
	0.75	Εν. αν.-μεθανόλη	0.12-0.14
	1.2	Εν. αν.-μεθανόλη	0.11
	4.975	Σίλικα τζελ-νερό	0.36
Σύνθετος παραβολικός συλλέκτης	1	Ζεόλιθος 4A-νερό	0.8-0.9
	0.8	Εν. αν.-αμμωνία	0.18
	2	Εν. αν.-μεθανόλη	0.02
	-	Εν. αν.-μεθανόλη	0.136
	0.55	Εν. αν.-μεθανόλη	0.078
Συλλέκτης εκκενωμένου σωλήνα	2	Εν. αν.-μεθανόλη	0.386
	-	Ζεόλιθος-νερό	0.25
	90	Σίλικα τζελ-νερό	0.35
	0.5064, 0.4080	-	-
	140	Άνθρακας/αμμωνία	0.43

Τέλος από τους παραπάνω πίνακες έχουμε ασφαλή εικόνα για την απόδοση των συστημάτων ψύξης με προσρόφηση . Εύκολα καταλαβαίνουμε ότι ένα από τα πιο αποδοτικά προσροφητικά μέσα είναι ο συνδυασμός σίλικα τζελ με νερό. Στις κατηγορίες των ηλιακών συλλεκτών προσρόφησης είναι κυριαρχεί ο σύνθετος παραβολικός συλλέκτης ,όσον αφορά στην απόδοση του συστήματος, εν αντιθέσει με τον επίπεδο συλλέκτη και τον εκκενωμένο σωλήνα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [34] Lu, Y.Z. (2003) The zeolite-water adsorption air conditioner driven by the waste heat of the locomotive with the internal combustion engine. PhD thesis. Shanghai Jiao Tong University , Shanghai, China (in Chinese).
- [35] Xu, J.Z. (2002) Prospective of the distributed CCHP system. *Energy Conservation and Environmental Protection*, **3**, 10-14 ISSN: 1009-539X (in Chinese).
- [36] Suzuki. M. (1993) Application of adsorption cooling systems to automobiles. *Heat Recovery Systems and CHP*, **13**(4), 335-340
- [37] Wang, R.Z., Dai, Y.J., Xu, Y.X., and Wu, J.Y. (1999) Flat-plate type adsorption solar collector. Invention patent of China 99240357.x.
- [38] Li, C.H., Wang, R.Z. and Dai, Y.J. (2003) Simulation and economic analysis of a solar-powered adsorption refrigerator using an evacuated tube for thermal insulation. *Renewable Energy*, **28**(2), 249-269
- [39] Pons, M. and Guilleminot .J.J. (1986) Design of an experimental solar-powered, solid-adsorption ice maker. *Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering* , **108**(4), 332-337
- [40] Boubakri, A. , Guilleminot, J.J. and Meunier, F. (2000) Adsorptive solar powered ice maker: experiments and model. *Solar Energy*, **69**(3), 249-263.
- [41] Leite, A.P.F. and Daguene, M. (2000) Performance of a new solid adsorption ice maker with solar energy regeneration. *Energy Conversion and Management*, **41**, 1625-1647
- [42] Khattab, N.M. (2004) A novel solar-powered adsorption refrigeration module. *Applied Thermal Engineering*, **24**(17-18), 2747-2760
- [300] Ruzhu Wang, Liwei Wang and Jingyi Wu. Adsorption refrigeration technology and applications. *Shanghai Jiao Tong University, China*
- [143] Wang, R.Z., Dai, Y.J., Xu, Y.X., and Wu, J.Y. (1999) The household air conditioner with the solar energy storage function.
- [144] Grenier, P., Guilleminot, J.J., Meunier, F. and Pons, M. (1988) Solar powered solid adsorption cold store. *Journal of Solar Energy – Transactions of ASME*
- [145] Fernandez-Garcia, A., Zarza, E., Valenzuela, L. and Perez, M. (2010) Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 1695-1721

[146] Fadar, A.E., Mimet, A. and Perez-Garcia, M. (2009) Modelling and performance study of a continuous adsorption refrigeration system driven by parabolic trough solar collector. *Solar Energy*, **83**, 850–861.

[147] El Fadar, A., Mimet, A., Azzabakh, A. *et al.* (2009) Study of a new solar adsorption refrigerator powered by a parabolic trough collector. *Applied Thermal Engineering* **29**, 1267–1270

[148] El Fadar, A., Mimet, A. and Perez-Garcia, M. (2009) Study of an adsorption refrigeration system powered by parabolic trough collector and coupled with a heat pipe. *Renewable Energy*, **34**, 2271–2279.

[149] Li, C., Wang, R.Z., Wang, L.W. *et al.* (2013) Experimental study on an adsorption icemaker driven by parabolic trough solar collector. *Renewable Energy*, **57**, 223–233

[150] Wang, L.W., Wang, R.Z. and Oliveira, R.G. (2009) A review on adsorption working pairs for refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 518–534.

[151] Wang, L.W., Wang, R.Z., Wu, J.Y. and Wang, K. (2004) Compound adsorbent for adsorption ice maker on fishing boats. *International Journal of Refrigeration*, **27**, 401–408.

[152] Dechang Wang, Jipeng Zhang, Xiaoliang Tian, Dawei Liu, K. Sumathy (2014) Progress in silica gel–water adsorption refrigeration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **30** (2014) 85–104

[153] Chang WS, Wang CC, Shieh CC. Experimental study of a solid adsorption cooling system using flat-tube heat exchangers as adsorption bed. *Applied Thermal Engineering* 2007.

[154] (<http://www.greenchiller.biz/>).

[155] Liu YL, Wang RZ, Xia ZZ. Experimental study on a continuous adsorption water chiller with novel design. *International Journal of Refrigeration* 2005

[156] Tomas N, Walter M, Hans-Martin H. Development of an adsorption chiller and heat pump for domestic heating and air-conditioning applications. *Applied Thermal Engineering* 2007, Volume 27, Issue 13, September 2007, Pages 2205–2212

[157] Wang, R.Z. (2002) Some thoughts on the energy saving in the buildings and combined energy systems. *Acta Energiae Solaris Sinica*, **3**(23), 322–335, ISSN: 0254-0096 (in Chinese).

[158] R. Z. Wang, R. G. Oliveira. Adsorption refrigeration – an efficient way to make good use of waste heat and solar energy . Progress in Energy and Combustion Science. Volume 32, Issue 4, 2006, Pages 424–458

[400] Parash Goyal, Prashant Baredar, Arvind Mittal, Ameenur. R. Siddiqui. Adsorption refrigeration technology –An overview of theory and its solar energy applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 53, January 2016, Pages 1389–1410