

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ με τίτλο:

**“ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΗΣ-ΕΞΑΤΜΙΣΤΙΚΗΣ  
ΜΟΝΑΔΑΣ ΨΥΞΗΣ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ”**



Ονοματεπώνυμο φοιτήτριας: **Καμπάση Μαρία**  
Επιβλέπων Καθηγητής: **Ρογδάκης Εμμανουήλ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε πειραματικά κλιματιστικό σύστημα απορρόφησης με υγρό αφυγραντικό υλικό που είναι εγκατεστημένο στο εργαστήριο του Τομέα Θερμότητας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ως υγρό αφυγραντικό υλικό χρησιμοποιείται το χλωριούχο λίθιο ( $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ ) και η πηγή ενέργειας του κλιματιστικού συστήματος είναι ένα θερμοδοχείο ζεστού νερού. Το κλιματιστικό σύστημα αποτελείται από τρεις βασικές συσκευές (εξατμιστικός ψύκτης, αφυγραντής, αναγεννητής), δύο δεξαμενές αποθήκευσης διαλύματος (υψηλής και χαμηλής συγκέντρωσης) και το θερμοδοχείο ζεστού νερού. Μέσα στον αφυγραντή αντίθετης ροής, το ισχυρό αφυγραντικό διάλυμα ( $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ ), προερχόμενο από της υψηλής συγκέντρωσης δεξαμενή αποθήκευσης, εισέρχεται από το πάνω μέρος της συσκευής. Ο υγρός αέρας περιβάλλοντος εισέρχεται στον αφυγραντή από το κάτω μέρος στη συσκευής και η υγρασία μεταφέρεται από τον αέρα στο αφυγραντικό υλικό. Η διαδικασία απορρόφησης ψύχεται από νερό, από τον εξατμιστικό ψύκτη, που ρέει μέσα σε φύλλα πολυπροπυλενίου. Το τέλος της διαδικασίας βρίσκει τον αέρα αφυγραμένο και ψυγμένο, ενώ το αφυγραντικό διάλυμα αραιωμένο και αποθηκευμένο στη δεξαμενή αποθήκευσης χαμηλής συγκέντρωσης. Μετά την αφύγρανση, ακολουθεί η διαδικασία της αναγέννησης όπου το αραιωμένο αφυγραντικό υλικό θα ανακτήσει την αρχική του συγκέντρωση. Μέσα στον αναγεννητή κυκλοφορεί θερμό νερό διαμέσου των φύλλων πολυπροπυλενίου και παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας. Καθώς το υγρό αφυγραντικό υλικό ζεσταίνεται, υγρός ατμός φεύγει από το χαμηλής συγκέντρωσης διάλυμα και παρασύρεται μακριά από το ρεύμα αέρα περιβάλλοντος. Στην έξοδο του αναγεννητή, το αφυγραντικό υλικό έχει ανακτήσει την αρχική του συγκέντρωση και αποθηκεύεται στην δεξαμενή υψηλής συγκέντρωσης, έτοιμο να εισέλθει ξανά στον αφυγραντή. Κατά την διεξαγωγή της διπλωματικής αυτής εργασίας, αρχικά λαμβάνονται μετρήσεις σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας και μετά παρατίθεται η επεξεργασία των μετρήσεων προς μελέτη της συμπεριφοράς της διάταξης. Άξιζει να σημειωθεί πως το ενδιαφέρον της παρούσας μονάδας και κατ'επέκταση της εργασίας, έγκειται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη διάταξη δε χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό και ο καινοτομικός της αυτός σχεδιασμός συναντάται σε ελάχιστες αντίστοιχες μονάδες στην Ελλάδα.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>5</b>
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	5
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΕΥΝΑΣ & ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ.....	8
1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	10
<b>2. ΘΕΡΜΟΚΙΝΗΤΟΙ ΨΥΚΤΕΣ .....</b>	<b>11</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	11
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ .....	13
2.2.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	13
2.2.2 ΜΟΝΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ/ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ .....	14
2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ.....	15
2.3.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	15
2.3.2 ΣΤΕΡΕΟΥ ΜΕΣΟΥ.....	16
2.3.3 ΥΓΡΟΥ ΜΕΣΟΥ.....	18
<b>3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΦΥΓΡΑΝΤΗ .....</b>	<b>19</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	19
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	21
3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	30
3.3.1 ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	30
3.3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....	31
3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	41
<b>4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ .....</b>	<b>42</b>
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	42
4.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ .....	44
4.2.1 ΑΦΥΓΡΑΝΤΗΣ .....	44

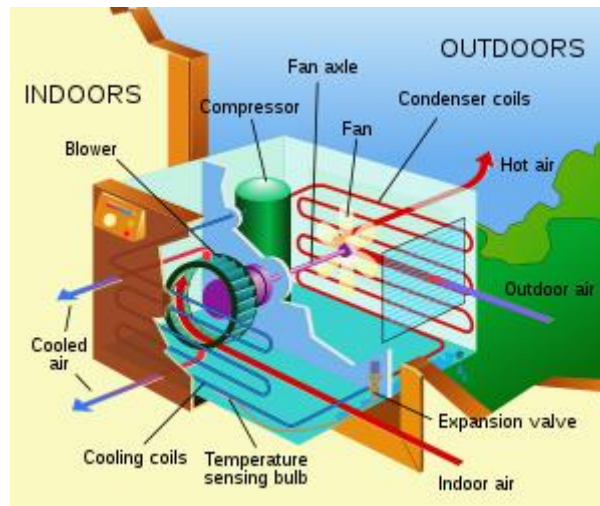
4.2.2	ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗΣ .....	53
4.2.3	ΕΞΑΤΜΙΣΤΙΚΟΣ ΨΥΚΤΗΣ .....	61
4.2.4	ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ .....	66
4.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	68
4.4	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	69
4.4.1	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΦΥΓΡΑΝΤΗ .....	70
4.4.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ.....	85
4.4.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
<b>5.</b>	<b>ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....</b>	<b>97</b>
<b>6.</b>	<b>ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....</b>	<b>99</b>
<b>7.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>101</b>

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

Η έννοια του κλιματισμού είναι γνωστό ότι έχει εφαρμοστεί στην Αρχαία Ρώμη, όπου νερό υδραγωγείου, διανεμήθηκε στους τοίχους ορισμένων σπιτιών για να κρυώσουν. Παρόμοιες τεχνικές στην μεσαιωνική Περσία εμπλέκονται με τη χρήση των δεξαμενών και πύργων του ανέμου για την ψύξη των κτιρίων κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου. Ο σύγχρονος κλιματισμός προέκυψε από τις προόδους στη χημεία κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα, και η πρώτη μεγάλης κλίμακας ηλεκτρικού κλιματισμού επινοήθηκε το 1902 και χρησιμοποιείται από Willis Haviland Carrier [1]. Κλιματισμός ονομάζεται η ρύθμιση της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της κίνησης, της καθαρότητας του αέρα ενός χώρου ο οποίος ονομάζεται κλιματιζόμενος. Οι βασικές λειτουργίες που επιτελούνται σε ένα σύστημα κλιματισμού είναι:

- Θέρμανση: είναι η διεργασία πρόσθεσης θερμικής ενέργειας (θερμότητας) στον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου με σκοπό την άνοδο της θερμοκρασίας ή τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε ορισμένα όρια [1].
- Ψύξη: είναι η διεργασία αφαίρεσης θερμικής ενέργειας (θερμότητας) από τον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου με σκοπό την πτώση της θερμοκρασίας ή τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε ορισμένα όρια [1].
- Ύγρανση: είναι η διεργασία πρόσθεσης νερού (υγρασίας) στον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου με σκοπό την άνοδο της σχετικής υγρασίας ή τη διατήρησή της σε ορισμένα όρια [1].
- Αφύγρανση: είναι η διεργασία αφαίρεσης νερού (υγρασίας) από τον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου με σκοπό την πτώση της σχετικής υγρασίας ή τη διατήρησή της σε ορισμένα όρια [1].
- Ανανέωση του αέρα: είναι η διεργασία λήψης εξωτερικού αέρα και απόρριψης αέρα από τους χώρους του κτιρίου, με σκοπό την αραίωση των αέριων προσμίξεων του αέρα και την εξασφάλιση της απαραίτητης ποιότητας του εσωτερικού αέρα [1].
- Καθαρισμός του αέρα: είναι η διεργασία αφαίρεσης των σωματιδιακών και βιολογικών προσμίξεων του αέρα με σκοπό τη βελτίωση και τη διατήρηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα [1].



Εικόνα 1 Βασικά Μέρη Συμβατικού Κλιματιστικού Συστήματος

Η απλούστερη και συγχρόνως η πλέον διαδεδομένη μέθοδος κλιματισμού βασίζεται στο φαινόμενο της αλλαγής φάσεως ενός ρευστού, συνήθως πτητικού και των θερμικών συναλλαγών που συνοδεύουν τη μεταβολή αυτή [2].

Πιο συγκεκριμένα, τα συμβατικά συστήματα κλιματισμού σήμερα, μειώνουν τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα στο χώρο, χρησιμοποιώντας μια πολύ απλή επιστημονική αρχή: όταν ένα ρευστό, περνά από την υγρή φάση στην αέρια, απορροφά θερμότητα, με αποτέλεσμα να παράγεται, ένα φορτίο ψύξης, γνωστό και ως λανθάνον φορτίο. Τα συστήματα κλιματισμού εκμεταλλεύονται αυτή την ιδιότητα της αλλαγής φάσης, εξαναγκάζοντας ειδικά χημικά υγρά να υπερψύχονται και να αναθερμαίνονται ξανά και ξανά σε ένα κλειστό σύστημα αγωγών, μέσω συμπίεσης και αποτόνωσης [3].

Τα χημικά υγρά που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διαδικασία λέγονται ψυκτικά μέσα και έχουν ιδιότητες που τους επιτρέπουν την αλλαγή φάσης, σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Το πιο διαδεδομένο ψυκτικό μέσο είναι το φρέον, όνομα που αντιστοιχεί σε οποιοδήποτε ψυκτικό μέσο που είναι Χλωροφθοράνθρακας (Chlorofluorocarbon – CFC), Υδροχλωροφθοράνθρακας (Hydrochlorofluorocarbon – HCFC) ή Υδροφθοράνθρακας (Hydrofluorocarbon – HFC) [3].

Στην Εικόνα 1, διακρίνονται τα μέρη ενός συμβατικού κλιματιστικού συστήματος. Στα συμβατικά συστήματα κλιματισμού, το ψυκτικό μέσο περνά μέσα από το Συμπιεστή ο οποίος ανεβάζει την πίεσή του και ταυτόχρονα προωθεί την κυκλοφορία του. Το ψυκτικό βρίσκεται σε αέρια φάση εισερχόμενο στο συμπιεστή και κατά την έξοδό του, η πίεση και η θερμοκρασία του έχουν αυξηθεί. Σε δεύτερη φάση, το αεριοποιημένο ψυκτικό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, προχωράει στον αγωγό συμπίκνωσης, ο οποίος είναι εκτεθειμένος σε

κύμα αέρα ψύξης, με αποτέλεσμα η θερμική ενέργεια να διαχέεται προς το εξωτερικό του δωματίου υπό τη μορφή ζεστού αέρα και το αεριοποιημένο ψυκτικό να συμπυκνώνεται. Δηλαδή, εξερχόμενο το ψυκτικό από τον αγωγό συμπύκνωσης, βρίσκεται πλέον στην υγρή φάση. Ακολουθώντας προχωρά στη βαλβίδα αποτόνωσης, όπου η πίεση του ψυκτικού υγρού πέφτει. Το ψυκτικό υγρό χαμηλής πίεσης εισέρχεται στον αγωγό εξάτμισης, όπου εξατμίζεται. Με αυτή την αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο, το ψυκτικό απορροφά θερμική ενέργεια, δημιουργώντας έτσι ένα φορτίο ψύξης. Εξωτερικά ο αγωγός εξάτμισης έρχεται σε επαφή με αέρα ο οποίος μέσω ενός φυσητήρα προωθείται στο εσωτερικό του χώρου που ψύχεται. Εξερχόμενο από τον αγωγό εξάτμισης, το ψυκτικό βρίσκεται σε αέρια φάση. Στη συνέχεια προχωράει στο Συμπιεστή για να επαναλάβει τον ίδιο κύκλο ξανά [3].

Αναφορικά με τα πλεονεκτήματά τους, αξίζει να σημειωθεί πως παρουσιάζουν ταχύτατη ανταπόκριση, γρήγορη δηλαδή ψύξη στο χώρο. Επίσης, η τεχνολογία τους είναι ευρέως γνωστή και υπάρχουν στην αγορά ποικίλλοι τύποι κλιματιστικών συστημάτων, καλύπτοντας ποικίλλες ανάγκες σε μεγέθη, απόδοση και χρήση [4].

Παρ'όλα ταύτα, τα μειονεκτήματά τους δεν είναι λίγα. Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία τους παρατηρείται άμεση θερμική απώλεια κατά τον αερισμό του χώρου, υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, θέματα υγείας προερχόμενα από ακόρεστη χρήση των συστημάτων καθώς και αίσθηση ξηρότητας του χώρου [4],[5]. Αυτή η όλο και περισσότερο εκτενής χρήση των εν λόγω συστημάτων είναι υπεύθυνη για την αυξανόμενη ζήτηση αιχμής της ηλεκτρικής ενέργειας το καλοκαίρι, η οποία φτάνει σε διάφορες περιπτώσεις στο ανώτατο όριο του δικτύου. Τέλος, η εκπομπή αέριων ρύπων υπεύθυνων για το φαινόμενο του θερμοκηπίου αυξάνεται, είτε από την ενεργειακή παραγωγή, είτε από τυχόν διαρροές των ψυκτικών ρευστών, γεγονός που ενισχύει το φαύλο κύκλο των κλιματικών αλλαγών [6].

## 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΕΥΝΑΣ & ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ

Οι απαιτήσεις κλιματισμού στον τριτογενή τομέα αυξάνονται συνεχώς, ιδιαίτερα λόγω των μεγαλύτερων απαιτήσεων θερμικής άνεσης και των υψηλότερων θερμοκρασιών που έχουν εμφανιστεί κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας. Την ίδια στιγμή, καινούριες τεχνολογίες είναι διαθέσιμες. Οι τεχνολογίες κλιματισμού που δε χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό έχουν αποδείξει, κάποιες για διάρκεια μεγαλύτερη των 10 ετών, την αποδοτικότητα και αξιοπιστία τους. Αυτές οι τεχνολογίες, χρησιμοποιούν αβλαβή ρευστά ( κυρίως νερό) και πολύ λιγότερη πρωτογενή ενέργεια σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα.

Χάρη στα νέα αυτά συστήματα , είναι δυνατόν να κλιματιστούν κτήρια μειώνοντας στο ελάχιστο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις [7].

Στην παρούσα εργασία μελετάται ένα τέτοιο σύστημα. Πρόκειται για σύστημα κλιματισμού, που όπως και τα συμβατικά, εκμεταλλεύεται το λανθάνον φορτίο ψύξης που προκύπτει από την απελευθέρωση θερμικής ενέργειας όταν η υγρασία στον αέρα περνά από την αέρια στην υγρή φάση. Παρόλα αυτά δεν χρησιμοποιεί συμπίεση, ούτε ψύχει και αναθερμαίνει το ψυκτικό, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα κατανάλωση έως και 4 φορές λιγότερης ενέργειας. Το σύστημα αυτό ανήκει στα συστήματα κλιματισμού που χρησιμοποιούν υγρό αφυγραντικό υλικό, στα οποία γίνεται εκτενής αναφορά παρακάτω. Στον κύκλο ψύξης υγρού στοιχείου, ένα αφυγραντικό διάλυμα (υγρό στοιχείο) χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει την υγρασία από τον αέρα , που κυκλοφορεί μεταξύ δύο κρίσιμων συστημάτων: του αφυγραντή και του αναγεννητή. Αφυγραντικό διάλυμα (υγρό στοιχείο) ψεκάζεται πάνω στον αφυγραντή εσωτερικής ψύξης, και κινείται προς τα κάτω λόγω της βαρύτητας, με αποτέλεσμα να έρχεται σε επαφή με τον αέρα που πρόκειται να ψυχθεί. Το αφυγραντικό διάλυμα και – εξ ορισμού – έχει μια ισχυρή τάση να απορροφά υγρό σε μορφή ατμού, οπότε απορροφά την υγρασία από τον αέρα, αφυγραίνει. Το τέλος αυτής της διαδικασίας βρίσκει τον αέρα κρύο και χωρίς υγρασία. Το αφυγραντικό διάλυμα, έχοντας απορροφήσει την υγρασία, είναι πλέον αραιωμένο. Έτσι, για να ανακτήσει την αρχική συγκέντρωσή του, εισέρχεται στον αναγεννητή. Το περιττό νερό στο διάλυμα – που προκαλεί και την αραιώση – παίρνει την απαραίτητη θερμότητα για να εξατμιστεί, από ζεστό νερό προερχόμενο από μια χαμηλής θερμοκρασίας πηγή. Στο τέλος της διαδικασίας, ο ζεστός υγρός αέρας απορρίπτεται στο περιβάλλον και το συμπυκνωμένο διάλυμα οδηγείται και πάλι στον αφυγραντή για να επαναλάβει και πάλι τον ίδιο κύκλο.

Η μέθοδος αυτή έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη συμβατική. Η εξάτμιση του αφυγραντικού γίνεται σε χαμηλή θερμοκρασία (40 – 70 °C), κάτι που οδηγεί στη μείωση της καταναλισκόμενης από το σύστημα ενέργειας. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι ο αέρας

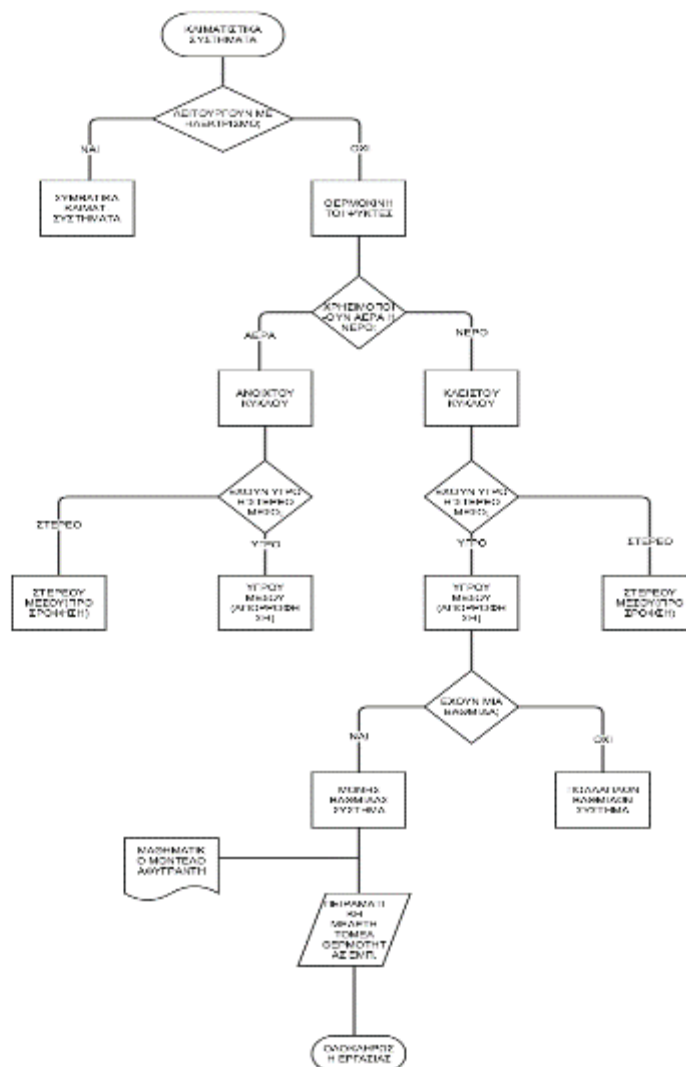


φιλτράρεται (ούτως ώστε να του αφαιρεθεί η υγρασία και να ψυχθεί) οδηγεί στη μείωση των βακτηρίων όταν έρχονται σε επαφή με το υγρό ξηραντικό στοιχείο.

Τα συστήματα κλιματισμού υγρού αφυγραντικού υλικού, έχουν γίνει αντικείμενο μελέτης στο ΕΜΠ. Τα περίπλοκα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας στον αφυγραντή και τον αναγεννητή, αποτέλεσαν θέμα προηγούμενης μελέτης. Βασισμένοι στη γνώση που έχει αποκτηθεί, ένα σύστημα υγρού στοιχείου έχει εγκατασταθεί στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής του ΕΜΠ για ερευνητικούς σκοπούς. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει κατασκευαστεί από την γερμανική εταιρία L-DCS.

### 1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η συγκεκριμένη εργασία, έχει ως αντικείμενο της, την πειραματική μελέτη αφυγραντικής-εξατμιστικής μονάδας που στεγάζεται στον Τομέα Θερμότητας του ΕΜΠ. Με τη μέθοδο ανάπτυξης των σχετικών με το αντικείμενο της εργασίας θεμάτων, από το γενικό στο ειδικό, σκοπό έχει την εισαγωγή του αναγνώστη στα κλιματιστικά συστήματα κι έπειτα την περιγραφή της νέας τεχνολογίας συστημάτων. Ύστερα, στην εργασία αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο αφυγραντή για την καλύτερη θεωρητική κατανόηση της διαδικασίας και των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψιν σε τέτοια συστήματα. Τέλος, η εργασία επικεντρώνεται στην προαναφερθείσα μονάδα, τόσο μέσω της περιγραφής της, όσο και μέσω της παράθεσης των πειραματικών δεδομένων που προέκυψαν από μετρήσεις που έγιναν σε αυτή. Πιο παραστατικά η δομή της εργασίας, δίδεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 2 Διάγραμμα Ροής-Δομή Εργασίας

## 2. ΘΕΡΜΟΚΙΝΗΤΟΙ ΨΥΚΤΕΣ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα προαναφερθέντα νέας τεχνολογίας κλιματιστικά συστήματα είναι οι λεγόμενοι θερμοκίνητοι ψύκτες ή αλλιώς ψύκτες απορρόφησης και προσρόφησης. Με τους ψύκτες αυτούς πραγματοποιείται μετατροπή της θερμότητας σε ψύξη. Οι τεχνολογίες τους βρίσκουν επιτυχή εφαρμογή στις περιπτώσεις όπου υπάρχει διαθέσιμη θερμότητα και δεν υπάρχουν ανάγκες για θερμότητα αλλά υπάρχουν ανάγκες για ψύξη. Τέτοια παραδείγματα είναι τα συστήματα συμπαραγωγής, στα οποία η συμπαραγόμενη θερμότητα κατά τη διάρκεια του χειμώνα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση χώρων (π.χ. ξενοδοχεία, νοσοκομεία, μεγάλα δημόσια κτίρια κλπ.), ενώ το καλοκαίρι διοχετεύεται σε ψύκτες απορρόφησης/προσρόφησης, οι οποίοι παράγουν ψύξη για τον κλιματισμό των χώρων [8].

Οι θερμοκίνητοι ψύκτες μπορούν να χαρακτηριστούν από τρία θερμοκρασιακά επίπεδα

- Επίπεδο υψηλής θερμοκρασίας στο οποίο παρέχεται η θερμοκρασία αναγέννησης της διεργασίας ρόφησης,
- Επίπεδο χαμηλής θερμοκρασίας στο οποίο λειτουργεί η διαδικασία ψύξης,
- Μέσο επίπεδο θερμοκρασίας στο οποίο και η θερμότητα που απορρίπτεται από τον κύκλο ψυχρού νερού και η θερμότητα αναγέννησης πρέπει να απομακρυνθούν [8].

Για την απομάκρυνση αυτής της θερμότητας, στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται πύργος ψύξης υγρού υλικού.

Τα συστήματα κλιματισμού με θερμοκίνητους ψύκτες που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα μπορούν να ταξινομηθούν σε :

- Συστήματα Κλειστού Κύκλου: αυτά είναι θερμοκίνητοι ψύκτες που παρέχουν ψυχρό νερό, το οποίο είτε χρησιμοποιείται στις κεντρικές κλιματιστικές μονάδες για να παρέχει πλήρως κλιματισμένο αέρα (ψυχρό, ξηρό) είτε διανέμεται μέσω ενός δικτύου ψυχρού νερού σε καθορισμένους χώρους για να ενεργοποιήσει τις τοπικές μονάδες των δωματίων (π.χ. fancoils). Είναι συστήματα απορρόφησης και προσρόφησης που χρησιμοποιούν μίγματα  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  ή  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  (απορρόφησης) και μίγμα  $\text{H}_2\text{O}$ /πήκτωμα πυριτίου (προσρόφησης). Στην αγορά σήμερα υπάρχουν διαθέσιμοι ψύκτες απορρόφησης, που διακρίνονται σε ψύκτες μονής βαθμίδας ή πολλαπλών βαθμίδων [8],[9].
- Συστήματα Ανοιχτού Κύκλου : που επιτρέπουν πλήρη κλιματισμό παρέχοντας ψυχρό και ξηρό αέρα σύμφωνα με τις απαιτούμενες συνθήκες άνεσης. Το ψυκτικό μέσο είναι πάντα νερό δεδομένου ότι είναι σε άμεση επαφή με τον αέρα. Χωρίζονται σε δύο

υποκατηγορίες. Στην πρώτη ομαδοποιούνται τα πιο κοινά συστήματα, τα συστήματα ψύξης ανοικτού κύκλου, που χρησιμοποιούν έναν περιστρεφόμενο τροχό αφύγρανσης με στερεό υλικό (προσρόφηση). Στη δεύτερη βρίσκονται τα κλιματιστικά συστήματα ανοιχτού κύκλου που χρησιμοποιούν υγρό υλικό (απορρόφηση) και αποτελούν νέα συστήματα σε ερευνητικό στάδιο [8],[9].

Μια βασική παράμετρος που περιγράφει την αποδοτικότητα ενός θερμοκίνητου ψύκτη είναι ο θερμικός Συντελεστής Απόδοσης (Coefficient of Performance, Cop), που ορίζεται ως το κλάσμα της θερμότητας που απορρίπτεται από το κύκλωμα ψυχρού νερού και της απαραίτητης θερμότητας αναγέννησης, δηλαδή  $COP_{THERMAL} = Q_{COLD}/Q_{HEAT}$ . Είναι δε διαφορετικός από το COP ενός συμβατικού, ηλεκτροκίνητου ψύκτη συμπίεσης, που ορίζεται ως  $COP = Q_{COLD}/ELECTRIC$  με τον όρο Electric να αντιπροσωπεύει την κατανάλωση ενέργειας του ψύκτη [8].

Ο ορισμός του  $COP_{THERMAL}$  δεν περιλαμβάνει άλλη πρόσθετη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, μια ρεαλιστική σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών απαιτεί την εκτίμηση της συνολικής ενέργειας που απαιτείται για τροφοδοσία θερμότητας, για αντλίες, ανεμιστήρες, κλπ. Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο μικρότερος είναι ο COP, τόσο περισσότερη τροφοδοσία θερμότητας απαιτείται και περισσότερη θερμότητα πρέπει να απορριφθεί από τον ψυκτικό πύργο. Αντίστροφα, η υψηλή τιμή COP είναι πλεονεκτική στην μείωση και της τροφοδοσίας θερμότητας και της ηλεκτρικής ενέργειας για τις αντλίες στον κύκλο θέρμανσης και στον κύκλο επανάψυξης [8].

Η απαιτούμενη θερμοκρασία ψυχρού νερού εξαρτάται από το εγκατεστημένο σύστημα ψύξης στους επιμέρους χώρους. Σε περίπτωση που απαιτείται αφύγρανση του αέρα, π.χ. πτώση κάτω από το σημείο κορεσμού της θερμοκρασίας δωματίου με τη χρήση τοπικών κλιματιστικών μονάδων, απαιτούνται θερμοκρασίες ψυχρού νερού της τάξης  $6^{\circ}\text{C}$  -  $9^{\circ}\text{C}$ . Για την απομάκρυνση μόνο των αισθητών ψυκτικών φορτίων, δεδομένου ότι επιτυγχάνεται με παροχή ψυχρού νερού  $12^{\circ}\text{C}$  -  $15^{\circ}\text{C}$  είναι ικανοποιητική, επιτρέποντας έτσι να λειτουργήσει ο ψύκτης σε υψηλότερη απόδοση [8].

## 2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

### 2.2.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Στα συστήματα Κλειστού Κύκλου,θερμικά οδηγούμενοι ψύκτες παρέχουν το νερό ψύξης, που με τη σειρά του είτε χρησιμοποιείται σε μονάδες διαχείρισης αέρα, είτε διανέμεται μέσω δικτύου στις αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις κλιματισμού δωματίων. Οι τεχνικά ώριμες μηχανές είναι οι ψύκτες απορρόφησης ή οι ψύκτες προσρόφησης. Οι ψύκτες απορρόφησης είναι οι πιο διαδεδομένοι ψύκτες παγκοσμίως. Η θερμική συμπίεση του ψυκτικού μέσου επιτυγχάνεται με τη χρήση υγρού διαλύματος ψυκτικού μέσου / ροφητικού υλικού και πηγή θερμότητας, αντικαθιστώντας με αυτόν τον τρόπο την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ενός μηχανικού συμπιεστή. Τα ζεύγη ψυκτικού μέσου / αφυγραντικού υλικού που χρησιμοποιούνται είναι το διάλυμα βρωμιούχου λιθίου  $\text{LiBr} / \text{H}_2\text{O}$  και αυτό της αμμωνίας  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ , όπου στην πρώτη περίπτωση το ψυκτικό μέσο είναι το  $\text{H}_2\text{O}$  ενώ στη δεύτερη είναι η  $\text{NH}_3$ . Η ψύξη βασίζεται στην εξάτμιση του ψυκτικού μέσου στον εξατμιστή σε πολύ χαμηλές πιέσεις. Το ατμοποιημένο ψυκτικό μέσο απορροφάται στον αφυγραντή, αραιώνοντας το διάλυμα ψυκτικού μέσου / αφυγραντικού υλικού. Το διάλυμα αντλείται συνεχώς στον αναγεννητή (γεννήτρια ατμού), όπου επιτυγχάνεται η αναγέννηση του διαλύματος χρησιμοποιώντας θερμότητα. Το ψυκτικό μέσο στη συνέχεια, συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή και κυκλοφορεί με τη βοήθεια μιας στραγγαλιστικής / εκτονωτικής βαλβίδας πάλι στον εξατμιστή. Στην περίπτωση ψυκτών προσρόφησης χρησιμοποιούνται στερεά πορώδη προσροφητικά υλικά, αντί υγρού διαλύματος. Τα διαθέσιμα στην αγορά συστήματα χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο και μίγμα  $\text{H}_2\text{O}/\text{πρήκτωμα πυριτίου}$  ως προσροφητικό υλικό. Οι ψύκτες αυτοί αποτελούνται από δύο χώρους προσροφητικού υλικού, έναν εξατμιστή και ένα συμπυκνωτή [10].

### 2.2.2 ΜΟΝΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ/ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ

Η διαδικασία απορρόφησης που περιγράφηκε στο 1.3.1 αποτελεί έναν κύκλο λειτουργίας συστημάτων κλιματισμού μονής βαθμίδας. Ωστόσο, υπάρχουν και συστήματα κλιματισμού κλειστού κύκλου-απορρόφησης πολλαπλών βαθμίδων στα οποία πραγματοποιείται εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας από τον συμπυκνωτή για να τροφοδοτήσει επιπλέον στάδια απορρόφησης και να διπλασιαστεί ή να τριπλασιαστεί η ποσότητα του ψυκτικού μέσου που αφαιρείται από το διάλυμα [11].

## 2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

### 2.3.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα συστήματα ψύξης ανοικτού κύκλου χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο, σε άμεση επαφή με τον αέρα. Ο θερμοκίνητος ψυκτικός κύκλος είναι συνδυασμός εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση αέρα μέσω αφυγραντικού υλικού. Για το σκοπό αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υγρά ή στερεά υλικά. Ο όρος «ανοικτός» χρησιμοποιείται για να δείξει ότι το ψυκτικό μέσο απορρίπτεται από το σύστημα αφού παράσχει την ψύξη και νέα ποσότητα ψυκτικού μέσου εισάγεται, μέσω ενός ανοιχτού βρόχου. Επομένως, μόνο το νερό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο, δεδομένου ότι υπάρχει άμεση επαφή με την ατμόσφαιρα [12].

Ο ανοικτός κύκλος ψύξης βασίζεται σε συνδυασμό εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση του αέρα μέσω αφυγραντικού υλικού. Και πάλι, για τον σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν στερεά υλικά. Ο πρότυπος κύκλος που εφαρμόζεται σήμερα χρησιμοποιεί περιστρεφόμενους αφυγραντικούς τροχούς, εξοπλισμένους είτε με πήκτωμα πυριτίου ως στερεό υλικό προσρόφησης ή χλωριούχο λίθιο ως υλικό απορρόφησης. Όλα τα απαιτούμενα μέρη, όπως αφυγραντική ανακύκλωση, μονάδες ανάκτησης θερμότητας, υγραντές, ανεμιστήρες και εναλλάκτες θερμότητας νερού-αέρα, είναι πρότυπα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές κλιματισμού και ξήρανσης αέρα κτιρίων ή εργοστασίων εδώ και πολλά χρόνια. Ωστόσο, ο κατάλληλος συνδυασμών των εξαρτημάτων που θα αποτελέσουν το αφυγραντικό-εξατμιστικό σύστημα ψύξης, που είναι το συνηθέστερο σύστημα ανοιχτού κύκλου, απαιτεί εμπειρία και χρειάζεται προσοχή [12].

Η εφαρμογή του κύκλου αυτού περιορίζεται στα εύκρατα κλίματα αφού η πιθανή αφύγρανση δεν επαρκεί για την εξατμιστική ψύξη του αέρα παροχής σε συνθήκες με κατά πολύ υψηλότερες τιμές υγρασίας του περιβάλλοντος αέρα. Συνεπώς, για κλίματα όπως αυτά των μεσογειακών χωρών χρησιμοποιούνται άλλες παραμετροποιήσεις των αφυγραντικών διεργασιών [12].

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν υλικά απορρόφησης ή προσρόφησης, έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως μεγαλύτερη αφύγρανση του αέρα στην ίδια θερμοκρασία λειτουργίας και τη δυνατότητα μεγαλύτερης αποθήκευσης ενέργειας μέσω συγκεντρωτικών υδροσκοπικών διαλυμάτων [12].

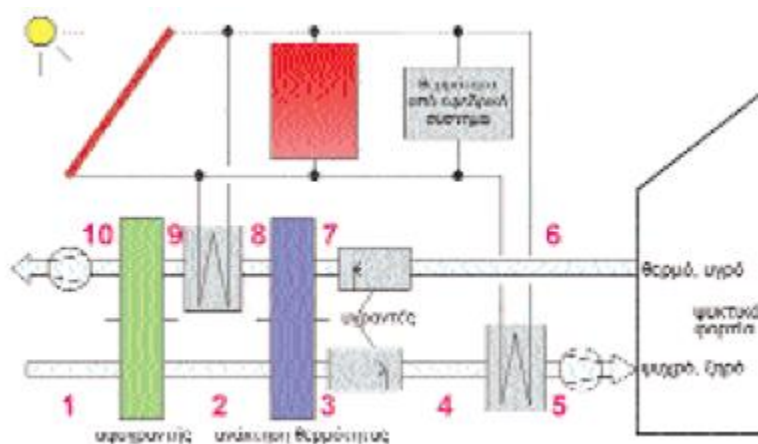
### 2.3.2 ΣΤΕΡΕΟΥ ΜΕΣΟΥ

Η βασική διαδικασία παροχής κλιματιζόμενου αέρα σε συστήματα ανοιχτού κύκλου στερεού μέσου μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

#### A: Περίπτωση ψύξης

Κατά την Εικόνα 3, θερμός και υγρός νωπός αέρας (1) εισάγεται στον αργά περιστρεφόμενο τροχό αφύγρανσης και αφυδατώνεται με την προσρόφηση της υγρασίας (1-2). Δεδομένου ότι ο αέρας θερμαίνεται από τη θερμότητα προσρόφησης, οδηγείται στον τροχό ανάκτησης θερμότητας (2-3), με συνέπεια να επιτυγχάνεται σημαντική πρόψυξη του ρεύματος νωπού αέρα. Στη συνέχεια, ο αέρας υγραίνεται και ψύχεται περαιτέρω από έναν ελεγχόμενο υγραντή (3-4), σύμφωνα με την επιθυμητή θερμοκρασία και υγρασία του αέρα παροχής. Το ρεύμα αέρα απόρριψης υγραίνεται (6-7) κοντά στο σημείο κορεσμού του για να εκμεταλλευτεί την μέγιστη δυνατότητα ψύξης, προκειμένου να επιτευχθεί μια αποδοτική ανάκτηση θερμότητας (7-8) [10].

Τέλος, το ροφητικό υλικό του τροχού πρέπει να αναγεννηθεί (9-10) με τη χρήση θερμότητας σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (της τάξης των 50-75°C), επιτρέποντας έτσι συνεχή λειτουργία αφύγρανσης [10].



Εικόνα 3 Σχηματικό Διάγραμμα Ενός Συστήματος Ψύξης DEC



## **B: Περίπτωση θέρμανσης**

Σε περιόδους με χαμηλές απαιτήσεις σε θέρμανση, μπορεί να αρκεί ανάκτηση θερμότητας από το ρεύμα αέρα απόρριψης και ανταλλαγή ενθαλπίας χρησιμοποιώντας έναν τρόπο

ταχείας περιστροφής του τροχού αφύγρανσης. Σε περίπτωση αυξημένης ζήτησης σε θέρμανση, διοχετεύεται θερμότητα από τους θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες και, εάν είναι απαραίτητο, από μια εφεδρική πηγή θερμότητας (4-5)Εικ. 3. Επίπεδοι θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να εφαρμοστούν ως πηγή θέρμανσης στα συστήματα ηλιακής ψύξης DEC. Το ηλιακό σύστημα μπορεί να αποτελείται από συλλέκτες υγρού και δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού, για καλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ενεργείας. Αυτή η διάταξη απαιτεί πρόσθετο εναλλάκτη θερμότητας νερού, αέρα (8-9)Εικ.3, για να συνδεθεί το ηλιακό σύστημα με το σύστημα αέρα. Μια εναλλακτική λύση, που οδηγεί σε χαμηλότερο πάγιο κόστος, είναι η άμεση τροφοδότηση της θερμότητας αναγέννησης από ηλιακούς συλλέκτες αέρα. Σε περιπτώσεις ακραίων συνθηκών όπως π.χ. σε παράκτιες περιοχές της Μεσογείου, απαιτείται ειδικός σχεδιασμός του τροχού αφύγρανσης [10].

Στην Ελλάδα, λόγω της υψηλής υγρασίας του περιβαλλοντικού αέρα, μια τυποποιημένη διάταξη του ψυκτικού κύκλου αφύγρανσης δεν είναι ικανή να μειώσει την υγρασία σε επίπεδο αρκετά χαμηλό, ώστε να επιτρέψει τη χρήση άμεσης εξατμιστικής ψύξης [10].

Πιο σύνθετες διατάξεις κεντρικών κλιματιστικών μονάδων DEC, που χρησιμοποιούν για παράδειγμα διαφορετικό τροχό ενθαλπίας ή πρόσθετους ψύκτες αέρος τροφοδοτούμενους με ψυχρό νερό, μπορούν να δώσουν λύση σε τέτοιου είδους προβλήματα [10].

### 2.3.3 ΥΓΡΟΥ ΜΕΣΟΥ

Τα συστήματα αυτά αποτελούν μια νέα καινοτομική προσέγγιση. Ουσιαστικά είναι συστήματα απορρόφησης ανοικτού κύκλου, όπου το νερό χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο. Χρησιμοποιούν υγρό διάλυμα ως υλικό απορρόφησης [10]. Περιλαμβάνουν έναν αφυγραντή (απορροφητήρα) και μια γεννήτρια για την αναγέννηση του διαλύματος, σε διάταξη πύργου. Διαθέτει λιγότερα τμήματα από τα συστήματα ανοιχτού κύκλου με στερεό μέσο και λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση. Μάλιστα, παρουσιάζει πιο αποδοτική εκμετάλλευση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (έως 60-70°C). Αυτός ο τύπος συστημάτων έχει διάφορα πλεονεκτήματα όπως υψηλότερα ποσοστά αφύγρανσης αέρα στις ίδιες θερμοκρασίες αναγέννησης σε σχέση με τα συστήματα ψύξης στερεού μέσου, και δυνατότητα υψηλής ενεργειακής αποθήκευσης με αποθήκευση μάζας του συμπυκνωμένου διαλύματος. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για περαιτέρω αύξηση της εκμετάλλευσης των συστημάτων κλιματισμού. Άξιο λόγου είναι πως δεν υπάρχει ακόμη εμπορική διαθεσιμότητα, καθώς απαιτείται περαιτέρω βελτιστοποίηση [9].

### 3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΦΥΓΡΑΝΤΗ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου αφυγραντή συστήματος κλιματισμού ανοιχτού κύκλου με υγρό μέσο (αφύγρανση) [13].

Ο λόγος που η εργασία αυτή περιέχει το μοντέλο του αφυγραντή και όχι του αναγεννητή είναι διότι κρίθηκε σκόπιμο να εστιάσει στη λειτουργία της συγκεκριμένης συσκευής, καθώς η έξοδός της είναι η παροχή αφυγραμένου και ψυχρού αέρα στο κτήριο που κλιματίζεται. Επομένως, καλό είναι να αναδειχθεί και μαθηματικά η αρχή λειτουργίας του. Έπειτα, η λειτουργία του αναγεννητή μπορεί να γίνει και ετερόχρονα από τον κλιματισμό, άλλο ένα στοιχείο της κρισιμότητας της λειτουργίας του αφυγραντή στο σύνολο της μονάδας κλιματισμού.

Το μαθηματικό αυτό μοντέλο αναπτύσσεται εκτενέστερα στη δημοσίευση των I.P. Koronaki, R.I. Christodoulaki, V.D. Papaefthimiou, E.D. Rogdakis με τίτλο “Thermodynamic analysis of a counterflow adiabatic dehumidifier with different liquid desiccant materials”, όπου έχει παραχθεί ένα μαθηματικό πρότυπο που επιτρέπει την αξιόπιστη πρόβλεψη της αποδοτικότητας αφυγραντή, χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά υδατικά διαλύματα (LiCl, LiBr και CaCl<sub>2</sub>). Αυτό το πρότυπο εξετάζει τη θερμότητα της απορρόφησης, η οποία εκφράζει την ενέργεια στο διάλυμα κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης του ατμού και έχει επιπτώσεις στην ικανότητα του διαλύματος να απορροφήσει τους υδρατμούς. Χρησιμοποιήθηκαν, επίσης, τα πειραματικά στοιχεία για LiCl των Chung και Ghosh για να ελέγξουν αυτήν την θεωρητική ανάλυση [14].

Ο κλιματισμός αντιπροσωπεύει το 20-40% της ενεργειακής κατανάλωσης σε ένα κτήριο. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, τα συμβατικά συστήματα ψύξης λειτουργούν με συμπίεση ατμού και υπερψύχουν την παροχή αέρα με αποτέλεσμα την πτώση θερμοκρασίας και την αφύγρανση. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν σε μια θερμοκρασία πιο χαμηλή από τη θερμοκρασία σημείου υγροποίησης του αέρα που παρέχεται, έτσι ο αέρας θερμαίνεται εκ νέου πριν να εξαχθεί. Αντίθετα από τα συμβατικά συστήματα ψύξης, το σύστημα κλιματισμού με αφυγραντικό υλικό δεν απαιτεί τον αέρα να ψύχεται κάτω από το σημείο υγροποίησης του. Με τη χρήση ενός συστήματος αφύγρανσης επιτυγχάνεται έως και 40% ενεργειακό “κέρδος” σε σχέση με τα συμβατικά κλιματιστικά συστήματα. Τα συστήματα αφύγρανσης οφείλουν την αυξημένη δημοτικότητα τους στην ευελιξία τους σε λειτουργία, δηλαδή τη δυνατότητά τους να λειτουργήσουν με μια σχετικά χαμηλή θερμοκρασία αναγέννησης, μεταξύ 60 και 75 βαθμών Κελσίου, καθιστώντας πιθανή τη χρήση της ηλιακής

ενέργειας ή της θερμότητας των αποβλήτων. Κατά συνέπεια, η περίσσεια ενέργειας μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω [13].

Ο στόχος της αφυγραντικής μονάδας ενός υγρού αφυγραντικού συστήματος είναι να αφαιρεθεί η υγρασία του αέρα, με το να έρθει σε επαφή με ψεκασμένο αφυγραντικό υγρό. Στον αφυγραντή, το ισχυρό, ψυχόμενο διάλυμα ψεκάζεται στην κορυφή της συσκευής. Ο υγρός αέρας από το περιβάλλον εισάγεται στον αφυγραντή στο κατώτατο σημείο. Κατά το τέλος της διαδικασίας, ο αέρας έχει αφυγρανθεί και το διάλυμα έχει αραιώσει. Η περιεκτικότητα του αέρα σε υγρασία που λαμβάνεται στην έξοδο του απορροφητή είναι χαμηλή, σε συνδυασμό με τη διατήρηση μιας χαμηλής θερμοκρασίας αφύγρανσης [13].

Η κατευθυντήρια δύναμη για τη μεταφορά μάζας μεταξύ του υγρού αφυγραντικού διαλύματος και του αέρα είναι η διαφορά μεταξύ της πίεσης ατμού αφύγρανσης και της μερικής πίεσης του υδρατμού στον αέρα. Δηλαδή, η μεταφορά υγρασίας πραγματοποιείται από τον αέρα στο διάλυμα μόνο όταν το τελευταίο είναι χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης λιγότερης από την πίεση ατμών στον αέρα [13].

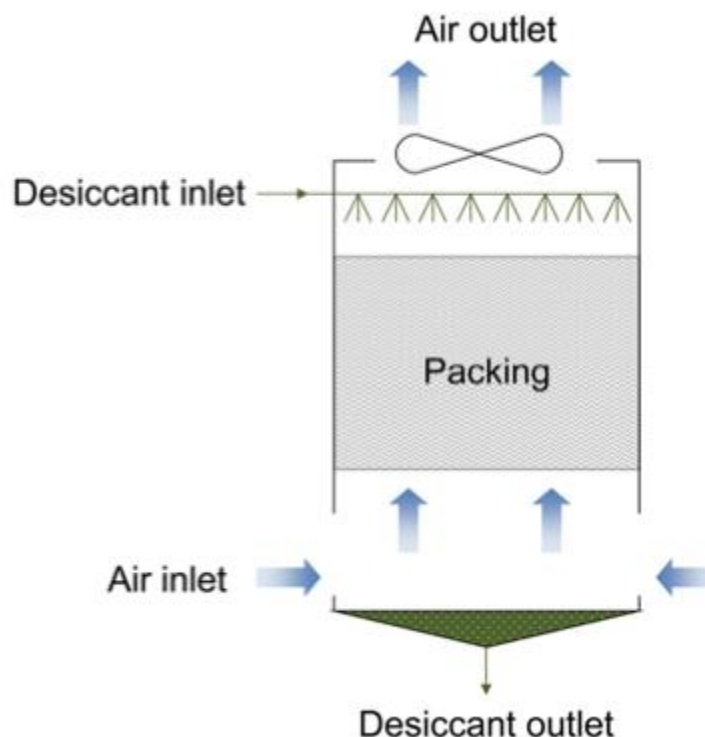
Διαλύματα όπως το LiBr, LiCl ή το CaCl<sub>2</sub> χρησιμοποιούνται κατά κόρον ως υγρά αφύγρανσης, σε σύγκριση με τις γλυκόλες, δεδομένου ότι έχουν περίπου μηδενική πίεση ατμών. Αν και οι γλυκόλες είναι λιγότερο διαβρωτικές από τα προαναφερθέντα άλατα, έχουν πολύ χαμηλή επιφανειακή πίεση ατμών και η εξάτμισή τους μολύνει τον αέρα, που αυξάνει τους κινδύνους για αναπνευστικά προβλήματα. Αυτές οι απώλειες εξάτμισης είναι απαράδεκτες σε ένα κατοικημένο κτήριο, επομένως τα άλατα υπερισχύουν σαν επιλογή [13].

Η παροχή αντίθετης κατεύθυνσης είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιημένο σχέδιο παροχής για έναν αφυγραντή/αναγεννητή και διάφοροι ερευνητές το έχουν αναλύσει. Αξίζει να γνωστοποιηθεί πως πολλοί απ' αυτούς έχουν αναπτύξει τα μαθηματικά πρότυπα των συνδεδεμένων διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας και μάζας στον αφυγραντή ή τον αναγεννητή. Ωστόσο, λίγοι εξ'αυτών έχουν αναλύσει την αφυγραντική ικανότητα περισσότερων από δύο υγρών αφυγραντικών υλικών [13].

### 3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το αναλυτικό πρότυπο αναπτύχθηκε από τους Rogdakis και Papaefthimiou [15],[16]. Με βάση τους νόμους διατήρησης ενέργειας και μάζας, το αναπτυγμένο αναλυτικό πρότυπο περιγράφει με συνοχή τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας που πραγματοποιούνται μέσα σε έναν αφυγραντή (ανοδική ροή αέρα και καθοδική ροή διαλύματος) [13]. Προκειμένου να αρχίσουν οι υπολογισμοί, έληφθησαν υπόψιν οι ακόλουθες αρχικές παράμετροι: η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία αέρα, η παροχή αέρα, η παροχή διαλύματος και οι συγκεντρώσεις των [13]. Το αναπτυγμένο αυτό αναλυτικό πρότυπο επικυρώθηκε έπειτα σε σχέση με τα πειραματικά στοιχεία που λήφθηκαν από τους Chung και Ghosh [14]. Προκειμένου να απλοποιηθεί η πολυπλοκότητα της ανάπτυξης του μοντέλου, οι παραδοχές που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς είναι:

- Αδιαβατική αφυγραντική διαδικασία,
- Μονοδιάστατη ανάλυση : η μεταφορά θερμότητας και μάζας εμφανίζεται μόνο στην κατεύθυνση ροής,
- Ομοιόμορφη παροχή νερού στον αφυγραντή
- Ισορροπία πίεσης μεταξύ του ατμού και υγρού στην επιφάνεια
- Σταθερός αριθμός Lewis στις μετρήσεις των Chung και Ghosh [14]
- Αμελητέα μεταφορά θερμότητας ακτινοβολίας, λόγω των μικρών διαφορών θερμοκρασίας της διαδικασίας [13]



Εικόνα 4 Σχηματικό Διάγραμμα Ροής Αφυγραντή

Αρχικά, με βάση τη σταθερού βήματος μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης Runge-Kutta, έγινε πρόβλεψη της απόδοσης της συσκευής κάτω από διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Κατά την επικύρωση του μοντέλου, βρέθηκαν σε πλήρη συμφωνία τα πειραματικά και τα θεωρητικά δεδομένα, με τη μέγιστη απόκλιση να είναι  $\pm 2,9\%$  για τη θερμοκρασία εξόδου του αέρα,  $\pm 15,9\%$  για την υγρασία εξόδου αέρα και  $\pm 2,8\%$  για τη θερμοκρασία εξόδου διαλύματος. Μετά την επικύρωση του μοντέλου, ο ρυθμός και η απόδοση της διαδικασίας αφύγρανσης αξιολογήθηκαν υπό την επίδραση των παραμέτρων, όπως της θερμοκρασίας του αέρα και της υγρασίας του, της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αφυγραντικού υλικού και της παροχής αέρα και αφυγραντικού. Τα τρία υγρά αφυγραντικά διαλύματα, δηλαδή LiCl, LiBr και CaCl<sub>2</sub> αξιολογήθηκαν το ένα έναντι του άλλου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η υψηλή ικανότητα αφύγρανσης και η καλύτερη δυνατή απόδοση του συστήματος θα μπορούσε να επιτευχθεί υπό υγρές συνθήκες, χαμηλή παροχή αέρα και LiCl ως αφυγραντικό διάλυμα [13].

Το αναπτυγμένο υπολογιστικό πρόγραμμα όχι μόνο είναι σε θέση να προβλέψει τις τιμές εξόδου των παραμέτρων από τον αφυγραντή, αλλά μπορεί επίσης να παράγει τις ακριβείς εκτιμήσεις αυτών των τιμών κατά μήκος του ύψους του αφυγραντή. Έτσι, η μελέτη της αναλογίας υγρασίας αέρα κατά μήκος του ύψους του αφυγραντή εφαρμόστηκε με τις αρχικές τιμές:  $T_{a,in}=36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $W_{a,in}=0.01486\text{ kg}_w/\text{kg}_{da}$ ,  $\dot{m}_a=0.0653\text{ kg/sec}$ ,  $T_{s,in}=14^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{m}_s=0.0107\text{ kg/sec}$  and  $X=30\%$ .

Ομοίως, υπολογίστηκε η παροχή του αέρα και η θερμοκρασία διαλύματος κατά μήκος του ύψους του αφυγραντή, με τον καθορισμό των ίδιων αρχικών τιμών [13].

Τα αφυγραντικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την ανάλυση είναι διαλύματα ύδατος LiCl, LiBr και του CaCl<sub>2</sub>, το σημείο βρασμού των οποίων είναι πάνω από 1200 βαθμούς Κελσίου σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Έτσι, η πίεση ατμών, η θερμοκρασία αφύγρανσης, η μεταφορά μάζας και θερμότητας και η πτώση πίεσης είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι στην αφυγραντική ικανότητα των διαλυμάτων [13].

### Η πίεση ατμών

Τα διαλύματα με τη χαμηλότερη πίεση ατμών μπορούν να απορροφήσουν περισσότερη υγρασία από διαλύματα με υψηλότερη πίεση ατμών, κάτω από την ίδια θερμοκρασία και συγκέντρωση. Μεταξύ των τριών διαλυμάτων, το LiCl έχει τη χαμηλότερη πίεση υδρατμών κατά συνέπεια, το LiCl έχει την υψηλότερη αφυγραντική ικανότητα, ενώ το CaCl<sub>2</sub> έχει τη χαμηλότερη [13].

Μετά από τις εξισώσεις συσχετισμού πίεσης ατμών, η ισοδύναμη αναλογία υγρασίας διαλύματος μπορεί να υπολογιστεί, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$W^{sat}(T_s) = 0.622 \frac{p_{w,sat}^{sat}(T_s)}{p_{atm} - p_{w,s}^{sat}(T_s)} \quad [13] \quad (\text{εξ.1})$$

Με βάση την ανωτέρω εξίσωση, αναπτύχθηκαν τα ψυχομετρικά διαγράμματα και για τα τρία διαλύματα. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες LiCl και του CaCl<sub>2</sub> λαμβάνονται από τον Conde [16], ενώ οι ιδιότητες LiBr λαμβάνονται από τον McNeely [17]. Οι γραμμές διαλύματος είναι σχεδόν συμπίπτουσες με τις γραμμές υγρασίας του αέρα εντούτοις οι γραμμές πολύ χαμηλής συγκέντρωσης διαλύματος βρίσκονται κοντά στη γραμμή αέρα, οι γραμμές πολύ υψηλής συγκέντρωσης διαλύματος βρίσκονται κοντά στις χαμηλές γραμμές σχετικής υγρασίας αέρα. Από τα αναπτυγμένα ψυχομετρικά διαγράμματα, θα μπορούσε να απαχθεί το συμπέρασμα ότι η αποδοτικότητα αφυγραντών ενισχύεται με τη χαμηλότερη θερμοκρασία και την υψηλότερη συγκέντρωση και πως το LiCl έχει την καλύτερη απόδοση αφύγρανσης από άλλα εξετασμένα διαλύματα [13].

### Η θερμότητα της απορρόφησης

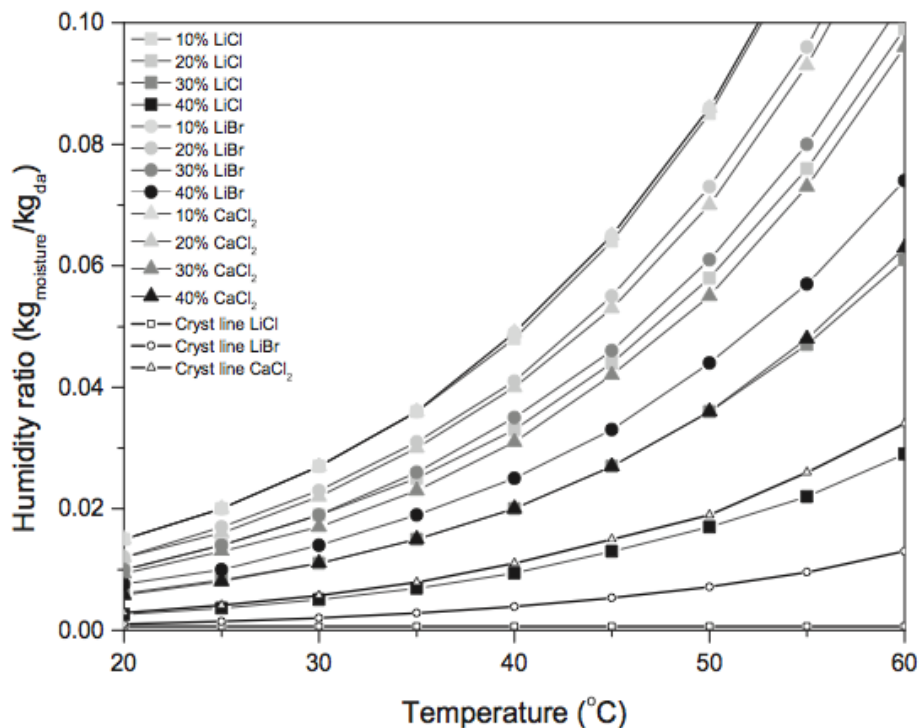
Παρά το γεγονός ότι η θερμοκρασία κορεσμού του καθαρού υδρατμού είναι ανάλογη μόνο της πίεσης, η θερμοκρασία διαλύματος εξαρτάται όχι μόνο από την πίεση, αλλά και από τη συγκέντρωση του άλατος στο διάλυμα. Η θερμοκρασία διαλύματος είναι πάντα μεγαλύτερη

από τη θερμοκρασία του υδρατμού, λόγω της παρουσίας του άλατος στο διάλυμα. Κατά τη διαδικασία αφύγρανσης, τα μόρια υδρατμών λαμβάνονται από το διάλυμα ενώ η συμπύκνωση υδρατμών εμφανίζεται μέσα στο διάλυμα [13].

Κατά συνέπεια, η ενέργεια που προστίθεται στο διάλυμα, κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης ενός κιλού υδρατμού εκφράζεται από τη διαφορά ενθαλπίας αφύγρανσης (θερμότητα της αφύγρανσης), που δίνεται από την εκφραση :

$$\Delta h_{\text{evr}} = h_{\text{v}}(p, T_{\text{s}}) - h_{\text{g},\text{s}}(T_{\text{v}}, X) \quad [19] \quad (\text{εξ.2})$$

Η θερμότητα της αφύγρανσης είναι μεγαλύτερη από τη θερμότητα συμπύκνωσης των υδρατμών στην ίδια πίεση. Η θερμότητα της αφύγρανσης αυξάνεται με την αύξηση στη συγκέντρωση ενώ μειώνεται με την αύξηση στη θερμοκρασία. Στην Εικόνα 5, παρουσιάζεται η θερμότητα της αφύγρανσης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας διαλύματος στην ίδια συγκέντρωση και για τα τρία διαλύματα.



Εικόνα 5 Ψυχομετρικές Καμπύλες Διαλυμάτων

### Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και μάζας

Στην εν λόγω δημοσίευση, οι συσχετίσεις μεταφοράς θερμότητας και μάζας για τους διάφορους τύπους διαλυμάτων, υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

Για τη μεταφορά μάζας, έχουμε :



$$K_{t,a} \left( \frac{M_w d_{eq}^2}{D_{ia} \rho_{ia}} \right) = 2.25 \cdot 10^{-1} (1-X)^{-0.75} \left( \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} \right)^{0.1} Sc^{0.333} Re_a \quad (\text{εξ.3})$$

όπου,

$$Sc = \frac{\mu_a}{\rho_a D_{ia}}, Re_a = \frac{d \rho_a V_a}{\mu_a} \quad (\text{εξ.4})$$

$$d = \frac{6(1-\varepsilon)}{\alpha} \quad (\text{εξ.5})$$

Η συσχέτιση της μεταφοράς θερμότητας προέρχεται από τη σχέση:

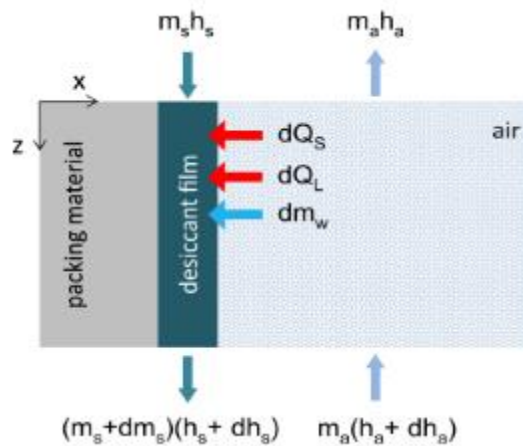
$$h_{t,i} = Le K_{t,i} C_{p,i,a} \quad (\text{εξ.6})$$

## Η πτώση πίεσης

Πολλοί ερευνητές αναγνωρίζουν το μειονέκτημα της υψηλής πτώσης πίεσης κατά την αφύγρανση [20]. Η πτώση πίεσης εξαρτάται από τις παροχές διαλυμάτων και αέρα. Η βέλτιστη ρύθμιση των παροχών αυτών είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να παρέχει περισσότερη ψύξη με μια πτώση πίεσης λιγότερο από τη μισή από αυτή ενός συμβατικού συστήματος. Η εξίσωση πτώσης πίεσης δίνεται από τον Gandhidasan [20] :

$$\Delta p_{drybed} = 0.125 \left( \frac{c_1}{Re_a} + \frac{c_2}{Re_a^{0.5}} + c_3 \right) \frac{\rho_a V_a^2 a}{\varepsilon^{4.65}} \quad [20] \quad (\text{εξ.7})$$

με c1,c2,c3 σταθερές.



Εικόνα 6 Ισολογισμοί Ενέργειας και Μάζας κατά τη διαδικασία της Αφύγγρανσης.

### Διεπαφή αέρα - αφυγραντικού διαλύματος

Εξ' ορισμού, η αναλογία της υγρασίας, δίνεται από τη σχέση:

$$W = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \quad [13] \quad \text{και διαφορίζοντας με το } dz \quad \frac{d\dot{m}_w}{dz} = \dot{m}_a \frac{dW}{dz} \quad [13]$$

Ωστόσο, η υγρασία που χάνεται από τον αέρα, απορροφάται από το διάλυμα, άρα :

$d\dot{m}_s = -d\dot{m}_w$ , οπότε ο ρυθμός παροχής μάζας αφυγραντικού διαλύματος βρίσκεται από :

$$\frac{d\dot{m}_s}{dz} = -\dot{m}_a \frac{dW}{dz} \quad [13] \quad (\text{εξ.8})$$

Η εξίσωση ισορροπίας της μάζας είναι  $d(\dot{m}_s X) = 0$ , (εξ.9)

την οποία διαφορίζουμε με το ύψος  $dz$  και έχουμε τη συγκέντρωση του διαλύματος

$$\frac{dX}{dz} = -\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_s} X \frac{dW}{dz} \quad [13] \quad (\text{εξ.10})$$

Η κλίση της αναλογίας υγρασίας με το ύψος  $z$ , εκφράζει το ρυθμό αφύγρανσης υδρατμών κατά τη διεπαφή ανά  $dz$  και υπολογίζεται από :

$$\frac{dW}{dz} = \frac{LK_G}{\dot{m}_a} (W^{\text{sat}} - W_a) \quad [13] \quad (\text{εξ.11})$$

όπου το  $W^{\text{sat}}$ , είναι η αναλογία υγρασίας κορεσμένου αέρα [13].

## Αέρια φάση

Ο Ισολογισμός ενέργειας στην αέρια φάση, αδιαβατικής μεταβολής κατά την αφύγρανση δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_a(h_a + dh_a) = \dot{m}_a h_a + dQ_s + dQ_L \Rightarrow \dot{m}_a dh_a = dQ_s + dQ_L, \quad [13] \quad (\text{εξ.12})$$

Η ενθαλπία του υγρού αέρα :

$$h_a = C_{p,a} T_a + W(C_{p,w} T_a + \Delta h_{a/w}) \quad [13] \quad (\text{εξ.13})$$

Το  $dQ_s$  είναι το φορτίο θερμότητας, που μεταφέρεται από

τον αέρα στο αφυγραντικό διάλυμα λόγω της διαφοράς θερμότητας και είναι ίσο με

$$dQ_s = Lh_{ci}(T_a - T_c)dz \quad [13] \quad (\text{εξ.14})$$

Όσο για το  $dQ_L$  είναι το λανθάνον φορτίο θερμότητας, που μεταφέρεται από τον αέρα στο διάλυμα λόγω συμπύκνωσης του αέρα και ισούται με

$$dQ_L = dm_s(C_{p,w} T_s + \Delta h_{w/s}) \quad [13] \quad (\text{εξ.15})$$

Ωστόσο, η ειδική θερμογόνος ικανότητα του υγρού αέρα είναι

$$C_{p,w} = C_{p,a} + WC_{p,w} \quad (\text{εξ.16})$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 8, 11, 14, 15 και 16 στη 12, υπολογίζεται η θερμοκρασία ξηρού αέρα, μέσα από την τελική σχέση :

$$\frac{dT_a}{dz} = \frac{T_a - T_c}{C_{p,w}} \left( \frac{Lh_{ci}}{\dot{m}_a} - C_{p,w} \frac{dW}{dz} \right) \quad (\text{εξ.17})$$

## Υγρή φάση αφυγραντικού διαλύματος

Οι εξισώσεις 8 και 11 δίνουν τη μάζα νερού που απορροφά το αφυγραντικό διάλυμα ανά ύψος

$$\frac{dm_s}{dz} = LK_c (W^* - W_{a2}) \quad (\text{εξ.18})$$

Ο Ισολογισμός ενέργειας στην υγρή φάση αφυγραντικού διαλύματος, αδιαβατικής μεταβολής κατά την αφύγρανση δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_e h_e + d\dot{Q}_s + d\dot{Q}_t = (\dot{m}_e + d\dot{m}_s)(h_s + dh_s) \quad (\text{εξ.19})$$

Ωστόσο, οι όροι  $d\dot{m}, dh_s$  είναι αμελητέοι, οπότε

$$\dot{m}_e dh_e + h_s d\dot{m}_s = d\dot{Q}_s + d\dot{Q}_t \quad (\text{εξ.20})$$

Έχοντας υπόψιν τις εξισώσεις 8,12,  $h_e = C_{p,s}(T_e - T_{s, \text{sat}})$ ,  $dh_s = C_{p,s}dT_s$  και διαφορίζοντας την εξίσωση 20 ανά ύψος  $dz$ , ο ρυθμός αλλαγής της θερμοκρασίας του αφυγραντικού διαλύματος δίδεται από

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_s C_{p,s}} \left[ \left( -C_{p,s}(T_s - T_{s, \text{sat}}) + C_{p,s}^{\text{sat}} T_a + \Delta h_{\text{obs}} \right) \frac{dW}{dz} + C_{p, \text{ms}} \frac{dT_a}{dz} \right] \quad (\text{εξ.21})$$

Τελικά, κατασκευάζεται ένα σύστημα 5 διαφορικών εξισώσεων

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_a}{dz} = \frac{T_a - T_s}{C_{p, \text{ms}}} \left( \frac{Lh_s}{\dot{m}_a} - C_{p, \text{st}} \frac{dW}{dz} \right) \\ \frac{dT_s}{dz} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_s C_{p,s}} \left[ \left( -C_{p,s}(T_s - T_{s, \text{sat}}) + C_{p,s}^{\text{sat}} T_a + \Delta h_{\text{obs}} \right) \frac{dW}{dz} + C_{p, \text{ms}} \frac{dT_a}{dz} \right] \\ \frac{dW}{dz} = -\frac{LK_s}{\dot{m}_a} (W^{\text{sat}} - W_{\text{in}}) \\ \frac{d\dot{m}_s}{dz} = \dot{m}_a \frac{dW}{dz} \\ \frac{dX}{dz} = -\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_s} X \frac{dW}{dz} \end{array} \right. \quad (\text{εξ.22})$$

με τις εξής οριακές συνθήκες :

$$\left\{ \begin{array}{l} (T_a)_{z=0} = T_{a, \text{in}} \\ (T_s)_{z=L} = T_{s, \text{sat}} \\ (W)_{z=0} = W_{\text{in}} \\ (\dot{m}_s)_{z=L} = \dot{m}_{s, \text{in}} \\ (X)_{z=L} = X_{\text{in}} \end{array} \right. \quad (\text{εξ.23})$$

Επίσης, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του αφυγραντή

$$R = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in} - W_{ref}} 100\% \quad (\text{εξ.24})$$

Οι πέντε παραπάνω συνήθεις διαφορικές εξισώσεις, επιλύθηκαν μέσω της μεθόδου αριθμητικής ανάλυσης Runge-Kutta 5ης τάξης, κάνοντας δοκιμές ενός βήματος στο μέσο ενός διαστήματος για να ακυρώσει χαμηλότερης τάξης σφάλματα όρων. Το μοντέλο αναπτύχθηκε με χρήση του λογισμικού Mathcad [21], όπου όλα τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της αφύγρανσης υπολογίζονται από το σημείο όπου αρχίζει η αφύγρανση μέχρι εκεί που τελειώνει.

### 3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.3.1 ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Πριν την εξέταση της επίδρασης των διάφορων παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση της αφύγρανσης που λαμβάνει χώρα στον αφυγραντή, αξίζει να συζητηθεί η επικύρωση του αναπτυγμένου υπολογιστικού προτύπου [13]. Είναι δηλαδή απαραίτητο να συγκριθούν τα θεωρητικά δεδομένα με αυτά μιας πειραματικής διαδικασίας. Για το σκοπό αυτό, επιλέχτηκαν τα πειραματικά στοιχεία από τη μελέτη των Chung και Ghosh [14]. Τα τυπικά σφάλματα της πειραματικής τους διαδικασίας δεν ελήφθησαν υπόψιν. Εντούτοις μια μέση απόκλιση ύψους 8% για τους συντελεστές μεταφοράς μάζας και 3% για τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας σημειώθηκαν μεταξύ των πειραματικών και των εκ θεωρίας υπολογισμένων τιμών [13].

Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με την θερμοκρασία εξόδου ξηρού αέρα, τα πειραματικά στοιχεία είναι σχεδόν ίδια με τα θεωρητικά. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι -2.9% (-0.55 °C) και η μέση απόκλιση είναι -0.9% (-0.17 °C). Αναφορικά με την αναλογία υγρασίας στην έξοδο του αφυγραντή, η απόκλιση φτάνει κατά το μέγιστο το 15.9%, (0.0007 kg<sub>w</sub>/kg<sub>da</sub>), με μέση όμως απόκλιση ίση με 3.0% (0.0001 kg<sub>w</sub>/kg<sub>da</sub>). Η θεωρητική θερμοκρασία εξόδου του αφυγραντικού διαλύματος διαφέρει από την πειραματική κατά 2.8% (0.50 °C) μέγιστη απόκλιση, ενώ κατά 1.3% (0.24 °C), μέση. Συνεπώς, το θεωρητικό μοντέλο έρχεται σε συμφωνία με την πειραματική διαδικασία, μιας και οι περισσότερες τιμές των ταυτίζονται [13].

### 3.3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Μετά από την επικύρωση του μαθηματικού μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα, συντελέστηκε μια εκτενής θεωρητική έρευνα για να εξετάσει την επίδραση των παραμέτρων εισόδου και εξόδου στην απόδοση του αφυγραντή [13].

Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια της ανάλυσης ευαισθησίας στις μεταβλητές εισόδου και εξόδου και του αέρα και του αφυγραντικού διαλύματος, ερευνήθηκε η επίδραση των μεταβλητών εισόδου και εξόδου στην απόδοση του αφυγραντή. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι οι τιμές των  $T_{a,in}$ ,  $W_{in}$ ,  $m_a$ ,  $T_{s,in}$ ,  $X_{in}$ ,  $m_{s,in}$  στην είσοδο του αφυγραντή και οι εξαρτώμενες είναι οι τιμές των  $T_{a,out}$ ,  $W_{out}$ ,  $X_{out}$ ,  $n$ ,  $m_w$  στην έξοδο του αφυγραντή. Συμπερασματικά, το  $T_{a,out}$  εξαρτάται καταλυτικά από τα  $m_a$  και  $X_{in}$ , ενώ η απόδοση του αφυγραντή  $n$  εξαρτάται από το  $m_a$  και το  $W_{in}$ . Από την άλλη, το  $m_w$  επηρεάζεται ελάχιστα από την μεταβολή οποιασδήποτε ανεξάρτητης μεταβλητής και για τα τρία αφυγραντικά διαλύματα που εξετάστηκαν [13].

Η επιρροή των μεταβλητών εισόδου, στις τιμές εξόδου, έχει ταξινομηθεί με φθίνουσα σειρά:  $X_{in}$  (-6.9% to 166.1%),  $m_a$  (-87.5% to 73.9%),  $W_{in}$  (-1.4% to 78.1%),  $T_{a,in}$  (-16.3% to 63.8%),  $T_{s,in}$  (-50.0% to 24.9%) και  $m_{s,in}$  (-6.4% to 5.6%). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας δείχνουν ότι οι τιμές εξόδου είναι οι πιο ευαίσθητες στην αλλαγή παροχής αέρα και την αλλαγή συγκέντρωσης εισόδου διαλύματος, αλλά οι λιγότερο εξαρτώμενες της αλλαγής παροχής διαλύματος [13]. Παρακάτω, γίνεται εκτενέστερη αναφορά στην επίδραση κάθε μίας παραμέτρου ξεχωριστά.

### 3.3.2.1 Θερμοκρασία εισόδου αέρα

Οι τιμές θερμοκρασίας εισόδου αέρα που μελετώνται είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές της θερμοκρασίας εισόδου διαλύματος. Έτσι, το ενδεχόμενο μεταφοράς μάζας μειώνεται και συνεπώς, και η απόδοση του αφυγραντή και το ποσοστό αφύγρανσης μειώνονται. Εντούτοις, όσο υψηλότερη είναι η ειδική θερμογόνος ικανότητα, τόσο λιγότερο επιρρεπές είναι ένα υλικό σε αλλαγές θερμοκρασίας. Έτσι, δεδομένου ότι LiBr και το CaCl<sub>2</sub> έχουν μικρότερη ειδική θερμογόνο ικανότητα από το LiCl, κάτω από την ίδια θερμοκρασία και συγκέντρωση, η αύξηση στη θερμοκρασία εισόδου αέρα έχει μια ισχυρότερη επίδραση στα LiBr και CaCl<sub>2</sub>. Αυτή η επίδραση υπολογίζεται από το ποσοστό μάζας αφύγρανσης, το οποίο μειώνεται κατά 7% για LiCl, κατά 11% για LiBr και κατά 15% για το CaCl<sub>2</sub>. Μια παρόμοια τάση μπορεί να παρατηρηθεί και στην απόδοση του αφυγραντή [13].



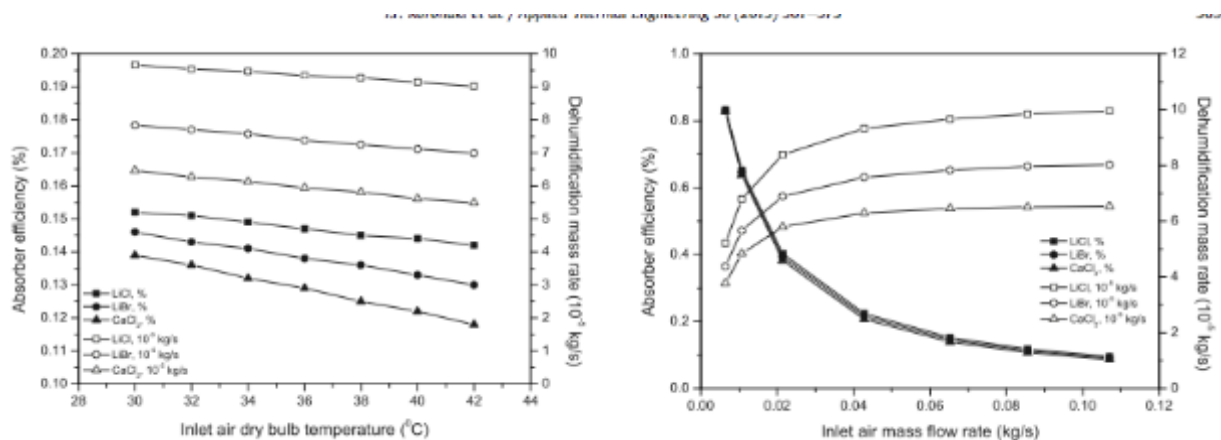
### 3.3.2.2 Αναλογία υγρασίας αέρα εισόδου

Αν αυξήσουμε την αναλογία υγρασίας αέρα εισόδου κατά 74%, αυξάνεται αισθητά η μάζα αφύγρανσης διαλύματος LiCl κατά 161%, LiBr κατά 243% και CaCl<sub>2</sub> κατά 400%. Ομοίως, η απόδοση αφυγραντή αυξάνεται κατά 8% για LiCl, 19% για LiBr και 40% για το CaCl<sub>2</sub>. Αυτό συμβαίνει επειδή μια υψηλότερη αναλογία υγρασίας ευνοεί μια υψηλότερη πίεση ατμών αέρα και έτσι, μια υψηλότερη μέση διαφορά πίεσης υδρατμών μεταξύ του αέρα και διαλύματος. Συνεπώς, εξασφαλίζεται η δυνατότητα για τη μεταφορά μάζας από το αέριο στην υγρή φάση.

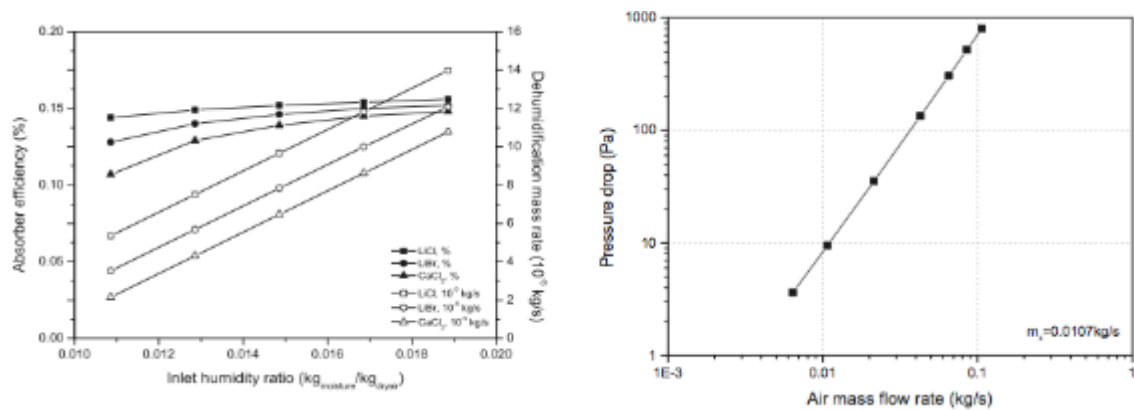
Η αφυγραντική ικανότητα του CaCl<sub>2</sub> υπόκειται στις μεγαλύτερες αλλαγές, έναντι LiCl, λόγω της χαμηλότερης πίεσης ατμών του CaCl<sub>2</sub>. Αυτό το φαινόμενο δηλώνει ότι η απόδοση ενός αφυγραντικού συστήματος που εγκαθίσταται σε μια περιοχή με χαμηλές αναλογίες υγρασίας αέρα εξαρτάται ιδιαίτερα από τον τύπο χρησιμοποιούμενου διαλύματος. Στις πιο υγρές περιοχές εντούτοις, είναι απίθανο ο τύπος διαλύματος να έχει αξιόλογες επιπτώσεις στην απόδοση των εν λόγω συστημάτων [13].

### 3.3.2.3 Παροχή αέρα

Όταν αυξάνεται η παροχή αέρα, έχει ως συνέπεια τη μείωση του συντελεστή μεταφοράς μάζας, υψηλότερη αναλογία υγρασίας αέρα εξόδου και έτσι, χαμηλότερη απόδοση αφυγραντή. Υψηλότερη αναλογία υγρασίας εξόδου συνεπάγεται μεγαλύτερη διαφορά στη μέση πίεση ατμών και υψηλότερο ποσοστό αφυγραμμένης μάζας. Κάτω από τα υψηλά ποσοστά παροχής, η θερμότητα απορρόφησης που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της αφύγρανσης είναι μεγαλύτερη από την επίδραση ψύξης λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας διαλύματος. Έτσι, το διάλυμα θερμαίνεται από τη θερμότητα απορρόφησης και το ποσοστό αφύγρανσης μειώνεται. Η πτώση πίεσης αυξήθηκε με την αύξηση της παροχής αέρα [13].



Εικόνα 7 Εξάρτηση βαθμού απόδοσης Αφυγραντή από θερμοκρασία και παροχή αέρα εισόδου



Εικόνα 8 Εξάρτηση β. απόδοσης Αφυγραντή από υγρασία αέρα εισόδου και Διάγραμμα (δεξιά) πτώσης πίεσης συναρτήσει παροχής αέρα

#### 3.3.2.4 Θερμοκρασία εισόδου αφυγραντικού διαλύματος

Η αυξανόμενη θερμοκρασία διαλύματος εισόδου κατά 200% μειώνει το ποσοστό μάζας αφύγρανσης κατά 27% στην περίπτωση του LiCl, κατά 41% με το LiBr και κατά 56% με το CaCl<sub>2</sub>. Αυτό συμβαίνει επειδή η αύξηση στη θερμοκρασία διαλύματος αυξάνει την πίεση ατμών για το διάλυμα και έτσι, η μέση διαφορά πίεσης ατμών μεταξύ του αέρα και διαλύματος στον αφυγραντή μειώνεται. Αυτό οδηγεί σε μια υψηλότερη αναλογία υγρασίας εισόδου αέρα και συνεπώς, σε ένα χαμηλότερο ποσοστό αφύγρανσης [13].

Εντούτοις, η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου διαλύματος αυξάνει την απόδοση του αφυγραντή κατά 9% για LiCl, 14% για LiBr και 19% για το CaCl<sub>2</sub> [13].

### 3.3.2.5 Συγκέντρωση εισόδου αφυγραντικού διαλύματος

Έπειτα από 40% αύξηση στη συγκέντρωση εισόδου διαλύματος προκάλεσε μια σημαντική αύξηση στο ποσοστό αφύγρανσης, κατά 22% στην περίπτωση LiCl και κατά 17% στο LiBr. Ο λόγος μπορεί να είναι ο ακόλουθος. Η αύξηση της συγκέντρωσης εισόδου διαλύματος μειώνει την πίεση ατμών επιφάνειας, με συνέπεια μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς μάζας από το αέριο στην υγρή φάση. Αυτό οδηγεί σε μια χαμηλότερη αναλογία υγρασίας εισόδου αέρα και, ως εκ τούτου, σε ένα υψηλότερο ποσοστό αφύγρανσης. Στην πραγματικότητα, η εν λόγω αύξηση δεν είναι απεριόριστη, δεδομένου ότι η πίεση ατμών διαλύματος επιφάνειας όχι μόνο εξαρτάται από τη συγκέντρωση, αλλά και από τη θερμοκρασία του διαλύματος. Πολύ πυκνό διάλυμα θα οδηγούσε σε αύξηση της θερμότητας απορρόφησης που απελευθερώνεται, η οποία θα θέρμαινε το διάλυμα και θα μείωνε τη μέση διαφορά πίεσης ατμών μεταξύ αέρα και διαλύματος [13].

Εντούτοις, στην περίπτωση του  $\text{CaCl}_2$ , το ποσοστό αφύγρανσης ήταν σχεδόν αμετάβλητο, καταγράφοντας μείωση κατά 1%. Αυτό συμβαίνει επειδή το  $\text{CaCl}_2$  έχει υψηλότερη πίεση ατμών από το LiCl και το LiBr, υπό τις ίδιες συνθήκες και κατά συνέπεια, μια αλλαγή στην πίεση ατμών του  $\text{CaCl}_2$  θα έχει πολύ λιγότερη επίδραση από την ίδια αλλαγή στο LiCl ή στο LiBr [13].

Η αύξηση της συγκέντρωσης εισόδου διαλύματος μειώνει και το  $W_{\text{sat}}$  και το  $W_{\text{out}}$ . Δεδομένου ότι αυτές οι τιμές αντισταθμίζουν η μια την άλλη, η απόδοση αφυγραντή θα παραμείνει σχεδόν αμετάβλητη [13].

### 3.3.2.6 Η παροχή του διαλύματος

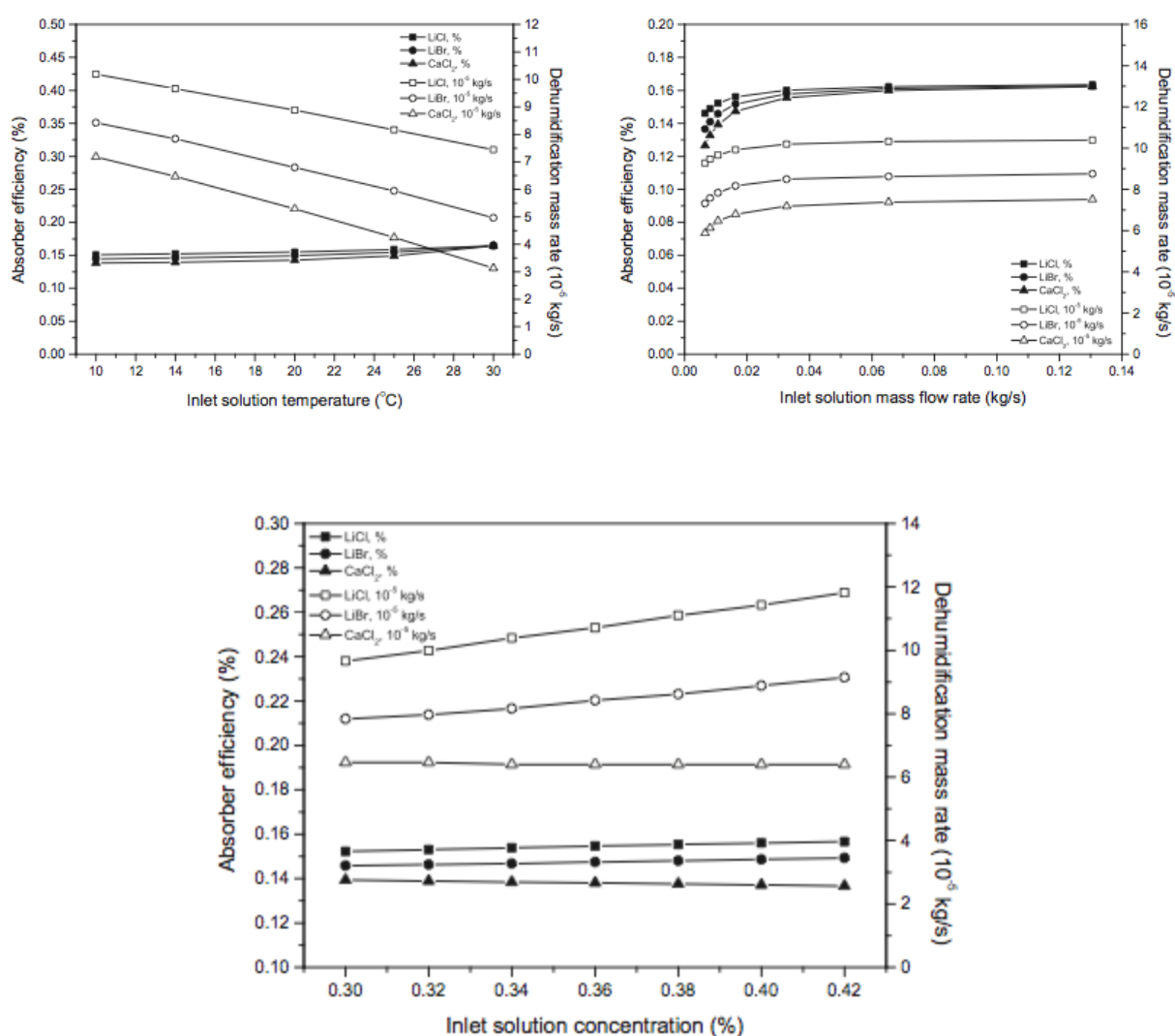
Κατά την παραμετρική αυτή ανάλυση, το ποσοστό αφύγρανσης αυξήθηκε ανάλογα με την παροχή διαλύματος, κατά 12% για το LiCl, 20% για το LiBr και 28% για το CaCl<sub>2</sub>. Αυτό συνέβη επειδή η αύξηση παροχής του διαλύματος μειώνει το χρόνο διεπαφής μεταξύ του διαλύματος και του αέρα και έτσι, μειώνει τη μεταβολή της συγκέντρωσης διαλύματος και της θερμοκρασίας κατά την αφύγρανση. Κατά συνέπεια, η μέση διαφορά πίεσης ατμών μεταξύ διαλύματος και αέρα αυξάνεται. Αυτό οδηγεί σε μια χαμηλότερη αναλογία υγρασίας εισόδου αέρα και ένα υψηλότερο ποσοστό αφύγρανσης [13].

Η απόδοση του αφυγραντή αυξήθηκε με ένα παρόμοιο ποσοστό, λόγω της χαμηλότερης αναλογίας υγρασίας εισόδου αέρα. Επίσης, η αύξηση της παροχής διαλύματος αυξάνει το συντελεστή μεταφοράς μάζας μεταξύ διαλύματος και αέρα στον αφυγραντή, με συνέπεια μια περαιτέρω αύξηση στην απόδοσή του [13].

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι σε συνθήκες χαμηλής παροχής, η αύξηση του παροχής διαλύματος, αυξάνει την ικανότητα μεταφοράς μάζας μεταξύ των δύο φάσεων (αέρια-υγρή). Σε υψηλότερες παροχές, εν τούτοις, αυτή η επίδραση δεν παρατηρείται. Επομένως, στις χαμηλότερες τιμές παροχής, λιγότερες από 0.04 kg/sec, η απόδοση του αφυγραντή και το ποσοστό αφύγρανσης αυξάνονται γρηγορότερα από, τι στις υψηλότερες τιμές παροχής [13].

### 3.3.2.7 Το υγρό αφυγραντικό διάλυμα

Η ερώτηση είναι ποιο διάλυμα έχει την καλύτερη απόδοση υπό τις ίδιες συνθήκες. Στην παραμετρική αυτή μελέτη [13], καταβλήθηκε προσπάθεια να συγκριθούν τα τρία διαλύματα δηλαδή τα LiCl, LiBr και CaCl<sub>2</sub>, στην ικανότητα αφύγρυνσης κατά μήκος του ύψους του αφυγραντή. Πράγματι, τα αποτελέσματα της υγρασίας επιβεβαιώνουν ότι ο αφυγραντής που χρησιμοποιεί LiCl έχει την καλύτερη απόδοση, δεδομένου ότι μπορεί να μειώσει την αναλογία υγρασίας κατά 10%, ακολούθησε στενά ο αφυγραντής που χρησιμοποιεί LiBr (8%). Ο αφυγραντής που χρησιμοποιεί CaCl<sub>2</sub> φαίνεται να έχει τη χειρότερη απόδοση, δεδομένου ότι μειώνει την αναλογία υγρασίας κατά 6%.



Εικόνα 9 Διαγράμματα εξάρτησης β.απόδοσης Αφυγραντή από θερμοκρασία, παροχή και συγκέντρωση διαλύματος εισόδου.

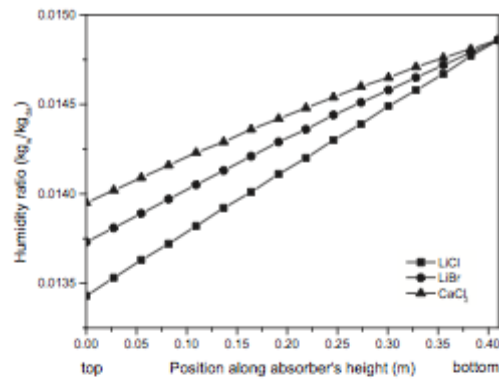


Fig. 13. Humidity ratio distribution along absorber's height.

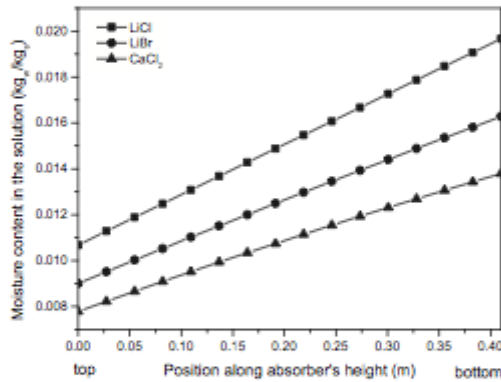
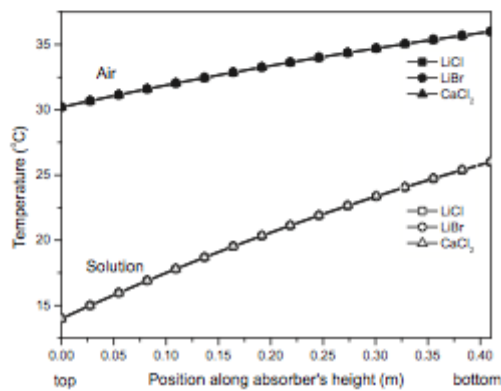


Fig. 14. Water concentration distribution along absorber's height.



Εικόνα 10 Διαγράμματα μεταβολής αναλογίας σε υγρασία, περιεκτικότητας σε υγρασία και θερμοκρασία

Όπως απεικονίζεται στα 3 παραπάνω διαγράμματα, η μεταβολή της περιεκτικότητας σε υγρασία σε αφυγραντικό διάλυμα (kgw/κλ) κατά μήκος του ύψους του αφυγραντή παρουσιάζει ίδιο αποτέλεσμα. Στην έξοδο του διαλύματος, που είναι το κατώτατο σημείο του αφυγραντή, το LiCl έχει απορροφήσει το μεγαλύτερο ποσό υγρασίας από τον αέρα, ενώ το CaCl<sub>2</sub> έχει απορροφήσει το λιγότερο.

Η θερμοκρασία τόσο του αέρα, όσο και του διαλύματος κατά μήκος του ύψους του απορροφητή είναι σχεδόν ίδια για όλα τα υλικά. Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η

διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας εξόδου και εισόδου του διαλύματος είναι πολύ υψηλότερη από αυτή της θερμοκρασίας εξόδου και εισόδου του αέρα. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους , ο αέρας έχει υψηλότερη παροχή που δεν επιτρέπει τις μεγάλες αλλαγές θερμοκρασίας, ενώ η χαμηλότερη παροχή διαλύματος επιτρέπει σε περισσότερη λανθάνουσα θερμότητα να απορροφηθεί, με συνέπεια μια μεγάλη διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου διαλύματος.



### 3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ανεπτυγμένο μαθηματικό μοντέλο παρουσίασε άριστη συμφωνία με τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία. Κατά συνέπεια, για μια λεπτομερή μελέτη της διαδικασίας αφύγρανσης, αυτό το πρότυπο δίνει ακριβείς προβλέψεις απόδοσης, που ελαχιστοποιούν τη χρήση των υποθέσεων/παραδοχών. Οι μεταβλητές που βρέθηκαν να ασκούν μέγιστη επίδραση στην απόδοση αφύγρανσης είναι η παροχή αέρα, η αναλογία υγρασίας αέρα, η θερμοκρασία αφυγραντικού διαλύματος και η συγκέντρωση αφυγραντικού διαλύματος. Διαπιστώθηκε ότι το ποσοστό αφύγρανσης αυξήθηκε ανάλογα με την αύξηση της αναλογία υγρασίας εισόδου αέρα, τη συγκέντρωση εισόδου διαλύματος, τον αέρα και την παροχή διαλύματος και ήταν σχεδόν ανεξάρτητο από τη θερμοκρασία εισόδου αέρα. Η παροχή εισόδου αέρα διαπιστώθηκε να έχει μια κρίσιμη τιμή για την απόδοση της αφυγραντικής διαδικασίας στα 0.05 kg/sec. Η απόδοση του αφυγραντή αυξήθηκε με την αύξηση της παροχής διαλύματος και της θερμοκρασίας εισόδου και μειώθηκε με την αύξηση παροχής αέρα, ενώ επηρεάστηκε μόνο ελαφρώς από την αναλογία θερμοκρασίας και υγρασίας εισόδου αέρα και τη συγκέντρωση εισόδου διαλύματος. Η υψηλή απόδοση αφύγρανσης θα μπορούσε να επιτευχθεί κάτω από συνθήκες υγρασίας ( $>0.013 \text{ kgw/kgda}$ ), καθιστώντας την ιδανική για τα κτήρια σε ζεστές και υγρές περιοχές, όπου ο κίνδυνος συμπύκνωσης προβλέπεται πολύ υψηλός.

Η ανάλυση επίσης έδειξε ότι τα αφυγραντικά συστήματα που χρησιμοποιούν LiCl φαίνονται να έχουν την καλύτερη απόδοση από εκείνα που χρησιμοποιούν LiBr και το CaCl<sub>2</sub>, υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Αν και κάτω από τις υψηλές αναλογίες υγρασίας, τα τρία διαλύματα καταδεικνύουν παρόμοια απόδοση, η απόδοση LiCl είναι σταθερότερη και πιο προβλέψιμη από αυτή του CaCl<sub>2</sub>.

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

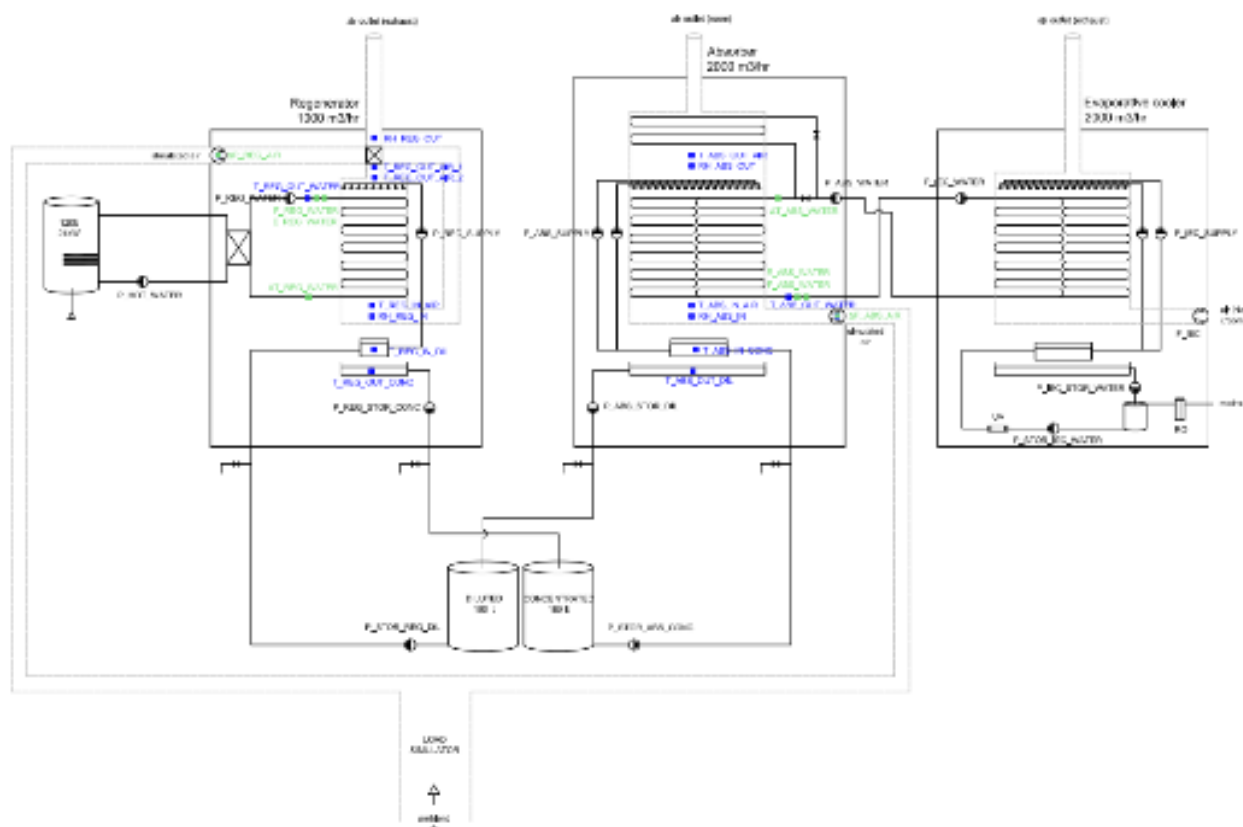
### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Μέσα στον αφυγραντήρα αντίθετης ροής, το ισχυρό αφυγραντικό διάλυμα ( $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ ), προερχόμενο από την υψηλής συγκέντρωσης δεξαμενή αποθήκευσης, πέφτει στο πάνω μέρος της συσκευής. Ο υγρός αέρας περιβάλλοντος εισέρχεται στον αφυγραντή από το κάτω μέρος στη συσκευής και η υγρασία μεταφέρεται από τον αέρα στο διάλυμα. Η διαδικασία αφύγρανσης ψύχεται από νερό που ρέει μέσα στα φύλλα πολυπροπυλενίου. Το τέλος της διαδικασίας βρίσκει τον αέρα χωρίς υγρασία και ψυγμένο, ενώ το αφυγραντικό διάλυμα αραιωμένο και αποθηκευμένο στη δεξαμενή αποθήκευσης χαμηλής συγκέντρωσης.

Ο ρόλος της λειτουργίας εξατμιστικού ψύκτη είναι να παρέχει το απαραίτητο νερό ψύξης κατά την διάρκεια της αφύγρανσης.

Μετά την αφύγρανση, το αραιωμένο αφυγραντικό διάλυμα πρέπει να ανακτήσει την αρχική του συγκέντρωση. Για αυτό ρέει μέσα στον αναγεννητή, και πέφτει στο πάνω μέρος του σε μορφή φιλμ στα τοιχώματα. Η βαρύτητα το αναγκάζει να κινηθεί προς τα κάτω, όπου έρχεται σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος που κινείται προς τα πάνω διαμέσου των σωλήνων. Την ίδια ώρα, νερό θέρμανσης κυκλοφορεί διαμέσου των φύλλων πολυπροπυλενίου και παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας. Καθώς το υγρό αφυγραντικό διάλυμα ζεσταίνεται, υγρός ατμός φεύγει από το χαμηλής συγκέντρωσης διάλυμα και παρασύρεται μακριά από το ρεύμα αέρα περιβάλλοντος. Στην έξοδο του αναγεννητή, το αφυγραντικό διάλυμα έχει ανακτήσει την αρχική του συγκέντρωση και αποθηκεύεται στην δεξαμενή υψηλής συγκέντρωσης, έτοιμο να εισέλθει ξανά στον αφυγραντή.

Η απαραίτητη ενέργεια για κλιματισμό μπορεί να αποθηκευτεί για οποιαδήποτε περίοδο είναι επιθυμητό, υπό μορφή συγκεντρωμένου διαλύματος αλατιού χωρίς απώλειες ενέργειας.



Εικόνα 9 Διάγραμμα της Πειραματικής Διάταξης με Αισθητήρες

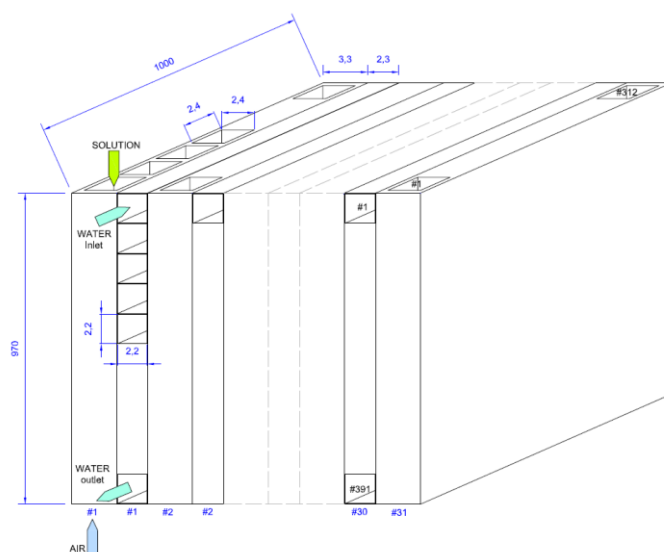
## 4.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

### 4.2.1 ΑΦΥΓΡΑΝΤΗΣ

Ο αφυγραντής απαρτίζεται από 60 φύλλα μαύρου πολυπροπυλενίου με οριζόντιους αγωγούς για την παροχή του νερού και 62 άσπρα φύλλα με κάθετους σωλήνες για το διάλυμα και την παροχή αέρα. Η παροχή του νερού ξεκινά από τα πάνω προς τα κάτω γιατί στο πάνω μέρος του αφυγραντή θα έχουμε την υψηλότερη συγκέντρωση, άρα και την μεγαλύτερη απορρόφηση άρα χρειαζόμαστε εκεί την μεγαλύτερη ψύξη.

Το μήκος, το βάθος και το ύψος των μαύρων φύλλων είναι 2.3X1000X970 mm και των άσπρων 3.3X1000X970 mm. Κάθε μαύρο φύλλο έχει 391 αγωγούς με μέγεθος 2.2X2.2 mm και κάθε λευκό φύλλο 2.4X2.4 mm.

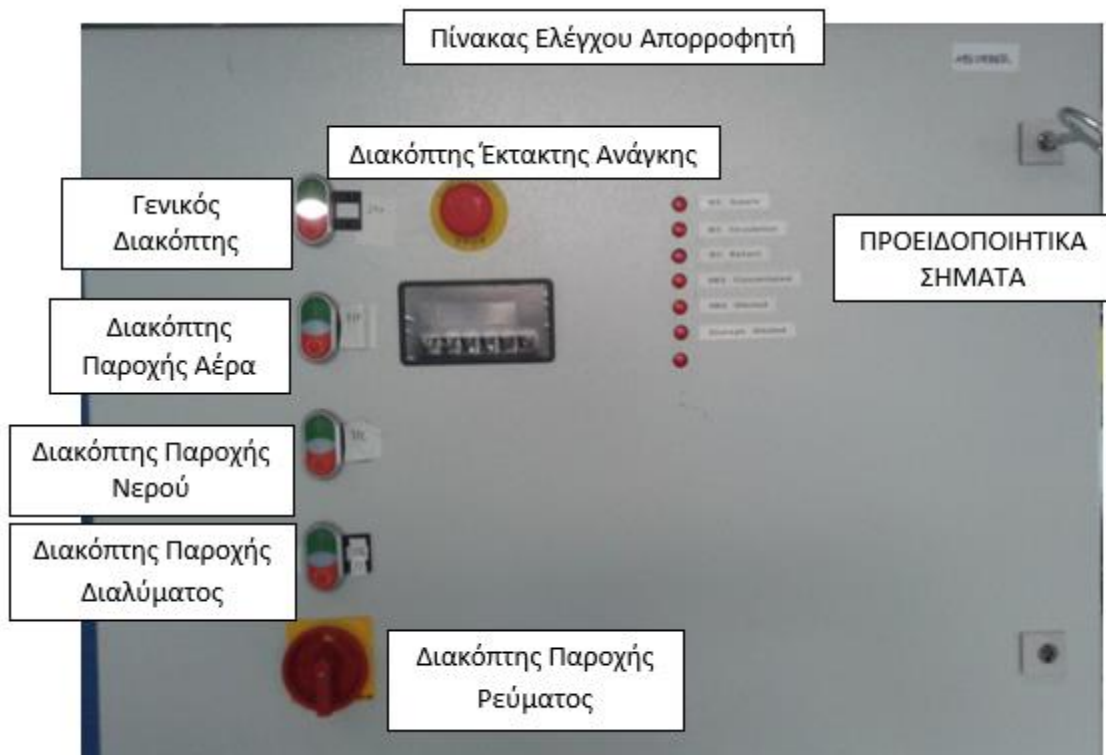
Οι πλάκες είναι κατασκευασμένες από τρίτης γενιάς πληρωτικό υλικό από πολυπροπυλένιο, συγκολλημένο με λείζερ στην Γερμανία. Παρακάτω, δίνονται αναλυτικά τα μέρη του.



Εικόνα 10 Γεωμετρία Πύργου Αφύγρυνσης

Η ικανότητα αφύγρυνσης του είναι 15 KW με  $\Delta h$  30 kg/Kgda. Το σύστημα διαθέτει ρυθμιστές της παροχής του διαλύματος αλλά και της παροχής του αέρα. Το σύστημα του αφυγραντή όπως επίσης του και του αναγεννητή διαθέτουν σύστημα ελέγχου υπερχείλισης το οποίο σταματά την λειτουργία των αντλιών σε περίπτωση υπερχείλισης.

## Πίνακας Λειτουργίας



Εικόνα 11 Πίνακας Ελέγχου Αφυγραντή

## Μετρητής Έλστερ

Το συγκεκριμένο μετρητικό μετρά τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε ρεύματα νερού και υπολογίζει και την παροχή του νερού.

Χαρακτηριστικά Έλστερ	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Elster
<b>Μοντέλο</b>	F90S – Single Jet Meter
<b>Ονομαστική Πίεση</b>	16 bar
<b>Όρια Μέτρησης Θερμοκρασίας</b>	15-90 °C
<b>Όρια Μέτρησης Θερμοκρασίας Αποσπώμενου καλωδίου</b>	1-130 °C
<b>Ακρίβεια</b>	0.01
<b>Αρχική παροχή για οριζόντια τοποθέτηση</b>	3.5 L/h
<b>Αρχική παροχή για κάθετη τοποθέτηση</b>	4 L/h
<b>Όρια λειτουργίας θερμοκρασίας</b>	15-90 °C

## Μετρητής Πίεσης Νερού

Μετρητής πίεσης με κεραμικό αισθητήρα και προστασία κατά της διάβρωσης, της τριβής και της υπερφόρτωσης που μετρά απόλυτη και μανομετρική πίεση.

Χαρακτηριστικά Μετρητή Πίεσης Νερού(Cerabar , n.d.)	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Endress+Hausers
<b>Μοντέλο</b>	Cerabar T PMC131
<b>Όρια Μέτρησης Θερμοκρασίας</b>	-20 -100 °C
<b>Όρια Θερμοκρασίας Λειτουργίας</b>	-20 - 85 °C
<b>Ακρίβεια</b>	0.5%
<b>Μέγιστη Πίεση</b>	60 bar

## Μετρητής Πίεσης Αέρα

Μετρητής διαφοράς πίεσης αέρα εισόδου με μεμβράνη για μέτρηση διαφοράς πίεσης ή αρχνητική πίεση σε μη δραστικά αέρια. Η μέτρηση της πίεσης γίνεται με υπολογισμό της μεταβολής της θέσης της μεμβράνης. Μεταβολές στην θέση της μεμβράνης ανιχνεύονται από ένα μετασχηματιστή και μεταβιβάζονται μέσω ενός ηλεκτρικού σήματος .

<b>Χαρακτηριστικά Μετρητή Πίεσης Αέρα Εισόδου Πύργου Αφύγρανσης</b>	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	ZIEHL - ABEGGα
<b>Μοντέλο</b>	DSG 500
<b>Όρια Μέτρησης Πίεσης</b>	0-500 Pa
<b>Προστασίας Υπερπίεσης</b>	0.2 bar
<b>Τάση Εξόδου</b>	0 -10 V
<b>Θερμοκρασία Αέρα</b>	-10 – 50 °C

## Αντλίες Διαλύματος

Οι συγκεκριμένες αντλίες είναι ενωμένες με ρυθμιστή παροχής αλλά και συχνότητας λειτουργίας. Έχει παρατηρηθεί ότι έχοντας μικρότερη παροχή και υψηλότερο ρυθμό παροχής, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση στην αναγέννηση και την αφύγρανση.

<b>Χαρακτηριστικά Αντλίας Αφυγραντή (P_ABS_SUPPLYx2)</b>	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Fluid-o-Tech
<b>Μοντέλο</b>	FG100
<b>Ισχύς</b>	50 W
<b>Μέγιστη πίεση</b>	20 bar
<b>Στροφές</b>	500-5000 rpm
<b>Τάση</b>	25 V
<b>Βάρος</b>	0.675 Kg

## Δεξαμενές Διαλύματος

Στον αφυγραντή, παρέχεται πυκνό αφυγραντικό διάλυμα (LiCl) στην εσωτερική δεξαμενή (τρίγωνη δεξαμενή) και στην εξωτερική αραιωμένο διάλυμα.

## Κυκλοφορητής Κρύου Νερού

Η αντλία υπεύθυνη για την ανακυκλοφορία του κρύου νερού προς και από τον αφυγραντή.

<b>Χαρακτηριστικά Κυκλοφορητή Αφυγραντή ( P_ABS_WATER)</b>	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Wilo
<b>Μοντέλο</b>	TOP S 25-10
<b>Ισχύς</b>	13.5 W
<b>Κατανάλωση Ενέργειας</b>	335W
<b>Στροφές</b>	2400 rpm
<b>Ένταση</b>	1,72 A
<b>Τάση</b>	230 V
<b>Βάρος</b>	6.2 Kg

## Αντλίες Αφυγραντή

Οι συγκεκριμένες αντλίες είναι υπεύθυνες για την μεταφορά προς και από τις δεξαμενές αποθήκευσης αφυγραντικού υγρού.

<b>Χαρακτηριστικά Αντλίας Αφυγραντή (P_ABS_STOR_DIL, P_STOR_ABS_CONC)</b>	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Shurflo
<b>Μοντέλο</b>	SUK-0218
<b>Μέγιστη πίεση</b>	8.96 bar
<b>Τάση</b>	230 V



## Μετρητής Σχετικής Υγρασίας

Υπολογίζει την σχετική υγρασίας χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό συμπληρωματικό οξείδιο μετάλλου ως ημιαγωγό, έναν πυκνωτή και ένα θερμίστορ.

Χαρακτηριστικά Μετρητή Σχετικής Υγρασίας (Kimo)			
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Kimo		
<b>Μοντέλο</b>	TH100		
<b>Όρια Μέτρησης Θερμοκρασίας</b>	-20 - 100 °C	-50 - 50°C	0 - 100°C
<b>Όρια Μέτρησης Υγρασίας</b>	0-100%RH		
	$\pm 2\%$ RH για 15 - 25°C		
<b>Ακρίβεια Μετρητή Υγρασίας</b>	$\pm 0.04\% \times (T-20) \%RH$ για $T < 15^\circ C$ ή $T > 25^\circ C$		

## Ρυθμιστής Στροφών Ανεμιστήρα

Ρυθμίζει την ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα μεταβάλλοντας την συχνότητα.

Χαρακτηριστικά Ρυθμιστή Στροφών Ανεμιστήρα	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Toshiba
<b>Μοντέλο</b>	VF-S11
<b>Όρια Λειτουργίας</b>	4 – 20 mA, 0 – 10 V
<b>Ροπή</b>	250% στο 1 Hz
<b>Όρια</b>	0.1% ρύθμιση ταχύτητας για εύρος ταχύτητας 60:1
<b>Ακρίβεια Μετρητή υγρασίας</b>	0.1% RH

Χαρακτηριστικά Ανεμιστήρα Αφυγραντή ( FAN_ABS)	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Motor: AC-Motoren Fan Nicotra
<b>Μοντέλο</b>	ACA 80 A-2 RLM E6-2528
<b>Ισχύς 50/60 Hz</b>	0.75/0.9 KW
<b>Στροφές 50/60 Hz</b>	2840/3408 rpm
<b>Ροπή</b>	2.54 Nm
<b>Βάρος</b>	8,7 Kg



Εικόνα 12 Μετρήτης Πίεσης και Θερμοκρασίας και Ανεμιστήρας

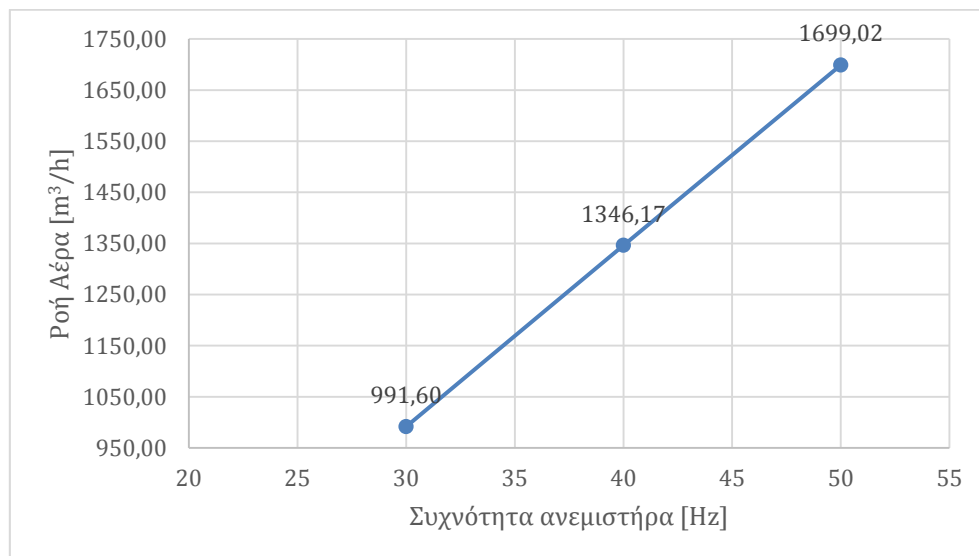
Ο ανεμιστήρας του αφυγραντή, βαθμονομήθηκε μετρώντας την διαφορά πίεσης του αέρα πριν και μετά το σύστημα. Η μέτρηση έγινε για συχνότητα ανεμιστήρα στα 50, 40 και 30 Hz με αντίστοιχα αποτελέσματα στην διαφορά πίεσης του αέρα 283.300, 177.850, 96.500 Pa.

Ο υπολογισμός της παροχής στον ανεμιστήρα γίνεται με βάση την πιο κάτω σχέση, μέσα από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή.

$$q_v = K \times \sqrt{\frac{2}{\rho} \times \Delta P} \rightarrow \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

όπου  $K=79 \text{ m}^2\text{s/h}$  και  $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$  ( $T=15 \text{ C}$ )

Άρα, τελικά, 991.60 , 1346.17 και 1699.02  $\text{m}^3/\text{h}$ .

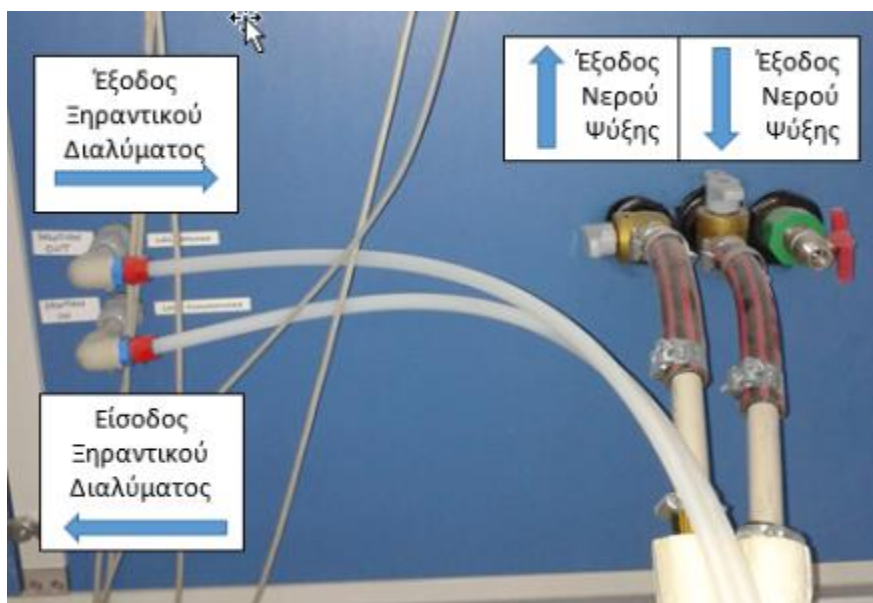


## Μετρητές Θερμοκρασίας

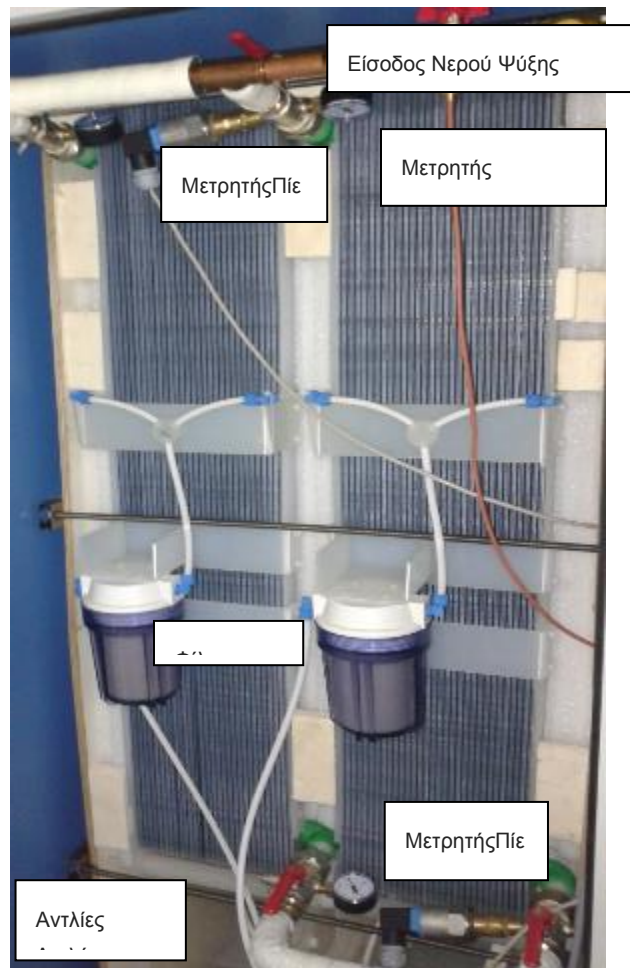
Μετρούν την θερμοκρασία χρησιμοποιώντας ένα θερμοστοιχείο. Το θερμοστοιχείο αποτελείται από 2 διαφορετικά σύρματα συνδεδεμένα στα άκρα τους, που όταν θερμαίνονται παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα γιατί λόγω των διαφορετικών μετάλλων σημειώνεται διαφορά θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την κίνηση ηλεκτρονίων.

### Χαρακτηριστικά Μετρητή Θερμοκρασίας

<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Κίμο	
<b>Μοντέλο</b>	PT 100	
<b>Όρια Λειτουργίας</b>	-50 – 260 °C	
<b>Όρια Λειτουργίας Καλωδίου σιλικόνης</b>	-50 – 180 °C	
<b>Ακρίβεια</b>	0 °C	± 0.3 °C
	100 °C	± 0.8 °C



Εικόνα 13 Έξοδος Σωλήνων Αφυγραντή

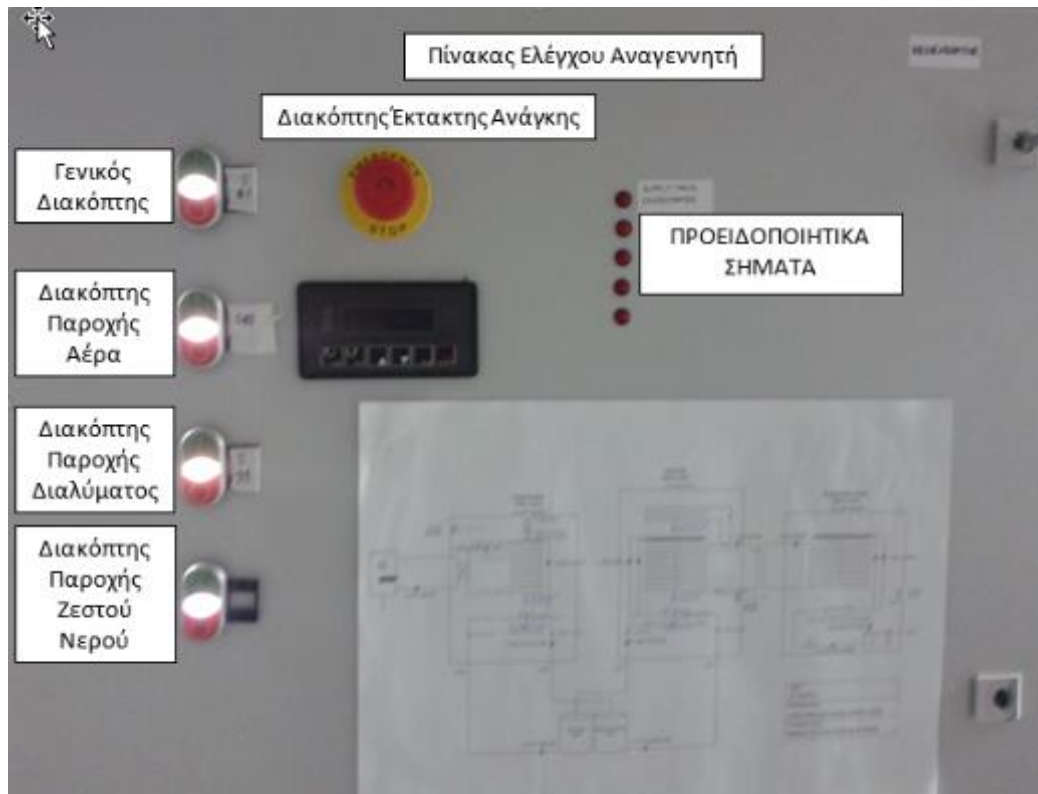


Εικόνα 14 Αφυγραντής

#### 4.2.2 ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗΣ

Ο αναγεννητής έχει την ίδια γεωμετρία με τα φύλλα του αφυγραντή, αλλά αποτελείται από 24 μαύρα φύλλα και 25 άσπρα, ενώ παρέχεται θερμό υγρό.

Πίνακας Λειτουργίας



Εικόνα 15 Πίνακας Ελέγχου Αναγεννητή

## Μετρητής Έλστερ

Το συγκεκριμένο μετρητικό μετρά την διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε ρεύματα νερού.

Χαρακτηριστικά Έλστερ	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Elster
<b>Μοντέλο</b>	F90S – Single Jet Meter
<b>Ονομαστική Πίεση</b>	16 bar
<b>Όρια Μέτρησης Θερμοκρασίας</b>	16-90 °C
<b>Όρια Μέτρησης Θερμοκρασίας Αποσπώμενου καλωδίου</b>	1-130 °C
<b>Ακρίβεια</b>	0.01
<b>Αρχική Ροή(οριζόντια)</b>	3.5 L/h
<b>Αρχική Ροή(κάθετα)</b>	4 L/h
<b>Όρια Διαφοράς Θερμοκρασίας</b>	3-50 °C

## Μετρητής Πίεσης

Μετρητής διαφοράς πίεσης αέρα εισόδου με μεμβράνη για μέτρηση διαφοράς πίεσης ή αρνητική πίεση σε μη δραστικά αέρια. Η μέτρηση της πίεσης γίνεται με υπολογισμό της μεταβολής της θέσης της μεμβράνης. Μεταβολές στην θέση της μεμβράνης ανιχνεύονται από ένα μετασχηματιστή και μεταβιβάζονται μέσω ενός ηλεκτρικού σήματος.

Χαρακτηριστικά Μετρητή Πίεσης Αέρα Εισόδου Πύργου Αναγέννησης	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	ZIEHL - ABEGGα
<b>Μοντέλο</b>	DSG 500
<b>Όρια Μέτρησης Πίεσης</b>	0-500 Pa
<b>Προστασίας Υπερπίεσης</b>	0.2 bar
<b>Τάση Εξόδου</b>	0 -10 V
<b>Θερμοκρασίας Αέρα</b>	-10 – 50 °C

## Αντλίες Διαλύματος

Οι συγκεκριμένες αντλίες είναι ενωμένες με ρυθμιστή ροής αλλά και συχνότητας λειτουργίας, άρα ρυθμίζεται και η παροχή αλλά και ο ρυθμός της παροχής.

<b>Χαρακτηριστικά Αντλίας Του Αναγεννητή (P_REG_SUPPLY)</b>	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Fluid-o-Tech
<b>Μοντέλο</b>	FG100
<b>Ισχύς</b>	50 W
<b>Μέγιστη πίεση</b>	20 bar
<b>Στροφές</b>	500-5000 rpm
<b>Τάση</b>	25 V
<b>Βάρος</b>	0.675 Kg

## Δεξαμενές Διαλύματος

Στον αναγεννητή υπάρχει αραιό αφυγραντικό διάλυμα (LiCl) στην εσωτερική δεξαμενή (τρίγωνη δεξαμενή) και στην εξωτερική, πυκνό διάλυμα.

## Κυκλοφορητής Κρύου Νερού

Η αντλία υπεύθυνη για την ανακυκλοφορία του ζεστού νερού προς και από τον αναγεννητή.

<b>Χαρακτηριστικά Κυκλοφορητή Αναγεννητή (P_REG_WATER)</b>	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Wilo
<b>Μοντέλο</b>	TOP S 25-10
<b>Ισχύς</b>	13.5 W
<b>Κατανάλωση Ενέργειας</b>	335W
<b>Στροφές</b>	2400 rpm
<b>Ένταση</b>	1,72 A
<b>Τάση</b>	230 V
<b>Βάρος</b>	6.2 Kg

## Αντλίες Αναγεννητή

Οι συγκεκριμένες αντλίες είναι υπεύθυνες για την μεταφορά προς και από τις δεξαμενές αποθήκευσης αφυγραντικού υγρού.

Χαρακτηριστικά Του Αναγεννητή (P_STOR_REG_DIL, P_REG_STOR_CONC)	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Shurflo
<b>Μοντέλο</b>	SUK-0218
<b>Μέγιστη πίεση</b>	8.96 bar
<b>Τάση</b>	230 V

## Μετρητής Σχετικής Υγρασίας

Υπολογίζει την σχετική υγρασία χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό συμπληρωματικό οξείδιο μετάλλου ως ημιαγωγό, έναν πυκνωτή και ένα θερμίστορ.

Χαρακτηριστικά Μετρητή Σχετικής Υγρασίας(Kimo)			
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Kimo		
<b>Μοντέλο</b>	TH100		
<b>Όρια Μέτρησης Θερμοκρασίας</b>	-20 - 100 °C	-50 - 50°C	0 - 100°C
<b>Όρια Μέτρησης Υγρασίας</b>	0-100%RH		
	± 2% RH για 15 - 25°C		
<b>Ακρίβεια Μετρητή Υγρασίας</b>	± 0.04% x (T-20) %RH για T<15°C ή T>25°C		

## Ρυθμιστής στροφών ανεμιστήρα

Ρυθμίζει την ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα μεταβάλλοντας την συχνότητα.

Χαρακτηριστικά Ρυθμιστή Στροφών Ανεμιστήρα	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Toshiba
<b>Μοντέλο</b>	VF-S11
<b>Όρια Λειτουργίας</b>	4 – 20 mA, 0 – 10 V
<b>Ροπή</b>	250% στο 1 Hz
<b>Όρια</b>	0.1% ρύθμιση ταχύτητας για εύρος ταχύτητας 60:1
<b>Ακρίβεια Μετρητή υγρασίας</b>	0.1% RH



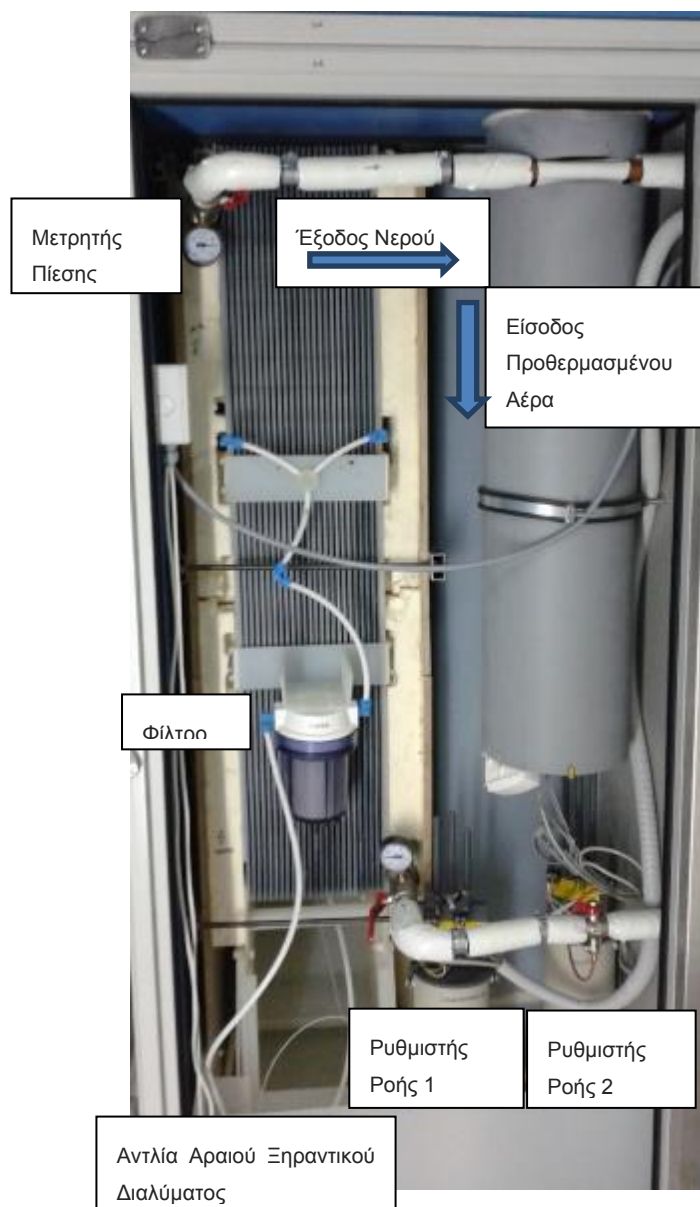
## Μετρητές Θερμοκρασίας

Μετρούν την θερμοκρασία χρησιμοποιώντας ένα θερμοστοιχείο. Το θερμοστοιχείο αποτελείται από 2 διαφορετικά σύρματα συνδεδεμένα στα άκρα τους, όταν θερμαίνονται παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα γιατί λόγω των διαφορετικών μετάλλων παρατηρείται διαφορά θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την κίνηση ηλεκτρονίων.

Χαρακτηριστικά Μετρητή Θερμοκρασίας		
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Kimo	
<b>Μοντέλο</b>	PT 100	
<b>Όρια Λειτουργίας</b>	-50 – 260 °C	
<b>Όρια Λειτουργίας Καλωδίου σιλικόνης</b>	-50 – 180 °C	
<b>Ακρίβεια</b>	0 °C	± 0.3 °C
	100 °C	± 0.8 °C

## Εναλλάκτης

Χρησιμοποιείται για προθέρμανση του αέρα. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση αέρα εξόδου του αναγεννητή που έχει θερμανθεί από το ζεστό νερό, για τη θέρμανση του αέρα εισόδου.



Εικόνα 16 Αναγεννητής

Ρελέ

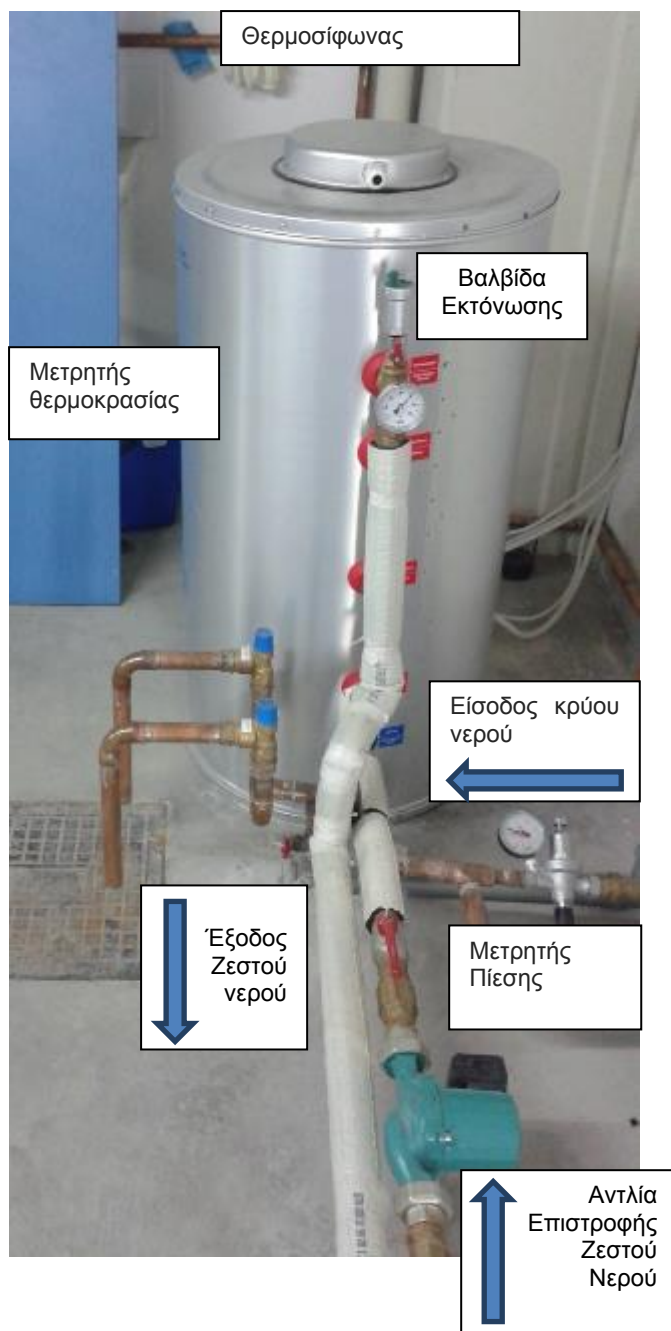
Ο ηλεκτρονόμος ή ρελέ είναι ένας ηλεκτρικός διακόπτης που ανοίγει και κλείνει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα κάτω από τον έλεγχο ενός άλλου ηλεκτρικού κυκλώματος [24].

Αντλία Λέβητα Επιστροφής Ζεστού Νερού του Αναγεννητή

Η συγκεκριμένη αντλία είναι υπεύθυνη για την μεταφορά του ζεστού νερού επιστροφής από τον αναγεννητή στο μπόιλερ.

<b>Χαρακτηριστικά Αντλίας Λέβητα Επιστροφής Ζεστού Νερού Του Αναγεννητή (P_HOT_WATER)</b>	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Wilo
<b>Μοντέλο</b>	STAR RS 25-7
<b>Ισχύς</b>	13.5 W
<b>Κατανάλωση Ενέργειας</b>	132 W
<b>Στροφές</b>	2800 rpm
<b>Ένταση</b>	0.58 A
<b>Τάση</b>	230 V
<b>Βάρος</b>	2.920 Kg

<b>Χαρακτηριστικά Θερμοστάτη(C.a.e.m, n.d.)</b>	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	c.a.e.m
<b>Μοντέλο</b>	TU. 10 B
<b>Όρια Λειτουργίας</b>	30 – 90 °C



Εικόνα 17 Θερμοσίφωνας Αναγεννητή

### 4.2.3 ΕΞΑΤΜΙΣΤΙΚΟΣ ΨΥΚΤΗΣ

Η γεωμετρία του εξατμιστικού ψύκτη είναι ακριβώς η ίδια με αυτή του αφυγραντή. Η διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης που ακολουθείται παράγει 2/3 καθαρό νερό και 1/3 υπολείμματα που οδηγούνται στην αποχέτευση.

Το νερό του δικτύου, περνάει μέσα από το φίλτρο αντίστροφης ώσμωσης και αποθηκεύεται στη δεξαμενή του ψύκτη. Στη συνέχεια, περνάει μέσα από την αντλία, εισέρχεται στη λάμπα υπεριώδους ακτινοβολίας και στη συνέχεια, ρέει ανάμεσα στα φύλλα του πληρωτικού υλικού.

Πίνακας Λειτουργίας



Εικόνα 18 Πίνακας Ελέγχου Εξατμιστικού Ψύκτη

## Αντλίες Διαλύματος

Οι συγκεκριμένες αντλίες είναι ενωμένες με ρυθμιστή παροχής αλλά και συχνότητας λειτουργίας άρα είναι δυνατόν να μεταβληθεί η παροχή αλλά επίσης ο ρυθμός της παροχής. Έχει παρατηρηθεί ότι έχοντας μικρότερη παροχή και υψηλότερο ρυθμό παροχής επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση στην αναγέννηση και την αφύγρανση.

<b>Χαρακτηριστικά αντλίας Εξατμιστικού Ψύκτη (P_IEC_SUPPLYx2)</b>	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Fluid-o-Tech
<b>Μοντέλο</b>	FG100
<b>Ισχύς</b>	50 W
<b>Μέγιστη πίεση</b>	20 bar
<b>Στροφές</b>	500-5000 rpm
<b>Τάση</b>	25 V
<b>Βάρος</b>	0.675 Kg

## Αντλίες Ανακυκλοφορίας

Η αντλία υπεύθυνη για την ανακυκλοφορία του κρύου νερού προς και από τον αναγεννητή.

<b>Χαρακτηριστικά αντλίας Ανακυκλοφορίας Εξατμιστικού Ψύκτη (P_IEC_STOP_WATER, P_STOP_IEC_WATER)</b>	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Shurflo
<b>Μοντέλο</b>	2088-592-144
<b>Μέγιστη θερμοκρασία υγρού</b>	45°C
<b>Στροφές</b>	1080-1940 rpm
<b>Τάση</b>	230 V
<b>Βάρος</b>	1.8 Kg

## Αντλίες Κρύου Νερού

Οι συγκεκριμένες αντλίες είναι υπεύθυνες για την εσωτερική κυκλοφορία του νερού στον εξατμιστικό ψύκτη.

Χαρακτηριστικά Αντλίας Εξατμιστικού Ψύκτη (P_IEC_WATER)	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Wilo
<b>Μοντέλο</b>	TOP S 25-10
<b>Ισχύς</b>	13.5 W
<b>Κατανάλωση Ενέργειας</b>	335W
<b>Στροφές</b>	2400 rpm
<b>Ένταση</b>	1,72 A
<b>Τάση</b>	230 V
<b>Βάρος</b>	6.2 Kg

## Ρυθμιστής στροφών ανεμιστήρα

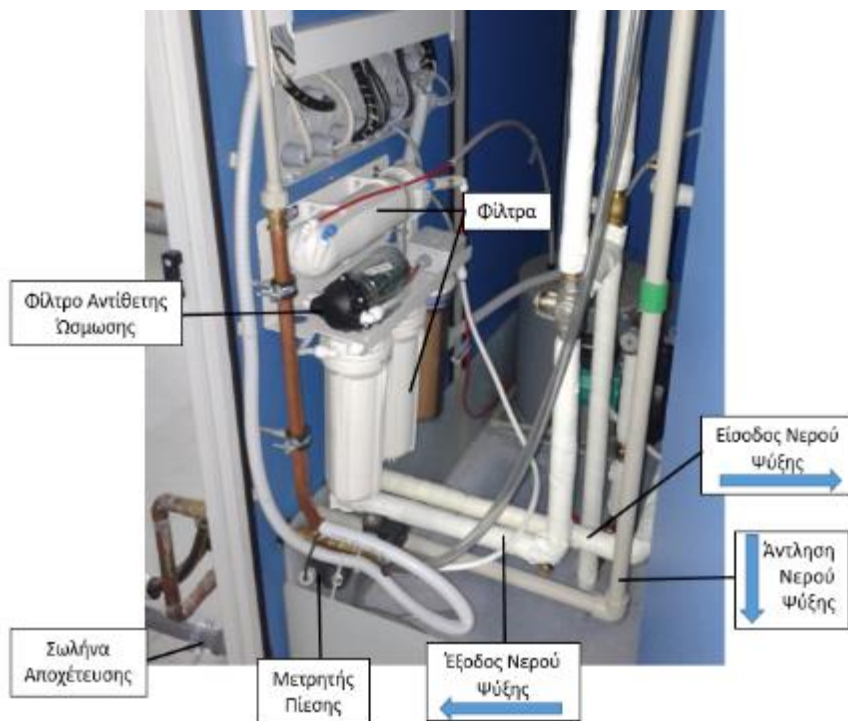
Ρυθμίζει την ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα μεταβάλλοντας την συχνότητα.

Χαρακτηριστικά Ρυθμιστή Στροφών Ανεμιστήρα	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Toshiba
<b>Μοντέλο</b>	VF-S11
<b>Όρια Λειτουργίας</b>	4 – 20 mA, 0 – 10 V
<b>Ροπή</b>	250% στο 1 Hz
<b>Όρια</b>	0.1% ρύθμιση ταχύτητας για εύρος ταχύτητας 60:1
<b>Ακρίβεια Μετρητή υγρασίας</b>	0.1% RH

Χαρακτηριστικά Ανεμιστήρα Εξατμιστικού Ψύκτη (FIEC)	
<b>Κατασκευάστρια Εταιρεία</b>	Motor: AC-Motoren Fan Nicotra
<b>Μοντέλο</b>	ACA 80 A-2 RLM E6-2528
<b>Ισχύς 50/60 Hz</b>	0.75 / 0.9 KW
<b>Στροφές 50/60 Hz</b>	2840 / 3408 rpm
<b>Ροπή</b>	2.54 Nm
<b>Βάρος</b>	8,7 Kg

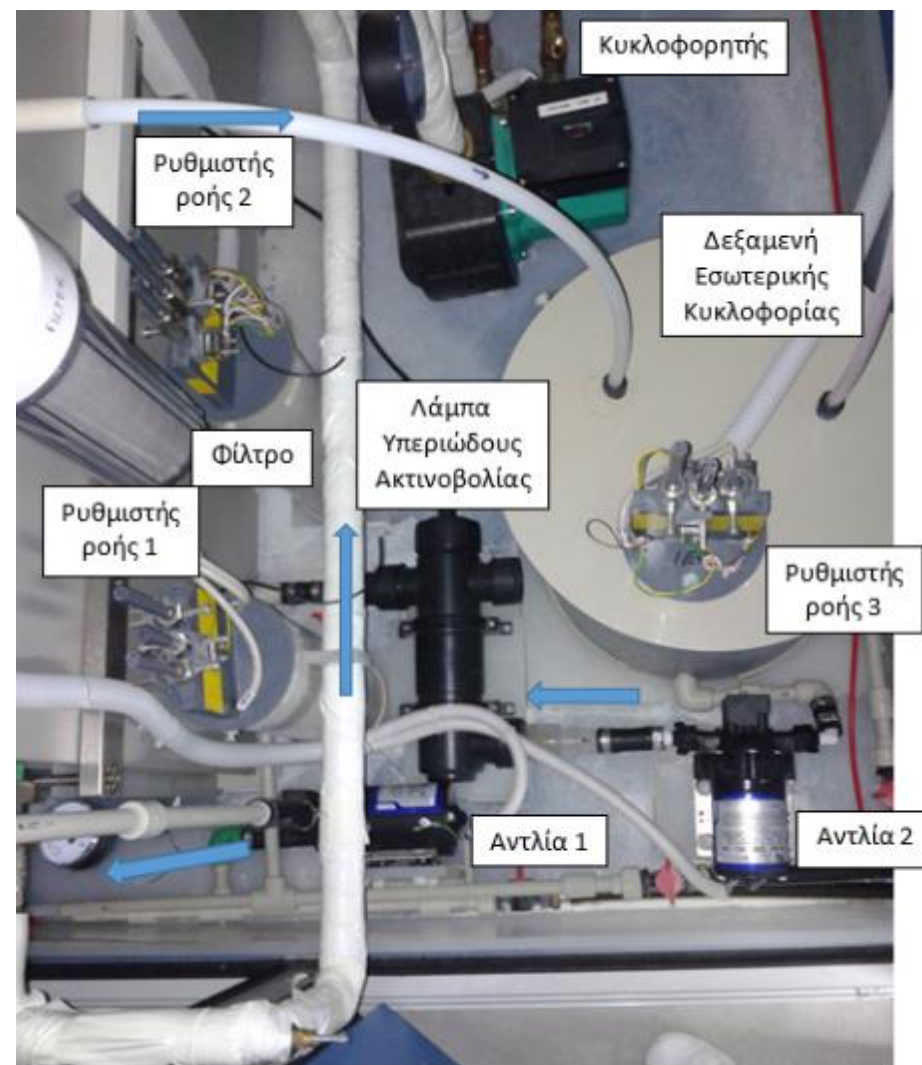
### Φίλτρο Αντίθετης Ώσμωσης

Είναι μια τεχνική κάθαρσης του νερού, στην οποία η πίεση του νερού "σπρώχνει" το νερό διαμέσου μιας ημιπερατής μεμβράνης, απομακρύνοντας πολλά είδη μορίων και ιόντων. Στην αντίθετη ώσμωση, η πίεση που ασκείται είναι μεγαλύτερη από την ωσμωτική πίεση, μια προσθετική ιδιότητα, η οποία συμβαίνει λόγω του χημικού δυναμικού. Στην αντίθετη ώσμωση, ο επικρατών μηχανισμός αφαίρεσης είναι το στράγγισμα, ή εξαίρεση μεγέθους, έτσι επιτυγχάνεται τέλεια απόρριψη σωματιδίων ανεξάρτητα από τις παραμέτρους του συστήματος όπως την πίεση και την συγκέντρωση [25].



Εικόνα 19 Εξατμιστικός Ψύκτης





Εικόνα 20 Εξατμιστικός Ψύκτης

#### 4.2.4 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ

Υπάρχουν δύο δεξαμενές αποθήκευσης χωρητικότητας 180 λίτρων έτσι ώστε να γίνεται η διαδικασία αφύγρανσης και αναγέννησης ανεξάρτητα η μια από την άλλη. Στη δεξαμενή υψηλής συγκέντρωσης αποθηκεύεται αφυγραντικό διάλυμα 40-43% κ.β LiCl και στις χαμηλής συγκέντρωσης 33-37% κ.β LiCl.



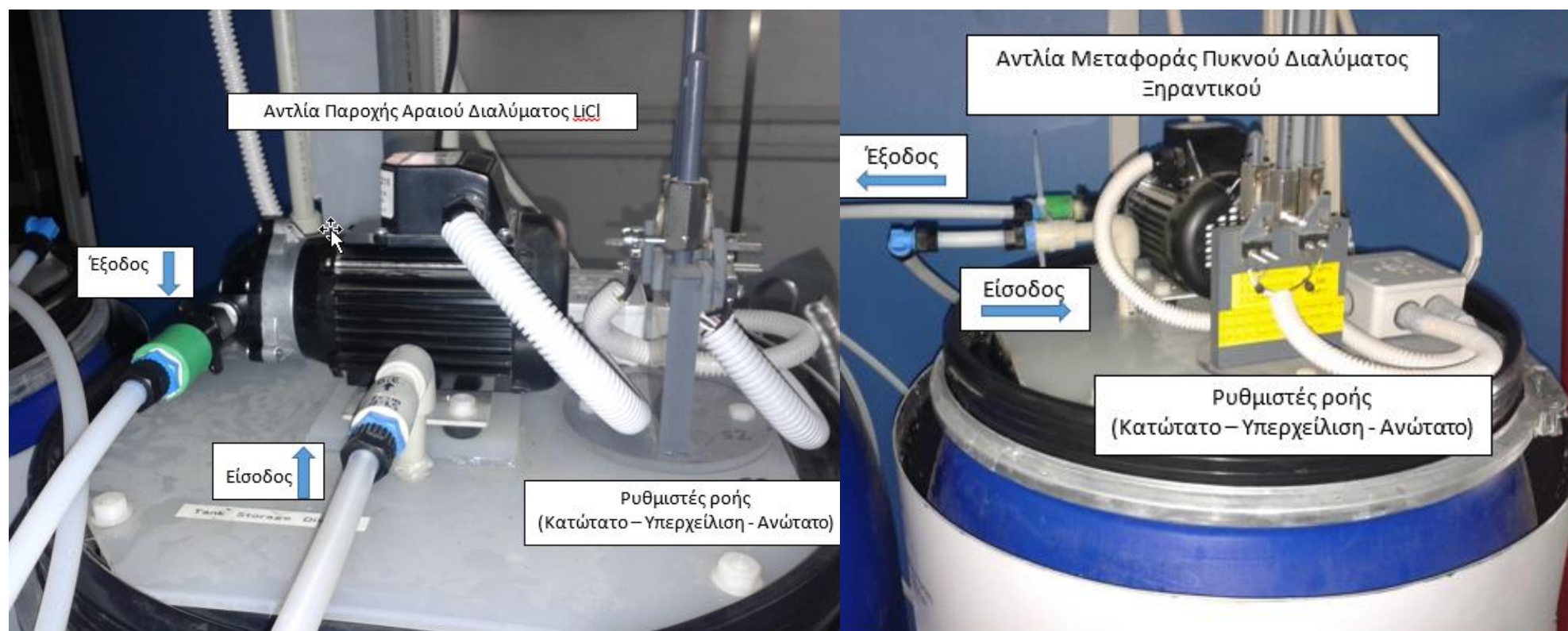
Εικόνα 21 Δεξαμενές Συγκέντρωσης Αφυγραντικού Υγρού

#### Μαγνητικές βαλβίδες

Ο ρόλος των μαγνητικών βαλβίδων στις δεξαμενές συγκέντρωσης αφυγραντικού διαλύματος είναι να σταματούν την αποστολή αφυγραντικού στον αφυγραντή και στον αναγεννητή μετά το τέλος λειτουργίας της αντλίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τον εξής τρόπο: όταν η αντλία λειτουργεί, οι μαγνητικές βαλβίδες είναι ρυθμισμένες ώστε να λειτουργούν και να κλείνουν την παροχή αέρα στις αντλίες. Όταν η αντλία σταματήσει, οι μαγνητικές βαλβίδες ανοίγουν με αποτέλεσμα να μπαίνει αέρας στην αντλία και να μην μπορεί να στείλει διάλυμα.



Εικόνα 22 Μαγνητικές βαλβίδες



Εικόνα 23 Δεξαμενές Αποθήκευσης Αφυγραντικού Υγρού

### 4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Αρχικά, οι γενικοί διακόπτες στον κεντρικό πίνακα του εργαστηρίου πρέπει να είναι ενεργοποιημένοι όπως επίσης και οι γενικοί διακόπτες για τον αφυγραντή, τον εξατμιστικό ψύκτη και τον αναγεννητή.

Ο αναγεννητής και ο αφυγραντής δεν πρέπει να λειτουργούν ταυτόχρονα γιατί το εισερχόμενο διάλυμα στις μονάδες δεν θα έχει σταθερή συγκέντρωση. Αυτό συμβαίνει γιατί η συγκέντρωση που θα παράγει ο αναγεννητής θα είναι διαφορετική από αυτή που βρίσκεται ήδη μέσα στη δεξαμενή ισχυρού διαλύματος, άρα η συνολική συγκέντρωση αλλάζει κατά πολύ και θα υπάρχουν έτσι συνέχεια διαφορετικές συνθήκες εισόδου στον αφυγραντή. Για τον συγκεκριμένο λόγο ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω.

#### ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗΣ

- i. Το διάλυμα πρέπει να βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου πριν το πείραμα για καλύτερα αποτελέσματα
- ii. Ανάδευση διαλύματος
- iii. Μέτρηση της συγκέντρωσης του διαλύματος υψηλής συγκέντρωσης διαλύματος
- iv. Θέση σε λειτουργία του ανεμιστήρα του εξατμιστικού ψύκτη, των αντλιών νερού, του κυκλοφορητή του κρύου νερού και του ανεμιστήρα του αφυγραντή.
- v. Ανάδευση διαλύματος
- vi. Μετά από 30' θέση σε λειτουργία του κυκλοφορητή του διαλύματος
- vii. Μετρήσεις μέχρι να εξαντληθεί η δεξαμενή υψηλής συγκέντρωσης διαλύματος

#### ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗΣ

- i. Άνοιγμα διακόπτη του πίνακα boiler
- ii. Άνοιγμα του γενικού ασφαλειοδιακόπτη
- iii. Ενεργοποίηση των αντιστάσεων 1 και 2
- iv. Ανάδευση διαλύματος
- v. Μέτρηση της συγκέντρωσης του αραιωμένου διαλύματος
- vi. Μετά από 20', λειτουργία του κυκλοφορητή του ζεστού νερού και του ανεμιστήρα του αναγεννητή
- vii. Μετά από 30', λειτουργία του κυκλοφορητή του διαλύματος
- viii. Μετρήσεις μέχρι να εξαντληθεί η δεξαμενή χαμηλής συγκέντρωσης διαλύματος

#### 4.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Κατά την προαναφερθείσα διαδικασία που περιγράφεται στο 4.3, οι μετρήσεις των πειραμάτων που έλαβαν χώρα τους θερινούς μήνες του 2014 στο εργαστήριο του Τομέα Θερμότητας του ΕΜΠ, αποθηκεύονταν στον υπολογιστή του εργαστηρίου σε μορφή text. Οι μετρήσεις, έπειτα, ησήχθησαν στο Excel προς επεξεργασία. Αξίζει να σημειωθεί πως ο υπολογιστής αποθηκεύει τιμές όλο το 24ωρο και κάθε μέρα αφ' ότου εγκαταστήθηκε σε αυτόν κατάλληλο λογισμικό. Αυτό είχε ως συνέπεια, να καταγράφονται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η ημερομηνία, η ώρα και η διάρκεια διεξαγωγής των, με σκοπό να απομονώθουν στο Excel οι τιμές που καταγράφηκαν μόνο κατά τα πειράματα και στη συνέχεια να επεξεργαστούν. Η επεξεργασία των μετρήσεων αφορά στη δημιουργία γραφημάτων τόσο για τις μεταβλητές του αφυγραντή, όσο και του αναγεννητή, καθώς και τον περαιτέρω σχολιασμό τους προς εξαγωγή συμπερασμάτων για τη λειτουργία και απόδοση της αφυγραντικής-εξατμιστικής μονάδας ψύξης του εργαστηρίου στον Τομέα Θερμότητας του ΕΜΠ. Ακολουθούν, λοιπόν, οι επεξεργασμένες μετρήσεις τριών χαρακτηριστικών πειραμάτων αφύγρανσης και αναγέννησης.

#### 4.4.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΦΥΓΡΑΝΤΗ

- Μετρήσεις 16-07-2014

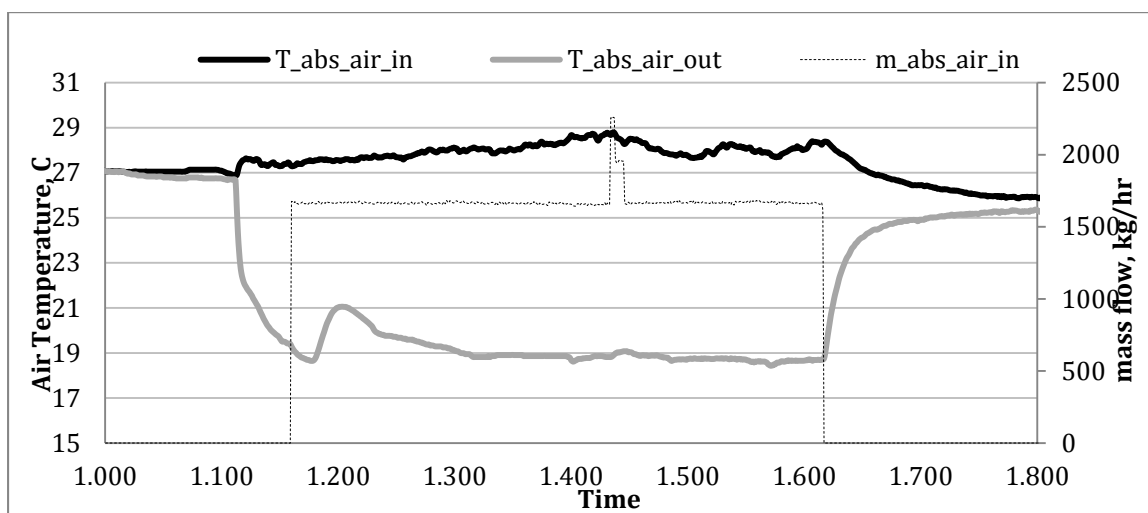
Ισολογισμός ενέργειας :

E_air	-41,40	kWh
E_water	43,33	kWh
E_sol	0,66	kWh
E_total	2,59	kWh

Απόκλιση  
Ενέργειας: **-6,3%**

Ορίζεται το πηλίκο του αθροίσματος των Ενεργειών Διαλύματος και Νερού αφαιρούμενο από τη μονάδα προς την Ενέργεια του Αέρα.

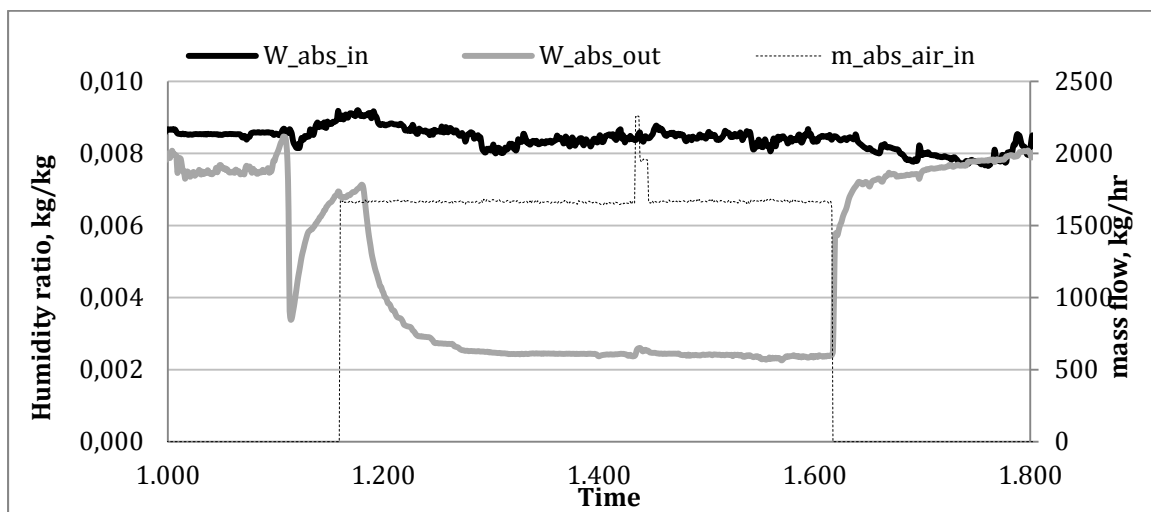
Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα και Παροχής Αέρα :





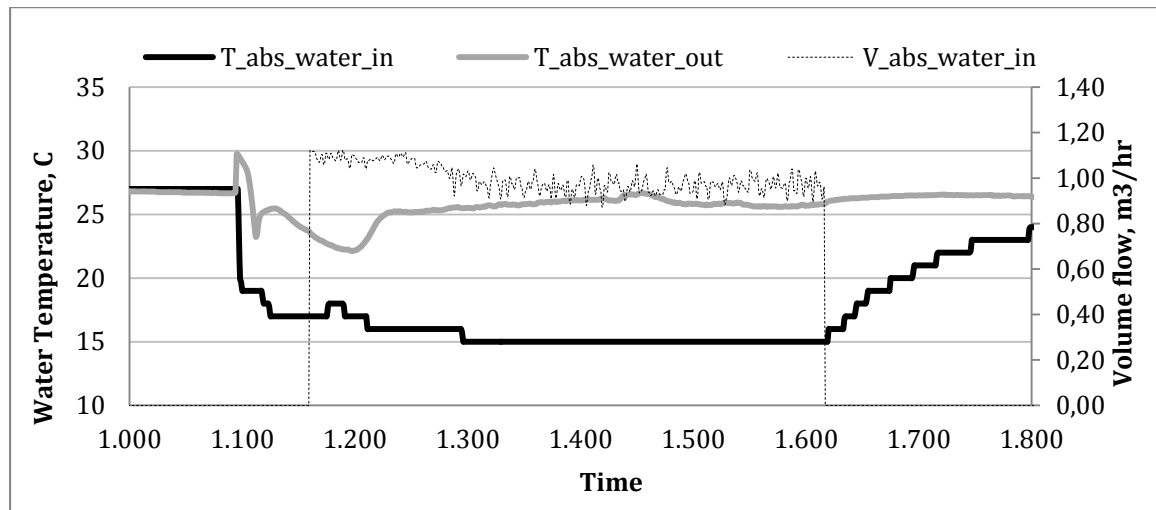
Παρατηρούμε πως η Θερμοκρασία Εισόδου του αέρα κυμαίνεται στους 28 βαθμούς Κελσίου, ενώ αυτή στην Έξοδο του Αφυγραντή μειώνεται στους 19. Αυτό είναι απολύτως θεμιτό, καθώς ο αέρας ψύχεται από το υπόψυκτο εξαγόμενο νερό του Πύργου Ψύξης. Σχετικά με την παροχή μάζας αέρα, διαπιστώνουμε πως κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι σταθερή και από τη μορφή της καμπύλης της σε χρόνο 1400, φαίνεται από το max που επιτυγχάνει ότι εκείνη τη στιγμή ο διακόπτης παροχής αέρα του Πίνακα Λειτουργίας του Αφυγραντή κλείνει και σύμφωνα και με τις καμπύλες Θερμοκρασίας το πείραμα αρχίζει να φτάνει στο τέλος του.

Γράφημα Αναλογίας Υγρασίας Εισόδου-Εξόδου Αέρα και Παροχής Αέρα:



Παρατηρούμε μεγάλη διαφορά στις τιμές Αναλογίας Υγρασίας Εισόδου και Εξόδου. Σύμφωνα με τη λειτουργία του Αφυγραντή, κατά το πείραμα τα μόρια του Νερού του Αέρα δεσμεύονται από το πυκνό Διάλυμα, με αποτέλεσμα ο Αέρας στην έξοδο της Συσκευής να βγαίνει με χαμηλή τιμή απόλυτης Υγρασίας και το Διάλυμα πιο αραιό. Αυτή ακριβώς η λειτουργία περιγράφεται στο άνω Γράφημα μέσα από τη μορφή των καμπυλών κι εφόσον η Αναλογία Υγρασίας Εισόδου είναι μεγαλύτερη κατά πολύ από εκείνη της Εξόδου, καταλαβαίνουμε πως ο Αφυγραντής αποδίδει. Σχετικά με την παροχή μάζας αέρα, διαπιστώνουμε πως κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι σταθερή και από τη μορφή της καμπύλης της σε χρόνο 1400, φαίνεται από το max που επιτυγχάνει ότι εκείνη τη στιγμή ο διακόπτης παροχής αέρα του Πίνακα Λειτουργίας του Αφυγραντή κλείνει.

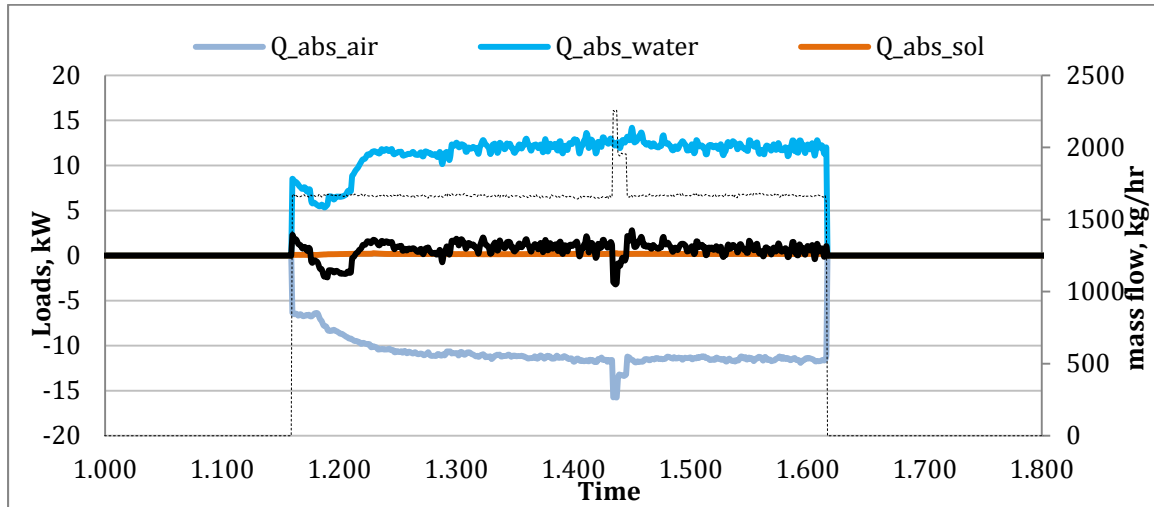
Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Νερού και Όγκο Νερού :



Παρατηρούμε πως η Θερμοκρασία Εισόδου Νερού κυμαίνεται στους 15 Βαθμούς Κελσίου, ενώ η Εξόδου φτάνει μέχρι και τους 26. Αυτό συμβαίνει καθώς, το Νερό εισέρχεται στον Αφυγραντή υπόψυκτο από τον Πύργο Ψύξης και κατά την Αφύγρανση λόγω της μετάδοσης Θερμότητας κατά την επαφή του Νερού με τον Αέρα ή/και το Διάλυμα, η Θερμοκρασία στην Έξοδο καταγράφεται αυξημένη.

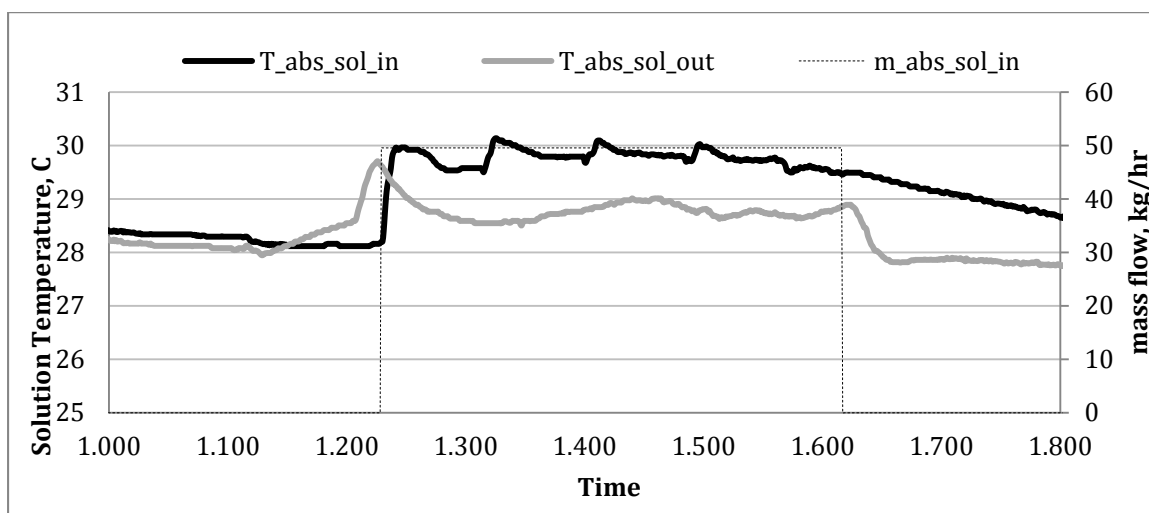


### Συγκεντρωτικό Γράφημα Ποσού Ενεργειών Αέρα, Διαλύματος, Νερού, Συνόλου και Παροχής Αέρα



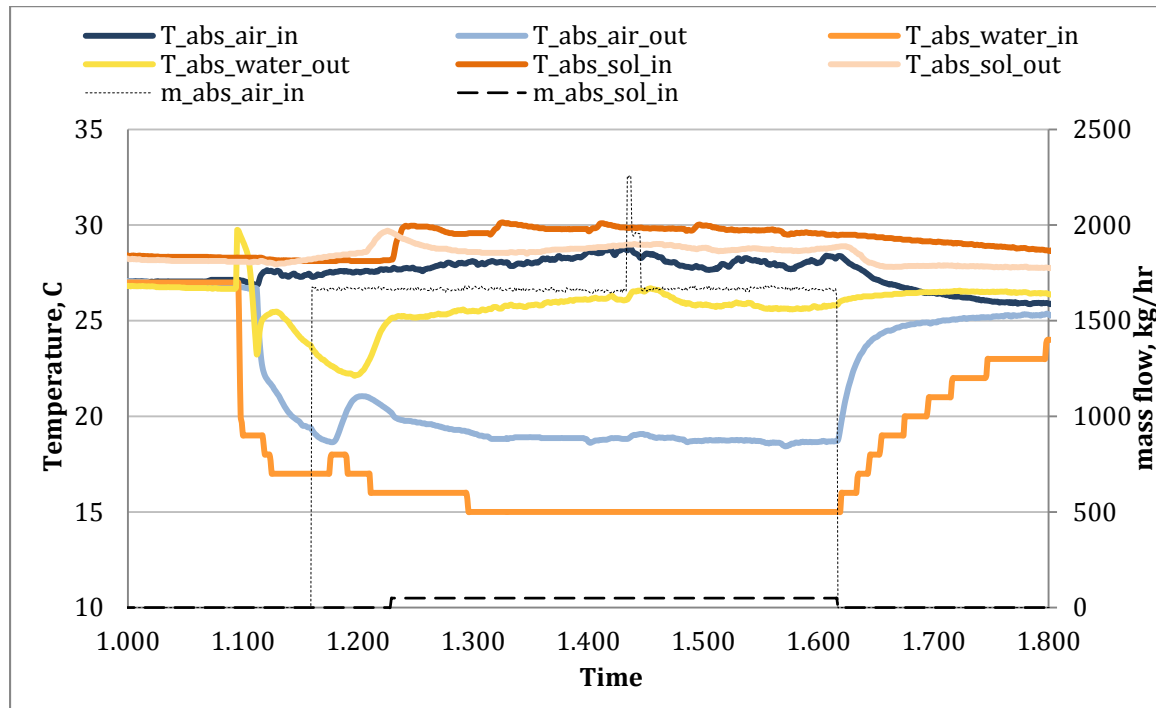
Παρατηρούμε πως το Ποσό Ενέργειας Διαλύματος είναι μηδέν μιας και το ίδιο δε μετέχει στη μετάδοση Ενέργειας μεταξύ των εν λόγω μεταβλητών. Έπειτα, διαπιστώνουμε από τις αντίστοιχες καμπύλες ότι όση Ενέργεια χάνει ο Αέρας στη διαδικασία, τόση παίρνει το Νερό, με τα  $max$  και  $min$  τους να έρχονται σε πλήρη αντιστοιχία στο Γράφημα. Το άθροισμα των δύο καμπυλών αυτών δίνουν την τελική μορφή του Συνολικού Ποσού Ενέργειας το οποίο πλησιάζει το μηδέν. Σχετικά με την παροχή μάζας αέρα, διαπιστώνουμε πως κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι σταθερή και από τη μορφή της καμπύλης της σε χρόνο 1400, φαίνεται από το  $max$  που επιτυγχάνει ότι εκείνη τη στιγμή ο διακόπτης παροχής αέρα του Πίνακα Λειτουργίας του Αφυγραντή κλείνει.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Διαλύματος και Παροχής Διαλύματος



Παρατηρούμε πως για σταθερή Παροχή Διαλύματος, η Θερμοκρασία του Διαλύματος στην Έξοδο του Αφυγραντή είναι στους 29 Βαθμούς, μικρότερη από τους 30 Βαθμούς στην Είσοδο, λόγω της επαφής του με το υπόψυκτο Νερό του Πύργου Ψύξης.

Συγκεντρωτικό Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα, Διαλύματος, Νερού και Παροχές Αέρα και Διαλύματος



Τα ανωτέρω γραφήματα συνοψίζονται στο παρόν γράφημα

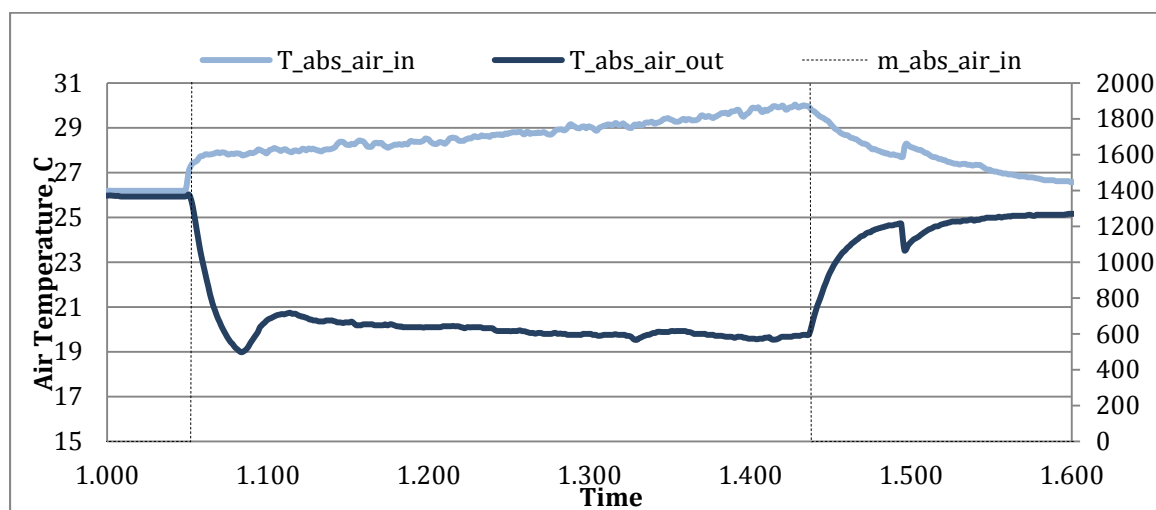
- Μετρήσεις 24-07-2014

Ισολογισμός ενέργειας :

E_air	-39,25	kWh
E_water	42,81	kWh
E_sol	0,64	kWh
E_total	4,19	kWh

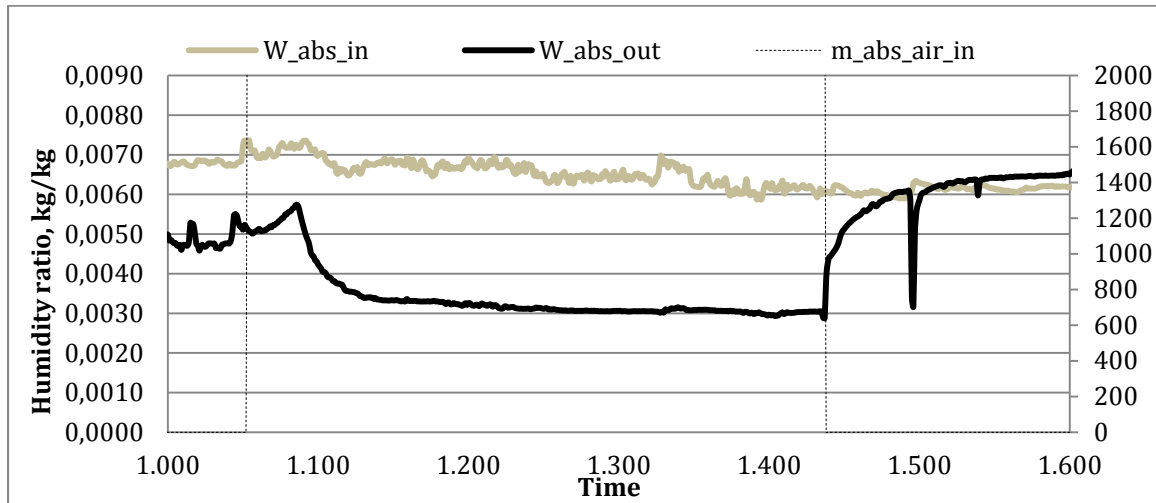
Απόκλιση: -10,7%

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα



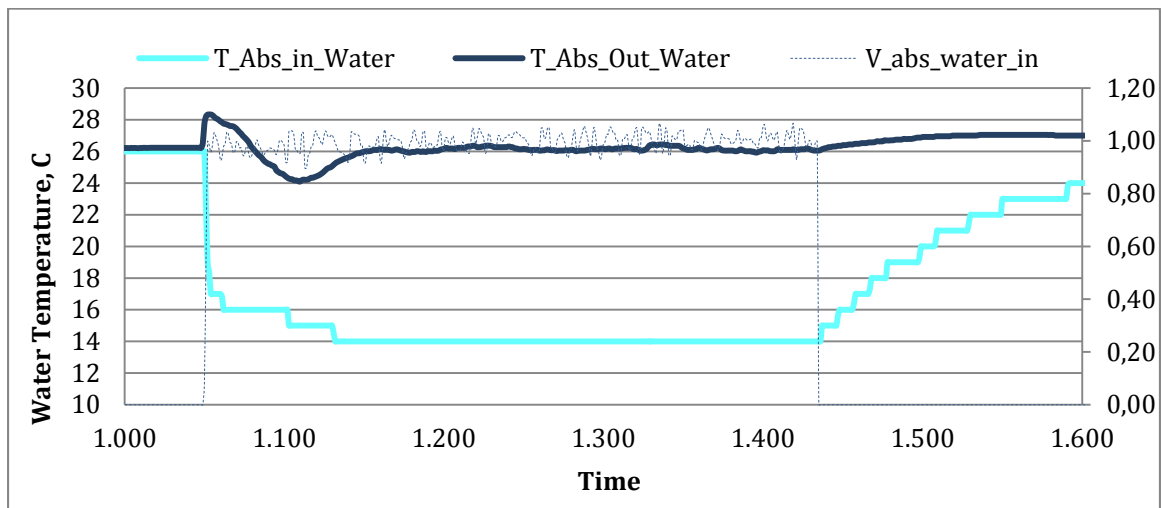
Παρατηρούμε πως η Θερμοκρασία Εισόδου του αέρα κυμαίνεται στους 28 βαθμούς Κελσίου, ενώ αυτή στην Έξοδο του Αφυγραντή μειώνεται στους 20. Αυτό είναι απολύτως θεμιτό, καθώς ο αέρας ψύχεται από το υπόψυκτο εξαγόμενο νερό του Πύργου Ψύξης.

Γράφημα Αναλογίας Υγρασίας Εισόδου-Εξόδου Αέρα



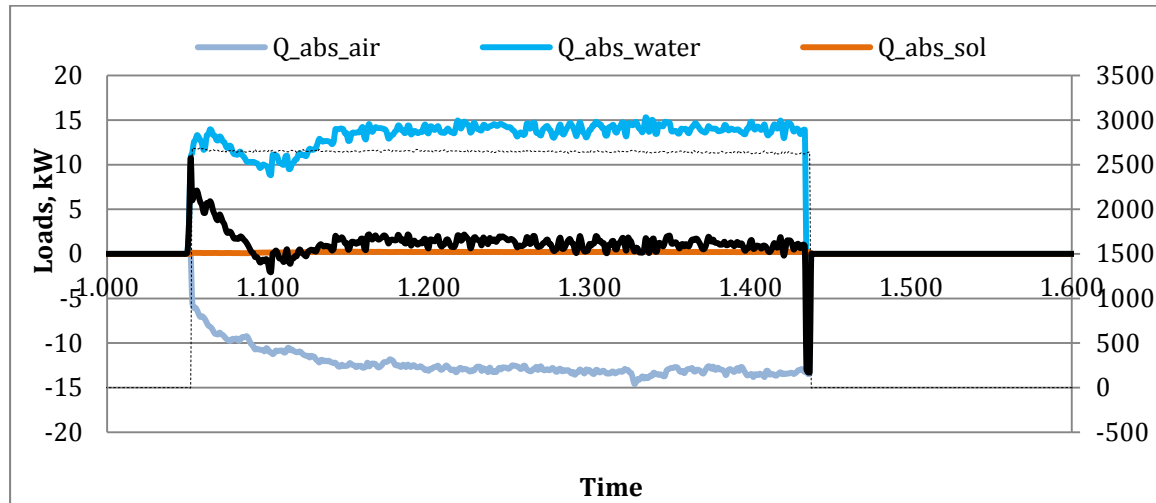
Παρατηρούμε μεγάλη διαφορά στις τιμές Αναλογίας Υγρασίας Εισόδου και Εξόδου. Σύμφωνα με τη λειτουργία του Αφυγραντή, κατά το πείραμα τα μόρια του Νερού του Αέρα δεσμεύονται από το πυκνό Διάλυμα, με αποτέλεσμα ο Αέρας στην έξοδο της Συσκευής να βγαίνει αφυγραμένος και το Διάλυμα πιο αραιό. Αυτή ακριβώς η λειτουργία περιγράφεται στο άνω Γράφημα μέσα από τη μορφή των καμπυλών κι εφόσον η Αναλογία Υγρασίας Εισόδου είναι μεγαλύτερη κατά πολύ από εκείνη της Εξόδου, καταλαβαίνουμε πως ο Αφυγραντής αποδίδει.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Νερού και Όγκου Νερού



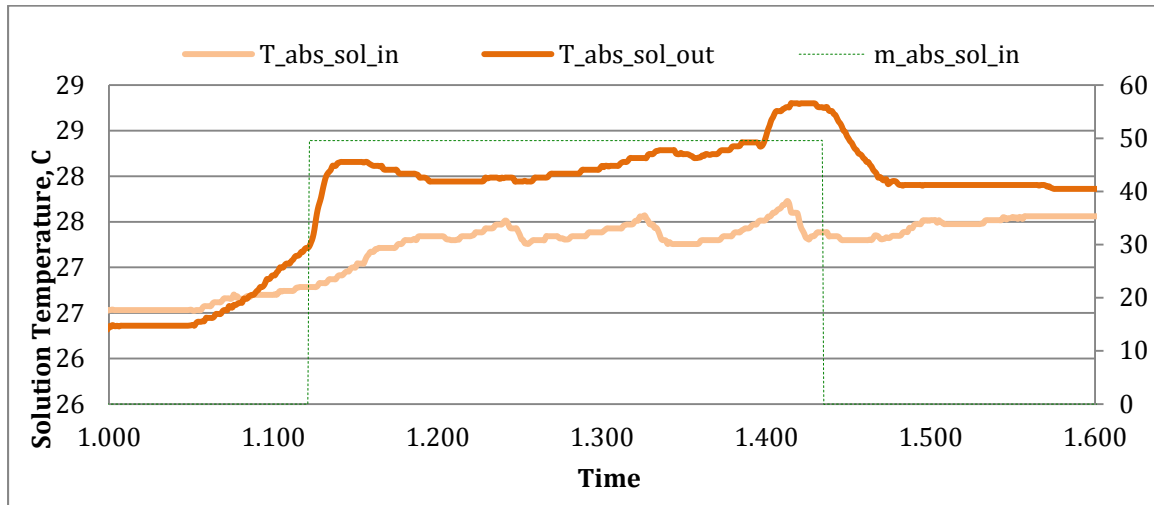
Παρατηρούμε πως η Θερμοκρασία Εισόδου Νερού κυμαίνεται στους 14 Βαθμούς Κελσίου, ενώ η Εξόδου φτάνει μέχρι και τους 26. Αυτό συμβαίνει καθώς, το Νερό εισέρχεται στον Αφυγραντή υπόψυκτο από τον Πύργο Ψύξης και κατά την Αφύγρανση λόγω της μετάδοσης Θερμότητας κατά την επαφή του Νερού με τον Αέρα ή/και το Διάλυμα, η Θερμοκρασία στην Έξοδο καταγράφεται αυξημένη.

### Συγκεντρωτικό Γράφημα Ποσού Ενεργειών Αέρα, Διαλύματος, Νερού, Συνόλου



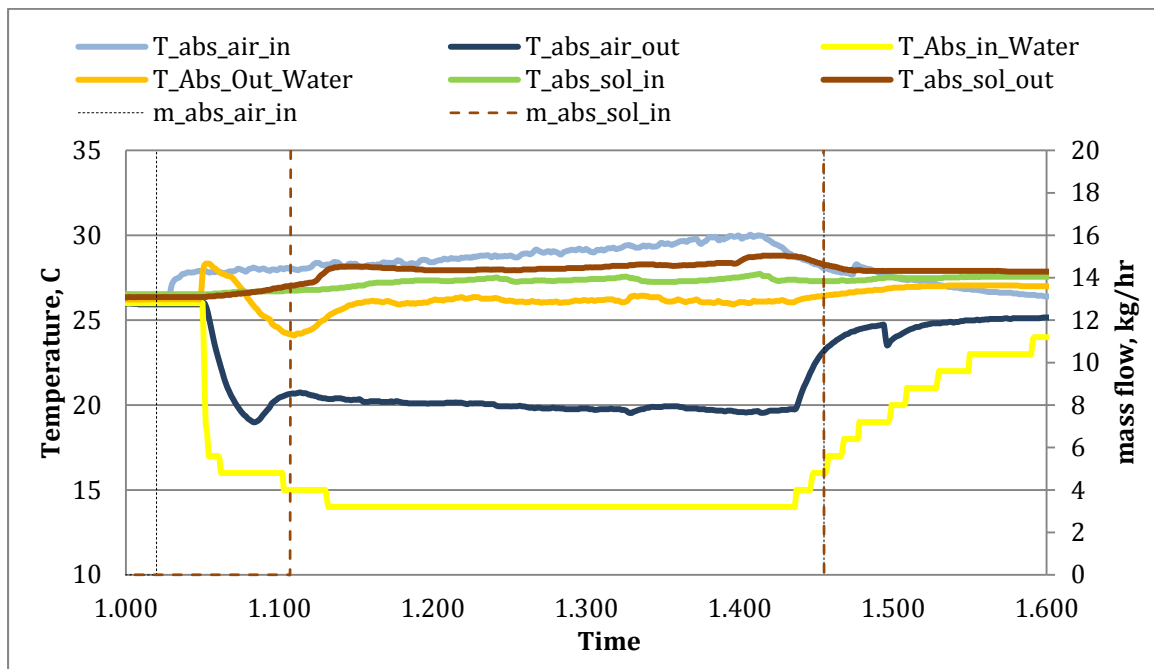
Παρατηρούμε πως το Ποσό Ενέργειας Διαλύματος είναι μηδέν μιας και το ίδιο δε μετέχει στη μετάδοση Ενέργειας μεταξύ των εν λόγω μεταβλητών. Έπειτα, διαπιστώνουμε από τις αντίστοιχες καμπύλες ότι όση Ενέργεια χάνει ο Αέρας στη διαδικασία, τόση παίρνει το Νερό, με τα  $\max$  και  $\min$  τους να έρχονται σε πλήρη αντιστοιχία στο Γράφημα. Το άθροισμα των δύο καμπυλών αυτών δίνουν την τελική μορφή του Συνολικού Ποσού Ενέργειας το οποίο πλησιάζει το μηδέν.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Διαλύματος και Παροχής Διαλύματος



Παρατηρούμε πως για σταθερή Παροχή Διαλύματος, η Θερμοκρασία του Διαλύματος στην Έξοδο του Αφυγραντή είναι στους 27.5 Βαθμούς, μικρότερη από τους 28.5 Βαθμούς στην Είσοδο, λόγω της επαφής του με το υπόψυκτο Νερό του Πύργου Ψύξης.

Συγκεντρωτικό Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα, Διαλύματος, Νερού



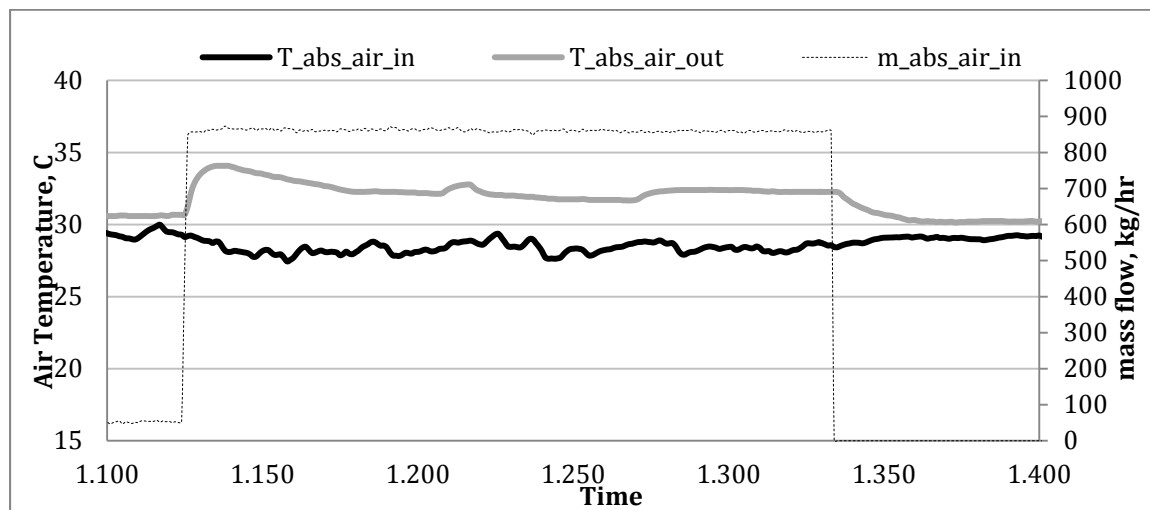
Τα ανωτέρω Γραφήματα συνοψίζονται στο παρόν.



- Μετρήσεις 05-09-2014

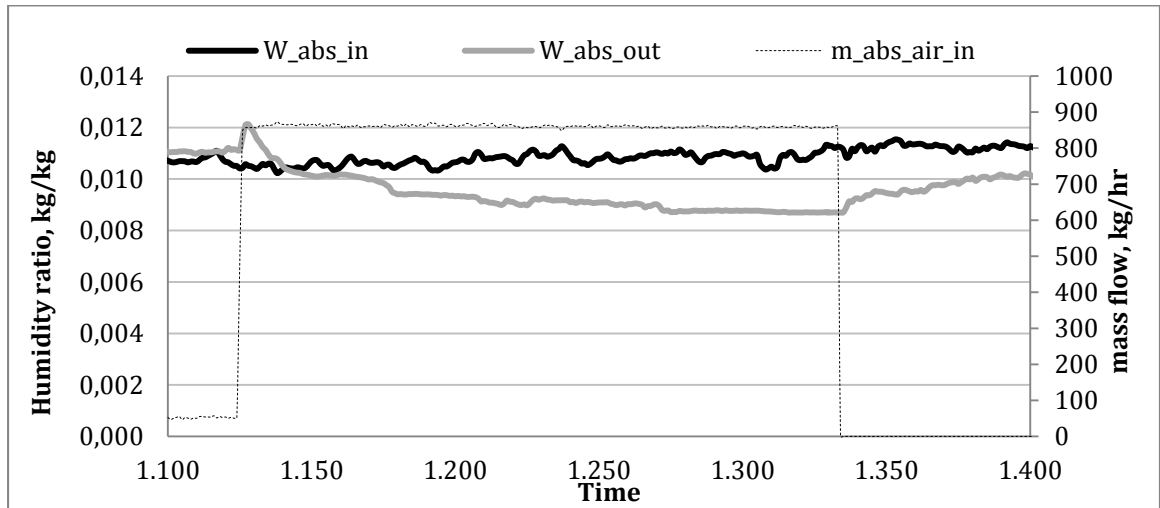
Ισολογισμός ενέργειας : Όπως θα δοθεί παρακάτω με λεπτομέρεια, το παρόν πείραμα διεξήχθη χωρίς ικανοποιητικά αποτελέσματα βάσει των τιμών των μεταβλητών που καταγράφησαν. Επομένως, είναι περιττό να δοθεί ο Ισολογισμός Ενέργειας μεταξύ των μεταβλητών, αφού η Αφύγρανση έλαβε χώρα μέσω μη αποδεκτής μετάδοσης Ενέργειας.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα και Παροχής Αέρα



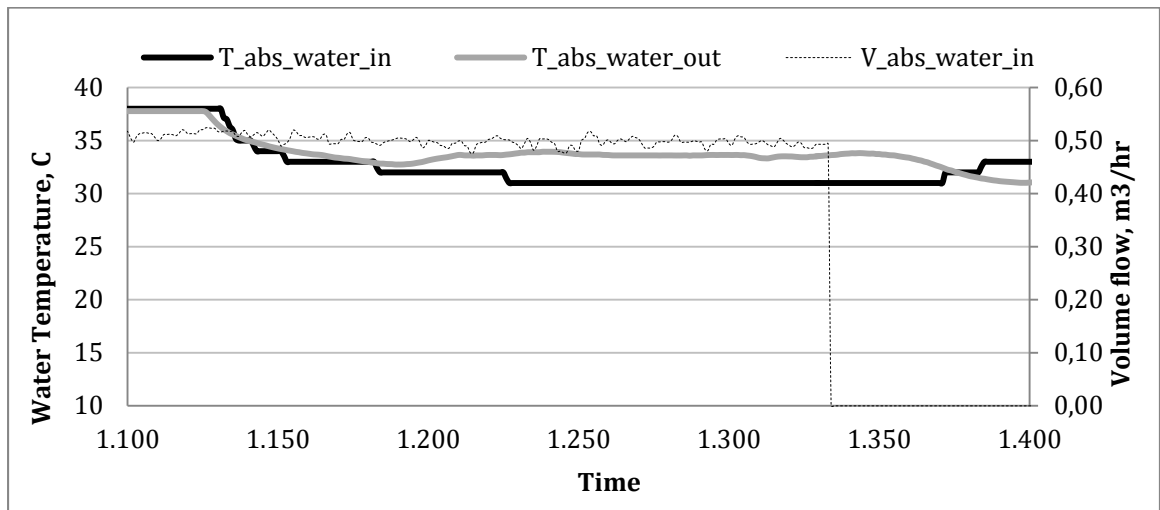
Παρατηρούμε πως ο Αέρας εισάγεται στον Αφυγραντή με Θερμοκρασία γύρω στους 28 Βαθμούς Κελσίου. Σε σταθερή παροχή Αέρα, η Θερμοκρασία Εξόδου είναι μεγαλύτερη-στους 32 Βαθμούς περίπου. Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως ο Εξατμιστικός Πύργος Ψύξης έχει κάποιο σφάλμα και το Νερό στην Έξοδό του δεν βγαίνει υπόψυκτο, ώστε να ψύξει τη διαδικασία με την Είσοδό του στον Αφυγραντή.

Γράφημα Αναλογίας Υγρασίας Εισόδου-Εξόδου Αέρα και Παροχής Αέρα



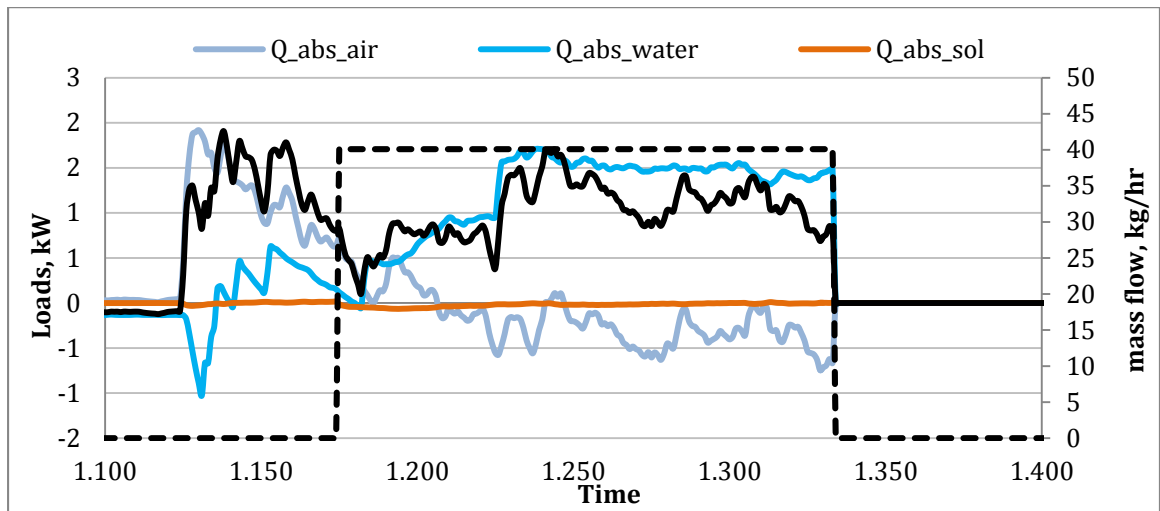
Για σταθερή Παροχή Αέρα, η Υγρασία του Αέρα στην Έξοδο είναι λιγότερη από αυτήν στην Είσοδο. Επομένως, η Αφύγρανση επιτυγχάνεται έστω και με διαταραγμένες τις προαναφερθείσες Θερμοκρασιακές Συνθήκες. Υποθέτουμε μάλιστα, πως η διαδικασία ψύχεται από τον Αέρα περιβάλλοντος μόνο.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Νερού και Όγκος Νερού



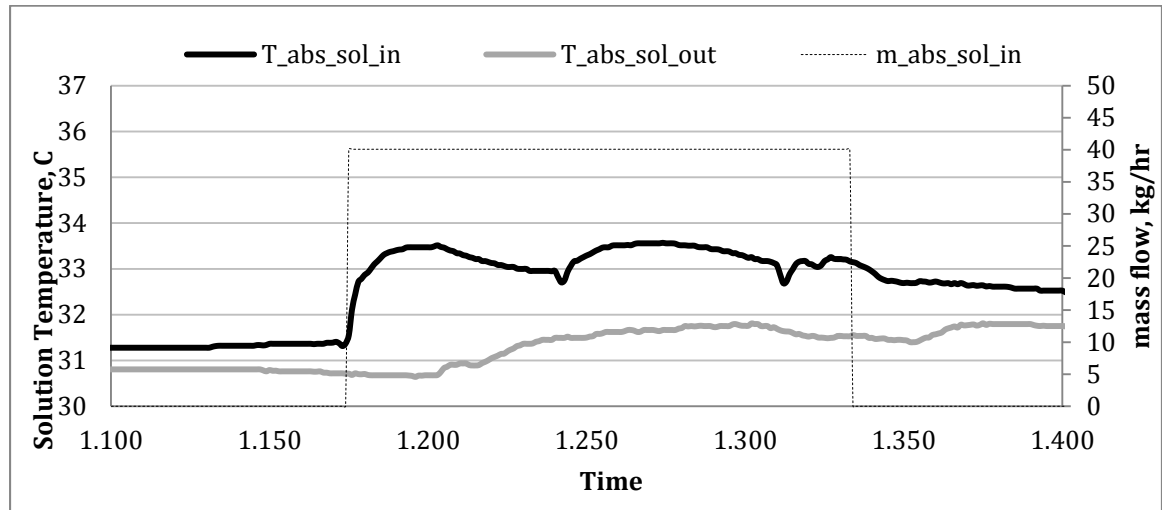
Οι καμπύλες των Θερμοκρασιών Νερού σε Έξοδο και Είσοδο, σχεδόν ταυτίζονται λόγω της δυσλειτουργίας στον Πύργο Ψύξης για σταθερό Όγκο Παροχής Νερού

### Συγκεντρωτικό Γράφημα Ποσού Ενέργειών Αέρα, Διαλύματος, Νερού, Συνόλου



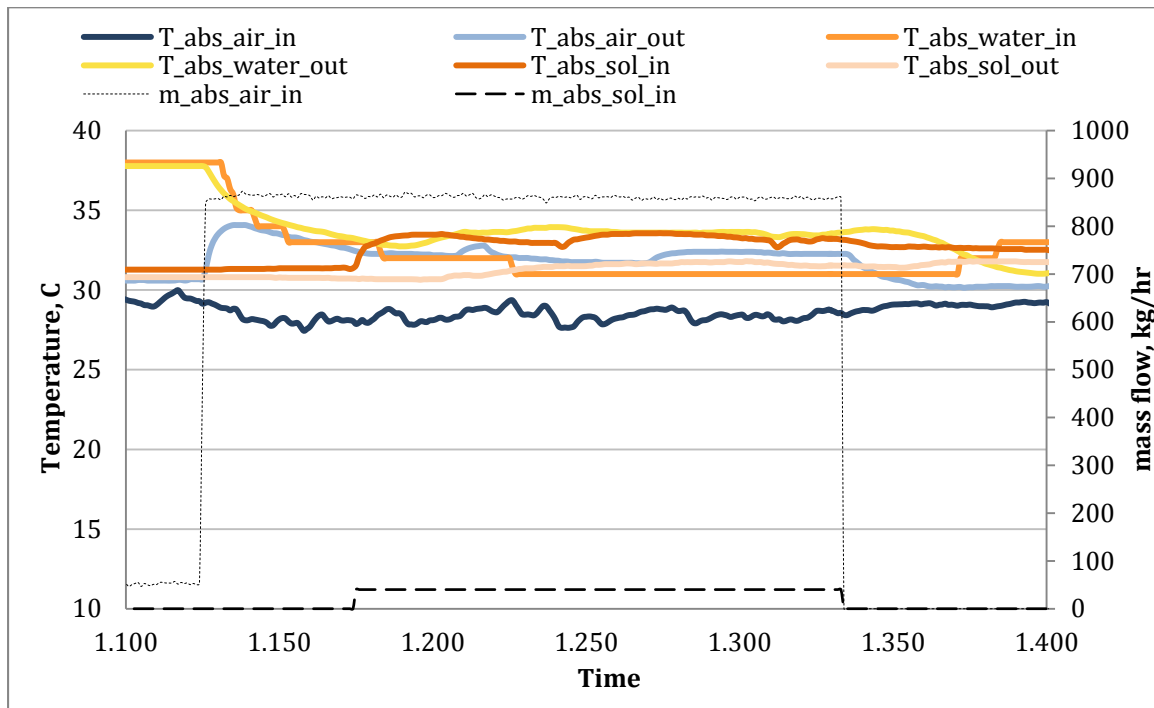
Παρατηρούμε τις καμπύλες Ενέργειας Αέρα και Νερού οι οποίες αντίθετες, όπως είναι αναμενόμενο. Τα max και min τους είναι σε αντιστοιχία με κάποιες, ωστόσο, αποκλίσεις οι οποίες συντελούν στην τελική μορφή της καμπύλης της Συνολικής Ενέργειας (μαύρη γραμμή) που πλησιάζει με αυξομειώσεις το μηδέν

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Διαλύματος και Παροχής Διαλύματος



Το Διάλυμα εισέρχεται στους 33 περίπου Βαθμούς και λόγω της επαφής του με τον Αέρα Περιβάλλοντος, πέφτει στους 31.5, με σταθερή Παροχή Διαλύματος

Συγκεντρωτικό Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα, Διαλύματος, Νερού και Παροχών Αέρα και Διαλύματος



Το παρόν γράφημα συγκεντρώνει τα ανώτερω.

#### 4.4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ

- Μετρήσεις 17-07-2014

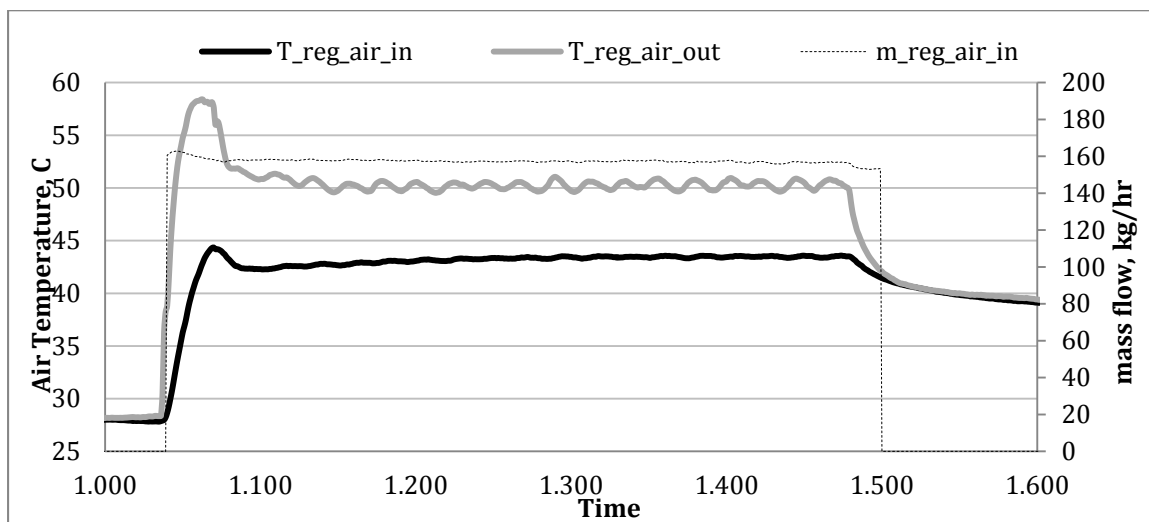
Ισολογισμός Ενέργειας :

E_air	25,88	kWh
E_water	-27,57	kWh
E_sol	1,13	kWh
E_total	-0,56	kWh

Απόκλιση:

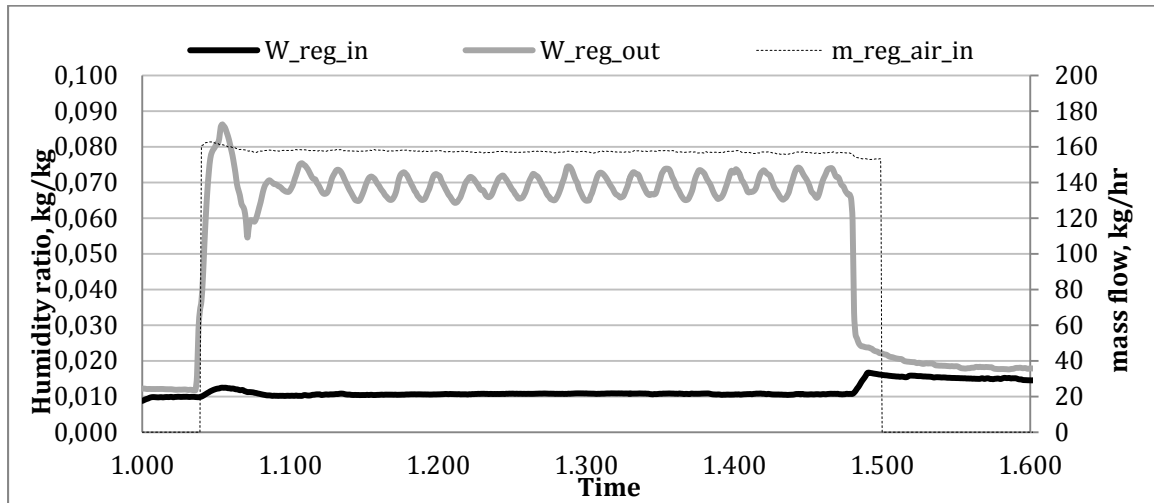
**-2,2%**

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα και Παροχής Αέρα



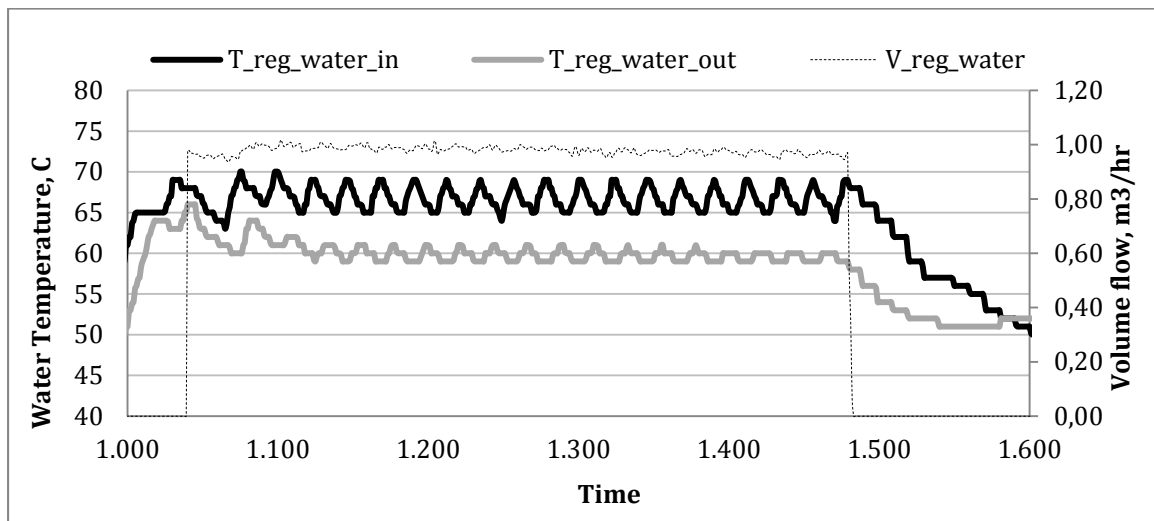
Ο Αέρας εισέρχεται με Θερμοκρασία 43 Βαθμών κι εξέρχεται με 50. Αυτό οφείλεται στο ότι η διαδικασία θερμαίνεται με Νερό εξερχόμενο από θερμοδοχείο (Boiler). Η κυματοειδής μορφή της καμπύλης Εξόδου με σταθερα πλάτη, αποδίδεται στο γεγονός πως σε αντίστοιχα χρονικά διαστήματα άναβε κι έσβηνε ο διακόπτης του Boiler

Γράφημα Αναλογίας Υγρασίας Εισόδου- Εξόδου Αέρα και Παροχής Αέρα



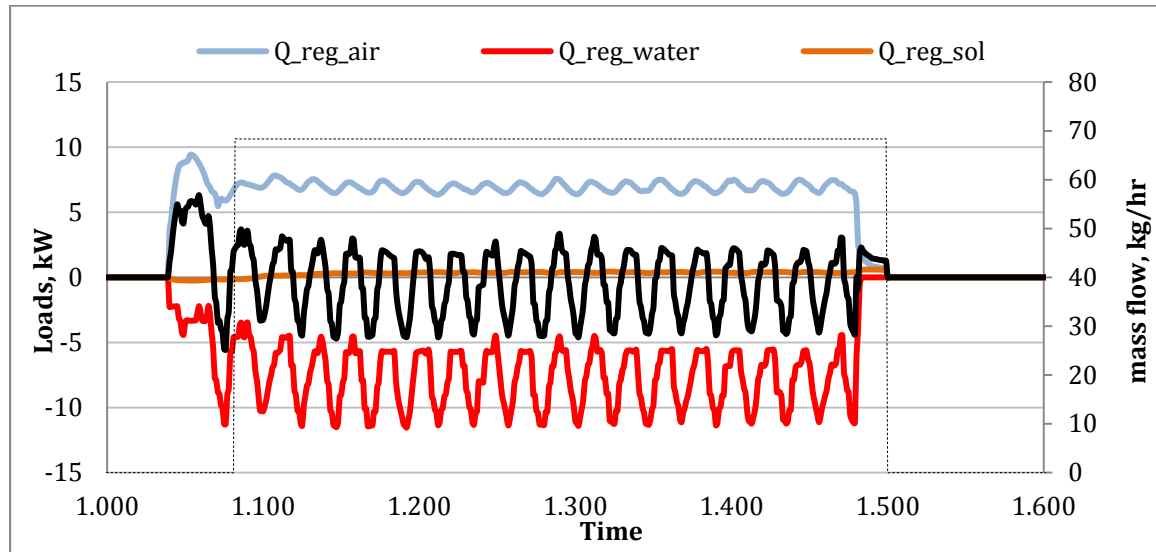
Ο Αέρας εξέρχεται πολύ πιο υγρός, μετά την επαφή του με το αραιό Διάλυμα και τη μεταφορά μορίων Νερού από το τελευταίο στον Αέρα κατά την Αναγέννηση.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Νερού Όγκου Νερού



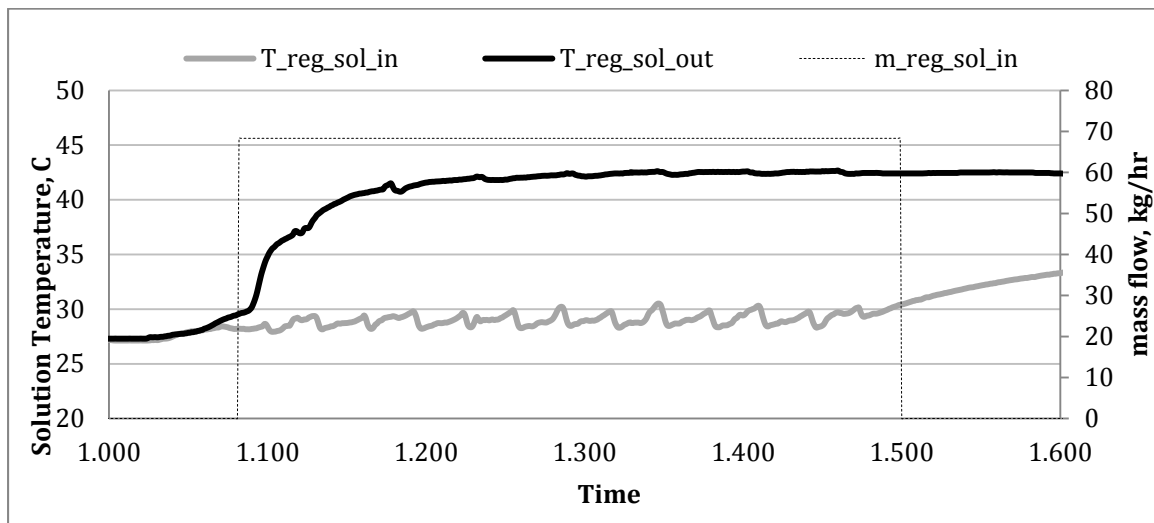
Το Νερό εισέρχεται θερμό στους 68 Βαθμούς από το Boiler κι από την επαφή του με το Διάλυμα και τον Αέρα, χάνεται ποσό της Θερμότητάς του και πέφτει στους 60. Η κυματοειδής μορφή της καμπύλης Εξόδου με σταθερά πλάτη, αποδίδεται στο γεγονός πως σε αντίστοιχα χρονικά διαστήματα άναβε κι έσβηνε ο διακόπτης του Boiler

Συγκεντρωτικό Γράφημα Ποσού Ενεργειών Αέρα, Διαλύματος, Νερού, Συνόλου



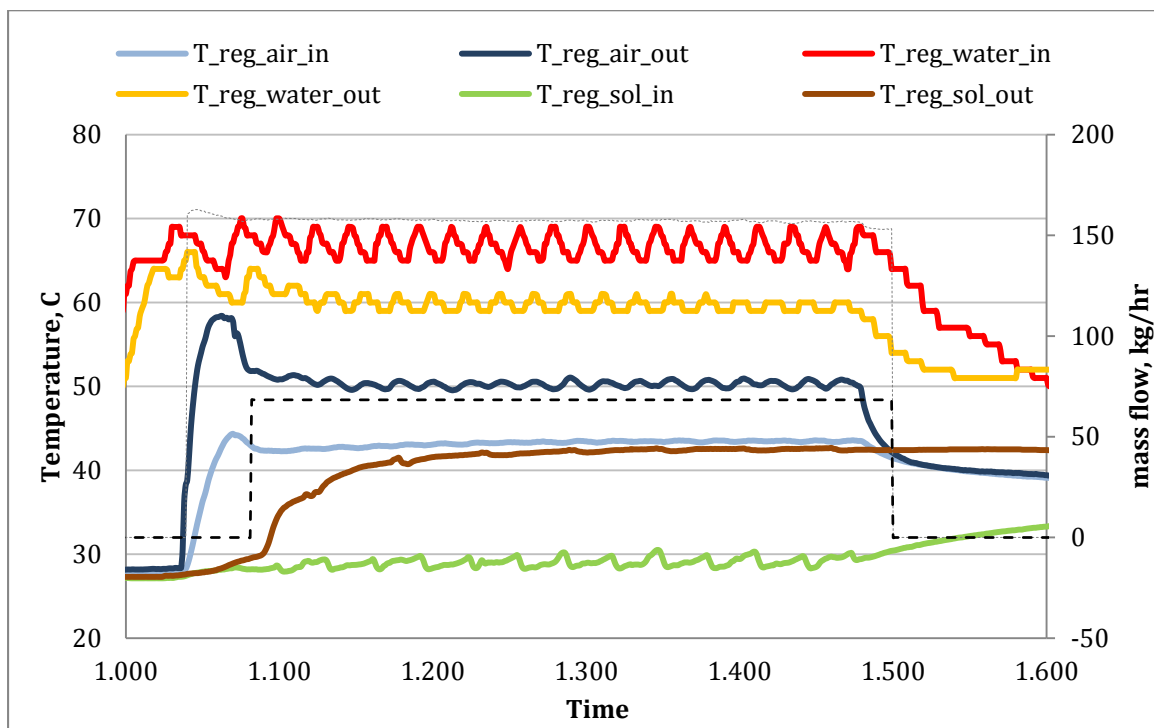
Το Διάλυμα δε μετέχει στη μετάδοση Ενέργειας, γι' αυτό κι η Ενέργεια του είναι μηδενική. Παρατηρείται πως όση Ενέργεια χάνει το Νερό, τόση απάγει ο Αέρας κατα την επαφή τους, γι' αυτό και τα max και min τους είναι ακριβώς αντίθετα. Έτσι, η Συνολική Ενέργεια (μαύρη καμπύλη) πλησιάζει το μηδέν. Η κυματοειδής μορφή, όπως προαναφέρθηκε έχει να κάνει με τη λειτουργία του Boiler.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Διαλύματος και Παροχής Διαλύματος



Το Διάλυμα εξέρχεται πολύ πιο θερμό, από τους 29 στους 43 βαθμούς μετά την επαφή του με το θερμό Νερό σε σταθερή παροχή Διαλύματος

Συγκεντρωτικό Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα, Διαλύματος, Νερού



Τα ανωτέρω συνοψίζονται στο παρόν Γράφημα.



- Μετρήσεις 25-07-2014

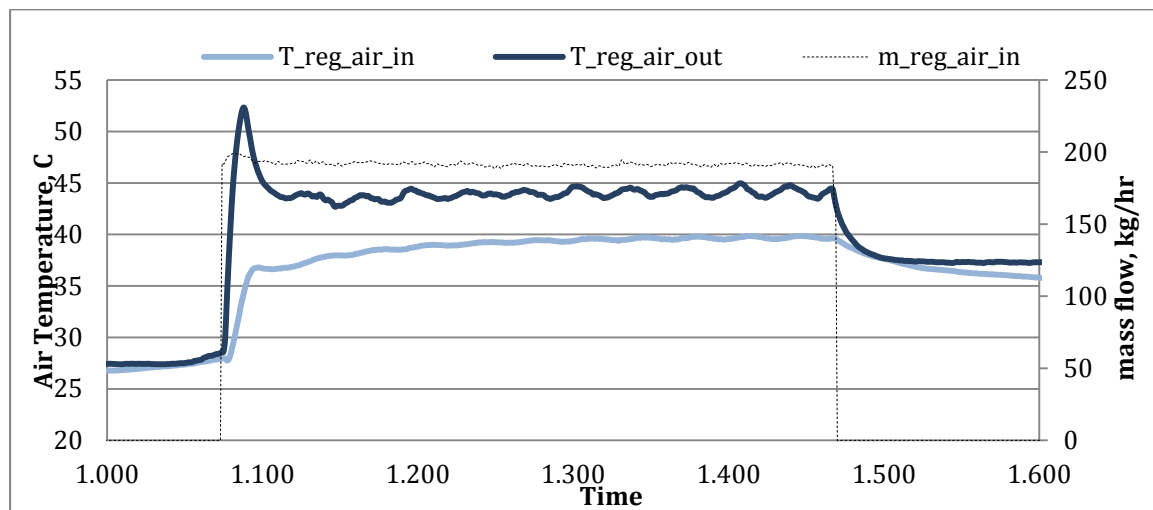
Ισολογισμός Ενέργειας :

E_air	14,65	kWh
E_water	-16,73	kWh
E_sol	0,81	kWh
E_total	-1,27	kWh

Απόκλιση:

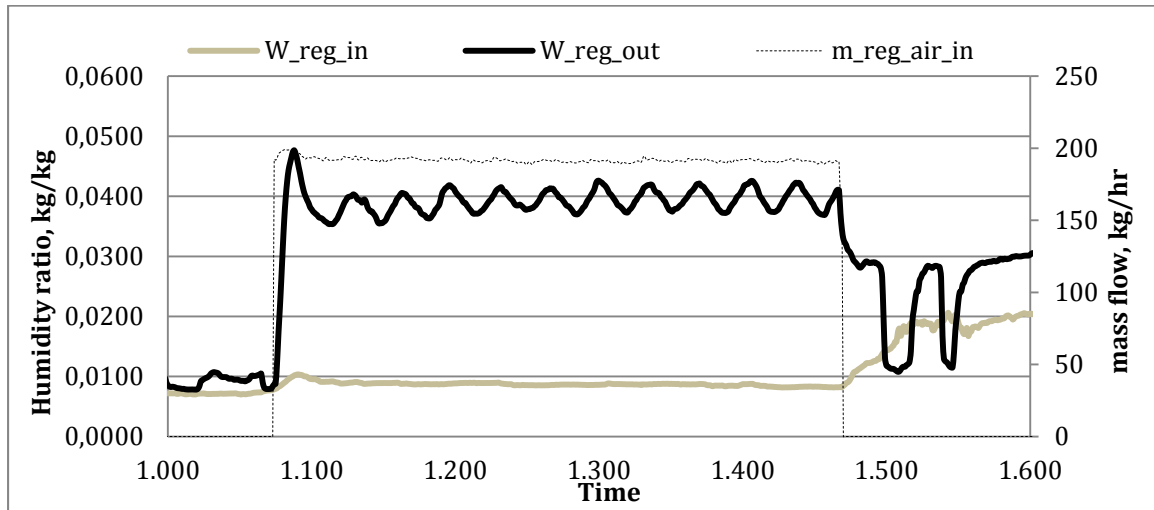
**-8,7%**

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα και Παροχής Αέρα



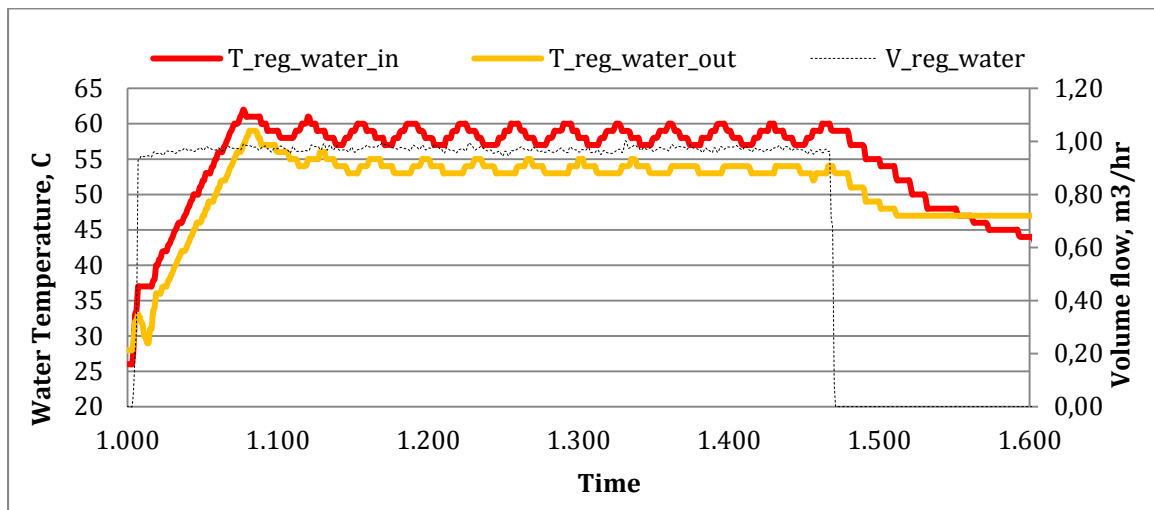
Ο Αέρας εισέρχεται με Θερμοκρασία 39 Βαθμών κι εξέρχεται με 43. Αυτό οφείλεται στο ότι η διαδικασία θερμαίνεται με Νερό εξερχόμενο από θερμοδοχείο (Boiler). Η κυματοειδής μορφή της καμπύλης Εξόδου με σταθερά πλάτη, αποδίδεται στο γεγονός πως σε αντίστοιχα χρονικά διαστήματα άναβε κι έσβηνε ο διακόπτης του Boiler

Γράφημα Αναλογίας Υγρασίας Εισόδου-Εξόδου Αέρα και Παροχής Αέρα



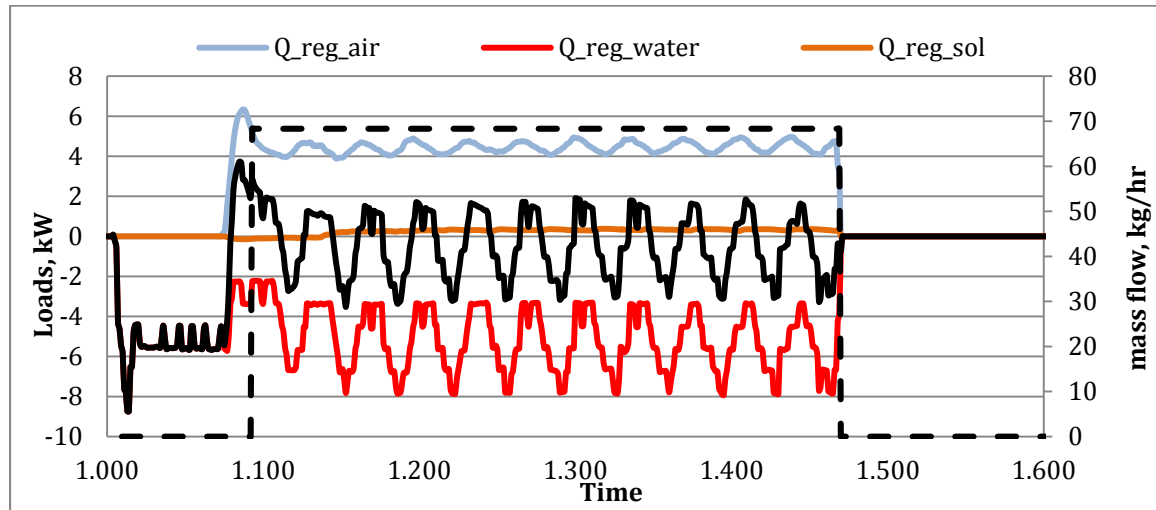
Ο Αέρας εξέρχεται πολύ πιο υγρός, μετά την επαφή του με το αραιό Διάλυμα και τη μεταφορά μορίων Νερού από το τελευταίο στον Αέρα κατά την Αναγέννηση.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Νερού και Όγκου Νερού



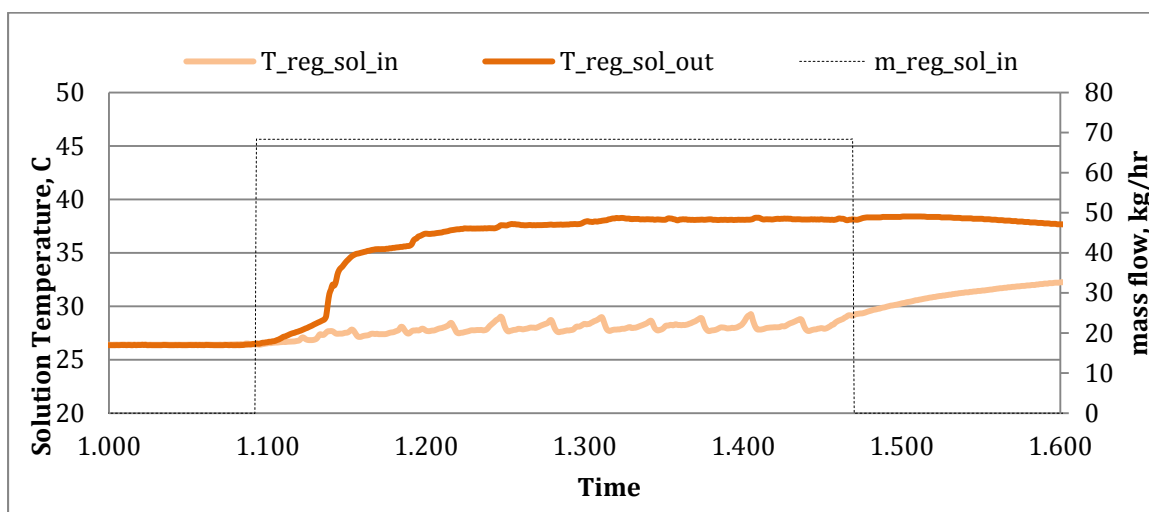
Το Νερό εισέρχεται θερμό στους 60 Βαθμούς από το Boiler κι από την επαφή του με το Διάλυμα και τον Αέρα, χάνεται ποσό της Θερμότητάς του και πέφτει στους 53. Η κυματοειδής μορφή της καμπύλης Εξόδου με σταθερά πλάτη, αποδίδεται στο γεγονός πως σε αντίστοιχα χρονικά διαστήματα άναβε κι έσβηνε ο διακόπτης του Boiler

### Συγκεντρωτικό Γράφημα Ποσού Ενεργειών Αέρα, Διαλύματος, Νερού, Συνόλου



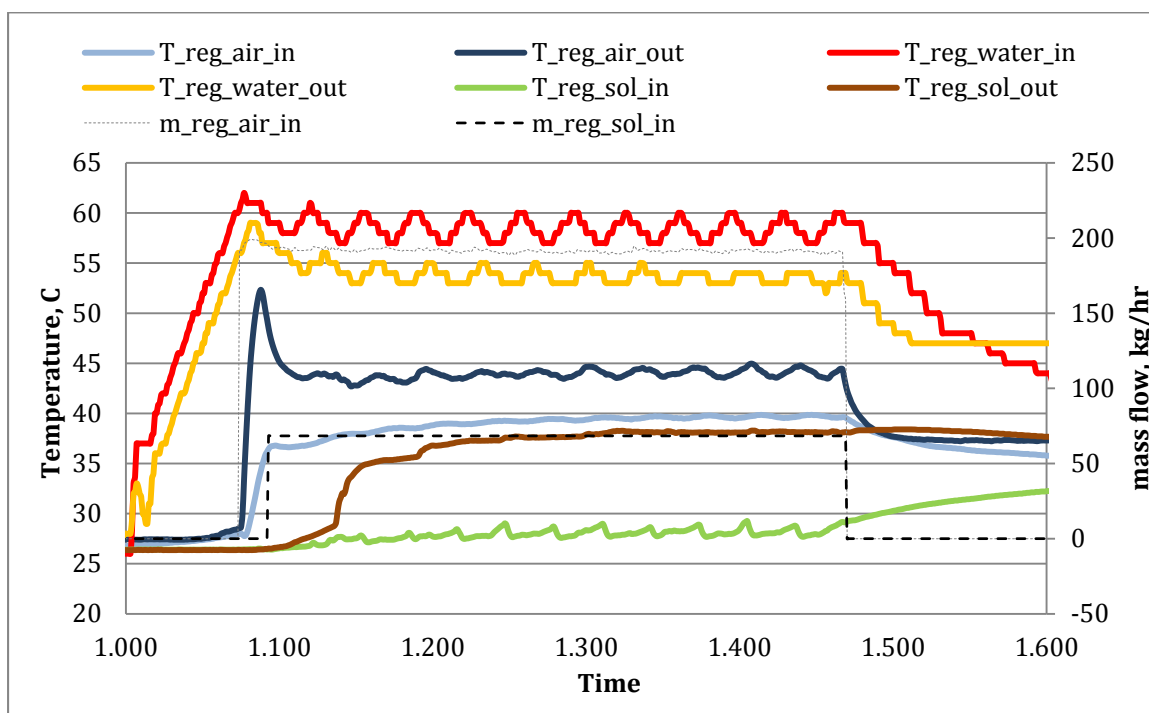
Το Διάλυμα δε μετέχει στη μετάδοση Ενέργειας, γι' αυτό κι η Ενέργεια του είναι μηδενική. Παρατηρείται πως όση Ενέργεια χάνει το Νερό, τόση απάγει ο Αέρας κατα την επαφή τους, γι' αυτό και τα max και min τους είναι ακριβώς αντίθετα. Έτσι, η Συνολική Ενέργεια (μαύρη καμπύλη) πλησιάζει το μηδέν. Η κυματοειδής μορφή, όπως προαναφέρθηκε έχει να κάνει με τη λειτουργία του Boiler.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Διαλύματος και Παροχής Διαλύματος



Το Διάλυμα εξέρχεται πολύ πιο θερμό, από τους 27 στους 38 βαθμούς μετά την επαφή του με το θερμό Νερό σε σταθερή παροχή Διαλύματος

Συγκεντρωτικό Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα, Διαλύματος, Νερού

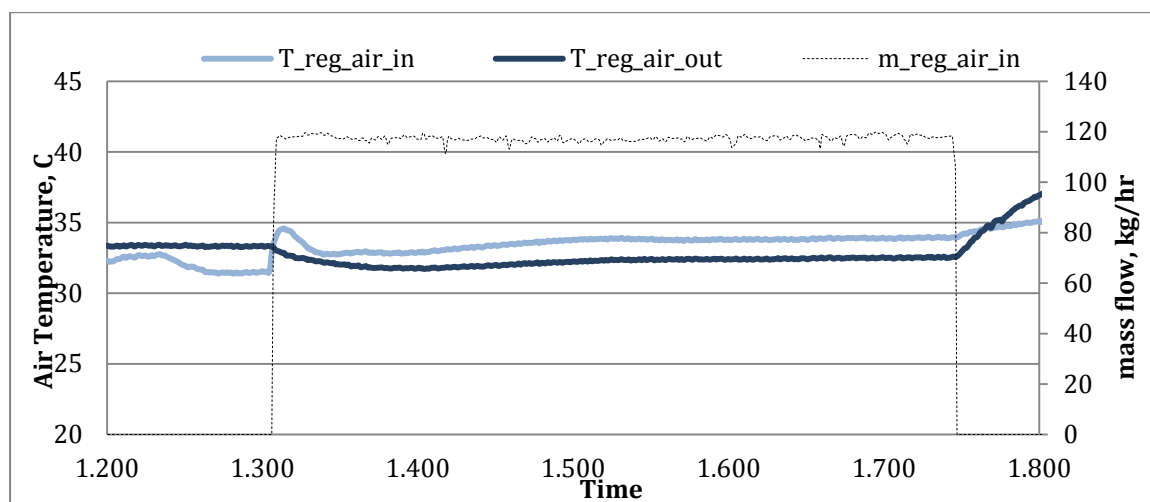


Τα ανωτέρω συνοψίζονται στο παρόν Γράφημα

- Μετρήσεις 05-09-2014

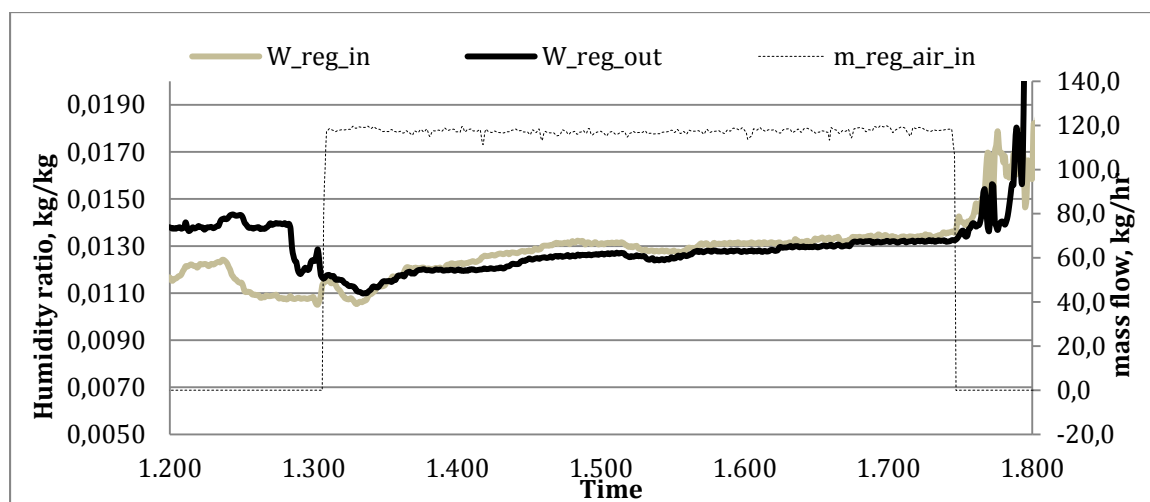
Οι Μετρήσεις αυτές παρουσιάζουν αποκλίσεις από της προηγούμενες Αναγεννήσεις, καθώς έχουν να κάνουν με την Αφύγρανση που έλαβε χώρα στις 05-09-2014 με σφάλμα στον Πύργο Ψύξης (4.4.1). Επομένως, το Διάλυμα που εισέρχεται στον Αναγεννητή παραμένει σε μεγάλο ποσοστό πυκνό.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα και Παροχής Αέρα



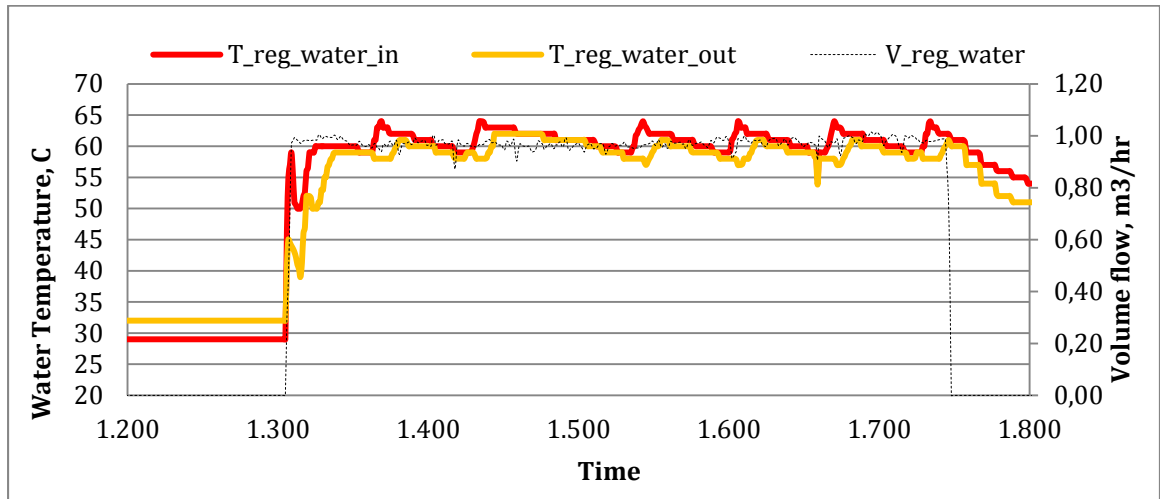
Οι Θερμοκρασίες Εισόδου-Εξόδου είναι πολύ κοντινές, διότι ο Αέρας στην Έξοδο του Αφυγραντή και κατ'επέκταση Είσοδο του Αναγεννητή δεν ήταν υπόψυκτος λόγω του προαναφερθέντος σφάλματος.

Γράφημα Αναλογίας Υγρασίας Εισόδου-Εξόδου Αέρα και Παροχής Αέρα



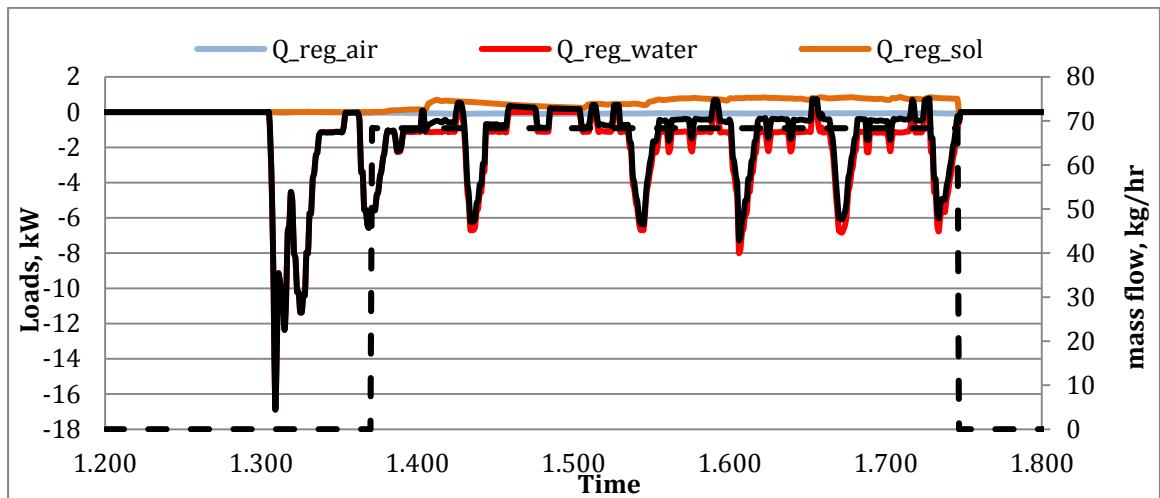
Σε σταθερή παροχή, λόγω της απουσίας Αφύγρανσης, το Διάλυμα είναι ακόμα πυκνό και δε μεταφέρεται ποσότητα Νερού από αυτό στον Αέρα, οπότε η Υγρασία του τελευταίου παραμένει περίπου η ίδια

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Νερού και Όγκου Νερού



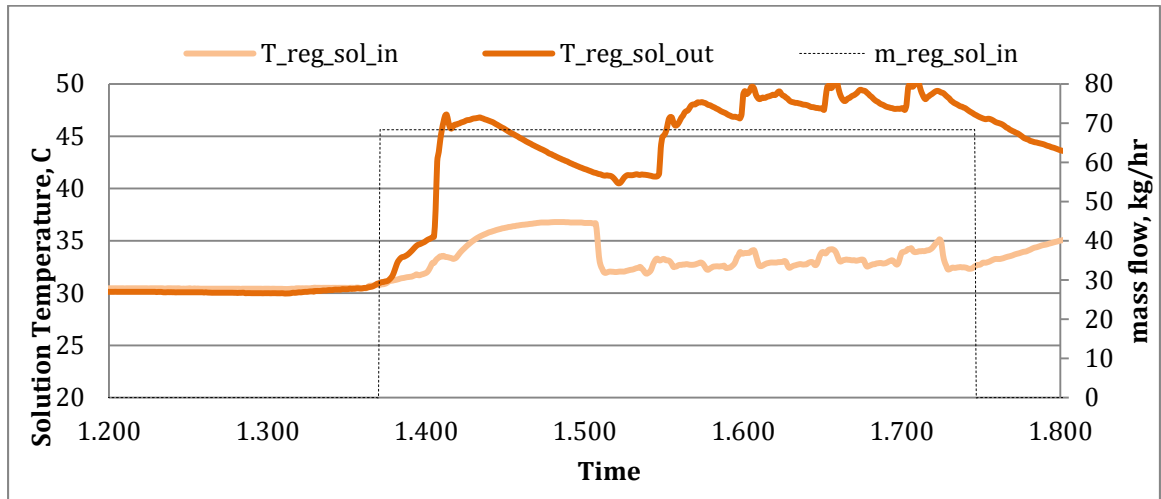
Οι Θερμοκρασίες Νερού σε Είσοδο και Έξοδο είναι περίπου ταυτόσημες, αφού το θερμό εισαγόμενο Νερό δεν ήρθε σε επαφή με υπόψυκτο Αέρα που έχει υποστεί Αφύγνωση.

Συγκεντρωτικό Γράφημα Ποσού Ενεργειών Αέρα, Διαλύματος, Νερού, Συνόλου



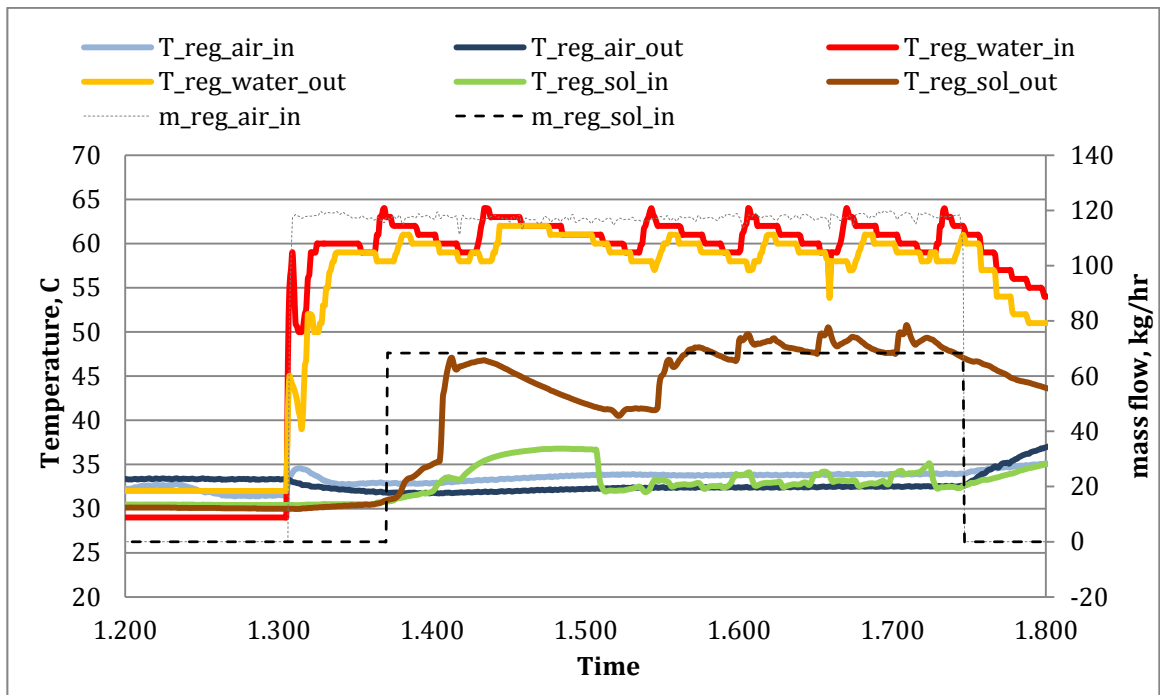
Η μετάδοση Ενέργειας δεν ήταν δυνατή κατά το συγκεκριμένο πείραμα. Επομένως, η καμπύλη της Συνολικής Ενέργειας (μαύρη καμπύλη) ταυτίζεται με αυτή του Νερού, που χάνει Ενέργεια αλλά η τελευταία δεν απάγεται από Αέρα.

Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Διαλύματος και Παροχής Διαλύματος



Το Διάλυμα εξέρχεται πιο θερμό-περίπου 45 Βαθμοί από τους 32 στην Είσοδο, καθώς έρχεται σε επαφή με το θερμό Νερό και τον Αέρα.

Συγκεντρωτικό Γράφημα Θερμοκρασιών Εισόδου-Εξόδου Αέρα, Διαλύματος, Νερού και Παροχών Αέρα, Διαλύματος



Τα ανωτέρω συνοψίζονται στο παρόν Γράφημα.

#### 4.4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε πειραματικά η διάταξη συστήματος υγρού ξηραντικού στοιχείου, εσωτερικά ψυγμένου, αντίθετης ροής που είναι εγκατεστημένη στο εργαστήριο του Τομέα Θερμότητας του ΕΜΠ. Με τη μελέτη των διαγραμμάτων του Κεφαλαίου 4.4 γίνεται δυνατή η κατανόηση της συμπεριφοράς του αφυγραντή υγρού στοιχείου και εξάγονται συμπεράσματα για την απόδοση του.

Όπως έγινε γνωστό παραπάνω, τα αποτελέσματα της εγκατάστασης είναι ικανοποιητικά κι έρχονται σε συμφωνία με την ανάπτυξη του Μαθηματικού Μοντέλου Αφυγραντή. Ωστόσο, εντοπίστηκε σφάλμα στον Εξατμιστικό Πύργο Ψύξης, το οποίο πρέπει να επιλυθεί διότι καθιστά ατελέσφορη την πραγματοποίηση πειραμάτων.

Βελτίωση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, θα μπορούσε να επιτευχθεί με το να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος με μεγαλύτερο αριθμό πειραμάτων, έτσι ώστε τα συμπεράσματα να είναι πληρέστερα.



## 5. ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Βασικά Μέρη Συμβατικού Κλιματιστικού Συστήματος .....	6
Εικόνα 2 Διάγραμμα Ροής-Δομή Εργασίας .....	10
Εικόνα 3 Σχηματικό Διάγραμμα Ενός Συστήματος Ψύξης DEC.....	16
Εικόνα 4 Σχηματικό Διάγραμμα Ροής Αφυγραντή.....	22
Εικόνα 5 Ψυχομετρικές Καμπύλες Διαλυμάτων .....	24
Εικόνα 6 Ισολογισμοί Ενέργειας και Μάζας κατά τη διαδικασία της Αφύγρανσης.....	26
Εικόνα 7 Εξάρτηση βαθμού απόδοσης Αφυγραντή από θερμοκρασία και παροχή αέρα εισόδου.....	34
Εικόνα 8 Εξάρτηση β.απόδοσης Αφυγραντή από υγρασία αέρα εισόδου και Διάγραμμα (δεξιά) πτώσης πίεσης συναρτήσει παροχής αέρα .....	34
Εικόνα 9 Διάγραμμα της Πειραματικής Διάταξης με Αισθητήρες.....	43
Εικόνα 10 Γεωμετρία Πύργου Αφύγρανσης .....	44
Εικόνα 11 Πίνακας Ελέγχου Αφυγραντή .....	45
Εικόνα 12 Μετρητής Πίεσης και Θερμοκρασίας και Ανεμιστήρας .....	50
Εικόνα 13 Έξοδος Σωλήνων Αφυγραντή .....	51
Εικόνα 14 Αφυγραντής.....	52
Εικόνα 15 Πίνακας Ελέγχου Αναγεννητή .....	53
Εικόνα 16 Αναγεννητής.....	58
Εικόνα 17 Θερμοσίφωνας Αναγεννητή .....	60
Εικόνα 18 Πίνακας Ελέγχου Εξατμιστικού Ψύκτη .....	61
Εικόνα 19 Εξατμιστικός Ψύκτης .....	64
Εικόνα 20 Εξατμιστικός Ψύκτης .....	65
Εικόνα 21 Δεξαμενές Συγκέντρωσης Αφυγραντικού Υγρού.....	66
Εικόνα 22 Μαγνητικές βαλβίδες .....	66

Εικόνα 23 Δεξαμενές Αποθήκευσης Αφυγραντικού Υγρού .....	67
----------------------------------------------------------	----

## 6. ONOMATOLOGIA

$C_p$	specific heat capacity at constant pressure ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$d$	diameter (m)
$D$	diffusion coefficient ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$h$	enthalpy ( $\text{kJ/kg}_{\text{da}}$ )
$h_G$	gas phase heat transfer coefficient ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
$g$	gravitational acceleration ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$k$	thermal conductivity ( $\text{kW/mK}$ )
$K_G$	gas phase mass transfer coefficient ( $\text{kmol/sm}^2\text{mole fraction}$ )
$L$	length of packing (m)
$Le$	Lewis number
$\dot{m}$	mass flow rate ( $\text{kg/s}$ )
$M$	molecular weight ( $\text{kg/kmol}$ )
$n$	absorber efficiency
$p$	pressure (Pa)
$Q$	heat (kJ)
$Re$	Reynolds number
$Sc$	Schmidt number
$T$	temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
$V'$	superficial velocity (volumetric flow rate per column cross section) ( $\text{m/s}$ )
$W$	air humidity ratio ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{da}}$ )
$X$	salt concentration in solution ( $\text{kg}_{\text{salt}}/\text{kg}_s$ )
$Y$	moisture content in solution ( $\text{kg}_w/\text{kg}_s$ )
$z$	column height (m)
$\Delta h_{\text{abs}}$	latent heat of vaporization for water ( $\text{J/kg}$ )

### *Greek symbols*

$\alpha$	specific interfacial surface area of packing ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )
$\epsilon$	void fraction (bed porosity) ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
$\lambda$	liquid hold up in the packed bed ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
$\mu$	viscosity ( $\text{kg/ms}$ )
$\rho$	density ( $\text{kg/m}^3$ )

### *Subscripts*

$\alpha$	air
atm	atmospheric
$\alpha$	dry air
deh	dehumidification
eq	equivalent
exp	experimental
in	inlet
L	latent
$\alpha$	moist air
out	outlet
S	sensible
s	solution
sim	simulated
st	steam
w	water

### *Superscripts*

sat	saturated
-----	-----------

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Public, [online] Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Air-conditioning>
- [2] Σ. Χατζηδάκης «Ψύξη», 2003
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Refrigerant>
- [4] <http://www.ekatanalotis.gr/1751/%CE%B5%CE%BE%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CE%AD%CF%89%CF%82-70-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CE%B8%CE%AD%CF%81%CE%BC%CE%B1%CE%BD%CF%83%CE%B7-%CE%BC%CE%B5-air-condition/>
- [5] <http://www.warmland.gr/economy-questions-main/disadvantages-of-conventional-heating-equipment/>
- [6] Public,[online]Available:[http://www.ebhe.gr/library/8\\_4\\_1013%20heliakos-klimatismos%20\\_Klhistos\\_kyklos.pdf](http://www.ebhe.gr/library/8_4_1013%20heliakos-klimatismos%20_Klhistos_kyklos.pdf).
- [7] Public, [online] Available: <http://www.solair-project.eu>
- [8] Public, [online] Available: <http://www.bonair.gr>
- [9] Public, [online] Available:[http://library.tee.gr/digital/m2385/m2385\\_balaras.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2385/m2385_balaras.pdf)
- [10] Public, [online] Available:<http://buildinggreen.gr/articles/%CE%AC%CF%81%CE%B8%CF%81%CE%B1/%CE%B5%CF%86%CE%B1%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CE%AE-%CF%84%CE%BF%CF%85-%CE%B7%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CF%8D-%CE%BA%CE%BB%CE%B9%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D-%CF%83%CF%84%CE%B7/>
- [11] Public, [online] Available:[http://www.bonair.gr/data/11\\_31.pdf](http://www.bonair.gr/data/11_31.pdf)
- [12] Public [online] Available: <http://www.centioncorp.com/productdata12.pdf>
- [13] I.P. Koronaki, R.I. Christodoulaki V.D. Papaefthimiou, E.D. Rogdakis «performance analysis on the internally cooled dehumidifier using two liquid desiccant solutions» ASME ESDA, 2012
- [14] Chung TW, Ghosh TK. Comparison between Random and Structured Packings for Dehumidification of Air by Lithium Chloride Solutions in a Packed Column and Their Heat and Mass Transfer Correlations. Ind. Eng. Chem. Res.; 1996; 35 (1): 192-198.

- [15] Papaefthimiou VD. PhD thesis: Thermodynamic analysis of a LiBr-H<sub>2</sub>O absorption cooling system and cooling tower. National Technical University of Athens; 2004.
- [16] Papaefthimiou VD, Zannis TC, Rogdakis ED. Thermodynamic study of wet cooling tower performance. International Journal of Energy Research; 2006; 30: 411-426.
- [17] Conde MR. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design. International Journal of Thermal Sciences; 2004;43: 367-382.
- [18] McNeely AL. Thermodynamic properties of aqueous solution lithium bromide, ASHRAE Transactions; 1979; 85 (1): p. 413-434.
- [19] Rogdakis ED, Papaefthimiou VD, Karampinos DC. A realistic approach to model LiBr-H<sub>2</sub>O smooth falling film absorption on a vertical tube. Applied Thermal Engineering; 2003; 23: 2269–2283.
- [20] Gandhidasan P. Prediction of pressure drop in a packed bed dehumidifier operating with liquid desiccant. Applied Thermal Engineering; 2002; 22: p.
- [21] PTC - Parametric Technology Corporation, MathCad Engineering Calculation Software, version 14.0.0.163, 2007.
- [22] Public. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Ball\\_valve](http://en.wikipedia.org/wiki/Ball_valve)
- [23] Public. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Relief\\_valve](http://en.wikipedia.org/wiki/Relief_valve)
- [24] Public. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Relay>.
- [25] Public. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Reverse\\_osmosis](http://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_osmosis).