

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΙΑΚΩΝ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**
Πατρ. Γρηγορίου & Νεαπόλεως, 153 10 Αγ. Παρασκευή
Τηλ.: 210 6503815 Φαξ: 210 6544592
email : sollab@ipta.demokritos.gr

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ &
ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ



ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΔΟΧΕΙΟΥ Calpak-gse ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΑΝΤΙΠΡΟΗΣ

Ομάδα Εργασίας

Δρ. Σ. Μπαμπαλής : Υπεύθυνος Μετρήσεων

Δρ. Η. Παπανικολάου : Ερευνητής, Υπεύθυνος Διασφάλισης Ποιότητας Εργαστηρίου

Δρ. Β. Μπελεσιώτης : Ερευνητής, Προϊστάμενος Εργαστηρίου

Νοέμβριος 2015

Πίνακας ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟ ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ

3.1 Η υδραυλική εγκατάσταση δοκιμών

3.2 Σύστημα ελέγχου και καταγραφής

3.3 Εξοπλισμός μετρήσεων

2

3.3.1 Μέτρηση παροχής νερού

3.3.2 Μέτρηση θερμοκρασίας νερού

3.3.3 Μέτρηση πτώσης πίεσης νερού

4. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

4.1 Διαδικασία δοκιμών και επεξεργασία αποτελεσμάτων

4.2 Αποτελέσματα δοκιμών

4.2.1 Διερεύνηση της λειτουργίας του θερμοδοχείου ειδικού σχεδιασμού (Θ.Ε.Σ.) με διάφορες αρχικές θερμοκρασίες με συνδεδεμένη και αποσυνδεδεμένη την δεξαμενή, 5m³, ελεγχόμενης σταθερής θερμοκρασίας.

- 4.2.2 Διερεύνηση της λειτουργίας του Θ.Ε.Σ, με αρχική θερμοκρασία 65°C για διαφορετικές παροχές αποφόρτισης, με συνεχή ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα.
- 4.2.3 Διερεύνηση της λειτουργίας του Θ.Ε.Σ, με αρχική θερμοκρασία 65°C για διαφορετικές παροχές αποφόρτισης χωρίς ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα .
- 4.2.4 Διερεύνηση της λειτουργίας του Θ.Ε.Σ, με αρχική θερμοκρασία 70°C για διαφορετικές παροχές ανακυκλοφορίας στον εξωτερικό σωλήνα.
- 4.2.5 Πτώση πίεσης του εναλλάκτη σε διαφορετικές παροχές
- 4.3 Μελλοντικές ενέργειες - βελτιστοποίηση εναλλάκτη

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ Α-Δ: Αναλυτικά αποτελέσματα δοκιμών

- Α Λειτουργία του Θ.Ε.Σ με διάφορες αρχικές θερμοκρασίες.
- Β Λειτουργία του Θ.Ε.Σ με αρχική θερμοκρασία 65oC για διαφορετικές παροχές αποφόρτισης, με συνεχή ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα.
- Γ Λειτουργία του Θ.Ε.Σ, με αρχική θερμοκρασία 65oC για διαφορετικές παροχές αποφόρτισης χωρίς ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα .
- Δ Λειτουργία του Θ.Ε.Σ με αρχική θερμοκρασία 70oC για διαφορετικές παροχές ανακυκλοφορίας στον εξωτερικό σωλήνα.
-

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα έκθεση αφορά τις δοκιμές για την διερεύνηση των θερμοϋδραυλικών επιδόσεων σωληνοειδούς εναλλάκτη διπλού σωλήνα προσαρμοσμένου σε δεξαμενή «στατικού νερού» (Θ.Ε.Σ.), που διενεργήθηκε, για λογαριασμό των εταιρειών CALPAK και Global SolEnergy (gse), από το Εργαστήριο Ηλιακών & Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ”, στο πλαίσιο υλοποίησης σχετικής ερευνητικής δραστηριότητας μεταξύ των δύο φορέων.

Αρχικά παρουσιάζεται η διαμόρφωση του συστήματος και η μεθοδολογία αξιολόγησης που ακολουθήθηκε και η εγκατάσταση δοκιμών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η περιγραφή που ακολουθεί αφορά την δεξαμενή «στατικού νερού» (Θ.Ε.Σ.) με τον σωληνοειδή εναλλάκτη διπλού σωλήνα της Calpak-gse, όπως αυτή εγκαταστάθηκε από συνεργεία της ίδιας της εταιρείας στο Εργαστήριο Ηλιακών & Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

Η προς αξιολόγηση θερμική διάταξη ειδικού σχεδιασμού αποτελείται από κυλινδρικό δοχείο 1000lt κατακόρυφης διαμόρφωσης με εξωτερική μόνωση από αφρώδη πολυουρεθάνη και τελική δερμάτινη επένδυση, με ενσωματωμένο σπειροειδή εναλλάκτη. Στο Σχήμα 1 δίνεται το σχέδιο της δεξαμενής με τον ενσωματωμένο κατακόρυφο εναλλάκτη. Ο εναλλάκτης είναι κοχλιοειδούς μορφής με διάμετρο έλικας 400mm, αποτελούμενο από 20m ανοξείδωτο σωλήνα διατομής DN25, του οποίου το τελικό τμήμα σε μήκος 18m περιβάλλεται από ανοξείδωτο σωλήνα διατομής DN50 ανοικτό στο άκρο του εντός του δοχείου. Στο Σχήμα 2 φαίνεται παραστατικά το κατασκευαστικό σχέδιο και οι διαστάσεις της δεξαμενής

«στατικού νερού» (Θ.Ε.Σ.) καθώς και ο εσωτερικός εναλλάκτης με τις πραγματικές διαστάσεις τους. Στην *Φωτογραφία 1* φαίνεται η δεξαμενή δοκιμής και στην *Φωτογραφία 2* ο εναλλάκτης πριν από την τοποθέτησή του εντός του δοχείου.

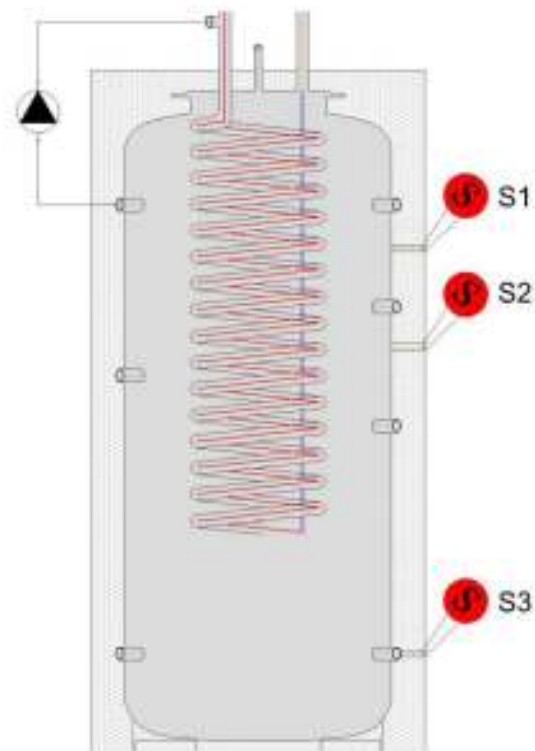
Το δοχείο είναι εξοπλισμένο με κύκλωμα ανακυκλοφορίας του θερμικού φορέα μέσω αντλίας νερού. Η ανακυκλοφορία του θερμικού φορέα πραγματοποιείται μέσω του εξωτερικού σωλήνα που περιβάλλει μέρος του εναλλάκτη.

Η θέρμανση του «στατικού νερού» πραγματοποιείται με κυκλοφορία θερμού νερού από εξωτερική δεξαμενή 5m³ το νερό της οποίας θερμαίνεται σε υψηλότερη από την επιθυμητή θερμοκρασία μέσω τεσσάρων ηλεκτρικών αντιστάσεων. Το νερό του υπό δοκιμή θερμοδοχείου (θερμικός φορέας) διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία κυκλοφορώντας νερό στην επιθυμητή θερμοκρασία μέσω τρίοδης μεικτικής βαλβίδας που ελέγχεται από ανεξάρτητο ελεγκτή.

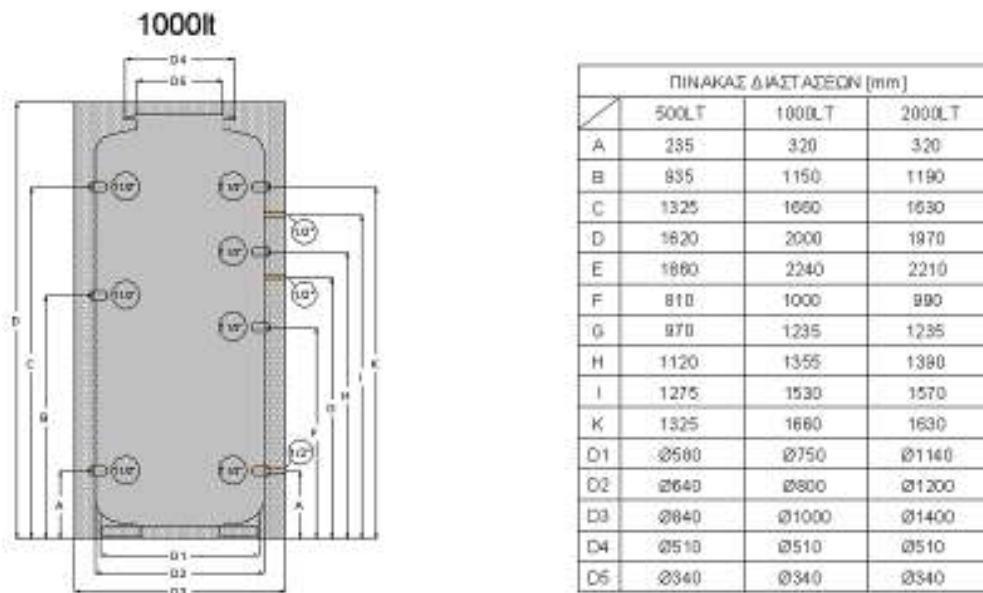
Το υδραυλικό κύκλωμα είναι εφοδιασμένο με κυκλοφορητή, ηλεκτρική αντίσταση για την θέρμανση του νερού κατά την διάρκεια των πειραμάτων και αισθητήρια μέτρησης θερμοκρασίας στην είσοδο και στην έξοδο. Εκτός από αυτά, για την ασφαλή εκτέλεση των σεναρίων, τοποθετήθηκαν βάνες διακοπής σε συγκεκριμένα σημεία στην είσοδο και έξοδο από τον εναλλάκτη και το δοχείο «στατικού νερού» (Θ.Ε.Σ.) .

Οι μετρήσεις που απαιτούνται για την αξιολόγηση των θερμο-υδραυλικών επιδόσεων αφορούν (α) την θερμοκρασία του νερού τόσο στην είσοδο και έξοδο του δοχείου «στατικού νερού» όσο και του εναλλάκτη, (β) την πίεση του νερού στην είσοδο και έξοδο του εναλλάκτη και (γ) την παροχή με την οποία απομαστεύεται νερό (αποφορτίζεται η δεξαμενή) μέσω του εναλλάκτη.

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο εξοπλισμός δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε από το Εργαστήριο.



Σχήμα 1: Δεξαμενή 1000lt και ενσωματωμένος εναλλάκτης



Σχήμα 2: Κατασκευαστικό σχέδιο δεξαμενής 1000lt



3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ

Η περιγραφή που ακολουθεί αφορά την εγκατάσταση δοκιμών, το σύστημα ελέγχου και καταγραφής καθώς και τον μετρητικό εξοπλισμό ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του εναλλάκτη θερμότητας με αντirroή της Calpak-gse. Η υδραυλική εγκατάσταση είναι εν μέρει ίδια με αυτήν που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές αξιολόγησης θερμικών επιδόσεων θερμοδοχείων στο Εργαστήριο Ηλιακών & Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

Ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου για την εκτέλεση των δοκιμών είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- *Υδραυλικό κύκλωμα* για την κυκλοφορία του νερού μέσω του δοχείου και του εναλλάκτη για την πραγματοποίηση των διαφόρων σεναρίων λειτουργίας.
- *Σύστημα συλλογής δεδομένων* και ελέγχου εγκατάστασης
- *Όργανα μετρήσεων* των διαφόρων θερμοδυναμικών μεγεθών

3.1 Η υδραυλική εγκατάσταση δοκιμών

Η εγκατάσταση δοκιμών είναι ένα κλειστό υδραυλικό κύκλωμα μέσω του οποίου κυκλοφορεί νερό και στο οποίο παρεμβάλλεται το υπό δοκιμή σύστημα. Η γενική λειτουργία του κυκλώματος είναι η ακόλουθη:

Η θέρμανση του «στατικού νερού» του δοχείου (Θ.Ε.Σ.) γίνεται χρησιμοποιώντας την δεξαμενή 5 m³ το νερό της οποίας θερμαίνεται από τέσσερις ηλεκτρικές αντιστάσεις των 9kW έκαστη. Η δεξαμενή αυτή είναι εφοδιασμένη με δοχείο διαστολής και τα κατάλληλα εξαρτήματα για την ασφαλή λειτουργία, την πλήρωση και το άδειασμα αυτής. Η θερμοκρασία του «στατικού νερού» του δοχείου δοκιμής διατηρείται σταθερή στην επιθυμητή θερμοκρασία μέσω μιας μεικτικής βαλβίδας που ελέγχεται από ανεξάρτητο ελεγκτή. Στο Σχήμα 3 δίνεται το υδραυλικό διάγραμμα του

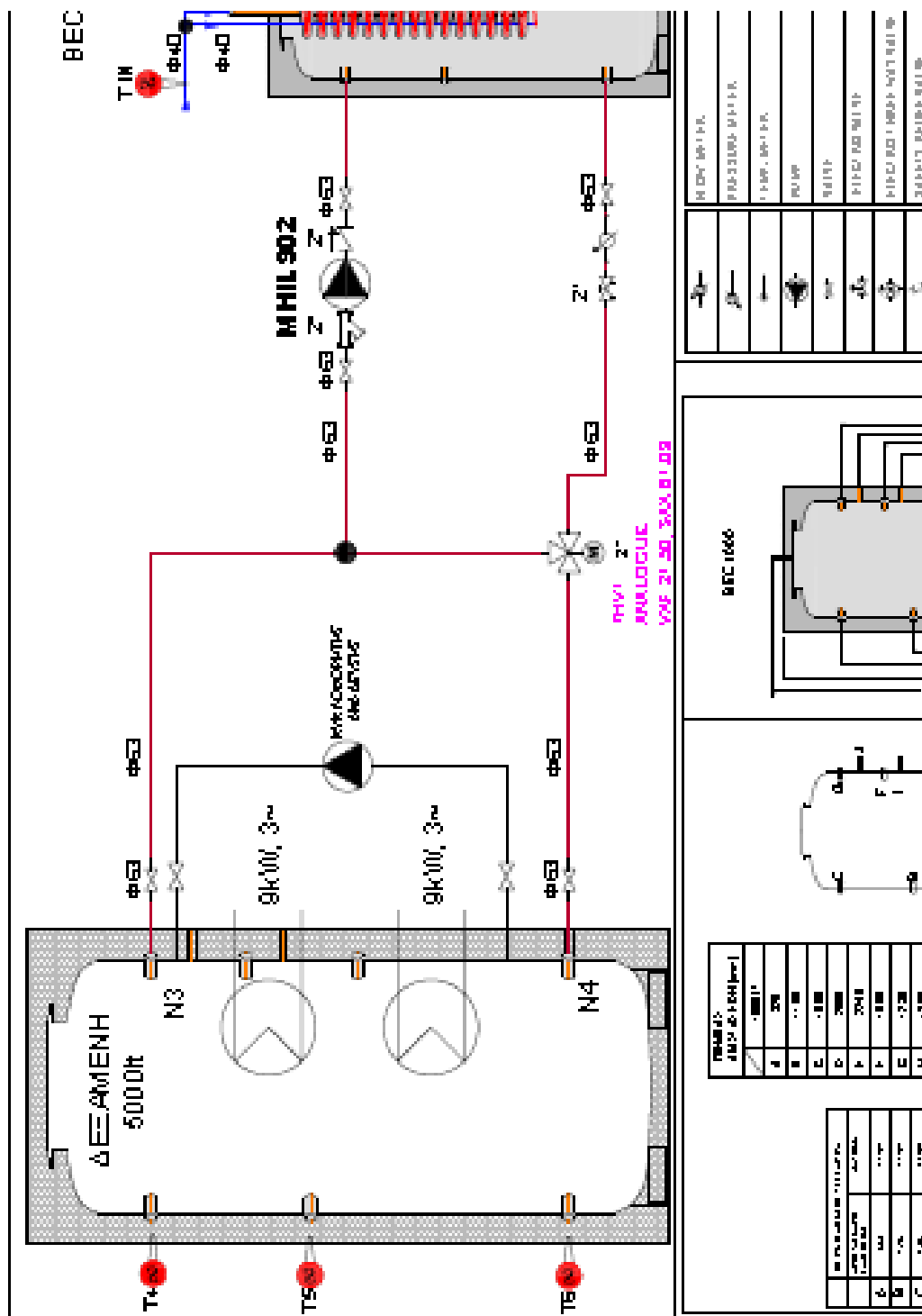
κυκλώματος ελέγχου της θερμοκρασίας του «στατικού νερού» στο δοχείο δοκιμής (Θ.Ε.Σ.) .

Η απομάστευση του νερού χρήσης (αποφόρτιση μέσω του εναλλάκτη), πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές διατάξεις τροφοδοσίας. Για τις χαμηλές παροχές χρησιμοποιήθηκε νερό, προετοιμασμένο στην επιθυμητή θερμοκρασία, από δύο μονωμένες θερμικά οριζόντιες δεξαμενές 0,460 m³. Το νερό διακινείται με φυγοκεντρικές αντλίες, ενεργοποιώντας τρίοδες πνευματικές βάνες, και διέρχεται μέσω του εναλλάκτη του δοχείου δοκιμής επιστρέφοντας στην δεξαμενή συλλογής 1 m³. Το υδραυλικό κύκλωμα για την κυκλοφορία του νερού, μαζί με τα απαραίτητα εξαρτήματα (ανεπίστροφες βαλβίδες, ροόμετρο, ρυθμιστική βάνα, φίλτρο νερού), φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.

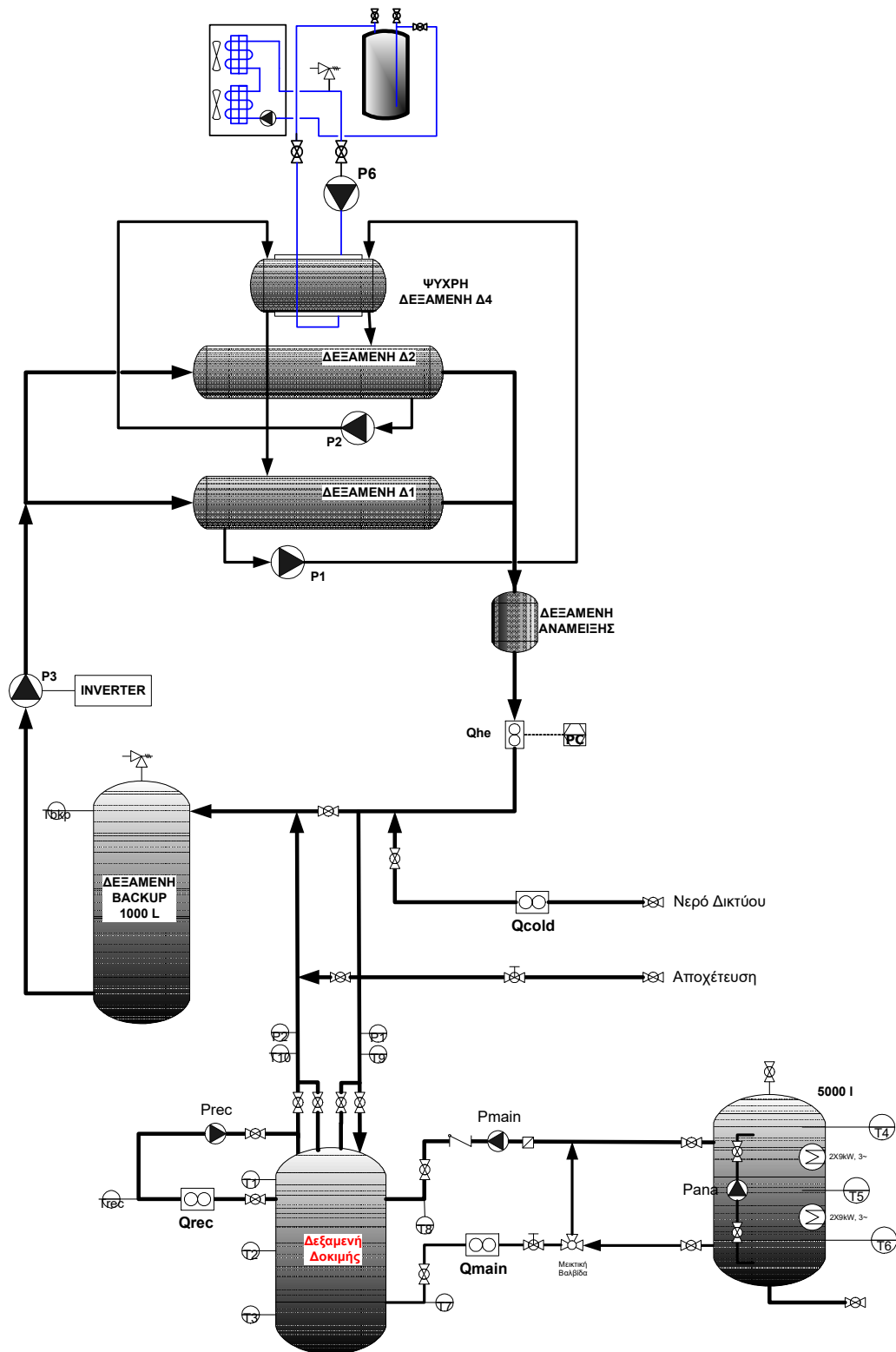
Σε σενάρια δοκιμών με υψηλότερη παροχή για την λειτουργία της αποφόρτισης μέσω του εναλλάκτη χρησιμοποιήθηκε απ' ευθείας το δίκτυο κρύου νερού του Εργαστηρίου με παροχέτευση του νερού απομάστευσης στην αποχέτευση όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.

9

Οι θερμοκρασίες του νερού εντός και των δεξαμενών ελέγχονται και καταγράφονται σε τρία σημεία καθ' ύψος. Το νερό και των δύο δοχείων ανακυκλοφορεί συνεχώς μέσω ενσωματωμένων εξωτερικά αντλιών ανακυκλοφορίας με αποτέλεσμα να διατηρείται σταθερή και ομοιόμορφη καθ' ύψος η θερμοκρασία του νερού .



Σχήμα 3. Υδραυλικό διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου θερμοκρασίας «στατικού νερού» στο δοχείο δοκιμής (Θ.Ε.Σ.)



Σχήμα 4. Υδραυλικό διάγραμμα εγκατάστασης δοκιμών

3.2 Σύστημα ελέγχου και καταγραφής

Το σύστημα αυτό επιτρέπει την αυτοματοποίηση των διαδικασιών συλλογής των πειραματικών δεδομένων της εγκατάστασης δοκιμών, αφού σε αυτό συνδέονται όλα τα αισθητήρια της εγκατάστασης, συνεπώς συλλέγονται οι ενδείξεις των αισθητήρων και καταγράφονται σε αρχεία οι αντίστοιχες τιμές των αισθητηρίων

Το hardware του συστήματος διεξαγωγής μετρήσεων αποτελείται από τα εξής:

- Σύστημα Ηλεκτρονικού Υπολογιστή
- Συσκευή Συλλογής Δεδομένων (Data Aquisition Unit)
- Αισθητήρια και Μορφοτροπείς (Sensors and Transducers)
- Ελεγχόμενα πνευματικά και υδραυλικά εξαρτήματα και συσκευές.

Η Συσκευή Συλλογής Δεδομένων αποτελείται από την μονάδα τύπου 34970A της AGILENT. Η συσκευή συλλογής δεδομένων μπορεί να ελέγξει έναν αριθμό καρτών αναλογικών εισόδων και εξόδων. Στα κανάλια εισόδου οδηγούνται τα αναλογικά μεγέθη που προέρχονται από τα αισθητήρια και τους μορφοτροπείς.

12

Το λογισμικό έχει αναπτυχθεί με βάση το προγραμματιστικό περιβάλλον VEE (Visual Engineering Environment) της Hewlett-Packard. Κύρια χαρακτηριστικά του είναι ότι παρέχει την δυνατότητα προγραμματισμού των λειτουργιών και των σταδίων του πειράματος με δυνατότητα ταυτόχρονης πραγματοποίησης διαφόρων δοκιμών ενώ παρέχει σε γραφική μορφή την παράσταση του κυκλώματος, άρα και τον άμεσο έλεγχο των σταδίων των δοκιμών. Επιπλέον το software δίνει την δυνατότητα παραμετρικού προσδιορισμού των διαφόρων μερών των σεναρίων δοκιμών, αλλά και των ιδίων των δοκιμών (τι γίνεται, πότε γίνεται και τι μετράται).

Τα μετρηθέντα μεγέθη καταχωρούνται σε αρχεία σε μορφή ASCII, για περαιτέρω επεξεργασία από άλλα προγράμματα.

3.3 Εξοπλισμός μετρήσεων και ελέγχου

Ο εξοπλισμός μετρήσεων περιλαμβάνει αισθητήρια μέτρησης παροχής, θερμοκρασίας και πίεσης του νερού.

3.3.1 Μέτρηση παροχής νερού

Για την μέτρηση της παροχής του νερού χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνητικά ροόμετρα της YOKOGAWA τύπου ADMAG. Έχουν τροφοδοσία 220 VAC με καθοριζόμενο κατά περίπτωση εύρος μέτρησης και έξοδο 4 – 20 mA με τυπική αβεβαιότητα $\pm 0.3\%$ της τιμής της μέτρησης. Η έξοδος του ροομέτρου συνδέεται απευθείας με τις κάρτες του συστήματος συλλογής δεδομένων στις θέσεις καταγραφής έντασης ηλεκτρικού ρεύματος.



3.3.2 Μέτρηση θερμοκρασίας νερού

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας υγρού χρησιμοποιούνται αισθητήρια θερμοκρασίας τύπου Pt100 τεσσάρων συρμάτων. Για την ακρίβεια και σταθερότητα της μέτρησης, το κάθε αισθητήριο βρίσκεται εντός ειδικής μονωμένης διάταξης, η οποία εξασφαλίζει αφενός μεν την καλή ανάμειξη του νερού πριν την μέτρηση της θερμοκρασίας, αφετέρου δε την τοποθέτηση της κεφαλής των αισθητήρων αντίθετα με την ροή του ρευστού είτε στην είσοδο είτε στην έξοδο αυτού.

Η εγκατάσταση διαθέτει τέτοια αισθητήρια στην είσοδο και στην έξοδο του εναλλάκτη, στην είσοδο και την έξοδο νερού της δεξαμενής δοκιμής, σε τρία σημεία καθ' ύψος των δύο δεξαμενών (δοκιμής και θέρμανσης), στην θερμοκρασία νερού αντιστροφής και στο επάνω μέρος της δεξαμενής επιστροφής.

Η έξοδος των αισθητήριων είναι σε Ohm και μετατρέπεται σε °C με κατάλληλους συντελεστές διακρίβωσης και συνδέεται απευθείας με τις

κάρτες του συστήματος συλλογής δεδομένων στις θέσεις καταγραφής ωμικής αντίστασης τεσσάρων συρμάτων.

3.3.2 Μέτρηση πίεσης νερού

Για τη μέτρηση της πίεσης νερού στην είσοδο και έξοδο του εναλλάκτη χρησιμοποιούνται αισθητήρια πίεσης QBE2002-P5 της SIEMENS με εύρος 0 ÷ 5 bar και έξοδο 0 ÷ 10 VDC.

Η έξοδος των μανομέτρων συνδέεται απευθείας με τις κάρτες του συστήματος συλλογής δεδομένων στις θέσεις καταγραφής ηλεκτρικής τάσης.



4. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Διαδικασία δοκιμών και επεξεργασία αποτελεσμάτων

Η διαδικασία δοκιμών καθορίστηκε έτσι ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος δοχείο - εναλλάκτης, μεταβάλλοντας τις τιμές των βασικών θερμο-υδραυλικών μεγεθών του κυκλώματος τροφοδοσίας και κατανάλωσης (θερμοκρασία, παροχή), μέσα στα πλαίσια του εύρους λειτουργίας. Τα θερμοδυναμικά μεγέθη που υπεισέρχονται στην διερεύνηση αφορούν την επίδραση της θερμοκρασίας του «στατικού νερού» της δεξαμενής και της παροχής νερού στον εναλλάκτη κατά την απομάστευση με κρύο νερό θερμοκρασίας περίπου 20 °C.

15

Σε κάθε συγκεκριμένο σενάριο καταγράφονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- $T1, T2, T3$ θερμοκρασίες καθ' ύψος του νερού της δεξαμενής δοκιμής, σε [°C] (βλ. Σχ. 3).
 - $T4, T5, T6$ θερμοκρασίες καθ' ύψος του νερού της δεξαμενής 5 m³, σε [°C] (βλ. Σχ. 4).
 - $T7, T8$ θερμοκρασίες νερού στην είσοδο και στην έξοδο της δεξαμενής δοκιμής, σε [°C] (βλ. Σχ. 4).
 - $T9, T10$ θερμοκρασίες νερού απομάστευσης, στην είσοδο και στην έξοδο του εναλλάκτη θερμότητας, σε [°C] (βλ. Σχ. 4).
 - $P1, P2$ πίεση νερού στη είσοδο και έξοδο του εναλλάκτη αντίστοιχα, σε [bar].
 - $Q_{rec}, Q_{main}, Q_{he}$ παροχές νερού στην ανακυκλοφορία δεξαμενής δοκιμής, παροχή από την δεξαμενή 5m³ στην δεξαμενή δοκιμής και παροχή τροφοδοσίας εναλλάκτη, σε [l/h].
 - T_{rec}, T_{bkr} θερμοκρασίες νερού ανακυκλοφορίας στο δοχείο δοκιμής και θερμοκρασία νερού στο επάνω μέρος του δοχείου backup 1000l της εγκατάστασης, σε [°C].
 - T_{cold} θερμοκρασία νερού όταν τροφοδοτούμε τον εναλλάκτη από το δίκτυο του Εργαστηρίου, σε [°C].
-

- Q_{cold} παροχή νερού όταν τροφοδοτούμε από το δίκτυο του Εργαστηρίου, σε [l/h].

Για την διερεύνηση των επιδόσεων ακολουθήθηκαν τα ακόλουθα σενάρια:

Η δεξαμενή ($\theta.E.\Sigma.$) φορτίζεται για κάθε δοκιμή σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία που έχει επιλεγεί από το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας του συστήματος (50, 60, 70 °C). Για την θέρμανση χρησιμοποιείται η αντλία κυκλοφορίας και η δεξαμενή των 5 m³ η οποία θερμαίνεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις σε υψηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή της δοκιμής. Η θερμοκρασία του «στατικού νερού» καθίσταται ομοιόμορφη με την συνεχή λειτουργία και την ανακυκλοφορία μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη.

Το δοχείο στην συνέχεια αποφορτίζεται μέσω του εναλλάκτη, χρησιμοποιώντας το κύκλωμα απομάστευσης της εγκατάστασης δοκιμών του Εργαστηρίου, τροφοδοτώντας τον εναλλάκτη με νερό σταθερής θερμοκρασίας T_{cold} περίπου 20 °C και με παροχή που αρχικά επελέγη έτσι ώστε η πτώση πίεσης να είναι περίπου 0.7 bar (παροχή που στην πράξη θεωρείται, από τον κατασκευαστή, ως η βέλτιστη). Η παροχή αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην διερεύνηση ήταν περίπου 1500 lt/h. Σε κάποια από τα σενάρια δοκιμών για την λειτουργία της αποφόρτισης σε υψηλές παροχές χρησιμοποιήθηκε απ' ευθείας το δίκτυο κρύου νερού του Εργαστηρίου με παροχέτευση του νερού απομάστευσης στην αποχέτευση.

Κατά την διάρκεια της δοκιμής η δεξαμενή ($\theta.E.\Sigma.$) απομονώνεται από την δεξαμενή θέρμανσης ενώ διατηρείται σταθερή η ανακυκλοφορία από τον εξωτερικό σωλήνα του εναλλάκτη. Από την διαμόρφωση της πειραματικής διάταξης που εικονίζεται στα *Σχήματα 3 και 4* γίνεται αντιληπτό ότι ο εναλλάκτης διπλού σωλήνα λειτουργεί για όλες τις περιπτώσεις των δοκιμών ως εναλλάκτης αντιροής, με ανοδική ροή στον εσωτερικό σωλήνα (κρύο νερό απομάστευσης) και καθοδική στο διάκενο μεταξύ των σωλήνων (ανακυκλοφορία στατικού νερού).

Για τον προσδιορισμό της ισχύος του εναλλάκτη σε διαφορετικές παροχές νερού μέσω του εναλλάκτη ακολουθήθηκαν σενάρια βασισμένα στο Πρότυπο ISO 12897:2006 [4] ως ακολούθως :

Η δεξαμενή φορτίζεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία που επελέγη (Τστατ=65°C), χρησιμοποιώντας για την θέρμανση την αντλία κυκλοφορίας και την δεξαμενή 5 m³, το νερό της οποίας θερμαίνεται προηγουμένως. Η θερμοκρασία του «στατικού νερού» καθίσταται ομοιόμορφη με την συνεχή λειτουργία και την ανακυκλοφορία μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη.

Το δοχείο στην συνέχεια αποφορτίζεται μέσω του εναλλάκτη, χρησιμοποιώντας το κύκλωμα απομάστευσης, τροφοδοτώντας τον εναλλάκτη με νερό σταθερής θερμοκρασίας Tcold≈20 °C και με τιμές της παροχής που να καλύπτουν όλο το εύρος της λειτουργίας του εναλλάκτη. Η παροχή αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην διερεύνηση κυμάνθηκε από 500 lt/h έως 3000 lt/h με βήματα των 500 lt/h.

Κατά την διάρκεια της δοκιμής, η δεξαμενή δοκιμής απομονώνεται από την δεξαμενή θέρμανσης ενώ διατηρείται σταθερή η ανακυκλοφορία από τον εξωτερικό σωλήνα του εναλλάκτη.

Στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων ακολουθήθηκαν οι σχέσεις που αναπτύσσονται στις επόμενες παραγράφους.

Η **ισχύς του εναλλάκτη** ορίζεται ως ο λόγος της *ωφέλιμης ενέργειας* που αποκτά το μέσο μεταφοράς θερμότητας (ρευστό που διέρχεται από τον εναλλάκτη) προς τον *χρόνο* εντός του οποίου διεξήχθη το φαινόμενο.

$$P = \hat{Q} / t \quad (1)$$

Η *ωφέλιμη ενέργεια* που προσδίδεται στο μέσο μεταφοράς θερμότητας δίδεται από την σχέση:

$$\hat{Q} = \dot{m} C_p (T_{he,out} - T_{he,in}) \quad (2)$$

όπου:

$\dot{m}$ [kg/s], η παροχή μάζας του εναλλάκτη

C_p [J/kgK], η θερμοχωρητικότητα του μέσου μεταφοράς θερμότητας και

$T_{he,out} [^{\circ}\text{C}]$, $T_{he,in} [^{\circ}\text{C}]$, οι θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου του μέσου μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη αντίστοιχα

Η **αποδοτικότητα (effectiveness) του εναλλάκτη** [1] ορίζεται ως ο λόγος της *ωφέλιμης ενέργειας* που αποκτά το μέσο μεταφοράς θερμότητας (ρευστό που διέρχεται από τον εναλλάκτη) κατά τον χρόνο εντός του οποίου διεξήχθη το φαινόμενο της απομάστευσης, προς την μέγιστη δυνατή *προσδιδόμενη ενέργεια* από το στατικό νερό του δοχείου.

$$\varepsilon = \hat{Q} / Q_{\max} \quad (0 \leq \varepsilon \leq 1) \quad (3)$$

Η *ωφέλιμη ενέργεια* $\hat{Q}$ που προσδίδεται στο μέσο μεταφοράς θερμότητας δίνεται από την σχέση (2) ενώ η *προσδιδόμενη ενέργεια* $Q_{\max}$ από την σχέση

$$Q_{\max} = \dot{m} C_p (T_{s,u} - T_{he,in}) \quad (4)$$

όπου:

18

$\dot{m}$ [kg/s], η παροχή μάζας του εναλλάκτη

C_p [J/kgK], η θερμοχωρητικότητα του μέσου μεταφοράς θερμότητας και

$T_{s,u}$ [$^{\circ}\text{C}$] η θερμοκρασία του επάνω στρώματος του στατικού νερού εντός του δοχείου (ίση με τη θερμοκρασία εισόδου του νερού ανακυκλοφορίας στον εναλλάκτη).

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2), (3) και (4), η αποδοτικότητα του εναλλάκτη μπορεί να υπολογιστεί ως :

$$\varepsilon = \frac{(T_{he,out} - T_{he,in})}{(T_{s,u} - T_{he,in})} \quad (5)$$

Στην περίπτωση μας δεν έχουμε καταμετρημένη την θερμοκρασία στην είσοδο του νερού ανακυκλοφορίας του εναλλάκτη και συνεπώς χρησιμοποιήθηκε στην θέση της $T_{s,u}$ η μέση θερμοκρασία του δοχείου

εφόσον οι τιμές των θερμοκρασιών καθ' ύψος ταυτίζονται στην περίπτωση της ανακυκλοφορίας.

Μια άλλη παράμετρος που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των εναλλακτών θερμότητας είναι ο **Αριθμός Μονάδων Μεταφοράς NTU (Number of Transfer Units)** του εναλλάκτη και ορίζεται από την σχέση [1]:

$$NTU = \frac{US}{C_{\min}} \quad (6)$$

όπου :

U [W/m²K], ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

S [m²], η ολική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας

$C_{\min}$, η μικρότερη από τις θερμοχωρητικότητες ($\dot{m}c_p$) των δύο ρευμάτων του εναλλάκτη (στην προκειμένη περίπτωση αντιστοιχεί στο κρύο νερό της απομάστευσης)

Ο αριθμός NTU είναι μέτρο του μεγέθους του εναλλάκτη και δίνεται από την σχέση ,

$$NTU = -\frac{1}{1-C^*} \ln\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon C^*-1}\right) \quad (7)$$

όπου C^* ο λόγος των θερμοχωρητικοτήτων $C_{\min}/C_{\max}$ των δύο ρευμάτων.

Στην περίπτωση που ο λόγος των θερμοχωρητικοτήτων C^* των δύο ρευμάτων είναι αρκετά μικρός, προκύπτει η συσχέτισή του με την αποδοτικότητα ε μέσω της σχέσης :

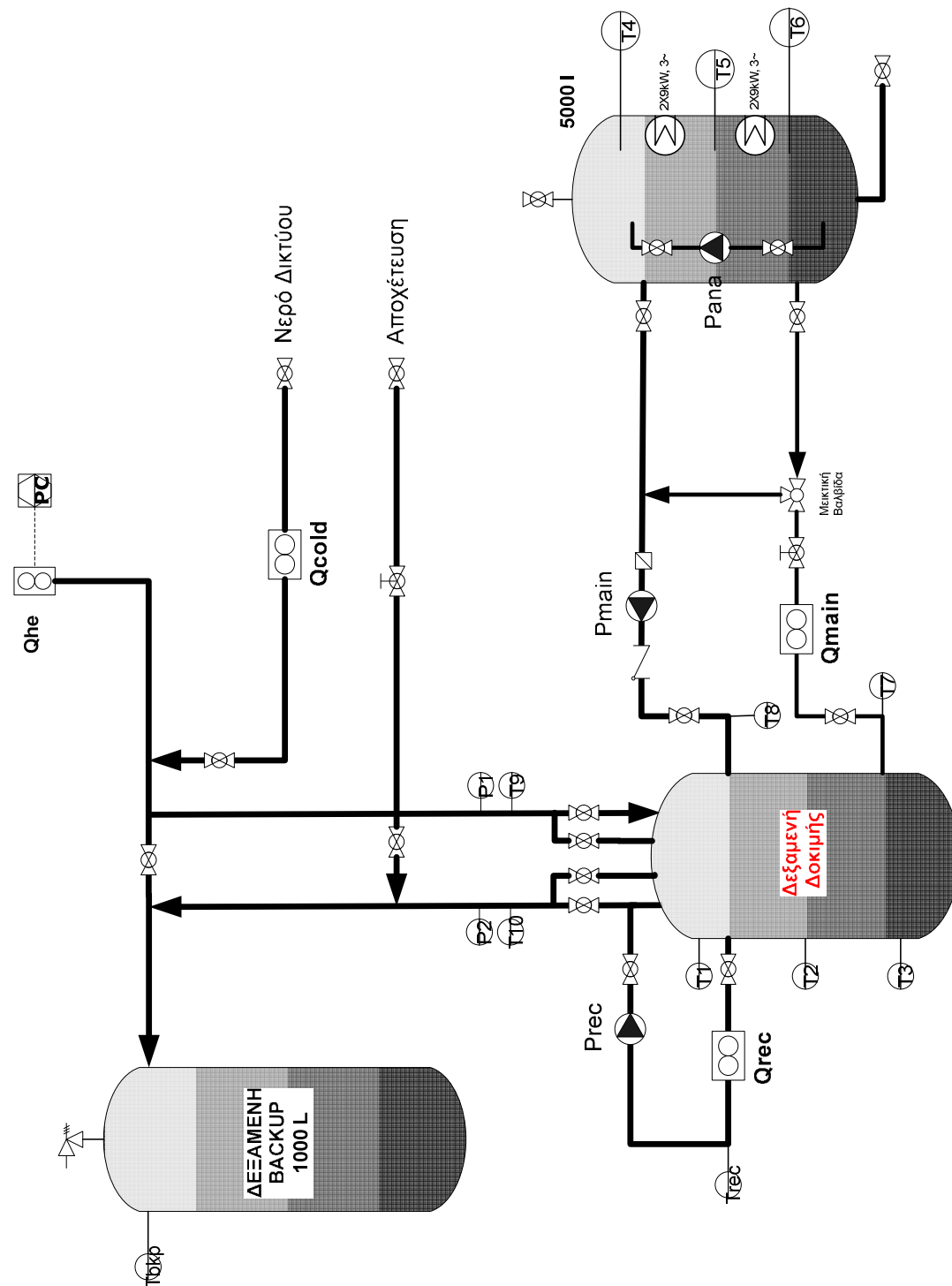
$$NTU = -\ln(1-\varepsilon_m) \quad (8)$$

Για την διερεύνηση της επίδρασης της ανακυκλοφορίας μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη ακολουθήθηκαν δύο σενάρια. Πρώτα ακολουθήθηκε το προηγούμενο σενάριο με στατικό νερό θερμοκρασίας

Τστατ=65°C, μεταβάλλοντας την παροχή κρύου νερού μέσω του εναλλάκτη αλλά χωρίς την χρήση της ανακυκλοφορίας (η βάννα ανακυκλοφορίας παρέμεινε ανοικτή). Στην συνέχεια ακολουθήθηκε το προηγούμενο σενάριο με Τστατ=65°C και παροχή απομάστευσης κρύου νερού στον εναλλάκτη ~1500l/h αλλά μεταβάλλοντας την παροχή της ανακυκλοφορίας μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη.

Για τον προσδιορισμό της πτώσης πίεσης στον εναλλάκτη έγινε καταγραφή της πίεσης στην είσοδο και την έξοδο του εναλλάκτη για τις διάφορες παροχές έως 3300 l/h. Τα μεγέθη τα οποία καταγράφονται εκτός από την παροχή, σε [l/h], και την πτώση πίεσης, σε [bar], είναι οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος και κρύου νερού εισόδου και θερμού νερού εξόδου από τον εναλλάκτη, σε [°C].

Στο επόμενο Σχήμα 5 φαίνονται παραστατικά οι θέσεις των διαφόρων οργάνων και η ονομασία τους



Σχήμα 5. Θέση και ονομασία οργάνων στην εγκατάστασης δοκιμών

4.2 Αποτελέσματα δοκιμών

4.2.1 Διερεύνηση της λειτουργίας της δεξαμενής (Θ.Ε.Σ.) με διάφορες αρχικές θερμοκρασίες, με συνδεδεμένη και αποσυνδεδεμένη την δεξαμενή 5m³.

Αρχικά έγινε διερεύνηση της λειτουργίας της δεξαμενής στην αποφόρτιση μέσω του εναλλάκτη χωρίς την χρήση της δεξαμενής 5m³, έχοντας σαν εκκίνηση την αρχική θερμοκρασία του νερού στο εσωτερικό της δεξαμενής ομοιόμορφα κατανεμημένη και σταθερή Τστατ=50°C, 60°C, 70°C. Η δεξαμενή δοκιμής θερμαίνεται, με την χρήση της δεξαμενής 5m³, έως την επιθυμητή θερμοκρασία και ομογενοποιείται. Στην συνέχεια ο εναλλάκτης τροφοδοτείται με νερό θερμοκρασίας 20 °C από το δίκτυο έως ότου η θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη να φθάσει τους 40 °C που θεωρείται η ελάχιστη χρήσιμη θερμοκρασία. Καθ' όλη την διάρκεια της αποφόρτισης συνεχιζόταν η λειτουργία της ανακυκλοφορίας μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη.

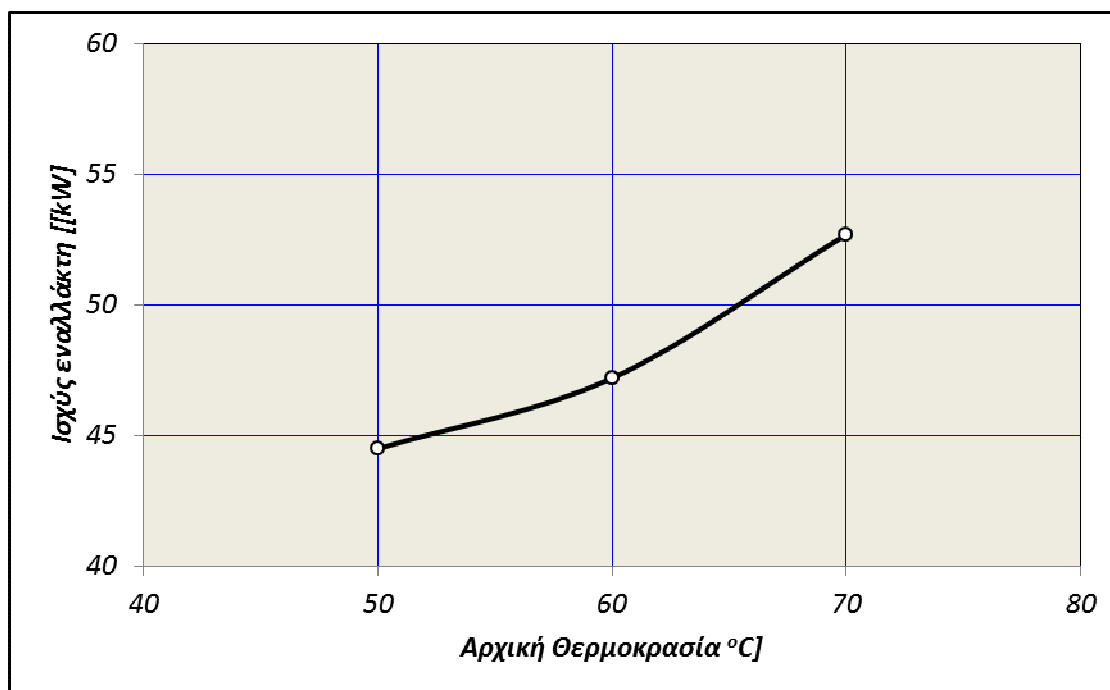
Σε επόμενο στάδιο έγινε διερεύνηση της λειτουργίας της δεξαμενής στην αποφόρτιση μέσω του εναλλάκτη με την χρήση της δεξαμενής 5m³, έχοντας σαν εκκίνηση την αρχική θερμοκρασία του νερού στο εσωτερικό της δεξαμενής δοκιμής και της δεξαμενής 5m³ ομοιόμορφα κατανεμημένη και σταθερή T= 70°C ενώ καθ' όλη την διάρκεια της αποφόρτισης συνεχιζόταν η λειτουργία της ανακυκλοφορίας μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη και η ανακυκλοφορία του νερού μεταξύ των δύο δεξαμενών.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι κατά την διάρκεια της λειτουργίας αποφόρτισης της δεξαμενής με σταθερή παροχή και για αρχική θερμοκρασία του νερού δεξαμενής T=70°C αλλά με σταθερή φόρτιση από την δεξαμενή 5m³, η υπό δοκιμή δεξαμενή παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με το σενάριο λειτουργίας με την δεξαμενή 5m³ αποσυνδεδεμένη. Ο κατά πολύ μεγαλύτερος χρόνος αποφόρτισης της δεξαμενής οφείλεται πρακτικά στον κατά πολύ μεγαλύτερο όγκο νερού που υπάρχει διαθέσιμος, δηλαδή 6m³ και άρα στην πολύ μεγαλύτερη αδράνεια του όγκου του ζεστού νερού. Όπως ανεμένετο η ισχύς του εναλλάκτη ταυτίζεται με αυτήν της περίπτωσης χωρίς τροφοδότηση.

Τα αποτελέσματα του σεναρίου μετρήσεων δίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 1 και σε διαγραμματική μορφή στο Σχήμα 6. Αναλυτικότερα αποτελέσματα και διαγράμματα ανά περίπτωση παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Πίνακας 1.

Λειτουργία	Μέση αρχική θερμοκρασία δεξαμενής [°C]	Παροχή εναλλάκτη [lt/h]	Χρόνος αποφόρτισης [min]	Ισχύς εναλλάκτη [kW]	Όγκος απομάστευσης [lt]
απομονωμένη	50	1451.2	13	44.5	313.6
απομονωμένη	60	1452.1	24	47.2	580.5
απομονωμένη	70	1412.4	34.8	52.7	819.6
συνδεδεμένη	70	1408.6	228.8	52.8	5372.3



Σχήμα 6.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι κατά την διάρκεια της λειτουργίας αποφόρτισης της δεξαμενής με σταθερή παροχή και για διάφορες αρχικές θερμοκρασίες του νερού δεξαμενής (50°C, 60°C, 70°C), η μέση θερμοκρασία της δεξαμενής και η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον εναλλάκτη πρακτικά ταυτίζονται (βλ. Παράρτημα Α) και επιπλέον η θερμοκρασία του νερού εντός της δεξαμενής διατηρεί μία αξιοσημείωτη ομοιομορφία στην κατανομή καθ' ύψος η οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ανακυκλοφορία μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη.

4.2.2 Διερεύνηση της λειτουργίας της δεξαμενής(Θ.Ε.Σ.), με αρχική θερμοκρασία 65°C για διαφορετικές παροχές αποφόρτισης, με συνεχή ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα.

Διερεύνηση της λειτουργίας της δεξαμενής στην αποφόρτιση μέσω του εναλλάκτη χωρίς την χρήση της δεξαμενής 5m³, έχοντας σαν εκκίνηση την αρχική θερμοκρασία του νερού στο εσωτερικό της δεξαμενής Τστατ= 65°C ομοιόμορφα κατανεμημένη και σταθερή **με ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα του εναλλάκτη.**

24

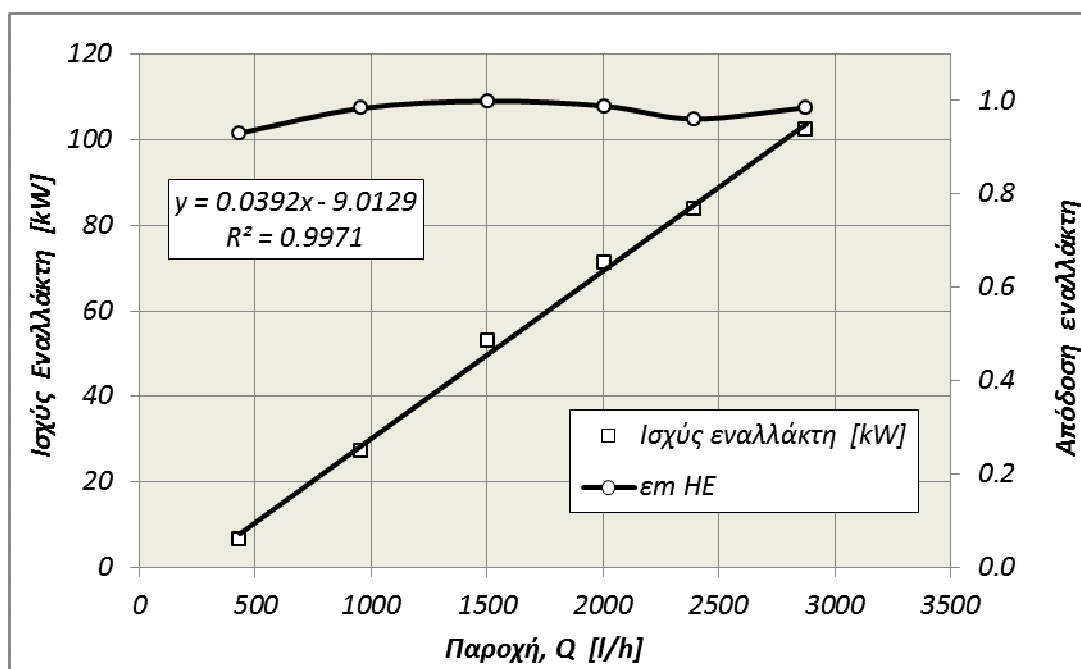
Η δεξαμενή δοκιμής θερμαίνεται, με την χρήση της δεξαμενής 5m³, έως την επιθυμητή θερμοκρασία και ομογενοποιείται. Στην συνέχεια ο εναλλάκτης τροφοδοτείται με νερό θερμοκρασίας 20 °C από το δίκτυο έως ότου η θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη να φθάσει τους 40 °C που θεωρείται η ελάχιστη χρήσιμη θερμοκρασία. Καθ' όλη την διάρκεια της αποφόρτισης συνεχιζόταν η λειτουργία της ανακυκλοφορίας μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη.

Τα αποτελέσματα του σεναρίου μετρήσεων δίνονται στον Πίνακα 2 και σε διαγραμματική μορφή στο Σχήμα 7. Αναλυτικότερα αποτελέσματα και διαγράμματα ανά περίπτωση παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Πίνακας 2.

Παροχή εναλλάκτη [lt/h]	Χρόνος αποφόρτισης [min]	Ισχύς εναλλάκτη [kW]	εμ HE	NTU	Όγκος απομάστευσης [lt]
432.7	95.8	6.6	0.93	2.67	249.83
955.1	46.5	27.4	0.98	4.12	553.87
1503.3	30.3	53.1	1.00	7.16	760.36
2006.2	22.5	71.3	0.99	4.48	753.78
2395.5	18.2	83.8	0.96	3.24	726.63
2876.9	15.3	102.4	0.99	4.24	737.03

25



Σχήμα 7.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι κατά την διάρκεια της λειτουργίας αποφόρτισης της δεξαμενής με σταθερή αρχική θερμοκρασία του νερού δεξαμενής 65°C για διάφορες παροχές απομάστευσης με την χρήση ανακυκλοφορίας από τον εξωτερικό σωλήνα του εναλλάκτη, η μέση θερμοκρασία της δεξαμενής και η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον εναλλάκτη πρακτικά ταυτίζονται και επιπλέον η θερμοκρασία του νερού εντός της δεξαμενής διατηρεί μία αξιοσημείωτη ομοιομορφία στην κατανομή καθ' ύψος καθ' όλη την διάρκεια της απομάστευσης, η οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ανακυκλοφορία μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη.

Στο Σχήμα 7 δίνεται το διάγραμμα της ισχύος του εναλλάκτη συναρτήσει της παροχής απομάστευσης με σταθερή αρχική θερμοκρασία καθώς και η μεταξύ τους σχέση η οποία είναι γραμμική. Επιπλέον, η αποδοτικότητα ε του εναλλάκτη (μέση τιμή) εμφανίζεται ιδιαίτερα υψηλή, προσεγγίζοντας την τιμή 1 για κάποιες τιμές της παροχής.

Σημ.: Η χρήση του $T_{s,u}$ στον παρονομαστή της σχέσης (5) μπορεί να δώσει τιμές μεγαλύτερες του 1 καθώς η θερμοκρασία εξόδου του εναλλάκτη μετρίεται σε υψηλότερη θέση από ότι το τελευταίο σημείο του στατικού νερού.

4.2.3 Διερεύνηση της λειτουργίας της δεξαμενής(Θ.Ε.Σ.), με αρχική θερμοκρασία 65°C για διαφορετικές παροχές αποφόρτισης χωρίς ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα.

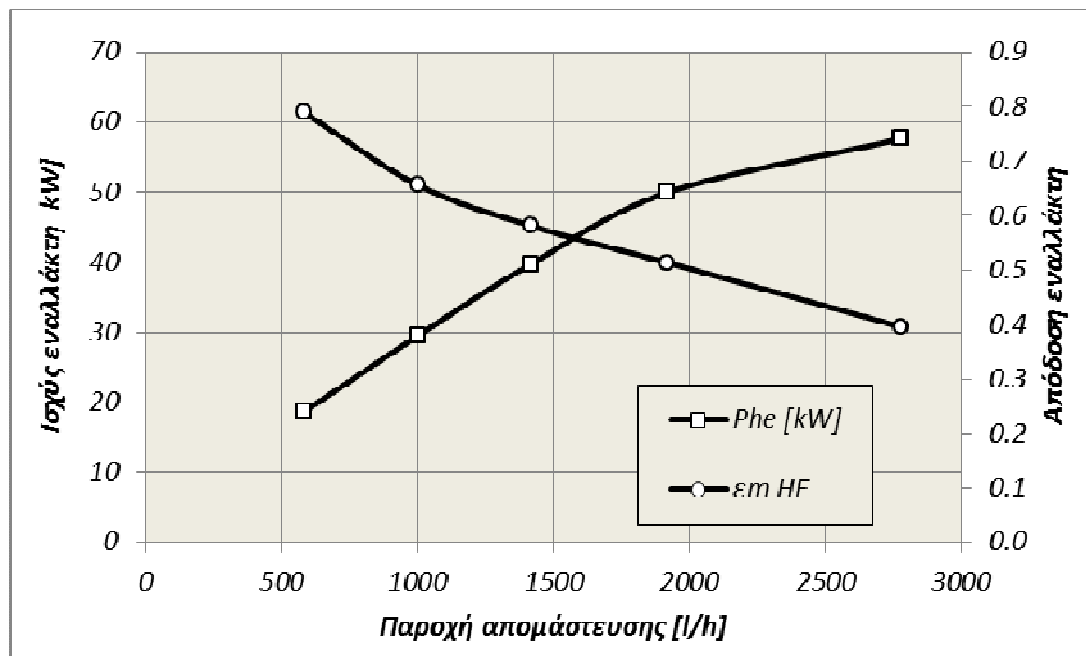
Διερεύνηση της λειτουργίας της δεξαμενής στην αποφόρτιση μέσω του εναλλάκτη χωρίς την χρήση της δεξαμενής 5m³, έχοντας σαν εκκίνηση την αρχική θερμοκρασία του νερού στο εσωτερικό της δεξαμενής $T_{στατ}= 65^{\circ}\text{C}$ ομοιόμορφα κατανεμημένη και σταθερή αλλά **χωρίς ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα του εναλλάκτη.**

Η δεξαμενή δοκιμής θερμαίνεται, με την χρήση της δεξαμενής 5m³, έως την επιθυμητή θερμοκρασία και ομογενοποιείται. Στην συνέχεια ο εναλλάκτης τροφοδοτείται με νερό θερμοκρασίας 20 °C από το δίκτυο έως ότου η θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη να φθάσει τους 40 °C που θεωρείται η ελάχιστη χρήσιμη θερμοκρασία. Καθ' όλη την διάρκεια της αποφόρτισης ήταν απενεργοποιημένος ο κυκλοφορητής ανακυκλοφορίας μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη αλλά η βάνα

ανακυκλοφορίας ήταν ανοικτή (μικρή κυκλοφορία λόγω φυσικής συναγωγής).

Πίνακας 3.

Παροχή εναλλάκτη [lt/h]	Χρόνος αποφόρτισης [min]	Ισχύς εναλλάκτη [kW]	ξ_m HE	NTU	Όγκος απομάστευσης [lt]
2779.2	2.82	57.7	0.4	0.50	134.2
1919.4	5.50	50.0	0.5	0.71	176.2
1413.7	15.17	39.7	0.6	0.87	357.4
998.0	28.00	29.5	0.7	1.07	467.7
579.3	62.65	18.6	0.8	1.56	604.9



Σχήμα 8.

Τα αποτελέσματα του σεναρίου μετρήσεων δίνονται στον *Πίνακα 3* και σε διαγραμματική μορφή στο *Σχήμα 8*. Αναλυτικότερα αποτελέσματα και διαγράμματα ανά περίπτωση παρουσιάζονται στο *Παράρτημα Γ*.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι κατά την διάρκεια της λειτουργίας αποφόρτισης της δεξαμενής με σταθερή αρχική θερμοκρασία του νερού δεξαμενής 65°C για διάφορες παροχές απομάστευσης χωρίς την χρήση ανακυκλοφορίας από τον εξωτερικό σωλήνα του εναλλάκτη, η αποδοτικότητα του εναλλάκτη είναι κατά πολύ χαμηλότερη αυτής με ανακυκλοφορία. Από τα αναλυτικά αποτελέσματα φαίνεται ότι η θερμοκρασία του νερού εντός της δεξαμενής παρουσιάζει μία διαστρωμάτωση καθ' ύψος καθ' όλη την διάρκεια της απομάστευσης ενώ η μέση θερμοκρασία της δεξαμενής και η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον εναλλάκτη δεν ταυτίζονται όπως στην περίπτωση της προηγούμενης παραγράφου. Είναι εμφανές ότι η διαφορά αυτή στην λειτουργία οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ανακυκλοφορία μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη, η οποία συντελεί στην αποδοτικότερη μεταφορά θερμότητας μέσα στον εναλλάκτη, λόγω των συνθηκών εξαναγκασμένης συναγωγής που επικρατούν. Αντίθετα, με την απουσία ανακυκλοφορίας, η μεταφορά γίνεται λόγω φυσικής συναγωγής, που χαρακτηρίζεται από χαμηλότερους συντελεστές μεταφοράς.

4.2.4 Διερεύνηση της λειτουργίας της δεξαμενής (Θ.Ε.Σ.), με αρχική θερμοκρασία 70°C, για διαφορετικές παροχές ανακυκλοφορίας στον εξωτερικό σωλήνα.

Διερεύνηση της λειτουργίας της δεξαμενής στην αποφόρτιση μέσω του εναλλάκτη χωρίς την χρήση της δεξαμενής 5m³, έχοντας σαν εκκίνηση την αρχική θερμοκρασία του νερού στο εσωτερικό της δεξαμενής Τστατ= 70°C ομοιόμορφα κατανεμημένη και σταθερή αλλά **με διάφορες παροχές ανακυκλοφορίας στον εξωτερικό σωλήνα του εναλλάκτη.**

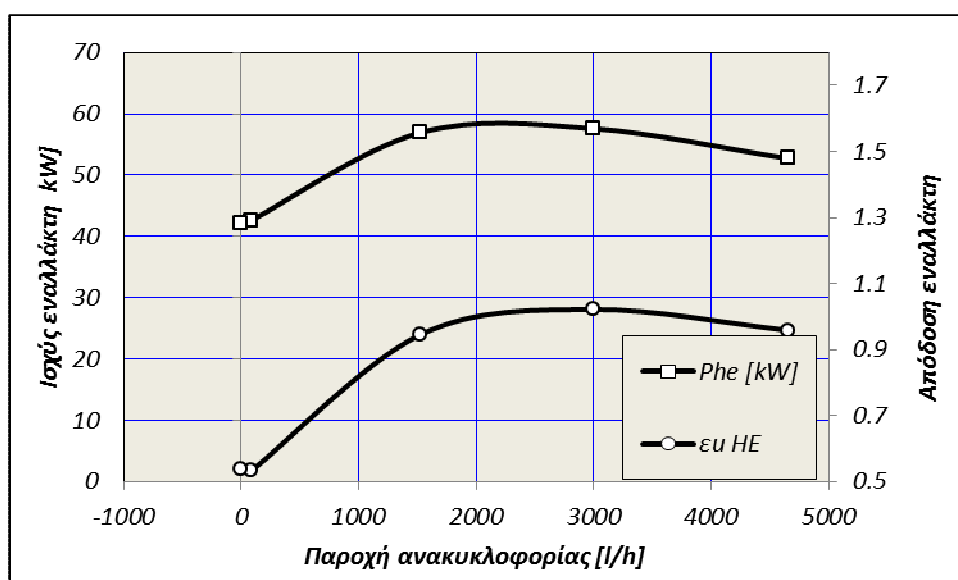
Η δεξαμενή δοκιμής θερμαίνεται, με την χρήση της δεξαμενής 5m³, έως την επιθυμητή θερμοκρασία και ομογενοποιείται. Στην συνέχεια ο εναλλάκτης τροφοδοτείται με νερό θερμοκρασίας 20 °C από το δίκτυο έως ότου η θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη να φθάσει τους 40 °C. Καθ' όλη την διάρκεια της αποφόρτισης ο κυκλοφορητής ανακυκλοφορίας μέσω του εξωτερικού σωλήνα του εναλλάκτη ήταν ενεργοποιημένος αλλά

η βάνα ανακυκλοφορίας ήταν στραγγαλισμένη για την επίτευξη διαφορετικής παροχής ανακυκλοφορίας, από πλήρως κλειστή έως πλήρως ανοικτή.

Τα αποτελέσματα του σεναρίου μετρήσεων δίνονται στον Πίνακα 4 και σε διαγραμματική μορφή στο Σχήμα 9. Αναλυτικότερα αποτελέσματα και διαγράμματα ανά περίπτωση παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ.

Πίνακας 4.

Παροχή ανακυκλοφ. [l/h]	Παροχή απομάστευσης [l/h]	Όγκος ανακυκλοφ. [l]	Ισχύς εναλλάκτη [kW]	ξ_m HE	NTU	Όγκος απομ [l]
4619.8	1412.4	2680.7	52.7	0.99	4.3	819.6
2962.5	1505.5	1695.2	57.6	1.04	-	861.9
1461.0	1493.2	856.2	57.0	1.02	2.9	867.0
77.5	1520.4	19.2	42.6	0.55	0.8	375.9
0	1478.0	0.0	42.1	0.55	0.8	365.4



Σχήμα 9.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι κατά την διάρκεια της λειτουργίας αποφόρτισης της δεξαμενής με σταθερή αρχική θερμοκρασία του νερού δεξαμενής 65°C και σταθερή παροχή απομάστευσης, μεταβάλλοντας μόνο την παροχή ανακυκλοφορίας από τον εξωτερικό σωλήνα του εναλλάκτη, η απόδοση του εναλλάκτη μεταβάλλεται με μη μονοτονικό τρόπο. Το διάγραμμα ισχύος του εναλλάκτη και της απόδοσης παρουσιάζουν ένα μέγιστο που προσδιορίζεται κατ' εκτίμηση στα 2500 l/h. Μετά από αυτή την παροχή η απόδοση του εναλλάκτη παραμένει σταθερή ή μειώνεται ελαφρά, κάτι που αποτελεί ένα πολύ σημαντικό δεδομένο για τον προσδιορισμό του μεγέθους του κυκλοφορητή.

4.2.5 Πτώση πίεσης του εναλλάκτη σε διαφορετικές παροχές

Ο προσδιορισμός της καμπύλης πτώσης πίεσης νερού μέσω του εναλλάκτη διενεργήθηκε εντός του Εργαστηρίου χρησιμοποιώντας την τροφοδοσία κρύου νερού από το δίκτυο. Η θερμοκρασία κρύου νερού κυμάνθηκε από 26.6 °C έως 20.7 °C ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμάνθηκε μεταξύ 23 °C και 25 °C.

Στον Πίνακα 5 δίνονται οι μέσες τιμές των κάτωθι παραμέτρων ροής:

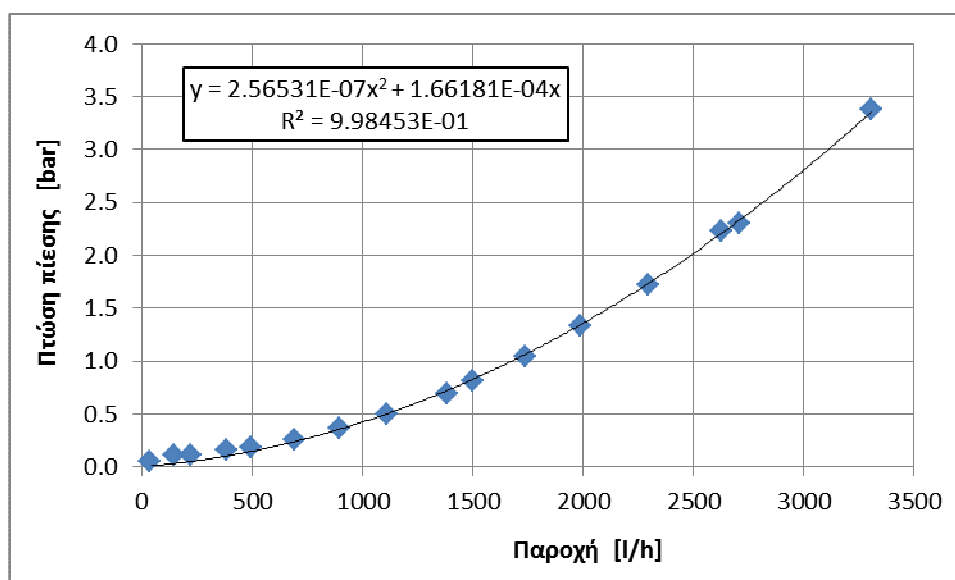
<i>T_{in}</i>	Θερμοκρασία κρύου νερού στην είσοδο του εναλλάκτη, [°C]
<i>T_{out}</i>	Θερμοκρασία κρύου νερού στην έξοδο του εναλλάκτη, [°C]
<i>P_{in}</i>	Πίεση νερού στην είσοδο του εναλλάκτη, [bar]
<i>P_{out}</i>	Πίεση νερού στην έξοδο του εναλλάκτη, [bar]
<i>T_a</i>	Θερμοκρασία περιβάλλοντος, [°C]
<i>Q_{cold}</i>	Παροχή νερού τροφοδοσίας στην είσοδο του εναλλάκτη, [l/h]
<i>DP</i>	Πτώση πίεσης νερού μέσω του εναλλάκτη, [bar]

Πίνακας 5.

T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	P _{in} [bar]	P _{out} [bar]	T _a [°C]	Q _{cold} [l/h]	DP [bar]
26.641	47.130	4.603	4.547	24.920	36.6	0.056
26.680	51.277	4.789	4.679	24.428	147.9	0.110
26.756	51.574	4.538	4.423	24.248	218.6	0.116
27.433	51.429	4.188	4.032	24.225	384.4	0.156
27.643	51.155	4.145	3.960	23.929	491.7	0.184
24.958	50.923	4.047	3.787	23.845	690.7	0.261
24.042	51.031	4.085	3.723	23.733	894.4	0.362
22.813	50.339	3.907	3.407	23.686	1108.2	0.500
26.665	50.295	3.820	3.134	23.261	1381.3	0.686
25.079	50.807	3.798	2.986	23.159	1500.6	0.812
21.821	47.910	3.470	2.430	23.286	1738.3	1.040
21.630	47.004	3.204	1.872	23.228	1987.7	1.332
21.349	45.871	2.874	1.159	23.277	2296.1	1.715
21.213	44.949	2.514	0.288	23.333	2625.0	2.226
20.964	43.858	2.402	0.097	23.197	2706.1	2.305
20.761	41.334	3.419	0.043	23.159	3303.7	3.376

31

Στο παρακάτω Σχήμα 10 δίνονται διαγραμματικά οι τιμές της πτώσης πίεσης νερού μέσω του εναλλάκτη καθώς και σχετική προσεγγιστική εξίσωση.



Σχήμα 10. Διάγραμμα πτώσης πίεσης συναρτήσει της παροχής νερού

4.3 Μελλοντικές ενέργειες - βελτιστοποίηση εναλλάκτη

Για την καλύτερη κατανόηση της ενεργειακής συμπεριφοράς της διάταξης εναλλάκτη-δεξαμενής (Θ.Ε.Σ.) με στόχο την περαιτέρω βελτιστοποίησή της, είναι σκόπιμο να γίνει μια θεωρητική ανάλυση, με βάση σχέσεις μεταφοράς θερμότητας διαθέσιμες στην βιβλιογραφία. Μια σχετική αναζήτηση, δείχνει ότι κατά κύριο λόγο αυτές αφορούν την ροή στο εσωτερικό του εναλλάκτη (εσωτερικός σωλήνας, διάκενο) [2]. Λιγότερα στοιχεία υπάρχουν σε ό,τι αφορά τους συντελεστές από το εξωτερικό τοίχωμα του εναλλάκτη προς το αποθηκευμένο (στατικό) νερό της δεξαμενής. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εξωτερικού τοιχώματος και στατικού νερού δημιουργεί καθοδικά ρεύματα κοντά στα τοιχώματα και γίνεται έτσι ψύξη του στατικού νερού μέσω φυσικής συναγωγής. Ο πλήρης χαρακτηρισμός αυτών των καθοδικών ροών και γενικώτερα ο τρόπος με τον οποίο ψύχεται το στατικό νερό, μπορεί να γίνει μόνο με μοντελοποίηση της δεξαμενής χρησιμοποιώντας μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Μια πλήρης μοντελοποίηση τέτοιων διατάξεων δεξαμενών με ελικοειδή εναλλάκτη διπλού σωλήνα, που να θεωρεί συζευγμένη επίλυση της ροής και μεταφοράς θερμότητας τόσο στο εσωτερικό του εναλλάκτη όσο και στην δεξαμενή είναι ιδιαίτερα απαιτητική και απαιτεί αφενός εξειδικευμένο λογισμικό και αφετέρου μεγάλη υπολογιστική ισχύ και χρόνο υπολογισμού. Η δυσκολία κατά κύριο λόγο οφείλεται στις γεωμετρικές λεπτομέρειες που πρέπει να αναλυθούν και απαιτούν υπολογιστικά πλέγματα πολύ μεγάλων διαστάσεων. Σε μια από τις ελάχιστες σχετικές εργασίες που υπάρχουν διαθέσιμες στη βιβλιογραφία [3], αναφέρεται ότι απαιτείται υπολογιστικός χρόνος άνω των 2 εβδομάδων για προσομοίωση μερικών λεπτών μόνο της πραγματικής διεργασίας. Έτσι, μια τέτοια προσομοίωση μπορεί να γίνει είτε με σημαντική επένδυση χρόνου και κόστος σε υπολογιστική υποδομή, είτε με την διαμόρφωση απλουστευμένων μοντέλων που να αποτυπώνουν τα βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας της διάταξης έτσι ώστε να επιτρέπουν σε εύλογο χρονικό διάστημα μια παραμετρική ανάλυση, με μεταβολή τόσο θερμοϋδραυλικών παραμέτρων (παροχές, θερμοκρασίες) όσο και των γεωμετρικών μεγεθών.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A.D. Kraus, "Heat Exchangers", Κεφάλαιο 11 του βιβλίου «Heat Transfer Handbook», A. Bejan & A.D. Kraus (eds.), Wiley, 2003.
2. Nada, S.A., El Shaer, W.G., Huzayyin, A.S., "Performance of multi tubes in tube helically coiled as a compact heat exchanger", Heat and Mass Transfer, vol. 51(7), pp. 973-982, 2015
3. Zachár, A., "Investigation of a new helical flow distributor design to extract thermal energy from hot water storage tanks", Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol. 80, pp. 844-857, 2015.
4. ISO 12897:2006, "Water supply – Specification for indirectly heated unvented (closed) storage water heaters".

6

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ Α-Δ

35

Αναλυτικά αποτελέσματα δοκιμών :

- A. Λειτουργία της δεξαμενής με διάφορες αρχικές θερμοκρασίες
 - B. Λειτουργία της δεξαμενής με αρχική θερμοκρασία 65°C για διαφορετικές παροχές αποφόρτισης, με συνεχή ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα
 - Γ. Λειτουργία της δεξαμενής, με αρχική θερμοκρασία 65°C για διαφορετικές παροχές αποφόρτισης χωρίς ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα
 - Δ. Λειτουργία της δεξαμενής με αρχική θερμοκρασία 70°C για διαφορετικές παροχές ανακυκλοφορίας στον εξωτερικό σωλήνα
-

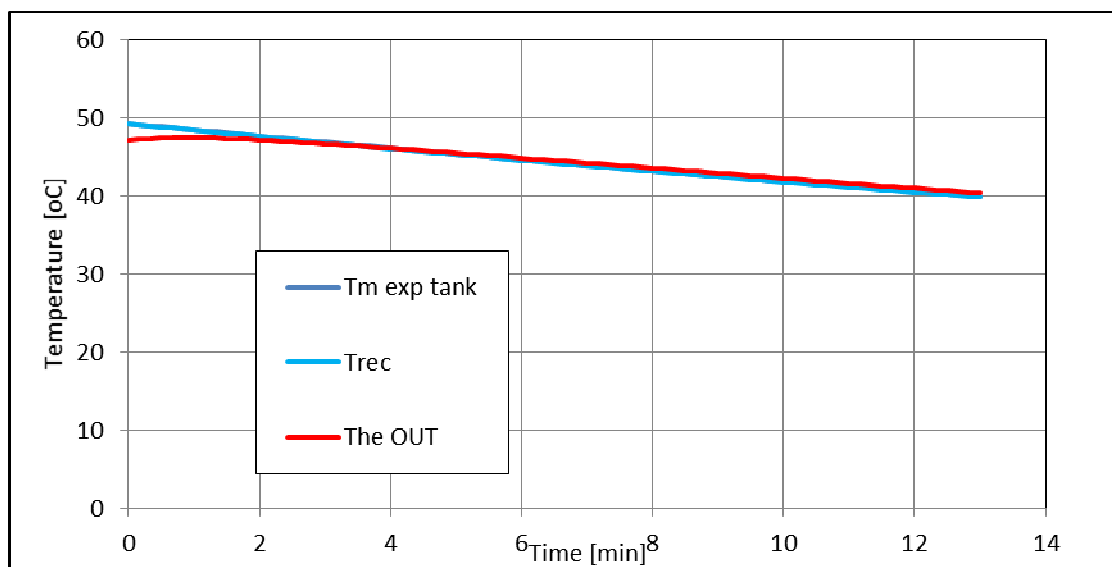
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

**Λειτουργία της δεξαμενής με
διάφορες αρχικές θερμοκρασίες**

A.1 Θερμοκρασία νερού δεξαμενής δοκιμής $T_{στατ} = 50^{\circ}\text{C}$

- Χρόνος αποφόρτισης (t) : 13 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη : 1451,23 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη : 17.7 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη : 44.4 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 314,6 lt

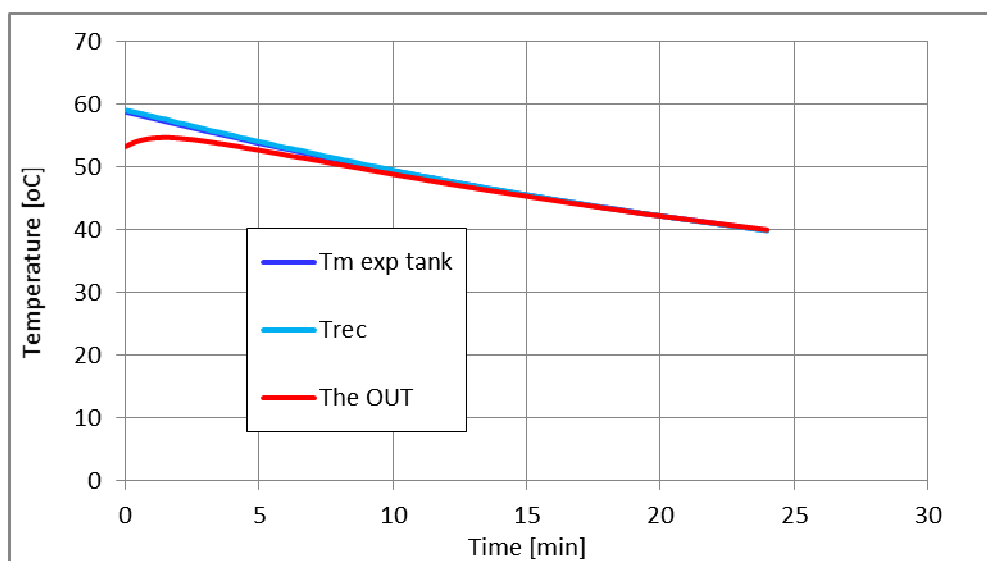
- Ισχύς εναλλάκτη, (P) : 44.5 kW



A.2 Θερμοκρασία νερού δεξαμενής δοκιμής $T_{στατ} = 60^{\circ}\text{C}$

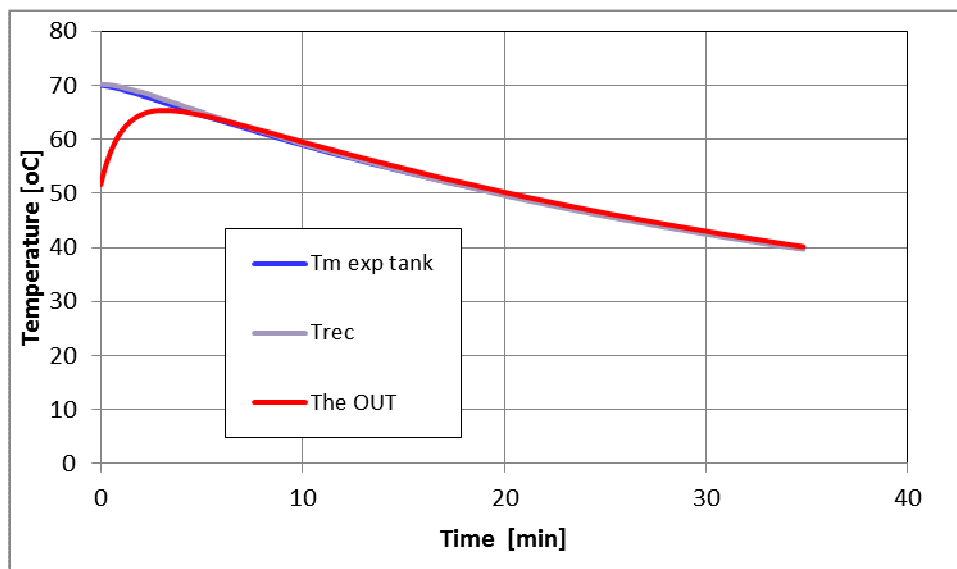
- Χρόνος αποφόρτισης (t) :24 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη : 1452,1 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :19.3 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :47.6 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) :580,4 lt

- Ισχύς εναλλάκτη,(P) : 47.2 kW



A.3 Θερμοκρασία νερού δεξαμενής δοκιμής $T_{στατ} = 70^{\circ}\text{C}$

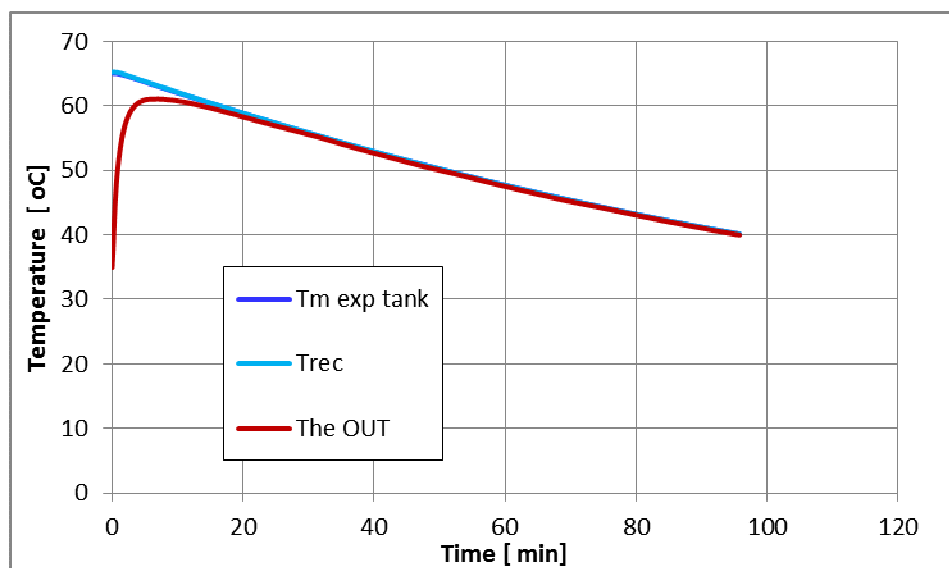
- Χρόνος αποφόρτισης (t) :35 min
 - Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη : 1412,5 lt/h
 - Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :20.2 °C
 - Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :52.7 °C
 - Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) :819.6 lt
-
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) : 52.7 kW



A.4 Θερμοκρασία νερού δεξαμενής δοκιμής $T_{στατ} = 70^{\circ}\text{C}$ συνεχής φόρτιση

- Χρόνος αποφόρτισης (t) :228.8 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη : 1408.6 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη : 19.6 $^{\circ}\text{C}$
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη : 52.5 $^{\circ}\text{C}$
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 $^{\circ}\text{C}$ (Vd) :5372 lt

- Ισχύς εναλλάκτη,(P) : 52.8 kW



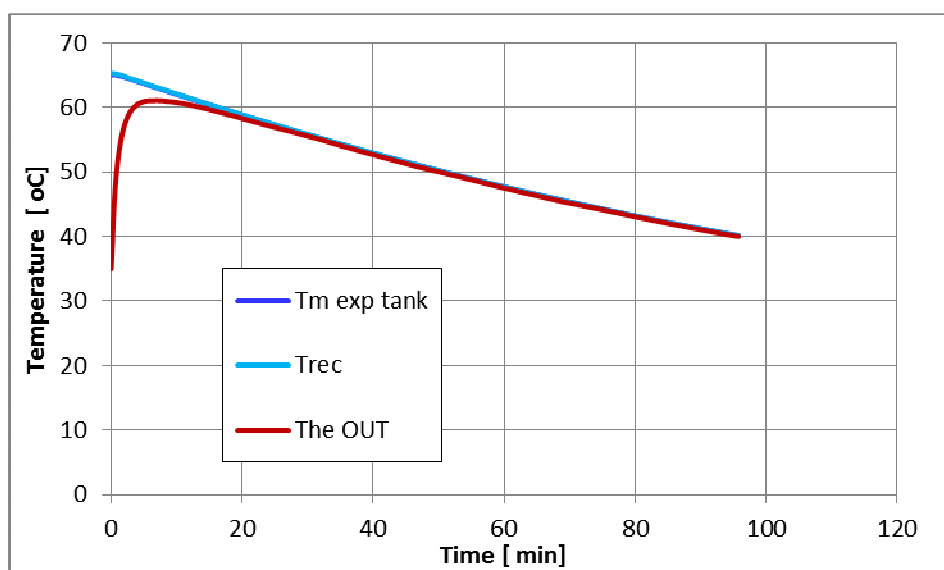
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

**Λειτουργία της δεξαμενής με αρχική
θερμοκρασία 65°C για διαφορετικές
παροχές αποφόρτισης, με συνεχή
ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα**

B.1 Παροχή αποφόρτισης $Q = 500 \text{ l/h}$

- Χρόνος αποφόρτισης (t) :95.82 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :432.6 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη : 20.20 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη : 50.52 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) :249.8 lt

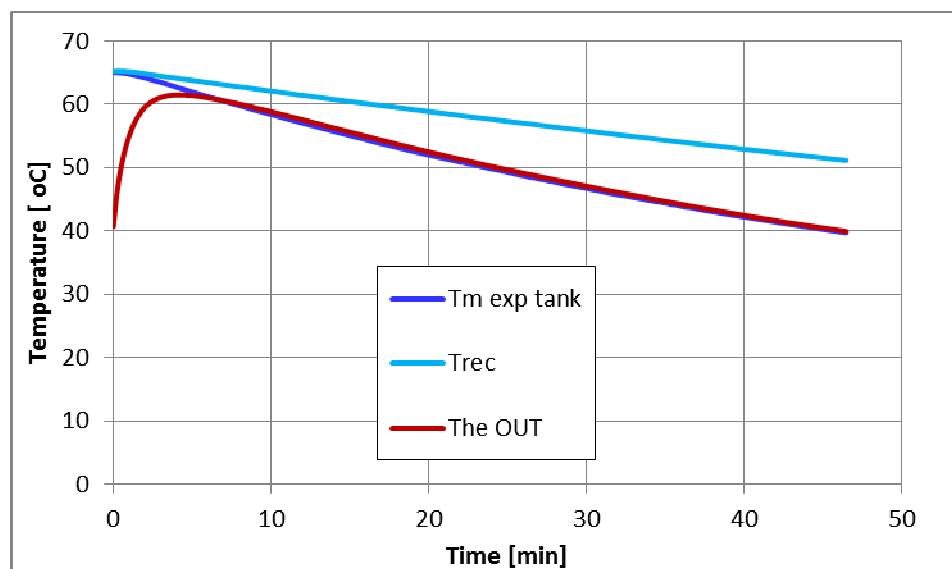
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) : 6.6 kW



B.2 Παροχή αποφόρτισης $Q = 1000 \text{ l/h}$

- Χρόνος αποφόρτισης (t) : 46.5 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη : 955 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη : 19.96 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη : 50.71 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 553 lt

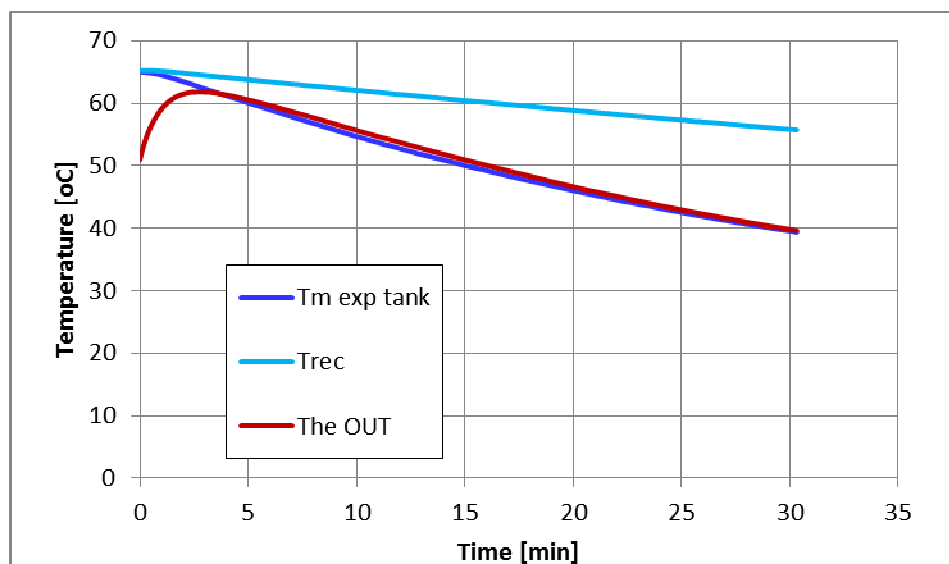
- Ισχύς εναλλάκτη, (P) : 27.4 kW



B.3 Παροχή αποφόρτισης $Q = 1500 \text{ l/h}$

- Χρόνος αποφόρτισης (t) : 30.32 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη : 1503.3 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη : 20.2 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη : 50.93 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 760 lt

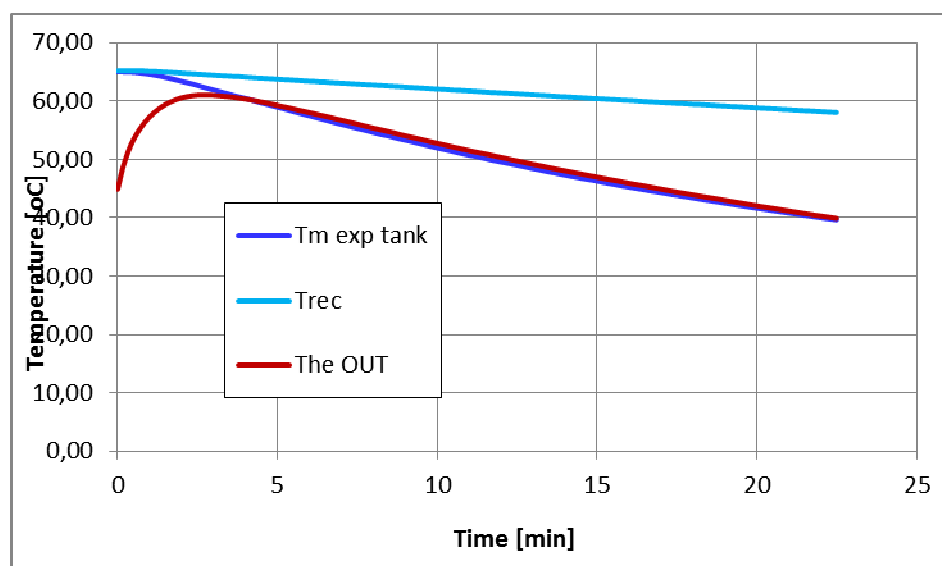
- Ισχύς εναλλάκτη, (P) : 53.1 kW



B.4 Παροχή αποφόρτισης $Q=2000$ l/h

- Χρόνος αποφόρτισης (t) :..... 22.5 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :..... 2006.2 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :..... 20.2 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :..... 50.94 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 753 lt

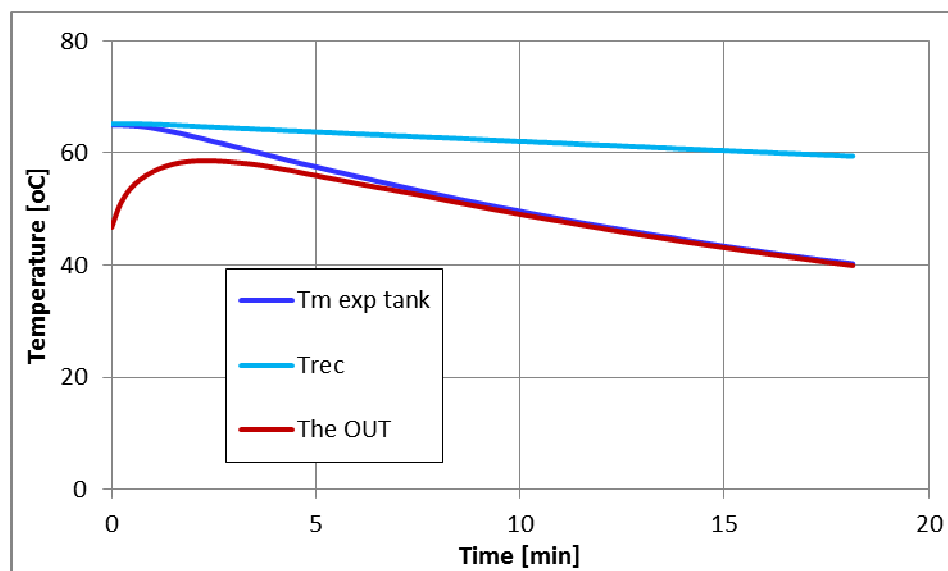
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 71.3 kW



B.5 Παροχή αποφόρτισης $Q=2500$ l/h

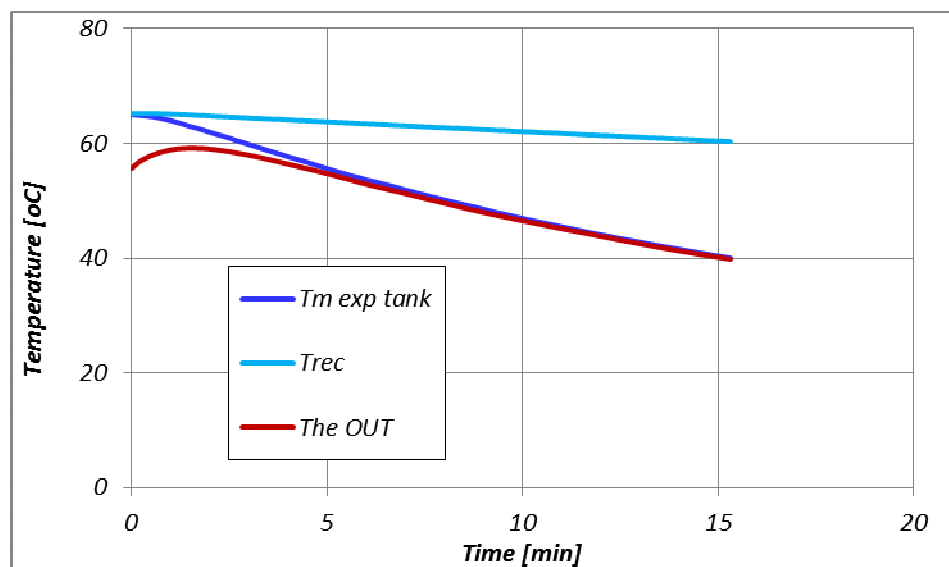
- Χρόνος αποφόρτισης (t) :..... 18.1 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :..... 2395.3 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :..... 19.6 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :..... 49.9 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 726 lt

- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 83.8 kW



B.6 Παροχή αποφόρτισης $Q = 3000 \text{ l/h}$

- Χρόνος αποφόρτισης (t) :15.32 min
 - Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :2876.9 lt/h
 - Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :19.3 °C
 - Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :50.21 °C
 - Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) :737 lt
-
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :102.4 kW

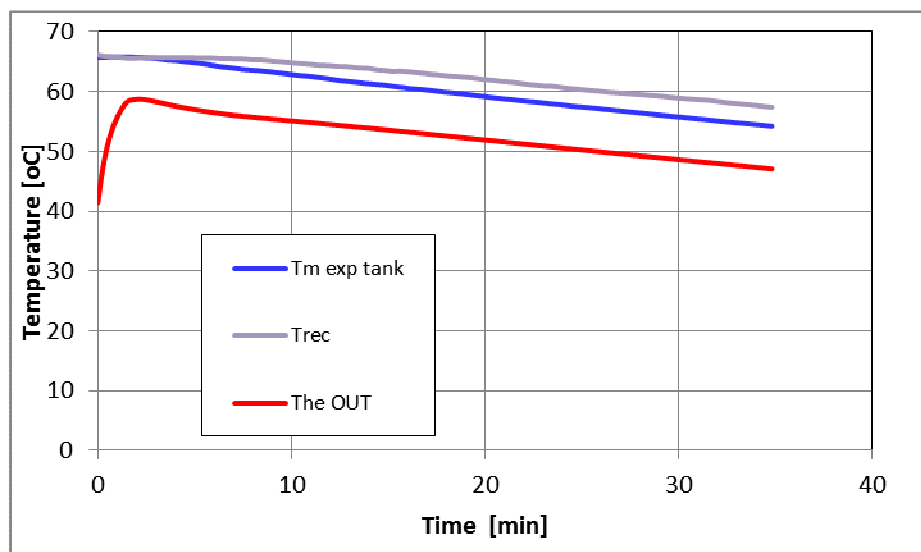


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

**Λειτουργία της δεξαμενής, με αρχική
θερμοκρασία 65°C για διαφορετικές
παροχές αποφόρτισης χωρίς
ανακυκλοφορία στον εξωτερικό σωλήνα**

Γ.1 Παροχή αποφόρτισης $Q=500\text{ l/h}$

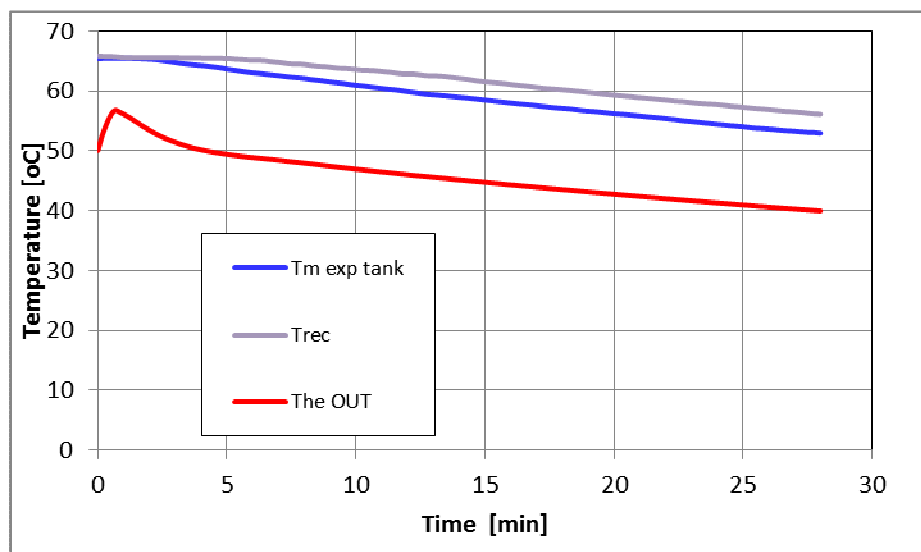
- Χρόνος αποφόρτισης (t) :..... 62.6 min
 - Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :..... 579.3 lt/h
 - Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :..... 20.11 °C
 - Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :..... 48.4 °C
 - Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 605 lt
-
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 18.6 kW



Γ.2 Παροχή αποφόρτισης $Q=1000 \text{ l/h}$

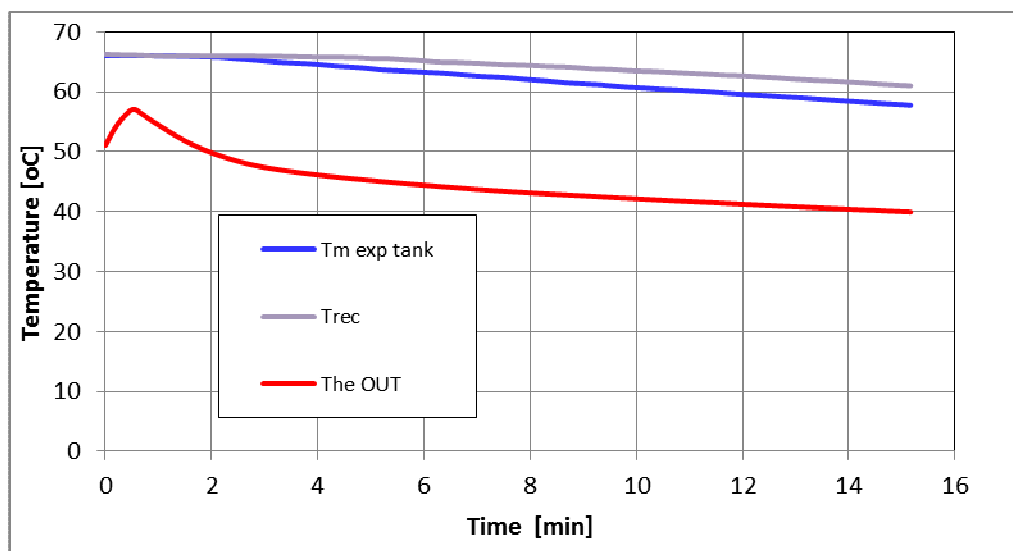
- Χρόνος αποφόρτισης (t) : 28.0 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη : 998 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη : 20.7 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη : 48.8 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 468 lt

- Ισχύς εναλλάκτη,(P) : 29.5 kW



Γ.3 Παροχή αποφόρτισης $Q=1500\text{ l/h}$

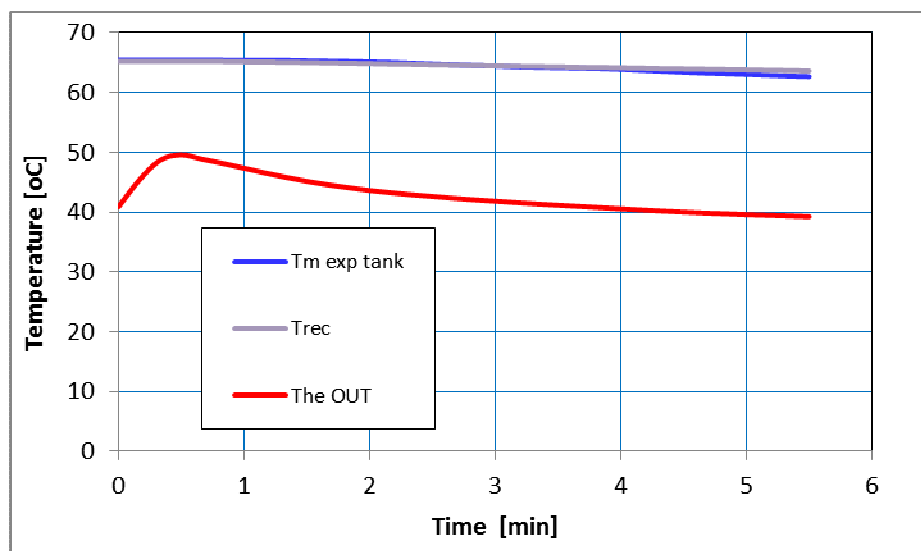
- Χρόνος αποφόρτισης (t) :..... 15.2 min
 - Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :..... 1413.7 lt/h
 - Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :..... 20.3 °C
 - Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :..... 44.8 °C
 - Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 357 lt
-
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 39.7 kW



Γ.4 Παροχή αποφόρτισης $Q=2000\text{ l/h}$

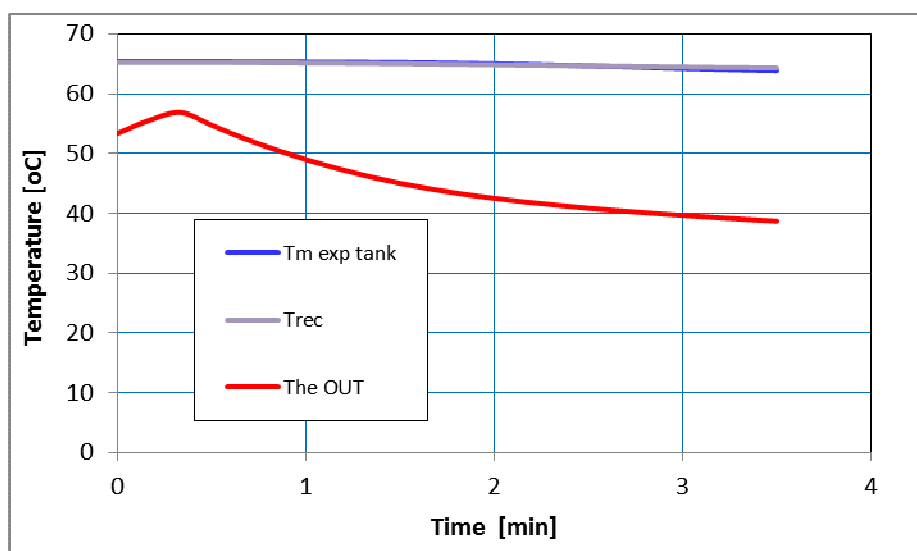
- Χρόνος αποφόρτισης (t) :.....5.5 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :..... 1919.5 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :.....20.4 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :.....42.9 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 176 lt

- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 50.0 kW



Γ.5 Παροχή αποφόρτισης $Q=2500\text{ l/h}$

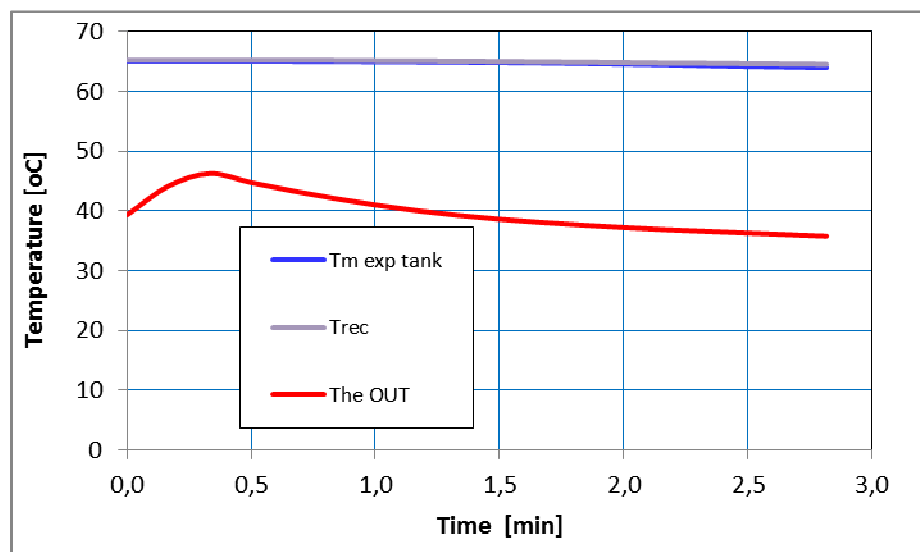
- Χρόνος αποφόρτισης (t) :.....3.5 min
 - Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :.....2401.5 lt/h
 - Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :.....20.6 °C
 - Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :.....45.6 °C
 - Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 141 lt
-
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 69.2 kW



Γ.6 Παροχή αποφόρτισης $Q=3000\text{ l/h}$

- Χρόνος αποφόρτισης (t) :.....2.8 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :.....2779.2 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :.....22.5 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :.....39.6 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) :134.6 lt

- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 57.7 kW



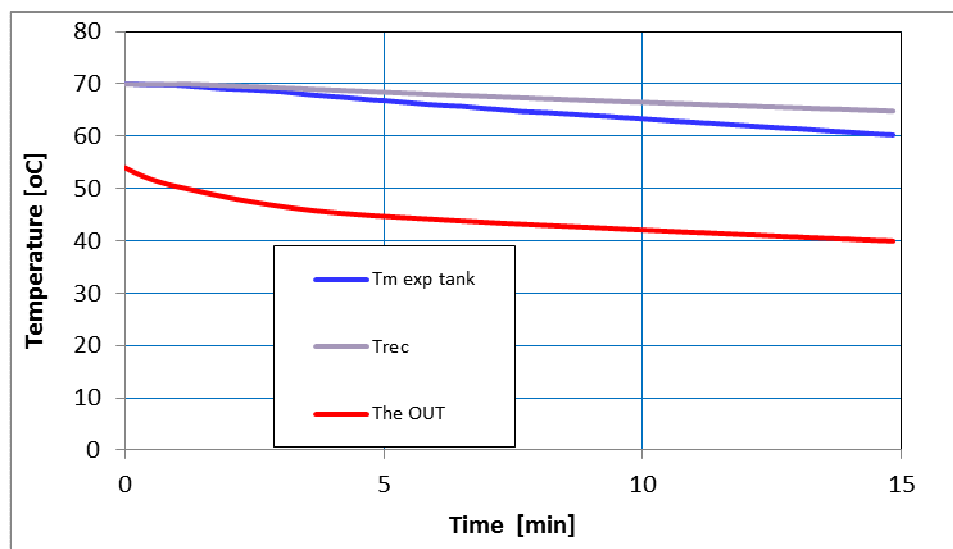
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

**Λειτουργία της δεξαμενής με αρχική
θερμοκρασία 70°C για διαφορετικές
παροχές ανακυκλοφορίας
στον εξωτερικό σωλήνα**

Δ.1 Παροχή ανακυκλοφορίας $Q_{rec}=0$ l/h

- Χρόνος αποφόρτισης (t) :..... 14.8 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :.....1478 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :.....19.4 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :..... 44.15 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 335 lt

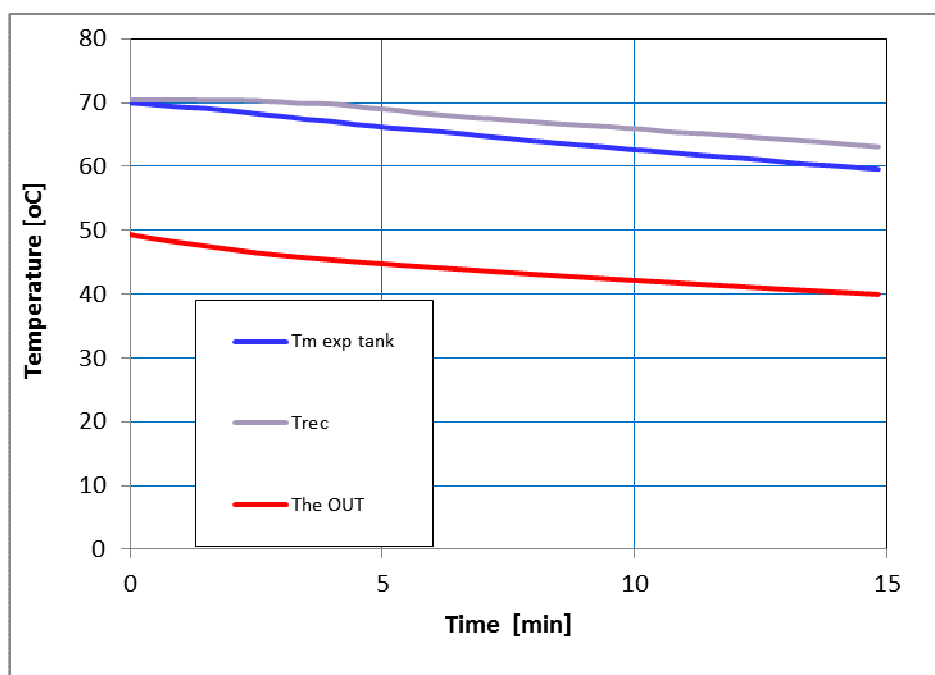
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 42.1 kW



Δ.2 Παροχή ανακυκλοφορίας $Q_{rec}= 77.5 \text{ l/h}$

- Χρόνος αποφόρτισης (t) : 14.8 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη : 1520.4 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη : 19.4 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη : 43.8 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 376 lt

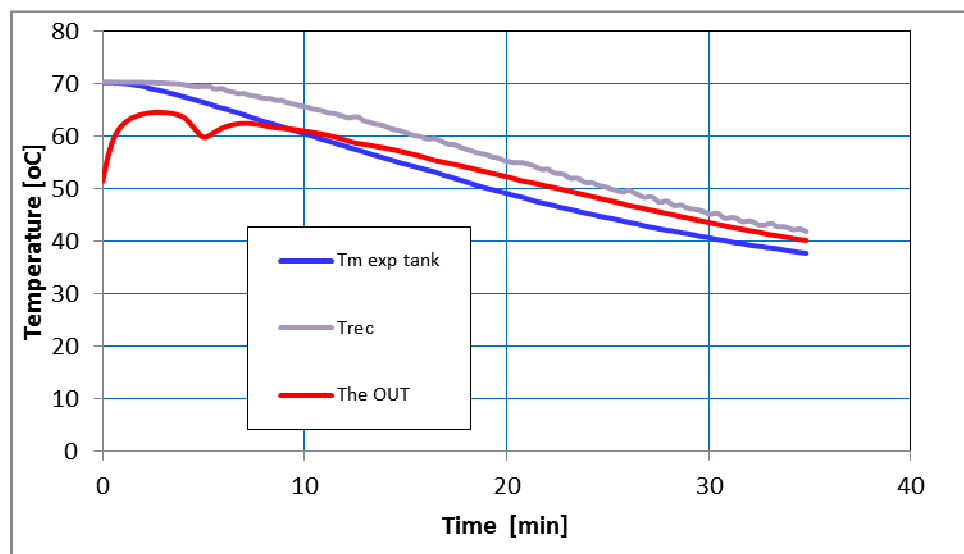
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) : 42.6 kW



Δ.3 Παροχή ανακυκλοφορίας $Q_{rec}=1461 \text{ l/h}$

- Χρόνος αποφόρτισης (t) :..... 35.2 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :..... 1493.2 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :..... 20.2 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :..... 53.5 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 867 lt

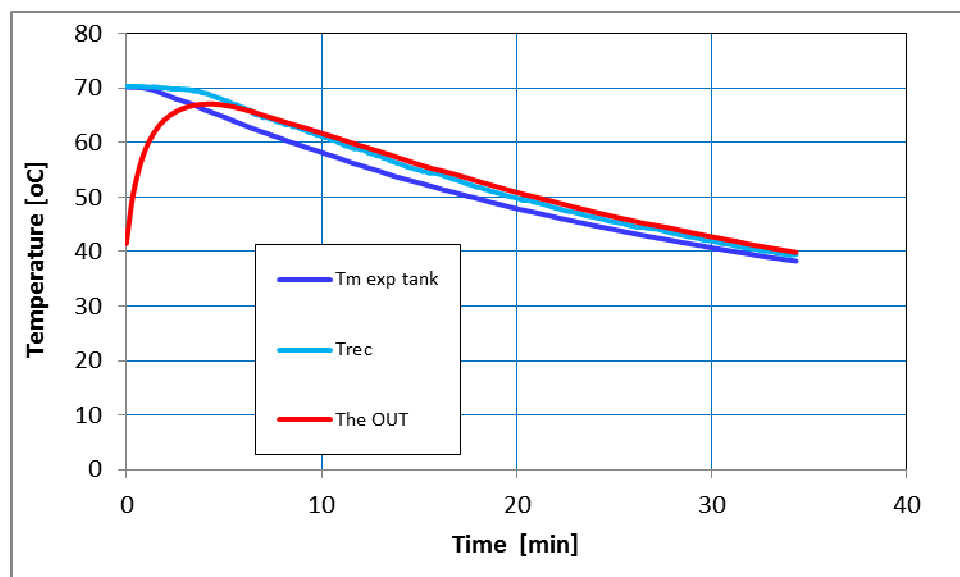
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 57.0 kW



Δ.4 Παροχή ανακυκλοφορίας $Q_{rec}=2962.5 \text{ l/h}$

- Χρόνος αποφόρτισης (t) :..... 34.3 min
- Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :..... 1505.5 lt/h
- Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :..... 20.3 °C
- Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :..... 53.6 °C
- Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 862 lt

- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 57.6 kW



Δ.5 Παροχή ανακυκλοφορίας $Q_{rec}=4619.8 \text{ l/h}$

- Χρόνος αποφόρτισης (t) :..... 34.8 min
 - Μέση παροχή στο κύκλωμα του εναλλάκτη :..... 1412.4 lt/h
 - Μέση θερμοκρασία στην είσοδο του εναλλάκτη :..... 20.2 °C
 - Μέση θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη :..... 52.8 °C
 - Όγκος απομάστευσης με θερμοκρασία πάνω από 40 °C (Vd) : 820 lt
-
- Ισχύς εναλλάκτη,(P) :..... 52.7 kW

