



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

«Μελέτη τῆς συμπεριφορᾶς ρευστῶν χαμηλοῦ ἰξώδους
μὲ τὴν χρῆση ἐναλλακτῶν θερμότητας».



ΜΙΧΑΗΛ ΣΠΑΝΑΚΟΣ

Ἐπιβλέπων καθηγητής
Ζαχαρίας Ἰωάννου: ἐπίκουρος καθηγητής.

- Μέλη τριμελοῦς ἐπιτροπῆς
- Ζαχαρίας Ἰωάννου: ἐπίκουρος καθηγητής.
 - Εὐστάθιος Καλούδης: ἐπίκουρος καθηγητής.
 - Κωνσταντῖνος Γκατζιώνης: ἀναπληρωτῆς καθηγητής.

Μύρινα, Λήμνος
2022 - 2023

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract	7
Εισαγωγή.....	8
Κεφάλαιο 1. Τρόποι μεταφοράς θερμότητας.....	9
1.1 Μεταφορά θερμότητας με άγωγή.....	10
1.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	13
1.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία	15
Κεφάλαιο 2. Μεταφορά θερμότητας σε συνθήκες σταθερής κατάστασης.....	16
2.1 Μεταφορά θερμότητας με άγωγή σε ορθογώνια πλάκα	16
2.1.1 Θερμική αντίσταση	18
2.2 Μεταφορά θερμότητας με άγωγή δια μέσου σωληνωτού άγωγού	19
2.3 Άγωγή θερμότητας σε σύνθετα τοιχώματα.....	21
2.3.1 Επίπεδο τοίχωμα από διαφορετικά υλικά σε στρώσεις.....	21
2.3.2 Κυλινδρικός άγωγός από διαφορετικά υλικά σε στρώσεις.....	23
2.4 Ύπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.....	24
2.4.1 Έξαναγκασμένη συναγωγή.....	31
2.4.1.1 Στρωτή ροή σε σωλῆνες.....	31
2.4.1.2 Μεταβατική ροή σε σωλῆνες.....	32
2.4.1.3 Τυρβώδης ροή σε σωλῆνες.....	32
2.4.2 Έλεύθερη ή φυσική συναγωγή.....	33
2.4.3 Θερμική αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	34
2.5 Έκτίμηση του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.....	35
2.6 Σχηματισμός αποθέσεων στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας.....	38
2.7 Σημασία των χαρακτηριστικών της επιφανείας στην μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	39
Κεφάλαιο 3. Μεταφορά θερμότητας σε συνθήκες μη σταθερής κατάστασης.....	41
3.1 Σημασία της εξωτερικής ἔναντι της ἔσωτερικής αντίστασης στην μεταφορά θερμότητας.....	42
3.2 Ἀμελητέα ἔσωτερική αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας ($NBi < 0,1$).....	43
3.3 Πεπερασμένη ἔσωτερική και ἐπιφανειακή αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας ($0,1 \leq NBi \leq 40$).....	45
3.4 Ἀμελητέα ἐπιφανειακή αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας ($NBi \geq 40$).....	47
Κεφάλαιο 4. Συστήματα θέρμανσης και ψύξης προϊόντων τροφίμων	48
4.1 Ἐναλλάκτης θερμότητας ἀποξεομένης ἐπιφανείας.....	49

4.2 Έναλλάκτης θερμότητας αὐλοῦ/κελύφους	50
4.3 Αὐλωτὸς ἐναλλάκτης θερμότητας.....	51
4.4 Έναλλάκτης θερμότητας πλακῶν	53
4.5 Έναλλάκτης θερμότητας ἔγχυσης ἀτμοῦ	57
Κεφάλαιο 5. Μέθοδος ἀποδοτικότητας/“NTU” γιὰ τὸν σχεδιασμὸ ἐναλλακτῶν θερμότητας	58
5.1 Λόγος ρυθμοῦ θερμοχωρητικότητας C	58
5.2 Ἀποδοτικότητα ἐναλλάκτη θερμότητας ϵ_E	59
5.3 Ἀριθμὸς μονάδων μεταφορᾶς NTU	60
Κεφάλαιο 6. Νανορρευστά: ἡ νέα τάση.....	62
6.1 Πειραματικὴ καὶ ἀριθμητικὴ διερεύνηση θερμοφυσικῶν ἰδιοτήτων μεταφορᾶς θερμότητας καὶ πτώσης πίεσης νανορρευστῶν σὲ δακτυλοειδῆ ἐναλλάκτη θερμότητας	62
6.2 Ἐνίσχυση μεταφορᾶς θερμότητας στὴν θερμικὴ ἐπεξεργασία χυμοῦ τομάτας μὲ ἐφαρμογὴ νανορρευστῶν	64
6.3 Πειραματικὴ διερεύνηση τῆς θερμικῆς ἀπόδοσης συμπαγοῦς ἐναλλάκτη θερμότητας καὶ τῶν ρεολογικῶν ἰδιοτήτων τῶν νανορρευστῶν χαμηλῆς συγκέντρωσης ποὺ περιέχουν νανοσωματίδια ὀξειδίου τοῦ ἀργιλίου καὶ ὀξειδίου τοῦ χαλκοῦ	66
6.4 Πειραματικὴ διερεύνηση τοῦ συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότητας καὶ τοῦ συντελεστῆ τριβῆς τοῦ νανορρευστοῦ μὲ νανοσωματίδια διοξειδίου τοῦ τιτανίου σὲ ἐναλλάκτη θερμότητας διπλοῦ σωλῆνος.....	67
6.5 Ἐπίδραση τοῦ νανορρευστοῦ μὲ νανοσωματίδια ὀξειδίου τοῦ ἀργιλίου στὴν ἀπόδοση τῆς θερμότητας σὲ συνθῆκες ὁμορροῆς.....	68
6.6 Διερεύνηση τυρβώδους ροῆς καὶ μεταφορᾶς θερμότητας τοῦ νανορρευστοῦ σὲ ἐναλλάκτη θερμότητας διπλοῦ σωλῆνος.....	70
6.7 Ἐκτίμηση τοῦ ἀριθμοῦ “Nusselt” καὶ τῆς ἀποτελεσματικότητας τοῦ ἐναλλάκτη θερμότητας διπλοῦ σωλῆνος σὲ νανορρευστά μὲ νανοσωματίδια Al_2O_3 καὶ CuO καὶ TiO_2 καὶ ZnO	71
Κεφάλαιο 7. Πειραματικὸ μέρος.....	73
7.1 Μονάδα βάσης “TIUS”	73
7.2 Έναλλάκτης θερμότητας διπλοῦ σωλῆνος “TITC”	75
7.3 Ἀποτελέσματα.....	78
7.3.1 Πείραμα 1 ^ο : ροὴ ἀραιωμένου χυμοῦ στὰ 1,4 L/min. καὶ θερμοκρασία στοὺς 40°C σὲ συνθῆκες ὁμορροῆς.....	78
7.3.2 Πείραμα 2 ^ο : ροὴ ἀραιωμένου χυμοῦ στὰ 1,4 L/min. καὶ θερμοκρασία στοὺς 50°C σὲ συνθῆκες ὁμορροῆς.....	82
7.3.3 Πείραμα 3 ^ο : ροὴ ἀραιωμένου χυμοῦ στὰ 1,4 L/min. καὶ θερμοκρασία στοὺς 60°C σὲ συνθῆκες ὁμορροῆς.....	86

7.3.4 Πείραμα 4 ^ο : ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 40°C σε συνθήκες όμορροης.....	90
7.3.5 Πείραμα 5 ^ο : ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες όμορροης.....	94
7.3.6 Πείραμα 6 ^ο : ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες όμορροης.....	98
7.3.7 Πείραμα 7 ^ο : ροή αραιωμένου χυμού στα 1,4 L/min. και θερμοκρασία στους 40°C σε συνθήκες αντίρροης	102
7.3.8 Πείραμα 8 ^ο : ροή αραιωμένου χυμού στα 1,4 L/min. και θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες αντίρροης	106
7.3.9 Πείραμα 9 ^ο : ροή αραιωμένου χυμού στα 1,4 L/min. και θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες αντίρροης	110
7.3.10 Πείραμα 10 ^ο : ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 40°C σε συνθήκες αντίρροης	114
7.3.11 Πείραμα 11 ^ο : ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες αντίρροης	118
7.3.12 Πείραμα 12 ^ο : ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες αντίρροης	122
7.4 Συζήτηση.....	126
7.4.1 Σύγκριση όμορροης και αντίρροης	126
7.4.1.1 Σταθερή παροχή στα 1,4 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 40°C ..	126
7.4.1.2 Σταθερή παροχή στα 1,4 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 50°C ..	129
7.4.1.3 Σταθερή παροχή στα 1,4 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 60°C ..	132
7.4.1.4 Σταθερή παροχή στα 2,1 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 40°C ..	135
7.4.1.5 Σταθερή παροχή στα 2,1 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 50°C ..	138
7.4.1.6 Σταθερή παροχή στα 2,1 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 60°C ..	141
7.4.2 Σύγκριση διαφορετικών θερμοκρασιών (T = 40°C, 50°C, 60°C).....	144
7.4.2.1 Σταθερή παροχή στα 1,4 L/min. σε συνθήκες όμορροης.....	144
7.4.2.2 Σταθερή παροχή στα 2,1 L/min. σε συνθήκες όμορροης.....	147
7.4.2.3 Σταθερή παροχή στα 1,4 L/min. σε συνθήκες αντίρροης	150
7.4.2.4 Σταθερή παροχή στα 2,1 L/min. σε συνθήκες αντίρροης	153
7.4.3 Σύγκριση διαφορετικής παροχής ($q_v = 1,4 \text{ L/min. και } 2,1 \text{ L/min.}$)	156
7.4.3.1 Σταθερή θερμοκρασία στους 40°C σε συνθήκες όμορροης	156
7.4.3.2 Σταθερή θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες όμορροης	158
7.4.3.3 Σταθερή θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες όμορροης	160
7.4.3.4 Σταθερή θερμοκρασία στους 40°C σε συνθήκες αντίρροης	162
7.4.3.5 Σταθερή θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες αντίρροης	164

7.4.3.6 Σταθερή θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες άντιρροής	166
Παρόμοιες μελέτες	168
Συμπεράσματα	169
Βιβλιογραφία.....	170

Περίληψη

Στήν παρούσα πτυχιακή εργασία μελετήθηκε ή ροή αραιωμένου χυμοῦ σέ εκπαιδευτικό έναλλάκτη θερμότητας διπλοῦ σωλήνος. Τά συστατικά τοῦ αναμίκτου χυμοῦ ἦταν τὰ ἑξῆς: χυμός μήλου (58%), χυμός “aronia” (19%), χυμός σταφυλιοῦ (13,5%) καὶ χυμός ροδιοῦ (9,5%). Πραγματοποιήθηκαν πειράματα στὸν έναλλάκτη σέ δύο διαφορετικὲς ροὲς ρευστοῦ (1,4 L/min. καὶ 2,1 L/min.) καὶ σέ τρεῖς διαφορετικὲς θερμοκρασίες (40°C, 50°C, 60°C) καὶ σέ δύο διαφορετικὲς ροὲς τροφίμου/ψυκτικοῦ μέσου (ὄμορροή, ἀντιρροή). Ἀπὸ τὰ συνολικά πειράματα ποὺ διεξήχθησαν, προκύπτει ὅτι ὁ ὀλικὸς συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητας εἶναι ὑψηλότερος στὴν ὑψηλότερη παροχή (2,1 L/min.) καὶ στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία (60°C) εἰσόδου τοῦ ρευστοῦ τροφίμου στὸν έναλλάκτη. Ἐπ’ ἴσης, φαίνεται ὅτι ή ἀντιρροή ἐξασφαλίζει πιδό γρήγορους ρυθμοὺς μεταφορᾶς θερμότητας, ἀξιοποιῶντας μὲ καλλίτερο τρόπο τὴν διαφορὰ θερμοκρασίας τῶν δύο ρευστῶν.

Abstract

In the present dissertation study, the flow of diluted juice in an educational double-tube heat exchanger was studied. The ingredients of the mixed juice were as follows: apple juice (58%), aronia juice (19%), grape juice (13,5%) and pomegranate juice (9,5%). Experiments were performed on the exchanger at two different flow rates (1,4 L/min. and 2,1 L/min.) and at three different temperatures (40°C, 50°C, 60°C) and at two different feed rates/refrigerant (parallel flow, countercurrent flow). From the total experiments conducted, it appears that the total heat transfer coefficient is higher at the highest flow rate (2,1 L/min.) and at the highest temperature (60°C) of liquid food entering the exchanger. Also, it seems that countercurrent flow ensures faster heat transfer rates, making better use of the temperature difference between the two fluids.

Είσαγωγή

Ἡ θέρμανση καὶ ἡ ψύξη ῥευστῶν τροφίμων μποροῦν νὰ γίνουν μὲ δύο τρόπους:

- μὲ ἄμεση ἐπαφὴ – ἀνάμιξη – τοῦ θερμαντικοῦ ἢ ψυκτικοῦ μέσου μὲ τὸ προϊόν.
- μὲ τὴν χρῆση εἰδικοῦ ἐξοπλισμοῦ – ἐναλλάκτη θερμότητας – μέσα στὸν ὅποιο τὸ θερμαινόμενο ἢ ψυχόμενο ῥευστὸ ἔρχεται σὲ ἔμμεση ἐπαφὴ μὲ τὸ θερμαντικὸ ἢ τὸ ψυκτικὸ μέσο μέσῳ τοιχώματος.

Ἡ θέρμανση καὶ ἡ ψύξη τῶν τροφίμων εἶναι ἀναγκαῖες, γιὰ νὰ ἀποφευχθῇ ἡ μικροβιακὴ καὶ ἐνζυμικὴ ὑποβάθμιση αὐτῶν. Ἐπὶ πλέον, ἡ θέρμανση ἢ ἡ ψύξη τῶν τροφίμων προσδίδει στὰ τρόφιμα τὶς ἐπιθυμητὲς ὀργανοληπτικὲς ιδιότητες (χρῶμα, γεύση, ὕψή).

Οἱ ἐναλλάκτες θερμότητας διατίθενται σὲ μεγάλη ποικιλία σχεδιασμοῦ, διότι ἐξυπηρετοῦν διαφορετικὲς ἀνάγκες θέρμανσης/ψύξης. Ὡς θερμαντικὰ μέσα χρησιμοποιοῦνται: ἀτμός, θερμὸ νερὸ ἢ τὸ ἴδιο τὸ ῥευστὸ μετὰ τὴν θέρμανσή του κατὰ τὴν διαδικασία τῆς πρόψυξής του. Ἐπομένως, ἀνακτῶνται σημαντικὲς ποσότητες θερμικῆς ἐνεργείας μὲ ἀποτέλεσμα τὴν ἐξοικονόμηση ἐνεργείας. Ὡς ψυκτικὰ μέσα χρησιμοποιοῦνται: ψυχρὸ νερὸ, ἄλλη ψύξης, πρωτογενὲς ψυκτικὸ μέσο ἢ τὸ ἴδιο τὸ ῥευστὸ κατὰ τὴν διαδικασία τῆς προθέρμανσής του.

Σὲ μία μονάδα ἐπεξεργασίας τροφίμων ἡ θέρμανση καὶ ἡ ψύξη τῶν τροφίμων πραγματοποιεῖται μὲ τὴν βοήθεια ἐξοπλισμοῦ ποὺ ὀνομάζεται: «ἐναλλάκτης θερμότητας». Οἱ ἐναλλάκτες θερμότητας μποροῦν νὰ ταξινομηθοῦν σὲ ἄμεσης καὶ ἔμμεσης ἐπαφῆς. Στους ἐναλλάκτες θερμότητας ἔμμεσης ἐπαφῆς τὸ προϊόν καὶ τὸ μέσο θέρμανσης ἢ ψύξης διατηροῦνται διαχωρισμένα συνήθως μέσῳ ἐνὸς λεπτοῦ τοιχώματος. Στους ἐναλλάκτες θερμότητας ἄμεσης ἐπαφῆς ὑπάρχει ἄμεση φυσικὴ ἐπαφὴ μετὰ τὸ προϊόν καὶ τῶν ῥευμάτων θέρμανσης ἢ ψύξης. Γιὰ παράδειγμα: σὲ ἓνα σύστημα ψεκασμοῦ ἀτμοῦ, ἀτμός ψεκάζεται ἀπ' εὐθείας στὸ προϊόν ποὺ πρόκειται νὰ θερμανθῇ· σὲ ἓναν ἐναλλάκτη θερμότητας πλακῶν, μία λεπτὴ μεταλλικὴ πλάκα διαχωρίζει τὸ ῥεῦμα τοῦ προϊόντος ἀπὸ τὸ ῥεῦμα θέρμανσης ἢ ψύξης, ἐπιτρέποντας τὴν μεταφορὰ θερμότητας χωρὶς τὴν μετὰ τῶν ἀνάμιξη.

Κεφάλαιο 1. Τρόποι μεταφοράς θερμότητας

Η θερμική ενέργεια εκφράζει την αισθητή και λανθάνουσα μορφή της έσωτερικής ενέργειας. Το θερμικό περιεχόμενο ενός αντικειμένου – όπως για παράδειγμα μιᾶς τομάτας – υπολογίζεται από: την μάζα του, την ειδική θερμότητα και την θερμοκρασία. Η εξίσωση για τὸν υπολογισμό τοῦ θερμικοῦ περιεχομένου εἶναι ἡ ἑξῆς:

$$Q = mc_p\Delta T$$

Όπου:

- m : ἡ μάζα (kg).
- c_p : ἡ ειδική θερμότητα ὑπὸ σταθερὴ πίεση (kJ / kg · K).
- ΔT : ἡ διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τοῦ αντικειμένου καὶ μιᾶς θερμοκρασίας ἀναφορᾶς (°C).

Τὸ θερμικὸ περιεχόμενο ἐκφράζεται πάντοτε σὲ σχέση μὲ κάποια ἄλλη θερμοκρασία πὸν χρησιμοποιεῖται ὡς ἀφετηρία καὶ ὀνομάζεται: θερμοκρασία ἀναφορᾶς. Ὁ προσδιορισμὸς τοῦ θερμικοῦ περιεχομένου θεωρεῖται σημαντικὸς. Ἡ γνώση τοῦ τρόπου μεταφορᾶς θερμότητας ἀπὸ ἓνα ἀντικείμενο σὲ ἄλλο ἢ στὸ ἐσωτερικὸ κάποιου ἀντικειμένου θεωρεῖται ἀκόμη πιὸ μεγάλης πρακτικῆς σημασίας. Για παράδειγμα: γιὰ τὴν θερμικὴ ἀποστείρωση χυμοῦ τομάτας πρέπει νὰ αὐξηθῆ τὸ θερμικὸ περιεχόμενο μὲ μεταφορᾶ θερμότητας ἀπὸ κάποιο μέσο θέρμανσης – ὅπως ὁ ἀτμὸς – στὸν χυμὸ. Γιὰ τὸν σχεδιασμὸ τοῦ ἐξοπλισμοῦ ἀποστείρωσης εἶναι ἀπαραίτητη ἡ γνώση τοῦ ποσοῦ θερμότητας πὸν ἀπαιτεῖται γιὰ τὴν αὐξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ χυμοῦ τομάτας ἀπὸ τὴν ἀρχικὴ ἕως τὴν τελικὴ θερμοκρασία ἀποστείρωσης, χρησιμοποιῶντας τὴν ἑξίσωση $Q = mc_p\Delta T$. Ἐπὶ πλέον, ἀπαιτεῖται νὰ εἶναι γνωστὸς ὁ ρυθμὸς μὲ τὸν ὁποῖον θὰ μεταφερθῆ θερμότητα ἀπὸ τὸν ἀτμὸ στὸν χυμὸ, ἐφ' ὅσον πρῶτα θὰ περάσῃ ἀπὸ τὰ τοιχώματα τοῦ ἀποστειρωτήρος. Ὡς ἐκ τούτου, ἀναφορικῶς μὲ τοὺς θερμικοὺς υπολογισμοὺς ἀπαιτοῦνται δύο παράμετροι:

- τὸ ποσὸ τῆς θερμότητας πὸν μεταφέρεται (Q), τὸ ὁποῖο ἐκφράζεται σὲ Joule (J).
- ὁ ρυθμὸς μεταφορᾶς θερμότητας (q), ὁ ὁποῖος ἐκφράζεται σὲ Joule/s (J/s) ἢ Watt (W).

Ἡ μεταβολὴ τῆς θερμικῆς ἐνέργειας σὲ ἓνα ρεῦμα ρευστοῦ, στὸ ὁποῖο ἡ θερμοκρασία μεταβάλλεται ἀπὸ T_1 σὲ T_2 , ἐκφράζεται ὡς ἑξῆς:

$$q = \dot{m}c_p(T_1 - T_2)$$

Όπου:

- \dot{m} : ὁ ρυθμὸς ροῆς μάζας τοῦ ρευστοῦ (kg/s).
- c_p : ἡ ειδική θερμότητα τοῦ ρευστοῦ (kJ / kg · K).
- T_1 : θερμοκρασία εἰσόδου.
- T_2 : θερμοκρασία ἐξόδου.

1.1 Μεταφορά θερμότητας με άγωγή

Κατά την μεταφορά θερμότητας με άγωγή (heat transfer by conduction) ή μεταφορά της ενέργειας λαμβάνει χώρα σε μοριακό επίπεδο. Υπάρχουν δύο ευρέως αποδεκτές θεωρίες που περιγράφουν την μεταφορά θερμότητας με άγωγή. Συμφώνως με την πρώτη θεωρία, καθώς τα μόρια ενός στερεού υλικού αποκτούν επί πλέον θερμική ενέργεια, γίνονται πιο ενεργητικά και ταλαντεύονται με αυξανόμενο πλάτος ταλάντωσης, εν όσφ βρίσκονται περιορισμένα στο πλέγμα του υλικού. Οί ταλαντώσεις αυτές διαδίδονται από ένα μόριο στο άλλο, χωρίς πραγματική μεταφορική κίνηση των μορίων. Συνεπώς, ή θερμότητα άγεται από τις περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας σε εκείνες με χαμηλότερη θερμοκρασία. Συμφώνως με την δεύτερη θεωρία, ή άγωγή παρατηρείται σε μοριακό επίπεδο λόγω της μετατόπισης των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια είναι διαδεδομένα στα μέταλλα και φέρουν θερμική και ήλεκτρική ενέργεια. Για τόν λόγο αυτόν, οί καλοί άγωγοί του ήλεκτρισμού – όπως ο άργυρος και ο χαλκός – είναι επ' ίσης καλοί άγωγοί θερμότητας. (Γιαννιώτης κ.ά., 2018).

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση της άγωγής δέν παρατηρείται φυσική κίνηση του αντικειμένου που ύφίσταται μεταφορά θερμότητας. Η άγωγή άποτελεί τόν συνηθέστερο τρόπο μεταφορής θερμότητας κατά την θέρμανση ή ψύξη άδιαφανών στερεών υλικών. (Γιαννιώτης κ.ά., 2018).

Είναι γνωστό ότι κατά την διάρκεια μιās ζεστής ήμέρας ή μεταφορά θερμότητας από τó έξωτερικό περιβάλλον προς τó έσωτερικό δια μέσου των τοιχωμάτων ενός δωματίου έξαρτάται από τó έμβαδόν του τοιχώματος (ένα τοίχωμα με μεγαλείτερο έμβαδόν έπιφανείας θα άγη περισσότερη θερμότητα), τις θερμικές ιδιότητες των δοκιμών υλικών (ó χάλυβας θα άγη περισσότερη θερμότητα από τά τουβλα), τó πάχος του τοιχώματος (ή μεταφορά θερμότητας είναι μεγαλείτερη, όσο λεπτότερο είναι τó τοίχωμα) και την διαφορά θερμοκρασίας (όσο μεγαλείτερη είναι ή έξωτερική θερμοκρασία σε σύγκριση με την έσωτερική του δωματίου, τόσο μεγαλείτερη και ή μεταφορά θερμότητας που παρατηρείται). Ο ρυθμός μεταφορής θερμότητας μέσω του τοιχώματος μπορεί να έκφρασθῆ ως έξῆς:

$$q \propto \frac{(\text{έμβαδόν τοιχώματος})(\text{διαφορά θερμοκρασίας})}{(\text{πάχος τοιχώματος})} \Leftrightarrow q \propto \frac{A \cdot dT}{dx}$$

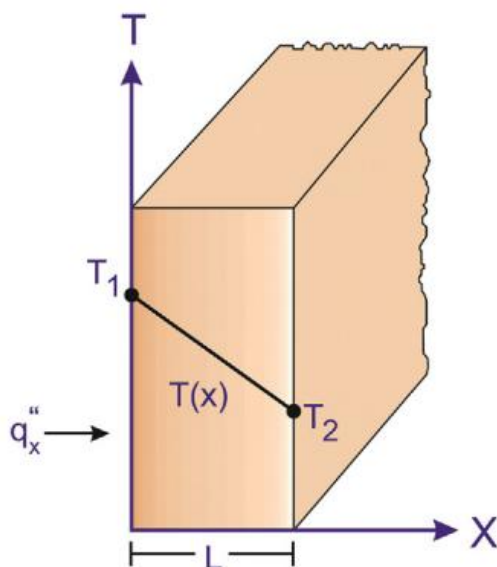
Εισάγοντας μία σταθερά αναλογικότητας, ισχύει:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

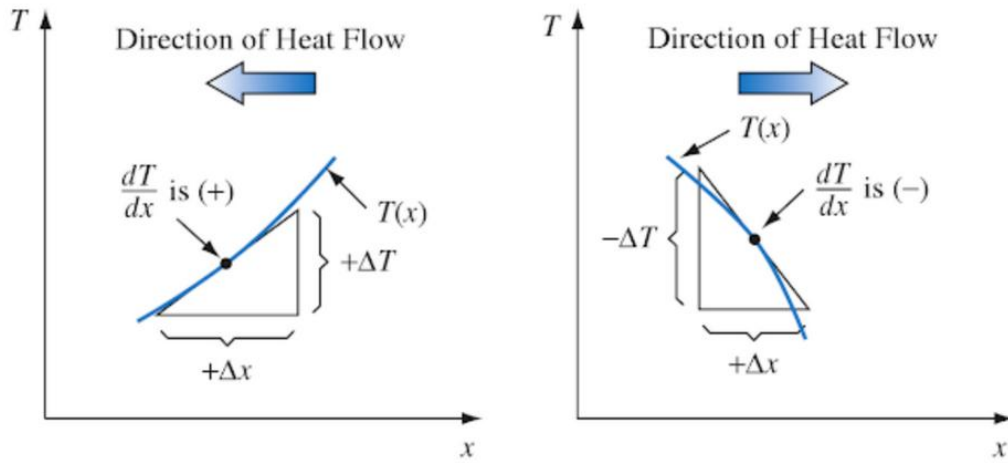
Όπου:

- q_x : ο ρυθμός ροής θερμότητας προς την κατεύθυνση της μεταφοράς θερμότητας με άγωγη (W).
- k : ή θερμική αγωγιμότητα (W / m · °C).
- A : τὸ ἔμβαδὸν ἐπιφανείας – καθέτως πρὸς τὴν κατεύθυνση τῆς μεταφοράς θερμότητας – μέσω τῆς ὁποίας μεταφέρεται ἡ θερμότητα (m²).
- T : ἡ θερμοκρασία (°C).
- x : τὸ μῆκος (m) ὡς μεταβλητή.

Ἡ ἐξίσωση $q_x = -kA \frac{dT}{dx}$ ἀποκαλεῖται καὶ νόμος τοῦ “Fourier” γιὰ τὴν ἄγωγη θερμότητας πρὸς τιμὴν τοῦ “Joseph Fourier”, ἐνὸς Γάλλου μαθηματικοῦ καὶ φυσικοῦ. Συμφώνως μὲ τὸν δεῦτερο νόμο τῆς θερμοδυναμικῆς, ἡ θερμότητα μεταφέρεται πάντοτε ἀπὸ τὴν ὑψηλότερη στὴν χαμηλότερη θερμοκρασία. Ἡ κλίση dT/dx εἶναι ἀρνητικὴ, ἐπειδὴ ἡ θερμοκρασία μειώνεται μὲ αὔξηση τῶν τιμῶν τοῦ x . Συνεπῶς, στὴν παραπάνω ἐξίσωση χρησιμοποιεῖται ἀρνητικὸ πρόσημο, γιὰ νὰ προκύψουν θετικὲς τιμὲς ροῆς θερμότητας στὴν κατεύθυνση μείωσης τῆς θερμοκρασίας.



Εικόνα 1. Μεταφορά θερμότητας με άγωγη (Ghassemi & Shahidian, 2017).



Εικόνα 2. Συμβατική χρήση προσήμου για ροή θερμότητας με άγωγη (Kreith, 1973).

1.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Όταν ένα ρευστό (ύγρο ή αέριο) έρχεται σε έπαφή με ένα στερεό σώμα (όπως ή επιφάνεια ενός τοίχου), παρατηρείται έναλλαγή θερμότητας μεταξύ του στερεού και του ρευστού, έφ' όσον υπάρχει μεταξύ των διαφορά θερμοκρασίας. Κατά την διάρκεια της θέρμανσης και ψύξης των αερίων και υγρών, τó ρεύμα του ρευστού ανταλλάσσει θερμότητα με τις στερεές επιφάνειες μέσω συναγωγής. (Γιαννιώτης κ.ά., 2018).

Η ένταση της κίνησης του ρευστού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην μεταφορά θερμότητας με συναγωγή (heat transfer by convection). Για παράδειγμα: αν ρέει αέρας με ύψηλή ταχύτητα δίπλα σε μία ψημένη και καυτή πατάτα, ή τελευταία θα κρυώσει πολύ γρηγορότερα σε σύγκριση με τó αν ή ταχύτητα του αέρα ήταν πολύ χαμηλότερη. Η σύνθετη συμπεριφορά ροής ενός ρευστού πλησίον μίας στερεής επιφάνειας περιπλέκουν τόν ύπολογοισμό της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. (Γιαννιώτης κ.ά., 2018).

Αναλόγως με τó αν ή ροή του ρευστού είναι τεχνητώς προκαλουμένη ή φυσική, υπάρχουν δύο τύποι μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή: ή εξαναγκασμένη συναγωγή και ή έλεύθερη ή φυσική συναγωγή. Η εξαναγκασμένη συναγωγή περιλαμβάνει την χρήση μηχανικών μέσων – όπως: άντλίες ή άνεμιστήρες – για την πρόκληση της κίνησης του ρευστού. Αντιθέτως, ή έλεύθερη ή φυσική συναγωγή στηρίζεται στην διαφορά πυκνότητας που προκαλούν οι διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας εντός του συστήματος. Και οι δύο αυτοί μηχανισμοί μπορεί να όδηγήσουν είτε σε στρωτή είτε σε τυρβώδη ροή του ρευστού, αν και ή τυρβώδης ροή παρατηρήται συχνότερα στην περίπτωση της εξαναγκασμένης μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. (Γιαννιώτης κ.ά., 2018).

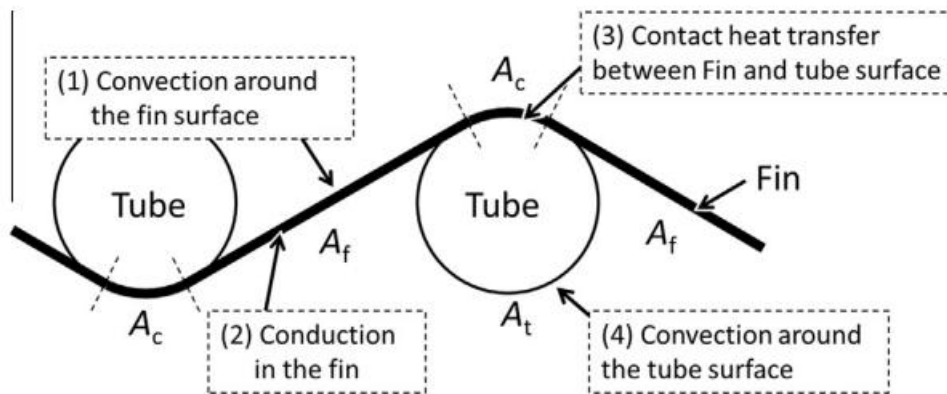
Έστω ή περίπτωση μεταφοράς θερμότητας από μία θερμαινομένη επίπεδη πλάκα “PQRS”, ή όποια έρχεται σε έπαφή με κάποιο ρευστό. Η επιφανειακή θερμοκρασία της πλάκας είναι T_s και ή θερμοκρασία του ρευστού μακριά από την επιφάνεια της πλάκας είναι T_∞ . Λόγω των ίξωδών ιδιοτήτων του ρευστού, έχει διαμορφωθή μία κατατομή ταχύτητας εντός του ρευστού με την ταχύτητα του ρευστού να μειώνεται στο μηδέν, συναντώντας την στερεή επιφάνεια. Συνολικώς, παρατηρείται ότι ό ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την στερεή επιφάνεια προς τó ρευστό είναι ανάλογος με τó έμβαδόν της επιφάνειας A του στερεού σε έπαφή με τó ρευστό και την διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών T_s και T_∞ . Ισχύει:

$$q \propto A(T_s - T_\infty) \Leftrightarrow q = hA(T_s - T_\infty)$$

Όπου:

- A : τó έμβαδόν (m^2).
- h : ό συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (μερικές φορές όνομάζεται και επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας) ($W / m^2 \cdot ^\circ C$).

Ἡ ἐξίσωση αὐτὴ ὀνομάζεται καὶ νόμος ψύξης τοῦ “Newton”. Σημειώνεται ὅτι ὁ συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητας μὲ συναγωγή (h), δὲν ἀποτελεῖ ιδιότητα τοῦ στερεοῦ ὑλικοῦ. Ὁ συντελεστὴς αὐτός, ὡστόσο, ἐξαρτᾶται ἀπὸ: ἓνα πλῆθος ιδιοτήτων τοῦ ρευστοῦ (πυκνότητα, εἰδικὴ θερμότητα, ἰζῶδες, θερμικὴ ἀγωγιμότητα), τὴν ταχύτητα τοῦ ρευστοῦ, τὴν γεωμετρία καὶ τὴν τραχύτητα τῆς ἐπιφανείας τοῦ στερεοῦ ἀντικειμένου σὲ ἐπαφὴ μὲ τὸ ρευστό. Ὑψηλὲς τιμὲς τοῦ h ἀντιστοιχοῦν σὲ ὑψηλοὺς ρυθμοὺς μεταφορᾶς θερμότητας. Ἡ ἐξαναγκασμένη συναγωγή συνεπάγεται μεγαλειότερες τιμὲς h σὲ σχέση μὲ τὴν ἐλεύθερη συναγωγή. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).



Εἰκόνα 3. Μεταφορὰ θερμότητας μὲ ἀγωγή καὶ συναγωγή σὲ ἓναν ἐναλλάκτη θερμότητας αὐλοῦ/κελύφους (Nakaso et al., 2014).

1.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία (radiation heat transfer) παρατηρείται μεταξύ δύο επιφανειών από την έκπομπή και την μετέπειτα απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ή φωτονίων). Σε αντίθεση με την αγωγή και την συναγωγή, η ακτινοβολία δεν απαιτεί κάποιο φυσικό μέσο μετάδοσης· μπορεί να συμβῆῖ ἀκόμη και στο ἀπόλυτο κενό· μεταδίδεται με την ταχύτητα τοῦ φωτός, με τρόπο ἀντίστοιχο με αὐτὸν τῆς ἡλιακῆς ακτινοβολίας πὸν βιώνει ὁ ἄνθρωπος. Τὰ ὑγρά ἀπορροφοῦν πολὺ τὴν ακτινοβολία. Τὰ ἀέρια εἶναι διαπερατὰ στὴν ακτινοβολία, με ἐξαίρεση ὠρισμένα ἀέρια πὸν ἀπορροφοῦν ακτινοβολία σὲ κάποιο συγκεκριμένο μῆκος κύματος (γιὰ παράδειγμα: τὸ ὄζον ἀπορροφᾷ τὴν ὑπεριώδη ακτινοβολία). Τὰ στερεὰ εἶναι ἀδιαπέραστα στὴν θερμικὴ ακτινοβολία. Ὡς ἐκ τούτου, στὰ προβλήματα πὸν ἀφοροῦν στὴν θερμικὴ ακτινοβολία σὲ στερεὰ ὑλικά, ὅπως στὴν περίπτωση τῶν στερεῶν τροφίμων, στὴν ἀνάλυση γίνεται ἐστίαση στὴν ἐπιφάνεια τοῦ ὑλικοῦ. Αὐτὸ ἔρχεται σὲ ἀντίθεση με τὰ μικροκύματα και τὴν ακτινοβολία ραδιοσυχνότητων, ὅπου ἡ διείσδυση τοῦ κύματος σὲ ἓνα στερεὸ ἀντικείμενο εἶναι σημαντικὴ. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

Ἅλα τὰ ἀντικείμενα σὲ θερμοκρασία πάνω ἀπὸ τὸ ἀπόλυτο 0 ἐκπέμπουν θερμικὴ ακτινοβολία. Ἡ θερμικὴ ακτινοβολία πὸν ἐκπέμπεται ἀπὸ τὴν ἐπιφάνεια ἑνὸς ἀντικειμένου εἶναι ἀνάλογη πρὸς τὴν ἀπόλυτη θερμοκρασία – ὑψωμένη στὴν τετάρτη δύναμη – και τὰ χαρακτηριστικὰ τῆς ἐπιφανείας. Πιὸ συγκεκριμένα, ὁ ρυθμὸς ἐκπομπῆς θερμότητας (ἢ ακτινοβολίας) ἀπὸ ἓνα ἀντικείμενο με ἐμβαδὸν ἐπιφανείας A ἐκφράζεται ἀπὸ τὴν ἀκόλουθη ἐξίσωση:

$$q = \sigma \varepsilon A T_A^4$$

Ὅπου:

- $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ (σταθερὰ “Stefan/Boltzmann”).
- ε : ὁ συντελεστὴς ἐκπομπῆς, ὁ ὁποῖος περιγράφει κατὰ πόσο μία ἐπιφάνεια προσομοιάζει με ἓνα μέλαν σῶμα· στὴν περίπτωση τοῦ μέλανος σώματος, ὁ συντελεστὴς ἐκπομπῆς εἶναι 1.
- A : τὸ ἐμβαδὸν τῆς ἐπιφανείας (m^2).
- T_A : ἡ ἀπόλυτη θερμοκρασία.

Κεφάλαιο 2. Μεταφορά θερμότητας σε συνθήκες σταθερής κατάστασης

Στην σταθερή κατάσταση ο χρόνος δεν επηρεάζει την κατανομή της θερμοκρασίας εντός του αντικειμένου, αν και η θερμοκρασία μπορεί να είναι διαφορετική σε διαφορετικές θέσεις εντός του αντικειμένου.

2.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε ορθογώνια πλάκα

Έστω μία πλάκα σταθερής διατομής. Η θερμοκρασία T_1 από την πλευρά X είναι γνωστή. Θα αναπτυχθεί μία εξίσωση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας T_2 στην απέναντι πλευρά Y και σε οποιαδήποτε θέση στο έσωτερικό της πλάκας υπό σταθερές συνθήκες. Για την επίλυση του προβλήματος πρέπει να χρησιμοποιηθεί αρχικώς ο νόμος του “Fourier”.

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

Οι όριακές συνθήκες είναι οι εξής:

$$x = x_1, \quad T = T_1$$

$$x = x_2, \quad T = T_2$$

Με διαχωρισμό των μεταβλητών στην εξίσωση $q_x = -kA \frac{dT}{dx}$, ισχύει:

$$\frac{q_x}{A} dx = -k dT$$

Όλοκληρώνοντας και αντικαθιστώντας τα όρια, ισχύει:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{q_x}{A} dx = - \int_{T_1}^{T_2} k dT$$

Δεδομένου ότι τα q_x και A είναι ανεξάρτητα του x και του k θεωρείται ανεξάρτητο της T , η εξίσωση $\int_{x_1}^{x_2} \frac{q_x}{A} dx = - \int_{T_1}^{T_2} k dT$ μπορεί να αναδιαταχθῆ ὡς εξής:

$$\frac{q_x}{A} \int_{x_1}^{x_2} dx = -k \int_{T_1}^{T_2} dT$$

Τέλος, ολοκληρώνοντας τὴν ἐξίσωση, ἰσχύει:

$$\frac{q_x}{A} (x_2 - x_1) = -k(T_2 - T_1) \Leftrightarrow q_x = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)} \Leftrightarrow T_2 = T_1 - \frac{q_x}{kA} (x_2 - x_1)$$

Γιὰ τὸν προσδιορισμὸ τῆς θερμοκρασίας T σὲ οποιαδήποτε θέση x ἐντὸς τῆς πλάκας, μποροῦν νὰ αντικατασταθοῦν τὰ T_2 καὶ x_2 μὲ τὴν ἄγνωστη T καὶ τὴν μεταβλητὴ ἀπόστασης x ἀντιστοίχως καὶ προκύπτει:

$$T = T_1 - \frac{q_x}{kA} (x - x_1)$$

2.1.1 Θερμική αντίσταση

Συμφώνως με τὸν νόμο τοῦ “Ohm”, τὸ ἠλεκτρικὸ ρεῦμα I εἶναι εὐθέως ἀνάλογο μετὰ τὴν διαφορὰ τάσης E_V καὶ ἀντιστρόφως ἀνάλογο μετὰ τὴν ἠλεκτρικὴ ἀντίσταση R_E :

$$I = \frac{E_V}{R_E}$$

Ἄν γίνῃ ἀναδιάταξη τῶν ὄρων τῆς ἐξίσωσης $q_x = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$, ἰσχύει:

$$q_x = \frac{(T_1 - T_2)}{\left[\frac{(x_2 - x_1)}{kA} \right]} \Leftrightarrow q_x = \frac{T_1 - T_2}{R_t}$$

Ἐπομένως, ἰσχύει:

$$R_t = \frac{(x_2 - x_1)}{kA}$$

2.2 Μεταφορά θερμότητας με άγωγη διᾱ μέσου σωληνωτοṷ άγωγοṷ

Έστω ἓνας μακρὸς καὶ κενὸς κύλινδρος: ἔσωτερικῆς ἀκτῖνος r_i , ἔξωτερικῆς ἀκτῖνος r_o καὶ μήκους L . Έστω ἡ θερμοκρασία τοṷ ἔσωτερικοṷ τοιχώματος T_i καὶ τοṷ ἔξωτερικοṷ τοιχώματος T_o . Θα ὑπολογισθῆ ὁ ρυθμὸς μεταφορᾶς θερμότητας κατὰ μήκος τῆς ἀκτῖνος τοṷ σωλῆνος. Πρέπει νὰ θεωρηθῆ ὅτι ἡ θερμικῆ ἀγωγιμότητα τοṷ μετάλλου παραμένει σταθερῆ με τὴν θερμοκρασία. Ὁ νόμος τοṷ “Fourier” σὲ κυλινδρικές συντεταγμένες μπορεῖ νὰ γραφθῆ ὡς ἑξῆς:

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr}$$

Όπου:

q_r : ὁ ρυθμὸς μεταφορᾶς θερμότητας κατὰ τὴν διεύθυνση τῆς ἀκτῖνος.

Ἀντικαθιστῶντας γιὰ τὴν περιμετρικῆ ἐπιφάνεια τοṷ σωλῆνος, ἰσχύει:

$$q_r = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr}$$

Οἱ ὁριακὲς συνθῆκες εἶναι οἱ ἑξῆς:

$$T = T_i, r = r_i$$

$$T = T_o, r = r_o$$

Μὲ ἀναδιάταξη τῆς ἑξίσωσης $q_r = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr}$ σχηματίζεται τὸ ὀλοκλήρωμα:

$$\frac{q_r}{2\pi L} \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = -k \int_{T_i}^{T_o} dT \Leftrightarrow \frac{q_r}{2\pi L} \ln r \Big|_{r_i}^{r_o} = -k(T) \Big|_{T_i}^{T_o} \Leftrightarrow q_r = \frac{2\pi Lk(T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}$$

Καὶ πάλι μπορεῖ νὰ χρησιμοποιηθῆ τὸ ἀνάλογο τῆς ἠλεκτρικῆς ἀντίστασης, γιὰ νὰ γραφθῆ μία ἔκφραση τῆς θερμικῆς ἀντίστασης γιὰ τὴν περίπτωση ἑνὸς ἀντικειμένου κυλινδρικοῦ σχήματος. Ἀναδιατάσσοντας τοὺς ὅρους τῆς ἐξίσωσης $q_r = \frac{2\pi Lk(T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}$,

προκύπτει:

$$q_r = \frac{(T_i - T_o)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi Lk} \right]}$$

Συγκρίνοντας τὴν ἐξίσωση $q_r = \frac{(T_i - T_o)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi Lk} \right]}$ μὲ τὴν ἐξίσωση $q_x = \frac{T_1 - T_2}{R_t}$,

προκύπτει ἡ θερμικὴ ἀντίσταση κατὰ τὴν διεύθυνση τῆς ἀκτῖνος τοῦ κυλίνδρου ὡς ἑξῆς:

$$R_t = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi Lk}$$

2.3 Άγωγη θερμότητας σε σύνθετα τοιχώματα

2.3.1 Επίπεδο τοίχωμα από διαφορετικά υλικά σε στρώσεις

Θα εξετασθῆ ἡ μεταφορά θερμότητας διὰ μέσου ἑνὸς συνθέτου τοιχώματος, κατασκευασμένου ἀπὸ διάφορα υλικά μὲ διαφορετικὲς θερμικὲς ἀγωγιμότητες καὶ διαφορετικὰ πάχη. Ἐνα τέτοιο παράδειγμα ἀποτελεῖ τὸ τοίχωμα ἑνὸς ψυχομένου θαλάμου ἀποθήκευσης, τὸ ὁποῖο εἶναι κατασκευασμένο ἀπὸ διαφορετικὰ στρώματα υλικῶν μὲ διαφορετικὲς μονωτικὲς ιδιότητες. Ὅλα τὰ υλικά εἶναι διατεταγμένα σὲ σειρά στὴν κατεύθυνση τῆς μεταφορᾶς θερμότητας. Ἀπὸ τὸν νόμο τοῦ “Fourier”:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

Ἡ ἐξίσωση μπορεῖ νὰ γραφθῆ ὡς ἐξῆς:

$$\Delta T = -\frac{q \Delta x}{kA}$$

Ἐστῶσαν τὰ υλικά B καὶ C καὶ D . Γιὰ τὰ υλικά B καὶ C καὶ D , ἰσχύει:

$$\Delta T_B = -\frac{q \Delta x_B}{k_B A}$$

$$\Delta T_C = -\frac{q \Delta x_C}{k_C A}$$

$$\Delta T_D = -\frac{q \Delta x_D}{k_D A}$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \Delta T_B + \Delta T_C + \Delta T_D$$

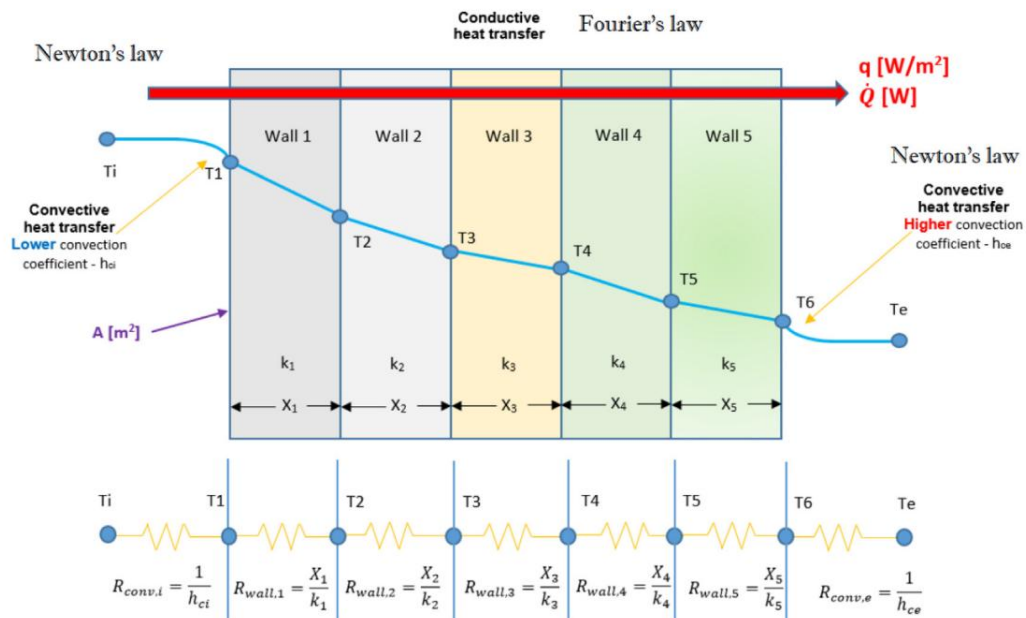
Από τις εξισώσεις $\Delta T = -\frac{q\Delta x}{kA}$ και $\Delta T_B = -\frac{q\Delta x_B}{k_B A}$ και $\Delta T_C = -\frac{q\Delta x_C}{k_C A}$ και $\Delta T_D = -\frac{q\Delta x_D}{k_D A}$ και $\Delta T = T_1 - T_2 = \Delta T_B + \Delta T_C + \Delta T_D$ προκύπτει:

$$T_1 - T_2 = -\left(\frac{q\Delta x_B}{k_B A} + \frac{q\Delta x_C}{k_C A} + \frac{q\Delta x_D}{k_D A}\right) \Leftrightarrow T_1 - T_2 = -\frac{q}{A}\left(\frac{\Delta x_B}{k_B} + \frac{\Delta x_C}{k_C} + \frac{\Delta x_D}{k_D}\right) \Leftrightarrow$$

$$q = \frac{T_2 - T_1}{\left(\frac{\Delta x_B}{k_B A} + \frac{\Delta x_C}{k_C A} + \frac{\Delta x_D}{k_D A}\right)}$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές θερμικής αντίστασης για κάθε στρώμα, ή εξίσωση $q = \frac{T_2 - T_1}{\left(\frac{\Delta x_B}{k_B A} + \frac{\Delta x_C}{k_C A} + \frac{\Delta x_D}{k_D A}\right)}$ μπορεί να γραφθῆ ὡς ἑξῆς:

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R_{tB} + R_{tC} + R_{tD}}$$



Εικόνα 4. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή μέσω ενός συνθέτου τοιχώματος μαζί με τὸ κύκλωμα θερμικῆς ἀντίστασης (Paraschiv et al., 2020)

2.3.2 Κυλινδρικός άγωγός από διαφορετικά υλικά σε στρώσεις

Έστω ένας κυλινδρικός άγωγός, κατασκευασμένος από δύο στρώματα υλικών: A και B . Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ένας σωλήνας από χάλυβα, καλυμμένος από ένα στρώμα μονωτικού υλικού. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στον σύνθετο αυτόν σωλήνα μπορεί να υπολογισθί με τόν κάτωθι τρόπο. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μέσω ενός κυλίνδρου μονού τοιχώματος είναι ό εξής:

$$q_r = \frac{(T_i - T_o)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi Lk} \right]}$$

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μέσα από ένα σύνθετο κύλινδρο με χρήση τών θερμικών αντίστασεων τών δύο στρωμάτων είναι ό εξής:

$$q_r = \frac{(T_1 - T_3)}{R_{tA} + R_{tB}}$$

Αντικαθιστώντας τίς μεμονωμένες τιμές θερμικής αντίστασης, ισχύει:

$$q_r = \frac{(T_1 - T_3)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk_A} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi Lk_B}}$$

Η προηγούμενη εξίσωση είναι χρήσιμη για τόν υπολογισμό του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας διά μέσου ενός πολυστρωματικού κυλίνδρου. Σημειώνεται ότι: αν υπήρχαν τρία στρώματα διά μέσου τών δύο επιφανειών με θερμοκρασίες T_1 και T_3 , τότε άπλως πρέπει να προστεθί άλλος ένας όρος θερμικής αντίστασης στον παρονομαστή.

2.4 Υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή

Ο προσδιορισμός του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής είναι περίπλοκος, εξ αιτίας της κίνησης του ρευστού. Κατά την ροή ενός ρευστού πάνω σε μία στερεή επιφάνεια αναπτύσσεται μία κατατομή ταχύτητας λόγω των ιξωδών ιδιοτήτων του ρευστού υλικού. Το ρευστό δίπλα στο τοίχωμα δεν κινείται, αλλά κολλᾷ σε αυτό με την ταχύτητά του να αυξάνεται όσο απομακρύνεται από το τοίχωμα. Ένα όριακο στρώμα αναπτύσσεται εντός του ρέοντος ρευστού, το οποίο επηρεάζεται σημαντικῶς από το ιξώδες του ρευστού. Το στρώμα αυτό κινείται προς το κέντρο του σωλήνος. Η παραβολική κατατομή ταχύτητας υπό συνθήκες στρωτής ροής δείχνει ότι η ἔλξη που προκαλείται από το κολλῶδες στρώμα σε ἔπαφή με την στερεή επιφάνεια επηρεάζει την ταχύτητα στο κέντρο του σωλήνος. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

Όπως και με την κατατομή της ταχύτητας, μία αντίστοιχη κατατομή θερμοκρασίας αναπτύσσεται εντός του ρευστού, καθὼς αυτό ρέει στὸ ἐσωτερικὸ ἑνὸς σωλήνος. Ἐστω ἡ θερμοκρασία τῆς ἐπιφανείας τοῦ σωλήνος, ἡ ὁποία διατηρεῖται σταθερὴ σὲ T_s καὶ τὸ ὑγρὸ εἰσέρχεται σὲ σταθερὴ θερμοκρασία T_i . Μία θερμοκρασιακὴ κατατομὴ σχηματίζεται, ἐπειδὴ τὸ ρευστὸ ποὺ ἔρχεται σὲ ἔπαφή με τὴν ἐπιφάνεια τοῦ σωλήνος φθάνει με γρήγορο τρόπο τὴν θερμοκρασία τοῦ τοιχώματος, δημιουργῶντας ἕνα δυναμικὸ θερμοκρασίας (μία βαθμίδα θερμοκρασίας). Ἐνα ὀριακὸ στρώμα θερμοκρασίας αναπτύσσεται, τὸ ὁποῖο στὸ τέλος τῆς θερμικῆς περιοχῆς εἰσόδου ἐκτείνεται ἕως τὸν ἄξονα συμμετρίας τοῦ σωλήνος. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

Ὡς ἐκ τούτου, κατὰ τὴν θέρμανση ἢ ψύξη ἑνὸς ρευστοῦ ποὺ ρέει ἐντὸς ἑνὸς σωλήνος, ἀναπτύσσονται δύο ὀριακὰ στρώματα: ἕνα ὑδροδυναμικὸ ὀριακὸ στρώμα καὶ ἕνα θερμικὸ ὀριακὸ στρώμα. Τὰ ὀριακὰ αὐτὰ στρώματα ἔχουν σημαντικὴ ἐπίδραση στὸν ρυθμὸ μεταφοράς θερμότητας μεταξὺ τῆς ἐπιφανείας τοῦ σωλήνος καὶ τοῦ ρευστοῦ. Οἱ μαθηματικοὶ ὑπολογισμοὶ ποὺ ἐμπλέκονται στὴν ἀναλυτικὴ προσέγγιση αὐτοῦ τοῦ ἀντικειμένου εἶναι περίπλοκοι. Ὡστόσο, ὑπάρχει μίᾳ ἐξ ἴσου χρήσιμη διαδικασία ποὺ ὀνομάζεται «ἐμπειρικὴ προσέγγιση», ἡ ὁποία χρησιμοποιεῖται εὐρέως γιὰ τὸν προσδιορισμὸ τοῦ ρυθμοῦ μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. Τὸ μειονέκτημα τῆς ἐμπειρικῆς προσέγγισης εἶναι ὅτι ἀπαιτεῖ μεγάλο ἀριθμὸ πειραμάτων γιὰ τὴν συλλογὴ τῶν ἀπαιτούμενων δεδομένων. Τὸ πρόβλημα αὐτὸ ἀντιμετωπίζεται καὶ ἡ ἀνάλυση δεδομένων διατηρεῖται σὲ διαχειρίσιμα ἐπίπεδα με τὴν χρῆση ἀδιάστατων ἀριθμῶν. Γιὰ τὴν διατύπωση αὐτῆς τῆς προσέγγισης πρέπει πρῶτα νὰ ὑπολογισθοῦν καὶ νὰ ἀναλυθοῦν οἱ ἀπαιτούμενοι ἀδιάστατοι ἀριθμοί: ὁ ἀριθμὸς “Reynolds” (N_{Re}), ὁ ἀριθμὸς “Nusselt” (N_{Nu}) καὶ ὁ ἀριθμὸς “Prandtl” (N_{Pr}). (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

Ο πρώτος αδιάστατος αριθμός που απαιτείται για την ανάλυση των δεδομένων είναι ο αριθμός “Reynolds”. Ο αριθμός “Reynolds” περιέχει πληροφορίες των δυνάμεων αδρανείας και ιξώδους που συναντώνται σε ένα ρευστό και υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$N_{Re} = \frac{\text{δυνάμεις αδρανείας}}{\text{ιξώδεις δυνάμεις}} \Leftrightarrow N_{Re} = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu}$$

Όπου:

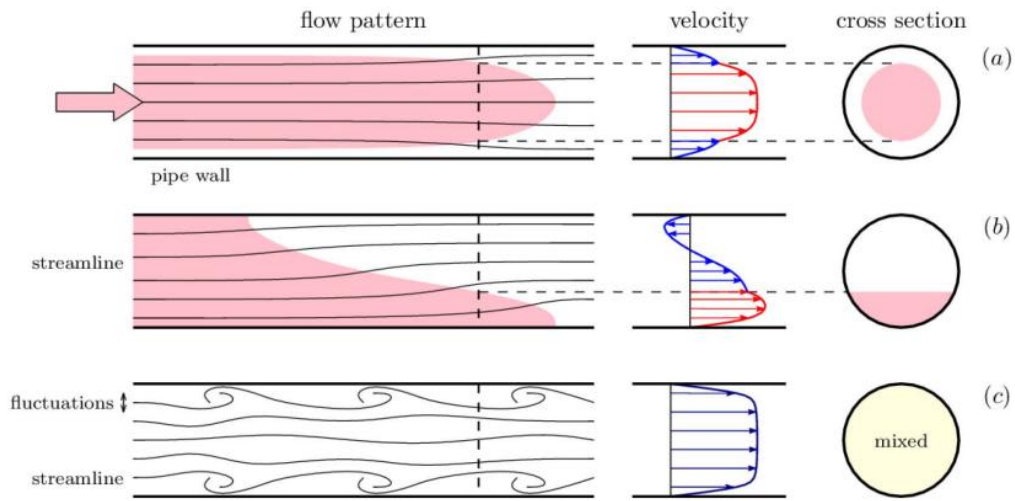
- ρ : ή πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3).
- \bar{u} : ή μέση ταχύτητα του ρευστού (m/s).
- D : ή διάμετρος του σωλήνος (m).
- μ : τὸ ιξώδες του ρευστού ($\text{Pa} \cdot \text{s}$).

Ἄν ἀντὶ τῆς μέσης ταχύτητας μετρηῆται ἢ δίδεται ὁ ρυθμὸς ροῆς μάζας m , ἰσχύει:

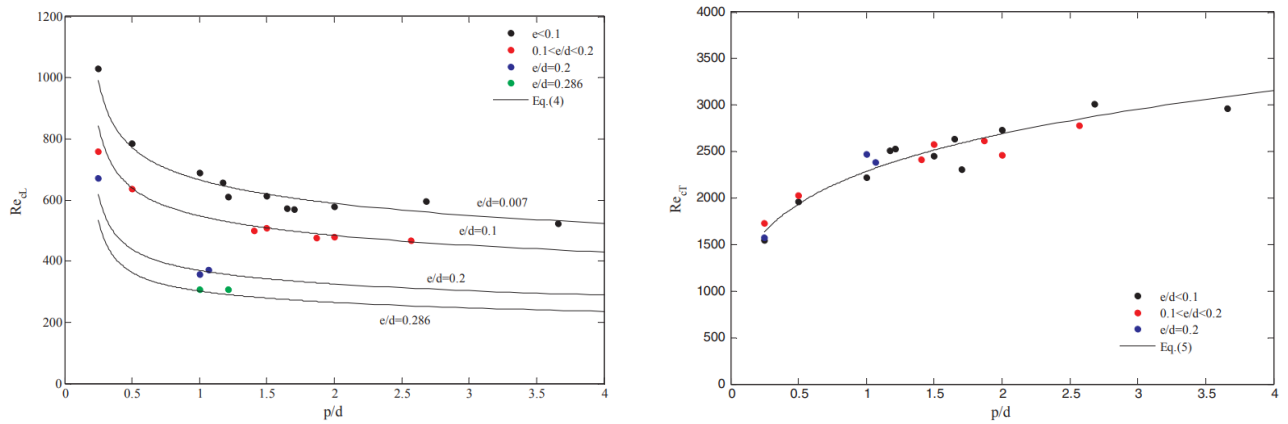
$$N_{Re} = \frac{4m}{\mu \pi D}$$

Ο αριθμός “Reynolds” παρέχει γνώσεις για την απώλεια ενέργειας που προκαλείται λόγω του ιξώδους. Όταν οι ιξώδεις δυνάμεις έχουν δεσπόζουσα επίδραση στην απώλεια ενέργειας, ο αριθμός “Reynolds” είναι μικρός ή η ροή είναι στην στρωτή περιοχή. Όσο ο αριθμός “Reynolds” είναι ίσος ή μικρότερος από 2100, η ροή έχει γραμμικά χαρακτηριστικά. Ένας αριθμός “Reynolds” μεταξύ 2100 και 4000 σηματοδοτεί μία μεταβατική ροή. Ένας αριθμός “Reynolds” μεγαλύτερος από 4000 υποδεικνύει τυρβώδη ροή που δηλώνει μικρή επίδραση των ιξωδών δυνάμεων στην απώλεια της ενέργειας. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

Ένα ρευστό μπορεί να απεικονισθῆ ὡς μάζα ἀποτελουμένη ἀπὸ διάφορα στρώματα. Τὸ ρευστὸ ἀρχίζει νὰ κινῆται, ὅταν δράση πάνω του μία δύναμη. Ἡ σχετική κίνηση ἑνὸς στρώματος ρευστοῦ σὲ σχέση μὲ κάποιον ἄλλο ὀφείλεται στὴν δύναμη ποὺ ὀνομάζεται «δύναμη διάτμησης» ἢ «διατμητική δύναμη» (shearing force), ἢ ὁποία ἐφαρμόζεται σὲ κατεύθυνση παράλληλη πρὸς τὴν ἐπιφάνεια ἐπὶ τῆς ὁποίας ἐνεργεῖ. Ἀπὸ τὸν δεύτερο νόμο κίνησης τοῦ Νεύτωνος ἰσχύει τὸ ἐξῆς: μία δύναμη ἀντίστασης στὴν κίνηση ἀναπτύσσεται ἀπὸ τὸ ρευστὸ μὲ κατεύθυνση ἀντίθετη πρὸς τὴν δύναμη διάτμησης καὶ ἢ ὁποία πρέπει ἐπ’ ἴσης νὰ δρᾷ σὲ κατεύθυνση παράλληλη πρὸς τὴν ἐπιφάνεια τῶν στρωμάτων. Αὐτὴ ἢ δύναμη ἀντίστασης εἶναι τὸ μέτρο μιᾶς σημαντικῆς ιδιότητος τῶν ρευστῶν ποὺ ὀνομάζεται: ιξώδες (viscosity). (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).



Εικόνα 5. Στρωτή και μεταβατική και τυρβώδης ροή σε ένα σωλήνα (Tardy et al., 2017).



Εικόνα 6. Γραφικές απεικονίσεις του κρίσιμου αριθμού “Reynolds” (Pérez-García et al., 2018).

Ο δεύτερος αδιάστατος αριθμός που απαιτείται για την ανάλυση των δεδομένων είναι ο αριθμός “Nusselt”, ο οποίος αποτελεί την αδιάστατη μορφή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (h). Έστω ένα στρώμα ρευστού, πάχους l . Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του άνω και κάτω μέρους του στρώματος είναι ΔT . Αν το ρευστό παραμείνη στάσιμο, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας θα οφείληται σε άγωγη και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας θα είναι:

$$q_{\text{άγωγη}} = q_{\text{conduction}} = -kA \frac{\Delta T}{l}$$

Ωστόσο, αν το στρώμα του ρευστού κινηται, ή μεταφορά θερμότητας θα οφείληται σε συναγωγή και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με χρήση του νόμου ψύξης του “Newton” θα είναι:

$$q_{\text{συναγωγή}} = q_{\text{convection}} = hA\Delta T$$

Διαιρώντας τις εξισώσεις $q_{\text{άγωγη}} = q_{\text{conduction}} = -kA \frac{\Delta T}{l}$ και $q_{\text{συναγωγή}} = q_{\text{convection}} = hA\Delta T$, ισχύει:

$$\frac{q_{\text{συναγωγή}}}{q_{\text{άγωγη}}} = \frac{q_{\text{convection}}}{q_{\text{conduction}}} = \frac{hA\Delta T}{kA \frac{\Delta T}{l}} = \frac{hl}{k} = N_{Nu}$$

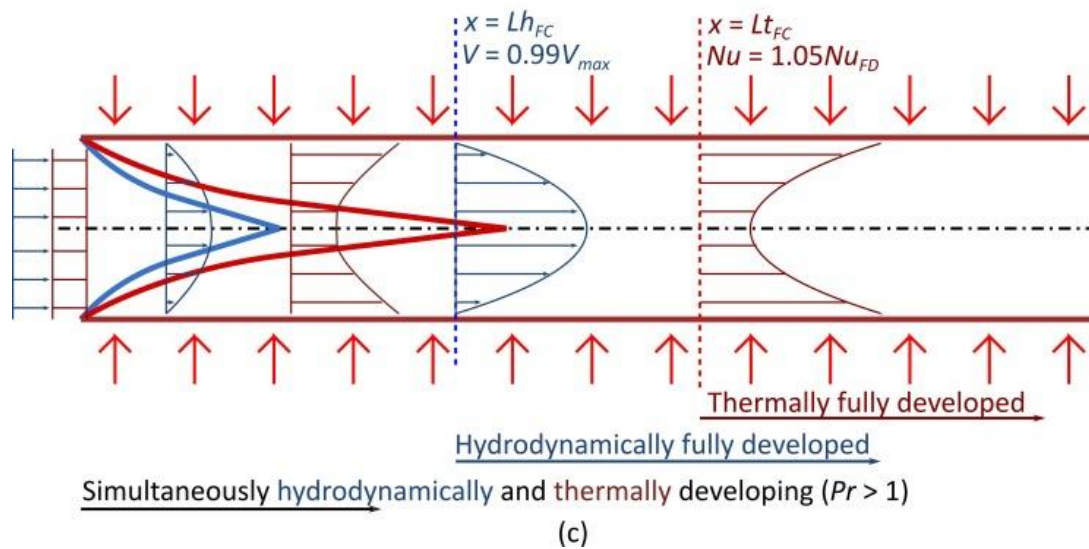
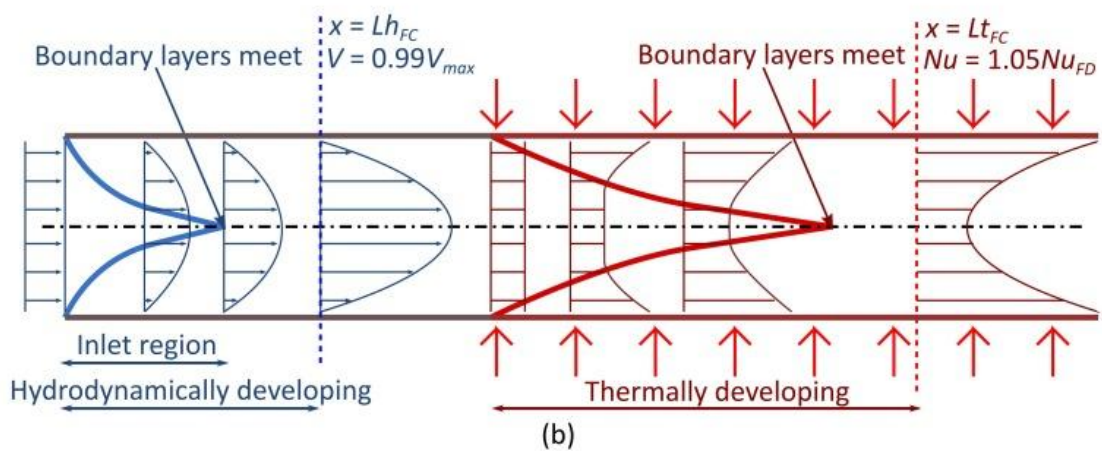
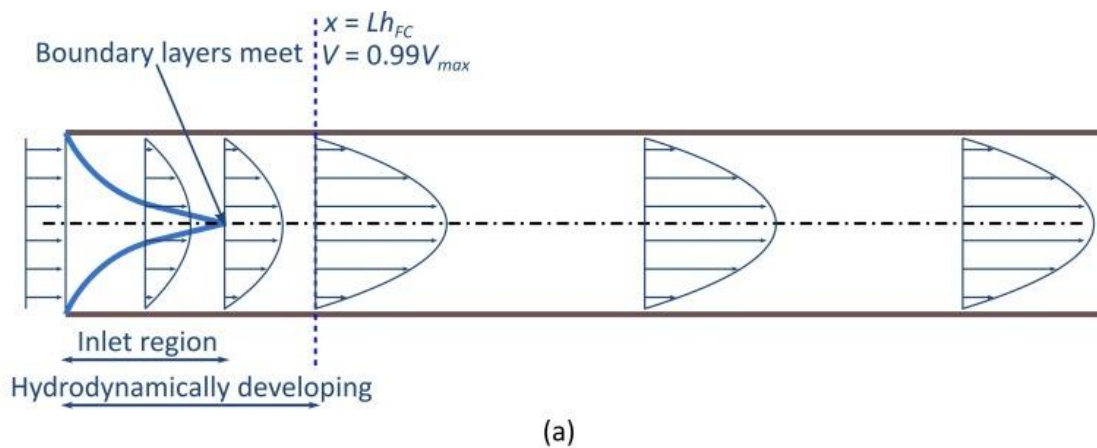
Αντικαθιστώντας το πάχος l με ένα πιο γενικό όρο για την διάσταση, την χαρακτηριστική διάσταση d_c , ισχύει:

$$N_{Nu} = \frac{hd_c}{k}$$

Όπου:

- h : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή ($\text{W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).
- d_c : ή χαρακτηριστική διάσταση (m).
- k : ή θερμική αγωγιμότητα του ρευστού ($\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$).

Ο αριθμός “Nusselt” μπορεί να θεωρηθῆ ὡς ἡ αὔξηση τοῦ ρυθμοῦ μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγῆς σὲ σχέση με τὴν μεταφορά με ἄγωγη. Ὡς ἐκ τούτου, ἂν $N_{Nu} = 1$, δὲν παρατηρεῖται αὔξηση τοῦ ρυθμοῦ μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγῆς. Ὡστόσο, ἂν $N_{Nu} = 5$, ὁ ρυθμὸς μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή λόγω τῆς κίνησης τοῦ ρευστοῦ εἶναι πενταπλάσιος τοῦ ρυθμοῦ μεταφοράς θερμότητας ποὺ θὰ προέκυπτε, ἂν τὸ ρευστὸ σὲ ἐπαφή με τὴν στερεὴ ἐπιφάνεια ἦταν στάσιμο. Τὸ γεγονός ὅτι: ἐμφυσῶντας ἀέρα πάνω ἀπὸ μία θερμὴ ἐπιφάνεια, γιὰ νὰ ψυχθῆ ταχύτερα, οφείλεται στὸν αὐξημένο ἀριθμὸ “Nusselt” καὶ κατὰ συνέπεια στὸν αὐξημένο ρυθμὸ μεταφοράς θερμότητας. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).



Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση των υδροδυναμικών και θερμικών όριακών στρωμάτων και των μηκών εισόδου για: (a) υδροδυναμικώς αναπτυσσόμενη ισοθερμική ροή, (b) υδροδυναμικώς αναπτυσσόμενη ροή, (c) υδροδυναμικώς και θερμικώς αναπτυσσόμενη ροή. (Everts & Meyer, 2020).

Ο τρίτος αδιάστατος αριθμός για την εμπειρική προσέγγιση του προσδιορισμού της μεραφοῦς θερμότητας με συναγωγή είναι ο αριθμός “Prandtl” (N_{Pr}), ο οποίος περιγράφει τὸ πάχος τοῦ ὑδροδυναμικοῦ ὀριακοῦ στρώματος σὲ σύγκριση με αὐτὸ τοῦ θερμικοῦ ὀριακοῦ στρώματος· εἶναι ὁ λόγος τῆς μοριακῆς διάχυσης τῆς ὀρμῆς πρὸς τὴν μοριακὴ διάχυση τῆς θερμότητας.

$$N_{Pr} = \frac{\text{μοριακὴ διάχυση ὀρμῆς}}{\text{μοριακὴ διάχυση θερμότητας}} \Leftrightarrow N_{Pr} = \frac{\text{κινηματικὸ ἰξῶδες}}{\text{θερμικὴ διαχυτότητα}} \Leftrightarrow N_{Pr} = \frac{\nu}{a}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$$a = \frac{k}{\rho C_p}$$

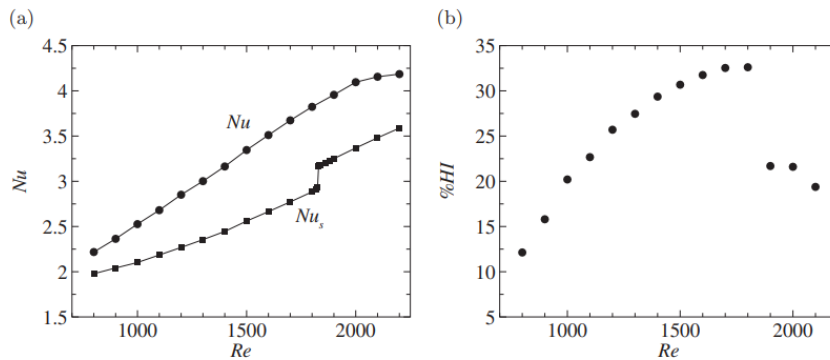
Ἐπομένως, ἰσχύει:

$$N_{Pr} = \frac{\mu C_p}{k}$$

Ὅπου:

- μ : τὸ ἰξῶδες τοῦ ῥευστοῦ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$).
- c_p : ἡ εἰδικὴ θερμότητα ($\text{kJ} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$).
- k : ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότητα τοῦ ῥευστοῦ ($\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$).

Ἄν $N_{Pr} = 1$, τότε τὸ πάχος τοῦ ὑδροδυναμικοῦ καὶ τοῦ θερμικοῦ ὀριακοῦ στρώματος θὰ εἶναι ἀκριβῶς τὸ ἴδιο. Ἀπὸ τὴν ἄλλη πλευρά, ἂν $N_{Pr} \ll 1$, ἡ μοριακὴ διαχυτότητα τῆς θερμότητας θὰ εἶναι πολὺ μεγαλειότερη ἀπὸ ἐκείνη τῆς ὀρμῆς. Ὡς ἐκ τούτου, ἡ θερμότητα θὰ διαχέεται ταχύτατα, ὅπως στὴν περίπτωση ἑνὸς ὑγροῦ μετάλλου πὺν ῥέει στὸ ἐσωτερικὸ ἑνὸς σωλῆνος. Γιὰ τὰ ἀέρια ὁ N_{Pr} εἶναι περίπου 0,7 καὶ γιὰ τὸ νερὸ εἶναι περίπου 10. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).



Εικόνα 8. (a) Διάγραμμα του αριθμού “Nusselt” πάνω από την θερμαιομένη επιφάνεια συναρτήσει του αριθμού “Reynolds” για ένα ταλαντούμενο και ακίνητο κύλινδρο. (b) Η ποσοστιαία αύξηση της μεταφοράς θερμότητας που παράγεται από την ταλάντωση του κυλίνδρου πάνω από έναν ακίνητο κύλινδρο ως συνάρτηση του αριθμού “Reynolds”. (Hussam et al., 2012).

Έχει προσδιορισθή πειραματικώς ότι για δεδομένο ρευστό με σταθερό αριθμό “Prandtl”, λαμβάνονται γραφήματα ευθείας γραμμής σε λογαριθμικές κλίμακες. Αυτό το είδος γραφικής σχέσης μπορεί να εκφρασθή με μία εξίσωση της μορφής:

$$N_{Nu} = C N_{Re}^m N_{Pr}^n$$

Όπου:

C, m, n : συντελεστές.

Με αντικατάσταση των πειραματικώς λαμβανομένων συντελεστών στην εξίσωση $N_{Nu} = C N_{Re}^m N_{Pr}^n$, προκύπτουν εμπειρικές σχέσεις που είναι ειδικές για κάθε δεδομένη κατάσταση. Άρκετοι έρευνητές έχουν προσδιορίσει τις εμπειρικές αυτές συσχετίσεις για ένα μεγάλο εύρος λειτουργικών συνθηκών, όπως για ροή ρευστού: μέσα σε ένα σωλήνα, γύρω από ένα σωλήνα ή γύρω από μία σφαίρα. Διαφορετικές συσχετίσεις έχουν προκύψει, αναλόγως με το αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης.

2.4.1 Έξαναγκασμένη συναγωγή

Στην έξαναγκασμένη συναγωγή ένα ρευστό αναγκάζεται να κινηθῆ πάνω από μία στερεή επιφάνεια με χρήση έξωτερικῶν μηχανικῶν μέσων, ὅπως μέ: ἕναν ἠλεκτρικὸ ἀνεμιστήρα, μία ἀντλία ἢ ἕναν ἀναδευτήρα. Ἡ γενικὴ συσχέτιση μεταξὺ τῶν ἀδιαστάτων ἀριθμῶν εἶναι ἡ ἐξῆς:

$$N_{Nu} = \Phi(N_{Re}, N_{Pr})$$

Τὸ Φ δηλώνει συνάρτηση.

2.4.1.1 Στρωτὴ ροὴ σὲ σωλῆνες

Σὲ συνθῆκες πλήρους ἀνάπτυξης με σταθερὴ θερμοκρασία ἐπιφανείας τοῦ σωλῆνος ἰσχύει: $N_{Nu} = 3,66$. Ὅπου:

- ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότητα τοῦ ρευστοῦ λαμβάνεται στὴν μέση θερμοκρασία T_{∞} τοῦ ρευστοῦ.
- d_c εἶναι ἡ ἐσωτερικὴ διάμετρος τοῦ σωλῆνος.

Σὲ συνθῆκες πλήρους ἀνάπτυξης με ὁμοίμορφη ροὴ θερμότητας στὴν ἐπιφάνεια ἰσχύει: $N_{Nu} = 4,36$. Ὅπου:

- ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότητα τοῦ ρευστοῦ λαμβάνεται στὴν μέση θερμοκρασία T_{∞} τοῦ ρευστοῦ.
- d_c εἶναι ἡ ἐσωτερικὴ διάμετρος τοῦ σωλῆνος.

Γιὰ τὴν περιοχὴ εἰσόδου καὶ πλήρως ἀνεπτυγμένες συνθῆκες ροῆς ἰσχύει:

$$N_{Nu} = 1,86 \left(N_{Re} \cdot N_{Pr} \cdot \frac{d_c}{L} \right)^{0,33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Ὅπου:

- L : τὸ μῆκος τοῦ σωλῆνος (m).
- d_c : ἡ χαρακτηριστικὴ διάσταση, ἡ ὁποία εἶναι ἡ ἐσωτερικὴ διάμετρος τοῦ σωλῆνος (m).

Ὅλες οἱ φυσικὲς ιδιότητες ὑπολογίστηκαν στὴν μέση θερμοκρασία T_{∞} τοῦ ρευστοῦ ἐκτὸς ἀπὸ τὴν μ_w , ἡ ὁποία ὑπολογίζεται στὴν θερμοκρασία τῆς ἐπιφανείας τοῦ τοιχώματος.

2.4.1.2 Μεταβατική ροή σέ σωλῆνες

Για ἀριθμούς “Reynolds” μεταξύ 2100 καὶ 10.000 ἰσχύει:

$$N_{Nu} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (N_{Re} - 1000) N_{Pr}}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (N_{Pr}^{2/3} - 1)}$$

Όλες οἱ ιδιότητες τοῦ ρευστοῦ ὑπολογίζονται στὴν μέση θερμοκρασία T_∞ τοῦ ρευστοῦ καὶ d_c εἶναι ἡ ἐσωτερικὴ διάμετρος τοῦ σωλῆνος καὶ ὁ συντελεστὴς τριβῆς f λαμβάνεται γιὰ λείους σωλῆνες χρησιμοποιῶντας τὴν ἀκόλουθη σχέση:

$$f = \frac{1}{(0,790 \ln N_{Re} - 1,64)^2}$$

2.4.1.3 Τυρβώδης ροή σέ σωλῆνες

Ἡ ἀκόλουθη ἐξίσωση μπορεῖ νὰ χρησιμοποιηθῆται γιὰ ἀριθμούς “Reynolds” μεγαλειτέρους ἀπὸ 10.000:

$$N_{Nu} = 0,023 N_{Re}^{0,8} \cdot N_{Pr}^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14}$$

Οἱ ιδιότητες τοῦ ρευστοῦ ὑπολογίζονται μὲ βάση τὴν μέση θερμοκρασία T_∞ τοῦ στρώματος τοῦ ρευστοῦ, ἐκτὸς ἀπὸ τὴν μ_w ποὺ ὑπολογίζεται στὴν θερμοκρασία τοῦ τοιχώματος καὶ d_c εἶναι ἡ ἐσωτερικὴ διάμετρος τοῦ σωλῆνος. Ἡ ἐξίσωση ἰσχύει γιὰ σταθερὴ θερμοκρασία ἐπιφανείας καὶ ὁμοίομορφες συνθῆκες ροῆς θερμότητας.

2.4.2 Έλεύθερη ή φυσική συναγωγή

Η έλεύθερη συναγωγή παρατηρείται λόγω της διαφορᾶς πυκνότητας μεταξύ τῶν ρευστῶν, καθὼς αὐτὰ ἔρχονται σὲ ἐπαφή μὲ μία θερμαινομένη ἐπιφάνεια. Λόγω τῆς χαμηλῆς πυκνότητας τοῦ ρευστοῦ στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία, ἀναπτύσσονται δυνάμεις ἄνωσης. Ὡς ἀποτέλεσμα, τὸ θερμότερο ρευστὸ κινεῖται πρὸς τὰ πάνω, καθὼς τὸ ψυχρότερο ρευστὸ καταλαμβάνει τὴν θέση του. (Γιαννιώτης κ.ᾶ., 2018).

Οἱ ἐμπειρικές ἐκφράσεις ποὺ χρησιμοποιοῦνται γιὰ τὴν πρόβλεψη τοῦ συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότητας μὲ συναγωγή εἶναι τῆς ἀκόλουθης μορφῆς:

$$N_{Nu} = \frac{hd_c}{k} \Leftrightarrow N_{Nu} = a(N_{Ra})^m$$

Τὰ a καὶ m εἶναι σταθερές καὶ N_{Ra} εἶναι ὁ ἀριθμὸς “Rayleigh”. Ὁ ἀριθμὸς “Rayleigh” ἀποτελεῖ τὸ γινόμενο δύο ἀδιαστάτων ἀριθμῶν: τοῦ ἀριθμοῦ “Grashof” καὶ τοῦ ἀριθμοῦ “Prandtl”.

$$N_{Ra} = N_{Gr} \cdot N_{Pr}$$

Ὁ ἀριθμὸς “Grashof” ὀρίζεται ὡς ἑξῆς:

$$N_{Gr} = \frac{d_c^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2}$$

Ὅπου:

- d_c : ἡ χαρακτηριστικὴ διάσταση (m).
- ρ : ἡ πυκνότητα (kg/m^3).
- g : ἡ ἐπιτάχυνση τῆς βαρύτητας ($9,80665 \text{ m/s}^2$).
- β : ὁ συντελεστὴς ὀγκομετρικῆς διαστολῆς (K^{-1}).
- ΔT : ἡ διαφορὰ θερμοκρασίας μεταξύ τοῦ τοιχώματος καὶ τοῦ περιβάλλοντος χώρου ($^{\circ}\text{C}$).
- μ : τὸ ἰξῶδες ($\text{Pa} \cdot \text{s}$).

Ὁ ἀριθμὸς “Grashof” ἐκφράζει μία ἀναλογία μεταξύ τῶν δυνάμεων ἄνωσης καὶ τῶν δυνάμεων ἰξῶδους. Ὁμοίως, μὲ τὸν ἀριθμὸ “Reynolds”, ὁ ἀριθμὸς “Grashof” εἶναι χρήσιμος προκειμένου νὰ προσδιορισθῆ: ἂν ἡ ροὴ γύρω ἀπὸ ἓνα ἀντικείμενο εἶναι στρωτὴ ἢ τυρβώδης. Γιὰ παράδειγμα: ἓνας ἀριθμὸς “Grashof” μεγαλιότερος ἀπὸ 10^9 γιὰ ροὴ ρευστοῦ πάνω ἀπὸ κατακόρυφες πλάκες, σηματοδοτεῖ τυρβώδη ροή. (Γιαννιώτης κ.ᾶ., 2018).

Στὴν περίπτωση μεταφορᾶς θερμότητας λόγω ἐλεύθερης συναγωγῆς, οἱ φυσικὲς ιδιότητες ὑπολογίζονται στὴν θερμοκρασία τοῦ στρώματος τοῦ ὑγροῦ στὴν διεπιφάνεια:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

2.4.3 Θερμική αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Η σχέση για την θερμική αντίσταση κατά την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μπορεί να ορισθῆ με παρόμοιο τρόπο, ὅπως στην περίπτωση τῆς μεταφοῦς θερμότητας με ἄγωγή. Ἴσχύει ὅτι: $q = hA(T_s - T_\infty)$. Αναδιατάσσοντας τοὺς ὅρους τῆς ἐξίσωσης, προκύπτει:

$$q = \frac{T_s - T_\infty}{\frac{1}{hA}}$$

Ἡ θερμική αντίσταση λόγω συναγωγῆς εἶναι ἡ ἐξῆς:

$$(R_t)_{\text{συναγωγή}} = \frac{1}{hA}$$

Σὲ προβλήματα μεταφοῦς θερμότητας με ἄγωγή καὶ συναγωγή σὲ σειρά, κατὰ μῆκος τῆς διαδρομῆς μεταφοῦς θερμότητας, ἡ θερμική αντίσταση λόγω συναγωγῆς προστίθεται στὴν θερμική αντίσταση λόγω ἄγωγῆς, γιὰ νὰ προκύψῃ ἡ συνολικὴ θερμική αντίσταση.

2.5 Έκτίμηση του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Σε πολλές εφαρμογές θέρμανσης/ψύξης μπορεί ταυτοχρόνως να πραγματοποιηθεί μεταφορά θερμότητας με άγωγή και συναγωγή. Στην μεταφορά θερμότητας σε έναν σωλήνα μεταφέρεται ένα ρευστό σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος γύρω από την εξωτερική πλευρά του σωλήνος. Σε αυτήν την περίπτωση, η θερμότητα πρέπει πρώτα να μεταφερθεί από το έσωτερικό ρευστό με εξαναγκασμένη συναγωγή προς την έσωτερική επιφάνεια του σωλήνος· στην συνέχεια με άγωγή δια μέσου του υλικού του τοιχώματος του σωλήνος και τέλος με ελεύθερη συναγωγή από την εξωτερική επιφάνεια του σωλήνος προς το περιβάλλον. Έτσι, η θερμότητα μεταφέρεται μέσω τριών στρωμάτων σε σειρά. (Γιαννιώτης κ.ά., 2018).

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση των τιμών θερμικής αντίστασης, ισχύει:

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{R_t}$$

Όπου R_t είναι ο συνδυασμός των θερμικών αντιστάσεων στο έσωτερικό στρώμα συναγωγής και στο στρώμα άγωγής στο υλικό του σωλήνος και στο εξωτερικό στρώμα συναγωγής.

$$R_t = (R_t)_{\text{έσωτερική συναγωγή}} + (R_t)_{\text{άγωγή}} + (R_t)_{\text{εξωτερική συναγωγή}}$$

Η αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής στην έσωτερική επιφάνεια του σωλήνος είναι:

$$(R_t)_{\text{έσωτερική συναγωγή}} = \frac{1}{h_i A_i}$$

Όπου:

h_i : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στην έσωτερική επιφάνεια του σωλήνος ($W / m^2 \cdot K$).

A_i : το έμβαδόν της έσωτερικής επιφανείας του σωλήνος (m^2).

Ἡ ἀντίσταση στὴν μεταφορὰ θερμότητας στὸ τοίχωμα τοῦ σωλῆνος εἶναι:

$$(R_t)_{\acute{\alpha}\gamma\omega\gamma\eta} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi kL}$$

Ὅπου:

- k : ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότητα τοῦ ὕλικου τοῦ σωλῆνος ($W / m \cdot K$).
- r_i : ἡ ἐσωτερικὴ ἀκτῖνα (m).
- r_o : ἡ ἐξωτερικὴ ἀκτῖνα (m).

Ἡ ἀντίσταση στὴν μεταφορὰ θερμότητας λόγω συναγωγῆς στὴν ἐξωτερικὴ ἐπιφάνεια τοῦ σωλῆνος εἶναι:

$$(R_t)_{\acute{\epsilon}\xi\omega\tau\epsilon\rho\iota\kappa\eta\ \sigma\upsilon\nu\alpha\gamma\omega\gamma\eta} = \frac{1}{h_o A_o}$$

Ὅπου:

h_o : ὁ συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητας μὲ συναγωγὴ στὴν ἐξωτερικὴ ἐπιφάνεια τοῦ σωλῆνος ($W / m^2 \cdot K$).

A_o : τὸ ἐμβαδὸν τῆς ἐξωτερικῆς ἐπιφανείας τοῦ σωλῆνος (m^2).

Ἀντικαθιστῶντας τὶς ἐξισώσεις $(R_t)_{\acute{\epsilon}\sigma\omega\tau\epsilon\rho\iota\kappa\eta\ \sigma\upsilon\nu\alpha\gamma\omega\gamma\eta} = \frac{1}{h_i A_i}$ καὶ $(R_t)_{\acute{\alpha}\gamma\omega\gamma\eta} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi kL}$ καὶ $(R_t)_{\acute{\epsilon}\xi\omega\tau\epsilon\rho\iota\kappa\eta\ \sigma\upsilon\nu\alpha\gamma\omega\gamma\eta} = \frac{1}{h_o A_o}$ στὴν ἐξίσωση $q = \frac{T_i - T_\infty}{R_t}$, προκύπτει:

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o}}$$

Ἐπ' ἴσης, εἶναι ἐφικτὸ νὰ γραφθῆ μία ἐξίσωση γιὰ τὴν συνολικὴ μεταφορὰ θερμότητας στὸ συγκεκριμένο παράδειγμα:

$$q = U_i A_i (T_i - T_\infty)$$

Ὅπου:

- A_i : τὸ ἐμβαδὸν τῆς ἐσωτερικῆς ἐπιφανείας τοῦ σωλῆνος.
- U_i : ὁ ὀλικὸς συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητας μὲ βάση τὴν ἐσωτερικὴ ἐπιφάνεια τοῦ σωλῆνος.

Από την εξίσωση $q = U_i A_i (T_i - T_\infty)$ ισχύει:

$$q = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{1}{U_i A_i}}$$

Από τις εξισώσεις $q = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{1}{U_i A_i}}$ και $q = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}}}$ ισχύει:

$$\frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}$$

Η εξίσωση $\frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Η επιλογή της επιφανείας επί της οποίας υπολογίζεται ή συνολική μεταφορά θερμότητας είναι αρκετά αυθαίρετη. Για παράδειγμα: αν επιλεγεί ο U_o ως όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με βάση την εξωτερική πλευρά του σωλήνος, η εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}$$

Η εξίσωση $q = U_i A_i (T_i - T_\infty)$ τροποποιείται ως εξής:

$$q = U_o A_o (T_i - T_\infty)$$

Και οι δύο εξισώσεις, $q = U_i A_i (T_i - T_\infty)$ και $q = U_o A_o (T_i - T_\infty)$, αποδίδουν την ίδια τιμή για τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας q .

2.6 Σχηματισμός αποθέσεων στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας

Τύπος αποθέσεων	Μηχανισμός αποθέσεων
Κατακρήμνιση	Κατακρήμνιση διαλυτών συστατικών. Άλατα – όπως τα CaSO_4 και CaCO_3 – προκαλούν τον σχηματισμό έπικαθίσεων.
Χημική αντίδραση	Το υλικό της επιφανείας δρᾶ ως αντιδραστήριο (χημικές αντιδράσεις πρωτεϊνών και σακχάρων και λιπών).
Σωματιδιακός	Συσσωρευση λεπτοκόκκων σωματιδίων που αιώρονται στο ρευστό υπό έπεξεργασία πάνω στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.
Βιολογικός	Προσκόλληση όργανισμών ή/και μικροοργανισμών στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.
Κατάψυξη	Στερεοποίηση των υγρών συστατικών σε ψυχρές επιφάνειες.
Διάβρωση	Ἡ επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας αντιδρᾶ με τὸ περιβάλλον και διαβρώνεται.

Πίνακας 1. Κοινὸι μηχανισμοὶ σχηματισμοῦ αποθέσεων στις επιφάνειες ἐναλλαγῆς θερμότητας (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

2.7 Σημασία τῶν χαρακτηριστικῶν τῆς ἐπιφανείας στὴν μεταφορὰ θερμότητας μὲ ἀκτινοβολία

Όλα τὰ ὑλικά στὸ σύμπαν ἐκπέμπουν ἀκτινοβολία ἠλεκτρομαγνητικῆς φύσης μὲ βάση τὴν θερμοκρασία τῆς ἐπιφανείας των. Στὴν θερμοκρασία τῶν 0 K παύει ἡ ἐκπομπὴ ἀκτινοβολίας. Τὰ χαρακτηριστικὰ τῆς ἀκτινοβολίας ἐξαρτῶνται ἐπ’ ἴσης ἀπὸ τὴν θερμοκρασία. Καθὼς αὐξάνεται ἡ θερμοκρασία, τὸ μῆκος κύματος μειώνεται. Γιὰ παράδειγμα: ἡ ἀκτινοβολία ποὺ ἐκπέμπεται ἀπὸ τὸν ἥλιο ἔχει μικρὸ μῆκος κύματος σὲ σύγκριση μὲ τὴν ἀκτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ποὺ ἐκπέμπεται ἀπὸ τὴν ἐπιφάνεια μιᾶς κούπας μὲ ζεστὸ “café”. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

Όταν μία ἀκτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος προσπίπτει πάνω σὲ ἓνα ἀντικείμενο, ἐν μέρει ἀνακλᾶται, μερικῶς μεταδίδεται καὶ μερικῶς ἀπορροφᾶται. Ἴσχύει ἡ ἀκόλουθη ἐξίσωση:

$$\varphi + \chi + \psi = 1$$

Όπου:

- φ : ἡ ἀπορροφητικότητα.
- χ : ἡ ἀνακλαστικότητα.
- ψ : ἡ διαπερατότητα.

Ἡ ἀπορροφούμενη ἀκτινοβολία θὰ ἔχη ὡς ἀποτέλεσμα τὴν αὐξηση τῆς θερμοκρασίας.

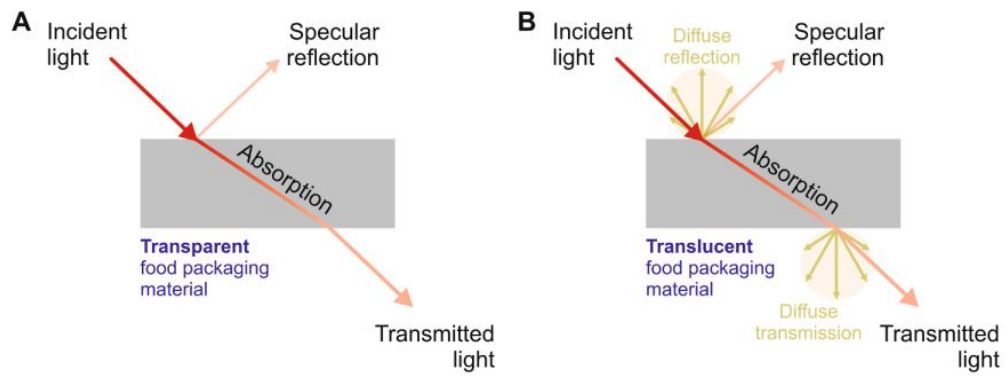
Γιὰ νὰ συγκριθῆ ἡ ἀπορρόφηση τῆς ἀκτινοβολίας ἀπὸ διαφορετικὰ ὑλικά, χρησιμοποιεῖται ἓνα ἰδανικὸ ὑλικὸ ἀναφορᾶς ποὺ ὀνομάζεται «μέλαν σῶμα». Γιὰ ἓνα μέλαν σῶμα, ἡ τιμὴ τῆς ἀπορροφητικότητας εἶναι 1. Σημειώνεται ὅτι στὸ σύμπαν δὲν ὑπάρχει πραγματικὸ μέλαν σῶμα· ἀκόμη καὶ ἡ μαύρη χρωστικὴ (lampblack) ἔχει $\varphi=0,99$ καὶ $\chi=0,01$. Ἀνεξαρτήτως ἀπὸ αὐτό, τὸ μέλαν σῶμα εἶναι μία χρήσιμη ἔννοια γιὰ τὴν σύγκριση τῶν ιδιοτήτων ἀκτινοβολίας τῶν διαφορῶν ὑλικῶν. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

Τὰ ἀπόλυτα μεγέθη τῶν φ καὶ χ καὶ ψ ἐξαρτῶνται ἀπὸ τὴν φύση τῆς προσπίπτουσας ἀκτινοβολίας. Ἔτσι, ὁ τοῖχος ἀπὸ τοῦβλα ἐνὸς σπιτιοῦ εἶναι ἀδιαφανὴς στὸ ὄρατὸ φῶς, ἀλλὰ διαφανὴς στὰ ραδιοκύματα. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

Ἡ ἐνέργεια ποὺ ἐκπέμπεται – ἢ ἀλλιῶς ἀκτινοβολεῖται – καὶ ἡ ἐνέργεια ποὺ ἀνακλᾶται πρέπει νὰ διαχωρισθοῦν σαφῶς. Αὐτὲς ἀποτελοῦν ἀρκετὰ διαφορετικοὺς ὅρους. Ἐνα ὑλικό, ἀναλόγως μὲ τὴν τιμὴ τῆς ἀπορροφητικότητας τῆς ἐπιφανείας του, θὰ ἀνακλᾷ μέρος τῆς προσπίπτουσας ἀκτινοβολίας. Ἐπὶ πλέον, μὲ βάση τὴν θερμοκρασία του, θὰ ἐκπέμπει ἀκτινοβολία. Τὸ μέγεθος τῆς ἀκτινοβολίας ποὺ ἐκπέμπεται μπορεῖ νὰ ὑπολογισθῆ ἀπὸ τὴν ἐξίσωση $q = \sigma \epsilon AT_A^4$. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

Ὁ νόμος τοῦ “Kirchhoff” ἀναφέρει ὅτι ἡ ἰκανότητα ἐκπομπῆς ἐνὸς σώματος εἶναι ἴση μὲ τὴν ἀπορροφητικότητά του στὸ ἴδιο μῆκος κύματος. Ἔτσι, μαθηματικῶς:

$$\epsilon = \varphi$$



Εικόνα 9. Σχηματική απεικόνιση, ή οποία δείχνει τις κύριες αλληλεπιδράσεις φωτός/ύλης, όταν τὸ προσπίπτον φῶς φθάνη σὲ ἓνα γενικὸ διαφανὲς ἢ ἡμιδιαφανὲς πολυμερὲς “film” συσκευασίας τροφίμων (Guzman-Puyol et al., 2022).

Κεφάλαιο 3. Μεταφορά θερμότητας σὲ συνθήκες μὴ σταθερῆς κατάστασης

Ἡ μεταφορά θερμότητας σὲ μὴ σταθερὴ κατάσταση σχετίζεται μὲ τὴν φάση τῆς διαδικασίας θέρμανσης καὶ ψύξης στὴν ὁποίαν ἡ θερμοκρασία μεταβάλλεται συναρτήσει τόσο τῆς θέσης ὅσο καὶ τοῦ χρόνου. Ἀντιθέτως, στὴν μεταφορά θερμότητας ὑπὸ σταθερὸς συνθήκες, ἡ θερμοκρασία μεταβάλλεται μόνο μὲ τὴν θέση. Κατὰ τὴν ἀρχικὴ περίοδο μὴ σταθερῆς κατάστασης, στὰ τρόφιμα πραγματοποιοῦνται πολλὲς σημαντικὲς ἀντιδράσεις. Στὶς θερμικὲς διεργασίες ἡ φάση μὴ σταθερῆς κατάστασης μπορεῖ ἀκόμη καὶ νὰ κυριαρχήσῃ στὴν ὅλη διαδικασία. Γιὰ παράδειγμα: σὲ ἀρκετὲς διεργασίες παστερίωσης καὶ ἀποστείρωσης τροφίμων ἡ περίοδος μὴ σταθερῆς κατάστασης ἀποτελεῖ ἓνα σημαντικό μέρος τῆς διεργασίας. Ἡ ἀνάλυση τῶν μεταβολῶν τῆς θερμοκρασίας μὲ τὸν χρόνο κατὰ τὴν περίοδο τῆς μὴ σταθερῆς κατάστασης εἶναι οὐσιώδης γιὰ τὸν σχεδιασμὸ μιᾶς τέτοιας διεργασίας. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

3.1 Σημασία της εξωτερικής έναντι της εσωτερικής αντίστασης στην μεταφορά θερμότητας

Ένα από τα πρώτα βήματα κατά την ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας σε μη σταθερή κατάσταση αποσκοπεί στην εξέταση της σχετικής σημασίας της μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια και στο εσωτερικό ενός αντικείμενου που υποβάλλεται σε θέρμανση ή ψύξη. Έστω ένα αντικείμενο που βυθίζεται αβυθιάς σε ένα υγρό. Αν το ρευστό βρίσκεται σε θερμοκρασία διαφορετική από την αρχική θερμοκρασία του στερεού, ή θερμοκρασία εντός του στερεού θα αυξηθῆ ἢ θα μειωθῆ μέχρι νὰ φθάσῃ σε μία τιμὴ ἰσορροπίας με τὴν θερμοκρασία τοῦ ρευστοῦ. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

Κατὰ τὴν διάρκεια τῆς περιόδου θέρμανσης σε μη σταθερὴ κατάσταση, ἡ θερμοκρασία στοῦ εσωτερικοῦ τοῦ στερεοῦ ἀντικειμένου – ποὺ ἀρχικῶς διέθετε ὁμοιόμορφη θερμοκρασία – θὰ μεταβάλλεται ἀναλόγως με τὴν θέση καὶ τὸν χρόνο. Με τὴν ἐμβάπτιση τοῦ στερεοῦ ἐντὸς τοῦ ρευστοῦ, ἡ μεταφορὰ θερμότητας ἀπὸ τὸ ρευστὸ πρὸς τὸ κέντρο τοῦ στερεοῦ συναντᾷ δύο ἀντιστάσεις: τὴν ἀντίσταση λόγω συναγωγῆς στοῦ στρώμα ρευστοῦ ποὺ περιβάλλει τὸ στερεὸ καὶ τὴν ἀντίσταση λόγω ἀγωγῆς στοῦ εσωτερικοῦ τοῦ στερεοῦ. Ὁ λόγος τῆς εσωτερικῆς ἀντίστασης στὴν μεταφορὰ θερμότητας στοῦ στερεοῦ πρὸς τὴν ἐξωτερικὴ ἀντίσταση στὴν μεταφορὰ θερμότητας στοῦ ρευστοῦ ὀρίζεται ὡς ὁ ἀριθμὸς “Biot”. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

$$N_{Bi} = \frac{\text{ἐσωτερικὴ ἀντίσταση στοῦ εσωτερικοῦ τοῦ στερεοῦ}}{\text{ἐξωτερικὴ ἀντίσταση στὴν ἐπιφάνεια τοῦ στερεοῦ}} \Leftrightarrow N_{Bi} = \frac{\frac{d_c}{k}}{\frac{1}{h}} \Leftrightarrow$$
$$N_{Bi} = \frac{hd_c}{k}$$

Ὅπου d_c εἶναι μία χαρακτηριστικὴ διάσταση.

Συμφώνως με τὴν παραπάνω ἐξίσωση, ἂν ἡ ἀντίσταση λόγω συναγωγῆς στὴν ἐπιφάνεια ἐνὸς σώματος εἶναι πολὺ μικρότερη ἀπὸ τὴν ἐσωτερικὴ ἀντίσταση λόγω ἀγωγῆς, τότε ὁ ἀριθμὸς “Biot” θὰ εἶναι μεγάλος. Γιὰ ἀριθμοὺς “Biot” μεγαλειτέρους ἀπὸ 40, ἡ ἐπιφανειακὴ ἀντίσταση στὴν μεταφορὰ θερμότητας θεωρεῖται ἀμελητέα. Ἀντιθέτως, ἂν ἡ ἐσωτερικὴ ἀντίσταση λόγω ἀγωγῆς στὴν μεταφορὰ θερμότητας εἶναι μικρὴ, τότε ὁ ἀριθμὸς “Biot” θὰ εἶναι μικρὸς. Γιὰ ἀριθμοὺς “Biot” μικροτέρους ἀπὸ 0,1, ἡ ἐσωτερικὴ ἀντίσταση στὴν μεταφορὰ θερμότητας θεωρεῖται ἀμελητέα. Γιὰ ἀριθμοὺς “Biot” μεταξὺ 0,1 καὶ 40 καὶ ἡ ἐσωτερικὴ καὶ ἡ ἐξωτερικὴ ἀντίσταση στὴν μεταφορὰ θερμότητας θεωροῦνται σημαντικῆς. Ὁ ἀτμὸς ποὺ συμπυκνώνεται στὴν ἐπιφάνεια ἐνὸς μίσχου μπρόκκολου συνεπάγεται ἀμελητέα ἐπιφανειακὴ ἀντίσταση στὴν μεταφορὰ θερμότητας ($N_{Bi} \geq 40$). Ἀπὸ τὴν ἄλλη πλευρά, μία μεταλλικὴ κονσέρβα ποὺ περιέχει θερμὸ τοματοπολτὸ καὶ ψύχεται σε ρεῦμα ψυχροῦ ἀέρα θὰ παρουσιάζῃ καθωρισμένη μετρήσιμη ἐσωτερικὴ καὶ ἐπιφανειακὴ ἀντίσταση στὴν μεταφορὰ θερμότητας, ἐνῶ μία μικρὴ σφαῖρα χαλκοῦ τοποθετημένη σε στάσιμο θερμὸ ἀέρα θὰ ἔχῃ ἀριθμὸ “Biot” μικρότερο ἀπὸ 0,1. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

3.2 Άμελητέα έσωτερική αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας ($N_{Bi} < 0,1$)

Για αριθμούς “Biot” μικρότερους από 0,1 , ή έσωτερική αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας θεωρείται άμελητέα. Η συνθήκη αυτή συναντάται κατά την θέρμανση και ψύξη τών περισσοτέρων στερεών μεταλλικών αντικειμένων αλλά όχι στα στερεά τρόφιμα, έπειδή ή θερμική άγωγιμότητα τών στερεών τροφίμων είναι σχετικώς χαμηλή. (Γιαννιώτης κ.ά., 2018).

Άμελητέα έσωτερική αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας σημαίνει έπ’ ίσης ότι ή θερμοκρασία είναι σχεδόν όμοιόμορφη στο έσωτερικό του αντικειμένου· για τόν λόγο αυτόν, ή συγκεκριμένη περίπτωση αναφέρεται έπ’ ίσης ως “lumped” σύστημα. Η συνθήκη αυτή έπιτυγχάνεται σε αντικείμενα με ύψηλή θερμική άγωγιμότητα, όταν τοποθετώνται σε κάποιο μέσο που είναι κακός άγωγός τής θερμότητας όπως ο στάσιμος άέρας. Σε αυτές τις περιπτώσεις ή θερμότητα ίσοκατανέμεται άκαριαίως έντος του αντικειμένου, άποφεύγοντας έτσι τις τοπικές μεταβολές τής θερμοκρασίας. Ένας άλλος τρόπος, για να έπιτευχθί αυτή ή συνθήκη είναι ένα καλώς άναδεδυμένο ύγρο τρόφιμο σε κάποιο περιέκτη. Σε αυτήν την ειδική περίπτωση δέν παρατηρείται κάμμία τοπική μεταβολή τής θερμοκρασίας, καθώς τò προϊόν άναμειγνύεται έπαρκώς. (Γιαννιώτης κ.ά., 2018).

Μία μαθηματική έξίσωση που να περιγράφη την μεταφορά θερμότητας στην περίπτωση άμελητέας έσωτερικής αντίστασης μπορεί να άναπτυχθί ως έξής: έστω ένα αντικείμενο σε χαμηλή όμοιόμορφη θερμοκρασία T_i που βυθίζεται σε ένα θερμό ρευστό θερμοκρασίας T_a . Κατά την διάρκεια τής περιόδου μη σταθερής κατάστασης, τò ίσοζύγιο θερμότητας στις όριακές συνθήκες του συστήματος δίδει:

$$q = \rho c_p V \frac{dT}{dt} = hA(T_a - T)$$

Όπου:

- T_a : ή θερμοκρασία του περιβάλλοντος μέσου.
- A : τò έμβαδόν τής έπιφανείας του αντικειμένου.

Με διαχωρισμό τών μεταβλητών:

$$\frac{dT}{(T_a - T)} = \frac{hAdt}{\rho c_p V}$$

Όλοκληρώνοντας και θέτοντας τὰ ὅρια, ἰσχύει:

$$\int_{T_i}^T \frac{dT}{T_a - T} = \frac{hA}{\rho c_p V} \int_0^t dt \Leftrightarrow -\ln(T_a - T) \Big|_{T_i}^T = \frac{hA}{\rho c_p V} (t - 0) \Leftrightarrow$$

$$-\ln\left(\frac{T_a - T}{T_a - T_i}\right) = \frac{hAt}{\rho c_p V}$$

Αναδιατάσσοντας τούς ὅρους, ἰσχύει:

$$\frac{T_a - T}{T_a - T_i} = e^{-\left(\frac{hA}{\rho c_p V}\right)t} \Leftrightarrow \frac{T_a - T}{T_a - T_i} = e^{-bt}$$

Όπου:

$$b = \frac{hA}{\rho c_p V}$$

Στὴν ἐξίσωση $\frac{T_a - T}{T_a - T_i} = e^{-bt}$ ὁ ἀριθμητὴς $T_a - T$ στὸ ἀριστερὸ σκέλος ἐκφράζει τὴν διαφορὰ θερμοκρασίας μεταξὺ τοῦ μέσου μεταφορᾶς θερμότητας καὶ τοῦ ἀντικειμένου. Ὁ παρονομαστὴς ἀποτελεῖ τὴν μεγίστη διαφορὰ θερμοκρασίας κατὰ τὴν ἔναρξη τῆς διαδικασίας θέρμανσης/ψύξης. Ἔτσι, ὁ λόγος τῶν θερμοκρασιῶν ποὺ ἐμφανίζονται στὸ ἀριστερὸ σκέλος τῆς ἐξίσωσης αὐτῆς ἐκφράζει τὴν ἀδιάστατη θερμοκρασία. Κατὰ τὴν ἔναρξη τῆς διαδικασίας θέρμανσης/ψύξης, ἡ ἀδιάστατη θερμοκρασία ἰσοῦται μὲ τὴν μονάδα καὶ μειώνεται μὲ τὸν χρόνο. Τὸ δεξιὸ σκέλος τῆς ἐξίσωσης δείχνει μία ἐκθετικῶς μειουμένη συνάρτηση. Αὐτὸ σημαίνει ὅτι: μὲ τὸ πέρασμα τοῦ χρόνου τὸ κλάσμα τῆς ἀδιάστατης θερμοκρασίας μειώνεται, ἀλλὰ ποτὲ δὲν φθάνει τὴν τιμὴ 0· πλησιάζει τὸ μηδὲν ἀσυμπτωτικῶς. Ἐπὶ πλέον, ὅταν ἕνα ἀντικείμενο θερμαίνεται μὲ ὑψηλότερη τιμὴ b , ἡ θερμοκρασία του ἀυξάνεται ταχύτερα (μεγαλειότερη ἐλάττωση τῆς διαφορᾶς θερμοκρασίας). Ἡ τιμὴ τοῦ b ἐπηρεάζεται ἄμεσα ἀπὸ τὶς συνθηκὲς συναγωγῆς στὴν ἐπιφάνεια ποὺ περιγράφονται ἀπὸ: τὸ h , τὶς θερμικὲς τοῦ ἰδιότητες καὶ τὸ μέγεθος. Μικρὰ ἀντικείμενα μὲ χαμηλὴ εἰδικὴ θερμότητα χρειάζονται λιγώτερο χρόνο, γιὰ νὰ θερμανθοῦν ἢ νὰ ψυχθοῦν. (Γιαννιώτης κ.ἄ., 2018).

3.3 Πεπερασμένη έσωτερική και έπιφανειακή αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας ($0, 1 \leq N_{Bi} \leq 40$)

Η επίλυση της εξίσωσης $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \frac{\partial T}{\partial r})$ είναι πολύπλοκη και είναι διαθέσιμη μόνο για σαφώς καθορισμένα σχήματα, όπως: ο κύλινδρος άπειρου μήκους, ή πλάκα άπειρου μήκους και ή σφαίρα. Σε κάθε περίπτωση ή λύση αποτελεί μία ακολουθία άπειρων όρων, ή οποία περιέχει τριγωνομετρικές ή/και υπερβατικές συναρτήσεις. Οι λύσεις αυτές έχουν ως εξής:

- κύλινδρος άπειρου μήκους

$$\frac{T_a - T}{T_a - T_i} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 N_{Fo}} J_0(\lambda_n) \frac{r}{d_c}$$

με εξίσωση για την εύρεση τών ριζών λ_n :

$$\lambda_n \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0(\lambda_n)} = N_{Bi}$$

- πλάκα άπειρου μήκους

$$\frac{T_a - T}{T_a - T_i} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin \lambda_n}{2\lambda_n + \sin 2\lambda_n} \right) e^{-\lambda_n^2 N_{Fo}} \cos \left(\lambda_n \frac{x}{d_c} \right)$$

με εξίσωση για την εύρεση τών ριζών λ_n :

$$\lambda_n \tan \lambda_n = N_{Bi}$$

- σφαίρα

$$\frac{T_a - T}{T_a - T_i} = 4 \left(\frac{d_c}{r} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \lambda_n - \lambda_n \cos \lambda_n}{2\lambda_n - \sin 2\lambda_n} e^{-\lambda_n^2 N_{Fo}} \sin \left(\lambda_n \frac{r}{d_c} \right)$$

με εξίσωση για την εύρεση τών ριζών λ_n :

$$1 - \lambda_n \cot \lambda_n = N_{Bi}$$

Αυτές οι αναλυτικές λύσεις με ακολουθίες απείρων ὄρων μπορούν να προγραμματισθούν σε κάποιο φύλλο ὑπολογιστῶν για χρήση σε ἠλεκτρονικό ὑπολογιστή. Αυτές οι λύσεις, ἐπ’ ἴσης, μπορούν να καταλήξουν σε ἀπλᾶ διαγράμματα θερμοκρασίας/χρόνου, τὰ ὁποῖα εἶναι σχετικῶς εὐκόλα στην χρήση. Κατὰ τὴν κατασκευὴ ἑνὸς διαγράμματος θερμοκρασίας/χρόνου για ἓνα τυπικὸ πρόβλημα μεταβαλλομένης μεταφορᾶς θερμότητας, οἱ μεταβλητὲς ποὺ πρέπει νὰ μελετηθοῦν εἶναι πολυάριθμες: $r, t, k, \rho, c_p, h, T_i$ καὶ T_a . Ὡστόσο, αὐτὲς οἱ μεταβλητὲς μπορούν νὰ συνδυασθοῦν σε τρεῖς ἀδιάστατους ἀριθμούς, καθιστῶντας ἐφικτὴ τὴν ἀνάπτυξη διαγραμμάτων για γενικὴ χρήση, ἀνεξαρτήτως ἀπὸ τὶς μονάδες ποὺ χρησιμοποιοῦνται για τὴν μέτρηση αὐτῶν τῶν μεταβλητῶν. Τὰ διαγράμματα θερμοκρασίας/χρόνου ποὺ ἔχουν ἀναπτυχθῆ για τὰ τρία γεωμετρικὰ σχήματα – κύλινδρος ἀπείρου μήκους, πλάκα ἀπείρου μήκους, σφαῖρα – παρουσιάζονται στὴν εἰκόνα 10. Τὰ διαγράμματα αὐτὰ ὀνομάζονται διαγράμματα “Heisler” καὶ βασίζονται στὴν ἐργασία τοῦ “Heisler”. Οἱ τρεῖς ἀδιάστατοι ἀριθμοὶ ποὺ φαίνονται σε αὐτὰ τὰ γραφήματα εἶναι: ἡ ἀδιάστατη θερμοκρασία $\frac{T_a - T}{T_a - T_i}$, ὁ ἀριθμὸς “Biot” (N_{Bi}) καὶ ἓνας ἀδιάστατος χρόνος ποὺ χαρακτηρίζεται ὡς ἀριθμὸς “Fourier”. Ὁ ἀριθμὸς “Fourier” ὀρίζεται ὡς ἐξῆς:

$$N_{Fo} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{t}{d_c^2} \Leftrightarrow N_{Fo} = \frac{at}{d_c^2}$$

Ὅπου d_c εἶναι μία χαρακτηριστικὴ διάσταση. Ἡ τιμὴ τῆς d_c ὑποδεικνύει τὴν μικρότερη ἀπόσταση ἀπὸ τὴν ἐπιφάνεια πρὸς τὸ κέντρο τοῦ ἀντικειμένου. Ἡ χαρακτηριστικὴ διάσταση, τόσο για τὸν κύλινδρο ἀπείρου μήκους, ὅσο καὶ για τὴν σφαῖρα, εἶναι ἡ ἀκτῖνα· για τὴν πλάκα ἀπείρου μήκους εἶναι τὸ ἥμισυ τοῦ πάχους τῆς πλάκας.

Μπορεῖ νὰ ἐξετασθῆ ἡ φυσικὴ σημασία τοῦ ἀριθμοῦ “Fourier”, ἀναδιατάσσοντας τὴν ἐξίσωση ὡς ἐξῆς:

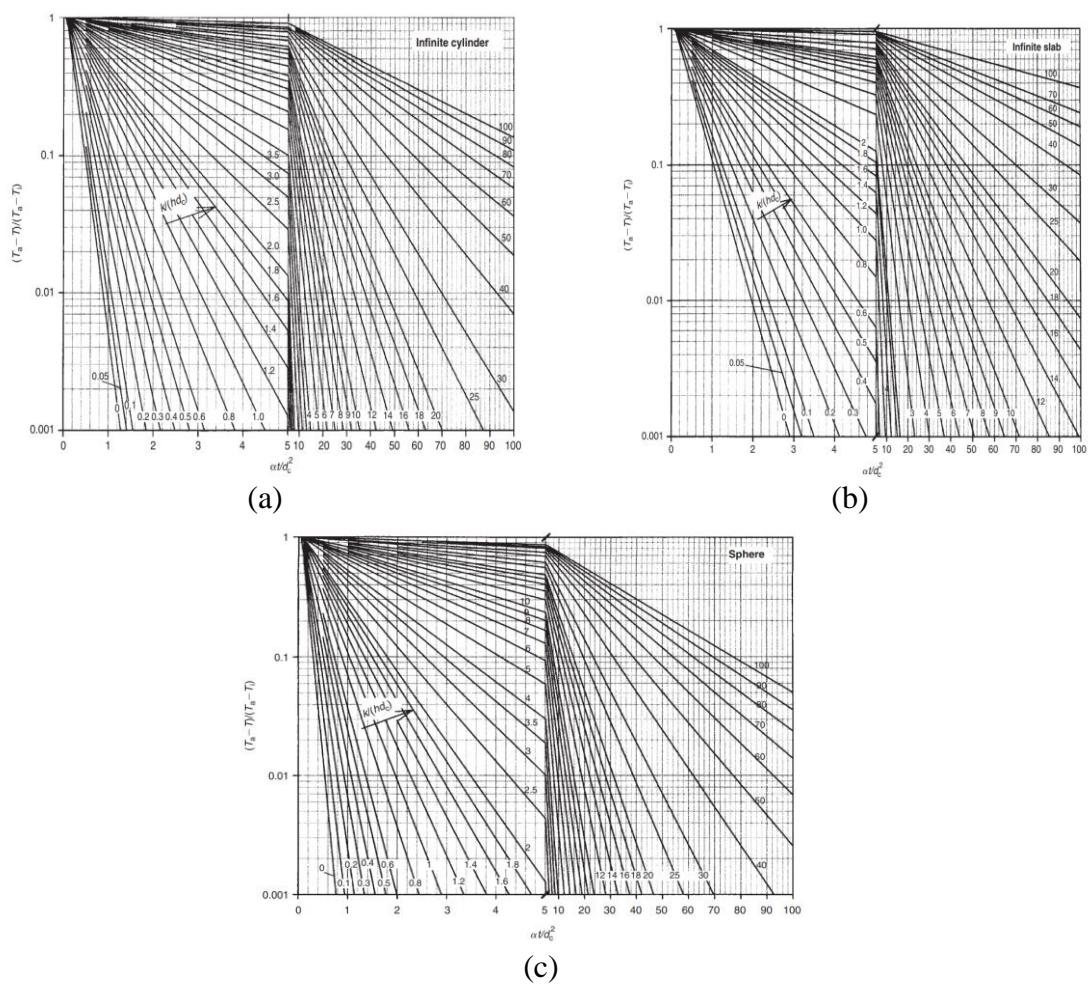
$$N_{Fo} = \frac{at}{d_c^2} \Leftrightarrow N_{Fo} = \frac{k \left(\frac{1}{d_c} \right) d_c^2}{\frac{\rho c_p d_c^3}{t}} \Leftrightarrow$$

$$N_{Fo} = \frac{\text{ῤυθμὸς μεταφορᾶς θερμότητας με ἀγωγή κατὰ μήκος τῆς } d_c \text{ σὲ ἀντικείμενο ὄγκου } d_c^3 \left(\frac{W}{\sigma C} \right)}{\text{ῤυθμὸς ἀποθήκευσης θερμότητας σὲ ἀντικείμενο ὄγκου } d_c^3 \left(\frac{W}{\sigma C} \right)}$$

Για ἓνα δεδομένο ὄγκο, ὁ ἀριθμὸς “Fourier” ἀποτελεῖ μέτρο τοῦ ῤυθμοῦ μεταφορᾶς θερμότητας με ἀγωγή ἀνὰ μονάδα ῤυθμοῦ ἀποθήκευσης θερμότητας. Ἔτσι, ἓνας μεγαλύτερος ἀριθμὸς “Fourier” ὑποδεικνύει βαθύτερη διείσδυση τῆς θερμότητας μέσα στὸ στερεὸ σε μία δεδομένη χρονικὴ περίοδο. Σημειώνεται ὅτι τὰ γραφήματα “Heisler” εἶναι κατασκευασμένα σε λογαριθμικὴ/γραμμικὴ κλίμακα.

3.4 Άμελητά επιφανειακή αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας ($N_{Bi} \geq 40$)

Για τις περιπτώσεις που ο αριθμός “Biot” είναι μεγαλύτερος από 40, υποδεικνύοντας άμελητά επιφανειακή αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα κάτωθι διαγράμματα. Σε αυτές τις εικόνες, οι γραμμές για $\frac{k}{hd_c} = 0$ αντιπροσωπεύουν άμελητά επιφανειακή αντίσταση στην μεταφορά θερμότητας.

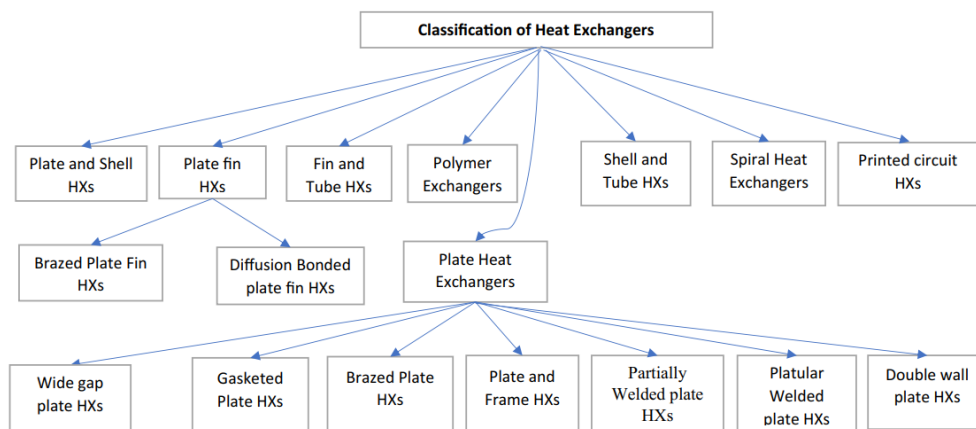


Εικόνα 10. (a) Θερμοκρασία στο γεωμετρικό κέντρο κυλίνδρου, άπειρου μήκους και ακτίνας d_c . (b) Θερμοκρασία στο μέσο επίπεδο πλάκας, άπειρου μήκους και πάχους $2d_c$. (c) Θερμοκρασία στο γεωμετρικό κέντρο μιᾶς σφαίρας, ακτίνας d_c . (Heisler, 1947).

Κεφάλαιο 4. Συστήματα θέρμανσης και ψύξης προϊόντων τροφίμων

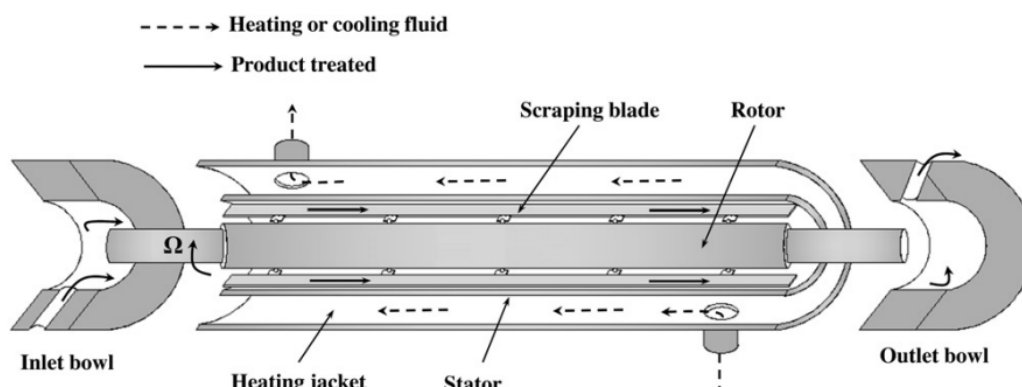
Έναλλάκτης θερμότητας ονομάζεται ή συσκευή μεταφοράς θερμότητας – θερμικής ενέργειας – από ένα ρευστό σε ένα άλλο λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς. Θερμική ενέργεια μεταφέρεται από το θερμό ρευστό προς το ψυχρό ρευστό. (Ζουμπούλης κ.ά., 2009).

Ο όρος «ρευστό» χαρακτηρίζει οποιαδήποτε ουσία, ή οποία μπορεί να παρουσιάσει ροή. Τέτοιες ουσίες είναι: τα υγρά, τα αέρια ή ακόμη και τα στερεά που βρίσκονται σε φάση ροής. Έπομένως, ο όρος «ρευστό» χαρακτηρίζει συνοπτικώς τα υγρά και τα αέρια των οποίων οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων είναι χαλαρές με αποτέλεσμα ή μάζα να ολισθαίνει ελεύθερα (περίπτωση υγρών) ή να μετατοπίζεται με αυτόνομο τρόπο (περίπτωση αερίων), ούτως ως τε να μπορούν κάθε φορά να καταλαμβάνουν το σχήμα του χώρου που βρίσκονται ή του μέσου δια του οποίου κινούνται, σε αντίθεση με το στερεό όπου οι δυνάμεις συνοχής είναι τόσο ισχυρές που δεν του επιτρέπουν να καταλάβει το σχήμα του χώρου στο οποίο βρίσκεται αλλά έχει συγκεκριμένο σχήμα και όγκο. (Λάζος, 2010).



Εικόνα 11. Ταξινόμηση των έναλλακτών θερμότητας (Awais & Bhuiyan, 2018).

4.1 Έναλλάκτης θερμότητας αποξεομένης επιφανείας



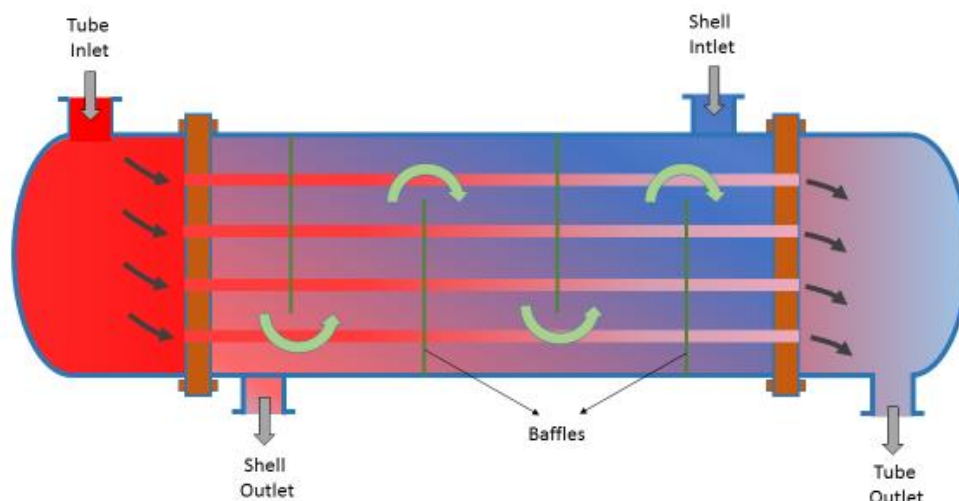
Εικόνα 12. Έναλλάκτης θερμότητας αποξεομένης επιφανείας (Blal et al., 2013).

Στους συμβατικούς αὐλωτούς έναλλάκτες ἡ μεταφορὰ θερμότητας πρὸς ἓνα ρεῦμα ρευστοῦ ἐπηρεάζεται ἀπὸ τὴν ὑδραυλικὴ καὶ θερμικὴ ἀντίσταση λόγω τοῦ σχηματισμοῦ μεμβράνης ἢ ἀποθέσεων στὰ τοιχώματα τοῦ σωλῆνος. Αὐτὴ ἡ θερμικὴ ἀντίσταση μπορεῖ νὰ ἐλαχιστοποιηθῆ, ἂν ἡ ἐσωτερικὴ ἐπιφάνεια τῶν τοιχωμάτων τοῦ σωλῆνος ἀποξέηται συνεχῶς μὲ μηχανικὰ ὑλικά. Ὁ ἐσωτερικὸς ρότορας διαθέτει πτερύγια καλυμμένα μὲ πολυστρωματικὸ πολυμερὲς ἢ χυτευμένο πλαστικὸ. Ἡ ταχύτητα τοῦ ρότορα κυμαίνεται μεταξὺ 150 rpm καὶ 500 rpm. Ἄν καὶ οἱ ὑψηλότερες ταχύτητες περιστροφῆς ἐπιτρέπουν τὴν καλλίτερη μεταφορὰ θερμότητας, μπορεῖ νὰ ἐπηρεάσουν τὴν ποιότητα τοῦ ἐπεξεργαζομένου προϊόντος λόγω ἐνδεχομένης διαβροχῆς. Ἔτσι, ἀναλόγως μὲ τὰ χαρακτηριστικὰ τοῦ ἐπεξεργαζομένου προϊόντος, πρέπει νὰ γίνηται προσεκτικὴ ἐπιλογή τῆς ταχύτητας τοῦ ρότορα καὶ τοῦ δακτυλοειδοῦς διακένου μεταξὺ τοῦ ρότορα καὶ τοῦ κυλίνδρου. (Singh & Heldman, 2009).

Τὰ κοινῶς χρησιμοποιούμενα μέσα περιλαμβάνουν: ἀτμό, θερμὸ νερό, ἄλμη ἢ κάποιον ψυκτικὸ μέσο. Οἱ τυπικὲς θερμοκρασίαι ποὺ χρησιμοποιοῦνται γιὰ τὴν ἐπεξεργασία τῶν τροφίμων στὸς έναλλάκτες θερμότητας ἀποξεομένης ἐπιφανείας κυμαίνονται ἀπὸ -35°C ἕως 190°C . (Singh & Heldman, 2009).

Ἡ διαρκὴς ἀνάμιξη ποὺ ἐπιτυγχάνεται σὲ ἓναν έναλλάκτη θερμότητας ἀποξεομένης ἐπιφανείας εἶναι συχνῶς ἐπιθυμητὴ γιὰ τὴν ἐνίσχυση τῆς ὁμοιομορφίας τῶν χαρακτηριστικῶν: ἀρώματος, χρώματος, ὀσμῆς καὶ ὑφῆς τοῦ προϊόντος. Στὴν βιομηχανία τροφίμων οἱ έναλλάκτες θερμότητας ἀποξεομένης ἐπιφανείας βρῖσκουν ἐφαρμογὲς σὲ διεργασίες: θέρμανσης, παστερίωσης, ἀποστείρωσης, ἐνσωμάτωσης ἀέρα, πήξης, γαλακτωματοποίησης, πλαστικοποίησης καὶ κρυστάλλωσης. Στους έναλλάκτες θερμότητας ἀποξεομένης ἐπιφανείας μποροῦν νὰ ὑποβληθοῦν γιὰ ἐπεξεργασία ρευστὰ τρόφιμα μὲ εὐρὴ φάσμα ἰζώδους, ὅπως: χυμοὶ φρούτων, σοῦπες, συμπυκνώματα ἐσπεριδοειδῶν, φιστικοβοῦτυρο, ψητὰ φασόλια, πάστα τομάτας καὶ γέμιση πίττας. (Singh & Heldman, 2009).

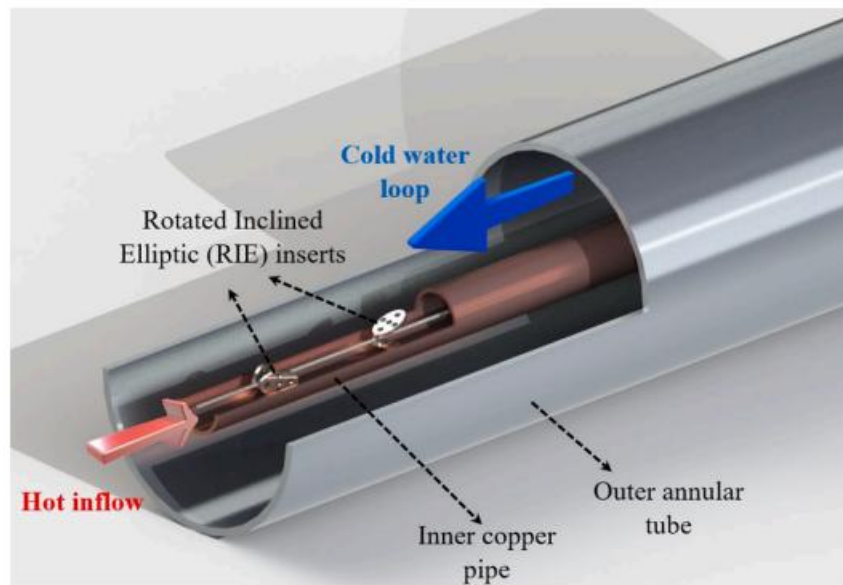
4.2 Έναλλακτης θερμότητας αλού/κελύφους



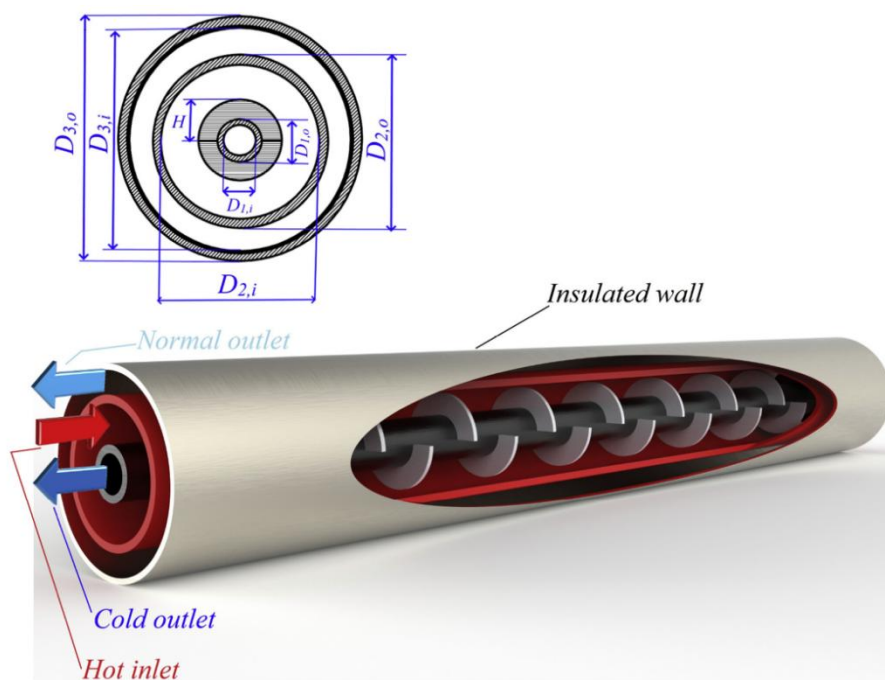
Εικόνα 13. Έναλλακτης θερμότητας αλού/κελύφους (Bhattad & Babu, 2022).

Ένας τύπος έναλλακτη θερμότητας που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία τροφίμων είναι ο έναλλακτης αλού/κελύφους, ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως για την θέρμανση ρευστών τροφίμων σε συστήματα εξάτμισης. Το ένα από τα ρεύματα ρευστού κινείται εντός του εσωτερικού σωλήνος, ενώ το άλλο ρεύμα διοχετεύεται γύρω από τους σωλήνες δια μέσου του κελύφους. Διατηρώντας την ροή του ρευστού στην πλευρά του κελύφους γύρω από τους σωλήνες και όχι παράλληλα προς αυτούς, επιτυγχάνονται υψηλότεροι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας. Η τοποθέτηση διαφραγμάτων στην πλευρά του κελύφους επιτρέπει την επίτευξη διασταυρωμένης ροής. Μία ή περισσότερες διελεύσεις από τον αλού μπορεί να επιτευχθούν αναλόγως με τον σχεδιασμό. Οι έναλλακτες θερμότητας αλού/κελύφους είναι τύπου: μονής διέλευσης από το κέλυφος και διπλής από τον σωλήνα, διπλής διέλευσης από το κέλυφος και τετραπλής από τον σωλήνα. (Singh & Heldman, 2009).

4.3 Αύλωτος έναλλάκτης θερμότητας



Εικόνα 14. Έναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνος (Nakhchi et al., 2021).



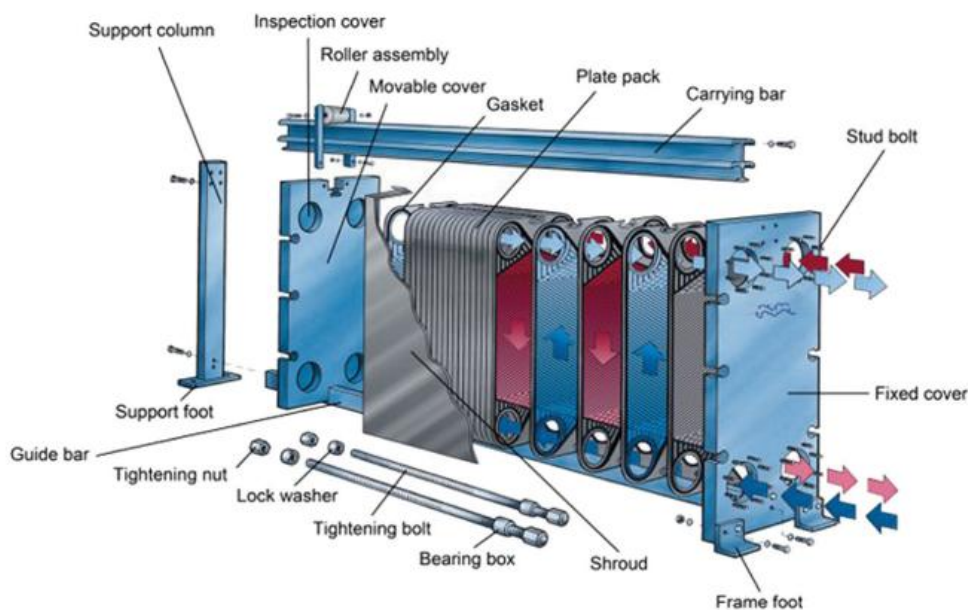
Εικόνα 15. Έναλλάκτης θερμότητας τριπλού σωλήνος (Bahiraei et al., 2021).

Ο απλούστερος εναλλάκτης θερμότητας έμμεσης έπαφής είναι ο εναλλάκτης διπλού σωλήνος, ο οποίος αποτελείται από ένα σωλήνα τοποθετημένο με όμοκεντρο τρόπο μέσα σέ έναν άλλο σωλήνα. Τα δύο ρευστά ρεύματα κινούνται έντος του δακτυλιοειδούς διακένου και του έσωτερικού σωλήνος αντίστοίχως. Τα ρεύματα μπορεί νά ρέουν πρòς τήν ίδια κατεύθυνση (όμορροή ή παράλληλη ροή) ή πρòς τήν αντίθετη κατεύθυνση (άντιρροή). (Singh & Heldman, 2009).

Μία μικρή παραλλαγή του εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνος αποτελεί ο εναλλάκτης τριπλού σωλήνος. Σέ αυτόν τόν τύπο εναλλάκτη θερμότητας τò προϊόν ρέει στò έσωτερικό δακτυλιοειδές διάκενο, ένω τò μέσο θέρμανσης/ψύξης ρέει έντος του έσωτερικού σωλήνος και του έξωτερικού δακτυλιοειδούς διακένου. Ο έσωτερικός σωλήνας μπορεί νά περιέχει είδικά σχεδιασμένα εμπόδια (αύλακώσεις) για τήν πρόκληση στροβιλισμού και τήν αποτελεσματικότερη μεταφορά θερμότητας. Ωρισμένες είδικές βιομηχανικές εφαρμογές των εναλλακτών θερμότητας τριπλού σωλήνος περιλαμβάνουν:

- τήν θέρμανση πορτοκαλλοχυμού άπλης άραιώσης από τούς 4°C στούς 93°C και στήν συνέχεια τήν ψύξη του στούς 4°C.
- τήν ψύξη μείγματος παγωτού από τούς 12°C στούς 0,5°C με άμμωνία.
- τήν ψύξη του νερού πλύσης τυριού τύπου “cottage” από τούς 46°C στούς 18°C με παγωμένο νερό.

4.4 Έναλλάκτης θερμότητας πλακῶν



Εικόνα 16. Έναλλάκτης θερμότητας πλακῶν (Pandya et al., 2020).

Ο έναλλάκτης πλακῶν έχει βρεῖ εὐρεία ἐφαρμογή στὴν βιομηχανία γαλακτοκομικῶν προϊόντων καὶ ποτῶν. Αὐτὸς ὁ έναλλάκτης θερμότητας ἀποτελεῖται ἀπὸ μία σειρά παραλλήλων πλακῶν ἀπὸ ἀνοξιδωτο χάλυβα, οἱ ὁποῖες βρίσκονται σὲ μικρὴ ἀπόσταση μεταξύ των, στερεωμένες ἐντὸς καταλλήλου πλαισίου. Ἐλαστικά παρεμβύσματα, κατασκευασμένα ἀπὸ φυσικὸ ἢ συνθετικὸ ἐλαστικὸ, σφραγίζουν τὰ ἄκρα καὶ τὶς εἰσόδους τῆς πλάκας προκειμένου νὰ ἀποφευχθῆ ἡ ἀνάμιξη τῶν ὑγρῶν. Αὐτὰ τὰ ἐλαστικά παρεμβύσματα, ἐπ' ἴσης, βοηθοῦν στὴν καθοδήγηση τοῦ ρεύματος θέρμανσης ἢ ψύξης καὶ τοῦ ρεύματος τοῦ προϊόντος στὰ ἀντίστοιχα διάκενα. Ἡ κατεύθυνση τοῦ ρεύματος τοῦ προϊόντος μπορεῖ νὰ εἶναι σὲ ὁμορροή (ἴδια κατεύθυνση) ἢ σὲ ἀντρορροή (ἀντίθετη κατεύθυνση) ὡς πρὸς τὸ ρεῦμα θέρμανσης/ψύξης. (Singh & Heldman, 2009).

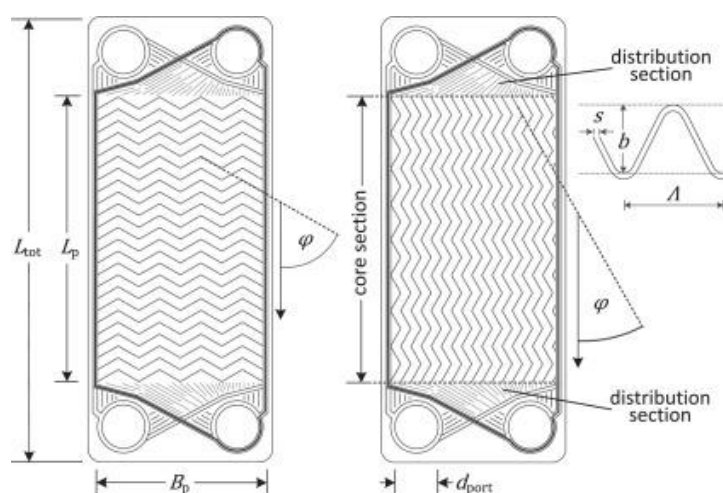
Οἱ πλάκες ποὺ χρησιμοποιοῦνται στὸν έναλλάκτη θερμότητας πλακῶν εἶναι κατασκευασμένες ἀπὸ ἀνοξιδωτο χάλυβα. Εἰδικές κατατομὲς πιέζονται ἐπὶ τῶν πλακῶν προκειμένου νὰ αὐξήσουν τὸν στροβιλισμό τοῦ ρεύματος τοῦ προϊόντος, ἐπιτυγχάνοντας ἀποτελεσματικότερη μεταφορὰ θερμότητας. Χαρακτηριστικὸ παράδειγμα μιᾶς τέτοιας κατατομῆς εἶναι οἱ ῥηχὲς ῥαβδώσεις τύπου ψαροκόκκαλου. (Singh & Heldman, 2009).

Οἱ έναλλάκτες πλακῶν εἶναι κατάλληλοι γιὰ ὑγρὰ τρόφιμα χαμηλοῦ ἰξώδους ($< 5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$). Ἄν ὑπάρχουν αἰωρούμενα στερεά, ἡ ἰσοδύναμη διάμετρος τῶν σωματιδίων πρέπει νὰ εἶναι μικρότερη ἀπὸ 0,3 cm. Σωματίδια μεγαλειτέρου μεγέθους μπορεῖ νὰ σφηνώσουν μεταξύ τῶν πλακῶν καὶ νὰ καοῦν κατὰ τὴν διάρκεια τῆς θέρμανσης. (Singh & Heldman, 2009).

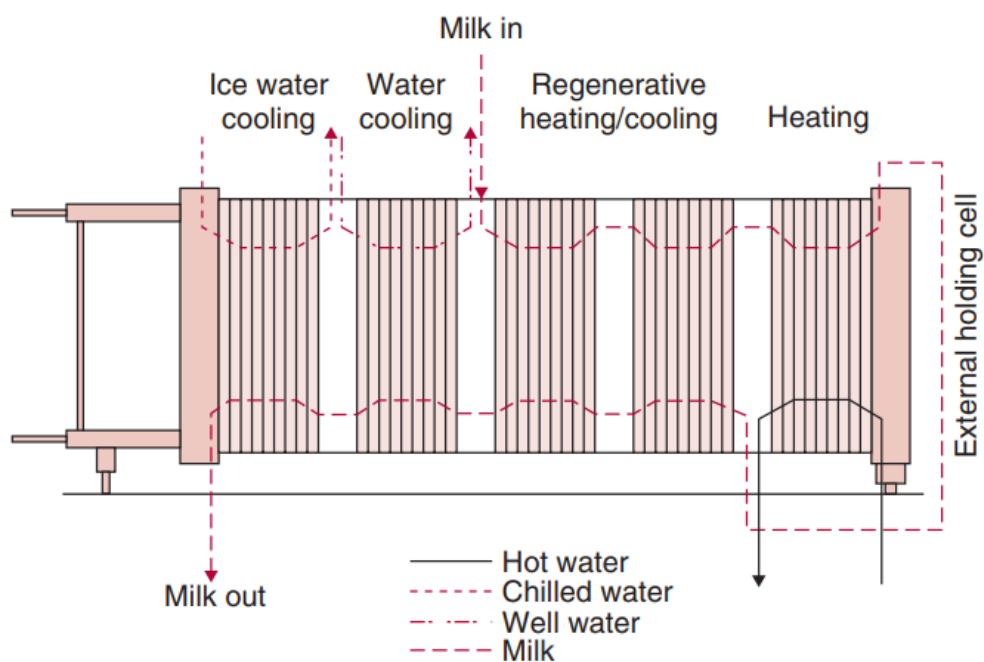
Στους εναλλάκτες θερμότητας βιομηχανικών διαστάσεων συχνώς επιτυγχάνονται ρυθμοί ροής προϊόντων από 5000 έως 20.000 kh/h. Όταν χρησιμοποιούνται εναλλάκτες πλακών, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα, ούτως ως τε να ελαχιστοποιηθεί ή απόθεση των στερεών συστατικών τροφίμων όπως: πρωτεΐνες γάλακτος πάνω στην επιφάνεια των πλακών. Αυτή ή έναπόθεση που ονομάζεται επ' ίσης απόθεση επιστρώσεων (fouling) μειώνει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από το μέσο θέρμανσης προς το προϊόν, ενώ παραλλήλως αυξάνει την πτώση πίεσης με την πάροδο του χρόνου. (Singh & Heldman, 2009).

Τελικώς, η διεργασία διακόπτεται και οι πλάκες καθαρίζονται. Στην περίπτωση των γαλακτοκομικών προϊόντων, τα όποια απαιτούν εφαρμογές υπερυψηλής θερμοκρασίας, ή διάρκεια συνεχούς λειτουργίας περιορίζεται στις 3-4 ώρες. Οι εναλλάκτες πλακών προσφέρουν τα εξής πλεονεκτήματα:

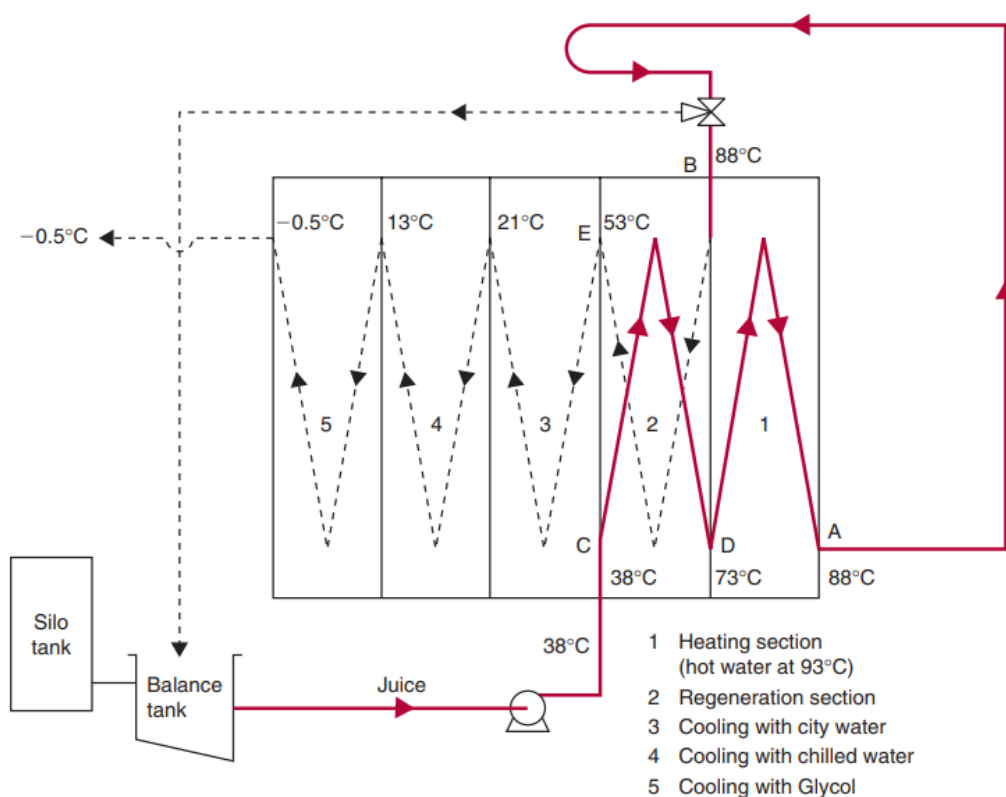
- επιτυγχάνεται θέρμανση ή ψύξη του προϊόντος έως και 1°C ως προς την θερμοκρασία του παρακειμένου μέσου θέρμανσης ή ψύξης με το χαμηλότερο κόστος επένδυσης συγκριτικώς με τους υπόλοιπους εναλλάκτες θερμότητας έμμεσης έπαφης.
- έχουν σχεδιασθή, για να πληρούν τους κανόνες υγιεινής για εφαρμογές σε προϊόντα τροφίμων.
- ή δυναμικότητα αυτών μπορεί εύκόλως να αυξηθῆ με την προσθήκη περισσοτέρων πλακών του πλαισίου αυτών.
- ή συντήρηση αυτών είναι άπλη και μπορούν εύκόλως και με γρήγορο τρόπο να αποσυναρμολογηθούν, για να επιθεωρηθῆ ή επιφάνεια αυτών.
- προσφέρουν την δυνατότητα ανατροφοδότησης για εξοικονόμηση ενέργειας.



Εικόνα 17. Κατατομές που πιέζονται σε πλάκες που χρησιμοποιούνται σε έναν εναλλάκτη πλακών (Grabenstein et al., 2017).



Εικόνα 18. Παστεριωτήρας πλακών πέντε σταδίων για την επεξεργασία του γάλακτος (Singh & Heldman, 2009).

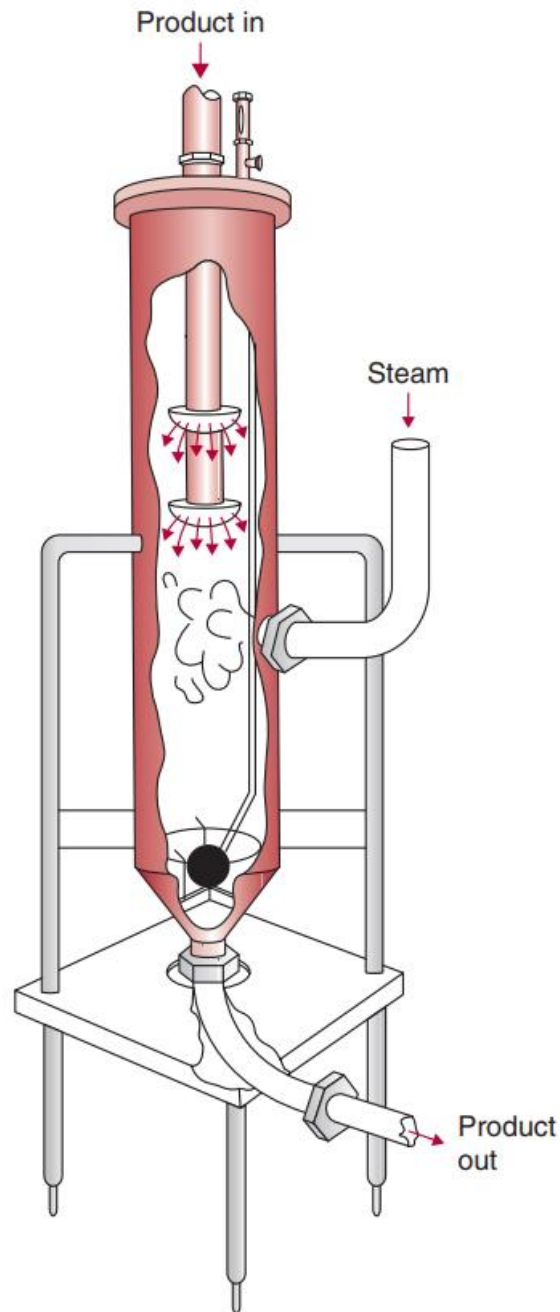


Εικόνα 19. Αμφίδρομο σύστημα ανατροφοδότησης (ανάκτησης), το οποίο χρησιμοποιείται στην επεξεργασία χυμού σταφυλιών (Singh & Heldman, 2009).

Όπως φαίνεται στην άπλη σχηματική απεικόνιση της εικόνας 18, ένα υγρό τρόφιμο θερμαίνεται σε θερμοκρασίες παστερίωσης ή σε άλλες επιθυμητές θερμοκρασίες στο τμήμα θέρμανσης. Στην συνέχεια, το θερμό υγρό μεταδίδει (έκχωρεί) μέρος της θερμοκρασίας του στο νεοεισερχόμενο ρευστό στο τμήμα ανατροφοδότησης. Το ψυχρό ρεῦμα θερμαίνεται σε τέτοια θερμοκρασία, ούτως ως τε να απαιτηται λίγη πρόσθετη ενέργεια προκειμένου να φθάση στην επιθυμητή θερμοκρασία. Για την ανατροφοδότηση απαιτούνται μὲν επιπρόσθετες πλάκες, ωστόσο τὸ ἐπὶ πλέον κόστος ἐπένδυσης μπορεῖ νὰ ἀποσβεσθῆ με γρήγορο τρόπο λόγω τοῦ μειωμένου λειτουργικοῦ κόστους. (Singh & Heldman, 2009).

Στην εικόνα 19 παρουσιάζεται μία ἀμφίδρομη διεργασία ἀνατροφοδότησης γιὰ τὴν περίπτωση τῆς παστερίωσης χυμοῦ σταφυλιῶν. Μετὰ τὴν ἀρχικὴ του θέρμανση στοὺς 88°C (σημεῖο Α), ὁ χυμὸς διέρχεται μέσω ἑνὸς βρόγχου συγκράτησης ἐντὸς τοῦ τμήματος ἀνατροφοδότησης (εἴσοδος στὸ σημεῖο Β). Στὸ τμήμα αὐτὸ ὁ χυμὸς ἀπελευθερώνει τὴν θερμότητά του στὸν νεοεισερχόμενο ἀκατέργαστο χυμὸ (σημεῖο C), ὁ ὁποῖος εἰσέρχεται στὸν ἐναλλάκτη στοὺς 38°C. Ἡ θερμοκρασία τοῦ ἀκατεργάστου χυμοῦ αὐξάνεται στοὺς 73°C (σημεῖο D), ἐνῶ ἡ θερμοκρασία τοῦ ἀρχικοῦ χυμοῦ μειώνεται στοὺς 53°C (σημεῖο E). Στὸ παράδειγμα αὐτό, ἡ ἀνατροφοδότηση (ἀνάκτηση θερμοκρασίας) εἶναι $[(73-38)/(88-38)] \cdot 100$ ἢ 70% δεδομένου ὅτι τὸ εἰσερχόμενο ρεῦμα ἀκατεργάστου χυμοῦ θερμαίνεται στὸ 70% τῆς τελικῆς θερμοκρασίας παστερίωσής του χωρὶς τὴν χρῆση ἐξωτερικοῦ μέσου θέρμανσης. Ὁ χυμὸς, ἐφ' ὅσον θὰ θερμανθῆ στοὺς 73°C, διοχετεύεται στὸ τμήμα θέρμανσης, ὅπου ἡ θερμοκρασία του ἀνυψώνεται στοὺς 88°C, χρησιμοποιώντας θερμὸ νερὸ θερμοκρασίας 93°C ὡς μέσο θέρμανσης. Ὁ θερμὸς χυμὸς στὴν συνέχεια ἀντλεῖται πρὸς τὸ τμήμα ἀνατροφοδότησης καὶ προθερμαίνει τὸν νεοεισερχόμενο ἀκατέργαστο χυμὸ καὶ ὁ κύκλος ἐπαναλαμβάνεται. Ἡ ψύξη τοῦ θερμοῦ παστεριομένου χυμοῦ ἐπιτυγχάνεται, χρησιμοποιώντας: νερὸ ἀστικῆς περιοχῆς, παγωμένο νερὸ ἢ γλυκόλη. Πρέπει νὰ σημειωθῆ ὅτι με τὸν τρόπο αὐτὸν τὸ ποσὸ θερμότητας ποὺ πρέπει νὰ ἀφαιρεθῆ ἀπὸ τὸν παστεριομένο χυμὸ εἶναι μικρότερο, μειώνοντας ἔτσι τὶς ἀπαιτήσεις ψύξης. (Singh & Heldman, 2009).

4.5 Έναλλάκτης θερμότητας ἔγχυσης ἀτμοῦ



Εικόνα 20. Έναλλάκτης θερμότητας ἔγχυσης ἀτμοῦ (Singh & Heldman, 2009).

Αὐτὸς ὁ τύπος ἐναλλάκτη θερμότητας βρῖσκει ἐφαρμογὲς στὸ μαγείρεμα ἢ/καὶ τὴν ἀποστείρωση ἑνὸς μεγάλου εὗρους προϊόντων, ὅπως: συμπυκνωμένες σοῦπες, σοκολάτα, ἐπεξεργασμένο τυρί, μείγματα παγωτοῦ, πουτίγκες, γέμιση πίττας ἀπὸ φροῦτα καὶ γάλα. (Singh & Heldman, 2009).

Κεφάλαιο 5. Μέθοδος αποδοτικότητας/“NTU” για τὸν σχεδιασμὸ ἐναλλακτῶν θερμότητας

Εἶναι ἐφικτὸ νὰ ἐφαρμοσθῇ μία τεχνικὴ ὑπολογισμοῦ ποὺ ὀνομάζεται: «μέθοδος ἀποδοτικότητας τοῦ ἐναλλάκτη». Ἡ μέθοδος αὐτὴ περιλαμβάνει τρία ἀδιάστατα μεγέθη: τὸν λόγος τοῦ ρυθμοῦ θερμοχωρητικότητας, τὴν ἀποδοτικότητα τοῦ ἐναλλάκτη θερμότητας καὶ τὸν ἀριθμὸ τῶν μονάδων μεταφορᾶς.

5.1 Λόγος ρυθμοῦ θερμοχωρητικότητας C

Ὁ ρυθμὸς θερμοχωρητικότητας ἑνὸς ὑγροῦ ρεύματος λαμβάνεται ὡς γινόμενο τοῦ ρυθμοῦ ροῆς μάζας καὶ τῆς εἰδικῆς θερμοχωρητικότητας. Ἔτσι, γιὰ τὰ θερμὰ καὶ ψυχρὰ ρεύματα οἱ ρυθμοὶ θερμοχωρητικότητας εἶναι ἀντιστοίχως:

$$C_H = \dot{m}_H c_{pH}$$

$$C_C = \dot{m}_C c_{pC}$$

Τὰ δύο αὐτὰ μεγέθη ὑπολογίζονται, χρησιμοποιῶντας τὰ δεδομένα στοιχεῖα σὲ ἓνα πρόβλημα. Ἡ μικρότερη ἀπὸ τὶς δύο τιμὲς ὀνομάζεται C_{min} καὶ ἡ μεγαλύτερη C_{max} . Ὁ λόγος τοῦ ρυθμοῦ θερμοχωρητικότητας C ὀρίζεται ὡς ἑξῆς:

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

5.2 Αποδοτικότητα έναλλάκτη θερμότητας ε_E

Η αποδοτικότητα του έναλλάκτη θερμότητας αποτελεί τὸν λόγὸ τοῦ πραγματικοῦ ρυθμοῦ μεταφορᾶς θερμότητας πὸ ἐπιτυγχάνεται καὶ τοῦ μεγίστου δυνατοῦ ρυθμοῦ μεταφορᾶς θερμότητας γιὰ ἓνα δεδομένο έναλλάκτη θερμότητας. Ἡ ἀποδοτικότητὰ τοῦ έναλλάκτη θερμότητας ε_E ὀρίζεται ὡς ἑξῆς:

$$\varepsilon_E = \frac{q_{actual}}{q_{max}}$$

Ὁ πραγματικὸς ρυθμὸς μεταφορᾶς θερμότητας μπορεῖ νὰ προσδιορισθῆ, τόσο γιὰ τὰ θερμά, ὅσο καὶ γιὰ τὰ ψυχρά, ὡς ἑξῆς:

$$q_{actual} = C_H(T_{H,inlet} - T_{H,exit}) = C_C(T_{C,exit} - T_{C,inlet})$$

Ὁ μέγιστος δυνατὸς ρυθμὸς μεταφορᾶς θερμότητας πὸ μπορεῖ νὰ ἐπιτευχθῆ, ὑπολογίζεται παρατηρῶντας ὅτι σὲ κάθε έναλλάκτη θερμότητας ἡ μέγιστη δυνατὴ θερμοκρασιακὴ διαφορὰ παρατηρεῖται μεταξὺ τῶν θερμοκρασιῶν τοῦ θερμοῦ καὶ τοῦ ψυχροῦ ρεύματος στὴν εἴσοδο. Αὐτὴ ἡ διαφορὰ θερμοκρασίας πολλαπλασιάζεται μὲ τὸν ἐλάχιστο ρυθμὸ θερμοχωρητικότητὰς C_{min} γιὰ τὸν ὑπολογισμὸ τοῦ q_{max} :

$$q_{max} = C_{min}(T_{H,inlet} - T_{C,inlet})$$

Ἀπὸ τὴν ἐξίσωσις $\varepsilon_E = \frac{q_{actual}}{q_{max}}$ προκύπτει:

$$q_{actual} = \varepsilon_E q_{max} = \varepsilon_E C_{min}(T_{H,inlet} - T_{C,inlet})$$

5.3 Αριθμός μονάδων μεταφοράς *NTU*

Ο αριθμός των μονάδων μεταφοράς αποτελεί μέτρο του έμβαδου της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας για ένα δεδομένο ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και τον ελάχιστο ρυθμό θερμοχωρητικότητας· εκφράζεται ως εξής:

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

Όπου:

- A : τὸ έμβαδὸν τῆς επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας (m^2).
- U : ὁ ὀλικὸς συντελεστὴς μεταφοράς θερμότητας με βάση τὴν ἐπιλεγμένη ἐπιφάνεια ($W / m^2 \cdot ^\circ C$).
- C_{min} : ὁ ελάχιστος ρυθμὸς θερμοχωρητικότητας ($W / ^\circ C$).

Σχέσεις μεταξύ “NTU” και ἀποδοτικότητας λαμβάνονται για διαφορετικούς τύπους ἐναλλακτῶν θερμότητας με προκαθορισμένες συνθήκες ροῆς (ὄπως: ἀντιροῆς ἢ ὁμοροῆς). Οἱ σχέσεις αὐτὲς περιλαμβάνουν τοὺς λόγους τῶν ρυθμῶν θερμοχωρητικότητας. Μερικὲς ἀπὸ αὐτὲς τὶς ἐξισώσεις για συχνῶς χρησιμοποιουμένους ἐναλλάκτες θερμότητας φαίνονται στοὺς πίνακες 2 και 3. Στὸν πίνακα 2 ἡ ἀποδοτικότητα τοῦ ἐναλλάκτη δίδεται συναρτήσῃ τοῦ “NTU” και στὸν πίνακα 3 οἱ τιμὲς τοῦ “NTU” δίδονται ὡς συνάρτηση τῆς ἀποδοτικότητας τοῦ ἐναλλάκτη. Ἡ μέθοδος “NTU” ἐφαρμόζεται σὲ περίπτωση πὸν χρησιμοποιεῖται ἕνας ἐναλλάκτης και δὲν εἶναι γνωστὲς οἱ θερμοκρασίες ἐξόδου και τοῦ ρευστοῦ τροφίμου και τοῦ ψυκτικοῦ μέσου.

Τύπος έναλλακτη θερμότητας	Έξισωση αποδοτικότητας
Έναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνος (Όμορροή)	$\varepsilon_E = \frac{1 - e^{-NTU(1+C)}}{1 + C}$
Έναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνος (Αντιρροή)	$\varepsilon_E = \frac{1 - e^{-NTU(1-C)}}{1 - C \cdot e^{-NTU(1-C)}}$
Έναλλάκτης θερμότητας αύλου/κελύφους	$\varepsilon_E = \frac{2}{1 + C + \sqrt{1 + C^2} \frac{1 + e^{(-NTU\sqrt{1+C^2})}}{1 - e^{(-NTU\sqrt{1+C^2})}}}$
Έναλλάκτης θερμότητας πλακών	$\varepsilon_E = \frac{e^{[(1-C)NTU]-1}}{e^{[(1-C)NTU]-C}}$
Όλοι οι έναλλάκτες θερμότητας ($C = 0$)	$\varepsilon_E = 1 - e^{(-NTU)}$

Πίνακας 2. Έξισώσεις αποδοτικότητας/“NTU” για έναλλάκτες θερμότητας (Γιαννιώτης κ.ά., 2018).

Τύπος έναλλακτη θερμότητας	Έξισωση “NTU”
Έναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνος (Όμορροή)	$NTU = -\frac{\ln [1 - \varepsilon_E(1 + C)]}{1 + C}$
Έναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνος (Αντιρροή)	$NTU = \frac{1}{1-C} \ln \left(\frac{1-C \cdot \varepsilon_E}{1-\varepsilon_E} \right), C < 1$ $NTU = \frac{\varepsilon_E}{1-\varepsilon_E}, C = 1$
Έναλλάκτης θερμότητας αύλου/κελύφους	$NTU = \frac{1}{\sqrt{1 + C^2}} \ln \frac{2 - \varepsilon_E(1 + C - \sqrt{1 + C^2})}{2 - \varepsilon_E(1 + C + \sqrt{1 + C^2})}$
Έναλλάκτης θερμότητας πλακών	$NTU = \frac{\ln \left(\frac{1-C}{1-\varepsilon_E} \right)}{1-C}$
Όλοι οι έναλλάκτες θερμότητας ($C = 0$)	$NTU = -\ln (1 - \varepsilon_E)$

Πίνακας 3. Έξισώσεις αποδοτικότητας/“NTU” για έναλλάκτες θερμότητας (Γιαννιώτης κ.ά., 2018).

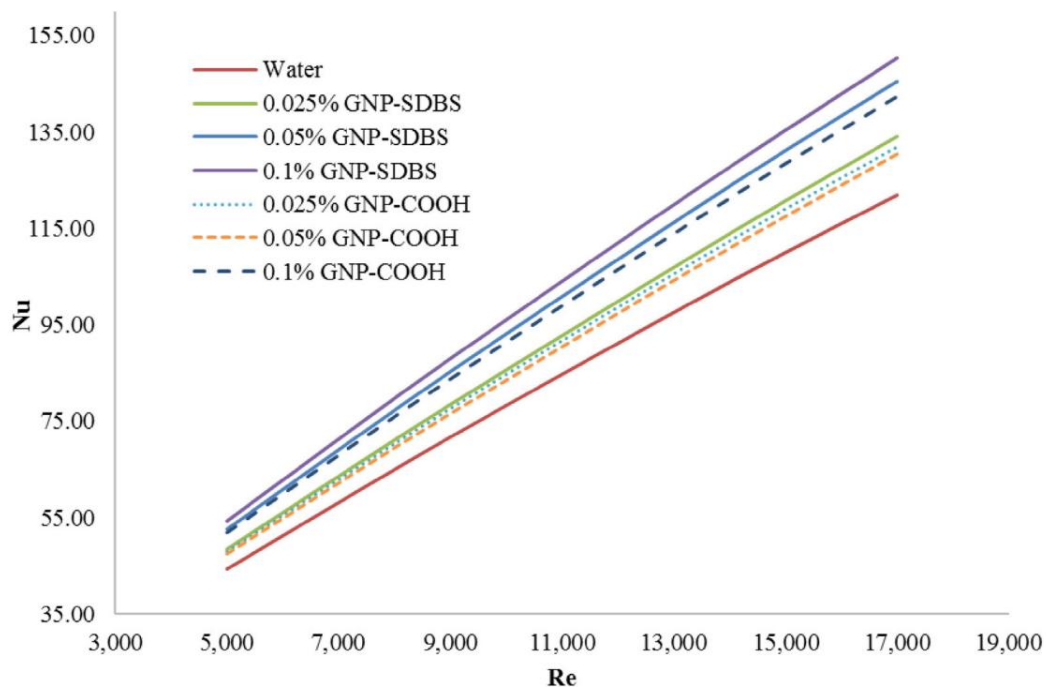
Κεφάλαιο 6. Νανορρευστά: ή νέα τάση

6.1 Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση θερμοφυσικῶν ιδιοτήτων μεταφορᾶς θερμότητας και πτώσης πίεσης νανορρευστῶν σὲ δακτυλοειδῆ ἐναλλάκτη θερμότητας

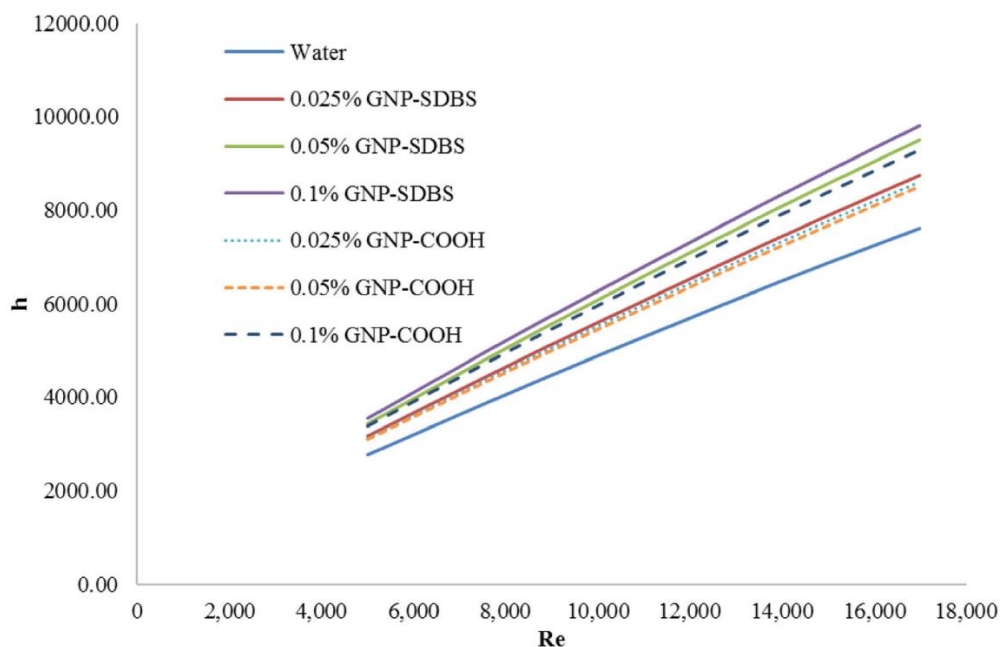
Τὸ νανορρευστὸ ὀρίζεται ὡς ἓνα νέο εἶδος ῥευστοῦ ποὺ περιλαμβάνει διαφορετικὰ νανοσωματίδια, τὰ ὁποῖα αἰωροῦνται σὲ ὑγρά μόρια. Συμφῶνως μὲ τὶς πειραματικὲς ἔρευνες, τὰ νανορρευστὰ ἔχουν δείξει σημαντικὴ δυνατότητα αὐξήσης τῆς μεταφορᾶς ἐνεργείας καὶ ὑψηλότερη θερμικὴ ἀγωγιμότητα σὲ σύγκριση μὲ τὰ βασικὰ ῥευστά. (Arzani et al., 2015).

	Νερὸ	“GNP-SDBS”/νερὸ			“GNP-COOH”/νερὸ		
		0,025%	0,05%	0,1%	0,025%	0,05%	0,1%
Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	994,1	995,1151	996,8895	998,158	994,9564	995,9241	996,8885
Εἰδικὴ θερμότητα c_p (J/kg·K)	4178	4152,66	4104,075	4055,95	4164,51	4111,11	4056,685
Θερμικὴ ἀγωγιμότητα k (W/m·K)	0,6230	0,6450	0,675	0,695	0,685	0,71	0,754
Ἰξῶδες μ (N·s/m ²)	0,0007	0,0010	0,0011	0,0013	0,0008	0,0009	0,0009

Πίνακας 4. Οἱ ἀποτελεσματικὲς φυσικὲς ιδιότητες τῶν νανορρευστῶν σὲ διαφορετικὰ κλάσματα μάζας (Arzani et al., 2015).



Εικόνα 21. Διάγραμμα του αριθμού “Nusselt” συναρτήσει του αριθμού “Reynolds” για διαφορετικές συγκεντρώσεις ναορρευστών (Arzani et al., 2015).



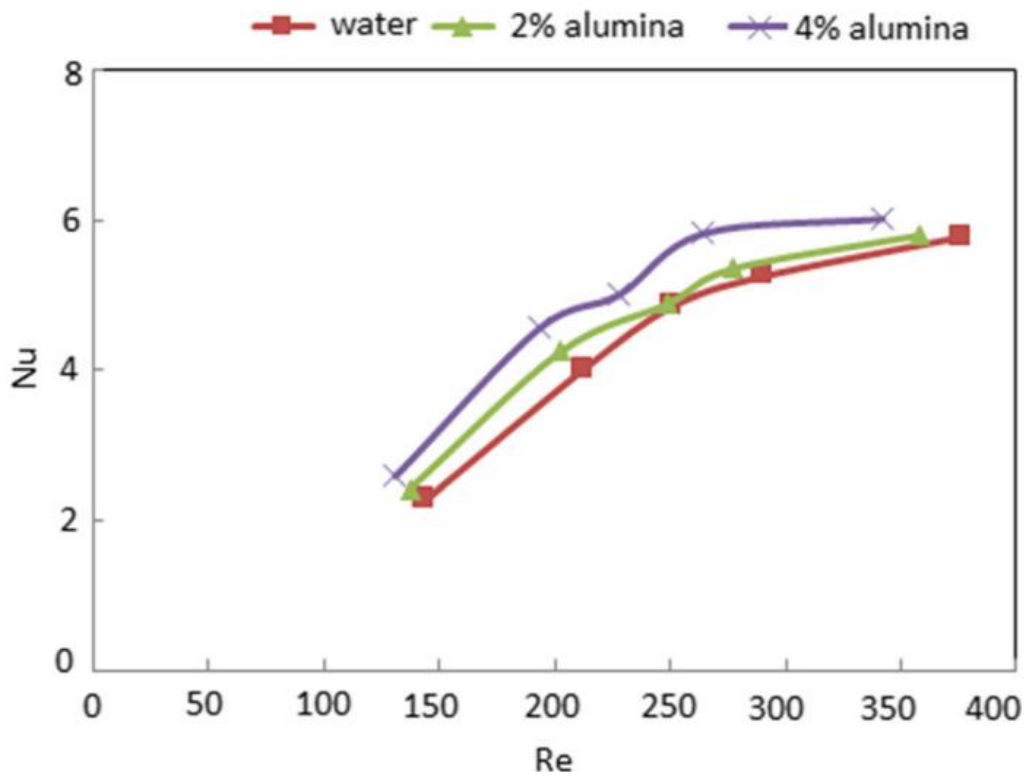
Εικόνα 22. Διάγραμμα του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή συναρτήσει του αριθμού “Reynolds” (Arzani et al., 2015).

6.2 Ένισχυση μεταφοράς θερμότητας στην θερμική επεξεργασία χυμού τομάτας με εφαρμογή νανορρευστών

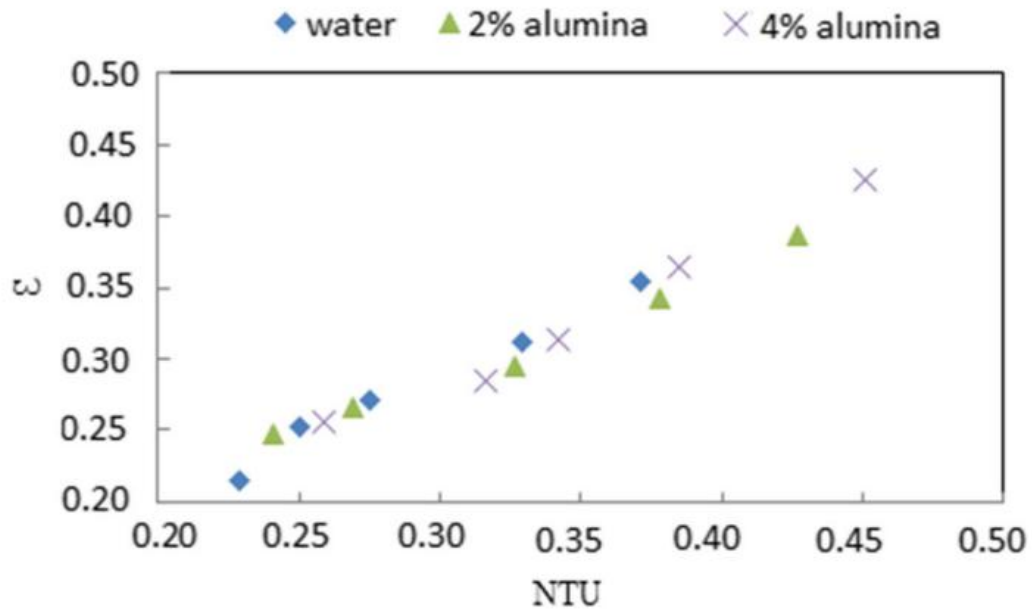
Ο πίνακας 5 δείχνει ότι η ένσωμάτωση νανοσωματιδίων θα μπορούσε να αυξήσει την πυκνότητα και το ιξώδες και την θερμική αγωγιμότητα και να μειώσει την ειδική θερμότητα. Τα ίδια εύρη και τάσεις παρατηρήθηκαν σε μία άλλη μελέτη για την πυκνότητα και την ειδική θερμότητα και την θερμική αγωγιμότητα νανορρευστών οξειδίου του άργιλιού (Pandey & Nema, 2012). Το σημαντικό σημείο είναι ότι οι αυξουσες και φθίνουσες τάσεις σε αυτήν την έρευνα ήταν γραμμικές για καθεμία από τις τέσσερις ιδιότητες. Ωστόσο, οι μη γραμμικές τάσεις για αλλαγές στην πυκνότητα και την ειδική θερμότητα και το ιξώδες των νανορρευστών με νανοσωματίδια οξειδίου του άργιλιού αναφέρονται σε δύο άλλες μελέτες στις οποίες προστέθηκαν νανοσωματίδια οξειδίου του άργιλιού με διάμετρο 50nm στο βασικό ρευστό του νερού και χρησιμοποιήθηκαν για την ένισχυση της μεταφοράς θερμότητας στους χυμούς καρπουζιού (Jafari et al., 2017) (Saremnejad et al., 2017). Αυτή η διαφορά θα μπορούσε να οφείλεται στην διάμετρο των νανοσωματιδίων. Σε μία άλλη μελέτη βρέθηκε μία μη γραμμική αύξηση στο ιξώδες του νερού μετά την προσθήκη νανοσωματιδίων οξειδίου του άργιλιού με διάμετρο 33nm (Ho et al., 2010).

Συγκέντρωση νανοσωματιδίων (%)	Πυκνότητα ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Ίξωδες μ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	Ειδική θερμότητα c_p ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Θερμική αγωγιμότητα k ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
0	996	0,611	4181	0,610
1	1025	0,627	4056	0,628
2	1054	0,645	3937	0,645
3	1083	0,664	3825	0,664
4	1112	0,682	3719	0,682

Πίνακας 5. Θερμοφυσικές ιδιότητες νανορρευστών με νανοσωματίδια οξειδίου του άργιλιού (Al_2O_3) σε διαφορετικές συγκεντρώσεις νανοσωματιδίων (Jafari et al., 2016).



Εικόνα 23. Διάγραμμα του αριθμού “Nusselt” συναρτήσει του αριθμού “Reynolds” για διαφορετικές συγκεντρώσεις νανορρευστών με νανοσωματίδια οξειδίου του άργιλιού (Jafari et al., 2016).



Εικόνα 24. Διάγραμμα της αποδοτικότητας του εναλλάκτη θερμότητας συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς (Jafari et al., 2016).

6.3 Πειραματική διερεύνηση τῆς θερμικῆς ἀπόδοσης συμπαγοῦς ἐναλλάκτη θερμότητας καὶ τῶν ῥεολογικῶν ιδιοτήτων τῶν ναορρευστῶν χαμηλῆς συγκέντρωσης ποὺ περιέχουν ναοσωματίδια ὀξειδίου τοῦ ἀργιλίου καὶ ὀξειδίου τοῦ χαλκοῦ

Ἡ παροῦσα ἐργασία ἐπικεντρώθηκε στὴν προετοιμασία καὶ τὴν μελέτη τῶν ναορρευστῶν καὶ τῶν θερμικῶν ιδιοτήτων, ὅπως: ἡ πυκνότητα, ἡ εἰδικὴ θερμότητα, ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότητα καὶ τὸ ἰξῶδες τῶν ναορρευστῶν. Μὲ βάση τὰ πειράματα ποὺ διεξήχθησαν, διαπιστώθηκε ὅτι ἡ χρῆση τῶν ναορρευστῶν Al_2O_3 καὶ CuO σὲ ἐναλλάκτη θερμότητας παρουσίασε αὐξηση τόσο στὸν ἀριθμὸ “Nusselt” ὅσο καὶ στοὺς μέσους συντελεστὲς μεταφορᾶς θερμότητας. (Asokan et al., 2020).

		Συγκέντρωση ὄγκου (%)					
		Al_2O_3			CuO		
Ἰδιότητες	(Βασικὸ ῥευστὸ)	0,02	0,04	0,06	0,02	0,04	0,06
Πυκνότητα ρ (kg/m^3)	1084	1134	1184	1235	1192	1300	1409
Εἰδικὴ θερμότητα c_p ($J/kg \cdot K$)	3184	2997	2859	2731	2863	2625	2424
Θερμικὴ ἀγωγιμότητα k ($W/m \cdot K$)	0,3729	0,4203	0,4423	0,4657	0,4243	0,448	0,4721
Ἰξῶδες μ ($kg/m \cdot s$)	0,00423	0,00539	0,00699	0,00906	0,00615	0,00971	0,01534

Πίνακας 6. Θερμοφυσικὲς ιδιοτήτες τῶν ναορρευστῶν μὲ ναοσωματίδια ὀξειδίου τοῦ ἀργιλίου (Al_2O_3) καὶ ὀξειδίου τοῦ χαλκοῦ (CuO) (Asokan et al., 2020).

6.4 Πειραματική διερεύνηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και του συντελεστή τριβής του ναορρευστοῦ με νανοσωματίδια διοξειδίου του τιτανίου σε έναλλάκτη θερμότητας διπλοῦ σωλήνος

Οι παρατηρήσεις από την πειραματική έρευνα είναι οι εξής:

- στο ναορρευστό με νανοσωματίδια διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) σε συγκέντρωση 0,02%, ὑπῆρξε ἐνίσχυση τῆς μεταφοῶς θερμότητας ἀπὸ 7,85% σὲ 10,73%, ὅταν ὁ ἀριθμὸς “Reynolds” κυμαίνονταν μεταξύ 4000 καὶ 15.000, σὲ σύγκριση μὲ τὸ βασικὸ ρευστό.

- σὲ ἀναλογία $P/d = 2,5$ ὑπῆρξε αὐξηση ἀπὸ 7,85% σὲ 16,11% μὲ $Re = 4000$.

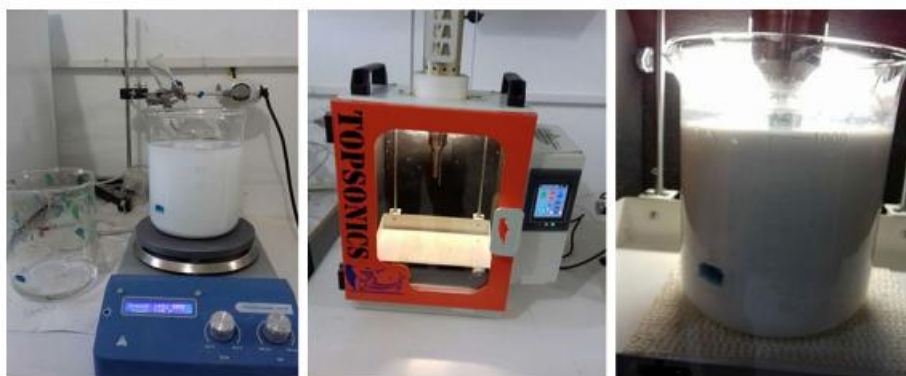
ἡ βελτίωση στὴν μεταφορὰ θερμότητας αὐξήθηκε περαιτέρω σὲ 17,71% μὲ $Re = 15.000$.

Reynolds (Re)	P/d = 0		P/d = 2,5	
	Ναορρευστό με συγκέντρωση ὄγκου 0,02%			
		Βασικὸ ρευστό· μείγμα αἰθυλενογλυκόλης καὶ νεροῦ σὲ ἀναλογία 40:60% κατὰ βάρος		Ναορρευστό μὲ νανοσωματίδια διοξειδίου τοῦ τιτανίου (TiO_2) σὲ συγκέντρωση ὄγκου 0,02%
4000	7,85	9,89		16,11
15.000	10,73	13,85		17,71

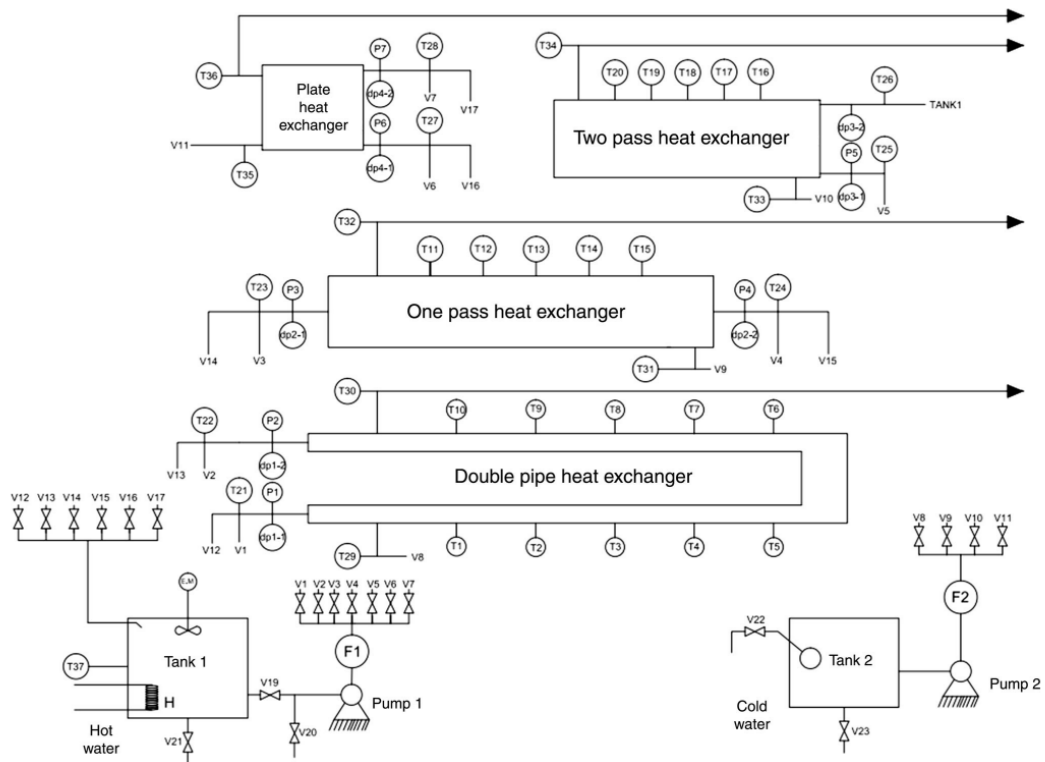
Πίνακας 7. Ποσοστιαία βελτίωση τοῦ συντελεστή μεταφοῶς θερμότητας (Reddy & Rao, 2014).

6.5 Επίδραση τοῦ νανορρευστοῦ μὲ νανοσωματίδια ὀξειδίου τοῦ ἀργιλίου στὴν ἀπόδοση τῆς θερμότητας σὲ συνθήκες ὁμορροῆς

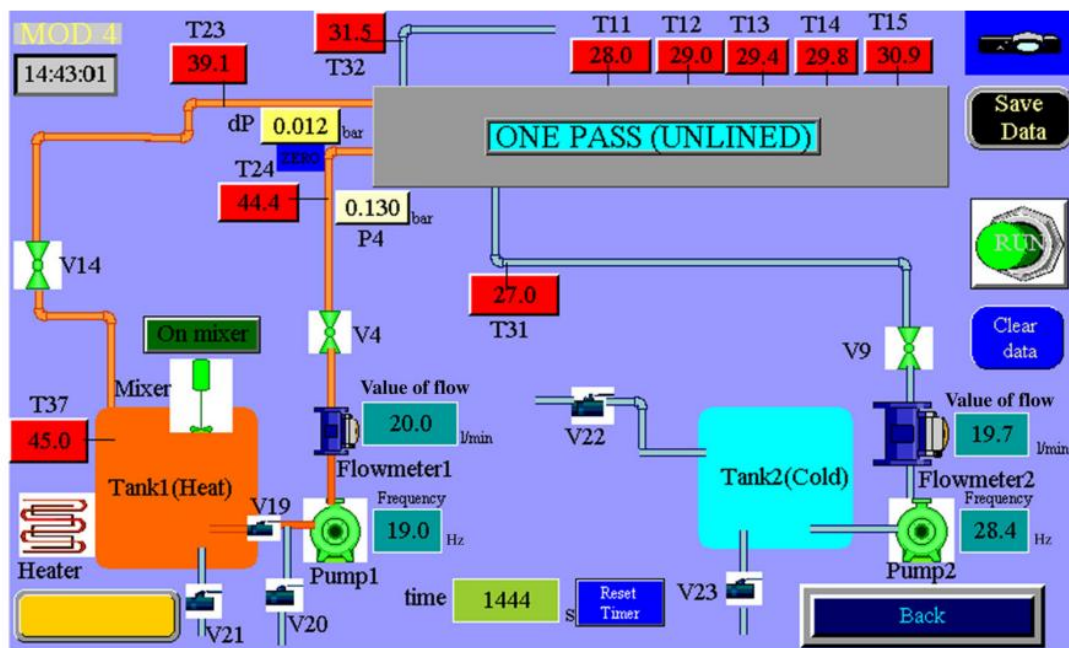
Ἡ συγκεκριμένη ἐργασία παρῆχε μία πειραματικὴ μελέτη τῆς ἐπίδρασης τοῦ νανορρευστοῦ μὲ νανοσωματίδια ὀξειδίου τοῦ ἀργιλίου στὴν μεταφορὰ θερμότητας καὶ τὴν πτώση πίεσης σὲ διαφόρους ἐναλλάκτες θερμότητας σὲ συνθήκες ὁμορροῆς. Κάτω ἀπὸ τὶς ἴδιες πειραματικὲς συνθήκες: ὁ ἐναλλάκτης θερμότητας διπλοῦ σωλῆνος παρουσίασε τὴν καλλίτερη ἀντίδραση στὴν μεταφορὰ θερμότητας τοῦ νανορρευστοῦ μὲ μεγίστη βελτίωση 26%, ἐνῶ ὁ ἐναλλάκτης θερμότητας πλακῶν παρουσίασε μία αὐξηση 7% στὸν ἀριθμὸ “Nusselt”. Ἐπ’ ἴσης, τὸ ὑψηλότερο ποσοστὸ τῆς πτώσης πίεσης καὶ κατὰ συνέπεια τοῦ συντελεστῆ τριβῆς ἐμφανίστηκε στὸν ἐναλλάκτη θερμότητας διπλοῦ σωλῆνος, ἐνῶ ὁ ἐναλλάκτης θερμότητας πλακῶν ἐμφάνισε τὸ χαμηλότερο ποσοστὸ αὐτῶν τῶν παραμέτρων μεταξὺ τῶν ἀποτελεσμάτων. (Mansoury et al., 2018).



Εἰκόνα 25. Προετοιμασία τῶν νανορρευστῶν (Mansoury et al., 2018).



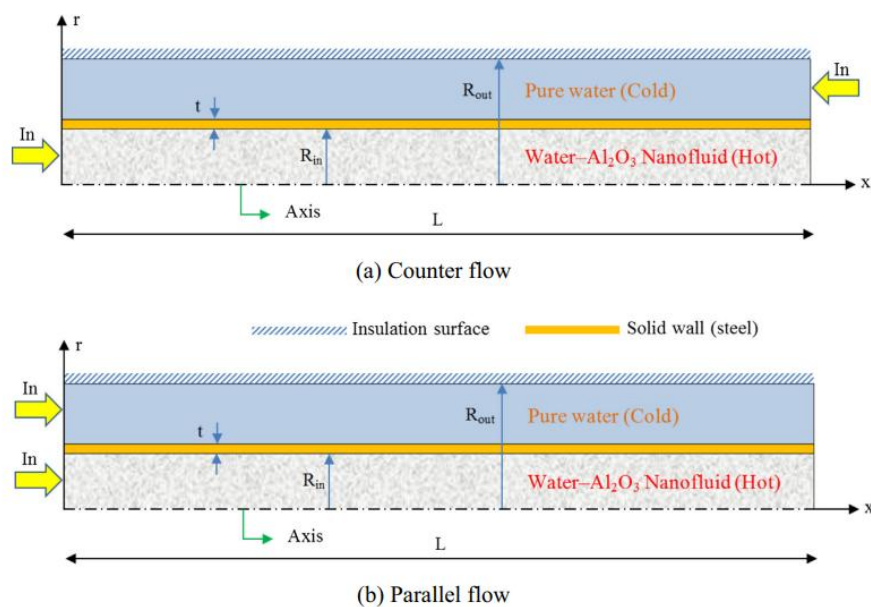
Εικόνα 26. Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής δοκιμής (Mansoury et al., 2018).



Εικόνα 27. Παράμετροι και αποτελέσματα του πειράματος (Mansoury et al., 2018).

6.6 Διερεύνηση τυρβώδους ροής και μεταφοράς θερμότητας του ναορρευστοῦ σὲ ἐναλλάκτη θερμότητας διπλοῦ σωλῆνος

Στὴν παροῦσα μελέτη διερευνήθηκε ἡ μεταφορὰ θερμότητας καὶ ἡ τυρβώδης ροὴ τοῦ ναορρευστοῦ μὲ ὁμοροῆ καὶ ἀντιροῆ σὲ ἐναλλάκτη θερμότητας διπλοῦ σωλῆνος. Τὰ ἀποτελέσματα ἔδειξαν ὅτι ἡ αὔξηση τοῦ κλάσματος ὄγκου τῶν ναοσωματιδίων ἢ τοῦ ἀριθμοῦ “Reynolds” προκαλεῖ αὔξηση τοῦ ἀριθμοῦ “Nusselt” καὶ τοῦ συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότητας μὲ συναγωγή. Ἐπ’ ἴσης, μὲ τὴν αὔξηση τοῦ κλάσματος ὄγκου τῶν ναοσωματιδίων, αὐξάνεται ἡ θερμοκρασία ἐξόδου τοῦ ναορρευστοῦ καὶ ἡ θερμοκρασία τοῦ τοιχώματος. Μελετῶντας τὴν ἐλάχιστη θερμοκρασία στὸ στερεὸ τοίχωμα τοῦ ἐναλλάκτη θερμότητας, μπορεῖ νὰ παρατηρηθῆ ὅτι ἡ ἐλάχιστη θερμοκρασία σὲ συνθήκες ἀντιροῆς ἔχει μειωθῆ σημαντικῶς σὲ σύγκριση μὲ τὶς συνθήκες ὁμοροῆς. Ὡστόσο, αὐξάνοντας τὸν ἀριθμὸ “Reynolds”, ἡ κλίση τῆς αὔξησης τῆς θερμικῆς ἀπόδοσης τοῦ ἐναλλάκτη θερμότητας τείνει σταδιακῶς σὲ ἓνα σταθερὸ ποσοστὸ· αὐτὴ ἡ συμπεριφορὰ εἶναι πιὸ ἐμφανῆς σὲ συνθήκες ὁμοροῆς. Ἐπομένως, ἡ χρῆση ἐναλλάκτη θερμότητας σὲ συνθήκες ἀντιροῆς συνίσταται σὲ ὑψηλότερους ἀριθμοὺς “Reynolds”. (Bahmani et al., 2017).



Εἰκόνα 28. Ἀντιροῆ καὶ ὁμοροῆ τοῦ ναορρευστοῦ μὲ ναοσωματιδία ὀξειδίου τοῦ ἀργιλίου (Al_2O_3) στὸν ἐναλλάκτη θερμότητας διπλοῦ σωλῆνος (Bahmani et al., 2017).

6.7 Έκτίμηση του αριθμού “Nusselt” και της αποτελεσματικότητας του εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνος σε νανορρευστά με νανοσωματίδια Al_2O_3 και CuO και TiO_2 και ZnO

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μελέτες για την ανάλυση των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας των νανορρευστών με νανοσωματίδια οξειδίου του άργιλιου (Al_2O_3) και οξειδίου του χαλκού (CuO) και διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) και οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) σε εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνος σε συνθήκες άντιρροής. Παρατηρήθηκε από το πείραμα ότι: με την αύξηση της συγκέντρωσης ὄγκου, ή θερμική αγωγιμότητα και το ιξώδες και ο παράγοντας τριβής αυξάνονται, ενώ ο αριθμός “Reynolds” μειώνεται. Έπ’ ίσης, διαπιστώθηκε ότι η υψηλότερη αποτελεσματικότητα επιτεύχθηκε κατά την χρήση νανορρευστών με νανοσωματίδια διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2). (Pattanayak et al., 2020).

Συγκεντρώσεις ὄγκου (%)	0,025	0,05	0,075	0,1
$k_{Al_2O_3}$	0,6733	0,7210	0,7710	0,8234
k_{CuO}	0,6736	0,7215	0,7718	0,8248
k_{TiO_2}	1,0400	1,0940	1,1450	1,1960
k_{ZnO}	0,6743	0,7230	0,7743	0,8282

Πίνακας 8. Θερμική αγωγιμότητα ($W/m \cdot K$) νανορρευστών σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ὄγκου (Pattanayak et al., 2020).

Συγκεντρώσεις ὄγκου (%)	0,025	0,05	0,075	0,1
$\mu_{Al_2O_3}$	0,000883	0,000932	0,00096	0,000996
μ_{CuO}	0,001918	0,003560	0,005756	0,008505
μ_{TiO_2}	0,000882	0,000934	0,000985	0,001037
μ_{ZnO}	0,0009903	0,001280	0,001674	0,002180

Πίνακας 9. Ίξώδες ($kg/m \cdot s$) νανορρευστών σε διαφορετικές συγκεντρώσεις ὄγκου (Pattanayak et al., 2020).

Συγκεντρώσεις όγκου (%)	0,025	0,05	0,075	0,1
$c_{p_{Al_2O_3}}$	3862,60	3583,70	3335,80	3117,78
$c_{p_{CuO}}$	3662,47	3248,04	2912,38	2477,97
$c_{p_{TiO_2}}$	3860,96	3577,57	3328,97	3109,13
$c_{p_{ZnO}}$	3725,09	3296,14	3038,63	2776,62

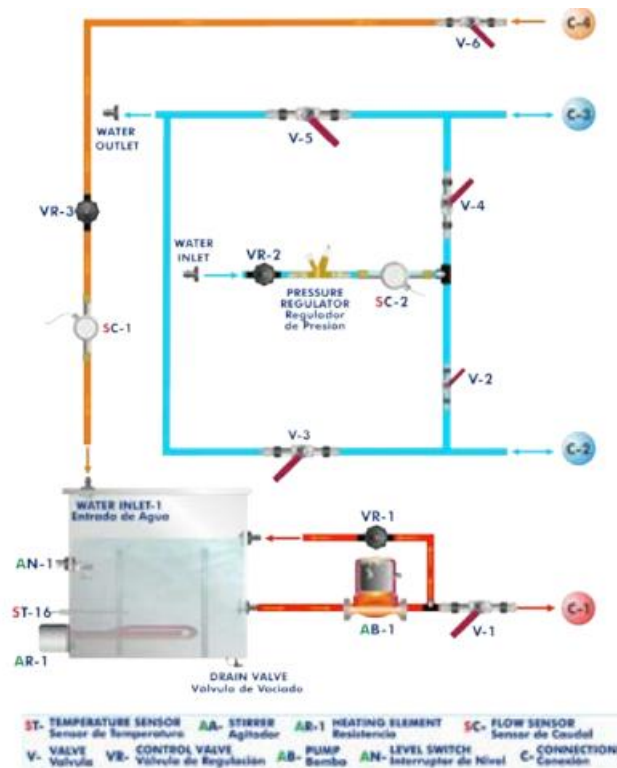
Πίνακας 10. Ειδική θερμότητα (J/kg·K) νανορρευστών σε διαφορετικές συγκεντρώσεις όγκου (Pattanayak et al., 2020).

Νανορρευστά	Συγκεντρώσεις όγκου (%)	ϵ
Al₂O₃-νερό	0,025	0,4450
	0,05	0,4540
	0,075	0,4520
	0,1	0,4510
CuO-νερό	0,025	0,5202
	0,05	0,5197
	0,075	0,5334
	0,1	0,5312
TiO₂-νερό	0,025	0,5204
	0,05	0,5168
	0,075	0,5346
	0,1	0,5229
ZnO-νερό	0,025	0,4727
	0,05	0,4806
	0,075	0,4912
	0,1	0,4828

Πίνακας 11. Σύγκριση αποτελεσματικότητας διαφόρων νανορρευστών (Pattanayak et al., 2020).

Κεφάλαιο 7. Πειραματικό μέρος

7.1 Μονάδα βάσης “TIUS”



Εικόνα 29. Διάγραμμα της μονάδας βάσης “TIUS” (Edibon, 2019).



Εικόνα 30. Μονάδα βάσης “TIUS” (Εργαστήριο κτηρίου διοίκησης, Λήμνος).

Ἡ δεξαμενὴ ἀπὸ ἀνοξείδωτο χάλυβα γιὰ τὴν θέρμανση τοῦ ρευστοῦ τροφίμου στὸ θερμὸ ρεῦμα περιλαμβάνει στὸ ἐσωτερικὸ τῆς τὰ ἑξῆς: μίᾳ ἠλεκτρικῇ ἀντίστασι “AR-1”, ἕναν αἰσθητήρα στάθμης “AN-1” – ὁ ὁποῖος ἐγγυᾶται ἕνα συγκεκριμένο ἐπίπεδο στὴν δεξαμενὴ – καὶ ἕναν αἰσθητήρα θερμοκρασίας “ST-16” τοῦ ρευστοῦ τροφίμου. Ὁ ρυθμιστὴς πίεσης “RP-1” ἐπιτρέπει τὴν ρύθμιση τῆς πίεσης εἰσόδου τοῦ νεροῦ. Ἡ μονάδα τροφοδοτεῖται μὲ τὸν ρυθμιστὴ νᾶναι ρυθμισμένος στὰ 0,7 bars περίπου γιὰ τὴν ἀποφυγὴ ὑπερπίεσης στὴν μονάδα ποὺ τροφοδοτεῖ. Ἡ φυγοκεντρικὴ ἀντλία “AB-1” τοῦ ρευστοῦ τροφίμου – ἡ ὁποία εἶναι περωτὴ – ἐπιτρέπει τὴν διακύμανση τῆς παροχῆς ποὺ κυκλοφορεῖ μέσῳ τοῦ θερμοῦ κυκλώματος. Ἡ “VR-1” εἶναι ἡ βαλβίδα ρύθμισης τῆς παράκαμψης τοῦ ρευστοῦ τροφίμου στὸ θερμὸ ρεῦμα. Ἡ “VR-2” εἶναι ἡ βαλβίδα ρύθμισης τῆς παροχῆς τοῦ νεροῦ στὸ ψυχρὸ ρεῦμα. Ἡ “VR-3” εἶναι ἡ βαλβίδα ρύθμισης τῆς παροχῆς τοῦ ρευστοῦ τροφίμου στὸ θερμὸ ρεῦμα. Ἡ “V-1” εἶναι ἡ σφαιρικὴ βαλβίδα διέλευσης καὶ ἡ “V-6” εἶναι ἡ σφαιρικὴ βαλβίδα ἀποξήρασης τοῦ ρευστοῦ τροφίμου στὸ θερμὸ ρεῦμα. Οἱ “V-2, V-3, V-4, V-5” εἶναι σφαιρικὲς βαλβίδες διέλευσης, οἱ ὁποῖες ἐπιτρέπουν τὴν μεταβολὴ τῆς κατεύθυνσης τῆς ροῆς πρὸς τὸν ἐναλλάκτη μέσῳ τοῦ ψυχροῦ κυκλώματος. Ὁ “SC-1” εἶναι ὁ αἰσθητήρας ροῆς, ὁ ὁποῖος μετρᾷ τὴν παροχὴ τοῦ ρευστοῦ τροφίμου στὸ θερμὸ ρεῦμα. Ὁ “SC-2” εἶναι ὁ αἰσθητήρας ροῆς, ὁ ὁποῖος μετρᾷ τὴν παροχὴ τοῦ νεροῦ στὸ ψυχρὸ ρεῦμα. (Edibon, 2018).

Διαστάσεις καὶ βάρος:

- καθαρὸ βάρος = 30 kg
- ὕψος = 400 mm
- πλάτος = 1100 mm
- βάθος = 650 mm

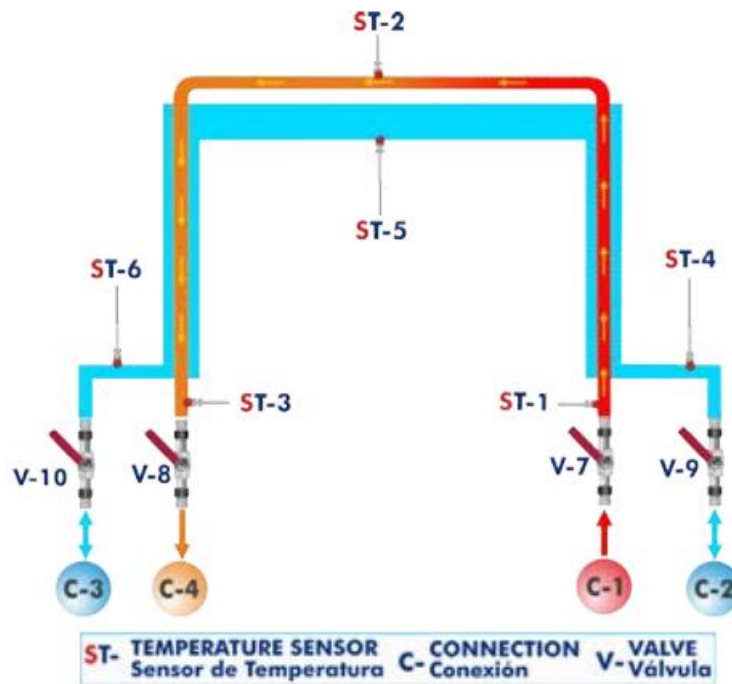
Ὅμορροή	
Βαλβίδα “V-2”	Ἀνοικτὴ
Βαλβίδα “V-3”	Κλειστὴ
Βαλβίδα “V-4”	Κλειστὴ
Βαλβίδα “V-5”	Ἀνοικτὴ

Πίνακας 12. Διάταξη βαλβίδων γιὰ ὁμορροή (Edibon, 2018).

Ἄντιρροή	
Βαλβίδα “V-2”	Κλειστὴ
Βαλβίδα “V-3”	Ἀνοικτὴ
Βαλβίδα “V-4”	Ἀνοικτὴ
Βαλβίδα “V-5”	Κλειστὴ

Πίνακας 13. Διάταξη βαλβίδων γιὰ ἀντιρροή (Edibon, 2018).

7.2 Έναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνος “TITC”



Εικόνα 31. Διάγραμμα του έναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνος “TITC” (Edibon, 2019).



Εικόνα 32. Έναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνος “TITC” (Εργαστήριο κτηρίου διοίκησης, Λήμνος).

Αναγνωριστικά	Περιγραφή
ST-1	Αισθητήρας θερμοκρασίας του ρευστού τροφίμου στην είσοδο του έναλλάκτη.
ST-2	Αισθητήρας θερμοκρασίας του ρευστού τροφίμου σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη.
ST-3	Αισθητήρας θερμοκρασίας του ρευστού τροφίμου στην έξοδο του έναλλάκτη.
ST-4	Αισθητήρας θερμοκρασίας του νερού στην είσοδο του έναλλάκτη για όμορροή και στην έξοδο του έναλλάκτη για αντίρροή.
ST-5	Αισθητήρας θερμοκρασίας του νερού σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη.
ST-6	Αισθητήρας θερμοκρασίας του νερού στην είσοδο του έναλλάκτη για αντίρροή και στην έξοδο του έναλλάκτη για όμορροή.
V-7	Βαλβίδα διέλευσης και αποξήρανσης του ρευστού τροφίμου μέσω του θερμού κυκλώματος στην είσοδο του έναλλάκτη.
V-8	Βαλβίδα διέλευσης και αποξήρανσης του ρευστού τροφίμου μέσω του θερμού κυκλώματος στην έξοδο του έναλλάκτη.
V-9	Βαλβίδα διέλευσης και αποξήρανσης του νερού μέσω του ψυχρού κυκλώματος στην είσοδο του έναλλάκτη για όμορροή και στην έξοδο του έναλλάκτη για αντίρροή.
V-10	Βαλβίδα διέλευσης και αποξήρανσης του νερού μέσω του ψυχρού κυκλώματος στην είσοδο του έναλλάκτη για αντίρροή και στην έξοδο του έναλλάκτη για όμορροή.
P-1	Βαλβίδα καθαρισμού, ή όποια επιτρέπει την απελευθέρωση αέρα από το θερμό ρεύμα.
P-2	Βαλβίδα καθαρισμού, ή όποια επιτρέπει την απελευθέρωση αέρα από το ψυχρό ρεύμα.

Πίνακας 14. Έξοπλισμός του έναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνος “TITC” (Edibon, 2018).

Μήκος έναλλάκτη

$$L = 2 \cdot 0,5 \text{ m} \Leftrightarrow L = 1 \text{ m}$$

Ἐσωτερικὸς σωλήνας:

- ἔσωτερικὴ διάμετρος: $D_{int} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- ἔξωτερικὴ διάμετρος: $D_{ext} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- πάχος = 10^{-3} m
- ἔσωτερικὴ ἐπιφάνεια μεταφορᾶς θερμότητας: $A_h = 0,0503 \text{ m}^2$
- ἔξωτερικὴ ἐπιφάνεια μεταφορᾶς θερμότητας: $A_c = 0,0565 \text{ m}^2$

Ἐξωτερικὸς σωλήνας:

- ἔσωτερικὴ διάμετρος: $D_{int} = 26 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- ἔξωτερικὴ διάμετρος: $D_{ext} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- πάχος = 10^{-3} m

Διαστάσεις καὶ βάρους:

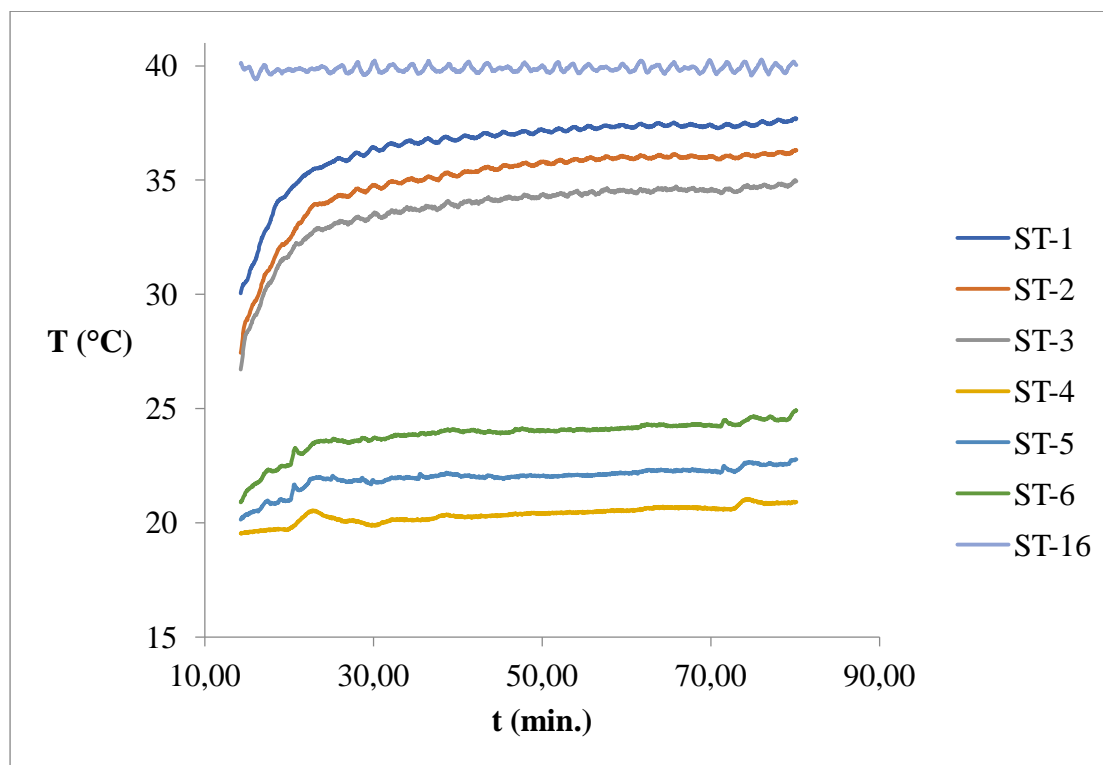
- καθαρὸ βάρους = 20 kg
- ὕψος = 200 mm
- πλάτος = 1000 mm
- βάθος = 500 mm

Παρατήρηση

Ἡ ἐπεξεργασία τῶν ἀποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε σὲ ἀρχεῖα “Excel”. Στὰ διαγράμματα συναρτήσῃ τοῦ χρόνου δὲν ἐλήφθησαν ὑπ’ ὄψιν τὰ πρῶτα λεπτά, ἐπειδὴ ὁ αἰσθητήρας θερμοκρασίας “ST-16” δὲν εἶχε φθάσει στὴν ἐπιθυμητὴ θερμοκρασία.

7.3 Αποτελέσματα

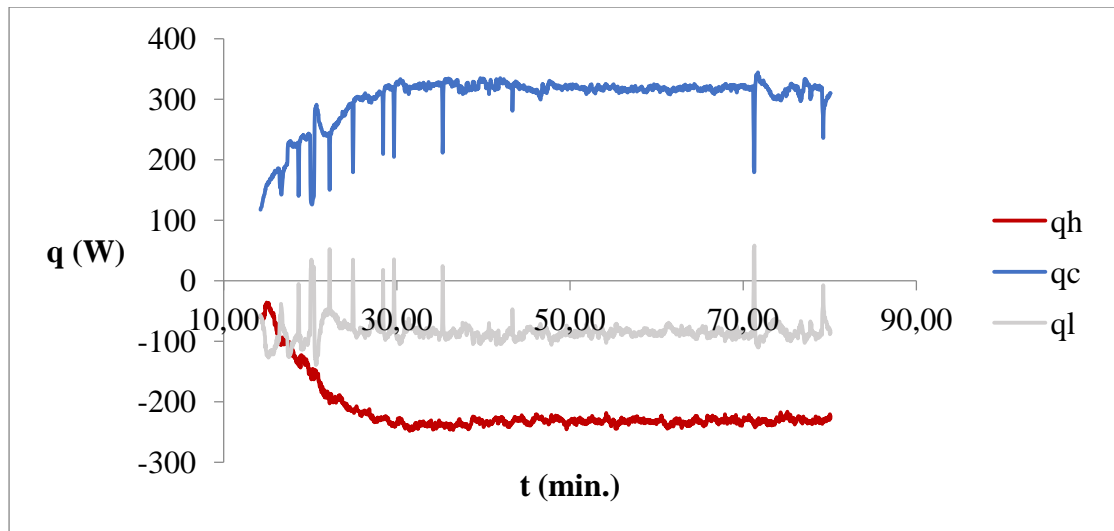
7.3.1 Πείραμα 1^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 1,4 L/min. και θερμοκρασία στους 40°C σε συνθήκες όμορροης



Σχήμα 7.3.1.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου.

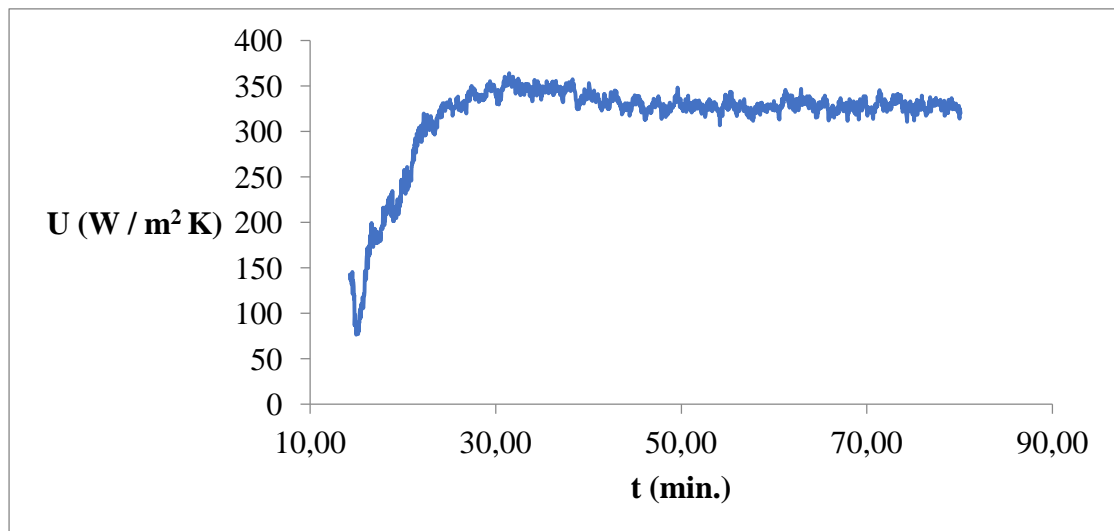
Στην είσοδο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία και φθάνει πάνω από τους 37°C στο χρονικό διάστημα των 70-80 λεπτών. Σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει θερμοκρασία κάτω από 30°C στο χρονικό διάστημα λίγο πριν το 20^ο λεπτό και φθάνει τους 36°C στο χρονικό διάστημα των 50-60 λεπτών. Στην έξοδο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει την μικρότερη θερμοκρασία και φθάνει στους 35°C στο 80^ο λεπτό.

Στην είσοδο του έναλλάκτη το νερό έχει την μικρότερη θερμοκρασία και φθάνει τους 20°C στο 20^ο λεπτό. Σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη το νερό έχει θερμοκρασία 20°C στο χρονικό διάστημα των 14-15 λεπτών και φθάνει στους 22°C στο 25^ο λεπτό και ακολουθεί μία μικρή πτωτική πορεία μέχρι να φθάσει πάλι στους 22°C. Στην έξοδο του έναλλάκτη το νερό έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία και φθάνει κοντά στους 25°C στο 80^ο λεπτό.



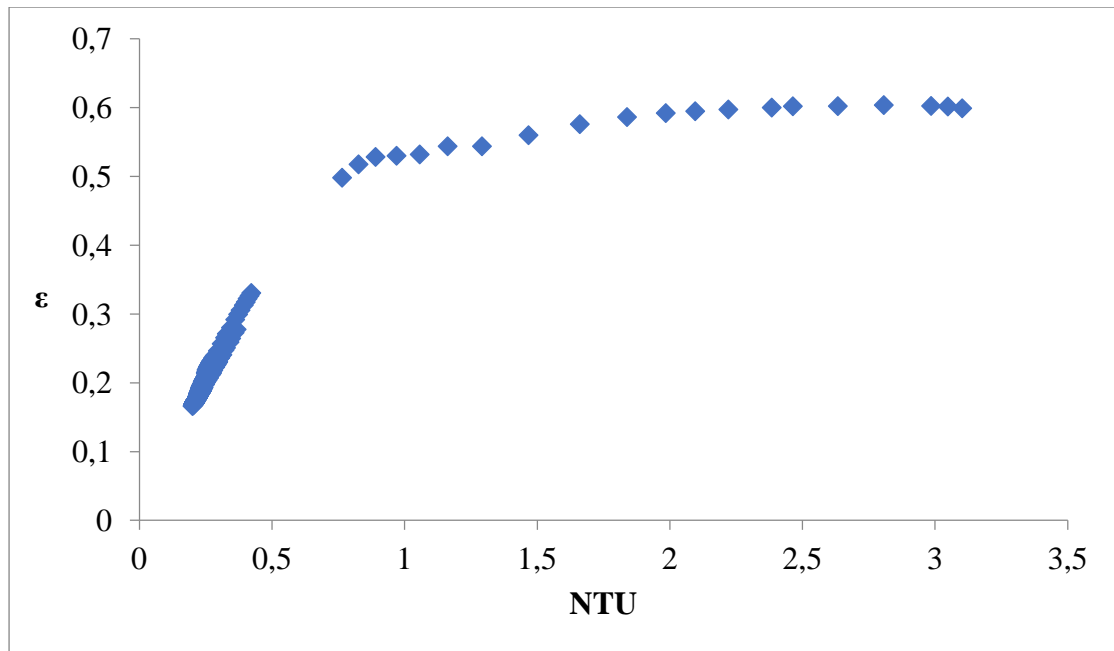
Σχήμα 7.3.1.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στον ανάμικτο χυμό (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -200 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) παρουσιάζει κάποιες αυξομειώσεις και φθάνει πάνω από τα 300 Watt. Το «-» δέν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία· υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον έναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



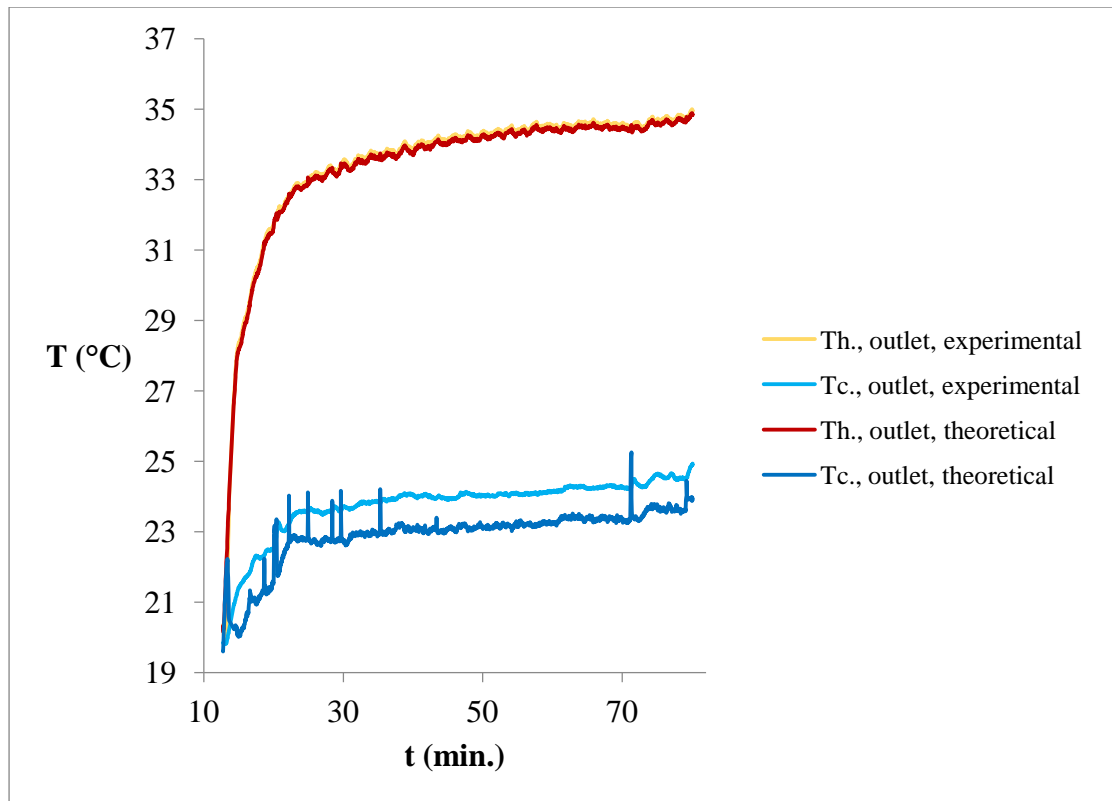
Σχήμα 7.3.1.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο χρονικό διάστημα των 20-40 λεπτών.



Σχήμα 7.3.1.4 | Διάγραμμα της θερμικής αποδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

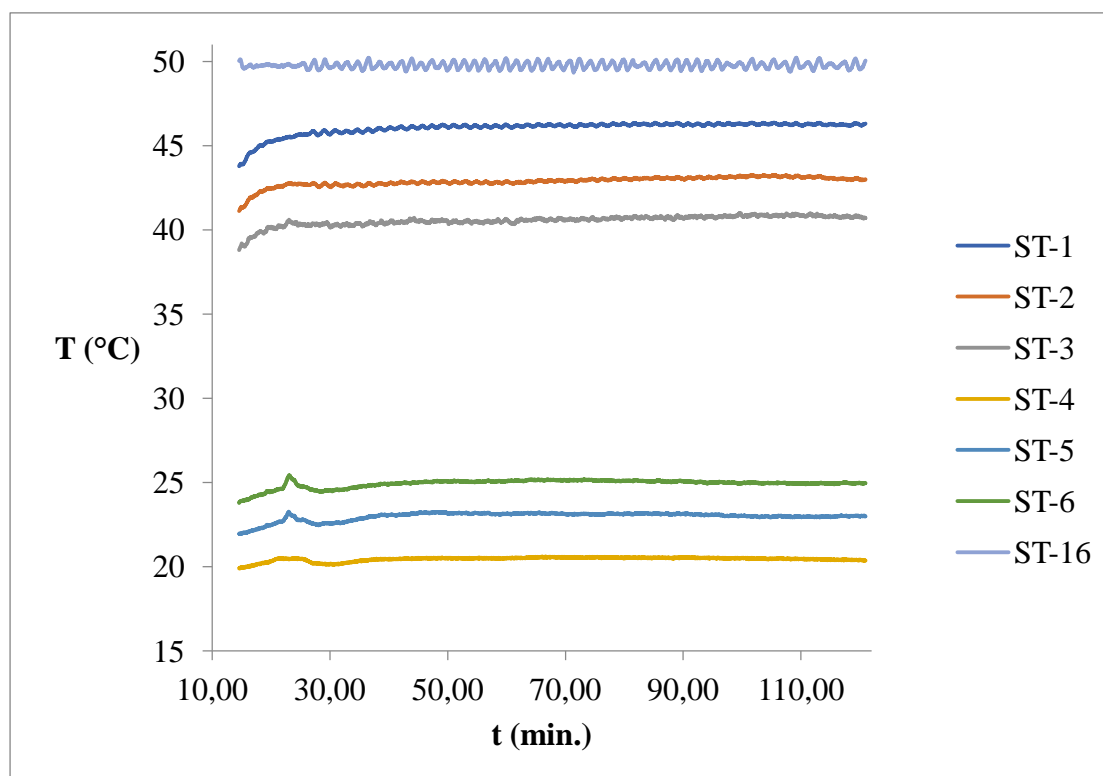
Η θερμική αποδοτικότητα του έναλλάκτη φθάνει το 0,6 ή 60% για αριθμό μονάδων μεταφοράς 3,1.



Σχήμα 7.3.1.5 | Διάγραμμα τών θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ῥευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.1.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 35°C ἔπειτα ἀπὸ 80 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξὺ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.1.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμικὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

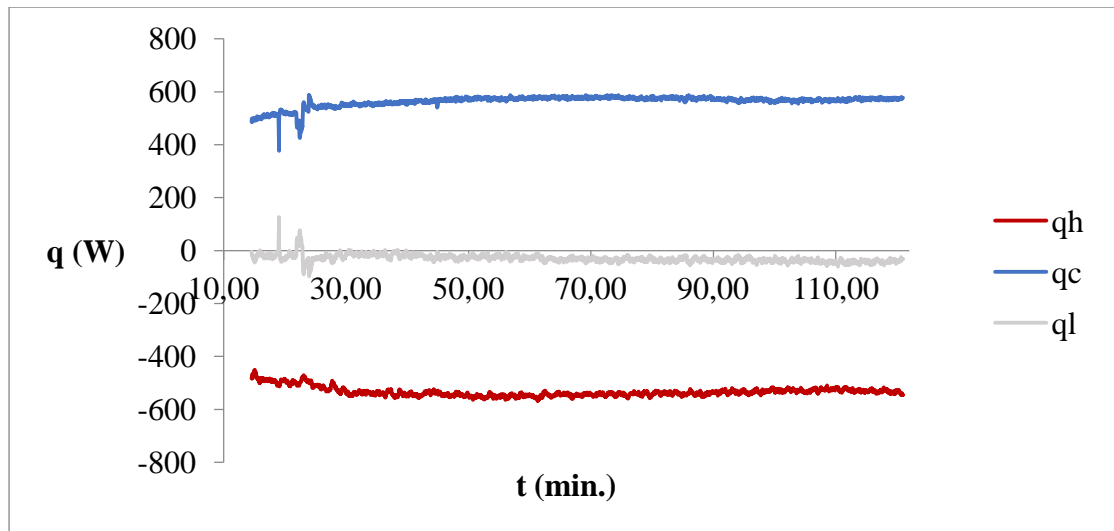
7.3.2 Πείραμα 2^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 1,4 L/min. και θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες όμορροης



Σχήμα 7.3.2.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσει τοῦ χρόνου.

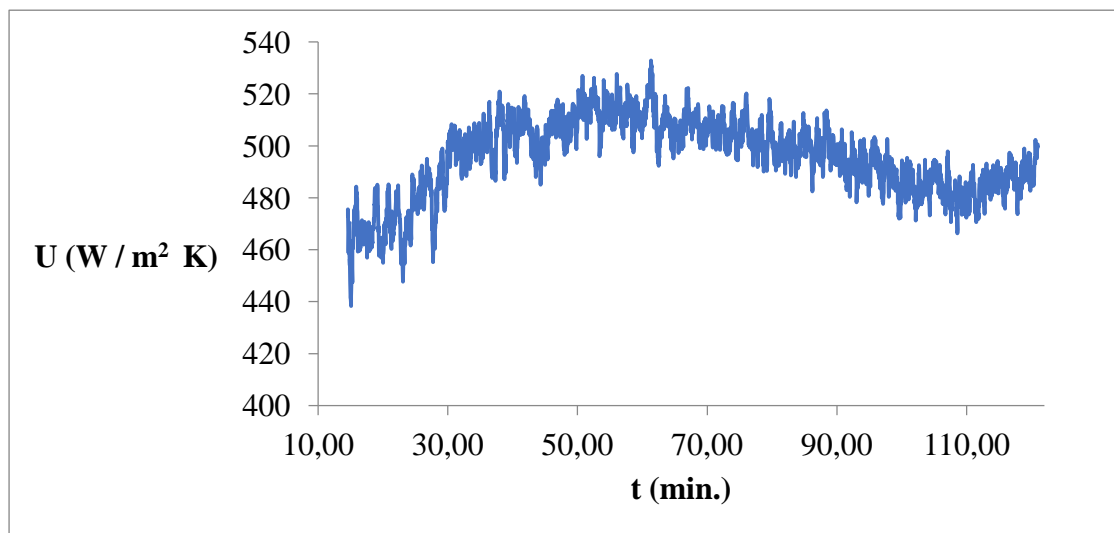
Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μεγαλιότερη θερμοκρασία καὶ φθάνει πάνω ἀπὸ τοὺς 46°C στὸ 40ὸ λεπτό. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει θερμοκρασία κάτω ἀπὸ 45°C. Στὴν ἐξοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία καὶ φθάνει στοὺς 40°C στὸ 20ὸ λεπτό.

Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία καὶ φθάνει τοὺς 20°C στὸ 15ο λεπτό. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει θερμοκρασία 23°C στὸ χρονικὸ διάστημα τῶν 20-25 λεπτῶν καὶ ἀκολουθεῖ μία μικρὴ πτωτικὴ πορεία μέχρι νὰ φθάσῃ πάλι στοὺς 23°C κοντὰ στὸ 40ὸ λεπτό. Στὴν ἐξοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μεγαλιότερη θερμοκρασία καὶ φθάνει στοὺς 25°C στὰ χρονικὰ διαστήματα τῶν 20-25 καὶ 45-90 λεπτῶν.



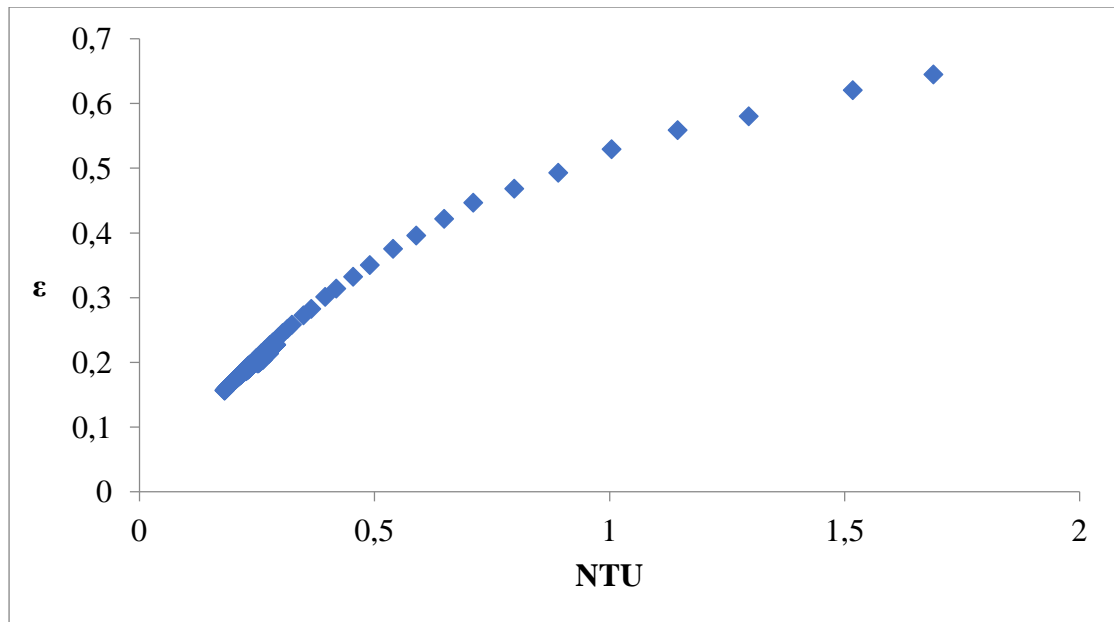
Σχήμα 7.3.2.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και τών θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσεϊ τοῦ χρόνου.

Ἡ μεταβολή της θερμικής ἐνεργείας στὸν ἀνάμικτο χυμὸ (q_h) μειώνεται καὶ φθάνει κάτω ἀπὸ τὰ -500 Watt. Ἡ μεταβολή της θερμικής ἐνεργείας στὸ νερὸ (q_c) παρουσιάζει κάποιες ἀξομειώσεις καὶ φθάνει πάνω ἀπὸ τὰ 500 Watt. Τὸ «-» δὲν ὑποδηλώνει κάποια φυσικὴ σημασία· ὑποδηλώνει τὴν μετάβαση θερμότητας ἀπὸ τὸ θερμὸ μέσο στὸ ψυχρὸ μέσο. Ὑπάρχουν ἀπώλειες στὸν ἐναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα ἀπὸ τὸ q_h στὸ q_c καὶ τὸ q_l .



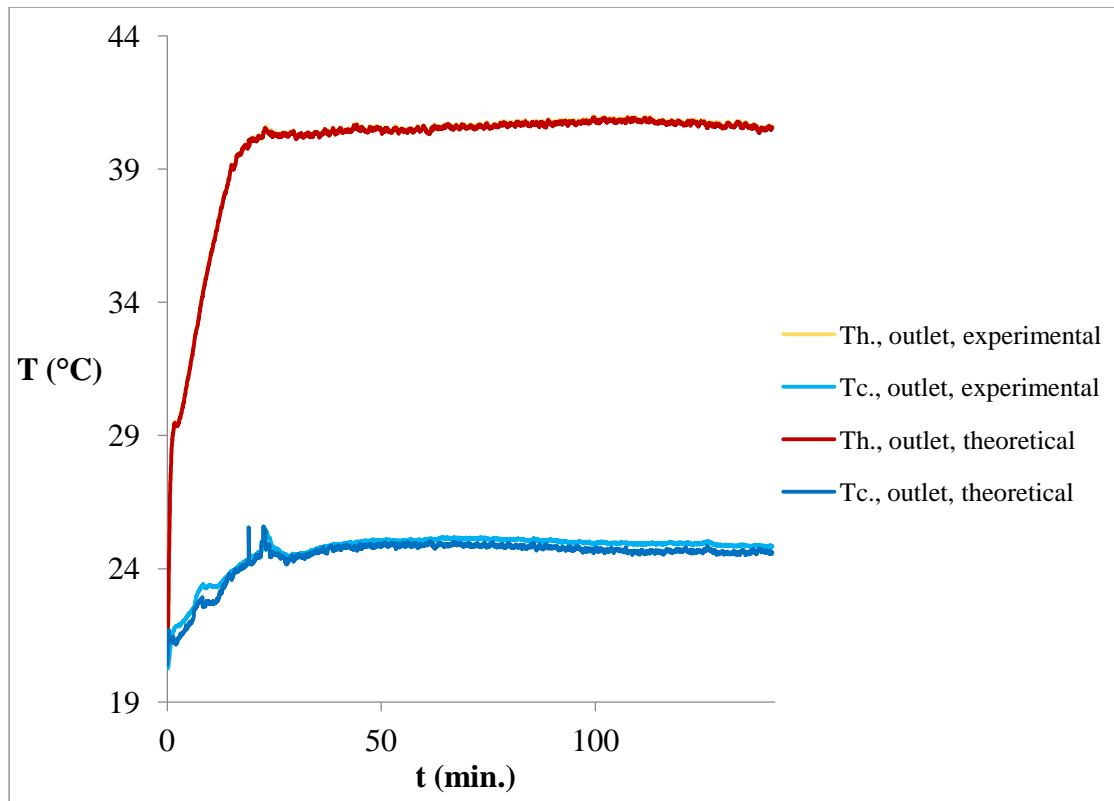
Σχήμα 7.3.2.3 | Διάγραμμα τοῦ ὀλικοῦ συντελεστῆ μεταφοῶς θερμότητας συναρτήσεϊ τοῦ χρόνου.

Ὁ ὀλικὸς συντελεστὴς μεταφοῶς θερμότητας παίρνει τὴν μεγίστη τιμὴ στὸ χρονικὸ διάστημα τῶν 60-62 λεπτῶν.



Σχήμα 7.3.2.4 | Διάγραμμα της θερμικής αποδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

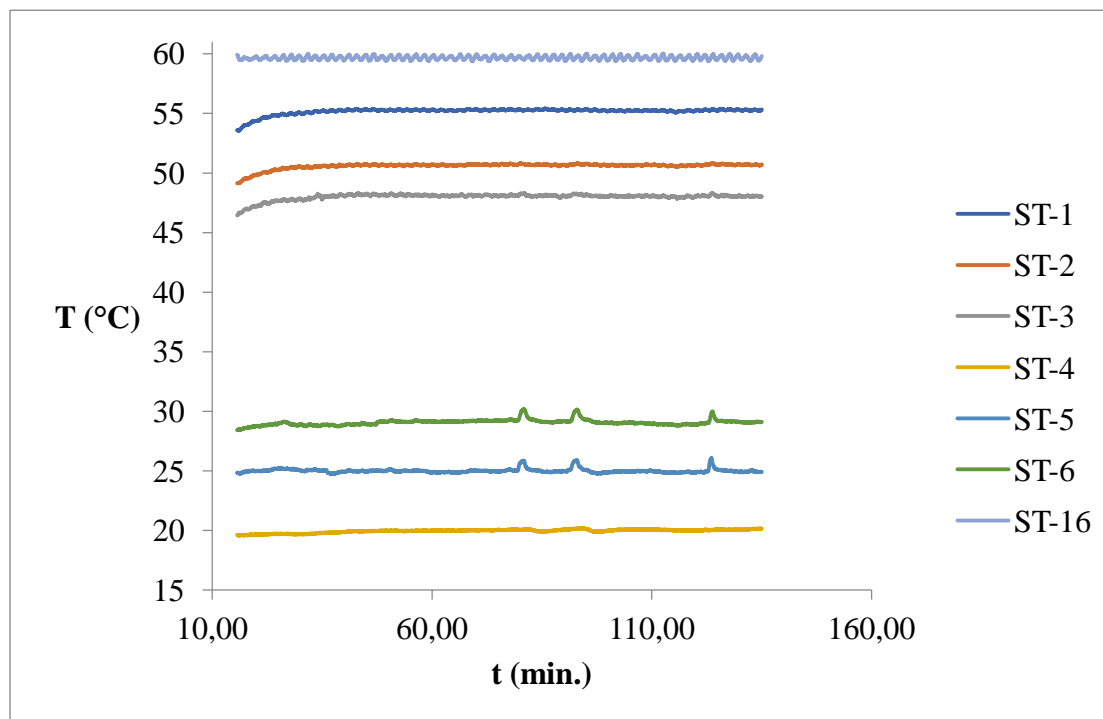
Η θερμική αποδοτικότητα του έναλλάκτη φθάνει το 0,64 ή 64% για αριθμό μονάδων μεταφοράς 1,7.



Σχήμα 7.3.2.5 | Διάγραμμα τών θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ῥευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσῃ τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.2.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 40-41°C ἔπειτα ἀπὸ 142 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξύ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.2.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμοκὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

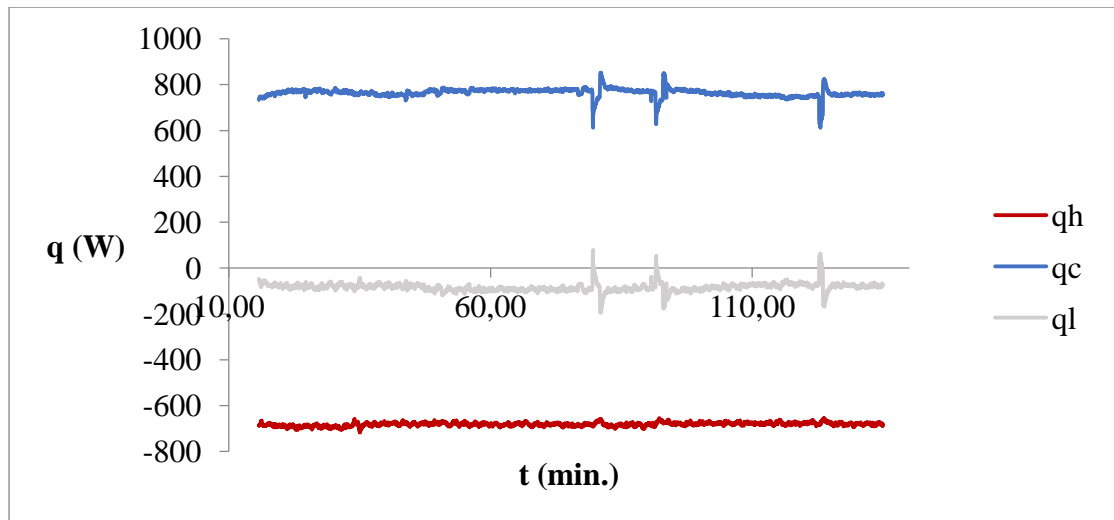
7.3.3 Πείραμα 3^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 1,4 L/min. και θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες όμορροης



Σχήμα 7.3.3.1 | Διάγραμμα τών θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου.

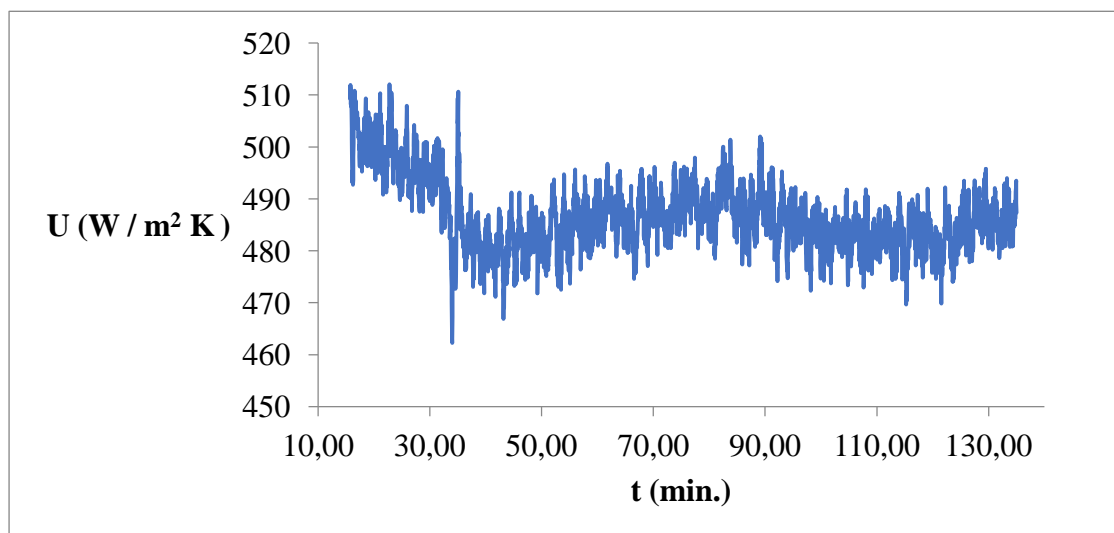
Στην είσοδο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία και φθάνει πάνω από τους 55°C στο 30^ο λεπτό. Σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει θερμοκρασία κάτω από 49°C περίπου μέχρι το 20^ο λεπτό και έπειτα πηγαίνει πάνω από τους 50°C. Στην έξοδο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει την μικρότερη θερμοκρασία και φθάνει στους 48°C στο 33^ο λεπτό και ακολουθεί μία σχεδόν σταθερή πορεία.

Στην είσοδο του έναλλάκτη το νερό έχει την μικρότερη θερμοκρασία και φθάνει τους 20°C με μία σταθερή πορεία μέχρι το 135^ο λεπτό. Σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη το νερό έχει θερμοκρασία 24-25°C. Στην έξοδο του έναλλάκτη το νερό έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία και φθάνει στους 30°C στο χρονικό διάστημα τών 92-93 λεπτών.



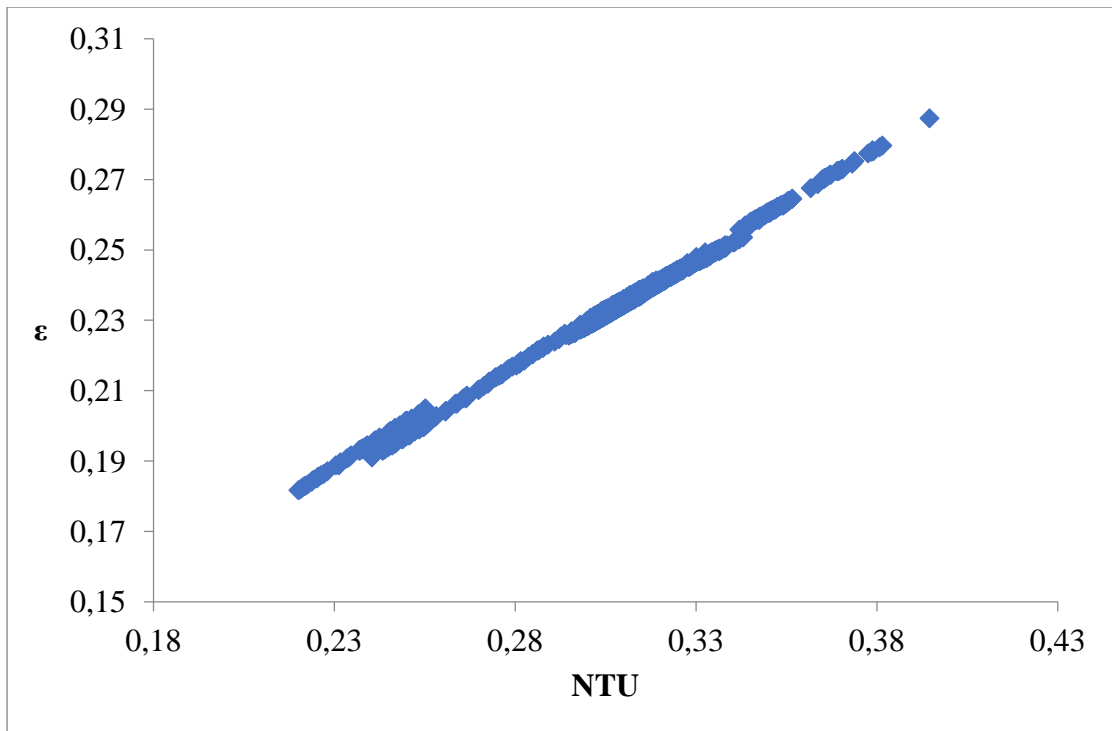
Σχήμα 7.3.3.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στον ανάμικτο χυμό (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -600 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) παρουσιάζει κάποιες μικρές αυξομειώσεις και φθάνει πάνω από τα 800 Watt. Το «-» δέν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία· υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον έναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



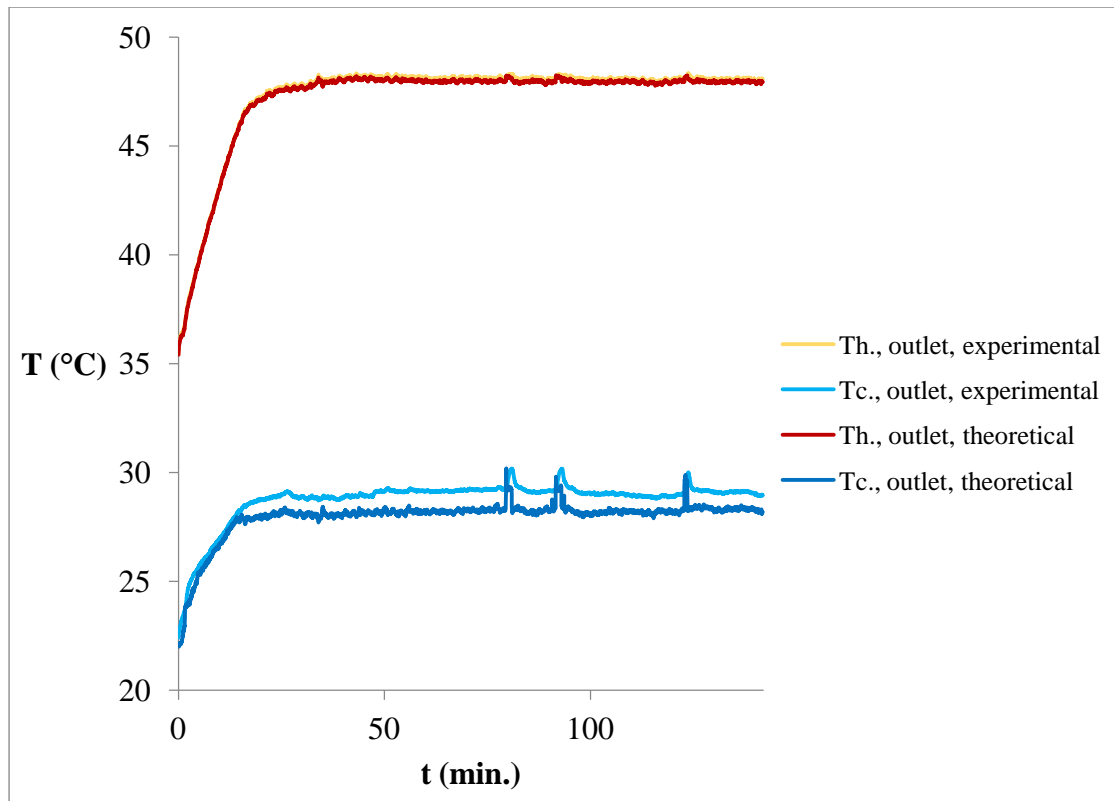
Σχήμα 7.3.3.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο χρονικό διάστημα των 20-23 λεπτών.



Σχήμα 7.3.3.4 | Διάγραμμα της θερμικής απόδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

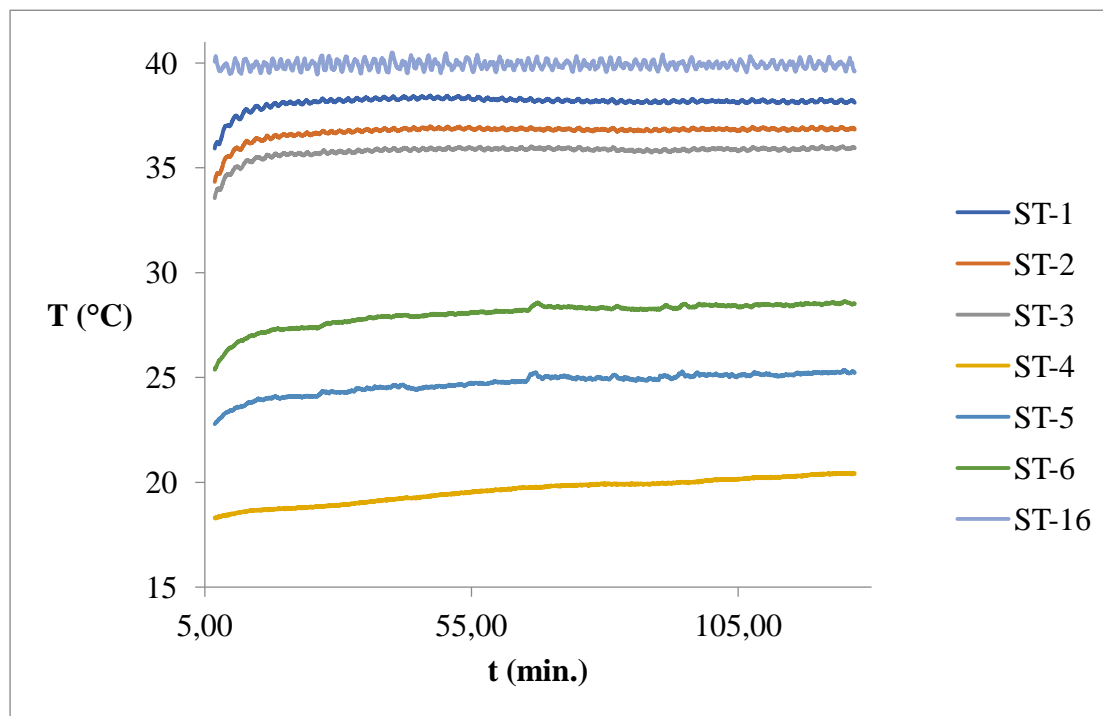
Ἡ θερμική απόδοτικότητα του έναλλάκτη φθάνει τὸ 0,29 ἢ 29% γιὰ ἀριθμὸ μονάδων μεταφοράς 0,39.



Σχήμα 7.3.3.5 | Διάγραμμα τών θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ῥευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσῃ τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.3.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 48-48,3°C ἔπειτα ἀπὸ 142 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξύ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.3.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμοκὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

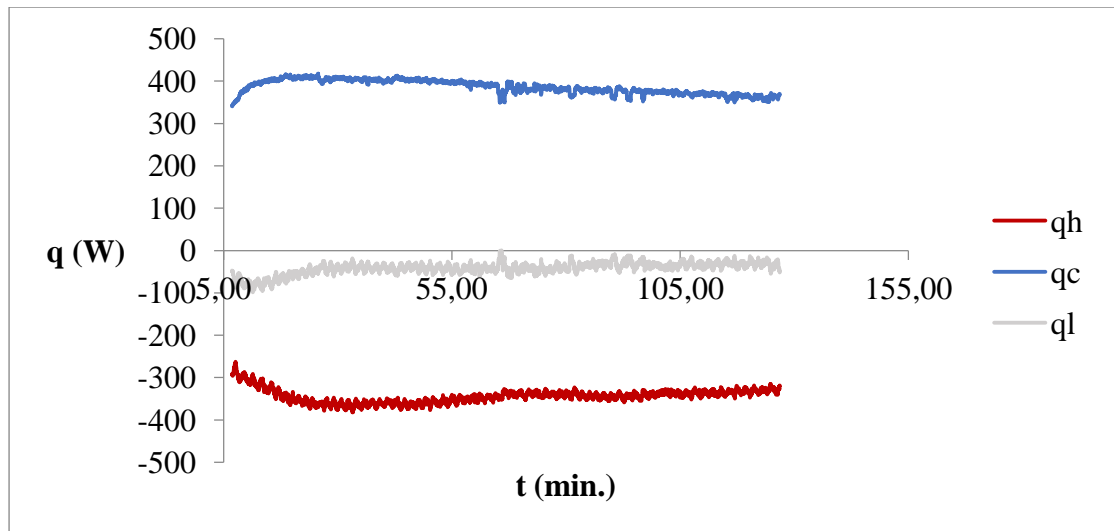
7.3.4 Πείραμα 4^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 40°C σε συνθήκες όμορροης



Σχήμα 7.3.4.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσῃ τοῦ χρόνου.

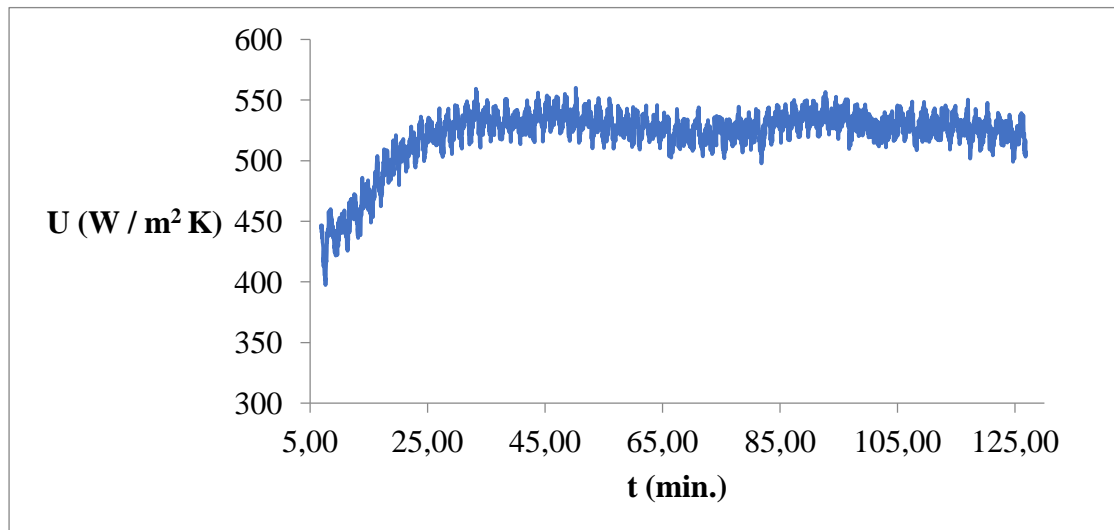
Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία καὶ φθάνει πάνω ἀπὸ τοὺς 38°C στὸ 160 λεπτό. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει θερμοκρασία κάτω ἀπὸ 34°C περίπου μέχρι τὸ 80 λεπτό καὶ ἔπειτα πηγαίνει πάνω ἀπὸ τοὺς 36°C ἀπὸ τὸ 120 λεπτό. Στὴν ἔξοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 33°C στὰ πρῶτα 7 λεπτά καὶ φθάνει σχεδὸν στοὺς 36°C στὸ 1260 λεπτό.

Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία καὶ φθάνει τοὺς 20°C στὸ 930 λεπτό. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει θερμοκρασία 23°C στὰ πρῶτα 7 λεπτά καὶ φθάνει στοὺς 25°C στὸ 1260 λεπτό. Στὴν ἔξοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία καὶ φθάνει στοὺς 28-28,6°C στὸ χρονικὸ διάστημα τῶν 50-126 λεπτῶν.



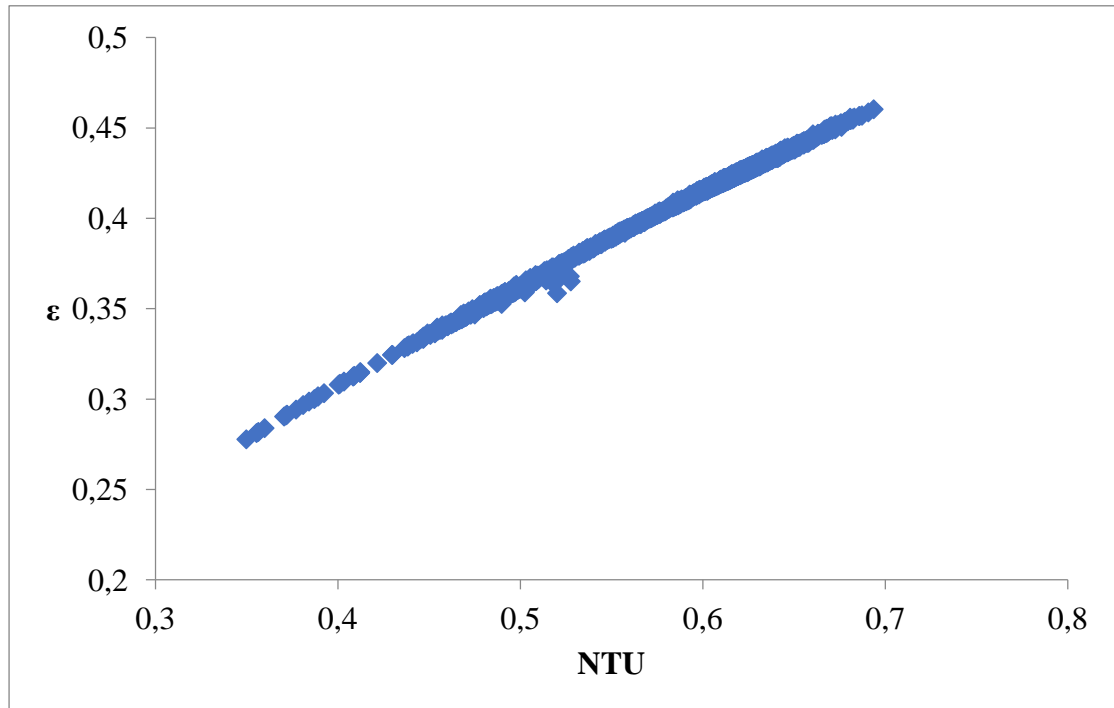
Σχήμα 7.3.4.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στον ανάμικτο χυμό (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -300 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) φθάνει πάνω από τα 400 Watt. Το «-» δεν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία· υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον εναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



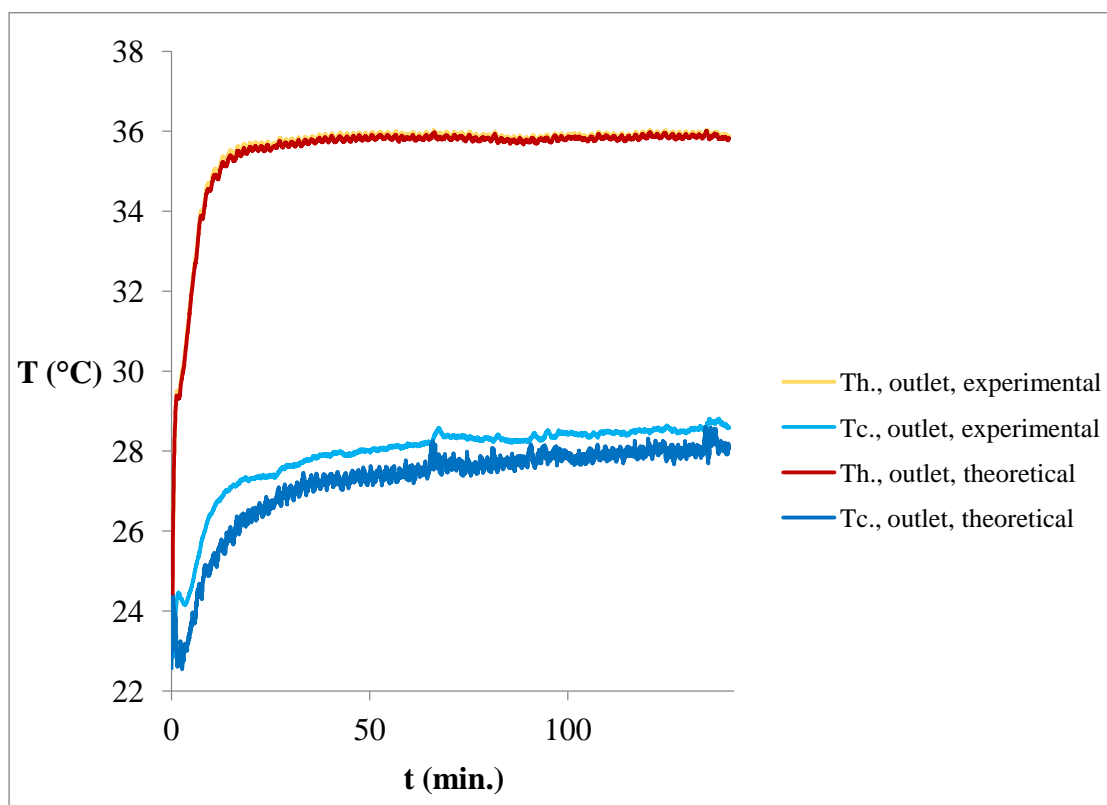
Σχήμα 7.3.4.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο χρονικό διάστημα των 50-55 λεπτών.



Σχήμα 7.3.4.4 | Διάγραμμα της θερμικής απόδοτικότητας τοῦ ἐναλλάκτη συναρτήσει τοῦ ἀριθμοῦ μονάδων μεταφορᾶς.

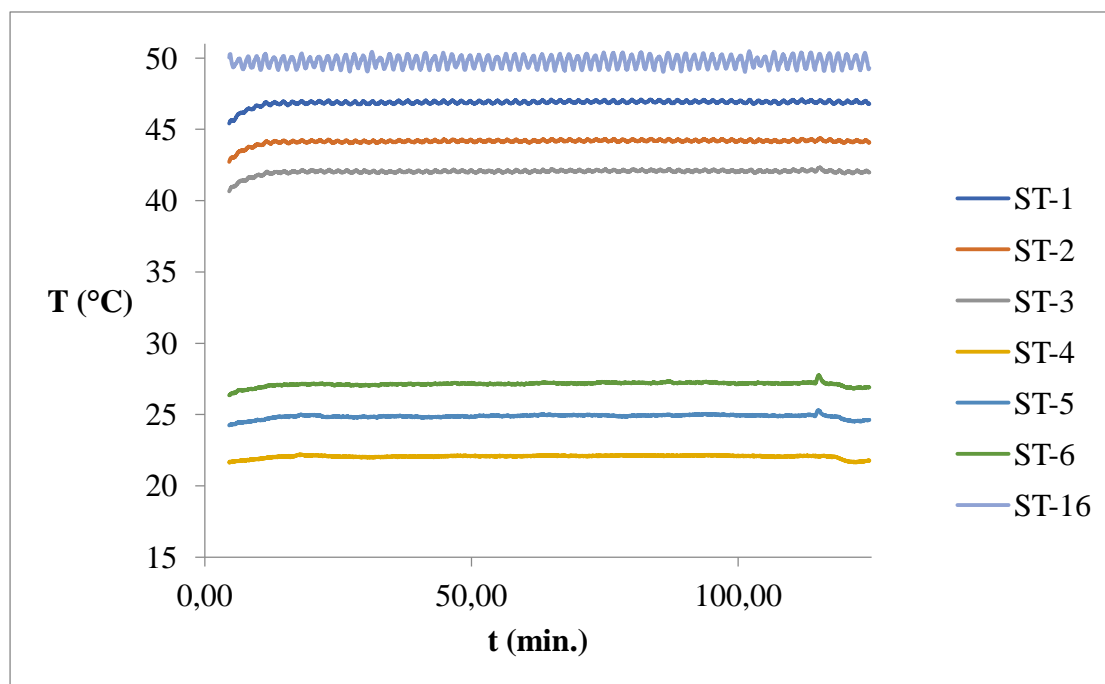
Ἡ θερμικὴ ἀποδοτικότητα τοῦ ἐναλλάκτη φθάνει τὸ 0,46 ἢ 46% γιὰ ἀριθμὸ μονάδων μεταφορᾶς 0,69.



Σχήμα 7.3.4.5 | Διάγραμμα τών θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ρευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.4.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 35,8-36°C ἔπειτα ἀπὸ 142 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξὺ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.4.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμικὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

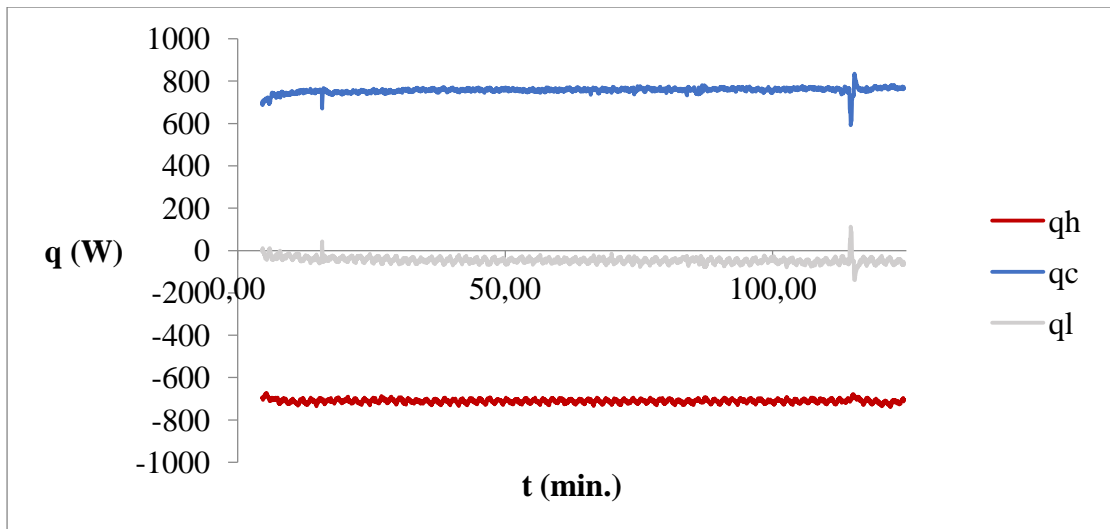
7.3.5 Πείραμα 5^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες όμορροης



Σχήμα 7.3.5.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου.

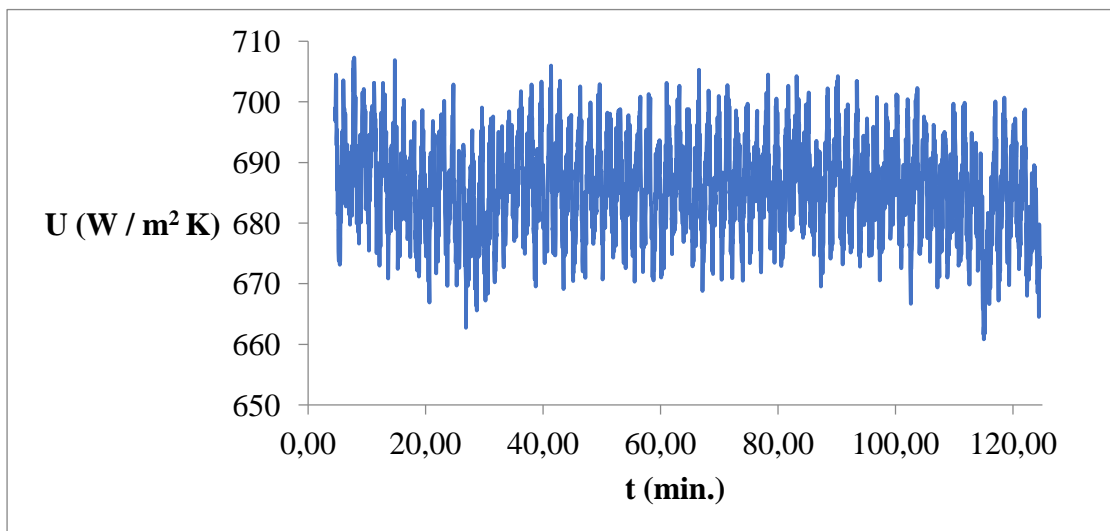
Στην είσοδο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία και φθάνει πάνω από τους 47°C. Σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει θερμοκρασία κάτω από 44°C περίπου μέχρι το 11ο λεπτό και έπειτα πηγαίνει πάνω από τους 44°C. Στην έξοδο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει την μικρότερη θερμοκρασία στους 41°C και 42°C.

Στην είσοδο του έναλλάκτη το νερό έχει την μικρότερη θερμοκρασία και φθάνει τους 22°C στο 13ο λεπτό και πέφτει κάτω από τους 22°C στο 118ο με 119ο λεπτό. Σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη το νερό έχει θερμοκρασία 24°C-25°. Στην έξοδο του έναλλάκτη το νερό έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία και φθάνει στους 27°C και πέφτει στους 26,9°C στο 124ο λεπτό.



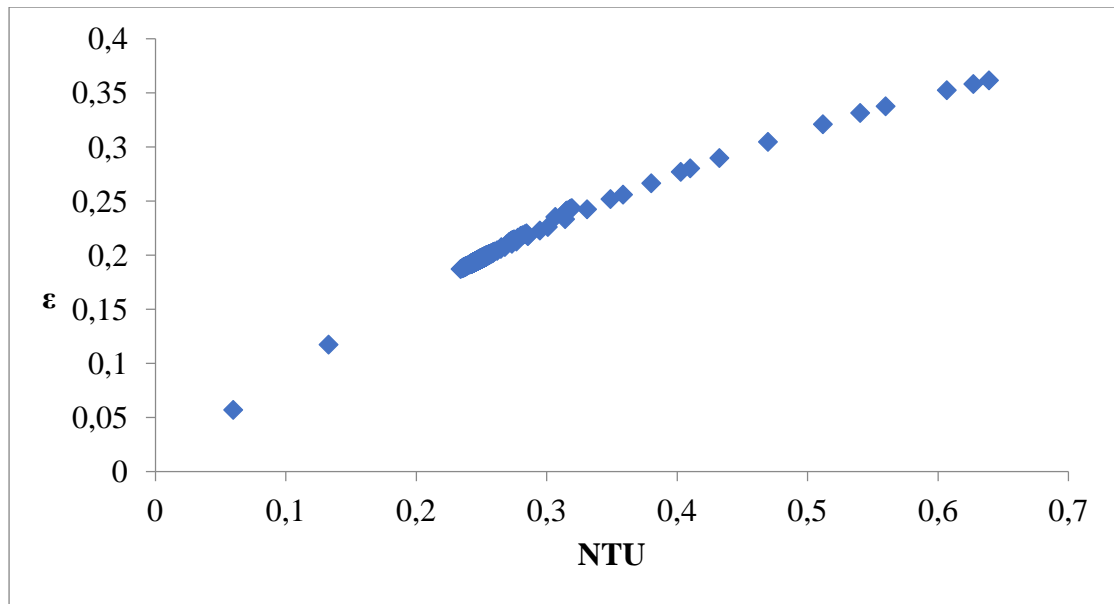
Σχήμα 7.3.5.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στον ανάμικτο χυμό (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -700 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) φθάνει πάνω από τα 700 Watt. Το «-» δέν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία: υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον εναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



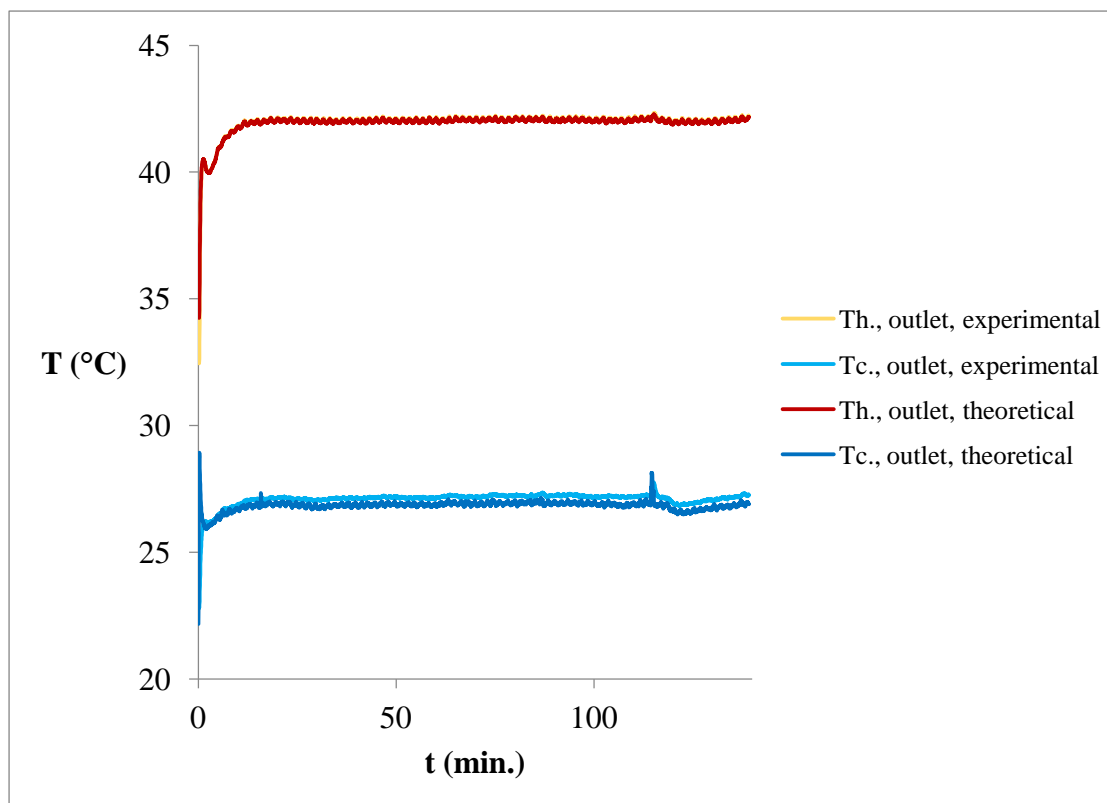
Σχήμα 7.3.5.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο χρονικό διάστημα των 7-8 λεπτών· ή ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στο 115ο λεπτό.



Σχήμα 7.3.5.4 | Διάγραμμα της θερμικής αποδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

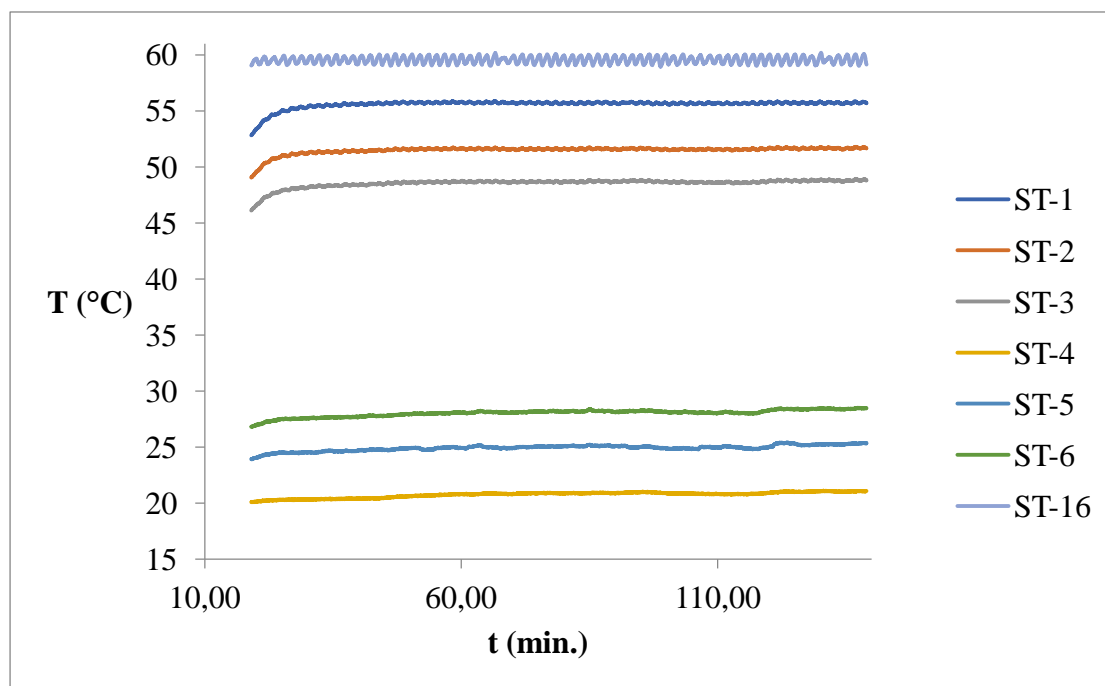
Ἡ θερμική ἀποδοτικότητα τοῦ έναλλάκτη φθάνει τὸ 0,36 ἢ 36% γιὰ ἀριθμὸ μονάδων μεταφορᾶς 0,64.



Σχήμα 7.3.5.5 | Διάγραμμα τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ῥευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.5.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 42,2-42,3°C ἔπειτα ἀπὸ 140 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξὺ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.5.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμικὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

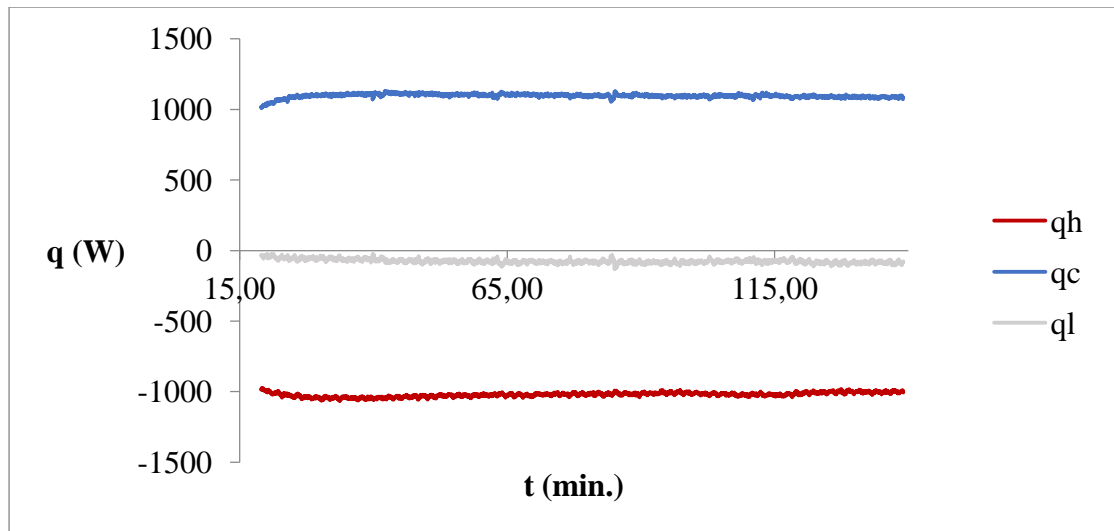
7.3.6 Πείραμα 6^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες όμορροης



Σχήμα 7.3.6.1 | Διάγραμμα τών θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου.

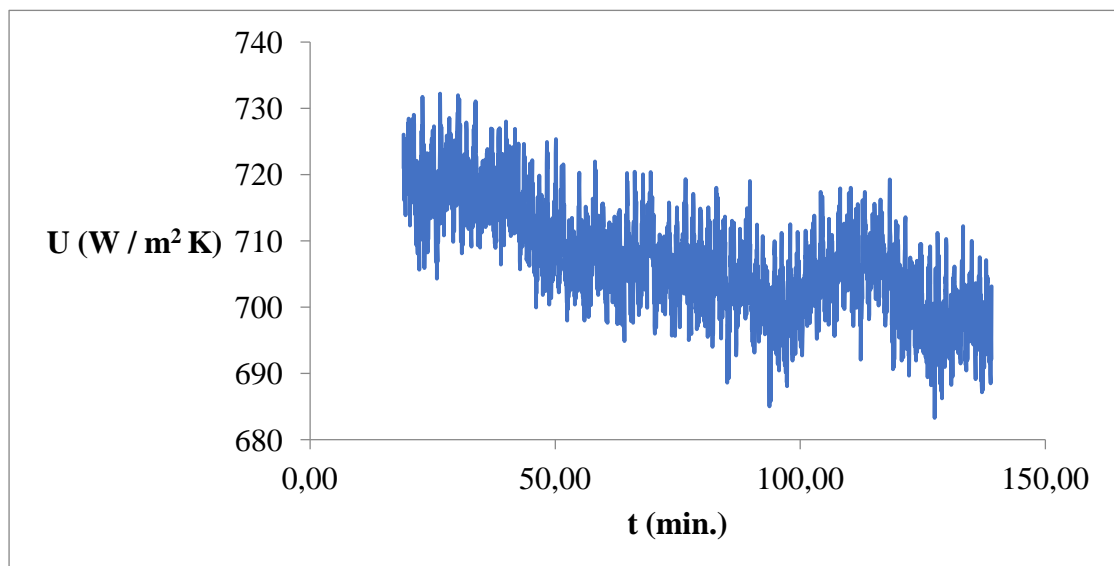
Στην είσοδο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία και φθάνει στους 55°C στο 25ο λεπτό. Σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει θερμοκρασία κάτω από 50°C μέχρι το 21ο λεπτό και έπειτα πηγαίνει πάνω από τους 50°C. Στην έξοδο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει την μικρότερη θερμοκρασία στους 48°C.

Στην είσοδο του έναλλάκτη το νερό έχει την μικρότερη θερμοκρασία στους 20-21°C. Σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη το νερό φθάνει στην θερμοκρασία των 25°C. Στην έξοδο του έναλλάκτη το νερό έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία και φθάνει στους 28°C.



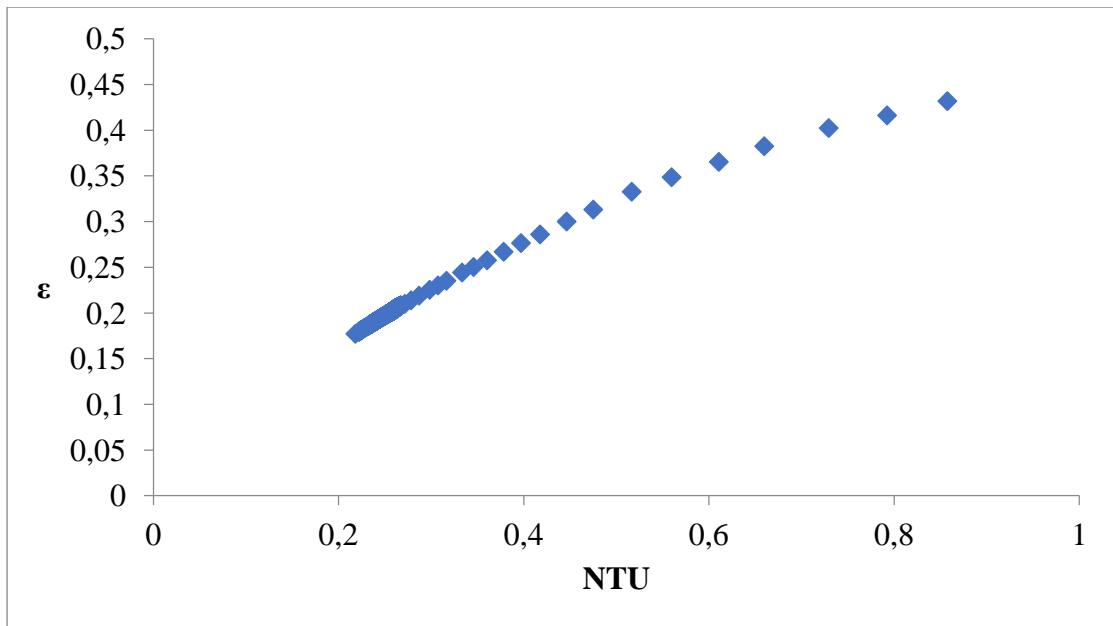
Σχήμα 7.3.6.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στον ανάμικτο χυμό (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -1000 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) φθάνει πάνω από τα 1000 Watt. Το «-» δέν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία· υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον εναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



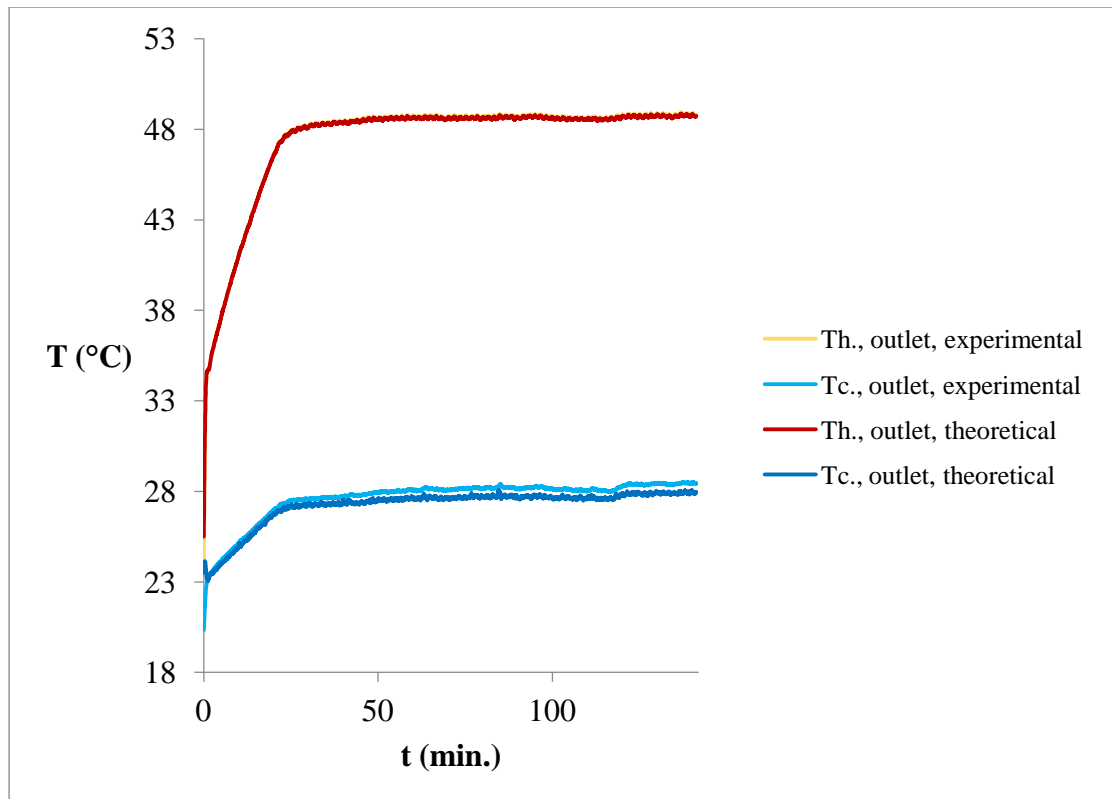
Σχήμα 7.3.6.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο χρονικό διάστημα των 26-27 λεπτών· η ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στο 127ο λεπτό.



Σχήμα 7.3.6.4 | Διάγραμμα της θερμικής αποδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

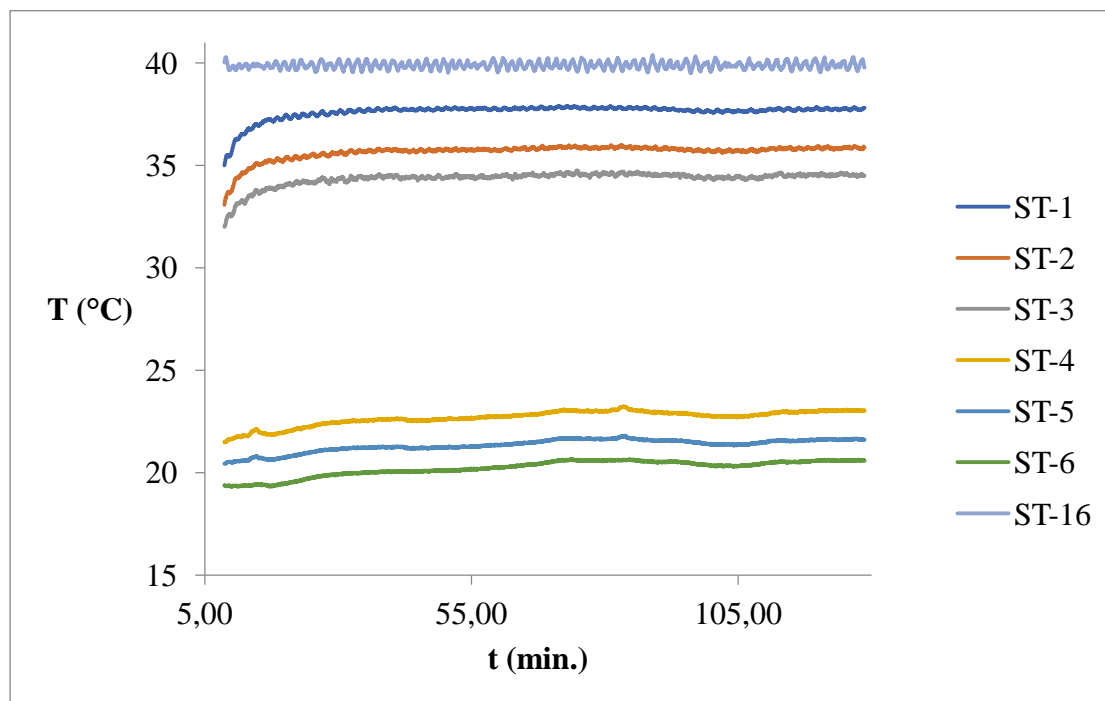
Ἡ θερμική ἀποδοτικότητα τοῦ έναλλάκτη φθάνει τὸ 0,43 ἢ 43% γιὰ ἀριθμὸ μονάδων μεταφοῶς 0,86.



Σχήμα 7.3.6.5 | Διάγραμμα τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ῥευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσεϊ τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.6.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 48,7-48,9°C ἔπειτα ἀπὸ 142 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξύ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.6.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμικὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

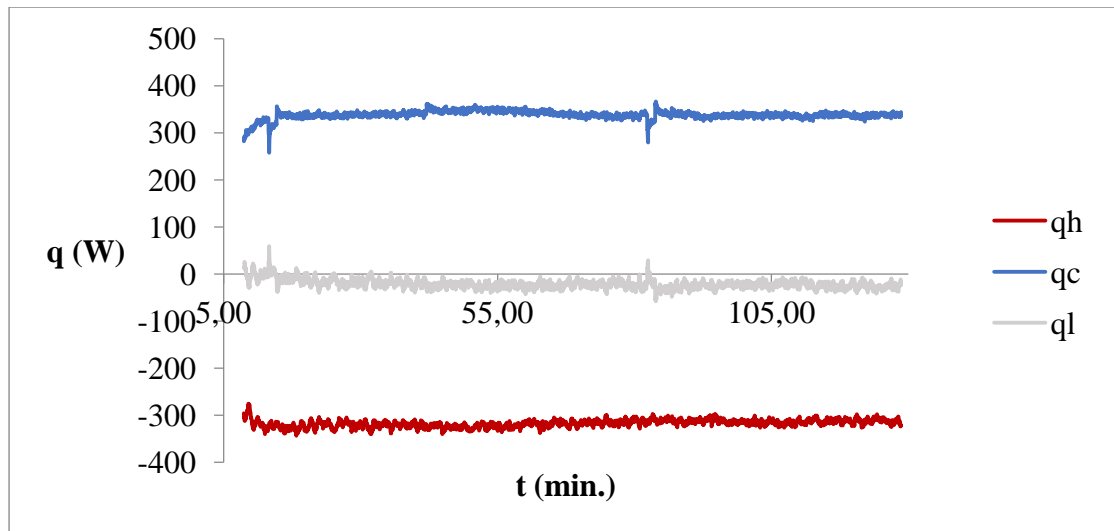
7.3.7 Πείραμα 7^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 1,4 L/min. και θερμοκρασία στους 40°C σε συνθήκες αντίρροφης



Σχήμα 7.3.7.1 | Διάγραμμα τών θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου.

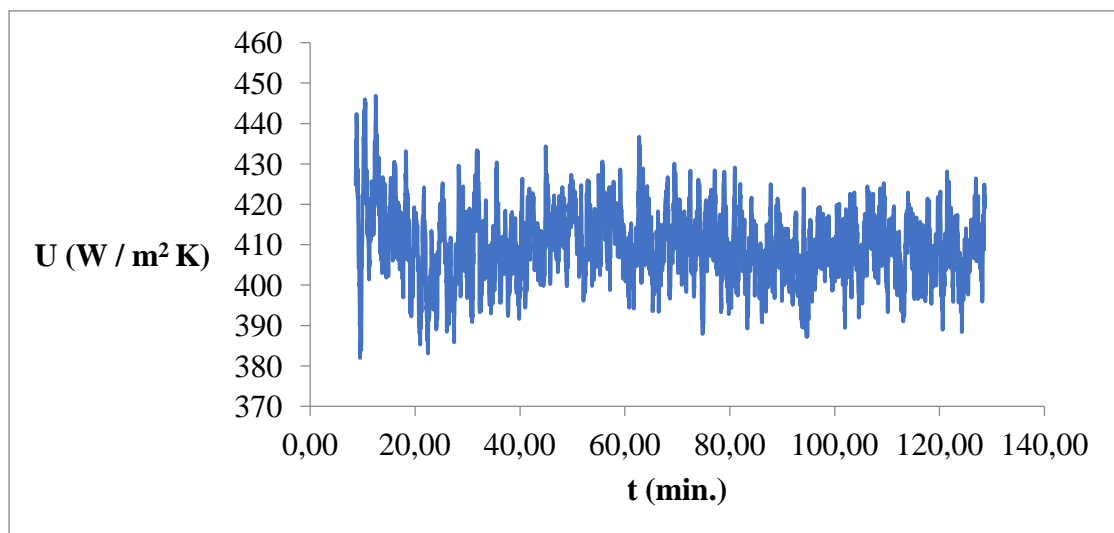
Στην είσοδο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία και φθάνει στους 37,8°C στο 38ο λεπτό περίπου. Σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει θερμοκρασία κάτω από 35°C μέχρι το 14ο λεπτό και έπειτα πηγαίνει πάνω από τους 35°C. Στην έξοδο του έναλλάκτη ο ανάμικτος χυμός έχει την μικρότερη θερμοκρασία στους 34,7°C.

Στην είσοδο του έναλλάκτη το νερό έχει την μικρότερη θερμοκρασία στους 19-20°C. Σε ενδιάμεσο σημείο του έναλλάκτη το νερό φθάνει στην θερμοκρασία τών 21,8°C στο χρονικό διάστημα τών 83-84 λεπτών. Στην έξοδο του έναλλάκτη το νερό έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία και φθάνει στους 23°C.



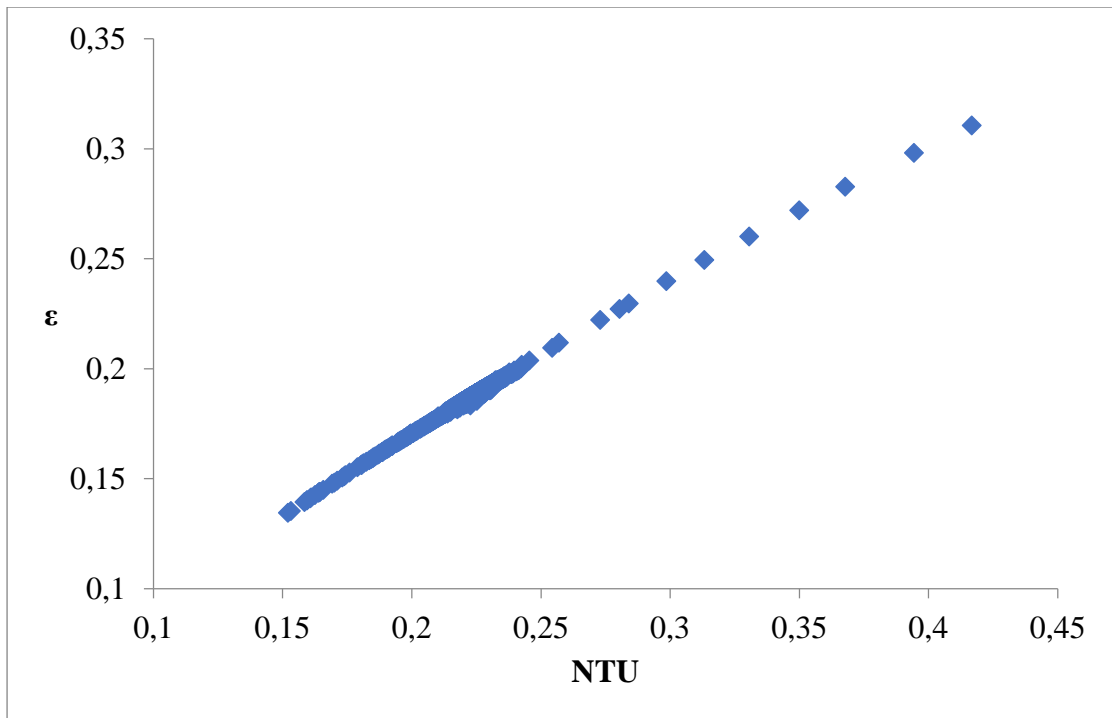
Σχήμα 7.3.7.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -300 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) φθάνει πάνω από τα 300 Watt. Το «-» δεν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία· υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον έναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



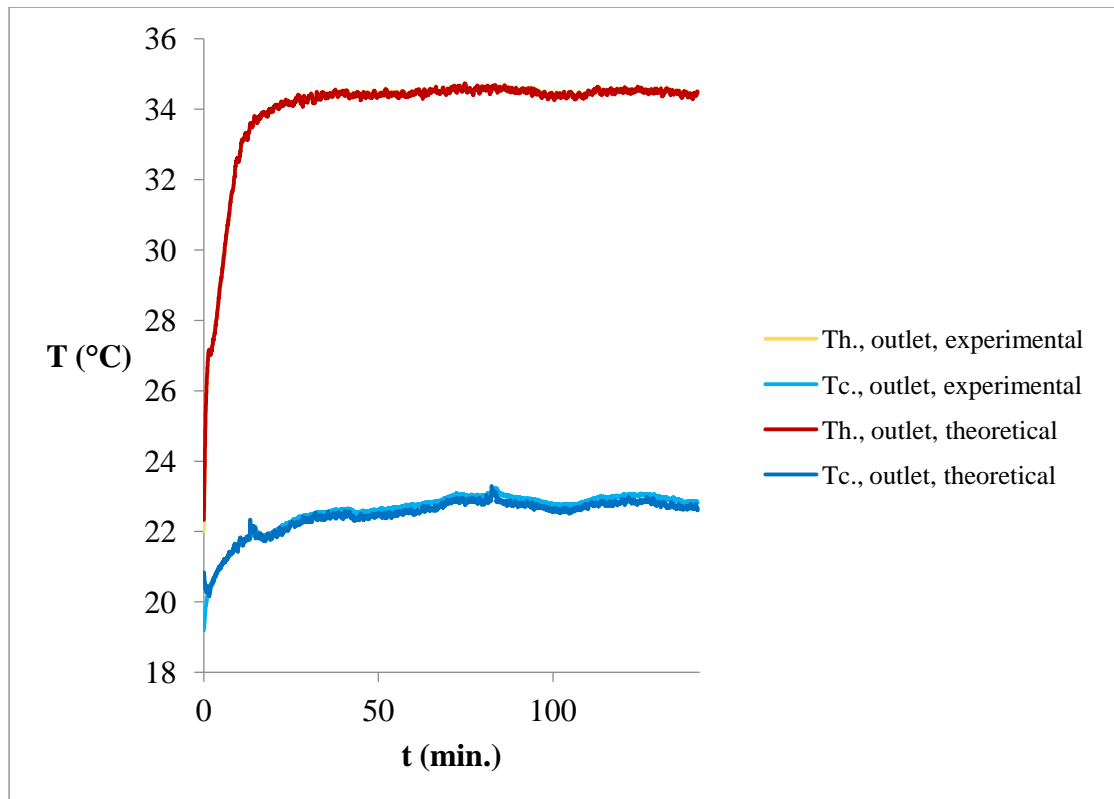
Σχήμα 7.3.7.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο χρονικό διάστημα των 12-13 λεπτών· ή ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στο 9ο λεπτό.



Σχήμα 7.3.7.4 | Διάγραμμα της θερμικής αποδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

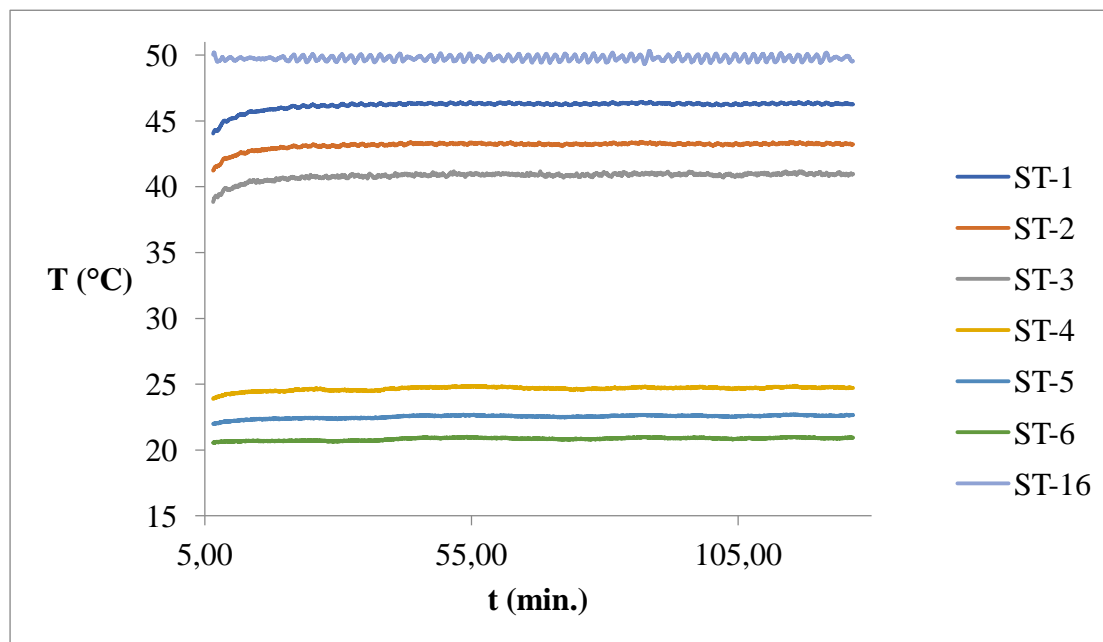
Η θερμική αποδοτικότητα του έναλλάκτη φθάνει το 0,31 ή 31% για αριθμό μονάδων μεταφοράς 0,42.



Σχήμα 7.3.7.5 | Διάγραμμα τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ῥευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσῃ τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.7.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 34,5-34,8°C ἔπειτα ἀπὸ 142 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξὺ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.7.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμικὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

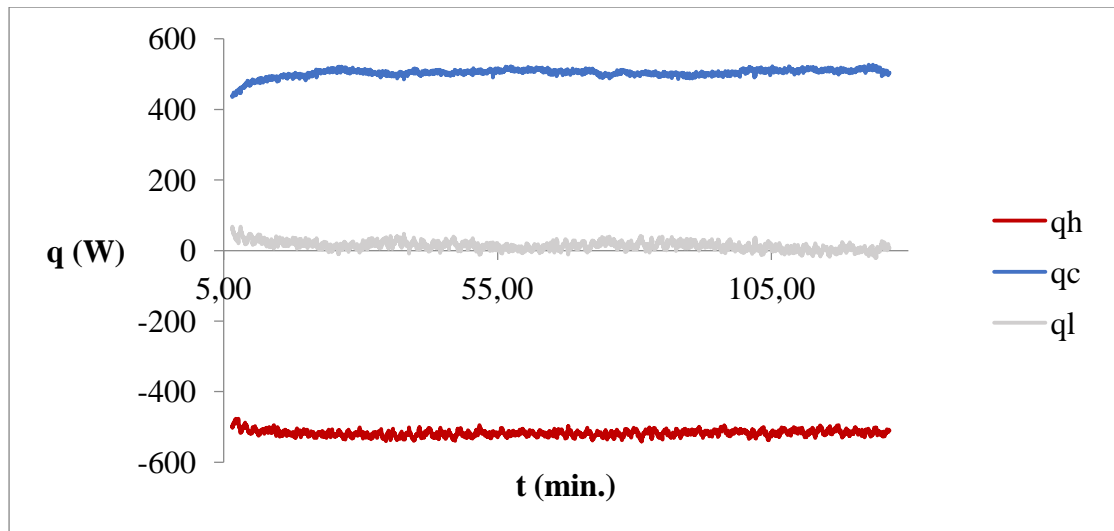
7.3.8 Πείραμα 8^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 1,4 L/min. και θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες άντιρροής



Σχῆμα 7.3.8.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσσει τοῦ χρόνου.

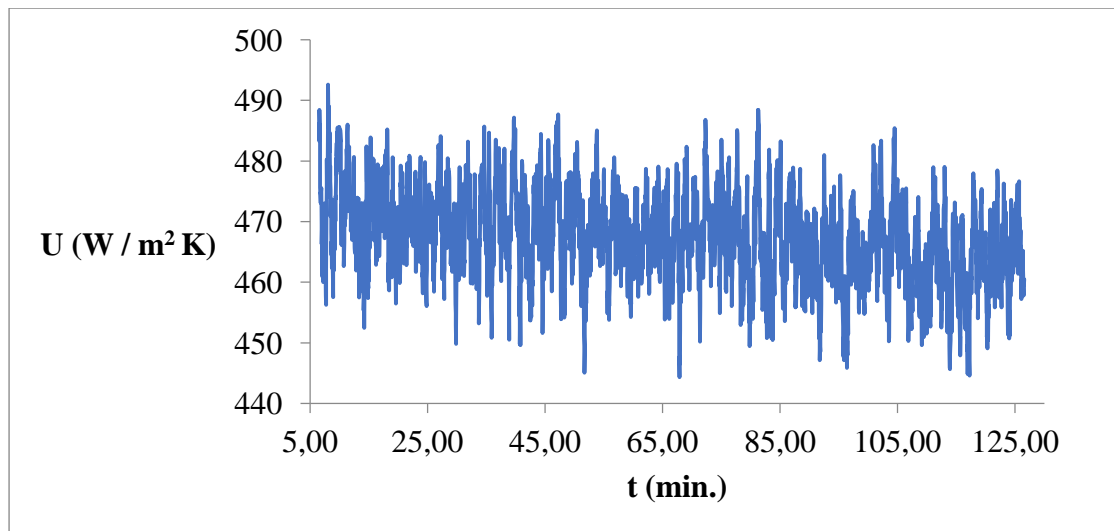
Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία καὶ φθάνει πάνω ἀπὸ τοὺς 46°C. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει θερμοκρασία κάτω ἀπὸ 42°C μέχρι τὸ 8ο λεπτὸ περίπου καὶ ἔπειτα πηγαίνει πάνω ἀπὸ τοὺς 42-43°C. Στὴν ἐξοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 41°C περίπου.

Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 20-20,9°C. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ φθάνει στὴν θερμοκρασία ἄνω τῶν 22°C. Στὴν ἐξοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία καὶ φθάνει στοὺς 24,8°C.



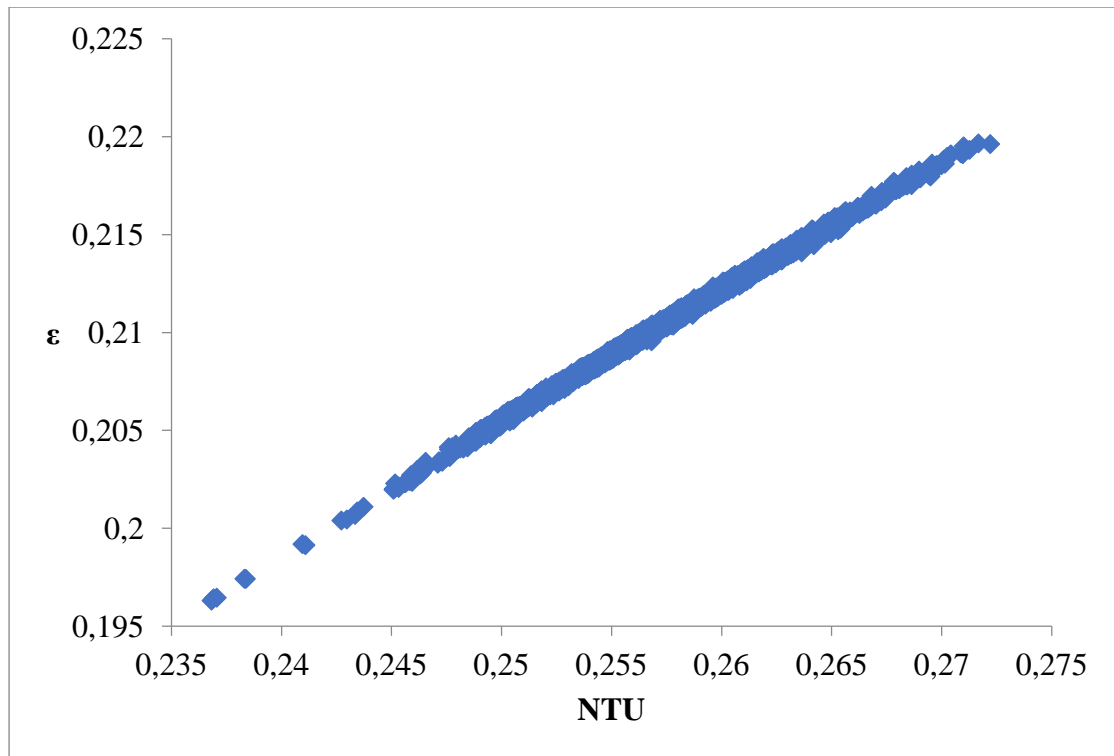
Σχήμα 7.3.8.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στον ανάμικτο χυμό (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -500 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) φθάνει πάνω από τα 500 Watt. Το «-» δέν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία· υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον εναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



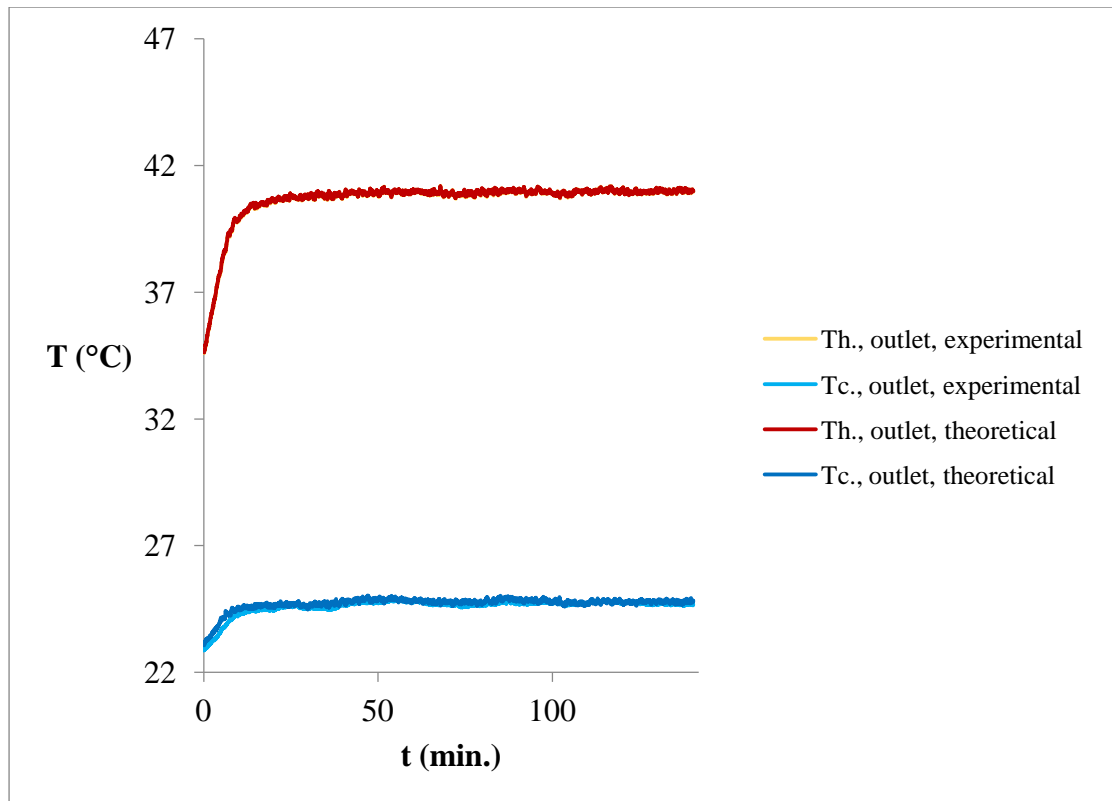
Σχήμα 7.3.8.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο 8ο λεπτό· ή ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στο 68ο λεπτό περίπου.



Σχήμα 7.3.8.4 | Διάγραμμα της θερμικής αποδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

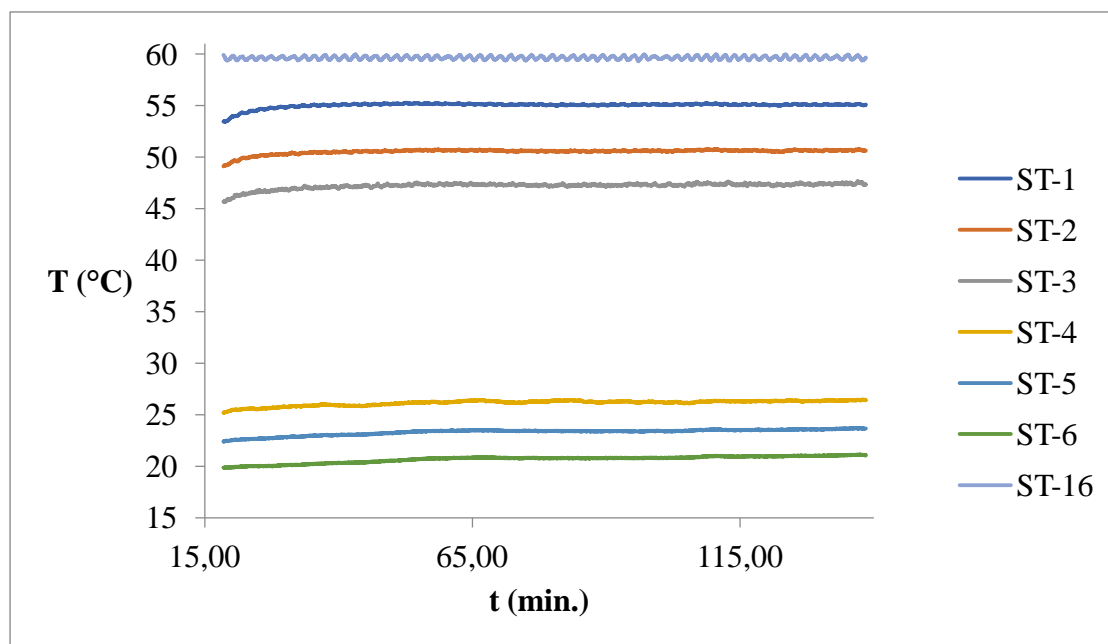
Η θερμική αποδοτικότητα του έναλλάκτη φθάνει το 0,22 ή 22% για αριθμό μονάδων μεταφοράς 0,27.



Σχήμα 7.3.8.5 | Διάγραμμα τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ῥευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.8.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 41-41,2°C ἔπειτα ἀπὸ 142 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξὺ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.8.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμικὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

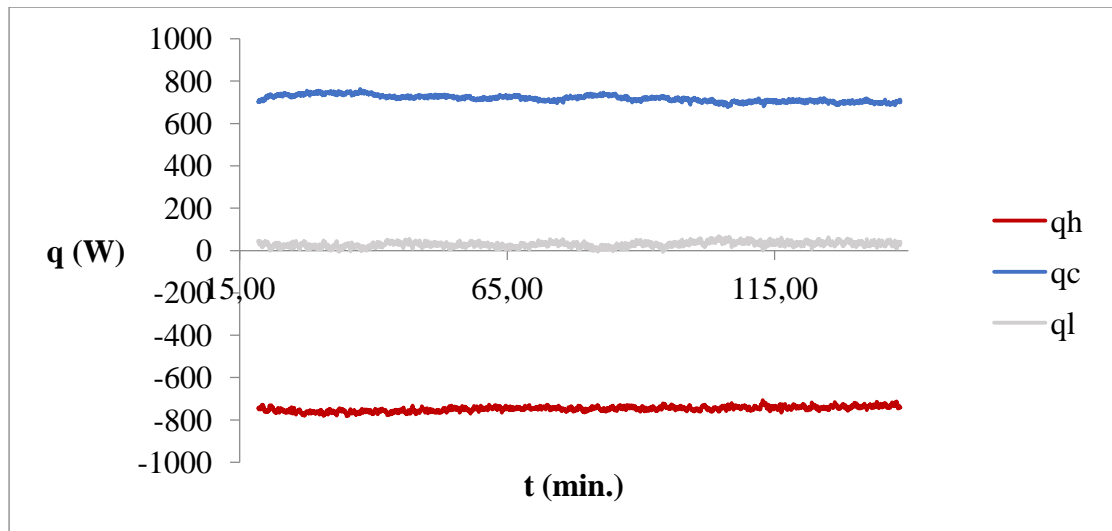
7.3.9 Πείραμα 9^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 1,4 L/min. και θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες άντιρροής



Σχήμα 7.3.9.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσῃ τοῦ χρόνου.

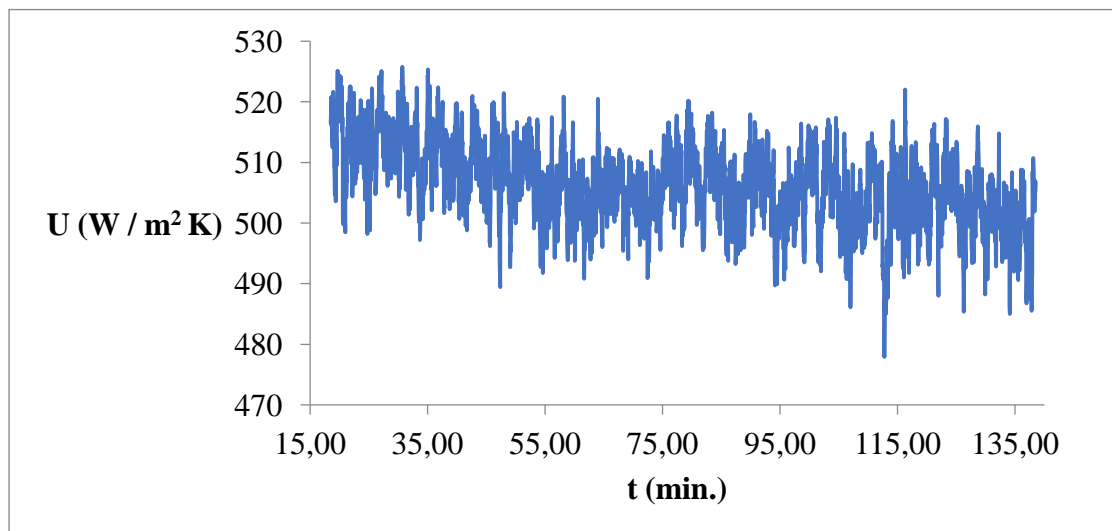
Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία καὶ φθάνει πάνω ἀπὸ τοὺς 55°C στὸ 35ο λεπτὸ περίπου. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει θερμοκρασία κάτω ἀπὸ 50°C μέχρι τὸ 23ο λεπτὸ καὶ ἔπειτα πηγαίνει πάνω ἀπὸ τοὺς 50°C. Στὴν ἔξοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 45-47°C περίπου.

Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 19-20°C καὶ πηγαίνει πάνω ἀπὸ τοὺς 21°C στὸ 110ο λεπτὸ περίπου. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ φθάνει στὴν θερμοκρασία ἄνω τῶν 23°C. Στὴν ἔξοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία ἄνω τῶν 26°C.



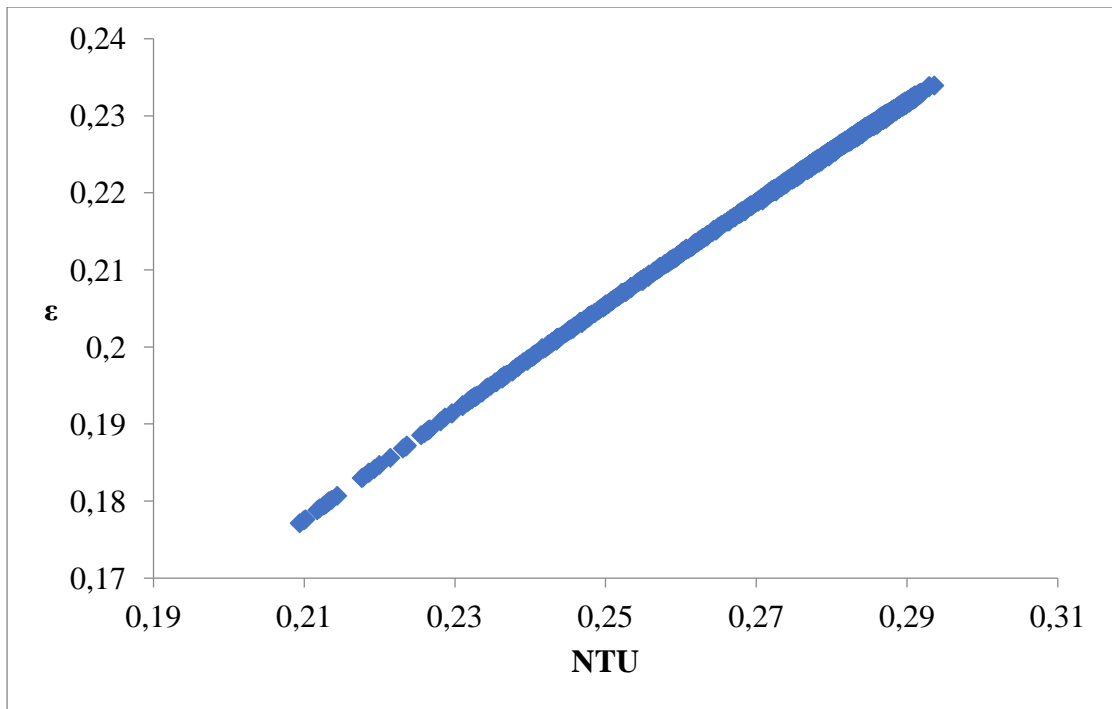
Σχήμα 7.3.9.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στον ανάμικτο χυμό (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -700 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) φθάνει πάνω από τα 700 Watt. Το «-» δέν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία· υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον εναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



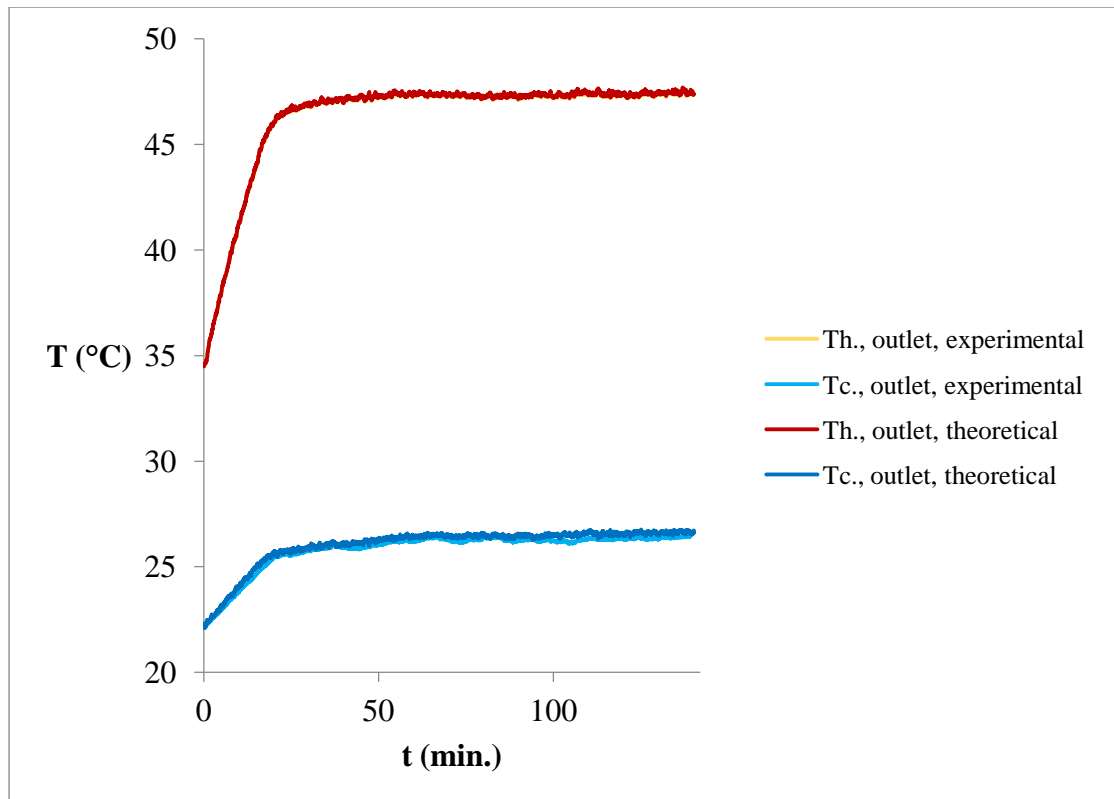
Σχήμα 7.3.9.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο 31ο λεπτό· η ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στο 113ο λεπτό περίπου.



Σχήμα 7.3.9.4 | Διάγραμμα της θερμικής αποδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

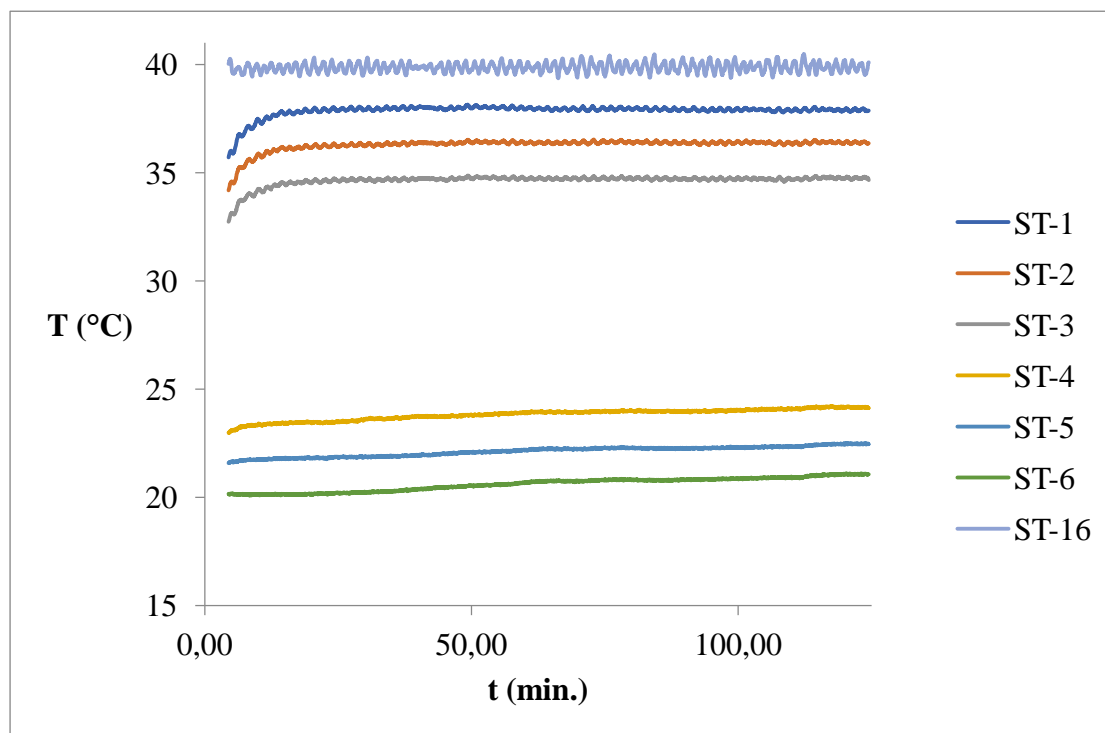
Η θερμική αποδοτικότητα του έναλλάκτη φθάνει το 0,23 ή 23% για αριθμό μονάδων μεταφοράς 0,29.



Σχήμα 7.3.9.5 | Διάγραμμα τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ῥευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.9.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 47,4-47,7°C ἔπειτα ἀπὸ 142 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξὺ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.9.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμικὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

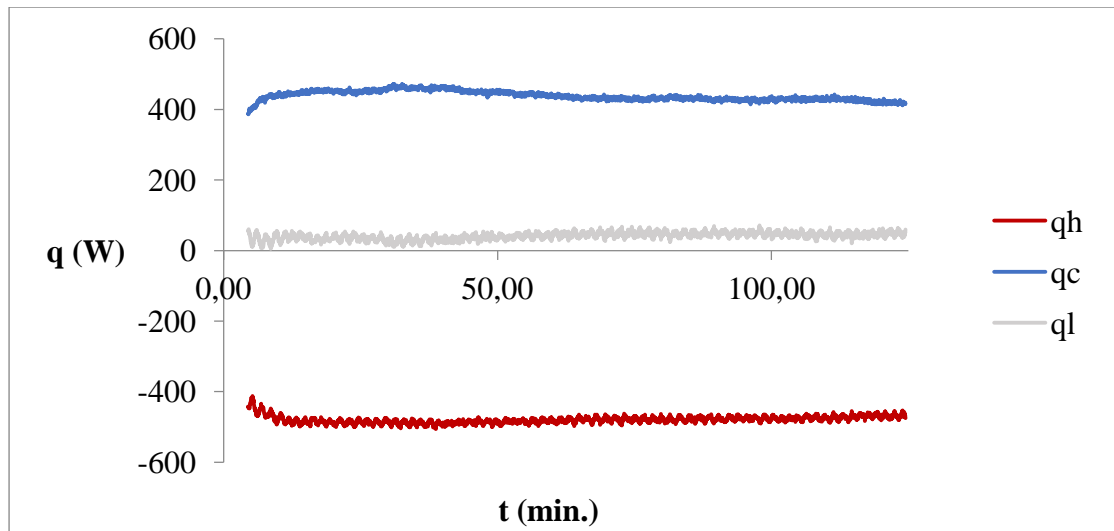
7.3.10 Πείραμα 10^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 40°C σε συνθήκες άντιρροής



Σχῆμα 7.3.10.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσεϊ τοῦ χρόνου.

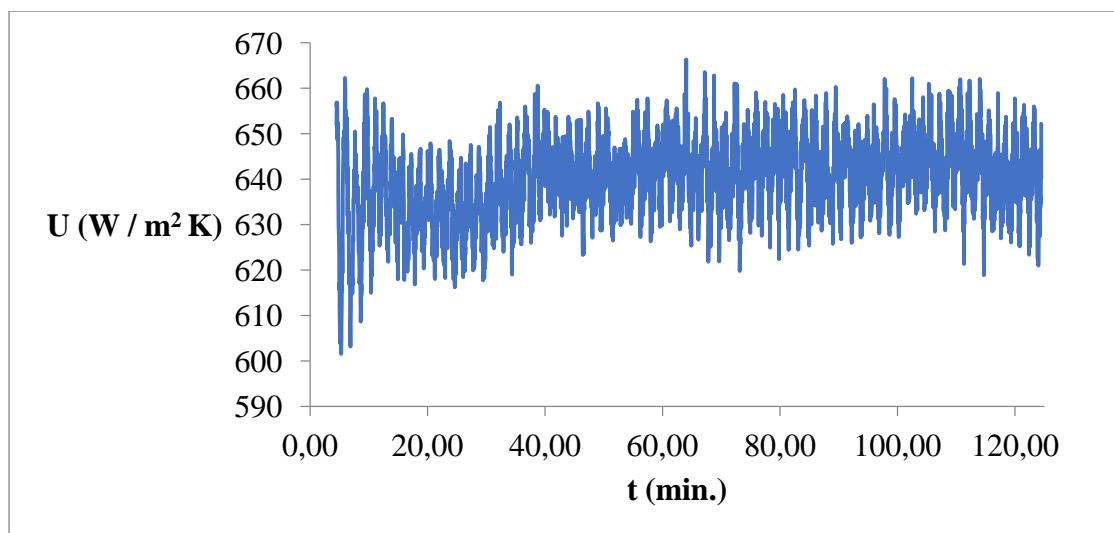
Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία καὶ φθάνει πάνω ἀπὸ τοὺς 38°C στὸ 21ο λεπτὸ. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει θερμοκρασία κάτω ἀπὸ 37°C. Στὴν ἐξοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 34,8°C περίπου.

Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 20°C καὶ πηγαίνει πάνω ἀπὸ τοὺς 21°C στὸ 113ο λεπτὸ περίπου. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ φθάνει στὴν θερμοκρασία τῶν 22,5°C στὸ 115ο λεπτὸ. Στὴν ἐξοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία ἄνω τῶν 24°C.



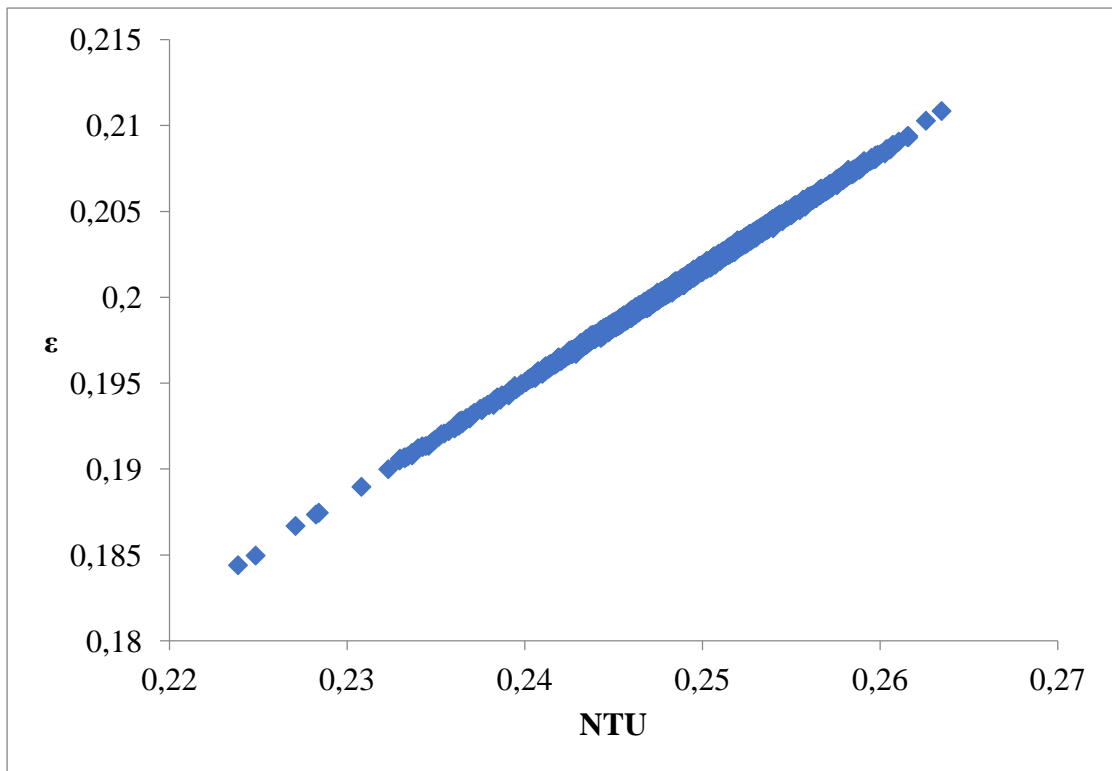
Σχήμα 7.3.10.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στον ανάμικτο χυμό (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -500 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) φθάνει πάνω από τα 400 Watt. Το «-» δέν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία· υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον έναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



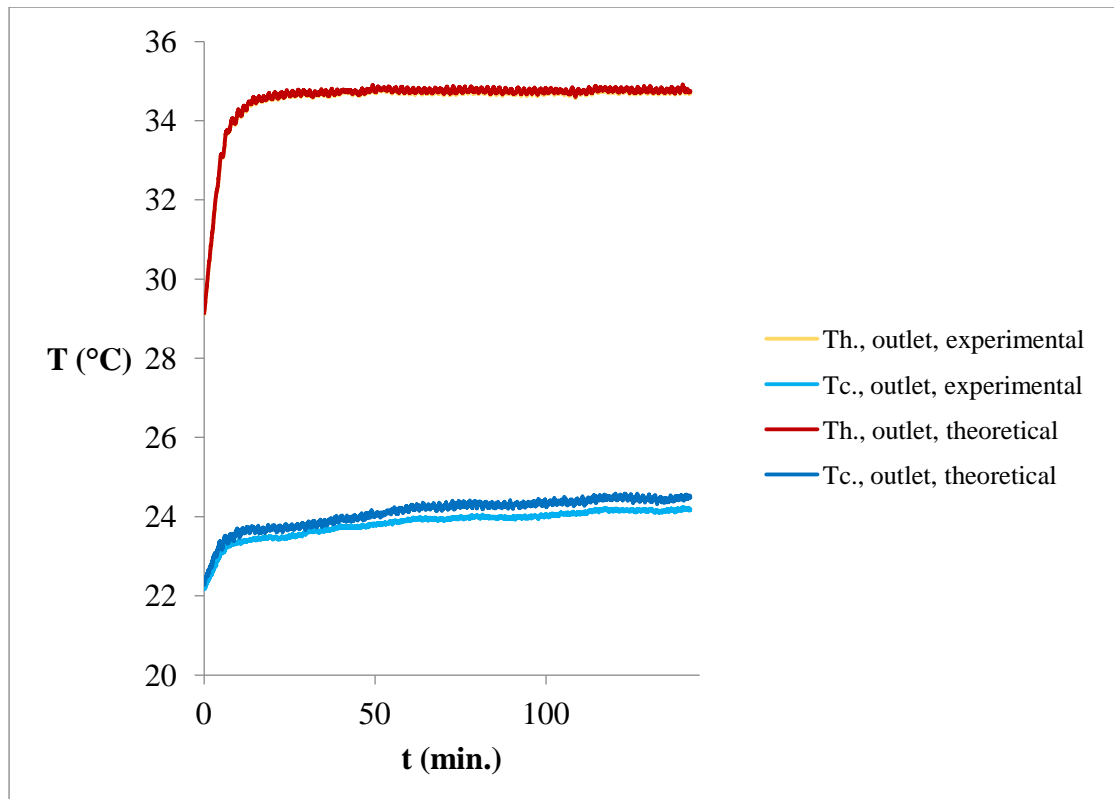
Σχήμα 7.3.10.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο 64ο λεπτό· ή ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στο 5ο λεπτό περίπου.



Σχήμα 7.3.10.4 | Διάγραμμα της θερμικής αποδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

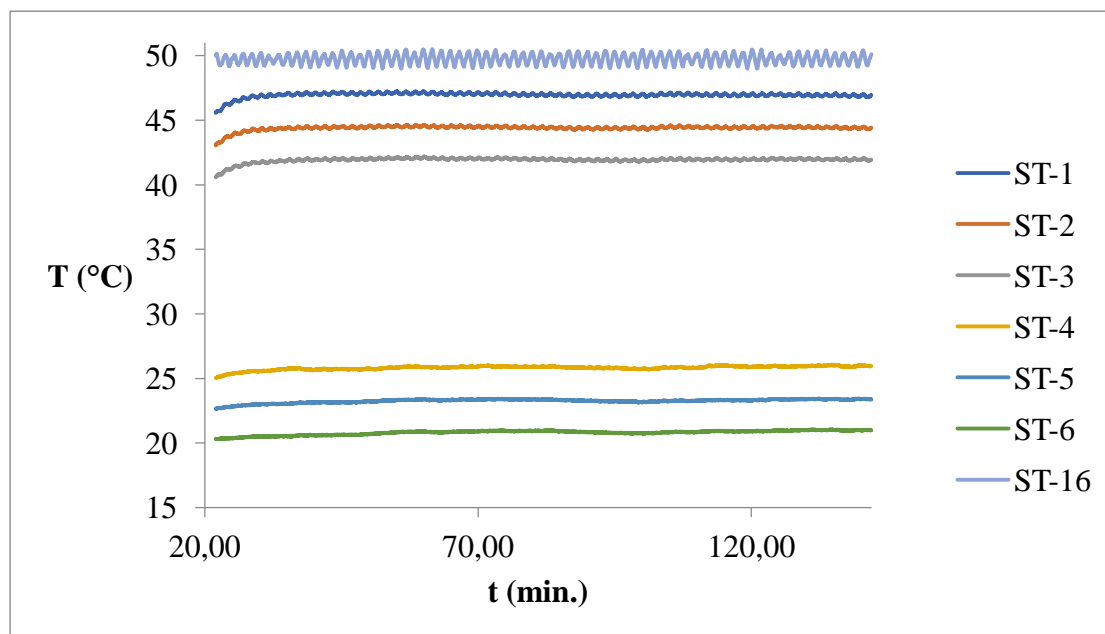
Η θερμική αποδοτικότητα του έναλλάκτη φθάνει το 0,21 ή 21% για αριθμό μονάδων μεταφοράς 0,26.



Σχήμα 7.3.10.5 | Διάγραμμα τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ρευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσεϊ τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.10.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίεσ ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιεσ καὶ φθάνουν στοὺσ 34,7-34,9°C ἔπειτα ἀπὸ 143 περίπου λεπτά. Ἀντιστοιχῶσ, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίεσ ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲσ ἀποκλίσεισ μεταξὺ τῶν τιμῶν, ὅπωσ φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.10.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆσ μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆσ λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμοκὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

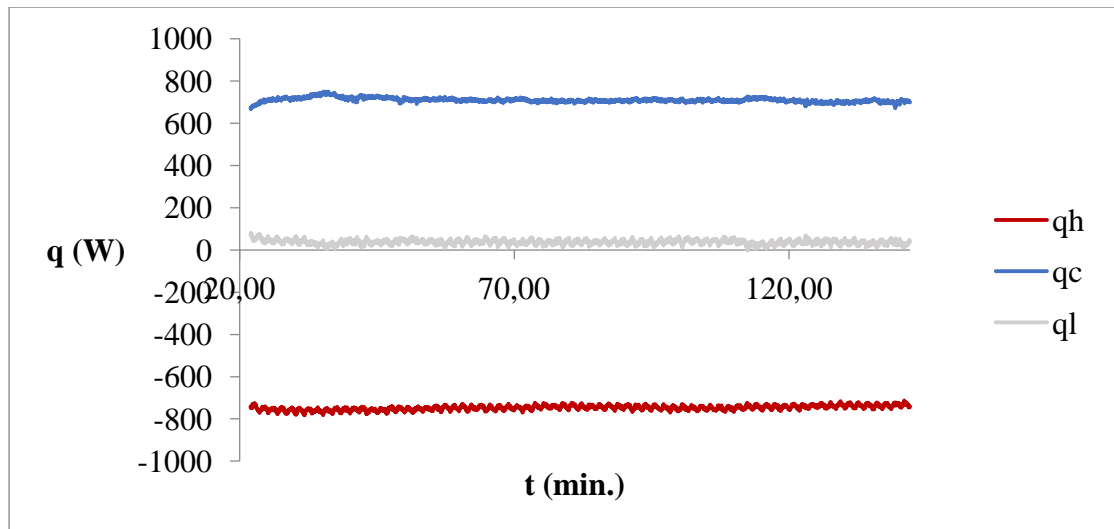
7.3.11 Πείραμα 11^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες άντιρροής



Σχῆμα 7.3.11.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσει τοῦ χρόνου.

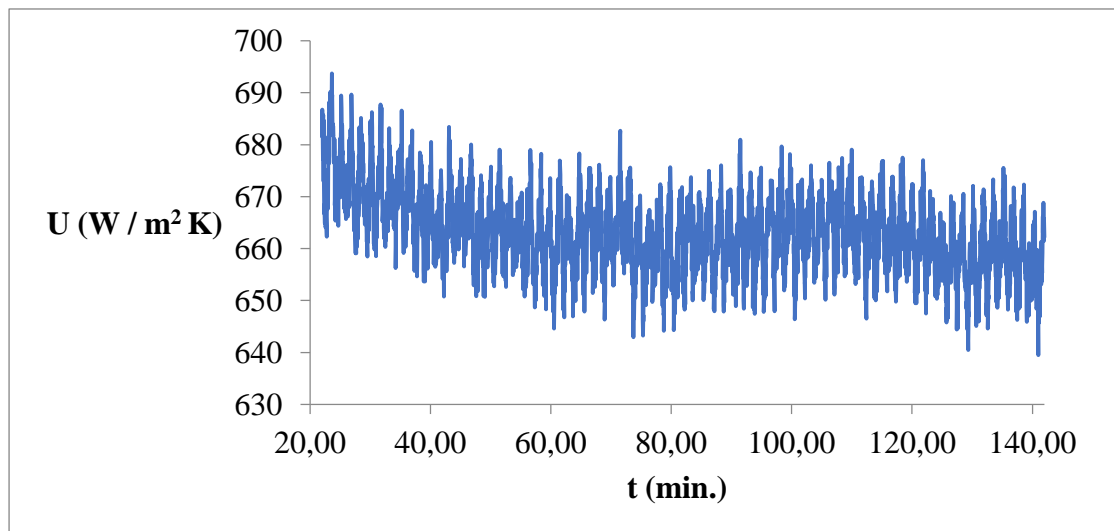
Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία καὶ φθάνει πάνω ἀπὸ τοὺς 47°C στὸ 30ὸ λεπτὸ περίπου. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει θερμοκρασία κάτω ἀπὸ 45°C. Στὴν ἐξοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 42,2°C περίπου.

Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 21,1°C. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ φθάνει στὴν θερμοκρασία τῶν 23,4°C. Στὴν ἐξοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία ἄνω τῶν 26°C.



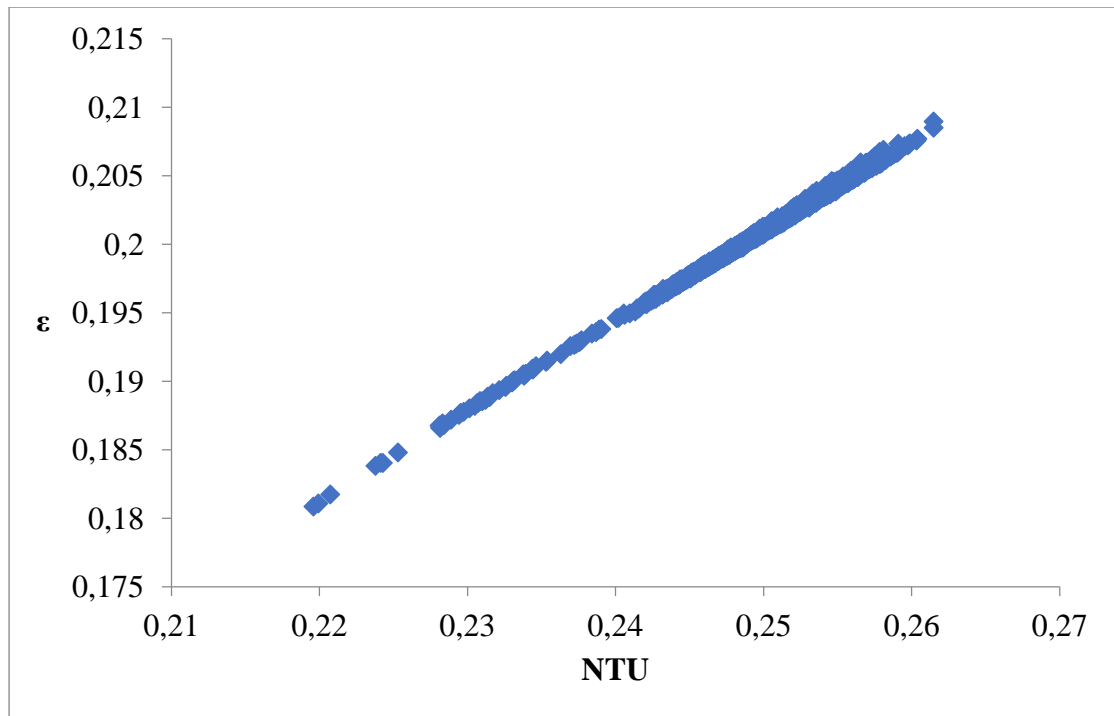
Σχήμα 7.3.11.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στον ανάμικτο χυμό (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -750 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) φθάνει πάνω από τα 700 Watt. Το «-» δεν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία· υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον εναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



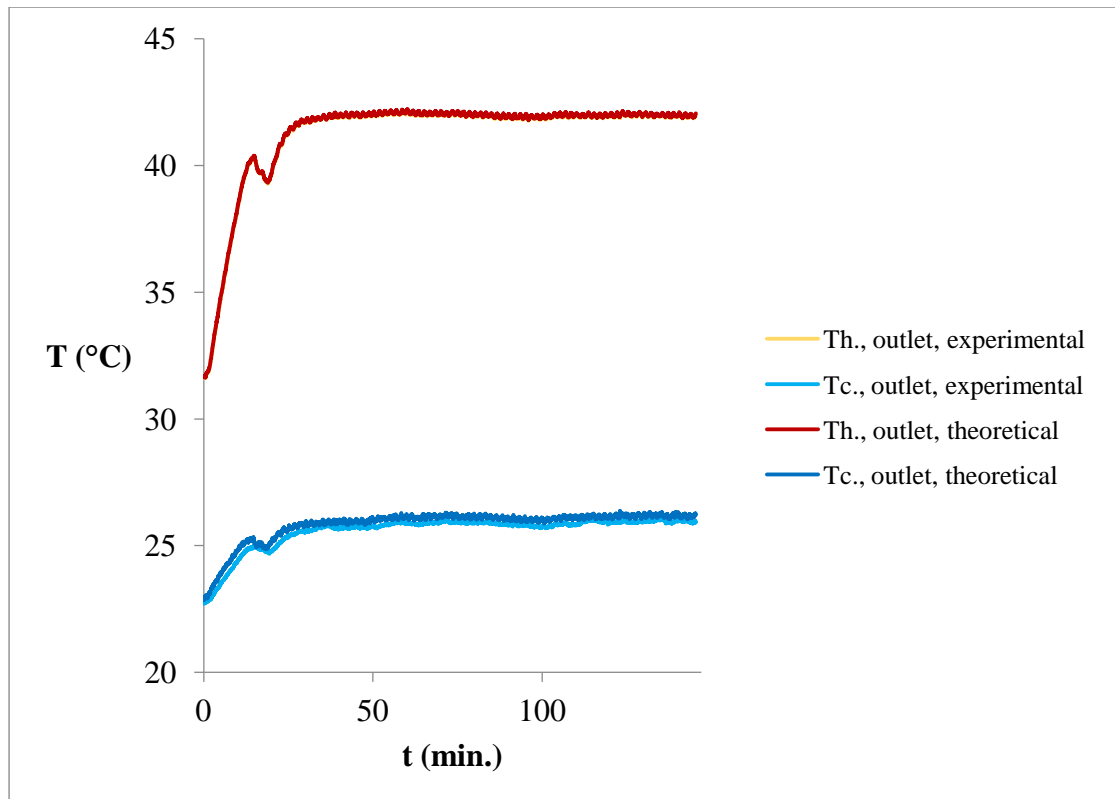
Σχήμα 7.3.11.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο χρονικό διάστημα των 23-24 λεπτών· ή ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στο 141ο λεπτό περίπου.



Σχήμα 7.3.11.4 | Διάγραμμα της θερμικής αποδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

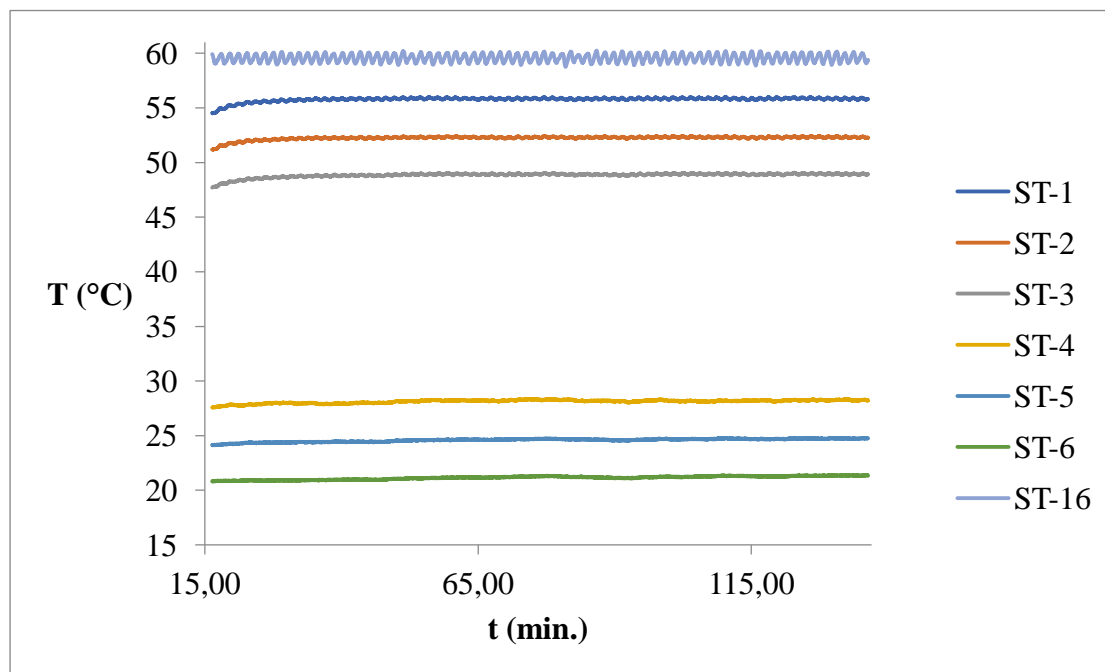
Η θερμική αποδοτικότητα του έναλλάκτη φθάνει το 0,21 ή 21% για αριθμό μονάδων μεταφοράς 0,26.



Σχήμα 7.3.11.5 | Διάγραμμα τών θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ρευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσεϊ τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.11.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 42-42,2°C ἔπειτα ἀπὸ 146 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξύ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.11.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμικὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

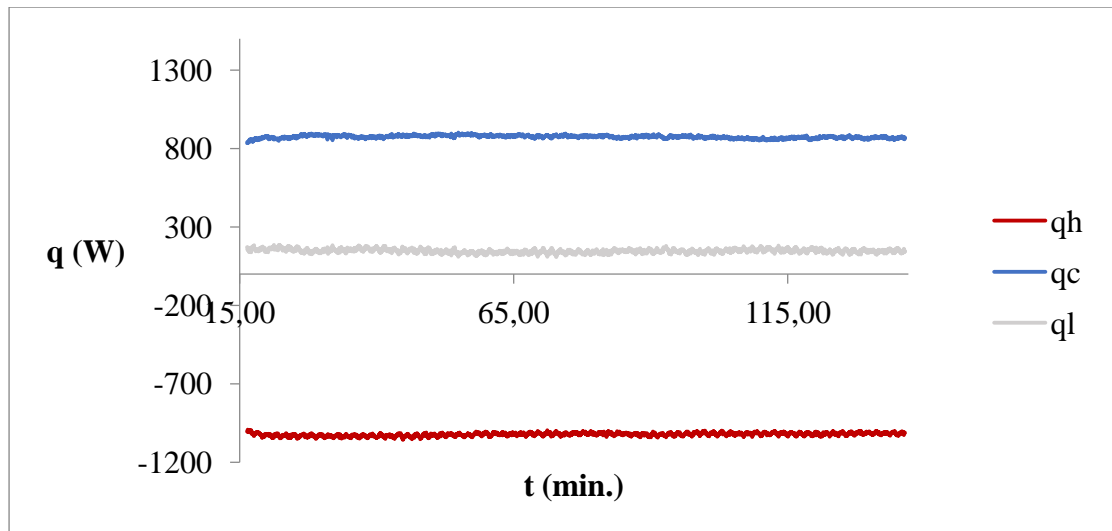
7.3.12 Πείραμα 12^ο: ροή αραιωμένου χυμού στα 2,1 L/min. και θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες άντιρροής



Σχῆμα 7.3.12.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσεϊ τοῦ χρόνου.

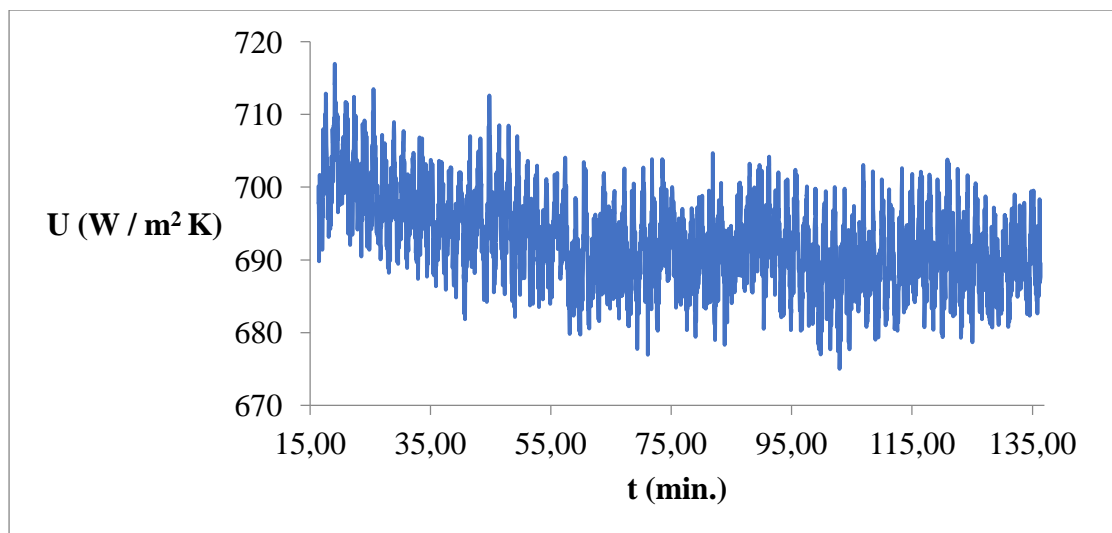
Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία καὶ φθάνει πάνω ἀπὸ τοὺς 55,5°C. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει θερμοκρασία κάτω ἀπὸ 53°C. Στὴν ἐξοδο τοῦ ἐναλλάκτη ὁ ἀνάμικτος χυμὸς ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 49°C.

Στὴν εἴσοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μικρότερη θερμοκρασία στοὺς 21,4°C. Σὲ ἐνδιάμεσο σημεῖο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ φθάνει στὴν θερμοκρασία τῶν 24,8°C. Στὴν ἐξοδο τοῦ ἐναλλάκτη τὸ νερὸ ἔχει τὴν μεγαλιέτερη θερμοκρασία ἀνω τῶν 28°C.



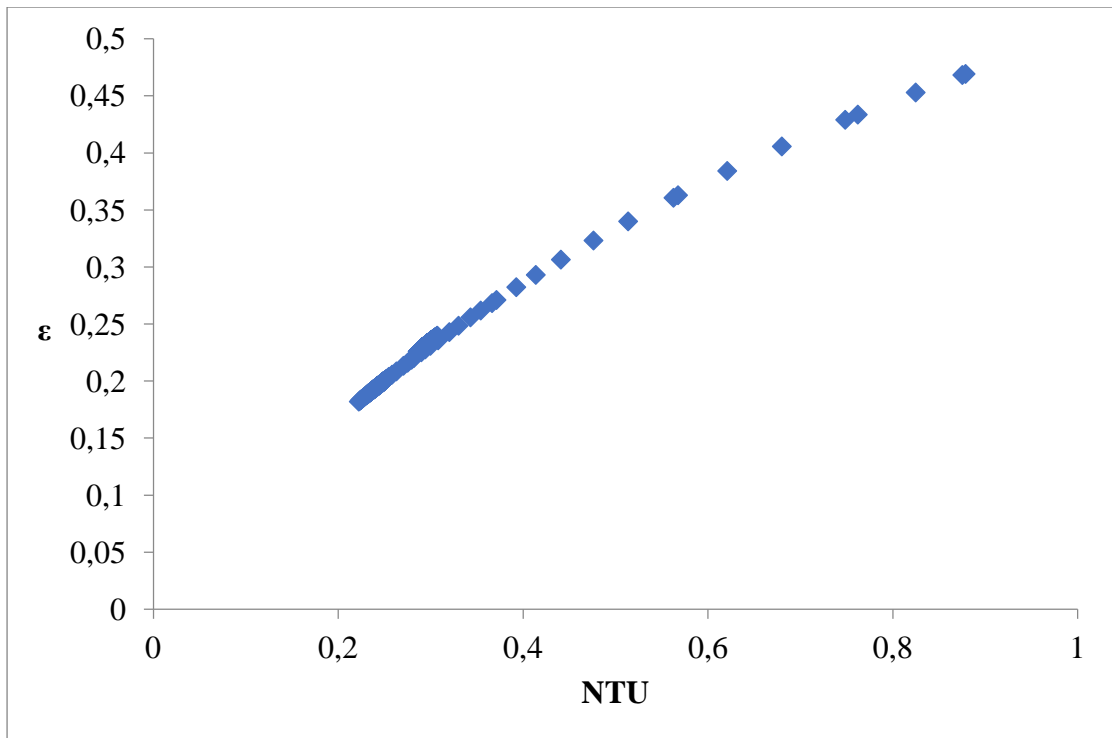
Σχήμα 7.3.12.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στον ανάμικτο χυμό (q_h) μειώνεται και φθάνει κάτω από τα -1000 Watt. Η μεταβολή της θερμικής ενέργειας στο νερό (q_c) φθάνει πάνω από τα 800 Watt. Το «-» δέν υποδηλώνει κάποια φυσική σημασία· υποδηλώνει την μετάβαση θερμότητας από το θερμό μέσο στο ψυχρό μέσο. Υπάρχουν απώλειες στον εναλλάκτη. Μεταφέρεται θερμότητα από το q_h στο q_c και το q_l .



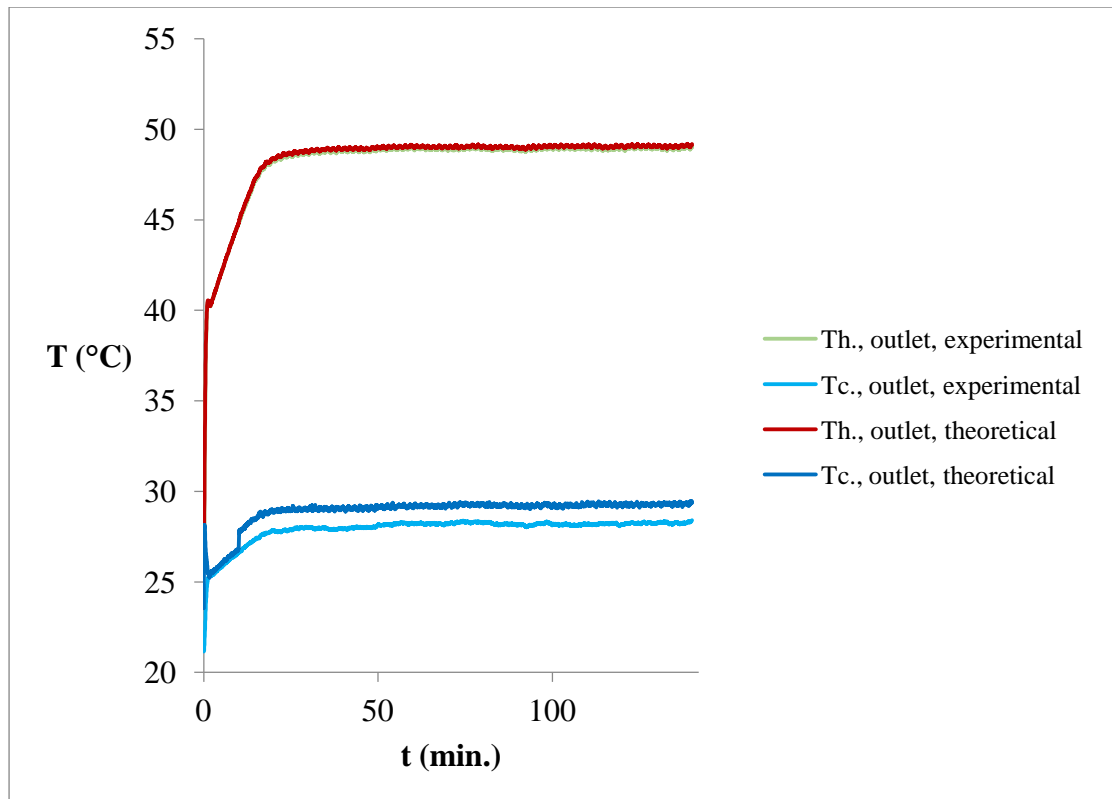
Σχήμα 7.3.12.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Ο όλικος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παίρνει την μέγιστη τιμή στο χρονικό διάστημα των 19-20 λεπτών· η ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στο 103ο λεπτό περίπου.



Σχήμα 7.3.12.4 | Διάγραμμα της θερμικής αποδοτικότητας του έναλλάκτη συναρτήσει του αριθμού μονάδων μεταφοράς.

Η θερμική αποδοτικότητα του έναλλάκτη φθάνει το 0,47 ή 47% για αριθμό μονάδων μεταφοράς 0,88.



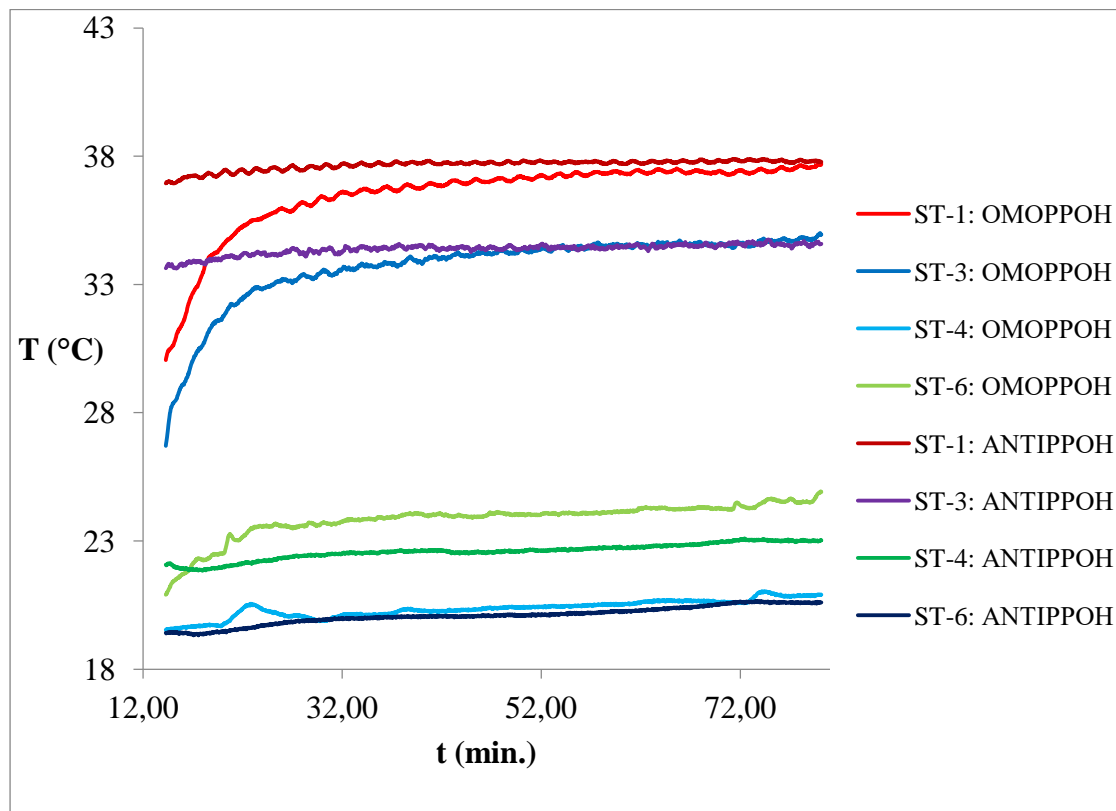
Σχήμα 7.3.12.5 | Διάγραμμα τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου τοῦ ρευστοῦ τροφίμου καὶ τοῦ ψυκτικοῦ μέσου συναρτήσῃ τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.3.12.5 συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ παρατηρεῖται ὅτι εἶναι παρόμοιες καὶ φθάνουν στοὺς 49-49,2°C ἔπειτα ἀπὸ 141 περίπου λεπτά. Ἀντιστοίχως, συγκρίνονται οἱ θεωρητικὲς καὶ πειραματικὲς θερμοκρασίες ἐξόδου τοῦ νεροῦ καὶ παρατηροῦνται μικρὲς ἀποκλίσεις μεταξὺ τῶν τιμῶν, ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 7.3.12.5. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ δείχνουν τὴν πολὺ καλὴ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU”. Ἡ σύγκριση τῶν θεωρητικῶν καὶ πειραματικῶν θερμοκρασιῶν ἐξόδου ἐφαρμόζεται γιὰ τὸν ἐξῆς λόγο: νὰ ἐλεγχθῆ, ἂν ἡ θερμοκὴ ἀποδοτικότητα εἶναι ὀρθή.

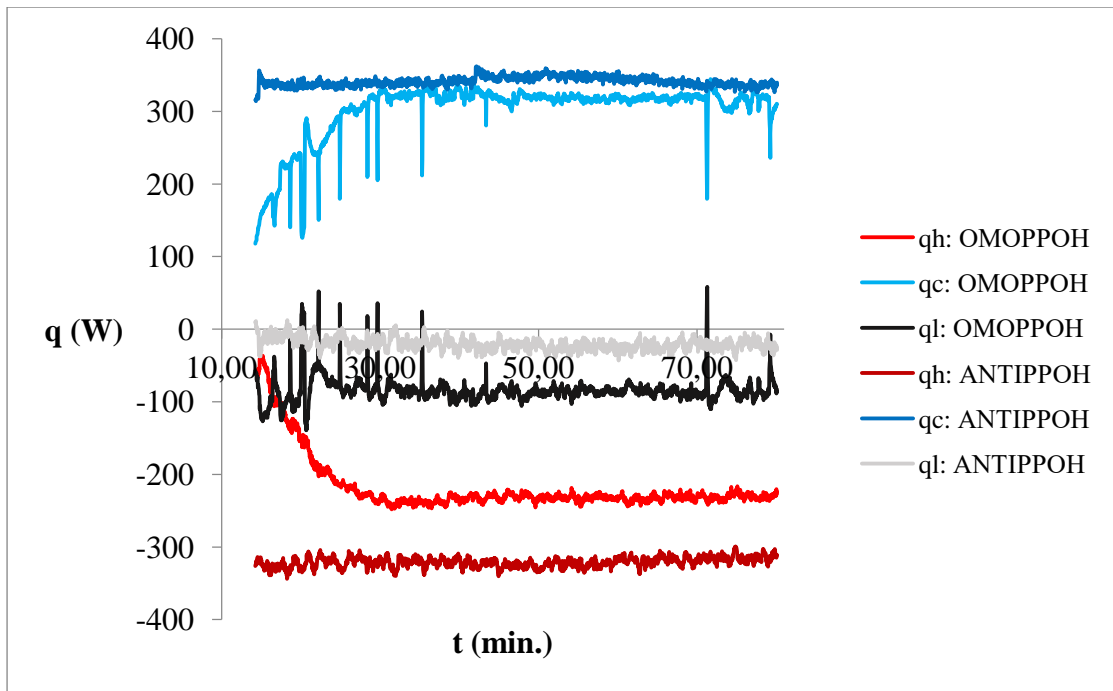
7.4 Συζήτηση

7.4.1 Σύγκριση όμορροής και αντίρροής

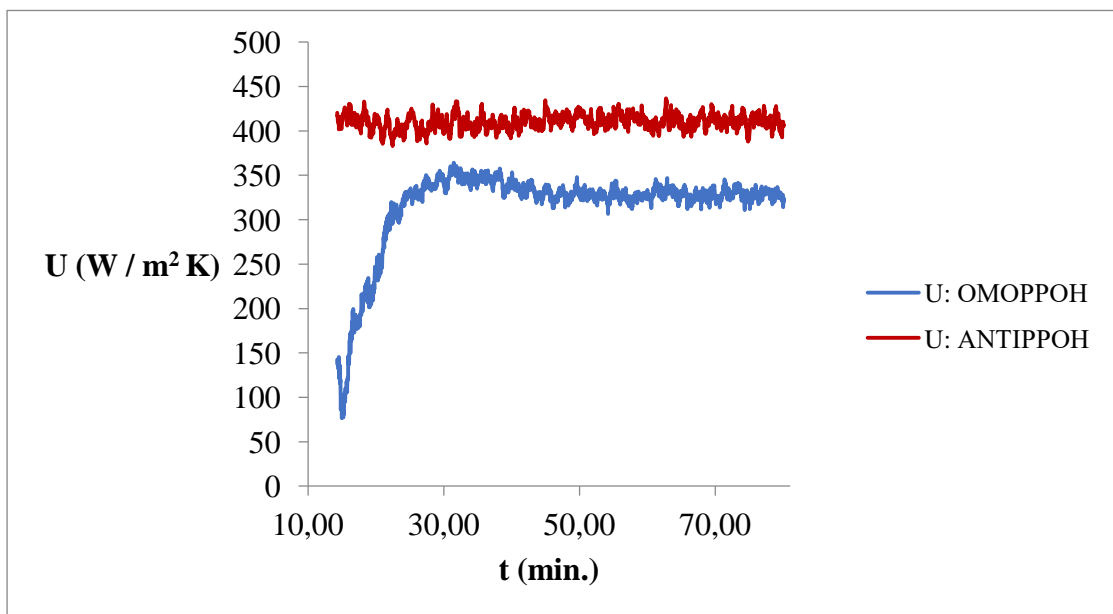
7.4.1.1 Σταθερή παροχή στα 1,4 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 40°C



Σχήμα 7.4.1.1.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου.



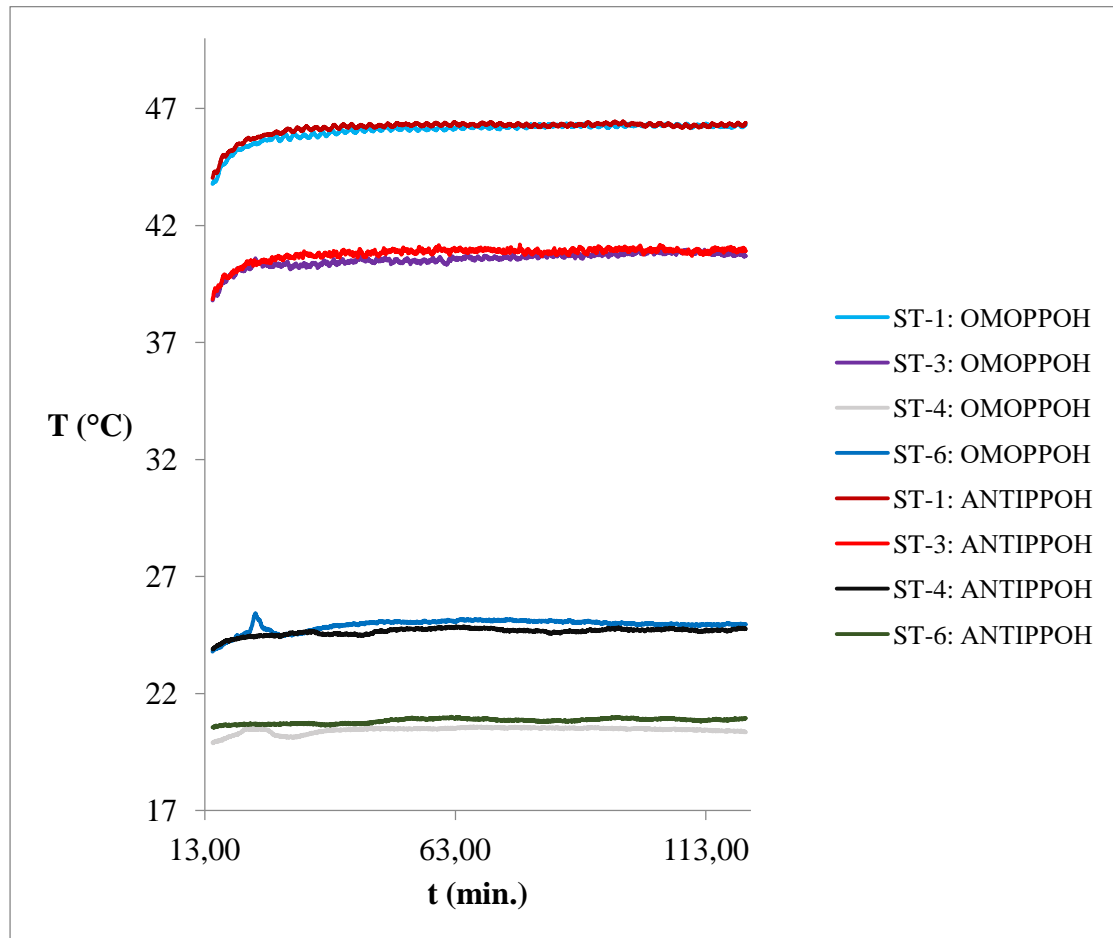
Σχήμα 7.4.1.1.2 | Διάγραμμα τής μεταβολής τής θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και τής μεταβολής τής θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και τών θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσει τοῦ χρόνου.



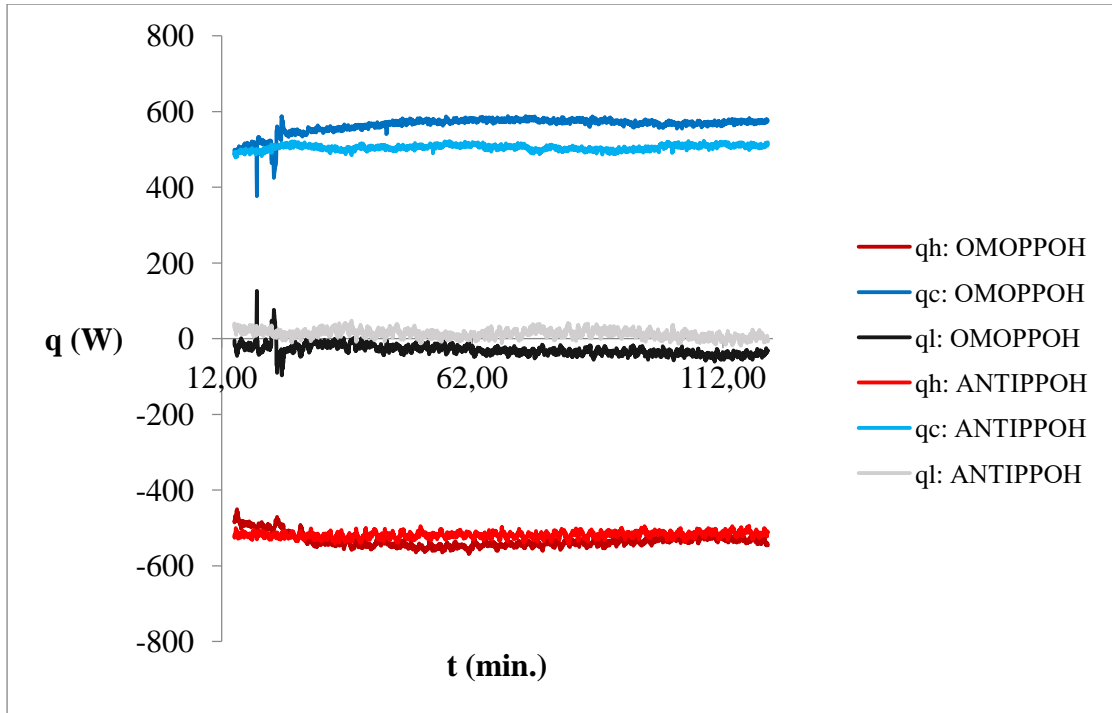
Σχήμα 7.4.1.1.3 | Διάγραμμα τοῦ ὀλικῶ συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότητας συναρτήσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.4.1.1.1 παρατηρεῖται γρηγορότερη σταθεροποίηση τῆς T στὴν ἐπιθυμητὴ θερμοκρασία. Στὸ σχῆμα 7.4.1.1.2 παρατηροῦνται μεγαλιότερη θερμότητα (q_h) γιὰ τὸν ἀραιωμένο χυμὸ καὶ μικρὲς ἀπώλειες θερμότητας (q_l) στὴν ἀντιρροή· ἐπ' ἴσης, μεγαλιότερη θερμότητα (q_c) περνᾷ στὸ νερὸ στὴν ἀντιρροή. Στὸ σχῆμα 7.4.1.1.3 παρατηρεῖται μεγαλιότερος ὀλικὸς συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητας στὴν ἀντιρροή.

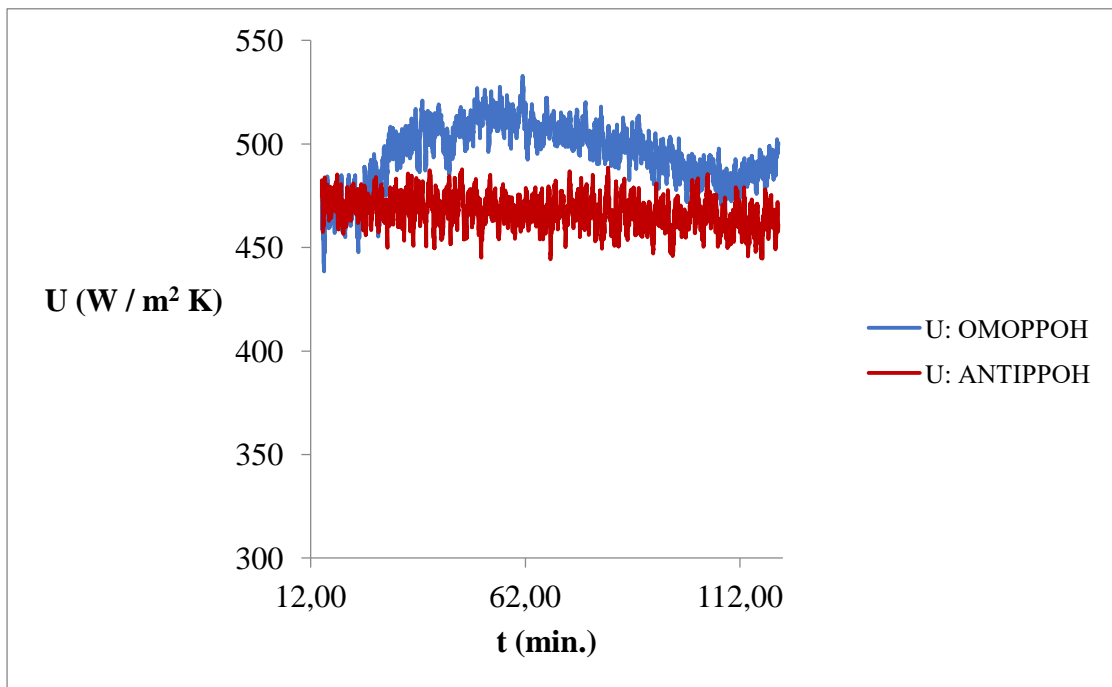
7.4.1.2 Σταθερή παροχή στα 1,4 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στούς 50°C



Σχήμα 7.4.1.2.1 | Διάγραμμα τών θερμοκρασιών συναρτήσει τοῦ χρόνου.



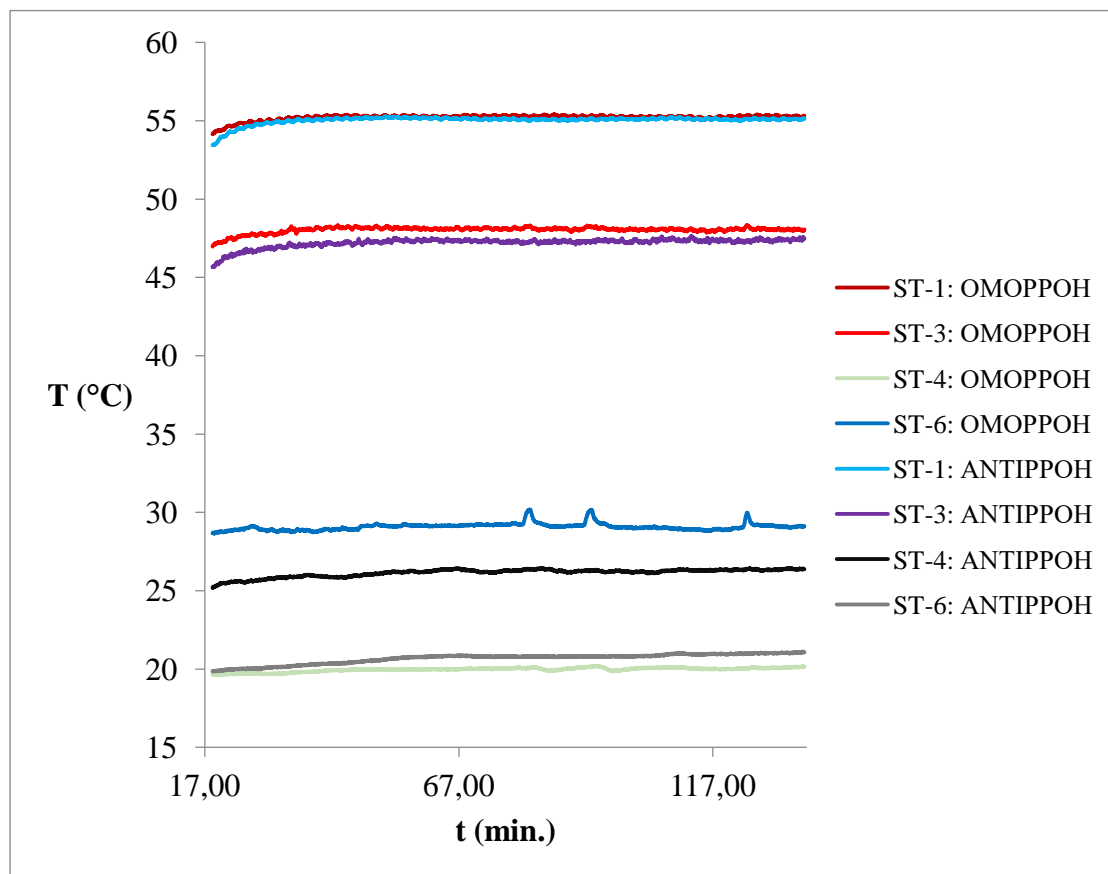
Σχήμα 7.4.1.2.2 | Διάγραμμα τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ῥευστὸ τρόφιμο (q_h) καὶ τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ψυκτικὸ μέσο (q_c) καὶ τῶν θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσσει τοῦ χρόνου.



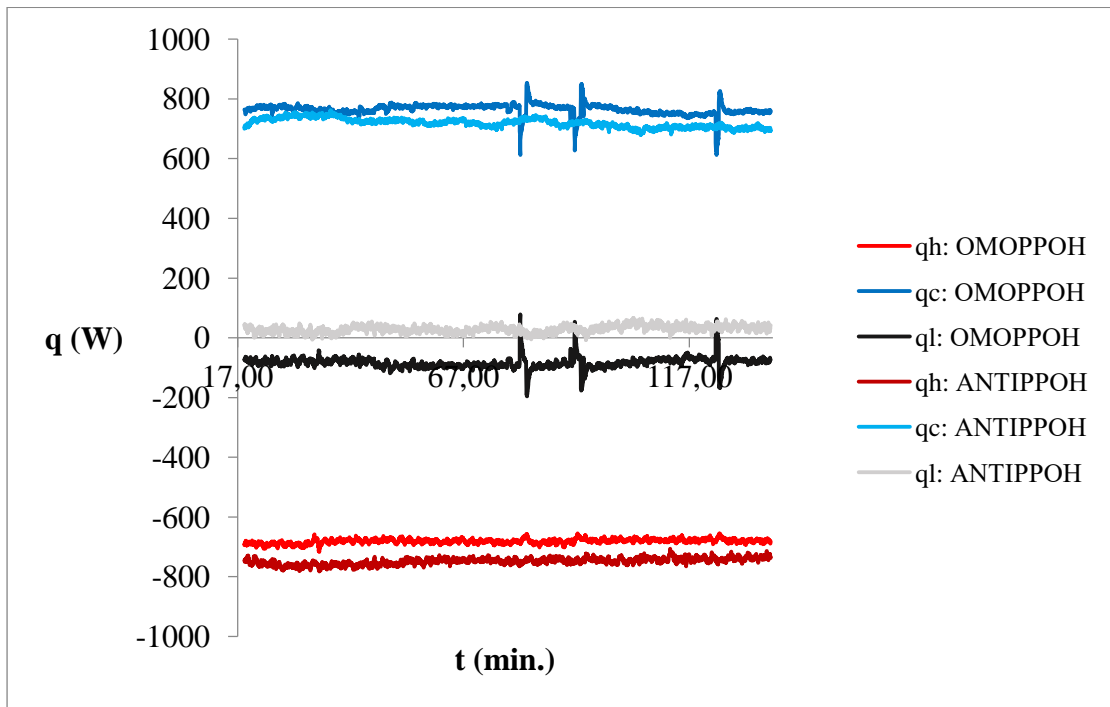
Σχήμα 7.4.1.2.3 | Διάγραμμα τοῦ ὀλικῆ συντελεστῆ μεταφοῶς θερμότηας συναρτήσσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.4.1.2.1 παρατηροῦνται παρόμοιες συνθήκες T τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ καὶ τοῦ νεροῦ. Στὸ σχῆμα 7.4.1.2.2 παρατηροῦνται παρόμοιες μεταφορὲς θερμότητας (q_h, q_c) γιὰ τὸν ἀραιωμένο χυμὸ καὶ τὸ νερὸ καὶ παρόμοιες ἀπώλειες (q_l). Στὸ σχῆμα 7.4.1.2.3 παρατηρεῖται μικρὴ αὐξηση τοῦ ὀλικοῦ συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότητας στὴν ὁμορροή.

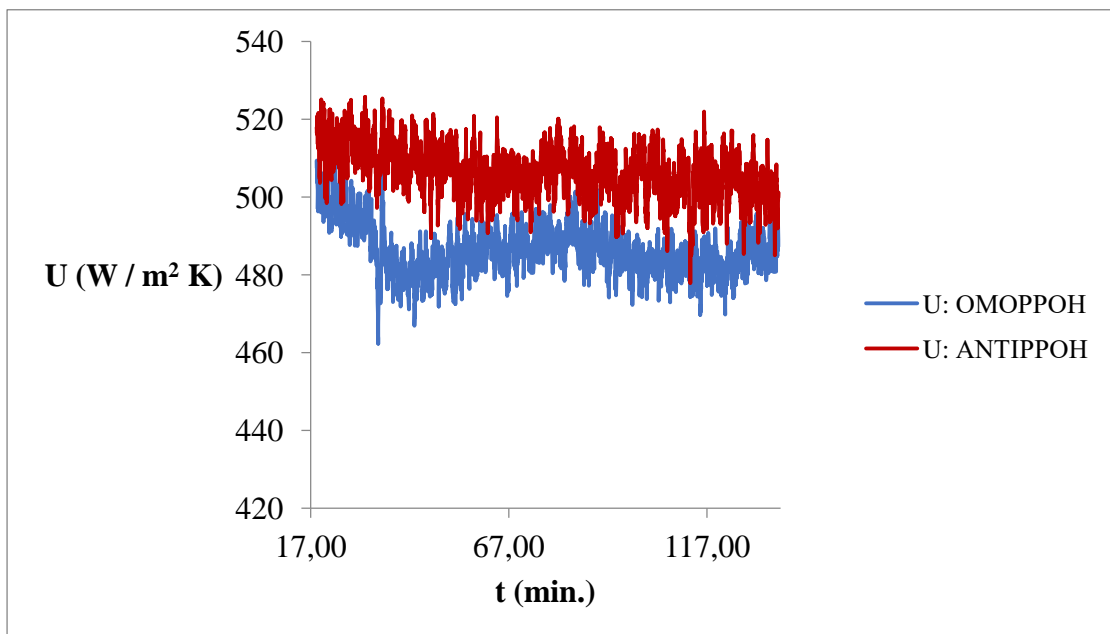
7.4.1.3 Σταθερή παροχή στα 1,4 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 60°C



Σχήμα 7.4.1.3.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει τοῦ χρόνου.



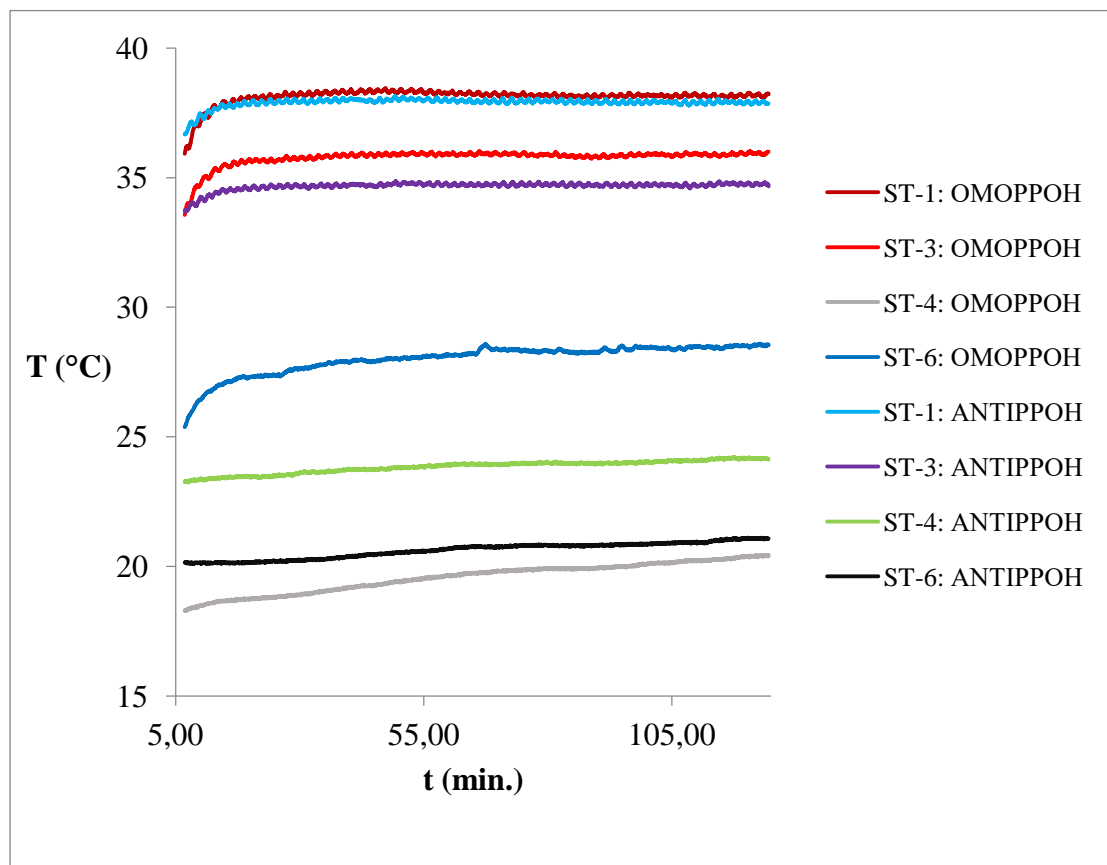
Σχήμα 7.4.1.3.2 | Διάγραμμα τής μεταβολής τής θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και τής μεταβολής τής θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και τών θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_i) συναρτήσει τοῦ χρόνου.



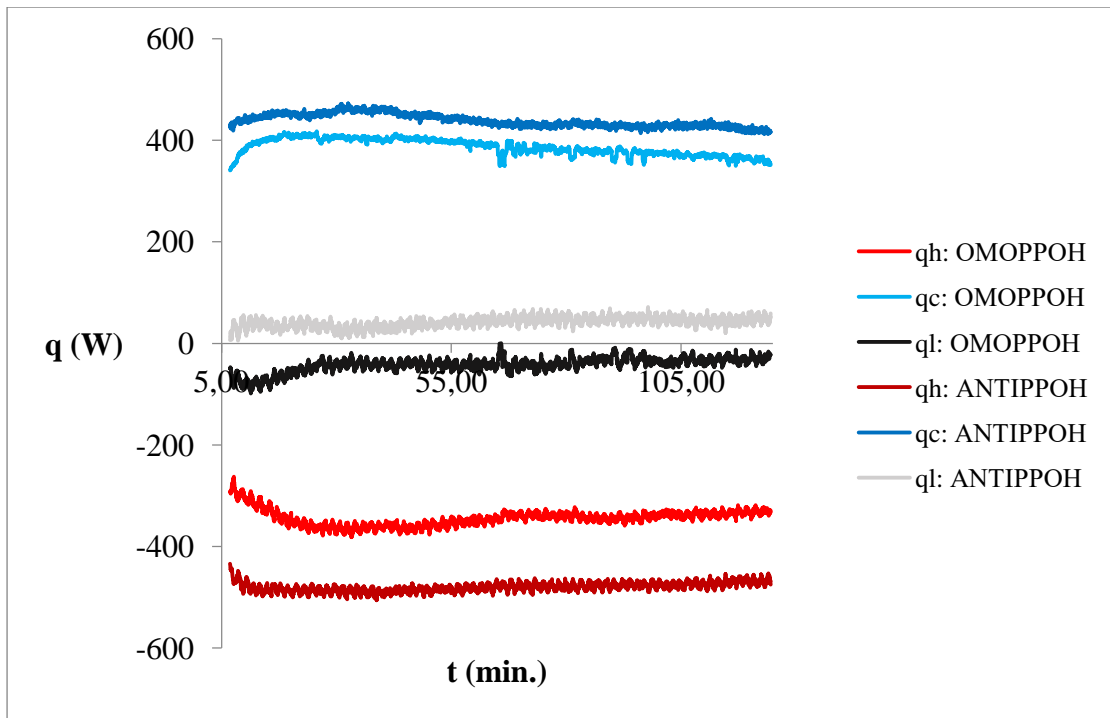
Σχήμα 7.4.1.3.3 | Διάγραμμα τοῦ ὅλικου συντελεστή μεταφορᾶς θερμότητας συναρτήσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.4.1.3.1 παρατηρεῖται μεγαλύτερη θερμοκρασία στὴν ἔξοδο τοῦ νεροῦ στὴν ὁμορροή σὲ σύγκριση μὲ τὴν ἀντιρροή. Στὸ σχῆμα 7.4.1.3.2 παρατηροῦνται μηδενικὲς ἀπώλειες θερμότητας (q_l) στὴν ἀντιρροή σὲ σύγκριση μὲ τὴν ὁμορροή καὶ μεγαλύτερη θερμότητα (q_h) στὸν ἀραιωμένο χυμὸ στὴν ἀντιρροή. Στὸ σχῆμα 7.4.1.3.3 παρατηρεῖται μεγαλύτερος ὀλικὸς συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητας στὴν ἀντιρροή.

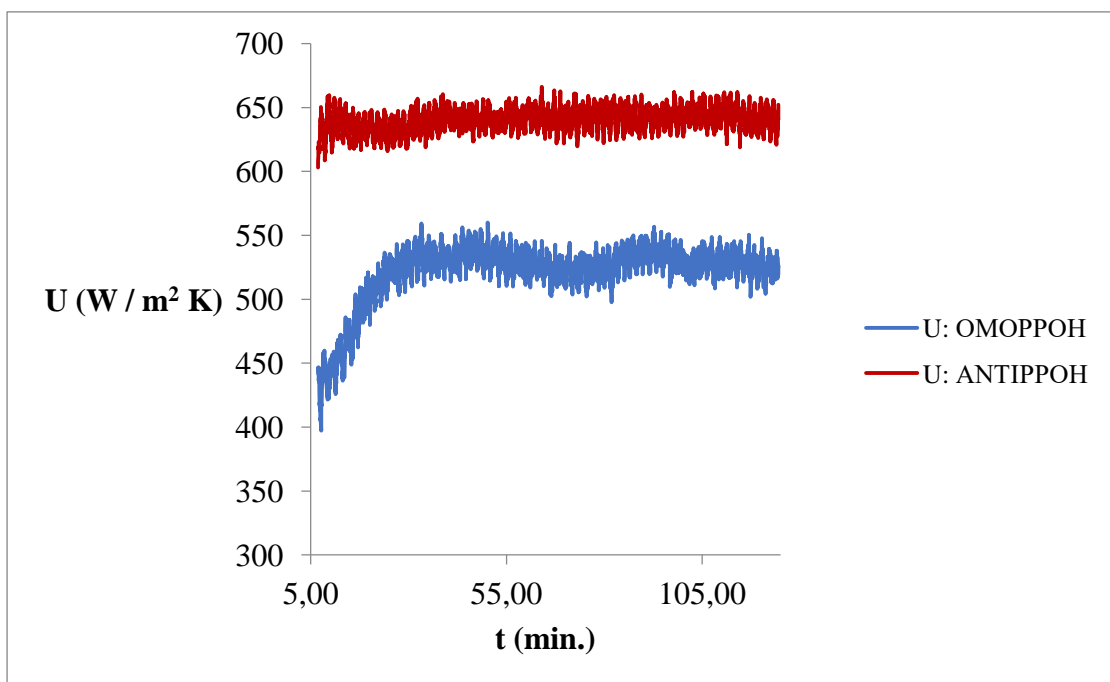
7.4.1.4 Σταθερή παροχή στα 2,1 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 40°C



Σχήμα 7.4.1.4.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου.



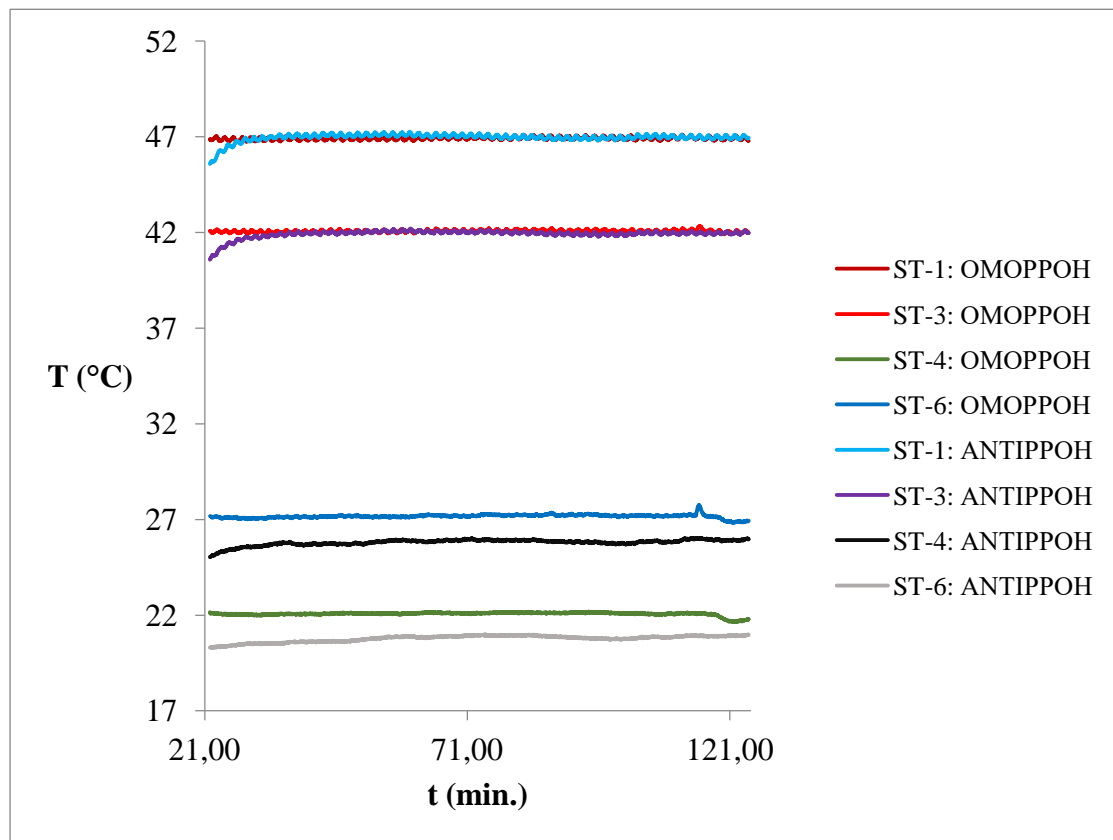
Σχήμα 7.4.1.4.2 | Διάγραμμα τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ῥευστὸ τρόφιμο (q_h) καὶ τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ψυκτικὸ μέσο (q_c) καὶ τῶν θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσῃ τοῦ χρόνου.



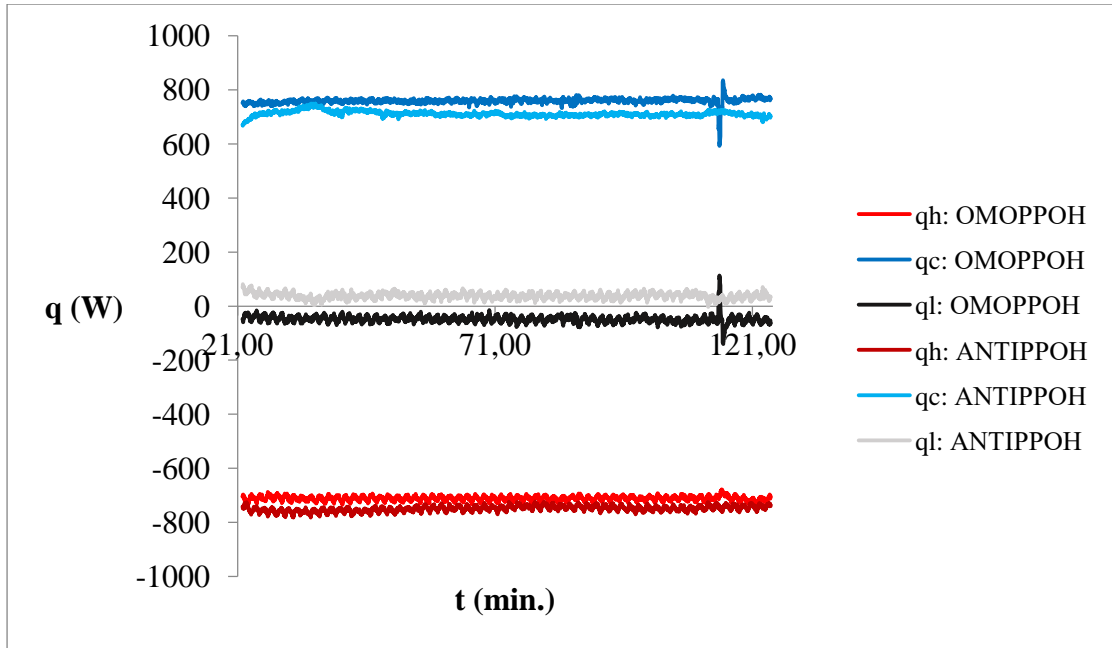
Σχήμα 7.4.1.4.3 | Διάγραμμα τοῦ ὅλικοῦ συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότητος συναρτήσῃ τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.4.1.4.1 παρατηρεῖται χαμηλότερη θερμοκρασία τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ κατὰ τὴν ἔξοδο ἀπὸ τὸν ἐναλλάκτη στὴν ἀντιρροή σὲ σύγκριση μὲ τὴν ὁμορροή· ἐπ' ἴσης, παρατηρεῖται χαμηλότερη θερμοκρασία νεροῦ στὴν ἀντιρροή σὲ σύγκριση μὲ τὴν ὁμορροή. Στὸ σχῆμα 7.4.1.4.2 παρατηρεῖται μεγαλιότερη θερμότητα (q_h) στὸν ἀραιωμένο χυμὸ στὴν ἀντιρροή· ἐπ' ἴσης, μεγαλιότερη θερμότητα (q_c) περνᾷ στὸ νερὸ στὴν ἀντιρροή. Στὸ σχῆμα 7.4.1.4.3 παρατηρεῖται μεγαλιότερος ὀλικὸς συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητας στὴν ἀντιρροή.

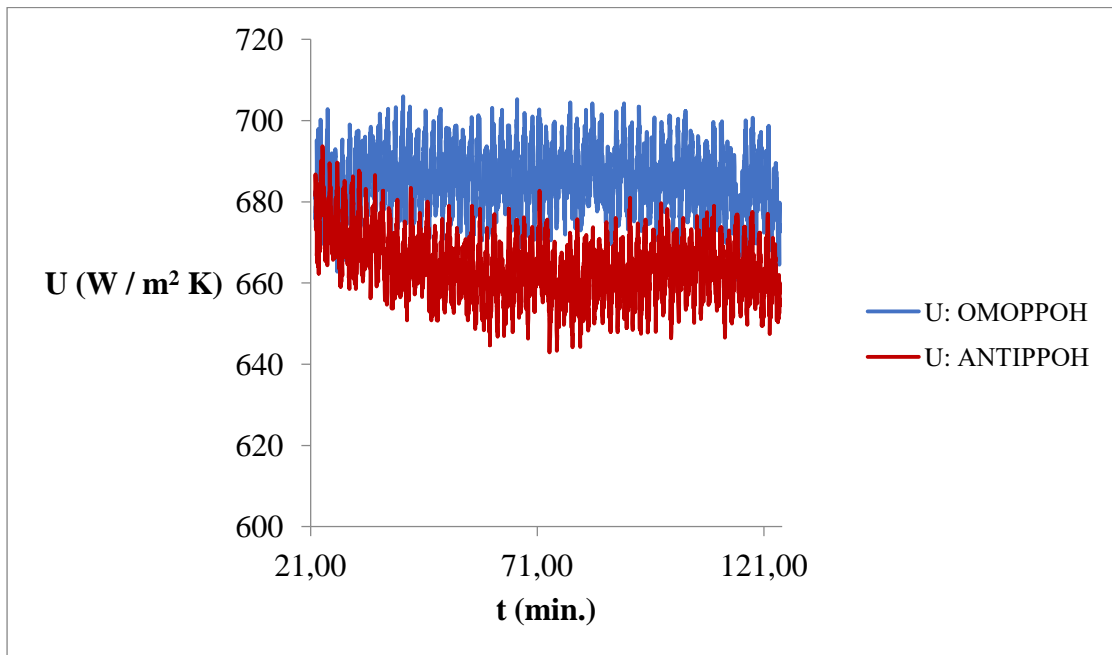
7.4.1.5 Σταθερή παροχή στα 2,1 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 50°C



Σχήμα 7.4.1.5.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου.



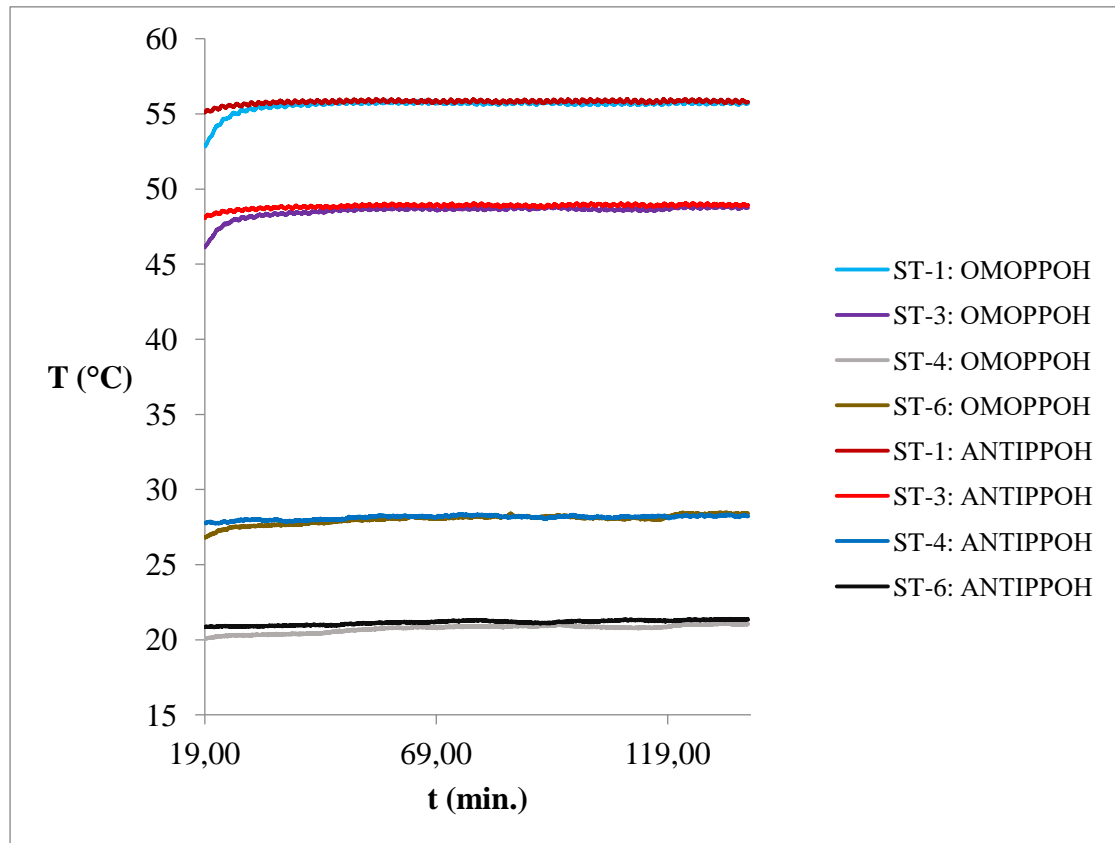
Σχήμα 7.4.1.5.2 | Διάγραμμα τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ρέυστὸ τρόφιμο (q_h) καὶ τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ψυκτικὸ μέσο (q_c) καὶ τῶν θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσει τοῦ χρόνου.



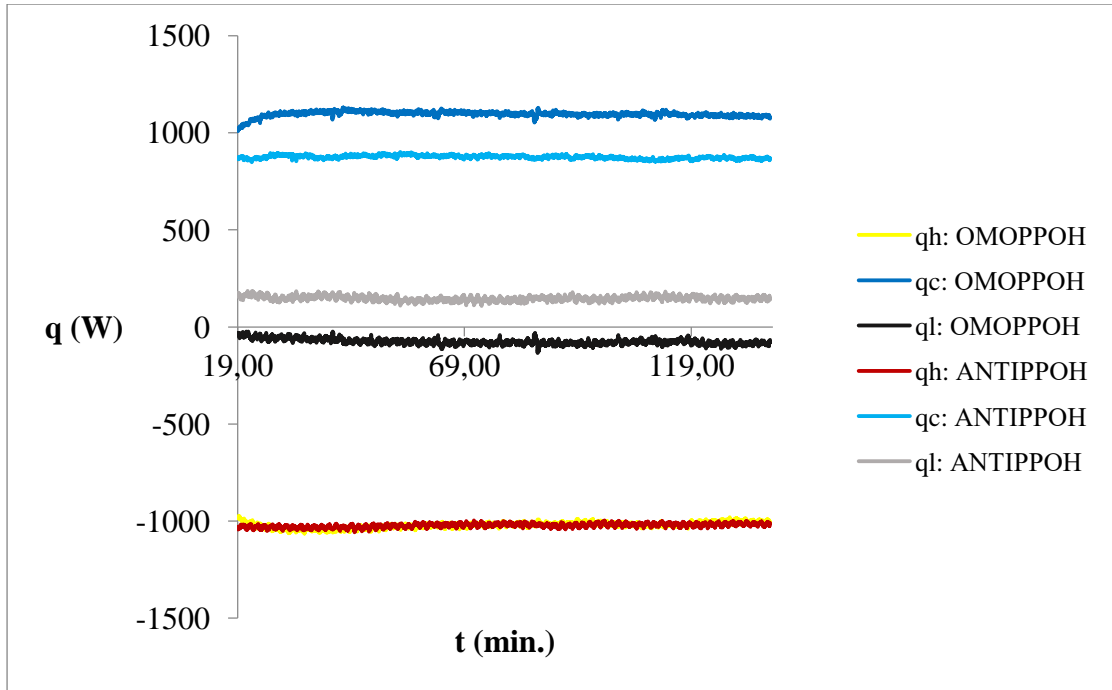
Σχήμα 7.4.1.5.3 | Διάγραμμα τοῦ ὀλικῆ συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότητος συναρτήσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.4.1.5.1 παρατηρεῖται χαμηλότερη θερμοκρασία τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ κατὰ τὴν ἔξοδο ἀπὸ τὸν ἐναλλάκτη στὴν ἀντιρροή σὲ σύγκριση μὲ τὴν ὁμορροή· ἐπ’ ἴσης, παρατηρεῖται χαμηλότερη θερμοκρασία νεροῦ στὴν ἀντιρροή σὲ σύγκριση μὲ τὴν ὁμορροή. Στὸ σχῆμα 7.4.1.5.2 παρατηροῦνται παρόμοιες μεταφορὲς θερμότητας (q_h , q_c) γιὰ τὸν ἀραιωμένο χυμὸ καὶ τὸ νερὸ καὶ παρόμοιες ἀπώλειες (q_l). Στὸ σχῆμα 7.4.1.5.3 παρατηρεῖται παρόμοιος ὀλικὸς συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητας σὲ ὁμορροή καὶ ἀντιρροή.

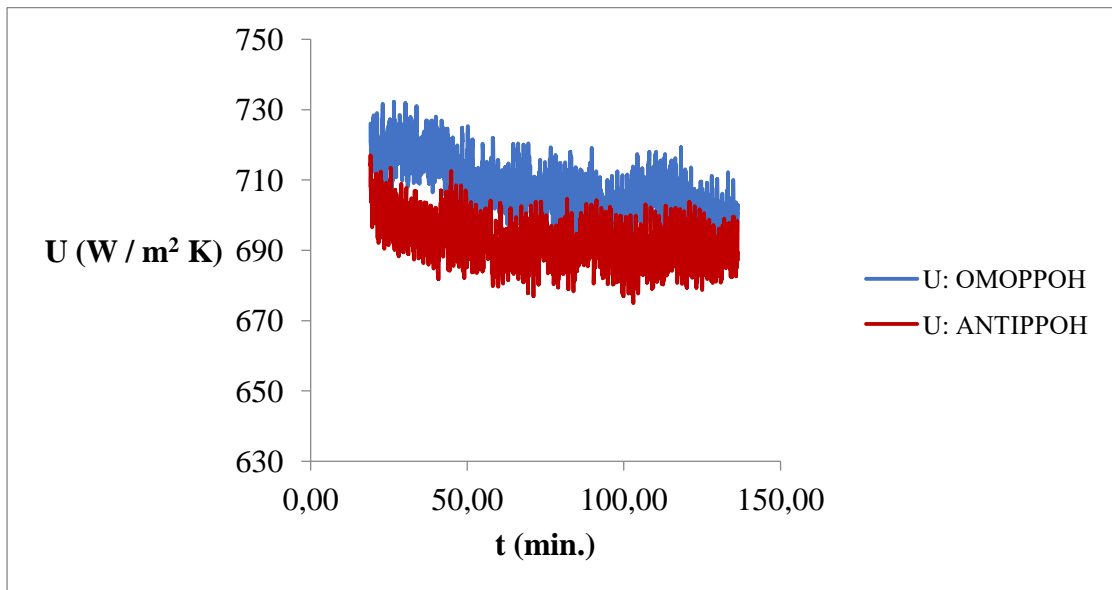
7.4.1.6 Σταθερή παροχή στα 2,1 L/min. και σταθερή θερμοκρασία στους 60°C



Σχήμα 7.4.1.6.1 | Διάγραμμα τών θερμοκρασιών συναρτήσει τοῦ χρόνου.



Σχήμα 7.4.1.6.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.

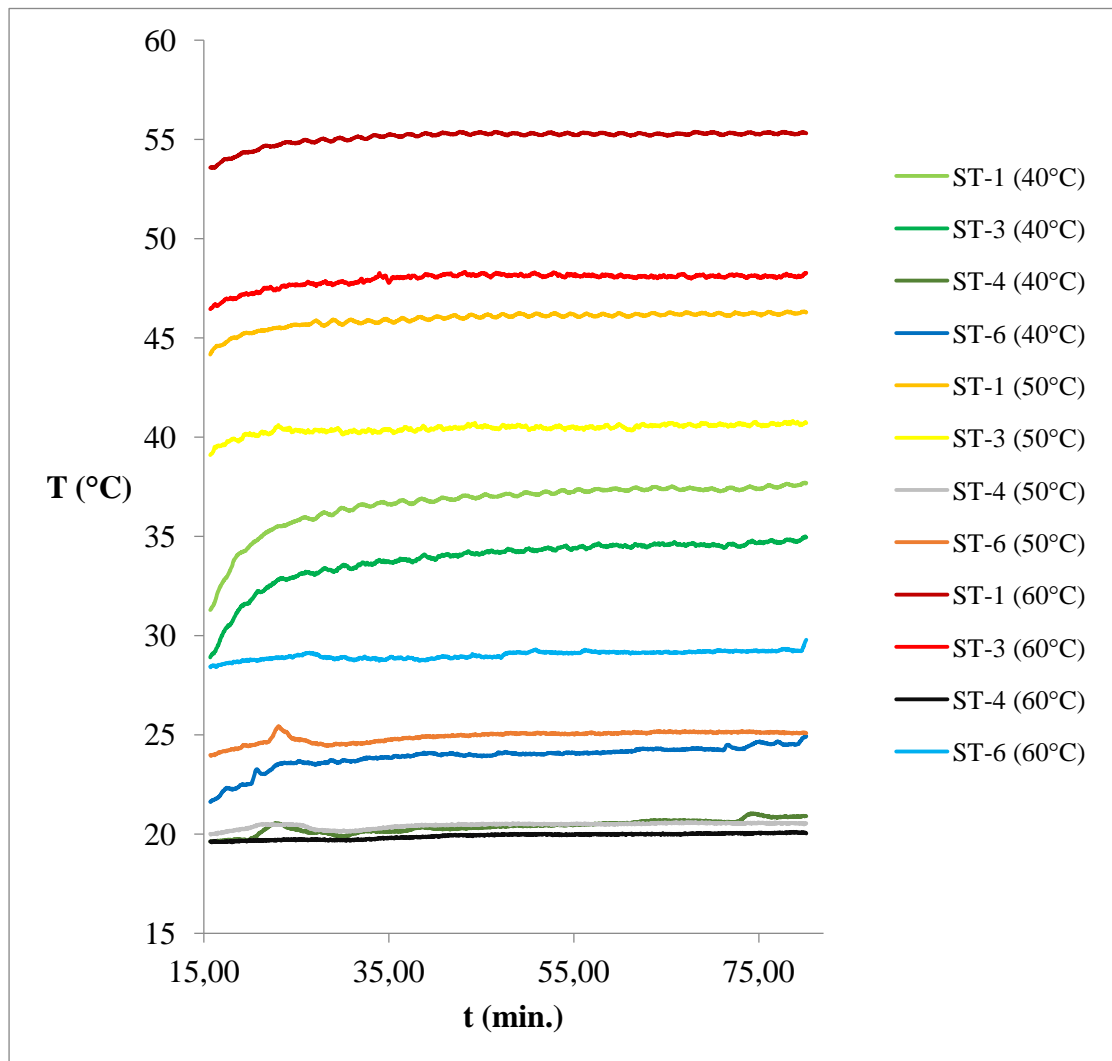


Σχήμα 7.4.1.6.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

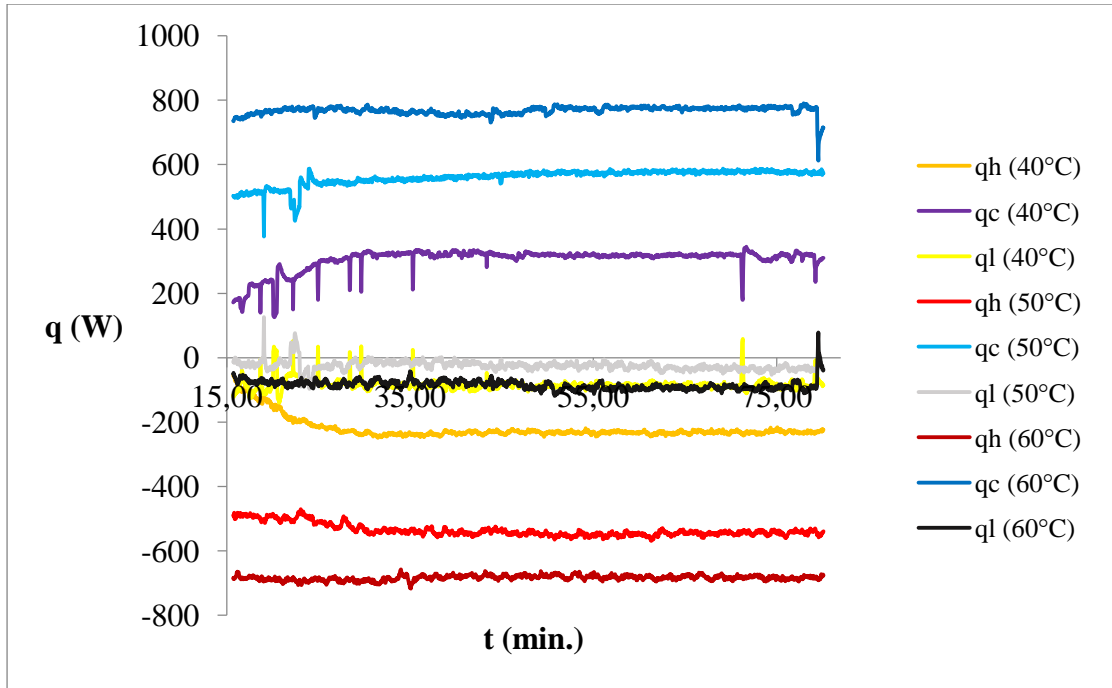
Στὸ σχῆμα 7.4.1.6.1 παρατηροῦνται παρόμοιες μεταβολές τῆς θερμοκρασίας σὲ ὄμορροή καὶ ἀντιρροή. Στὸ σχῆμα 7.4.1.6.2 παρατηροῦνται ὑψηλότερες ἀπώλειες (q_i) στὴν ἀντιρροή σὲ σύγκριση μὲ τὴν ὄμορροή· ἐπ' ἴσης, παρατηρεῖται ὑψηλότερη θερμότητα (q_c) γιὰ τὸ νερὸ στὴν ὄμορροή σὲ σύγκριση μὲ τὴν ἀντιρροή. Στὸ σχῆμα 7.4.1.6.3 παρατηρεῖται ὑψηλότερος συντελεστής μεταφοῦ θερμότητας στὴν ὄμορροή.

7.4.2 Σύγκριση διαφορετικῶν θερμοκρασιῶν ($T = 40^{\circ}\text{C}$, 50°C , 60°C)

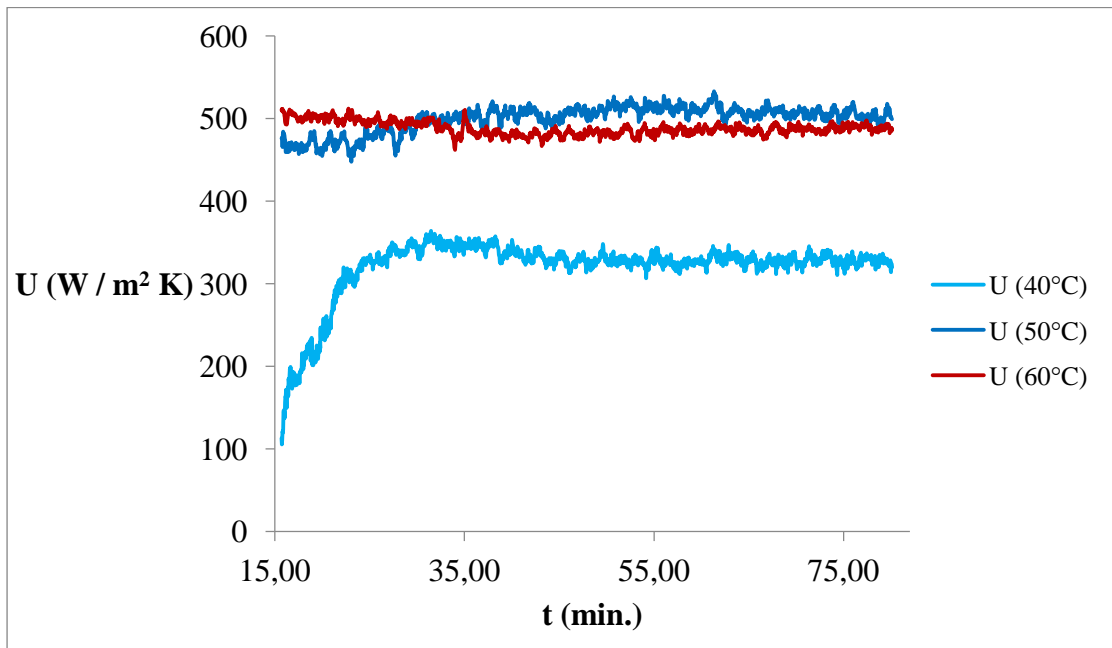
7.4.2.1 Σταθερή παροχή στα 1,4 L/min. σὲ συνθήκες ὁμορροῆς



Σχῆμα 7.4.2.1.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσει τοῦ χρόνου.



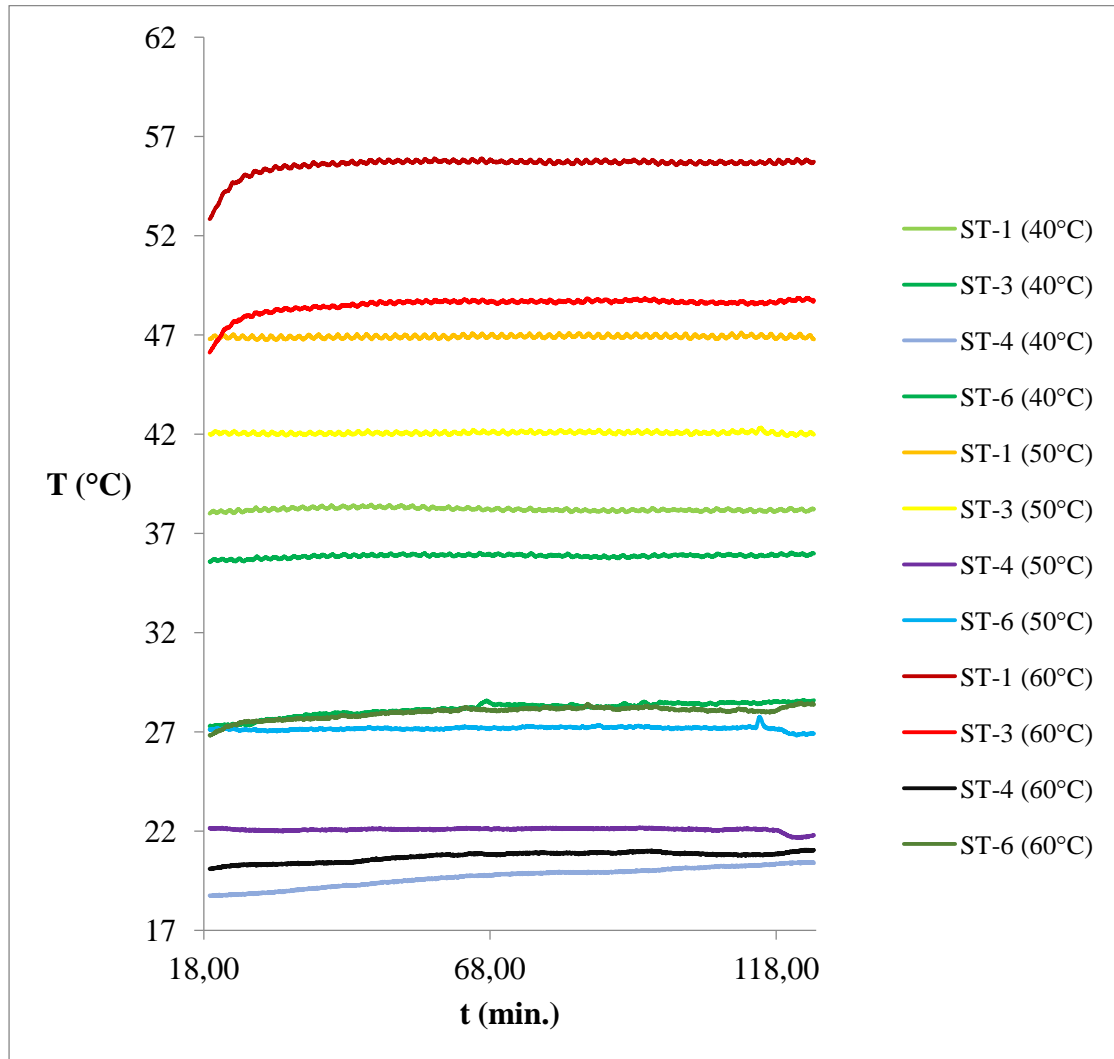
Σχήμα 7.4.2.1.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.



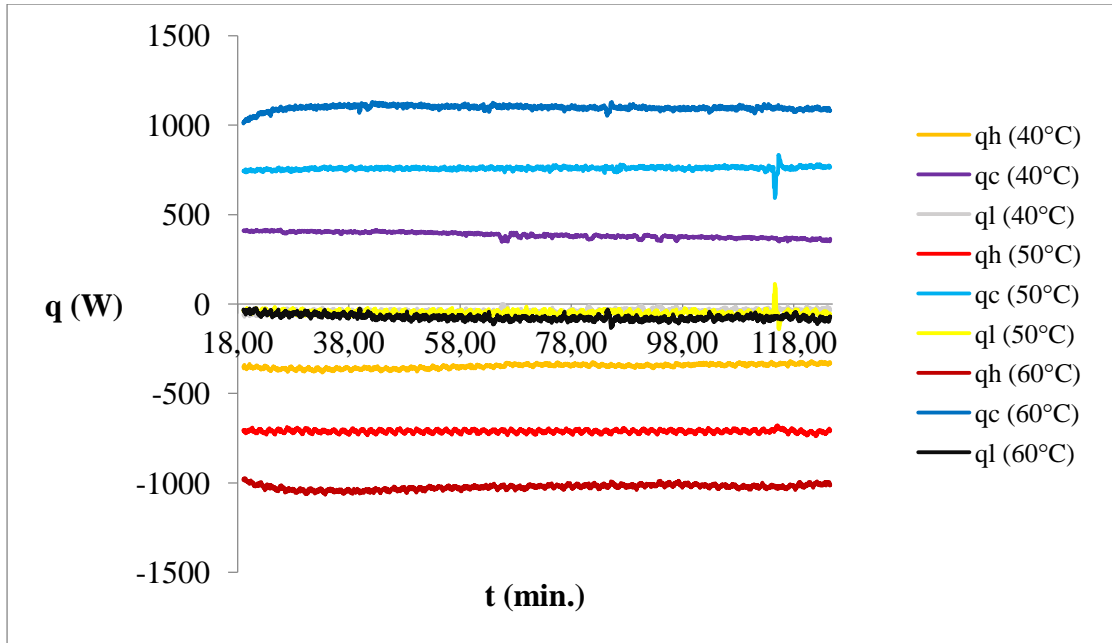
Σχήμα 7.4.2.1.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.4.2.1.1 παρατηρεῖται μεγαλῆτερη πτώση τῆς θερμοκρασίας τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ ($\Delta T = 7,1^{\circ}\text{C}$) στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία (60°C) καὶ χαμηλότερη πτώση ($\Delta T = 2,6^{\circ}\text{C}$) στὴν χαμηλότερη θερμοκρασία (40°C). Ἐπ' ἴσης, παρατηρεῖται μεγαλῆτερη αὔξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ νεροῦ ($\Delta T = 9,7^{\circ}\text{C}$) στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία (60°C) καὶ χαμηλότερη αὔξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ νεροῦ ($\Delta T = 4^{\circ}\text{C}$) στὴν χαμηλότερη θερμοκρασία (40°C). Στὸ σχῆμα 7.4.2.1.2 ἡ σειρά αὔξησης τῆς q_h γιὰ τὸν ἀραιωμένο χυμὸ εἶναι ἡ ἐξῆς: $q_{h40^{\circ}\text{C}} < q_{h50^{\circ}\text{C}} < q_{h60^{\circ}\text{C}}$. Ἡ σειρά αὔξησης τῆς q_c γιὰ τὸ νερὸ εἶναι ἡ ἐξῆς: $q_{h40^{\circ}\text{C}} < q_{h50^{\circ}\text{C}} < q_{h60^{\circ}\text{C}}$. Παρατηροῦνται παρόμοιες ἀπώλειες θερμότητας (q_l) γιὰ ὅλες τὶς θερμοκρασίες. Στὸ σχῆμα 7.4.2.1.3 γιὰ τοὺς ὀλικοὺς συντελεστῆς μεταφορᾶς θερμότητας ἰσχύει: $U_{50^{\circ}\text{C}} \approx U_{60^{\circ}\text{C}} > U_{40^{\circ}\text{C}}$.

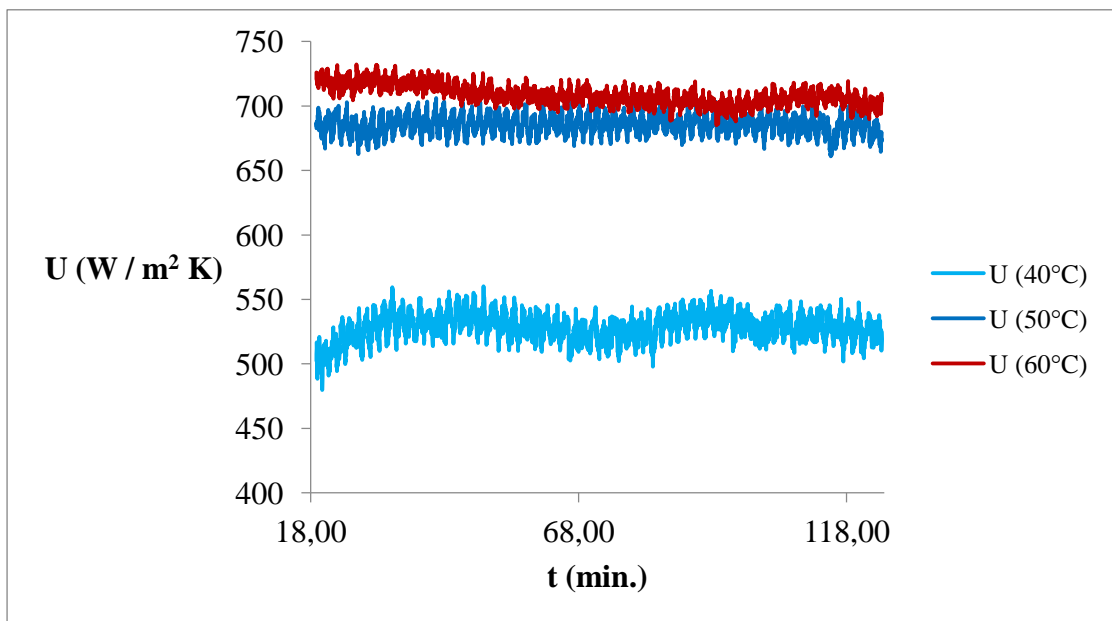
7.4.2.2 Σταθερή παροχή στα 2,1 L/min. σέ συνθήκες όμορροής



Σχήμα 7.4.2.2.1 | Διάγραμμα τών θερμοκρασιών συναρτήσει τοῦ χρόνου.



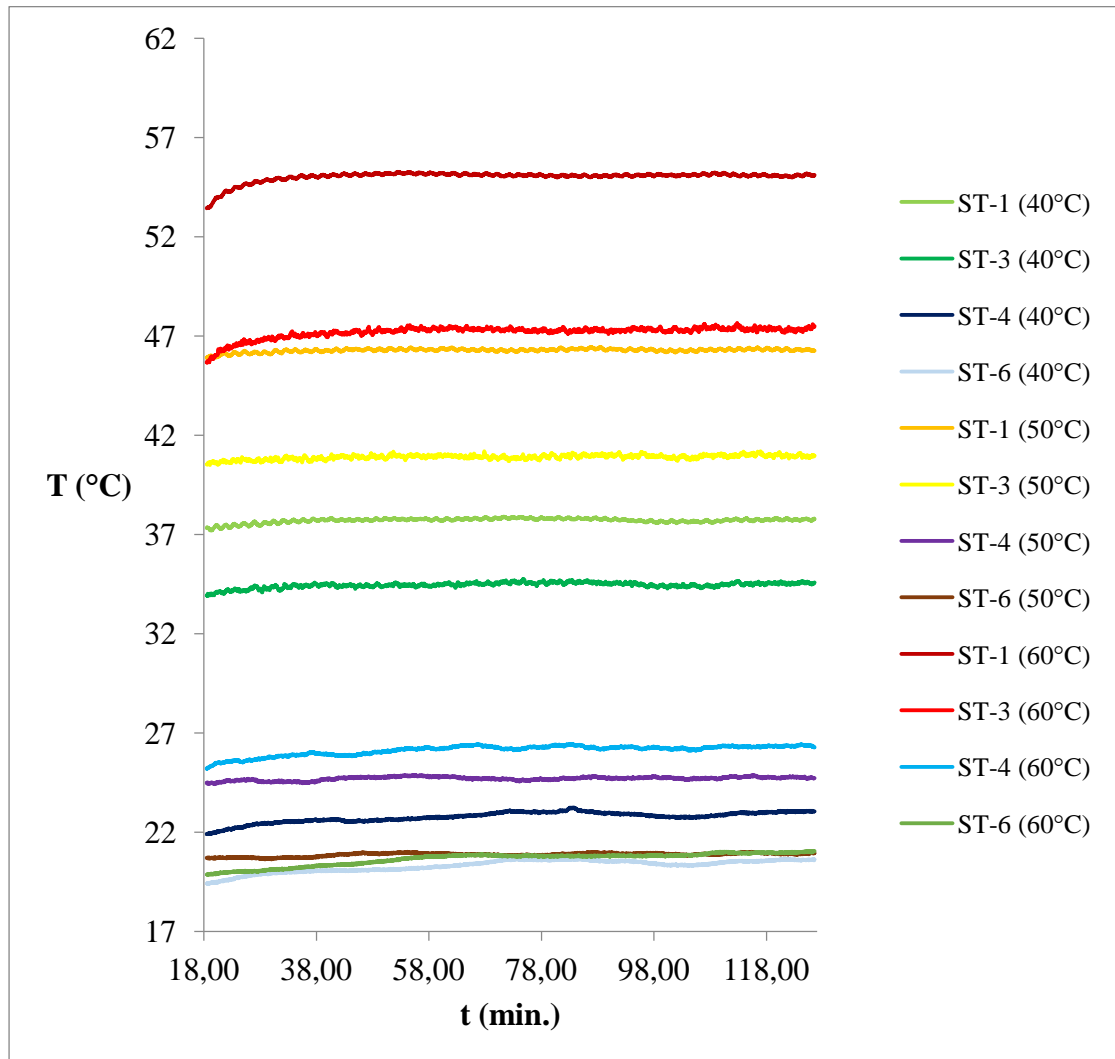
Σχῆμα 7.4.2.2.2 | Διάγραμμα τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ρέυστὸ τρόφιμο (q_h) καὶ τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ψυκτικὸ μέσο (q_c) καὶ τῶν θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτῆσει τοῦ χρόνου.



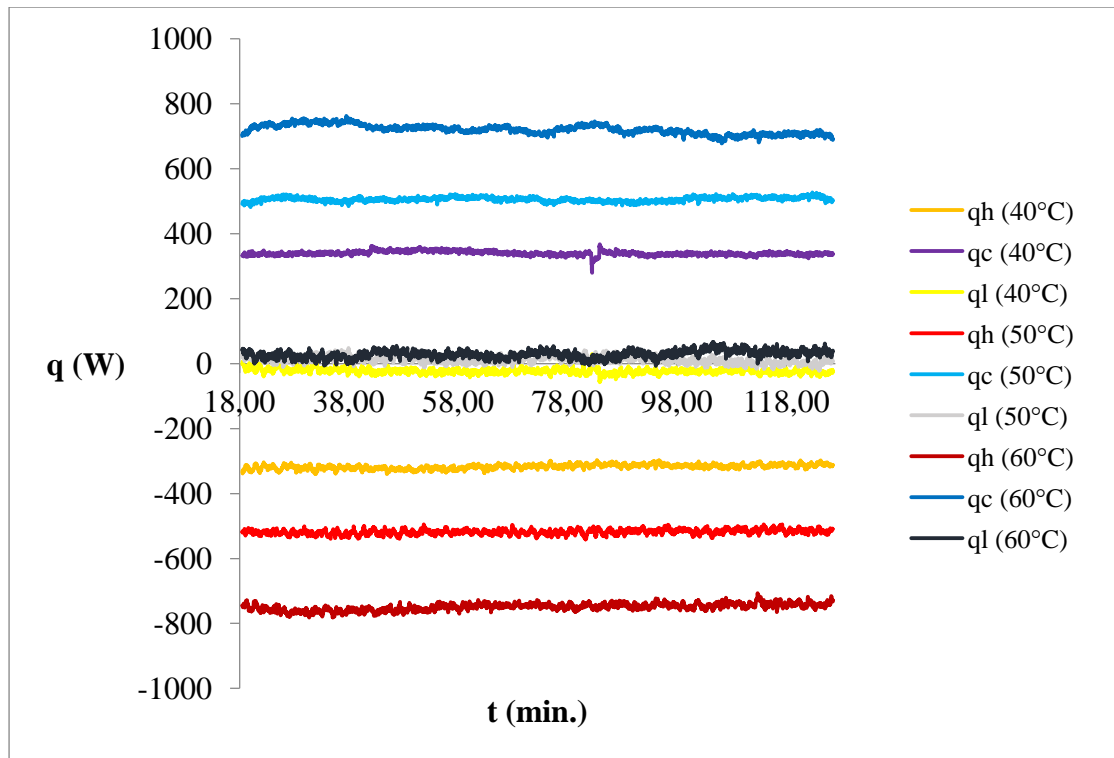
Σχῆμα 7.4.2.2.3 | Διάγραμμα τοῦ ὅλικου συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότητας συναρτῆσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.4.2.2.1 παρατηρεῖται μεγαλείτερη πτώση τῆς θερμοκρασίας τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ ($\Delta T = 6,9^{\circ}\text{C}$) στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία (60°C) καὶ χαμηλότερη πτώση ($\Delta T = 2,2^{\circ}\text{C}$) στὴν χαμηλότερη θερμοκρασία (40°C). Ἐπ' ἴσης, παρατηρεῖται μεγαλείτερη αὔξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ νεροῦ ($\Delta T = 8,1^{\circ}\text{C}$) στὴν χαμηλότερη θερμοκρασία (40°C) καὶ χαμηλότερη αὔξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ νεροῦ ($\Delta T = 5,2^{\circ}\text{C}$) στὴν μεσαία θερμοκρασία (50°C). Στὸ σχῆμα 7.4.2.2.2 ἡ σειρά αὔξησης τῆς q_h γιὰ τὸν ἀραιωμένο χυμὸ εἶναι ἡ ἐξῆς: $q_{h40^{\circ}\text{C}} < q_{h50^{\circ}\text{C}} < q_{h60^{\circ}\text{C}}$. Ἡ σειρά αὔξησης τῆς q_c γιὰ τὸ νερὸ εἶναι ἡ ἐξῆς: $q_{h40^{\circ}\text{C}} < q_{h50^{\circ}\text{C}} < q_{h60^{\circ}\text{C}}$. Παρατηροῦνται παρόμοιες ἀπώλειες θερμότητας (q_l) γιὰ ὅλες τὶς θερμοκρασίες. Στὸ σχῆμα 7.4.2.2.3 γιὰ τοὺς ὀλικοὺς συντελεστῆς μεταφοῆς θερμότητας ἰσχύει: $U_{60^{\circ}\text{C}} > U_{50^{\circ}\text{C}} > U_{40^{\circ}\text{C}}$.

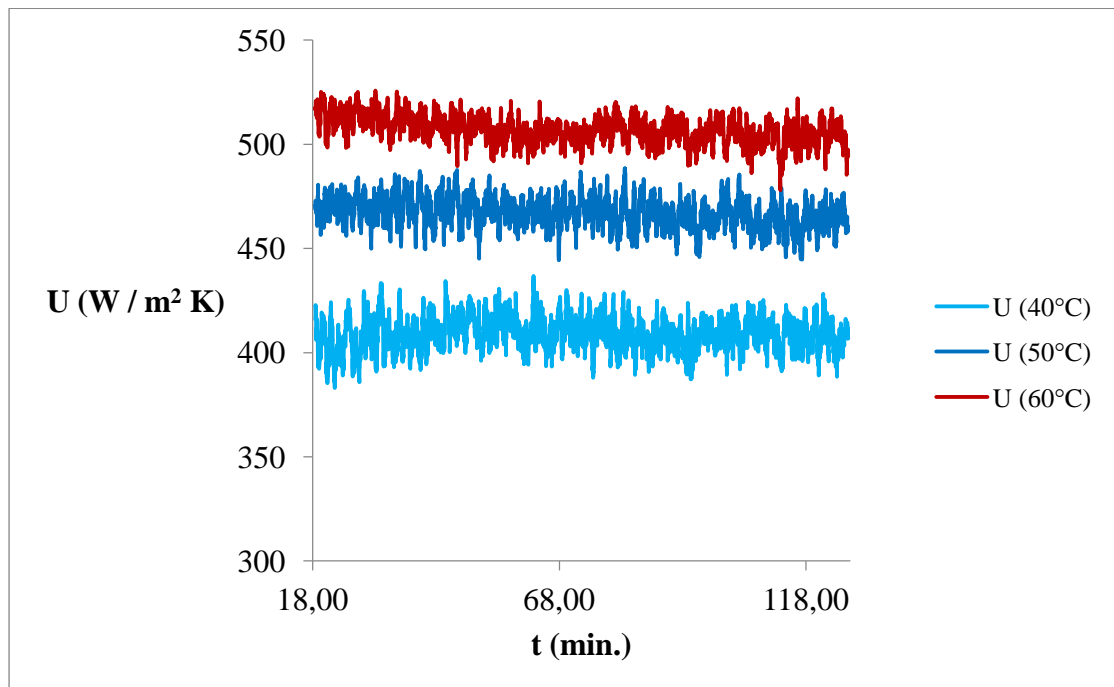
7.4.2.3 Σταθερή παροχή στα 1,4 L/min. σέ συνθήκες άντλησης



Σχήμα 7.4.2.3.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει τοῦ χρόνου.



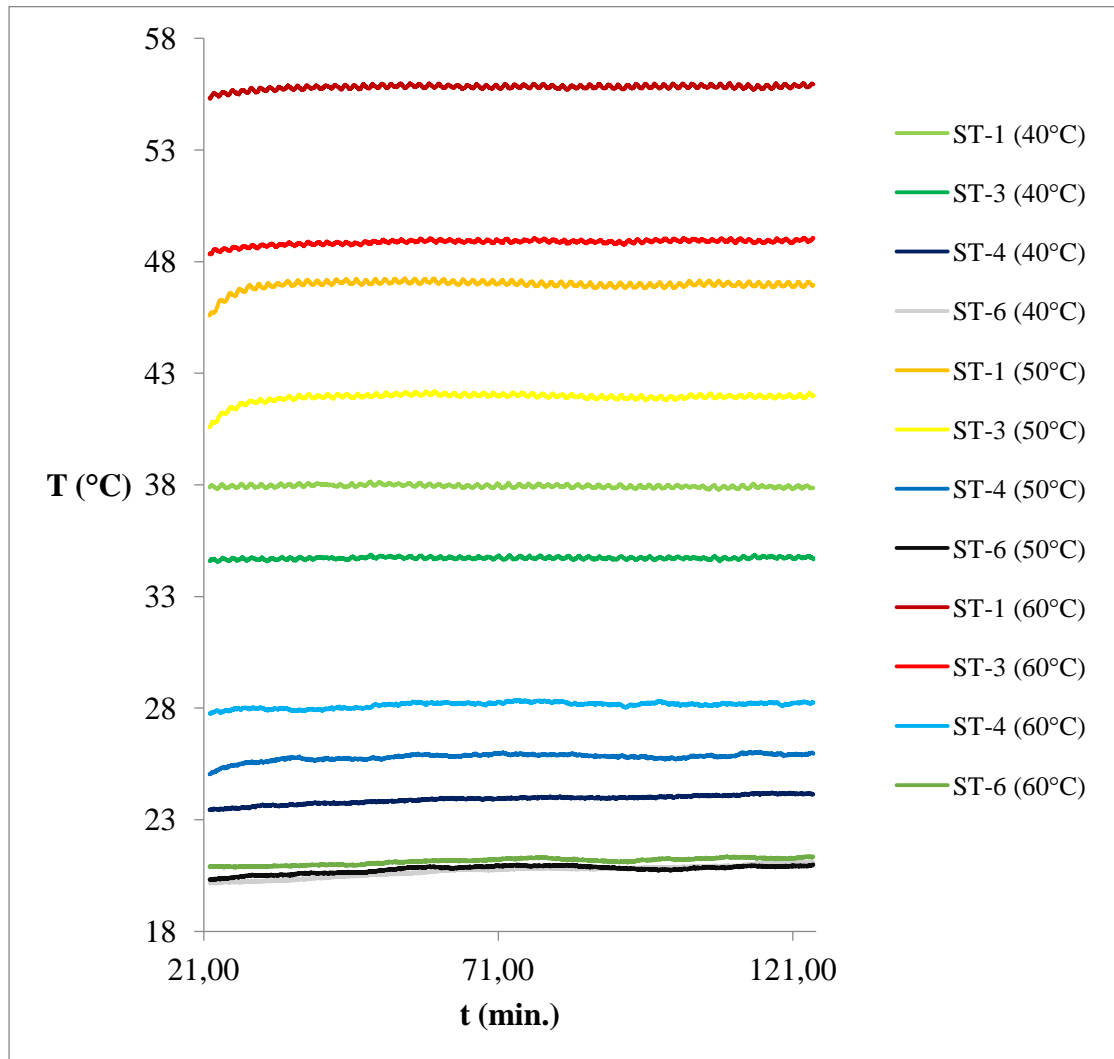
Σχήμα 7.4.2.3.2 | Διάγραμμα τής μεταβολής τής θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και τής μεταβολής τής θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και τών θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσει τοῦ χρόνου.



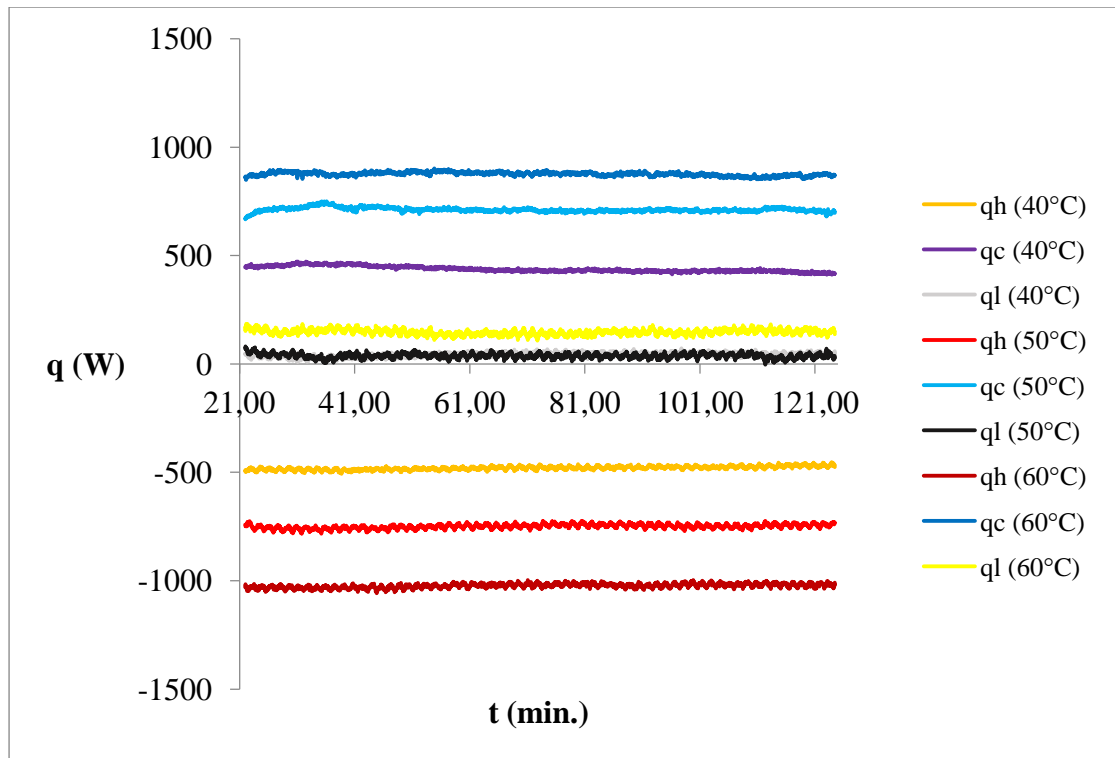
Σχήμα 7.4.2.3.3 | Διάγραμμα τοῦ ὀλικοῦ συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότητος συναρτήσει τοῦ χρόνου.

Στὸ σχῆμα 7.4.2.3.1 παρατηρεῖται μεγαλῆτερη πτώση τῆς θερμοκρασίας τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ ($\Delta T = 7,6^{\circ}\text{C}$) στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία (60°C) καὶ χαμηλότερη πτώση ($\Delta T = 3,2^{\circ}\text{C}$) στὴν χαμηλότερη θερμοκρασία (40°C). Ἐπ' ἴσης, παρατηρεῖται μεγαλῆτερη αὔξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ νεροῦ ($\Delta T = 5,3^{\circ}\text{C}$) στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία (60°C) καὶ χαμηλότερη αὔξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ νεροῦ ($\Delta T = 2,4^{\circ}\text{C}$) στὴν χαμηλότερη θερμοκρασία (40°C). Στὸ σχῆμα 7.4.2.3.2 ἡ σειρά αὔξησης τῆς q_h γιὰ τὸν ἀραιωμένο χυμὸ εἶναι ἡ ἐξῆς: $q_{h40^{\circ}\text{C}} < q_{h50^{\circ}\text{C}} < q_{h60^{\circ}\text{C}}$. Ἡ σειρά αὔξησης τῆς q_c γιὰ τὸ νερὸ εἶναι ἡ ἐξῆς: $q_{h40^{\circ}\text{C}} < q_{h50^{\circ}\text{C}} < q_{h60^{\circ}\text{C}}$. Παρατηροῦνται παρόμοιες ἀπώλειες θερμότητας (q_l) γιὰ ὅλες τὶς θερμοκρασίες. Στὸ σχῆμα 7.4.2.3.3 γιὰ τοὺς ὀλικοὺς συντελεστῆς μεταφορᾶς θερμότητας ἰσχύει: $U_{60^{\circ}\text{C}} > U_{50^{\circ}\text{C}} > U_{40^{\circ}\text{C}}$.

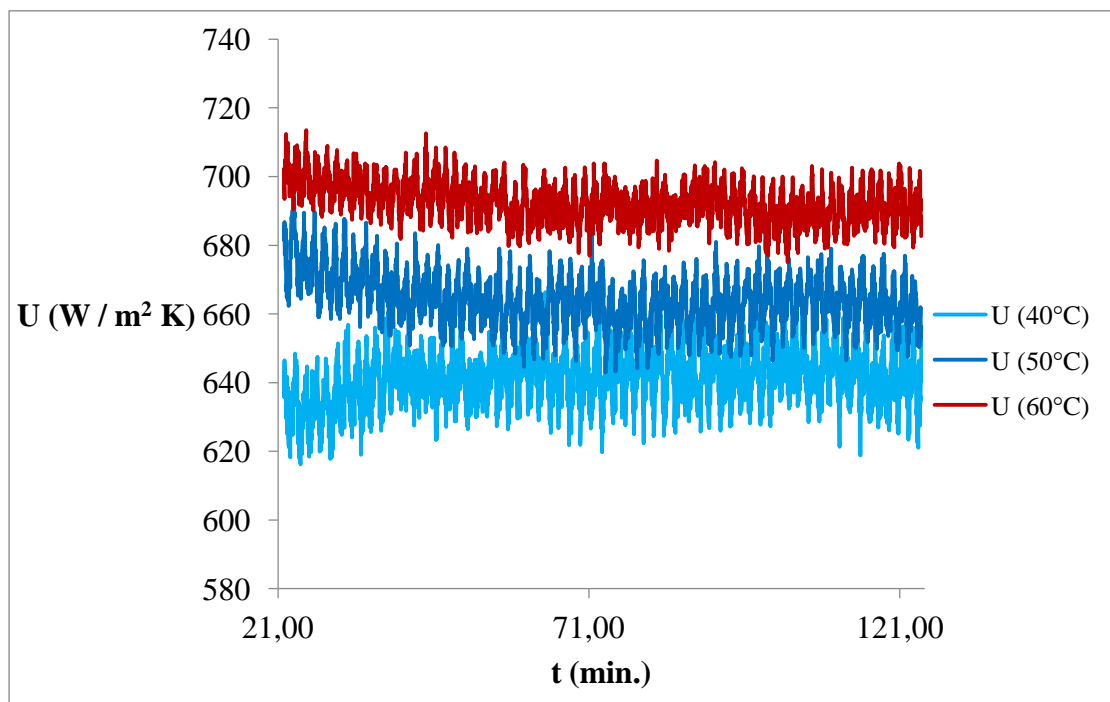
7.4.2.4 Σταθερή παροχή στα 2,1 L/min. σέ συνθήκες άντλησης



Σχήμα 7.4.2.4.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει τοῦ χρόνου.



Σχήμα 7.4.2.4.2 | Διάγραμμα τής μεταβολής τής θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και τής μεταβολής τής θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και τών θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσει τοῦ χρόνου.

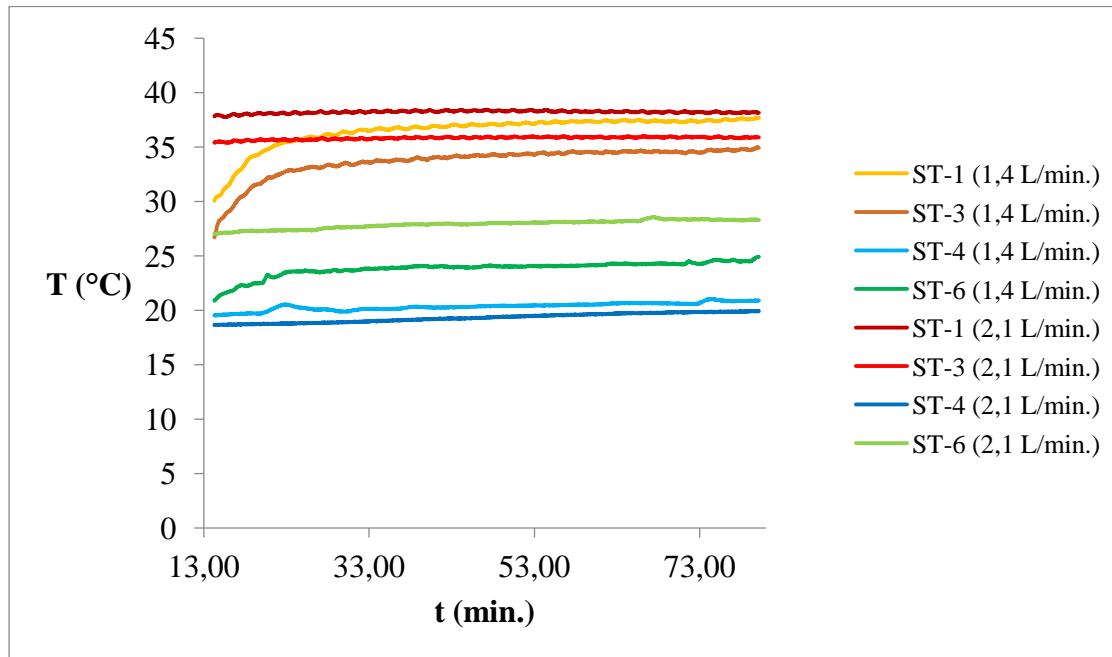


Σχήμα 7.4.2.4.3 | Διάγραμμα τοῦ ὀλικῆ συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότηας συναρτήσει τοῦ χρόνου.

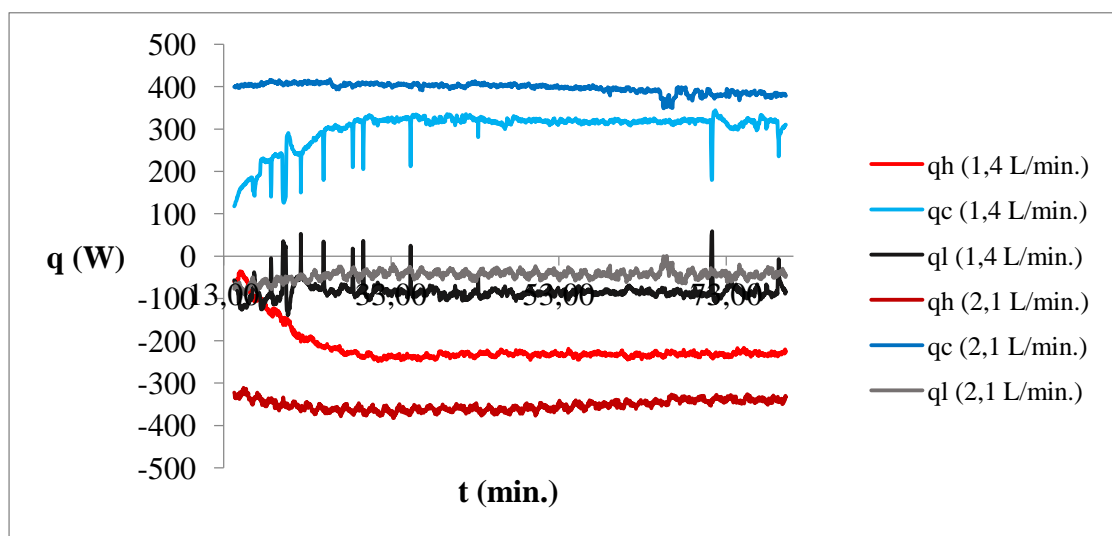
Στὸ σχῆμα 7.4.2.4.1 παρατηρεῖται μεγαλῆτερη πτώση τῆς θερμοκρασίας τοῦ ἀραιωμένου χυμοῦ ($\Delta T = 6,8^{\circ}\text{C}$) στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία (60°C) καὶ χαμηλότερη πτώση ($\Delta T = 3,2^{\circ}\text{C}$) στὴν χαμηλότερη θερμοκρασία (40°C). Ἐπ' ἴσης, παρατηρεῖται μεγαλῆτερη αὔξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ νεροῦ ($\Delta T = 7^{\circ}\text{C}$) στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία (60°C) καὶ χαμηλότερη αὔξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ νεροῦ ($\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$) στὴν χαμηλότερη θερμοκρασία (40°C). Στὸ σχῆμα 7.4.2.4.2 ἡ σειρά αὔξησης τῆς q_h γιὰ τὸν ἀραιωμένο χυμὸ εἶναι ἡ ἐξῆς: $q_{h40^{\circ}\text{C}} < q_{h50^{\circ}\text{C}} < q_{h60^{\circ}\text{C}}$. Ἡ σειρά αὔξησης τῆς q_c γιὰ τὸ νερὸ εἶναι ἡ ἐξῆς: $q_{h40^{\circ}\text{C}} < q_{h50^{\circ}\text{C}} < q_{h60^{\circ}\text{C}}$. Παρατηροῦνται παρόμοιες ἀπώλειες θερμότητας (q_l) στοὺς 40°C καὶ στοὺς 50°C καὶ ὑψηλότερες ἀπώλειες θερμότητας (q_l) στοὺς 60°C . Στὸ σχῆμα 7.4.2.4.3 γιὰ τοὺς ὀλικοὺς συντελεστὲς μεταφορᾶς θερμότητας ἰσχύει: $U_{60^{\circ}\text{C}} > U_{50^{\circ}\text{C}} > U_{40^{\circ}\text{C}}$.

7.4.3 Σύγκριση διαφορετικής παροχής ($q_v = 1,4 \text{ L/min.}$ και $2,1 \text{ L/min.}$)

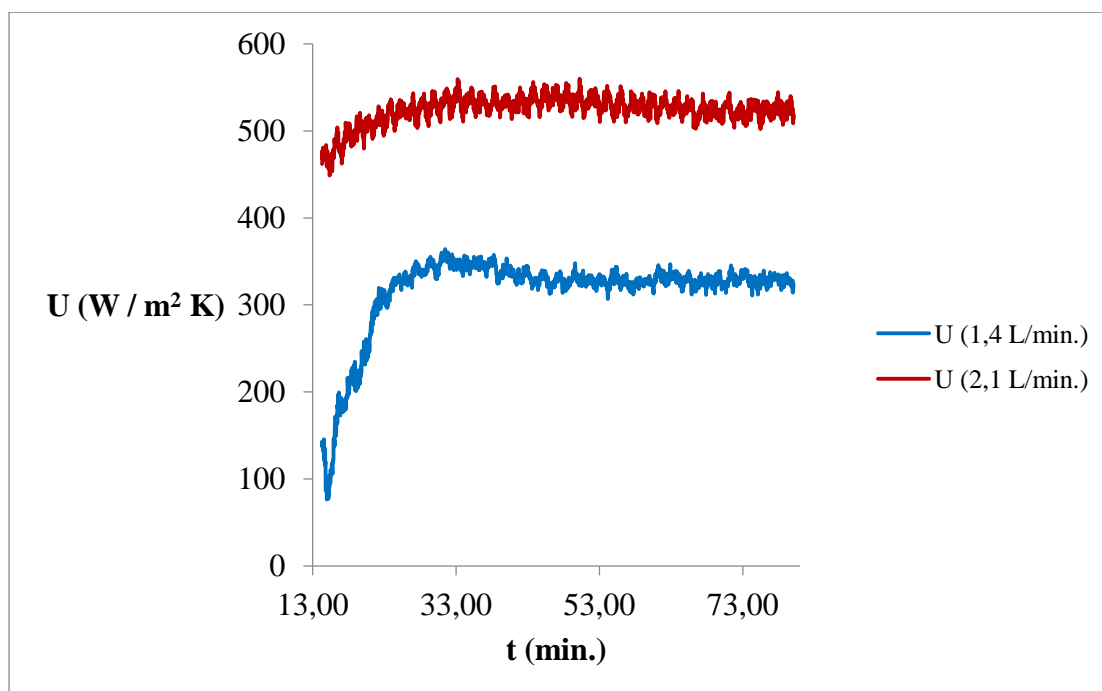
7.4.3.1 Σταθερή θερμοκρασία στούς 40°C σέ συνθήκες όμορροής



Σχῆμα 7.4.3.1.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσῃ τοῦ χρόνου.



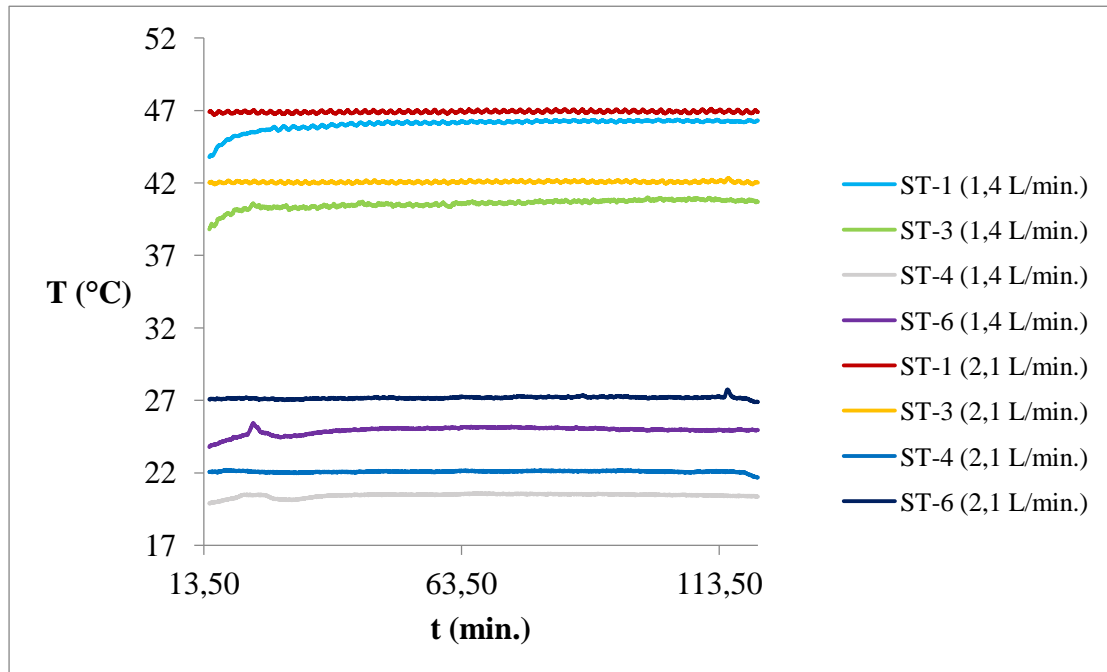
Σχῆμα 7.4.3.1.2 | Διάγραμμα τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) καὶ τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στο ψυκτικό μέσο (q_c) καὶ τῶν θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσῃ τοῦ χρόνου.



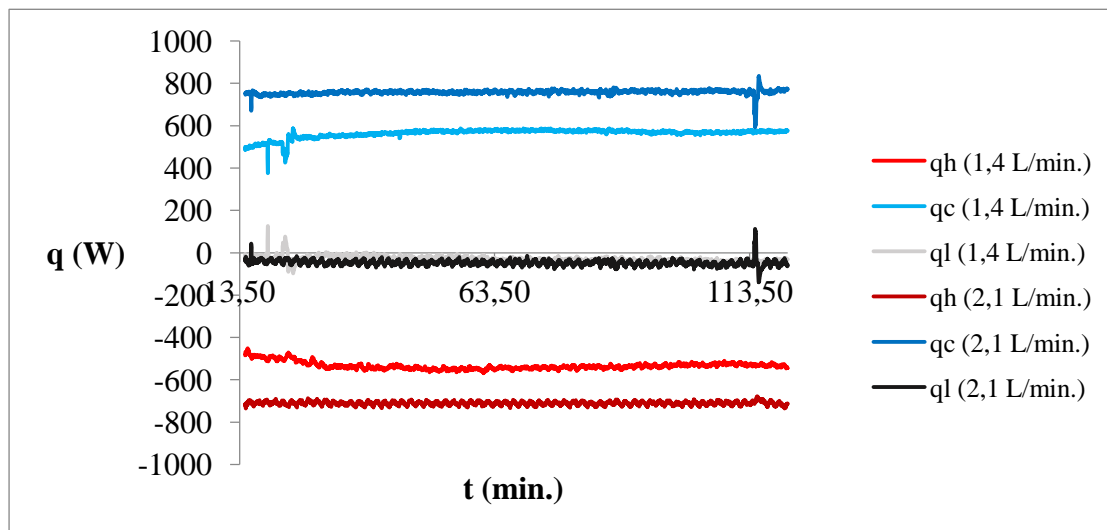
Σχήμα 7.4.3.1.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 7.4.3.1.1 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία εξόδου του άραιωμένου χυμού και του νερού είναι μεγαλύτερες στην ύψηλη παροχή ($T_{\text{εξ. άρ. χυμού}} = 35,9^{\circ}\text{C}$) ($T_{\text{εξ. νερού}} = 28,3^{\circ}\text{C}$) σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή ($T_{\text{εξ. άρ. χυμού}} = 34,9^{\circ}\text{C}$) ($T_{\text{εξ. νερού}} = 24,9^{\circ}\text{C}$). Στο σχήμα 7.4.3.1.2 παρατηρούνται παρόμοιες απώλειες (q_1) και για τις δύο παροχές. Έπ' ίσης, παρατηρούνται υψηλότερες q_h και q_c για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή. Στο σχήμα 7.4.3.1.3 παρατηρείται υψηλότερος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή.

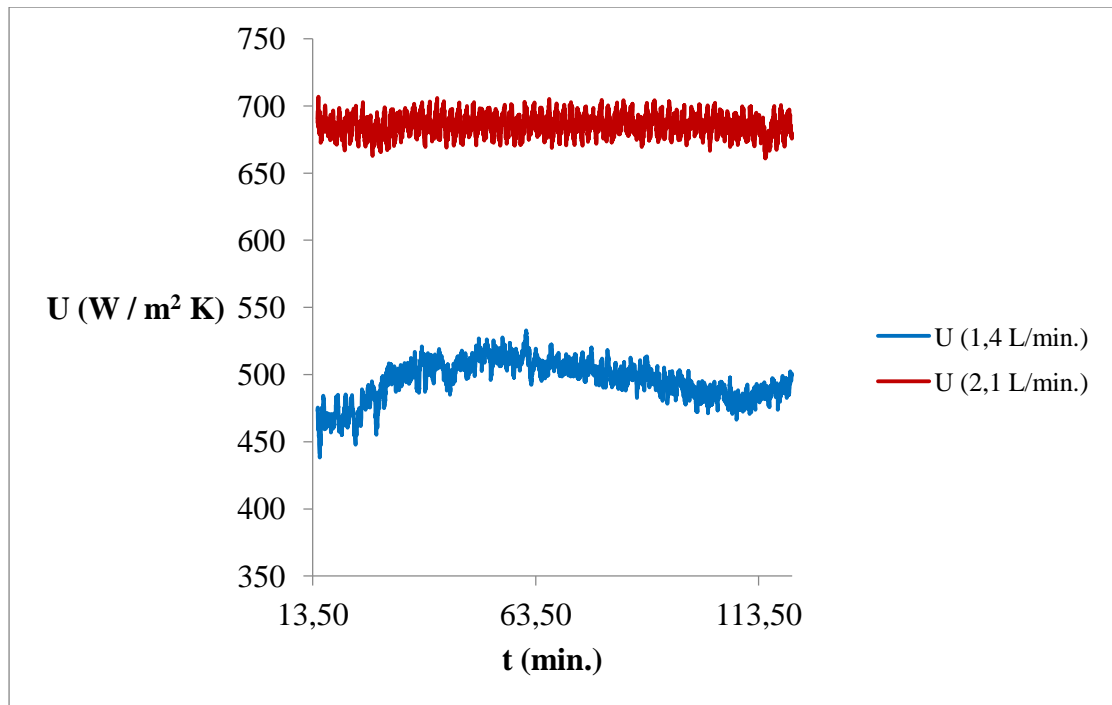
7.4.3.2 Σταθερή θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες όμορροής



Σχῆμα 7.4.3.2.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσει τοῦ χρόνου.



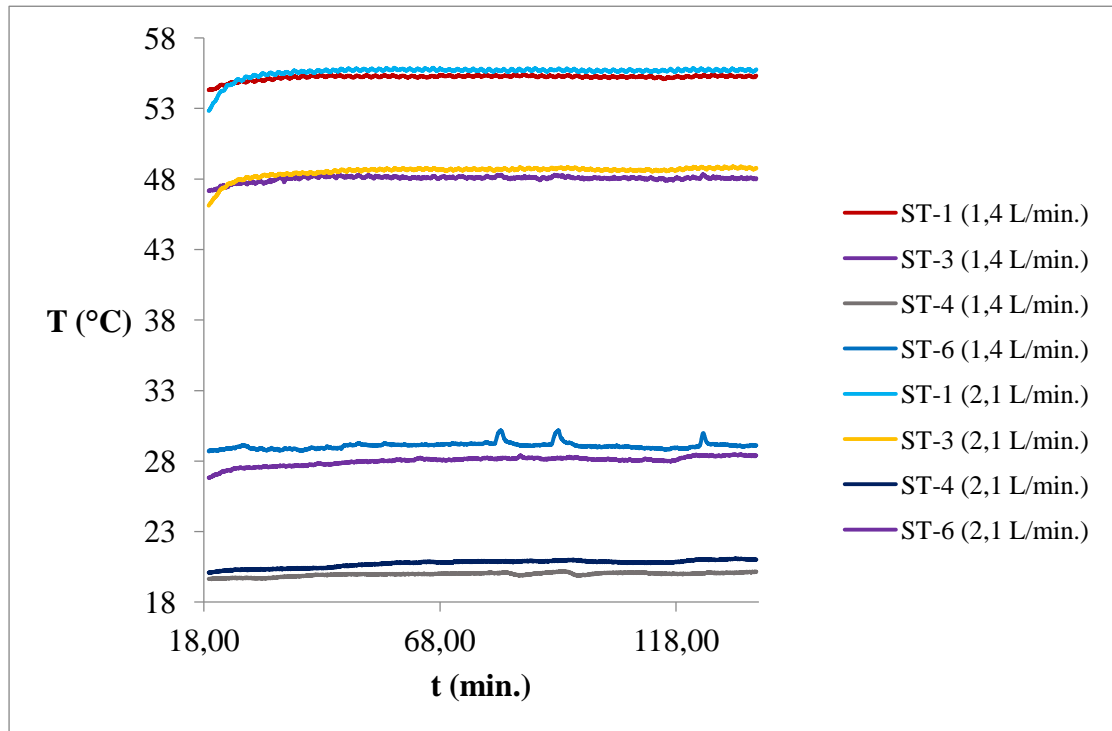
Σχῆμα 7.4.3.2.2 | Διάγραμμα τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἔνεργειας στὸ ρευστὸ τρόφιμο (q_h) καὶ τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἔνεργειας στὸ ψυκτικὸ μέσο (q_c) καὶ τῶν θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσει τοῦ χρόνου.



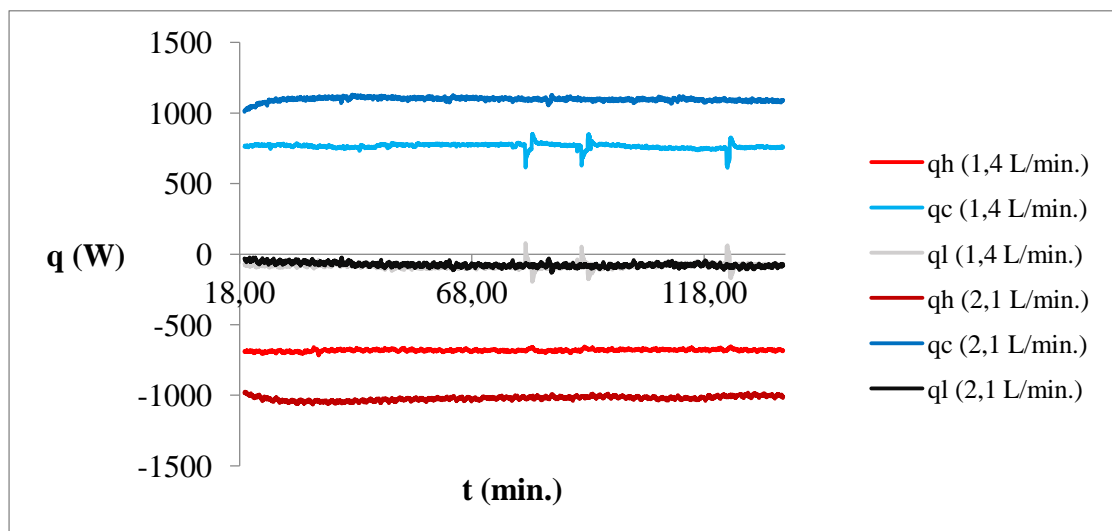
Σχήμα 7.4.3.2.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 7.4.3.2.1 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία εξόδου του άραιωμένου χυμού και του νερού είναι μεγαλύτερες στην ύψηλη παροχή ($T_{\text{εξ. άρ. χυμού}} = 42,1^{\circ}\text{C}$) ($T_{\text{εξ. νερού}} = 27,3^{\circ}\text{C}$) σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή ($T_{\text{εξ. άρ. χυμού}} = 40,7^{\circ}\text{C}$) ($T_{\text{εξ. νερού}} = 24,9^{\circ}\text{C}$). Στο σχήμα 7.4.3.2.2 παρατηρούνται παρόμοιες απώλειες (q_l) και για τις δύο παροχές. Έπ' ίσης, παρατηρούνται υψηλότερες q_h και q_c για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή. Στο σχήμα 7.4.3.2.3 παρατηρείται υψηλότερος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή.

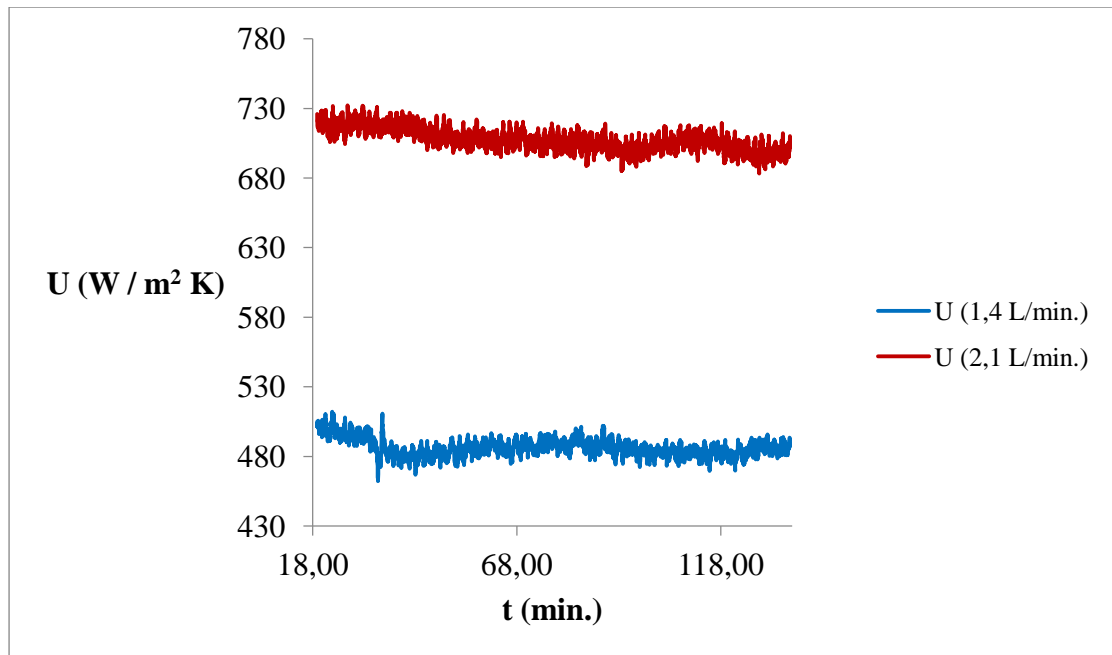
7.4.3.3 Σταθερή θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες όμορροής



Σχήμα 7.4.3.3.1 | Διάγραμμα τῶν θερμοκρασιῶν συναρτήσει τοῦ χρόνου.



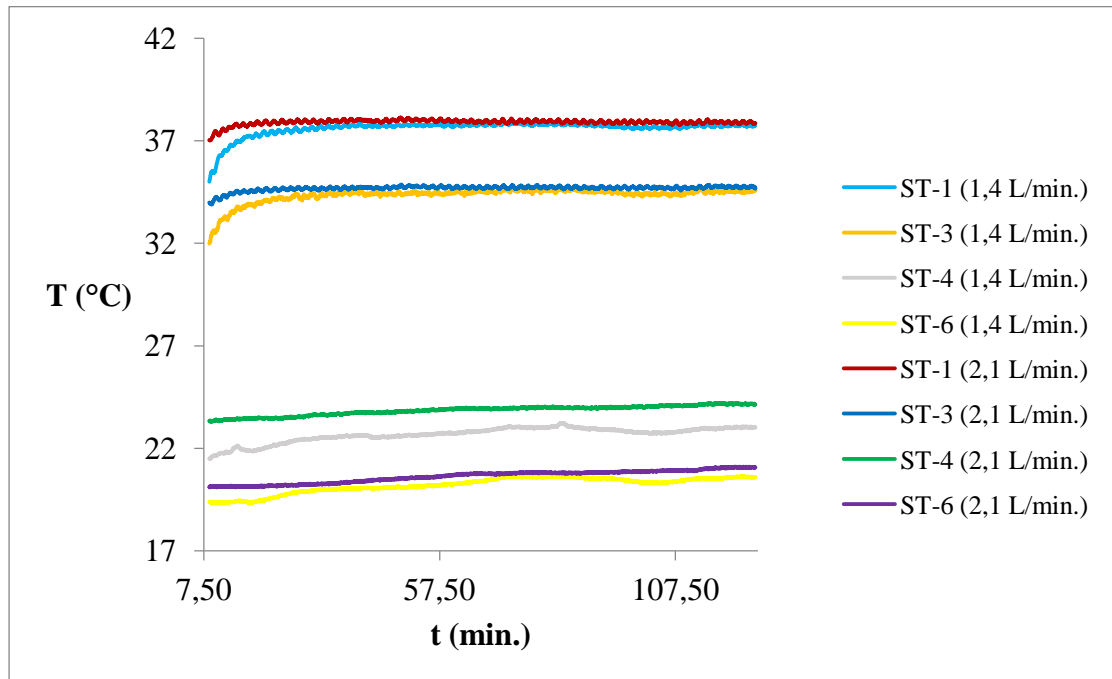
Σχήμα 7.4.3.3.2 | Διάγραμμα τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ρέυστὸ τρόφιμο (q_h) καὶ τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ψυκτικὸ μέσο (q_c) καὶ τῶν θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσει τοῦ χρόνου.



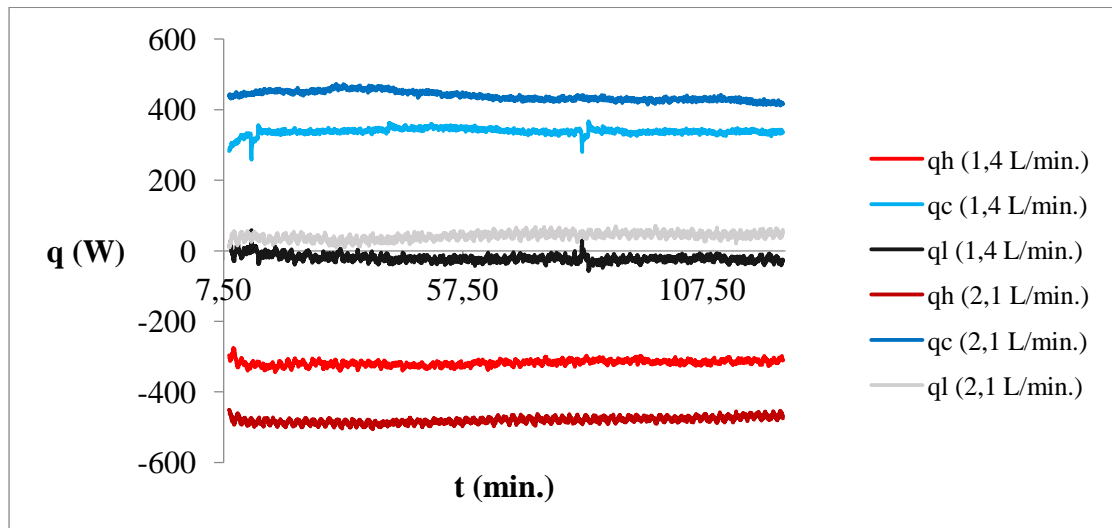
Σχήμα 7.4.3.3.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 7.4.3.3.1 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία εξόδου του αραιωμένου χυμού είναι μεγαλύτερη στην ύψηλη παροχή ($T_{\text{έξ. άρ. χυμού}} = 48,7^{\circ}\text{C}$) σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή ($T_{\text{έξ. άρ. χυμού}} = 47,9^{\circ}\text{C}$). Η θερμοκρασία εξόδου του νερού στην ύψηλη παροχή ($T_{\text{έξ. νερού}} = 28,3^{\circ}\text{C}$) είναι μικρότερη σε σύγκριση με την θερμοκρασία εξόδου του νερού στην χαμηλή παροχή ($T_{\text{έξ. νερού}} = 29,1^{\circ}\text{C}$). Στο σχήμα 7.4.3.3.2 παρατηρούνται παρόμοιες απώλειες (q_l) και για τις δύο παροχές. Έπ' ίσης, παρατηρούνται υψηλότερες q_h και q_c για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή. Στο σχήμα 7.4.3.3.3 παρατηρείται υψηλότερος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή.

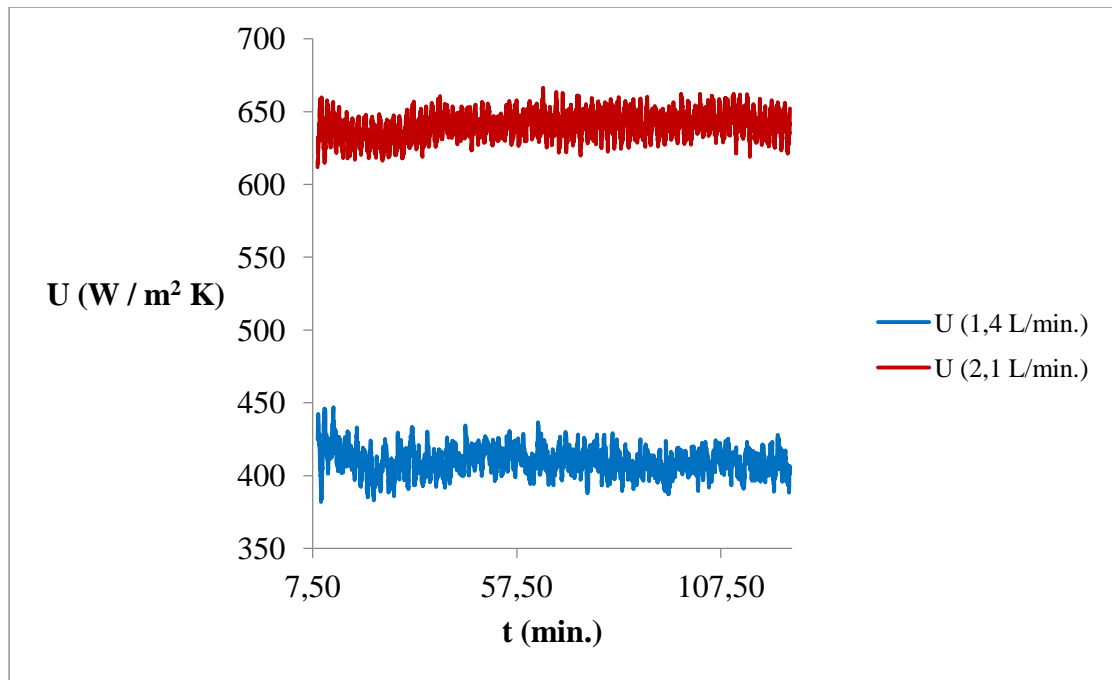
7.4.3.4 Σταθερή θερμοκρασία στους 40°C σε συνθήκες άντιρροής



Σχήμα 7.4.3.4.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου.



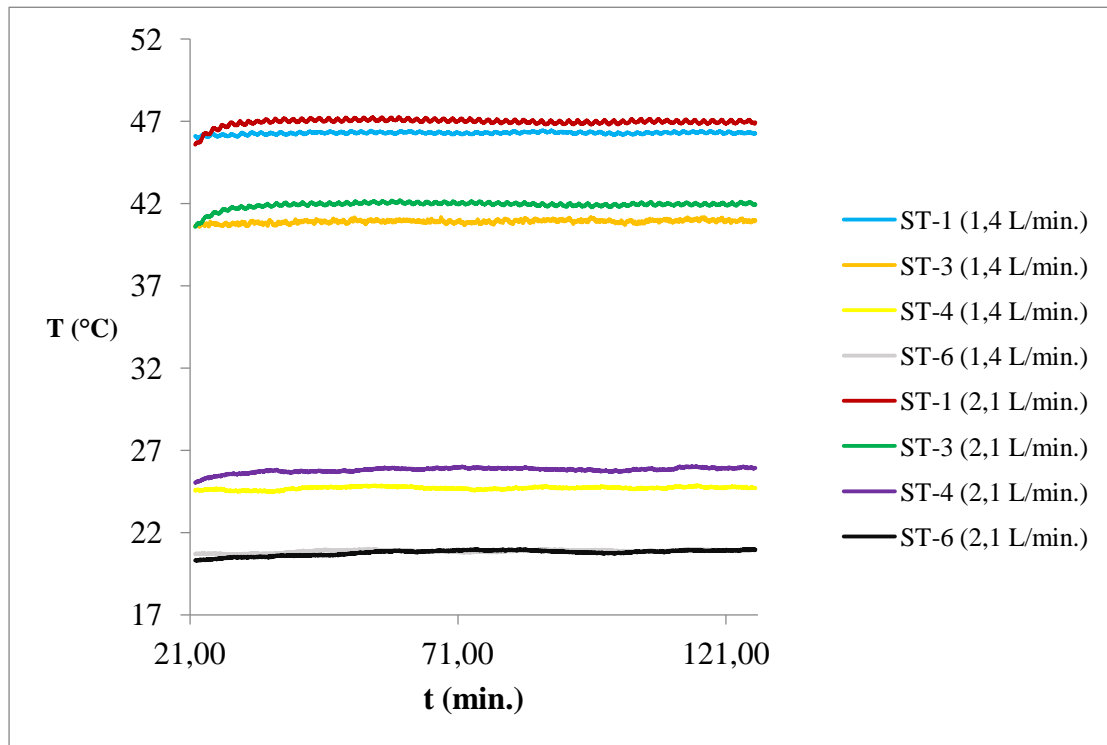
Σχήμα 7.4.3.4.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.



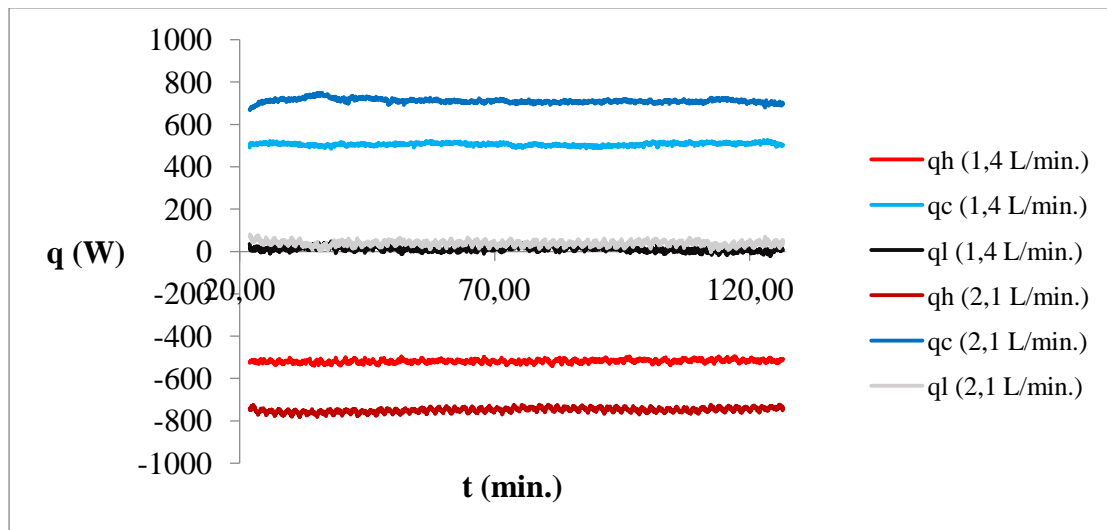
Σχήμα 7.4.3.4.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 7.4.3.4.1 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία εξόδου του άραιωμένου χυμού και του νερού είναι μεγαλύτερες στην ύψηλη παροχή ($T_{\text{εξ. άρ. χυμού}} = 34,7^{\circ}\text{C}$) ($T_{\text{εξ. νερού}} = 24,2^{\circ}\text{C}$) σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή ($T_{\text{εξ. άρ. χυμού}} = 34,5^{\circ}\text{C}$) ($T_{\text{εξ. νερού}} = 23^{\circ}\text{C}$). Στο σχήμα 7.4.3.4.2 παρατηρούνται παρόμοιες απώλειες (q_i) και για τις δύο παροχές. Έπ' ίσης, παρατηρούνται υψηλότερες q_h και q_c για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή. Στο σχήμα 7.4.3.4.3 παρατηρείται υψηλότερος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή.

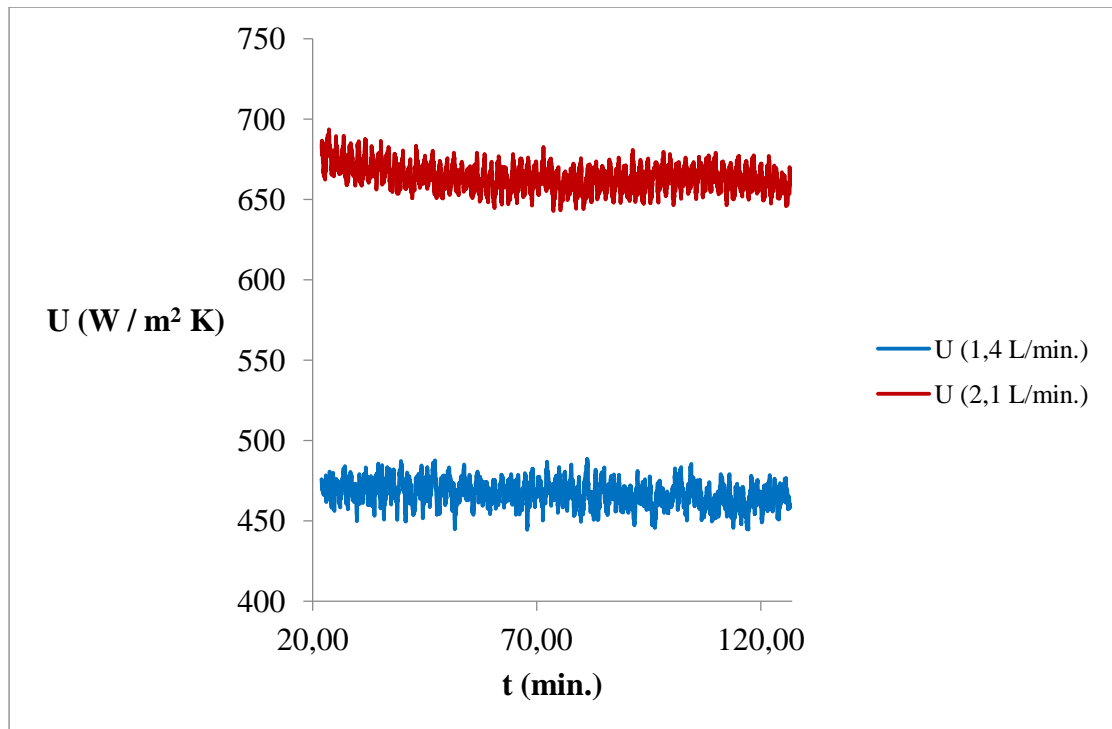
7.4.3.5 Σταθερή θερμοκρασία στους 50°C σε συνθήκες άντλησης



Σχήμα 7.4.3.5.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει του χρόνου.



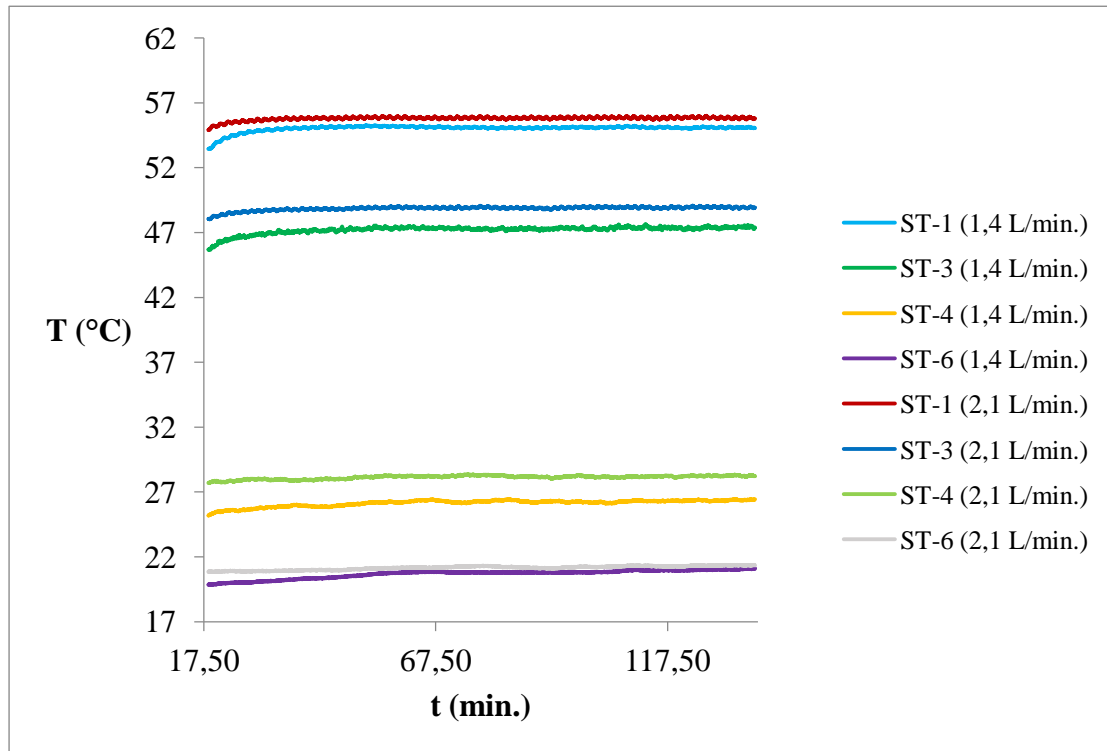
Σχήμα 7.4.3.5.2 | Διάγραμμα της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ρευστό τρόφιμο (q_h) και της μεταβολής της θερμικής ενέργειας στο ψυκτικό μέσο (q_c) και των θερμικών απωλειών (q_l) συναρτήσει του χρόνου.



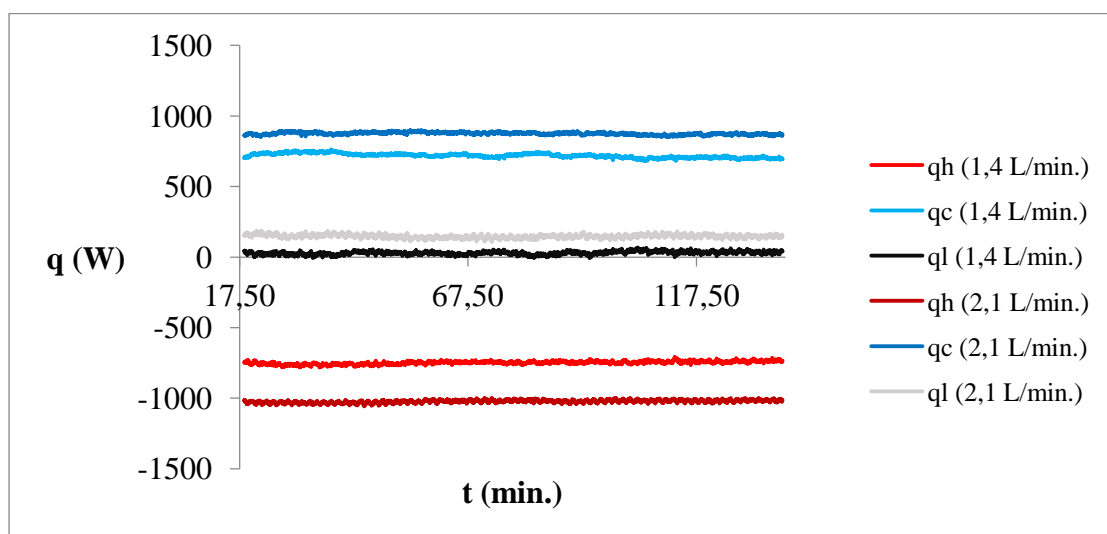
Σχήμα 7.4.3.5.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 7.4.3.5.1 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία εξόδου του άραιωμένου χυμού και του νερού είναι μεγαλύτερες στην ύψηλη παροχή ($T_{\text{εξ. άρ. χυμού}} = 42^{\circ}\text{C}$) ($T_{\text{εξ. νερού}} = 25,9^{\circ}\text{C}$) σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή ($T_{\text{εξ. άρ. χυμού}} = 40,9^{\circ}\text{C}$) ($T_{\text{εξ. νερού}} = 24,7^{\circ}\text{C}$). Στο σχήμα 7.4.3.5.2 παρατηρούνται παρόμοιες απώλειες (q_l) και για τις δύο παροχές. Έπ' ίσης, παρατηρούνται υψηλότερες q_h και q_c για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή. Στο σχήμα 7.4.3.5.3 παρατηρείται υψηλότερος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή.

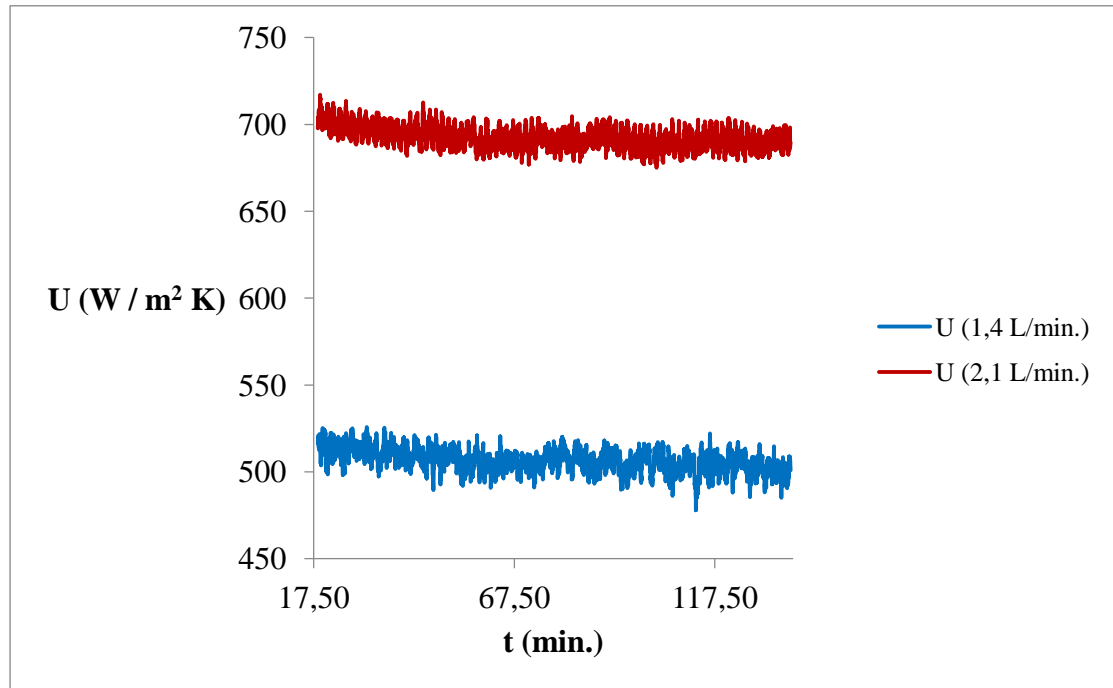
7.4.3.6 Σταθερή θερμοκρασία στους 60°C σε συνθήκες άντιρροής



Σχήμα 7.4.3.6.1 | Διάγραμμα των θερμοκρασιών συναρτήσει τοῦ χρόνου.



Σχήμα 7.4.3.6.2 | Διάγραμμα τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ρέυστὸ τρόφιμο (q_h) καὶ τῆς μεταβολῆς τῆς θερμικῆς ἐνεργείας στὸ ψυκτικὸ μέσο (q_c) καὶ τῶν θερμικῶν ἀπωλειῶν (q_l) συναρτήσει τοῦ χρόνου.



Σχήμα 7.4.3.6.3 | Διάγραμμα του όλικου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα 7.4.3.6.1 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία εξόδου του αραιωμένου χυμού και του νερού είναι μεγαλύτερες στην ύψηλη παροχή ($T_{\text{εξ. αρ. χυμού}} = 48,9^{\circ}\text{C}$) ($T_{\text{εξ. νερού}} = 28,2^{\circ}\text{C}$) σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή ($T_{\text{εξ. αρ. χυμού}} = 47,3^{\circ}\text{C}$) ($T_{\text{εξ. νερού}} = 26,4^{\circ}\text{C}$). Στο σχήμα 7.4.3.6.2 παρατηρούνται παρόμοιες απώλειες (q_l) και για τις δύο παροχές. Έπ' ίσης, παρατηρούνται υψηλότερες q_h και q_c για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή. Στο σχήμα 7.4.3.6.3 παρατηρείται υψηλότερος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για την ύψηλη παροχή σε σύγκριση με την χαμηλή παροχή.

Παρόμοιες μελέτες

Αντικείμενο μιᾶς διπλωματικῆς ἐργασίας ἦταν ὁ ἔλεγχος ἀπόδοσης ἐνὸς πλακοειδοῦς ἐναλλάκτη θερμότητας. Ἐνα συμπέρασμα ποὺ προέκυψε ἦταν ἡ ἐπαλήθευση τῆς θεωρητικῆς ἀπόδοσης μὲ τὴν πειραματικὴ. Ἡ βάση τῆς σύγκρισης γιὰ ἓνα καινούργιο καὶ ἓνα συντηρημένο ἐναλλάκτη καθιστᾷ τὸν ἔλεγχο τῆς ἀπόδοσης περισσότερο ἀκριβῆ. Ὡστόσο, παρατηρήθηκε μία μικρὴ ἀπόκλιση στὶς τιμὲς τῆς θεωρητικῆς ἀπόδοσης (65%) μὲ τὴν πραγματικὴ (66%) μὲ τὴν τελευταία νὰ ἐμφανίζεται κατὰ 1% αὐξημένη ἀπὸ αὐτὴν ποὺ προέβλεψε ὁ κατασκευαστὴς καὶ πιθανώτατα στὸν σχεδιασμὸ τοῦ ἐναλλάκτη συμπεριλήφθηκαν περιθώρια γιὰ ἐπικαθίσεις μὲ ἀποτέλεσμα ἓναν ἐλαφρῶς ὑπερδιαστασιοποιημένο ἐναλλάκτη. Ἐνα ἄλλο συμπέρασμα ἐντοπίσθηκε μὲ τὴν σύγκριση τῶν τιμῶν τῆς θεωρητικῆς καὶ τῆς πειραματικῆς ἀπόδοσης πρὶν τὴν συντήρηση τοῦ ἐναλλάκτη. Ἡ ἀπόδοση ἀναμενόταν ἴση μὲ 65% καὶ βρέθηκε στὸ 60% περίπου· πρακτικῶς αὐτὸ σημαίνει ὅτι: ἐνῶ ἀναμενόταν μία μείωση τοῦ θερμοκρασιακοῦ περιεχομένου τοῦ λαδίου κατὰ 19,7°C, ἡ πραγματικὴ μείωση δὲν κατάφερε νὰ ξεπεράσῃ τοὺς 18°C. Ἐν τούτοις, ἓνα γενικὸ συμπέρασμα ἦταν τὸ ἐξῆς: γιὰ κάθε χρόνο ποὺ περνᾷ, ἡ ἀπόδοση μειώνεται κατὰ περίπου 1%. Ἐνα ἄλλο σημεῖο σύγκρισης ἦταν ἡ τιμὴ τῆς πειραματικῆς ἀπόδοσης συγκριτικῶς μὲ τὴν ὑπολογιστικὴ. Πιὸ συγκεκριμένα, ἡ ὑπολογιστικὴ ἢ ἀριθμητικὴ ἀπόδοση ἦταν τῆς τάξεως τοῦ 70% καὶ ὑψηλότερη ἀπὸ τὴν πειραματικὴ – μετὰ τὴν συντήρηση – ποὺ δὲν ξεπερνοῦσε τὸ 66%. Πρακτικῶς τὸ λᾶδι ἐξῆλθε μὲ μειωμένη θερμοκρασία κατὰ 17,5°C, ἐνῶ ἀπὸ τὴν ὑπολογιστικὴ προσέγγιση ἀναμενόταν ἡ θερμοκρασία τοῦ ρευστοῦ μειωμένη κατὰ 18,5°C. Ἡ ἀπόκλιση αὐτὴ ὀφειλόταν πιθανώτατα στὸ τραπεζοειδὲς σχῆμα τῶν πτυχώσεων. Τὸ σχῆμα τῶν πτυχώσεων ἐπηρεάζει σημαντικῶς τὸν συντελεστὴ τριβῆς. (Παπαλαζάρου, 2010).

Αντικείμενο μιᾶς μεταπτυχιακῆς ἐργασίας ἦταν ἡ μελέτη ἐνὸς ἐναλλάκτη θερμότητας πλακῶν μὲ χρῆση τεχνικῶν ὑπολογιστικῆς ρευστοδυναμικῆς (computational fluid dynamics). Ἀρχικῶς, πραγματοποιήθηκε ἡ προσομοίωση τοῦ ἐναλλάκτη χωρὶς αὐλακώσεις σὲ ὁμοροῆ γιὰ τὶς περιπτώσεις στρωτῆς καὶ τυρβώδους ροῆς καὶ στὴν συνέχεια προσομοίωση τοῦ ἐναλλάκτη μὲ αὐλακώσεις γιὰ τὶς περιπτώσεις ὁμοροῆς καὶ ἀντιροῆς γιὰ δύο θερμοκρασίες γιὰ τὸ κάθε ρεῦμα: 33,7°C καὶ 42,6°C γιὰ τὸ μέσο θέρμανσης καὶ 16,1 καὶ 18,1°C γιὰ τὸ προϊόν. Καὶ γιὰ τὶς δύο θερμοκρασιακὲς λειτουργίες τοῦ ἐναλλάκτη παρατηρήθηκε πανομοιότυπο μοτίβο στὰ διαγράμματα, κάτι ποὺ δείχνει ὅτι ἡ μοντελοποίηση τοῦ ἐναλλάκτη μὲ τὴν χρῆση C.F.D. εἶχε λογικὴ συνέπεια καὶ δὲν ἐπηρεάσθηκε ἀπὸ τὴν θερμοκρασία (40°C ἢ 50°C) λειτουργίας τοῦ ἐναλλάκτη. Τελικῶς, ἔγινε σύγκριση τῶν ἀποτελεσμάτων τῶν ἀριθμητικῶν μέσῳ C.F.D. λύσεων τόσο μὲ πειραματικὰ ἀποτελέσματα ὅσο καὶ μὲ τὰ ἀποτελέσματα ἐμπειρικῆς προσέγγισης. Οἱ προσεγγίσεις ποὺ ἀκολουθήθηκαν στὴν συγκεκριμένη ἐργασία γιὰ τὴν μοντελοποίηση τοῦ ἐναλλάκτη μὲ τὴν χρῆση τεχνικῶν C.F.D. ἦταν ἱκανοποιητικῆς. (Μαγκουσάκης, 2018).

Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τὰ πειράματα με τις δύο διαφορετικές παροχές ($q_v = 1,4 \text{ L/min.}$ και $2,1 \text{ L/min.}$) με τις οποίες εισάγεται τὸ ρευστὸ τρόφιμο στὸν ἐναλλάκτη για σταθερές θερμοκρασίες, παρατηροῦμε τὰ ἑξῆς:

- ἡ θερμοκρασία ἐξόδου τοῦ τροφίμου και τοῦ νεροῦ ἀπὸ τὸν ἐναλλάκτη εἶναι μεγαλειότερη στὴν ὑψηλότερη παροχὴ ($q_v = 2,1 \text{ L/min.}$).
- παρουσιάζονται παρόμοιες ἀπώλειες (q_l) και στὶς δύο παροχές.
- παρουσιάζεται ὑψηλότερη θερμότητα στὸ ρευστὸ τρόφιμο (q_h) και στὸ ψυκτικὸ μέσο (q_c) στὴν ὑψηλὴ παροχὴ ($q_v = 2,1 \text{ L/min.}$).
- παρουσιάζεται ὑψηλότερος συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητας (U) στὴν ὑψηλὴ παροχὴ ($q_v = 2,1 \text{ L/min.}$).

Τὰ ἀνωτέρω ἰσχύουν και στὴν ὁμορροή και στὴν ἀντιρροή.

Συγκρίνοντας τὰ πειράματα με τις διαφορετικὲς θερμοκρασίες ($T = 40^\circ\text{C}$, 50°C , 60°C) με τις οποίες θερμαίνουμε κάθε φορὰ τὸ ρευστὸ τρόφιμο, παρατηροῦμε τὰ ἑξῆς:

- μεγαλειότερη πτώση τῆς θερμοκρασίας κατὰ τὴν ψύξη τοῦ ρευστοῦ τροφίμου και μεγαλειότερη αὔξηση τῆς θερμοκρασίας τοῦ ψυκτικοῦ μέσου στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία θέρμανσης τοῦ τροφίμου ($T = 60^\circ\text{C}$).
- ἡ αὔξηση τῆς θερμότητας ποὺ προσλαμβάνει τὸ ρευστὸ τρόφιμο εἶναι μεγαλειότερη στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία ($q_{h40^\circ\text{C}} < q_{h50^\circ\text{C}} < q_{h60^\circ\text{C}}$).
- ἡ αὔξηση τῆς θερμότητας ποὺ προσλαμβάνει τὸ ψυκτικὸ μέσο εἶναι μεγαλειότερη στὴν ὑψηλότερη θερμοκρασία ($q_{c40^\circ\text{C}} < q_{c50^\circ\text{C}} < q_{c60^\circ\text{C}}$).
- ἡ σειρὰ αὔξησης τοῦ ὀλικοῦ συντελεστῆ μεταφορᾶς θερμότητας εἶναι ἡ ἑξῆς:

$U_{40^\circ\text{C}} < U_{50^\circ\text{C}} < U_{60^\circ\text{C}}$.

Τὰ ἀνωτέρω ἰσχύουν και στὴν ὁμορροή και στὴν ἀντιρροή.

Συγκρίνοντας τὰ πειράματα ὁμορροῆς και ἀντιρροῆς για τις ἴδιες συνθήκες θέρμανσης και παροχῆς τοῦ ρευστοῦ τροφίμου στὸν ἐναλλάκτη, παρατηροῦμε τὰ ἑξῆς:

- ὑψηλότερο ὀλικὸ συντελεστὴ μεταφορᾶς θερμότητας στὴν ἀντιρροή, ἐκτὸς ἀπὸ τις περιπτώσεις ὅπου ἡ παροχὴ τοῦ ρευστοῦ τροφίμου εἶναι $1,4 \text{ L/min.}$ και $2,1 \text{ L/min.}$ και ἡ θερμοκρασία εισόδου τοῦ ρευστοῦ τροφίμου στὸν ἐναλλάκτη εἶναι 50°C και 60°C ἀντιστοίχως.
- πρόσληψη μεγαλειότερης θερμότητας (q_c) ἀπὸ τὸ ψυκτικὸ μέσο στὴν ἀντιρροή για τὴν χαμηλὴ θερμοκρασία ($T = 40^\circ\text{C}$) με $q_v = 1,4 \text{ L/min.}$ και $2,1 \text{ L/min.}$, ἐνῶ στὶς ὑπόλοιπες περιπτώσεις ἰσχύει τὸ ἀντίθετο.
- παρόμοιες θερμοκρασίες στὴν ἐξοδο τοῦ ρευστοῦ τροφίμου ἀπὸ τὸν ἐναλλάκτη.

Ἡ ἐφαρμογὴ τῆς μεθόδου “NTU” ἔδειξε ὅτι ἡ θερμικὴ ἀποδοτικότητα τοῦ ἐναλλάκτη ἔφθασε ἕως 64% και ἐπ’ ἴσης παρουσιάζεται πολὺ καλὴ προσαρμογὴ μεταξὺ τῶν θεωρητικῶν και πειραματικῶν τιμῶν τῆς θερμοκρασίας ἐξόδου τόσο για τὸ ρευστὸ τρόφιμο (τὸν ἀραιωμένο χυμὸ) ὅσο και για τὸ ψυκτικὸ μέσο (νερό).

Βιβλιογραφία

Έλληνική βιβλιογραφία

- Γιαννιώτης Σ., Στοφόρος Ν., Τζιά Κ., εισαγωγή στην μηχανική τροφίμων, 5^η έκδοση, εκδόσεις «Παρισιαῖνος», Ἀθήναι, 2018.
- Ζουμπούλης Α., Καραπάντσιος Θ., Μάτης Κ., Μαῦρος Π., στοιχεία φυσικῶν διεργασιῶν, εκδόσεις «Τζιόλας», Θεσσαλονίκη, 2009.
- Λαζαρίδης Χ., Γούλα Α., μηχανική τροφίμων: θεμελιώδεις ἔννοιες/φαινόμενα μεταφορᾶς/βασικὲς διεργασίες, εκδόσεις «Τζιόλας», Θεσσαλονίκη, 2022.
- Λάζος Ε., ἐπεξεργασία τροφίμων, τόμος Ι, εκδόσεις “Interbooks”, Ἀθήναι, 2010.
- Μαγκουσάκης Ἐ., μελέτη ἐναλλάκτη θερμότητας πλακῶν με χρήση ὑπολογιστικῆς ρευστοδυναμικῆς (μεταπτυχιακὴ μελέτη), Γεωπονικὸ Πανεπιστήμιο Ἀθηνῶν, σχολὴ τροφίμων βιοτεχνολογίας καὶ ἀνάπτυξης, τμῆμα ἐπιστήμης τροφίμων καὶ διατροφῆς τοῦ ἀνθρώπου, Ἀθήναι, 2018.
- Παπαλαζάρου Α., μοντελοποίηση καὶ ἔλεγχος ἀπόδοσης ἐνὸς πλακοειδοῦς ἐναλλάκτη θερμότητας με τὴν μέθοδο τῶν πεπερασμένων στοιχείων (διπλωματικὴ ἐργασία), Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνικὴ σχολή, τμῆμα μηχανικῶν παραγωγῆς καὶ διοίκησης, Ξάνθη, 2010.
- Σαραβάκος Γ., τεχνικὴ θερμικῶν διεργασιῶν, Β΄ ἔκδοσις, Ἀθήναι, 1979.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Akbarinia A., Behzadmehr A., “Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes”, Applied Thermal Engineering, vol. 27, no. 8-9, pp. 1327-1337, 2007.
- Akbarinia A., Laur R., “Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach”, International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 30, no. 4, pp. 706-714, 2009.
- Akhgar A., Toghraie D., Sina N., Afrand M., “Developing dissimilar artificial neural networks (ANNs) to prediction the thermal conductivity of MWCNT-TiO₂/Water-ethylene glycol hybrid nanofluid”, Powder Technology, vol. 355, pp. 602-610, 2019.
- Arzani H. K., Amiri A., Kazi S. N., Chew B. T., Badarudin A., “Experimental and numerical investigation of thermophysical properties, heat transfer and pressure drop of covalent and noncovalent functionalized graphene nanoplatelet-based water nanofluids in an annular heat exchanger”, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 68, pp. 267-275, 2015.
- Asokan N., Gunnasegaran P., Wanatasanappan V. V., “Experimental investigation on the thermal performance of compact heat exchanger and the rheological properties of low concentration mono and hybrid nanofluids containing Al₂O₃ and CuO nanoparticles”, Thermal Science and Engineering Progress, vol. 20, p. 100727, 2020.

- Awais M., Bhuiyan A. A., “Heat and mass transfer for compact heat exchanger (CHXs) design: a state of the art review”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 127, pp. 359-380, 2018.
- Bahiraei M., Foong L. K., Hosseini S., Mazaheri N., “Predicting heat transfer rate of a ribbed triple-tube heat exchanger working with nanofluid using neural network enhanced by advanced optimization algorithms”, *Powder Technology*, vol. 381, pp. 459-476, 2021.
- Bahmani M. H., Sheikhzadeh G., Zarringhalam M., Akbari O. A., Alrashed A. A. A., Shabani G. A. S., Goodarzi M., “Investigation of turbulent heat transfer and nanofluid flow in a double pipe heat exchanger”, *Advanced Powder Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 273-282, 2017.
- Barbés B., Páramo R., Blanco E., Casanova C., “Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of CuO nanofluids”, *J Therm Anal Calorim*, vol. 115, no. 2, pp. 1883-1891, 2014.
- Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., DeWitt D. P., “Fundamentals of heat and mass transfer”, 7th edition, Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- Bhattad A., Babu S., “Thermal analysis of shell and tube type heat exchanger using hybrid nanofluid”, *Trends Sci.*, vol. 19, no. 5, p. 2890, 2022.
- Blel W., Legentilhomme P., Bénézec T., Fayolle F., “Cleanability study of a scraped surface heat exchanger”, *Food and Bioprocess Processing*, vol. 91, no. 2, pp. 95-102, 2013.
- Boles M. A., Çengel Y. A., “Thermodynamics: an engineering approach”, 4th edition, Boston: McGraw-Hill, 2002.
- Brennan J. G., Butters J. R., Cowell N. D., Lilly A. E. V., “Food engineering operations”, 3rd edition, London; New York: Elsevier Applied Science, 1990.
- Charm S. E., “The fundamentals of food engineering”, 3rd edition, Westport, Conn: AVI Pub. Co., 1978.
- Choi Y., Okos M. R., “The thermal properties of tomato juice concentrates”, *Transactions of the ASAE*, vol. 26, no. 1, pp. 305-315, 1983.
- Copson D. A., “Microwave heating”, 2nd edition, Westport, Conn: Avi Pub. Co., 1975.
- Coulson J. M., Richardson J. F., Backhurst J. R., Harker J. H., “Chemical engineering Vol. 1: fluid flow, heat transfer and mass transfer”, 6th edition, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.
- Das S. K., “Process heat transfer”, U.K.: Alpha Science International, 2005.
- Decareau R. V., “Microwave foods: new product development”, Trumbull, Conn., USA: Food & Nutrition Press, 1992.
- Decareau R. V., Peterson R. A., “Microwave processing and engineering”, Chichester, England: Horwood, 1986.

- Edibon, "Heat exchangers: engineering and technical teaching equipment", Madrid, 2019.
- Edibon, "Heat exchangers: TITC; practical exercises manual", Madrid, 2018.
- Esfahani N. N., Toghraie D., Afrand M., "A new correlation for predicting the thermal conductivity of ZnO-Ag (50%-50%)/water hybrid nanofluid: an experimental study", *Powder Technology*, vol. 323, pp. 367-373, 2018.
- Everts M., Meyer J. P., "Laminar hydrodynamic and thermal entrance lengths for simultaneously hydrodynamically and thermally developing forced and mixed convective flows in horizontal tubes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 118, p. 110153, 2020.
- Ghassemi M., Shahidian A., "Nano and bio heat transfer and fluid flow", Elsevier, pp. 31-56, 2017.
- Grabenstein V., Polzin A.-E., Kabelac S., "Experimental investigation of the flow pattern, pressure drop and void fraction of two-phase flow in the corrugated gap of a plate heat exchanger", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 91, pp. 155-169, 2017.
- Green D. W., Perry R. H., "Perry's chemical engineers' handbook", 8th edition, New York: McGraw-Hill, 2007.
- Guzman-Puyol S., Benítez J. J., Heredia-Guerrero J. A., "Transparency of polymeric food packaging materials", *Food Research International*, vol. 161, p. 111792, 2022.
- Heisler M. P., "Temperature charts for induction and constant-temperature heating", *Journal of Fluids Engineering*, vol. 69, no. 3, pp. 227-236, 1947.
- Heldman D. R., Lund D. B., "Handbook of food engineering", 2nd edition, CRC Press, 2007.
- Heldman D. R., Singh R. P., "Food process engineering", 2nd edition, Westport, Conn.: Avi Pub. Co., 1981.
- Ho C. J., Wei L. C., Li Z. W., "An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al₂O₃/water nanofluid", *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 2-3, pp. 96-103, 2010.
- Holman J. P., "Heat transfer", 10th edition, Boston: McGraw Hill Higher Education, 2009.
- Hottel H. C., "Radiant heat transmission", *Mech. Eng.* 52 (7): 700, 1930.
- Hussam W. K., Thompson M. C., Sheard G. J., "Enhancing heat transfer in a high Hartmann number magnetohydrodynamic channel flow via torsional oscillation of a cylindrical obstacle", *Physics of Fluids*, vol. 24, no. 11, p. 113601, 2012.
- Jafari S. M., Jabari S. S., Dehnad D., Shahidi S. A., "Heat transfer enhancement in thermal processing of tomato juice by application of nanofluids", *Food Bioprocess Technol*, vol. 10, no. 2, pp. 307-316, 2016.

- Jafari S. M., Saremnejad F., Dehnad D., “Nano-fluid thermal processing of watermelon juice in a shell and tube heat exchanger and evaluating its qualitative properties”, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 42, pp. 173-179, 2017.
- Khanafer K., Vafai K., Lightstone M., “Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, no. 19, pp. 3639-3653, 2003.
- Kreith F., “Principles of heat transfer”, 3rd edition, New York: Intext Educational Publishers, 1973.
- Lin Z., Cleland A. C., Cleland D. J., Serrallach G. F., “A simple method for prediction of chilling times for objects of two-dimensional irregular shape”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 19, no. 2, pp. 95-106, 1996.
- Liu H., Pramuanjaroenkij A., Kakaç S., “Heat exchangers”, CRC Press, 2002.
- Loncin M., Merson R. L., “Food engineering, principles and selected applications”, New York: Academic Press, 1979.
- Mahmoud M., Mohammed H., Mahdi J., Bokov D., Ben Khedher N., “Melting enhancement in a triple-tube latent heat storage system with sloped fins”, *Nanomaterials*, vol. 11, no. 11, p. 3153, 2021.
- Mansoury D., Doshmanziari F. I., Rezaie S., Rashidi M. M., “Effect of Al₂O₃/water nanofluid on performance of parallel flow heat exchangers: an experimental approach”, *J Therm Anal Calorim*, vol. 135, no. 1, pp. 625-643, 2018.
- Myers G. E., “Analytical methods in conduction heat transfer”, New York: McGraw-Hill, 1971.
- Nakaso K., Mitani H., Fukai J., “Convection heat transfer in a shell-and-tube heat exchanger using sheet fins for effective utilization of energy”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 82, pp. 581-587, 2014.
- Nakhchi M. E., Hatami M., Rahmati M., “Experimental evaluation of performance intensification of double-pipe heat exchangers with rotary elliptical inserts”, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 169, p. 108615, 2021.
- Palaniappan S., Sastry S. K., “Electrical conductivities of selected solid foods during ohmic heating”, *Journal of Food Process Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 221-236, 1991.
- Pandey S. D., Nema V. K., “Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 38, pp. 248-256, 2012.
- Pandya N. S., Shah H., Molana M., Tiwari A. K., “Heat transfer enhancement with nanofluids in plate heat exchangers: a comprehensive review”, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 81, pp. 173-190, 2020.
- Paraschiv L. S., Acomi N., Serban A., Paraschiv S., “A web application for analysis of heat transfer through building walls and calculation of optimal insulation thickness”, *Energy Reports*, vol. 6, pp. 343-353, 2020.

- Pattanayak B., Mund A., Jayakumar J. S., Parashar K., Parashar S. K. S., “Estimation of Nusselt number and effectiveness of double-pipe heat exchanger with Al₂O₃ and CuO and TiO₂ and ZnO water based nanofluids”, *Heat Transfer*, vol. 49, no. 4, pp. 2228-2247, 2020.
- Pérez-García J., García A., Herrero-Martín R., Solano J. P., “Experimental correlations on critical Reynolds numbers and friction factor in tubes with wire-coil inserts in laminar, transitional and low turbulent flow regimes”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 91, pp. 64-79, 2018.
- Pflug I. J., Blaisdell J. L., Kopelman I. J., “Developing temperature-time curves for objects that can be approximated by a sphere, infinite plate or infinite cylinder”, *ASHRAE Trans.* 71 (1), pp. 238-248, 1965.
- Reddy M. C. S., Rao V. V., “Experimental investigation of heat transfer coefficient and friction factor of ethylene glycol water based TiO₂ nanofluid in double pipe heat exchanger with and without helical coil inserts”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 68-76, 2014.
- Roy G., Nguyen C. T., Lajoie P.-R., “Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids”, *Superlattices and Microstructures*, vol. 35, no. 3-6, pp. 497-511, 2004.
- Saremnejad F., Jafari S. M., Dehnad D., Rashidi A. M., “Evaluation of performance and thermophysical properties of alumina nanofluid as a new heating medium for processing of food products”, *Journal of Food Process Engineering*, vol. 40, no. 5, p. e12544, 2017.
- Shahi M., Mahmoudi A. H., Talebi F., “Numerical study of mixed convective cooling in a square cavity ventilated and partially heated from the below utilizing nanofluid”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, no. 2, pp. 201-213, 2010.
- Simpson S., Schelfhout A., Golden C., Vafaei S., “Nanofluid thermal conductivity and effective parameters”, *Applied Sciences*, vol. 9, no. 1, p. 87, 2018.
- Singh R. P., “Food properties database”, RAR Press, Davis, California, 1994.
- Singh R. P., Heldman D. R., “Introduction to food engineering”, 4th edition, Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2009.
- Sundar L. S., Sharma K. V., “Turbulent heat transfer and friction factor of Al₂O₃ nanofluid in circular tube with twisted tape inserts”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 7-8, pp. 1409-1416, 2010.
- Talebi F., Mahmoudi A. H., Shahi M., “Numerical study of mixed convection flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, no. 1, pp. 79-90, 2010.
- Tardy P. M., Flamant N. C., Lac E., Parry A., Utama C. S., Almagro S. P., “New generation 3D simulator predicts realistic mud displacement in highly deviated and horizontal wells”, The Hague, 2017.

- Telis-Romero J., Telis V. R. N., Gabas A. L., Yamashita F., “Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content”, *Journal of Food Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 27-40, 1998.
- Ungar E., Erickson L., “Assessment of the use of nanofluids in spacecraft active thermal control systems”, in *AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition*, Long Beach, California, 2011.
- Valentas K. J., Rotstein E., Singh R. P., “Handbook of food engineering practice”, Boca Raton, Fla: CRC Press, 1997.
- Whitaker S., “Fundamental principles of heat transfer”, Saint Louis: Elsevier Science, 2013.
- White F. M., “Fluid mechanics”, 8th edition, New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- Wilk J., Smusz R., Grosicki S., “Thermophysical properties of water based Cu nanofluid used in special type of coil heat exchanger”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 127, pp. 933-943, 2017.
- Yang L., Xu J., Du K., Zhang X., “Recent developments on viscosity and thermal conductivity of nanofluids”, *Powder Technology*, vol. 317, pp. 348-369, 2017.