



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

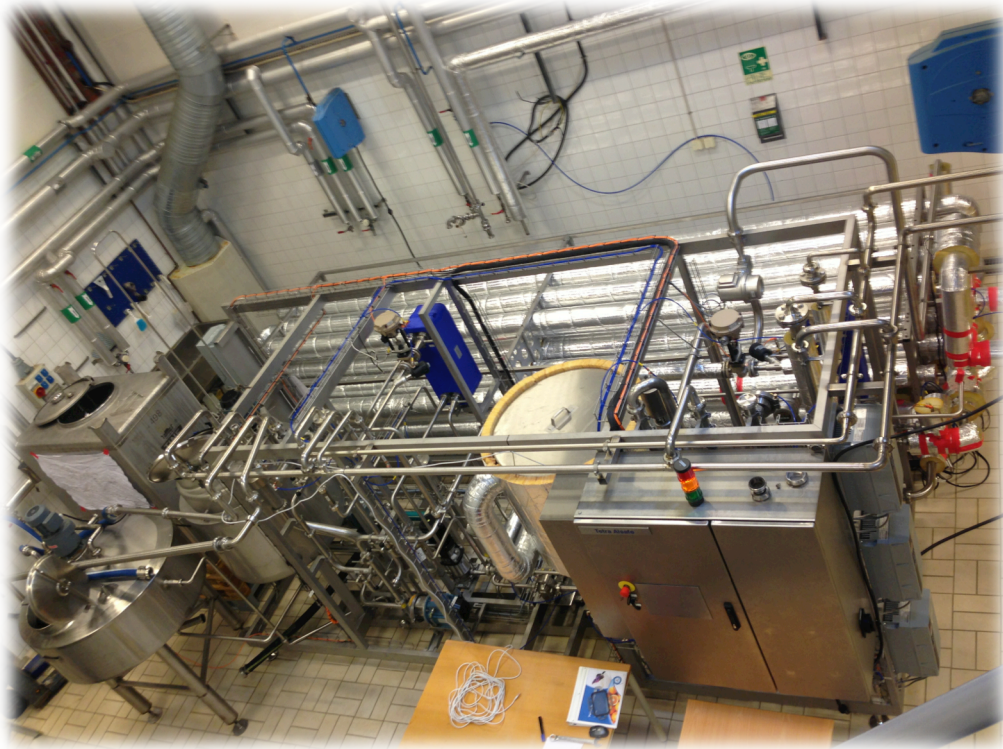
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Τομέας IV : Σύνθεσης και Ανάπτυξης  
Βιομηχανικών Διαδικασιών

Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνολογίας  
Τροφίμων

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Πειραματική Μελέτη των Φαινομένων Μεταφοράς  
Θερμότητας και της Πτώσης Πίεσης κατά τη Θερμική  
Επεξεργασία Διφασικών Ρευστών Τροφίμων σε Εναλλάκτη  
Θερμότητας Διπλού Σωλήνα**



**Στυλιανός Δ. Σαράντης**

**Επιβλέπων: Πέτρος Ταούκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο « Πειραματική Μελέτη των Φαινομένων Μεταφοράς Θερμότητας και της Πτώσης Πίεσης στη Θερμική Επεξεργασία Διφασικών Ρευστών Τροφίμων σε Εναλλάκτη Θερμότητας Διπλού Σωλήνα » εκπονήθηκε στις εγκαταστάσεις της εταιρίας Tetra Pak Processing Solutions στο Lund της Σουηδίας κατά το εαρινό εξάμηνο του ακαδημαϊκού έτους 2012 – 2013. Η εργασία αυτή αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου προγράμματος με τίτλο « Particle Technology I » του τμήματος Research & Technology της προαναφερθείσας εταιρίας. Μάλιστα, στα πλαίσια του προγράμματος αυτού εκπονήθηκαν ταυτοχρόνως δύο διπλωματικές εργασίες: η παρούσα που εστιάζει στη μελέτη, αφενός, της μεταφοράς θερμότητας από το τοίχωμα του αγωγού προς το φέρον ρευστό και, αφετέρου, της πτώσης πίεσης στο εσωτερικό του αγωγού και ακόμη μία διπλωματική εργασία που εστιάζει στη μελέτη της μεταφοράς θερμότητας από το φέρον ρευστό προς την επιφάνεια των σωματιδίων, που εκπονήθηκε από τον Tor Sewring, προπτυχιακό φοιτητή της σχολής Faculty of Engineering, LTH, Lund University.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Πέτρο Ταούκη για τη θετική αντιμετώπιση που έδειξε στην ιδέα μου για εκπόνηση διπλωματικής στο εξωτερικό από την πρώτη στιγμή. Θα ήθελα, επίσης, να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγησή του κατά τη συγγραφή της εργασίας και για την αισιοδοξία που εμπνέει σε μια, ομολογουμένως, δύσκολη περίοδο για το Πολυτεχνείο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους συμμετέχοντες στο πρόγραμμα «Particle Technology I» που βοήθησαν να δημιουργηθεί η παρούσα εργασία, ξεκινώντας από την επικεφαλής του προγράμματος και άμεση επιβλέπουσα της εργασίας, Dr. Jeanette Lindau. Την ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, ώστε να αναλάβω ένα ιδιαίτερα απαιτητικό και ενδιαφέρον έργο, και για την ικανότητά της να με εμπνέει στις δύσκολες στιγμές απογοήτευσης και προσωρινής αποτυχίας των πειραμάτων. Θα ήθελα, ακόμη, να ευχαριστήσω τον φίλο και συνεργάτη μου, Tor Sewring, για τη στήριξη και τη βοήθεια που μου πρόσφερε κατά την περίοδο προσαρμογής μου σε ένα απολύτως νέο περιβάλλον διαμονής και εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τους Dr. Tomas Skoglund, Dr. Jaana Mathisson και τον καθηγητή του Lund University, Faculty of Engineering, LTH, Prof. Ulf Bolmstedt για τις λύσεις και τις κατευθύνσεις που μου παρείχαν κατά το στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων και συγγραφής της αναφοράς.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου για τη στήριξη και την αγάπη με την οποία αγκάλιασε αυτή μου την προσπάθεια και όλους τους δικούς μου ανθρώπους που εκμηδένισαν τις αποστάσεις και βρέθηκαν με κάθε μέσο στη μακρινή Σουηδία για να είναι δίπλα μου στις πιο κρίσιμες «στροφές» αυτού του «ταξιδιού».



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα διφασικά ρευστά τρόφιμα που περιέχουν στερεά σωματίδια (particulate foods) είναι μία κατηγορία τροφίμων η οποία σήμερα αναπτύσσεται συνεχώς και με υψηλό ρυθμό. Πρόκειται για τρόφιμα τα οποία αποτελούνται από το φέρον ρευστό, που αποτελεί την υγρή φάση του προϊόντος, και τα σωματίδια, που αποτελούν την υγρή φάση του προϊόντος. Τέτοια προϊόντα τροφίμων θα μπορούσαν να είναι αναψυκτικά ή ροφήματα που περιέχουν κομμάτια φρούτων, παιδικές τροφές, σούπες και σάλτσες. Η θερμική επεξεργασία τους και η ρεολογική τους συμπεριφορά κατά τη ροή σε αγωγούς έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και η πτώση πίεσης κατά τη θερμική επεξεργασία ρευστού διφασικού τροφίμου σε εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα και η επίδραση σε αυτά των παραμέτρων του τροφίμου και της διεργασίας. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση του ιξώδους του ρευστού, της ταχύτητας ροής, της συγκέντρωσης σωματιδίων στο προϊόν, του σχήματος και του μέγεθους των σωματιδίων στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού προς το φέρον ρευστό του προϊόντος  $h_{W,F}$  και στην πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού. Η γνώση του συντελεστή  $h_{W,F}$  είναι σημαντική για το βέλτιστο σχεδιασμό της διεργασίας και στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τον εν λόγω συντελεστή σε θερμική επεξεργασία πραγματικών τροφίμων.

Συνοπτικά, από τη διεξαγωγή των πειραμάτων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε το γενικό συμπέρασμα ότι η παρουσία των σωματιδίων επηρεάζει σημαντικά τον συντελεστή συναγωγής  $h_{W,F}$ . Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων στο προϊόν επιφέρει αύξηση του συντελεστή  $h_{W,F}$ . Ο δεύτερος παράγοντας που έδειξε να επιδρά σημαντικά στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h_{W,F}$  είναι ο αριθμός Reynolds του φέροντος ρευστού, ο οποίος εξ ορισμού εκφράζει την επίδραση του ιξώδους και της ταχύτητας ροής του ρευστού. Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση του αριθμού Reynolds διευκολύνει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του τοιχώματος του αγωγού και του φέροντος ρευστού προκαλώντας αύξηση του αντίστοιχου συντελεστή. Ακόμη, στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα μαθηματικό μοντέλο που συνδέει τη μεταβολή του συντελεστή συναγωγής  $h_{W,F}$  με τη μεταβολή της συγκέντρωσης σωματιδίων και του αριθμού Reynolds του ρευστού. Το μοντέλο αυτό έχει ως στόχο την ακριβή πρόβλεψη του συντελεστή συναγωγής  $h_{W,F}$  για ένα εύρος πειραματικών παραμέτρων και περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Nu = 0,567 \cdot Re^{0,348} \cdot Pr^{0,194} \cdot (1 + \phi)^{4,196}$$

Όσον αφορά τη μελέτη της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού, γενικά παρατηρείται αύξηση της πτώσης πίεσης με τη συγκέντρωση των σωματιδίων στο διφασικό προϊόν. Πέραν της συγκέντρωσης, το σχήμα και το μέγεθος των σωματιδίων δεν παρατηρήθηκε να έχει σημαντική επίδραση στη μεταφορά θερμότητας και την πτώση πίεσης. Ένα πρόσθετο ενδιαφέρον εύρημα που προέκυψε κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων είναι ότι η παρουσία των σωματιδίων στο προϊόν φαίνεται να επεκτείνει την περιοχή της στρωτής ροής. Προφανώς, η κίνηση των σωματιδίων στο ρευστό εμποδίζει τη δημιουργία δινών ώστε να περάσει η ροή στην τυρβώδη περιοχή.



## ABSTRACT

Particulate foods is a rapidly developing food category nowadays. They are two-phase fluid products that consist of the carrier fluid, which is the liquid phase, and the particles, which represent the solid phase. Such food products can be refreshing drinks that contain fruit pieces, baby foods, soups and sauces. Their thermal treatment and rheological behavior in tube flow has been investigated during the latest decades.

In the present work, the heat transfer phenomena and the pressure drop during thermal treatment of a particulate product in a tubular heat exchanger are studied. The influence of the fluid viscosity, product velocity, % particle concentration and particle shape and size on the wall-to-fluid heat transfer coefficient  $h_{W,F}$  and the pressure drop is investigated. Knowing the actual wall-to-fluid heat transfer coefficient is important for the optimal process design and there is no sufficient information in literature about this coefficient in case of actual food products heat treatment process.

Shortly, the general conclusion that came out of the experiments and the data processing is that the particles presence causes a significant increase of the heat transfer coefficient  $h_{W,F}$ . Actually, the wall-to-fluid heat transfer coefficient  $h_{W,F}$  increases with the particle concentration in the product. The second factor that has been observed to have a significant influence on the heat transfer coefficient  $h_{W,F}$  is the fluid Reynolds number, which expresses the influence of both the fluid viscosity and the flow velocity. As expected, the increase of the Reynolds number assists the wall-to-fluid heat transfer leading to an increase of the corresponding coefficient. Additionally, in the present work, a mathematical model, that relates the convective coefficient  $h_{W,F}$  with the particle concentration and the fluid Reynolds number, is presented. This model has been produced in order to predict accurately the heat transfer coefficient  $h_{W,F}$  given the values of the experimental parameters. The following equation describes the model that has been produced:

$$Nu = 0,567 \cdot Re^{0,348} \cdot Pr^{0,194} \cdot (1 + \Phi)^{4,196}$$

Regarding the study of the pressure drop along the tube, generally it is observed that the increase of the particle concentration in the two-phase product causes increase of the pressure drop along the pipe. Apart from the particle concentration, the particles' shape and size did not seem to have significant influence on the heat transfer phenomena and pressure drop. An additional interesting finding that came out of the experimental results processing is that the particles presence in the product seems to extend the laminar flow regime. Obviously, their movement in the fluid prevents the formation of eddies and the turbulent flow regime cannot be reached.





## Πίνακας Περιεχομένων

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1. Γενικά</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2. Εξισώσεις Ρυθμού</b> .....	<b>4</b>
1.2.1. Αγωγή.....	4
1.2.2. Συναγωγή .....	5
1.2.3. Ακτινοβολία.....	6
<b>1.3. Εναλλάκτης Θερμότητας Διπλού Σωλήνα</b> .....	<b>7</b>
<b>1.4. Φαινόμενα Μεταφοράς Θερμότητας - Μονοφασικό Ρευστό</b> .....	<b>9</b>
<b>1.5. Φαινόμενα Μεταφοράς Θερμότητας - Διφασικό Ρευστό</b> .....	<b>12</b>
1.5.1. Μεταφορά Θερμότητας από το Τοίχωμα Αγωγού προς το Φέρον Ρευστό του προϊόντος.....	13
1.5.2. Μεταφορά Θερμότητας από το Φέρον Ρευστό προς την Επιφάνεια των Σωματιδίων.....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟ</b> .....	<b>29</b>
<b>2.1. Γενικά</b> .....	<b>29</b>
<b>2.2. Νευτωνικά Ρευστά</b> .....	<b>30</b>
<b>2.3. Μη Νευτωνικά Ρευστά</b> .....	<b>30</b>
<b>2.4. Μη Νευτωνικά Ρευστά - Ροή σε Αγωγό</b> .....	<b>32</b>
<b>2.5. Πτώση Πίεσης για ροή σε αγωγό</b> .....	<b>34</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : ΥΛΙΚΑ – ΜΕΘΟΔΟΙ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1. Στόχοι και Πλαίσιο Πειραματικών Παραμέτρων</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2. Υλικά</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3. Σχεδιασμός Πειραμάτων</b> .....	<b>41</b>
<b>3.4. Πειραματική διάταξη - Εξοπλισμός</b> .....	<b>45</b>
3.4.1. Liquid Mixing Tank (T100).....	46
3.4.2. Slurry Tank (BTD120) .....	47
3.4.3. Liquid Tank (BTD110).....	48
3.4.4. Slurry Pump (M20) .....	49
3.4.5. Liquid Pump (M10).....	50
3.4.6. Εναλλάκτης Θερμότητας Διπλού Σωλήνα (Tubular Heat Exchanger THE301) .....	50
3.4.7. Θερμαντικό / Ψυκτικό Μέσο .....	51
3.4.8. Ροομετρα .....	52
3.4.9. Γυαλί παρατήρησης (Sight Glass).....	53
3.4.10. Δεξαμενή Απόρριψης (Rejection Tank T200).....	53
<b>3.5. Πειραματική Διαδικασία</b> .....	<b>54</b>
3.5.1. Προετοιμασία του διαλύματος CMC.....	54
3.5.2. Προετοιμασία του «πολτού» σωματιδίων.....	54
3.5.3. Εκτέλεση του πειράματος.....	55
3.5.4. Μετρήσεις.....	56
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>63</b>
<b>4.1. Αριθμός Reynolds του φέροντος ρευστού</b> .....	<b>63</b>
<b>4.2. Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τον αγωγό προς το φέρον ρευστό (<math>h_{w,F}</math>)</b> .....	<b>65</b>
4.2.1 Περιγραφή της μεθόδου υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από τον αγωγό προς το φέρον ρευστό ( $h_{w,F}$ ) .....	65
4.2.2. Επίδραση της συγκέντρωσης σωματιδίων στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_{w,F}$ .....	72

4.2.3. Επίδραση του σχήματος των σωματιδίων στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_{w,F}$ .....	75
4.2.4. Επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_{w,F}$ .....	77
4.2.5. Επίδραση της ψύξης στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_{w,F}$ .....	79
4.2.6. Δημιουργία μοντέλου .....	81
<b>4.3. Πτώση Πίεσης .....</b>	<b>85</b>
4.3.1. Εξέλιξη της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού .....	86
4.3.2. Επίδραση της συγκέντρωσης σωματιδίων στην πτώση πίεσης .....	88
4.3.3. Επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στην πτώση πίεσης .....	89
4.3.4. Επίδραση του σχήματος των σωματιδίων στην πτώση πίεσης .....	91
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>93</b>
<b>5.1. Συμπεράσματα .....</b>	<b>93</b>
5.1.1. Μεταφορά θερμότητας .....	93
5.1.2. Πτώση Πίεσης .....	94
<b>5.2. Προτάσεις για Βελτίωση και Μελλοντική Έρευνα .....</b>	<b>95</b>
5.2.1. Βελτιώσεις .....	95
5.2.2. Μελλοντική έρευνα .....	97
<b>ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ .....</b>	<b>99</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>103</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 – Φυσικές ιδιότητες .....</b>	<b>105</b>
1. Υδατικό διάλυμα CMC – 0,25% CEKOL 30000 .....	105
2. Υδατικό διάλυμα CMC – 0,1% CEKOL 30000 .....	106
3. Υδατικό διάλυμα CMC – 1,2% CEKOL 700 .....	108
4. Υδατικό διάλυμα CMC – 0,15% CEKOL 30000 .....	109
5. Κύβοι καρότου .....	111
6. Μπιζέλια .....	112
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 – Θερμική αγωγιμότητα του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 316 .....</b>	<b>115</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 – Αβεβαιότητα Μετρήσεων .....</b>	<b>116</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 – Μετρήσεις Ιξώδους του φέροντος ρευστού .....</b>	<b>119</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5 – Αποτελέσματα πειραμάτων με κύβους καρότου μικρού μεγέθους .....</b>	<b>125</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6 – Αποτελέσματα πειραμάτων με κύβους καρότου μεγάλου μεγέθους .....</b>	<b>127</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 7 - Αποτελέσματα πειραμάτων με μπιζέλια .....</b>	<b>128</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαπραγματεύεται το θέμα της θερμικής επεξεργασίας ρευστών διφασικών τροφίμων με σωματίδια (= particulate foods) με τη χρήση εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα από τη σκοπιά των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και της ρεολογίας. Τα τρόφιμα αυτά αποτελούνται από δύο φάσεις : το φέρον ρευστό (υγρή φάση) και τα σωματίδια (στερή φάση). Πρόκειται για μία κατηγορία προϊόντων η οποία αποτελεί αντικείμενο επιστημονικών μελετών τις τελευταίες δεκαετίες και κερδίζει συνεχώς το ενδιαφέρον της αγοράς. Από εμπορικής άποψης, ολοένα και περισσότερες εταιρίες του κλάδου – είτε παρασκευής των εν λόγω τροφίμων είτε κατασκευής του εξοπλισμού επεξεργασίας τροφίμων – στοχεύουν στη βελτιστοποίηση των διεργασιών επεξεργασίας τους με απώτερο σκοπό την εξοικονόμηση κόστους και την αναβάθμιση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων.

Πιο συγκεκριμένα, ο τελικός στόχος είναι η ανάπτυξη συνεχούς διεργασίας για τη θερμική επεξεργασία των διφασικών τροφίμων, μέσα από την οποία:

- θα διασφαλίζεται ότι το τελικό προϊόν είναι ασφαλές προς κατανάλωση
- τα παραγόμενα προϊόντα θα υφίστανται ακριβώς την απαιτούμενη θερμική επεξεργασία διατηρώντας κατά το δυνατόν αναλλοίωτα τα θρεπτικά συστατικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά τους.

Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος, χρειάζεται η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης των επιμέρους συντελεστών μεταφοράς θερμότητας. Αυτό θα οδηγήσει στην ακριβή διαστασιολόγηση των εναλλακτών θερμότητας και κατ' επέκταση στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της διεργασίας. Η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζουν τα τρόφιμα αυτά είναι η ύπαρξη των στερεών σωματιδίων μέσα στην υγρή φάση. Έτσι, λόγω της ιδιαιτερότητας αυτής, τα υπάρχοντα εργαλεία υπολογισμού των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας για την επεξεργασία μονοφασικών ρευστών τροφίμων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσια και για τα διφασικά τρόφιμα. Αρκετές μελέτες αποδεικνύουν ότι η παρουσία των σωματιδίων έχει μεγάλη επίδραση στους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας ( J. Sannervik et al. [10], P. N. Baptista et al. [15] ).

Στο χώρο της βιομηχανίας, τα διφασικά τρόφιμα με σωματίδια παράγονταν συνήθως μέσα από μη συνεχείς διεργασίες. Σήμερα, σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα σε συνεχείς διεργασίες. Ωστόσο, η τακτική που ακολουθείται για τη διαστασιολόγησή τους είναι αποτελεσματική αλλά δεν είναι η βέλτιστη. Συνήθως η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μοντέλα που δε λαμβάνουν υπόψη την παρουσία των στερεών σωματιδίων στο μίγμα. Έπειτα, κατασκευάζεται η διάταξη και μέσα από δοκιμές προσδιορίζονται οι κατάλληλες διαστάσεις. Αυτή η προσέγγιση αυξάνει το κόστος κατασκευής των εναλλακτών θερμότητας και πολλές φορές υπάρχει ο κίνδυνος μη βελτιστοποίησης της

διεργασίας, κάτι που οδηγεί στην υπερβολική επεξεργασία (= overprocessing) του προϊόντος.

Στο χώρο της επιστήμης, η θερμική επεξεργασία αυτών των τροφίμων αποτελεί αντικείμενο έρευνας κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Βέβαια, η βιβλιογραφική έρευνα που έγινε πριν τη συγγραφή της παρούσας εργασίας έδειξε ότι οι περισσότερες μελέτες εστιάζουν κυρίως στον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το φέρον ρευστό προς την επιφάνεια των σωματιδίων και χρησιμοποιούν αυθαίρετες τιμές για τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το τοίχωμα του εναλλάκτη προς το φέρον ρευστό ( P. N. Baptista et al. [15], H. S. Ramaswamy et al. [16], J. M. Mwangi et al. [17] ) . Επίσης, συνήθως τα αποτελέσματα των μελετών προκύπτουν από προσομοίωση της διεργασίας ( F. Chinesta et al. [18] ) και όχι από την επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων.

Σε ό,τι αφορά τη μελέτη της ροής του προϊόντος στον εναλλάκτη, αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το σχεδιασμό των διεργασιών είναι η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού και ο τρόπος με τον οποίο αυτή επηρεάζεται από την παρουσία των στερεών στο μίγμα. Αρκετές μελέτες έχουν εκπονηθεί και για το συγκεκριμένο αντικείμενο ( M. Gradeck et al. [6], M. Eesa & M. Barigou [7] ) και παρουσιάζουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Ωστόσο, σε όσα πειράματα έγιναν στα πλαίσια των μελετών αυτών χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα σωματίδια - είτε μεταλλικά είτε σφαιρίδια αλγινικού - και όχι πραγματικά τρόφιμα.

Από τα παραπάνω συμπεραίνει κανείς ότι παρουσιάζεται η ανάγκη για την πραγματοποίηση πειραμάτων με στόχο την ενδελεχή μελέτη των παραπάνω φαινομένων σε πραγματικές συνθήκες επεξεργασίας τροφίμων.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν επιχειρείται η θεωρητική θεμελίωση όλων των σταδίων μεταφοράς θερμότητας και των θεμάτων που σχετίζονται με τη ροή του προϊόντος σε αγωγό. Ο τελικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου που θα συνδέει τον προαναφερθέντα συντελεστή συναγωγής με τις πειραματικές παραμέτρους (ιξώδες του φέροντος ρευστού, συγκέντρωση σωματιδίων, σχήμα και μέγεθος σωματιδίων, ταχύτητα ροής). Το ίδιο ισχύει και για τη μελέτη της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού. Όσον αφορά το πειραματικό μέρος, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιούνται πειράματα θερμικής επεξεργασίας ρευστών διφασικών τροφίμων. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα ημιβιομηχανικής κλίμακας και τα τρόφιμα αποτελούνται από το φέρον ρευστό, που έχει ως βάση την κυτταρίνη, και τα στερεά σωματίδια, που είναι κύβοι καρότου ή μπιζέλια. Σε πειραματικό επίπεδο, η μελέτη εστιάζεται στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το τοίχωμα του αγωγού προς το φέρον ρευστό και στην πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

## 1.1. Γενικά

- **Θερμότητα** είναι η ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ δύο συστημάτων από τη θερμότερη προς την ψυχρότερη περιοχή εξαιτίας της μεταξύ τους διαφοράς θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια, τα εμπλεκόμενα συστήματα τείνουν σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, με αποκατάσταση μοιόμορφης θερμοκρασίας σε όλες τις περιοχές [11].
- Ο κλάδος της **Μεταφοράς Θερμότητας** μελετά τους μηχανισμούς με τους οποίους πραγματοποιείται η μεταφορά θερμότητας με στόχο την ανάπτυξη σχέσεων υπολογισμού του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Αυτό αποτελεί και το κρισιμότερο πρόβλημα στο σχεδιασμό διεργασιών από τη σκοπιά του μηχανικού. Η γνώση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας θα επιτρέψει τον υπολογισμό του μεγέθους (διαστάσεις) και του κόστους της συσκευής που απαιτείται για τη μεταφορά μιας ποσότητας θερμότητας σε συγκεκριμένο χρόνο [11].
- Θερμότητα μεταφέρεται πάντα όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μέσα σε ένα σώμα ή μεταξύ δύο σωμάτων. Αυτό που διαφοροποιείται είναι ο φυσικός μηχανισμός με τον οποίο πραγματοποιείται η μεταφορά. Διακρίνονται τρεις βασικοί **μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας**:
  - **Μεταφορά με Αγωγή:**  
Η μεταφορά θερμότητας οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις των μικροσκοπικών σωματιδίων, χωρίς μακροσκοπικά να παρατηρείται μετακίνηση υλικού από τη μία θέση του χώρου στην άλλη. Ο μηχανισμός αυτός είναι κυρίαρχος σε στερεά σώματα ή σε μη κινούμενα ρευστά.  
Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή αντιστοιχεί στην μεταφορά ορμής και μάζας με μοριακή διάχυση, δηλαδή λόγω της κίνησης των μορίων [11].
  - **Μεταφορά με Συναγωγή:**  
Η μεταφορά θερμότητας οφείλεται σε μετακίνηση μάζας ρευστού. Το ρευστό, όταν μετακινείται από μία θέση του χώρου σε άλλη, μεταφέρει μαζί του και την ενέργεια που περιέχει, επηρεάζοντας έτσι το ενεργειακό περιεχόμενο, και κατ' επέκταση τη θερμοκρασία, του χώρου στον οποίο καταλήγει.  
Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή αντιστοιχεί στη μεταφορά ορμής και μάζας λόγω της μετακίνησης «πακέτων» ύλης ρευστού [11].
  - **Μεταφορά με Ακτινοβολία:**  
Η ενέργεια μεταφέρεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ο μηχανισμός αυτός δεν παρουσιάζει καμία αντιστοιχία με άλλα

φαινόμενα μεταφοράς. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν μόνο ενέργεια, όχι ορμή και μάζα [11].

## 1.2. Εξισώσεις Ρυθμού

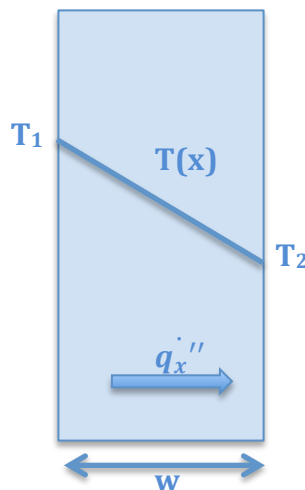
Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να παρουσιαστούν συνοπτικά οι σχέσεις που επιτρέπουν τον υπολογισμό του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Οι σχέσεις αυτές αποτελούν τη βάση της μεταφοράς θερμότητας και είναι γνωστές ως εξισώσεις ρυθμού.

### 1.2.1. Αγωγή

Παρατηρείται μακροσκοπικά ότι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι ανάλογος της διαφοράς θερμοκρασίας και αντιστρόφως ανάλογος του πάχους του υλικού μέσα από το οποίο πραγματοποιείται η μεταφορά. Η βασική μαθηματική σχέση που συνδέει τη ροή θερμότητας με τη βαθμίδα θερμοκρασίας δίδεται από το νόμο του Fourier για την αγωγή και έχει την ακόλουθη μορφή [11]:

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

όπου  $q_x''$  είναι η ροή θερμότητας στη διεύθυνση  $x$  και  $k$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Το αρνητικό πρόσημο εμφανίζεται στην (1), επειδή η θερμότητα άγεται από την περιοχή υψηλών προς την περιοχή χαμηλών θερμοκρασιών, δηλαδή κατά τη διεύθυνση της αρνητικής θερμοκρασιακής βαθμίδας.



Εικόνα 1: Αγωγή θερμότητας σε επίπεδο τοίχωμα

Έστω επίπεδο τοίχωμα μεγάλου μήκους και πλάτους που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, μέσω του οποίου μεταφέρεται θερμότητα με αγωγή. Όταν η θερμοκρασία στα όρια του συστήματος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, αυτό

βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση. Στις συνθήκες αυτές και χωρίς παραγωγή θερμότητας, η ροή θερμότητας είναι σταθερή. Αν ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $k$  δε μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, τότε η βαθμίδα θερμοκρασίας είναι σταθερή ποσότητα και η κατανομή της θερμοκρασίας σε όλο το πάχος του τοιχώματος είναι γραμμική [11]. Έτσι:

$$-\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_1 - T_2}{w} \quad (2)$$

Με βάση τη (2) η ροή θερμότητας γίνεται:

$$q_x'' = k \frac{T_1 - T_2}{w} \quad (3)$$

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή το σύνολο της θερμότητας που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου μέσα από τοίχωμα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά (Εικόνα 1) και με συνολική επιφάνεια  $A$ , είναι [11]:

$$q_x \dot{=} q_x'' A = kA \frac{T_1 - T_2}{w} \quad (4)$$

### **1.2.2. Συναγωγή**

Στα ρευστά, η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο με συναγωγή λόγω της κίνησής τους. Έτσι, η συναγωγή εμφανίζεται όταν ένα ρευστό ρέει λόγω επιβολής εξωτερικών αιτίων (εξαναγκασμένη κυκλοφορία) αλλά ακόμη και όταν ένα ρευστό θερμαίνεται ή ψύχεται «ακίνητο» σε έναν χώρο (φυσική κυκλοφορία, δηλαδή κίνηση των στρωμάτων του ρευστού λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας και κατ' επέκταση πυκνότητας) [11].

Βέβαια, ανεξάρτητα από τις ιδιαιτερότητες των μηχανισμών και την πολυπλοκότητα των παρατηρούμενων φαινομένων συναγωγής, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του δυναμικού, δηλαδή της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας με την οποία έρχεται σε επαφή [11]. Την έκφραση αυτή περιγράφει η ακόλουθη εξίσωση:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

όπου  $q''$  είναι η ροή θερμότητας,  $T_s$  η θερμοκρασία της επιφάνειας και  $T_\infty$  η θερμοκρασία του ρευστού. Ο παράγων αναλογίας  $h$  ονομάζεται συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή ή συντελεστής συναγωγής. Η εξίσωση (5) προτάθηκε από τον Isaac Newton και είναι γνωστή ως νόμος ψύξης του Newton [11].

Η εξίσωση (5) έχει τοπική εφαρμογή, γιατί η θερμοκρασιακή βαθμίδα μεταβάλλεται λόγω ανάπτυξης του οριακού στρώματος του ρευστού στην επιφάνεια και αυτό μεταβάλλει τη ροή θερμότητας και τον συντελεστή

συναγωγής, ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Ωστόσο, όταν τα  $q''$  και  $h$  αντιπροσωπεύουν τη μέση ροή θερμότητας και τον μέσο συντελεστή συναγωγής στην επιφάνεια αντίστοιχα, η (5) μπορεί να εφαρμοστεί για όλη την επιφάνεια [11]. Ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια εμβαδού  $A$  στο ρευστό υπολογίζεται τότε από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (6)$$

### **1.2.3. Ακτινοβολία**

Θερμική ακτινοβολία εκπέμπεται και απορροφάται από όλα τα στερεά σώματα, σε όποια θερμοκρασία κι αν βρίσκονται. Ακτινοβολία εκπέμπουν και απορροφούν επίσης τα υγρά και ορισμένα αέρια. Η μέγιστη θερμική ισχύς που είναι δυνατό να ακτινοβολεί ένα σώμα ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από το νόμο των Stefan – Boltzmann [11]:

$$q_b'' = \sigma T_s^4 \quad (7)$$

και η ολική θερμική ισχύς που εκπέμπει μια επιφάνεια εμβαδού  $A$ :

$$\dot{q}_b = \sigma AT_s^4 \quad (8)$$

όπου  $T_s$  η απόλυτη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του σώματος και  $\sigma$  η σταθερά των Stefan – Boltzmann [11].

Ένα σώμα που εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή θερμική ισχύ ονομάζεται μέλαν σώμα [11]. Η θερμική ισχύς που ακτινοβολεί μία επιφάνεια είναι συνήθως μικρότερη από αυτή του μέλανος σώματος και δίνεται από την εξίσωση:

$$q'' = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (9)$$

όπου  $\epsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής, που παίρνει τιμές από 0 έως 1 και εκφράζει την “απόδοση” σε θερμική εκπομπή της επιφάνειας σε σχέση με την εκπομπή του μέλανος σώματος [11].

Συνήθως στις εφαρμογές δεν ενδιαφέρει ο ρυθμός εκπομπής αλλά ο ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα σώμα και εκείνης που απορροφά. Στην περίπτωση της ανταλλαγής θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ μιας επιφάνειας και του περιβάλλοντος, το περιβάλλον μπορεί να θεωρηθεί ως μέλαν σώμα το οποίο απορροφά όλη την εκπεμπόμενη θερμότητα από την επιφάνεια του σώματος [11]. Έτσι, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια στο περιβάλλον δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{q} = A\epsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (10)$$

όπου  $T_{sur}$  είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος γύρω από την επιφάνεια του σώματος.



Η ίδια επιφάνεια μπορεί ταυτόχρονα με την ακτινοβολία να ανταλλάσσει θερμότητα και με μηχανισμό συναγωγής. Οι μηχανισμοί μεταφοράς με συναγωγή και ακτινοβολία δρουν παράλληλα. Έτσι, το συνολικό ποσό θερμότητας που μεταφέρεται υπολογίζεται ως εξής [11]:

$$\dot{q} = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{conv} = A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) + hA(T_s - T_\infty) \quad (11)$$

Για ομοιομορφία στους υπολογισμούς, αλλά και για να είναι ευκολότερη η σύγκριση της συνεισφοράς των δύο μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας, χρησιμοποιείται ένας πλασματικός συντελεστής μεταφοράς με ακτινοβολία, αντίστοιχος του συντελεστή μεταφοράς με συναγωγή, που ορίζεται ως εξής [11]:

$$\dot{q}_{rad} = h_r A(T_s - T_{sur}) \quad (12)$$

Από το συνδυασμό των σχέσεων (10) και (12) προκύπτει ότι ο συντελεστής μεταφοράς με ακτινοβολία είναι ίσος με:

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s^2 + T_{sur}^2)(T_s + T_{sur}) \quad (13)$$

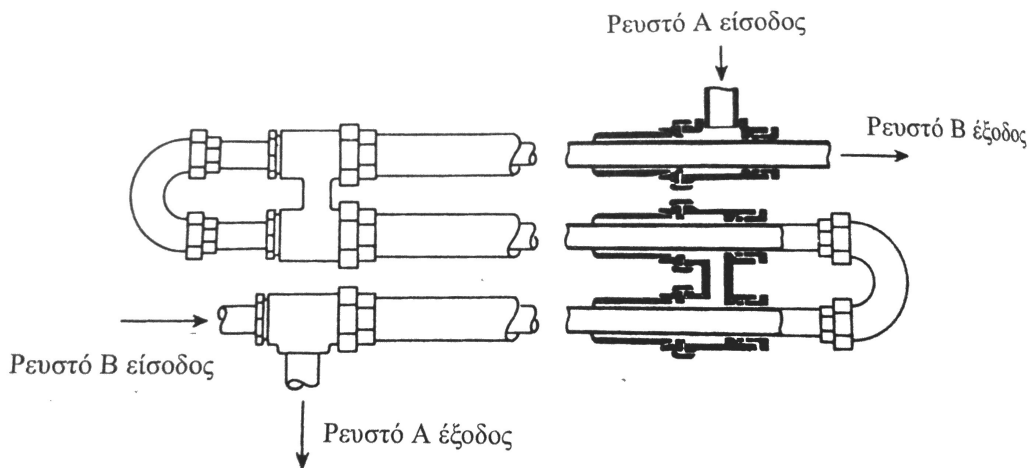
και το συνολικό ποσό θερμότητας που ανταλλάσσεται δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{q} = h_r A(T_s - T_{sur}) + hA(T_s - T_\infty) \quad (14)$$

### 1.3. Εναλλάκτης Θερμότητας Διπλού Σωλήνα

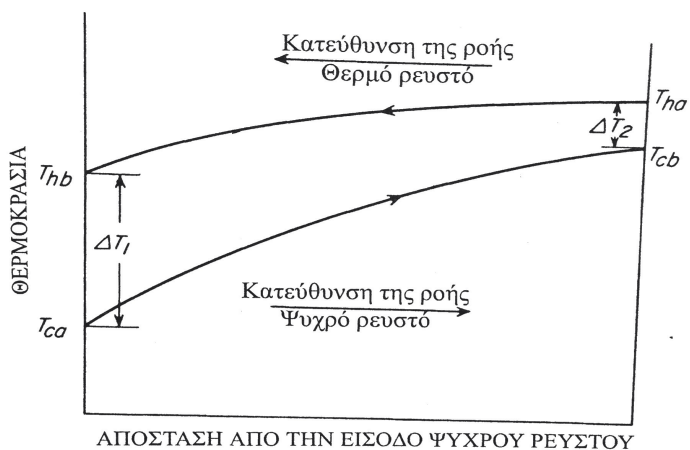
Η μεταφορά θερμότητας είναι πιθανότατα η πιο διαδεδομένη διεργασία στο χώρο της βιομηχανίας επεξεργασίας τροφίμων και της χημικής βιομηχανίας. Εξοπλισμός όπως αποστειρωτές και παστεριωτές στη βιομηχανία τροφίμων και αποστακτικές στήλες στη χημική βιομηχανία εμπεριέχουν στη λειτουργία τους θέρμανση και ψύξη των χρησιμοποιούμενων ρευστών. Ως θερμαντικό μέσο χρησιμοποιείται θερμό νερό ή ατμός και ως ψυκτικό μέσο ψυχρό νερό, που προέρχεται συνήθως από βοηθητική παροχή.

Στην παρούσα εργασία, το βασικότερο τμήμα της μηχανής δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας διπλού σωλήνα. Αυτός ο τύπος εναλλάκτη είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος στις διεργασίες επεξεργασίας τροφίμων και η επιλογή του στα συγκεκριμένα πειράματα είναι αναμενόμενη, καθώς τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που θα προκύψουν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν άμεσα προς βελτίωση της επεξεργασίας τυποποιημένων τροφίμων. Στην προκειμένη περίπτωση, το προϊόν ρέει στον εσωτερικό αγωγό και θερμαίνεται (ή ψύχεται) με τη χρήση νερού ως μέσο το οποίο ρέει κατ'αντιρροή με το προϊόν. Ο εναλλάκτης είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα τύπου AISI 316 και το εσωτερικό τοίχωμα των αγωγών είναι λείο (χωρίς μοτίβο αυλακώσεων).

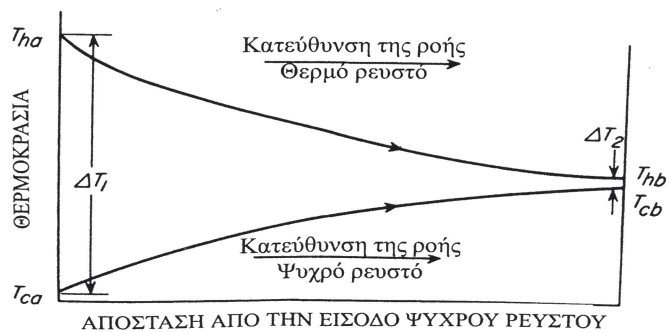


Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα [8]

Στην παραπάνω εικόνα δίνεται σχηματικά η λειτουργία του εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται μεταξύ των ρευστών A και B τα οποία ρέουν στους αγωγούς (το B στον εσωτερικό και το A στον εξωτερικό) κατ' αντιρροή. Ουσιαστικά, μεταφέρεται θερμότητα από το θερμότερο προς το ψυχρότερο διαμέσου του εσωτερικού τοιχώματος των αγωγών [8].



(α)



(β)

Εικόνα 3: Θερμοκρασίες ρευμάτων σε (α) ροή κατ' αντιρροή και (β) παράλληλη ροή [8]

Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας των δύο ρευμάτων συναρτήσει του μήκους του εναλλάκτη για την περίπτωση της ροής κατ' αντιρροή (α) και της παράλληλης ροής (β). Με  $T_{ha}$  και  $T_{hb}$  συμβολίζεται η αρχική και τελική θερμοκρασία, αντίστοιχα, του θερμού ρεύματος και με  $T_{ca}$  και  $T_{cb}$  η αρχική και τελική θερμοκρασία, αντίστοιχα, του ψυχρού ρεύματος [8].

Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα σε έναν εναλλάκτη διπλού σωλήνα είτε το προϊόν είναι ένα καθαρό μονοφασικό ρευστό είτε είναι ένα διφασικό ρευστό που αποτελείται από το φέρον ρευστό και τα σωματίδια. Επίσης, θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις που περιγράφουν τα εν λόγω φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας.

#### 1.4. Φαινόμενα Μεταφοράς Θερμότητας – Μονοφασικό Ρευστό

Έστω ότι μονοφασικό ρευστό υφίσταται θέρμανση σε εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα. Το προϊόν ρέει στον εσωτερικό αγωγό και θερμαίνεται με τη χρήση θερμού νερού ως θερμαντικό μέσο το οποίο ρέει στον εξωτερικό αγωγό. Η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμαντικό μέσο προς το προϊόν διαμέσου του τοιχώματος του αγωγού το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο ρευστών. Αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα μεταφέρεται μέσω κάποιων «στρωμάτων» υλικού με τον μηχανισμό της συναγωγής (σε εξαναγκασμένη κυκλοφορία μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας του αγωγού) και αγωγής (διαμέσου του χαλύβδινου τοιχώματος του αγωγού).

Στο σημείο αυτό θα αναλυθεί το κάθε στάδιο που περνά η θερμότητα για να μεταφερθεί από το θερμό στο ψυχρό ρευστό.

##### 1. Από το (ρευστό) θερμαντικό μέσο προς την εξωτερική επιφάνεια του αγωγού:

Είναι το οριακό στρώμα ρευστού που δημιουργείται στο εξωτερικό τοίχωμα του εσωτερικού αγωγού (από την πλευρά του θερμαντικού μέσου δηλαδή) του εναλλάκτη. Καθώς η θερμότητα μεταφέρεται με το μηχανισμό της συναγωγής από το θερμό νερό προς την επιφάνεια του αγωγού, πρέπει να διασχίσει το οριακό στρώμα ρευστού που σχηματίζεται εκεί [11]. Η ροή θερμότητας περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$q''_M = h_{M,W} \cdot (T_M - T_{W,OUT}) \quad (15)$$

Και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας – υπό την παραδοχή ότι η συντελεστής συναγωγής  $h_{M,W}$  είναι σταθερός και ίσος με τον μέσο συντελεστή συναγωγής για το οριακό στρώμα ρευστού – δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_M = h_{M,W} \cdot A_{OUT} \cdot (T_M - T_{W,OUT}) \quad (16)$$

## 2. Διαμέσου του τοιχώματος:

Η θερμότητα μεταφέρεται από την εξωτερική προς την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού μέσω του τοιχώματος αυτού με τον μηχανισμό της αγωγής [11]. Η επόμενη εξίσωση περιγράφει τη ροή θερμότητας διαμέσου του τοιχώματος κυλινδρικού αγωγού:

$$q_W'' = k_w \cdot \frac{1}{r \cdot \ln\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)} \cdot (T_{W,OUT} - T_{W,IN}) \quad (17)$$

Είναι εμφανές ότι η ροή θερμότητας εξαρτάται από την ακτίνα – και κατ' επέκταση τη διάμετρο – του αγωγού. Ωστόσο, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι σταθερός και περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_W = q_W'' \cdot A = k_w \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)} \cdot (T_{W,OUT} - T_{W,IN}) \quad (18)$$

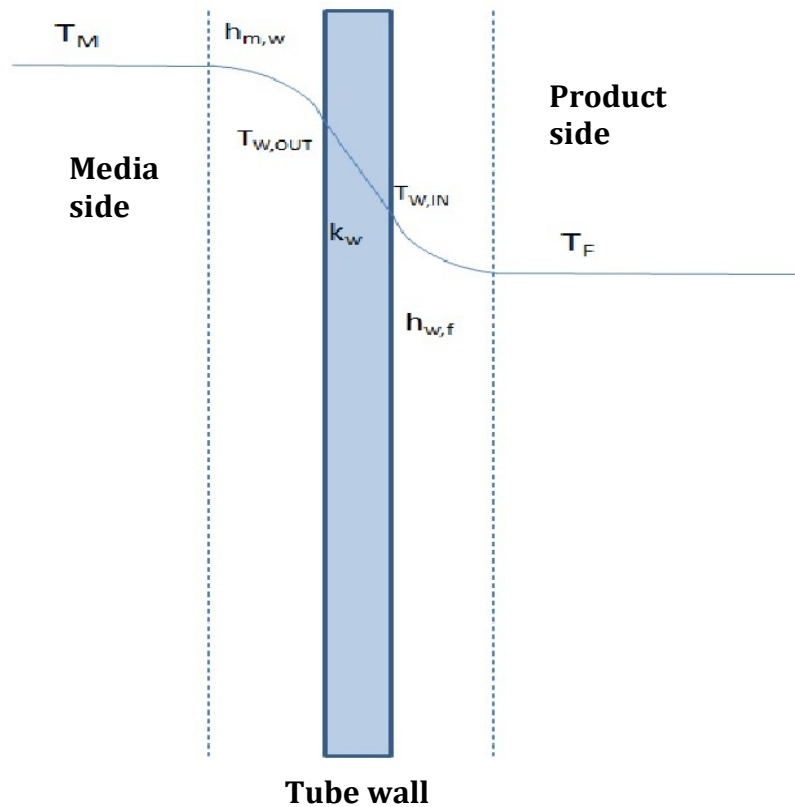
## 3. Από την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού προς το (ρευστό) προϊόν:

Είναι το οριακό στρώμα ρευστού που δημιουργείται στο εσωτερικό τοίχωμα του εσωτερικού αγωγού (από την πλευρά του προϊόντος δηλαδή) του εναλλάκτη. Καθώς η θερμότητα μεταφέρεται με το μηχανισμό της συναγωγής από την επιφάνεια του αγωγού προς το ρευστό προϊόν, πρέπει να διασχίσει το οριακό στρώμα ρευστού που σχηματίζεται εκεί [11]. Η ροή θερμότητας περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$q_F'' = h_{W,F} \cdot (T_{W,IN} - T_F) \quad (19)$$

Και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας – υπό την παραδοχή ότι η συντελεστής συναγωγής  $h_{W,F}$  είναι σταθερός και ίσος με τον μέσο συντελεστή συναγωγής για το οριακό στρώμα ρευστού – δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_F = h_{W,F} \cdot A_{IN} \cdot (T_{W,IN} - T_F) \quad (20)$$



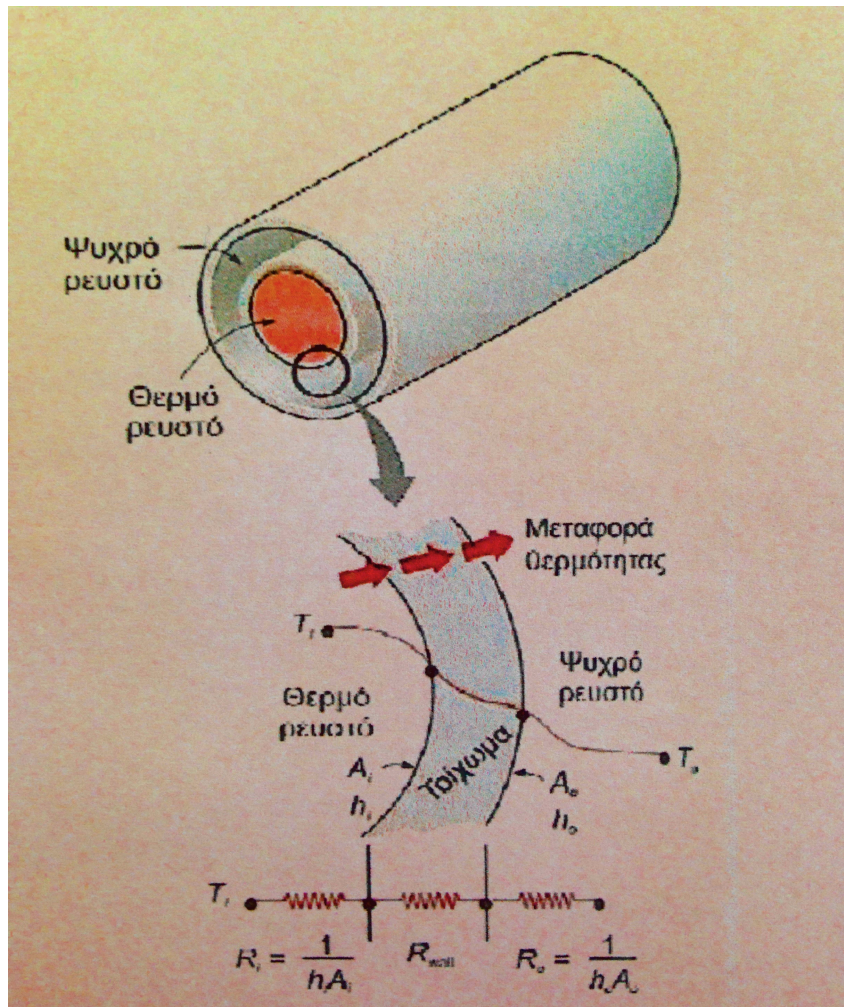
Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση της "διαδρομής" που ακολουθεί η θερμότητα κατά τη μεταφορά της από το θερμαντικό μέσο (αριστερά) προς το προϊόν (δεξιά)

Από την παραπάνω εικόνα δίνεται μια συνολική άποψη της μεταφοράς θερμότητας από το θερμό ρεύμα προς το ψυχρό. Αντιμετωπίζοντας, λοιπόν, τη μεταφορά θερμότητας συνολικά, οι σχέσεις που ακολουθούν συνδέουν τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας των επιμέρους σταδίων, που αναλύθηκαν ανωτέρω, με τον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $U$  που χαρακτηρίζει το σύστημα στο σύνολό του.

$$\begin{aligned}
 Q_{TOT} &= U \cdot A_{mean} \cdot (T_M - T_F) \\
 &= h_{M,W} \cdot A_{OUT} \cdot (T_M - T_{W,OUT}) \\
 &= \frac{k_W \cdot 2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left(\frac{r_{OUT}}{r_{IN}}\right)} \cdot (T_{W,OUT} - T_{W,IN}) \\
 &= h_{W,F} \cdot A_{IN} \cdot (T_{W,IN} - T_F) \quad (21)
 \end{aligned}$$

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας συνδέονται με μια εξίσωση που είναι ανάλογη της εξίσωσης που περιγράφει την παράλληλη σύνδεση ηλεκτρικών αντιστάσεων.

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{A_{OUT}} \cdot \frac{1}{h_{M,W}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{OUT}}{r_{IN}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_W} + \frac{1}{A_{IN}} \cdot \frac{1}{h_{W,F}} \quad (22)$$



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση του ανάλογου της ηλεκτρικής αντίστασης που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται μέρος ενός εναλλάκτη διπλού σωλήνα με το θερμό ρευστό να ρέει στον εσωτερικό αγωγό. Αυτό που επισημαίνεται στο σχήμα αυτό είναι η σύνδεση των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας κατ' αναλογία της σύνδεσης ηλεκτρικών αντιστάσεων.

### 1.5. Φαινόμενα Μεταφοράς Θερμότητας - Διφασικό Ρευστό

Στην περίπτωση αυτή, το προϊόν είναι ένα ρευστό που περιέχει στερεά σωματίδια. Αυτό το είδος τροφίμου έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης και έρευνας στο παρελθόν, ενώ η παρουσία των σωματιδίων στο ρευστό τρόφιμο παραμένει ένα άλυτο ζήτημα για τις διεργασίες θερμικής επεξεργασίας των τροφίμων αυτών ακόμη και σήμερα.

Τα στάδια που περνά η θερμότητα κατά τη μεταφορά της από τον εξωτερικό αγωγό (θερμαντικό μέσο) προς τον εσωτερικό (διφασικό προϊόν) περιγραφικά είναι τα εξής:

- i. Από το ρευστό θερμαντικό μέσο προς την εξωτερική επιφάνεια του τοιχώματος του εσωτερικού αγωγού
- ii. Διαμέσου του τοιχώματος του εσωτερικού αγωγού
- iii. Από την εσωτερική επιφάνεια του τοιχώματος του εσωτερικού αγωγού προς το φέρον ρευστό του διαφασικού προϊόντος
- iv. Από το φέρον ρευστό προς την επιφάνεια του κάθε σωματιδίου του προϊόντος
- v. Από την επιφάνεια του σωματιδίου προς το θερμικό κέντρο αυτού

Από την εξέταση της βιβλιογραφίας που έχει δημοσιευτεί στο συγκεκριμένο αντικείμενο προκύπτει ότι στις περισσότερες μελέτες το βασικό στοιχείο έρευνας είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας **από το φέρον ρευστό προς την επιφάνεια των σωματιδίων**, ενώ στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας **από το τοίχωμα του αγωγού προς το φέρον ρευστό** δίνεται συνήθως αυθαίρετα μια σταθερή τιμή. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν ξεχωριστά οι δύο αυτοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας. Παρόλο που η παρούσα εργασία δεν εξετάζει πειραματικά τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα στα σωματίδια, κρίνεται σκόπιμο να δοθεί μια σφαιρική θεωρητική περιγραφή των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας που συμβαίνουν στον εναλλάκτη.

#### **1.5.1. Μεταφορά Θερμότητας από το Τοίχωμα Αγωγού προς το Φέρον Ρευστό του προϊόντος**

Μία από τις λίγες μελέτες που ασχολούνται με τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του τοιχώματος του αγωγού και του φέροντος ρευστού εκπονήθηκε από τον **J. Sannervik** το 1995. Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων ένας εναλλάκτης διπλού σωλήνα Spiraflo. Ο εναλλάκτης αυτός αποτελούνταν από 4 αγωγούς: ένας για θέρμανση του προϊόντος με χρήση θερμού νερού, ένας για ψύξη του προϊόντος με χρήση ψυχρού νερού και δύο χρησιμοποιούνταν ως αγωγοί συγκράτησης, όπου το προϊόν δεν υφίσταται θερμική επεξεργασία ώστε τα σωματίδια (που θερμαίνονται πιο αργά από το ρευστό) να αποκτήσουν την ίδια σχεδόν θερμοκρασία με το φέρον ρευστό. Η εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια των αγωγών διαθέτει μοτίβο αυλακώσεων (corrugated tubes). Η υγρή φάση του προϊόντος (φέρον ρευστό) είναι ένα διάλυμα αμύλου περιεκτικότητας 4%, το οποίο είναι ψευδοπλαστικό ρευστό και η συμπεριφορά του περιγράφεται ικανοποιητικά από το νόμο των Ostwald – De Waele. Τα σωματίδια κατασκευάστηκαν από αλγινικό, έχουν μέση διάμετρο 5,6 mm και οι συγκεντρώσεις σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν στο σχηματισμό του διφασικού προϊόντος είναι 0%, 10%, 20% και 30% w/w. Η θερμοκρασία του φέροντος ρευστού μετράται με θερμοζεύγη, τα οποία είναι συνδεδεμένα στον αγωγό στην είσοδο και έξοδο των τμημάτων θέρμανσης και ψύξης. [10]

Σύμφωνα με την προσέγγιση της μελέτης αυτής – και χρησιμοποιώντας τους ακριβείς συμβολισμούς της – η θερμότητα  $H$  που λαμβάνει το προϊόν ισούται με τη θερμότητα που παρέχεται από το θερμαντικό μέσο (που είναι θερμό νερό), υπό την παραδοχή ότι οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον είναι μηδαμινές. [10]

$$H = M_p \cdot \sum_{H_p}^{c_{pp}} \Delta_1 = M_w \cdot \sum_{H_w}^{c_{pw}} \Delta_2 \quad (23)$$

Και ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $k_h$  υπολογίζεται από την εξής εξίσωση:

$$H = k_h \cdot A \cdot \Delta T_{ln} \quad (24)$$

Όπου η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας (LMTD) ορίζεται ως εξής:

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (25)$$

Γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου για το προϊόν και το θερμαντικό (ή ψυκτικό) μέσο υπολογίζεται εύκολα η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας. Από την εξίσωση (23) υπολογίζεται η συνολική παρεχόμενη θερμότητα και, έπειτα, από την εξίσωση (24) ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Τέλος, για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού προς το φέρον ρευστό χρησιμοποιήθηκε η γνωστή εξίσωση (22) που εξηγήθηκε ανωτέρω.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη αυτή είναι τα ακόλουθα:

- Η αύξηση της μαζικής παροχής του προϊόντος επιφέρει αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ τοιχώματος και φέροντος ρευστού.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων στο προϊόν επιφέρει αύξηση του εξεταζόμενου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Συγκεκριμένα, μία αύξηση της συγκέντρωσης σωματιδίων από 0% σε 10% w/w παρουσίασε αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά 100%, ενώ όταν η συγκέντρωση σωματιδίων αυξήθηκε από 10% σε 20% w/w και από 20% σε 30% w/w η αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας έφτασε το 25%.
- Μία πιθανή εξήγηση της επίδρασης της συγκέντρωσης σωματιδίων στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του τοιχώματος του αγωγού και του φέροντος ρευστού είναι ότι τα σωματίδια σαρώνουν τα τοιχώματα του αγωγού μειώνοντας έτσι το πλάτος του οριακού στρώματος ρευστού. Αυτό θα εξηγούσε άμεσα την αύξηση του αντίστοιχου συντελεστή συναγωγής.

Όσον αφορά την προσέγγιση που επιχειρείται στην παρούσα εργασία, όπως θα αναπτυχθεί λεπτομερώς στα επόμενα κεφάλαια, η θερμοκρασία του φέροντος



ρευστού του προϊόντος και του θερμαντικού μέσου μετράται σε 4 σημεία (είσοδος, έξοδος και δύο ενδιάμεσα ισοαποστασιακά σημεία) κατά μήκος του εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα. Ο τελικός στόχος είναι να υπολογιστεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του τοιχώματος του αγωγού και του φέροντος ρευστού. Επίσης, είναι σημαντικό να εξεταστεί η πιθανότητα εξαγωγής ενός μοντέλου που θα προβλέπει την τιμή του εν λόγω συντελεστή στηριζόμενο στις πειραματικές παραμέτρους.

Ο συντελεστής συναγωγής, λοιπόν, μεταξύ της επιφάνειας του αγωγού και του φέροντος ρευστού θα υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (22). Στην εξίσωση αυτή, όλοι οι υπόλοιποι όροι μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση των μετρήσεων της θερμοκρασίας. Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί αναλυτικά η πορεία υπολογισμού του κάθε όρου της εξίσωσης (22) ξεχωριστά ώστε να επιτευχθεί ο τελικός στόχος των υπολογισμών.

### **Συνολικός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας U**

Το ισοζύγιο ενέργειας για τον όγκο ελέγχου του εσωτερικού αγωγού μεταξύ δύο μετρητών θερμοκρασίας περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{aligned} Q_{TOT} &= (Q_{media,in} - Q_{media,out}) - Q_{loss} \\ &= (Q_{fluid,out} - Q_{fluid,in}) + (Q_{particles,out} - Q_{particles,in}) \\ \rightarrow Q_{TOT} &= Q_M - Q_{loss} = Q_F + Q_P \end{aligned} \quad (26)$$

Το ενεργειακό φορτίο του θερμαντικού μέσου, του φέροντος ρευστού και των σωματιδίων δίνεται από τις επόμενες σχέσεις:

$$Q_M = \dot{m}_M \cdot C_{p,M} \cdot (T_{M,in} - T_{M,out}) \quad (27)$$

$$Q_F = \dot{m}_F \cdot C_{p,F} \cdot (T_{F,out} - T_{F,in}) \quad (28)$$

$$Q_P = \dot{m}_P \cdot C_{p,P} \cdot (T_{P,out} - T_{P,in}) \quad (29)$$

Το συνολικό ποσό θερμότητας που παρέχεται στο σύστημα δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_{TOT} = U \cdot A_{mean} \cdot \Delta T_{ln} \quad (30)$$

Θεωρώντας μηδαμινές απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον και αντικαθιστώντας το ενεργειακό φορτίο του θερμαντικού μέσου και το συνολικό ποσό θερμότητας από τις σχέσεις (27) και (30) στην εξίσωση (26), ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας U μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$U = \frac{\dot{m}_M \cdot C_{p,M} \cdot (T_{M,in} - T_{M,out})}{A_{mean} \cdot \Delta T_{ln}} \quad (31)$$

Όπου η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας ορίζεται ως εξής:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{M,out} - T_{F,in}) - (T_{M,in} - T_{F,out})}{\ln \left( \frac{T_{M,out} - T_{F,in}}{T_{M,in} - T_{F,out}} \right)} \quad (32)$$

### Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας μεταξύ Θερμαντικού Μέσου και Εξωτερικού Τοιχώματος του αγωγού

Στις εφαρμογές των εναλλακτών διπλού σωλήνα συνηθίζεται η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μεταξύ ρευστού και τοιχώματος να περιγράφεται από μια σχέση που συνδέει τον αριθμό Nusselt, ο οποίος εκφράζει τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας στο οριακό στρώμα του ρευστού, με τους αριθμούς Prandtl και Reynolds, οι οποίοι εκφράζουν τις φυσικές ιδιότητες και τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ρευστού. Για την περίπτωση της ροής του θερμού νερού στον εξωτερικό αγωγό του εναλλάκτη υπάρχουν στη βιβλιογραφία τέτοιου είδους εμπειρικές σχέσεις.

Στην προκειμένη περίπτωση η σχέση των αδιάστατων αριθμών, που χρησιμοποιήθηκε, αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις θερμοκρασίας που λήφθηκαν διεξάγοντας πειράματα αναφοράς με νερό και στους δύο αγωγούς του εναλλάκτη διπλού σωλήνα. Η σχέση αυτή, λοιπόν, περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Nu = 0,0090385 \cdot Re^{0,895} \cdot Pr^X \quad (33)$$

Όπου

$$X = \frac{1}{A} \cdot e^{\frac{Sigma}{Pr+B}} \quad (34)$$

Και

$$\begin{aligned} A &= 3 \\ B &= 27 \\ Sigma &= 9 \end{aligned}$$

Οι αδιάστατοι αριθμοί Nusselt, Prandtl και Reynolds για τη ροή του θερμαντικού μέσου στον εξωτερικό αγωγό του εναλλάκτη ορίζονται ως εξής:

$$Re = \frac{\rho_{water} \cdot u \cdot D_H}{\mu_{water}} \quad (35)$$

$$Pr = \frac{C_{p,water} \cdot \mu_{water}}{k_{water}} \quad (36)$$

$$Nu = \frac{h_{M,W} \cdot D_H}{k_{water}} \quad (37)$$

Και η υδραυλική διάμετρος  $D_H$  που χρησιμοποιείται στις παραπάνω εξισώσεις ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$D_H = \text{inner diameter of outer tube} - \text{outer diameter of inner tube} = d_{out} - d_{in} \quad (38)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που παρατέθηκαν παραπάνω, ο συντελεστής συναγωγής  $h_{M,W}$  για το θερμαντικό μέσο μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια.

### **Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας του Τοιχώματος του αγωγού**

Το τοίχωμα που χωρίζει τους δύο αγωγούς του εναλλάκτη διπλού σωλήνα είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα τύπου AISI 316 και η θερμική αγωγιμότητα του συγκεκριμένου υλικού είναι διαθέσιμη στη βιβλιογραφία. [11] Από τις τιμές που συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία προέκυψε η ακόλουθη εξίσωση που συνδέει τη θερμική αγωγιμότητα του τοιχώματος με τη θερμοκρασία (βλ. Παράρτημα 2).

$$k_w = -2 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 0,017 \cdot T + 12,997 \quad (39)$$

Αφού υπολογιστούν όλοι οι παραπάνω όροι, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (22) είναι εύκολο να υπολογιστεί ο συντελεστής συναγωγής για το φέρον ρευστό του προϊόντος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, δεδομένου πως οι φυσικές ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται άμεσα από τη θερμοκρασία, στον υπολογισμό τους η θερμοκρασία που χρησιμοποιείται είναι η μέση θερμοκρασία που προκύπτει από τις μετρήσεις των δύο μετρητών που βρίσκονται στην είσοδο και την έξοδο του εναλλάκτη. Επίσης, οι φυσικές ιδιότητες του διφασικού προϊόντος προκύπτουν ως σταθμισμένος μέσος των φυσικών ιδιοτήτων της υγρής και της στερεής φάσης. Ακόμη, οι φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία που έχουν μέσα στη δεξαμενή (Slurry Tank). Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμοκρασία μέσα στη δεξαμενή είναι η μοναδική γνωστή θερμοκρασία για τα σωματίδια και θεωρείται ότι τα σωματίδια μεταβάλλουν τη θερμοκρασία τους με πολύ χαμηλότερο ρυθμό σε σχέση με το φέρον ρευστό.

Τέλος, αφού υπολογιστεί ο συντελεστής συναγωγής για το φέρον ρευστό  $h_{W,F}$  για το κάθε πείραμα ξεχωριστά, υπολογίζονται και οι αδιάστατοι αριθμοί που προαναφέρθηκαν και εξετάζεται αν υπάρχει κάποια σχέση που τους συνδέει.

## 1.5.2. Μεταφορά Θερμότητας από το Φέρον Ρευστό προς την Επιφάνεια των Σωματιδίων

### 1. Βιβλιογραφική μελέτη

Αρκετές μελέτες, που επικεντρώνονται στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στα σωματίδια και το φέρον ρευστό που τα περιβάλλει, έχουν εξεταστεί και οι πιο σχετικές – με την παρούσα εργασία – από αυτές θα παρουσιαστούν στο σημείο αυτό.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αποτελεί μία κοινώς χρησιμοποιούμενη παράμετρο στην κλασική μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας, η οποία περιγράφει τη ροή θερμότητας. Στην προκειμένη περίπτωση, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας που εξετάζεται περιγράφει τη ροή θερμότητας από το φέρον ρευστό του διφασικού προϊόντος προς την επιφάνεια των σωματιδίων και συμβολίζεται με  $h_{fp}$ . Το μοντέλο της μεταφοράς θερμότητας, που εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση, περιέχει επίσης τους όρους που αντιστοιχούν στην επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας  $A$  και στην κινούσα δύναμη που είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο υλικών,  $\Delta T$ .

$$heat\ flux\ (W) = h_{fp}A\Delta T \quad (40)$$

Ο Baptista et al. [15] το 1997 παρουσίασε μία επισκόπηση ποικίλων παλαιότερων μελετών στη μεταφορά θερμότητας από διάφορους συγγραφείς. Συχνά παραπέμπει σε αρκετές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τους Zitoun και Sastry, οι οποίες αναφέρουν μετρήσεις του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ σωματιδίων και φέροντος ρευστού υπό συνθήκες στρωτής ροής. Πιο συγκεκριμένα, κύβοι αλουμινίου μεταφέρονται με τη βοήθεια διαλύματος CMC (= CarboxyMethyl Cellulose), που αποτελεί το φέρον ρευστό, με τον αριθμό Reynolds να κυμαίνεται από 14,5 έως 506,6 και τον μετρηθέντα συντελεστή συναγωγής  $h_{fp}$  να κυμαίνεται από 268 έως και 2010 W/m<sup>2</sup>K.

Ο H. S. Ramaswamy et al. [16] το 2000 δημοσιεύει αποτελέσματα από 300 πειράματα, κατά τα οποία μελετά τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα σε κύβους αλουμινίου μεγέθους 19 – 25 mm και φέροντος ρευστού το οποίο είναι υδατικά διαλύματα CMC με περιεκτικότητα που κυμαίνεται σε εύρος 0 – 1%. Ο συντελεστής συναγωγής  $h_{fp}$  κυμαίνεται από 650 έως και 2660 W/m<sup>2</sup>K.

Ο Mwangi et al. [17] το 1993 μέσα από πειράματα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι εν λόγω συντελεστής συναγωγής  $h_{fp}$  για σφαιρίδια από PMMA (polymethyl methacrylate), τα οποία μεταφέρονται με τη βοήθεια διαλύματος γλυκερίνης υπό συνθήκες στρωτής ροής ( $73,1 < Re < 369,4$ ), κυμαίνεται από 58,3 έως και 1301,3 W/m<sup>2</sup>K. Επίσης, ο συγγραφέας συμπεραίνει ότι η αύξηση της συγκέντρωσης σωματιδίων (0 – 3,2 %v/v) και του λόγου των διαμέτρων σωματιδίου – αγωγού επιφέρει σημαντική αύξηση του συντελεστή συναγωγής  $h_{fp}$ . Ο λόγος διαμέτρων σωματιδίου – αγωγού κυμαίνεται στο εύρος 0,16 – 0,25. Τα σωματίδια είναι σχεδόν επιπλέοντα με μέγεθος που κυμαίνεται στο εύρος 8 – 12 mm. Τέλος, τα πειράματα δείχνουν ότι έστω και μικρή διαφορά στην

πυκνότητα μεταξύ των σωματιδίων και του φέροντος ρευστού έχει επίδραση στο χρόνο παραμονής των σωματιδίων στον αγωγό συγκράτησης (=holding tube), καθώς τα σωματίδια καθιζάνουν γρήγορα αν είναι πυκνότερα από το ρευστό.

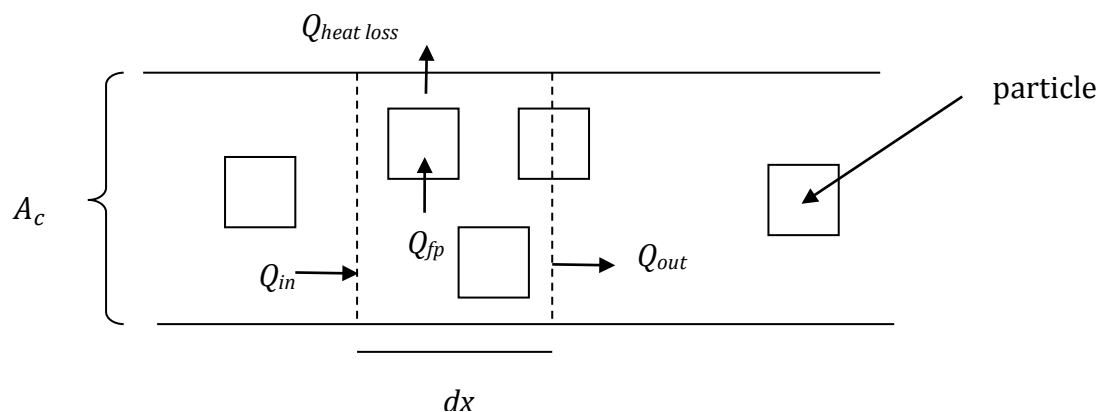
## 2. Μαθηματική θεμελίωση

Στη συγκεκριμένη εργασία δεν αξιολογείται η μεταφορά θερμότητας μεταξύ ρευστού και σωματιδίων στο πειραματικό μέρος. Παρόλα αυτά είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να περιγραφεί η αντιμετώπιση και αυτής της υποθετικής περίπτωσης, ώστε να αποδοθεί μια σφαιρική εικόνα της διεργασίας.

Δύο μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το φέρον ρευστό προς την επιφάνεια των σωματιδίων για την περίπτωση της ροής διαφασικού ρευστού τροφίμου σε κυλινδρικό αγωγό, και στην προκειμένη περίπτωση τον Αγωγό Συγκράτησης (= Holding Tube). Και τα δύο μοντέλα προέκυψαν από το ίδιο ισοζύγιο ενέργειας. Το πρώτο μοντέλο που θα αναλυθεί είναι γενικό, ενώ το δεύτερο είναι μια απλοποίηση του πρώτου και ισχύει μόνο για συγκεκριμένες συνθήκες.

### Ισοζύγιο Ενέργειας

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται σχηματικά το ισοζύγιο ενέργειας της υγρής φάσης στον αγωγό. Η εικόνα επικεντρώνεται σε έναν στοιχειώδη όγκο ελέγχου  $dV = A_c dx$ , ο οποίος περιέχει την υγρή φάση που είναι το φέρον ρευστό και τη στερεή φάση που είναι τα σωματίδια.



Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση στοιχειώδους όγκου  $dV$  του αγωγού. Η ροές θερμότητας από και προς την υγρή φάση συμβολίζονται με  $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$  και  $Q_{fp}$

Το ισοζύγιο θερμότητας για το **φέρον ρευστό μόνο** περιγράφεται από την εξίσωση που ακολουθεί, όπου  $Q_{acc}$  είναι η συσσώρευση θερμότητας στον στοιχειώδη όγκο του αγωγού,  $Q_{in}$  η εισροή θερμότητας στον στοιχειώδη όγκο του αγωγού μέσω του ρευστού,  $Q_{out}$  η εκροή θερμότητας από τον στοιχειώδη όγκο του αγωγού μέσω του ρευστού,  $Q_{fp}$  η θερμότητα που μεταφέρεται από το

φέρον ρευστό στα σωματίδια και  $Q_{heat\ loss}$  η απώλεια θερμότητας μέσω του τοιχώματος του αγωγού προς το περιβάλλον.

$$Q_{acc} = Q_{in} - Q_{out} - Q_{fp} - Q_{heat\ loss} \quad (41)$$

Για τη συνέχεια των υπολογισμών, η απώλεια θερμότητας προς το περιβάλλον θεωρείται αμελητέα,  $Q_{heat\ loss} = 0$ .

### Γενικό Μοντέλο

Στην εξίσωση (42), το ισοζύγιο ενέργειας της εξίσωσης (41) εκφράζεται με διαφορική μορφή, όπου η διαφορά  $Q_{in} - Q_{out}$  εκφράζεται με έναν όρο συναγωγής, ο οποίος περιλαμβάνει την παράγωγο πρώτης τάξης της θερμοκρασίας του ρευστού  $T_f$  ως προς το μήκος του αγωγού  $x$ , και έναν όρο θερμικής διασποράς, ο οποίος περιλαμβάνει την παράγωγο δεύτερης τάξης της θερμοκρασίας του ρευστού  $T_f$  ως προς το μήκος του αγωγού  $x$ .

Επίσης, η θερμοκρασία του ρευστού  $T_f$  αντιπροσωπεύει τη μέση θερμοκρασία της διατομής του αγωγού σε μία θέση  $x$ . Ορίζοντας τη θερμοκρασία του ρευστού κατ' αυτόν τον τρόπο, λαμβάνονται υπόψη χαρακτηριστικά όπως είναι η εμβολική ροή του προϊόντος και το θερμοκρασιακό προφίλ στη διεύθυνση της ακτίνας του αγωγού. Ακόμη, στις εκφράσεις της ογκομετρικής ειδικής θερμοχωρητικότητας,  $(C_p\rho)_f$  για το ρευστό, και  $(C_p\rho)_p$  για τα σωματίδια, λαμβάνεται υπόψη η εξάρτησή τους από τη θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι οι φυσικές αυτές ιδιότητες υπολογίζονται με τη χρήση της θερμοκρασίας που έχει η κάθε φάση,  $T_f$  ή  $T_p$  σε μια συγκεκριμένη θέση στο μήκος του αγωγού.

$$(1 - \phi_p)(C_p\rho)_f \frac{dT_f}{dt} = \\ = \alpha_f(1 - \phi_p)(C_p\rho)_f \frac{d^2T_f}{dx^2} + c_f u_{tot}(1 - \phi_p)(C_p\rho)_f \frac{dT_f}{dx} + h_{fp}\phi_p S_p (T_f - T_p|_{r_p=R_p}) \quad (42)$$

Η συγκέντρωση των σωματιδίων στον αγωγό θεωρείται σταθερή και αντιμετωπίζεται ως συνεχής φάση εκφρασμένη σε όρους ογκομετρικού κλάσματος σωματιδίων  $\phi_p$ . Έτσι, το ογκομετρικό κλάσμα του φέροντος ρευστού είναι  $(1 - \phi_p)$ .

Η ταχύτητα του ρευστού δίνεται από την εξίσωση  $u_f = c_f u_{tot}$ , όπου ο όρος  $c_f$  είναι μια σταθερά αναλογίας η οποία συσχετίζει την ταχύτητα του ρευστού με την ολική μέση ταχύτητα του εναιωρήματος,  $u_{tot}$ . Με  $\alpha_f$  συμβολίζεται ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας του ρευστού και με  $S_p$  η ειδική επιφάνεια του σωματιδίου, δηλαδή ο λόγος της επιφάνειας προς τον όγκο του σωματιδίου ( $m^2/m^3$ ).

Η εξίσωση (42) περιγράφει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού με τον χρόνο στον αγωγό. Ωστόσο, η περίπτωση που ενδιαφέρει να μελετηθεί στην παρούσα ανάλυση είναι όταν η θερμοκρασία του φέροντος ρευστού σε μια

δεδομένη θέση  $x$  του αγωγού είναι σταθερή με το χρόνο, δηλαδή  $\frac{dT_f}{dt} = 0$ . Επίσης, είναι αναμενόμενο ο όρος της θερμικής διασποράς να θεωρηθεί αμελητέος, καθώς η πτώση της θερμοκρασίας κατά μήκος του αγωγού είναι συχνά τόσο μικρή που η δεύτερη παράγωγος αυτής της μεταβολής μπορεί να θεωρηθεί μηδαμινή.

Με βάση τα παραπάνω, η εξίσωση (42) μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$\frac{dT_f}{dx} = - \frac{h_{fp} \phi_p S_p}{c_f u_{tot} (1 - \phi_p) (C_p \rho)_f} (T_f - T_p|_{r_p=R_p}) \quad (43)$$

Όταν χρησιμοποιείται η εξίσωση (43) με στόχο την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας στον αγωγό συγκράτησης, η αρχική τιμή της θερμοκρασίας του ρευστού  $T_f(x=0)$  μπορεί να οριστεί ως η θεωρητική θερμοκρασία ανάμιξης του προϊόντος στο σημείο ανάμιξης, όπου η ροή των ψυχρών σωματιδίων (slurry flow) συναντά τη ροή του θερμού καθαρού φέροντος ρευστού (βλ. «Πειραματική Διάταξη - Εξοπλισμός»). Η αρχική τιμή της θερμοκρασίας της επιφάνειας των σωματιδίων  $T_p|_{r_p=R_p}(x=0)$  ορίζεται ως η θερμοκρασία που έχουν τα σωματίδια στη δεξαμενή πολτού (Slurry Tank) πριν αναμιχθούν με το ρεύμα του φέροντος ρευστού.

Για τη **στερεή φάση**, αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο που στηρίζεται σε σωματίδια σφαιρικού σχήματος και το ισοζύγιο ενέργειας εκφράζεται σε δύο διαστάσεις, την ακτίνα του σωματιδίου  $r$  και το μήκος του αγωγού  $x$ .

Στην εξίσωση (44) το ισοζύγιο παρουσιάζεται με διαφορική μορφή. Περιγράφει τη συσσώρευση θερμότητας με το χρόνο σε κάποια ακτινική θέση  $r$  του σφαιρικού σωματιδίου και σε κάποια θέση  $x$  κατά μήκος του αγωγού. Ο όρος που περιλαμβάνει την πρώτη παράγωγο της θερμοκρασίας των σωματιδίων  $\frac{dT_p}{dx}$  αντιπροσωπεύει τη θερμότητα του σωματιδίου σε μια ακτινική θέση  $r_p$  καθώς εισέρχεται και εξέρχεται μιας θέσης  $x$  του αγωγού με ταχύτητα  $u_p = c_p u_{tot}$ , όπου το  $c_p$  είναι μια σταθερά αναλογίας που συσχετίζει την ταχύτητα των σωματιδίων με τη μέση συνολική ταχύτητα του εναιωρήματος. Ο όρος που περιλαμβάνει τη δεύτερη παράγωγο της θερμοκρασίας των σωματιδίων  $T_p$ , ως προς την ακτίνα σωματιδίου  $r_p$  (εκφρασμένη σε ένα σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων), αντιπροσωπεύει την αγωγή θερμότητας από την επιφάνεια του σωματιδίου προς το θερμικό του κέντρο στη διεύθυνση της ακτίνας του σωματιδίου.

$$(C_p \rho)_p \frac{dT_p}{dt} = \frac{\lambda_p}{r_p^2} \frac{d}{dr_p} \left( r_p^2 \frac{dT_p}{dr_p} \right) + c_p u_{tot} (C_p \rho)_p \frac{dT_p}{dx} \quad (44)$$

Οριακές Συνθήκες:  $\lambda_p \left( \frac{dT_p}{dr_p} \right)_{r_p=R_p} = h_{fp} (T_f - T_p|_{r_p=R_p})$  και  $\left( \frac{dT_p}{dr_p} \right)_{r_p=0} = 0$

Ωστόσο, αφού η περίπτωση που εξετάζεται είναι όταν το θερμοκρασιακό προφίλ των σωματιδίων είναι σταθερό με το χρόνο σε οποιαδήποτε ακτινική θέση  $r_p$  και για οποιαδήποτε θέση  $x$  κατά μήκος του αγωγού, θεωρείται  $\frac{dT_p}{dt} = 0$ .

Η εξίσωση (44), λοιπόν, μπορεί να απλοποιηθεί προς την εξίσωση (45) η οποία περιγράφει το θερμοκρασιακό προφίλ των σωματιδίων σε κάποια θέση  $x$  του αγωγού. Ο συντελεστής θερμικής διάχυτότητας για τα σωματίδια ορίζεται ως εξής:  $\alpha_p = \frac{\lambda_p}{(c_p \rho)_p}$ .

$$\frac{dT_p}{dx} = \frac{\alpha_p}{c_p u_{tot} r_p^2} \frac{d}{dr_p} \left( r_p^2 \frac{dT_p}{dr_p} \right) \quad (45)$$

Οριακές Συνθήκες:  $\lambda_p \left( \frac{dT_p}{dr_p} \right)_{r_p=R_p} = h_{fp} (T_f - T_p|_{r_p=R_p})$  και  $\left( \frac{dT_p}{dr_p} \right)_{r_p=0} = 0$

Η αρχική τιμή της θερμοκρασίας  $T_p(x=0)$  ορίζεται ως η θερμοκρασία των σωματιδίων όταν ακόμη βρίσκονται στη δεξαμενή και πριν την ανάμιξή τους με το ρεύμα του φέροντος ρευστού.

Η σχέση που συνδέει τα  $c_p$ ,  $c_f$  και  $\phi_p$  περιγράφεται στην εξίσωση (46).

$$\begin{aligned} \dot{V}_{tot} = \dot{V}_f + \dot{V}_p &= (1 - \phi_p) u_f A_t + \phi_p u_p A_t = ((1 - \phi_p) c_f + \phi_p c_p) u_{tot} A_t \\ &\rightarrow (1 - \phi_p) c_f + \phi_p c_p = 1 \quad (46) \end{aligned}$$

### Διαστάσεις και Σχήμα των Σωματιδίων

Στις εξισώσεις (42) και (43), με  $S_p$  συμβολίζεται η ειδική επιφάνεια των σωματιδίων. Για σωματίδιο με σφαιρικό σχήμα ισχύει ότι  $S_p = \frac{6}{d_p}$ , όπου  $d_p$  είναι η διάμετρος του σωματιδίου. Για σωματίδιο με κυβικό σχήμα ισχύει ότι  $S_p = \frac{6}{l_p}$ , όπου  $l_p$  είναι το μήκος της ακμής του κυβικού σωματιδίου.

Για να υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων στις εξισώσεις (44) και (45) ακόμη και για σωματίδια κυβικού σχήματος, εισάγεται ένα ισοδύναμο όγκου - ακτίνας υπολογίζοντας την ακτίνα της σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με το κυβικό σωματίδιο που χρησιμοποιείται. Το ισοδύναμο όγκου - ακτίνας ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$particle\ volume = l_p^3 = \frac{4\pi}{3} r_p^3 \quad (47)$$



## Ισοζύγια σε Αδιάστατη Μορφή

Η ακτινική συντεταγμένη  $r_p$  των σωματιδίων διαβαθμίζεται με την ακτίνα των σωματιδίων  $R_p$  στην αδιάστατη ακτινική συντεταγμένη  $\xi$ . Η συντεταγμένη του μήκους του αγωγού  $x$  διαβαθμίζεται με το συνολικό μήκος του αγωγού  $L_t$  σε μία αδιάστατη συντεταγμένη μήκους του αγωγού  $\Gamma$ . Ο τρόπος με τον οποίο ορίζονται οι νέες αδιάστατες συντεταγμένες παρουσιάζεται στις εξισώσεις (48) και (49). Ακόμη, η θερμοκρασία τόσο του φέροντος ρευστού όσο και των σωματιδίων διαβαθμίζεται σε μία αδιάστατη θερμοκρασία  $\theta_i$  σύμφωνα με την εξίσωση (50).

$$\xi = \frac{r_p}{R_p}, \quad 0 \leq \xi \leq 1 \quad (48)$$

$$\Gamma = \frac{x}{L_t}, \quad 0 \leq \Gamma \leq 1 \quad (49)$$

$$\theta_i = \frac{(T_i - T_{p,in})}{(T_{f,in} - T_{p,in})}, \quad 0 \leq \theta_i \leq 1, \quad i = f \text{ ή } p, \quad T_{p,in} \leq T_i \leq T_{f,in} \quad (50)$$

Η αδιαστατοποίηση των συντεταγμένων οδηγεί στις ακόλουθες εξισώσεις αδιάστατης μορφής:

$$\frac{d\theta_f}{d\Gamma} = -\frac{L_t h_{fp} S_p \phi_p}{c_f u_{tot} (1 - \phi_p) (C_p \rho)_f} (\theta_f - \theta_p|_{\xi=1}) = -\beta (\theta_f - \theta_p|_{\xi=1}) \quad (51)$$

$$\beta = \frac{L_t h_{fp} S_p \phi_p}{c_f u_{tot} (1 - \phi_p) (C_p \rho)_f} \quad (52)$$

$$\frac{d\theta_p}{d\Gamma} = \frac{L_t \alpha_p}{c_p u_{tot} R_p^2} \frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left( \xi^2 \frac{d\theta_p}{d\xi} \right) = Fo \frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left( \xi^2 \frac{d\theta_p}{d\xi} \right) \quad (53)$$

$$\text{Οριακές Συνθήκες: } \left( \frac{d\theta_p}{d\xi} \right)_{\xi=1} = Bi (\theta_f - \theta_p|_{\xi=1}) \quad \text{και} \quad \left( \frac{d\theta_p}{d\xi} \right)_{\xi=0} = 0$$

$$Fo = \frac{L_t \alpha_p}{c_p u_{tot} R_p^2} \quad (54)$$

Συνοψίζοντας τις εξισώσεις που πρέπει να επιλυθούν, ώστε να υπάρχει πλήρης γνώση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας από το ρευστό στα σωματίδια:

$$\frac{d\theta_f}{d\Gamma} = -\beta (\theta_f - \theta_p|_{\xi=1}) \quad (55)$$

$$\frac{d\theta_p}{d\Gamma} = Fo \frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left( \xi^2 \frac{d\theta_p}{d\xi} \right) \quad (56)$$

$$\left( \frac{d\theta_p}{d\xi} \right)_{\xi=1} = Bi (\theta_f - \theta_p|_{\xi=1}) \quad (57)$$

Η εγκυρότητα του γενικού μοντέλου είναι ανεξάρτητη του αριθμού Biot που λαμβάνεται κάθε φορά για τη μεταφορά θερμότητας από το φέρον ρευστό προς το θερμικό κέντρο του σωματιδίου. Ο αριθμός Biot είναι ένας χρήσιμος αδιάστατος αριθμός ο οποίος δείχνει ποιος είναι ο περιοριστικός μηχανισμός (συναγωγή στην επιφάνεια ή αγωγή στο εσωτερικό του σωματιδίου) στη διεργασία. Ο ορισμός του αριθμού Biot δίνεται πιο ξεκάθαρα παρακάτω.

$$Bi = \frac{\text{συναγωγή στην επιφάνεια του σωματιδίου}}{\text{αγωγή στο εσωτερικό του σωματιδίου}}$$

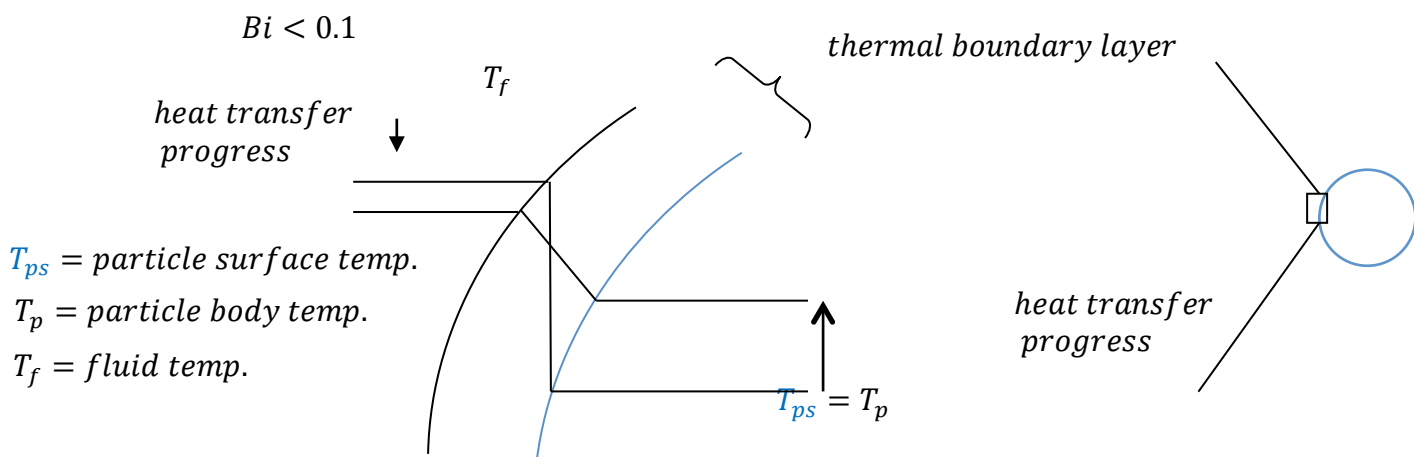
- **An  $Bi < 0.1$**  , η θέρμανση των σωματιδίων περιορίζεται από τη **μεταφορά θερμότητας με συναγωγή** από το φέρον ρευστό προς την επιφάνεια του σωματιδίου. Στην περίπτωση αυτή το σωματίδιο μπορεί να θεωρηθεί θερμοκρασιακά ομοιόμορφο και η μεταφορά θερμότητας με αγωγή να αγνοηθεί. [14]
- **An  $Bi > 1$**  , η θέρμανση των σωματιδίων περιορίζεται από τη **μεταφορά θερμότητας με αγωγή** από την επιφάνεια προς το θερμικό κέντρο του σωματιδίου. Στην περίπτωση αυτή ο μηχανισμός της συναγωγής στην επιφάνεια μπορεί να αγνοηθεί.
- **An  $0.1 \leq Bi \leq 1$**  , πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι δύο μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας.

Το γενικό μοντέλο που περιγράφηκε παραπάνω στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

1. Η ροή στον αγωγό είναι εμβολική (η βαθμίδα της θερμοκρασίας στην ακτίνα του αγωγού είναι μηδενική)
2. Ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων (σταθερή συγκέντρωση σωματιδίων κατά μήκος του αγωγού)
3. Οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον είναι αμελητέες.
4. Τα σωματίδια έχουν ιδανικό κυβικό ή σφαιρικό σχήμα χωρίς ατέλειες.
5. Όλα τα σωματίδια έχουν την ίδια θερμοκρασία στη διατομή του κυλινδρικού αγωγού.

## Ειδικό Μοντέλο (για συγκεκριμένες περιπτώσεις)

Όταν  $Bi < 0.1$ , η θερμοκρασία στο εσωτερικό των σωματιδίων μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη θερμοκρασία της επιφάνειάς τους, καθώς το στάδιο της μεταφοράς θερμότητας από το ρευστό προς την επιφάνεια του σωματιδίου είναι τόσο αργό που η θερμότητα διαχέεται σχεδόν άμεσα στο κυρίως σώμα του σωματιδίου με αγωγή. Με άλλα λόγια, η μεταφορά θερμότητας με αγωγή είναι απείρως ταχύτερη από αυτή με συναγωγή και η αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας από το ρευστό προς το σωματίδιο μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα μόνο στο οριακό στρώμα στην επιφάνεια του σωματιδίου. Μια σχηματική απεικόνιση της περίπτωσης αυτής φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση του θερμοκρασιακού προφίλ στο οριακό στρώμα και στο εσωτερικό του σωματιδίου για  $Bi < 0,1$

Για την περίπτωση που απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα και όταν η μέση ταχύτητα των σωματιδίων και του φέροντος ρευστού είναι ίσες, το ισοζύγιο ενέργειας για τη στερεή φάση του προϊόντος (σωματίδια) εκφράζεται ως εξής:

$$0 = u_{tot} A_t (1 - \phi_p) (C_p \rho)_f \frac{dT_f}{dx} + u_{tot} A_t \phi_p (C_p \rho)_p \frac{dT_p}{dx} \quad (58)$$

Έτσι, τα ισοζύγια ενέργειας για το φέρον ρευστό και για τα σωματίδια μπορούν τώρα να απλοποιηθούν στις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{dT_f}{dx} = - \frac{h_{fp} \phi_p S_p}{u_{tot} (1 - \phi_p) (C_p \rho)_f} (T_f - T_p) \quad (59)$$

$$\frac{dT_p}{dx} = - \frac{dT_f}{dx} \frac{(1 - \phi_p) (C_p \rho)_f}{\phi_p (C_p \rho)_p} \quad (60)$$

Το ειδικό αυτό μοντέλο που περιγράφηκε παραπάνω στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

1. Η ροή στον αγωγό είναι εμβολική (η βαθμίδα της θερμοκρασίας στην ακτίνα του αγωγού είναι μηδενική)
2. Ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων (σταθερή συγκέντρωση σωματιδίων κατά μήκος του αγωγού)
3. Οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον είναι αμελητέες.
4. Τα σωματίδια έχουν ιδανικό κυβικό ή σφαιρικό σχήμα χωρίς ατέλειες.
5. Όλα τα σωματίδια έχουν την ίδια θερμοκρασία στη διατομή του κυλινδρικού αγωγού.
6. Η μέση ταχύτητα ροής των σωματιδίων και του φέροντος ρευστού είναι ίσες. Τα σωματίδια «ταξιδεύουν» με την ταχύτητα ροής του ρευστού που τα περιβάλλει.
7. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από το φέρον ρευστό στην επιφάνεια του σωματιδίου αποτελεί το περιοριστικό στάδιο στη διεργασία της θέρμανσης των σωματιδίων. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική θερμική αντίσταση προέρχεται σχεδόν μόνο από το οριακό στρώμα ρευστού στην επιφάνεια των σωματιδίων.

### **Θερμική Ισορροπία**

Όταν το σύστημα έχει φτάσει σε σημείο θερμικής ισορροπίας, το συνολικό ισοζύγιο ενέργειας περιγράφεται στην επόμενη εξίσωση:

$$0 = u_{fx} A_t (1 - \phi_p) (C_p \rho)_f (T_{f0} - T_{f,end}) - u_{fx} A_t \phi_p (C_p \rho)_p (T_{p,end} - T_{p,0}) \quad (61)$$

Από αυτό το ισοζύγιο μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία των δύο φάσεων στο σημείο θερμικής ισορροπίας.

$$0 = u_{fx}A_t(1 - \phi_p)(C_p\rho)_f(T_{f0} - T_{f,end}) - u_{fx}A_t\phi_p(C_p\rho)_p(T_{p,end} - T_{p,0})$$

$$0 = (1 - \phi_p)(C_p\rho)_f(T_{f0} - T_{f,end}) - \phi_p(C_p\rho)_p(T_{p,end} - T_{p,0})$$

$$0 = (1 - \phi_p)(C_p\rho)_f(T_{f0} - T) - \phi_p(C_p\rho)_p(T - T_{p,0})$$

$$\frac{(1 - \phi_p)(C_p\rho)_f}{\phi_p(C_p\rho)_p}(T_{f0} - T) + T_{p,0} = T$$

$$\frac{(1 - \phi_p)(C_p\rho)_f}{\phi_p(C_p\rho)_p}T_{f0} + T_{p,0} = T + T \frac{(1 - \phi_p)(C_p\rho)_f(T_{f0} - T)}{\phi_p(C_p\rho)_p}$$

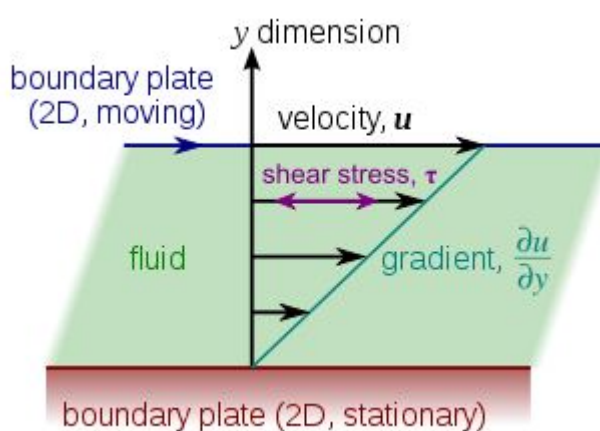
$$T = \frac{\frac{(1 - \phi_p)(C_p\rho)_f}{\phi_p(C_p\rho)_p}T_{f0} + T_{p,0}}{\left(1 + \frac{(1 - \phi_p)(C_p\rho)_f}{\phi_p(C_p\rho)_p}\right)} \quad (62)$$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

Η ρεολογία είναι η επιστήμη της ροής και της παραμόρφωσης των ρευστών [1]. Στην επιστήμη των τροφίμων, χρησιμοποιείται για να περιγράψει την συνοχή των προϊόντων και πρωτίστως εστιάζει στο ιξώδες και την ελαστικότητα [2]. Έχει πολύ μεγάλη σημασία όσον αφορά τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων και τον σχεδιασμό των προϊόντων. Η κατανόηση των ρεολογικών ιδιοτήτων ενός προϊόντος τροφίμου είναι απαραίτητη για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό των διεργασιών επεξεργασίας του, καθώς επηρεάζουν άμεσα τη ροή στον αγωγό και τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας [3].

### 2.1. Γενικά



Εικόνα 8: Διατμητική τάση που υφίσταται το ρευστό μεταξύ δύο πλακών

Μια δύναμη  $F$  προκαλεί την κίνηση του υλικού. Η διατμητική τάση ορίζεται ως η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που εφαρμόζεται παράλληλα στην επιφάνεια του ρευστού [4]. Σύμφωνα με αυτό, η διατμητική τάση ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [Pa] \quad (63)$$

Όταν ένα ρευστό εκτίθεται σε διατμητική τάση, η κινητική του κατάσταση μεταβάλλεται και αρχίζει να ρέει.

Ο ρυθμός διάτμησης ορίζεται ως η σχετική μεταβολή της ταχύτητας ανά μονάδα απόστασης από το ακίνητο τοίχωμα (που έρχεται σε επαφή με το ρευστό) και περιγράφει την εγκάρσια βαθμίδα ταχύτητας [5]. Ο ρυθμός διάτμησης ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{du}{dy} \quad [s^{-1}] \quad (64)$$

Η ροή των ρευστών πάντα σχετίζεται με τις εσωτερικές δυνάμεις τριβής. Η τριβή του ρευστού είναι άμεσα συνδεδεμένη με το ιξώδες του. Το ιξώδες  $\mu$  είναι η ιδιότητα του ρευστού που του επιτρέπει να αντιστέκεται σε κάθε απόπειρα μεταβολής της μορφής του. Είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του ρευστού, γιατί περιγράφει επαρκώς τη ρεολογική συμπεριφορά του ρευστού και παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τον σχεδιασμό διεργασιών επεξεργασίας του ρευστού τροφίμου. Το ιξώδες εκφράζεται ως η σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διάτμησης [5]. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, το ιξώδες ορίζεται από την επόμενη εξίσωση:

$$\text{viscosity} = \frac{\text{shear stress}}{\text{shear rate}}$$

Όταν το ιξώδες είναι σταθερό με τον ρυθμό διάτμησης, το ρευστό χαρακτηρίζεται ως **Νευτωνικό** και το ιξώδες συμβολίζεται με  $\mu$ . Όταν η σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διάτμησης δεν είναι γραμμική (το ιξώδες δεν είναι σταθερό), το ρευστό χαρακτηρίζεται ως **μη Νευτωνικό** και το ιξώδες συμβολίζεται με  $\mu_{app}$  (= φαινόμενο ιξώδες) [5].

## 2.2. Νευτωνικά Ρευστά

Ένα ρευστό χαρακτηρίζεται ως Νευτωνικό όταν η σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διάτμησης είναι γραμμική, δηλαδή όταν το ιξώδες είναι σταθερό. Αυτή η σχέση περιγράφεται από τον νόμο Ιξώδους του Newton [5]:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (65)$$

Για τα Νευτωνικά ρευστά το ιξώδες είναι μια πραγματική ιδιότητα και η τιμή της επηρεάζεται από τη σωματιδιακή φύση και την κατάσταση του ρευστού [5]. Ορίζεται από την εξίσωση:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [Pa \cdot s] \quad (66)$$

Τα πιο συνήθη Νευτωνικά ρευστά στη βιομηχανία τροφίμων είναι το νερό, τα ζαχαροδιαλύματα και τα φυτικά λιπαρά.

## 2.3. Μη Νευτωνικά Ρευστά

Ένα ρευστό χαρακτηρίζεται ως μη Νευτωνικό, όταν η σχέση που συνδέει τη διατμητική τάση και τον ρυθμό διάτμησης δεν είναι γραμμική, δηλαδή το ιξώδες δεν είναι σταθερό. Γι'αυτό και η καμπύλη που περιγράφει τη σχέση αυτή, στην προκειμένη περίπτωση, δεν είναι ευθεία. Αυτό σημαίνει ότι η κλίση της εξαρτάται από τον ρυθμό διάτμησης. Στην περίπτωση ενός Νευτωνικού ρευστού, η κλίση της καμπύλης αυτής είναι σταθερή και ισούται με το ιξώδες του ρευστού. Ωστόσο, στην περίπτωση του μη Νευτωνικού ρευστού, η κλίση της



καμπύλης διατμητικής τάσης – ρυθμού διάτμησης δεν είναι σταθερή και το ιξώδες δεν αποτελεί μια πραγματική ιδιότητα του ρευστού, καθώς μεταβάλλεται με τον ρυθμό διάτμησης. Έτσι, αναφέρεται ως **φαινόμενο ιξώδες**, εξαρτάται από τον ρυθμό διάτμησης και ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{app} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [Pa \cdot s] \quad (67)$$

Τα μη Νευτωνικά ρευστά, σύμφωνα με τη ρεολογική συμπεριφορά τους, χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες [5]:

- a) Μη Νευτωνικά ρευστά ανεξάρτητα του χρόνου: Το ιξώδες τους εξαρτάται μόνο από τον ρυθμό διάτμησης.
- b) Μη Νευτωνικά ρευστά εξαρτώμενα από το χρόνο: Το ιξώδες τους, εκτός από τον ρυθμό διάτμησης, εξαρτάται και από το χρόνο.
- c) Ιξωδοελαστικά ρευστά: Αυτά τα ρευστά, εκτός από χαρακτηριστικά ρευστού, εμφανίζουν και ιδιότητες στερεού.

Τα μη Νευτωνικά ρευστά ανεξάρτητα του χρόνου χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες, ανάλογα με την αναλυτική μορφή της σχέσης που συνδέει τη διατμητική τάση με τον ρυθμό διάτμησης [5]. Οι υποκατηγορίες είναι οι εξής:

- a) Πλαστικά ρευστά (ή πλαστικά Bingham): Τα ρευστά που ρέουν μόνο όταν η εφαρμοζόμενη σε αυτά διατμητική τάση υπερβεί μια ορισμένη τιμή  $\tau_0$ .
- b) Ψευδοπλαστικά ρευστά: Το φαινόμενο ιξώδες τους μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης.
- c) Διασταλτικά ρευστά: Το φαινόμενο ιξώδες τους αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης.

Τα μη Νευτωνικά ρευστά ανεξάρτητα του χρόνου χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, ανάλογα με το είδος της μεταβολής που υφίσταται το φαινόμενο ιξώδες του ρευστού με το χρόνο [5]. Οι υποκατηγορίες είναι οι εξής:

- a) Θιξοτροπικά ρευστά: Το φαινόμενο ιξώδες τους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, όταν υφίστανται διάτμηση με σταθερό ρυθμό.
- b) Ρεοπηκτικά ρευστά: Το φαινόμενο ιξώδες τους αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, όταν υφίστανται διάτμηση με σταθερό ρυθμό.

Στην παρούσα εργασία, τα ρευστά που χρησιμοποιούνται είναι υδατικά διαλύματα CMC (carboxymethyl cellulose) και ανήκουν στα ψευδοπλαστικά ρευστά. Η ρεολογική συμπεριφορά τους περιγράφεται επαρκώς από τον νόμο Ostwald – De Waele (Power Law fluids). Σύμφωνα με το νόμο αυτόν, η εξάρτηση της διατμητικής τάσης και του φαινομένου ιξώδους από το ρυθμό διάτμησης δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

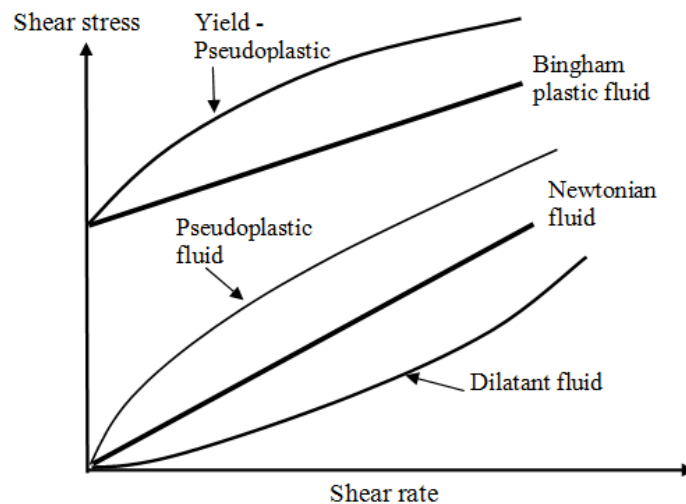
$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (68)$$

$$\mu_{app} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (69)$$

Όπου:

- $K$  : συντελεστής συνεκτικότητας ( $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ )
- $n$  : δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς

Όσο υψηλότερος είναι ο συντελεστής συνεκτικότητας  $K$ , τόσο υψηλότερο είναι και το ιξώδες του ρευστού. Ο δείκτης  $n$  παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη φύση του ρευστού. Αν  $n = 1$  το ρευστό είναι Νευτωνικό, αν  $0 < n < 1$  το ρευστό είναι ψευδοπλαστικό και αν  $n > 1$  το ρευστό είναι διασταλτικό [5]. Το ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζει τη σχέση ανάμεσα στη διατμητική τάση και το ρυθμό διάτμησης για διαφορετικές κατηγορίες ρευστών.



Εικόνα 9: Μεταβολή της διατμητικής τάσης με το ρυθμό διάτμησης για διαφορετικές κατηγορίες ρευστών

## 2.4. Μη Νευτωνικά Ρευστά – Ροή σε Αγωγό

Η περίπτωση της ροής μη Νευτωνικού ρευστού σε αγωγό απαιτεί ειδική αντιμετώπιση, καθώς η μεταβολή των ρεολογικών του ιδιοτήτων θα είναι διαφορετική συγκριτικά με ένα Νευτωνικό ρευστό. Ως αποτέλεσμα, ο ρυθμός διάτμησης στο τοίχωμα του αγωγού θα είναι διαφορετικός από την περίπτωση της Νευτωνικής συμπεριφοράς. Οι Metzner & Reed πρότειναν ένα μοντέλο για τον υπολογισμό του ρυθμού διάτμησης στο τοίχωμα του αγωγού για μη Νευτωνικό ρευστό και αυτό περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση [9]:

$$\dot{\gamma} = \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \cdot \frac{8 \cdot u}{D} \quad (70)$$

Στο σημείο αυτό, αν ο ρυθμός διάτμησης αντικατασταθεί στις εξισώσεις (68) και (69) με τον τρόπο που ορίζεται στην εξίσωση (70), θα ληφθούν δύο νέες σχέσεις για τη διατμητική τάση και το φαινόμενο ιξώδες:

$$\tau = K \cdot \left( \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right)^n \cdot \left( \frac{8 \cdot u}{D} \right)^n \quad (71)$$

$$\mu_{app} = K \cdot \left( \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right)^{n-1} \cdot \left( \frac{8 \cdot u}{D} \right)^{n-1} \quad (72)$$

Το φαινόμενο ιξώδες δεν είναι αρκετό για να περιγράψει τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ρευστού για ολόκληρη της διάσταση της διατομής του αγωγού. Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται ένας πιο αντιπροσωπευτικός (=representative) ορισμός του ιξώδους. Ο σκοπός αυτό θα εκπληρωθεί μέσα από το σχηματισμό της έκφρασης του αντιπροσωπευτικού αριθμού Reynolds.

Η εξαγωγή της έκφρασης αυτής ξεκινά με τον ορισμό του συντελεστή τριβής Fanning:

$$f = \frac{2 \cdot \tau}{\rho \cdot u^2} \quad (73)$$

Αντικαθιστώντας τη διατμητική τάση  $\tau$  από την εξίσωση (71) στην εξίσωση (73), προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$f = \frac{2}{\rho \cdot u} \cdot K \cdot \left( \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right)^n \cdot \left( \frac{8 \cdot u}{D} \right)^n \quad (73.1)$$

Ο συντελεστής τριβής Fanning για στρωτή ροή δίνεται από την εξίσωση:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (74)$$

Η αντικατάσταση του συντελεστή τριβής από την εξίσωση (74) στην εξίσωση (73.1) δίνει την έκφραση του αντιπροσωπευτικού αριθμού Reynolds για ψευδοπλαστικά ρευστά:

$$Re_{repr} = \frac{\rho \cdot D^n \cdot u^{2-n}}{K \cdot \left( \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right)^n \cdot 8^{n-1}} \quad (75)$$

Βέβαια, ο αντιπροσωπευτικός αριθμός Reynolds μπορεί να οριστεί και από την επόμενη γνωστή εξίσωση ορισμού του:

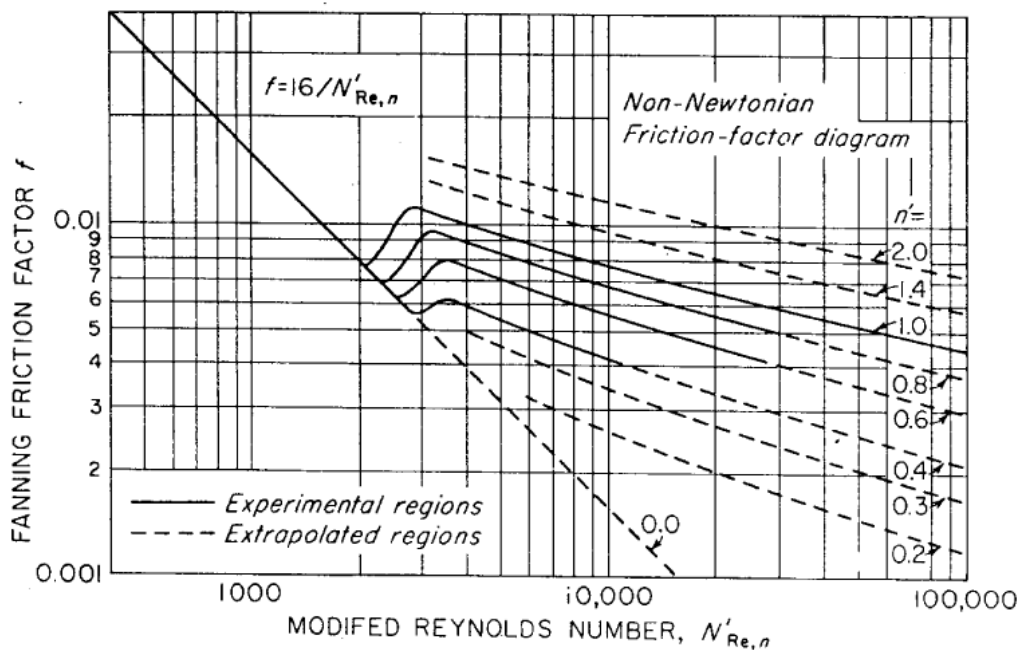
$$Re_{repr} = \frac{\rho \cdot D \cdot u}{\mu_{repr}} \quad (76)$$

Με αντικατάσταση του αριθμού Reynolds από την εξίσωση (75) στην εξίσωση (76) και με αναδιάταξη των όρων προκύπτει η έκφραση του αντιπροσωπευτικού ιξώδους ψευδοπλαστικού ρευστού που ρέει σε αγωγό:

$$\mu_{repr} = K \cdot \left( \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right)^n \cdot \left( \frac{8 \cdot u}{D} \right)^{n-1} \quad (77)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκφράσεις του αντιπροσωπευτικού ιξώδους και αριθμού Reynolds που σχηματίστηκαν παραπάνω ισχύουν μόνο σε περίπτωση στρωτής ροής.

Παρόλο που στην περίπτωση των μη Νευτωνικών ρευστών είναι δύσκολο να σχηματιστεί τυρβώδης ροή, υπάρχουν κάποιες προτάσεις στη βιβλιογραφία που καλύπτουν και αυτή την περίπτωση. Με τον αριθμό Reynolds υπολογισμένο από την εξίσωση (75), ο συντελεστής τριβής  $f$  μπορεί να ληφθεί από το ακόλουθο γράφημα, το οποίο περιγράφει τη σχέση που συνδέει τον αντιπροσωπευτικό αριθμό Reynolds και το συντελεστή τριβής Fanning για διάφορες τιμές του δείκτη ρεολογικής συμπεριφοράς  $n$ .

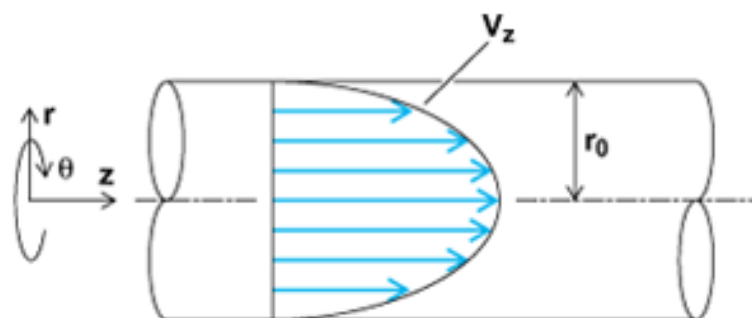


Εικόνα 10: Διάγραμμα συντελεστή τριβής για ρευστά που υπακούουν στον νόμο Ostwald - De Waele [9]

## 2.5. Πτώση Πίεσης για ροή σε αγωγό

Όταν ένα ρευστό ρέει μέσα σε αγωγό, ένα μέρος της ενέργειάς του καταναλώνεται για να υπερνικήσει τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας του αγωγού που βρίσκονται σε επαφή. Αυτές οι δυνάμεις δημιουργούν το προφίλ της ταχύτητας του ρευστού κατά μήκος της ακτίνας του αγωγού. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα είναι μηδενική στην επιφάνεια του αγωγού, γιατί το ρευστό προσκωλλάται σε αυτή (υπό την παραδοχή ότι το ρευστό δεν ολισθαίνει στο τοίχωμα του αγωγού). Όσο η απόσταση από την επιφάνεια του τοιχώματος μεγαλώνει, τόσο αυξάνεται και η ταχύτητα του ρευστού, δηλαδή όταν ένα ρευστό ρέει σε αγωγό σχηματίζεται

βαθμίδα ταχύτητας στη διατομή του αγωγού και η ταχύτητα είναι συνάρτηση της ακτίνας [8].



Εικόνα 11: Προφίλ ταχύτητας στη διατομή του αγωγού για στρωτή ροή

Λόγω αυτού του φαινομένου, δυνάμεις τριβής αναπτύσσονται και μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων του ρευστού προκαλώντας περαιτέρω απώλειες ενέργειας. Αυτές οι απώλειες ενέργειας παρατηρούνται και μετρώνται με τη μορφή της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού [8]. Η πτώση πίεσης συνδέεται άμεσα με τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ρευστού μέσω του αριθμού Reynolds.

Η ακόλουθη εξίσωση περιγράφει τη σχέση μεταξύ της πτώσης πίεσης στον αγωγό και του συντελεστή τριβής Fanning για στρωτή αλλά και τυρβώδη ροή.

$$f = \frac{1}{2} \cdot \frac{D}{\rho \cdot u^2} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (78)$$

Ο αριθμός Reynolds χαρακτηρίζει το είδος της ροής και υπολογίζεται από την επόμενη εξίσωση:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad (79)$$

Για  $Re < 2100$  η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή, ενώ για  $Re > 4000$  η ροή χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης.

- Για στρωτή ροή:  
Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής στον αγωγό για την περίπτωση της στρωτής ροής.

$$f = \frac{16}{Re} \quad (80)$$

- Για τυρβώδη ροή:  
Στην περίπτωση του ψευδοπλαστικού ρευστού δεν είναι πιθανό να σχηματιστεί τυρβώδης ροή. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής τριβής βρίσκεται από το γράφημα της εικόνας 10. Όπως φαίνεται στο γράφημα, για  $n = 1$  (Νευτωνικό ρευστό) η οριακή τιμή

αριθμού Reynolds για την περιοχή της στρωτής ροής είναι κατά προσέγγιση 2100. Παρατηρείται ότι αυτή η οριακή τιμή αυξάνεται όσο μειώνεται ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς  $n$ . Στην παρούσα εργασία, ισχύει ότι  $n > 0,78$ . Στην περίπτωση αυτή, το «τέλος» της στρωτής ροής σηματοδοτείται για αριθμό Reynolds ίσο με 2400 κατά προσέγγιση.

Η μελέτη και πρόβλεψη της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού είναι πιο πολύπλοκη όταν το ρευστό που ρέει στον αγωγό αποτελείται από στερεή και υγρή φάση. Αρκετές μελέτες έχουν γίνει στην προσπάθεια διερεύνησης της περίπτωσης των διφασικών προϊόντων και έχουν, ακόμη, προταθεί μοντέλα πρόβλεψης. Η πιο συνήθης μέθοδος που ακολουθείται στη μοντελοποίηση της πτώσης πίεσης για διφασικό ρευστό με σωματίδια είναι να αντιμετωπιστεί το διφασικό ρευστό σαν μονοφασικό. Αυτό, ουσιαστικά, σημαίνει ότι το διφασικό μίγμα θα αντιμετωπίζεται ως ένα **ισοδύναμο μονοφασικό ρευστό**. Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ισοδύναμου ρευστού εκφράζονται στο σύνολό τους από τον ισοδύναμο αριθμό Reynolds.

Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για τον υπολογισμό του ισοδύναμου ιξώδους ενός διφασικού ρευστού περιγράφεται από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$\mu_{eff} = \mu_o \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{packing}}\right)^{-q} \quad (81)$$

Το συγκεκριμένο μοντέλο προτάθηκε από τον Krieger [7] και υπολογίζει το ιξώδες του ισοδύναμου ρευστού ως συνάρτηση του ιξώδους του φέροντος ρευστού  $\mu_o$ , του ογκομετρικού κλάσματος της στερεής φάσης (σωματιδίων)  $\varphi$  και του κλάσματος συσσώρευσης των σωματιδίων (=packing fraction)  $\varphi_{packing}$ . Ακόμη, η σταθερή τιμή 2 έχει προταθεί από τον Quemada [7] για τον εκθέτη  $q$ .

Πρέπει να σημειωθεί ότι το παραπάνω μοντέλο έχει επικυρωθεί με πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια της κλίμακας του  $\mu\text{m}$  και όχι του  $\text{mm}$ . Παρόλα αυτά, δεν υπάρχουν «αντιρρήσεις» της θεωρίας που να εμποδίζουν την μεταφορά της ισχύος του και για σωματίδια της κλίμακας των  $\text{mm}$ .

Ο Gradeck [6] έχει μελετήσει τη ροή Νευτωνικών και μη Νευτωνικών ρευστών φορτισμένων με ομοιογενή σκληρά σφαιρίδια. Η διάμετρος των σωματιδίων (4,4 mm) δεν είναι αμελητέα σε σχέση με τη διάμετρο του αγωγού (30 mm). Η συγκεκριμένη μελέτη έδειξε ότι η πτώση πίεσης του μίγματος μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας την απλή έκφραση του ισοδύναμου ιξώδους του διφασικού προϊόντος που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Γίνεται σαφές ότι, χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο ιξώδες του διφασικού προϊόντος, ο ισοδύναμος αριθμός Reynolds μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Re_{eff} = \frac{\rho_{eff} \cdot u \cdot D}{\mu_{eff}} \quad (79.1)$$

Οι επόμενες εξισώσεις συμπληρώνουν την προσέγγιση που παρουσιάζεται στο σημείο αυτό.

- Για στρωτή ροή:

$$f = \frac{16}{Re_{eff}} \quad (80.1)$$

- Για τυρβώδη ροή:

Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, το διφασικό προϊόν αντιμετωπίζεται ως μονοφασικό. Έτσι, στην περίπτωση της τυρβώδους ροής ο συντελεστής τριβής Fanning μπορεί να ληφθεί από το γράφημα της εικόνας 10. Η μόνη διαφορά είναι ότι στην προκειμένη περίπτωση, στον άξονα των x θα πρέπει να θεωρηθεί ο ισοδύναμος αριθμός Reynolds.

Και, τέλος, η πτώση πίεσης του ισοδύναμου ρευστού στον αγωγό υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$f = \frac{1}{2} \cdot \frac{D}{\rho_{eff} \cdot u^2} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (78.1)$$

Συμπερασματικά, χρησιμοποιώντας το παραπάνω μοντέλο για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού, χρειάζεται μόνο η γνώση του ιξώδους της υγρής φάσης  $\mu_o$ , του ογκομετρικού κλάσματος της στερεής φάσης (σωματιδίων)  $\varphi$  και του κλάσματος συσσώρευσης των σωματιδίων (=packing fraction)  $\varphi_{packing}$ .

Σε συνέχεια της θεωρητικής θεμελίωσης των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και ρεολογίας που λαμβάνουν χώρα κατά τη θερμική επεξεργασία των ρευστών διφασικών τροφίμων που διαπραγματεύεται η παρούσα εργασία, αναπτύσσεται το πειραματικό μέρος της μελέτης. Περιγράφεται λεπτομερώς ο σχεδιασμός των πειραμάτων, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και η πειραματική διαδικασία που τηρήθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει κενό γνώσης όσον αφορά τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το τοίχωμα του αγωγού στο φέρον ρευστό του προϊόντος και ο πειραματικός σχεδιασμός έχει ως στόχο τη δυνατότητα υπολογισμού του συντελεστή για επεξεργασία πραγματικών τροφίμων.





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : ΥΛΙΚΑ – ΜΕΘΟΔΟΙ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ**

### **3.1. Στόχοι και Πλαίσιο Πειραματικών Παραμέτρων**

Οι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι οι εξής:

- Η απόκτηση πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας και πίεσης μέσω της πραγματοποίησης πειραμάτων θερμικής επεξεργασίας πραγματικών διφασικών τροφίμων με στερεά σωματίδια
- Η ποσοτική εξέταση της επίδρασης των πειραματικών παραμέτρων – περιεκτικότητα σωματιδίων, μέγεθος και σχήμα σωματιδίων, ρεολογικές ιδιότητες του φέροντος ρευστού, ταχύτητα ροής του προϊόντος – στην μεταφορά θερμότητας από την εσωτερική επιφάνεια του τοιχώματος του σωλήνα προς το φέρον ρευστό και στην πτώση πίεσης κατά μήκος του σωληνωτού εναλλάκτη
- Χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων για τη δημιουργία ενός μοντέλου που θα προβλέπει τον συντελεστή συναγωγής από το εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού προς το φέρον ρευστό και την πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού
- Επικύρωση της αξιοπιστίας των μοντέλων με την πραγματοποίηση αντίστοιχων πειραμάτων

Οι παράμετροι που εξετάζονται στα πειράματα και το εύρος αυτών δίνεται παρακάτω:

- Περιεκτικότητα σωματιδίων: 10 – 40% w/w
- Ο αριθμός Reynolds του φέροντος ρευστού στον αγωγό ποικίλει μεταξύ των τιμών 180 – 6500 και ρυθμίζεται μεταβάλλοντας το ιξώδες του ρευστού και την ογκομετρική παροχή του προϊόντος
- Η ανώτερη θερμοκρασιακή διαφορά που επιτεύχθηκε για το προϊόν είναι 50°C κατά τη θέρμανση και 30°C κατά την ψύξη
- Τα σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα είναι κύβοι καρότου δύο μεγεθών με ονομαστικό μήκος πλευράς 6mm και 10mm και μπιζέλια με ανώτατη ονομαστική διάμετρο 8,75mm

### 3.2. Υλικά

Για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα θερμικής κατεργασίας σε διφασικό προϊόν. Τα βασικά στοιχεία που αποτελούσαν το προϊόν αυτό είναι το φέρον ρευστό (υγρή φάση) και τα σωματίδια (στερεή φάση).

Το φέρον ρευστό είναι ένα υδατικό διάλυμα καρβοξυμεθυλικής κυτταρίνης (carboxymethyl cellulose), αναφερόμενη και ως CMC. Για τις ανάγκες των πειραμάτων δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά διαλύματα που διέφεραν μεταξύ τους ως προς το ιξώδες. Το είδος της σκόνης CMC που χρησιμοποιήθηκε στο κάθε διάλυμα και η περιεκτικότητά αυτή περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 1: Τα διαλύματα CMC που χρησιμοποιήθηκαν

Είδος CMC	Περιεκτικότητα	Προμηθευτής
CEKOL 30.000	0,1% w/w	Fermia
CEKOL 30.000	0,25% w/w	
CEKOL 700	1,2% w/w	

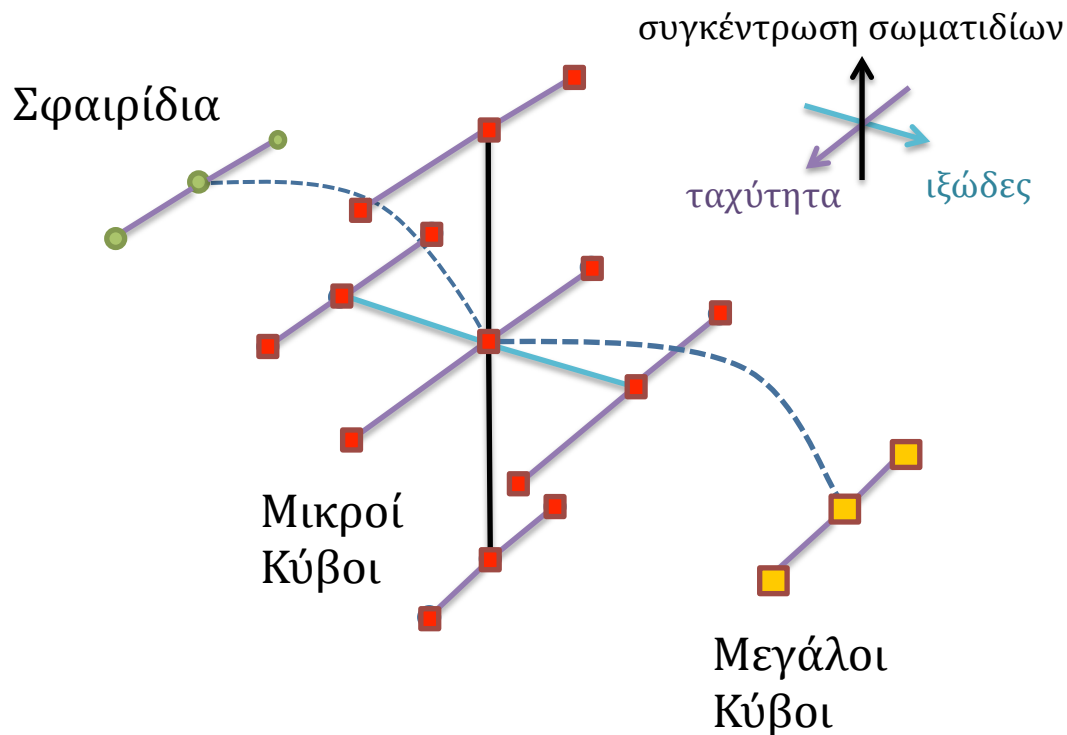
Η στερεή φάση αποτελείται από σωματίδια τροφίμων και συγκεκριμένα κύβους καρότου και μπιζέλια. Οι κύβοι καρότου και τα μπιζέλια παραλαμβάνονταν κατεψυγμένα και συσκευασμένα σε συσκευασίες των 25 kg τα καρότα και των 10 kg τα μπιζέλια. Στον πίνακα που ακολουθεί περιγράφεται το σχήμα και το μέγεθος των τριών διαφορετικών σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2: Τα είδη, σχήματα και μεγέθη των σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν

Είδος	Σχήμα	Ονομαστικό μέγεθος (mm)	Μέσο πραγματικό μέγεθος (mm)	Προμηθευτής
καρότα	κύβοι	6	6,03	Magnihill AB
καρότα	κύβοι	10	8,37	
μπιζέλια	σφαίρες	μέγιστη διάμετρος 8,75	3,94	

### 3.3. Σχεδιασμός Πειραμάτων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σε κάθε πείραμα μεταβάλλονταν οι παράμετροι της διεργασίας ώστε να μελετηθεί η επίδρασή τους στη μεταφορά θερμότητας και την πτώση πίεσης στον αγωγό. Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν είναι: το ιξώδες του φέροντος ρευστού, η ταχύτητα ροής του προϊόντος, η περιεκτικότητα σε σωματίδια, το σχήμα και το μέγεθος των σωματιδίων. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται γραφικά ο σχεδιασμός των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στον σωληνωτό εναλλάκτη θερμότητας.



Εικόνα 12: Σχηματική απεικόνιση του πλάνου των πειραμάτων

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται σχηματικά ο σχεδιασμός των πειραμάτων που εκτελέστηκαν στον εναλλάκτη διπλού σωλήνα. Συγκεκριμένα, με κόκκινο τετράγωνο απεικονίζονται τα πειράματα με κύβους καρότου μικρού μεγέθους, με κίτρινο τετράγωνο τα πειράματα με κύβους καρότου μεγάλου μεγέθους και με πράσινο κύκλο τα πειράματα με μπιζέλια. Ακόμη, ο κάθε ένας άξονας στο σύστημα τριών αξόνων του σχήματος αντιπροσωπεύει και μία πειραματική παράμετρο: ο μαύρος δείχνει τη συγκέντρωση σωματιδίων στο μίγμα προϊόντος, ο μωβ την ταχύτητα ροής και ο μπλε το ιξώδες του φέροντος ρευστού. Έτσι, είναι εμφανές ότι πραγματοποιήθηκαν πειράματα με χαμηλές, μέσες και υψηλές τιμές αυτών των παραμέτρων και επίσης κάποια πειράματα στα οποία η παράμετροι που μεταβάλλονταν είναι το σχήμα και το μέγεθος των σωματιδίων.

Πριν την κυρίως φάση πειραμάτων με διφασικό προϊόν, πραγματοποιήθηκαν κάποια πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκε μόνο το φέρον ρευστό – διάλυμα CMC. Στόχος αυτών των πειραμάτων είναι η συλλογή δεδομένων για την

περίπτωση μονοφασικού ρευστού προϊόντος και η δημιουργία μιας βάσης σύγκρισης με τα αποτελέσματα των πειραμάτων με διφασικό προϊόν. Στον πίνακα που ακολουθεί περιγράφονται οι παράμετροι των εν λόγω πειραμάτων.

**Πίνακας 3: Πειράματα χωρίς σωματίδια (Heat EXchanger\_No Particles = HEX\_NP)**

Ταυτότητα πειράματος	Διάλυμα CMC	Περιεκτικότητα σωματιδίων (%w/w)	Θερμική κατεργασία	Ταχύτητα (m/s)
HEX_NP001	0,25%	0	θέρμανση	0,5
HEX_NP002	CEKOL	0		1
HEX_NP003	30.000	0		1,5
HEX_NP004	0,1% CEKOL 30.000	0		0,3
HEX_NP005		0		0,5
HEX_NP006		0		1
HEX_NP007	1,2% CEKOL 700	0		1,5
HEX_NP008		0		0,3
HEX_NP009		0		0,5
HEX_NP010	700	0		1
HEX_NP011		0		1,5

Ο επόμενος πίνακας συγκεντρώνει τα πειράματα, στα οποία χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια, και τις παραμέτρους αυτών.

**Πίνακας 4: Παράμετροι των πειραμάτων στα οποία χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια**

Ταυτότητα πειράματος	Διάλυμα CMC	Σχήμα σωματιδίου	Ονομαστικό μέγεθος σωματιδίου (mm)	Περιεκτικότητα σωματιδίων	Θερμική κατεργασία	Ταχύτητα (m/s)
HEX001	0,25% CEKOL 30.000 (μέσο ιξώδες)	Κύβος	6	Μέση	Θέρμανση	0,5
HEX002						1
HEX003						1,5
HEX004	0,1% CEKOL 30.000 (χαμηλό ιξώδες)	Κύβος	6	Μέση	Θέρμανση	0,5
HEX005						1
HEX006						1,5
HEX007	1,2% CEKOL 700 (υψηλό ιξώδες)	Κύβος	6	Μέση	Θέρμανση	0,5
HEX008						1
HEX009						1,5
HEX010	0,25% CEKOL 30.000 (μέσο ιξώδες)	Κύβος	10	Μέση	Θέρμανση	0,5
HEX011						1
HEX012						1,5

HEX013	0,25% CEKOL 30.000 (μέσο ιξώδες)	Κύβος	6	Χαμηλή	Θέρμανση	0,5
HEX014						1
HEX015						1,5
HEX016	0,25% CEKOL 30.000 (μέσο ιξώδες)	Κύβος	6	Υψηλή	Θέρμανση	0,5
HEX017						1,5
HEX018						1
HEX019	0,25% CEKOL 30.000 (μέσο ιξώδες)	Κύβος	6	Μέση	Ψύξη	0,5
HEX020						1
HEX021						1,5
HEX022	0,25% CEKOL 30.000 (μέσο ιξώδες)	Σφαίρα	<8,75	Μέση	Θέρμανση	0,5
HEX023						1
HEX024						1,5

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ομάδες των τριών. Στις ομάδες αυτές η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται είναι η ταχύτητα. Η ομάδα πειραμάτων που αποτελείται από τα HEX001, HEX002 και HEX003 αναφέρεται και ως «κεντρικό σημείο» επειδή είναι το κέντρο του πλέγματος των πειραματικών σημείων. Κάθε ένα από τα υπόλοιπα πειράματα προκύπτει μεταβάλλοντας μια από τις παραμέτρους του «κεντρικού σημείου». Ως «κύβος» χαρακτηρίζεται το σχήμα των σωματιδίων καρότου και ως «σφαίρα» το σχήμα των μπιζελιών. Η περιεκτικότητα των σωματιδίων στον παραπάνω πίνακα δεν περιγράφεται με αριθμό αλλά με την κλίμακα «Χαμηλή – Μέση – Υψηλή», γιατί είναι μια παράμετρος που αποδείχτηκε δύσκολο να ρυθμιστεί με ακρίβεια κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Οπότε στο σημείο αυτό δεν ενδιαφέρει τόσο η απόλυτη περιεκτικότητα σωματιδίων όσο η σύγκριση μεταξύ των πειραμάτων ως προς αυτή.

Ο σκοπός του παραπάνω πειραματικού σχεδιασμού είναι να ληφθούν πειραματικά δεδομένα που αντιστοιχούν σε ένα εύρος παραμέτρων όσο το δυνατόν πιο ευρύ. Οι πειραματικές παράμετροι που σχετίζονται με τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του φέροντος ρευστού και η ταχύτητα ροής του προϊόντος μπορούν να εκφραστούν μέσω του αριθμού Reynolds, ορισμένου για το φέρον ρευστό. Έτσι, στον παραπάνω πίνακα φαίνεται μια προσπάθεια να ληφθούν πολλές διαφορετικές τιμές αριθμού Reynolds αλλάζοντας το ιξώδες του φέροντος ρευστού και την ταχύτητα ροής.

Εκτός από τα βασικά πειράματα, πραγματοποιήθηκαν και κάποια πρόσθετα με στόχο την επικύρωση της ακρίβειας ενός πιθανού μοντέλου. Ο ακόλουθος πίνακας συγκεντρώνει τις παραμέτρους των πρόσθετων αυτών πειραμάτων.

Πίνακας 5: Παράμετροι πρόσθετων πειραμάτων επικύρωσης

Ταυτότητα πειράματος	Διάλυμα CMC	Σχήμα σωματιδίου	Ονομαστικό μέγεθος σωματιδίου (mm)	Περιεκτικότητα σωματιδίων (%w/w)	Θερμική κατεργασία	Ταχύτητα (m/s)
HEX025	1,2% CEKOL 700	Κύβος	6	≈ 40	Θέρμανση	1
HEX026	0,15% CEKOL 30.000	Κύβος	6	≈ 20	Θέρμανση	2
HEX027	0,15% CEKOL 30.000	Κύβος	6	≈ 30	Θέρμανση	1
HEX028	0,15% CEKOL 30.000	Κύβος	6	≈ 20	Θέρμανση	1,5

Ο σκοπός της εκτέλεσης των πρόσθετων πειραμάτων είναι η επικύρωση της ακρίβειας ενός πιθανού μοντέλου με τη χρήση αποτελεσμάτων τα οποία προέρχονται από πειράματα που δεν ανήκουν στο εύρος παραμέτρων του αρχικού σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, ο στόχος του πειράματος HEX025 ήταν να επιτευχθεί όσο δυνατόν υψηλότερη περιεκτικότητα σωματιδίων και μάλιστα εκτός του εύρους των πειραμάτων HEX001 – HEX024. Με την εκτέλεση των πειραμάτων HEX026 – HEX028 επιχειρήθηκε να μεταβληθεί ο αριθμός Reynolds με τη χρήση ενός φέροντος ρευστού που δεν είχε χρησιμοποιηθεί στα κυρίως πειράματα και με την αύξηση της ταχύτητας ροής έως τα 2 m/s.

### 3.4. Πειραματική διάταξη – Εξοπλισμός

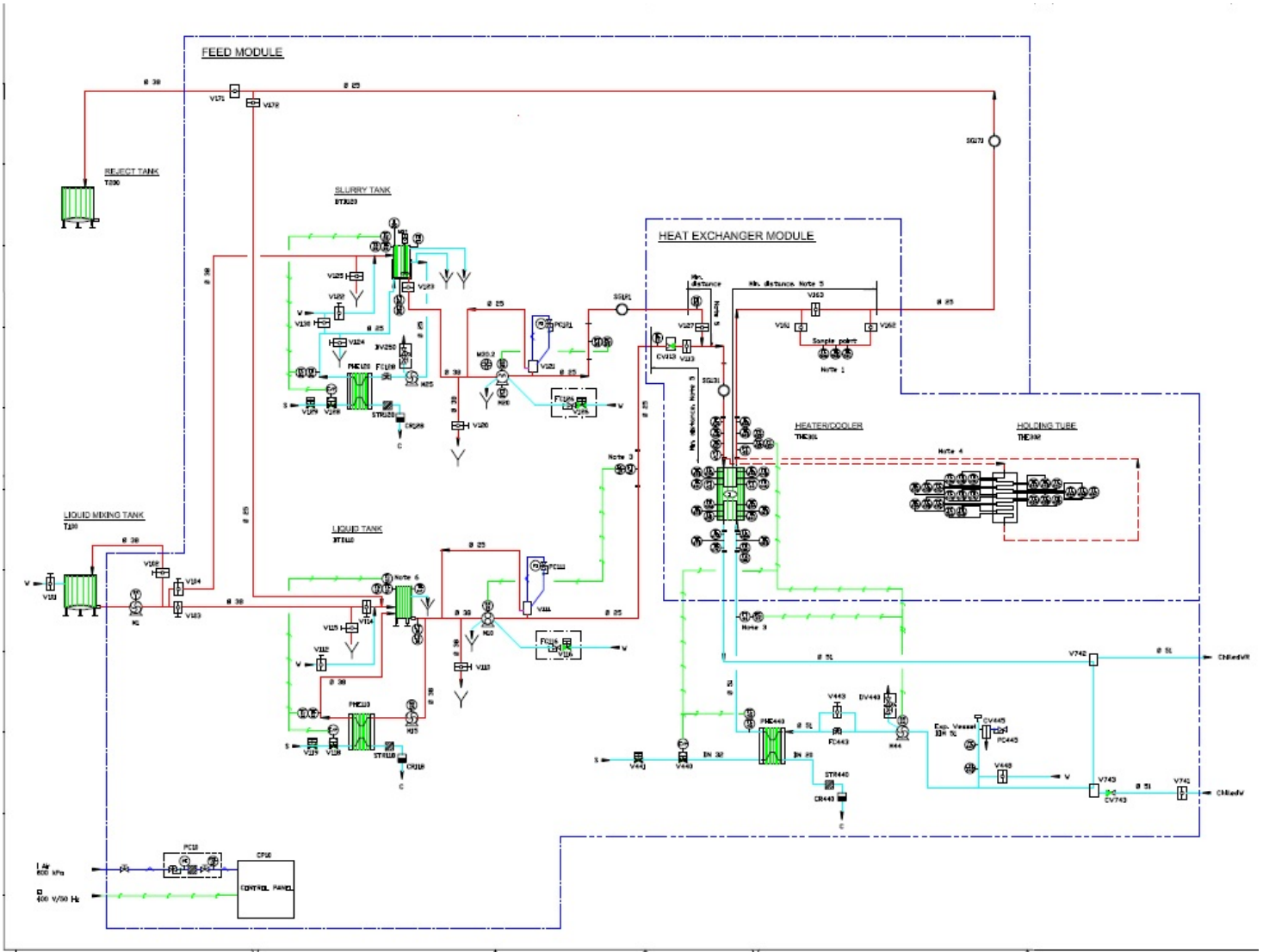
Η παρούσα εργασία βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά σε δεδομένα που έχουν προκύψει από πειράματα θερμικής κατεργασίας διαφασικών προϊόντων, τα οποία είναι κύβου καρότου ή μπιζέλια σε υδατικό διάλυμα CMC. Για το λόγο αυτό, μια πλατφόρμα δοκιμών κατασκευάστηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων και παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 13: Πλατφόρμα δοκιμών για την πραγματοποίηση των πειραμάτων

Το μηχάνημα που απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα παρέχει την δυνατότητα επιλογής της λειτουργίας του. Αφενός, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως «Αγωγός Συγκράτησης (=Holding Tube)», στον οποίο ερευνάται η μεταφορά θερμότητας από το φέρον ρευστό στην επιφάνεια του σωματιδίου. Στη λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται ένα σύστημα σωληνώσεων με μήκος σχεδόν 60 m στην αρχή του οποίου αναμιγνύεται θερμή υγρή φάση και ψυχρά σωματίδια. Αφετέρου, το μηχάνημα χρησιμοποιείται ως «Εναλλάκτης Θερμότητας (=Heat Exchanger)», ο οποίος είναι σωληνωτός και το διαφασικό προϊόν θερμαίνεται με τη χρήση θερμού νερού ως θερμαντικό μέσο σε αντιρροή. Στη λειτουργία αυτή, τα κύρια σημεία έρευνας είναι η μεταφορά θερμότητας

από την εσωτερική επιφάνεια του αγωγού προς το φέρον ρευστό και η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού και πως αυτά επηρεάζονται από την παρουσία των σωματιδίων. Στη συνέχεια, δίνεται το ακριβές διάγραμμα ροής της πλατφόρμας δοκιμών και η περιγραφή όλων των βασικών στοιχείων αυτής.



Εικόνα 14: Διάγραμμα ροής της πλατφόρμας δοκιμών

### 3.4.1. Liquid Mixing Tank (T100)

Είναι μια δεξαμενή όγκου 600 lt στην οποία το διάλυμα CMC διατηρείται μετά την παρασκευή του. Συγκεκριμένα, το διάλυμα παρασκευάζεται αναμιγνύοντας νερό και σκόνη CMC σε εμπορικό μηχάνημα ανάμιξης (Tetra AlMix) και έπειτα αντλείται στην εν λόγω δεξαμενή. Το περιεχόμενο διάλυμα CMC μπορεί να αντληθεί στις δύο επόμενες δεξαμενές ("Slurry Tank" και "Liquid Tank") με τη χρήση της αντλίας M1 (βλ. Διάγραμμα Ροής).



### **3.4.2. Slurry Tank (BTD120)**



**Εικόνα 15: Δεξαμενή "Πολτού" (Slurry Tank)**

Είναι μια δεξαμενή χωρητικότητας 250 lt με κωνικό πυθμένα και αναδευτήρα – σάρωθρο τοιχωμάτων. Στη δεξαμενή αυτή δημιουργείται ο «πολτός» (=slurry), που είναι το διαφασικό προϊόν με υψηλή περιεκτικότητα σε σωματίδια (40% - 50%). Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας τα σωματίδια στο διάλυμα CMC που έχει ήδη αντληθεί εκεί από την προηγούμενη δεξαμενή (Liquid Mixing Tank). Η θερμοκρασία του πολτού μπορεί να ρυθμιστεί και να διατηρηθεί σταθερή, καθώς η δεξαμενή διαθέτει διπλό τοίχωμα και παρέχει τη δυνατότητα θέρμανσης και ψύξης με ανακυκλοφορία θερμού ή ψυχρού νερού. Η βασική της λειτουργία είναι η διατήρηση του πολτού σε σταθερή θερμοκρασία και η παροχή του στην αντλία που ακολουθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του αναδευτήρα, ο οποίος διατηρεί το προϊόν σε ομοιογενή κατάσταση και διευκολύνει την πορεία του προς την αντλία. Ο στόχος είναι να φτάνει στην αντλία το διαφασικό τρόφιμο σε σταθερή θερμοκρασία και συγκέντρωση σωματιδίων.

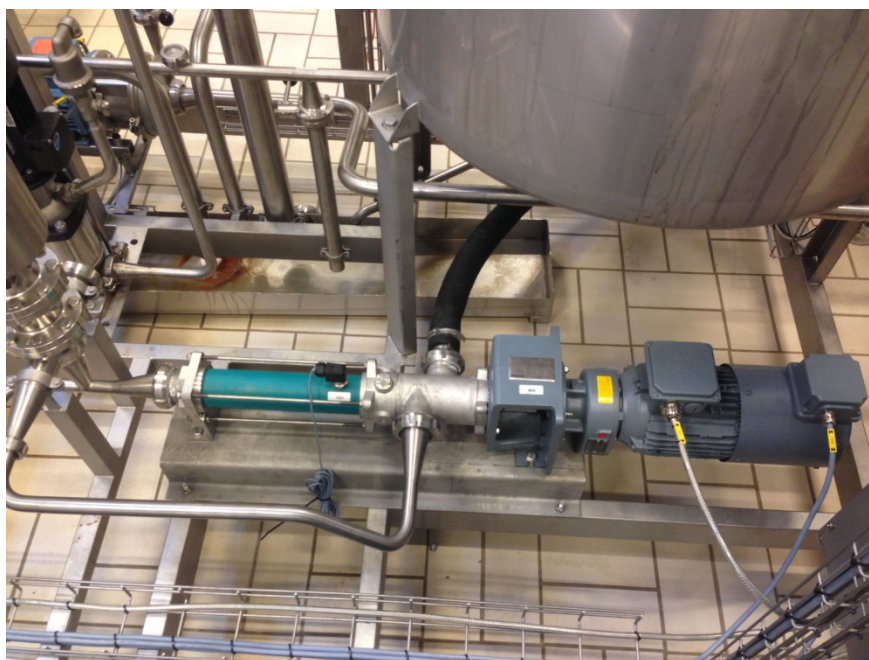
### **3.4.3. Liquid Tank (BTD110)**



**Εικόνα 16: Δεξαμενή φέροντος ρευστού (Liquid Tank)**

Είναι μια δεξαμενή χωρητικότητας 350 lt στην οποία περιέχεται μόνο το φέρον ρευστό, δηλαδή διάλυμα CMC το οποίο αντλείται από την αρχική δεξαμενή Liquid Mixing Tank. Παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης και διατήρησης της θερμοκρασίας του περιεχομένου της, καθώς αυτό ανακυκλοφορείται και θερμαίνεται η ψύχεται με τη βοήθεια πλακοειδούς εναλλάκτη θερμότητας. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, η δεξαμενή είναι επαρκώς μονωμένη για να επιτυγχάνεται η διατήρηση του περιεχομένου σε σταθερή θερμοκρασία. Τη δεξαμενή ακολουθεί μια αντλία θετικής εκτόπισης (Liquid Pump).

#### **3.4.4. Slurry Pump (M20)**

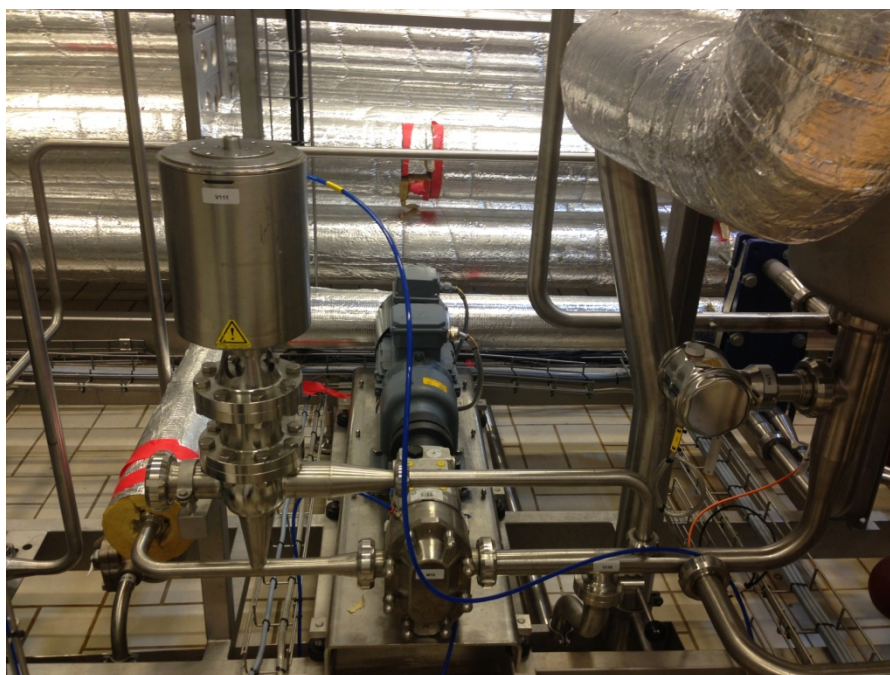


**Εικόνα 17: Αντλία ρεύματος "πολτού" (Slurry Pump)**

Είναι μια έκκεντρη κοχλιωτή αντλία (τύπου Netzsch) η οποία αντλεί τον πολτό από την αντίστοιχη δεξαμενή προς το σημείο ανάμιξης, όπου αυτό το ρεύμα συναντά το ρεύμα που προέρχεται από τη δεξαμενή που περιέχει το φέρον ρευστό (Liquid Tank). Σύμφωνα με τα όρια βαθμονόμησης, η αντλία μπορεί να παρέχει μέγιστη παροχή ύψους 1000 kg/h.

Η αντλία αυτή είναι ένας περιοριστικός παράγοντας στην περιεκτικότητα σωματιδίων που μπορεί να επιτευχθεί στο τελικό προϊόν. Συγκεκριμένα, έχει την τάση να αντλεί πιο εύκολα την υγρή φάση από τα σωματίδια. Κατά συνέπεια, η περιεκτικότητα σωματιδίων του πολτού που φτάνει στο σημείο ανάμιξης είναι χαμηλότερη από αυτή που επικρατεί μέσα στη δεξαμενή αφού η αντλία αντλεί περισσότερο υγρό από σωματίδια. Επίσης, κατά τη διάρκεια του πειράματος η περιεκτικότητα σωματιδίων μέσα στη δεξαμενή αυξάνεται συνεχώς μέχρι που δεν υπάρχει πλέον υγρό στη δεξαμενή. Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει ένα συγκεκριμένο διάστημα τιμών περιεκτικότητας σωματιδίων του πολτού στο οποίο η λειτουργία της αντλίας βελτιστοποιείται και αυτό είναι 40% - 45% w/w.

### **3.4.5. Liquid Pump (M10)**



**Εικόνα 18: Αντλία ρεύματος φέροντος ρευστού (Liquid Pump)**

Είναι μια περιστροφική λοβωτή αντλία η οποία χρησιμοποιείται για την άντληση του περιεχομένου της αντίστοιχης δεξαμενής (Liquid Tank) προς το σημείο ανάμιξης, όπου αναμιγνύεται με το ρεύμα πολτού που προέρχεται από την Slurry Tank. Σύμφωνα με τα όρια βαθμονόμησης, η μέγιστη παροχή που της εν λόγω αντλίας είναι 2000 lt/h.

### **3.4.6. Εναλλάκτης Θερμότητας Διπλού Σωλήνα (Tubular Heat Exchanger THE301)**



**Εικόνα 19: Το σύστημα αγωγών που αποτελούν τον Σωληνωτό Εναλλάκτη Θερμότητας (Tubular Heat Exchanger) και τον Αγωγό Συγκράτησης (Holding Tube)**

Αποτελεί το κύριο μέρος των πειραμάτων στο οποίο το διαφασικό προϊόν υφίσταται θερμική κατεργασία. Είναι εναλλάκτης διπλού σωλήνα που αποτελείται από 6 λείους σωλήνες με διπλό τοίχωμα. Ο κάθε ένας από αυτούς έχει μήκος 5,65m και η εσωτερική διάμετρος του αγωγού στον οποίο ρέει το προϊόν είναι 18mm. Στο διπλό τοίχωμα ρέει νερό σε αντιρροή που χρησιμοποιείται ως θερμαντικό ή ψυκτικό μέσο. Η θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου μπορεί να ρυθμιστεί με τη χρήση πλακοειδούς εναλλάκτη θερμότητας μέσα από τον οποίο διέρχεται. Σε λειτουργία ψύξης, όμως, η θερμοκρασία του νερού δεν μπορεί να ρυθμιστεί καθώς εισέρχεται απευθείας από την παροχή ψυχρού νερού ( $\approx 16^{\circ}\text{C}$ ). Η θερμοκρασία του προϊόντος και του μέσου μετράται με τη χρήση θερμοστοιχείων που είναι τοποθετημένα κατά μήκος του αγωγού. Επίσης, μετράται και η πίεση στο εσωτερικό του αγωγού του προϊόντος. Ο σωληνωτός εναλλάκτης είναι επαρκώς μονωμένος σε όλο το μήκος του ώστε να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας σε επίπεδο που να μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

#### **3.4.7. Θερμαντικό / Ψυκτικό Μέσο**



**Εικόνα 20:** Φυγοκεντρική αντλία (M44) που χρησιμοποιείται για την ανακυκλοφορία του θερμού νερού στο κλειστό κύκλωμα του εξωτερικού τοιχώματος του σωληνωτού εναλλάκτη

Στο εξωτερικό τοίχωμα του σωληνωτού εναλλάκτη, νερό ρέει σε αντιρροή. Χρησιμοποιείται ως θερμαντικό ή ψυκτικό μέσο, καθώς το μηχάνημα παρέχει και τις δύο αυτές επιλογές θερμικής κατεργασίας. Το νερό εισέρχεται στο σύστημα από την παροχή ψυχρού νερού ( $\approx 16^{\circ}\text{C}$ ) και το κλειστό κύκλωμα στο εξωτερικό τοίχωμα του εναλλάκτη πληρώνεται. Στη λειτουργία της θέρμανσης, ένας πλακοειδής εναλλάκτης (PHE440) χρησιμοποιείται για να θερμάνει το νερό και μια φυγοκεντρική αντλία (M44) για να το ανακυκλοφορήσει μέσα στο

κλειστό κύκλωμα του διπλού τοιχώματος. Η θερμοκρασία εισόδου του θερμαντικού μέσου στον εναλλάκτη και η ογκομετρική παροχή του επιλέγονται από τον χειριστή της μηχανής. Στην παρούσα εργασία, η θερμοκρασία εισόδου του μέσου θέρμανσης κυμαίνεται στο εύρος 70°C – 80°C. Στη λειτουργία ψύξης, το μέσο δεν ανακυκλοφορεί καθώς εισέρχεται απευθείας από την παροχή ψυχρού νερού και αφού διαπεράσει όλο το μήκος του εναλλάκτη απορρίπτεται στο αντίστοιχο φρεάτιο αποστράγγισης. Επίσης, η θερμοκρασία του δεν μπορεί να ρυθμιστεί (συνήθως  $\approx 16^\circ\text{C}$ ) και η ογκομετρική του παροχή δε ρυθμίζεται με τη χρήση της αντλίας M44 αλλά χειροκίνητα με μια βαλβίδα ρύθμισης ροής. Η θερμοκρασία του μέσου μετράται με θερμοστοιχεία σε όλο το μήκος του εναλλάκτη.

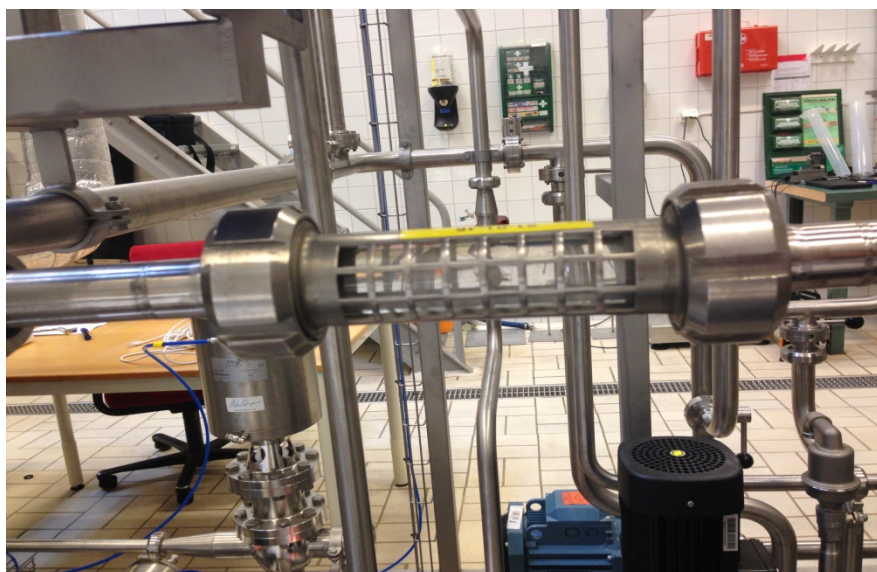
### **3.4.8. Ροόμετρα**



**Εικόνα 21: Ροόμετρο που μετρά την ογκομετρική παροχή του ρεύματος φέροντος ρευστού (FT10)**

Υπάρχουν 3 ροόμετρα συνδεδεμένα στην πλατφόρμα δοκιμών. Το FT20 είναι ένα ροόμετρο πυκνότητας και μετρά τη μαζική παροχή του ρεύματος που περιέχει τον “πολτό” (Slurry Tank). Τα FT10 και FT44 μετρούν την ογκομετρική παροχή του ρεύματος που περιέχει φέρον ρευστό (Liquid Tank) και του μέσου θέρμανσης / ψύξης, αντίστοιχα. Τα ροόμετρα είναι συνδεδεμένα με τις αντίστοιχες αντλίες, ώστε να παρέχεται στον χειριστή η δυνατότητα ρύθμισης της ροής μέσω PID ρυθμιστών.

### **3.4.9. Γυαλί παρατήρησης (Sight Glass)**



**Εικόνα 22: Εν σειρά συνδεδεμένος γυάλινος σωλήνας παρατήρησης πριν τη δεξαμενή απόρριψης (SG171)**

Είναι γυάλινοι σωλήνες με μήκος  $\approx 15\text{cm}$  που τοποθετούνται εν σειρά στους αγωγούς παρέχοντας τη δυνατότητα παρατήρησης της ροής στο εσωτερικό του αγωγού. Υπάρχουν 3 γυάλινοι σωλήνες παρατήρησης στην πλατφόρμα δοκιμών. Ο πρώτος είναι τοποθετημένος ακριβώς πριν το σημείο ανάμιξης (SG121) και έχει ως στόχο την παρατήρηση της ροής στο ρεύμα του πολτού σωματιδίων (προέρχεται από την Slurry Tank). Ο δεύτερος βρίσκεται ακριβώς μετά το σημείο ανάμιξης (SG131) και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ανάμιξη των δύο ρευμάτων. Ο τρίτος (SG171) βρίσκεται πριν τη δεξαμενή απόρριψης (Rejection Tank) και δείχνει τη ροή του τελικού προϊόντος μετά τη θερμική κατεργασία που υφίσταται.

### **3.4.10. Δεξαμενή Απόρριψης (Rejection Tank T200)**

Είναι η δεξαμενή όπου το επεξεργασμένο προϊόν απορρίπτεται και είναι τοποθετημένη έπειτα από τον σωληνωτό εναλλάκτη θερμότητας.

### **3.5. Πειραματική Διαδικασία**

Στο σημείο αυτό θα περιγραφεί η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

#### **3.5.1. Προετοιμασία του διαλύματος CMC**

Το διάλυμα CMC που χρησιμοποιείται ως φέρον ρευστό παρασκευάζεται στο ξεκίνημα κάθε ημέρας πειραμάτων. Για την ανάμιξη της σκόνης CMC με νερό χρησιμοποιείται το μηχάνημα ανάμιξης Tetra Almix. Πιο συγκεκριμένα, η σκόνη αναμιγνύεται με νερό θερμοκρασίας 30°C και αφού δημιουργηθεί το διάλυμα, θερμαίνεται ή ψύχεται στην επιθυμητή θερμοκρασία. Το διάλυμα CMC παρασκευάζεται το πρωί κάθε ημέρας πειραμάτων και η συνταγή ανάμιξης εξαρτάται από τα προγραμματισμένα πειράματα. Μετά την παρασκευή του, παραμένει στην αρχική δεξαμενή Liquid Mixing Tank για 1 – 2 ώρες. Ο χρόνος αυτός είναι απαραίτητος ώστε να απομακρυνθούν επαρκώς οι φυσαλίδες αέρα που δημιουργούνται από την έντονη ανάδευση κατά την ανάμιξη.

#### **3.5.2. Προετοιμασία του «πολτού» σωματιδίων**

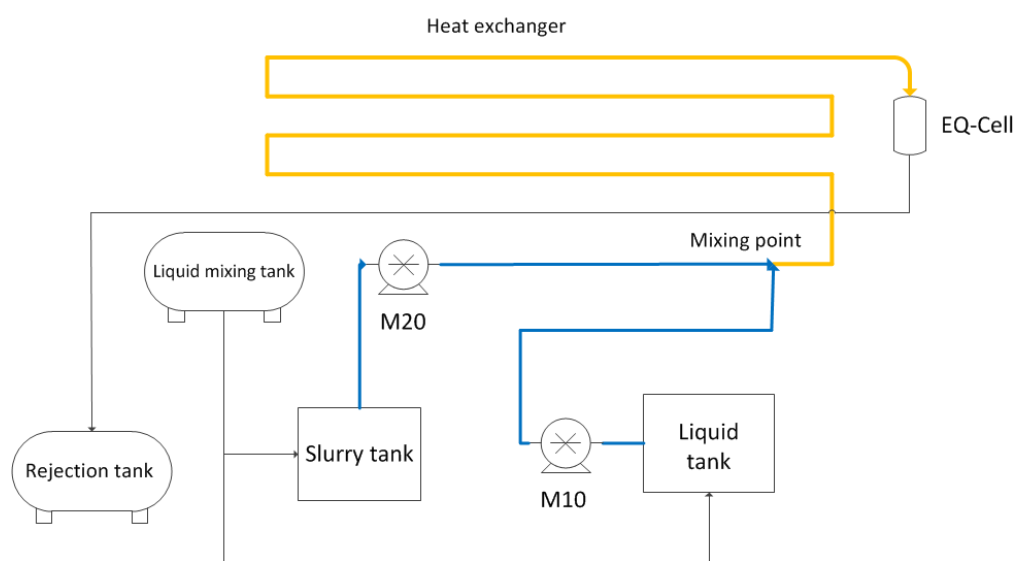
Οι κύβοι καρότου που χρησιμοποιούνται στα πειράματα παραδίδονται σε συσκευασίες των 25 kg και τα μπιζέλια σε συσκευασίες των 2,5 kg. Και τα δύο είδη σωματιδίων κατά την προμήθειά τους είναι κατεψυγμένα και διατηρούνται στην κατάψυξη μέχρι την ημέρα που θα χρησιμοποιηθούν. Η ποσότητα σωματιδίων που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα μιας ημέρας αποσύρεται από την κατάψυξη την προηγούμενη ημέρα και διατηρείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τη χρήση. Ο στόχος είναι η επαρκής απόψυξη των σωματιδίων πριν αυτά χρησιμοποιηθούν.

Κατά την προετοιμασία του «πολτού», αρχικά προστίθεται το διάλυμα CMC και τα σωματίδια στη δεξαμενή. Έτσι, δημιουργείται ο πολτός, ο οποίος, όπως προαναφέρθηκε, είναι ένα μίγμα ρευστού και σωματιδίων με υψηλή περιεκτικότητα σε σωματίδια (40% - 50% w/w). Τα συστατικά του μίγματος δεν ζυγίζονται αλλά η επιθυμητή κατά βάρος περιεκτικότητα επιτυγχάνεται με οπτική παρατήρηση του μίγματος. Ο πολτός διατηρείται στη δεξαμενή για 1 – 2 ώρες και αναδεύεται συνεχώς. Σε αυτό το χρονικό διάστημα τα σωματίδια που πιθανώς είναι ακόμη παγωμένα ξεπαγώνουν και η θερμοκρασία των δύο φάσεων, υγρής και στερεής, εξισορροπείται. Είναι σημαντικό μέσα στη δεξαμενή οι δύο φάσεις να έχουν την ίδια θερμοκρασία, ώστε να μην υπάρχει μεταφορά θερμότητας μεταξύ τους πριν την έναρξη της θερμικής κατεργασίας. Για να μην υπάρχει αμφιβολία ότι οι δύο φάσεις έχουν την ίδια θερμοκρασία, η ένδειξη της θερμοκρασίας του ρευστού παρακολουθείται διαρκώς μέχρι να γίνει σταθερή. Εφόσον το θερμοστοιχείο μετρά τη θερμοκρασία της υγρής φάσης μέσα στη δεξαμενή, στην αρχή η θερμοκρασία αυτή θα μειώνεται επειδή ψυχρά σωματίδια προστίθενται σε διάλυμα CMC θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ) και απορροφούν θερμότητα από αυτό μειώνοντας τη θερμοκρασία του. Η θερμοκρασιακή ένδειξη, λοιπόν, του περιεχομένου της δεξαμενής



παρακολουθείται καθώς μειώνεται και θεωρείται σταθερή όταν παρατηρηθεί η παραμικρή αύξηση ( $\approx 0,1^\circ\text{C}$ ). Αυτό σημαίνει ότι τα σωματίδια δεν απορροφούν πλέον θερμότητα από το ρευστό και οι δύο φάσεις έχουν την ίδια θερμοκρασία. Διάλυμα CMC επίσης προστίθεται και στη δεξαμενή φέροντος ρευστού (Liquid Tank) και η θερμοκρασία του ρυθμίζεται ώστε να είναι η ίδια με τη θερμοκρασία του πολτού.

### 3.5.3. Εκτέλεση του πειράματος



Εικόνα 23: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής της διάταξης που περιλαμβάνει μόνο τα βασικά στοιχεία - βήματα της διεργασίας

Στο σημείο αυτό και γνωρίζοντας τα μέρη του εξοπλισμού που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, γίνεται πιο εύκολη η κατανόηση της ροής των βασικών βημάτων της επεξεργασίας του διφασικού προϊόντος. Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, η διεργασία ξεκινά στη δεξαμενή «Liquid Mixing Tank», στην οποία τοποθετείται το υδατικό διάλυμα CMC που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως φέρον ρευστό στα πειράματα. Από αυτή τη δεξαμενή το ρευστό μπορεί να κατανεμηθεί στις δύο επόμενες δεξαμενές, «Slurry Tank» και «Liquid Tank», ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος. Στη Δεξαμενή Πολτού (Slurry Tank) προστίθενται τα σωματίδια και δημιουργείται ένα μίγμα σωματιδίων - ρευστού με συγκέντρωση σωματιδίων που κυμαίνεται στο εύρος 40% - 50% w/w. Στη Δεξαμενή Ρευστού (Liquid Tank) υπάρχει μόνο φέρον ρευστό. Με τη βοήθεια των αντλιών M20 και M10, το περιεχόμενο των δύο δεξαμενών αντλείται προς το σημείο ανάμιξης (mixing point) των δύο ρευμάτων. Εκεί σχηματίζεται το τελικό προϊόν και ρυθμίζοντας την παροχή των ρευμάτων παρέχεται η δυνατότητα να ρυθμιστεί και η συγκέντρωση σωματιδίων του τελικού προϊόντος μετά την ανάμιξη. Μετά το σημείο ανάμιξης το προϊόν εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα. Εκεί υφίσταται θερμική επεξεργασία με χρήση θερμού (ή ψυχρού) νερού ως θερμαντικό (ή ψυκτικό) μέσο σε αντιρροή. Κατά την έξοδό του από τον εναλλάκτη, μέρος του προϊόντος

δεσμεύεται μέσα στον σωλήνα που ονομάζεται κελί θερμική ισορροπίας (EQ Cell), στον οποίο εξετάζεται αν το διαφασικό προϊόν έχει φτάσει σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας (αν δηλαδή τα σωματίδια έχουν την ίδια θερμοκρασία με το φέρον ρευστό) και αν όχι με τι ρυθμό οδεύει προς αυτή. Τέλος, έπειτα από το EQ Cell το προϊόν απορρίπτεται στη Δεξαμενή Απόρριψης (Rejection Tank). Στο σημείο αυτό μετράται η πραγματική συγκέντρωση σωματιδίων του προϊόντος με τη συλλογή δειγμάτων πριν την απόρριψη.

Το μηχάνημα ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό μέσω ενός προγράμματος το οποίο παρέχει πολλές επιλογές στον χειριστή. Για παράδειγμα, υπάρχει επιλογή για αυτόματη ή χειροκίνητη λειτουργία ανάλογα με τις απαιτήσεις των πειραμάτων. Πριν ξεκινήσει η κύρια φάση της εκτέλεσης των πειραμάτων, επιλέγεται η επιθυμητή παροχή των δύο ρευμάτων προϊόντος (πολτού και φέροντος ρευστού) και του θερμαντικού μέσου, ανάλογα με την απαιτούμενη συνολική ταχύτητα ροής προϊόντος, τελική περιεκτικότητα σωματιδίων και τελική θερμοκρασία προϊόντος.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το περιεχόμενο των δύο βασικών δεξαμενών αντλείται προς το σημείο ανάμιξης. Στο σημείο αυτό σχηματίζεται το τελικό προϊόν το οποίο, έπειτα, ρέει διαμέσου του σωληνωτού εναλλάκτη, υφίσταται θερμική κατεργασία και, τελικά, απορρίπτεται στη δεξαμενή απόρριψης. Κατά μήκος του εναλλάκτη, η θερμοκρασία του προϊόντος και του θερμαντικού μέσου μετρώνται και καταχωρούνται με τη χρήση θερμοστοιχείων. Τα θερμοστοιχεία είναι τοποθετημένα σε 4 ισοαποστασιακά σημεία, τα οποία είναι η είσοδος, η έξοδος και δύο ενδιάμεσα σημεία για το προϊόν αλλά και για το θερμαντικό μέσο. Επίσης, και η πίεση στον αγωγό όπου ρέει το προϊόν μετράται και καταχωρείται και τα σημεία μέτρησης είναι ισοαποστασιακά, όπως και στην περίπτωση της μέτρησης της θερμοκρασίας.

#### **3.5.4. Μετρήσεις**

Στο σημείο αυτό θα αναλυθεί λεπτομερώς η διαδικασία διεξαγωγής όλων των μετρήσεων που συμπεριλαμβάνονται στην πειραματική διαδικασία.

##### **1. Μέτρηση Θερμοκρασίας**

Τα θερμοστοιχεία (ή μεταδότες θερμοκρασίας = temperature transmitters) μετρούν τη θερμοκρασία διαρκώς κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Σε κάθε σημείο μέτρησης είναι τοποθετημένα 3 θερμοστοιχεία, καθώς επιδιώκεται μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις. Και τα 3 μετρούν τη θερμοκρασία αλλά η μέση θερμοκρασία του σημείου μέτρησης προκύπτει από τις μετρήσεις δύο εξ αυτών. Το σύστημα, δηλαδή, κρατά τις 2 μετρήσεις που είναι πιο κοντά η μία στην άλλη και απορρίπτει την τρίτη.

Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει μια διαδικασία που ακολουθεί το κάθε θερμοστοιχείο στις μετρήσεις του ώστε να πληροί μια συνθήκη

ακρίβειας. Το κάθε ένα θερμοστοιχείο συλλέγει 800 διαδοχικές μετρήσεις θερμοκρασίας και υπολογίζει την τυπική απόκλιση αυτών. Με τον τρόπο αυτό ελέγχει τη σταθερότητα της θερμοκρασίας. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι η θερμοκρασία είναι το πιο σημαντικό από τα δεδομένα που λαμβάνονται στα πειράματα. Για τον λόγο αυτόν, πριν αρχίσει το λογισμικό να καταχωρεί τιμές θερμοκρασίας, πρέπει η θερμοκρασία να έχει σταθεροποιηθεί στα σημεία μέτρησης, να μη μεταβάλλεται δηλαδή με τον χρόνο (steady-state). Έτσι, τίθεται από τον χειριστή της μηχανής ένα όριο απόκλισης που πρέπει να πληρείται ώστε η θερμοκρασία να θεωρείται σταθερή. Στην προκειμένη περίπτωση η συνθήκη ακρίβειας υπαγορεύει ότι η σχετική τυπική απόκλιση για 800 διαδοχικές μετρήσεις θερμοκρασίας πρέπει να είναι το μέγιστο 1%.

Όταν ικανοποιηθεί η συνθήκη σταθερότητας για όλα τα θερμοστοιχεία που είναι τοποθετημένα στον εναλλάκτη, τότε καταχωρείται η θερμοκρασία κάθε σημείου μέτρησης για χρονικό διάστημα 60 δευτερολέπτων και για κάθε δευτερόλεπτο. Έτσι, λαμβάνονται 60 μετρήσεις θερμοκρασίας για κάθε σημείο μέτρησης και αυτή είναι η βασικότερη πληροφορία που λαμβάνεται κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

## **2. Μέτρηση Πίεσης και Ρύθμιση Παροχής**

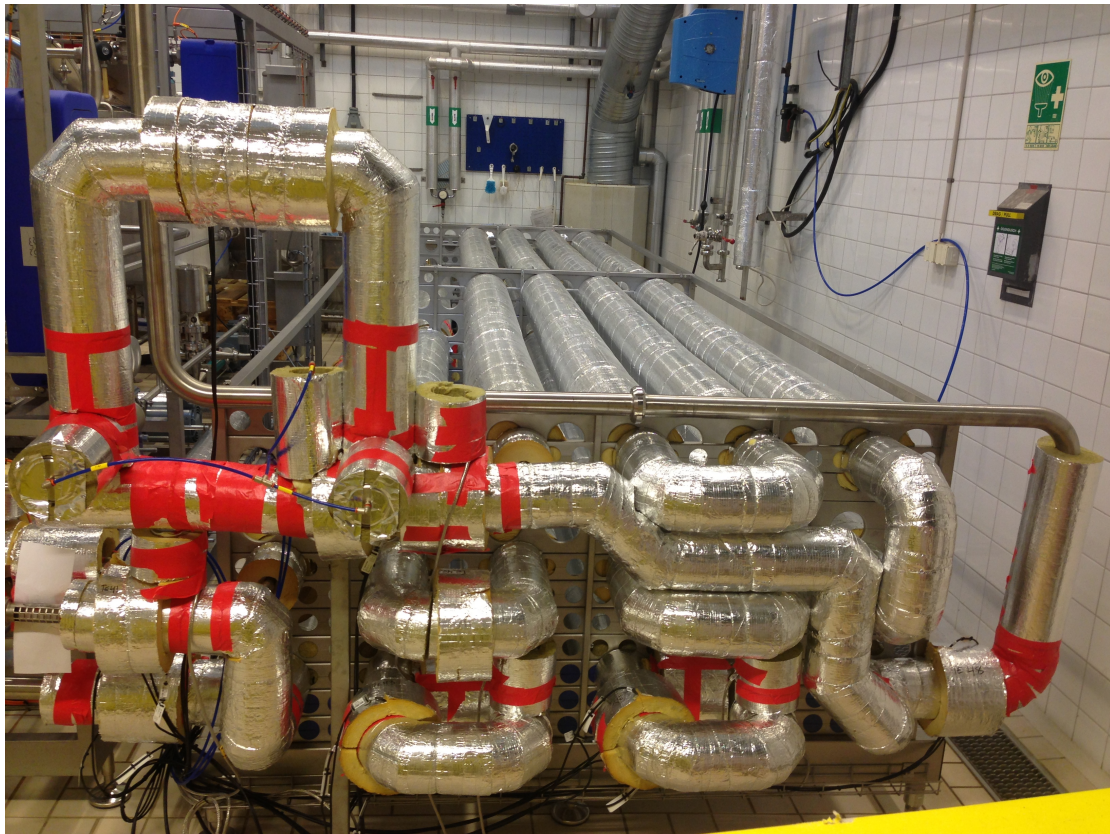
Ταυτοχρόνως, εκτός από τη θερμοκρασία, καταχωρούνται ως αποτελέσματα και οι μετρήσεις πίεσης και παροχής, αλλά χωρίς να υπάρχει η ανάγκη να ικανοποιηθούν κάποια κριτήρια.

Η ρύθμιση της παροχής είναι πολύ σημαντική προϋπόθεση για την επιτυχή ολοκλήρωση των πειραμάτων. Η παροχή επηρεάζει άμεσα τη θερμοκρασία στον αγωγό. Έτσι, είναι φανερό πως όταν η παροχή δεν είναι σταθερή δεν επιτρέπει ούτε στη θερμοκρασία να σταθεροποιηθεί. Για το λόγο αυτό, υπάρχει η ανάγκη για γρήγορη και αποτελεσματική ρύθμιση της παροχής τόσο του προϊόντος όσο και του θερμαντικού μέσου. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή βρόχων ελέγχου PID. Πριν τα δύο ρεύματα (πολτού και φέροντος ρευστού) συναντηθούν στο σημείο ανάμιξης περνούν από τα ροόμετρα FC10 (μετρά ογκομετρική παροχή του φέροντος ρευστού) και FC20 (μετρά μαζική παροχή του πολτού). Οι βρόχοι ελέγχου PID ρυθμίζουν την ταχύτητα περιστροφής του άξονα των αντλιών με στόχο να σταθεροποιήσουν γρήγορα την παροχή στην τιμή που έχει επιλεγεί από τον χειριστή. Οι παράμετροι ρύθμισης ( $K_c$  και  $T_i$ ) επιλέγονται με βάση τις απαιτήσεις και τις συνθήκες κάθε πειράματος με αποτέλεσμα να αλλάζουν διαρκώς και γι'αυτό το λόγο δεν δίνονται οι τιμές τους στην παρούσα αναφορά.

## **3. Κελί Θερμικής Ισοροπίας (EQ Cell)**

Η συντομογραφία «EQ Cell» προέρχεται από τις λέξεις «Equilibrium Cell» (= Κελί Θερμικής Ισοροπίας). Είναι ένας συγκεκριμένος σωλήνας ο οποίος είναι τοποθετημένος ακριβώς μετά την έξοδο του σωληνωτού

εναλλάκτη και μπορεί να δεσμεύσει μια ποσότητα προϊόντος στο εσωτερικό του με τη χρήση δύο βαλβίδων που είναι τοποθετημένες στα άκρα του και ανοίγουν και κλείνουν ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα, μετά το πέρας της καταγραφής των μετρήσεων θερμοκρασίας και πίεσης στον εναλλάκτη, οι δύο βαλβίδες κλείνουν και το προϊόν δεσμεύεται στο EQ Cell. Για να μη διακόπτεται, όμως, η ροή του προϊόντος προς τη δεξαμενή απόρριψης, μια τρίτη βαλβίδα ανοίγει και παρακάμπει το EQ Cell, που νωρίτερα ήταν μέρος του κυρίως αγωγού. Στο EQ Cell είναι τοποθετημένη μια τριάδα θερμοστοιχείων, καθώς αποτελεί σημείο μέτρησης, τα οποία καταγράφουν τη θερμοκρασία του ρευστού για κάθε δευτερόλεπτο του χρόνου που το προϊόν παραμένει δεσμευμένο μέσα στον ειδικό αυτό σωλήνα. Ο σκοπός της ύπαρξης του EQ Cell είναι η παρατήρηση της μεταφοράς θερμότητας από το φέρον ρευστό προς τα σωματίδια όταν το προϊόν δεν υφίσταται θερμική κατεργασία και δεν ρέει.



Εικόνα 24: Απεικόνιση του Κελιού Θερμικής Ισορροπίας

Καθώς το προϊόν υφίσταται θερμική κατεργασία στον εναλλάκτη, πιστεύεται ότι η θερμοκρασία της υγρής φάσης μεταβάλλεται γρηγορότερα από αυτή της στερεής (σωματίδια), αφού ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι διαφορετικός σε κάθε περίπτωση. Κατά συνέπεια, στην έξοδο του εναλλάκτη οι δύο φάσεις θα έχουν διαφορετική θερμοκρασία. Έτσι, κατά τη διάρκεια της παραμονής του τροφίμου στο Κελί Θερμικής Ισορροπίας, τα μόνα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα είναι μεταξύ του φέροντος ρευστού και της

επιφάνειας των σωματιδίων και από την επιφάνεια προς το θερμικό κέντρο του σωματιδίου. Προφανώς, το ρευστό έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από τα σωματίδια στην έξοδο του εναλλάκτη, οπότε τα σωματίδια μέσα στο EQ Cell απορροφούν θερμότητα από το ρευστό μειώνοντας τη θερμοκρασία του. Έτσι, δεδομένου ότι στο EQ Cell μετράται η θερμοκρασία του φέροντος ρευστού, ουσιαστικά καταγράφεται η μείωση της θερμοκρασίας του ρευστού λόγω της μεταφοράς θερμότητας από αυτό προς τα σωματίδια, μέχρι το τρόφιμο να φτάσει σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, όπου οι δύο φάσεις θα έχουν την ίδια θερμοκρασία.

Οι πληροφορίες που συλλέγονται σε αυτό το βήμα της πειραματικής διαδικασίας μπορούν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα σχετικά με τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των σωματιδίων και του φέροντος ρευστού καθώς και τη μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια του σωματιδίου προς το θερμικό κέντρο του.

#### **4. Μέτρηση Περιεκτικότητας Σωματιδίων**

Η περιεκτικότητα του τελικού προϊόντος σε σωματίδια μετράται με τη χρήση δειγμάτων τα οποία συλλέγονται στο σημείο απόρριψης. Κατά τη διάρκεια της φάσης καταγραφής των αποτελεσμάτων (τιμές θερμοκρασίας και πίεσης), όταν η απαιτούμενη σταθερότητα της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση της παροχής έχει επιτευχθεί, συλλέγονται τρία δείγματα προϊόντος στο σημείο της απόρριψης, ακριβώς πριν τη δεξαμενή απόρριψης. Εφόσον η συγκέντρωση των σωματιδίων εκφράζεται ως % κ.β. περιεκτικότητα, αυτή υπολογίζεται για κάθε δείγμα διαιρώντας το βάρος των σωματιδίων του δείγματος με το συνολικό του βάρος. Πιο συγκεκριμένα, μετά τη συλλογή των δειγμάτων σε περιέκτες των 10 L, αυτά ζυγίζονται και γνωρίζοντας το βάρος των περιεκτών υπολογίζεται το καθαρό βάρος τους. Έπειτα, διαχωρίζονται τα σωματίδια με τη χρήση ενός απλού κόσκινου και απορρίπτεται το υγρό. Τα σωματίδια ξεπλένονται με νερό, ώστε να απομακρυνθεί όσο γίνεται περισσότερο διάλυμα CMC, το οποίο έχει την τάση να προσκολλάται στα σωματίδια, και μετά ανακινούνται μέσα στο κόσκινο για περίπου 1min ώστε να απομακρυνθεί και το νερό. Τέλος, τοποθετούνται σε στεγνό περιέκτη και ζυγίζονται. Η μέση περιεκτικότητα σωματιδίων που προκύπτει από τα τρία αυτά δείγματα θεωρείται μια ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικής μέσης περιεκτικότητας σωματιδίων του διαφασικού προϊόντος.

Επίσης, δείγματα συλλέγονται και από το περιεχόμενο της δεξαμενής «πολτού» (Slurry Tank) πριν και μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων και η περιεκτικότητα σωματιδίων μετράται με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Αυτές οι μετρήσεις δε χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς των αποτελεσμάτων. Ο σκοπός τους είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της αντίστοιχης αντλίας στην άντληση της απαιτούμενης ποσότητας σωματιδίων στον «πολτό». Στην πραγματικότητα, όπως προαναφέρθηκε και στην περιγραφή του

εξοπλισμού, η αντλία τύπου Netzsch (M20), που χρησιμοποιείται για την άντληση του «πολτού» προς το σημείο ανάμιξης, παρουσιάζει μια τάση να αντλεί περισσότερο ρευστό παρά σωματίδια. Ωστόσο, υπάρχει ένα συγκεκριμένο διάστημα τιμών συγκέντρωσης σωματιδίων στο περιεχόμενο της δεξαμενής για τις οποίες η αντλία λειτουργεί βέλτιστα. Αυτή η γνώση προέκυψε μέσα από δοκιμές και μετρήσεις και αποδείχθηκε ότι το διάστημα αυτό είναι κατά προσέγγιση 40% - 45% w/w περιεκτικότητα σωματιδίων μέσα στη δεξαμενή «πολτού». Ο λόγος, λοιπόν, της μέτρησης της περιεκτικότητας σωματιδίων μέσα στη δεξαμενή είναι για να επιβεβαιωθεί ότι κυμαίνεται μεταξύ αυτών των τιμών.

## **5. Ανάλυση Ρεολογικών Ιδιοτήτων**

Δείγματα του φέροντος ρευστού συλλέγονται από το τελικό προϊόν και υφίστανται ρεολογική ανάλυση για να ληφθούν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τα ρεολογικά του χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, όπως προαναφέρθηκε, συλλέγονται δείγματα τελικού προϊόντος από το σημείο απόρριψης για μέτρηση περιεκτικότητας σωματιδίων. Σε ένα από τα τρία δείγματα, το φέρον ρευστό, κατά το διαχωρισμό του από τα σωματίδια, δεν απορρίπτεται αλλά συλλέγεται και υφίσταται ρεολογική ανάλυση.

Εφόσον η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στον αριθμό Reynolds, είναι πολύ σημαντική η ακριβής γνώση του συντελεστή συνεκτικότητας  $K$ , του δείκτη ρεολογικής συμπεριφοράς  $n$  και του φαινόμενου ιξώδους του ρευστού. Κατά την ανάλυση μετρώνται οι παραπάνω παράμετροι για θερμοκρασίες 30°C, 60°C και 90°C και το φαινόμενο ιξώδες για τιμές ρυθμού διάτμησης 10, 50, 100 και 500 s<sup>-1</sup>.

## **6. Μέτρηση Μεγέθους Σωματιδίων**

Οι ονομαστικές διαστάσεις των κύβων καρότου είναι 6mm και 10mm (η ακμή του κύβου) υπό την προϋπόθεση ότι έχουν ιδανικό σχήμα κύβου. Ωστόσο, το πραγματικό σχήμα των σωματιδίων καρότου δεν είναι κυβικό και εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η διαφοροποίηση όσον αφορά το μέγεθος είναι μεγάλη. Τα μπιζέλια φαίνεται ότι προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό το ιδανικό σφαιρικό σχήμα αλλά δεν υπάρχει ονομαστική τιμή για τη διάμετρό τους. Για τους λόγους αυτούς, το μέγεθος των σωματιδίων μετρήθηκε πειραματικά σε δείγματα σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

Κατά τη μέτρηση του μέσου μεγέθους σωματιδίων συλλέγεται ένα δείγμα σωματιδίων, μετράται ο αριθμός αυτών και προστίθενται σε έναν γνωστό όγκο νερού μέσα σε έναν ογκομετρικό κύλινδρο. Η διαφορά του όγκου του μίγματος πριν και μετά την προσθήκη των σωματιδίων δείχνει τον συνολικό όγκο των σωματιδίων που προστέθηκαν. Έτσι, γνωρίζοντας το πλήθος των σωματιδίων μπορεί να υπολογιστεί ο μέσος

όγκος σωματιδίου και υποθέτοντας ένα ιδανικό σχήμα (κυβικό ή σφαιρικό) υπολογίζεται και το μέσο μέγεθος των σωματιδίων.

## **7. Μέτρηση Πυκνότητας Σωματιδίων**

Η μέτρηση της μέσης πυκνότητας των σωματιδίων γίνεται ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία με τη μέτρηση του μέσου μεγέθους σωματιδίων. Η βασική διαφορά είναι ότι στην προκειμένη περίπτωση δεν μετράται το πλήθος των σωματιδίων (λόγω του μεγάλου αριθμού αυτών αφού χρησιμοποιείται 0,5 - 1 kg σωματιδίων) αλλά αντί γι'αυτό ζυγίζονται. Ο συνολικός όγκος των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται στη μέτρηση μετράται με τη χρήση ογκομετρικού σωλήνα (όπως στη μέτρηση του μεγέθους σωματιδίων). Γνωρίζοντας το βάρος και τον όγκο υπολογίζεται η πυκνότητα του δείγματος των σωματιδίων της μέτρησης. Ο τελικός στόχος είναι ο υπολογισμός της πυκνότητας του τελικού διφασικού προϊόντος, η οποία απαιτείται στους περαιτέρω υπολογισμούς.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Κατά την πειραματική φάση εκτελέστηκαν πολλά πειράματα και καλύφθηκε μεγάλο εύρος τιμών των πειραματικών παραμέτρων. Στο παρόν τμήμα της αναφοράς επιχειρείται η κατηγοριοποίηση των πειραμάτων και ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων με στόχο να αποκαλυφθούν πιθανά ενδιαφέροντα φαινόμενα που προκαλούνται από την επίδραση των σωματιδίων στη μεταφορά θερμότητας και την πτώση πίεσης.

### 4.1. Αριθμός Reynolds του φέροντος ρευστού

Βασικό στοιχείο για την εξαγωγή συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα που θα ακολουθήσουν αποτελεί ο αριθμός Reynolds του φέροντος ρευστού του προϊόντος. Συγκεκριμένα, ο αδιάστατος αυτός αριθμός συμμετέχει στη συζήτηση των αποτελεσμάτων, τόσο του συντελεστή συναγωγής μεταξύ αγωγού και φέροντος ρευστού όσο και της πτώσης πίεσης, και αποτελεί βασικό όρο στο μαθηματικό μοντέλο που παράχθηκε μέσα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητο να επεξηγηθεί ο τρόπος με τον οποίο ορίστηκε και υπολογίστηκε ο αριθμός Reynolds για το φέρον ρευστό στην παρούσα εργασία.

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι, εφόσον το φέρον ρευστό του διαφασικού προϊόντος είναι ένα ψευδοπλαστικό ρευστό, ο αριθμός Reynolds χαρακτηρίζεται ως *αντιπροσωπευτικός* και, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.4. , υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Re_{repr} = \frac{\rho \cdot D^n \cdot u^{2-n}}{K \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n}\right)^n \cdot 8^{n-1}} \quad (75)$$

όπου

- $\rho$  : η πυκνότητα του φέροντος ρευστού
- $D$  : η διάμετρος του αγωγού
- $u$  : η ταχύτητα ροής του φέροντος ρευστού
- $K$  : ο συντελεστής συνεκτικότητας του φέροντος ρευστού
- $n$  : ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς του φέροντος ρευστού

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η πορεία των υπολογισμών ως τον τελικό στόχο, που είναι ο υπολογισμός του αριθμού Reynolds, για κάθε πείραμα.