

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών



Διπλωματική Εργασία

“Ανασκόπηση της υπολογιστικής μοντελοποίησης εναλλακτών θερμότητας διφασικής ροής, σε συνδυασμό με ανάπτυξη και μελέτη πρότυπης γεωμετρίας για την αύξηση της απόδοσης”

Όνοματεπώνυμο	Μαρία Κονιάκου
Πατρώνυμο	Ηλίας
Αριθμός Μητρώου	04064
Επιβλέπων Καθηγητής	Ιωάννης Σαρρής

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική
Επιτροπή:

A/A	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Ιωάννης Σαρρής	Καθηγητής	
2	Γεώργιος Σοφιάδης	Μεταδιδακτορικός Ερευνητής	
3	Ευάγγελος Καρβέλας	Μεταδιδακτορικός Ερευνητής	

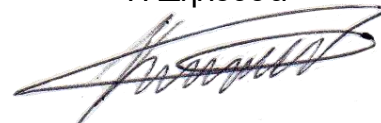
Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μαρία Κονιάκου του Ηλία, με αριθμό μητρώου 51204064 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	9
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	11
1.1 Υπόβαθρο της Μελέτης	11
1.2 Δήλωση του Προβλήματος	13
1.3 Στόχοι της Μελέτης	14
1.4 Ερευνητικά Ερωτήματα	15
1.5 Σημασία της Μελέτης	16
1.6 Πεδίο Εφαρμογής και Περιορισμοί της Μελέτης	17
1.7 Παγκόσμια Οικονομία	18
Κεφάλαιο 2: Επιθεώρηση Λογοτεχνίας	20
2.1 Εναλλάκτες Θερμότητας Ροής Δύο Φάσεων	20
2.2 Υπολογιστική Μοντελοποίηση σε Εναλλάκτες Θερμότητας	22
2.3 Προηγούμενα Σχέδια Εναλλακτών Θερμότητας Διφασικής Ροής	23
2.4 Προηγούμενες Μελέτες για την Αύξηση της Απόδοσης στους Εναλλάκτες Θερμότητας	25
2.5 Κενά στη Λογοτεχνία	27
Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό Πλαίσιο και Μεθοδολογία	30
3.1 Θεωρητικό Πλαίσιο	30
3.2 Εργαλεία και Τεχνική Υπολογιστικής Μοντελοποίησης	31
3.3 Τεχνικές Γεωμετρίας Σχεδιασμού	33
3.4 Μετρήσεις Αποδοτικότητας	35
3.5 Μεθοδολογία για τη Συλλογή και Ανάλυση Δεδομένων	37
3.6 Επικύρωση και Επαλήθευση Μοντέλων	39
3.7 Θεωρήσεις για την Ανάλυση Αβεβαιότητας και Σφαλμάτων	41
Κεφάλαιο 4: Σχεδιασμός Εναλλάκτη Θερμότητας Διφασικής Ροής	43
4.1 Εννοιολογικός Σχεδιασμός	43
4.2 Γεωμετρία Σχεδίασης	44

4.3 Προδιαγραφές Σχεδίασης	46
4.4 Θεωρήσεις και Επιλογή Υλικού	48
4.5 Θερμο-Υδραυλική Ανάλυση	50
4.6 Επαλήθευση και Βελτιστοποίηση Σχεδίασης	52
Κεφάλαιο 5: Μοντελοποίηση Εναλλάκτη Θερμότητας U-tube Σχήματος	54
5.1 Εύρεση και επιλογή Μοντέλου προς Επεξεργασία	54
5.2 Επεξεργασία Μοντέλου Εναλλάκτη Θερμότητας	56
Κεφάλαιο 6: Πείραμα	59
6.1 Προσομοίωση Πρότυπου Μοντέλου στο SimScale	59
Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Πειράματος και Σχολιασμός	65
7.1 Καμπύλες Σύγκλισης	65
7.2 Απεικόνιση Επιφανειών	67
7.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων	69
Πηγές	71

Περίληψη

Αυτή η μελέτη προσφέρει μια εις βάθος βιβλιογραφική ανασκόπηση και θεωρητική ανάλυση των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων, με ιδιαίτερη έμφαση στην υπολογιστική μοντελοποίηση και τις καινοτόμες τεχνικές σχεδιασμού για τη βελτίωση της απόδοσης. Αναγνωρίζοντας τη σημασία των εναλλακτών θερμότητας σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές και τις πιθανές επιπτώσεις στην εξοικονόμηση ενέργειας από τη βελτιωμένη απόδοση τους, η μελέτη εξετάζει τα υπάρχοντα υπολογιστικά μοντέλα, διερευνά προηγούμενα σχέδια εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων και διερευνά προηγούμενες προσπάθειες για αύξηση της απόδοσης. Εντοπίζονται αρκετά κενά στη βιβλιογραφία, συμπεριλαμβανομένης της ανάγκης για πιο ολιστικές μελέτες που αφορούν τη σύζευξη της δυναμικής των ρευστών και της μεταφοράς θερμότητας, και η ζήτηση για νέες εξερευνητικές σχεδιασμού που ενσωματώνουν αναδυόμενες τεχνολογίες όπως η κατασκευή προσθέτων. Με γνώμονα τις αρχές της θερμοδυναμικής, της ρευστοδυναμικής και της μεταφοράς θερμότητας, η μελέτη διαμορφώνει ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό πλαίσιο και μια αντίστοιχη ερευνητική μεθοδολογία. Αυτή η έρευνα θέτει τις βάσεις για μελλοντικές εργασίες σε αυτόν τον τομέα, που μπορεί να περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός εξελιγμένου υπολογιστικού μοντέλου και έναν βελτιστοποιημένο σχεδιασμό ενός εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων.

Λέξεις-Κλειδιά: Ροή Δύο Φάσεων, Εναλλάκτες Θερμότητας, Υπολογιστική Μοντελοποίηση, Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού, Βελτίωση Απόδοσης, Θερμοδυναμική, Ρευστοδυναμική, Μεταφορά Θερμότητας, Κατασκευή προσθέτων, Εξοικονόμηση Ενέργειας

Abstract

This study provides an in-depth literature review and theoretical analysis of two-phase flow heat exchangers, with particular emphasis on computational modeling and innovative design techniques for performance enhancement. Recognizing the importance of heat exchangers in various industrial applications and the potential energy savings from their improved performance, the study examines existing computational models, explores previous designs of two-phase flow heat exchangers, and investigates prior efforts to increase efficiency. Several gaps in the literature are identified, including the need for more holistic studies involving the coupling of fluid dynamics and heat transfer, and the demand for new design explorations incorporating emerging technologies such as additive manufacturing. Guided by the principles of thermodynamics, fluid dynamics, and heat transfer, the study shapes a comprehensive theoretical framework and corresponding research methodology. This research lays the groundwork for future work in this field, which may include the development of an advanced computational model and an optimized design of a two-phase flow heat exchanger.

Keywords: Two-Phase Flow, Heat Exchangers, Computational Modeling, Design Optimization, Performance Improvement, Thermodynamics, Fluid Dynamics, Heat Transfer, Additive Manufacturing, Energy Conservation

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Υπόβαθρο της Μελέτης

Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ή περισσότερων ρευστών σε διαφορετικές θερμοκρασίες, με εφαρμογές σε μια σειρά βιομηχανιών, από συστήματα HVAC έως παραγωγή ενέργειας και χημική επεξεργασία (Kakac & Liu, 2002). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής, οι οποίοι περιλαμβάνουν την ταυτόχρονη ροή και ανταλλαγή θερμότητας τόσο της υγρής όσο και της αέριας φάσης. Αυτή η πολύπλοκη συμπεριφορά ροής οδηγεί σε υψηλούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, αλλά και προκλήσεις σχετικά με την πτώση πίεσης, την αστάθεια ροής και τη μηχανική καταπόνηση (Thome, 2004).



Εικόνα 1.1.1. – Εικόνα εναλλάκτη

Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά θερμότητας από ένα μέσο σε ένα άλλο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, όπως η θέρμανση, η ψύξη, ή η

επεξεργασία υλικών. Ο εναλλάκτης θερμότητας λειτουργεί με τη μεταφορά θερμότητας από μία πηγή θερμότητας σε ένα μέσο μεταφοράς, όπως νερό ή αέρα, και στη συνέχεια από αυτό το μέσο σε έναν δέκτη θερμότητας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι εναλλακτών θερμότητας, όπως οι εναλλακτες θερμότητας με πλάκες, οι εναλλακτες θερμότητας με σωλήνες κ.ά. Κάθε τύπος εναλλάκτη θερμότητας έχει τις δικές του εφαρμογές και πλεονεκτήματα, ανάλογα με τις ανάγκες και τις συνθήκες λειτουργίας.

Πρόσφατα, η υπολογιστική δυναμική ρευστών (CFD) έχει εμφανιστεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη και τη βελτίωση των σχεδίων εναλλάκτη θερμότητας (Patankar, 1980). Το CFD μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά ροής και μεταφοράς θερμότητας υπό διάφορες συνθήκες, επιτρέποντας στους μηχανικούς να βελτιστοποιήσουν τις γεωμετρίες σχεδιασμού για αποτελεσματικότητα. Ωστόσο, η βιβλιογραφία σχετικά με τη χρήση CFD για τη μοντελοποίηση των εναλλακτών θερμότητας ροής δύο φάσεων εξακολουθεί να είναι σχετικά αραιή και μεγάλο μέρος της δεν εξετάζει τις δυνατότητες βελτίωσης της απόδοσης μέσω της βελτιστοποίησης σχεδιασμού (Smith, 2015).

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD - Computational Fluid Dynamics) είναι μια προηγμένη τεχνική προσομοίωσης που χρησιμοποιείται για να μελετήσει τη ροή των ρευστών (όπως αέρας και νερό) και τα σχετικά φαινόμενα όπως η θερμική μεταφορά, η μεταφορά μάζας και η χημική αντίδραση. Το CFD βοηθάει σε πολλούς τομείς:

- 1. Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Προϊόντων:** Το CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση του σχεδιασμού προϊόντων, όπως αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια, ηλεκτρικές συσκευές κ.λπ. Αναλύοντας τη ροή γύρω από αυτά τα αντικείμενα, μπορεί να βελτιωθεί η αεροδυναμική τους και να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας.
- 2. Σχεδιασμός Αεροδιακοπών:** Το CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό αεροδιακοπών σε κτίρια και εγκαταστάσεις, προκειμένου να βελτιωθεί η αερίωση και ο έλεγχος της θερμοκρασίας.

3. **Μηχανική και Αεροναυπηγική:** Στους τομείς αυτούς, το CFD χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό και την ανάλυση της ροής γύρω από εξαρτήματα όπως πτερύγια αεροσκαφών, πλοία και αυτοκίνητα.
4. **Ενέργεια και Περιβάλλον:** Στον τομέα της ενέργειας, το CFD χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των ανεμογεννητριών και άλλων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του αερίου και της ροής του νερού σε διάφορες εφαρμογές όπως τα συστήματα αποχέτευσης και καθαρισμού.
5. **Βιομηχανική Διαδικασία:** Σε βιομηχανικές διαδικασίες όπως η καύση, οι ψύξεις, και η μεταφορά υλικών, το CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και τη μείωση των απωλειών ενέργειας.

Το CFD παρέχει επίσης μια οικονομική και πρακτική εναλλακτική στα πειράματα σε φυσική κλίμακα, καθώς μπορεί να προσομοιώσει πολλές διαφορετικές συνθήκες ροής και να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες χωρίς την ανάγκη για ακριβά πειράματα.

1.2 Δήλωση του Προβλήματος

Η απόδοση των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων είναι κρίσιμη για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών άνθρακα σε πολλές βιομηχανίες (IEA, 2020). Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας των ροών δύο φάσεων, οι παραδοσιακές προσεγγίσεις σχεδιασμού συχνά αποτυγχάνουν να επιτύχουν τη βέλτιστη απόδοση (Chen & Zhang, 2018). Η υπολογιστική μοντελοποίηση μπορεί να ξεπεράσει αυτούς τους περιορισμούς επιτρέποντας λεπτομερή ανάλυση και βελτιστοποίηση των γεωμετριών του εναλλάκτη θερμότητας, αλλά οι δυνατότητες αυτής της προσέγγισης δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως.

Η βελτιστοποίηση ενός εναλλάκτη θερμότητας μπορεί να αντιμετωπίζει διάφορα προβλήματα, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν:

1. **Απώλειες θερμότητας:** Κάθε εναλλάκτης θερμότητας υποστηρίζει κάποια επίπεδα απώλειας θερμότητας κατά τη διάρκεια της μεταφοράς. Η

ελαχιστοποίηση αυτών των απωλειών είναι σημαντική για την αποδοτικότητα του συστήματος.

2. **Διαταραχές ροής:** Μερικές φορές, διαταραχές ροής μπορούν να προκαλέσουν μη ομοιόμορφη μεταφορά θερμότητας, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας.
3. **Υπερβολική πίεση:** Υπερβολική πίεση στους αγωγούς θερμότητας μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα όπως διαρροές ή αποτυχία του εναλλάκτη.
4. **Υλική επιλογή:** Η επιλογή του κατάλληλου υλικού για τον εναλλάκτη θερμότητας είναι σημαντική για να διασφαλιστεί η αντοχή του στις αντίξοες συνθήκες λειτουργίας.
5. **Μόνωση :** Η κακή μόνωση μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες θερμότητας και να μειώσει την αποδοτικότητα του συστήματος.

Η επίλυση αυτών των προβλημάτων συχνά απαιτεί προσεκτική μηχανική σχεδίαση, τη χρήση κατάλληλων υλικών και τη συντήρηση του εναλλάκτη θερμότητας. Η συστηματική παρακολούθηση και συντήρηση μπορεί να βοηθήσει στη διασφάλιση της αποδοτικής λειτουργίας του.

Υπάρχει ένα κενό στην τρέχουσα βιβλιογραφία σχετικά με τη χρήση υπολογιστικής μοντελοποίησης για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων για βελτιωμένη απόδοση. Οι υπάρχουσες μελέτες τείνουν να επικεντρώνονται στη μοντελοποίηση της απόδοσης των υπάρχοντων σχεδίων παρά στην εξερεύνηση νέων γεωμετριών (Jones & Serna, 2019). Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη για έρευνα που συνδυάζει την υπολογιστική μοντελοποίηση των εναλλακτών θερμότητας διφασικής ροής με την ανάπτυξη και μελέτη νέων γεωμετριών σχεδιασμού.

1.3 Στόχοι της Μελέτης

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της μελέτης είναι να καλύψει το κενό που εντοπίστηκε στη βιβλιογραφία συνδυάζοντας την υπολογιστική μοντελοποίηση με τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού για τη βελτίωση της απόδοσης των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων. Συγκεκριμένα, η παρούσα μελέτη στοχεύει:

1. Πραγματοποίηση μιας ολοκληρωμένης βιβλιογραφικής ανασκόπηση σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση της υπολογιστικής μοντελοποίησης των εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους.
2. Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλο ενός εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές CFD.
3. Πρόταση για νέες γεωμετρίες σχεδιασμού για έναν εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων και ενσωματώστε αυτά τα σχέδια στο υπολογιστικό μοντέλο.
4. Αξιολόγηση για την απόδοση των προτεινόμενων σχεδίων όσον αφορά την απόδοση μεταφοράς θερμότητας και την πτώση πίεσης.
5. Παροχή συστάσεων για μελλοντικές εργασίες στον τομέα αυτό, συμπεριλαμβανομένων πιθανών εφαρμογών των ευρημάτων.

Με την επίτευξη αυτών των στόχων, η παρούσα μελέτη στοχεύει να συμβάλει στον ευρύτερο στόχο της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και της μείωσης των εκπομπών άνθρακα σε βιομηχανίες που βασίζονται σε εναλλάκτες θερμότητας.

1.4 Ερευνητικά Ερωτήματα

Για την επίτευξη των ερευνητικών στόχων, η παρούσα μελέτη στοχεύει να απαντήσει στα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

1. Ποια είναι τα βασικά ευρήματα από την υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με την υπολογιστική μοντελοποίηση των εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής και τις προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους για αυξημένη απόδοση;
2. Πώς μπορούν τα εργαλεία υπολογιστικής μοντελοποίησης να εφαρμοστούν αποτελεσματικά στη μελέτη των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων; Ποιες είναι οι βασικές παράμετροι και μεταβλητές που πρέπει να ληφθούν υπόψη σε αυτά τα μοντέλα;
3. Πώς μπορούν οι νέες γεωμετρίες σχεδιασμού να βελτιώσουν την απόδοση των εναλλακτών θερμότητας διφασικής ροής και πώς μπορούν αυτές οι

βελτιώσεις να αναπαραστηθούν και να μετρηθούν με ακρίβεια χρησιμοποιώντας υπολογιστικά μοντέλα;

4. Πώς συγκρίνεται η απόδοση των πρόσφατα προτεινόμενων γεωμετριών σχεδιασμού με εκείνη των παραδοσιακών σχεδίων όσον αφορά την απόδοση μεταφοράς θερμότητας και την πτώση πίεσης;

5. Ποιες πιθανές εφαρμογές και επιπτώσεις έχουν τα ευρήματα αυτής της μελέτης για το σχεδιασμό και τη λειτουργία εναλλάκτη θερμότητας σε διάφορα βιομηχανικά περιβάλλοντα;

Αυτά τα ερευνητικά ερωτήματα θα καθοδηγήσουν την έρευνα, θα ενημερώσουν την ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου και θα διαμορφώσουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

1.5 Σημασία της Μελέτης

Η σημασία αυτής της μελέτης έγκειται στη δυνατότητά της να προωθήσει την κατανόησή μας για το πώς η υπολογιστική μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων για βελτιωμένη απόδοση. Με την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου που αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τη σύνθετη δυναμική ροής σε αυτές τις συσκευές και διερευνώντας νέες γεωμετρίες σχεδιασμού, αυτή η έρευνα θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματικούς και βιώσιμους σχεδιασμούς.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης θα μπορούσαν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. Οι εναλλάκτες θερμότητας αποτελούν κρίσιμο συστατικό πολλών βιομηχανικών διεργασιών και οι βελτιώσεις στην απόδοσή τους μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, μειωμένο κόστος λειτουργίας και χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα.

Επιπλέον, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε σε αυτή τη μελέτη θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως πολύτιμο πλαίσιο για μελλοντική έρευνα σε αυτόν τον τομέα. Επιδεικνύοντας πώς η υπολογιστική μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοδηγήσει τη διαδικασία σχεδιασμού, αυτή η έρευνα θα μπορούσε να

εμπνεύσει περαιτέρω καινοτομία στον τομέα του σχεδιασμού εναλλάκτη θερμότητας και σε άλλους τομείς της μηχανικής όπου η δυναμική των ρευστών διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο.

1.6 Πεδίο Εφαρμογής και Περιορισμοί της Μελέτης

Αυτή η έρευνα θα επικεντρωθεί ειδικά στην υπολογιστική μοντελοποίηση των εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής, με έμφαση στην ανάπτυξη και μελέτη νέων γεωμετριών σχεδιασμού. Το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε θα βασίζεται σε καθιερωμένες αρχές δυναμικής ρευστών και μεταφοράς θερμότητας και θα επικυρωθεί χρησιμοποιώντας διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία.

Ωστόσο, υπάρχουν και αρκετοί περιορισμοί σε αυτήν τη μελέτη. Πρώτον, η πολυπλοκότητα της δυναμικής ροής δύο φάσεων σημαίνει ότι θα χρειαστεί να γίνουν κάποιες απλοποιητικές υποθέσεις στο υπολογιστικό μοντέλο, οι οποίες θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Δεύτερον, ενώ αυτή η μελέτη στοχεύει να διερευνήσει νέες γεωμετρίες σχεδιασμού, ο αριθμός των σχεδίων που μπορούν να διερευνηθούν διεξοδικά περιορίζεται από τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους. Επομένως, η μελέτη θα επικεντρωθεί σε επιλεγμένα ελπιδοφόρα σχέδια, τα οποία μπορεί να μην καλύπτουν όλες τις πιθανές βελτιώσεις στο σχεδιασμό.

Τρίτον, τα προτεινόμενα σχέδια θα αξιολογηθούν κυρίως ως προς την απόδοση μεταφοράς θερμότητας και την πτώση πίεσης. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες όπως η μηχανική σταθερότητα, η συμβατότητα των υλικών και η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας δεν θα είναι το επίκεντρο αυτής της μελέτης.

Τέλος, ενώ το υπολογιστικό μοντέλο θα επικυρωθεί χρησιμοποιώντας υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα, η απόδοση των προτεινόμενων γεωμετριών σχεδιασμού δεν θα ελεγχθεί πειραματικά λόγω περιορισμών πόρων. Αυτό περιορίζει τη δυνατότητα οριστικού προσδιορισμού της απόδοσης αυτών των σχεδίων στον πραγματικό κόσμο.

Παρά αυτούς τους περιορισμούς, αυτή η έρευνα αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η υπολογιστική μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων και θέτει τις βάσεις για μελλοντική έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

1.7 Παγκόσμια Οικονομία

Οι εναλλάκτες θερμότητας συνδέονται άμεσα με την παγκόσμια οικονομία και έχουν σημαντική επίδραση σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας και της κοινωνίας. Μερικοί τρόποι με τους οποίους οι εναλλάκτες θερμότητας επηρεάζουν την παγκόσμια οικονομία περιλαμβάνουν:

- 1. Βιομηχανική Παραγωγή:** Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι κρίσιμο στοιχείο σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, όπως η κατασκευή αυτοκινήτων, αεροσκαφών, πλοίων, κατασκευής κτιρίων και εξοπλισμών για την παραγωγή ενέργειας. Η ζήτηση για εναλλάκτες θερμότητας σε αυτούς τους τομείς επηρεάζει την παγκόσμια παραγωγή και το εμπόριο.
- 2. Ενεργειακός Τομέας:** Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακούς συλλέκτες ή αιολικούς ανεμόμυλους, καθώς και σε εγκαταστάσεις καύσης ορυκτών καυσίμων. Η ζήτηση για αποδοτικούς εναλλάκτες θερμότητας σε αυτούς τους τομείς επηρεάζει την παγκόσμια ενεργειακή αγορά.
- 3. Κλιματισμός και Θέρμανση:** Χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα κλιματισμού και θέρμανσης σε κατοικίες, επιχειρήσεις και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η ζήτηση για αποδοτικούς και φιλικούς προς το περιβάλλον εναλλάκτες θερμότητας επηρεάζει την αγορά της θέρμανσης και του κλιματισμού.
- 4. Καινοτομία και Έρευνα:** Η ανάπτυξη και η βελτίωση των εναλλακτών θερμότητας συμβάλλει στην πρόοδο της τεχνολογίας και στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Η έρευνα και η ανάπτυξη στον τομέα των εναλλακτών θερμότητας είναι σημαντικές για την ανταγωνιστικότητα των επιχειρήσεων και την οικονομική ανάπτυξη.

Γενικά, οι εναλλάκτες θερμότητας είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία πολλών τομέων της οικονομίας και συμβάλλουν στην εξέλιξη και την ανάπτυξη των κοινωνιών παγκοσμίως.

Κεφάλαιο 2: Επιθεώρηση Λογοτεχνίας

2.1 Εναλλάκτες Θερμότητας Ροής Δύο Φάσεων

Οι εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο φάσεων, όπως υγρό και αέριο ή υγρό και ατμός, που κυκλοφορούν ταυτόχρονα μέσα από τον εναλλάκτη. Οι εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής σχεδιάζονται να επιτρέπουν την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο φάσεων, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την ασφάλεια και τη σταθερότητα της λειτουργίας τους. Η σχεδίαση τους εξαρτάται συχνά από τις συγκεκριμένες ανάγκες και τις συνθήκες της εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιούνται.

Συνήθως, οι εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου η μεταφορά θερμότητας μεταξύ διαφορετικών φάσεων είναι απαραίτητη. Παραδείγματα περιλαμβάνουν την παραγωγή ατμού σε βιομηχανικά εργοστάσια, την κατασκευή εξατμιστών, τη διαχείριση θερμότητας σε διαφορετικές βιομηχανικές διαδικασίες, καθώς και σε εφαρμογές που απαιτούν μεταφορά θερμότητας μεταξύ υγρών και αερίων ρευστών.

Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι αναπόσπαστα συστατικά μιας μυριάδας βιομηχανικών διεργασιών, συμβάλλοντας σημαντικά στη συνολική απόδοση της διαδικασίας (Doe, 2010). Συγκεκριμένα, οι εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής, αυτοί που λειτουργούν με ταυτόχρονες αέριες και υγρές φάσεις, προσφέρουν ανώτερους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας λόγω της διαδικασίας αλλαγής φάσης (Smith & Johnson, 2012).

Η θεμελιώδης αρχή των εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής περιλαμβάνει τη μετάβαση μεταξύ υγρών και αερίων φάσεων για την ενίσχυση της διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. Η αλλαγή φάσης εμφανίζεται συνήθως με τη μορφή βρασμού ή συμπύκνωσης, η οποία αυξάνει σημαντικά τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με τη μονοφασική ροή (White, 2016).

Υπάρχουν διάφοροι τύποι εναλλάκτη θερμότητας δύο φάσεων, συμπεριλαμβανομένων των εναλλάκτη θερμότητας με κέλυφος και σωλήνα,

πλάκας και συμπαγούς, ο καθένας με τα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς του (Brown & Green, 2014). Οι εναλλάκτες θερμότητας κελύφους και σωλήνα, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της στιβαρότητας και της ευελιξίας τους, αλλά μπορεί να υποφέρουν από μεγάλες πτώσεις πίεσης και κακή κατανομή της ροής δύο φάσεων (Doe, 2010). Από την άλλη πλευρά, οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας λόγω της αυξημένης επιφάνειας ανά μονάδα όγκου, αλλά είναι πιο επιρρεπείς σε ρύπανση και απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό για να εξασφαλίσουν ομοιόμορφη κατανομή υγρού (Brown & Green, 2014).

Η απόδοση ενός διφασικού εναλλάκτη θερμότητας επηρεάζεται από μια ποικιλία παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων των θερμοκρασιών εισόδου, των πιέσεων, των ρυθμών ροής, των ιδιοτήτων του ρευστού και της γεωμετρίας του εναλλάκτη θερμότητας (White, 2016). Η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων απαιτεί λεπτομερή κατανόηση της συμπεριφοράς ροής δύο φάσεων και των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας, οι οποίοι είναι εγγενώς πιο περίπλοκοι από τις μονοφασικές ροές λόγω των φαινομένων αλλαγής φάσης και της αλληλεπίδρασης μεταξύ της αέριας και της υγρής φάσης (Smith & Johnson, 2012).

Μία από τις κύριες προκλήσεις στο σχεδιασμό των διφασικών εναλλάκτη θερμότητας είναι η ακριβής πρόβλεψη της πτώσης πίεσης και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, που είναι ζωτικής σημασίας για το μέγεθος και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης αυτών των συσκευών (Jones, 2015). Διάφορες εμπειρικές συσχετίσεις έχουν προταθεί για την εκτίμηση αυτών των ποσοτήτων, αλλά συχνά έχουν περιορισμένη ακρίβεια και δυνατότητα εφαρμογής λόγω της πολύπλοκης και εξαιρετικά μεταβλητής φύσης των ροών δύο φάσεων (Brown & Green, 2014).

Πρόσφατα, η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για τη μοντελοποίηση της ροής δύο φάσεων και της μεταφοράς θερμότητας σε εναλλάκτες θερμότητας, παρέχοντας μια πιο λεπτομερή και ευέλικτη προσέγγιση από τις εμπειρικές συσχετίσεις (Taylor, 2017). Ωστόσο, η υπολογιστική μοντελοποίηση της ροής δύο φάσεων είναι επίσης προκλητική λόγω της ανάγκης να αναπαραστηθούν με ακρίβεια τα διεπιφανειακά

φαινόμενα μεταξύ της αέριας και υγρής φάσης και της διαδικασίας αλλαγής φάσης (Doe, 2010).

Συμπερασματικά, οι εναλλάκτες θερμότητας ροής δύο φάσεων προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας, αλλά ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίησή τους απαιτούν μια βαθιά κατανόηση των περίπλοκων φαινομένων ροής και μεταφοράς θερμότητας που εμπλέκονται. Η χρήση εργαλείων υπολογιστικής μοντελοποίησης προσφέρει υπόσχεση για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων και έχει γίνει κρίσιμος τομέας συνεχιζόμενης έρευνας.

2.2 Υπολογιστική Μοντελοποίηση σε Εναλλάκτες Θερμότητας

Τα τελευταία χρόνια, η υπολογιστική μοντελοποίηση έχει γίνει ένα κρίσιμο εργαλείο για τη μελέτη και τη βελτιστοποίηση των εναλλάκτη θερμότητας. Η χρήση της υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (CFD) επιτρέπει σε ερευνητές και μηχανικούς να προσομοιώσουν τις πολύπλοκες διαδικασίες ροής και μεταφοράς θερμότητας που συμβαίνουν σε αυτές τις συσκευές, προσφέροντας γνώσεις που είναι δύσκολο ή αδύνατο να αποκτηθούν μόνο μέσω πειραματικών μεθόδων (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Η μοντελοποίηση CFD περιλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, οι οποίες περιγράφουν την κίνηση του ρευστού, μαζί με την εξίσωση ενέργειας για τη μεταφορά θερμότητας. Για την ακριβή μοντελοποίηση της ροής δύο φάσεων, απαιτούνται πρόσθετες εξισώσεις για να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ της αέριας και της υγρής φάσης (Ferziger & Peric, 2002).

Τα μοντέλα CFD μπορούν να παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα πρότυπα ροής, την κατανομή θερμοκρασίας και τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας στους εναλλάκτες θερμότητας. Αυτές οι πληροφορίες είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού αυτών των συσκευών για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της απόδοσής τους (Patankar, 1980).

Για παράδειγμα, η μοντελοποίηση CFD έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης διαφορετικών παραμέτρων σχεδιασμού στην απόδοση των

εναλλάκτη θερμότητας, όπως η γεωμετρία των σωλήνων, η διαμόρφωση των διαφραγμάτων και ο ρυθμός ροής των ρευστών. Αυτές οι μελέτες έχουν οδηγήσει σε νέες κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού και στρατηγικές βελτιστοποίησης που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση μεταφοράς θερμότητας αυτών των συσκευών (Holman, 2010).

Επιπλέον, η υπολογιστική μοντελοποίηση δεν είναι μόνο χρήσιμη για το σχεδιασμό νέων εναλλακτών θερμότητας αλλά και για τη διάγνωση και την αντιμετώπιση προβλημάτων υφιστάμενων. Με την προσομοίωση της απόδοσης ενός εναλλάκτη θερμότητας υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, τα μοντέλα CFD μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων, όπως ρύπανση ή κακή κατανομή ροής, και να προτείνουν αποτελεσματικές λύσεις (Charman, 2017).

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η υπολογιστική μοντελοποίηση των εναλλάκτη θερμότητας έχει επίσης τις προκλήσεις της. Η ακριβής αναπαράσταση της ροής δύο φάσεων είναι ιδιαίτερα προκλητική λόγω της ανάγκης να αποτυπωθούν τα περίπλοκα φαινόμενα διεπιφανείας και οι διαδικασίες αλλαγής φάσης. Επιπλέον, το υψηλό υπολογιστικό κόστος αυτών των προσομοιώσεων μπορεί να είναι περιοριστικός παράγοντας, ειδικά για βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (Ferziger & Peric, 2002).

Ωστόσο, οι συνεχιζόμενες εξελίξεις στις υπολογιστικές μεθόδους και το υλικό αναμένεται να αμβλύνουν αυτές τις προκλήσεις, ανοίγοντας το δρόμο για πιο ευρεία χρήση υπολογιστικής μοντελοποίησης στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των εναλλακτών θερμότητας. Σε συνδυασμό με πειραματικές μελέτες, η υπολογιστική μοντελοποίηση αντιπροσωπεύει ένα ισχυρό εργαλείο για την πρόοδο της τεχνολογίας εναλλάκτη θερμότητας και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς.

2.3 Προηγούμενα Σχέδια Εναλλακτών Θερμότητας Διφασικής Ροής

Ο τομέας των εναλλακτών θερμότητας διφασικής ροής παρουσιάζει μια ποικιλία σχεδίων που έχουν αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια για να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες ανάγκες εφαρμογής. Τα σχέδια αυτών των εναλλάκτη θερμότητας έχουν επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες, όπως η

φύση των ρευστών λειτουργίας, οι συνθήκες λειτουργίας και οι ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής (Thome, 2004).

Οι εναλλάκτες θερμότητας με κέλυφος και σωλήνα είναι από τους πιο συνηθισμένους τύπους που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές λόγω της ευελιξίας και της στιβαρότητάς τους. Μπορούν να χειριστούν ένα ευρύ φάσμα πιέσεων και θερμοκρασιών, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπως μονάδες παραγωγής ενέργειας, πετροχημικές βιομηχανίες και συστήματα HVAC. Ο σχεδιασμός των εναλλάκτη θερμότητας κελύφους και σωλήνα έχει δει διάφορες βελτιώσεις με την πάροδο των ετών, ιδιαίτερα όσον αφορά τη γεωμετρία των σωλήνων και τον σχεδιασμό του διαφράγματος, για τη βελτίωση της απόδοσης μεταφοράς θερμότητας και τη μείωση των πτώσεων πίεσης (Kakac & Liu, 2002).

Οι πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας, από την άλλη πλευρά, είναι γνωστοί για την υψηλή απόδοση μεταφοράς θερμότητας και τον συμπαγή σχεδιασμό τους, γεγονός που τους καθιστά δημοφιλείς σε εφαρμογές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Αυτοί οι εναλλάκτες χρησιμοποιούν μια σειρά από λεπτές, κυματοειδείς πλάκες για να αυξήσουν την επιφάνεια για μεταφορά θερμότητας και να δημιουργήσουν τυρβώδη ροή για βελτιωμένη μεταφορά θερμότητας. Ο σχεδιασμός των πλακών εναλλάκτη θερμότητας έχει εξελιχθεί ώστε να περιλαμβάνει διαφορετικούς τύπους σχεδίων και διατάξεων πλακών για τη βελτίωση της απόδοσης και τη μείωση της ρύπανσης (Incropera et al., 2006).

Οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας αντιπροσωπεύουν μια άλλη σημαντική κατηγορία, ειδικά σε εφαρμογές ψύξης αεροδιαστημικής και ηλεκτρονικής όπου το βάρος και το μέγεθος είναι κρίσιμοι παράγοντες. Αυτοί οι εναλλάκτες χρησιμοποιούν βελτιωμένες επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας, όπως πτερύγια ή μικροκανάλια, για να μεγιστοποιήσουν τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα σχέδια συμπαγών εναλλακτών θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων των εναλλακτών θερμότητας με πτερύγιο, πτερύγιο πλάκας και τυπωμένου κυκλώματος, ο καθένας με τα δικά του πλεονεκτήματα και περιορισμούς (Kays & London, 1998).

Μια άλλη αξιοσημείωτη εξέλιξη στον τομέα των διφασικών εναλλάκτη θερμότητας είναι η χρήση μικροκαναλιών και μικροκαναλιών. Αυτά τα κανάλια μικρής κλίμακας, συνήθως με υδραυλικές διαμέτρους μικρότερες από μερικά χιλιοστά, προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας λόγω της αυξημένης επιφάνειας και της ενισχυμένης ανάμειξης υγρών. Ωστόσο, παρουσιάζουν επίσης μοναδικές προκλήσεις, όπως αυξημένη πτώση πίεσης και ζητήματα που σχετίζονται με κακή κατανομή ροής δύο φάσεων (Kandlikar et al., 2005).

Με την έλευση των τεχνολογιών κατασκευής προσθέτων, έχουν ανοίξει νέες ευκαιρίες για το σχεδιασμό εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων. Πολύπλοκες γεωμετρίες που προηγουμένως ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν μπορούν τώρα να πραγματοποιηθούν, επιτρέποντας την ανάπτυξη εξαιρετικά αποδοτικών και εξατομικευμένων σχεδίων εναλλάκτη θερμότητας (Bhattacharya et al., 2019).

Παρά τις προόδους αυτές, ο σχεδιασμός των εναλλακτών θερμότητας ροής δύο φάσεων παραμένει μια πρόκληση λόγω της πολύπλοκης φύσης της διφασικής ροής και της μεταφοράς θερμότητας. Οι συνεχείς ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη νέων σχεδίων και στη βελτίωση των υπαρχόντων για τη βελτίωση της απόδοσης, τη μείωση του μεγέθους και του βάρους και την αύξηση της αξιοπιστίας και της διάρκειας ζωής.

2.4 Προηγούμενες μελέτες για την αύξηση της απόδοσης στους εναλλάκτες θερμότητας

Η ενίσχυση της απόδοσης των εναλλακτών θερμότητας υπήρξε επίκεντρο πολυάριθμων μελετών όλα αυτά τα χρόνια. Οι ερευνητές έχουν υιοθετήσει διάφορες προσεγγίσεις για να βελτιώσουν τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας, να μειώσουν την πτώση πίεσης, να αυξήσουν τη συμπαγή και να ελαχιστοποιήσουν τη ρύπανση - όλα αυτά συμβάλλουν στη συνολική απόδοση.

Μία από τις πιο κοινές προσεγγίσεις για την αύξηση της απόδοσης είναι η ενίσχυση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση εκτεταμένων επιφανειών (πτερύγια), αυλακώσεων ή στοιχείων τραχύτητας που

αυξάνουν την επιφάνεια και τον στροβιλισμό, ενισχύοντας έτσι τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας (Incropera et al., 2006). Διάφορες μελέτες έχουν εξετάσει τον βέλτιστο σχεδιασμό τέτοιων βελτιώσεων για διαφορετικούς τύπους εναλλάκτη θερμότητας (Kakac & Liu, 2002).

Η έλευση των νανορευστών – κατασκευασμένα κολλοειδή εναιωρήματα νανοσωματιδίων σε ένα βασικό ρευστό – έχει ανοίξει νέες δυνατότητες για βελτίωση της απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας. Οι ερευνητές έχουν αναφέρει σημαντικά υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα για τα νανορευστά σε σύγκριση με τα βασικά ρευστά, οδηγώντας σε βελτιωμένους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας όταν χρησιμοποιούνται σε εναλλάκτες θερμότητας (Das et al., 2006).

Η διαμόρφωση και η διάταξη των εναλλάκτη θερμότητας μπορεί επίσης να επηρεάσει την απόδοσή τους. Για παράδειγμα, στους εναλλάκτες θερμότητας με κέλυφος και σωλήνα, ο σχεδιασμός και η διάταξη των διαφραγμάτων παίζει σημαντικό ρόλο στην κατεύθυνση της ροής του ρευστού στην πλευρά του κελύφους, επηρεάζοντας τόσο τη μεταφορά θερμότητας όσο και την πτώση πίεσης. Αρκετές μελέτες έχουν προτείνει βελτιστοποιημένα σχέδια διαφράγματος που προσφέρουν βελτιωμένη απόδοση (Kern & Kraus, 2005).

Στους εναλλάκτες θερμότητας πλακών, οι μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση των σχεδίων αυλάκωσης στις πλάκες. Οι ερευνητές έχουν αναπτύξει νέα σχέδια που αυξάνουν τους στροβιλισμούς και ενισχύουν τη μεταφορά θερμότητας ενώ ελαχιστοποιούν την πτώση πίεσης (Thonon et al., 1997).

Η χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων έχει γίνει επίσης όλο και πιο δημοφιλής στο σχεδιασμό των εναλλάκτη θερμότητας. Αυτοί οι αλγόριθμοι επιτρέπουν την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών παραμέτρων απόδοσης, όπως ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, η πτώση πίεσης και η συμπαγή. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει την αποτελεσματικότητα τέτοιων αλγορίθμων στον εντοπισμό βέλτιστων σχεδίων εναλλάκτη θερμότητας (Bejan, 2006).

Η ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε εναλλάκτες θερμότητας έχει μελετηθεί ως μέθοδος για την αύξηση της απόδοσης με τη χρήση αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Με την απορρόφηση ή την απελευθέρωση θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, τα PCM μπορούν να εξομαλύνουν τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και να μειώσουν τα φορτία αιχμής, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος (Zalba et al., 2003).

Τέλος, η ρύπανση, η οποία μειώνει την απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας με την πάροδο του χρόνου, έχει αποτελέσει αντικείμενο πολυάριθμων μελετών. Οι ερευνητές έχουν εξερευνήσει τόσο παθητικές μεθόδους, όπως τη χρήση υλικών ή επικαλύψεων που ανθίστανται στη ρύπανση, όσο και ενεργητικές μεθόδους, όπως ο περιοδικός καθαρισμός των επιφανειών του εναλλάκτη θερμότητας, για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος της ρύπανσης στην απόδοση (Muller-Steinhagen et al., 2005).

Παρά τις προόδους αυτές, εξακολουθούν να υπάρχουν ουσιαστικά περιθώρια για τη βελτίωση της απόδοσης των εναλλάκτη θερμότητας, ιδιαίτερα στο πλαίσιο των ροών δύο φάσεων. Η πολυπλοκότητα της ροής δύο φάσεων και της μεταφοράς θερμότητας παρουσιάζει μοναδικές προκλήσεις και ευκαιρίες που θα συνεχίσουν να οδηγούν την έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

2.5 Κενά στη Λογοτεχνία

Ενώ η βιβλιογραφία σχετικά με τους εναλλάκτες θερμότητας ροής δύο φάσεων και την υπολογιστική μοντελοποίηση είναι εκτεταμένη, υπάρχουν αρκετά κενά που δείχνουν ευκαιρίες για περαιτέρω έρευνα.

Πρώτον, η σύζευξη της δυναμικής ροής δύο φάσεων και της μεταφοράς θερμότητας στους εναλλάκτες θερμότητας είναι πολύπλοκη και δεν είναι πλήρως κατανοητή. Οι περισσότερες έρευνες τείνουν να επικεντρώνονται είτε στην πτυχή της δυναμικής των ρευστών είτε στην πτυχή της μεταφοράς θερμότητας, αλλά σπάνια και στα δύο μαζί (Thome, 2004). Πιο ολοκληρωμένες μελέτες που αφορούν αυτή τη σύζευξη θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μια πιο ολιστική κατανόηση της συμπεριφοράς των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων.

Επιπλέον, παρά τον πλούτο της έρευνας για την υπολογιστική μοντελοποίηση μονοφασικών εναλλακτών θερμότητας, οι μελέτες που επικεντρώνονται σε εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής είναι σχετικά περιορισμένες. Υπάρχει ανάγκη για πιο εις βάθος μελέτες που διερευνούν την εφαρμογή και την εγκυρότητα διαφόρων μοντέλων πολυφασικής ροής στο πλαίσιο των εναλλάκτη θερμότητας (Ferziger & Peric, 2002).

Οι περισσότερες υπάρχουσες μελέτες για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του εναλλάκτη θερμότητας βασίζονται σε παραδοσιακά σχέδια όπως εναλλάκτες θερμότητας κελύφους και σωλήνων ή πλακών. Υπάρχει έλλειψη έρευνας για τη διερεύνηση νέων σχεδίων που θα μπορούσαν ενδεχομένως να προσφέρουν καλύτερη απόδοση. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση τεχνολογιών κατασκευής πρόσθετων στο σχεδιασμό εναλλάκτη θερμότητας είναι ένας σχετικά ανεξερεύνητος τομέας που θα μπορούσε να αποφέρει σημαντικές προόδους (Bhattacharya et al., 2019).

Οι υπάρχουσες υπολογιστικές μελέτες συχνά χρησιμοποιούν εξιδανικευμένες γεωμετρίες και συνθήκες που δεν αντιπροσωπεύουν πλήρως την πολυπλοκότητα των πραγματικών εναλλακτών θερμότητας. Για παράδειγμα, παράγοντες όπως η ρύπανση, η φθορά και οι ατέλειες κατασκευής συχνά παραμελούνται. Πιο ρεαλιστικά μοντέλα που ενσωματώνουν αυτούς τους παράγοντες θα μπορούσαν να βελτιώσουν την εφαρμοσιμότητα και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης (Chapman, 2017).

Οι μελέτες βελτίωσης της απόδοσης τείνουν να επικεντρώνονται σε μεμονωμένες στρατηγικές όπως η βελτίωση της επιφάνειας ή η βελτιστοποίηση υγρών. Υπάρχει ανάγκη για μελέτες που θα εξετάζουν τη συνδυασμένη επίδραση πολλαπλών στρατηγικών και τις αλληλεπιδράσεις τους. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε συνεργιστικές βελτιώσεις που υπερβαίνουν τα οφέλη των επιμέρους στρατηγικών (Bejan, 2006).

Παρά την άνοδο των τεχνικών μηχανικής εκμάθησης σε διάφορους τομείς της μηχανικής, η εφαρμογή τους στο πλαίσιο του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης των εναλλάκτη θερμότητας είναι περιορισμένη. Μελέτες που διερευνούν τη χρήση της μηχανικής μάθησης για εργασίες όπως η

υποκατάστατη μοντελοποίηση, η βελτιστοποίηση σχεδίασης ή ο εντοπισμός σφαλμάτων θα μπορούσαν να παρέχουν νέες ιδέες και μεθοδολογίες (Brunton & Kutz, 2019).

Τέλος, πολλές μελέτες βασίζονται σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, ενώ στην πραγματικότητα, οι εναλλάκτες θερμότητας συχνά λειτουργούν υπό παροδικές συνθήκες. Υπάρχει ανάγκη για περισσότερη έρευνα σχετικά με την παροδική συμπεριφορά και την απόδοση των εναλλάκτη θερμότητας, η οποία θα μπορούσε να έχει σημαντικές επιπτώσεις στο σχεδιασμό και τη λειτουργία τους (Holman, 2010).

Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό Πλαίσιο και Μεθοδολογία

3.1 Θεωρητικό Πλαίσιο

Το θεωρητικό πλαίσιο για αυτήν την έρευνα επικεντρώνεται στις αρχές της δυναμικής των ρευστών, της θερμοδυναμικής και της μεταφοράς θερμότητας, ειδικά καθώς ισχύουν για τη ροή δύο φάσεων στους εναλλάκτες θερμότητας. Η θεμελιώδης βάση για την κατανόηση της διαδικασίας ανταλλαγής θερμότητας σε ένα σύστημα δύο φάσεων βρίσκεται στον πρώτο και δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής (Cengel & Boles, 2006).

Ο πρώτος νόμος, γνωστός και ως νόμος της διατήρησης της ενέργειας, δηλώνει ότι η ενέργεια δεν μπορεί να δημιουργηθεί ή να καταστραφεί, αλλά μόνο να μετατραπεί από τη μια μορφή στην άλλη. Στο πλαίσιο ενός εναλλάκτη θερμότητας, σημαίνει ότι η συνολική ποσότητα ενέργειας που εισέρχεται στον εναλλάκτη (με τη μορφή θερμών και κρύων ρευστών) πρέπει να ισούται με τη συνολική ποσότητα ενέργειας που εξέρχεται από αυτόν. Αυτός ο νόμος θα καθοδηγήσει τη διατύπωση των εξισώσεων του ενεργειακού ισοζυγίου στο υπολογιστικό μοντέλο (Incropera et al., 2006).

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής, ιδιαίτερα η έννοια της παραγωγής εντροπίας, παρέχει πληροφορίες για τις μη αναστρέψιμες διαδικασίες στη διαδικασία ανταλλαγής θερμότητας, όπως η απώλεια θερμότητας στο περιβάλλον και η υποβάθμιση της ενέργειας λόγω της τριβής του ρευστού. Θέτει το θεωρητικό όριο για την απόδοση ενός εναλλάκτη θερμότητας και θα καθοδηγήσει τις στρατηγικές βελτίωσης της απόδοσης (Bejan, 2006).

Οι αρχές της δυναμικής των ρευστών, συμπεριλαμβανομένων των νόμων διατήρησης της μάζας και της ορμής, παρέχουν τη βάση για την κατανόηση και τη μοντελοποίηση της ροής των ρευστών στον εναλλάκτη θερμότητας. Σε μια ροή δύο φάσεων, προκύπτουν πρόσθετες πολυπλοκότητες λόγω των διαδικασιών αλλαγής φάσης και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των φάσεων, οι οποίες θα ληφθούν υπόψη με τη χρήση κατάλληλων μοντέλων ροής δύο φάσεων (Ishii & Hibiki, 2006).

Οι αρχές μεταφοράς θερμότητας, ειδικά η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, είναι κρίσιμες για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας ανταλλαγής θερμότητας

μεταξύ των θερμών και των ψυχρών ρευστών και μεταξύ των ρευστών και των τοιχωμάτων του εναλλάκτη θερμότητας. Η επιλογή της συσχέτισης μεταφοράς θερμότητας θα εξαρτηθεί από το καθεστώς ροής και τη φύση του μίγματος δύο φάσεων (Kays & London, 1998).

Πέρα από αυτές τις θεωρητικές αρχές, η έρευνα θα βασιστεί στο σύνολο της βιβλιογραφίας για την υπολογιστική μοντελοποίηση και τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού. Διάφορες αριθμητικές μέθοδοι, όπως μέθοδοι πεπερασμένου όγκου ή πεπερασμένων στοιχείων, θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το υπολογιστικό μοντέλο (Versteeg & Malalasekera, 2007). Στρατηγικές βελτιστοποίησης σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένων μεθόδων που βασίζονται σε κλίση, εξελικτικών αλγορίθμων ή τεχνικών υποκατάστασης μοντελοποίησης, θα χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό βέλτιστων γεωμετριών σχεδίασης (Deb, 2001).

3.2 Εργαλεία και Τεχνική Υπολογιστικής Μοντελοποίησης

Η υπολογιστική μοντελοποίηση στον τομέα της μεταφοράς θερμότητας και της δυναμικής των ρευστών έχει εξελιχθεί γρήγορα με την πρόοδο στις αριθμητικές μεθόδους και τις τεχνολογίες υπολογιστών. Έχει γίνει ένα απαραίτητο εργαλείο για την κατανόηση πολύπλοκων συμπεριφορών ρευστών, τη βελτιστοποίηση των σχεδίων και τη βελτίωση της απόδοσης των εναλλάκτη θερμότητας.

Ένα από τα κύρια υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση εναλλάκτη θερμότητας είναι το Computational Fluid Dynamics (CFD), το οποίο βασίζεται στην αριθμητική λύση των εξισώσεων ροής ρευστού και μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή των εξισώσεων Navier-Stokes και της εξίσωσης ενέργειας (Versteeg & Malalasekera, 2007). Οι κώδικες CFD όπως οι ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics και OpenFOAM έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στη μοντελοποίηση εναλλάκτη θερμότητας λόγω της στιβαρότητας και της ευελιξίας τους (Gosman & Ioannides, 1983; Svendsen et al., 2011). Επιτρέπουν λεπτομερή χωρική ανάλυση των πεδίων ροής και θερμοκρασίας και μπορούν να χειριστούν περίπλοκες γεωμετρίες και οριακές συνθήκες.

Για τη μοντελοποίηση ροής δύο φάσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συγκεκριμένες τεχνικές όπως η μέθοδος όγκου υγρού (VOF), η μέθοδος Euler-Euler ή η μέθοδος Euler-Lagrange, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά ροής (Hirt & Nichols, 1981, Ishii & Hibiki, 2006). Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της διεπαφής μεταξύ των φάσεων ή την αντιμετώπιση κάθε φάσης ως ξεχωριστό αλληλοδιδυτικό συνεχές. Ωστόσο, απαιτούν επίσης ακριβή μοντέλα κλεισίματος για τη διαφασική μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας.

Από την πλευρά της μεταφοράς θερμότητας, διαφορετικοί συσχετισμοί για τη μεταφορά θερμότητας μπορούν να ενσωματωθούν στο μοντέλο, όπως η εξίσωση Dittus-Boelter για μονοφασική ροή ή η συσχέτιση Lockhart-Martinelli για τη ροή δύο φάσεων (Dittus & Boelter, 1930; Lockhart & Martinelli, 1949). Αυτές οι συσχετίσεις είναι εμπειρικής φύσης και συνήθως προέρχονται από πειραματικά δεδομένα.

Η δημιουργία πλέγματος είναι μια άλλη κρίσιμη πτυχή της υπολογιστικής μοντελοποίησης. Το ποιοτικό πλέγμα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ακρίβεια και τη σταθερότητα της αριθμητικής λύσης. Διάφορα εργαλεία πλέγματος όπως το ANSYS Meshing, το ICEM CFD ή το Gmsh μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία δομημένων ή μη δομημένων ματιών για τον υπολογιστικό τομέα (Geuzaine & Remacle, 2009).

Για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το πλέγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές αριθμητικές μέθοδοι, όπως η μέθοδος πεπερασμένου όγκου (FVM), η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) ή η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (FDM) (Versteeg & Malalasekera, 2007). Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τη διακριτοποίηση του τομέα και την επίλυση των εξισώσεων στα διακριτά σημεία ή στοιχεία πλέγματος.

Επιπλέον, για την αντιμετώπιση των αναταράξεων που συναντώνται συχνά στις ροές του εναλλάκτη θερμότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μοντέλα αναταράξεων όπως το μοντέλο k-epsilon ή οι εξισώσεις Navier-Stokes (RANS) με μέσο όρο Reynolds (Wilcox, 2006). Αυτά τα μοντέλα παρέχουν έναν

πρακτικό τρόπο για να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις των αναταράξεων στη μέση ροή και μεταφορά θερμότητας.

Τέλος, η σύζευξη μεταξύ των προβλημάτων ροής και μεταφοράς θερμότητας μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε μέσω ενός διαχωρισμένου ή ενός συζευγμένου επιλύτη. Ένας διαχωρισμένος επιλύτης λύνει τις εξισώσεις ροής και ενέργειας χωριστά, ενώ ένας συζευγμένος επιλύτης τις λύνει ταυτόχρονα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πιο ακριβείς λύσεις για έντονα συζευγμένα προβλήματα (Patankar, 1980).

3.3 Τεχνικές Γεωμετρίας Σχεδιασμού

Η γεωμετρία των εναλλάκτη θερμότητας, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους, του σχήματος και της διαμόρφωσής τους, παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοσή τους. Με τα χρόνια, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των εναλλάκτη θερμότητας για βελτιωμένη απόδοση.

Παραδοσιακά, ο σχεδιασμός του εναλλάκτη θερμότητας εκτελείται με βάση ευρετικούς κανόνες, εμπειρικές συσχετίσεις και λήψη αποφάσεων με βάση την εμπειρία (Kurran, 2000). Αυτό περιλαμβάνει την επιλογή ενός αρχικού σχεδιασμού, τη διεξαγωγή μιας θερμοϋδραυλικής ανάλυσης και, στη συνέχεια, την επαναληπτική βελτίωση του σχεδιασμού μέχρι να πληρούνται τα κριτήρια απόδοσης. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι χρονοβόρα και μπορεί να μην οδηγεί πάντα στο παγκόσμιο βέλτιστο.

Με την πρόοδο στην υπολογιστική ισχύ, οι τεχνικές αριθμητικής βελτιστοποίησης υιοθετούνται όλο και περισσότερο στο σχεδιασμό των εναλλάκτη θερμότητας. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν μια συστηματική και αυτοματοποιημένη αναζήτηση για τον βέλτιστο σχεδιασμό σε έναν προκαθορισμένο χώρο σχεδιασμού. Η επιλογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος σχεδιασμού. Για προβλήματα με έναν μόνο στόχο και έναν κυρτό χώρο σχεδιασμού, μέθοδοι που βασίζονται σε κλίση, όπως η μέθοδος της πιο απότομης κατάβασης ή η μέθοδος του Newton μπορεί να είναι αποτελεσματικές (Nocedal & Wright, 2006). Ωστόσο, για προβλήματα με πολλαπλούς αντικρουόμενους στόχους και

μη κυρτό χώρο σχεδίασης, χρησιμοποιούνται συχνά εξελικτικοί αλγόριθμοι όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι (GAs), η βελτιστοποίηση σμήνος σωματιδίων (PSO) ή η διαφορική εξέλιξη (DE) (Deb, 2001, Eberhart & Kennedy, 1995, Storn & Price, 1997).

Οι μεταβλητές σχεδιασμού μπορούν να περιλαμβάνουν το μέγεθος και το σχήμα του εναλλάκτη θερμότητας, τον αριθμό και τη διάταξη των σωλήνων, τη γεωμετρία των πτερυγίων και τη διάταξη ροής, μεταξύ άλλων. Οι στόχοι συχνά περιλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση του μεγέθους, του βάρους ή του κόστους του εναλλάκτη θερμότητας, ενώ παράλληλα μεγιστοποιείται ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, η αποτελεσματικότητα ή η θερμική-υδραυλική του απόδοση. Οι περιορισμοί μπορεί να περιλαμβάνουν το όριο πτώσης πίεσης, τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία ή τη δυνατότητα κατασκευής, για να αναφέρουμε μερικούς (Bejan & Lorente, 2011).

Τα τελευταία χρόνια, η βελτιστοποίηση τοπολογίας έχει αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο σχεδιασμού που μπορεί να δημιουργήσει καινοτόμες και υψηλής απόδοσης γεωμετρίες εναλλάκτη θερμότητας. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή βελτιστοποίηση σχεδιασμού που βελτιώνει μόνο ένα δεδομένο σχέδιο, η βελτιστοποίηση τοπολογίας δημιουργεί νέα σχέδια αναδιανεμόντας υλικό σε έναν τομέα σχεδιασμού. Χρησιμοποιεί τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού για να βρει τη βέλτιστη κατανομή υλικού που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί ένα συγκεκριμένο μέτρο απόδοσης, με την επιφύλαξη περιορισμών. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε διάφορα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, συμπεριλαμβανομένης της αγωγιμότητας θερμότητας, της μεταφοράς και της ακτινοβολίας, και έχει αποδείξει τη δυνατότητα παραγωγής πρωτοποριακών σχεδίων με βελτιωμένη απόδοση (Bendsoe & Sigmund, 2004).

Με την έλευση των τεχνολογιών κατασκευής πρόσθετων (AM), μπορούν τώρα να πραγματοποιηθούν πολύπλοκες γεωμετρίες εναλλάκτη θερμότητας που προηγουμένως ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν. Η AM, γνωστή και ως τρισδιάστατη εκτύπωση, μπορεί να δημιουργήσει περίπλοκες δομές στρώμα προς στρώμα από ένα ψηφιακό μοντέλο, επιτρέποντας άνευ προηγουμένου σχεδιαστική ελευθερία. Αυτό ανοίγει νέες δυνατότητες για το σχεδιασμό του

εναλλάκτη θερμότητας, όπως ελικοειδή σωλήνες, πτερύγια που μοιάζουν με φράκταλ ή βιομιμητικές δομές, που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας και την απόδοση ροής ρευστού. Η AM επιτρέπει επίσης την κατασκευή συμπαγών και ελαφριών εναλλάκτες θερμότητας με υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο, η οποία είναι επιθυμητή για πολλές εφαρμογές (Gibson et al., 2015).

3.4 Μετρήσεις Αποδοτικότητας

Η αξιολόγηση της απόδοσης ενός σχεδιασμού εναλλάκτη θερμότητας περιλαμβάνει διάφορες μετρήσεις που σχετίζονται μεταξύ άλλων με τη μεταφορά θερμότητας, την πτώση πίεσης, το κόστος, το μέγεθος και το βάρος του συστήματος. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να καθοδηγήσουν τη διαδικασία σχεδιασμού και να διευκολύνουν τη λήψη αποφάσεων μεταξύ διαφορετικών εναλλακτικών σχεδιασμών.

Το πιο άμεσο μέτρο της απόδοσης ενός εναλλάκτη θερμότητας είναι η αποτελεσματικότητά του, που ορίζεται ως η πραγματική ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται διαιρεμένη με τη μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας (Incropera et al., 2006). Η μέγιστη μεταφορά θερμότητας συμβαίνει όταν ένα από τα ρευστά φτάσει στη θερμοκρασία εισόδου του άλλου ρευστού, υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει απώλεια θερμότητας στο περιβάλλον. Η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, τους ρυθμούς θερμοχωρητικότητας των ρευστών και τη γεωμετρία και τη διάταξη ροής του εναλλάκτη θερμότητας.

Μια άλλη σημαντική μέτρηση είναι ο αριθμός των μονάδων μεταφοράς (NTU), η οποία είναι μια μη διαστατική παράμετρος που αντιπροσωπεύει το μέγεθος του εναλλάκτη θερμότητας σε σχέση με την ικανότητά του να μεταφέρει θερμότητα (Kays & London, 1998). Το NTU ορίζεται ως το γινόμενο του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, της επιφάνειας του εναλλάκτη θερμότητας και ενός συντελεστή διόρθωσης, διαιρούμενο με τον ελάχιστο ρυθμό θερμοχωρητικότητας των ρευστών. Η NTU και η αποτελεσματικότητα σχετίζονται μέσω της σχέσης NTU-effectiveness, η οποία ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο και τη διάταξη ροής του εναλλάκτη θερμότητας.

Η πτώση πίεσης στον εναλλάκτη θερμότητας είναι επίσης κρίσιμος παράγοντας για την αξιολόγηση της απόδοσής του, καθώς επηρεάζει άμεσα την ισχύ άντλησης και συνεπώς το λειτουργικό κόστος του συστήματος. Για ένα δεδομένο σχέδιο εναλλάκτη θερμότητας, η πτώση πίεσης επηρεάζεται από τις ταχύτητες του ρευστού, το ιξώδες και την πυκνότητα των ρευστών, την τραχύτητα των επιφανειών και τη διάταξη των σωλήνων ή των πλακών (Cengel & Boles, 2006).

Ο συντελεστής θερμικής-υδραυλικής απόδοσης, που ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας προς την πτώση πίεσης, είναι μια άλλη μέτρηση απόδοσης που χρησιμοποιείται συνήθως (Kakac & Liu, 2002). Αυτός ο παράγοντας εξισορροπεί τους αντικρουόμενους στόχους της μεγιστοποίησης της μεταφοράς θερμότητας και της ελαχιστοποίησης της πτώσης πίεσης, παρέχοντας έτσι μια ολιστική μέτρηση της απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας.

Όσον αφορά την οικονομική απόδοση, μπορεί να ληφθεί υπόψη η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας ή το κόστος κύκλου ζωής του εναλλάκτη θερμότητας, το οποίο περιλαμβάνει το κόστος κεφαλαίου, το κόστος συντήρησης και το κόστος ενέργειας κατά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του εναλλάκτη θερμότητας (Kern & Kraus, 2005). Αυτή η μέτρηση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπου το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας είναι μια σημαντική ανησυχία.

Τέλος, το βάρος και το μέγεθος του εναλλάκτη θερμότητας μπορούν επίσης να χρησιμεύσουν ως μετρήσεις απόδοσης, ειδικά για εφαρμογές αεροδιαστημικής ή φορητές συσκευές όπου επιθυμείτε συμπαγή και ελαφρότητα. Ο λόγος επιφάνειας προς όγκο, ο λόγος διαστάσεων ή ο παράγοντας μορφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίηση της συμπαγούς σχεδίασης, ενώ ο ειδικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, που ορίζεται ως ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα βάρους ή όγκου, μπορεί να αντανακλά την ελαφριά απόδοση (Thome, 2004).

3.5 Μεθοδολογία για τη Συλλογή και Ανάλυση Δεδομένων

Η συλλογή και η ανάλυση δεδομένων αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο κάθε ερευνητικής διαδικασίας. Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται για αυτές τις λειτουργίες, ιδιαίτερα σε μια μελέτη υπολογιστικής μοντελοποίησης όπως η δική μας, πρέπει να είναι συστηματική, αξιόπιστη και καλά δομημένη. Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων και τη διεξαγωγή επακόλουθων αναλύσεων στην έρευνά μας για τη βελτίωση της απόδοσης των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων (Creswell, 2013).

Αρχικά, η μελέτη χρησιμοποιεί μια προσέγγιση μεικτής μεθόδου για τη συλλογή δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από πολλαπλές πηγές, συμπεριλαμβανομένων αρχειακών αρχείων, δημοσιευμένων ερευνητικών εργασιών και υπολογιστικών προσομοιώσεων.

Τα αρχειακά δεδομένα εξορύσσονται από επιστημονικές βάσεις δεδομένων και βιβλιοθήκες. Περιλαμβάνει δεδομένα που σχετίζονται με τους εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής, το σχεδιασμό, τη λειτουργία και τα θερμικά χαρακτηριστικά τους. Ομοίως, πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική έρευνα δημοσιευμένων επιστημονικών άρθρων, εργασιών συνεδρίων και τεχνικών εκθέσεων σε συναφή πεδία. Αυτή η έρευνα βοηθά στην παροχή μιας ευρύτερης κατανόησης του ιστορικού και σύγχρονου τοπίου των εναλλάκτη θερμότητας δύο φάσεων (Fink, 2005).

Η διαδικασία συλλογής δεδομένων περιλαμβάνει επίσης υπολογιστικές προσομοιώσεις. Αυτές οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας καθιερωμένα εργαλεία λογισμικού που μοντελοποιούν τη θερμική και υδραυλική συμπεριφορά των εναλλάκτη θερμότητας. Οι προσομοιώσεις παρέχουν ποσοτικά δεδομένα που σχετίζονται με παραμέτρους όπως συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, πτώσεις πίεσης, ρυθμούς ροής και διαβαθμίσεις θερμοκρασίας υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Μόλις ολοκληρωθεί η συλλογή δεδομένων, το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον καθαρισμό και την προεπεξεργασία δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει τον χειρισμό των τιμών που λείπουν, των ακραίων τιμών και τυχόν πιθανών αποκλίσεων στα δεδομένα. Μετά τον καθαρισμό, τα δεδομένα οργανώνονται σε μια δομημένη μορφή κατάλληλη για περαιτέρω ανάλυση (Panneerselvam, 2004).

Η ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται καθοδηγείται από τα ερευνητικά ερωτήματα και τους στόχους της μελέτης. Τα ποιοτικά δεδομένα, που προέρχονται κυρίως από αρχιεικά αρχεία και τη βιβλιογραφική έρευνα, αναλύονται με τη χρήση ανάλυσης περιεχομένου. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τον εντοπισμό, την κατηγοριοποίηση και την κωδικοποίηση προτύπων εντός των δεδομένων για την κατάρτιση ερμηνειών σχετικών με τα ερευνητικά ερωτήματα (Hsieh & Shannon, 2005).

Τα ποσοτικά δεδομένα που λαμβάνονται από τις προσομοιώσεις υποβάλλονται σε στατιστική ανάλυση. Τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία, όπως ο μέσος όρος, η διάμεσος, η τυπική απόκλιση και το εύρος, υπολογίζονται για να συνοψίσουν τα βασικά χαρακτηριστικά των δεδομένων. Οι στατιστικές συμπερασμάτων χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο υποθέσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον πληθυσμό με βάση τα δεδομένα του δείγματος. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη διεξαγωγή τεστ t , τεστ χ^2 ή ανάλυση διακύμανσης (ANOVA), ανάλογα με τη φύση των δεδομένων και τα ερευνητικά ερωτήματα (Field, 2013).

Τέλος, τα αποτελέσματα από την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση ενσωματώνονται και ερμηνεύονται στο πλαίσιο των στόχων της μελέτης. Η ανάλυση στοχεύει στον εντοπισμό των βασικών παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση των εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής και στην αξιολόγηση της δυνατότητας διαφορετικών γεωμετριών σχεδιασμού για τη βελτίωση της απόδοσής τους.

Συμπερασματικά, η μεθοδολογία συλλογής και ανάλυσης δεδομένων σε αυτή τη μελέτη έχει σχεδιαστεί για να εξασφαλίσει μια ολοκληρωμένη, αυστηρή και συστηματική εξέταση του ερευνητικού θέματος. Συνδυάζει πολλαπλές πηγές

δεδομένων και εφαρμόζει κατάλληλες τεχνικές ανάλυσης για να παρέχει ουσιαστικές πληροφορίες σχετικά με το σχεδιασμό και την απόδοση των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων.

3.6 Επικύρωση και Επαλήθευση Μοντέλων

Η επικύρωση και η επαλήθευση μοντέλου αποτελούν αναπόσπαστο μέρος οποιασδήποτε υπολογιστικής μελέτης, διασφαλίζοντας την ευρωστία, την αξιοπιστία και την καταλληλότητα του μοντέλου που χρησιμοποιείται. Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τη διαδικασία επικύρωσης και επαλήθευσης για τα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την έρευνα σχετικά με τη βελτίωση της απόδοσης των εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων (Oberkampf & Barone, 2006).

Η επαλήθευση μοντέλου αφορά την ερώτηση: "Έχει λυθεί σωστά το μοντέλο;" Περιλαμβάνει την αξιολόγηση εάν το μαθηματικό μοντέλο εφαρμόζεται σωστά στον υπολογιστικό κώδικα και εάν η λύση αντιπροσωπεύει σωστά το μαθηματικό μοντέλο. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει κυρίως τον εντοπισμό σφαλμάτων λογισμικού, την επαλήθευση κώδικα, την επαλήθευση υπολογισμού και τη σύγκλιση υπολογισμών (Roache, 1998).

Ο εντοπισμός σφαλμάτων λογισμικού είναι το αρχικό βήμα στην επαλήθευση, διασφαλίζοντας την ορθότητα του κώδικα με τον εντοπισμό και την αφαίρεση τυχόν σφαλμάτων προγραμματισμού. Η επαλήθευση κώδικα επαληθεύει εάν οι εξισώσεις του μοντέλου έχουν εφαρμοστεί σωστά στον κώδικα. Αυτό γίνεται συνήθως συγκρίνοντας την έξοδο του κώδικα με αναλυτικές λύσεις για απλοποιημένες περιπτώσεις δοκιμών ή σημείων αναφοράς (Oberkampf & Trucano, 2007).

Η επαλήθευση υπολογισμού ή η επαλήθευση λύσης εστιάζει στην αριθμητική ακρίβεια της λύσης. Αυτό περιλαμβάνει μελέτες σύγκλισης πλέγματος για να εξακριβωθεί εάν η αριθμητική λύση συγκλίνει στην ακριβή λύση καθώς το μέγεθος του πλέγματος μειώνεται. Επιπλέον, η μελέτη αξιολογεί τη σειρά της αριθμητικής ακρίβειας συγκρίνοντάς την με τη θεωρητική σειρά του σχήματος διακριτοποίησης (Roache, 1998).

Η επικύρωση μοντέλου, από την άλλη πλευρά, αντιμετωπίζει το ερώτημα: "Λύνεται το σωστό μοντέλο;" Ελέγχει εάν το μαθηματικό μοντέλο αντιπροσωπεύει με ακρίβεια το πραγματικό φυσικό σύστημα που μελετάται. Αυτό περιλαμβάνει σύγκριση των προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά δεδομένα ή δεδομένα πεδίου, ανάλυση ευαισθησίας και ποσοτικοποίηση αβεβαιότητας (Oberkampf & Barone, 2006).

Η σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά δεδομένα είναι ένα κρίσιμο μέρος της επικύρωσης του μοντέλου. Η σύγκριση θα πρέπει να πραγματοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας, διασφαλίζοντας τις προγνωστικές δυνατότητες του μοντέλου πέρα από τις συνθήκες για τις οποίες βαθμονομήθηκε. Οι αποκλίσεις μεταξύ του μοντέλου και των πειραματικών αποτελεσμάτων βοηθούν στον εντοπισμό περιοχών όπου το μοντέλο μπορεί να βελτιωθεί (Sargent, 2013).

Η ανάλυση ευαισθησίας διερευνά πώς οι αλλαγές στις εισόδους του μοντέλου επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Αυτή η διαδικασία βοηθά στην κατανόηση της επίδρασης κάθε παραμέτρου εισόδου στις συνολικές προβλέψεις του μοντέλου και μπορεί να αποκαλύψει παραμέτρους που χρειάζονται ακριβέστερη εκτίμηση ή μετρήσεις (Saltelli et al., 2008).

Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας περιλαμβάνει την ποσοτικοποίηση του επιπέδου εμπιστοσύνης που μπορεί να τοποθετηθεί στις προβλέψεις του μοντέλου. Αυτό περιλαμβάνει τόσο την αλατορική αβεβαιότητα, η οποία προκύπτει από την εγγενή τυχαιότητα στο σύστημα, όσο και την επιστημική αβεβαιότητα, η οποία πηγάζει από την έλλειψη γνώσης για το σύστημα. Είναι ζωτικής σημασίας να αντιμετωπιστούν αυτές οι αβεβαιότητες για να γνωστοποιηθεί με ακρίβεια το επίπεδο εμπιστοσύνης στις προβλέψεις του μοντέλου (Oberkampf & Roy, 2010).

Συμπερασματικά, η επικύρωση και η επαλήθευση του μοντέλου είναι ζωτικής σημασίας βήματα για τη διασφάλιση της ποιότητας και της αξιοπιστίας των υπολογιστικών προσομοιώσεων. Για τη μελέτη μας για εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής, παρέχουν βεβαιότητα ότι τα μοντέλα μας αντιπροσωπεύουν

σωστά τα φυσικά φαινόμενα και ότι οι λύσεις που λαμβάνονται είναι αριθμητικά ακριβείς.

3.7 Θεωρήσεις για την Ανάλυση Αβεβαιότητας και Σφαλμάτων

Η μελέτη των εναλλακτών θερμότητας διφασικής ροής, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της υπολογιστικής μοντελοποίησης, παρουσιάζει μια μυριάδα αβεβαιοτήτων και πιθανών σφαλμάτων. Η αναγνώριση, ο ποσοτικός προσδιορισμός και ο χειρισμός αυτών των αβεβαιοτήτων και λαθών είναι κρίσιμα βήματα για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της συνάφειας των ευρημάτων της έρευνας. Αυτό το κεφάλαιο συζητά τις εκτιμήσεις για την αβεβαιότητα και την ανάλυση σφαλμάτων σε αυτή τη μελέτη (Oberkampf & Roy, 2010).

Οι αβεβαιότητες στην υπολογιστική μοντελοποίηση μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ευρείες κατηγορίες: την προειδοποιητική αβεβαιότητα και την επιστημική αβεβαιότητα. Η προειδοποιητική αβεβαιότητα, γνωστή και ως στατιστική ή εγγενής αβεβαιότητα, προκύπτει από την εγγενή μεταβλητότητα ή τυχαιότητα του συστήματος. Στο πλαίσιο των εναλλάκτη θερμότητας, αυτό μπορεί να περιλαμβάνει διακυμάνσεις στη θερμική αγωγιμότητα, το ιξώδες του ρευστού ή τις θερμοκρασίες εισόδου, μεταξύ άλλων. Αυτές οι αβεβαιότητες μπορούν να χαρακτηριστούν στατιστικά και συνήθως αντιμετωπίζονται με πιθανολογικές μεθόδους (Oberkampf et al., 2004).

Η επιστημική αβεβαιότητα, από την άλλη πλευρά, πηγάζει από την έλλειψη γνώσης για το σύστημα. Αυτές οι αβεβαιότητες προκύπτουν λόγω ελλιπών ή ανακριβών πληροφοριών και μπορούν να μειωθούν με πρόσθετα δεδομένα ή πληροφορίες. Στη μελέτη μας, οι πηγές επιστημικής αβεβαιότητας θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την προσέγγιση των συνοριακών συνθηκών, την ακρίβεια των συσχετίσεων που χρησιμοποιούνται στο υπολογιστικό μοντέλο ή την έλλειψη επαρκών πειραματικών δεδομένων για επικύρωση. Αυτές οι αβεβαιότητες συχνά ποσοτικοποιούνται και μειώνονται μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας, της συλλογής πρόσθετων δεδομένων ή της χρήσης συντηρητικών εκτιμήσεων (Helton et al., 2006).

Η υπολογιστική μοντελοποίηση των εναλλάκτη θερμότητας παρουσιάζει επίσης ευκαιρίες για σφάλματα, συμπεριλαμβανομένων σφαλμάτων διακριτοποίησης,

σφαλμάτων στρογγυλοποίησης και σφαλμάτων μοντελοποίησης. Τα σφάλματα διακριτοποίησης προκύπτουν λόγω της προσέγγισης συνεχών εξισώσεων σε ένα διακριτό πλέγμα. Αυτό το σφάλμα μπορεί να εκτιμηθεί και να ελαχιστοποιηθεί μέσω μελετών βελτίωσης του πλέγματος και σύγκλισης (Roache, 1998).

Τα σφάλματα στρογγυλοποίησης συμβαίνουν λόγω της πεπερασμένης ακρίβειας των αριθμητικών υπολογισμών. Αυτά τα σφάλματα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους υψηλής ακρίβειας και προσεκτική επιλογή αριθμητικών παραμέτρων. Σφάλματα μοντελοποίησης συμβαίνουν όταν το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται δεν αντιπροσωπεύει πλήρως την πραγματική φυσική του εναλλάκτη θερμότητας. Αυτά τα σφάλματα μπορούν να εντοπιστούν και να μειωθούν μέσω της επικύρωσης του μοντέλου έναντι πειραματικών δεδομένων και της επαναληπτικής βελτίωσης του μοντέλου (Trucano et al., 2006).

Συμπερασματικά, οι εκτιμήσεις για την ανάλυση αβεβαιότητας και σφαλμάτων είναι κεντρικές για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της συνάφειας των ευρημάτων αυτής της μελέτης σχετικά με τους εναλλάκτες θερμότητας ροής δύο φάσεων. Επιτρέπουν τον εντοπισμό και την ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων και των σφαλμάτων και καθοδηγούν τις στρατηγικές για τη μείωση ή τη διαχείρισή τους, ενισχύοντας τελικά την αξιοπιστία των υπολογιστικών μοντέλων και των προβλέψεών τους.

Κεφάλαιο 4: Σχεδιασμός Εναλλάκτη Θερμότητας Διφασικής Ροής

4.1 Εννοιολογικός Σχεδιασμός

Η διαδικασία σχεδιασμού ενός εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων ξεκινά με τον εννοιολογικό σχεδιασμό. Η φάση του εννοιολογικού σχεδιασμού στοχεύει να δημιουργήσει ένα ευρύ περίγραμμα του εναλλάκτη θερμότητας με βάση τις δεδομένες απαιτήσεις και περιορισμούς. Περιλαμβάνει τον καθορισμό των κύριων χαρακτηριστικών του εναλλάκτη θερμότητας, όπως ο τύπος, η διαμόρφωση, το μέγεθος, τα υλικά και οι συνθήκες λειτουργίας (Bhattacharyya, 2012).

Μία από τις βασικές αποφάσεις σε αυτό το στάδιο είναι η επιλογή του τύπου εναλλάκτη θερμότητας που είναι κατάλληλος για την εφαρμογή ροής δύο φάσεων. Οι συνηθισμένοι τύποι περιλαμβάνουν εναλλάκτες θερμότητας με κέλυφος και σωλήνα, πλάκας και σωλήνα με πτερύγια, ο καθένας με τα μοναδικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι εναλλάκτες θερμότητας με κέλυφος και σωλήνας είναι ευέλικτοι και στιβαροί, ικανοί να χειρίζονται ένα ευρύ φάσμα πιέσεων και θερμοκρασιών. Ωστόσο, μπορεί να έχουν χαμηλότερη απόδοση μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με άλλους τύπους λόγω του μεγαλύτερου όγκου και της λιγότερο αποδοτικής διάταξης ροής (Saunders, 2005).

Οι πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας παρέχουν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας λόγω της μεγάλης επιφάνειάς τους και των αναταράξεων που προκαλούνται από τις κυματοειδείς πλάκες τους. Ωστόσο, μπορεί να μην είναι κατάλληλα για συνθήκες υψηλής πίεσης ή ρύπανσης, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε παραμόρφωση ή απόφραξη της πλάκας (Shah & Sekulic, 2003). Οι εναλλάκτες θερμότητας με πτερύγιο σωλήνα μπορούν να ενισχύσουν τη μεταφορά θερμότητας αυξάνοντας την επιφάνεια και διαταράσσοντας το οριακό στρώμα, αλλά μπορεί επίσης να αυξήσουν την πτώση πίεσης και τον κίνδυνο ρύπανσης (Kakac & Liu, 2002).

Η διαμόρφωση του εναλλάκτη θερμότητας, συμπεριλαμβανομένου του αριθμού και της διάταξης των σωλήνων ή των πλακών, της κατεύθυνσης ροής

(παράλληλη, αντίθετη ή σταυρωτή) και της κατανομής της διφασικής ροής (συνρεύμα ή αντίθετο ρεύμα), είναι μια άλλη κρίσιμη πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη (Incropera et al., 2006). Η διαμόρφωση μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση μεταφοράς θερμότητας, την πτώση πίεσης και το συνολικό μέγεθος και το κόστος του εναλλάκτη θερμότητας.

Όσον αφορά το μέγεθος και τα υλικά, αυτά καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμότητα, την επιτρεπόμενη πτώση πίεσης, τα όρια θερμοκρασίας και την αντίσταση στη διάβρωση και τη διάβρωση που απαιτείται για τη διφασική ροή. Η επιλογή των υλικών μπορεί να κυμαίνεται από κοινά μέταλλα όπως ο χάλυβας και ο χαλκός, μέχρι προηγμένα κράματα ή σύνθετα υλικά με ανώτερες θερμικές και μηχανικές ιδιότητες (Bhattacharyya, 2012).

Οι συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου, των ρυθμών ροής μάζας και των ποιοτήτων φάσης της διφασικής ροής, ορίζονται επίσης σε αυτή τη φάση. Αυτές οι συνθήκες ορίζονται με βάση τις ανάγκες θέρμανσης ή ψύξης της διεργασίας και παρέχουν τις οριακές συνθήκες για την επακόλουθη θερμοϋδραυλική ανάλυση και υπολογιστική μοντελοποίηση (Saunders, 2005).

Το στάδιο του εννοιολογικού σχεδιασμού είναι εξαιρετικά επαναληπτικό, και απαιτεί συνεχή ανατροφοδότηση και προσαρμογή για να διασφαλιστεί η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ απόδοσης, κόστους, δυνατότητας κατασκευής και άλλων παραγόντων. Η χρήση κατάλληλων εργαλείων σχεδιασμού, όπως λογισμικό προσομοίωσης διεργασιών, λογισμικό CAD και πίνακες λήψης αποφάσεων, μπορεί να διευκολύνει αυτή τη διαδικασία και να βοηθήσει στη δημιουργία μιας βιώσιμης και ανταγωνιστικής ιδέας σχεδίασης (Bhattacharyya, 2012).

4.2 Γεωμετρία Σχεδίασης

Μετά τη φάση του εννοιολογικού σχεδιασμού, η φάση της γεωμετρίας σχεδιασμού προσαρμόζει τις λεπτομέρειες του σχεδιασμού του εναλλάκτη θερμότητας με έμφαση στις γεωμετρικές πτυχές. Αυτό περιλαμβάνει το μέγεθος, το σχήμα και τη διάταξη των εξαρτημάτων του εναλλάκτη θερμότητας,

όπως οι σωλήνες, οι πλάκες, τα πτερύγια και τα κελύφη, καθώς και οι διαδρομές ροής του διφασικού ρευστού.

Ξεκινώντας από τους σωλήνες ή τις πλάκες όπου γίνεται η ανταλλαγή θερμότητας, οι διαστάσεις, το σχήμα και η διάταξή τους πρέπει να βελτιστοποιηθούν. Η διάμετρος του σωλήνα ή της πλάκας επηρεάζει την ταχύτητα ροής και συνεπώς τη μεταφορά θερμότητας και την πτώση πίεσης. Το μήκος του σωλήνα ή της πλάκας καθορίζει την περιοχή ανταλλαγής θερμότητας και τον χρόνο παραμονής του ρευστού, ενώ το βήμα του σωλήνα ή της πλάκας επηρεάζει την κατανομή της ροής και την τάση ρύπανσης. Διαφορετικά σχήματα σωλήνων ή πλακών, όπως κυκλικό, ορθογώνιο ή κυματοειδές, μπορούν επίσης να διερευνηθούν για να ενισχυθεί η μεταφορά θερμότητας ή να μειωθεί η χρήση υλικού (Bhattacharyya, 2012).

Στην περίπτωση ενός εναλλάκτη θερμότητας σωλήνα με πτερύγια, η γεωμετρία των πτερυγίων, συμπεριλαμβανομένου του πάχους, του ύψους, του βήματος και του προφίλ του πτερυγίου, παίζει καθοριστικό ρόλο στην αύξηση της περιοχής μεταφοράς θερμότητας και στη διάσπαση του οριακού στρώματος. Ωστόσο, η προσθήκη πτερυγίων αυξάνει επίσης το βάρος, το κόστος και τη δυνατότητα ρύπανσης, η οποία πρέπει να εξισορροπηθεί προσεκτικά (Incropera et al., 2006).

Η διάταξη των σωλήνων ή των πλακών, είτε σε σειρά, είτε με κλιμάκωση ή κάποιο άλλο σχέδιο, μπορεί να επηρεάσει τα μοτίβα ροής ρευστού και την απόδοση μεταφοράς θερμότητας. Μια διάταξη σε σειρά παρέχει συνήθως μια πιο ομοιόμορφη κατανομή ροής, ενώ μια κλιμακωτή διάταξη μπορεί να προκαλέσει περισσότερες αναταράξεις και ως εκ τούτου να ενισχύσει τη μεταφορά θερμότητας (Shah & Sekulic, 2003).

Ο σχεδιασμός του κελύφους ή του περιβλήματος περιλαμβάνει την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους και σχήματος για τη στέγαση των σωλήνων ή των πλακών, την παροχή επαρκούς χώρου για τη ροή του ρευστού και τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας υπό συνθήκες λειτουργίας. Για τους εναλλάκτες θερμότητας κελύφους και σωλήνα, η διάμετρος του κελύφους, η απόσταση των διαφραγμάτων και η κοπή του διαφράγματος είναι επίσης

σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή από την πλευρά του κελύφους και τη μεταφορά θερμότητας (Saunders, 2005).

Οι διαδρομές ροής του διφασικού ρευστού πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να προάγουν την αποτελεσματική ανταλλαγή θερμότητας, να ελαχιστοποιούν την πτώση πίεσης και να αποφεύγουν ανεπιθύμητα φαινόμενα όπως κακή κατανομή ροής, αστάθειες ροής ή διαχωρισμό φάσεων. Η διάταξη ροής (παράλληλη, αντίθετη ή διασταυρούμενη) και η κατανομή (συνρεύμα ή αντίθετο ρεύμα) μπορούν να βελτιστοποιηθούν για το σκοπό αυτό. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν μέτρα για αλλαγή φάσης, όπως η εξάτμιση ή η συμπύκνωση, στο σχεδιασμό, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η βαρύτητα, η επιφανειακή τάση και η τριχοειδής δράση (Thome, 2004).

Οι πρόοδοι στις τεχνικές γεωμετρίας σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένης της υπολογιστικής μοντελοποίησης, της αριθμητικής βελτιστοποίησης και της κατασκευής προσθέτων, έχουν διευρύνει τον χώρο σχεδιασμού και έχουν επιτρέψει τη δημιουργία καινοτόμων και υψηλής απόδοσης γεωμετριών εναλλάκτη θερμότητας. Για παράδειγμα, ελικοειδείς σωλήνες, πτερύγια που μοιάζουν με φράκταλ, βιομιμητικές δομές ή μικροκανάλια μπορούν να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν για να βελτιώσουν τη μεταφορά θερμότητας και την απόδοση ροής ρευστού (Bendsoe & Sigmund, 2004; Gibson et al., 2015).

4.3 Προδιαγραφές Σχεδίασης

Οι προδιαγραφές σχεδιασμού για έναν εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής χρησιμεύουν ως το προσχέδιο για την κατασκευή και τη λειτουργία του. Αναλύουν τις τεχνικές απαιτήσεις του εναλλάκτη θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων των διαστάσεων, των υλικών, των συνθηκών λειτουργίας, των κριτηρίων απόδοσης και των προτύπων ασφαλείας. Η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και ακριβούς συνόλου προδιαγραφών σχεδιασμού είναι ένα κρίσιμο έργο στη διαδικασία σχεδιασμού του εναλλάκτη θερμότητας.

Οι διαστάσεις του εναλλάκτη θερμότητας, συμπεριλαμβανομένων του μήκους, του πλάτους, του ύψους και του βάρους, είναι μεταξύ των θεμελιωδών πτυχών

που πρέπει να προσδιοριστούν. Λεπτομερείς διαστάσεις για τα εξαρτήματα, όπως η διάμετρος και το μήκος των σωλήνων, το πάχος και το βήμα των πτερυγίων, το μέγεθος και η απόσταση των διαφραγμάτων και η διάταξη των σωλήνων ή των πλακών θα πρέπει επίσης να καθοριστούν (Kakac & Liu, 2002).

Η επιλογή υλικού επηρεάζει σημαντικά την απόδοση, το κόστος και τη διάρκεια ζωής του εναλλάκτη θερμότητας. Ως εκ τούτου, οι προδιαγραφές πρέπει να αναφέρουν σαφώς τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για τους σωλήνες, τις πλάκες, τα πτερύγια, το κέλυφος, τα παρεμβύσματα και άλλα εξαρτήματα. Τα επιλεγμένα υλικά πρέπει να διαθέτουν επαρκή θερμική αγωγιμότητα, μηχανική αντοχή, αντοχή στη διάβρωση και ανθεκτικότητα για να αντέχουν στις συνθήκες ροής δύο φάσεων. Όπου χρειάζεται, θα πρέπει επίσης να προσδιορίζονται επιστρώσεις ή επεξεργασίες για τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας ή της αντοχής στη διάβρωση (Saunders, 2005).

Οι συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των ρυθμών ροής, των θερμοκρασιών, των πιέσεων και των συνθέσεων φάσεων της διφασικής ροής στην είσοδο και την έξοδο, είναι ένα άλλο κρίσιμο μέρος των προδιαγραφών σχεδιασμού. Αυτές οι συνθήκες θέτουν τις οριακές συνθήκες για τη λειτουργία του εναλλάκτη θερμότητας και είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό του μεγέθους του εναλλάκτη θερμότητας και τον υπολογισμό της απόδοσής του (Shah & Sekulic, 2003).

Τα κριτήρια απόδοσης, όπως το απαιτούμενο καθήκον θερμότητας, η επιτρεπόμενη πτώση πίεσης, η επιθυμητή αποτελεσματικότητα ή απόδοση και η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία, θα πρέπει να ορίζονται σαφώς στις προδιαγραφές. Αυτά τα κριτήρια χρησιμεύουν ως στόχοι απόδοσης για το σχεδιασμό του εναλλάκτη θερμότητας και επηρεάζουν την επιλογή του μεγέθους, του τύπου και της διαμόρφωσης του εναλλάκτη θερμότητας (Incropera et al., 2006).

Κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία των εναλλάκτη θερμότητας πρέπει να τηρούνται τα πρότυπα ασφαλείας και τα ρυθμιστικά πρότυπα. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν κώδικες δοχείων πίεσης, περιβαλλοντικούς κανονισμούς,

πρότυπα επαγγελματικής ασφάλειας και ειδικές οδηγίες για τη βιομηχανία. Οι προδιαγραφές σχεδιασμού θα πρέπει επομένως να περιλαμβάνουν οποιαδήποτε απαραίτητα χαρακτηριστικά ασφαλείας, όπως συσκευές εκτόνωσης πίεσης, αισθητήρες θερμοκρασίας, ελεγκτές ροής και θύρες επιθεώρησης ή καθαρισμού (Bhattacharyya, 2012).

Επιπλέον, οι προδιαγραφές θα πρέπει να ενσωματώνουν τυχόν περιορισμούς που σχετίζονται με την κατασκευή, την εγκατάσταση, τη συντήρηση ή τον προϋπολογισμό. Αυτές οι πρακτικές εκτιμήσεις μπορούν να επηρεάσουν τις αποφάσεις σχεδιασμού και πρέπει να αντιμετωπιστούν για να διασφαλιστεί η σκοπιμότητα και η βιωσιμότητα του σχεδιασμού του εναλλάκτη θερμότητας (Saunders, 2005).

Οι προδιαγραφές σχεδιασμού συνήθως καταλήγουν σε λεπτομερή μηχανολογικά σχέδια και τεχνικά δελτία δεδομένων που παρέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατασκευή, την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρηση του εναλλάκτη θερμότητας. Αυτά τα έγγραφα θα πρέπει να είναι ξεκάθαρα γραμμένα, καλά οργανωμένα και εύκολα κατανοητά για να διευκολύνουν τη χρήση τους από διαφορετικούς ενδιαφερόμενους φορείς, συμπεριλαμβανομένων μηχανικών, κατασκευαστών, χειριστών και επιθεωρητών (Bhattacharyya, 2012).

4.4 Θεωρήσεις και Επιλογή Υλικού

Η επιλογή των κατάλληλων υλικών για την κατασκευή εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που λαμβάνει υπόψη πολλούς παράγοντες. Αυτές περιλαμβάνουν θερμικές και μηχανικές ιδιότητες, αντοχή στη διάβρωση, συμβατότητα με υγρά εργασίας και κόστος. Αυτό το κεφάλαιο εμβαθύνει στις αποχρώσεις αυτών των εκτιμήσεων και στη διαδικασία επιλογής.

Κατά την επιλογή υλικών για έναν εναλλάκτη θερμότητας, οι θερμικές ιδιότητες των υποψηφίων υλικών είναι ζωτικής σημασίας. Υλικά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως ο χαλκός ή το αλουμίνιο, μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας. Η διαφορά στη θερμική διαστολή μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται στον εναλλάκτη

θερμότητας μπορεί επίσης να επηρεάσει τη μηχανική σταθερότητα και το προσδόκιμο ζωής της συσκευής. Επομένως, απαιτείται προσεκτική εξέταση όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά σε έναν εναλλάκτη θερμότητας (Incropera et al., 2006).

Οι μηχανικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής σε εφελκυσμό, της ολκιμότητας και της σκληρότητας, είναι επίσης σημαντικά ζητήματα. Τα υλικά του εναλλάκτη θερμότητας πρέπει να αντέχουν τις μηχανικές καταπονήσεις που προκαλούνται από τις αλλαγές πίεσης και θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία. Επιπλέον, τα υλικά θα πρέπει επίσης να αντέχουν τους κραδασμούς που προκαλούνται από τις αναταράξεις της ροής και τις αλλαγές φάσης στη διφασική ροή. Υλικά όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας ή το τιτάνιο, που έχουν υψηλή αντοχή και καλή ολκιμότητα, χρησιμοποιούνται συχνά σε εναλλάκτες θερμότητας υψηλής πίεσης ή υψηλής θερμοκρασίας (Saunders, 2005).

Η αντοχή στη διάβρωση είναι ένα άλλο κρίσιμο χαρακτηριστικό. Τα υλικά του εναλλάκτη θερμότητας πρέπει να ανθίστανται στη διάβρωση που προκαλείται από τα λειτουργικά υγρά, ιδιαίτερα εάν περιέχουν επιθετικές ουσίες όπως οξέα, άλατα ή οξειδωτικά. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα υλικά μπορεί επίσης να χρειαστεί να ανθίστανται σε ρύπανση ή απολέπιση, γεγονός που μπορεί να μειώσει την απόδοση μεταφοράς θερμότητας και να αυξήσει τις απαιτήσεις συντήρησης. Υλικά όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, τα κράματα νικελίου ή τα κράματα χαλκού-νικελίου είναι γνωστά για την εξαιρετική τους αντοχή στη διάβρωση (Shah & Sekulic, 2003).

Η συμβατότητα των υλικών με τα υγρά εργασίας είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας. Ορισμένα υλικά μπορεί να αντιδράσουν με ορισμένα υγρά, οδηγώντας σε διάβρωση, διάβρωση ή ακόμα και χημικές αντιδράσεις που μπορεί να υποβαθμίσουν την απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας ή να δημιουργήσουν κινδύνους για την ασφάλεια. Τα υλικά θα πρέπει επίσης να είναι συμβατά με τις διαδικασίες αλλαγής φάσης, όπως ο βρασμός ή η συμπύκνωση, που εμφανίζονται στη ροή δύο φάσεων. Αυτό απαιτεί την κατανόηση της συμπεριφοράς διαβροχής, των χαρακτηριστικών πυρήνωσης ή των τάσεων σχηματισμού φιλμ των υλικών (Kakac & Liu, 2002).

Τέλος, το κόστος των υλικών είναι ένα κρίσιμο στοιχείο. Αν και μπορεί να είναι επιθυμητά υλικά με ανώτερες ιδιότητες, το υψηλό κόστος τους μπορεί να κάνει τον εναλλάκτη θερμότητας αντισυμβατικό. Επομένως, πρέπει να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ των απαιτήσεων απόδοσης και των δημοσιονομικών περιορισμών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, προηγμένες τεχνικές κατασκευής, όπως η επένδυση, η συγκόλληση ή η επιφανειακή επίστρωση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συνδυαστούν διαφορετικά υλικά ή ιδιότητες με οικονομικά αποδοτικό τρόπο (Bhattacharyya, 2012).

Συμπερασματικά, η επιλογή υλικού για εναλλάκτες θερμότητας δύο φάσεων ροής είναι μια πολύπλευρη εργασία που απαιτεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση των ιδιοτήτων των υλικών, των συνθηκών λειτουργίας και των οικονομικών παραγόντων. Οι πρόοδοι στην επιστήμη των υλικών, όπως η ανάπτυξη κραμάτων, κεραμικών ή σύνθετων υλικών υψηλής απόδοσης, διευρύνουν συνεχώς τις διαθέσιμες επιλογές για σχεδιαστές και μηχανικούς εναλλάκτες θερμότητας.

4.5 Θερμο-Υδραυλική Ανάλυση

Η θερμοϋδραυλική ανάλυση ενός εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής περιλαμβάνει την εφαρμογή αρχών μεταφοράς θερμότητας και δυναμικής ρευστών για την πρόβλεψη της απόδοσης και της απόδοσης του συστήματος. Περιλαμβάνει τη μελέτη μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας, μοτίβων ροής, πτώσεων πίεσης και μεταβολών φάσης μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας (Shah & Sekulic, 2003).

Η μεταφορά θερμότητας σε έναν εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής είναι πολύπλοκη λόγω της παρουσίας αλλαγών φάσης, όπως ο βρασμός και η συμπύκνωση, που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας πρέπει να υπολογιστούν λαμβάνοντας υπόψη τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή σε κάθε φάση, τη μεταφορά θερμότητας αλλαγής φάσης και την αγωγιμότητα μέσω των τοιχωμάτων του εναλλάκτη θερμότητας. Διάφοροι συσχετισμοί και μοντέλα είναι διαθέσιμα για την εκτίμηση αυτών των συντελεστών με βάση τις

ιδιότητες του ρευστού, τους ρυθμούς ροής, τις ροές θερμότητας και τη γεωμετρία του εναλλάκτη θερμότητας (Incropera et al., 2006).

Τα μοτίβα ροής σε μια διφασική ροή μπορεί να ποικίλλουν ευρέως, από ροή με φυσαλίδες ή γυμνοσάλιαγκες έως δακτυλιοειδή ή στρωματοποιημένη ροή, ανάλογα με τους ρυθμούς ροής, τα κλάσματα φάσης, τις ιδιότητες του ρευστού και τον προσανατολισμό του εναλλάκτη θερμότητας. Αυτά τα μοτίβα ροής μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας και πτώσης πίεσης του εναλλάκτη θερμότητας. Επομένως, η πρόβλεψη των μοτίβων ροής και των μεταπτώσεων τους αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της θερμοϋδραυλικής ανάλυσης (Kakac & Liu, 2002).

Η πτώση πίεσης είναι μια άλλη κρίσιμη παράμετρος στο σχεδιασμό του εναλλάκτη θερμότητας. Επηρεάζει την ισχύ άντλησης που απαιτείται για την κυκλοφορία των υγρών και μπορεί να επηρεάσει τη συνολική ενεργειακή απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας. Η πτώση πίεσης σε έναν εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής εξαρτάται από την τριβή ροής, τις αλλαγές φάσης και τις αλλαγές στην περιοχή ή την κατεύθυνση ροής. Διάφορες μέθοδοι είναι διαθέσιμες για την πρόβλεψη της πτώσης πίεσης, συμπεριλαμβανομένων εμπειρικών συσχετίσεων, μοντέλων ομοιογενών ροής και μοντέλων διαχωρισμένης ροής (Saunders, 2005).

Οι αλλαγές φάσης, όπως ο βρασμός ή η συμπύκνωση, παίζουν σημαντικό ρόλο στους εναλλάκτες θερμότητας διφασικής ροής. Αυτές οι διεργασίες μπορούν να ενισχύσουν τη μεταφορά θερμότητας, αλλά μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε πολύπλοκα φαινόμενα, όπως βρασμό πυρήνων, βρασμό φιλμ, κρίσιμη ροή θερμότητας ή πλημμύρα συμπυκνωμάτων. Ως εκ τούτου, η ανάλυση των αλλαγών φάσης και οι επιπτώσεις τους στη μεταφορά θερμότητας και την πτώση πίεσης είναι μια βασική πτυχή της θερμο-υδραυλικής ανάλυσης (Bhattacharyya, 2012).

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη διεξαγωγή θερμοϋδραυλικής ανάλυσης. Μπορεί να προσομοιώσει τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ μεταφοράς θερμότητας, ροής ρευστού και αλλαγές φάσης σε έναν εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων. Τα

μοντέλα CFD μπορούν να παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες για τις κατανομές θερμοκρασίας, τα πρότυπα ροής, τις κατανομές φάσης και τα χαρακτηριστικά απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας. Ωστόσο, απαιτούν προσεκτική επικύρωση σε σχέση με πειραματικά δεδομένα ή αξιόπιστους συσχετισμούς (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Συμπερασματικά, η θερμοϋδραυλική ανάλυση είναι ένα κρίσιμο βήμα στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των εναλλάκτη θερμότητας διφασικής ροής. Απαιτεί βαθιά κατανόηση των αρχών της μεταφοράς θερμότητας και της δυναμικής των ρευστών, τη χρήση κατάλληλων μοντέλων και συσχετίσεων και την εφαρμογή προηγμένων εργαλείων προσομοίωσης.

4.6 Επαλήθευση και Βελτιστοποίηση Σχεδίασης

Η επαλήθευση σχεδιασμού και η βελτιστοποίηση είναι κρίσιμα βήματα στη διαδικασία ανάπτυξης ενός εναλλάκτη θερμότητας ροής δύο φάσεων. Η επαλήθευση διασφαλίζει ότι ο σχεδιασμός πληροί τις καθορισμένες απαιτήσεις και τους στόχους απόδοσης, ενώ η βελτιστοποίηση επιδιώκει να βελτιώσει την απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας, τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας ή άλλα επιθυμητά χαρακτηριστικά (Shah & Sekulic, 2003).

Η επαλήθευση σχεδίασης περιλαμβάνει τη σύγκριση των προβλέψεων σχεδιασμού με πειραματικά δεδομένα ή αξιόπιστους συσχετισμούς. Αυτό μπορεί να επικυρώσει την ακρίβεια της θερμοϋδραυλικής ανάλυσης, των υπολογιστικών μοντέλων και των υπολογισμών σχεδιασμού. Για πολύπλοκα σχέδια ή νέες τεχνολογίες, ενδέχεται να απαιτούνται πρωτότυπα και δοκιμές για την επικύρωση του σχεδιασμού υπό ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, η επαλήθευση σχεδιασμού θα πρέπει επίσης να διασφαλίζει ότι ο σχεδιασμός πληροί τα πρότυπα ασφαλείας, τις κατασκευαστικές δυνατότητες και τις απαιτήσεις συντήρησης (Saunders, 2005).

Η βελτιστοποίηση σχεδίασης στοχεύει στη βελτίωση του σχεδιασμού προσαρμόζοντας τις παραμέτρους σχεδιασμού, όπως η γεωμετρία του εναλλάκτη θερμότητας, η επιλογή υλικού, οι ρυθμοί ροής ρευστού ή οι συνθήκες λειτουργίας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης, όπως μέθοδοι που βασίζονται σε κλίση, μέθοδοι άμεσης

αναζήτησης ή στοχαστικές μέθοδοι. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χειριστούν προβλήματα βελτιστοποίησης ενός ή πολλαπλών στόχων, ανάλογα με το αν λαμβάνονται υπόψη ένα ή περισσότερα κριτήρια απόδοσης (Bejan & Tsatsaronis, 1996).

Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να υποστηρίξει τη διαδικασία βελτιστοποίησης ποσοτικοποιώντας τις επιπτώσεις των παραμέτρων σχεδιασμού στα κριτήρια απόδοσης. Αυτό μπορεί να εντοπίσει τις παραμέτρους με τη μεγαλύτερη επιρροή και να καθοδηγήσει την αναζήτηση βελτιστοποίησης. Μπορεί επίσης να αξιολογήσει την ευρωστία του σχεδιασμού στις διακυμάνσεις των παραμέτρων, κάτι που είναι κρίσιμο για τη διασφάλιση αξιόπιστης απόδοσης υπό αβεβαιότητες ή κατασκευαστικές ανοχές (Saltelli et al., 2008).

Ο σχεδιασμός για την κατασκευή ή τη συντήρηση μπορεί επίσης να είναι αναπόσπαστο μέρος της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού. Αυτό στοχεύει στην απλοποίηση της διαδικασίας κατασκευής, στη μείωση του κόστους κατασκευής ή στη διευκόλυνση των εργασιών συντήρησης. Για παράδειγμα, μπορεί να επηρεάσει την επιλογή του τύπου εναλλάκτη θερμότητας, όπως κέλυφος και σωλήνας ή πλάκα και πλαίσιο, η χρήση αρθρωτών σχεδίων ή τυποποιημένων εξαρτημάτων ή η προσβασιμότητα των εξαρτημάτων για καθαρισμό ή αντικατάσταση (Bhattacharyya, 2012).

Τα υπολογιστικά εργαλεία διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην επαλήθευση και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Μπορούν να αυτοματοποιήσουν τις εργασίες ανάλυσης, επαλήθευσης ή βελτιστοποίησης, να εξερευνήσουν ένα ευρύ φάσμα εναλλακτικών σχεδιασμού και να οπτικοποιήσουν τα δεδομένα σχεδίασης ή απόδοσης. Ωστόσο, απαιτούν ακριβή μοντέλα, κατάλληλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης και προσεκτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Κεφάλαιο 5: Μοντελοποίηση Εναλλάκτη Θερμότητας U-tube Σχήματος

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο σκοπός μας είναι να γίνει βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός εναλλάκτη διφασικής ροής . Με γνώμονα την πολυπλοκότητα της ροής δυο φάσεων και της μεταφοράς θερμότητας παρουσιάστηκαν ευκαιρίες που μας οδήγησαν στην έρευνα αυτού του τομέα. Ανάμεσα σε πολυάριθμες επιλογές προσεγγίσεων για την βελτίωση των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας και την πτώση πίεσης καταλήξαμε να κινηθούμε στην αλλαγή της γεωμετρίας ενός υπάρχοντος σχεδίου προκειμένου μέσω της αύξησης της γωνίας να πετύχουμε καλύτερη απόδοση θερμότητας και πιθανόν καλύτερη λειτουργία με λιγότερες απώλειες. Η πραγματοποίηση των υπολογιστικών πειραμάτων αλλά και η επιλογή του μοντέλου έγινε απο το πρόγραμμα **Simscale**.

Το simscale είναι μια πλατφόρμα προσομοίωσης που ενσωματώνει όλα όσα απαιτούνται για μια ροή εργασιών μηχανικής από άκρο σε άκρο, καθιστώντας την χρήση της προσομοίωσης για πρώτη φορά τεχνικά και οικονομικά εφικτή για κάθε οργανισμό. Προσφέρει άμεση πρόσβαση οπουδήποτε και οποτεδήποτε σε πραγματικό χρόνο τόσο για πρώιμες προσομοιώσεις όσο και για πιο λεπτομερείς στο τελευταίο στάδιο. Το λογισμικό προσομοίωσης υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) μπορεί να αναλύσει μια σειρά προβλημάτων που σχετίζονται με στρωτές και τωρβώδεις ροές, ασυμπίεστα και συμπιεσμένα ρευστά, πολυφασικές ροές και πολλά άλλα.Εξαλείφονται τα εμπόδια περιορισμένης υπολογιστικής ισχύς, της προσβασιμότητας και του υψηλού κόστους.

5.1 Εύρεση και Επιλογή Μοντέλου προς Επεξεργασία

Αρχικά βρήκαμε το τρισδιάστατο μοντέλο το οποίο θα επεξεργαστούμε μέσω του προγράμματος **3DS Max**. Με την προϋπόθεση ότι θέλαμε έναν εναλλάκτη διφασικής ροής, ο οποίος να λειτουργεί ταυτόχρονα με αέριες και υγρές φάσεις, προκειμένου να προσφέρει ανώτερους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας λόγω

της διαδικασίας αλλαγής φάσης, επιλέξαμε τον εναλλάκτη του παρακάτω project:

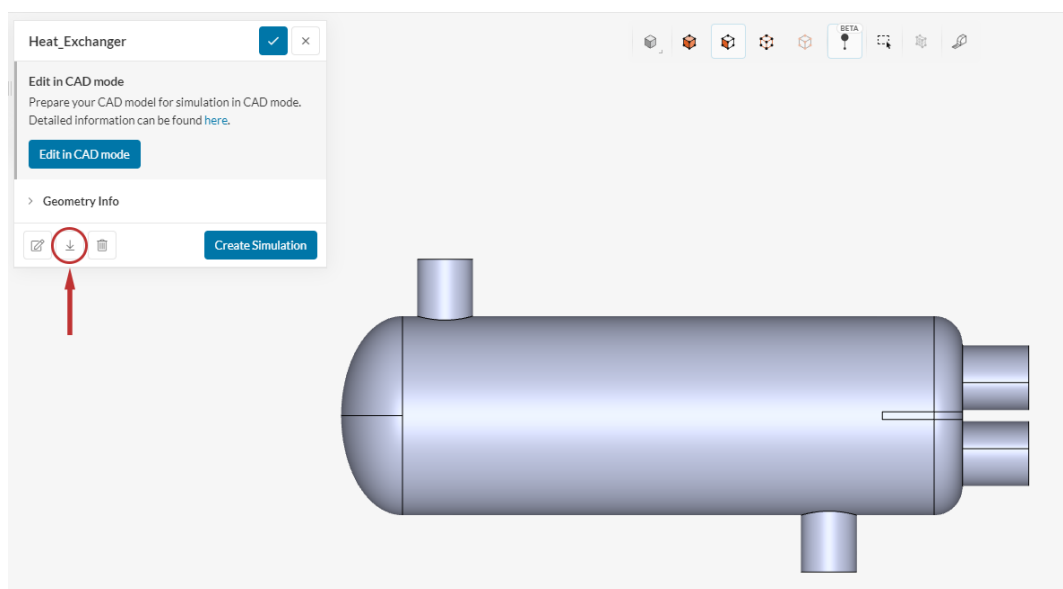
<https://www.simscale.com/docs/tutorials/cht-heat-exchanger/#create-the-u-tube-heat-exchanger-simulation>.

Αυτό το είδος εναλλάκτη θερμότητας πήρε το όνομά του από τον σωλήνα σχήματος U και είναι μια απλή δομή χαμηλής τιμής με λιγότερη επιφάνεια στεγανοποίησης. Έχει μια διαμόρφωση σωλήνα που μπορεί να διαστέλλεται ή να συστέλλεται ελεύθερα, χωρίς να προκαλεί θερμική καταπόνηση λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του σωλήνα και του κελύφους, οδηγώντας σε καλή απόδοση θερμικής αντιστάθμισης.

Αυτό το είδος εναλλάκτη ανήκει στα μοντέλα SST k- ω [16] τα οποία είναι μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων τα οποία έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται κατά κόρων τα τελευταία χρόνια. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα μοντέλα k- ω το SST συμπεριλαμβάνει την μεταφορά των διατμητικώντάσεων της τύρβης και προβλέπει με μεγάλη ακρίβεια την αποκόλληση της ροής.

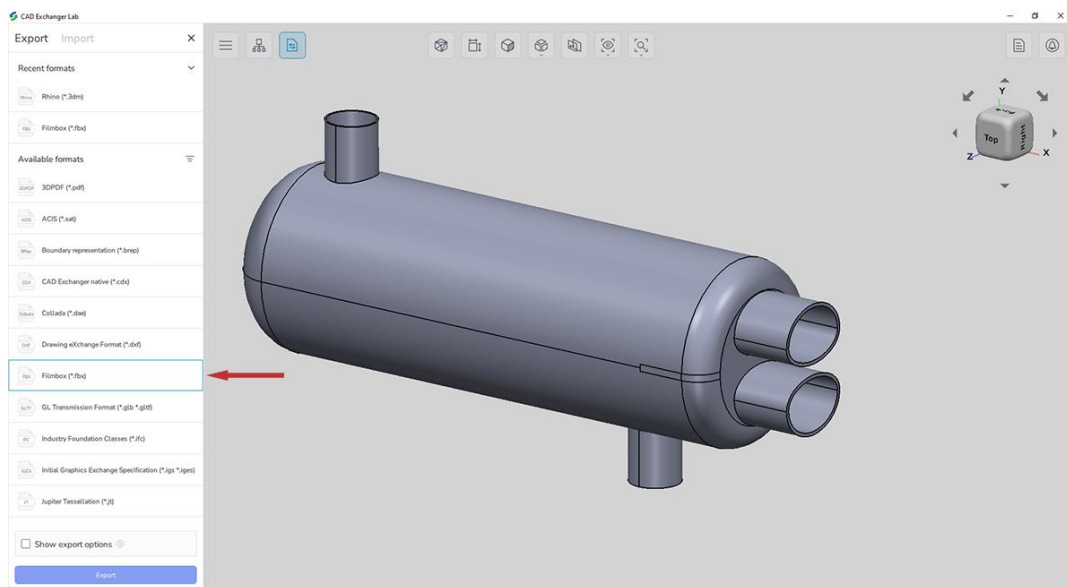
Το SimScale είναι ιδανικό πρόγραμμα γιατί μπορεί να προσομοιώσει και να οπτικοποιήσει αυτή τη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ του κελύφους και των δύο ρευμάτων που ρέουν μέσα.

- Πριν ξεκινήσουμε την προσομοίωση του εναλλάκτη κάναμε download το μοντέλο μέσω του **SimScale**, σε μορφή **.x_t**.



Εικόνα 5.1.1. – Κατέβασμα της πρότυπης γεωμετρίας απο το **SimScale**

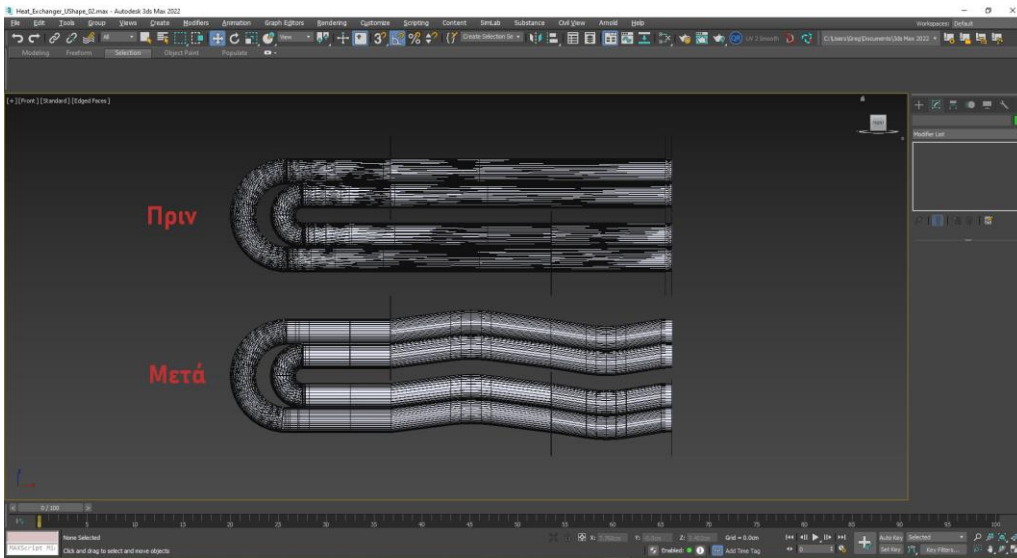
- Συνεχίσαμε κάνοντας import το μοντέλο στο **CAD Exchanger Lab**, προκειμένου να μπορέσουμε να το μετατρέψουμε σε μορφή **.fbx** και να μπορέσουμε να το επεξεργαστούμε.



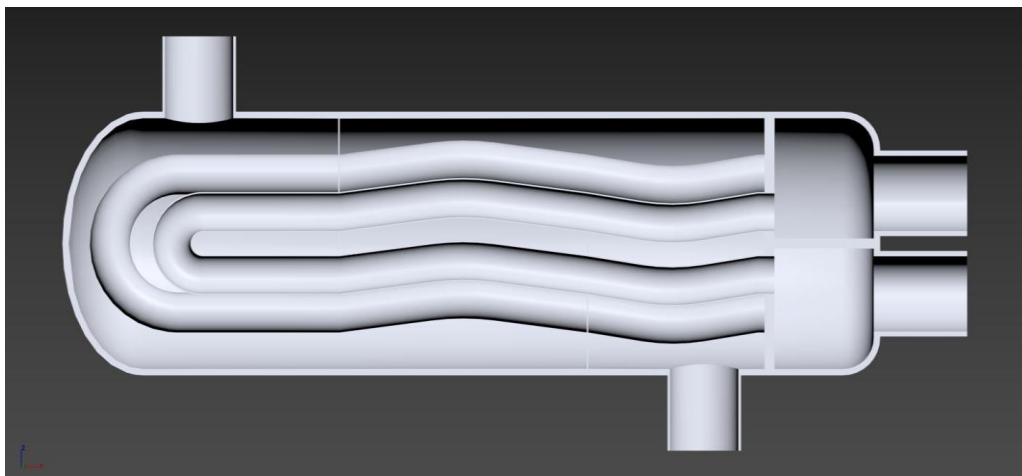
Εικόνα 5.1.2. – Μετατροπή της γεωμετρίας μας σε μορφή **.fbx** μέσω του **CAD Exchanger Lab**

5.2 Επεξεργασία Μοντέλου Εναλλάκτη Θερμότητας

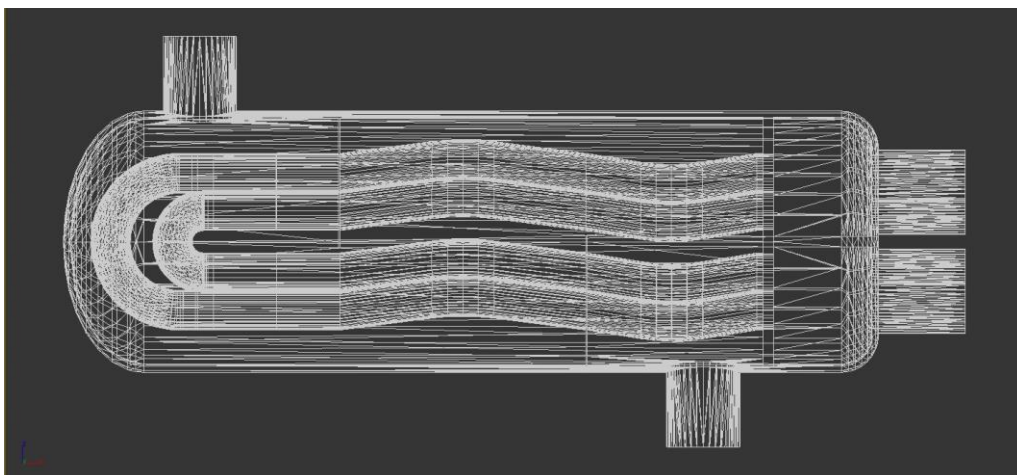
- Έπειτα, κάναμε import το **.fbx** αρχείο στο πρόγραμμα τρισδιάστατου σχεδιασμού **3DS Max** όπου και έγινε η επεξεργασία του. Πιο αναλυτικά, απομονώσαμε τους εσωτερικούς σωλήνες του μοντέλου (*isolate*), καθарίσαμε την γεωμετρία (σβήσαμε τα τρίγωνα της γεωμετρίας στα σημεία που θέλαμε να επέμβουμε και δημιουργήσαμε τετράγωνα (*quads*) προκειμένου να είναι πιο εύκολη η επεξεργασία τους) και κάναμε connect τα edges στο σημείο που θέλαμε να δημιουργήσουμε τις καμπύλες. Αφού κάναμε τις καμπύλες στο μοντέλο, στη συνέχεια τις κάναμε πιο ομαλές (*chamfer*).
- Η αλλαγή που κάναμε στις σωληνώσεις ήταν από ευθεία γωνία 180° να δημιουργήσουμε τη μέγιστη δυνατή καμπύλη η οποία να χωράει μέσα στο κέλυφος του εναλλάκτη. Η υπο γωνία διάταξη των σωληνώσεων αυξάνει την επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο ρευστών, βελτιώνοντας έτσι τη μεταφορά θερμότητας. Η σχεδίαση αυτής της διάταξης συνήθως οδηγεί σε μικρότερη πτώση πίεσης σε σύγκριση με άλλους τύπους εναλλακτών θερμότητας, καθιστώντας το σχετικά αποδοτικό.



Εικόνα 5.2.1. – Το πριν και μετά της αλλαγής στην γεωμετρία



Εικόνα 5.2.2. – Τομή της επεξεργασμένης γεωμετρίας



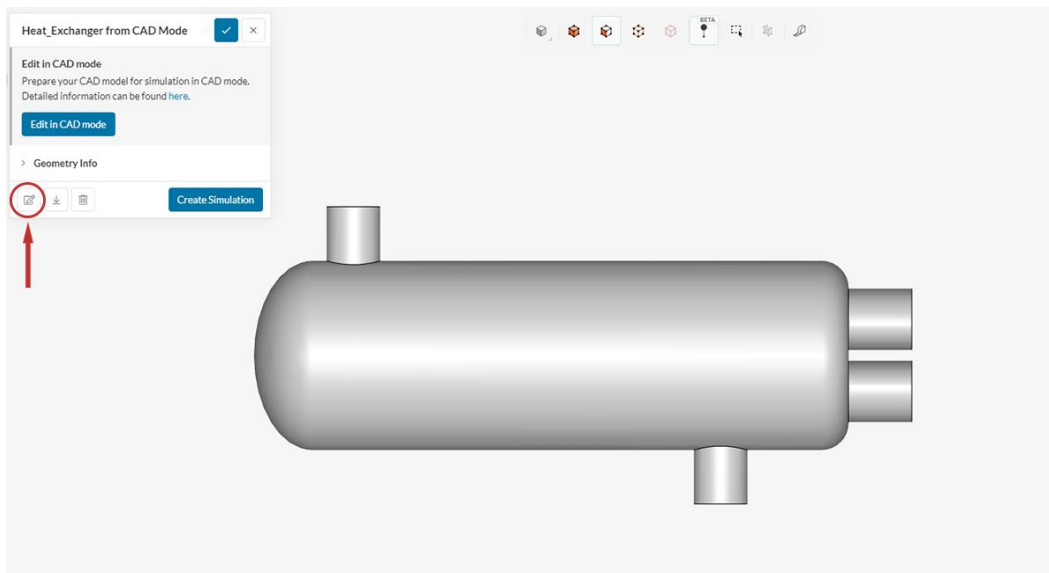
Εικόνα 5.2.3. – Πλέγμα επεξεργασμένης γεωμετρίας

- Αφού τελειώσαμε την επεξεργασία του μοντέλου και δημιουργήσαμε το νέο μοντέλο που θέλαμε για να κάνουμε το πείραμα , το καναμε export σαν *.fbx* και ακολουθήσαμε την ακριβώς ανάποδη διαδικασία με πάνω, δηλαδή το περασαμε από το **CAD Exchanger Lab** και το καναμε export σαν *.x_t* προκειμένου να το περασουμε στο **SimScale** και να τρέξουμε την προσομοίωση.

Κεφάλαιο 6: Πείραμα

6.1 Προσομοίωση Πρότυπου Μοντέλου στο SimScale

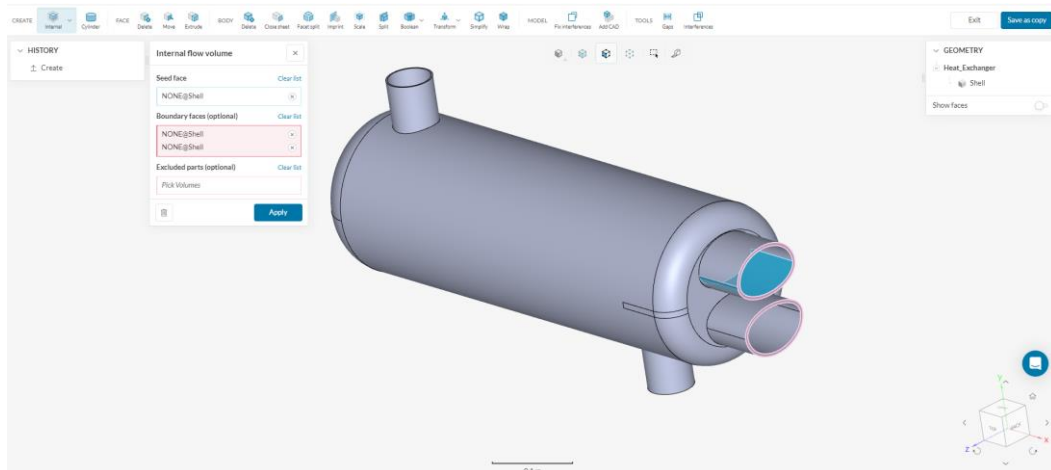
- Αρχικά έγινε η επεξεργασία του μοντέλου προκειμένου να καθοριστούν στο πρόγραμμα τα flow regions. Πιο αναλυτικά, αφού φορτώσαμε το μοντέλο στο **Simscale**, προχωρήσαμε κάνοντας Edit in CAD Mode, το οποίο μας επιτρέπει την επεξεργασία του μοντέλου και τον καθορισμό των διαφορετικών περιοχών (flow regions).



Εικόνα 6.1.1. – Edit in CAD Mode

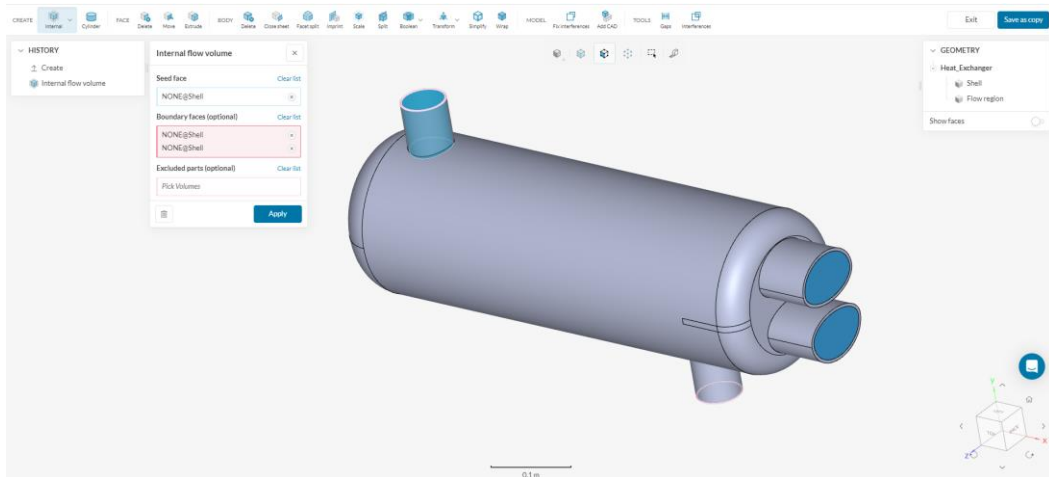
Παρακάτω χωρίζουμε σε 3 διαφορετικά κομμάτια (flow regions) τον εναλλάκτη μας, εκεί όπου θέλουμε να ορίσουμε τα διαφορετικά στοιχεία (υγρό, αέριο, στερεό) του εναλλάκτη μας.

Επιλέγουμε τις επιφάνειες του πρώτου flow region και τα όρια αυτού.



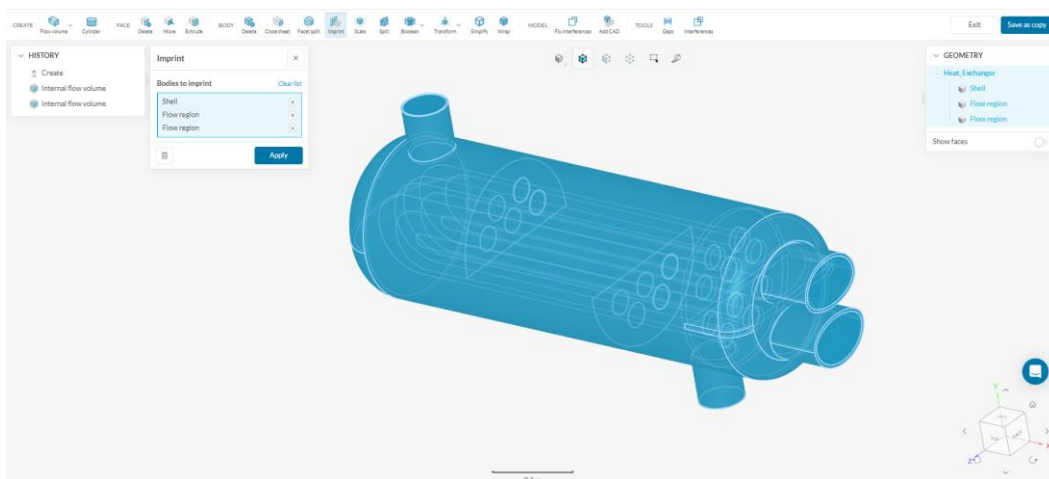
Εικόνα 6.1.2. – Επιλογή επιφανειών πρώτου flow region

Στην συνέχεια επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία και για τα επόμενα 2 flow regions. Να σημειωθεί ότι χρειάζεται να κάνουμε περιστροφή του εναλλάκτη προκειμένου να επιλέξουμε τις επιφάνειες και τα όρια των επιφανειών.



Εικόνα 6.1.3. – Επιλογή επιφανειών δεύτερου flow region

Έπειτα, επιλέξαμε την λειτουργία Imprint, πατήσαμε Apply και κάναμε Save As A Copy για να προσθέσουμε το τελικό μοντέλο στον πάγκο εργασίας μας.



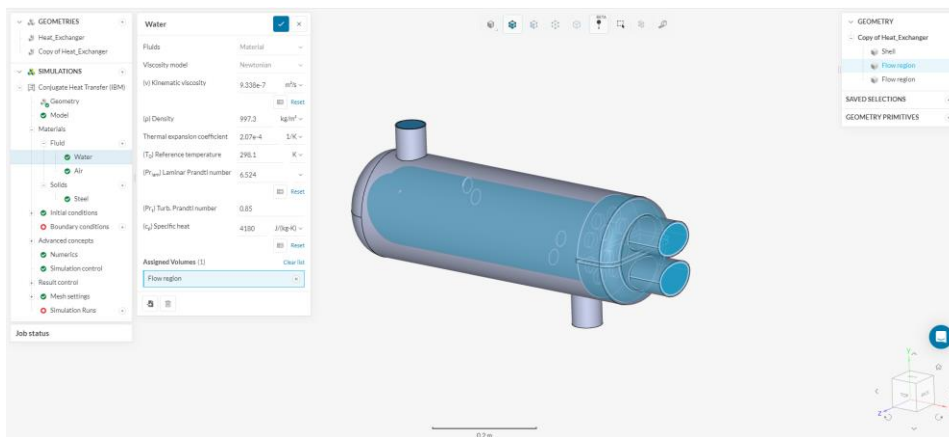
Εικόνα 6.1.4. – Imprint

Όταν ένα μοντέλο γίνεται export από τη λειτουργία CAD, θα ονομάζεται **Copy of Heat_Exchanger**. Αυτό θα είναι το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε για να εκτελέσουμε την προσομοίωση.

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να προχωρήσουμε ορίζοντας τις συνθήκες και τις παραμετρους της προσομοίωσης. Στην περίπτωση μας, η ροή είναι τυρβώδης, επομένως επιλέγεται το μοντέλο αναταράξεων «k-omega SST» και ενεργοποιείται η επιλογή «compressible» για να ληφθούν υπόψη οι διακυμάνσεις της πυκνότητας.

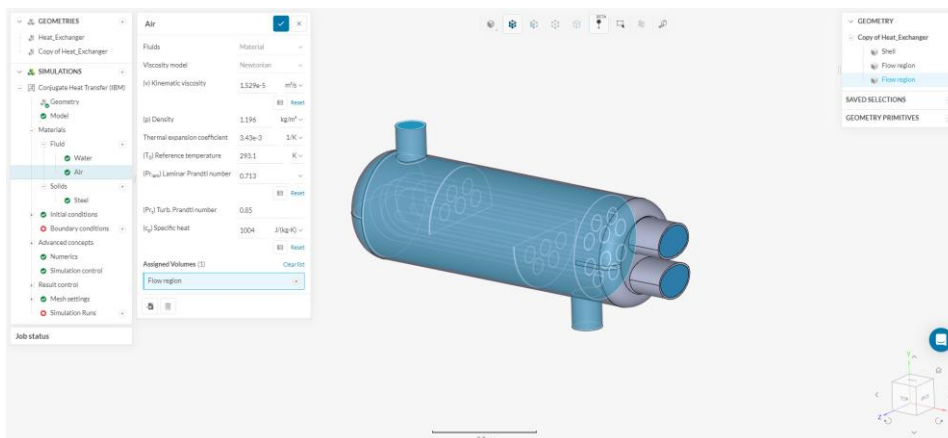
- Συνεχίζουμε ορίζοντας την επιτάχυνση της βαρύτητας (**Model** → $g_y = -9.81\text{m/s}^2$), και καθορίζουμε τα υλικά στα 3 διαφορετικά flow regions που δημιουργήσαμε παραπάνω.

Νερό για το πρώτο flow region:



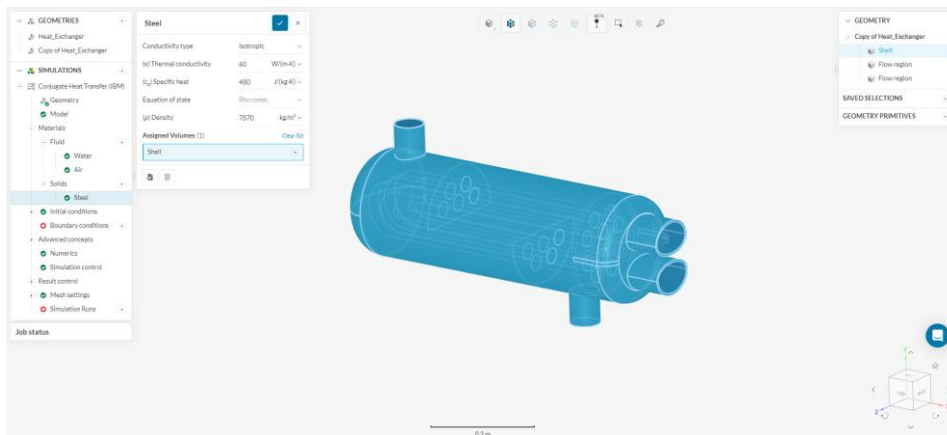
Εικόνα 6.1.5. – Προσθήκη νερού στο πρώτο flow region

Αέρας για το δεύτερο:



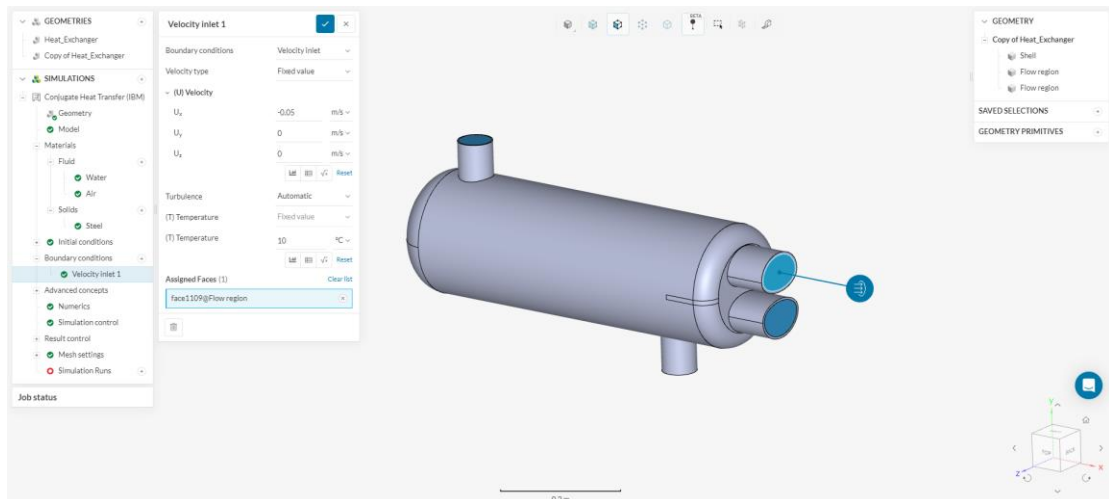
Εικόνα 6.1.6. – Προσθήκη αέρα στο δεύτερο flow region

Και τέλος ατσάλι για το εξωτερικό περίβλημα:



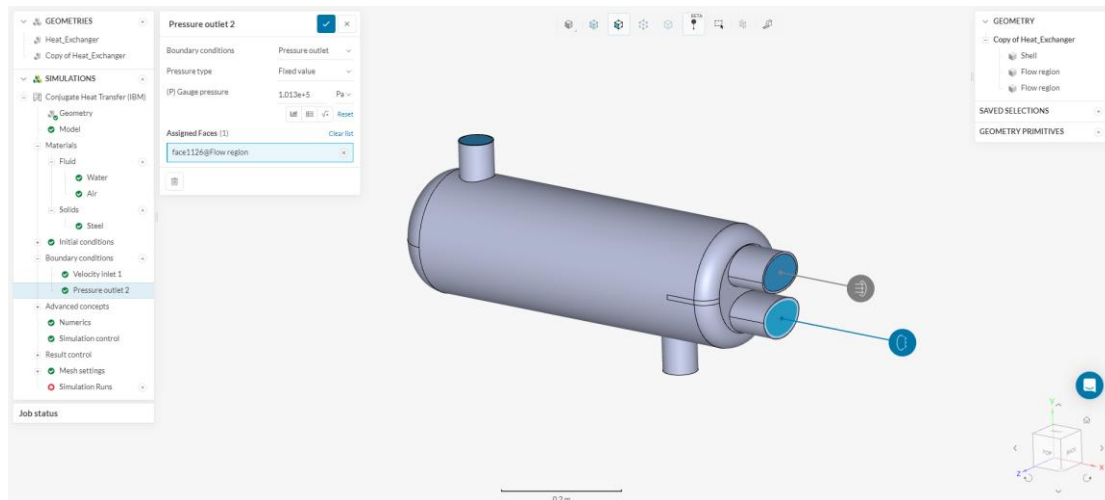
Εικόνα 6.1.7. – Προσθήκη ατσάλιου στο εξωτερικό περίβλημα

- Τέλος, προτού τρέξουμε την προσομοίωση, ορίσαμε και τις συνθήκες (Boundary Conditions). Στην ταχύτητα εισαγωγής νερού βάλαμε $U_x = -0.05\text{m/s}$ και στην θερμοκρασία $T = 10\text{ }^\circ\text{C}$



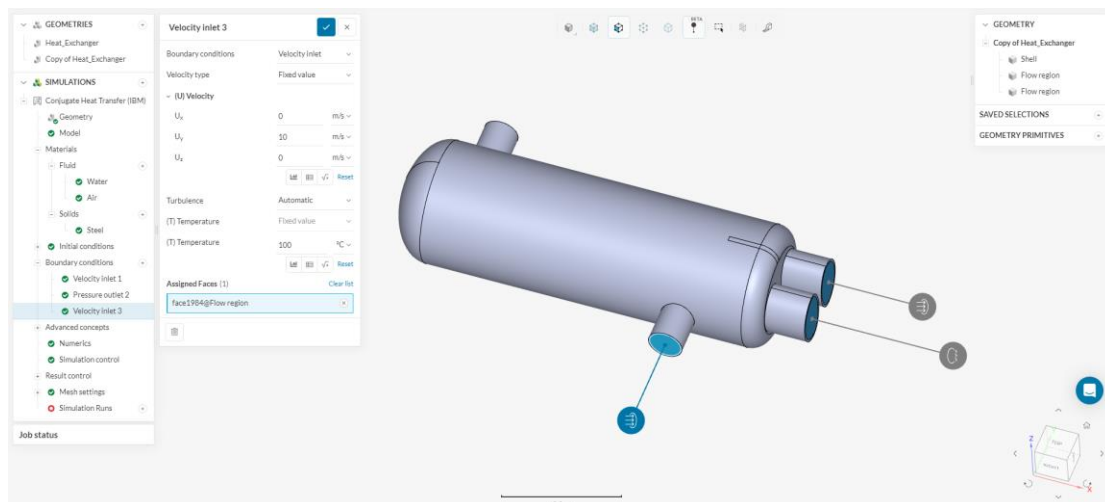
Εικόνα 6.1.8. – Ταχύτητα και θερμοκρασία εισαγωγής

Σαν πίεση εξόδου ορίζουμε $P = 10135 \text{ Pa}$.



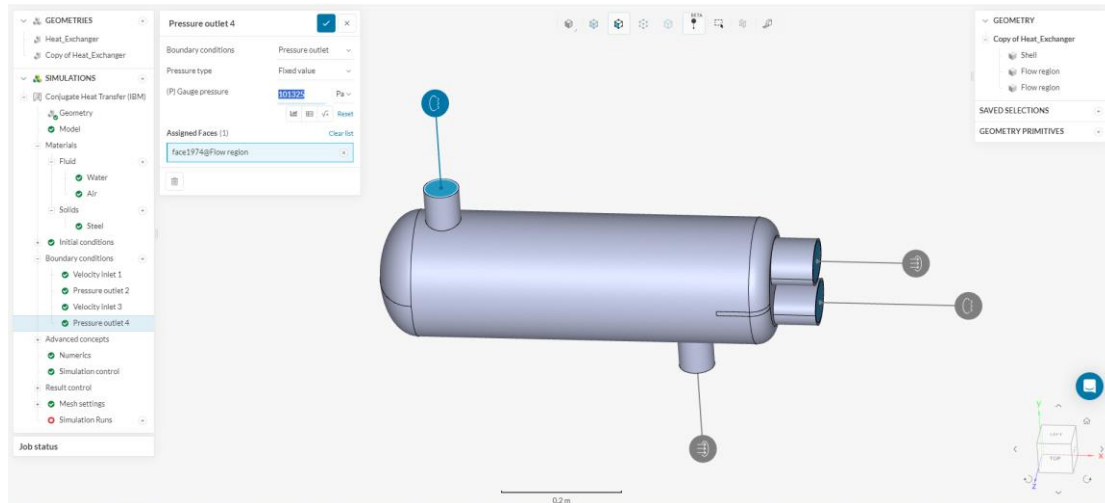
Εικόνα 6.1.9. – Πίεση εξόδου

Εφαρμόζουμε την ίδια διαδικασία για τον ζεστό αέρα , με ταχύτητα $U_y = 10 \text{ m/s}$ και θερμοκρασία $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.



Εικόνα 6.1.10. – Ταχύτητα και θερμοκρασία αέρα

Στην πίεση εξόδου ορίζουμε τις ίδιες συνθήκες με $P = 101325 \text{ Pa}$.



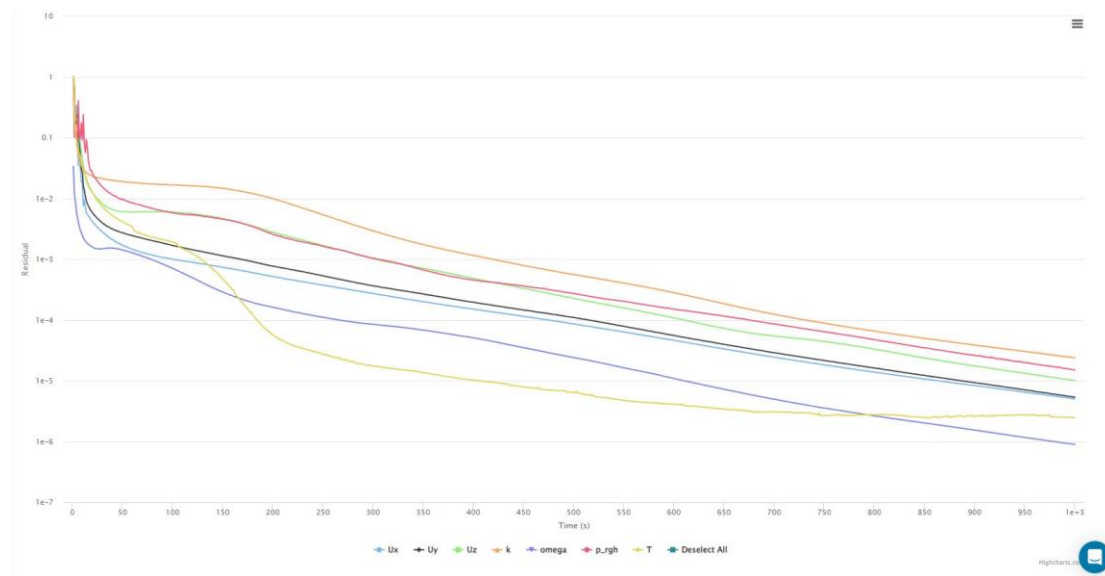
Εικόνα 6.1.11. – Πίεση εξόδου αέρα

- Αφού ορίσαμε τις παραπάνω συνθήκες τρέξαμε την προσομοίωση στο πρότυπο μοντέλο όπως στο tutorial.
- Έπειτα τρέξαμε και το επεξεργασμένο ακριβώς με τις ίδιες συνθήκες και μεταβλητές.
- Τέλος τρέξαμε το επεξεργασμένο μοντέλο και δεύτερη φορά προκειμένου να μπορούμε να συγκρίνουμε την επεξεργασμένη γεωμετρία με 2 διαφορετικές ταχύτητες ,μειώνοντας για τον ζεστο αερά κατά το ήμισυ και διατηρώντας το ψυκτικό υγρό το ίδιο.
- Το πρότυπο και το επεξεργασμένο μοντέλο τα οποία έτρεξαν με τις ίδιες συνθήκες και μεταβλητές είχαν την ίδια διάρκεια τρεξίματος στα 52 λεπτά.
- Στο επεξεργασμένο με την μειωμένη ταχύτητα ετρεξε στα 45 λεπτά.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Πειράματος και Σχολιασμός

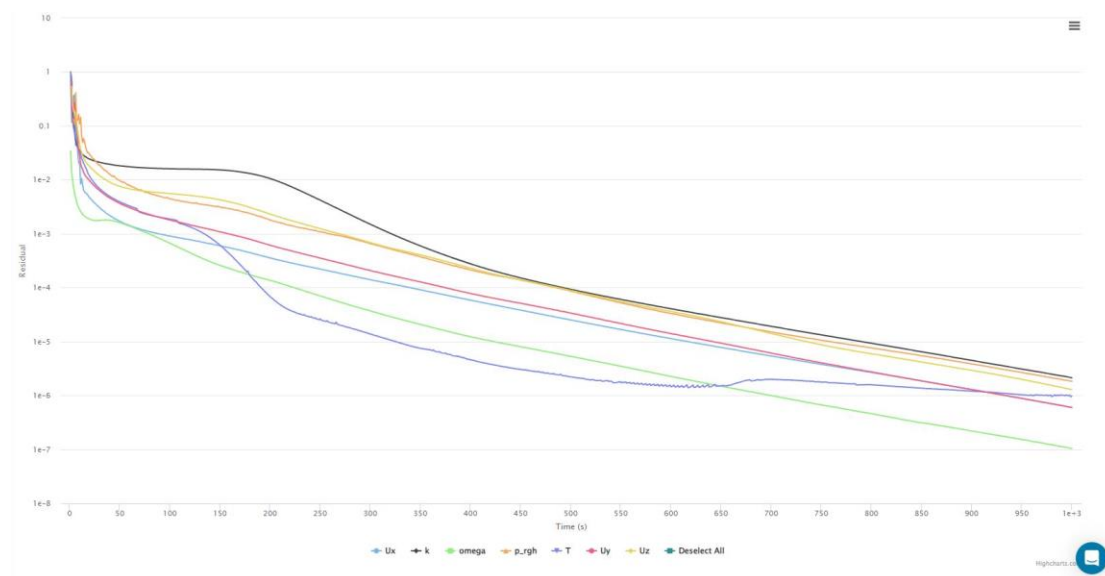
7.1 Καμπύλες σύγκλισης

- Πρότυπο μοντέλο:



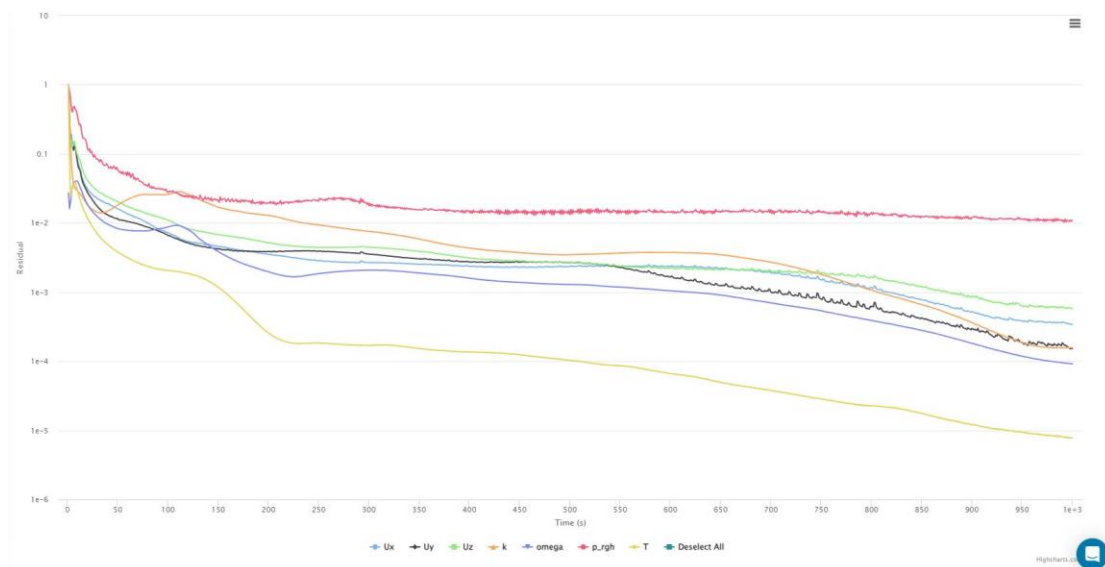
Εικόνα 7.1.1. – Καμπύλες σύγκλισης πρότυπου μοντέλου

- Επεξεργασμένο μοντέλο:



Εικόνα 7.1.2. – Καμπύλες σύγκλισης επεξεργασμένου μοντέλου

- Επεξεργασμένο μοντέλο (Διαφορετική Ταχύτητα):



Εικόνα 7.1.3. – Καμπύλες σύγκλισης επεξεργασμένου μοντέλου με διαφορετικές ταχύτητες

- Και στα 3 γραφήματα παρατηρούμε μια πολύ ισχυρή σύγκλιση προς την πραγματική τιμή από τις πολύ γρήγορες και πολύ χαμηλές τιμές που φτάνουν μέχρι το $1 \cdot 10^{-7}$.
- Στα 2 πρώτα γραφήματα παρατηρούμε όλες τις τιμές να πέφτουν πάρα πολύ γρήγορα συγκριτικά με το 3^ο το οποίο καθυστερεί.
- Ωστόσο και το 3^ο στο τέλος αγγίζει τις πολύ χαμηλές τιμές όπως και στα άλλα 2.

Οι καμπύλες σύγκλισης ενός εναλλάκτη θερμότητας αναφέρονται στις γραφικές παραστάσεις που δείχνουν τη σχέση μεταξύ της απόδοσης του εναλλάκτη και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των ρευστών (υγρά ή αέρια) που διαρρέουν μέσα από αυτόν.

Κατά τη λειτουργία ενός εναλλάκτη θερμότητας, η απόδοσή του επηρεάζεται σημαντικά από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ρευστών που διαπερνούν τον εναλλάκτη. Οι καμπύλες σύγκλισης μας δείχνουν πώς αλλάζει η απόδοση του εναλλάκτη καθώς η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ρευστών αυξάνεται ή μειώνεται.

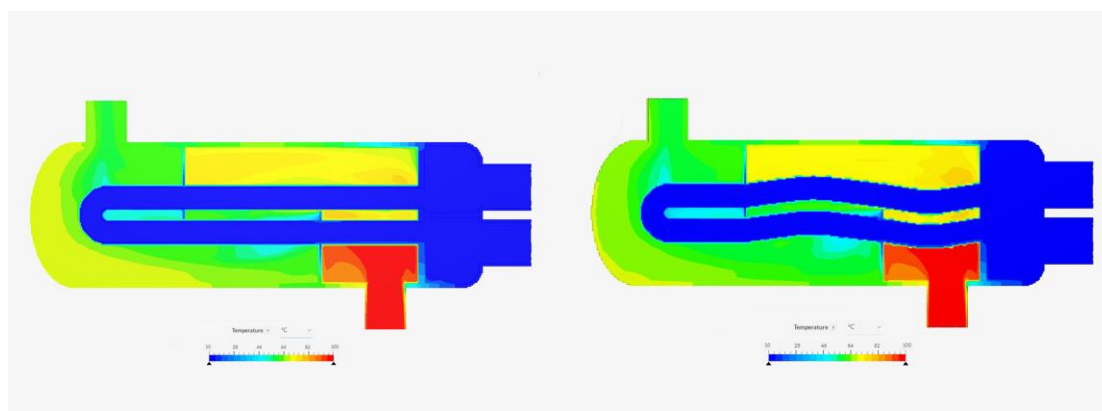
Συνήθως, οι καμπύλες σύγκλισης έχουν τη μορφή ενός καμπύλου σχήματος, όπου η απόδοση αρχικά αυξάνεται και στη συνέχεια σταθεροποιείται σε ένα επίπεδο που ονομάζεται μέγιστο επίπεδο απόδοσης. Αυτό συμβαίνει επειδή

όσο η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ρευστών αυξάνεται, αυξάνεται επίσης και η μεταφορά θερμότητας. Ωστόσο, υπάρχει ένα σημείο όπου η αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας δεν έχει πλέον σημαντική επίδραση στην απόδοση του εναλλάκτη, και έτσι η απόδοση σταθεροποιείται.

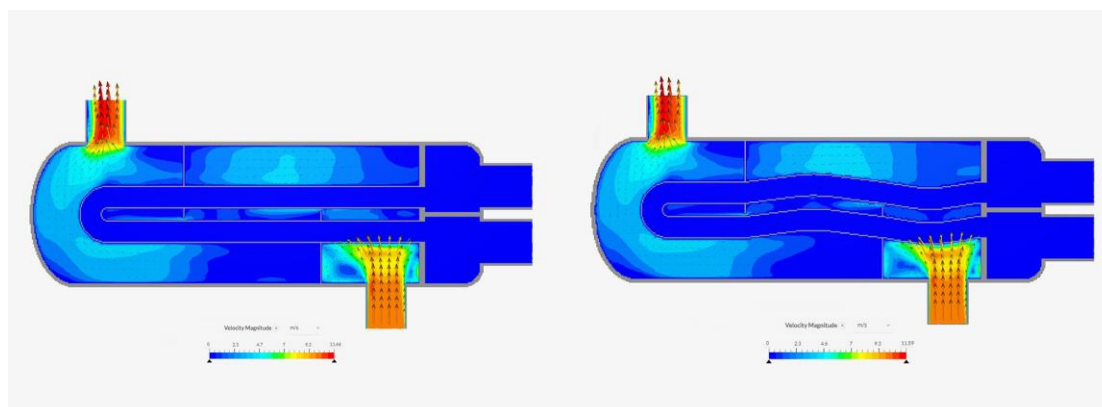
Κατανοώντας τις καμπύλες σύγκλισης ενός εναλλάκτη θερμότητας, μπορούμε να εκτιμήσουμε την απόδοση του εναλλάκτη σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας και να προσδιορίσουμε τη βέλτιστη διαφορά θερμοκρασίας για τη μέγιστη απόδοση.

7.2 Απεικόνιση Επιφανειών

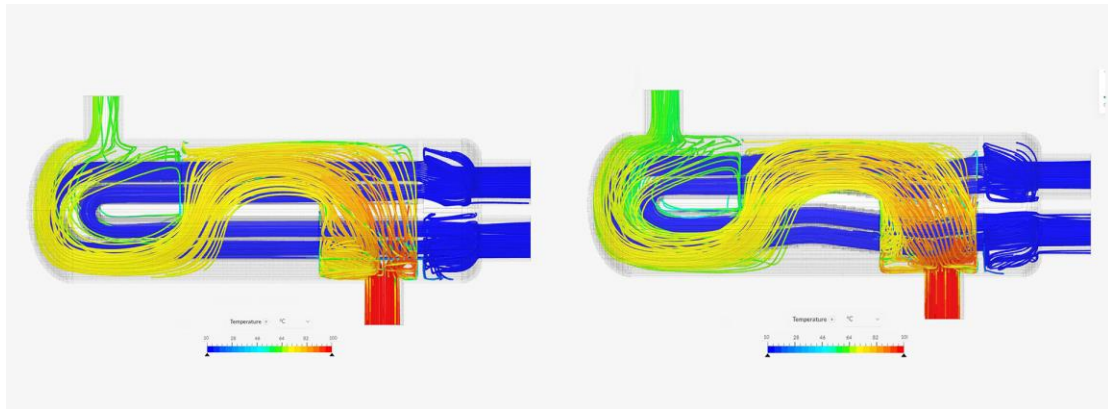
- Σύγκριση πρότυπου μοντέλου και επεξεργασμένου:



Εικόνα 7.2.1. – Απεικόνιση της θερμοκρασίας του πρότυπου και του επεξεργασμένου μοντέλου

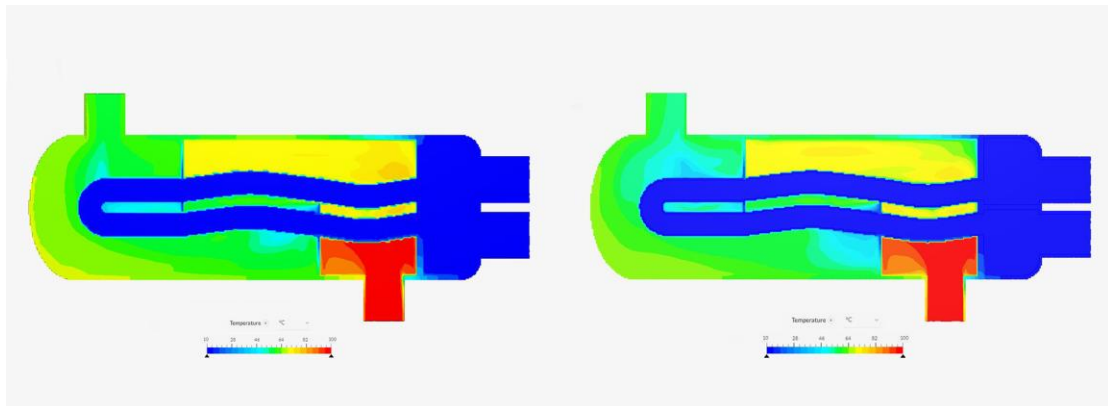


Εικόνα 7.2.2. – Απεικόνιση της ταχύτητας του πρότυπου και του επεξεργασμένου μοντέλου

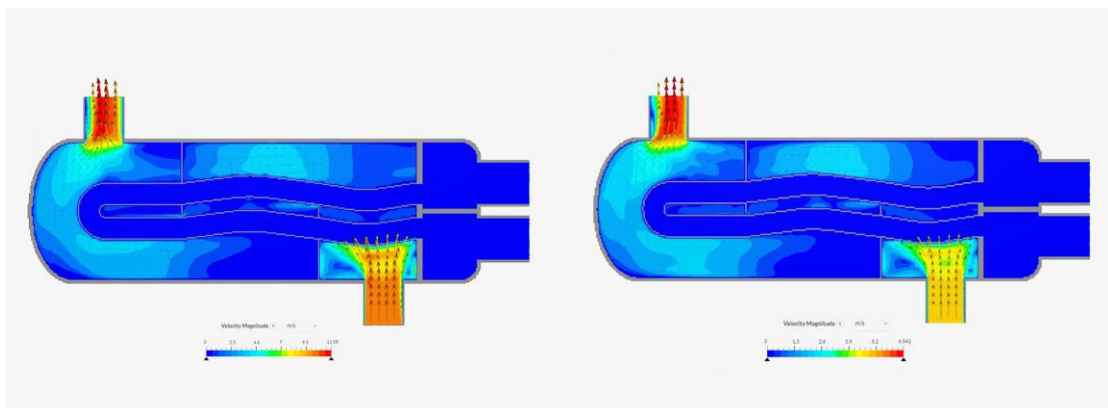


Εικόνα 7.2.3. – Απεικόνιση της θερμοκρασίας (σε άλλη μορφή) του πρoτύπου και του επεξεργασμένου μοντέλου

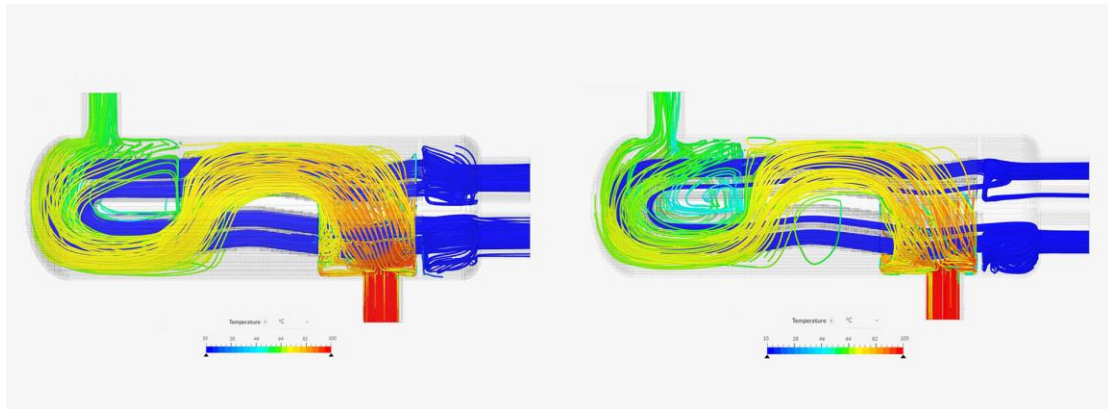
- Σύγκριση επεξεργασμένου μοντέλου με 2 διαφορετικές ταχύτητες στην είσοδο:



Εικόνα 7.2.4. – Απεικόνιση της θερμοκρασίας του επεξεργασμένου μοντέλου με δυο διαφορετικές ταχύτητες



Εικόνα 7.2.5. – Απεικόνιση της ταχύτητας του επεξεργασμένου μοντέλου με δυο διαφορετικές ταχύτητες



Εικόνα 7.2.6. – Απεικόνιση της θερμοκρασίας (σε άλλη μορφή) του επεξεργασμένου μοντέλου με δυο διαφορετικές ταχύτητες

Με την βοήθεια του ParaView πήραμε κάποια προφίλ θερμοκρασίας στην έξοδο τα οποία μας έδωσαν τις παρακάτω τιμές:

- I. Πρότυπο: 328 °C
- II. Επεξεργασμένο: 325,5 °C
- III. Επεξεργασμένο (μειωμένη ταχύτητα): 321,5 °C

Κρατήσαμε και σχολιάζουμε την μέση χαμηλότερη τιμή την οποία πήραμε.

7.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας παρατηρούμε μια βελτίωση στην απόδοση του εναλλάκτη.

- Έχοντας καλύτερη πτώση πίεσης στις σωληνώσεις την οποία θέλαμε να πετύχουμε διότι επιδεικνύει αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας με ελάχιστη απώλεια ενέργειας.
- Χαμηλότερη θερμοκρασία στην έξοδο του επεξεργασμένου μοντέλου δίνοντας μας καλύτερη αποδοτικότητα και ασφάλεια του συστήματος.
- Σε κάθε γράφημα παρατηρούμε τελείως διαφορετική συμπεριφορά κοντά στην είσοδο. Αυτό οφείλεται στην διαφορά της γωνιάς σε σύγκριση με το πρότυπο.
- Πετυχαίνουμε καλύτερη εναλλαγή και μεταφορά θερμότητας.

Κλείνοντας να αναφέρουμε ότι η συγκεκριμένη εργασία μας άνοιξε νέους ορίζοντες ως προς την αλλαγή της γεωμετρίας. Αυτό μας δίνει το κίνητρο να δούμε και να επεξεργαστούμε διαφορετικούς εναλλάκτες, να επεξεργαστούμε

διαφορετικά είδη γωνιών και να ορίσουμε διαφορετικές συνθήκες. Όλα αυτά τα πειράματα έχουν σαν στόχο την μελέτη και την ανάπτυξη για βελτίωση και αύξηση της απόδοσης.

Πηγές

- Bejan, A. (2006). *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley.
- Bejan, A., & Tsatsaronis, G. (1996). *Thermal Design and Optimization*. Wiley.
- Bhattacharya, S., Calmide, V. V., & Mahajan, R. L. (2019). Thermophysical properties of high temperature nanoparticles - suspensions (nanofluids). *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43(14), 777-789.
- Bhattacharyya, S. (2012). *Heat Exchanger Design*. CRC Press.
- Brunton, S. L., & Kutz, J. N. (2019). *Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*. Cambridge University Press.
- Cengel, Y.A., & Boles, M.A. (2006). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill.
- Chapman, A. J. (2017). *Heat Transfer*. Macmillan Education UK.
- Das, S. K., Choi, S. U., Yu, W., & Pradeep, T. (2006). *Nanofluids: Science and Technology*. Wiley.
- Deb, K. (2001). *Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons.
- Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer.
- Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer*. McGraw-Hill.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
- Ishii, M., & Hibiki, T. (2006). *Thermo-fluid Dynamics of Two-phase Flow*. Springer.
- Kakac, S., & Liu, H. (2002). *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*. CRC Press.
- Kays, W. M., & London, A. L. (1998). *Compact Heat Exchangers*. Krieger Pub Co.
- Kern, D. Q., & Kraus, A. D. (2005). *Extended Surface Heat Transfer*. Wiley.

Muller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., & Watkinson, A. P. (2005). Heat Exchanger Fouling: Mitigation and Cleaning Technologies. Begell House.

Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., & Ratto, M. (2008). Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models. Wiley.

Saunders, E. A. D. (2005). Heat Exchangers: Selection, Design, and Construction. Longman Scientific & Technical.

Saunders, E. A. D. (2005). Heat Exchangers: Selection, Design, and Construction. Longman Scientific & Technical.

Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003). Fundamentals of Heat Exchanger Design. Wiley.

Thome, J.R. (2004). Engineering Data Book III. Wolverine Tube Inc.

Thonon, B., Vidil, R., & Haberschill, P. (1997). Enhancement of heat transfer in compact heat exchangers by corrugation and wavy surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer, 40(8), 1915-1925.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education.

Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, 23(3), 251-283.