



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΣΕ ΛΕΒΗΤΕΣ  
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΒΑΘΜΟ  
ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ  
ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ**

**ΤΑΜΒΑΚΗ ΙΩΑΝΝΑ**

47599

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΝΑΖΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ**

ΑΘΗΝΑ, 2021



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**SCHOOL OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**DIPLOMA THESIS**

**EXHAUST GAS ANALYSIS AND EVALUATION IN BOILERS OF  
HEAT GENERATION SYSTEMS – IMPACT ON THE DEGREE OF  
PERFORMANCE OF EXHAUST GAS HEAT EXCHANGERS  
RECOVERY**

**TAMVAKI IOANNA**

**47599**

**SUPERVISOR**

**NAZOS ANTONIOS**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΣΕ ΛΕΒΗΤΕΣ  
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΒΑΘΜΟ  
ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ  
ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>A/a</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	ΜΟΥΣΤΡΗΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ	ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
2	ΝΑΖΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ	ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	
3	ΤΣΙΤΣΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ	ΕΔΙΠ	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Ταμβάκη Ιωάννα του Βασιλείου, με αριθμό μητρώου 47599 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/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».

Ο/Η Δηλών/ούσα



(Υπογραφή)

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην μέτρηση και ανάλυση καυσαερίων, με χρήση Βιομηχανικού Αναλυτή Καυσαερίων, σε λέβητες αερίων, υγρών και στερεών καυσίμων.

Στόχος είναι η αξιολόγηση της σύστασης των καυσαερίων, καθώς και η διερεύνηση της επίδρασής τους στην αποδοτικότητα εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση ποσών θερμότητας από τα καυσαέρια.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη, το Μέρος Α της εργασίας είναι θεωρητικό και υποστηρικτικό του Μέρους Β, που αποτελεί το πειραματικό μέρος. Το σύνολο της εργασίας υποστηρίζεται από την βιβλιογραφία, ελληνική και ξένη, με πηγές από βιβλία, επιστημονικά άρθρα, διδακτικές σημειώσεις και αξιόπιστες διαδικτυακές πηγές.

Το Μέρος Α αποτελείται από τρία κεφάλαια και καλύπτει απαραίτητες γνώσεις που αφορούν το υπόβαθρο της εργασίας. Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται σύντομα οι απαραίτητοι ορισμοί από τις επιστήμες της θερμοδυναμικής και της μετάδοσης θερμότητας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ειδικότερη αναφορά στους εναλλάκτες θερμότητας, παρουσιάζοντας απαραίτητη μεθοδολογία για το πειραματικό μέρος και την θεωρία για την ανάκτηση θερμότητας και ρύπανση στους εναλλάκτες που απασχολεί το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρία για τους λέβητες και την καύση, ώστε να καλυφθεί πλήρως η θεωρία που αφορά την μεθοδολογία και το σύνολο των συστημάτων που εξετάζει η διπλωματική.

Το Μέρος Β αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια, το τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας αφιερώνεται στην περιγραφή του Βιομηχανικού Αναλυτή Καυσαερίων NOVAPlus της MRU που ανήκει στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής. Παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία όπως ακολουθήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου της εταιρίας κατασκευής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις με τον αναλυτή, καθώς και δεδομένα και παρατηρήσεις που αφορούν τις εγκαταστάσεις στις οποίες εκτελέστηκε η πειραματική διαδικασία. Ακολουθεί η επεξεργασία των μετρήσεων με σχέσεις από την στοιχειομετρία και με την μέθοδο επίλυσης εναλλακτών  $\epsilon$ -NTU.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση και ο σχολιασμός των μετρήσεων και αποτελεσμάτων όπως υπολογίστηκαν στο πέμπτο κεφάλαιο, ενώ αξιολογείται και ο βαθμός απόδοσης των εναλλακτών ανάκτησης θερμότητας.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο διεξάγονται τα συμπεράσματα για το σύνολο της εργασίας, αξιολογείται η επίτευξη του στόχου της και γίνονται προτάσεις όσον αφορά το αντικείμενό της. Στο τέλος της εργασίας ακολουθούν η πλήρης βιβλιογραφία και το παράρτημα.

## Abstract

The objective of this thesis is the measurement and analysis of flue gases in gas, liquid and solid fuel boilers using an industrial flue gas analyzer.

The aim is to evaluate the composition of flue gases, as well as to investigate their effect on the efficiency of heat exchangers used in heat recovery from exhaust gases.

The paper consists of two parts, Part A is theoretical and complementary to Part B, which is the experimental part of the study. In its entirety it is supported by Greek and foreign bibliography, with sources from books, scientific articles, educational notes and reliable online sources.

Part A consists of three chapters and contains the necessary information regarding the background of this thesis. In the first chapter the necessary definitions from thermodynamics and heat transfer are explained.

In the second chapter a specific reference to heat exchangers is made, presenting the methodology for the experimental part and the theory regarding heat recovery and fouling of heat exchangers. Those matters apply to the main theme of the study.

The third chapter presents the theory on boilers and combustion, in order to complete the theory concerning the method used for analysis and the systems explained in the experimental part.

Part B consists of four chapters, the fourth chapter of the paper is devoted to the description of the industrial flue gas analyzer NOVAPlus manufactured by MRU, which belongs to the University of West Attica. The experimental procedure is presented as followed according to the instructions of the manual provided by the company.

The fifth chapter contains the data obtained from measurements using the flue gas analyzer, as well as data and observations regarding the facilities where the procedure was performed. The measurements are then processed according to stoichiometric analysis and the  $\varepsilon$ -NTU method of analysis for heat exchangers.

In the sixth chapter, measurements and results calculated in the previous chapter are analyzed and reviewed, while the efficiency of heat recovery is evaluated.

In the seventh and final chapter, conclusions are made regarding the thesis and the achievement of its objective is evaluated. Suggestions are made regarding the subject of the study. In the final pages the complete bibliography is recited followed by the appendix.

## Table of Contents

<b>ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</b> .....	4
Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
Εισαγωγή .....	9
1. Θερμικές Επιστήμες .....	11
1.1 Θερμοδυναμική.....	11
1.2 Μετάδοση Θερμότητας.....	12
2. Εναλλάκτες Θερμότητας .....	17
2.1 Κατηγοριοποίηση Εναλλακτών Θερμότητας.....	17
2.2 Συντελεστές Εναλλακτών Θερμότητας.....	20
2.2.1 Συνολικός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας.....	20
2.2.2 Συνολικός Συντελεστής Επιφανειακής Απόδοσης.....	23
2.2.3 Συντελεστής Ρυπαρότητας.....	24
2.2.4 Ενεργός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας .....	25
2.3 Μέθοδοι Επίλυσης Εναλλακτών Θερμότητας .....	25
2.3.1 Μέση Λογαριθμική Θερμοκρασιακή Διαφορά LMTD.....	26
2.3.2 Αποτελεσματικότητα – Αριθμός Μονάδων Μεταφοράς $\epsilon$ -NTU .....	29
2.4 Εναλλάκτες Ανάκτησης Θερμότητας Καυσαερίων .....	31
2.4.1 Ανάκτηση Θερμότητας .....	31
2.4.2 Η Ρύπανση στους Εναλλάκτες Ανάκτησης Θερμότητας.....	33
2.4.3 Επιλογή Υλικού Κατασκευής Εναλλάκτη Ανάκτησης.....	37
3. Λέβητες Παραγωγής Θερμότητας.....	39
3.1 Ατμοπαραγωγοί Λέβητες.....	39
3.2 Λέβητες Θερμού Νερού.....	41
3.2.1 Λέβητες Χαμηλών Θερμοκρασιών .....	43
3.3 Ανάκτηση Θερμότητας στους Λέβητες .....	44
3.3.1 Λέβητες Συμπύκνωσης .....	44
3.4 Η Χημεία της Καύσης στους Λέβητες.....	47
3.4.1 Καύσιμα .....	49
3.4.2 Καυσαέρια.....	49
4. Βιομηχανικού Τύπου Αναλυτής Καυσαερίων.....	52
4.1 Βιομηχανικού Τύπου Αναλυτής NOVAPlus της MRU.....	52
4.1.1 Επιλογές και απαραίτητες ρυθμίσεις .....	53

4.1.2	Διαδικασία λήψης μετρήσεων.....	56
5.	Μετρήσεις.....	58
5.1	Πειραματική Διαδικασία.....	58
5.1.2	Παρατηρήσεις για τις Τοποθεσίες των Μετρήσεων .....	58
5.2	Δεδομένα.....	60
5.2.1	Δεδομένα Διαθέσιμα από τις Εγκαταστάσεις .....	60
5.2.2	Μετρήσεις από τον αναλυτή .....	61
5.3	Επεξεργασία Μετρήσεων.....	63
5.3.1	Μεθοδολογία Επεξεργασίας .....	63
5.3.2	Αποτελέσματα Επεξεργασίας .....	66
6.	Ανάλυση .....	69
6.1	Σχολιασμός Μετρήσεων .....	69
6.2	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων .....	78
6.3	Απόδοση Εναλλάκτη Ανάκτησης Θερμότητας.....	83
6.3.1	Εξέταση περίπτωσης λέβητα Φυσικού Αερίου 1 .....	85
7.	Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	87
7.1	Συμπεράσματα .....	87
7.2	Προτάσεις για βελτιστοποίηση κατασκευής και χρήσης εναλλάκτη στην ανάκτηση .....	89
7.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	89
	Bibliography .....	90
	Παράρτημα.....	92



## Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την χρήση Βιομηχανικού Αναλυτή Καυσαερίων για την μέτρηση και ανάλυση καυσαερίων σε λέβητες αερίων, υγρών και στερεών καυσίμων. Οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο της συσκευής, σε εγκαταστάσεις όπου αυτό επιτράπη, δεδομένων και των επικρατούντων συνθηκών της πανδημίας Covid-19.

Η συλλογή πληροφοριών που αφορούν το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας έγινε από βιβλία και διαθέσιμες διαδικτυακές πηγές, ιστοσελίδες, άρθρα και αναφορές. Τα διαθέσιμα στοιχεία και ιδιαίτερες λεπτομέρειες που αφορούν τις εγκαταστάσεις των λεβήτων συλλέχθηκαν κατά την επίσκεψη στις διαφορετικές εγκαταστάσεις και όπου ήταν δυνατόν από τον τεχνικό συντήρησης τους.

Κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων οι συνθήκες δεν ήταν πάντοτε οι επιθυμητές, αναζητούνται οι αιτίες και αναφέρονται όλα τα γνωστά στοιχεία που μπορεί να συνέβαλλαν σε μη αναμενόμενα αποτελέσματα. Μεγέθη για τα οποία συμπεριλαμβάνονται οριακές τιμές στην νομοθεσία, συγκρίνονται με αυτές.

Η μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων, επιλέχθηκε με γνώμονα προηγούμενες γνώσεις από μαθήματα του προγράμματος σπουδών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, σε συνδυασμό με την βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε προς εμπλουτισμό και υποστήριξη αυτών των γνώσεων.

Μετά από προσεκτική ανάλυση των μετρήσεων και αποτελεσμάτων, γίνεται αξιολόγηση του στόχου της εργασίας, που αφορά την ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια και τον έλεγχο επίδρασής τους στον βαθμό απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας για την ανάκτηση. Μέσα από αυτή την αξιολόγηση προκύπτουν και συμπεράσματα για την αξιοποίηση και αποδοτικότητα της ανάκτησης, ενώ προτείνονται βήματα για μελλοντική συνέχεια αυτής της μελέτης.

## **Μέρος Α΄**

# 1. Θερμικές Επιστήμες

## 1.1 Θερμοδυναμική

Η επιστήμη της θερμοδυναμικής μελετά τις θερμικές διεργασίες, συχνά στα πλαίσια ενός συστήματος του οποίου την κατάσταση περιγράφει η μετάβαση μεταξύ του έργου και της θερμότητας.<sup>(1)</sup>

Το έργο είναι η μηχανική ενέργεια του συστήματος, το σύνολο ασκούμενων δυνάμεων με αποτέλεσμα την αλλαγή της κινητικής κατάστασης του. Το έργο μπορεί να προστίθεται στο σύστημα και τότε είναι θετικό. Αν απορρίπτεται από το σύστημα, τότε το έργο είναι αρνητικό. Μονάδες που χρησιμοποιεί στο διεθνές σύστημα είναι το Joule ( $J=N*m$ ).

Η θερμότητα, κατά την θερμοδυναμική, είναι ενέργεια που μπορεί να απάγεται από το σύστημα ή και να εισάγεται σε αυτό. Συνήθως οφείλεται στην επαφή δύο σωμάτων που εμφανίζουν θερμοκρασιακή διαφορά και κατά κανόνα μεταφέρεται από το θερμό προς το ψυχρότερο σώμα.<sup>(2)</sup> Στο διεθνές σύστημα μετράται σε kJ, άλλες μονάδες που χρησιμοποιεί είναι η θερμίδα ( $1 \text{ kcal} = 4.1840 \text{ kJ}$ ) και η Βρετανική Μονάδα Θερμότητας ( $1 \text{ BTU} = 1.05 \text{ kJ}$ ).

Η θερμότητα εμφανίζεται σε δύο μορφές, η αισθητή θερμότητα (sensible heat) γίνεται αντιληπτή με την αυξομείωση της θερμοκρασίας, όμως η λανθάνουσα θερμότητα (latent heat) είναι υπεύθυνη για την αλλαγή φάσης μιας ουσίας χωρίς να επηρεάζει την θερμοκρασία της.

Η λανθάνουσα θερμότητα ορίζεται ως το ποσό της απαιτούμενης θερμότητας για να αλλάξει η κατάσταση μιας ουσίας ή ενός σώματος, σε συνθήκες σταθερής πίεσης και θερμοκρασίας αλλαγής φάσης.

Η αλλαγή της μορφής της ενέργειας στο μεταβαλλόμενο σύστημα περιγράφεται από τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο. Είναι συνέπεια της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας, η εσωτερική ενέργεια του συστήματος παραμένει σταθερή και αποτελεί άθροισμα του έργου και της θερμότητας που το διέπουν. Η ισχύς του βασίζεται στο γεγονός πως ο Νόμος επαληθεύεται πάντοτε πειραματικά.

Σε συνέχεια αυτού, ο Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος εισάγει τους απαραίτητους περιορισμούς και την έννοια των απωλειών ενέργειας. Είναι μια έκφραση της εντροπίας του συστήματος και αποτελεί «αρνητικό νόμο»<sup>(1)</sup>.

## 1.2 Μετάδοση Θερμότητας

Η Μετάδοση Θερμότητας εξετάζει τους μηχανισμούς μεταφοράς της θερμικής ενέργειας, χωρίς την αναγκαστική προϋπόθεση ισορροπίας κατά την έκβαση του φαινομένου, κάτι που την διαφοροποιεί από την θερμοδυναμική επιστήμη.<sup>(3)</sup>

Πίνακας Α.1. 1 Θερμοφυσικές Ιδιότητες Μ.Θ.

Μέγεθος	Συμβολισμός	Μονάδες	Περιγραφή
Θερμοκρασία	T	K	Ιδιότητα που εκφράζει τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων ενός σώματος
Πυκνότητα	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Εντατικό μέγεθος, προσδιορίζει την ποσότητα της μάζας στη μονάδα του όγκου
Συντελεστής θερμικής αγωγής	$\lambda$	W/mK	Το ποσό και η ταχύτητα ροής θερμότητας δια μέσω υλικού, μέγεθος αντίστροφο της θερμικής αντίστασης
Θερμική διάχυση	$\alpha$	m <sup>2</sup> /s	Πηλίκο της αγωγίμης ικανότητας του υλικού προς την ογκομετρική θερμοχωρητικότητά του (ικανότητα αποθήκευσης)
Θερμοχωρητικότητα	$c_p$	J/kgK	Το ποσό θερμότητας απαιτούμενο για αύξηση θερμοκρασίας ύλης 1 kg κατά 1 K, εξαρτάται από το υλικό, την θερμοκρασία και την πίεση

Οι τρεις τρόποι μετάδοσης μπορεί να ενεργούν σε ένα μέσο ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό, ποτέ όμως όλοι ταυτόχρονα. Ακολουθούν οι μηχανισμοί και οι Νόμοι που τους διέπουν με τις απλοποιητικές παραδοχές της μονοδιάστατης μεταφοράς και σταθερών θερμοκρασιών των επιφανειών.<sup>(3) (4)</sup>

- Αγωγή (Thermal Conduction)

Η θερμότητα μεταφέρεται λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς, από ένα θερμό σώμα ή σύστημα σε ένα ψυχρότερο με προαπαιτούμενη την φυσική τους επαφή. Περιγράφεται από τον Νόμο του Fourier.

$$\dot{Q}_{cond} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

Όπου

$\dot{Q}_{cond}$  ροή συναλλασσόμενης θερμότητας από αγωγή σε (W)

$\lambda$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού σε  $\left(\frac{W}{mK}\right)$

$A$  η επιφάνεια κάθετη στη ροή σε (m<sup>2</sup>)

$\frac{dT}{dx}$  η μεταβολή της θερμοκρασίας στη χωρική συντεταγμένη σε (K)

- Συναγωγή (Thermal Convection)

Η συναλλαγή της θερμότητας γίνεται μεταξύ ενός στερεού μέσου και ενός ρευστού μέσου εν κινήσει, οφείλεται στη σύνθεση της ροής από αγωγή και της ταυτόχρονης κίνησης. Στην περίπτωση αυτή, η ροή της θερμότητας συναγωγής υπολογίζεται με τον Νόμο του Newton.

$$\dot{Q}_{conv} = h A \Delta T \quad (1.2)$$

Όπου

$\dot{Q}_{conv}$  ρυθμός μεταφοράς της θερμικής συναγωγής σε (W)

**h** ο τοπικός (μεταβαλλόμενος) συντελεστής θερμικής συναγωγής σε  $\left(\frac{W}{mK}\right)$

**A** επιφάνεια κάθετη στη ροή θερμότητας ( $m^2$ )

$\Delta T = T_s - T_f$  η διαφορά θερμοκρασίας στερεού μέσου και ρευστού σε (K)

Πριν γίνει χρήση του Νόμου Newton θα πρέπει να βρεθούν τα χαρακτηριστικά του μέσου και της ροής, ώστε να γίνει ορθός υπολογισμός του τοπικού ή μέσου συντελεστή συναγωγής με την κατάλληλη εμπειρική σχέση.

Όταν μεσολαβεί εξωτερική ενέργεια μέσω βοηθητικής συσκευής ή παράγοντα, η συναγωγή χαρακτηρίζεται εξαναγκασμένη και εξαρτάται άμεσα από τις ιδιότητες του ρευστού μέσου. Ο συντελεστής θερμικής συναγωγής σε αυτή την περίπτωση είναι υψηλός και για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται ο αριθμός Nusselt. Ο αριθμός Nusselt για εξαναγκασμένη συναγωγή μπορεί να βρεθεί συναρτήσει των αριθμών Reynolds και Prandtl.

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (1.3)$$

Όπου

**Re** αδιάστατος αριθμός Reynolds

**u** χαρακτηριστική ταχύτητα ροής του ρευστού σε  $\left(\frac{m}{s}\right)$

**L** χαρακτηριστική διάσταση σε (m), (d για σφαίρα ή κύλινδρο, l για κάθετες επιφάνειες)

**$\nu$**  κινηματικό ιξώδες σε  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (1.4)$$

Όπου

**Pr** αδιάστατος αριθμός Prandtl, μπορεί επίσης να βρεθεί από πίνακες

**μ** δυναμικό ιξώδες σε  $\left(\frac{Ns}{m^2}\right)$

**c<sub>p</sub>** συντελεστής θερμοχωρητικότητας σε  $\left(\frac{J}{kgK}\right)$

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} = KRe^m Pr^n \left(\frac{l}{d}\right)^o L \quad (1.5)$$

Όπου

**Nu** αδιάστατος αριθμός Nusselt

**K, m, n, o** συντελεστές

Πίνακας Α.1. 2

Ροή	Επίπεδη πλάκα	Αγωγός Κυκλικής Διατομής
Στρωτή	$Re < 10^5$	$Re < 2300$
Μεταβατική	$10^5 < Re < 5*10^5$	$2300 < Re < 4000$
Τυρβώδης	$5*10^5 < Re$	$4000 < Re < Re$

Στην περίπτωση αγωγού ορθογωνικής διατομής  $A=a*b$ , ορίζεται για τους υπολογισμούς η υδραυλική διάμετρος

$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (1.6)$$

Η συναγωγή χαρακτηρίζεται ελεύθερη όταν οφείλεται σε φυσικά φαινόμενα ή κάποια φυσική ιδιότητα του μέσου, όπως η διαφορά πυκνότητας των μέσων σε επαφή. Εκδηλώνεται με βασικό μηχανισμό την άνωση. Για ελεύθερη συναγωγή ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται συναρτήσει των αριθμών Grashof και Prandtl.

$$Gr = \frac{gL^3\beta\Delta T}{\nu^2} \quad (1.7)$$

Όπου

**Gr** αδιάστατος αριθμός Grashof

**g** η επιτάχυνση της βαρύτητας ίση με  $9,81 \frac{m}{s^2}$

**β** ογκομετρικός συντελεστής θερμικής διαστολής

$\Delta T = T_w - T_\infty$

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} = CGr^m Pr^n \quad (1.8)$$

**C, m, n** συντελεστές

- **Ακτινοβολία (Thermal Radiation)**

Η θερμική ακτινοβολία μεταδίδεται από κάθε μέσο στερεό, υγρό ή αέριο με θερμοκρασία υψηλότερη του απόλυτου μηδέν (0 K). Διαδίδεται ως κύμα από την επιφάνεια ενός μέσου σε ένα άλλο, χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη ύλης ή επαφής μεταξύ τους, δηλαδή στο κενό ή τον χώρο.

Η ακτινοβολία εξαρτάται άμεσα από το μήκος κύματος, η μετάδοση με ακτινοβολία εξαρτάται από τον προσανατολισμό των επιφανειών μετάδοσης, τις θερμοκρασίες και τις ιδιότητες σχετικές με την ακτινοβολία.

Όταν ένα σώμα απορροφά όλη τη διαθέσιμη ακτινοβολία για κάθε μήκος κύματος και ταυτόχρονα μπορεί να εκπέμπει τη μέγιστη ακτινοβολία σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο σώμα υπό τις ίδιες θερμοκρασιακές συνθήκες, τότε το σώμα καλείται μέλαν ή μαύρο και είναι ιδανικό σώμα.

Ένα πραγματικό σώμα εκπέμπει σε συνεχές φάσμα μειωμένη ακτινοβολία, σε σχέση με ένα ιδανικό στο ίδιο μήκος κύματος, αυτό ονομάζεται φαιό ή γκρι.

Για μέλαν σώμα στο κενό ισχύει ο Νόμος των Stefan-Boltzmann, ενώ το φαιό σώμα διαφέρει από αυτό κατά έναν συντελεστή εκπομπής ( $\epsilon$ ).

$$\dot{Q}_b = \dot{E}_b = \sigma AT_w^4 \quad (1.9)$$

Όπου

$\dot{Q}_b = \dot{E}_b$  η θερμοροή λόγω ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε (W)

**σ** η σταθερά Stefan-Boltzmann ίση με  $5,67 \cdot 10^{-8} \left( \frac{W}{m^2 K^4} \right)$

**A** η επιφάνεια εκπομπής σε ( $m^2$ )

**T<sub>w</sub>** η θερμοκρασία εκπομπής σώματος σε (K)

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}}{\dot{E}_b} \quad (1.10)$$

Όπου

$\varepsilon$  ο αδιάστατος συντελεστής εκπομπής, ισχύει  $0 < \varepsilon < 1$

$\dot{E}$  η πραγματική ακτινοβολία φαιού σώματος σε (W)

$\dot{E}_b$  η ακτινοβολία μέλανος σώματος σε (W)

$$\dot{E} = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (1.11)$$

Πίνακας Α.1. 3 Συνδυασμοί Μηχανισμών Μ.Θ. (3)

Μέσο	Διαθέσιμος Μηχανισμός Μετάδοσης
Αδιαφανές στερεό	Αγωγή
Ημιδιαφανές στερεό	Αγωγή και Ακτινοβολία
Ρευστό εν ηρεμία	Αγωγή και πιθανόν ακτινοβολία
Ρευστό εν κινήσει	Συναγωγή και πιθανόν ακτινοβολία
Κενό	Ακτινοβολία μόνο

Σημειώνεται πως, για κάθε σύστημα συντεταγμένων, οι εξισώσεις αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας αλλάζουν.

Πίνακας Α.1. 4

Σύστημα Συντεταγμένων	Διαστάσεις
Καρτεσιανό	x, y, z
Κυλινδρικό	r, φ, z
Σφαιρικό	r, φ, θ

Τέλος, ως συνέπεια των ανωτέρω, ο Ά Θερμοδυναμικός Νόμος θα ανεξαρτητοποιηθεί από την ύπαρξη ή μη ισορροπίας στο σύστημα, ενώ θα παραλειφθούν όροι που σχετίζονται με την ενέργεια που παράγεται ή αποθηκεύεται σε αυτό. <sup>(3)</sup>

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0 \quad (1.12)$$

Όπου

$\dot{E}_{in}$  ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα

$\dot{E}_{out}$  ενέργεια που εξέρχεται του συστήματος



## 2. Εναλλάκτες Θερμότητας

### 2.1 Κατηγοριοποίηση Εναλλακτών Θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συσκευές που διευκολύνουν την μετάδοση της θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών ρευστών που εμφανίζουν θερμοκρασιακή διαφορά. Ο ρυθμός της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών σε ένα μέρος του εναλλάκτη εξαρτάται από την τάξη μεγέθους της θερμοκρασιακής διαφοράς στο σημείο και διαφέρει κατά μήκος του εναλλάκτη. Διαχωρίζονται από τα δοχεία ανάμιξης, καθώς στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μεταφοράς θερμότητας σε εναλλάκτη δεν επιτρέπεται η επαφή των ουσιών. <sup>(5)</sup>

Υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής των εναλλακτών για χρήση σε εφαρμογές με ιδιαίτερες απαιτήσεις, επομένως οι διάφοροι τύποι εναλλάκτη μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση κοινά χαρακτηριστικά που αφορούν τον μηχανισμό μετάδοσης, την γεωμετρία της κατασκευής και το είδος ροής των ρευστών. Ακολουθεί ο διαχωρισμός τους με βάση αυτά τα κριτήρια. <sup>(3) (4) (6)</sup>

#### **Μηχανισμός συναλλαγής θερμότητας**

- Άμεση μετάδοση/Ανάμιξη:

Τα ρευστά έρχονται σε άμεση επαφή και η θερμότητα από το θερμό σώμα μεταφέρεται στο ψυχρό, στην συνέχεια διαχωρίζονται και πάλι. Κατά τη μετάδοση τα ποσά ακτινοβολίας είναι ελάχιστα και μπορούν να παραληφθούν. Βρίσκει κυρίως εφαρμογές στους πύργους ψύξης, την ψύξη ελασμάτων και σε πρέσες.

- Ημι-άμεση μετάδοση/Αναγέννηση:

Τα δύο ρεύματα ρέουν εναλλάξ μέσα από τον πυρήνα που αποτελεί μια δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας, εκεί το θερμό ρευστό αποδίδει ενέργεια. Στη συνέχεια το ψυχρό ρευστό θα πάρει τη θέση του και θα λάβει την θερμότητα, ψύχοντας ταυτόχρονα τον πυρήνα.

- Έμμεση μετάδοση/Ανάκτηση θερμότητας:

Τα ρεύματα των ρευστών ανταλλάσσουν θερμότητα δια μέσω ενός αγωγίμου τοιχώματος, με συναγωγή από το θερμό ρεύμα στο τοίχωμα, αγωγή δια μέσω του τοιχώματος και από αυτό στο ψυχρό ρευστό με συναγωγή.

#### **Γεωμετρία κατασκευής**

- Σωληνωτοί/Ομόκεντρων σωλήνων:

Ανάμεσα στους δύο ομόκεντρους σωλήνες δημιουργείται δακτύλιος στον οποίο ρέει ένα από τα ρευστά, ενώ το δεύτερο ρευστό ρέει εντός της διατομής του εσωτερικού σωλήνα.

Η θερμοκρασία του ρευστού σε κάθε διατομή εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

- Σωληνωτοί κελύφους/Δέσμης αυλών

Αποτελούν μια δέσμη σωλήνων στους οποίους ρέει το ένα ρεύμα ρευστού, αυτή είναι τοποθετημένη μέσα στο περίβλημα του κελύφους εντός του οποίου ρέει το δεύτερο ρεύμα. Η εισαγωγή και η εξαγωγή του ρευστού γίνονται σε στόμια του περιβλήματος, η ροή κατευθύνεται εντός του κελύφους με κατάλληλα οδηγητικά ελάσματα και ανάλογα την κατασκευή. Οι σωληνωτοί εναλλάκτες κελύφους διαμορφώνονται με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής και τυποποιούνται κατά τα στοιχεία τους.

- Πλακοειδείς

Αποτελούνται από σειρά λεπτών ελασμάτων, αυτά τοποθετούνται παράλληλα και φέρουν αυλακώσεις στην επιφάνειά τους για να κατευθύνουν την ροή του ρευστού. Ρεύματα του θερμού και του ψυχρού ρευστού οδηγούνται εναλλάξ μεταξύ των ελασμάτων ώστε να επιτευχθεί η θερμορροή. Πλάκες μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν όταν συγκρατούνται με μεθόδους στεγανοποίησης για εφαρμογές χαμηλών πιέσεων, σε υψηλότερες συνθήκες πίεσης χρησιμοποιούνται συγκολλητοί εναλλάκτες.

- Πτερυγιοφόροι/Συμπαγείς

Μπορούν να αποτελούνται από δέσμη σωλήνων ή δέμα πλακών που και στις δύο περιπτώσεις φέρουν πτερύγια τα οποία αυξάνουν το ρυθμό της θερμορροής. Η ύπαρξη πτερυγίων αυξάνει την ρυπαρότητα λόγω δυσκολίας καθαρισμού και επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πτερυγιοφόροι εναλλάκτες για ορισμένες εφαρμογές.

- Σπειροειδείς

Αποτελούνται από δύο σωλήνες μορφής σπείρας, αυτοί βρίσκονται σε επαφή και στο εσωτερικό του ενός ρέει το ψυχρό ρεύμα, ενώ με αντίθετη φορά στο εσωτερικό του άλλου ρέει το θερμό ρεύμα. Η εισαγωγή και η εξαγωγή του ρευστού γίνονται από στόμια στα άκρα των σπειρών. Η σπειροειδής κατασκευή αυξάνει την επιφάνεια θερμορροής διατηρώντας μικρό όγκο.

## Είδος ροής

- Ομορροή

Στην περίπτωση της ομορροής τα δύο ρεύματα ρευστών ρέουν παράλληλα μεταξύ τους, χωρίς να έρχονται σε επαφή και με κοινή φορά.

- Αντιρροή

Στην περίπτωση αντιρροής τα ρευστά ρέουν παράλληλα και ανέπαφα όπως στην ομορροή αλλά με αντίθετη φορά το θερμό από το ψυχρό. Υπό ίδιες συνθήκες, η αντιρροή

θεωρείται αποτελεσματικότερη συγκριτικά με την ομορροή, καθώς το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται είναι μεγαλύτερο.

- Διασταυρούμενη ροή

Όταν τα δύο ρεύματα ρέουν κάθετα το ένα προς το άλλο η ροή καλείται διασταυρούμενη, και η θερμορροή μπορεί να επιτυγχάνεται με ανάμιξη των ρευστών ή άνευ ανάμιξης με χρήση πτερυγίων για την κατεύθυνση των ρευστών.

Ο τύπος και τα φυσικά χαρακτηριστικά των ρευστών που χρησιμοποιούνται στον εναλλάκτη είναι καθοριστικά για την επιλογή και λειτουργία του. Τα ρευστά μπορεί να είναι αέριας ή υγρής μορφής, επομένως διακρίνονται εναλλάκτες αερίου-αερίου, υγρού-υγρού ή αερίου-υγρού. Σπάνια μπορεί να χρησιμοποιηθούν περισσότερα από δύο ρευστά.

Προσαρμοσμένες συσκευές που καλύπτουν ειδικές απαιτήσεις μπορούν να κατασκευαστούν, σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να επιλεγθούν από τυποποιημένους ειδικούς εναλλάκτες και συνήθως αποτελούν παραλλαγές των κοινών μορφών εναλλακτών. Μερικά παραδείγματα αποτελούν οι εναλλάκτες οφιοειδούς (ελικοειδούς) σωλήνα, ασφαλείας, λεπτού στρώματος, γραφίτη και ειδικής διεργασίας αντιρροής.<sup>(4)</sup>

Ο εναλλάκτης οφιοειδούς σωλήνα τοποθετείται μέσα σε ένα δοχείο το οποίο φέρει το ένα από τα δύο ρευστά, η είσοδος και έξοδος των ρευστών γίνεται μέσω στομιών του δοχείου. Αντιμετωπίζεται δυσκολία στον εσωτερικό καθαρισμό τους και απώλειες θερμορροής λόγω χαμηλής ταχύτητας των ρευστών στο δοχείο. Είναι κοινώς γνωστοί ως σερπαντίνες.

Οι εναλλάκτες ασφαλείας προστατεύουν τα ρευστά από ανάμιξη. Φέρουν πτερύγια εντός εξωτερικών σωλήνων ή εκτός των εσωτερικών, εναλλακτικά γίνεται χρήση ενός τρίτου ρευστού με αυξημένο συντελεστή αγωγής και κοινά χαρακτηριστικά με τα άλλα δύο ρευστά του εναλλάκτη που θέλουμε να αποκλείσουμε από επαφή.

Οι εναλλάκτες λεπτού στρώματος είναι συχνότερα εξατμιστήρες και τα ρευστά που χρησιμοποιούνται έχουν υψηλό ιξώδες. Εμφανίζουν αρκετά αυξημένους συντελεστές αγωγής. Σε ειδικές περιπτώσεις με απαιτήσεις αντοχής σε διάβρωση, χρησιμοποιούνται εναλλάκτες γραφίτη εμποτισμένοι με συνθετικές ρητίνες. Παρουσιάζουν άριστη θερμική αγωγιμότητα, θερμοχημική αντοχή και αντιδιαβρωτική ικανότητα.

Στην περισσότερο θεωρητική ειδική διεργασία αντιρροής, παρατηρείται σταθερή θερμοκρασιακή διαφορά των ρευμάτων, η διαφορά θερμοκρασιών είναι ίδια σε κάθε πλευρά του εναλλάκτη, καθώς και σε όλο το μήκος του και είναι ίση με τη μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά.<sup>(3)</sup>

Οι εναλλάκτες μπορούν επίσης να διαχωριστούν ανάλογα με την χρήση τους σε συμπυκνωτές, ατμοποιητές και εξατμιστήρες.<sup>(4)</sup>

Στους συμπυκνωτές πραγματοποιείται αλλαγή φάσης του ρευστού υπό συνθήκες σταθερής πίεσης, η διεργασία αυτή είναι συνήθως συμπύκνωση ατμού με χρήση υγρού μέσου και σπανιότερα αερίου όταν η απαίτηση ισχύος είναι μικρότερη. Οι εναλλάκτες ανάδευσης αποτελούν

ειδική εφαρμογή συμπτκνωτή, όπου η υγροποίηση του ατμού γίνεται σε σπείρα ή εντός ενός διπλού τοιχώματος.

Οι εναλλάκτες ατμοποίησης εκτελούν διεργασία αντίστροφη της συμπύκνωσης, αποτέλεσμα είναι η εξαγωγή συμπτκνώματος. Η ψύξη ενός υγρού σε εξατμιστήρα μπορεί να γίνει με θερμό αέριο μέσο, όπως θα δούμε με τους εναλλάκτες ανάκτησης θερμότητας από καυσαέρια. Εναλλακτικά η ψύξη του υγρού μπορεί να γίνει με χρήση υγρών μέσων, όπως τα ψυκτικά υγρά. Οι λέβητες είναι μια ξεχωριστή κατηγορία εναλλάκτη, στη μετάδοση συνυπολογίζεται το ποσό θερμότητας λόγω ακτινοβολίας της φλόγας. Οι λέβητες θα αναλυθούν λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο.

Η επιλογή του κατάλληλου εναλλάκτη θερμότητας από την πληθώρα τυποποιημένων συσκευών δεν βασίζεται μόνο στα κριτήρια διάκρισής τους και την χρήση. Είναι μια περίπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει τις απαιτήσεις σε ροή θερμότητας και απόδοση, οικονομικές μεταβλητές κόστους για την αγορά και εξόδων λειτουργίας και συντήρηση.

Το μέγεθος, το βάρος και το υλικό του εναλλάκτη επιλέγονται με βάση την διαθέσιμη εγκατάσταση και τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν στον περιβάλλον λειτουργίας. Λαμβάνεται υπόψιν η ασφάλεια των εργαζομένων στο χώρο, καθώς τα χρησιμοποιούμενα ρευστά μπορεί να έχουν βλαβερές ιδιότητες και εξετάζεται το επίπεδο θορύβου στο χώρο της εργασίας.

Οι αυξημένες θερμικές ανάγκες συνεπάγονται αύξηση της πτώσης πίεσης στους εναλλάκτες και της απαίτησης ισχύος στον κυκλοφορητή που διακινεί τα ρευστά στον εναλλάκτη. Για την καλύτερη λειτουργία συνίσταται η ροή του ρευστού με μεγαλύτερο ιξώδες στην μεγαλύτερη διατομή, έτσι επιτυγχάνεται μικρότερη τιμή πτώσης πίεσης. Γενικά, γίνεται υπερδιαστασιολόγηση κατά την επιλογή των εναλλακτών για την εξασφάλιση επιθυμητής λειτουργίας.

## 2.2 Συντελεστές Εναλλακτών Θερμότητας

### 2.2.1 Συνολικός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας

Ο Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $U$  αποτελεί συνολικό δείγμα της συνεισφοράς συναγωγής των ρευστών και αγωγής μέσω της διαχωριστικής ύλης στους εναλλάκτες θερμότητας. Τυχόν φαινόμενα μεταφοράς λόγω ακτινοβολίας μπορούν να συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς.

Η τιμή του συντελεστή κυμαίνεται σε μια ευρεία περιοχή και εξαρτάται από τους συντελεστές αγωγής και συναγωγής, τις θερμοφυσικές ιδιότητες των μέσων, τις ρευστοδυναμικές ιδιότητες των ρευστών και την γεωμετρία. Η εξάρτηση του συντελεστή από όλες αυτές τις παραμέτρους προκαλεί δυσκολία στον ακριβή υπολογισμό.

Ο Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αντικαθιστά τον συντελεστή μεταφοράς λόγω συναγωγής στο Νόμο του Newton, καθώς αντιπροσωπεύει τη συνολική θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των ρευστών. <sup>(7)</sup>

$$\dot{Q} = UA \Delta T \quad (2.1)$$

Όπου

$\dot{Q}$  η ποσότητα θερμορροής μεταξύ των ρευστών σε (W)

U ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε  $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

A η συνολική επιφάνεια σε (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  η συνολική μέση θερμοκρασιακή μεταβολή των ρευστών σε (K)

Για την απλή περίπτωση επίπεδου τοιχώματος, ο συντελεστής υπολογίζεται:

$$U^{-1} = \frac{1}{h_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (2.2)$$

Όπου

**h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub>** οι συντελεστές συναγωγής

**λ** ο συντελεστής θερμικής αγωγής του υλικού

**b** το πάχος του τοιχώματος

Αν υπάρχουν n στρώματα σε πολλαπλό τοίχωμα, λαμβάνονται υπόψιν ως το άθροισμα των επιμέρους λόγων πάχους προς συντελεστή αγωγής υλικού:

$$U^{-1} = \frac{1}{h_1} + \sum \frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2} \quad (2.3)$$

Για την κοινή περίπτωση ομόκεντρου σωληνωτού εναλλάκτη, κυλινδρικού τοιχώματος, με το ψυχρό ρευστό (i) να ρέει εντός του κυλίνδρου και το θερμό ρευστό (o) να ρέει εντός των τοιχωμάτων, η θερμότητα μεταφέρεται από το ρευστό (o) στο ρευστό (i).

Κατά την διαδικασία θερμορροής συναντώνται τρεις θερμικές αντιστάσεις, η αντίσταση μεταξύ του ρευστού (o) και της εξωτερικής επιφάνειας του μικρότερου κυλίνδρου, η αντίσταση μεταξύ εσωτερικής επιφάνειας του μικρότερου κυλίνδρου και του ρευστού (i) που ρέει σε αυτόν και η αντίσταση του τοιχώματος του κυλίνδρου.

Από άθροισμα αυτών των αντιστάσεων και ανάλογα με την επιφάνεια, υπολογίζεται ο Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για εξωτερική επιφάνεια συναλλαγής (Σχ. 2.4) ή για εσωτερική επιφάνεια συναλλαγής (Σχ.2.5). Ισχύει  $U = U_o = U_i$ .<sup>(6)</sup>

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o \ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi\lambda L} + \frac{1}{h_o}} \quad (2.4)$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi\lambda L} + \frac{A_i}{A_o h_o}} \quad (2.5)$$

Όπου

$h_o$  ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ του ρευστού (ο) και της εξωτερικής επιφάνειας του μικρότερου κυλίνδρου σε  $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

$h_i$  ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ εσωτερικής επιφάνειας του μικρότερου κυλίνδρου και του ρευστού (i) σε  $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

$\lambda$  ο συντελεστής θερμικής αγωγής του ρευστού (i) σε  $\left(\frac{W}{mK}\right)$

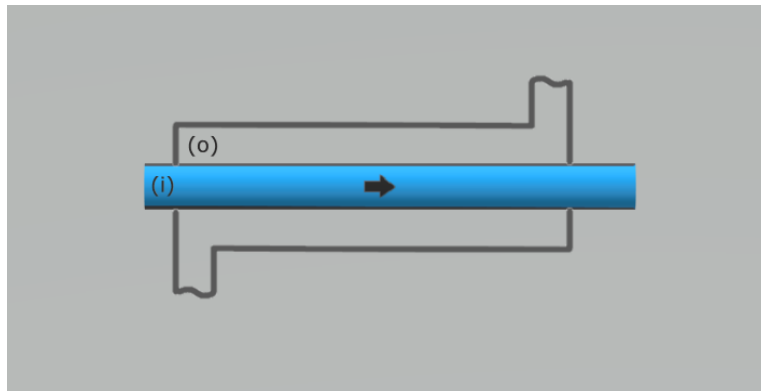
$A_o$  η επιφάνεια επαφής του ρευστού (ο) με την εξωτερική επιφάνεια του μικρότερου κυλίνδρου σε  $(m^2)$

$A_i$  η επιφάνεια επαφής του ρευστού (i) με την εσωτερική επιφάνεια του μικρότερου κυλίνδρου σε  $(m^2)$

$r_o$  η εξωτερική ακτίνα του μικρότερου κυλίνδρου σε (m)

$r_i$  η εσωτερική ακτίνα του μικρότερου κυλίνδρου σε (m)

$L$  το μήκος του εσωτερικού κυλίνδρου σε (m)



Εικόνα Α.2. 1 Εναλλάκτης διπλού σωλήνα με θερμό ρευστό (ο) μεταξύ αγωγών και ψυχρό ρευστό εντός της μικρής διατομής

Για την απλοποιητική παραδοχή αγωγού λεπτού τοιχώματος που παρουσιάζει μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και οι επιφάνειες επαφής με τα ρευστά είναι ίσες  $A_o=A_i$ , τότε η σχέση υπολογισμού του συντελεστή θα είναι:

$$U^{-1} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i} \quad (2.6)$$

Εκτός της μεθόδου του υπολογισμού που διαφέρει για κάθε περίπτωση, για κάποιες κοινές περιπτώσεις έχουν υπολογιστεί προσεγγιστικά τιμές του Συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και μπορούν να βρεθούν από σχετικούς πίνακες.

### 2.2.2 Συνολικός Συντελεστής Επιφανειακής Απόδοσης

Η χρήση πτερυγίων στους εναλλάκτες είναι μια μέθοδος αύξησης της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές με μέσα που δεν αποδίδουν τα επιθυμητά ποσά ενέργειας, για παράδειγμα η ύπαρξη πτερυγώσεων μειώνει την αντίσταση του αέρα που χρησιμοποιείται ως μέσο αλλά φέρει κακές ψυκτικές ιδιότητες. <sup>(3)</sup>

Η απόδοση του πτερυγίου μπορεί να υπολογιστεί ως ο λόγος της πραγματικής θερμορροής σε εναλλάκτη με πτερύγια, προς τη θερμορροή αν τα πτερύγια είχαν θερμοκρασία ίση με αυτή της βάσης του. Η τιμή της μπορεί επίσης να βρεθεί από διαγράμματα, συναρτήσει της μορφής των πτερυγίων.

Οι πτερυγώσεις δεν αποτελούν ιδανική λύση λόγω της αυξημένης τους τάσης σε διάβρωση και ρύπανση, κυρίως όπου δημιουργούνται στενά κανάλια ροής σε εναλλάκτες συμπαγούς μορφής. Ταυτόχρονα φέρουν δυσκολία καθαρισμού, ενώ δεν διατίθεται δυνατότητα καθαρισμού με μηχανικές μεθόδους.

Σε εναλλάκτη με πτερύγια και στις δύο βρεχόμενες επιφάνειες, ο συνολικός συντελεστής επιφανειακής απόδοσης  $\varepsilon$  υπολογίζεται:

$$\varepsilon = \eta_f \frac{A_f}{A} + \frac{A_u}{A} \quad (2.7)$$

Όπου

$A_f$  η επιφάνεια που φέρει πτερύγια

$A_u$  η επιφάνεια χωρίς πτερύγια

$A$  η συνολική επιφάνεια, άθροισμα των επιφανειών με και χωρίς πτερύγια

$\eta_f$  η απόδοση των πτερυγίων

Αν ο συντελεστής συναγωγής στην επιφάνεια με πτερύγια είναι ίσος με τον συντελεστή συναγωγής στην επιφάνεια χωρίς πτερύγια, η σχέση υπολογισμού του  $\varepsilon$  (Σχ. 2.7) μετασχηματίζεται:

$$\varepsilon = 1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta_f) \quad (2.8)$$

### 2.2.3 Συντελεστής Ρυπαρότητας

Η απόδοση ενός εναλλάκτη θερμότητας επιδεινώνεται με το πέρασ του χρόνου ως αποτέλεσμα της συσσώρευσης επικαθίσεων στις επιφάνειες συναλλαγής. Το στρώμα των επικαθίσεων αντιπροσωπεύει μια επιπλέον αντίσταση προκαλώντας την πτώση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας.<sup>(5)</sup>

Μέτρο της θερμικής αντίστασης εξαιτίας των εναποθέσεων είναι ο συντελεστής ρυπαρότητας  $R_f$ . Αποτελεί συνάρτηση των ιδιοτήτων των ρευστών μέσων, του χρόνου λειτουργίας και της συχνότητας συντήρησης του εναλλάκτη.<sup>(3)</sup>

$$R_f = \left(\frac{R_f}{A}\right)_i + \left(\frac{R_f}{A}\right)_o \quad (2.9)$$

Για

**i** εσωτερική επιφάνεια συναλλαγής

**o** εξωτερική επιφάνεια συναλλαγής

Σε νέους εναλλάκτες ισχύει  $R_f = 0$  και θα αυξηθεί με την εν καιρώ συγκέντρωση επικαθίσεων στις επιφάνειες του εναλλάκτη, καθώς επηρεάζεται αρνητικά από εκτεταμένες περιόδους λειτουργίας χωρίς συντήρηση.

Ο συντελεστής ρυπαρότητας αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας και μειώνεται η ταχύτητα των ρευστών. Τιμές του συντελεστή ρυπαρότητας μπορούν να βρεθούν από πίνακες, τυπική περιοχή τιμών του είναι μεταξύ  $10^{-4}$  και  $5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{W}{m^2K}\right)$ .

Ο συντελεστής ρυπαρότητας μπορεί να προστεθεί στον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας καθαρού εναλλάκτη, επομένως για εναλλάκτη με την επίδραση ρύπανσης στις επιφάνειες συναλλαγής ισχύει<sup>(7)</sup>:

$$U_{dirt}^{-1} = R_f + U_{clean}^{-1} \quad (2.10)$$

Για εναλλάκτη χωρίς πτερύγια μπορεί να εκφραστεί ως:

$$U_{dirt}^{-1} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi\lambda L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.11)$$

Όπου

$R_{f,i}$ ,  $R_{f,o}$  συντελεστής ρυπαρότητας στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια αντίστοιχα σε  $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

$D_i$ ,  $D_o$  εσωτερική και εξωτερική διάμετρος αγωγού σε (m)



## 2.2.4 Ενεργός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας

Στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μπορεί να ληφθεί υπόψιν η θερμική αντίσταση που προκαλούν οι επικαθίσεις και η αντίσταση που υπάρχει αν ο εναλλάκτης φέρει πτερύγια στην βρεχόμενη επιφάνειά του. Σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής καλείται Ενεργός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας  $h_{ef}$ .<sup>(3)</sup>

Ο ενεργός συντελεστής μεταφοράς μπορεί να συμπεριληφθεί στη συνολική θερμική αντίσταση, για παράδειγμα σε εναλλάκτη ομόκεντρων σωλήνων με πτερύγια και εναποθέσεις:

$$R_t = \left( \frac{1}{\varepsilon h_{ef} A} \right)_h + R_w + \left( \frac{1}{\varepsilon h_{ef} A} \right)_c \quad (2.12)$$

Όπου

$R_t$  η συνολική αντίσταση με όρους για το θερμό (h) και το ψυχρό (c) ρεύμα

$\varepsilon$  ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

$h_{ef}$  ο ενεργός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

$A$  η επιφάνεια σε (m<sup>2</sup>)

$R_w$  η αντίσταση λόγω ύπαρξης τοιχώματος μεταξύ των ρευμάτων ρευστών

## 2.3 Μέθοδοι Επίλυσης Εναλλακτών Θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας συνήθως λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα συνεχόμενα, χωρίς αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας τους. Μπορούν να υπολογιστούν ως συσκευές μόνιμης ροής (steady flow) υπό την παραδοχή σταθερής παροχής μάζας ρευστών και σταθερή θερμοκρασία και ταχύτητα σε κάθε είσοδο και έξοδο του εναλλάκτη.<sup>(5)</sup>

Τα ρεύματα των ρευστών δεν έχουν έντονες αλλαγές στην ταχύτητα και την άνωσή τους, επομένως οι όροι δυναμικής και κινητικής ταχύτητας μπορούν να απαλειφθούν. Η θερμοχωρητικότητα  $c_p$  ενός ρευστού σε ορισμένο διάστημα τιμών θερμοκρασίας μπορεί να ληφθεί ως σταθερά ή ως μέση τιμή, χωρίς σημαντικές επιπτώσεις στην ακρίβεια των υπολογισμών.

Η εξωτερική επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας θεωρείται απολύτως μονωμένη, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες λόγω της διαχωριστικής ύλης και η μετάδοση της θερμότητας γίνεται μόνο μεταξύ των δύο ρευστών.

Υπό τις παραπάνω υποθέσεις, ο Α΄ Θερμοδυναμικός Νόμος ορίζει ότι η ροή θερμότητας από το θερμό ρευστό είναι ίση με αυτήν από το ψυχρό ρευστό. Σε συμφωνία με τον Β΄ Θερμοδυναμικό

Νόμο, η θερμορροή κατευθύνεται από το θερμό προς το ψυχρό ρεύμα και λαμβάνεται ως θετική ποσότητα.

Με βάση αυτές τις παραδοχές και σε συνδυασμό με τα δεδομένα και ζητούμενα που προκύπτουν κατά την θερμική ανάλυση των εναλλακτών έχουν αναπτυχθεί δύο μέθοδοι επίλυσης:

- Για εναλλάκτη που πρέπει να επιτύχει συγκεκριμένη θερμοκρασιακή αλλαγή σε ρευστό με γνωστή ροή μάζας χρησιμοποιείται η Μέση Λογαριθμική Θερμοκρασιακή Διαφορά.
- Για υπολογισμό θερμοκρασιών εξόδου του θερμού και ψυχρού ρεύματος σε ορισμένο εναλλάκτη χρησιμοποιείται η μέθοδος Αποτελεσματικότητας - Αριθμού Μονάδων Μεταφοράς.

### 2.3.1 Μέση Λογαριθμική Θερμοκρασιακή Διαφορά LMTD

Η Μέση Λογαριθμική Θερμοκρασιακή Διαφορά (LMTD: Log Mean Temperature Difference) αντικαθιστά την μέση θερμοκρασία με την λογαριθμικής φύσης έκφρασή της, καθώς είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική της μεταβολής της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των ρευστών από σημείο σε σημείο στον εναλλάκτη.

Η θερμοκρασία του θερμού ρευστού μειώνεται, ενώ η θερμοκρασία του ψυχρού ρευστού αυξάνεται κατά μήκος του εναλλάκτη, χωρίς ποτέ να ξεπερνά αυτή του θερμού ρεύματος. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ρευστών είναι αρκετά υψηλή στην είσοδο, αλλά παρουσιάζει ραγδαία μείωση πλησιάζοντας την έξοδο.

Η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά βρίσκεται από τον εντοπισμό του πραγματικού θερμοκρασιακού προφίλ των ρευστών κατά μήκος του εναλλάκτη. Είναι ακριβής αναπαράσταση της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ θερμού και ψυχρού ρεύματος, αντιπροσωπευτική της εκθετικής μείωσής της<sup>(4)</sup>.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (2.13)$$

Όπου

$\Delta T_{lm}$  η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά

$\Delta T_1, \Delta T_2$  θερμοκρασιακές διαφορές στην είσοδο και την έξοδο του εναλλάκτη

Από την αρχή διατήρησης στα ρεύματα των ρευστών και υπό τις παραδοχές σταθερής θερμοχωρητικότητας κάθε ρευστού και σταθερού συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού της θερμορροής στους εναλλάκτες.

Ο ρυθμός θερμοχωρητικότητας αντιπροσωπεύει τον απαιτούμενο ρυθμό μεταφοράς για να αλλάξει η θερμοκρασία ενός ρεύματος που ρέει στον εναλλάκτη. Η μόνη στιγμή που η θερμοκρασιακή αύξηση του κρύου ρευστού εξισώνεται με την θερμοκρασιακή πτώση του θερμού ρευστού, είναι όταν οι ρυθμοί θερμοχωρητικότητάς τους είναι ίσοι. <sup>(3)</sup>

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h2} - T_{h1}) \quad (2.14)$$

Όπου

$\dot{Q}_h$  η θερμοροή για το θερμό ρεύμα

$\dot{m}_h c_{p,h}$  ο ρυθμός θερμοχωρητικότητας του θερμού ρευστού

$T_{h1}, T_{h2}$  οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του θερμού ρεύματος

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c1} - T_{c2}) \quad (2.15)$$

Όπου

$\dot{Q}_c$  η θερμοροή για το ψυχρό ρεύμα

$\dot{m}_c c_{p,c}$  ο ρυθμός θερμοχωρητικότητας του ψυχρού ρευστού

$T_{c1}, T_{c2}$  οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ψυχρού ρεύματος

$$\dot{Q} = U A_s \Delta T_{lm} \quad (2.16)$$

Όπου

$\dot{Q}$  η θερμοροή στον εναλλάκτη

$A_s$  η επιφάνεια συναλλαγής μεταξύ των δύο ρευμάτων

Στην περίπτωση της αντιρροής το θερμό και το ψυχρό ρεύμα εισέρχονται από αντίθετα άκρα, η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού δεν μπορεί ποτέ να ξεπεράσει την θερμοκρασία εισόδου του θερμού ρευστού, καθώς αυτό θα παραβίαζε τον Β' Θερμοδυναμικό Νόμο.

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out} \quad (2.17)$$

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in} \quad (2.18)$$

Για ορισμένες θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου, η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά αντιρροής είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή της ομορροής, επομένως σε εναλλάκτη αντιρροής

απαιτείται μικρότερη επιφάνεια και συνεπώς μικρότερος εναλλάκτης για να επιτευχθεί ορισμένο ποσό θερμορροής, με προϋπόθεση ίδια τιμή συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Για ρυθμό θερμοχωρητικότητας ψυχρού ρεύματος ίσο με αυτόν του θερμού, η διαφορά θερμοκρασίας των δύο ρευστών θα είναι σταθερή κατά μήκος του εναλλάκτη  $\Delta T_{lm} = \Delta T_1 = \Delta T_2$ .

Οι συμπυκνωτές και οι λέβητες μπορούν να υπολογιστούν ως εναλλάκτες ομορροής ή αντιρροής, καθώς και οι δύο προσεγγίσεις αναμένεται να δώσουν ίδια αποτελέσματα. <sup>(5)</sup>

Για εναλλάκτες μικτής ροής (σταυρωτής ροής) και αναμιγνύομενης ροής, η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά χρησιμοποιείται με έναν διορθωτικό συντελεστή  $F$ . Αυτός σχετίζεται με τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευμάτων και την γεωμετρία του εναλλάκτη. Ισχύει  $F \leq 1$  με  $F=1$  να ισχύει στις περιπτώσεις αντιρροής και συμπύκνωσης.

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,αντιρροής} \quad (2.19)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης  $F$  λαμβάνεται από διαγράμματα ή εξισώσεις και είναι συνάρτηση των λόγων θερμοκρασιακών μεταβολών των ρευστών. Ενδεικτικά για σωληνωτό εναλλάκτη κελύφους:

$$P = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad (2.20)$$

Όπου

$P$  η μεταβολή θερμοκρασίας του θερμού ρευστού μέσα στους αυλούς προς τη μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά στο σύστημα

$$R = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}} \quad (2.21)$$

Όπου

$R$  η θερμοκρασιακή μεταβολή του θερμού ρεύματος στο κέλυφος προς την μεταβολή του ψυχρού ρευστού μέσα στους αυλούς

Η μέθοδος LMTD είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό του μεγέθους του εναλλάκτη όταν η εφαρμογή στοχεύει την επίτευξη συγκεκριμένων θερμοκρασιών εξόδου. Η διαδικασία επιλογής συνοπτικά περιλαμβάνει:

- Επιλογή κατάλληλου τύπου εναλλάκτη
- Προσδιορισμό άγνωστων θερμοκρασιών και ποσού θερμορροής
- Υπολογισμός της  $\Delta T_{lm}$  με χρήση συντελεστή  $F$  όπου απαιτείται
- Υπολογισμός ή εύρεση από πίνακες του Συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας
- Υπολογισμός επιφάνειας συναλλαγής  $A_s$  χρησιμοποιώντας το Νόμο του Newton. Ο εναλλάκτης που θα επιλεγεί από κατάλογο τυποποιημένων θα φέρει επιφάνεια ίση ή μεγαλύτερη αυτής που υπολογίστηκε.

### 2.3.2 Αποτελεσματικότητα – Αριθμός Μονάδων Μεταφοράς ε-NTU

Όταν είναι γνωστός ο τύπος του εναλλάκτη και οι θερμοκρασίες εισόδου των ρευστών και πρέπει να προσδιοριστούν οι θερμοκρασίες εξόδου και η θερμορροή, ουσιαστικά γίνεται έλεγχος καταλληλότητας του διαθέσιμου εναλλάκτη για την εφαρμογή και προσδιορισμός των επιδόσεών του.

Η μέθοδος LMTD μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την περίπτωση, όμως η εφαρμογή της δεν είναι πρακτική στη χρήση λόγω ανάγκης πολλών παραδοχών ή και επαναληπτικών μεθόδων. Κατάλληλη μέθοδος είναι αυτή της Αποτελεσματικότητας - Αριθμού Μονάδων Μεταφοράς (ε-NTU: effectiveness-Number of Thermal Units).

Η μέθοδος ε-NTU βασίζεται στην αδιάστατη παράμετρο ε (Σχ. 2.23) που καλείται αποδοτικότητα και ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ποσότητας θερμορροής στον εναλλάκτη προς τη μέγιστη δυνατή θερμορροή.<sup>(3)</sup>

Ο αριθμός μονάδων μεταφοράς NTU είναι αδιάστατος, σχετίζεται με το μέγεθος της επιφάνειας του εναλλάκτη και την ικανότητα του σε μεταφορά θερμότητας μεταξύ των ρευστών.

Η πραγματική θερμορροή  $\dot{Q}$  υπολογίζεται από το ρυθμό θερμοχωρητικότητας κάθε ρευστού και τη θερμοκρασιακή διαφορά κατά την είσοδο και έξοδο του από το σύστημα (Σχ. 2.14 και 2.15). Η μέγιστη ροή θερμότητας επιτυγχάνεται για την ελάχιστη τιμή ρυθμού θερμοχωρητικότητας μεταξύ των δύο ρευμάτων.

$$\dot{Q}_{max} = (\dot{m}c_p)_{min} (T_{h1} - T_{c2}) \quad (2.22)$$

Όπου

$\dot{Q}_{max}$  η μέγιστη θερμορροή

$(\dot{m}c_p)_{min}$  ο ελάχιστος ρυθμός θερμοχωρητικότητας μεταξύ θερμού και ψυχρού ρεύματος

$T_{h1} - T_{c2}$  η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας του συστήματος

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (2.23)$$

$$NTU = \frac{UA}{(\dot{m}c_p)_{min}} \quad (2.24)$$

Η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Ισχύει  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , αυξάνεται αρκετά γρήγορα για μικρές τιμές NTU έως 1.5. Για μεγαλύτερες τιμές NTU η αύξηση της αποτελεσματικότητας γίνεται με αρκετά αργούς ρυθμούς, επομένως η χρήση εναλλάκτη με μεγάλη τιμή  $\varepsilon$  είναι επιθυμητή αλλά αντισυμβατική.<sup>(4)</sup>

Για δεδομένο NTU και λόγο θερμοχωρητικότητας, ο εναλλάκτης τύπου αντιροής είναι ο πιο αποδοτικός, ακολουθεί ο εναλλάκτης σταυρωτής ροής χωρίς ανάμιξη και τέλος ο εναλλάκτης τύπου ομοροής.

$$c = \frac{(\dot{m}c_p)_{\min}}{(\dot{m}c_p)_{\max}} \quad (2.25)$$

Όπου

$c$  ο λόγος θερμοχωρητικότητας

$(\dot{m}c_p)_{\min}$  ο ελάχιστος ρυθμός θερμοχωρητικότητας μεταξύ θερμού και ψυχρού ρεύματος

$(\dot{m}c_p)_{\max}$  ο μέγιστος ρυθμός θερμοχωρητικότητας μεταξύ θερμού και ψυχρού ρεύματος

Ισχύει  $0 \leq c \leq 1$ , για δεδομένο NTU η αποδοτικότητα μεγιστοποιείται για  $c=0$  και αντίστοιχα ελαχιστοποιείται όταν  $c=1$ . Η αποδοτικότητα ανεξαρτητοποιείται του λόγου θερμοχωρητικότητας για τιμές NTU < 0.3.

$$\varepsilon_{\max} = 1 - e^{-NTU} \quad (2.26)$$

Για διαφορετικούς τύπους εναλλακτών, η σχέση υπολογισμού της αποτελεσματικότητας αλλάζει και μπορεί να βρεθεί από πίνακες. Ομοίως, ο αριθμός μονάδων μεταφοράς μπορεί να υπολογιστεί από κατάλληλη σχέση ή να βρεθεί από σχετικά διαγράμματα. Συνοπτικά η επίλυση με την μεθοδολογία  $\varepsilon$ -NTU περιλαμβάνει:

- Προσδιορισμό  $c$ ,  $\dot{Q}_{\max}$ ,  $\Delta T_{\max}$  από τα δεδομένα
- Επιλογή και επίλυση κατάλληλων σχέσεων  $\varepsilon$  και NTU με πίνακες, διαγράμματα ή την κατάλληλη μαθηματική σχέση
- Υπολογισμό των άγνωστων ποσοτήτων  $\dot{Q}$ ,  $T_{h2}$ ,  $T_{c2}$ ,  $A$  από τις σχέσεις (2.14), (2.15), (2.23), (2.24)

## 2.4 Εναλλάκτες Ανάκτησης Θερμότητας Καυσαερίων

### 2.4.1 Ανάκτηση Θερμότητας

Η ανάκτηση θερμότητας είναι η διαδικασία αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας που προκύπτει από κάποια παραγωγική διαδικασία. Κατά την θέρμανση προκύπτουν καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας, αυτά καταλήγουν στο περιβάλλον και τα σημαντικά ποσά θερμότητας που μεταφέρουν χάνονται χωρίς να αποδοθούν στο σύστημα.<sup>(6)</sup>

Οι εφαρμογές ανάκτησης μπορούν να υλοποιηθούν για οποιαδήποτε πηγή εκπομπής θερμότητας, περιορίζονται μόνο από το σκοπό και το κόστος ανάπτυξής τους σε σχέση με τα οφέλη που αποδίδουν. Κυριότερο μέσο αυτών των εφαρμογών είναι ο εναλλάκτης θερμότητας.

Σκοπός είναι η μέγιστη δυνατή ανάκτηση με χρήση μιας απλής κατασκευής που είναι ταυτόχρονα οικονομικά αποδοτική, φιλική προς το περιβάλλον και σύμφωνη με τις ισχύουσες νομοθεσίες. Έτσι καλύπτεται ικανοποιητικό μέρος των απωλειών λόγω καυσαερίων, άμεσα συνδεδεμένων με την παροχή και την θερμοκρασία.

Οι εναλλάκτες ανάκτησης θερμότητας από τα καυσαέρια, εκμεταλλεύονται τα ωφέλιμα ποσά αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας που φέρουν τα θερμά καυσαέρια. Ταυτόχρονα τα ψύχουν σταθεροποιώντας την σύστασή τους, ώστε να διοχετεύονται στο περιβάλλον με ελαχιστοποίηση των βλαβερών ενώσεων που δημιουργούνται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η θερμότητα που ανακτάται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάποια εφαρμογή στο χώρο ή να επιστραφεί στο σύστημα βελτιστοποιώντας την απόδοση της παραγωγής ενέργειας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προθέρμανση του προσαγόμενου αέρα για την καύση και για θέρμανση υγρών ή αερίων ρευμάτων του συστήματος.

Κατεξοχήν βρίσκει εφαρμογή στους ατμολέβητες, στους ατμοπαραγωγούς δεύτερης γενιάς προθερμαίνεται το τροφοδοτικό νερό που ρέει σε αυλούς τοποθετημένους στην έξοδο των καυσαερίων. Στους σύγχρονους ατμοπαραγωγούς τοποθετούνται σωλήνες σε επαφή με τον θάλαμο καύσης (εστία) για αξιοποίηση και της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται. Στην συνέχεια τα καυσαέρια μπορεί να οδηγούνται σε αυλούς που θερμαίνουν τον ατμό (υπερθερμαντήρας).

Τα συμπυκνώματα των δικτύων ατμού φέρουν υψηλές θερμοκρασίες, είναι εκμεταλλεύσιμα ειδικά με εξαγωγή στο δοχείο συμπυκνωμάτων για εκ νέου χρήση με στρατσωνισμό. Τα απόνερα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάκτηση, με τρόπο όμοιο κατά αυτόν της ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων.

Για εφαρμογή ανάκτησης από τα καυσαέρια σε λέβητα πετρελαίου, φυσικού αερίου ή βιομάζας, ο εναλλάκτης που θα συνδυαστεί με την εγκατάσταση είναι συχνότερα, τύπου

σωληνωτού-κελύφους με υγρό και αέριο. Το υγρό ρεύμα ρέει εντός των αυλών του εναλλάκτη και το αέριο ρεύμα στο κέλυφος είναι το ρεύμα των θερμών καυσαερίων. <sup>(4)</sup>

Η χρήση σωληνωτού εναλλάκτη κελύφους είναι ωφέλιμη, καθώς λειτουργεί σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και πιέσεων, με ρευστά αέριας ή υγρής κατάστασης και τον συνδυασμό τους. Είναι κατάλληλος για εφαρμογές συμπύκνωσης και εξάτμισης, ενώ φέρει ευελιξία στις δυνατότητες διαμόρφωσης της κατασκευής του.

Όσο αυξάνουμε το μέγεθος του εναλλάκτη τόσο μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας θα ανακτηθεί, όμως το κόστος ενός μεγάλου εναλλάκτη αυξάνεται πολύ σε σχέση με τις επιπλέον ενεργειακές απολαβές. Η κατασκευαστική επιλογή θα εξαρτηθεί από τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, τις ιδιότητες των μέσων και τυχόν ιδιαιτερότητες στις ανάγκες της γεωμετρίας.

*Πίνακας Α.2. 1 Κριτήρια επιλογής από τυποποιημένες κατασκευές <sup>(4)</sup>*

<b>Είδος σωλήνων</b>	Τυποποίηση κατά διαστάσεις και υλικό
<b>Διάταξη αυλών κελύφους</b>	Επηρεάζει την ταχύτητα του ρευστού στο κέλυφος, η γωνία ροής που επιλέγεται σχετίζεται με την πτώση πίεσης. Η τάση για ρύπανση εξαρτάται από το πόσο επιτρέπει η διάταξη τον καθαρισμό του εναλλάκτη.
<b>Οδήγηση ροών</b>	Κριτήρια διευθέτησης των ροών αφορούν το είδος της εφαρμογής, τις ιδιότητες των εργαζόμενων μέσων και τη συμπεριφορά της ρύπανσης. Καθορίζει την απόδοση θερμικών απολαβών.
<b>Γεωμετρία</b>	Καθορίζεται από το μήκος και τη διάμετρο των αυλών, τις ιδιότητες των ρευστών και τις επιθυμητές τελικές διαστάσεις της κατασκευής. Επηρεάζει τις ταχύτητες ροής των ρευστών.
<b>Ταχύτητες ρευστών</b>	Είναι ανάλογη της πτώσης πίεσης και αντιστρόφως ανάλογη της επιφάνειας συναλλαγής. Η τελική επιλογή περιορίζεται από την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή ταχύτητας ροής για αποτροπή φαινομένων ρύπανσης.
<b>Αριθμός διαδρομών</b>	Επηρεάζει την ταχύτητα ροής και συνεπώς την πτώση πίεσης και το ποσό μετάδοσης θερμότητας.

Ο βαθμός απόδοσης σωληνωτού εναλλάκτη μπορεί να φτάσει το 90% για χρήση ελάχιστων διαδρομών αυλών, όμως με πολλαπλές διαδρομές αυξάνεται η ταχύτητα ροής του ρευστού και συνεπώς η μετάδοση της θερμότητας. Η κατασκευή με πολλαπλές διαδρομές πλεονεκτεί και στο χαρακτήρα της ροής που προσομοιάζει εκείνον της αντιρροής.

Η διάταξη των αυλών στο κέλυφος είναι συνάρτηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών τους, τα χαρακτηριστικά που φέρουν λόγω τυποποίησης και τυχόν ύπαρξη εσωτερικών στοιχείων τους λόγω χαρακτήρα της ροής. Μπορεί να είναι τετραγωνικής ή τριγωνικής κατανομής, από αυτή την επιλογή καθορίζεται και το πλήθος των αυλών στο κέλυφος, καθώς είναι μεγαλύτερο για την τριγωνική κατανομή.



Κατά τη διεργασία συμπύκνωσης επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα ανάκτησης λανθάνουσας θερμότητας για χαμηλές θερμοκρασίες του ψυχρού ρευστού και θερμοκρασίες επιφάνειας συναλλαγής στον εναλλάκτη χαμηλότερες της θερμοκρασίας δρόσου των καυσαερίων. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις αυξάνεται και η απόδοση του συστήματος.

Στους εξατμιστήρες με αέριο ρεύμα το καυσαέριο η συμπύκνωση γίνεται εκτός των αυλών με τον μηχανισμό του βρασμού, δηλαδή της εξάτμισης υγρού ρευστού εντός των αυλών. Η μέθοδος αυτή αποδίδει μεγάλα ποσά θερμότητας, υψηλούς συντελεστές μετάδοσης και είναι αποδοτικότερη της επιφανειακής εξάτμισης.

Μειονέκτημα χρήσης εξατμιστήρων στην ανάκτηση είναι η αυξημένη τάση για ρύπανση λόγω επικαθίσεων από τα καυσαέρια στους αυλούς. Είναι αναγκαία η εφαρμογή αντιδιαβρωτικής προστασίας και η επιλογή κατάλληλου υλικού κατασκευής του εναλλάκτη.

Σε περιπτώσεις ανάκτησης που χρησιμοποιούνται εναλλάκτες αερίων ρευμάτων ρευστών η γεωμετρία της κατασκευής εξαρτάται από την πίεση λειτουργίας, αλλά είναι κυρίως τύπου σωληνωτού-κελύφους. Για τις εφαρμογές ανάκτησης όπου το θερμό ρεύμα είναι καυσαέριο, ιδανική λύση είναι η χρήση αναγεννητή, λαμβάνεται υπόψιν ότι συνοδεύεται από ανάμιξη. Ο εναλλάκτης αερίου-αερίου μπορεί να είναι και ειδικά προσαρμοσμένη κατασκευή.

#### 2.4.2 Η Ρύπανση στους Εναλλάκτες Ανάκτησης Θερμότητας

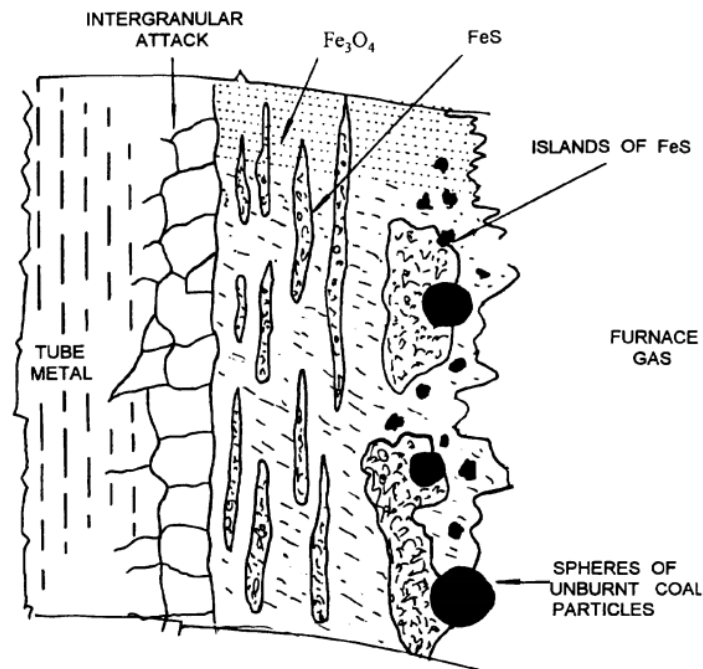
Η ρύπανση που εμφανίζεται μετά το πέρας ενός διαστήματος λειτουργίας επηρεάζει την απόδοση των εναλλακτών και συνοδεύεται από αύξηση κατανάλωσης καυσίμων με συνέπεια αυξημένο κόστος λειτουργίας. Είναι παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό τους, ώστε να μην είναι ανεπαρκής η ποσότητα ενέργειας που λαμβάνεται μετά από σύντομη, συνεχή χρήση.<sup>(5)</sup>

Ρύπανση στους εναλλάκτες αναφέρεται κυρίως σε εναπόθεση και επικαθίσεις ουσιών και σωματιδίων που είτε περιέχονται στα εργαζόμενα ρευστά ή μεταφέρονται στις επιφάνειες συναλλαγής από το περιβάλλον λειτουργίας. Ειδικότερα σε εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται για ανάκτηση θερμότητας από καυσαέρια, δημιουργούνται στρώματα επικαθίσεων στις επιφάνειες προθερμαντήρων και αγωγών.<sup>(8)</sup>

Το επιπλέον στρώμα επικαθίσεων φέρει πολύ μικρές τιμές συντελεστή αγωγής. Η θερμική αντίσταση που προκαλείται από την παρουσία της ρυπαρότητας είναι μια συνάρτηση του πάχους του στρώματος και του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του υλικού από το οποίο αποτελείται. Λαμβάνεται υπόψιν στον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $U$  και εκφράζεται από τον συντελεστή ρυπαρότητας  $R_f$ .

Ένας αγωγός μπορεί να φέρει επικαθίσεις ή διάβρωση στο εσωτερικό ή το εξωτερικό του. Στο εσωτερικό η ρύπανση οφείλεται κυρίως στις ιδιότητες του ρευστού, συνηθέστερη μορφή

επικαθίσεων εμφανίζεται ως στρώμα στερεών κατακρημνίσεων (scaling). Έχει σημαντική επίδραση στη μετάδοση θερμότητας, μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση και τελικά αστοχία.



Εικόνα Α.2. 2 Στερεές κατακρημνίσεις (scaling) (8)

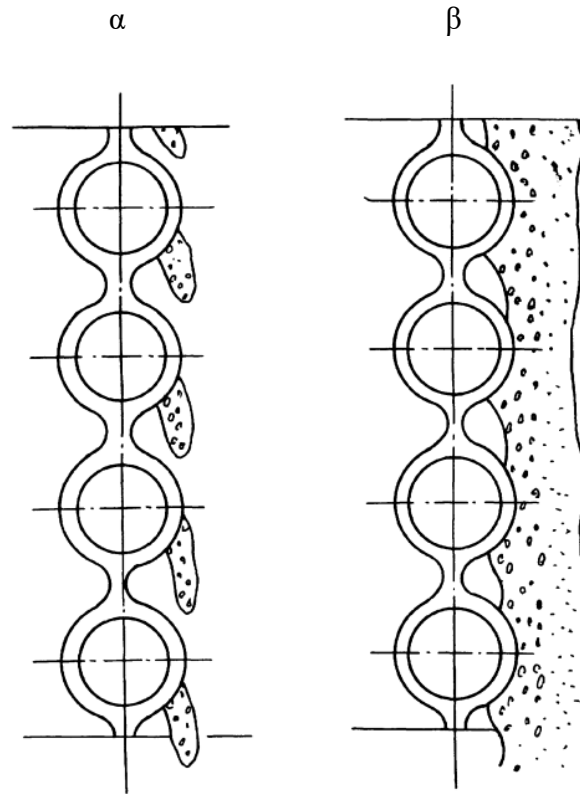
Στο εξωτερικό του αγωγού το ρεύμα καυσαερίων συμπαρασύρει ανόργανες ουσίες, τέφρα και αιθάλη. Όταν αυτές συναντούν ψυχρά σημεία της επιφάνειας συναλλαγής, τότε συμπυκνώνονται και προσκολλώνται στον αγωγό. Με το πέρασμα του χρόνου τα συμπυκνώματα τέφρας συσσωματώνονται δημιουργώντας ένα στρώμα ρυπαρότητας (fouling) στην επιφάνεια.

Εξαιτίας των επικαθίσεων ρυπαρότητας η εξωτερική θερμοκρασία του αγωγού αρχίζει να αυξάνεται, τελικά φτάνει την θερμοκρασία τήξης κάποιων ουσιών της τέφρας. Η διαδικασία αύξησης της θερμοκρασίας σταδιακά επιταχύνεται και τα τήγματα τέφρας (slagging) αρχίζουν να ρέουν. Η δημιουργία τηγμάτων εξαρτάται από την ευτηκτότητα της τέφρας (ash fusibility), δηλαδή ιδιότητά της να τήκεται ή να μαλακώνει σε κάποια θερμοκρασία.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την συγκέντρωση επικαθίσεων τέφρας και αιθάλης αφορούν την ταχύτητα του ρευστού, το είδος και την κατεύθυνση της ροής, την θερμοκρασία των σωματιδίων που περιέχονται ή παρασύρονται από το ρεύμα καυσαερίων, την αυξημένη περισσεια αέρα στην καύση και την γεωμετρία του εναλλάκτη.

Ανάλογα με τις ιδιότητες της ρύπανσης προκαλείται φθορά μηχανικής ή χημικής φύσεως στον εναλλάκτη. Οι κατακρημνίσεις μπορεί να οδηγήσουν σε φραγμό της διατομής. Η αύξηση συγκέντρωσης της τέφρας είναι μέγεθος ανάλογο της μηχανικής διάβρωσης (erosion). Σωματίδια

που έρχονται σε επαφή με την περιοχή τηγμάτων τέφρας προσκολλώνται σε αυτή, συχνά το σώμα εναποθέσεων αποκτά αρκετό βάρος ώστε να αποκολληθεί.



Εικόνα Α.2. 3 Εμφάνιση ρυπαρότητας (α) και εξέλιξη σε τήγματα τέφρας (β) (8)

Η ρύπανση, με τις μορφές που αναλύθηκαν, εμφανίζεται με συγκεκριμένους μηχανισμούς. Αυτοί μπορεί να συνυπάρχουν ταυτόχρονα ή και να δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την εμφάνιση άλλων μηχανισμών. <sup>(4)</sup>

- Κρυστάλλωση  
Επικαθίσεις με μορφή αλάτων, προκαλείται από φαινόμενα βρασμού, σε ροές ανάμιξης και σε περιπτώσεις μεταβολής οξύτητας ή αλκαλικότητας του ρευστού.
- Σωματίδια  
Ρύπανση λόγω ύπαρξης ή μεταφοράς λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων του ρευστού.
- Χημική ρύπανση  
Επικαθίσεις ως αποτέλεσμα χημικών ή οξειδωτικών αντιδράσεων. Η υψηλή θερμοκρασία σε συνδυασμό με τις συνθήκες καύσης και την χημεία του καυσίμου ευνοούν την παραγωγή καταστρεπτικών στρωμάτων οξειδίων ( $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) και αντιδράσεις με τον σίδηρο ( $\text{H}_2\text{S} + \text{Fe}$ ) δημιουργώντας πορώδεις ενώσεις ( $\text{FeS}$ ), επιρρεπείς σε διάβρωση.

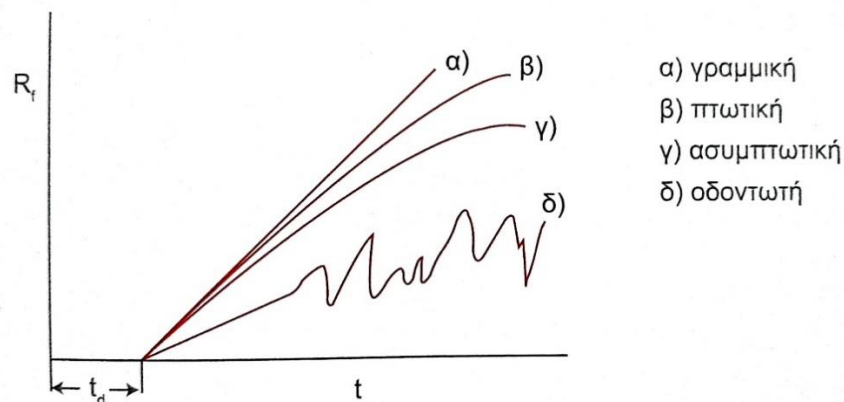
- Διάβρωση  
Μηχανική (erosion) ή χημική (corrosion) διάβρωση οφείλεται σε, ευνοϊκές για τη δημιουργία της, συνθήκες λειτουργίας, ιδιότητες του υλικού κατασκευής και σε συγκέντρωση ή πρόσκρουση διαβρωτικών υλικών στις επικαθίσεις.
- Βιολογική ρύπανση  
Θερμά ρεύματα ευνοούν την ανάπτυξη άλγης και μικροοργανισμών, λόγω της φύσης τους αυτού του είδους οι επικαθίσεις είναι δυνατό να εισέλθουν στο κύκλωμα.

Η εξελικτική πορεία της ρύπανσης εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής, τις φυσικές ιδιότητες των επικαθίσεων και τους μηχανισμούς που τις προκαλούν. Περιλαμβάνει βασικά στάδια της λειτουργίας του εναλλάκτη, ξεκινώντας από την στιγμή που δεν φέρει ρύπανση και ισχύει  $R_f = 0$ .

Η απουσία ρύπανσης διαρκεί για ένα σύντομο χρονικό διάστημα στην αρχή λειτουργίας του εναλλάκτη. Με την σταδιακή μεταφορά ουσιών και σωματιδίων ξεκινά ο σχηματισμός εναποθέσεων. Ακολουθεί η φθορά και γήρανση, όπου η θερμική αντίσταση λόγω ρύπανσης αυξάνεται με επιπτώσεις στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας.

Η αντίσταση της ρυπαρότητας σε συνδυασμό με την τραχύτητα της επιφάνειάς της και την μείωση της στροβιλότητας της ροής στον αγωγό, οδηγούν στην μεταβολή του συνολικού συντελεστή μεταφοράς. Η καθαρή επιφάνεια του εναλλάκτη φέρει μεγαλύτερη τραχύτητα από αυτή των επικαθίσεων, ώστε να αυξάνεται η στροβιλότητα που είναι απαραίτητη για την θερμορροή.<sup>(5)</sup>

Από την επίλυση μοντέλων ρύπανσης προκύπτουν οι καμπύλες εξέλιξης, αποτελούν συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού εναπόθεσης και του ρυθμού φθοράς του στρώματος επικαθίσεων. Η συσχέτιση είναι γραμμική για επικαθίσεις σταθερά προσκολλημένες στην επιφάνεια και αμελητέα φθορά τους. Πτωτική συσχέτιση σημειώνεται για μείωση ρυθμών επικαθίσεων και φθοράς, ενώ αν η μείωση αυτή είναι σταθερή, η συσχέτιση γίνεται ασυμπτωτική. Όταν έχουμε αποκόλληση και παρασυρόμενες επικαθίσεις η συσχέτιση παίρνει οδοντωτή μορφή.<sup>(4)</sup>



Διάγραμμα Δ.Α.1. 1 Εξέλιξη φαινομένου ρύπανσης (4)

Η ρυπαρότητα αντιμετωπίζεται κατά το σχεδιασμό του εναλλάκτη θερμότητας με υπερδιαστασιολόγηση, ώστε να εξασφαλίζεται η μετάδοση του απαιτούμενου ποσού θερμότητας ακόμα και μετά την επίδραση της θερμικής αντίστασης της ρύπανσης. Σε αυτή την περίπτωση οι επιπλέον διαστάσεις είναι επαρκείς για το διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ συντήρησης και καθαρισμού.

Η χρήση μεγαλύτερου εναλλάκτη συνοδεύεται από το επιπλέον κόστος αυτής της επιλογής, ενώ θα πρέπει να γίνει προσεκτικά λαμβάνοντας υπόψιν τα όρια και τα φυσικά μεγέθη που υπολογίζονται για την απαιτούμενη εφαρμογή. Οι επικαθίσεις παρουσιάζουν αντίσταση κατά την απομάκρυνσή τους, η οποία αυξάνεται με τη γήρανσή τους, συνεπώς θα πρέπει να τηρούνται προληπτικά μέτρα για τον περιορισμό της ρύπανσης και να μην αγνοείται η συντήρηση.

Κατά την ανάκτηση από καυσαέρια, μπορεί να περιοριστεί η ρύπανση των επιφανειών συναλλαγής με προεπεξεργασία του καυσίμου και έλεγχο της περισσειας αέρα για βελτίωση των συνθηκών καύσης. Η αποθείωση καυσίμου ή χρήση φυσικού αερίου, που από φύσης του δεν περιέχει ενώσεις θείου, η τοποθέτηση φίλτρων στο ρεύμα των καυσαερίων και η επιλογή κραμάτων με αντιδιαβρωτικές ιδιότητες προστατεύουν κατά της χημικής ρύπανσης.

Η συντήρηση περιλαμβάνει τεχνικές καθαρισμού της επιφάνειας από χαλαρές ή σκληρές επικαθίσεις. Ο μηχανικός καθαρισμός γίνεται με χρήση πεπιεσμένου ατμού ή αέρα, εναλλακτικά χρησιμοποιείται συσκευή παραγωγής ηχητικών δονήσεων. Ο χημικός καθαρισμός δεν μπορεί πάντα να αξιοποιηθεί, αλλά αποτελεί μια εύκολη μέθοδο για απομάκρυνση επικαθίσεων χωρίς φθορά του εξοπλισμού και είναι ιδανικός για την περίπτωση βιολογικής ρύπανσης. Και στις δύο περιπτώσεις ο εναλλάκτης θα πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας.

Τελικά η βέλτιστη επιλογή της τεχνικής απομάκρυνσης της ρυπαρότητας θα πρέπει να βασιστεί σημαντικά και στους παράγοντες κόστους και ασφάλειας. Τήρηση όλων των κανονισμών ασφαλούς εργασίας και συνεχής επίβλεψη της διαδικασίας συντήρησης συντελούν σε διασφάλιση της ποιότητας του εναλλάκτη και σε διατήρηση υψηλού βαθμού απόδοσης κατά την ανάκτηση.

#### 2.4.3 Επιλογή Υλικού Κατασκευής Εναλλάκτη Ανάκτησης

Η επιλογή του υλικού από το οποίο θα κατασκευαστεί ο εναλλάκτης γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν πολλούς παράγοντες και συχνότερα ακολουθεί ισχύουσες τυποποιήσεις. Ένα υλικό μπορεί να έχει άριστη μηχανική συμπεριφορά, ένα άλλο υψηλούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας όμως η καλύτερη επιλογή θα πρέπει να συνδυάζει μηχανικές, θερμικές και χημικές ιδιότητες που θα αρμόζουν στις ανάγκες της εφαρμογής, ενώ είναι σημαντικός ο παράγοντας του κόστους.

Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψιν η φύση της λειτουργίας της εγκατάστασης και το καύσιμο που χρησιμοποιείται. Σε εφαρμογές ανάκτησης από τα καυσαέρια, η σύσταση μπορεί να είναι απαγορευτική για τη χρήση κάποιων υλικών κατασκευής. Κυριότερο πρόβλημα αποτελεί η

ύπαρξη θείου σε ορισμένα καύσιμα που οδηγεί σε δημιουργία διαβρωτικών οξειδίων του θείου στα καυσαέρια.

Η δυνατότητα λειτουργίας κάποιων εγκαταστάσεων με διάφορα καύσιμα είναι ένας παράγοντας που πρέπει επίσης να ληφθεί προσεκτικά υπόψιν. Για παράδειγμα, αν ένας λέβητας διαθέτει καυστήρα που καίει φυσικό αέριο αλλά έχει δυνατότητα και για πετρέλαιο, συνδυαστεί με εναλλάκτη του οποίου το υλικό έχει κακή συμπεριφορά σε επαφή με ενώσεις του θείου, τότε το πετρέλαιο θα πρέπει να έχει υποστεί αποθείωση ή να τοποθετηθεί κατάλληλο φίλτρο στα καυσαέρια, ώστε να μην καταστραφεί ο εναλλάκτης.

Στους εναλλάκτες θερμότητας ακολουθείται συνήθως η γερμανική τυποποίηση κατά DIN ή η αμερικανική τυποποίηση κατά TEMA, σύμφωνα με αυτά και για κάθε εφαρμογή μπορεί να γίνει η επιλογή κατάλληλου εναλλάκτη. <sup>(4)</sup> Σε εφαρμογές ανάκτησης, με γνώμονα την ανάγκη αντιδιαβρωτικής προστασίας, οι εναλλάκτες κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα, ενώ έχει αρχίσει να καθιερώνεται ως επιλογή το κράμα αλουμινίου με πρόσμιξη πυριτίου.

Συνηθέστερη επιλογή είναι ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα AISI 316L (Low carbon,  $C \leq 0.03$ ). Χάρη στην προσθήκη 2-2.5% μολυβδαινίου, εμφανίζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και αποτελεί ιδανική επιλογή για εφαρμογές κυκλοφορίας νερού χρήσης. <sup>(9)</sup>

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας AISI 314, που παρουσιάζει ανθεκτικότητα στην οξείδωση και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Συνιστάται κυρίως για ανάκτηση με καύσιμο φυσικό αέριο ή αποθειωμένο υγρό καύσιμο, καθώς η επαφή με ενώσεις θείου είναι καταστρεπτική για τον 314 χάλυβα και προκαλείται έντονη διάβρωση. <sup>(10)</sup>

Προτείνεται η χρήση κράματος αλουμινίου πυριτίου (Al-Si Alloy, Σειρά 4000) ιδιαίτερα σε εφαρμογές συμπύκνωσης. Το κράμα φέρει μεγάλο συντελεστή αγωγιμότητας, αρκετά αυξημένο σε σύγκριση με αυτό του ανοξείδωτου χάλυβα. Έχει αυξημένη αντοχή σε μηχανική καταπόνηση και άριστη συμπεριφορά κατά την κατεργασία, επιτρέποντας την κατασκευή σύνθετων γεωμετριών και την επίτευξη μεγάλης επιφάνειας συναλλαγής σε μια ευέλικτη τελική κατασκευή. <sup>(11)</sup>

Ταυτόχρονα, το κράμα φέρει υψηλή αντοχή στην χημική διάβρωση. Η επαφή του με νερό ή οξυγόνο οδηγεί στην δημιουργία ενός μη πορώδους φιλμ  $Al_2O_3$  (Alumina), ο συντελεστής αγωγιμότητας του φιλμ θα πρέπει να συνυπολογιστεί στην μεταφορά της θερμότητας.

### 3. Λέβητες Παραγωγής Θερμότητας

Ο λέβητας είναι ειδική περίπτωση εναλλάκτη θερμότητας, μεταδίδει θερμότητα σε ένα εργαζόμενο μέσο μέσω της καύσης ενός καυσίμου. Η θερμότητα από την καύση στο λέβητα μεταφέρεται κυρίως με το μηχανισμό της συναγωγής και συμπεριλαμβάνει ένα ποσό μετάδοσης λόγω ακτινοβολίας της φλόγας. <sup>(12)</sup>

Μπορεί από την διεργασία στον λέβητα να παράγεται ατμός, να θερμαίνεται νερό για χρήση ή να θερμαίνεται ρευστό για απόδοση θερμότητας σε κάποιο χώρο μέσω ενός δικτύου κυκλοφορίας του ρευστού. Επομένως μια αρχική διάκριση των λεβήτων μπορεί να γίνει σε ατμοπαραγωγούς λέβητες και σε λέβητες θερμού νερού.

#### 3.1 Ατμοπαραγωγοί Λέβητες

Ο ατμοπαραγωγός λέβητας (ατμολέβητας) είναι ατμοποιητής εναλλάκτης, είναι μια κλειστή μεταλλική κατασκευή με εργαζόμενο μέσο τον ατμό. Ο ατμός παράγεται υπό συνθήκες χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας, μέσω θερμότητας που προσδίδεται στο τροφοδοτικό νερό και το ατμοποιεί. <sup>(2)</sup>

Διακρίνονται σύμφωνα με τον τύπο του λέβητα, η επιφάνεια συναλλαγής, ο όγκος του θαλάμου καύσης, η ισχύς του λέβητα (ατμοπαραγωγική ικανότητα), ο βαθμός καύσης (σε  $\text{kg/m}^2$  ή  $\text{kg/m}^3$ ), η πίεση του παραγόμενου ατμού και η θερμοκρασία του, ειδικά στην περίπτωση που παράγεται υπέρθερμος ατμός.

Ο ατμοπαραγωγός μπορεί να είναι αεριαυλωτός ή υδραυλωτός. Στον αεριαυλωτό λέβητα το καυσαέριο ρέει μέσα σε αγωγούς που περιβάλλονται από το ψυχρό ρεύμα ρευστού, το ρευστό που θερμαίνεται ή εξατμίζεται είναι συνήθως το τροφοδοτικό ρευστό. Οι υδραυλωτοί λέβητες εξυπηρετούν εφαρμογές υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών ατμού, τροφοδοτικό νερό ή ατμός ρέει στους αγωγούς που βρίσκονται στο ρεύμα των καυσαερίων ή στο χώρο της καύσης. <sup>(4) (13)</sup>

Βασικά μέρη ατμολέβητα είναι η εστία που αποτελεί τον θάλαμο καύσης του λέβητα και χώρο σχηματισμού των καυσαερίων, ο θερμοαντήρας όπου γίνεται η καύση και διαφεύγουν φλόγα και καυσαέρια, ο υδροθάλαμος και ο ατμοθάλαμος όπου βρίσκονται αντίστοιχα το τροφοδοτικό νερό και ο ατμός και μπορεί να συνυπάρχουν σε μία μοναδική κατασκευή που καλείται τύμπανο. Τέλος, ο καπναγωγός απ' όπου διαφεύγουν τα καυσαέρια.

Ο λέβητας μπορεί να συνδυαστεί με άλλους εναλλάκτες θερμότητας για να επιτευχθούν αναγκαίες λειτουργίες, όπως η προθέρμανση του νερού, η παραγωγή υπέρθερμου ατμού, η εξατμισμό του ρευστού και η αναθέρμανση του ατμού.

Ο προθερμαντήρας (οικονομητήρας) είναι ένας εναλλάκτης τοποθετημένος στο ρεύμα των καυσαερίων που αποδίδουν ποσά θερμότητας στο τροφοδοτικό νερό το οποίο ρέει εντός του

προθερμαντήρα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν προθερμαντήρες αέρα καύσης με την ίδια αρχή λειτουργίας και προθέρμανσης καυσίμου με ατμό.

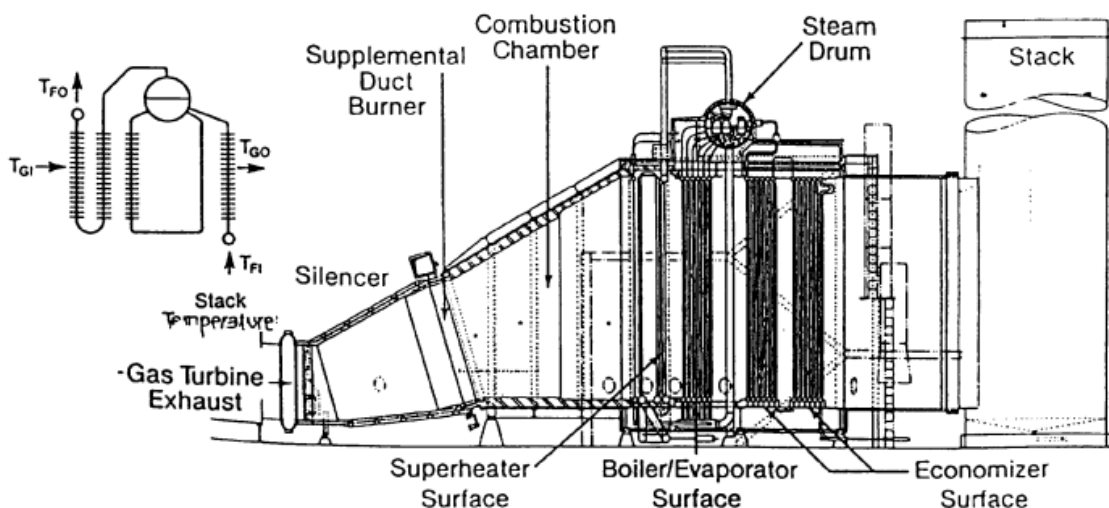
Η εξάτμιση του τροφοδοτικού ρευστού γίνεται στον φλογοθάλαμο, έναν εναλλάκτη τύπου εξατμιστήρα στον οποίο η διεργασία γίνεται με βρασμό. Τα καυσαέρια αποδίδουν θερμότητα στο εξωτερικό του κυρίως με μετάδοση λόγω ακτινοβολίας. Τον φλογοθάλαμο μπορεί να ακολουθεί ο εναλλάκτης διεργασίας υπερθέρμανσης του κεκορεσμένου ατμού.

Στον υπερθερμαντήρα περιέχεται ο ατμός που προέρχεται από τον ατμοθάλαμο (ή το τύμπανο), τοποθετημένος στην ροή των καυσαερίων λαμβάνει και αξιοποιεί την θερμότητά τους για να υπερθερμάνει τον ατμό υπό σταθερή πίεση. Τα σημαντικότερα ποσά ενέργειας στον υπερθερμαντήρα μεταδίδονται λόγω ακτινοβολίας. Ο υπέρθερμος ατμός μετά την εκτόνωσή του και την απόδοση της ενέργειάς του στο σύστημα, εισάγεται στον αναθερμαντήρα όπου ανακτά θερμότητα και πάλι από τα καυσαέρια.

Η καλή λειτουργία εξασφαλίζεται με την χρήση οργάνων, εσωτερικών και εξωτερικών για τον έλεγχο νερού και ατμού, καθώς και εξαρτήματα για την ομαλή έκβαση της καύσης. Οι λέβητες μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύκλωμα, στην περίπτωση του ατμοπαραγωγού έχουμε το κύκλωμα καύσης-καυσαερίων και το κύκλωμα τροφοδοτικού νερού-ατμού.

Το κύκλωμα καύσης και καυσαερίων περιλαμβάνει την εισαγωγή του αέρα και του καυσίμου στο θάλαμο καύσης (εστία) και την εξαγωγή των παραγόμενων καυσαερίων στο περιβάλλον από τον καπναγωγό μέσω του θερμαντήρα.

Το κύκλωμα νερού και ατμού αφορά την διεργασία ατμοποίησης του τροφοδοτικού ρευστού, από την εισαγωγή του, υπό υψηλή πίεση, στον λέβητα με την βοήθεια αντλίας, στην εισαγωγή του στον υδροθάλαμο ή το τύμπανο και τελικά την παραλαβή θερμότητας προς αλλαγή της φάσης του.



Εικόνα Α.3. 1 Ατμοπαραγωγός με ανάκτηση θερμότητας (8)



### 3.2 Λέβητες Θερμού Νερού

Οι λέβητες θέρμανσης ζεστού νερού σκοπεύουν στη χρήση του για θέρμανση χώρων, το νερό παραλαμβάνει τη θερμότητα της καύσης και στη συνέχεια διοχετεύεται σε εναλλάκτες συνδεδεμένους στο δίκτυο διανομής, τα θερμομαντικά σώματα. Οι λέβητες συνδυάζονται επίσης με έναν καυστήρα που ελέγχει τις συνθήκες της καύσης.<sup>(12)</sup>

Η διάκριση των λεβήτων θερμού νερού μπορεί να γίνει με βάση το υλικό κατασκευής τους, το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, το εργαζόμενο μέσο την αποδιδόμενη ισχύ τους, την μορφή της εστίας και τον βαθμό αξιοποίησης θερμότητας των καυσαερίων.

Πίνακας Α.3. 1 Διάκριση λεβήτων θερμού νερού

Κριτήριο	Λέβητες	Περιγραφή
Υλικό κατασκευής	Χυτοσίδηροι	Μεγάλη διάρκεια ζωής
	Χαλύβδινοι	Υψηλή απόδοση
	Ανοξείδωτοι	Αντιδιαβρωτικές ιδιότητες
Είδος καυσίμου	Στερεών καυσίμων	Βιομάζα, pellets
	Υγρών	Πετρέλαιο, μαζούτ
	Αερίων καυσίμων	Φυσικό αέριο, υγραέριο
Εργαζόμενο μέσο	Νερού	
	Αέρα	
	Λαδιού	
Θερμική ισχύς (μέγεθος)	Μικροί	$Q < 50000 \text{ kcal/h}$
	Μεσαίοι	$50000 \text{ kcal/h} < Q < 300000 \text{ kcal/h}$
	Μεγάλοι	$Q > 300000 \text{ kcal/h}$
Μορφή εστίας	Αεριαυλωτοί (Φλογαυλωτοί)	
	Ενιαίου θαλάμου	
	Απλής/Διπλής/Πολλαπλής διαδρομής	
Αξιοποίηση θερμότητας από καυσαέρια	Συμβατικοί (Υψηλών Θερμοκρασιών)	Έξοδος καυσαερίων στο περιβάλλον
	Χαμηλών Θερμοκρασιών	Δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας
	Συμπύκνωσης	

Βασικά μέρη των λεβήτων είναι η εστία (θάλαμος καύσης), ο υδροθάλαμος, ο καπνοθάλαμος όπου βρίσκονται τα καυσαέρια και ο αγωγός διαφυγής των καυσαερίων. Ανάλογα με την δυνατότητα αξιοποίησής τους τα καυσαέρια οδηγούνται σε αλούς για την αξιοποίηση της θερμότητάς τους ή διοχετεύονται απευθείας στο περιβάλλον. Τα δύο κυκλώματα στα οποία μπορούν να διαιρεθούν είναι αυτό των καυσαερίων και αυτό του νερού.

Το κύκλωμα καυσαερίου αφορά την εισαγωγή του καυσίμου στην εστία, την καύση του και τον προσεχή σχηματισμό των καυσαερίων. Τα θερμά καυσαέρια διέρχονται από τους αεριαλούς και τυχόν εναλλάκτες που μπορούν να τοποθετηθούν στο ρεύμα τους για εφαρμογές ανάκτησης, πριν εξέλθουν από τον καπναγωγό στο περιβάλλον.

Το κύκλωμα νερού ξεκινά από τον λέβητα, το νερό αφού θερμανθεί προσάγεται στο δίκτυο διανομής υποβοηθούμενο από τον κυκλοφορητή, οδηγείται στα θερμαντικά σώματα όπου αποδίδει ποσά θερμότητας, επομένως ψύχεται και επιστρέφει στον λέβητα για αναθέρμανση και ανακυκλοφορία.

Η ισχύς (σε kW) που θα αποδώσει ο λέβητας καθορίζεται από τα ποσά ωφέλιμης θερμικής ενέργειας που μπορεί να αποδίδει σε καθορισμένες συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή σε συνεχή λειτουργία με βάση το καύσιμο και τον βαθμό απόδοσης για τα οποία έχει σχεδιαστεί.

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{Q}}{\eta_{NCV} H_u} \quad (3.1)$$

Όπου

$\dot{m}_b$  η παροχή καυσίμου  $\left(\frac{kg}{s}\right)$

$\dot{Q}$  η ωφέλιμη ονομαστική ισχύς (kW)

$\eta_{NCV}$  ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (%)

$H_u$  η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου  $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$

Παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του λέβητα<sup>(14)</sup>:

- Περίσσεια αέρα

Περίσσεια αέρα πάνω από το απαιτούμενο ποσό απορροφά μέρος της θερμότητας της καύσης, μειώνοντας το ωφέλιμο ποσό θερμότητας που μπορεί να μεταφερθεί στο νερό. Μπορεί να βελτιωθεί με τακτική βαθμονόμηση του λέβητα σε πολλαπλά επίπεδα καύσης.

- Απώλειες λόγω μεταφοράς θερμότητας

Οι απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας είναι αναπόφευκτες, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με χρήση μόνωσης υψηλής ποιότητας και ελεγχόμενης ροής του αέρα πάνω από τις επιφάνειες συναλλαγής.

- Σύσταση καυσίμου

Απαιτείται η χρήση κατάλληλου και υψηλής ποιότητας καυσίμου. Αυξημένες ποσότητες υδρογόνου οδηγούν σε μεγαλύτερη παραγωγή υδρατμών και επομένως κατανάλωση

ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται φυσικό αέριο είναι σημαντικό να επιλέγεται αέριο πλούσιο σε μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και λιγότερο σε άλλες ενώσεις υδρογονανθράκων ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ).

- **Θερμοκρασία αέρα καύσης**

Χαμηλές θερμοκρασίες συντελούν σε μικρή αύξηση του βαθμού απόδοσης, ιδανικά κατάλληλη θερμοκρασία εισαγωγής είναι περί τους  $20^\circ\text{C}$  με  $25^\circ\text{C}$ . Αναλογικά με την αύξηση του βαθμού απόδοσης δεν θεωρείται σκόπιμο να προσπαθήσουμε να χαμηλώσουμε περισσότερο την θερμοκρασία με τεχνητές μεθόδους.

- **Θερμοκρασία καυσαερίων**

Υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων είναι πιθανή ένδειξη απώλειας θερμότητας που δεν αποδίδεται τελικά στο νερό. Απώλεια θερμότητας καυσαερίων μπορεί να οριστεί το ποσοστό της ενέργειας που προσδίδεται από την καύση του καυσίμου το οποίο χάνεται λόγω θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων.

Προκύπτει ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του λέβητα που ορίζεται ως η διαφορά της απώλειας λόγω θερμότητας καυσαερίων από την θερμοροή που αποδίδεται από την καύση.  
(15)

$$\eta_{NCV} = 100\% - Losses_{NCV} \quad (3.2)$$

Όπου:

$\eta_{NCV}$  Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (Efficiency Net Calorific Value)

$Losses_{NCV}$  Απώλειες Θερμότητας Καυσαερίων (Losses Net Calorific Value)

### 3.2.1 Λέβητες Χαμηλών Θερμοκρασιών

Στους λέβητες χαμηλών θερμοκρασιών το νερό εισάγεται στο σύστημα με χαμηλότερη θερμοκρασία με σκοπό την κάλυψη των θερμικών αναγκών και ταυτόχρονη κατανάλωση μικρότερου ποσού ενέργειας και εξαγωγή των καυσαερίων σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Είναι κατάλληλη εφαρμογή για λέβητες αερίου.<sup>(12)</sup>

Ο κίνδυνος δημιουργίας συμπυκνωμάτων στα τοιχώματα λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών ελαχιστοποιείται με τη χρήση διμεταλλικής επιφάνειας, το διπλό τοίχωμα με διάκενο αέρα που χρησιμοποιείται στην κατασκευή έχει επίσης μονωτικές ιδιότητες.

Σε σχέση με συμβατικούς λέβητες, οι λέβητες χαμηλών θερμοκρασιών συνδυάζουν την μεγάλη διάρκεια ζωής και τον υψηλό βαθμό απόδοσης (έως περίπου 95%) της χρήσης των χυτοσιδηρών και χαλύβδινων αντίστοιχα.

### 3.3 Ανάκτηση Θερμότητας στους Λέβητες

Οι σύγχρονοι λέβητες είναι συστήματα που επιτυγχάνουν υψηλές αποδόσεις, ενώ ταυτόχρονα εξοικονομούν ενέργεια και είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Οι απαιτήσεις που συνοδεύουν τα συστήματα παραγωγής θερμότητας υπαγορεύονται από την τεχνολογική ανάπτυξη αλλά και την ισχύουσα νομοθεσία. Με στόχο την διατήρηση υψηλής ολικής αποδοτικότητας των συστημάτων, ο σχεδιασμός τους επικεντρώνεται στην μείωση των απωλειών θερμότητας.

Κυριότερη αιτία απωλειών στους λέβητες είναι τα καυσαέρια, η απόδοση μειώνεται όσο αυξάνεται η ποσότητα και η θερμοκρασία με την οποία θερμά καυσαέρια εξέρχονται του συστήματος. Κατά την κυκλοφορία τους τα καυσαέρια πρέπει να υπερνικήσουν μια σειρά αντιστάσεων, κυρίως αντίθλιψης λόγω διέλευσής τους από την εστία και τους αυλούς και ελκυσμού λόγω μετάβασης από τους αυλούς στο περιβάλλον.

Τα υψηλά θερμικά ποσά ενέργειας που φέρουν τα καυσαέρια οδηγούν σε δυνατότητες ανάκτησης της θερμότητάς τους. Στα δίκτυα ατμού τα καυσαέρια και τα συμπυκνώματα αποτελούν σημαντική πηγή ενέργειας που διοχετεύεται στην παραγωγή ατμού και σε διεργασίες προθέρμανσης.

Σε εγκαταστάσεις με κεντρικό σύστημα θέρμανσης, η θερμότητα που θα χανόταν στο περιβάλλον μπορεί να αξιοποιηθεί με την χρήση ενός λέβητα ανάκτησης θερμότητας από τα καυσαέρια. Τοποθετώντας έναν εναλλάκτη θερμότητας στην ροή των καυσαερίων συμβατικού λέβητα η ανακτώμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμού νερού ή προθέρμανσή του. <sup>(6) (12)</sup>

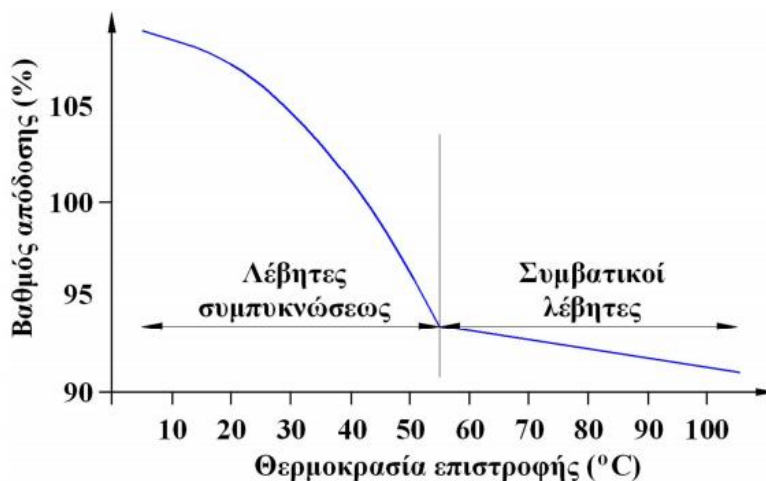
#### 3.3.1 Λέβητες Συμπύκνωσης

Οι λέβητες συμπύκνωσης αποτελούν την πιο εξελιγμένη τεχνολογία στους λέβητες με καύσιμο πετρέλαιο ή αέριο. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην συμπύκνωση των υδρατμών που προέρχονται από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε υδρογόνο, την υγρασία του και από την υγρασία του αέρα καύσης. Στην συνέχεια, μέσω ενός εναλλάκτη αξιοποιούν την αισθητή θερμότητα των καυσαερίων, καθώς και την λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης λόγω συμπύκνωσης.

Βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται κυρίως με χρήση αερίων καυσίμων, διότι έχουν αυξημένη περιεκτικότητα σε υδρογόνο και δεν περιέχουν θείο που δημιουργεί διαβρωτικές ενώσεις.

Χρησιμοποιείται φυσικό αέριο με υψηλή περιεκτικότητα σε μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) ή εναλλακτικά υγραέριο (LPG). Ένα ποσοστό 50% έως 80% της λανθάνουσας θερμότητας μπορεί να ανακτηθεί, ενώ ο βαθμός απόδοσης λέβητα συμπύκνωσης μπορεί να είναι περίπου 12% αυξημένος, σε σχέση με αυτόν ενός συμβατικού. <sup>(16)</sup>

Συστήματα θέρμανσης χαμηλής θερμοκρασίας είναι ιδανικά για συνδυασμό με λέβητα συμπύκνωσης, γενικά μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε σύστημα ζεστού νερού έως 85°C.



Εικόνα Α.3. 2 Βαθμός απόδοσης λέβητα συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η απόδοση επίσης εξαρτάται από την θερμοκρασία επιστροφής του νερού, ιδανικά θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη και έχει εποχιακό χαρακτήρα λόγω της εξάρτησής της από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ο βαθμός απόδοσης μπορεί να φτάσει το 108% με καύσιμο φυσικό αέριο, ο υπολογισμός γίνεται με βάση την Κατώτερη Θερμογόνο Δύναμη (Hu), σε συμφωνία κοινών υπολογισμών για όλους τους λέβητες. <sup>(12) (17)</sup>

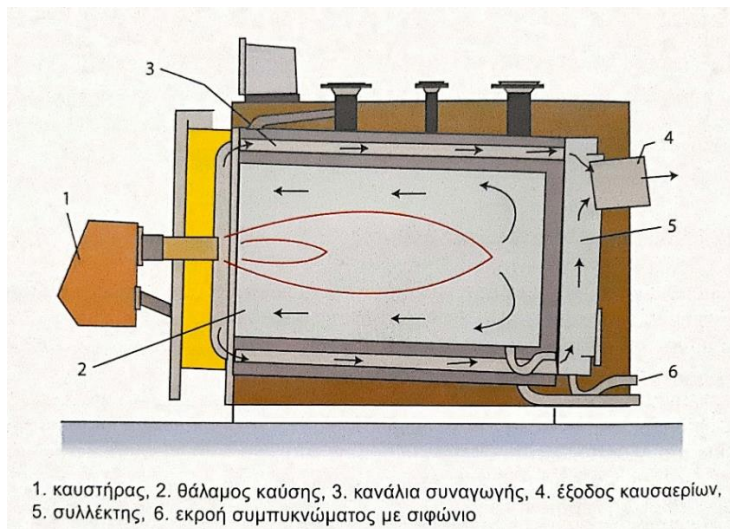
Έστω λέβητας φυσικού αερίου με βαθμό απόδοσης 90% και κατώτερη θερμογόνο δύναμη  $8130 \left(\frac{kcal}{m^3}\right)$ , όταν καταναλώνεται 1 m<sup>3</sup> καυσίμου αποδίδει 7319 kcal όπως προκύπτει από το γινόμενο (8130×0.9).

Για το ίδιο 1 m<sup>3</sup> καυσίμου, ένας λέβητας συμπύκνωσης με βαθμό απόδοσης 95% παράγει (8130×0.95) + 1032 = 8755 kcal, εκ των οποίων 1032 kcal προέρχονται από την συμπύκνωση υδρατμών των καυσαερίων.

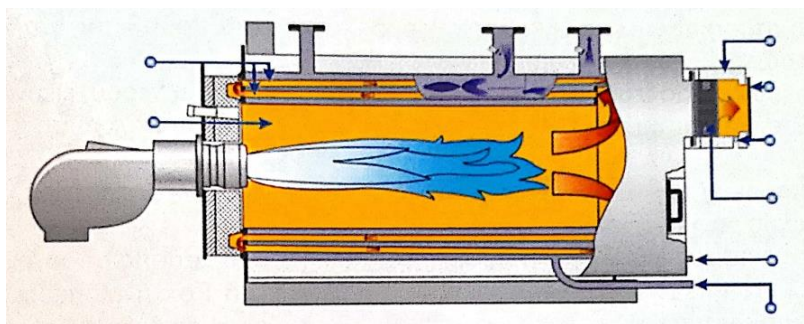
Επομένως προκύπτει συμβατικός βαθμός απόδοσης:

$$\frac{8755}{8130} 100\% = 108\%$$

Η συμπύκνωση των υδρατμών συντελεί σε έξοδο των καυσαερίων με μειωμένο ελκυσμό και σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία, η ψύξη τους οφείλεται στην απόδοση των ποσών θερμότητας που είχαν απορροφήσει από την καύση. Η συμπύκνωση γίνεται εντός του λέβητα ή σε εναλλάκτη και απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό του συστήματος ρύθμισης και δημιουργία συστήματος διαχείρισης των συμπυκνωμάτων. <sup>(4)</sup>



Εικόνα Α.3. 3 Ανάκτηση με συμπύκνωση εντός του λέβητα (4)



Εικόνα Α.3. 4 Ανάκτηση με συμπύκνωση σε εναλλάκτη (4)

### Πλεονεκτήματα χρήσης

Οι λέβητες συμπύκνωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση χώρων ή ζεστού νερού χρήσης, με εξοικονόμηση καυσίμου έως 20% σε σχέση με συμβατικούς λέβητες, παράγοντας ταυτόχρονα τα ίδια ποσά ενέργειας. Η εξοικονόμηση καυσίμου συνεπάγεται και ελαχιστοποίηση ρύπων οξειδίων του αζώτου και μονοξειδίου του άνθρακα ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ) λόγω καλύτερων συνθηκών

καύσης, σε προσαρμογή και με διατάξεις που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος. Είναι συστήματα με μεγάλο βαθμό απόδοσης και μικρότερες απώλειες. <sup>(6) (12) (16)</sup>

### Μειονεκτήματα χρήσης

Η συγκέντρωση συμπυκνωμάτων δημιουργεί την πρόσθετη απαίτηση διαχείρισής τους. Λόγω της όξινης φύσης των συμπυκνωμάτων τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή πρέπει να φέρουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση, ενώ η επιπλέον θερμότητα που θα πρέπει να παραληφθεί οδηγεί σε αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής. Το κόστος που επιφέρουν τα παραπάνω πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν για την επιλογή ενός λέβητα συμπύκνωσης, καθώς αν τα ανακτώμενα ποσά δεν επαρκούν υπάρχει δυσαναλογία παραγωγής ενέργειας και οικονομικής απόδοσης.

### 3.4 Η Χημεία της Καύσης στους Λέβητες

Η καύση είναι η εξώθερμη αντίδραση μετατροπής της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμική ενέργεια. Ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας καύσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε η ενέργεια που εκλύεται να είναι αξιοποιήσιμη. Η ένταση της καύσης εκφράζεται ως το πηλίκο της εκλυόμενης θερμικής ισχύος προς τον όγκο του θαλάμου καύσης. Σκοπός αξιοποίησης της καύσης είναι η παραγωγή και εκμετάλλευση της μέγιστης δυνατής θερμορροής. <sup>(14)</sup>

Ιδανικά η καύση είναι τέλεια, δηλαδή συντελείται στιγμιαία και παράγει μόνο διοξείδιο του άνθρακα και νερό ( $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$ ). Στην πραγματικότητα η καύση γίνεται σε πολλά στάδια και λόγω σύστασης του αέρα και των συνθηκών απαιτείται περίσσεια οξυγόνου για να επιτευχθεί τέλεια καύση. Η καύση κατά την οποία καταναλώνεται μόνο το απαραίτητο οξυγόνο που είναι αρκετό για την οξείδωση του καυσίμου καλείται στοιχειομετρική. <sup>(18)</sup>

$$L_o = L_{OT}(1 - w) \quad (4.1)$$

Όπου

$L_o$  υγρός αέρας απαραίτητος για την στοιχειομετρική καύση

$L_{OT}$  ξηρός αέρας απαραίτητος για την στοιχειομετρική καύση

$w$  υγρασία περιεχόμενη στον αέρα

Η σύσταση του αέρα κατά όγκο είναι 79% άζωτο και 21% οξυγόνο, κατά μάζα 76.79% άζωτο και 23.21% οξυγόνο. Εάν στη σύσταση του καυσίμου περιέχεται οξυγόνο, αυτό συμμετέχει στην καύση και αφαιρείται από το υπολογιζόμενο απαιτούμενο οξυγόνο για στοιχειομετρική καύση.

$$O_{2,απαιτούμενο} = 0,2321 L_{OT} \left( \frac{kg O_2}{kg καυσίμου} \right) \quad (4.2)$$

ή

$$O_{2,απαιτούμενο} = 0,21 L_{OT} \left( \frac{m^3 O_2}{Nm^3 καυσίμου} \right) \quad (4.3)$$

Όταν απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου από αυτήν που ορίζει η στοιχειομετρική καύση, τότε η καύση γίνεται με περίσσεια. Ο λόγος του αέρα στην περίπτωση περίσσειας προς τον απαιτούμενο για στοιχειομετρική καύση είναι ο λόγος αέρα καύσης ( $\lambda$ ) και αν είναι γνωστός συμμετέχει στον υπολογισμό της ποσότητας πραγματικά απαιτούμενου αέρα.

$$\lambda = \frac{21\%}{21\% - O_2\%} \quad (4.4)$$

$$L_T = \lambda L_{OT} \quad (4.5)$$

Όπου

$L_T$  ξηρός αέρας απαιτούμενος για καύση με περίσσεια

$$L = L_T(1 - w) \quad (4.6)$$

Όπου

$L$  υγρός αέρας απαιτούμενος για καύση με περίσσεια

Σημειώνεται, το περιεχόμενο οξυγόνο στα καυσαέρια υπολογίζεται, αν από το απαιτούμενο οξυγόνο για καύση με περίσσεια αφαιρεθεί το απαιτούμενο οξυγόνο για στοιχειομετρική καύση.

Η ύπαρξη απωλειών λόγω ατελούς καύσης και απωλειών θερμότητας κατά τη μεταφορά, οδηγούν στην ανάγκη κατανάλωσης μεγαλύτερου ποσού καυσίμου για την παραγωγή του επιθυμητού ποσού αξιοποιήσιμης θερμότητας.

Όταν η καύση είναι ατελής, μέρος της χημικής ενέργειας του καυσίμου παραμένει ανεκμετάλλευτο, κατά την ατελή καύση παρατηρείται ύπαρξη μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στα καυσαέρια. Η δημιουργία κατάλληλων συνθηκών καύσης γίνεται με αύξηση της παροχής αέρα και επαρκή ανάμιξή του με το καύσιμο, καθώς και με καλή μόνωση για την αποφυγή απωλειών θερμότητας.

Απώλειες δημιουργούνται και λόγω της εξόδου των καυσαερίων με υψηλή θερμοκρασία, στα καυσαέρια δημιουργείται υπέρθερμος υδρατμός λόγω της οξείδωσης του υδρογόνου που



περιέχεται στο καύσιμο και της υγρασίας καυσίμου και αέρα. Ποσό αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας λόγω ατμοποίησης απορροφάται από τους υδρατμούς οδηγώντας στις απώλειες λόγω θερμότητας καυσαερίων. Η χρήση εναλλακτών για ανάκτηση αυτών των ποσών θερμότητας αποτελούν την κύρια μέθοδο μείωσης απωλειών από θερμά καυσαέρια. <sup>(4) (19)</sup>

### 3.4.1 Καύσιμα

Απαραίτητα για την καύση είναι το οξυγόνο και ένα μέσο ανάφλεξης, ώστε να πραγματοποιηθεί η αντίδραση οξειδωσης μεταξύ καυσίμου και οξυγόνου. Από την τέλεια καύση του καυσίμου απελευθερώνονται ποσά θερμότητας, μέτρο αυτού αποτελεί η Θερμογόνος Δύναμη. Ανάλογα με την τελική κατάσταση του νερού που παράγεται κατά την καύση, διακρίνουμε την Ανώτερη Θερμογόνου Δύναμη (Hu) όταν το νερό βρίσκεται σε υγρή τελική κατάσταση και την Κατώτερη Θερμογόνου Δύναμη (Ho) όταν το νερό βρίσκεται σε ατμοποιημένη τελική κατάσταση. <sup>(14)</sup>

### 3.4.2 Καυσαέρια

Κύριοι ρύποι που εκλύονται στα καυσαέρια είναι η τέφρα, η αιθάλη, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>), τα οξειδία του θείου (SO<sub>x</sub>) και άκαυστοι υδρογονάνθρακες (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>). Η σύνθεση και ποιότητα του καυσίμου, οι συνθήκες της καύσης, ο βαθμός απόδοσης και η γεωμετρία της εστίας επηρεάζουν σημαντικά τις εκπομπές και την συμπεριφορά αυτών των ρύπων.

Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων σχετίζεται άμεσα με τον βαθμό απόδοσης και τις απώλειες της καύσης, ενώ όσο αυξάνεται απελευθερώνονται συστατικά των καυσαερίων που αντιδρούν μεταξύ τους και με στοιχεία στο περιβάλλον και δημιουργούν βλαβερές ενώσεις. Ορίζουμε την θερμοκρασία υγροποίησης των περιεχόμενων συστατικών των καυσαερίων ως σημείο δρόσου (dew point). <sup>(20)</sup>

$$T_{dew} = \frac{4077.9}{23.6448 - \ln(p_D)} - 236.67 \quad (4.7)$$

Όπου

$T_{dew}$  η θερμοκρασία δρόσου των καυσαερίων

$P_d$  η μερική πίεση ατμού

Η εμφάνιση αιθάλης είναι ένδειξη υπερφόρτισης του θαλάμου καύσης, ενώ η συγκέντρωση τέφρας με βάση το είδος του καυσίμου, εξαρτάται από την ποσότητα και την σύσταση του καυσίμου όταν αυτό είναι υγρό, ενώ εξαρτάται από τον τύπο του λέβητα και το είδος της εστίας όταν το καιάμενο καύσιμο είναι στερεό. Η τέφρα και η αιθακομίχλη που δημιουργείται από τον συνδυασμό της με διοξείδιο του θείου, μπορούν να αντιμετωπιστούν με χρήση ηλεκτροστατικών φίλτρων. <sup>(14)</sup>

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι παράγωγο της ατελούς καύσης άνθρακα και η συγκέντρωσή του εξαρτάται από τις συνθήκες της καύσης, κυρίως την θερμοκρασία, το λόγο ανάμιξης αέρα και καυσίμου, τον χρόνο παραμονής και τον χρόνο αντίδρασης. Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι τοξικό αέριο, ιδιαίτερα επικίνδυνο και δεν γίνεται εύκολα αντιληπτό καθώς είναι άοσμο και άχρωμο. Από την ατελή καύση προκύπτουν και άκαυστοι υδρογονάνθρακες, κυριότερη πηγή τους είναι τα καυσαέρια.

Τα οξείδια του αζώτου εμφανίζονται με τρεις μηχανισμούς, ως άμεσο  $\text{NO}_x$ , θερμικό  $\text{NO}_x$  και  $\text{NO}_x$  από την καύση καυσίμου. Κυρίως παράγεται μονοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}$ ) λόγω της αντίδρασης του αζώτου που περιέχεται στην ατμόσφαιρα με το οξυγόνο, σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών ( $>1100\text{ }^\circ\text{C}$ ). Το μονοξείδιο του αζώτου στον αέρα μετατρέπεται σε διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ), τα οξείδια του αζώτου είναι άχρωμα και τοξικά αέρια. Αντιμετώπιση των υψηλών συγκεντρώσεων σε συστήματα παραγωγής θερμότητας γίνεται με χρήση αμοπαγωγών χαμηλών εκπομπών οξειδίων του αζώτου και μέσω τροποποίησης των συνθηκών καύσης, όπως η θερμοκρασία και ο λόγος αέρα και καυσίμου.

Το θείο ( $\text{S}_2$ ) είναι αδρανές στοιχείο, όμως από την αντίδρασή του με οξυγόνο δημιουργεί οξείδια του θείου που είναι ρυπαντές. Τα οξείδια του θείου προέρχονται κυρίως από την καύση άνθρακα και πετρελαίου, επομένως κύρια πηγή τους είναι τα συστήματα θέρμανσης και οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας. Η μείωση της παραγωγής τους μπορεί να επιτευχθεί με αποθείωση του καυσίμου κατά την διύλιση ή αποθείωση με φίλτρα κατά την καύση.

Η ύπαρξη θείου στα καύσιμα οδηγεί σε ύπαρξη οξειδίων τους στα καυσαέρια, ειδικότερα οξείδωση του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2 + \text{O}_2$ ) οδηγεί στην παραγωγή τριοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_3$ ), το τριοξείδιο του θείου αντιδρά με τους υδρατμούς ( $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) σχηματίζοντας θειικό οξύ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) που είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό και τοξικό.

Ορίζεται όξινο σημείο δρόσου (acid dew point) η υψηλότερη θερμοκρασία στην οποία το υγρό θειικό οξύ βρίσκεται σε ισορροπία με τους ατμούς θειικού οξέος (σημείο αλλαγής φάσης) και αυξάνεται κατά αναλογία με την αύξηση συγκέντρωσης τριοξειδίου του θείου και στερεών σωματιδίων στα καυσαέρια.

## **Μέρος Β΄**

## 4. Βιομηχανικού Τύπου Αναλυτής Καυσαερίων

Ο αναλυτής καυσαερίων βιομηχανικού τύπου είναι συσκευή, που φέρει τη δυνατότητα μέτρησης, ανάλυσης και αποθήκευσης των τιμών εκπομπών καυσαερίων σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας μέσω καύσης. Αναλυτές καυσαερίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις σε βιομηχανικούς κινητήρες, κινητήρες πλοίων, αεριοστρόβιλους, λέβητες, καυστήρες και για την μέτρηση εκπομπών σε βιομηχανίες.

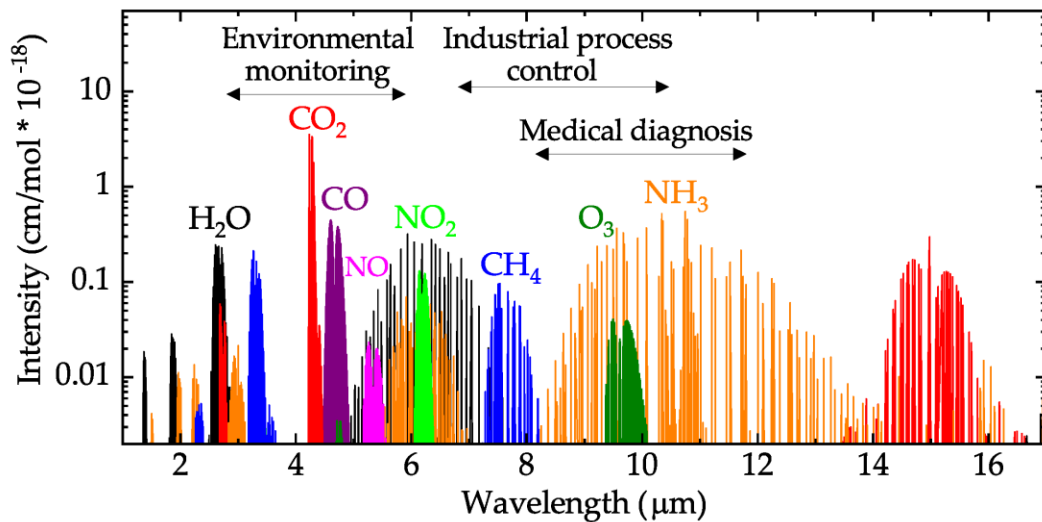
Η χρήση του είναι κυρίως υποστηρικτική, στοχεύει στον ακριβή έλεγχο και τον προσδιορισμό απόδοσης και απωλειών του συστήματος. Οι μετρήσεις λειτουργούν ως ένα μέτρο για την προσαρμογή της εγκατάστασης, ενώ ο έλεγχος γίνεται σε συμφωνία με κατάλληλα πρότυπα και την ισχύουσα νομοθεσία. Εκτός της σύστασης των αερίων προϊόντων των καυσαερίων, συχνά μετρούνται και μεγέθη όπως η παροχή, η πίεση, η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα του ρεύματος καυσαερίων.

### 4.1 Βιομηχανικού Τύπου Αναλυτής NOVAPlus της MRU

Η αρχή λήψης μετρήσεων του αναλυτή NOVAPlus βασίζεται στη λήψη δείγματος των καυσαερίων μέσω του αισθητηρίου και με τη χρήση ενσωματωμένης αντλίας. Το δείγμα καθαρίζεται και διαχωρίζεται από τα συμπυκνώματά του με τη χρήση ενός φίλτρου, στη συνέχεια αναλύεται στους αισθητήρες της συσκευής, ηλεκτροχημικούς (ECS) και επιλεκτικής απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας (NDIR). Διαφορά πίεσης (draft) και θερμοκρασία μετρούνται στην άκρη του αισθητηρίου.<sup>(20)</sup>

- **Ηλεκτροχημικοί Αισθητήρες (ECS: Electro-Chemical Sensors)**  
Χρησιμοποιούνται αμπερομετρικοί αισθητήρες για την μέτρηση συγκεντρώσεων υδρογόνου ( $H_2$ ), οξυγόνου ( $O_2$ ), μονοξειδίου του άνθρακα ( $CO$ ), υδρόθειου ( $H_2S$ ) και οξειδίων του αζώτου ( $NO_x$ , κυρίως  $NO$  και  $NO_2$ ). Οι αυξημένες συγκεντρώσεις ενός αερίου ή στοιχείου μπορεί να επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων άλλων στοιχείων που συμμετέχουν στα καυσαέρια (σε επίπεδο ppm), ενώ η ρύπανση στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων μπορεί να προκαλέσει μείωση της ευαισθησίας τους ή φραγμό τους. Ο χρόνος ζωής των ηλεκτροχημικών αισθητήρων εξαρτάται από το είδος χρήσης τους, τυπικά αναμένεται στα 2 χρόνια για το οξυγόνο, 2 με 3 χρόνια για το μονοξείδιο του άνθρακα και 3 χρόνια για οξείδια του αζώτου.<sup>(21)</sup>
- **Αισθητήρας επιλεκτικής απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας (NDIR: Non Dispersive Infrared)**  
Κάποια αέρια απορροφούν ακτινοβολία σύμφωνα με τον Νόμο Kirchhof, που ορίζει πως ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας ( $\epsilon$ ) του αερίου είναι ίσος με τον βαθμό

απορρόφησης ακτινοβολίας (A) από το αέριο. Η ακτινοβολία αυτή εκπέμπεται και απορροφάται σε συγκεκριμένα μήκη κύματος τα οποία διαφέρουν για διάφορα αέρια. <sup>(4)</sup> Οι αισθητήρες NDIR εκμεταλλεύονται την αρχή επιλεκτικής απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας μετρούν τις συγκεντρώσεις CO, CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub> στα καυσαέρια με ακρίβεια ±5%. Ένα πηνίο εκπέμπει την υπέρυθη ακτινοβολία, τα αέρια απορροφούν ακτινοβολία που βρίσκεται στο μήκος κύματος της ζώνης απορρόφησής τους. <sup>(22)</sup>



Εικόνα Β.4. 1 Μήκη κύματος απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας (22)

- Διαφορά πίεσης Draft

Η διαφορά πίεσης μεταξύ της ατμοσφαιρικής πίεσης και της πίεσης που επικρατεί στον αγωγό καυσαερίων. <sup>(23)</sup> Μια σημαντική διαφορά πίεσης αυξάνει το ρυθμό της καύσης και την κυκλοφορία και συνεπώς το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από τα καυσαέρια στο λέβητα, βελτιώνοντας την απόδοση. Μετράται σε hPa (1 hPa = 10<sup>2</sup> Pa).

#### 4.1.1 Επιλογές και απαραίτητες ρυθμίσεις

Ο αναλυτής προσαρμόζεται σύμφωνα με πρότυπα ως προς την χρήση και τους αισθητήρες του (EN 50379, VDI 4206) και ως προς τον έλεγχο ασφαλούς λειτουργίας (EN 61010, DIN VDE 0701). Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του γίνεται σύμφωνα με τα DIN 31000/VDE 1000 και UVV=VBG 4, ενώ η λειτουργία του υπό χαμηλή τάση και η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα ακολουθούν αντίστοιχα τα 89/336/EWG και 3/23/EWG. <sup>(20)</sup>

Η συσκευή φέρει ασύρματο φορητό ελεγκτή (Remote Control Unit RCU) που συνδέεται με τη βάση με πρωτόκολλο Bluetooth. Το αισθητήριο (gas sampling probe) που θα λάβει το δείγμα μετρήσεων μπορεί να επιλεγεί από ποικιλία διαθέσιμων από την MRU, σε κάθε περίπτωση φέρει σταθεροποιητικό εξάρτημα (probe cone) και συνδέεται σε αγωγό με κατάλληλα βύσματα σύνδεσης με τη βάση στο άκρο του.

Απαραίτητες ρυθμίσεις πριν την χρήση μπορούν να γίνουν μέσω του ασύρματου ελεγκτή, αυτές αφορούν επιλογές για τη διενέργεια μετρήσεων (measurements), την αποθήκευση στη μνήμη και διαχείριση μετρήσεων (memory) και επιπλέον ρυθμίσεις για τον αναλυτή ή τον ελεγκτή (extras). Για την διαδικασία των μετρήσεων μπορεί να επιλεγθεί σύστημα μονάδων και να ενεργοποιηθεί η αναζήτηση μέγιστης θερμοκρασίας στη ροή των καυσαερίων (core flow search) για βέλτιστη τοποθέτηση του αισθητηρίου στον αγωγό καυσαερίων.

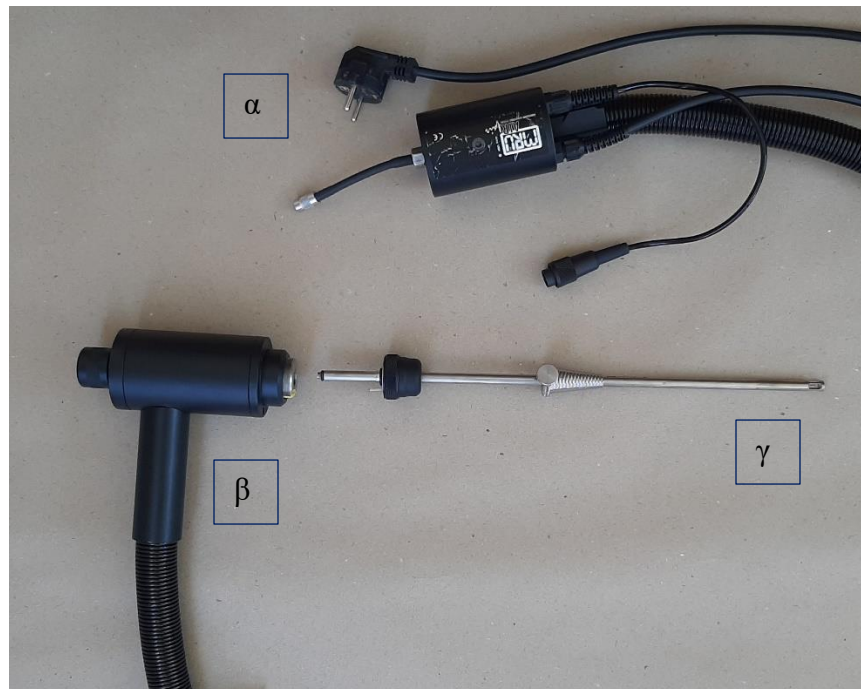
Στο πρόγραμμα μπορεί να ρυθμιστεί το όριο του μονοξειδίου του άνθρακα σε ppm για προστασία του αισθητήρα CO, διαθέσιμες τιμές μπορούν να επιλεγθούν, ανά 100 ppm, από 300 έως 4000 ppm. Δίνεται επίσης δυνατότητα επιλογής του καυσίμου, του ονόματος προγράμματος και της διάταξης των παραθύρων μετρήσεων σε προβολή. Για τη φορητή μονάδα διατίθενται ρυθμίσεις φωτεινότητας, μεγέθυνσης αντικειμένων στην LCD οθόνη, τοπικές ρυθμίσεις ώρας και ημερομηνίας, ενώ υπάρχει δυνατότητα ενεργοποίησης χρήσιμων σύντομων μηνυμάτων για αργάριους χρήστες.



Εικόνα Β.4. 2 Ο Βιομηχανικού Τύπου Αναλυτής Καυσαερίων NOVAPlus της MRU (Φωτογραφία)



Εικόνα Β.4. 3 Ασύρματος Φορητός Ελεγκτής RCU (Φωτογραφία)



Εικόνα Β.4. 4 α) Άκρα σύνδεσης αγωγού με τον αναλυτή και την παροχή ρεύματος, β) Άκρο σύνδεσης με το γ)αισθητήριο (Φωτογραφία)

#### 4.1.2 Διαδικασία λήψης μετρήσεων

Πριν τη χρήση απαιτείται σχολαστικός έλεγχος του εξοπλισμού, αν ο αναλυτής μετακινήθηκε μεταξύ ακραίων θερμοκρασιών θα πρέπει να επιτραπεί απαραίτητο χρονικό διάστημα σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία για εξισορρόπηση και αποφυγή υγροποίησης στο εσωτερικό του αναλυτή. Ο αναλυτής θα τοποθετηθεί κοντά στην εγκατάσταση σε σημείο που θα πρέπει να αποφασισθεί πριν την εκκίνησή του, ο ασύρματος φορητός ελεγκτής (RCU) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για απομακρυσμένο έλεγχο της διαδικασίας, στην απόσταση εμβέλειάς του. Πριν την ενεργοποίηση του αναλυτή συνδέονται σε αυτόν οι αισθητήρες που τον συνοδεύουν. <sup>(20)</sup>

Ο λέβητας στον οποίο θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις θα πρέπει να τεθεί σε λειτουργία νωρίτερα, ώστε να επιτευχθεί θερμική ισορροπία. Η βέλτιστη μέτρηση γίνεται για τη μέγιστη δυνατή θερμοκρασία καυσαερίων στη ρύθμιση με την οποία λειτουργεί ο λέβητας, ενώ πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να μην περάσει αυτόματα η εγκατάσταση εκτός λειτουργίας πριν ολοκληρωθούν οι μετρήσεις.

Ενεργοποιώντας τη βάση του αναλυτή, εκκινείται αυτόματα η διαδικασία μηδενισμού (zeroing), κατά την οποία ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στο κύκλωμα του αναλυτή μέσω ειδικής αντλίας (zero gas inlet) και ταυτόχρονα διεξάγονται διαγνωστικοί έλεγχοι για διαρροές, για τα αισθητήρια και για την κατάσταση της μπαταρίας. Η διαδικασία διαρκεί 1 έως 3 λεπτά, αυτός ο χρόνος επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και την κατάσταση των αισθητηρίων. Ελάχιστος χρόνος μηδενισμού για αποτελεσματικές μετρήσεις εκτιμάται στο 1,5 λεπτό. Τυχόν σφάλματα θα εμφανιστούν με σχετικό μήνυμα στην οθόνη του ελεγκτή.

Μετά τον μηδενισμό και αφού έχουν αντιμετωπιστεί τυχόν σφάλματα που μπορεί να προκύψουν, επιλέγεται το πρόγραμμα της μέτρησης. Μπορεί να γίνει επιλογή από διαθέσιμα προγράμματα με βάση το καύσιμο του λέβητα, ενώ μπορεί να δημιουργηθεί προσαρμοσμένο πρόγραμμα για τις ανάγκες της εγκατάστασης. Στη συνέχεια, το αισθητήριο τοποθετείται στη ροή των καυσαερίων από άνοιγμα στον αγωγό, αν δεν υπάρχει τέτοιο άνοιγμα μπορεί να δημιουργηθεί πριν την εκκίνηση λειτουργίας της εγκατάστασης, με διαστάσεις επαρκείς για την εισαγωγή και προσαρμογή του αισθητηρίου με το εξάρτημα σταθεροποίησης (cone).

Εφόσον έχει επιλεγεί εκ των προτέρων, στην οθόνη του φορητού ελεγκτή εμφανίζεται το μενού “core flow search”, για την εύρεση του βέλτιστου σημείου εισαγωγής του αισθητηρίου. Το αισθητήριο τοποθετείται προσεκτικά στη ροή μέχρι να υποδειχθεί από τον ελεγκτή το σημείο μέγιστης θερμοκρασίας των καυσαερίων, σε αυτή τη θέση θα ακινητοποιηθεί το αισθητήριο με τον κώνο και στη συνέχεια χειροκίνητα δίνεται η εντολή εκκίνησης των μετρήσεων μέσω του ελεγκτή, στον οποίο θα εμφανιστούν οι τιμές σε πραγματικό χρόνο.

Όταν οι τιμές των μετρήσεων σταθεροποιηθούν, η διαδικασία μπορεί να διακοπεί. Οι τελικές τιμές παραμένουν στην οθόνη του ελεγκτή και στην βραχυπρόθεσμη μνήμη του έως ότου αυτός απενεργοποιηθεί. Οι μετρήσεις μπορούν να αποθηκευτούν στη μνήμη με κατάλληλα στοιχεία



αναγνώρισης, που καταχωρούνται από τον χρήστη. Ο αναλυτής φέρει θερμικό εκτυπωτή και οι μετρήσεις μπορούν να εκτυπωθούν επιτόπου πατώντας το κουμπί “print” στον φορητό ελεγκτή.

Το αισθητήριο απομακρύνεται από την ροή όταν διακοπεί η λήψη των μετρήσεων, αφήνεται σε ατμοσφαιρικό αέρα και αποφεύγεται η επαφή καθώς έχει θερμομανθεί σε υψηλή θερμοκρασία από την επαφή του με τα καυσαέρια. Στη συνέχεια καθαρίζεται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και αποσυνδέεται από τον αναλυτή για ασφαλή αποθήκευση μέχρι την επόμενη χρήση του.

Σημειώνεται πως στην περίπτωση που η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα υπερβεί τις καθορισμένες οριακές τιμές, θα εκκινηθεί αυτόματα η λειτουργία της ενσωματωμένης αντλίας αποκαθαρισμού του. Η λειτουργία της αντλίας μπορεί να διακοπεί από τον φορητό ελεγκτή, ενώ αν κριθεί απαραίτητο στο τέλος μιας μέτρησης μπορεί να γίνει αποκαθαρισμός του μονοξειδίου του άνθρακα (CO purging).

Ο αναλυτής δεν έχει σχεδιαστεί για συνεχόμενες λήψεις μετρήσεων, ένα χρονικό διάστημα (15’-30’) απαιτείται πριν πραγματοποιηθεί επόμενη μέτρηση, ενώ πολλαπλές συνεχόμενες μετρήσεις μπορεί να οδηγήσουν σε αναξιόπιστα αποτελέσματα.

## 5. Μετρήσεις

### 5.1 Πειραματική Διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε σε όλες τις τοποθεσίες λήψης μετρήσεων ήταν η ίδια και με πιστή προσαρμογή σε όσα περιγράφει το προηγούμενο κεφάλαιο. Έγινε ανάλυση καυσαερίων σε πέντε τοποθεσίες, σε τρεις λέβητες με καύσιμο πετρέλαιο, έναν λέβητα φυσικού αερίου, έναν επίτοιχο λέβητα φυσικού αερίου τοποθετημένο σε εξωτερικό χώρο και έναν λέβητα με καύσιμο pellet.

Όλοι οι λέβητες είχαν τεθεί σε λειτουργία νωρίτερα, ώστε να επιτευχθεί θερμική ισορροπία πριν ξεκινήσει η λήψη των μετρήσεων. Λαμβάνεται υπόψη η εποχιακή λειτουργία, όλες οι μετρήσεις έγιναν τον Απρίλιο του 2021 σε διάστημα δύο εβδομάδων και οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος στον χώρο του λεβητοστασίου μετρήθηκαν από το θερμοστοιχείο στην βάση του αναλυτή.

Χρησιμοποιήθηκε το μενού “core flow search”, για την εύρεση του βέλτιστου σημείου εισαγωγής του αισθητηρίου, όπου η θερμοκρασία του καυσαερίου στον αγωγό ήταν μέγιστη. Αφού σταθεροποιήθηκε το αισθητήριο στην θέση που υπέδειξε το πρόγραμμα, παρακολούθηθηκαν προσεκτικά οι μετρήσεις έως την σταθεροποίηση των τιμών, όταν και διακόπηκε χειροκίνητα το πρόγραμμα.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του δείγματος κατέγραψαν συγκεντρώσεις οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα, μονοξειδίου του άνθρακα, μονοξειδίου του αζώτου, διοξειδίου του αζώτου, διοξειδίου του θείου, υδρόθειου και μεθανίου.

Επιπρόσθετα, από τον αναλυτή γίνεται μέτρηση της θερμοκρασίας του καυσαερίου ( $T_{gas}$ ), της θερμοκρασίας αέρα στο χώρο ( $T_{air}$ ) και γίνονται επιτόπου υπολογισμοί Απωλειών Θερμότητας λόγω καυσαερίων επί τοις εκατό (Losses NCV), Εσωτερικού βαθμού απόδοσης επί τοις εκατό (eff. NCV), σημείου δρόσου των καυσαερίων (Dewpoint), λόγου αέρα-καυσίμου ( $\lambda$ ), ποσοστού αέρα σε περίσσεια και διαφοράς πίεσης στον αγωγό (Draft).

#### 5.1.2 Παρατηρήσεις για τις Τοποθεσίες των Μετρήσεων

- **Πετρέλαιο 1** (09.04.2021 18:52:33)  
Οικιακός χαλύβδινος υπερπρεστικός λέβητας σε πολυκατοικία.
- **Πετρέλαιο 2** (20.04.2021 08:36:16)  
Χαλύβδινος λέβητας, καύση γίνεται με καύσιμο αποθειωμένο πετρέλαιο. Χρήση για θέρμανση μηχανουργείου. Ο λέβητας έχει βλάβη, παρουσιάζει διαρροές σε σωληνώσεις.

- **Πετρέλαιο 3** (20.04.2021 10:26:29)  
Βιομηχανικός λέβητας θερμού νερού, μπορεί να τροποποιηθεί για λειτουργία με καυστήρα φυσικού αερίου. Καύση γίνεται με καύσιμο αποθειωμένο πετρέλαιο.
- **Φυσικό Αέριο 1** (15.04.2021 10:49:19)  
Βιομηχανικός λέβητας θερμού νερού, έχει τροποποιηθεί για καύση με φυσικό αέριο μπορεί να λειτουργήσει με πετρέλαιο όπως ο λέβητας πετρελαίου 3. Την ημέρα των μετρήσεων η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν αρκετά υψηλή, ήταν δύσκολο να επιτευχθεί θερμική ισορροπία καθώς δεν υπήρχε ζήτηση στο δίκτυο για κάλυψη θερμικών αναγκών.
- **Φυσικό Αέριο 2** (15.04.2021 18:12:05)  
Οικιακός επίτοιχος λέβητας τοποθετημένος σε κλειστό διαμορφωμένο χώρο εκτός του διαμερίσματος. Ο αγωγός των καυσαερίων που εξέρχεται του χώρου αυτού, είναι μικρού μήκους με αποτέλεσμα η έξοδος των καυσαερίων να είναι εκτεθειμένη στον ατμοσφαιρικό αέρα.
- **Pellet** (20.04.2021 16:49:04)  
Λόγω αδυναμίας εύρεσης λέβητα καύσης Βιομάζας με δευτερεύον κύκλωμα θέρμανσης νερού, οι μετρήσεις έγιναν σε αερόθερμο λέβητα pellet. Θεωρούμε πως θα χρησιμοποιηθεί για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης και ελέγχουμε ποια θα ήταν η απόδοσή του σε ανάκτηση από τα καυσαερίά του.



Εικόνα Β.5. 1 Φυσικό Αέριο 1



Εικόνα Β.5. 2 Πετρέλαιο 2

## 5.2 Δεδομένα

### 5.2.1 Δεδομένα Διαθέσιμα από τις Εγκαταστάσεις

Πίνακας Β.5. 1 Ωφέλιμη ισχύς λέβητα

	Q (kcal/h)	Q (kW)
<b>Πετρέλαιο 1</b>	90000	105
<b>Πετρέλαιο 2</b>	300000	349
<b>Πετρέλαιο 3</b>	1332000	1549
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	1168000	1358
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	26225	30.50
<b>Pellets</b>	25000	29.05

Ισχύει  $1 \text{ kW} = 859.84 \text{ kcal/h}$

### 5.2.2 Μετρήσεις από τον αναλυτή

Πίνακας Β.5. 2 Μετρήσεις παραμέτρων καυσαερίου όπως δίνονται απευθείας από τον αναλυτή καυσαερίων

	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	H <sub>2</sub> S (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)
<b>Πετρέλαιο 1</b>	4.03	12.09	9	78	1	79	26	7	150
<b>Πετρέλαιο 2</b>	6.33	10.25	7	61	2	63	0	5	160
<b>Πετρέλαιο 3</b>	2.25	13.34	28	94	0	94	0	8	180
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	2.74	9.84	4	61	2	63	0	7	100
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	14.37	3.51	23	21	4	25	0	2	180
<b>Pellets</b>	19.42	1.69	1240	8	2	10	1	0	200

Πίνακας Β.5. 3 Μετρήσεις απαραίτητων μεγεθών καυσαερίου όπως δίνονται απευθείας από τον αναλυτή καυσαερίων

	T <sub>gas</sub> (°C)	T <sub>air</sub> (°C)	Losses NCV (%)	eff. NCV (%)	Dewpoint (°C)	λ	Exc. Air (%)	Draft (hPa)
<b>Πετρέλαιο 1</b>	211.8	16.2	9.2	90.8	47.8	1.24	24	-0.04
<b>Πετρέλαιο 2</b>	119.8	17.9	5.5	94.5	45.2	1.43	43	-0.02
<b>Πετρέλαιο 3</b>	272.3	22.8	10.8	89.2	49.4	1.12	12	-0.03
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	185.7	28.1	7.1	92.9	55.4	1.15	15	-0.04
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	148	20.3	13.9	86.1	39	3.18	218	-0.04
<b>Pellets</b>	128.4	22	53.1	46.9		13.58		-0.04

Κατά την ελληνική νομοθεσία (ΚΥΑ 189533, Παράρτημα 2) <sup>(15)</sup>, οι μετρούμενες τιμές μονοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου στα καυσαέρια πρέπει να ανάγονται σε οξυγόνο αναφοράς (O<sub>2ref</sub>) 3% για καύσιμο πετρέλαιο και φυσικό αέριο, ενώ για καύση βιομάζας γίνεται αναγωγή σε οξυγόνο 10%.

$$CO = CO_{\text{μετρ}} \frac{21 - O_{2\text{ref}}}{21 - O_{2\text{μετρ}}} \quad (5.1)$$

$$NO_x = NO_{x\text{μετρ}} \frac{21 - O_{2\text{ref}}}{21 - O_{2\text{μετρ}}} \quad (5.2)$$

Πίνακας Β.5. 4 Μετρήσεις παραμέτρων καυσαερίου με ανηγμένες τιμές CO, NOx σε οξυγόνο αναφοράς

αναγωγή σε O <sub>2</sub> ref%	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	H <sub>2</sub> S (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	ref.
<b>Πετρέλαιο 1</b>	4,03	12,09	9,55	82,73	1,06	83,79	26	7	150	3%
<b>Πετρέλαιο 2</b>	6,33	10,25	8,59	74,85	2,45	77,30	0	5	160	3%
<b>Πετρέλαιο 3</b>	2,25	13,34	26,88	90,24	0,00	90,24	0	8	180	3%
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	2,74	9,84	3,94	60,13	1,97	62,10	0	7	100	3%
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	14,37	3,51	62,44	57,01	10,86	67,87	0	2	180	3%
<b>Pellets</b>	19,42	1,69	8632,91	55,70	13,92	69,62	1	0	200	10%

Στην ίδια απόφαση <sup>(15)</sup> ορίζονται οι οριακές τιμές παραμέτρων του καυσαερίου λεβητών (Πίνακας 1 και 2 της απόφασης).

**ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ ΛΕΒΗΤΩΝ  
ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΕΣΤΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ**

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΟΡΙΑΚΗ ΤΙΜΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ	ΟΡΙΑΚΗ ΤΙΜΗ ΑΕΡΙΑ ΚΑΥΣΙΜΑ
Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή απωλειών θερμότητας λόγω θερμών καυσαερίων, σε %	15	15
Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της περιεκτικότητας κατ' όγκο των καυσαερίων σε μονοξειδίο του άνθρακα (CO) ανηγμένη σε οξυγόνο αναφοράς 3%, σε ppm.	90	90
Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της περιεκτικότητας κατ' όγκο των καυσαερίων σε οξειδία του αζώτου (NOx) ανηγμένη σε οξυγόνο αναφοράς 3%, σε ppm.	150	150 για Υγραέριο 125 για Φυσικό Αέριο
Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του Δείκτη αιθάλης, κατά Bacharach.	1	1 για Υγραέριο 0 για Φυσικό Αέριο
Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της περιεκτικότητας των καυσαερίων σε οξυγόνο (O <sub>2</sub> ), σε % κ.ο. (Ισχύει μόνο για πιεστικούς καυστήρες)	7	7

Εικόνα Β.5. 3 Οριακές τιμές παραμέτρων καυσαερίου λεβητών όπως δίνονται από την ΚΥΑ 189533 (15)

Μέθοδος τροφοδοσίας	Ονομαστική ισχύς	Οριακές τιμές εκπομπών ρύπων (εκφρασμένες σε mg/m <sup>3</sup> και ανηγμένες σε 10 % O <sub>2</sub> ) [τιμές εκφρασμένες σε ppm και ανηγμένες σε 10 % O <sub>2</sub> ]				Βαθμός Απόδοσης
		CO	OGC (Ολικός αέριος οργανικός άνθρακας)	Σωματίδια	NO <sub>x</sub> (εκφρασμένα ως NO <sub>2</sub> )	
	(kW)					%
Χειροκίνητη	< 50	5000 [4000]	150 [91]	150	340 [166]	η = 67 + 6log Q <sub>n</sub> , όπου Q <sub>n</sub> είναι η ονομαστική ισχύς του λέβητα σε kW.
	50 – 150	2500 [2000]	100 [61]	150		
	150 - 300	1200 [960]	100 [61]	150		
Αυτόματη	< 50	3000 [2400]	100 [61]	150		
	50 – 150	2500 [2000]	80 [49]	150		
	150 - 300	1200 [960]	80 [49]	150		

Εικόνα Β.5. 4 Οριακές τιμές παραμέτρων καυσαερίων λέβητων Βιομάζας όπως δίνονται από το πρότυπο EN 303-05, για την κλάση 3 (15)

## 5.3 Επεξεργασία Μετρήσεων

### 5.3.1 Μεθοδολογία Επεξεργασίας

Η μεθοδολογία με την οποία επεξεργάστηκαν μετρήσεις και δεδομένα προέκυψε από συνδυασμό της στοιχειομετρίας της καύσης για τον υπολογισμό απαραίτητων μεγεθών που προέρχονται από την λειτουργία του κάθε λέβητα, με την μεθοδολογία ε-NTU για την επίλυση του εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας.

Γνωστά μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν είναι η ωφέλιμη ισχύς  $\dot{Q}_{\omega\phi}$  όπως λαμβάνεται από τα στοιχεία του κάθε εξεταζόμενου λέβητα και από τις μετρήσεις με τον βιομηχανικό αναλυτή καυσαερίων, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{NCV}$ , το ποσοστό συμμετοχής CO<sub>2</sub> στα καυσαέρια, ο λόγος αέρα-καυσίμου λ και η θερμοκρασία του καυσαερίου T<sub>gas</sub>.

Απαραίτητα μεγέθη για τους υπολογισμούς λήφθηκαν από αξιόπιστες πηγές. Στις περιπτώσεις που έγινε χρήση πινάκων και όπου αυτό ήταν απαραίτητο τα μεγέθη υπολογίστηκαν από γραμμική παρεμβολή. Αποφεύγεται η χρήση διαγραμμάτων όπου αυτό είναι δυνατόν για να ελαχιστοποιηθεί

τυχόν σφάλμα ανάγνωσης. Τυχόν πειραματικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν περιέχονται στην εργασία και συνοδεύονται από την σχετική βιβλιογραφική αναφορά.

Συγκεκριμένα, οι τιμές Κατωτέρας θερμογόνου δύναμης λήφθηκαν από πίνακες <sup>(14)</sup>, οι τιμές θερμοχωρητικότητας για τα καυσαέρια πετρελαίου και φυσικού αερίου <sup>(4)</sup>, καθώς και για το νερό <sup>(1)</sup> λαμβάνονται από πίνακες με χρήση γραμμικής παρεμβολής για την κατάλληλη θερμοκρασία, ομοίως και η πυκνότητα των καυσαερίων του φυσικού αερίου <sup>(4)</sup>, ενώ η θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων λέβητα pellet υπολογίστηκε από πειραματική σχέση. <sup>(24)</sup>

$$c_{p,flue} = (0.01382 T + 3.188) * (\ln l)^2 - (0.07622 T + 17.693) * \ln l + 0.0002785 T^2 + 0.008727 T + 1043.1 \quad (5.3)$$

Ακόμη, από πίνακες λήφθηκαν εμπειρικές τιμές του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας U για το υπό εξέταση είδος εναλλάκτη <sup>(4)</sup>, ενώ τυποποιημένες τιμές του συντελεστή ρυπαρότητας R<sub>f</sub> βρέθηκαν από πίνακες της TEMA για το είδος του εναλλάκτη και την προέλευση των καυσαερίων. <sup>(4)(5)</sup>

Για την χρήση ορισμένων τιμών έγιναν παραδοχές, οι τιμές θερμοκρασίας του νερού είναι οι φυσιολογικές θερμοκρασίες που αναμένονται στη φυσιολογική λειτουργία ενός λέβητα. Η θερμοκρασία επιστροφής του νερού στον λέβητα γίνεται μεταξύ 60 και 70°C, επομένως λαμβάνεται ως θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού ρευστού στον εναλλάκτη T<sub>c,in</sub>=65°C. <sup>(12)</sup>

Η θερμοκρασία προσαγωγής του νερού στον λέβητα γίνεται περί τους 90°C, επομένως αυτή είναι και η θερμοκρασία στόχος T<sub>c,out</sub> για την θέρμανση του νερού από τα καυσαέρια. Αντίστοιχα θεωρούμε θερμοκρασία-στόχο ψύξης των καυσαερίων T<sub>h,out</sub>=110°C. <sup>(19)</sup>

Αν η θερμοκρασία εξόδου μειωθεί στο σημείο δρόσου των καυσαερίων η ανάκτηση θα έχει υψηλό βαθμό απόδοσης, όμως τα προϊόντα της συμπύκνωσης επικάθονται στην επιφάνεια του εναλλάκτη ως σταγονίδια με ισχυρές διαβρωτικές ιδιότητες. Κρίνεται σκόπιμο να μην μειωθεί η τελική θερμοκρασία καυσαερίων κάτω μια μέση θερμοκρασία υγροποίησης των διάφορων συστατικών.

Οι περιεκτικότητες, του πετρελαίου σε άνθρακα C%, του φυσικού αερίου CH<sub>4</sub>% και των pellet σε C%, λήφθηκαν με βάση την τυπική σύσταση των καυσίμων λόγω έλλειψης δεδομένων για τα καύσιμα των εγκαταστάσεων. <sup>(14)</sup>

Για τα υπολογίσιμα μεγέθη, μέσω της σχέσης (3.1) υπολογίστηκε η παροχή καυσίμου, στην σχέση (5.4) δίνεται η σχέση υπολογισμού της παροχής καυσαερίου με την βοήθεια των εξισώσεων καύσης (5.5, 5.6) με δεδομένη την σύσταση των καυσίμων και την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε CO<sub>2</sub>.

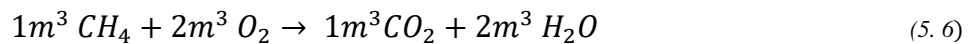
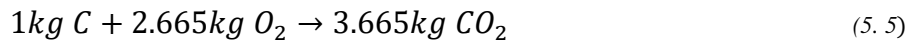


$$\dot{m}_{flue} = \frac{kg_{CO_2}/kg_{fuel}}{maxCO_2} \quad (5.4)$$

Όπου

$\dot{m}_{flue}$  η παροχή του καυσαερίου σε  $\left(\frac{kg}{s}\right)$

**maxCO<sub>2</sub>** η μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα του καυσαερίου σε CO<sub>2</sub>%, όπως υπολογίζεται από το γινόμενο του λόγου αέρα-καυσίμου (λ) με την πραγματική περιεκτικότητα των καυσαερίων σε CO<sub>2</sub> που μετρήθηκε με τον αναλυτή καυσαερίων



Σημειώνεται πως στην περίπτωση του φυσικού αερίου η σχέση (5.4) πολλαπλασιάζεται με την πυκνότητα του καυσαερίου, ώστε να προκύψει η παροχή του καυσαερίου σε  $\frac{kg}{s}$ .

Στην συνέχεια υπολογίζονται τα μεγέθη του εναλλάκτη με την μεθοδολογία που αναλύεται στο κεφάλαιο (2.3.2 Αποτελεσματικότητα – Αριθμός Μονάδων Μεταφοράς ε-NTU). Ο τύπος εναλλάκτη που επιλέγεται για την ανάκτηση στους λέβητες είναι εναλλάκτης κελύφους με πολλά περάσματα αυλών.

Υπολογίστηκε η θερμορροή για το θερμό ρεύμα καυσαερίων από τη σχέση (2.14), θεωρούμε ότι είναι ίση με την θερμορροή του ψυχρού ρευστού και μέσω της σχέσης (2.15) επιλύουμε ως προς την παροχή του ψυχρού ρευστού  $\dot{m}_c$ .

Υπολογίζεται ο λόγος ρυθμών θερμοχωρητικότητας c από την σχέση (2.25), η μέγιστη θερμορροή από την σχέση (2.22) και τελικά η αποδοτικότητα του καθαρού εναλλάκτη από την (2.23).

Ο υπολογισμός του NTU γίνεται από εμπειρικές σχέσεις<sup>(5)</sup> που έχουν προκύψει από τα σχετικά διαγράμματα (Παράρτημα).

$$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1+c^2}} \ln \left( \frac{\frac{2}{\varepsilon} - 1 - c - \sqrt{1+c^2}}{\frac{2}{\varepsilon} - 1 - c + \sqrt{1+c^2}} \right) \quad (5.7)$$

Αφού βρεθούν η λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας και η επιφάνεια επιλύοντας την σχέση (2.24) ως προς A, μπορεί να υπολογιστεί η πραγματική θερμορροή  $\dot{Q}_{real}$  από την σχέση (2.16).

Στην συνέχεια εξετάζουμε τα ίδια μεγέθη υπό την επίδραση της ρύπανσης στον εναλλάκτη, με χρήση της σχέσης (2.10) υπολογίζεται ο μειωμένος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας  $U_{fouled}$  όπως προκύπτει λόγω της συγκέντρωσης επικαθίσεων στα τοιχώματα του εναλλάκτη.

Η επιπλέον επιφάνεια  $A_{extra}\%$  που απαιτείται για την διατήρηση της απόδοσης στα ίδια επίπεδα με τον εναλλάκτη χωρίς ρύπανση, αντιστοιχεί και στην επιφάνεια που έχει μειωθεί λόγω

επικαθίσεων. Η μειωμένη επιφάνεια  $A_{fouled}$  και ο συντελεστής  $U_{fouled}$ , αντικαθίστανται στην σχέση (2.24) για να υπολογιστεί ο νέος NTU' και από εμπειρικές σχέσεις <sup>(5)</sup> η νέα τιμή αποδοτικότητας  $\epsilon'$ .

$$A_{extra} \% = \frac{A_{need}-A}{A} * 100\% \quad (5. 8)$$

Όπου

$A_{need}$  η απαιτούμενη επιφάνεια για εναλλάκτη με επικαθίσεις σε (m<sup>2</sup>)

$A$  η επιφάνεια εναλλάκτη χωρίς ρύπανση

$$\epsilon = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + e^{-NTU\sqrt{1+c^2}}}{1 - e^{-NTU\sqrt{1+c^2}}} \right\}^{-1} \quad (5. 9)$$

Η μειωμένη θερμορροή στον εναλλάκτη μετά την επίδραση της ρύπανσης μπορεί να βρεθεί επιλύοντας την σχέση (2.23) ως προς  $\dot{Q}_{fouled}$ , ενώ υπολογίζεται η λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά που επιτεύχθηκε μεταξύ των ρευστών μέσω της (2.16).

Η μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα του εναλλάκτη και για τα δύο εξεταζόμενα σενάρια λειτουργίας μπορεί να βρεθεί με επίλυση της (2.26) και να συγκριθεί με τις πραγματικές τιμές απόδοσης που υπολογίστηκαν, ενώ ο λόγος των  $\epsilon$  και  $\epsilon'$  χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της μείωσης απόδοσης που επέφερε η ρύπανση.

Τέλος, δημιουργούνται τα απαραίτητα διαγράμματα για μετρήσεις και αποτελέσματα, ώστε να μπορεί να γίνει οπτική σύγκριση και αξιολόγηση των όσων προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.

### 5.3.2 Αποτελέσματα Επεξεργασίας

Πίνακας Β.5. 5 Δεδομένα καυσίμων

	$H_u \left( \frac{kJ}{kg} \right)$	$\dot{m}_B \left( \frac{kg}{s} \right)$	$\frac{kg (CO_2)}{kg (fuel)}$	maxCO <sub>2</sub> (%)
<b>Πετρέλαιο 1</b>	42800	0.003	3.1519	14.99
<b>Πετρέλαιο 2</b>	42800	0.009	3.1519	14.66
<b>Πετρέλαιο 3</b>	42800	0.041	3.1519	14.94
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	37080	0.039	0.8500	11.32
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	37080	0.001	0.8500	11.16
<b>Pellets</b>	18422	0.003	1.8325	22.95

Πίνακας Β.5. 6 Μεγέθη Ρευστών Εναλλάκτη Θερμότητας

	$\dot{m}_{flue}$ $\left(\frac{kg}{s}\right)$	$\dot{m}_c$ $\left(\frac{kg}{s}\right)$	$c_{p,flue}$ $\left(\frac{kJ}{kgK}\right)$	$c_{p,c}$ $\left(\frac{kJ}{kgK}\right)$	$C_{min}$ $\left(\frac{J}{K*s}\right)$	$C_{max}$ $\left(\frac{J}{K*s}\right)$	$c$
<b>Πετρέλαιο 1</b>	0.057	0.061	1.100	4.19	62.48	254.43	0.246
<b>Πετρέλαιο 2</b>	0.186	0.019	1.074	4.19	78.10	199.23	0.392
<b>Πετρέλαιο 3</b>	0.856	1.479	1.115	4.19	954.43	6196.18	0.154
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	0.222	0.179	1.118	4.19	248.20	751.55	0.330
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	0.006	0.002	1.112	4.19	6.66	10.12	0.658
<b>Pellets</b>	0.027	0.020	1.014	4.19	20.04	27.23	0.736

Πίνακας Β.5. 7 Συνολικός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας πριν και μετά την επίδραση του Συντελεστή Ρυπαρότητας

	$U \left(\frac{W}{m^2K}\right)$	$R_f = R_{f,in} + R_{f,out} \left(\frac{m^2K}{W}\right)$	$U_{fouled} \left(\frac{W}{m^2K}\right)$
<b>Πετρέλαιο 1</b>	31	0.00198	29.207
<b>Πετρέλαιο 2</b>	31	0.00198	29.207
<b>Πετρέλαιο 3</b>	31	0.00198	29.207
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	31	0.000445	30.578
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	31	0.000445	30.578
<b>Pellets</b>	20	0.0007	19.724

Πίνακας Β.5. 8 Αποτελέσματα Υπολογισμών Ρυθμού Μεταφοράς Θερμότητας

	$\dot{Q}_{max}$ (W)	$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c$ (W)	$\dot{Q}_{real}$ (W)	$\dot{Q}_{fouled}$ (W)
<b>Πετρέλαιο 1</b>	9172.40	6360.70	6169.49	4059.31
<b>Πετρέλαιο 2</b>	4279.85	1952.49	2074.70	874.90
<b>Πετρέλαιο 3</b>	197853.96	154904.48	148408.15	111225.03
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	29957.59	18788.65	18408.47	11401.67
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	552.55	252.97	254.96	115.00
<b>Pellets</b>	1270.83	501.12	520.89	201.98

Πίνακας Β.5. 9 Λογαριθμική Διαφορά Θερμοκρασίας πριν και μετά την επίδραση της ρύπανσης στον εναλλάκτη

	$\Delta T_{lm}$ (K)	$\Delta T_{lm, fouled}$ (K)
<b>Πετρέλαιο 1</b>	68.81	51.19
<b>Πετρέλαιο 2</b>	37.97	18.11
<b>Πετρέλαιο 3</b>	86.18	73.04
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	60.78	38.70
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	48.33	22.41
<b>Pellets</b>	41.26	16.45

Πίνακας Β.5. 10 Επιφάνεια Εναλλάκτη πριν και μετά την ρύπανση, Ποσοστό Επιπλέον Επιφάνειας απαιτούμενο για καλή λειτουργία

	$A_{clean}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{fouled}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{extra}$ (%)
<b>Πετρέλαιο 1</b>	2.892	2.715	6.14
<b>Πετρέλαιο 2</b>	1.763	1.654	6.14
<b>Πετρέλαιο 3</b>	55.549	52.140	6.14
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	9.769	9.635	1.38
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	0.170	0.168	1.38
<b>Pellets</b>	0.631	0.622	1.40

Πίνακας Β.5. 11 Αποτελέσματα Απόδοσης από Υπολογισμούς με την Μέθοδο  $\epsilon$ -NTU

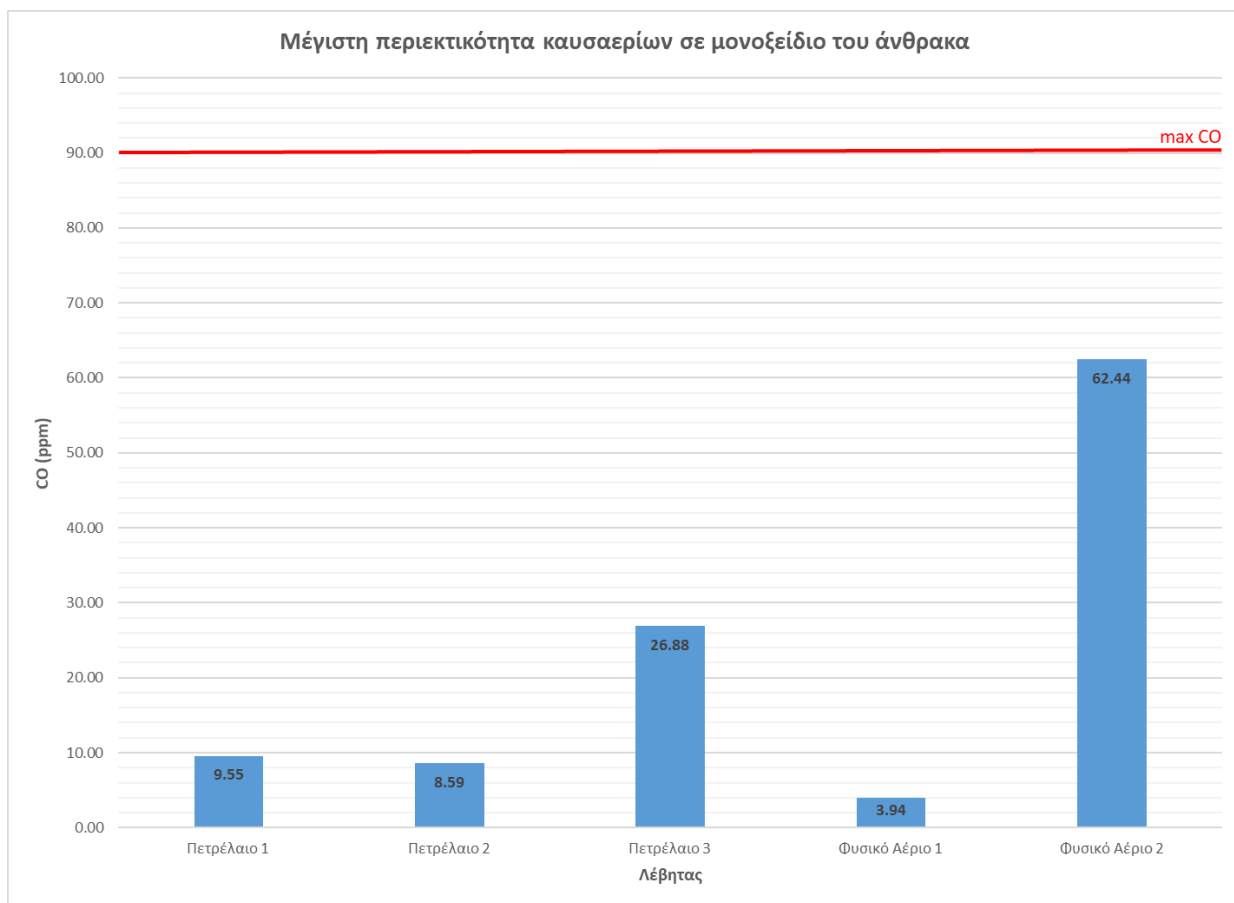
	$\epsilon$ (%)	$\epsilon_{max}$ (%)	NTU	$\epsilon'$ (%)	$\epsilon_{max}'$ (%)	NTU'	Μεταβολή $\epsilon$ (%)
<b>Πετρέλαιο 1</b>	69.35	76	1.44	65.80	72	1.27	5.12
<b>Πετρέλαιο 2</b>	45.62	50	0.70	42.17	46	0.62	7.56
<b>Πετρέλαιο 3</b>	78.29	84	1.80	74.95	80	1.60	4.27
<b>Φυσικό Αέριο 1</b>	62.72	70	1.22	61.94	69	1.19	1.24
<b>Φυσικό Αέριο 2</b>	45.78	55	0.79	45.10	54	0.77	1.48
<b>Pellets</b>	39.43	47	0.63	38.78	46	0.61	1.66

## 6. Ανάλυση

Για την διευκόλυνση του σχολιασμού και της ανάλυσης των δεδομένων δημιουργούνται τα απαραίτητα διαγράμματα. Τα κατηγοριοποιημένα μεγέθη συγκρίνονται οπτικά, ενώ όπου διατίθενται τιμές επιτρεπόμενων ορίων από την βιβλιογραφία συμπεριλαμβάνονται στο αντίστοιχο διάγραμμα.

### 6.1 Σχολιασμός Μετρήσεων

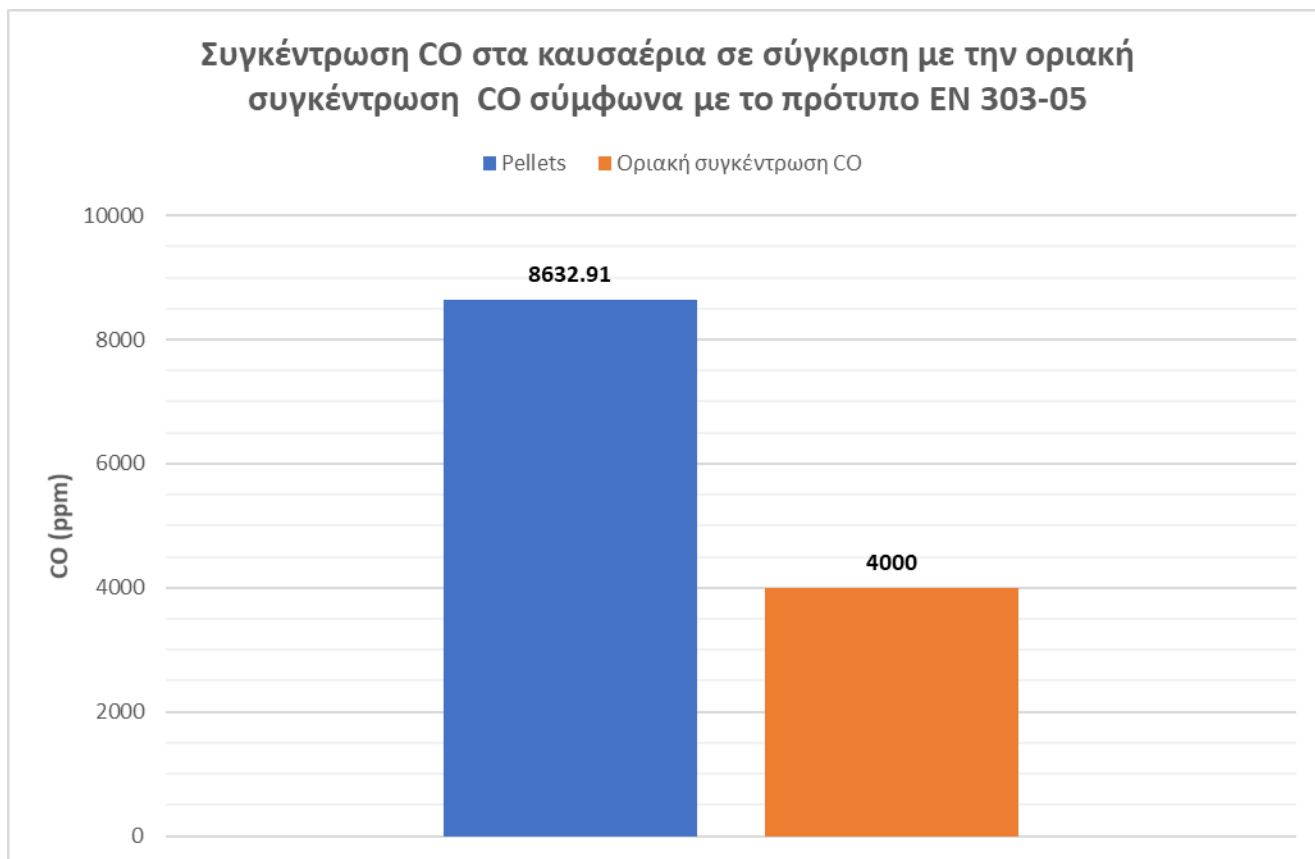
Για τις μετρήσεις του αναλυτή καυσαερίων, όπως προαναφέρθηκε, τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών για ουσίες που συμμετέχουν στα καυσαέρια δίνονται από την ελληνική νομοθεσία.



Διάγραμμα Β.6. 1 Μέγιστη περιεκτικότητα καυσαερίων σε CO, τιμές ανηγμένες σε οξυγόνο αναφοράς 3%

Οι συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα για υγρά και αέρια καύσιμα δεν ξεπερνούν την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή και οι περισσότερες τιμές είναι αρκετά χαμηλές. Μεγαλύτερη συγκέντρωση CO εμφανίζει ο λέβητας Φυσικού Αερίου 2, επομένως και οι συνθήκες καύσης είναι δυσμενέστερες σε σύγκριση με τους υπόλοιπους λέβητες.

Βέλτιστες συνθήκες καύσης σύμφωνα με την ελάχιστη συγκέντρωση CO στα καυσαέρια εμφανίζει ο λέβητας Φυσικού Αερίου 1, ακόμα και σε σχέση με μικρότερης ισχύος λέβητες πετρελαίου. Γνωρίζοντας τα προβλήματα της εγκατάστασης Φυσικού Αερίου 2, προκύπτει πως καλές συνθήκες καύσης και τήρηση των σχετικών οδηγιών εγκατάστασης, ευνοούν χρήση φυσικού αερίου.



Διάγραμμα Β.6. 2 Σύγκριση της μετρούμενης συγκέντρωσης CO με την μέγιστη επιτρεπόμενη για λέβητα Pellet κλάσης 3

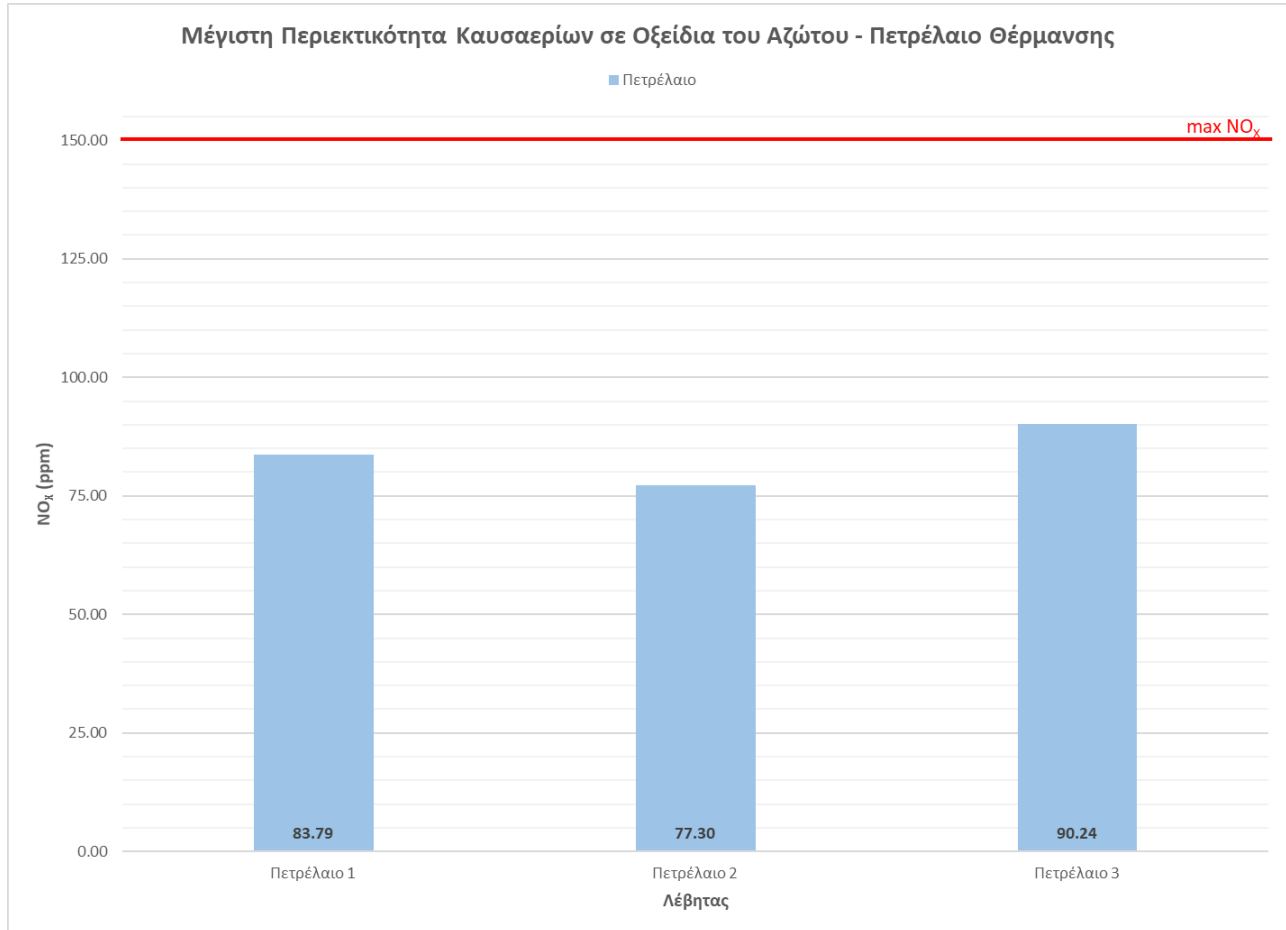
Η σύγκριση στην περίπτωση αυτή γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός πως πρόκειται για αερόθερμο λέβητα Pellet, ενώ το πρότυπο αναφέρεται σε λέβητα καύσης βιομάζας κλάσης 3 για ισχύ κάτω των 50kW.

Δεν μπορούμε να θεωρήσουμε πως η οριακή τιμή που επιβάλλεται από την νομοθεσία συμπεριλαμβάνει τον αερόθερμο λέβητα, όμως παρατηρούμε πως η μέτρηση που έγινε με τον αναλυτή μας δίνει μια τιμή παραπάνω από διπλάσια. Αυτό αρχικά μας οδηγεί σε αρνητικά συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της καύσης στον αερόθερμο λέβητα.

Οι υψηλές εκπομπές CO στους λέβητες βιομάζας οφείλονται κυρίως στη σύσταση του καυσίμου και είναι αναμενόμενες, όμως η τοξική φύση του μονοξειδίου του άνθρακα απαιτεί

συνεχή προσπάθεια βελτίωσης των λεβήτων pellet, κάτι που γίνεται εμφανές και από την μείωση των επιτρεπόμενων οριακών τιμών εκπομπής CO στις αναθεωρήσεις του προτύπου.

Σημειώνεται ότι κατά την μέτρηση ήταν και η μόνη φορά που έγινε αυτόματη εκκίνηση της αντλίας απομάκρυνσης CO του αναλυτή, καθώς η συγκέντρωση ξεπέρασε το ρυθμισμένο όριο.



Διάγραμμα Β.6. 3 Σύγκριση μετρούμενης συγκέντρωσης NO<sub>x</sub> με τις επιτρεπόμενες οριακές τιμές για λέβητα πετρελαίου

Οι εκπομπές NO<sub>x</sub> στους λέβητες πετρελαίου είναι επιτρεπτές. Σύμφωνα με τις μετρήσεις του αναλυτή, κατά το μεγαλύτερο μέρος τους ευθύνονται στην δημιουργία NO και ελάχιστα σε NO<sub>2</sub>.

Παρατηρείται μεγαλύτερη συγκέντρωση στον λέβητα Πετρελαίου 3 και μικρότερη στον λέβητα Πετρελαίου 2, αυτό οφείλεται στην θερμοκρασία των καυσαερίων και την περίσσεια αέρα που επηρεάζουν τις ποσότητες NO<sub>x</sub>.

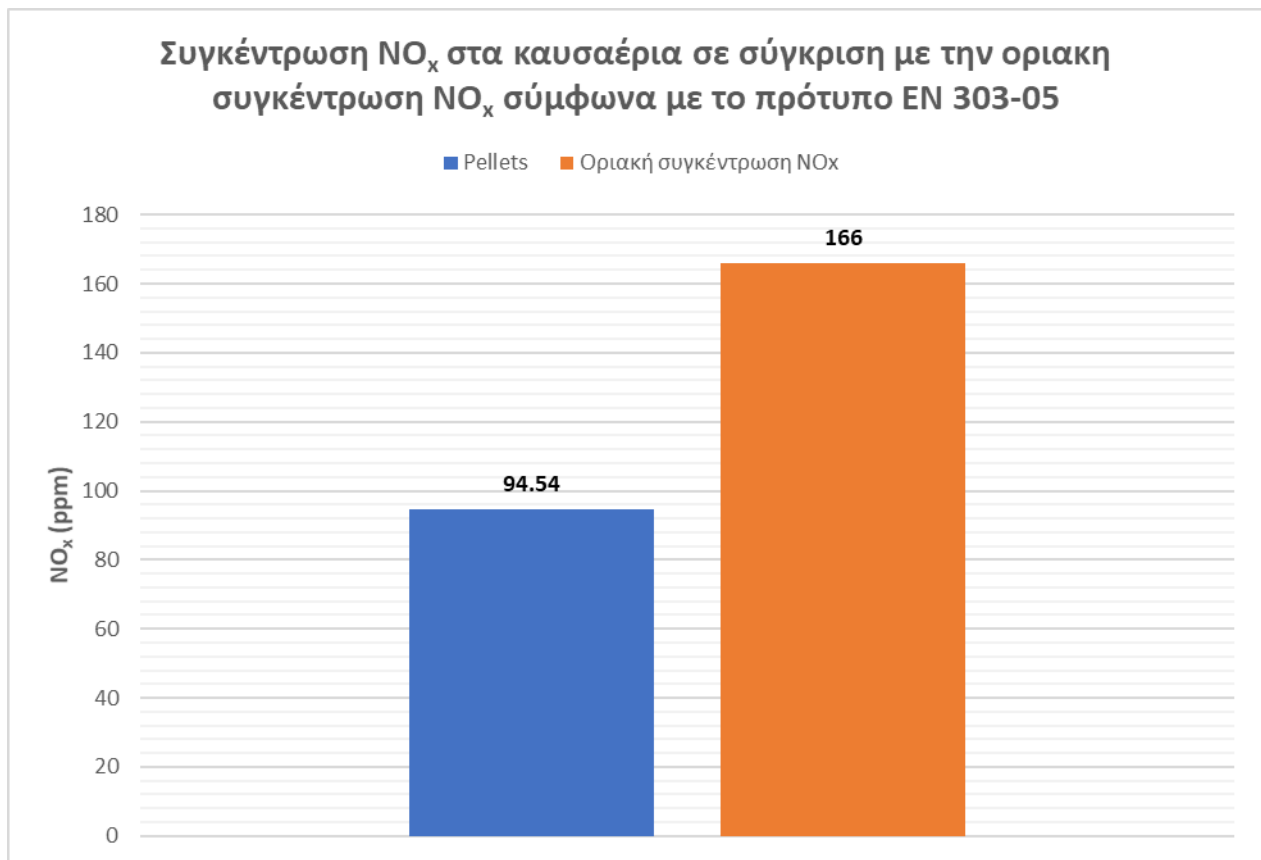


Διάγραμμα Β.6. 4 Σύγκριση μετρούμενης συγκέντρωσης NO<sub>x</sub> με τις επιτρεπόμενες οριακές τιμές για λέβητα φυσικού αερίου

Οι τιμές NO<sub>x</sub> για τους λέβητες φυσικού αερίου είναι εντός ορίων, σημειώνεται πως το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο για τους λέβητες πετρελαίου. Παρατηρούμε χαμηλότερες εκπομπές NO<sub>x</sub> στο φυσικό αέριο, ενώ όπως και στην περίπτωση των λεβήτων πετρελαίου κατά το μεγαλύτερο μέρος τους ευθύνονται στην δημιουργία NO.

Η τοποθέτηση του λέβητα Φυσικού Αερίου 2 επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις, καθώς ο αγωγός είναι εκτεθειμένος στον ατμοσφαιρικό αέρα θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το ενδεχόμενο μέρος των NO<sub>x</sub> στις μετρήσεις να είναι ατμοσφαιρικό.

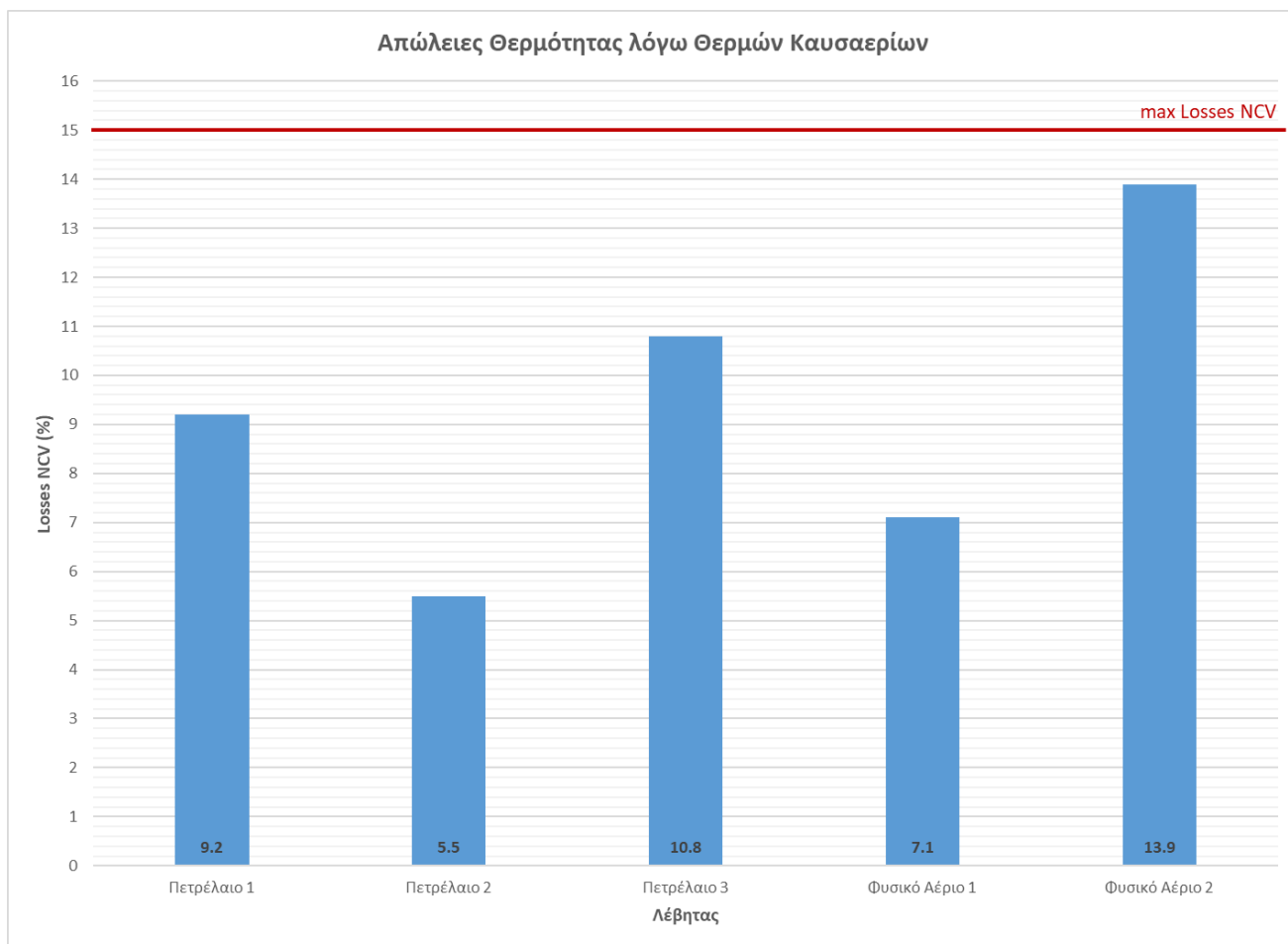




Διάγραμμα Β.6. 5 Σύγκριση μετρούμενης συγκέντρωσης NO<sub>x</sub> με τις επιτρεπόμενες οριακές τιμές για λέβητα Pellet κλάσης 3

Η συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου για τους λέβητες, όπως δίνεται από το πρότυπο εκφράζεται για NO<sub>2</sub>, στην περίπτωση του αερόθερμου λέβητα έχουμε τιμή NO<sub>x</sub> μικρότερη της οριακής και κατά το μεγαλύτερο μέρος της ευθύνεται στην ύπαρξη μονοξειδίου του αζώτου.

Τα ποσά διοξειδίου του αζώτου στον αερόθερμο λέβητα Pellet είναι μειωμένα σε σχέση με το NO στον ίδιο λέβητα, όμως όχι και σε σχέση με τους λέβητες πετρελαίου και φυσικού αερίου.

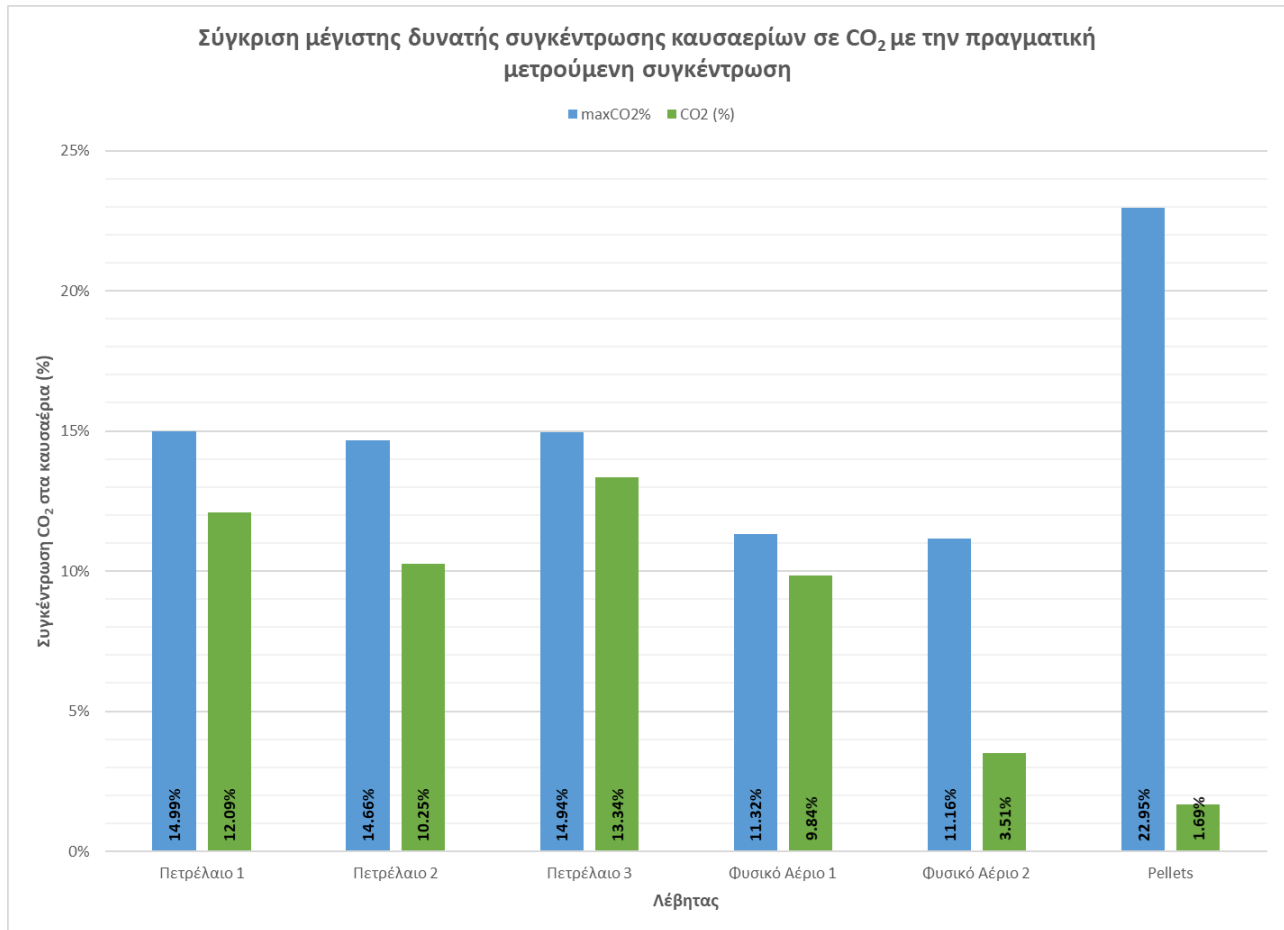


Διάγραμμα Β.6. 6 Σύγκριση απωλειών λόγω εξόδου θερμών καυσαερίων στο περιβάλλον με την επιτρεπόμενη οριακή τιμή

Για τις απώλειες λόγω διαφυγής των καυσαερίων στο περιβάλλον υπάρχει επίσης μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή στο 15%. Μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών εμφανίζει ο λέβητας Φυσικού Αερίου 2, ο αγωγός καυσαερίων είναι εκτεθειμένος στον ατμοσφαιρικό αέρα λόγω του μικρού μήκους του και της τοποθέτησής του.

Από αυτό το ποσοστό ενέργειας που χάνεται λόγω εξόδου των καυσαερίων, αναμένεται να γίνει και η ανάκτηση. Επομένως, οι απώλειες λόγω θερμότητας καυσαερίων θα μειώνονται, όσο αυξάνεται η αποδοτικότητα της εφαρμογής της ανάκτησης.

Από την στοιχειομετρική ανάλυση υπολογίστηκε η μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα των καυσαερίων σε CO<sub>2</sub> για τέλεια καύση.

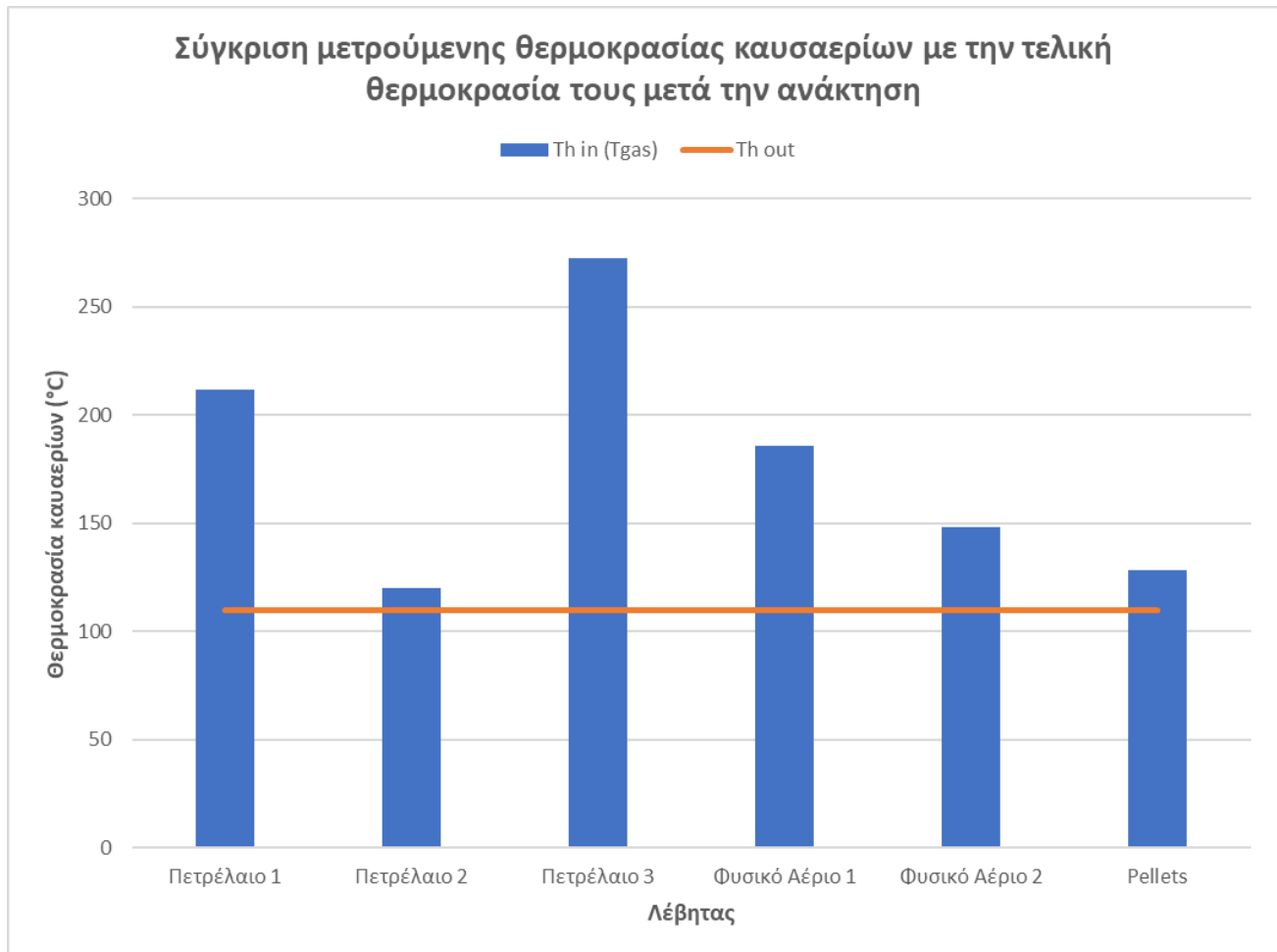


Διάγραμμα Β.6. 7 Μέγιστη δυνατή συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια στοιχειομετρικής καύσης σε σύγκριση με τις μετρούμενες συγκεντρώσεις

Η σύγκριση με τις μετρούμενες πραγματικές τιμές, ενώ αρχικά δείχνει μειωμένες πραγματικές εκπομπές CO<sub>2</sub> στην πραγματικότητα αποτελεί ένα δείγμα της αποτελεσματικότητας της καύσης. Η καύση είναι ατελής και τα ποσά άνθρακα που δεν μετατρέπονται σε διοξείδιο του άνθρακα παράγουν ενώσεις μονοξειδίου, τοξικού για τον άνθρωπο και ρυπογόνου για το περιβάλλον.

Αυτό επαληθεύεται και από το διάγραμμα συγκέντρωσης CO, οι λέβητες Φυσικού Αερίου 2 και Pellet που εμφανίζουν τις ελάχιστες εκπομπές CO<sub>2</sub> έχουν αντίστοιχα και τις υψηλότερες συγκεντρώσεις CO στα καυσαέρια.

Οι θερμοκρασίες των καυσαερίων όπως μετρήθηκαν από τον αναλυτή, συγκρινόμενες με την τελική θερμοκρασία στην οποία θα ψυχθούν τα καυσαέρια μας δίνει ήδη μια πρώτη εικόνα για την ανάκτηση.



Διάγραμμα Β.6. 8 Θερμοκρασίες καυσαερίων σε σύγκριση με την θερμοκρασία στην οποία πρέπει να ψυχθούν τα καυσαέρια στο τέλος της ανάκτησης

Η θερμοκρασία των καυσαερίων αποτελεί την θερμοκρασία εισόδου τους στον εναλλάκτη που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση. Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον εναλλάκτη επιλέγεται να γίνει στους 110 °C.

Όσο η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου του θερμού ρεύματος καυσαερίου μειώνεται, μειώνεται και το διαθέσιμο ποσό ενέργειας για ανάκτηση. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία καυσαερίων στον λέβητα πετρελαίου 2 είναι ιδιαίτερα χαμηλή και συγκεκριμένα χαμηλότερη των 160°C, το υλικό του καπναγωγού δεν έχει επιλεγεί με την πρόβλεψη τόσο χαμηλών θερμοκρασιών και δεν υπάρχει σύστημα διαχείρισης συμπυκνωμάτων επιδεινώνοντας τις βλάβες.<sup>(19)</sup>

Επιπλέον, στις μετρήσεις παρατηρείται μια ποσότητα υδρόθειου  $H_2S$ , που είναι διαβρωτικός παράγοντας, ακόμα και σε λέβητες με καύσιμο φυσικό αέριο ή αποθειωμένο πετρέλαιο. Αυτό μπορεί να αποδοθεί σε μη απόλυτη καθαρότητα του καυσίμου ή στο γεγονός πως η αποθείωση έχει μια αποτελεσματικότητα που δεν φτάνει το 100%, ανάλογα και με την χρησιμοποιούμενη μέθοδο.

Είναι επίσης πιθανό να μην έγινε καθαρισμός του αγωγού μετά την καύση κάποιου καυσίμου με προσμίξεις θείου, επομένως το  $H_2S$  να προέρχεται από υπολείμματα. Αυτή η περίπτωση είναι πιο πιθανή, όπου παλιότερα γινόταν χρήση πετρελαίου θέρμανσης με θείο.

Στα καυσαέρια του λέβητα Πετρελαίου 1 προέκυψε ποσότητα  $SO_2$ , το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς το καύσιμό του είναι γνωστό πως περιέχει προσμίξεις θείου. Δεν βρέθηκε κάποια οριακή τιμή, όμως είναι επιθυμητό η συγκέντρωση να είναι κατά το δυνατόν ελάχιστη, ώστε να ελαχιστοποιούνται και τα συμπυκνώματα θειικού οξέος και υδρόθειου.

Από την καύση pellet προέκυψε μόλις 1 ppm  $SO_2$  και καθόλου  $H_2S$ , εξηγείται καθώς τα pellet περιέχουν ελάχιστη ποσότητα θείου. Λαμβάνεται υπόψιν και η ύπαρξη  $SO_2$  στην ατμόσφαιρα, ειδικά σε περιπτώσεις που ο αγωγός καυσαερίων είναι εκτεθειμένος σε ατμοσφαιρικό αέρα.

Οι μετρήσεις του λόγου αέρα καυσίμου λ, είναι οι αναμενόμενες στις περισσότερες περιπτώσεις, εκτός των λεβήτων Πετρελαίου 2, Φυσικού αερίου 2 και pellet. Για αυτό ευθύνονται οι συνθήκες λειτουργίας όπως έχουν ήδη αναφερθεί, ιδιαίτερα στον λέβητα Φυσικού αερίου 2 το ποσοστό επιπλέον αέρα στον αγωγό μετρήθηκε 218% από τον αναλυτή, ενώ στον λέβητα pellet ο αναλυτής δεν έδωσε μέτρηση.

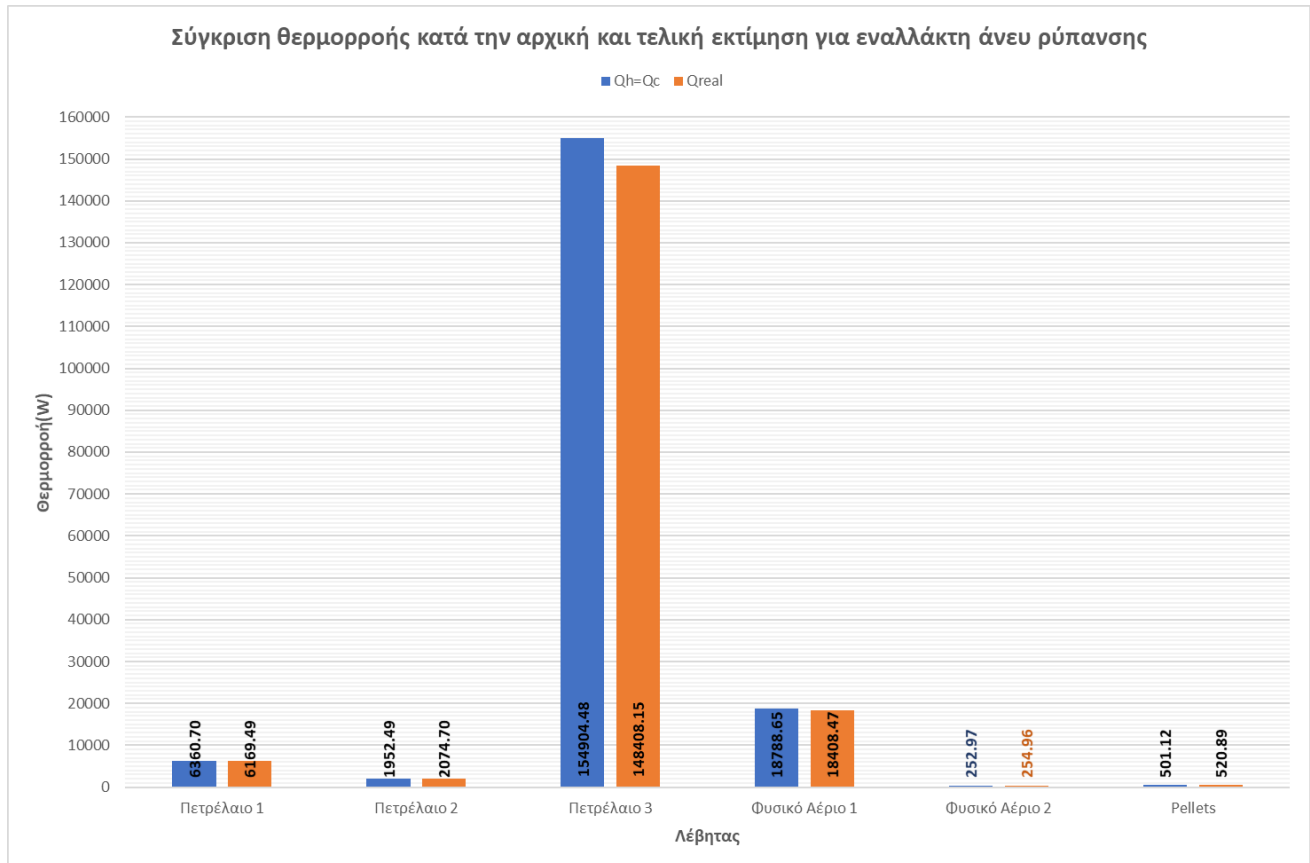
Οι εξαιρετικά υψηλές τιμές λόγου αέρα καυσίμου, καθώς και η αυξημένη συγκέντρωση οξυγόνου μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως θερμαίνονται ποσότητες αέρα επιπλέον του απαιτούμενου <sup>(25)</sup>, κάτι που πρέπει να αλλάξουμε με σωστή ρύθμιση ή επισκευή τυχόν βλάβης, ώστε να μην γίνεται άσκοπα κατανάλωση επιπλέον ποσότητας καυσίμου.

Το ποσοστό συγκέντρωσης οξυγόνου στους αγωγούς Φυσικού αερίου 2 και pellet επαληθεύει τα παραπάνω, ενώ στην καύση pellet πρέπει να σημειωθεί πως το ίδιο το καύσιμο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο.

Το σημείο δρόσου των καυσαερίων σε κάθε αγωγό όπως μετρήθηκε από τον αναλυτή, μπορεί να συγκριθεί με τυπικές τιμές για το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο για συγκέντρωση  $CO_2$  10%, που δίνονται 42.4° και 55.2° αντίστοιχα. <sup>(12)</sup>

Οι μετρήσεις κατανέμονται γύρω από αυτές τις τιμές ανάλογα και με το ποσοστό συμμετοχής  $CO_2$  στα καυσαέρια, όμως η τιμή του λέβητα Φυσικού αερίου 2 είναι αρκετά χαμηλότερη, πιθανόν λόγω της επίδρασης του ατμοσφαιρικού αέρα.

## 6.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων



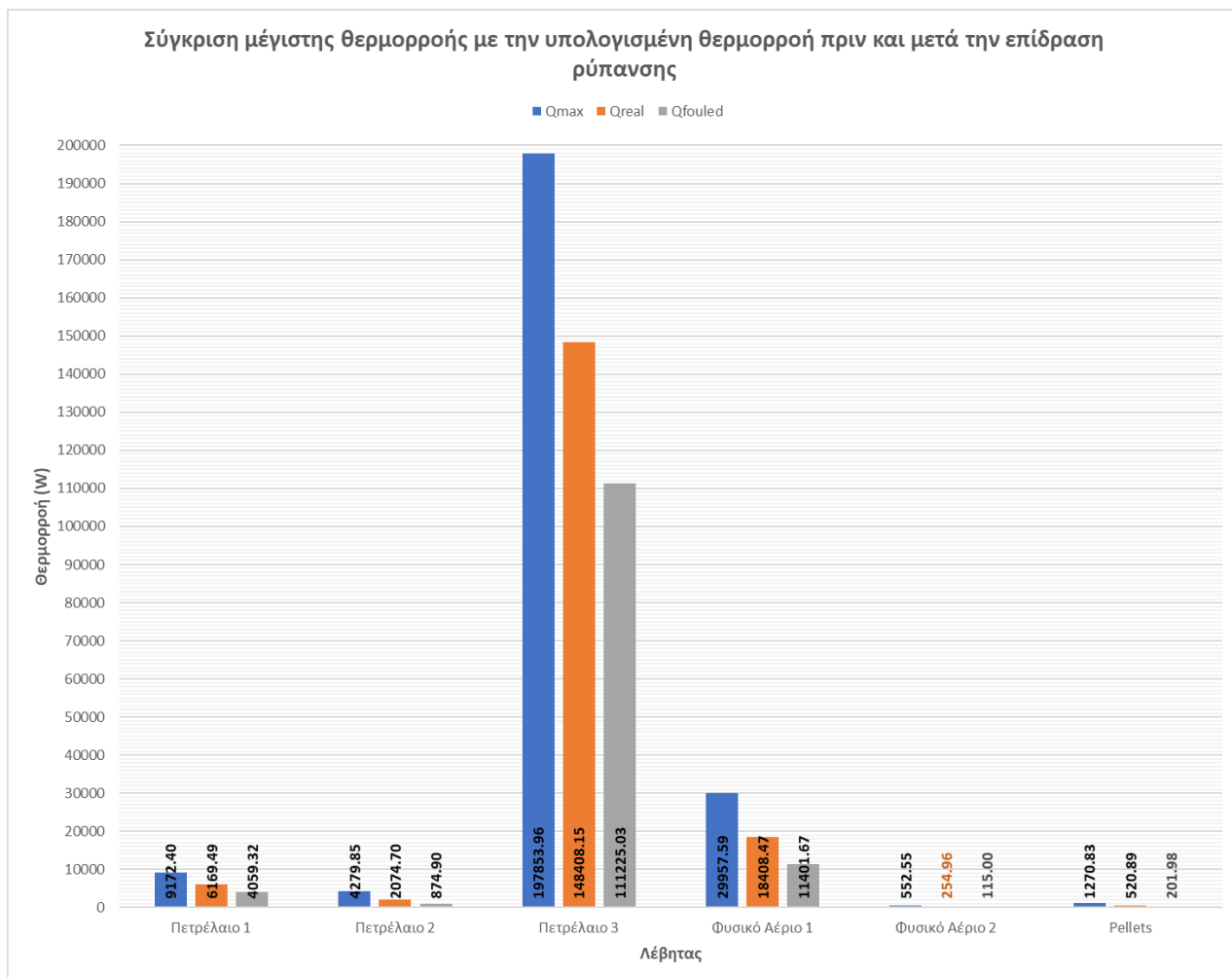
Διάγραμμα Β.6. 9 Σύγκριση του Ρυθμού Μεταφοράς Θερμότητας όπως υπολογίστηκε για τα δεδομένα των ρευστών με τον Ρυθμό Μεταφοράς Θερμότητας που υπολογίστηκε στο τέλος της επίλυσης  $\varepsilon$ -NTU

Όπως είναι αναμενόμενο, ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας στο τέλος των υπολογισμών προκύπτει μικρότερος αυτού που αρχικά είχε υπολογιστεί και ιδανικά θεωρήθηκε πως είναι ίδιος και για τα δύο ρεύματα ρευστών στον εναλλάκτη.

Η θερμορροή στον εναλλάκτη του λέβητα Πετρελαίου 3 είναι ιδιαίτερα αυξημένη σε σχέση με αυτή των υπόλοιπων εγκαταστάσεων. Σημειώνεται όμως, πως αυτό δεν ευθύνεται μόνο σε καλές συνθήκες καύσης αλλά και σε μεγάλη θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων στον εναλλάκτη.

Στους συμβατικούς λέβητες χάνονται μεγάλα ποσά θερμότητας λόγω της εξόδου των καυσαερίων σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η απόδοση είναι μειωμένη σε σχέση με λέβητες συμπύκνωσης που τα αξιοποιούν με ανάκτηση.<sup>(19)</sup>

Επομένως η ανάκτηση θα βελτιώσει σημαντικά την απόδοση, όμως πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η σημαντική επίδραση πολύ υψηλών θερμοκρασιών στον ρυθμό συγκέντρωσης ρυπαρότητας.

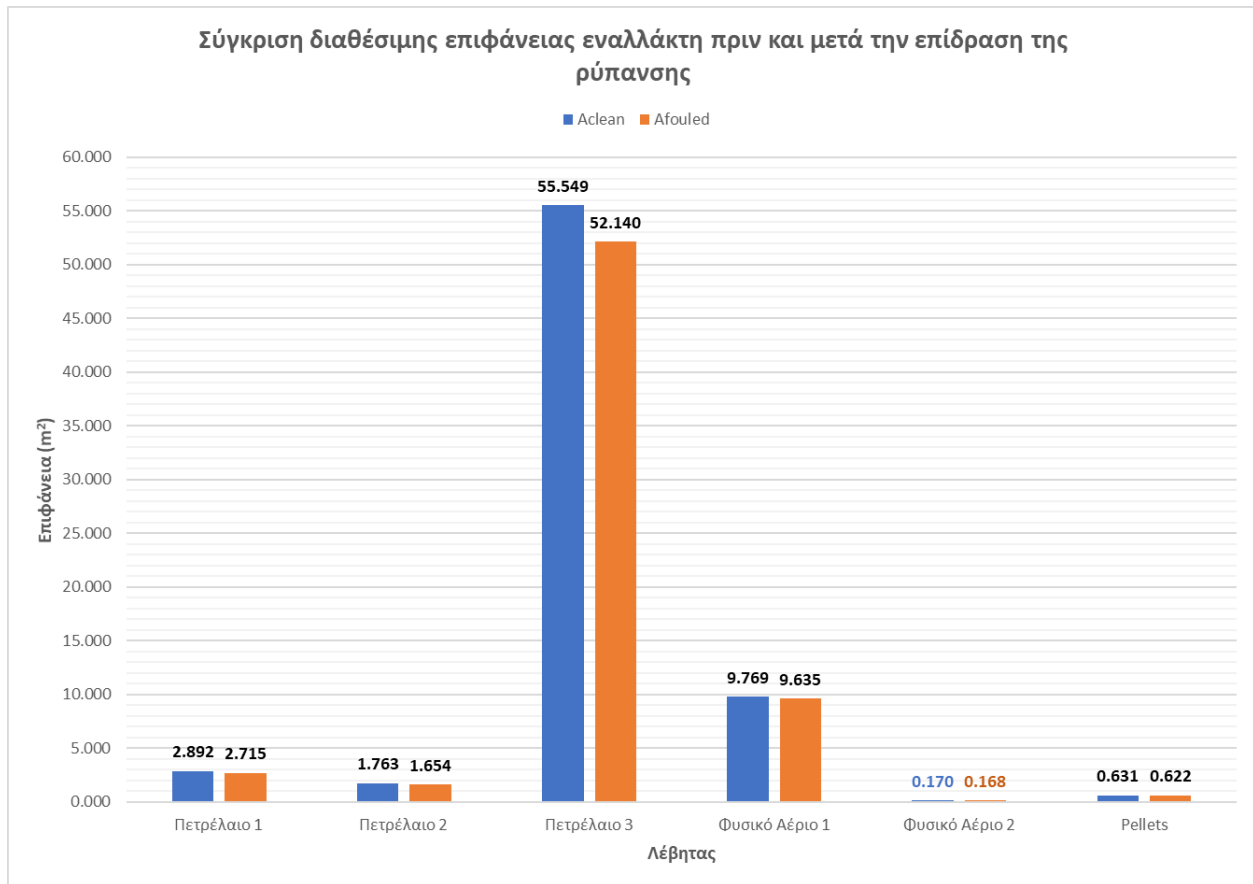


Διάγραμμα Β.6. 10 Σύγκριση μέγιστης υπολογισμένης θερμορροής του εναλλάκτη με την πραγματική αναμενόμενη θερμορροή και την θερμορροή εναλλάκτη υπό την επίδραση ρύπανσης

Παρατηρείται σημαντικότερη μείωση ρυθμού μεταφοράς θερμότητας για τον λέβητα Πετρελαίου 3, καθώς και γενικότερα για τους εναλλάκτες των λεβήτων καύσης πετρελαίου. Ο λέβητας Πετρελαίου 2 λόγω βλάβης και ο λέβητας Φυσικού Αερίου 2 λόγω τοποθέτησης έχουν χαμηλές τιμές θερμορροής λόγω απωλειών.

Αν και ο λέβητας Πετρελαίου 3 έχει υψηλό ρυθμό θερμορροής ακόμα και μετά την ρύπανση, οι ιδιαίτερα ψηλές θερμοκρασίες ευνοούν τον ρυθμό ανάπτυξης επικαθίσεων και επομένως τις απώλειες θερμότητας. Η επιλογή του υλικού εναλλάκτη ανάκτησης θα πρέπει να γίνει με γνώμονα την δημιουργία επικαθίσεων και την συχνότητα καθαρισμού, για την ελαχιστοποίηση επίδρασης της ρύπανσης.<sup>(26)</sup>

Πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την σύγκριση και η διαφορά στην ωφέλιμη ισχύ και τις παροχές ρευστών των λεβήτων, κυρίως μας ενδιαφέρει η μείωση μεταξύ των δύο μεγεθών με βάση το καύσιμο και όχι η διαφορά ποσού θερμορροής μεταξύ των εγκαταστάσεων.



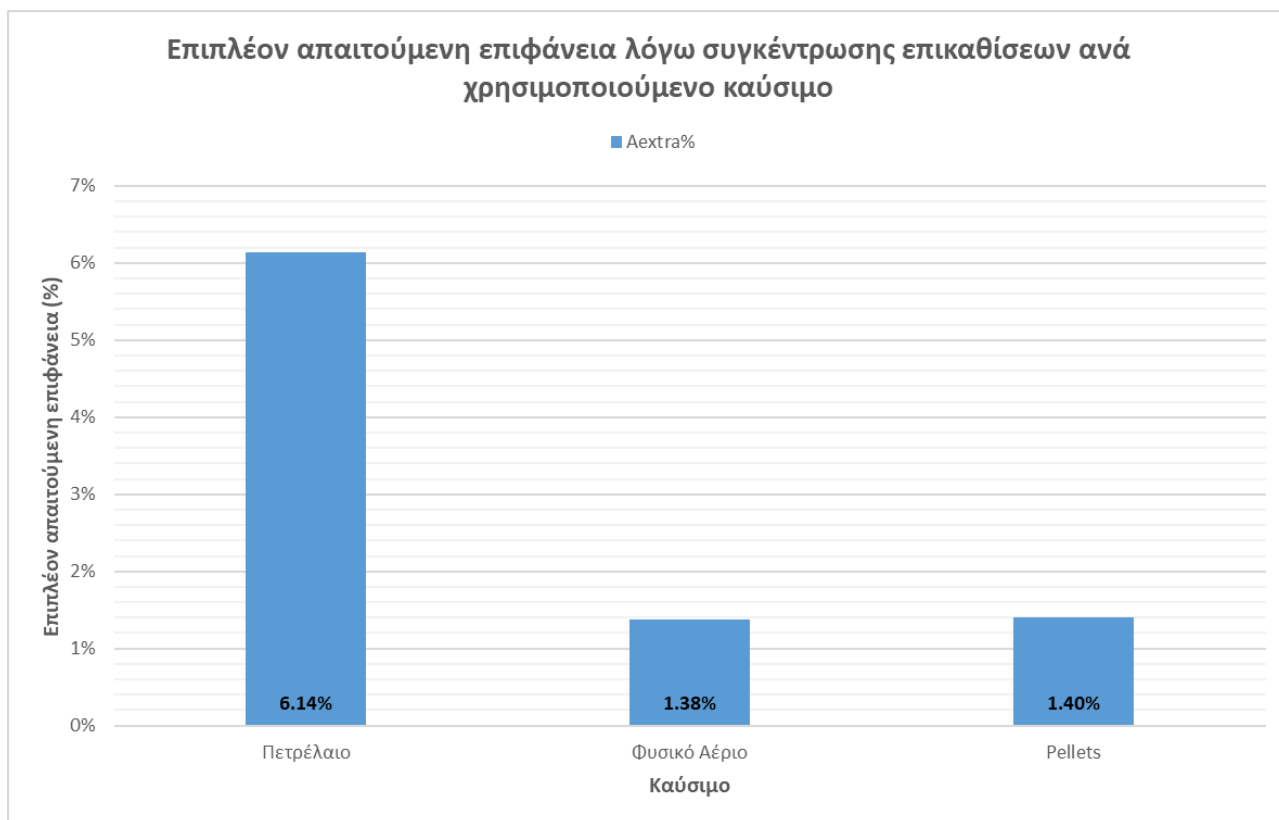
Διάγραμμα Β.6. 11 Παρουσίαση της υπολογισμένης επιφάνειας του εναλλάκτη άνευ ρύπανσης, σε σύγκριση με την επιφάνεια με ρυπαρές επικαθίσεις

Οι απώλειες στην επιφάνεια οφείλονται στην συγκέντρωση ρυπαρών επικαθίσεων στις θερμές επιφάνειες του εναλλάκτη. Αποτέλεσμα αυτού είναι σημαντικές απώλειες, καθώς ο εναλλάκτης θα λειτουργεί με μια επιφάνεια μικρότερη της επιφάνειας σχεδιασμού.

Η μειωμένη επιφάνεια είναι αποτέλεσμα τυπικών τιμών ρύπανσης που λήφθηκαν από τυποποίηση. Σε μια πραγματική εγκατάσταση ανάκτησης, όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα λειτουργίας του εναλλάκτη, χωρίς προστασία ρύπανσης, τόσο η συγκέντρωση επικαθίσεων θα αυξάνεται και η επιφάνεια θα μειώνεται.

Όσο αυξάνονται οι θερμικές ανάγκες παρατηρείται αύξηση και της επιφάνειας του εναλλάκτη, καθώς και των αναγκών του σε επιπλέον επιφάνεια. Η διαφορά σε εναλλάκτες με μικρή τιμή επιφάνειας φαίνεται μικρότερη, όμως στην πραγματικότητα βασίζεται σε ένα ποσοστό απώλειας λόγω ρύπανσης.<sup>(26)</sup>

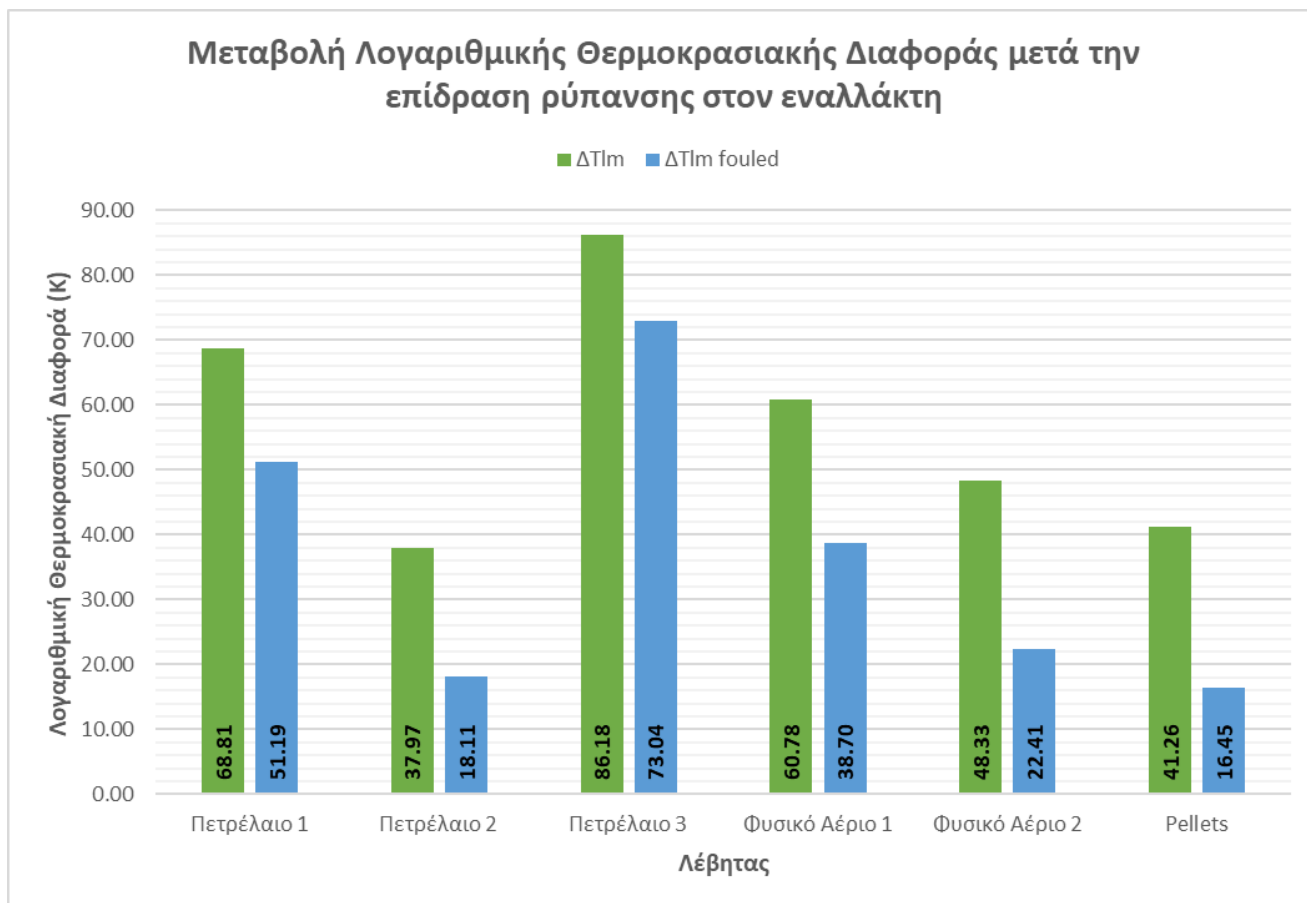




Διάγραμμα Β.6. 12 Ποσοστό προσάυξης της επιφάνειας ανά καύσιμο από το οποίο προέρχονται τα καυσαέρια

Το ποσοστό επιπλέον επιφάνειας υπολογίστηκε μόνο για αντιστάθμιση της επίδρασης της ρύπανσης στον εναλλάκτη και δεν λαμβάνει υπόψιν άλλες παραμέτρους που σχετίζονται με την λειτουργία του λέβητα ή του εναλλάκτη που μπορεί να ευθύνονται για απώλειες.

Το ποσοστό είναι σταθερό για κάθε καύσιμο λόγω της επιλογής συντελεστή ρυπαρότητας από τυποποιημένες τιμές, αυτό αναμένεται να αλλάξει για πραγματικές τιμές ρύπανσης ανάλογα με την λειτουργία του εναλλάκτη, την συντήρηση και τις ειδικές συνθήκες.



Διάγραμμα Β.6. 13 Σύγκριση Λογαριθμικής Θερμοκρασιακής Διαφοράς εναλλάκτη άνευ ρύπανσης με εναλλάκτη που φέρει συγκέντρωση επικαθίσεων

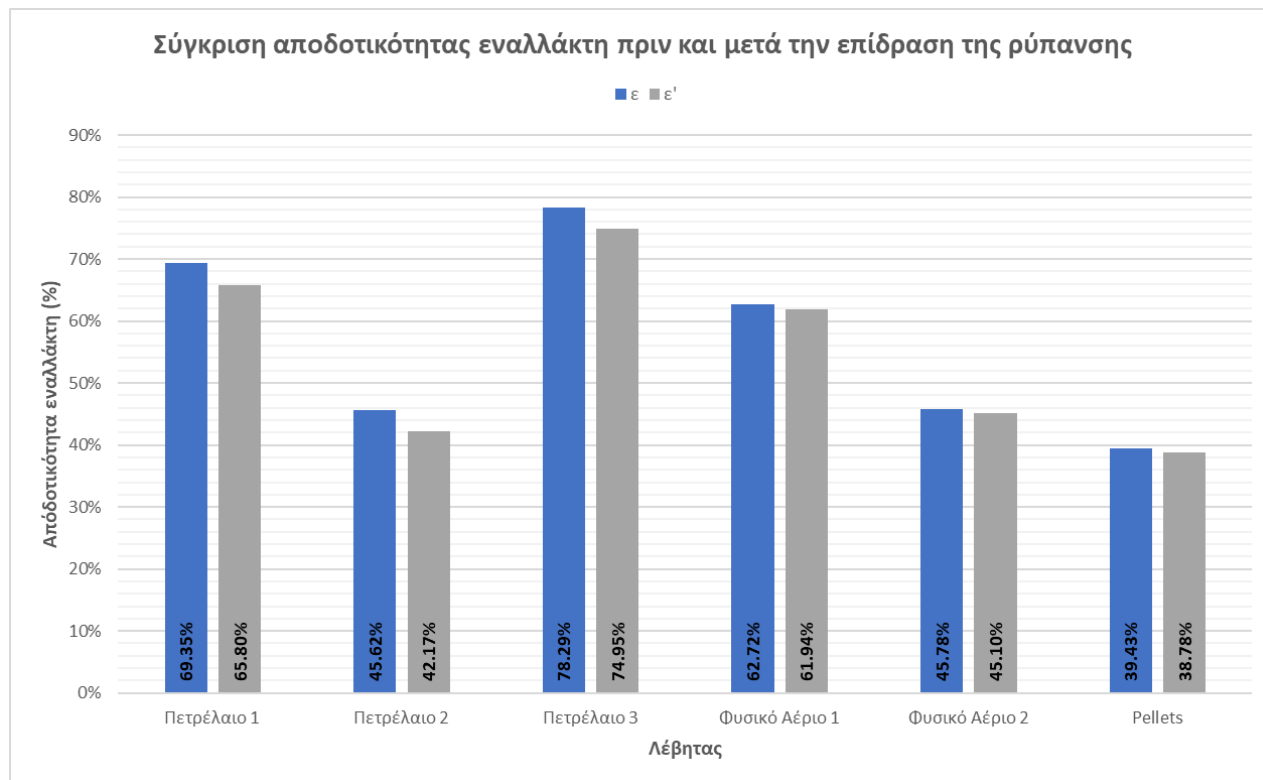
Θεωρούμε την θερμοκρασία καυσαερίων  $T_{gas}$  και την θερμοκρασία επιστροφής του νερού, σταθερές θερμοκρασίες όπως παρέχονται στον εναλλάκτη μέσω της λειτουργίας του λέβητα. Οι θερμοκρασίες που ευθύνονται για την μείωση της λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς είναι οι θερμοκρασίες που θέτονται ως στόχοι για την ανάκτηση.

Λόγω της ρύπανσης η ανάκτηση έχει μειωμένη απόδοση σε σχέση με έναν εναλλάκτη άνευ επικαθίσεων, τα καυσαέρια δεν θα ψυχθούν ως τους  $110^{\circ}\text{C}$  και το νερό δεν θα θερμανθεί ως τους απαιτούμενους  $90^{\circ}\text{C}$ .

Σημαντικότερες μειώσεις παρατηρούνται στους λέβητες Πετρελαίου 2, Φυσικού αερίου 2 και Pellet όπου, όπως έχει διαπιστωθεί, οι συνθήκες λειτουργίας είναι δυσμενέστερες.

### 6.3 Απόδοση Εναλλάκτη Ανάκτησης Θερμότητας

Έχοντας υπόψιν το αντικείμενο της εργασίας, εξετάζεται η μεταβολή της απόδοσης εξαιτίας της συγκέντρωσης ρυπαρών επικαθίσεων στον εναλλάκτη.



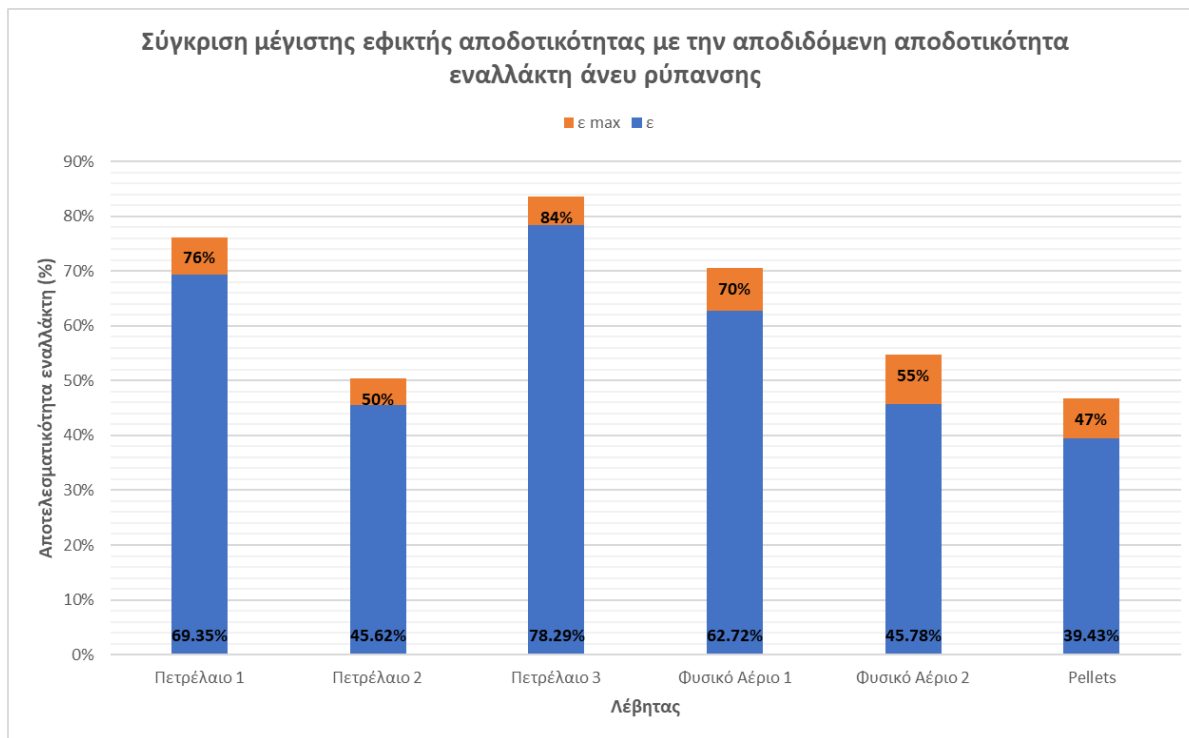
Διάγραμμα Β.6. 14 Αποδοτικότητα ε των εναλλακτών άνευ ρύπανσης σε σύγκριση με την αποδοτικότητα ε' που υπολογίστηκε για εναλλάκτη με ρυπαρές επικαθίσεις

Μικρότερες τιμές αποδοτικότητας παρατηρούμε στους λέβητες των προβληματικών εγκαταστάσεων. Ο λέβητας Πετρελαίου 2 συγκεκριμένα έχει τον μέγιστο λόγο μείωσης απόδοσης. Αυτό αποδίδεται και στην βλάβη του λέβητα, με αποτέλεσμα την κακή λειτουργία του.

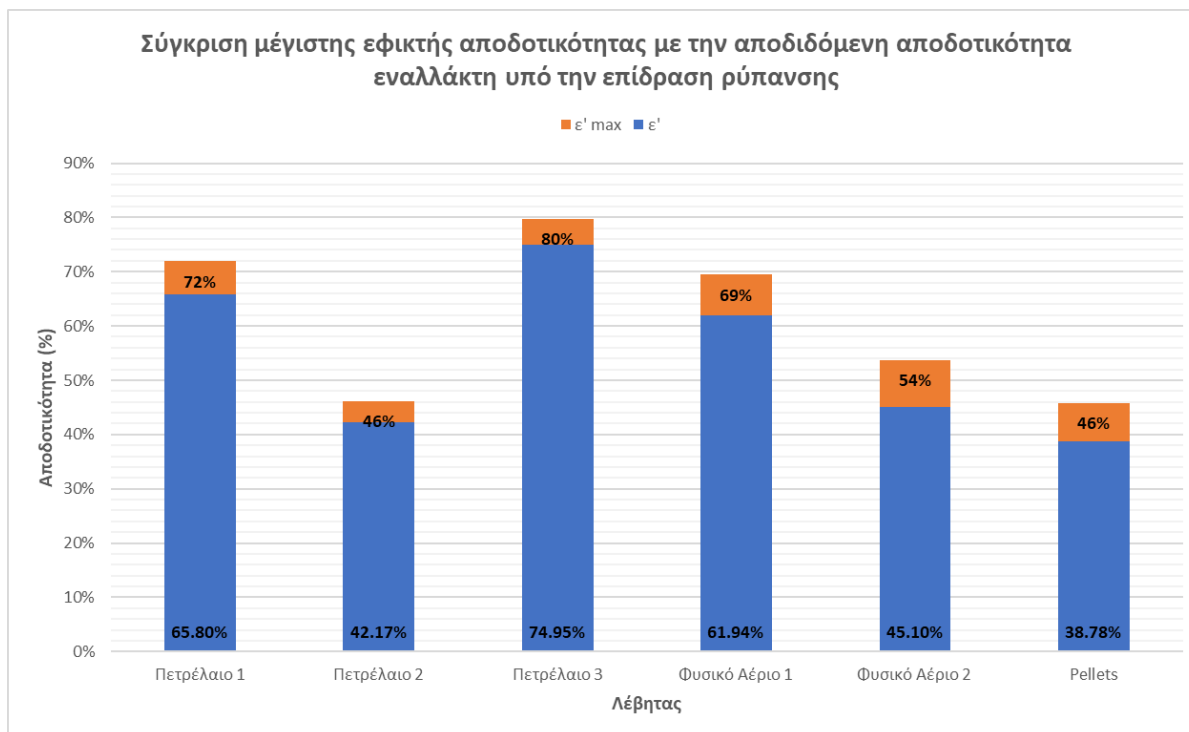
Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ανάκτησης δίνεται από τον εναλλάκτη στην εγκατάσταση Πετρελαίου 3, όμως η ελάχιστη ποσοστιαία μεταβολή απόδοσης υπολογίστηκε στον εναλλάκτη του λέβητα Φυσικού Αερίου 1.

Συνολικά, οι εναλλάκτες σε λέβητες με καύσιμο πετρέλαιο δίνουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις μετά την επίδραση της ρύπανσης. Μικρότερες ποσοστιαίες μεταβολές απόδοσης δίνει το φυσικό αέριο και ακολουθεί ο εναλλάκτης σε λέβητα pellet, με μικρές όμως τιμές αποδοτικότητας.

Η καύση pellet παράγει ποσά τέφρας που επιδρούν σημαντικά στη δημιουργία ρυπαρών επικαθίσεων, μειώνοντας δραστικά τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και την απόδοση, αυτό θα επηρεάσει σημαντικά την ανάκτηση.<sup>(27)</sup>



Διάγραμμα Β.6. 15 Υπολογισμένη αποδοτικότητα  $\epsilon$  σε εναλλάκτη χωρίς ρύπανση, σε σύγκριση με την θεωρητικά μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα σύμφωνα με τον Αριθμό Μονάδων Μεταφοράς NTU



Διάγραμμα Β.6. 16 Υπολογισμένη αποδοτικότητα  $\epsilon'$  σε εναλλάκτη με ρυπαρές επικαθίσεις, σε σύγκριση με την θεωρητικά μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα σύμφωνα με τον Αριθμό Μονάδων Μεταφοράς NTU'

Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται στους λέβητες φυσικού αερίου και pellet, για αυτό κυρίως ευθύνεται ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και ο ρυθμός θερμοχωρητικότητας, που συμμετέχει στις σχέσεις υπολογισμού αποδοτικότητας και αριθμού μονάδων μεταφοράς.

Η αποδοτικότητα σε εναλλάκτη άνευ ρύπανσης υπολογίζεται από τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας, ενώ η μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα υπολογίζεται σύμφωνα με τον NTU.

Οι διαφορές μεταξύ μέγιστης και υπολογισμένης απόδοσης σε εναλλάκτη με επικαθίσεις μειώνονται, πιθανόν λόγω υπολογισμού της αποδοτικότητας με την χρήση εμπειρικής σχέσης, θεωρώντας καλή ακρίβεια του αποτελέσματος.

Γενικά, ο βαθμός απόδοσης θα αυξηθεί αν οι θερμοκρασίες, εισόδου του ψυχρού ρευστού στον εναλλάκτη και εξόδου των καυσαερίων από αυτόν, μειωθούν. Ισχύουν περιορισμοί για την λειτουργία περί προστασίας της συσκευής από ρύπανση και καταπονήσεις, όπως και περιορισμοί που προκύπτουν από την λειτουργία του λέβητα, επομένως δεν θα επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός βαθμός απόδοσης.

### 6.3.1 Εξέταση περίπτωσης λέβητα Φυσικού Αερίου 1

Παρατηρώντας τις μετρήσεις, η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων του λέβητα Φ.Α.1 σημειώνεται στους 185.7 °C. Ο λέβητας φέρει σήμανση από τον κατασκευαστή κατά την οποία η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων πρέπει να ξεπερνά τουλάχιστον τους 190 °C. Αυτό αποδίδεται στις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν την ημέρα λήψης των μετρήσεων.

Λόγω αδυναμίας επανάληψης των μετρήσεων στην τοποθεσία, παραχωρήθηκε σχετικό φύλλο συντήρησης για σύγκριση με τα δεδομένα. Η διαδικασία επεξεργασίας επαναλαμβάνεται για το φύλλο συντήρησης και τα αποτελέσματα ακολουθούν στον πίνακα Β.6.1.

Η θερμοκρασία καυσαερίων είναι επιτρεπτή. Σε σχέση με τις μετρήσεις του αναλυτή, στο φύλλο συντήρησης παρατηρούμε χαμηλότερη καταγεγραμμένη εκπομπή CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια, αλλά καλύτερες συνθήκες λειτουργίας για έξοδο καυσαερίων πάνω από 190°C.

Όσον αφορά την ανάκτηση με εναλλάκτη, παρατηρούμε καλύτερη απόδοση πριν και μετά την επίδραση ρύπανσης, ενώ το ποσοστό μεταβολής της απόδοσης μετά από ρύπανση είναι 1.16% για τα δεδομένα του φύλλου συντήρησης, λιγότερο από το 1.24% που έδωσαν οι μετρήσεις, επομένως έχουμε λιγότερες απώλειες.

Πίνακας Β.6. 1 Σύγκριση δεδομένων από τον αναλυτή με δεδομένα από φύλλο μετρήσεων, Λέβητας Φυσικού Αερίου 1

	Μετρήσεις Φ.Α.1	Φύλλο συντήρησης Φ.Α.1
<b>CO<sub>2</sub> %</b>	9.84	9.52
<b>T<sub>in</sub> (T<sub>gas</sub>)</b>	185.70	204.20
<b>ΔT<sub>lm</sub></b>	60.78	66.51
<b>ΔT<sub>lm, fouled</sub></b>	38.70	45.73
<b>ε</b>	62.72%	67.67%
<b>ε'</b>	61.94%	66.89%
<b>ε<sub>max</sub></b>	70.48%	74.77%
<b>ε<sub>max</sub>'</b>	69.49%	73.81%
<b>Q<sub>max</sub></b>	29957.59	34673.34
<b>Q<sub>real</sub></b>	18408.47	22815.47
<b>Q<sub>fouled</sub></b>	11401.67	15261.35

## 7. Συμπεράσματα και Προτάσεις

### 7.1 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει μια σημαντική συσχέτιση της απόδοσης ανάκτησης με την λειτουργία του λέβητα, στον οποίο θα τοποθετηθεί ο εναλλάκτης. Ο εναλλάκτης παραλαμβάνει τα ρευστά από τον λέβητα, επομένως πρέπει πρώτα να διασφαλίζεται κατάλληλη λειτουργία σε συμφωνία με τις οδηγίες ορθής χρήσης. Οι βέλτιστες συνθήκες καύσης οδηγούν σε κατάλληλες θερμοκρασίες, παροχές και ποιότητες ρευστών.

Όταν εξασφαλίζεται η καλή λειτουργία, τότε τα μέτρα για την ρύπανση του εναλλάκτη θα είναι αποτελεσματικά. Η συχνή συντήρηση και καλή ποιότητα χρησιμοποιούμενου καυσίμου αποτελούν ένα πρώτο μέτρο για την μείωση της ρύπανσης. Σε διαφορετική περίπτωση αναμένονται επικαθίσεις βλαβερών ουσιών από ανεπιθύμητες προσμίξεις στα καύσιμα.

Αποφεύγονται καύσιμα με υψηλές συγκεντρώσεις θείου, επιλέγονται κυρίως φυσικό αέριο και αποθειωμένο πετρέλαιο, ώστε να μην δημιουργούνται διαβρωτικές ενώσεις θείου ( $H_2S$ ,  $H_2SO_4$ ). Στην περίπτωση χρήσης βιομάζας, πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά η πηγή προμήθειας και να γίνεται χρήση βιομάζας που έχει περάσει αυστηρό ποιοτικό έλεγχο.

Η επίδραση της ρύπανσης στην ποσοστιαία μεταβολή της απόδοσης μειώνεται για χρήση φυσικού αερίου, όταν και οι συνθήκες λειτουργίας του λέβητα είναι οι κατάλληλες. Ταυτόχρονα, η κατάλληλη επιλογή υλικού και τύπου εναλλάκτη με τα κατάλληλα κριτήρια κατά της ρύπανσης θα συμβάλει στην καλύτερη δυνατή αποδοτικότητα.

Η επίδραση της ρυπαρότητας παρατηρείται κυρίως στην μεταβολή του συνολικού συντελεστή θερμότητας, δρώντας ως θερμική αντίσταση  $R_f$ . Αρχικά σκοπός ήταν να γίνει υπολογισμός του συντελεστή ρυπαρότητας, όμως λόγω έλλειψης δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικές τιμές από πίνακες τυποποίησης.

Από την διαθέσιμη βιβλιογραφία βρέθηκε πως οι μετρήσεις ρύπανσης γίνονται όταν αυτή έχει ήδη δημιουργηθεί στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας. Από αυτή την διαδικασία προκύπτουν και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν, αφού δεν βρέθηκε διαθέσιμο υπολογιστικό μοντέλο για πρόβλεψη των επικαθίσεων.

Αυτό που μπορεί να σχολιαστεί είναι πως, όταν οι συνθήκες λειτουργίας ευνοούν την ρύπανση, τα πραγματικά αποτελέσματα αποδοτικότητας της ανάκτησης θα είναι δυσμενέστερα και από αυτά που υπολογίστηκαν υπό την επίδραση ρυπαρών επικαθίσεων, αυτό υποστηρίζεται και από την βιβλιογραφική έρευνα.

Επομένως, σε περιπτώσεις βλάβης ή κακής τοποθέτησης, όπως συμβαίνει στους λέβητες Πετρελαίου 2 και Φυσικού αερίου 2 αντίστοιχα, μια μη ορθή εκτίμηση του εναλλάκτη θα οδηγήσει σε συνθήκες ρύπανσης και διάβρωσης λόγω λανθασμένης διαχείρισης των ρευστών. Περαιτέρω,

η δυσμενής και ακατάλληλη λειτουργία της εγκατάστασης καθιστούν την ανάκτηση μη αποδοτική.

Η χρήση αερόθερμου λέβητα pellet δεν είναι αντιπροσωπευτική ως προς το δευτερεύον κύκλωμα, όμως προκύπτει πως η σύσταση του καυσίμου και των καυσαερίων της καύσης του επιδρούν σημαντικά στη δημιουργία επικαθίσεων και στη διάβρωση. Για αποτελεσματική ανάκτηση θα πρέπει να ληφθούν αρκετά μέτρα βελτίωσης.

Τελικά, η ανάκτηση επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την ρύπανση, της οποίας ο ρυθμός αύξησης εξαρτάται από τις θερμοκρασίες και ταχύτητες των ρευστών, με αρνητικές επιπτώσεις στις τελικές θερμοκρασίες της ανάκτησης και τα συναλλασσόμενα ποσά θερμότητας μεταξύ των ρευστών.

Η συγκέντρωση ρυπαρών επικαθίσεων στις επιφάνειες συναλλαγής του εναλλάκτη οδηγεί σε μείωση της διαθέσιμης επιφάνειας, ειδικά στην περίπτωση καύσης πετρελαίου. Για την αντιμετώπιση αυτού προτείνεται συχνός καθαρισμός με την κατάλληλη μέθοδο, χημική ή μηχανική.

Η μείωση της απόδοσής της κυμαίνεται σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα μεταξύ 1.24% έως 7.56% για τυπικές τιμές ρύπανσης, και εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στην εγκατάσταση.

Σημειώνεται, πως η ανάκτηση μειονεκτεί από την άποψη πως δεν είναι πάντα εφαρμόσιμη. Κάθε ποσό ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί είναι ωφέλιμο από την ενεργειακή σκοπιά, όμως ο παράγοντας κόστους δεν επιτρέπει πάντα την επένδυση αν αυτή δεν είναι αποδοτική.

Η ανάκτηση μπορεί να γίνει μόνο από την διαθέσιμη ενέργεια των απορριπτόμενων καυσαερίων, όμως λόγω απωλειών υλικού και θερμικών αντιστάσεων θα ανακτηθεί μέρος αυτών. Ο εναλλάκτης θα πρέπει να επιλεγθεί ή να κατασκευαστεί από κατάλληλα αντιδιαβρωτικά υλικά, να αποφευχθεί η υπερδιαστασιολόγηση και να υπάρξει σύστημα διαχείρισης των συμπυκνωμάτων που προκύπτουν από την ψύξη των καυσαερίων.

Φυσικά, τα πλεονεκτήματα της απόδοσης όταν αυτή εφαρμοστεί ορθά είναι ιδιαίτερα ελκυστικά. Ένα ποσό ενέργειας που μέχρι τώρα χανόταν ως αναπόφευκτη απώλεια επιστρέφει στο σύστημα αυξάνοντας την απόδοσή του. Σημαντικά είναι τα οφέλη για το περιβάλλον, αφού οι βλαβερές ενώσεις των καυσαερίων σταθεροποιούνται πριν εξέλθουν στην ατμόσφαιρα.

Η χρήση εναλλάκτη αντί της αντικατάστασης εξοπλισμού έχει διπλό όφελος, οικονομικό και περιβαλλοντικό, καθώς η απομάκρυνση και ανακύκλωση μιας παλιάς εγκατάστασης φέρει σημαντικές δυσκολίες. Ταυτόχρονα, η απλή προσθήκη της συσκευής αναβαθμίζει την εγκατάσταση προς συμμόρφωση με τα νέα δεδομένα της θέρμανσης, κατά την ισχύουσα νομοθεσία.



## 7.2 Προτάσεις για βελτιστοποίηση κατασκευής και χρήσης εναλλάκτη στην ανάκτηση

Για την χρήση εναλλάκτη θερμότητας για ανάκτηση από τα καυσαέρια, προτείνονται:

- Εφαρμογή της ανάκτησης σε αποδοτικές εγκαταστάσεις, στις οποίες να επικρατούν κατά το δυνατόν βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας
- Χρήση κατάλληλου τύπου εναλλάκτη θερμότητας ώστε να ευνοείται η μετάδοση θερμότητας μεταξύ ρευστών
- Επιλογή γεωμετρίας εναλλάκτη που να επιτρέπει εύκολο καθαρισμό του με τις διαθέσιμες μεθόδους
- Επιλογή κατάλληλου αντιδιαβρωτικού υλικού, ανθεκτικού στα συμπυκνώματα, για την κατασκευή του εναλλάκτη
- Χρήση καυσίμων υψηλής ποιότητας για την καύση στον συνεργαζόμενο λέβητα
- Συχνή συντήρηση του συνόλου της εγκατάστασης από εξειδικευμένο προσωπικό
- Αυστηρή συμμόρφωση με την ισχύουσα νομοθεσία και τις οδηγίες ειδικών για τις εγκαταστάσεις παραγωγής θερμότητας

## 7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σε συνέχεια της παρούσας εργασίας προτείνονται:

- Μέτρηση σε λέβητα βιομάζας με δευτερεύον κύκλωμα ζεστού νερού, ώστε να γίνει σύγκριση με τον αερόθερμο λέβητα, καθώς και να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη άποψη για την ανάκτηση σε λέβητες βιομάζας.
- Μετρήσεις σε εναλλάκτη που έχει εφαρμοστεί η ανάκτηση και έχει εμφανιστεί ρύπανση, ώστε από παρακολούθηση και έλεγχο να βελτιωθούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών.
- Εύρεση ή ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της συγκέντρωσης ρυπαρών επικαθίσεων.

## Bibliography

1. **Νίκας, Παναγιώτης Κων/νου.** *Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική για Μηχανικούς.* Αθήνα : LEEDER Enterprices ltd, 2011. ISBN: 978-618-81509-0-4.
2. **Κουρεμένου, Δ.** *Στοιχεία Θερμοδυναμικής δια Τεχνικούς Ψύξεως.* Αθήνα : Ίδρυμα Ευγενίδου, 1975.
3. **Νίκας, Κωνσταντίνος-Στέφανος Παν. and Παπάζογλου, Ελένη Σπ.** *Αρχές της Μετάδοσης Θερμότητας.* Αθήνα : s.n., 2010. ISBN: 978-960-93-2443-4.
4. **Πασπαλάς, Κωνσταντίνος Γ.** *Εναλλάκτες Θερμότητας.* Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα, 2014. ISBN 978-960-418-439-2.
5. **Çengel, Yunus A. and Ghajar, Afshin J.** *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications.* 6th. s.l. : McGraw-Hill Education, 2019. ISBN 978-0073398198.
6. **Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.** *Οδηγός Εξοικονόμησης Ενέργειας με Συστήματα Ανάκτησης Θερμότητας.* Αθήνα : Κ.Α.Π.Ε.
7. **Αλέξης, Γεώργιος Κ.** *Η Τεχνολογία της Ψύξης.* Αθήνα : Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε., 2007. ISBN: 978-960-351-729-0.
8. **Basu, Prabir, Kefa, Cen and Jestin, Louis.** *Boilers and Burners: Design and Theory.* s.l. : Springer, 2000. ISBN 978-1-4612-1250-8.
9. **Stahlhandel Gröditz GmbH.** Stahlhandel Gröditz GmbH . *stahlportal.com.* [Online] [Cited: July 22, 2021.] <https://www.stahlportal.com/en/stainless-steel/aisi-316-aisi-316l/>.
10. **Stahlhandel Gröditz GmbH .** Stahlhandel Gröditz GmbH . *stahlportal.com.* [Online] [Cited: July 22, 2021.] <https://www.stahlportal.com/en/stock/14841-x15crnisi25-21-solution-annealed-and-quenched/>.
11. **KLIMATIKA.** *klimatika.gr.* [Online] [Cited: July 22, 2021.] <https://www.klimatika.gr/files/lebhtes-aerioy-krama-aloyminioy.pdf>.
12. **Κατσαπρακάκης, Δ. and Μονιάκης, Μ.** *Θέρμανση - Ψύξη - Κλιματισμός.* Αθήνα : Εκδόσεις Κάλλιπος, 2015. ISBN: 978-960-603-339-1.
13. **Δανιήλ, Γ. Φ. and Μιμηκόπουλου, Κων. Ηρ.** *Ναυτικοί Ατμολέβητες. Ναυτικοί Ατμολέβητες.* Αθήνα : Ίδρυμα Ευγενίδου, 1971, pp. 5-16.
14. **Πολυζάκης, Απόστολος.** *Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος.* Πτολεμαΐδα : P.H.C., 2017. ISBN: 978-960-98311-8-5.
15. **Υπουργική απόφαση.** *Ρύθμιση θεμάτων σχετικών με τη λειτουργία των σταερών εστιών καύσης για τη θέρμανση κτιρίων και νερού.* Αθήνα : s.n., 2011.
16. **Study on condensing boiler technology potential accounting various fuels.** Bălănescu, Dan-Teodor and Homutescu, Vlad-Mario. 2019, *Procedia Manufacturing*, Vol. Volume 32. ISSN 2351-9789.

17. Μαυρής, Χάρης. Τεχνολογία Λεβητών Συμπύκνωσης. *Ο Υδραυλικός*. 2007.
18. Αλέξης, Γεώργιος. Σημειώσεις του Μαθήματος Θερμικές Εγκαταστάσεις Παραγωγής Ενέργειας. *Η Καύση σε Ατμοπαραγωγούς*. Αιγάλεω : s.n., 2019. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών.
19. T.E.E. TOTEE 20701-4/2010 ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΘΚ2. [Online] Ιούνιος 2011. [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/dg2013/thermansis/THK2-Epitheorisi%20Egatastaseon%20Thermansis-Ver4\\_July2012.pdf](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/dg2013/thermansis/THK2-Epitheorisi%20Egatastaseon%20Thermansis-Ver4_July2012.pdf).
20. MRU. MRU GmbH. *MRU NOVAPlus Biogas*. [Online] 2020-09-14-V1.00.EN, September 14, 2020. [Cited: April 1, 2021.] [https://www.mru.eu/fileadmin/user\\_upload/files/bedienungsanleitungen-en/9472EN-BIO\\_USER\\_MANUAL\\_NOVAPlusBIOGAS.pdf](https://www.mru.eu/fileadmin/user_upload/files/bedienungsanleitungen-en/9472EN-BIO_USER_MANUAL_NOVAPlusBIOGAS.pdf).
21. Θεοδωρίδης, Γεώργιος, et al. Βιοαισθητήρες. *Βιοαναλυτική Χημεία*. Αθήνα : Εκδόσεις Κάλλιπος, 2015, 7.
22. Popa, Daniel and Udrea, Florin. *Sensors*. May 4, 2019, Semiconductor and CMOS-Based Sensors for Environmental Monitoring, pp. 19(9), 2076.
23. Staff, McGraw-Hill Editorial. *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*. University of Minnesota USA : McGraw-Hill Education, 2003. ISBN 9780070452701.
24. *Methodology for identifying parameters for the TRNSYS model Type 210 -wood pellet stoves and boilers*. Persson, Tomas and Fiedler, Frank. Borlänge : s.n., May 26, 2006. ISSN 1401 - 7555.
25. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Οδηγός Τεχνικών και Οργάνων Ενεργειακών Μετρήσεων. Δεκέμβριος 1999.
26. Bott, T.R. *Fouling of Heat Exchangers*. Birmingham : ELSEVIER , 1995. ISBN: 0-444-82186-4.
27. *Influence of Combustion Parameters on Fouling Composition after Wood Pellet Burning in a Lab-Scale Low-Power Boiler*. Febrero Garrido, Lara, et al. Vigo, Spain : Energies, 2015. ISSN 1996-1073.
28. thyssenkrupp Materials (UK) Ltd. *thyssenkrupp*. [Online] [Cited: July 22, 2021.] <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-314-14841.html>.
29. Ltd, thyssenkrupp Materials (UK). *thyssenkrupp*. [Online] [Cited: July 22, 2021.] <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-316l-14404.html>.
30. Marner, W and Suitor, J. *A survey of gas-side fouling in industrial heat-transfer equipment*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Pasadena : s.n., 1983.

## Παράρτημα

### i. Γραμμική Παρεμβολή

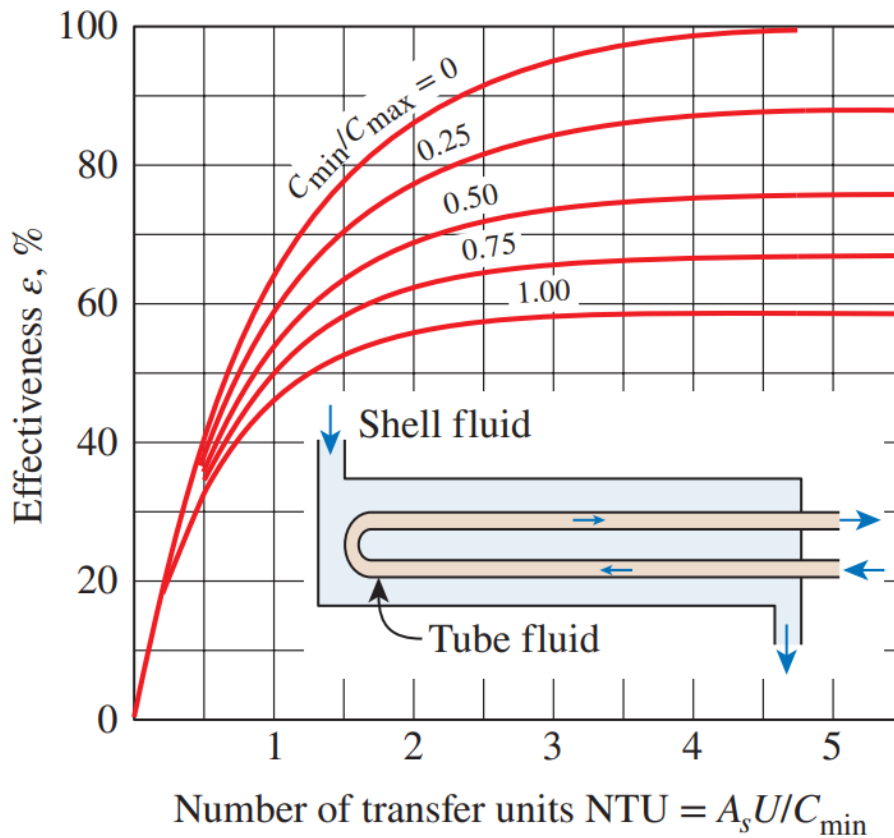
Γνωρίζοντας τα όλες τις τιμές εκτός μίας εκ των X, Y

$X_{\min}$	$Y_{\min}$
$X_{\min} < X < X_{\max}$	$Y_{\min} < Y < Y_{\max}$
$X_{\max}$	$Y_{\max}$

Η άγνωστη τιμή μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\frac{Y - Y_{\min}}{X - X_{\min}} = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (II. 1)$$

### ii. Διάγραμμα $\epsilon$ -NTU



Εικόνα Π. 1 Διάγραμμα  $\epsilon$ -NTU εναλλάκτη αντιρροής τύπου κελύφους-αυλών, με 1 πέρασμα στο κέλυφος και 2,4,6,ν στους αυλούς (5)