



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:**

**«ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΥΣΙΜΩΝ»**



Επιβλέπων: Καρώνης Δημήτριος, Καθηγητής ΕΜΠ

Φοιτητής: Νταντάσιος Γεώργιος

Αριθμός Μητρώου: 05118092

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2022-2023 στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Δημήτριου Καρώνη.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον κύριο Δημήτριο Καρώνη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, μέσω της ανάθεσης ενός τόσο καινοτόμου θέματος. Ήταν μεγάλη μου τιμή που συνεργάστηκα μαζί του και θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και τη συνεχή και ασταμάτητη βοήθεια που μου προσέφερε.

Στη συνέχεια, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Πέτρο Σχοινά για τη συνεργασία, την αμέριστη συμπαράστασή του και τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε. Οι συμβουλές, οι παρατηρήσεις και τα σχόλιά του ήταν για εμένα πολύτιμα εργαλεία καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών, για τη βοήθεια και τις συμβουλές που μου προσέφεραν όταν μου ήταν απαραίτητες. Ιδιαίτερα, την κυρία Υπατία Ζαννίκου που με τη μεγάλη εμπειρία της και την κατάλληλη καθοδήγηση συνέβαλε για να βγει εις πέρας ένα σημαντικό μέρος των μετρήσεων.

Εκτός από τους παραπάνω, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για το προσωπικό του χημείου του διυλιστηρίου των ΕΛ.ΠΕ. και της Motor Oil για τη διάθεση των δειγμάτων καυσίμων που χωρίς αυτά δεν θα μπορούσαν να διεξαχθούν οι μετρήσεις.

Τέλος, η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας δεν θα πραγματοποιούνταν χωρίς την απέραντη υποστήριξη, ενθάρρυνση και βοήθεια της οικογένειάς μου και των φίλων μου, που βρίσκονταν συνεχώς δίπλα μου, όπως και σε όλη τη διάρκεια φοίτησής μου στη σχολή. Θα ήθελα λοιπόν για τους παραπάνω λόγους αλλά και για το ενδιαφέρον που έδειξαν να τους ευχαριστήσω από καρδιάς.

## Περίληψη

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση της ποιότητας ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων, μέσω της χρήσης συσκευής θαλάμου καύσης σταθερού όγκου (Constant Volume Combustion Chamber – CVCC), που μετρά την καθυστέρηση ανάφλεξης και την καθυστέρηση καύσης υπολειμματικών καυσίμων, σύμφωνα με το πρότυπο IP 541/06.

Γενικά, για τον προσδιορισμό της ποιότητας ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων χρησιμοποιείται ο δείκτης αρωματικότητας (CCAI – Calculated Carbon Aromaticity Index), ο οποίος βρίσκεται υπολογιστικά, μέσω εξίσωσης που χρησιμοποιεί ως δεδομένα την πυκνότητα και το κινηματικό ιξώδες του καυσίμου. Είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και το εύρος τιμών του κυμαίνεται από 790 μέχρι 950 περίπου. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη αυτού τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων, ενώ όσο αυξάνεται η τιμή του, μειώνεται η ποιότητα ανάφλεξής τους.

Ωστόσο, δεν είναι λίγες οι φορές που τα αποτελέσματα του δείκτη αρωματικότητας για αρκετά υπολειμματικά καύσιμα δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Για τον λόγο αυτό, καλό είναι να αποτελεί απλά μία πρώτη ένδειξη για την ποιότητα των υπολειμματικών καυσίμων και όχι το μοναδικό κριτήριο για την ποιότητά τους. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, γίνεται χρήση της συσκευής θαλάμου καύσης σταθερού όγκου, που μετρά την καθυστέρηση ανάφλεξης και την καθυστέρηση καύσης των υπολειμματικών καυσίμων και το αποτέλεσμα που δίνει, μετά το τέλος της καύσης, είναι ο δείκτης ECN (Estimated Cetane Number – Εκτιμώμενος Αριθμός Κετανίου). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι είναι η πρώτη φορά στην Ελλάδα που γίνεται προσπάθεια αξιολόγησης της ποιότητας ανάφλεξης υπολειμματικών καυσίμων με τη χρήση τέτοιας συσκευής.

Αναφορικά με το πειραματικό μέρος, προσδιορίστηκε αρχικά το κινηματικό ιξώδες και η πυκνότητα των δειγμάτων καυσίμου, με σκοπό να υπολογιστεί ο δείκτης αρωματικότητάς τους. Στη συνέχεια, ακολούθησαν οι μετρήσεις στη συσκευή FIA – 100/FCA, για τον προσδιορισμό του δείκτη ECN και στο τέλος προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα των δειγμάτων αυτών σε θείο.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων ελήφθησαν βασικά στοιχεία και διαγράμματα για τη συμπεριφορά των δειγμάτων καυσίμων κατά την καύση τους και υπήρχε η δυνατότητα σύγκρισής τους με τα αποτελέσματα του δείκτη αρωματικότητας. Η συσχέτιση μεταξύ των δύο βρέθηκε όχι ιδιαίτερα ικανοποιητική, στηρίζοντας ακόμα περισσότερο τα υφιστάμενα αποτελέσματα ερευνών σχετικά με τις αποκλίσεις του δείκτη αρωματικότητας από την πραγματικότητα. Οι μετρήσεις ως προς την περιεκτικότητα των καυσίμων σε θείο, έδειξαν ότι ως επί το πλείστον τα δείγματα που μετρήθηκαν ήταν υπολειμματικά καύσιμα υψηλού θείου.

Τέλος, παρατηρείται ότι η μέθοδος IP 541/06 δεν αποτελεί έως τώρα προδιαγραφή στο πρότυπο ISO 8217, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στις σταθερές συνθήκες κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

*Λέξεις κλειδιά:* υπολειμματικά καύσιμα, ποιότητα ανάφλεξης, δείκτης αρωματικότητας (CCAI), πρότυπο ISO 8217, εκτιμώμενος αριθμός κετανίου (ECN), πρότυπο IP 541/06

## Abstract

The aim of this thesis is to evaluate the ignition quality of residual fuels through the use of a Constant Volume Combustion Chamber (CVCC) instrument that measures the ignition delay and combustion delay of residual fuels, according to IP 541/06.

In general, the Calculated Carbon Aromaticity Index (CCAI) is used to determine the ignition quality of residual fuels, which is calculated by an equation using the density and kinematic viscosity of the fuel as data. It is a dimensionless value and its range of values varies from approximately 790 to 950. The lower the value of this index, the better the ignition quality of the residual fuels, while the higher the value, the lower the ignition quality of the residual fuels.

However, there are many times when the results of the aromaticity index for several residual fuels do not correspond to reality. In this respect, that aromaticity index is only recommended as a first indication of the quality of residual fuels and not the sole criterion for their quality. The use of a constant volume combustion chamber device is introduced to measure the ignition delay and the combustion delay of the residual fuel. As a result, at the end of the combustion, the Estimated Cetane Number – ECN will emerge. It is worth mentioning that this is the first time in Greece that an attempt has been made to evaluate the ignition quality of residual fuels by using such a device.

Regarding the experimental part, the kinematic viscosity and density of the fuel samples were first determined in order to calculate their aromaticity index. This was followed by tests on the FIA - 100/FCA apparatus to determine the ECN index. Finally, the sulphur content of these samples was determined.

Significant data and diagrams were obtained from the results of the tests, on the behavior of the fuel samples during combustion and it was possible to compare them with the results of the aromaticity index. The correlation between the two was found to be not very satisfactory, further corroborating the results from previous research on the deviation of the aromaticity index from reality. The measurements of the sulphur content of the fuels showed that the most of the samples taken into consideration high-sulphur residual fuels.

Finally, it is observed that the IP 541/06 method is currently not a specification in ISO 8217, which may be due to the stable conditions during the test.

**Key Words:** residual fuels, ignition quality, aromaticity index (CCAI), standard ISO 8217, Estimated Cetane Number (ECN), standard IP 541/06

## Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	ii
Abstract .....	iv
Κατάλογος Διαγραμμάτων .....	ix
Κατάλογος Εικόνων .....	xiii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiv
1. Θεωρητικό Μέρος.....	1
1.1. Ποιότητα ανάφλεξης καυσίμων .....	1
1.2. Αριθμός Κετανίου.....	2
1.3. Δείκτης Κετανίου.....	3
1.4. Γενικά περί μαζούτ .....	4
1.5. Παρασκευή Μαζούτ.....	5
1.6. Ιδιότητες των μαζούτ .....	8
1.6.1. Κινηματικό Ιξώδες.....	9
1.6.2. Πυκνότητα .....	11
1.6.3. Δείκτης αρωματικότητας (CCAI).....	12
1.6.4. Περιεκτικότητα σε θείο .....	12
1.6.5. Σημείο Ανάφλεξης.....	13
1.6.6. Περιεκτικότητα σε υδρόθειο (H <sub>2</sub> S) .....	13
1.6.7. Αριθμός οξύτητας.....	14
1.6.8. Ολικό Υπόστημα .....	14
1.6.9. Εξανθράκωμα .....	15
1.6.10. Σημείο Ροής.....	16
1.6.11. Θερμογόνος Δύναμη.....	17
1.6.12. Περιεκτικότητα σε Νερό .....	18
1.6.13. Περιεκτικότητα σε Τέφρα .....	18
1.6.14. Περιεκτικότητα σε Νάτριο και Βανάδιο.....	19
1.6.15. Περιεκτικότητα σε Αργίλιο και Πυρίτιο .....	20
1.6.16. Περιεκτικότητα σε χρησιμοποιημένα λιπαντικά (ULO – Used Lubricating Oil).....	21
1.6.17. Ασφαλτένια .....	21
1.6.18. Σταθερότητα-Συμβατότητα .....	22
1.7. Δείκτης αρωματικότητας (CCAI - Calculated Carbon Aromaticity Index).....	24
2. Πειραματικό Μέρος .....	29
2.1. Σκοπός.....	29
2.2. Όργανα και συσκευές.....	29
2.3. Πρώτες Ύλες – Αντιδραστήρια .....	30
2.3.1. 1-μέθυλο-ναφθαλίνη.....	30

2.3.2.	2, 2, 4, 4, 6, 8, 8 επτά-μέθυλο-εννεάνιο.....	31
2.3.3.	Μέθυλο-κυκλοεξάνιο .....	31
2.3.4.	Κανονικό δεκαεξάνιο .....	32
2.4.	Αρχές μεθόδων ανάλυσης.....	32
2.4.1.	Μέθοδος IP 541/06 για τον προσδιορισμό της ποιότητας ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων .....	32
2.4.2.	Μέθοδος EN ISO 3104 (ή ASTM D7042) για τον προσδιορισμό του κινηματικού και δυναμικού ιξώδους αλλά και της πυκνότητας των καυσίμων .....	40
2.4.3.	Μέθοδος EN ISO 8754 (ή ASTM D4294) για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο.....	42
2.5.	Πειραματική διαδικασία .....	43
2.5.1.	Σχετικά με τη συσκευή FIA – 100/FCA .....	43
2.5.2.	Σχετικά με τη συσκευή Stabinger Viscometer 3000.....	44
2.5.3.	Σχετικά με τη συσκευή Spectro Xepos της Ametek .....	45
3.	Αποτελέσματα.....	46
3.1.	Σχετικά με τη συσκευή FIA – 100/FCA .....	46
3.1.1.	Μέτρηση δείγματος μέθυλο-κυκλοεξανίου (MCH) .....	49
3.1.2.	Μέτρηση δείγματος επτά-μέθυλο-εννεανίου (HMN).....	50
3.1.3.	Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C <sub>16</sub> ) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) (30% v/v n-C <sub>16</sub> και 70% v/v AMN).....	51
3.1.4.	Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C <sub>16</sub> ) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN) (17,65% v/v n-C <sub>16</sub> με 82,35% v/v HMN).....	52
3.1.5.	Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C <sub>16</sub> ) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) (25% v/v n-C <sub>16</sub> και 75% v/v AMN).....	53
3.1.6.	Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C <sub>16</sub> ) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN) (11,76% v/v n-C <sub>16</sub> με 88,24% v/v HMN).....	54
3.1.7.	Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C <sub>16</sub> ) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) (20% v/v n-C <sub>16</sub> και 80% v/v AMN).....	55
3.1.8.	Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C <sub>16</sub> ) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN) (5,88% v/v n-C <sub>16</sub> με 94,12% v/v HMN).....	56
3.1.9.	Μέτρηση δείγματος 1 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου .....	57
3.1.10.	Μέτρηση δείγματος 2 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου.....	58
3.1.11.	Μέτρηση δείγματος 3 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου.....	60
3.1.12.	Μέτρηση δείγματος 4 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου.....	61
3.1.13.	Μέτρηση δείγματος 5 από διεργαστηριακό έλεγχο .....	62
3.1.14.	Μέτρηση δείγματος 6 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου.....	63
3.1.15.	Μέτρηση δείγματος 7 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου.....	64
3.1.16.	Μέτρηση δείγματος 8 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου.....	66
3.1.17.	Μέτρηση δείγματος 9 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου.....	67
3.1.18.	Μέτρηση δείγματος 10 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου.....	69
3.1.19.	Μέτρηση δείγματος 11 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου.....	70

3.1.20.	Μέτρηση δείγματος 12 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου.....	71
3.1.21.	Μέτρηση δείγματος 13 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου.....	73
3.1.22.	Μέτρηση δείγματος 14 (LCO) από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου .....	74
3.1.23.	Μέτρηση μείγματος 1 – 95% m/m δείγματος 1 με 5% m/m δείγματος 14 (LCO).....	75
3.1.24.	Μέτρηση μείγματος 2 – 90% m/m δείγματος 1 με 10% m/m δείγματος Slurry FCC.	76
3.1.25.	Μέτρηση μείγματος 3 – 85% m/m δείγματος 4 με 15% m/m δείγματος 14 (LCO)....	77
3.1.26.	Μέτρηση μείγματος 4 – 80% m/m δείγματος 2 με 20% m/m δείγματος 14 (LCO)....	78
3.1.27.	Μέτρηση μείγματος 5 – 90% m/m δείγματος 6 με 10% m/m δείγματος Slurry FCC.	79
3.1.28.	Μέτρηση μείγματος 6 – 95% m/m δείγματος 12 με 5% m/m δείγματος 14 (LCO)....	81
3.1.29.	Μέτρηση μείγματος 7 – 95% m/m δείγματος 12 με 5% m/m δείγματος diesel .....	82
3.1.30.	Μέτρηση μείγματος 8 – 80% m/m δείγματος 10 με 20% m/m δείγματος Slurry FCC	84
3.1.31.	Μέτρηση μείγματος 9 – 80% m/m δείγματος 7 με 20% m/m δείγματος 3 .....	85
3.2.	Σχετικά με τη συσκευή Stabinger Viscometer 3000.....	86
3.2.1.	Δείγμα 1.....	88
3.2.2.	Δείγμα 2.....	88
3.2.3.	Δείγμα 3.....	89
3.2.4.	Δείγμα 4.....	90
3.2.5.	Δείγμα 5.....	91
3.2.6.	Δείγμα 6.....	91
3.2.7.	Δείγμα 7.....	92
3.2.8.	Δείγμα 8.....	93
3.2.9.	Δείγμα 9.....	94
3.2.10.	Δείγμα 10.....	94
3.2.11.	Δείγμα 11.....	95
3.2.12.	Δείγμα 12.....	96
3.2.13.	Δείγμα 13.....	97
3.2.14.	Δείγμα 14 (LCO).....	97
3.2.15.	Δείγμα Slurry FCC .....	98
3.2.16.	Δείγμα diesel .....	99
3.2.17.	Μείγμα 1.....	99
3.2.18.	Μείγμα 2.....	100
3.2.19.	Μείγμα 3.....	101
3.2.20.	Μείγμα 4.....	101
3.2.21.	Μείγμα 5.....	102
3.2.22.	Μείγμα 6.....	103
3.2.23.	Μείγμα 7.....	104
3.2.24.	Μείγμα 8.....	104
3.2.25.	Μείγμα 9.....	105



3.3.	Σχετικά με τη συσκευή Spectro Xepos της Ametek .....	106
4.	Προβλήματα κατά τις μετρήσεις με τη συσκευή FIA – 100/FCA .....	107
5.	Συμπεράσματα .....	109
5.1.	Σχετικά με τις μετρήσεις στη συσκευή FIA – 100/FCA και στη SVM 3000 .....	109
5.2.	Σχετικά με τις μετρήσεις στη συσκευή Spectro Xepos .....	120
5.3.	Γενικά συμπεράσματα .....	120
	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	124
	Βιβλιογραφία .....	125

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Μεταβολή ιξώδους σε σχέση με τη θερμοκρασία ανά κατηγορία μαζούτ. ....	10
Διάγραμμα 2. Νομογράφημα του δείκτη αρωματικότητας, μέσω της πυκνότητας και του ιξώδους του καυσίμου. ....	25
Διάγραμμα 3. Σχέση μεταξύ της καθυστέρησης ανάφλεξης και του δείκτη CCAI υπολειμματικών καυσίμων.....	26
Διάγραμμα 4. Σχέση μεταξύ του λόγου υδρογόνου προς άνθρακα (H/C) και του δείκτη αρωματικότητας CCAI. ....	27
Διάγραμμα 5. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος MCH σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση. ....	49
Διάγραμμα 6. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος MCH σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.....	50
Διάγραμμα 7. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση. ....	50
Διάγραμμα 8. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.....	51
Διάγραμμα 9. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 30% v/v n-C <sub>16</sub> με 70% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση. ....	51
Διάγραμμα 10. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 30% v/v n-C <sub>16</sub> με 70% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.....	52
Διάγραμμα 11. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 17,65% v/v n-C <sub>16</sub> με 82,35% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.....	52
Διάγραμμα 12. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 17,65% v/v n-C <sub>16</sub> με 82,35% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.....	53
Διάγραμμα 13. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 25% v/v n-C <sub>16</sub> με 75% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση. ....	53
Διάγραμμα 14. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 25% v/v n-C <sub>16</sub> με 75% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.....	54
Διάγραμμα 15. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 11,76% v/v n-C <sub>16</sub> με 88,24% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.....	54
Διάγραμμα 16. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 11,76% v/v n-C <sub>16</sub> με 88,24% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.....	55
Διάγραμμα 17. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 20% v/v n-C <sub>16</sub> με 80% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση. ....	55
Διάγραμμα 18. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 20% v/v n-C <sub>16</sub> με 80% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.....	56
Διάγραμμα 19. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 5,88% v/v n-C <sub>16</sub> με 94,12% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.....	56
Διάγραμμα 20. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 5,88% v/v n-C <sub>16</sub> με 94,12% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.....	57
Διάγραμμα 21. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 1 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση. ....	58
Διάγραμμα 22. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 1 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.....	58
Διάγραμμα 23. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 2 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση. ....	59
Διάγραμμα 24. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 2 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.....	59





Διάγραμμα 73. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 10. ....	95
Διάγραμμα 74. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 11. ....	95
Διάγραμμα 75. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 12. ....	96
Διάγραμμα 76. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 13. ....	97
Διάγραμμα 77. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα Slurry FCC. ....	98
Διάγραμμα 78. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 1. ....	99
Διάγραμμα 79. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 2. ....	100
Διάγραμμα 80. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 3. ....	101
Διάγραμμα 81. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 4. ....	102
Διάγραμμα 82. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 5. ....	102
Διάγραμμα 83. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 6. ....	103
Διάγραμμα 84. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 7. ....	104
Διάγραμμα 85. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 8. ....	105
Διάγραμμα 86. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 9. ....	105
Διάγραμμα 87. Συσχέτιση μεταξύ δείκτη αρωματικότητας (CCAI) και εκτιμώμενου αριθμού κετανίου (ECN) για τα δείγματα και τα μείγματα που μετρήθηκαν. ....	121
Διάγραμμα 88. Συσχέτιση μεταξύ δείκτη αρωματικότητας (CCAI) και εκτιμώμενου αριθμού κετανίου (ECN) για τα δείγματα και τα μείγματα που παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. ....	122

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Πρότυπος κινητήρας CFR για τη μέτρηση του αριθμού κετανίου ενός καυσίμου. ....	2
Εικόνα 2. Διάγραμμα συσχέτισης των μεθόδων Conradson και Ramsbottom για τον προσδιορισμό του εξανθρακώματος.....	16
Εικόνα 3. Συσχέτιση των μεθόδων Conradson και Micro για τον προσδιορισμό του εξανθρακώματος. ....	16
Εικόνα 4. Προσκόλληση σωματιδίων τέφρας στους αλούς του λέβητα.....	19
Εικόνα 5. Διάβρωση στον εξοπλισμό στροβίλου, λόγω της χρήσης καυσίμου με μεγάλη περιεκτικότητα σε νάτριο και βανάδιο. ....	20
Εικόνα 6. Μία ενδεικτική δομή των ασφαλτενίων που περιέχονται στα υπολειμματικά καύσιμα. ....	22
Εικόνα 7. Σχηματισμός ιλύος και απόφραξη φίλτρων, λόγω της ασυμβατότητας καυσίμων. ....	23
Εικόνα 8. Φθορές εξοπλισμού ναυτικού κινητήρα, από τη χρήση καυσίμου με προβληματική συμπεριφορά καύσης. ....	28
Εικόνα 9. Πρότυπα αντιδραστήρια. 1-μέθυλο-ναφθαλίνη, κανονικό δεκαεξάνιο, μέθυλο-κυκλοεξάνιο και 2, 2, 4, 4, 6, 8, 8 επτά-μέθυλο-εννεάνιο (από αριστερά προς τα δεξιά). ....	30
Εικόνα 10. Συντακτικός τύπος της 1-μέθυλο-ναφθαλίνης.....	30
Εικόνα 11. Συντακτικός τύπος του 2, 2, 4, 4, 6, 8, 8 επτά-μέθυλο-εννεανίου.....	31
Εικόνα 12. Συντακτικός τύπος του μέθυλο-κυκλοεξανίου.....	31
Εικόνα 13. Συντακτικός τύπος του κανονικού δεκαεξανίου.....	32
Εικόνα 14. Καμπύλη του ROHR σε σχέση με τον χρόνο, με τη σχηματική απεικόνιση των τεχνικών όρων.....	35
Εικόνα 15. Καμπύλη της πίεσης σε σχέση με τον χρόνο, με τη σχηματική απεικόνιση των τεχνικών όρων.....	35
Εικόνα 16. Σχηματική απεικόνιση του αναλυτή καύσης.....	36
Εικόνα 17. Συσκευή FIA – 100/FCA της Fueltech Solutions AS. ....	37
Εικόνα 18. Συσκευή Stabinger Viscometer 3000 της Anton Paar.....	41
Εικόνα 19. Το εσωτερικό της συσκευής SVM 3000 της Anton Paar.....	41
Εικόνα 20. Συσκευή Spectro Xeros της Ametek για τον προσδιορισμό θείου σε πετρελαϊκά προϊόντα.....	43
Εικόνα 21. Εσωτερικό μέρος της συσκευής Spectro Xeros της Ametek.....	43
Εικόνα 22. Εναπόθεση στερεών σωματιδίων πάνω στο σύστημα φίλτρου της συσκευής FIA – 100/FCA.....	107
Εικόνα 23. Έμφραξη της οπής της βαλβίδας εξάτμισης (exhaust valve) της συσκευής FIA – 100/FCA.....	108
Εικόνα 24. Αποκόλληση των στηριγμάτων μεταξύ του ηλεκτρονικού κυκλώματος και της πλάκας του αισθητήρα ακροφυσίου της συσκευής FIA – 100/FCA. ....	108

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Προδιαγραφές υπολειμματικών καυσίμων ναυτιλίας, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8217. ....	8
Πίνακας 2. Αξιολόγηση της σταθερότητας και της συμβατότητας καυσίμων σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D4740. ....	23
Πίνακας 3. Κατηγοριοποίηση υπολειμματικών καυσίμων με βάση τις τιμές του δείκτη αρωματικότητας (CCAI). ....	27
Πίνακας 4. Εύρος των παραμέτρων των μετρήσεων και τιμές επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας. ....	39
Πίνακας 5. Κατάταξη δειγμάτων και μειγμάτων καυσίμων που μετρήθηκαν με τη συσκευή FIA – 100/FCA. ....	47
Πίνακας 6. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος MCH. ....	49
Πίνακας 7. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος HMN. ....	50
Πίνακας 8. Αποτελέσματα πρώτης μέτρησης του μείγματος 30% v/v n-C <sub>16</sub> με 70% v/v AMN. ....	51
Πίνακας 9. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 17,65% v/v n-C <sub>16</sub> με 82,35% v/v HMN. ....	52
Πίνακας 10. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 25% v/v n-C <sub>16</sub> με 75% v/v AMN. ....	53
Πίνακας 11. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 11,76% v/v n-C <sub>16</sub> με 88,24% v/v HMN. ....	54
Πίνακας 12. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 20% v/v n-C <sub>16</sub> με 80% v/v AMN. ....	55
Πίνακας 13. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 5,88% v/v n-C <sub>16</sub> με 94,12% v/v HMN. ....	56
Πίνακας 14. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 1. ....	57
Πίνακας 15. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 1. ....	57
Πίνακας 16. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 2. ....	58
Πίνακας 17. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 2. ....	59
Πίνακας 18. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 3. ....	60
Πίνακας 19. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 3. ....	60
Πίνακας 20. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 4. ....	61
Πίνακας 21. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 4. ....	61
Πίνακας 22. Αποτελέσματα μέτρησης του δείγματος 5. ....	63
Πίνακας 23. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 6. ....	63
Πίνακας 24. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 6. ....	63
Πίνακας 25. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 7. ....	64
Πίνακας 26. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 7. ....	65
Πίνακας 27. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 8. ....	66
Πίνακας 28. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 8. ....	66
Πίνακας 29. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 9. ....	67
Πίνακας 30. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 9. ....	67
Πίνακας 31. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 10. ....	69
Πίνακας 32. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 10. ....	69
Πίνακας 33. Αποτελέσματα πρώτης μέτρησης του δείγματος 11. ....	70
Πίνακας 34. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 11. ....	70
Πίνακας 35. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 12. ....	71
Πίνακας 36. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 12. ....	72
Πίνακας 37. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 13. ....	73
Πίνακας 38. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 13. ....	73
Πίνακας 39. Αποτελέσματα μέτρησης του δείγματος 14 (LCO). ....	74
Πίνακας 40. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 1. ....	75
Πίνακας 41. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 1. ....	75

Πίνακας 42. Αποτελέσματα μέτρησης του μείγματος 2. ....	76
Πίνακας 43. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 3. ....	77
Πίνακας 44. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 3. ....	77
Πίνακας 45. Αποτελέσματα πρώτης μέτρησης του μείγματος 4. ....	78
Πίνακας 46. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 4. ....	78
Πίνακας 47. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 5. ....	79
Πίνακας 48. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 5. ....	80
Πίνακας 49. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 6. ....	81
Πίνακας 50. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 6. ....	81
Πίνακας 51. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 7. ....	82
Πίνακας 52. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 7. ....	82
Πίνακας 53. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 8. ....	84
Πίνακας 54. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 8. ....	84
Πίνακας 55. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 9. ....	85
Πίνακας 56. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 9. ....	85
Πίνακας 57. Αναγωγή της τιμής της πυκνότητας ενός καυσίμου στους 15 °C. ....	87
Πίνακας 58. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 1. ....	88
Πίνακας 59. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 1. ....	88
Πίνακας 60. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 2. ....	88
Πίνακας 61. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 2. ....	89
Πίνακας 62. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 3. ....	89
Πίνακας 63. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 3. ....	90
Πίνακας 64. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 4. ....	90
Πίνακας 65. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 4. ....	90
Πίνακας 66. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 5. ....	91
Πίνακας 67. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 5. ....	91
Πίνακας 68. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 6. ....	91
Πίνακας 69. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 6. ....	92
Πίνακας 70. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 7. ....	92
Πίνακας 71. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 7. ....	93
Πίνακας 72. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 8. ....	93
Πίνακας 73. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 8. ....	93
Πίνακας 74. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 9. ....	94
Πίνακας 75. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 9. ....	94
Πίνακας 76. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 10. ....	94
Πίνακας 77. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 10. ....	95
Πίνακας 78. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 11. ....	95
Πίνακας 79. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 11. ....	96
Πίνακας 80. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 12. ....	96
Πίνακας 81. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 12. ....	96
Πίνακας 82. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 13. ....	97
Πίνακας 83. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 13. ....	97
Πίνακας 84. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 14 (LCO). ....	97
Πίνακας 85. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 14 (LCO). ....	98
Πίνακας 86. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα Slurry FCC. ....	98
Πίνακας 87. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος Slurry FCC. ....	98
Πίνακας 88. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα diesel. ....	99
Πίνακας 89. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 1. ....	99



Πίνακας 90. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 1. ....	100
Πίνακας 91. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 2. ....	100
Πίνακας 92. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 2. ....	100
Πίνακας 93. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 3. ....	101
Πίνακας 94. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 3. ....	101
Πίνακας 95. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 4. ....	101
Πίνακας 96. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 4. ....	102
Πίνακας 97. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 5. ....	102
Πίνακας 98. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 5. ....	103
Πίνακας 99. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 6. ....	103
Πίνακας 100. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 6. ....	103
Πίνακας 101. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 7. ....	104
Πίνακας 102. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 7. ....	104
Πίνακας 103. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 8. ....	104
Πίνακας 104. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 8. ....	105
Πίνακας 105. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 9. ....	105
Πίνακας 106. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 9. ....	106
Πίνακας 107. Περιεκτικότητα δειγμάτων 1 έως και 13 και δείγματος Slurry FCC σε θείο. ....	106
Πίνακας 108. Αποτελέσματα των μετρήσεων της συσκευής FIA – 100/FCA σχετικά με τα δείγματα MCH και HMN και τα μείγματα κανονικού δεκαεξανίου (n-C16) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C16) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN). ....	109
Πίνακας 109. Αποτελέσματα των μετρήσεων των συσκευών FIA – 100/FCA και SVM 3000, σχετικά με τα δείγματα 1 έως και 14 και με τα μείγματα 1 έως και 9. ....	110

# 1. Θεωρητικό Μέρος

## 1.1. Ποιότητα ανάφλεξης καυσίμων

Η ποιότητα ανάφλεξης των καυσίμων αποτελεί μέτρο της σχετικής ευκολίας με την οποία τα καύσιμα καίγονται σε έναν κινητήρα.

Όσον αφορά στους κινητήρες ανάφλεξης με σπινθηριστή (κινητήρες Otto), που έχουν ως βασικό καύσιμο τη βενζίνη, η ποιότητα ανάφλεξης τους χαρακτηρίζεται από την κλίμακα του αριθμού οκτανίου (Octane Number - ON). Αυτή προτάθηκε το 1926 από τον Graham Edgar και τελικά καθιερώθηκε ως επίσημη μέθοδος το 1929. Ο αριθμός οκτανίου μετράται με δύο διαφορετικές μεθόδους: την ερευνητική μέθοδο (Research Octane Number – RON), που σχετίζεται με ήπιες συνθήκες οδήγησης και χαμηλές στροφές και τη μέθοδο κινητήρα (Motor Octane Number – MON), η οποία δείχνει την ποιότητα του καυσίμου σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας και σε υψηλές στροφές [1].

Αντίστοιχα, η ποιότητα ανάφλεξης ενός καυσίμου σε κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση (κινητήρας diesel), που λειτουργεί με καύσιμο diesel, παρουσιάζεται μέσω του αριθμού κετανίου (Cetane Number – CN). Αυτός χαρακτηρίζει την ευκολία με την οποία το καύσιμο αυταναφλέγεται αμέσως μετά την έγχυσή του. Όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός αυτός, τόσο πιο εύκολα αυταναφλέγεται το καύσιμο. Ο αριθμός κετανίου δείχνει την ποιότητα καύσης του καυσίμου και συνδέεται άμεσα με τη χρονική περίοδο καθυστέρησης μεταξύ της έναρξης της έγχυσης και την έναρξη της καύσης του καυσίμου. Η χρονική αυτή καθυστέρηση ονομάζεται καθυστέρηση ανάφλεξης, γνωστή και ως Ignition Delay και εξαρτάται από παράγοντες συσχετιζόμενους με τον κινητήρα, τον λόγο συμπίεσης, την πίεση έγχυσης του καυσίμου, το ακροφύσιο έγχυσης, τον κύλινδρο, τη γεωμετρία του πιστονιού και την ποιότητα του καυσίμου. Υψηλή ποιότητα καύσης εμφανίζουν τα καύσιμα diesel που παρουσιάζουν μικρή καθυστέρηση ανάφλεξης. Όσο μικρότερη καταγράφεται αυτή η χρονική περίοδος, τόσο λιγότερο προ-αναμεμειγμένο μείγμα καυσίμου/αέρα συσσωρεύεται στο εσωτερικό του κυλίνδρου πριν από την καύση, συμβάλλοντας έτσι στο να παραμένει σε λογικά επίπεδα ο ρυθμός της καύσης. Έτσι, αντισταθμίζονται προβλήματα όπως η πολύ υψηλή πίεση εντός του θαλάμου καύσης του κινητήρα που οδηγεί σε μειωμένη απόδοση, σε αυξημένα επίπεδα θορύβου και σε άλλες μελλοντικές βλάβες. Αντίθετα, όσο αυξάνεται η καθυστέρηση ανάφλεξης του καυσίμου, δηλαδή όσο η ποιότητα ανάφλεξης μειώνεται, εμφανίζονται προβλήματα στη λειτουργία του κινητήρα όπως ο αυξημένος χρόνος εκκίνησης, μεγαλύτερα επίπεδα θορύβου του και έντονες εκπομπές καυσαερίων. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι μεγάλες τιμές αριθμού κετανίου έχουν τα καύσιμα με καλή ποιότητα ανάφλεξης, δηλαδή αυτά που έχουν μικρή καθυστέρηση ανάφλεξης άρα και πιο εύκολη ανάφλεξη [2], [3]. Ο τρόπος με τον οποίο μετράται ο αριθμός κετανίου ενός καυσίμου diesel, αναφέρεται αναλυτικά στην παράγραφο 1.2.

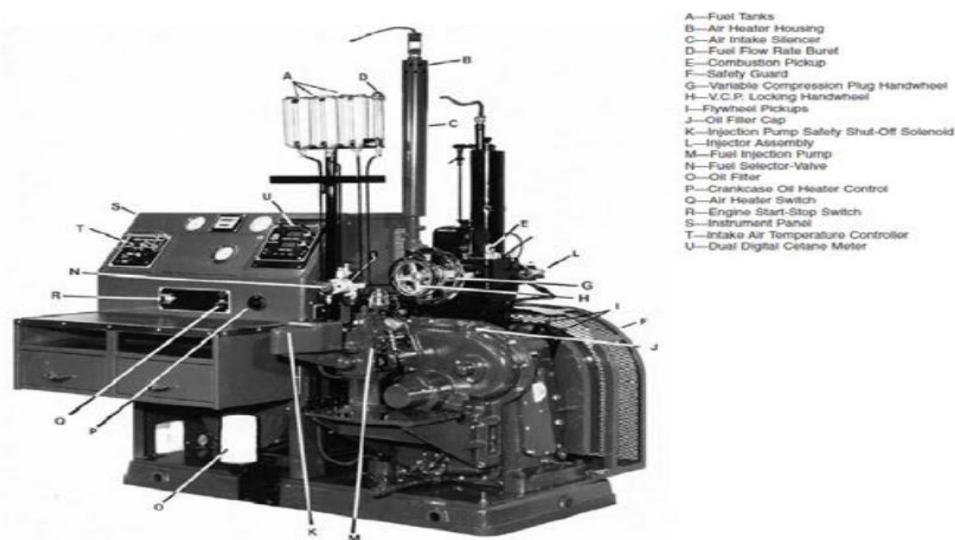
## 1.2. Αριθμός Κετανίου

Γενικά, ο αριθμός κετανίου των καυσίμων εξαρτάται από τη σύστασή τους, δηλαδή από την περιεκτικότητά τους σε διαφορετικού τύπου υδρογονάνθρακες. Η κατηγοριοποίηση των υδρογονανθράκων με βάση τον αριθμό κετανίου που εμφανίζουν, είναι κατά φθίνουσα σειρά [1]:

Κανονικοί Παραφινικοί > Ολεφινικοί > Ναφθενικοί > Ισοπαραφινικοί > Αρωματικοί

Πιο συγκεκριμένα, τον υψηλότερο αριθμό κετανίου τον επιτυγχάνουν οι μακριάς αλυσίδας κανονικοί παραφινικοί υδρογονάνθρακες. Στη συνέχεια, υψηλό αριθμό κετανίου εμφανίζουν οι ολεφινικοί υδρογονάνθρακες (περιέχουν τουλάχιστον έναν διπλό δεσμό στο μόριό τους). Ακολουθούν οι ναφθενικοί υδρογονάνθρακες (τα μόριά τους σχηματίζουν δακτύλιο) που επιτυγχάνουν αριθμούς κετανίου από 40 έως 70. Ο αριθμός κετανίου τους αυξάνεται όσο αυξάνεται και το μήκος της πλευρικής τους αλυσίδας άρα και το μοριακό τους βάρος. Οι ισοπαραφινικοί υδρογονάνθρακες δεν ενδείκνυνται συνήθως για χρήση συστατικών υψηλού αριθμού κετανίου, αφού η χαμηλότερή τους τιμή είναι ίση με 10, αλλά μπορούν να επιτύχουν και τιμές που φτάνουν το 80, όσο λιγότερες πλευρικές ομάδες περιέχουν. Τέλος, οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες έχουν υψηλή αντίσταση στην αυτανάφλεξη και έχουν αριθμούς κετανίου από την περιοχή του 10 έως 70, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στα μόρια με μεγάλες πλευρικές ομάδες. Επισημαίνεται ότι οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες που αποτελούνται από δύο ή τρεις αρωματικούς δακτυλίους παρουσιάζουν πολύ χαμηλούς αριθμούς κετανίου, μικρότερους από 20 [4].

Ο προσδιορισμός της ποιότητας ανάφλεξης ενός καυσίμου diesel και κατ' επέκταση του αριθμού κετανίου του, γίνεται μέσω της χρήσης ενός πρότυπου κινητήρα CFR (Cooperative Fuel Research), δηλαδή ενός πρότυπου κινητήρα μέτρησης αριθμού κετανίου, που φαίνεται στην Εικόνα 1 και με βάση τη μέθοδο ASTM D613 που ισοδυναμεί με την EN ISO 5165 [5].



Εικόνα 1. Πρότυπος κινητήρας CFR για τη μέτρηση του αριθμού κετανίου ενός καυσίμου.

Πηγή: Wilson, G. I. R., Comparison of ASTM D613 and ASTM D6890.

Η μέτρηση του αριθμού κετανίου ενός καυσίμου στον πρότυπο κινητήρα CFR περιλαμβάνει την καύση του καυσίμου που εξετάζεται, κάτω από πρότυπες συνθήκες καύσης και τη σύγκριση της ποιότητας ανάφλεξης του με την ποιότητα ανάφλεξης πρότυπων μειγμάτων γνωστών καυσίμων αναφοράς με γνωστή τιμή αριθμού κετανίου. Τα δύο καύσιμα αναφοράς ήταν αρχικά το κανονικό δεκαεξάνιο ή κετάνιο ( $n\text{-C}_{16}\text{H}_{34}$ ) που έχει αριθμό κετανίου ίσο με 100 και η 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) που ο αριθμός κετανίου της ισούται με 0. Ωστόσο, λόγω της κακής ποιότητας ανάφλεξης της 1-μέθυλο-ναφθαλίνης (πολύ μεγάλη καθυστέρηση ανάφλεξης), το καύσιμο αναφοράς με την κακή ποιότητα ανάφλεξης ορίστηκε να είναι το 2, 2, 4, 4, 6, 8, 8 επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN) που έχει αριθμό κετανίου ίσο με 15. Η σχέση με την οποία υπολογίζεται ο αριθμός κετανίου (CN) ενός καυσίμου, που έχει την ίδια ποιότητα ανάφλεξης με συγκεκριμένης σύστασης μείγμα των δύο καυσίμων αναφοράς (κ-δεκαεξάνιο και επτά-μέθυλο-εννεάνιο), περιγράφεται από την Εξίσωση 1.1 [6]:

$$\text{CN} = \% \text{ Όγκος}_{\kappa\text{-δεκαεξανίου}} + 0,15 * (\% \text{ Όγκος}_{\text{επτά-μέθυλο-εννεάνιο}}) \quad (\text{Εξ. 1.1})$$

Παρόλα αυτά, η μέτρηση του αριθμού κετανίου ενός καυσίμου σε πρότυπο κινητήρα CFR δεν έχει ευρεία χρήση, κυρίως λόγω:

- του υψηλού κόστους κτήσης και λειτουργίας (ακριβά καύσιμα αναφοράς) ενός τέτοιου πρότυπου κινητήρα
- της πολύπλοκης και ακριβής συντήρησής του
- της εκτεταμένης διάρκειας της μέτρησης, καθώς και
- της χαμηλής ακρίβειας που παρουσιάζει η μέθοδος

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένας εναλλακτικός τρόπος μέτρησης του αριθμού κετανίου ενός καυσίμου. Συνοπτικά, το καύσιμο καίγεται σε συγκεκριμένα πρότυπα όργανα μέτρησης, τα οποία μετρούν την καθυστέρηση ανάφλεξης και μέσω εμπειρικών σχέσεων υπολογίζουν τον παραγόμενο αριθμό κετανίου (Derived Cetane Number - DCN) που εμφανίζει πολύ καλή συσχέτιση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε πρότυπο κινητήρα [2]. Ωστόσο, δεν θα γίνει περαιτέρω ανάλυση του νέου τρόπου μέτρησης του αριθμού κετανίου, επειδή δεν αποτελεί κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

### 1.3. Δείκτης Κετανίου

Ο προσδιορισμός του αριθμού κετανίου ενός καυσίμου όπως τελικά γίνεται αντιληπτό, αποτελεί ακριβή, χρονοβόρα και όχι εύκολη διαδικασία, γεγονός που οδήγησε στη δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων και εμπειρικών σχέσεων που προβλέπουν τον αριθμό κετανίου ενός καυσίμου με πολύ μεγαλύτερη ευκολία βάσει των φυσικοχημικών του χαρακτηριστικών. Οι εμπειρικές αυτές σχέσεις βασίζονται στη γνώση της πυκνότητας και της καμπύλης απόσταξης του καυσίμου και το αποτέλεσμα δίνεται ως δείκτης κετανίου του καυσίμου ή CCI (Calculated Cetane Index). Η πιο διαδεδομένη μαθηματική σχέση που έχει επικρατήσει τελικά δίνοντας πολύ καλά και ικανοποιητικά αποτελέσματα, χρησιμοποιεί την τιμή της πυκνότητας του καυσίμου και τρία σημεία της καμπύλης απόσταξής του. Έτσι, ο δείκτης κετανίου (CCI) πλέον

προσδιορίζεται με τη μέθοδο ASTM D4737 (ή EN ISO 4264) και υπολογίζεται μέσω της Εξίσωσης 1.2 [2], [1].

$$CCI = 45,2 + 0,0892 * (T_{10} - 215) + 0,131 * (T_{50} - 260) + 0,0523 * (T_{90} - 310) + 0,901 * B * (T_{50} - 260) - 0,420 * B * (T_{90} - 310) + 0,00049 * (T_{10} - 215)^2 - 0,00049 * (T_{90} - 310)^2 + 107,0 * B + 60,0 * B^2 \text{ (Εξ. 1.2)}$$

όπου: B είναι ίσο με  $B = e^{-3,5*(D-0,85)} - 1$

D είναι η πυκνότητα του καυσίμου στους 15 °C, σε g/ml

T<sub>i</sub> είναι η θερμοκρασία ανάκτησης του i=10%, 50%, 90% του καυσίμου σε °C

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μία βασική διαφορά του δείκτη κετανίου και του αριθμού κετανίου είναι ότι ο πρώτος δεν μπορεί να ανιχνεύσει τα βελτιωτικά πρόσθετα του αριθμού κετανίου στο καύσιμο αν υπάρχουν [2].

#### 1.4. Γενικά περί μαζούτ

Τα υπολειμματικά καύσιμα ή μαζούτ (από τη γαλλική λέξη mazout) ή πετρέλαιο εξωτερικής καύσης (fuel oil) αποτελούν τα υπολείμματα της απόσταξης του αργού πετρελαίου. Το σημείο βρασμού του υπολείμματος είναι σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 350 °C και αποτελείται από υδρογονάνθρακες με περισσότερα από είκοσι τέσσερα (24) άτομα άνθρακα [7], [8]. Τα μαζούτ είναι πολύπλοκα και ετερογενή μείγματα, που αποτελούνται από παραφινικούς, ολεφινικούς, αρωματικούς και ναφθενικούς υδρογονάνθρακες, από ετεροάτομα όπως είναι το θείο και το άζωτο καθώς και από μέταλλα όπως το νικέλιο, το βανάδιο, ο σίδηρος και πολλά άλλα [9]. Τα κλάσματα που αποτελούν τα καύσιμα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες.

- Έλαια (oils) ή μαλτένια

Μείγματα παραφινικών, ναφθενικών και αρωματικών υδρογονανθράκων, με μοριακά βάρη που δεν ξεπερνούν το 800 και είναι διαλυτά σε προπάνιο.

- Ρητίνες (resins)

Συμπυκνωμένοι αρωματικοί υδρογονάνθρακες με ναφθενικούς δακτυλίους, τα μοριακά τους βάρη βρίσκονται στην περιοχή του 1000 και είναι διαλυτά σε πεντάνιο και επτάνιο.

- Ασφαλτένια (asphaltenes)

Μεγάλες πολυαρωματικές δομές δακτυλίων άνθρακα που έχουν αλειφατικές πλευρικές αλυσίδες (που περιλαμβάνουν καρβοξυλικά οξέα, καρβονύλια και φαινόλες), περιέχουν το μεγαλύτερο μέρος ετεροατόμων και μετάλλων, τα μοριακά τους βάρη βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ 1000 και 2000 και είναι αδιάλυτα σε παραφινικούς διαλύτες (όπως το προπάνιο, το πεντάνιο και το επτάνιο), αλλά διαλύονται σε τολουόλιο.

Είναι γνωστό ότι ο ρόλος των ρητινών είναι να διατηρεί σε ισορροπία τα έλαια με τα ασφαλτένια.

Τα υπολειμματικά καύσιμα είναι μαύρα παχύρρευστα υγρά σε περιβαλλοντικές συνθήκες, γι' αυτό και για να έχουν την κατάλληλη ρευστότητα για τη μεταφορά τους είναι απαραίτητη η προθέρμανσή τους πριν τη χρήση. Χρησιμοποιούν ως καύσιμο σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, φούρνους, πλοία, για ηλεκτροπαραγωγή καθώς και αποτελούν την πρώτη ύλη για την παραγωγή της ασφάλτου. Η δυνατότητα βελτίωσης της ποιότητας των καυσίμων αυτών είναι μηδαμινή, το θερμικό περιεχόμενο που αποδίδουν είναι το χαμηλότερο σε σχέση με άλλα διυλιστηριακά προϊόντα, γι' αυτό και αποτελούν τα πιο φθηνά προϊόντα του διυλιστηρίου (με τιμή πώλησης συνήθως στη μισή τιμή των αποσταγμάτων καυσίμων περίπου). Η ζήτησή τους μειώνεται όσο περνούν τα χρόνια, διότι αντικαθίστανται από άλλα καύσιμα όπως το φυσικό αέριο [3], [8]. Δεν πραγματοποιείται η χρήση προσθέτων βελτιωτικών καύσης ή προσθέτων για τη βελτίωση άλλων ιδιοτήτων στα υπολειμματικά καύσιμα όπως στα αποστάγματα, λόγω της χαμηλής τιμής πώλησής τους [3], [10].

### 1.5. Παρασκευή Μαζούτ

Όσον αφορά στον τομέα της ναυτιλίας, αρχικά, τα υπολειμματικά καύσιμα αποτελούνταν από το υπόλειμμα της ατμοσφαιρικής απόσταξης, αλλά η όλο και αυξανόμενη ζήτηση ελαφρών κλασμάτων (το γεγονός αυτό αναλύεται στην επόμενη παράγραφο), είχε ως αποτέλεσμα, το υπόλειμμα της ατμοσφαιρικής απόσταξης να μην πληροί πια τις προδιαγραφές για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στα πλοία, αλλά να απαιτείται να αναμειχθεί με συστατικά από πολλές διεργασίες του διυλιστηρίου, ώστε να προκύψουν τα επιθυμητής ποιότητας υπολειμματικά καύσιμα [11].

Κύρια συστατικά για την παρασκευή των μαζούτ αποτελούν τα υπολείμματα από αρκετές διεργασίες ενός διυλιστηρίου όπως [11]:

- το υπόλειμμα της ατμοσφαιρικής απόσταξης
- το υπόλειμμα της απόσταξης υπό κενό
- το υπόλειμμα της καταλυτικής πυρόλυσης και
- το υπόλειμμα της ιξωδόλυσης

Ωστόσο, τα εκάστοτε υπολείμματα, πολλές φορές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν, για την παρασκευή των μαζούτ που να πληρούν τις προδιαγραφές. Αρχικά, η ποσότητα του υπολείμματος της ατμοσφαιρικής απόσταξης δεν είναι επαρκής, διότι με περαιτέρω επεξεργασία αυτού, παράγονται επιπλέον ποσότητες λευκών προϊόντων, ενώ το πολύ βαρύ υπόλειμμα της απόσταξης υπό κενό δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές. Το υπόλειμμα της καταλυτικής πυρόλυσης έχει τιμή πυκνότητας μεγαλύτερη από αυτή των προδιαγραφών και το υπόλειμμα της ιξωδόλυσης αρκετές φορές δεν έχει την επιθυμητή τιμή ιξώδους [3].

Για την επίλυση των προβλημάτων που προαναφέρθηκαν, κρίνεται αναγκαία η ανάμειξη των υπολειμμάτων με πιο ελαφριά προϊόντα πετρελαίου σε συγκεκριμένες αναλογίες, με

σκοπό να βελτιωθούν οι ιδιότητες του τελικού προϊόντος και να παρασκευαστούν μαζούτ που να ικανοποιούν τις προδιαγραφές που τα διέπουν.

Τα ελαφρύτερα προϊόντα που χρησιμοποιούνται για την ανάμειξη με τα υπολείμματα, μπορεί να είναι [3]:

- τα gasoil ατμοσφαιρικής απόσταξης, όπου τότε το τελικό προϊόν είναι παραφινικής βάσης κυρίως
- τα gasoil που προκύπτουν μετά από διεργασίες πυρόλυσης με το τελικό προϊόν να είναι περισσότερο αρωματικής βάσης (η παραγωγή ντήζελ με την περαιτέρω επεξεργασία τους δεν ενδείκνυται, γεγονός που οφείλεται στη μειωμένη ποιότητά τους) και είναι το πιο συνηθισμένο συστατικό ανάμειξης [11]
- τα προϊόντα της περιοχής της κηροζίνης, μόνο όταν ικανοποιείται η προδιαγραφή του σημείου ανάφλεξης του τελικού προϊόντος.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι προϊόντα της περιοχής της βενζίνης δεν χρησιμοποιούνται ως προϊόντα ανάμειξης, για λόγους ασφαλείας [3].

Τα πιο ελαφριά προϊόντα πετρελαίου που συνήθως χρησιμοποιούνται για την ανάμειξη με τα υπολείμματα, είναι το κλάσμα Light Cycle Oil (LCO) και το Clarified Oil ή Heavy Cycle Oil (HCO), τα οποία είναι προϊόντα της διεργασίας της καταλυτικής πυρόλυσης ρευστοστερεάς κλίνης FCC, με τη διαφορά ότι το LCO αποτελεί απόσταγμα της διεργασίας, ενώ το HCO είναι το υπόλειμμα της διεργασίας. Όσον αφορά στο LCO, έχει τιμή ιξώδους περίπου 2,5 cSt (mm<sup>2</sup>/s) στους 50 °C, πυκνότητα στην περιοχή του 920 με 950 kg/m<sup>3</sup> στους 15 °C, η περιεκτικότητά του σε θείο είναι αρκετά χαμηλή και έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε αρωματικά που αποτελούν περίπου το 60% της σύστασής του. Επίσης, έχει παρόμοια περιοχή απόσταξης με αυτή του gasoil και γι' αυτούς τους λόγους χρησιμοποιείται ως συστατικό ανάμειξης με βαριά υπολείμματα, ώστε να προκύψουν προϊόντα που να πληρούν τις προδιαγραφές. Από την άλλη πλευρά, το HCO έχει τιμή ιξώδους στην περιοχή των 130 cSt (mm<sup>2</sup>/s) στους 50 °C, έχει πυκνότητα συνήθως μεγαλύτερη από 1000 kg/m<sup>3</sup> στους 15 °C, η περιεκτικότητά του σε θείο είναι και αυτή αρκετά χαμηλή και έχει περιεκτικότητα σε αρωματικά και αυτό το κλάσμα περίπου 60% της σύστασής του. Από τη στιγμή που αποτελεί υπόλειμμα της διεργασίας της καταλυτικής πυρόλυσης, στην οποία χρησιμοποιείται και καταλύτης, ανιχνεύονται ποσότητες σωματιδίων καταλύτη στο υπόλειμμα, δεν επιτυγχάνεται όμως η εξ' ολοκλήρου απομάκρυνσή τους από το HCO μέσω φίλτρων. Όπως και το LCO, έτσι και το HCO χρησιμοποιείται ως συστατικό ανάμειξης βαρέων υπολειμματικών καυσίμων. Η αρωματικότητα και των δύο αυτών κλασμάτων (του LCO και το HCO) εξασφαλίζει, σε πολύ μεγάλο βαθμό, τη σταθερότητα του μείγματος όταν το άλλο συστατικό του μείγματος είναι υπόλειμμα της διεργασίας της ιξωδόλυσης. Το βασικό υπολειμματικό καύσιμο που αποτελεί μείγμα του LCO, του HCO και του υπολείμματος της ιξωδόλυσης, είναι το IFO 380, που έχει τιμή ιξώδους 380 cSt (mm<sup>2</sup>/s) στους 50 °C. Το υπόλειμμα της ιξωδόλυσης που εμφανίζει περιεκτικότητες σε ασφαλτένια, μέταλλα και θείο αρκετά μεγαλύτερες σε σύγκριση με αυτές του ατμοσφαιρικού υπολείμματος (συνήθως τρεις φορές μεγαλύτερες) και πολύ μεγάλη τιμή ιξώδους, αναμειγνύεται με τα LCO και HCO τόσο για να μειωθεί το ιξώδες του μείγματος στην επιθυμητή τιμή, όσο και για να διατηρηθεί η σταθερότητα του καυσίμου. Είναι απαραίτητο

όμως η περιεκτικότητα του μείγματος σε LCO και HCO να κρατείται σε χαμηλά επίπεδα, ώστε τα αρωματικά που περιέχουν να μην προκαλέσουν σοβαρό πρόβλημα στην ποιότητα καύσης του καυσίμου (στην παράγραφο «Δείκτης Κετανίου» γίνεται εκτενέστερη αναφορά στο γεγονός αυτό) [3], [10].

Η κατάταξη των μαζούτ στην Ελλάδα, γίνεται σε δύο κατηγορίες, μία ως προς το ιξώδες και μία ως προς το θείο. Όσον αφορά στην κατηγοριοποίηση ως προς το ιξώδες, υπάρχουν δύο τύποι μαζούτ, το Νο. 1 και το Νο. 3. Η άλλη ονομασία που χρησιμοποιείται στην αγορά για τους δύο αυτούς διαφορετικούς τύπους μαζούτ, είναι μαζούτ 1500 και μαζούτ 3500 αντίστοιχα, ονομασία που πηγάζει από την προδιαγραφή του ιξώδους τους αναφορικά με τη μέθοδο Redwood. Η διαφορά των δύο τύπων μαζούτ έγκειται στο διαφορετικό εύρος του ιξώδους τους, αφού το Νο. 1 είναι χαμηλού ιξώδους, ενώ το Νο. 3 υψηλού. Από την άλλη πλευρά, η κατηγοριοποίηση ως προς το θείο γίνεται σε δύο κατηγορίες, χαμηλού και υψηλού θείου. Πλέον, στην Ελλάδα για περιβαλλοντικούς λόγους, διατίθεται στην αγορά μόνο μαζούτ χαμηλού θείου, με μέγιστο όριο σε περιεχόμενο θείο 0,5% κ.β. [12].

Το διεθνές πρότυπο ISO 8217, που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1, καθορίζει τις προδιαγραφές για τα υπολειμματικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται ως καύσιμα για λέβητες και για κινητήρες πλοίων. Περιλαμβάνει τα αποδεκτά εύρη τιμών για πολλές ιδιότητες αυτών των καυσίμων, με σκοπό να διασφαλιστεί η κατάλληλη ποιότητα αυτών για την περαιτέρω χρήση τους. Ωστόσο, το πρότυπο αυτό εμφανίζει και κάποιες σημαντικές ελλείψεις όπως είναι η έλλειψη προδιαγραφής για τη σταθερότητα και συμβατότητα των υπολειμματικών καυσίμων καθώς επίσης δεν αναφέρεται σε όλους τους τύπους υπολειμματικών καυσίμων [13].



Πίνακας 1. Προδιαγραφές υπολειμματικών καυσίμων ναυτιλίας, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8217.

Ιδιότητα	Μονάδες	Όριο	RMA	RMB	RMD	RME	RMG				RMK			Μέθοδος Ελέγχου	
			10	30	80	180	180	380	500	700	380	500	700		
Κινηματικό ιξώδες, 50 °C	mm <sup>2</sup> /s	μέγ.	10,00	30,00	80,00	180,00	180,0	380,0	500,0	700,0	380,0	500,0	700,0	ISO 3104	
Πυκνότητα, 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	μέγ.	920,0	960,0	975,0	991,0	991,0				1010,0			ISO 3675, ISO 12185	
Δείκτης αρωματικότητας CCAI		μέγ.	850	860			870								
Περιεκτικότητα σε Θείο	% m/m	μέγ.	Εξαρτάται από τις απαιτήσεις της περιοχής χρήσης (ζώνες SECA)											ISO 8754, ISO 14596	
Σημείο ανάφλεξης	°C	ελάχ.	60,0											ISO 2719	
Υδροθείο	mg/kg	μέγ.	2,00											IP 570	
Αριθμός οξύτητας	mgKOH/g	μέγ.	2,5											ASTM D664	
Ολικό υπόστημα	% m/m	μέγ.	0,10											ISO 10307-2	
Εξανθράκωμα	% m/m	μέγ.	2,50	10,00	14,00	15,00	18,00				20,00			ISO 10307	
Σημείο ροής - καλοκαίρι - χειμώνας	°C	μέγ.	60			30								ISO 3016	
Νερό	% v/v	μέγ.	0,30	0,50											ISO 3733
Τέφρα	% m/m	μέγ.	0,040	0,070			0,100				0,150			ISO 6245	
Βανάδιο	mg/kg	μέγ.	50	150			350				450			IP 501, IP 470, ISO 14597	
Νάτριο	mg/kg	μέγ.	50	100			50				100			IP 501, IP 470	
Αργίλιο + Πυρίτιο	mg/kg	μέγ.	25	40		50	60							IP 501, IP 470, ISO 10478	
Χρησιμοποιημένα Λιπαντικά (ULO) Ασβέστιο + Ψευδάργυρος ή Ασβέστιο + Φώσφορος	mg/kg	μέγ.	Το καύσιμο δεν πρέπει να περιέχει ULO. Ένα καύσιμο θεωρείται ότι περιέχει ULO όταν ικανοποιείται μία από τις εξής συνθήκες: Ασβέστιο > 30 και Ψευδάργυρος > 15 ή Ασβέστιο > 30 και Φώσφορος > 15												

Πηγή: ExxonMobil, ISO 8217:2017 Fuel standard for marine residual fuels.

## 1.6. Ιδιότητες των μαζούτ

Το διεθνές πρότυπο ISO 8217 (Πίνακας 1) χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση των υπολειμματικών καυσίμων ναυτιλίας. Σε αυτό αναφέρονται οι αποδεκτές οριακές τιμές αρκετών ιδιοτήτων των καυσίμων αυτών καθώς και οι αντίστοιχες μέθοδοι προσδιορισμού, με στόχο να παρακολουθείται και να ελέγχεται διεθνώς η ποιότητα αυτών. Στις υποπαραγράφους που ακολουθούν, αναλύονται οι ιδιότητες που αναφέρονται στον Πίνακα 1, ενώ περιγράφονται συνοπτικά και οι μέθοδοι μέσω των οποίων προσδιορίζονται οι τιμές τους.

### 1.6.1. Κινηματικό Ιξώδες

Το ιξώδες αποτελεί μία από τις πολύ βασικές ιδιότητες των υπολειμματικών καυσίμων και εκφράζει την εσωτερική αντίστασή τους στη ροή. Το κινηματικό ιξώδες του καυσίμου έχει άμεση σχέση με την ευκολία μεταφοράς, άντλησης και ψεκασμού του καυσίμου, γι' αυτό και συνήθως είναι απαραίτητο να θερμαίνεται το μαζούτ ώστε η τιμή του να βρίσκεται εντός συγκεκριμένου εύρους. Επίσης, αποτελεί μία ένδειξη για την περιεκτικότητα του καυσίμου σε εξανθράκωμα και ασφαλτένια, αφού όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των δύο συστατικών μέσα στο καύσιμο τόσο πιο υψηλό είναι το ιξώδες. Επιπλέον, όσο μικρότερο είναι το κινηματικό ιξώδες του καυσίμου τόσο ευκολότερα διαχωρίζεται το νερό και τα στερεά σωματίδια από αυτό. Κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι το κινηματικό ιξώδες των υπολειμματικών καυσίμων έχει σημαντικό ρόλο και κατά την έγχυση του καυσίμου, διότι αν η τιμή του είναι πολύ χαμηλή, δηλαδή το υπολειμματικό καύσιμο να έχει θερμανθεί σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, τότε υπάρχει η πιθανότητα του βρασμού του καυσίμου μέσα στον εξοπλισμό, δημιουργώντας έτσι σοβαρό πρόβλημα στις αντλίες καυσίμου. Αντίθετα, αν η τιμή του ιξώδους είναι πολύ μεγάλη, δηλαδή το καύσιμο να είναι πολύ βαρύ και να μην έχει θερμανθεί, τότε δεν επιτυγχάνεται ο κατάλληλος διασκορπισμός του καυσίμου στα ακροφύσια των εγχυτήρων, προκαλώντας σημαντικά προβλήματα στην ποιότητα της καύσης, στην απόδοση του κινητήρα, αλλά και βλάβες στο εσωτερικό αυτού [11].

Στα υπολειμματικά καύσιμα, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί το κινηματικό τους ιξώδες είναι η ISO 3104 (ASTM D445). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, για να μετρηθεί το κινηματικό ιξώδες των μαζούτ, αυτά πρέπει να είναι νευτώνια ρευστά, γι' αυτό και η μέτρηση πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες των 50 °C ή και υψηλότερες. Τοποθετείται αρχικά, το γυάλινο ιξωδομέτρο εντός λουτρού, που είναι συνήθως ένα διαφανές υγρό και βρίσκεται στην επιθυμητή θερμοκρασία δοκιμής, πληρώνεται με το δείγμα με συγκεκριμένο τρόπο, που ορίζει η μέθοδος και μετράται ο χρόνος (σε δευτερόλεπτα) που απαιτείται για να διέλθει συγκεκριμένος όγκος του δείγματος καυσίμου μέσω του τριχοειδούς σωλήνα του ιξωδομέτρου, υπό την επίδραση της βαρύτητας σε καθορισμένη τιμή θερμοκρασίας. Έπειτα, ο υπολογισμός του κινηματικού ιξώδους γίνεται με τη βοήθεια της Εξίσωσης 1.3 [7], [14]:

$$v = c * t \quad (\text{Εξ. 1.3})$$

όπου:  $v$  είναι το κινηματικό ιξώδες σε cSt ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )

$c$  είναι η σταθερά του ιξωδομέτρου που χρησιμοποιείται σε cSt/s ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )

$t$  είναι ο χρόνος ροής σε s

Το ιξώδες των μαζούτ επηρεάζεται αρκετά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας και πιο συγκεκριμένα η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση του ιξώδους, ενώ αντίθετα η μείωση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ιξώδους του καυσίμου. Η Εξίσωση 1.4 περιγράφει τη μεταβολή του ιξώδους σε σχέση με τη θερμοκρασία, αναγράφεται στη συνέχεια και είναι γνωστή ως ο νόμος του Walther [1]:

$$\log(\log(v + 0,7)) = A + B * \log T \quad (\text{Εξ. 1.4})$$

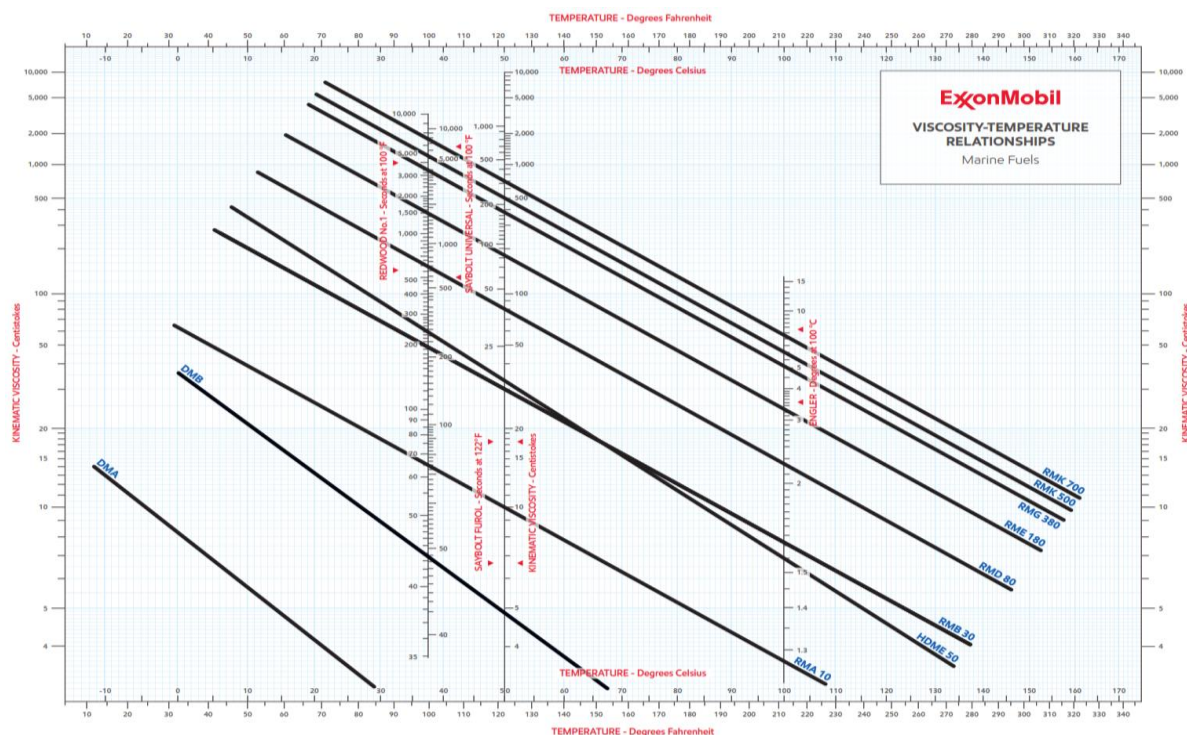
όπου:  $v$  είναι το κινηματικό ιξώδες του δείγματος σε cSt

T είναι η θερμοκρασία σε Kelvin

A, B είναι σταθερές

Οι σταθερές A και B, μπορούν να προσδιοριστούν με γνωστή την τιμή του ιξώδους του καυσίμου σε δύο θερμοκρασίες [1].

Επίσης, για να γίνει πιο κατανοητή η σχέση της μεταβολής του ιξώδους με τη θερμοκρασία, στο Διάγραμμα 1, παριστάνεται η σχέση των δύο για αρκετά δείγματα μαζούτ [15].



Διάγραμμα 1. Μεταβολή ιξώδους σε σχέση με τη θερμοκρασία ανά κατηγορία μαζούτ.

Πηγή: ExxonMobil, Viscosity-Temperature relationships in Marine Fuels.

Εκτός από τη σχέση της μεταβολής του ιξώδους με τη θερμοκρασία που περιγράφει ο νόμος του Walther, υπάρχει και άλλη μία σχέση, που έχει προκύψει εμπειρικά και μετά από στατιστική μελέτη πολλών μετρήσεων. Μέσω αυτής, μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του κινηματικού ιξώδους του μείγματος (μαζούτ), που προκύπτει από την ανάμειξη ενός υπολείμματος με ένα πιο ελαφρύ προϊόν (συνήθως gasoil), όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο «Παρασκευή Μαζούτ», γνωρίζοντας τα κινηματικά ιξώδη των δύο συστατικών που αναμειγνύονται καθώς και τη σύσταση του μείγματος (αναλογία με την οποία αναμειγνύονται). Η Εξίσωση 1.5 που περιγράφει τα παραπάνω είναι η ακόλουθη [1]:

$$x * \log(\log(v_A + 0,7)) + (1 - x) * \log(\log(v_B + 0,7)) = \log(\log(v_M + 0,7)) \quad (\text{Εξ. 1.5})$$

όπου: x είναι η ογκομετρική αναλογία του συστατικού χαμηλού ιξώδους

$v_A$  είναι το κινηματικό ιξώδες του συστατικού χαμηλού ιξώδους σε cSt

$v_B$  είναι το κινηματικό ιξώδες του συστατικού υψηλού ιξώδους σε cSt

$v_M$  είναι το κινηματικό ιξώδες του μείγματος σε cSt

Στην Εξίσωση 1.5, η ογκομετρική αναλογία του συστατικού χαμηλού ιξώδους υπολογίζεται ως το πηλίκο του όγκου του συστατικού χαμηλού ιξώδους προς τον συνολικό όγκο και των δύο συστατικών, δηλαδή  $x = \frac{\text{Όγκος}_A}{\text{Όγκος}_A + \text{Όγκος}_B}$ . Επίσης, για να χρησιμοποιηθεί η Εξίσωση 1.5 είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η τιμή του κινηματικού ιξώδους και των δύο συστατικών ανάμειξης στην ίδια θερμοκρασία, ώστε και η τιμή του κινηματικού ιξώδους του μείγματος να βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία. Γίνεται αντιληπτό ότι, η ποσότητα του συστατικού χαμηλού ιξώδους, δηλαδή του ελαφρύτερου συστατικού, που θα αναμειχθεί με το υπόλειμμα, έχει μεγάλη σημασία να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, διότι το ελαφρύτερο συστατικό έχει αρκετά μεγαλύτερη τιμή πώλησης από το υπόλειμμα, αν πουληθεί ως έχει και όχι ως μείγμα μαζούτ [1].

### 1.6.2. Πυκνότητα

Όπως και το κινηματικό ιξώδες, έτσι και η πυκνότητα, αποτελεί μία πολύ βασική ιδιότητα των μαζούτ που έχει άμεση σχέση με τη θερμογόνο δύναμή τους, αλλά και με την ποιότητα καύσης. Χρησιμοποιείται και ως χαρακτηριστικό της ποιότητας του καυσίμου που παραδίδεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε εξανθράκωμα και ασφαλτένια, τόσο αυξάνεται και η τιμή της πυκνότητας. Αυξημένη παρουσία αυτών των συστατικών μπορεί να δημιουργεί προβλήματα στον καθαρισμό του καυσίμου και να απαιτούνται ειδικοί εξοπλισμοί όπως διαχωριστές κλπ. Γενικά, μεγάλες τιμές πυκνότητας (σε συνδυασμό με μικρές τιμές κινηματικού ιξώδους) ενός υπολειμματικού καυσίμου υποδηλώνουν καύσιμο με κακή ποιότητα ανάφλεξης και καύσης [16].

Η μέθοδος μέσω της οποίας μετριέται η πυκνότητα των μαζούτ είναι η ISO 3675 (ASTM D1298). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, μέσα σε ένα κυλινδρικό δοχείο που περιέχει το δείγμα βυθίζεται ένα πυκνόμετρο (ή υδρόμετρο) και αφήνεται να ισορροπήσει. Όταν αυτό ισορροπήσει καταγράφεται η τιμή της πυκνότητας στην επιφάνεια του δείγματος και η θερμοκρασία του δείγματος. Στη συνέχεια, γίνεται αναγωγή της πυκνότητας στη θερμοκρασία αναφοράς των 15 °C. Αυτό γίνεται διότι στα μαζούτ, η μέτρηση της πυκνότητας πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες των 50 °C ή και μεγαλύτερες, θερμοκρασίες οι οποίες επιτρέπουν την πλήρη ομογενοποίηση των μαζούτ και την κατάλληλη ρευστότητα [3], [7].

Επίσης, με τη χρήση του πυκνομέτρου μπορεί να πραγματοποιηθεί η μέτρηση του σχετικού ειδικού βάρους στους 60 °F και από την τιμή του μπορεί να προκύψει η τιμή του API βάρους, που έχει μονάδα μέτρησης τους βαθμούς API (°API) μέσω της Εξίσωσης 1.6 [7]:

$$SG_{60/60\text{ }^\circ\text{F}} = \frac{141,5}{131,5 + \text{°API}} \Rightarrow$$

$$\text{°API} = \frac{141,5}{SG_{60/60\text{ }^\circ\text{F}}} - 131,5 \quad (\text{Εξ. 1.6})$$

όπου:  $SG_{60/60\text{ }^\circ\text{F}}$  είναι το σχετικό ειδικό βάρος στους 60 °F

### 1.6.3. Δείκτης αρωματικότητας (CCAI)

Για τον προσδιορισμό της ποιότητας ανάφλεξης των ναυτιλιακών καυσίμων χρησιμοποιείται ο δείκτης αρωματικότητας (CCAI) και όχι ο αριθμός κετανίου, διότι ένα υπολειμματικό καύσιμο δεν έχει χαρακτηριστικά καυσίμου diesel για να χρησιμοποιηθεί σε πρότυπο κινητήρα diesel, καθώς είναι πιο βαρύ (με μεγαλύτερο ιξώδες και πυκνότητα) καύσιμο. Ο δείκτης αρωματικότητας ενός υπολειμματικού καυσίμου, για τον οποίο θα γίνει εκτενής αναφορά στην παράγραφο «Δείκτης αρωματικότητας (CCAI - Calculated Carbon Aromaticity Index)», βρίσκεται υπολογιστικά, μέσω μιας εξίσωσης που χρησιμοποιεί ως δεδομένα την πυκνότητα και το κινηματικό ιξώδες του καυσίμου [1].

### 1.6.4. Περιεκτικότητα σε θείο

Τα υπολειμματικά καύσιμα περιέχουν ετεροάτομα όπως είναι το θείο, το οποίο ενώνεται με τους υδρογονάνθρακες του καυσίμου σε ευθεία αλυσίδα, αλλά και σε μορφή δακτυλίου, με τις πιο χαρακτηριστικές κατηγορίες των ενώσεων του θείου να αποτελούν οι μερκαπτάνες, τα σουλφίδια, τα δισουλφίδια, τα θειοφαίνια, τα βενζινοθειοφαίνια και τα διβενζοθειοφαίνια. Η συγκέντρωση του θείου σε ένα καύσιμο έχει άμεση σχέση με την προέλευση και το είδος της πρώτης ύλης του, δηλαδή του αργού πετρελαίου. Η ποσότητά του σε ένα καύσιμο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, διότι ως προϊόντα καύσης του έχει το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) και το τριοξείδιο του θείου (SO<sub>3</sub>) που δημιουργούν ένα διαβρωτικό και όξινο περιβάλλον. Στο πρώτο (SO<sub>2</sub>) οφείλεται το φαινόμενο της όξινης βροχής, ενώ όταν το τριοξείδιο του θείου έρθει σε επαφή με υδρατμούς από τα καυσαέρια, μετατρέπεται σε θειικό οξύ, που είναι εξαιρετικά διαβρωτικό [1].

Όπως διαπιστώνεται, οι θειούχες ενώσεις που περιέχονται στα υπολειμματικά καύσιμα, έχουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και γι' αυτόν τον λόγο έχει δημιουργηθεί η συνθήκη MARPOL 73/78, η οποία σχετίζεται με την προστασία της ατμόσφαιρας από τέτοιες ενώσεις. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το παράρτημα VI της MARPOL που υιοθετήθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Ναυτιλίας (IMO – International Maritime Organization), τα υπολειμματικά καύσιμα που χρησιμοποιούν όλα τα πλοία (από τον Ιανουάριο του 2020 και μετά) δεν θα πρέπει να περιέχουν θείο με συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 0,50% m/m. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες περιοχές, γνωστές και ως «Ζώνες Ελέγχου Εκπομπών Ενώσεων Θείου» (SECA – SO<sub>x</sub> Emission Control Areas), όπως είναι η περιοχή της Βαλτικής θάλασσας, της Βόρειας Θάλασσας, της Μάγχης, της Αυστραλίας αλλά και πολλές άλλες, στις οποίες η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο είναι απαραίτητο να μην ξεπερνάει το 0,1% m/m. Γίνεται αντιληπτό ότι δεν καθίσταται εύκολη η επίτευξη των τιμών αυτών [1].

Η επίτευξη των προδιαγραφών αυτών επέρχεται είτε μέσω της χρήσης αργού πετρελαίου με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, άρα μικρή ποσότητα θείου στο τελικό προϊόν είτε με την εγκατάσταση συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων στα πλοία, γνωστά ως scrubbers, που στόχος τους είναι με ειδικά φίλτρα να κατακρατούν σημαντικές ποσότητες ενώσεων θείου και όχι μόνο, ώστε οι ρύποι που βγαίνουν στην ατμόσφαιρα να είναι βάσει των επιτρεπτών ορίων [1], [16]. Επιπλέον, η οδηγία του 2016 της Ευρωπαϊκής Ένωσης επιτρέπει τη χρήση



υπολειμματικών καυσίμων, των οποίων η περιεκτικότητα σε θείο υπερβαίνει το 3,5% m/m μόνο στα πλοία που διαθέτουν συστήματα επεξεργασίας των καυσαερίων, scrubbers καθώς επίσης επιβάλλει στα πλοία που βρίσκονται πάνω από δύο ώρες σε αγκυροβόλιο, η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο να είναι μικρότερη από 0,1% m/m [12], [16]. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι και το παράρτημα VI της MARPOL καθώς και η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, κρίνουν απαραίτητη τη λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από το καύσιμο που παραδόθηκε, το οποίο πρέπει να κρατείται πάνω στο πλοίο μέχρι να καταναλωθεί η μεγαλύτερη ποσότητά του. Το δείγμα αυτό είναι γνωστό ως «δείγμα MARPOL», σφραγίζεται από τον προμηθευτή, ο οποίος αναφέρει και την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο που συμφωνεί με τους κανονισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω [4], [12].

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο είναι η ISO 8754 (ASTM D4294), σύμφωνα με την οποία το δείγμα καυσίμου δέχεται ακτίνες X, με αποτέλεσμα το θείο να διεγείρεται και μεταπίπτοντας στην αρχική του κατάσταση να εκπέμπει ακτινοβολία, δηλαδή να φθορίζει. Η ένταση της φθορίζουσας ακτινοβολίας δείχνει την τιμή της συγκέντρωσης του θείου στο δείγμα καυσίμου (όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της φθορίζουσας ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση θείου στο υπολειμματικό καύσιμο) [1], [17].

#### 1.6.5. Σημείο Ανάφλεξης

Το σημείο ανάφλεξης (Flash Point) των μαζούτ, χαρακτηρίζεται ως η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία αναφλέγεται η φάση των ατμών του καυσίμου μέσω προσαγωγής δοκιμαστικής εξωτερικής φλόγας και κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες θέρμανσης. Πρόκειται για προδιαγραφή ασφαλείας που καθορίζει τις συνθήκες στις οποίες θα αποθηκευτεί και θα μεταφερθεί το καύσιμο με ασφάλεια, χωρίς τον κίνδυνο πυρκαγιάς [1].

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του σημείου ανάφλεξης είναι η ISO 2719 (ASTM D93) κατά Pensky-Martens [18]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, πληρώνεται το δοχείο της συσκευής με συγκεκριμένη ποσότητα δείγματος καυσίμου και στη συνέχεια θερμαίνεται με αργό και σταθερό ρυθμό κάτω από συνεχή ανάδευση. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα, μια δοκιμαστική φλόγα προσάγεται μέσα στο δοχείο που περιέχει το δείγμα ενώ η ανάδευση σταματάει. Μόλις η προσαγωγή της δοκιμαστικής φλόγας προκαλέσει ανάφλεξη των ατμών του δείγματος, καταγράφεται η θερμοκρασία που αποτελεί και το σημείο ανάφλεξης του καυσίμου. Το σημείο ανάφλεξης λοιπόν, γίνεται αντιληπτό ότι αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για τη σύσταση του καυσίμου ειδικά για τα περιεχόμενα ελαφριά συστατικά, γι' αυτό και μέσω της μέτρησής του μπορεί να γίνει έμμεσος έλεγχος ενδεχόμενης επιμόλυνσης του καυσίμου με κάποιο πιο ελαφρύ συστατικό [7].

#### 1.6.6. Περιεκτικότητα σε υδρόθειο (H<sub>2</sub>S)

Το υδρόθειο (H<sub>2</sub>S) είναι ένα πολύ τοξικό αέριο και η εκτεταμένη έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι πολύ επικίνδυνη και μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε θάνατο. Υδρόθειο

υπάρχει στο αργό πετρέλαιο καθώς επίσης μπορεί να σχηματιστεί μέσω διεργασιών του διυλιστηρίου για την παραγωγή των προϊόντων. Τα υπολειμματικά καύσιμα μπορεί να περιέχουν ποσότητες υδροθείου τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια φάση, γεγονός που εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία του καυσίμου και το ιξώδες του. Το μέγιστο όριο που τίθεται για την περιεκτικότητα των υπολειμματικών καυσίμων σε υδρόθειο που ισούται με 2,00 mg/kg δεν είναι απόλυτα ασφαλές και παραμένει ο κίνδυνος εμφάνισης υψηλών συγκεντρώσεων υδροθείου σε κλειστούς χώρους. Γι' αυτόν τον λόγο, ελέγχεται τακτικά η συγκέντρωση υδροθείου στα υπολειμματικά καύσιμα για να βρίσκεται σε όσο πιο χαμηλά επίπεδα γίνεται [16].

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των υπολειμματικών καυσίμων σε υδρόθειο είναι η ASTM D7621 (ή IP 570), σύμφωνα με την οποία δείγμα καυσίμου εισάγεται σε δοχείο το οποίο θερμαίνεται και περιέχει ένα αραιωτικό έλαιο, μέσω του οποίου θα εξαχθεί ο αέρας υπό μορφή φυσαλίδων, στον οποίο και θα περιέχεται το αέριο υδρόθειο. Στη συνέχεια, ο αέρας, διοχετεύεται σε έναν ηλεκτροχημικό ανιχνευτή υδροθείου, μέσω του οποίου μετράται η περιεκτικότητά του σε υδρόθειο και υπολογίζεται αυτόματα από τον ανιχνευτή η συγκέντρωσή του στην υγρή φάση σε mg/kg [19].

#### 1.6.7. Αριθμός οξύτητας

Ο αριθμός οξύτητας αναφέρεται στην περιεκτικότητα των καυσίμων σε όξινα συστατικά, όπως είναι τα οργανικά και ανόργανα οξέα, οι εστέρες, οι φαινολικές ενώσεις, οι ρητίνες, άλατα βαρέων μετάλλων, άλατα αμμωνίας, άλατα άλλων ασθενών βάσεων και άλλα. Τα υπολειμματικά καύσιμα έχουν έναν φυσικό αριθμό οξύτητας, που εξαρτάται από την προέλευσή τους και από τις όξινες ενώσεις που περιέχουν. Τα υπολειμματικά καύσιμα ναφθενικής βάσης έχουν υψηλές τιμές αριθμού οξύτητας και πολλές φορές ξεπερνούν το μέγιστο όριο της προδιαγραφής. Οι μεγάλες τιμές αριθμού οξύτητας μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα φθοράς και βλάβης του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται και των κινητήρων [16].

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του αριθμού οξύτητας των υπολειμματικών καυσίμων είναι η ASTM D664, σύμφωνα με την οποία το δείγμα καυσίμου διαλύεται σε μείγμα τολουολίου και ισοπροπανόλης (που περιέχει μικρή ποσότητα νερού) και τιτλοδοτείται ποτενσιομετρικά με υδροξείδιο του καλίου με τη βοήθεια δύο ηλεκτροδίων. Τα αποτελέσματα του οργάνου που χρησιμοποιείται για την αυτόματη τιτλοδότηση, καταγράφονται αυτόματα και δημιουργείται καμπύλη με τους όγκους του τιτλοδοτικού διαλύματος, που απαιτείται για την τιτλοδότηση και το τελικό σημείο της τιτλοδότησης, με το τελικό αποτέλεσμα να εκφράζεται σε mg KOH/g [20].

#### 1.6.8. Ολικό Υπόστημα

Όσον αφορά στο υπόστημα, αυτό είναι είτε ανόργανης (μικροποσότητες μετάλλων και σκουριάς από τις δεξαμενές αποθήκευσης) είτε οργανικής προέλευσης (συσσωμάτωση

ολεφινών από πυρολυμένα gasoil). Δημιουργεί σοβαρά προβλήματα διάβρωσης και φθοράς των ακροφυσίων ψεκασμού του καυσίμου, ενώ οι συγκεντρώσεις των συστατικών του υποστήματος αυξάνονται όταν το μαζούτ έχει προκύψει από την ανάμειξη gasoil ατμοσφαιρικής απόσταξης με βαρύ υπόλειμμα από διεργασίες πυρόλυσης και τότε είναι συχνό φαινόμενο να διαχωρίζονται τα βαριά συστατικά (πίσσα), επειδή δεν είναι συμβατοί οι υδρογονάνθρακες των δύο συστατικών [16].

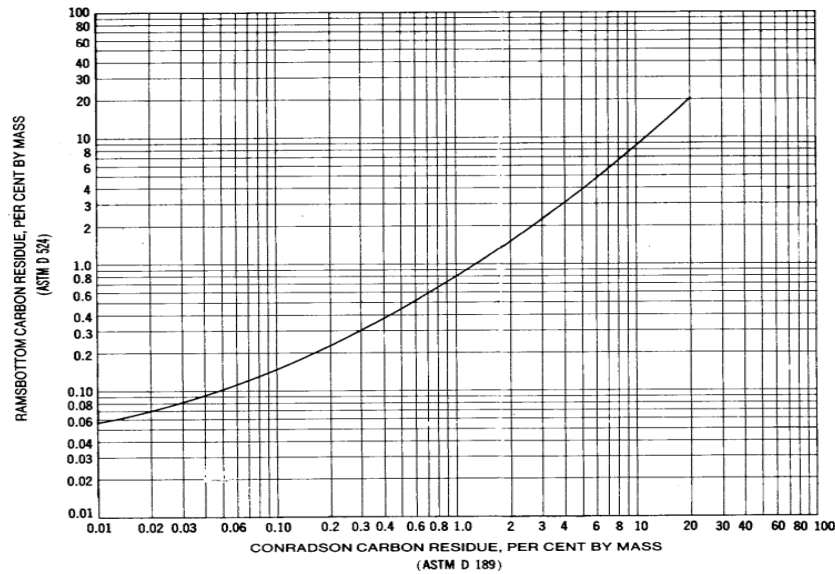
Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί το υπόστημα στα μαζούτ είναι η ISO 10307, σύμφωνα με την οποία γίνεται θέρμανση του δείγματος καυσίμου, ώστε να είναι ρευστό και στη συνέχεια αυτό διηθείται μέσω προζυγισμένου ηθμού. Έτσι, αφού ολοκληρωθεί η διήθηση, μέσω της διαφοράς βάρους του ηθμού αρχικά και μετά τη διήθηση, προκύπτει η ποσότητα του ολικού υποστήματος του υπολειμματικού καυσίμου ως επί τοις εκατό ποσοστό στη συνολική μάζα του καυσίμου [1].

#### 1.6.9. Εξανθράκωμα

Με τον όρο εξανθράκωμα στα μαζούτ γίνεται λόγος για τα βαριά συστατικά που αυτά περιέχουν και τα οποία πυρολύονται, λόγω έλλειψης οξυγόνου, με αποτέλεσμα να δημιουργούν αιθάλη, δηλαδή ανθρακούχο υπόλειμμα. Το ανθρακούχο αυτό υπόλειμμα συντελεί στη φθορά και στον σχηματισμό ανθρακούχων αποθέσεων στα ακροφύσια ψεκασμού του καυσίμου, στις βαλβίδες εξαγωγής και στο εσωτερικό των κυλίνδρων [11].

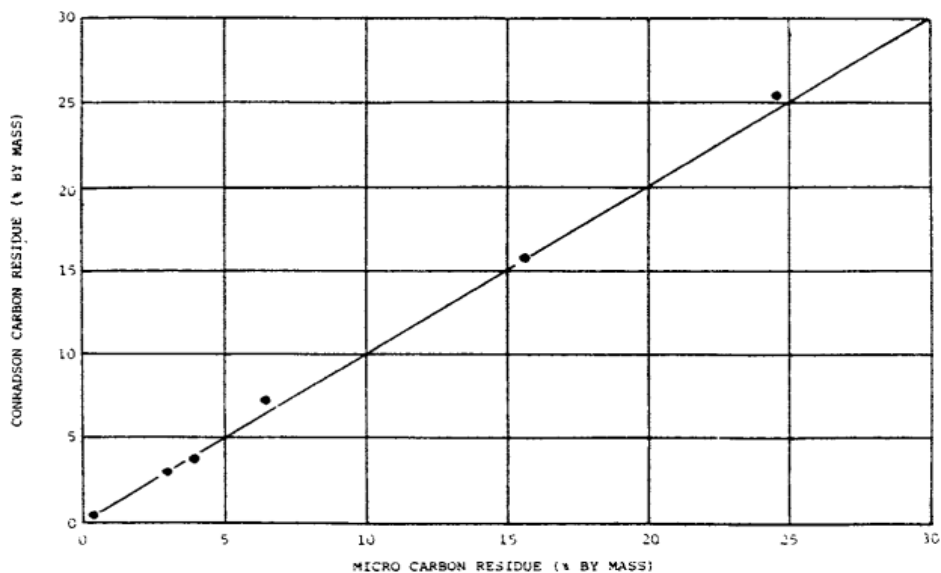
Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του είναι δύο, η κατά Conradson (ISO 6615, ASTM D189) και η Ramsbottom (ISO 4262, ASTM D524), σύμφωνα με τις οποίες το δείγμα καυσίμου θερμαίνεται σε θερμοκρασίες περίπου 600 °C για καθορισμένο χρονικό διάστημα και σχεδόν απουσία αέρα, με αποτέλεσμα το καύσιμο να υφίσταται πυρόλυση και όχι καύση. Πλέον, χρησιμοποιείται μια μέθοδος, η οποία είναι πιο εύκολη στη διεξαγωγή της σε σχέση με τις άλλες δύο και είναι η ISO 10370. Σε αυτή, το δείγμα καυσίμου θερμαίνεται σε περιβάλλον αζώτου, εξασφαλίζοντας έτσι την πυρόλυση του καυσίμου. Για τη συσχέτιση των τριών μεθόδων υπάρχουν δημοσιευμένα διαγράμματα από τους οργανισμούς τυποποίησης, με αποτέλεσμα όταν είναι γνωστή η τιμή του εξανθρακώματος στη μία μέθοδο, να είναι δυνατή και η αξιολόγηση της ποσότητάς του με την άλλη μέθοδο (Εικόνα 2 και Εικόνα 3) [1].





Εικόνα 2. Διάγραμμα συσχέτισης των μεθόδων Conradson και Ramsbottom για τον προσδιορισμό του εξανθρακώματος.

Πηγή: ASTM D189/06, Standard test method for Conradson Carbon Residue of petroleum products.



Εικόνα 3. Συσχέτιση των μεθόδων Conradson και Micro για τον προσδιορισμό του εξανθρακώματος.

Πηγή: ASTM D189/06, Standard test method for Conradson Carbon Residue of petroleum products.

### 1.6.10. Σημείο Ροής

Όσον αφορά στο σημείο ροής, αυτό αποτελεί τη χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο είναι ακόμα ρευστό, όταν ψυχθεί κάτω από τις συνθήκες που ορίζει η μέθοδος. Για να χρησιμοποιηθούν τα μαζούτ, είναι απαραίτητο να προθερμαίνονται για να έχουν την επιθυμητή τιμή ιξώδους [16].

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του σημείου ροής των μαζούτ είναι η ISO 3016 (ASTM D97), σύμφωνα με την οποία το δείγμα καυσίμου αρχικά θερμαίνεται και στη συνέχεια ψύχεται με σταθερό ρυθμό, ενώ ελέγχεται αν είναι ρευστό, ανά τακτά

διαστήματα που καθορίζονται από τη μείωση της θερμοκρασίας κατά 3 °C. Μόλις το καύσιμο δεν είναι πλέον ρευστό, καταγράφεται η θερμοκρασία, προστίθενται σε αυτή 3 °C και το αποτέλεσμα αυτό αποτελεί το σημείο ροής του καυσίμου [21].

Πρόκειται για μία ιδιότητα που αποτελεί ένδειξη για τη χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα καύσιμο. Ωστόσο, επειδή τα μαζούτ προθερμαίνονται για να έχουν την επιθυμητή τιμή ιξώδους, ο προσδιορισμός του σημείου ροής δεν παρουσιάζει κάποιο ενδιαφέρον, αφού οι θερμοκρασίες στις οποίες προθερμαίνονται είναι μεγαλύτερες από αυτή του σημείου ροής, πετυχαίνοντας με αυτόν τον τρόπο την επιθυμητή ρευστότητά τους [1].

#### 1.6.11. Θερμογόνος Δύναμη

Ο όρος θερμογόνος δύναμη αναφέρεται στο ποσό της ενέργειας που εκλύεται κατά την πλήρη και τέλεια καύση του καυσίμου παρουσία οξυγόνου και μετράται σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα μάζας (kJ/kg, kcal/kg και BTU/lb). Η θερμογόνος δύναμη διακρίνεται σε Ανώτερη Θερμογόνο Δύναμη (ΑΘΔ) και Κατώτερη Θερμογόνο Δύναμη (ΚΘΔ), με τη διαφορά των δύο να έγκειται στην κατάσταση των υδρατμών που παράγονται κατά την καύση. Στην Ανώτερη Θερμογόνο Δύναμη οι υδρατμοί βρίσκονται σε υγρή κατάσταση, ενώ στην Κατώτερη Θερμογόνο Δύναμη βρίσκονται σε αέρια [1].

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί η θερμογόνος δύναμη είναι η ISO 1928 (ASTM D240), σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται καύση μικρής ποσότητας δείγματος με περίσσεια οξυγόνου μέσα σε όλμο σταθερού όγκου, που βρίσκεται βυθισμένος σε λουτρό απεσταγμένου νερού με χρήση θερμοιδόμετρου τύπου οβίδας οξυγόνου [22]. Με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας η Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη, διότι οι παραγόμενοι υδρατμοί κατά την καύση αναγκαστικά συμπυκνώνονται, λόγω της θερμοκρασίας του λουτρού. Συνεπώς, αρχικά, προσδιορίζεται η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη και στη συνέχεια, γνωρίζοντας την περιεκτικότητα του δείγματος σε υδρογόνο, προσδιορίζεται υπολογιστικά η Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη [23].

Η θερμογόνος δύναμη των μαζούτ εξαρτάται άμεσα από την παρουσία ετεροατόμων όπως θείο, νερό, τέφρα, αλλά και το ποσοστό τους στο καύσιμο. Αν είναι γνωστή η περιεκτικότητα των συστατικών αυτών στο καύσιμο, τότε μπορούν να προσδιοριστούν υπολογιστικά (και όχι πειραματικά) η Ανώτερη και Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη, μέσω εξισώσεων που είναι πολύ ακριβείς και αναγνωρίζονται από επίσημους οργανισμούς τυποποίησης όπως τους ISO, ASTM και British Standards. Οι εμπειρικές εξισώσεις αυτές περιγράφονται παρακάτω [1]:

$$ΑΘΔ = (12403 - 2101 * d^2) * \left(1 - \frac{S + Y + T}{100}\right) + 2251 * \frac{S}{100} \quad (\text{Εξ. 1.7})$$

$$ΚΘΔ = (12403 - 2101 * d^2 - 761 * d) * \left(1 - \frac{S + Y + T}{100}\right) + 2251 * \frac{S}{100} - 585 * \frac{Y}{100} \quad (\text{Εξ. 1.8})$$

όπου: ΑΘΔ είναι η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη σε kcal/kg

ΚΘΔ είναι η Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη σε kcal/kg

d είναι η πυκνότητα του καυσίμου σε g/ml στους 15 °C

S είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο σε % κ.β.

Y είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε νερό σε % κ.β.

T είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε τέφρα σε % κ.β.

#### 1.6.12. Περιεκτικότητα σε Νερό

Σχεδόν πάντα στα μαζούτ υπάρχει ποσότητα νερού που προέρχεται είτε από διαρροές στις διεργασίες μέσω των οποίων παράγεται το καύσιμο είτε κατά τη μεταφορά και αποθήκευσή του. Η ύπαρξη θαλασσινού νερού στο καύσιμο μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα διάβρωσης και φθοράς του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το αλάτι ενωθεί με το βανάδιο (η περιεκτικότητά του στο καύσιμο εξαρτάται από την προέλευση του αργού πετρελαίου) [11]. Επίσης, η υψηλή περιεκτικότητα του υπολειμματικού καυσίμου σε νερό μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία γαλακτώματος μεταξύ του καυσίμου και του νερού, με αποτέλεσμα τη δυσκολία αόκη και την αδυναμία ψεκασμού του καυσίμου εντός του κυλίνδρου του κινητήρα. Ωστόσο, η απομάκρυνσή του από τα μαζούτ δεν είναι εύκολη, λόγω της παραπλήσιας τιμής πυκνότητας των δύο [24].

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας του καυσίμου σε νερό είναι η ISO 3733 (ASTM D123), μέσω χρήσης συσκευής απόσταξης. Σύμφωνα με τη μέθοδο, σε ειδικό δοχείο γίνεται θέρμανση του δείγματος καυσίμου παρουσία διαλύτη (μείγμα τολουολίου/ξυλολίου), αδιάλυτος στο νερό και συναποστάζει με το νερό του δείγματος. Κατά τη διάρκεια της απόσταξης, το απόσταγμα συμπυκνώνεται σε κάθετο ψυκτήρα και συλλέγεται σε βαθμονομημένη παγίδα. Εμφανίζονται δύο φάσεις· ο διαλύτης διαχωρίζεται από το νερό, λόγω της αδιαλυτότητάς του σε αυτό και της διαφορετικής του πυκνότητας. Το νερό παραμένει εντός της παγίδας, ενώ μέρος του διαλύτη επιστρέφει στο δοχείο [1].

#### 1.6.13. Περιεκτικότητα σε Τέφρα

Η τέφρα σχηματίζεται κατά την καύση συστατικών που υπάρχουν στα μαζούτ, τα οποία αποτελούνται από αρκετές διαλυτές οργανομεταλλικές ενώσεις και στερεά που αιωρούνται. Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας του καυσίμου σε τέφρα είναι αρκετά σημαντικός, διότι η εναπόθεση αυτής δημιουργεί σοβαρά προβλήματα διάβρωσης και αποθέσεων στα ακροφύσια ψεκασμού του καυσίμου. Επίσης, η εναπόθεσή της πάνω σε εγκαταστάσεις μεταφοράς θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα, εκτός από τη διάβρωση, τη μείωση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της θερμικής εγκατάστασης (Εικόνα 4). Τα μέταλλα της τέφρας, των οποίων η συγκέντρωση έχει τη μεγαλύτερη σημασία είναι το νάτριο και το βανάδιο, επειδή τα οξειδία που σχηματίζουν έχουν χαμηλά σημεία τήξης, με αποτέλεσμα την πιθανή μεταφορά και εναπόθεσή τους σε επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας και την εκδήλωση των προβλημάτων που επισημάνθηκαν ως άνω [1].



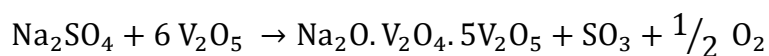
Εικόνα 4. Προσκόλληση σωματιδίων τέφρας στους αυλούς του λέβητα.

Πηγή: Yoffe, O., Oil shale fueled FBC power plant – Ash deposits and fouling problems.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τέφρας στα μαζούτ, που αναφέρεται ως επί τοις εκατό ποσοστό στη συνολική μάζα του καυσίμου, είναι η ISO 6245 (ASTM D482), σύμφωνα με την οποία μέρος του δείγματος καυσίμου αφήνεται να καεί εντελώς σε κάμινο, έως ότου παραμείνουν μόνο τα άκαυστα ανόργανα συστατικά [25].

#### 1.6.14. Περιεκτικότητα σε Νάτριο και Βανάδιο

Όπως προαναφέρθηκε, η παρουσία νατρίου και βαναδίου στα υπολειμματικά καύσιμα δημιουργεί αρκετά σοβαρά προβλήματα, όπως είναι η διάβρωση, που οφείλεται στη δημιουργία ευτηκτικών αλάτων (στερεών τηγμάτων που προσκολλώνται στις επιφάνειες), τα οποία προέρχονται από την ύπαρξη βαναδίου, που οξειδώνεται σε  $V_2O_5$  όταν καίγεται και θεικού νατρίου, που δημιουργείται κατά την αντίδραση του  $NaCl$  του θαλασσινού νερού με το οξυγόνο και το  $SO_2$ . Η αντίδραση μέσω της οποίας προκύπτει το ευτηκτικό άλας αναγράφεται παρακάτω [11]:



Η τήξη του ευτηκτικού αυτού άλατος και η προσκόλλησή του πάνω στις επιφάνειες του κινητήρα ξεκινάει σε θερμοκρασίες μικρότερες των  $625^\circ C$ . Στη συνέχεια, απορροφά οξυγόνο και αντιδρά με τα μέταλλα των επιφανειών που τα οξειδώνει, προκαλώντας έτσι σημαντική διάβρωση του εξοπλισμού [11]. Άλλα σημαντικά προβλήματα που δημιουργούνται, λόγω της ύπαρξης αυτών των συστατικών είναι η φθορά των ακροφυσίων ψεκασμού του καυσίμου, των κεφαλών των εμβόλων και των πτερυγίων των στροβίλων (Εικόνα 5). Για την αντιμετώπιση του προβλήματος με τη δημιουργία του ευτηκτικού άλατος νατρίου-βαναδίου, κρίνεται σκόπιμο η περιεκτικότητά του καυσίμου σε νάτριο να μην είναι μεγαλύτερη από το ένα τρίτο (1/3) της περιεκτικότητάς του σε βανάδιο [1].



Εικόνα 5. Διάβρωση στον εξοπλισμό στροβίλου, λόγω της χρήσης καυσίμου με μεγάλη περιεκτικότητα σε νάτριο και βανάδιο.

Πηγή: Olena Rube, Corrosion inhibitor for OIL and GAS Industry.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας ενός υπολειμματικού καυσίμου σε νάτριο και βανάδιο είναι η IP 501 (ή IP 470), σύμφωνα με την οποία το δείγμα καυσίμου αναλύεται μέσω της φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης και από την ένταση της ακτινοβολίας που προκύπτει από τη διέγερση των δύο συστατικών αυτών, προσδιορίζεται η περιεκτικότητα του καυσίμου σε νάτριο και βανάδιο [1], [26].

#### 1.6.15. Περιεκτικότητα σε Αργίλιο και Πυρίτιο

Είναι συχνό φαινόμενο στα υπολειμματικά καύσιμα να υπάρχουν ποσότητες αργιλίου και πυριτίου, που οφείλονται στα σωματίδια καταλύτη τα οποία προέρχονται από όλες τις διεργασίες διύλισης του αργού πετρελαίου και όχι στις συγκεντρώσεις τους στο αργό πετρέλαιο, καθώς αυτές είναι πολύ μικρές (της τάξης των 50 mg/kg) σε σχέση με αυτές που προέρχονται από τα σωματίδια καταλύτη. Έχουν διαστάσεις 30-60 μm συνήθως και βασικό χαρακτηριστικό των συστατικών αυτών αποτελεί η υψηλή τους σκληρότητα, που οδηγεί στη φθορά του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, ενώ για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων συνιστάται η χρήση φυγοκεντρικών διαχωριστών. Συνήθως, γίνεται επιπλέον καθαρισμός των καυσίμων από αυτά τα σωματίδια, πάνω στα πλοία, που επιτυγχάνει απομάκρυνση ίση με 80%, ώστε το καύσιμο να είναι αποδεκτό από τον κινητήρα και για να αποφευχθούν οι φθορές στις αντλίες του καυσίμου [1], [16].

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η περιεκτικότητα των υπολειμματικών καυσίμων σε αργίλιο και πυρίτιο είναι η IP 501 (ή IP 470), σύμφωνα με την οποία το δείγμα καυσίμου αναλύεται μέσω της φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης και από την ένταση της ακτινοβολίας που προκύπτει από τη διέγερση του αργιλίου και του πυριτίου [1].



#### 1.6.16. Περιεκτικότητα σε χρησιμοποιημένα λιπαντικά (ULO – Used Lubricating Oil)

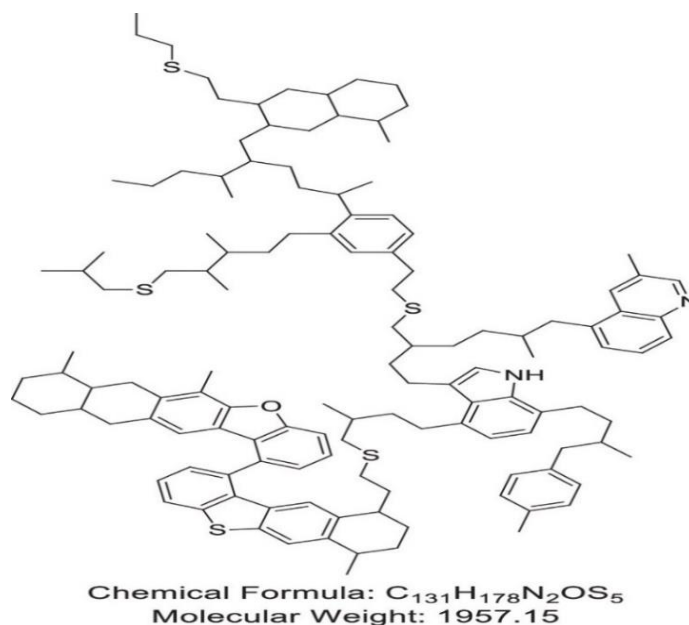
Δεν είναι λίγες οι φορές που εντοπίζονται χρησιμοποιημένα λιπαντικά κινητήρων σε υπολειμματικά καύσιμα. Ο εντοπισμός τους γίνεται έμμεσα μέσω του προσδιορισμού συστατικών μέσα στα υπολειμματικά καύσιμα όπως είναι το ασβέστιο, ο ψευδάργυρος και ο φώσφορος [24]. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8217, ένα υπολειμματικό καύσιμο δεν φαίνεται να περιέχει χρησιμοποιημένα λιπαντικά όταν η συγκέντρωση του ασβεστίου είναι μικρότερη των 30 mg/kg και του ψευδαργύρου και του φωσφόρου είναι μικρότερη των 15 mg/kg για το καθένα. Ωστόσο, αν ξεπεραστούν τα όρια αυτά δεν σημαίνει απαραίτητα ότι το υπολειμματικό καύσιμο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή ότι περιέχει ποσότητα χρησιμοποιημένων λιπαντικών. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται, διότι η μείωση της μέγιστης περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο οδήγησε στην παραγωγή διαφορετικών μειγμάτων υπολειμματικών καυσίμων, που μπορεί να περιέχουν ασβέστιο σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από 30 mg/kg. Επίσης, μπορεί να περιέχουν ποσότητες ψευδαργύρου, που στόχος του είναι να απορροφάει το υδρόθειο που υπάρχει στο καύσιμο. Έτσι, συμπεραίνεται ότι οι συγκεντρώσεις των συστατικών αυτών μέσα στο καύσιμο μπορεί μεν να μην βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων, αλλά ταυτόχρονα να μην οφείλονται στα χρησιμοποιημένα λιπαντικά [16].

#### 1.6.17. Ασφαλτένια

Στα υπολειμματικά καύσιμα περιέχονται σημαντικές ποσότητες ασφατενίων (ως ένα κολλοειδές αιώρημα), που είναι πολύπλοκες μεγαλομοριακές αλειφατικές, ναφθениκές και αρωματικές δομές, με μοριακό βάρος από 1000 έως 2000 g/mol, περιέχουν μεγάλο μέρος ετεροατόμων (όπως θείο, άζωτο και οξυγόνο) και μετάλλων (όπως σίδηρο, νικέλιο και βανάδιο), είναι αδιάλυτα σε ελαφρείς παραφινικούς διαλύτες, ενώ είναι διαλυτά σε θερμό τολουόλιο, έχουν σκούρο χρώμα και δεν έχουν συγκεκριμένο σημείο τήξης [1], [8].

Γενικά, η συγκέντρωση των ασφατενίων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή γίνεται, διότι παρατηρείται το φαινόμενο του διαχωρισμού τους από το υπόλοιπο καύσιμο με αποτέλεσμα να σχηματίζεται αδιάλυτο υπόστημα. Επίσης, τα ασφατενία μειώνουν τη λιπαντική ικανότητα του καυσίμου, δημιουργούν γαλακτώματα με το νερό καθώς και η καύση των μετάλλων, που είναι διαλυμένα σε αυτά, οδηγεί στον σχηματισμό των αντίστοιχων οξειδίων τους, δηλαδή σε ανόργανα συστατικά (τέφρα), δημιουργώντας έτσι προβλήματα φθοράς στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Για τη μείωση της πιθανότητας της καταβύθισης των ασφατενίων ως ασφαλτούχο υπόλειμμα, είναι σημαντικό το υπολειμματικό καύσιμο να μην αποτελείται εξ' ολοκλήρου από παραφινικούς υδρογονάνθρακες, αλλά να έχει και αρωματικούς, διότι αυτοί λειτουργούν ανασταλτικά στο φαινόμενο της καταβύθισης των ασφατενίων, αφού επιτυγχάνουν την αιώρηση τέτοιων ενώσεων και αποτρέπουν την καταβύθισή τους [8], [27].

Η δομή των ασφατενίων είναι περίπλοκη και αυτό διακρίνεται και στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6. Μία ενδεικτική δομή των ασφαλτενίων που περιέχονται στα υπολειμματικά καύσιμα.

Πηγή: Ali H. Alshareef (ACS), *Asphaltenes: Definition, Properties and Reaction of Model Compounds*.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν τα ασφαλτένια του καυσίμου είναι η IP 143 (ASTM D6560), σύμφωνα με την οποία το δείγμα καυσίμου αρχικά, διαλύεται σε ζέον επτάνιο που ανακυκλοφορεί και στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία αλλά με τολουόλιο [28].

#### 1.6.18. Σταθερότητα-Συμβατότητα

Όσον αφορά στη σταθερότητα των υπολειμματικών καυσίμων, αυτή αναφέρεται στην ικανότητα που έχουν τα καύσιμα αυτά να αποτρέπουν τη δημιουργία συσσωματωμάτων, λόγω της ύπαρξης ασφαλτενίων. Τα ασφαλτένια πρέπει να είναι διαλυτά μέσα στο καύσιμο, αλλιώς εμφανίζονται προβλήματα συσσώρευσης και καταβύθισής τους. Στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος συμβάλλει η ύπαρξη αρωματικών συστατικών που μπορούν να τα κρατήσουν σε διαλυτή μορφή. Στα ασταθή υπολειμματικά καύσιμα είναι έντονο το πρόβλημα της καταβύθισης αυτών των συστατικών και του σχηματισμού ιλύος, ενώ το πρόβλημα γίνεται πιο έντονο με την αύξηση της θερμοκρασίας [1].

Εκτός από τη σταθερότητα, η δυνατότητα δύο συστατικών να αναμειγνύονται και να δημιουργούν ένα σταθερό μείγμα αναφέρεται ως συμβατότητα. Το μείγμα που προκύπτει από την ανάμειξη δύο σταθερών καυσίμων δεν είναι σίγουρο ότι θα είναι σταθερό. Προβλήματα ασυμβατότητας καυσίμων, οδηγούν στον σχηματισμό ιλύος και στην απόφραξη φίλτρων, σωληνώσεων και δεξαμενών, που για να αντιμετωπιστούν είναι απαραίτητη η χειροκίνητη αφαίρεση της ιλύος (Εικόνα 7). Η πιθανότητα εμφάνισης ασυμβατότητας καυσίμων αυξάνεται όταν αναμειγνύονται gasoil ατμοσφαιρικής απόσταξης με υπόλειμμα από διεργασίες πυρόλυσης [1], [11].



Εικόνα 7. Σχηματισμός υλός και απόφραξη φίλτρων, λόγω της ασυμβατότητας καυσίμων.

Πηγή: Fleury engineering, In-line filter suffering from fuel deterioration (αριστερή εικόνα).

Πηγή: Λόης, Ε., Ζαννίκος, Φ., Καρώνης, Δ., Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών (δεξιά εικόνα).

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί αν τα συστατικά ανάμειξης του υπολειμματικού καυσίμου είναι συμβατά και αν το τελικό υπολειμματικό καύσιμο είναι σταθερό, είναι η ASTM D4740, που αποτελεί ένα γρήγορο τεστ (spot test). Σύμφωνα με αυτή, δείγμα υπολειμματικού καυσίμου, αφού προθερμανθεί, τοποθετείται σε πρότυπο χαρτί δοκιμής και στη συνέχεια θερμαίνεται στους 100 °C για μία ώρα και όταν ολοκληρωθεί η θέρμανση, εξετάζεται η κηλίδα που αφήνει, σύμφωνα με τα στοιχεία, όπως αυτά περιγράφονται στον Πίνακα 2 [1], [29]:

Πίνακας 2. Αξιολόγηση της σταθερότητας και της συμβατότητας καυσίμων σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D4740.

Rating ASTM D4740	Reference Spot	Spot Description	Fuel status
1		Homogeneous spot, no inner ring	Compatible / Stable
2		Faint or poorly defined inner ring	Will deposit some sludge Handle carefully Consider chemical additives Do not overheat Increase purifier Blow down frequency
3		Well-defined inner ring, only slightly darker than the background	As for 2 but increased sludge potential. Future onshore test verification recommended
4		Well-defined inner ring, thicker than the ring in reference spot no. 3 and somewhat darker than the background	Incompatible / Unstable
5		Very dark solid or nearly solid area in the center, the central area is much darker than the background	Incompatible / Unstable

Πηγή: P.I.N, Marine fuels compatibility testing by automated instrumentation according to ASTM D4740.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 2, γίνεται αντιληπτό ότι στην πρώτη και στη δεύτερη περίπτωση, το υπολειμματικό καύσιμο είναι κατάλληλο για χρήση, με μία μικρή προσοχή στη δεύτερη περίπτωση. Όταν η συμπεριφορά του καυσίμου είναι όπως στην τρίτη περίπτωση τότε είναι



απαραίτητος ο επιπλέον έλεγχος του καυσίμου, ενώ στις περιπτώσεις τέσσερα και πέντε, το καύσιμο δεν είναι ούτε συμβατό, αλλά ούτε σταθερό, συνεπώς ακατάλληλο για χρήση [29].

### 1.7. Δείκτης αρωματικότητας (CCAI - Calculated Carbon Aromaticity Index)

Τα υπολειμματικά καύσιμα χρησιμοποιούνται ως βασικά καύσιμα στα πλοία από τις αρχές του 20ού αιώνα. Τα πρώτα χρόνια, που προέρχονταν από τη διεργασία της ατμοσφαιρικής απόσταξης, τα προβλήματα που εμφάνιζαν οι κινητήρες των πλοίων που λειτουργούσαν με τα καύσιμα αυτά ήταν λίγα και ασήμαντα [13]. Ωστόσο, οι μεγάλες προσπάθειες των διυλιστηρίων παγκοσμίως για να ικανοποιήσουν τη ζήτηση αλλά και να αυξήσουν την απόδοση των προϊόντων υψηλής αξίας όπως είναι οι βενζίνες και τα diesel, είχε ως αποτέλεσμα την εισαγωγή διεργασιών όπως είναι η απόσταξη υπό κενό, η θερμική και καταλυτική πυρόλυση, η υδρογονοπυρόλυση, η εξανθράκωση και η ιξωδόλυση στον χώρο των διυλιστηρίων. Στόχος αυτών των διεργασιών ήταν να επεξεργάζονται περαιτέρω τα υπολείμματα, ώστε τα διυλιστήρια να έχουν μεγαλύτερη απόδοση σε «λευκά» προϊόντα, δηλαδή σε αποστάγματα και μικρότερη σε υπόλειμμα. Έτσι, το υπόλειμμα της ατμοσφαιρικής απόσταξης που ανερχόταν περίπου στο 40% της ποσότητας του αργού πετρελαίου, μετά την εισαγωγή των προαναφερθέντων διεργασιών ήταν περίπου το 10% αυτού. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη μείωση της ποσότητας του διαθέσιμου υπολείμματος, οπότε για να υπάρχει αρκετή ποσότητα υπολειμματικών καυσίμων που να καλύπτει τη ζήτηση, ήταν απαραίτητη η ανάμειξη συστατικών από αρκετές διεργασίες [30]. Εξαιτίας αυτού, μειώθηκε η ποιότητα των υπολειμματικών καυσίμων, με αποτέλεσμα να εμφανιστούν προβλήματα στους κινητήρες των πλοίων, καθιστώντας απαραίτητη την έναρξη των ερευνών για τις αιτίες που προκαλούσαν τα προβλήματα αυτά [13].

Επισημαίνεται ότι δεν μπορούσε να προσδιοριστεί ο αριθμός κετανίου των υπολειμματικών καυσίμων, διότι ένα υπολειμματικό καύσιμο δεν έχει χαρακτηριστικά καυσίμου diesel για να χρησιμοποιηθεί σε πρότυπο κινητήρα diesel όπως απαιτείται, καθώς είναι πιο βαρύ (με μεγαλύτερο ιξώδες και πυκνότητα) καύσιμο.

Έτσι, η εταιρεία πετρελαιοειδών Royal Dutch Shell έκανε μεγάλη προσπάθεια, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, για να ξεκινήσει ένα πρόγραμμα με στόχο την κατανόηση των παραγόντων που ελέγχουν την απόδοση ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων και τον ποσοτικό προσδιορισμό της ποιότητας ανάφλεξης [2], [31]. Πιο συγκεκριμένα, ο A.P. Zeelenberg το 1983, εισήγαγε την έννοια του δείκτη αρωματικότητας CCAI (Calculated Carbon Aromaticity Index), σύμφωνα με τον οποίο προσδιορίζεται η αρωματικότητα ενός υπολειμματικού καυσίμου [13]. Η Shell κατέληξε στην εισαγωγή του δείκτη αρωματικότητας (CCAI) πραγματοποιώντας πειράματα με εργαστηριακούς κινητήρες, κατά τα οποία καταγραφόταν η αύξηση της πίεσης κατά τη διάρκεια της καύσης των καυσίμων [32], [33].

Ο δείκτης αρωματικότητας ενός υπολειμματικού καυσίμου, που είναι σαν τον δείκτη κετανίου για το diesel, βρίσκεται υπολογιστικά, μέσω της Εξίσωσης 1.9 που χρησιμοποιεί ως δεδομένα την πυκνότητα και το κινηματικό ιξώδες του καυσίμου [1]:

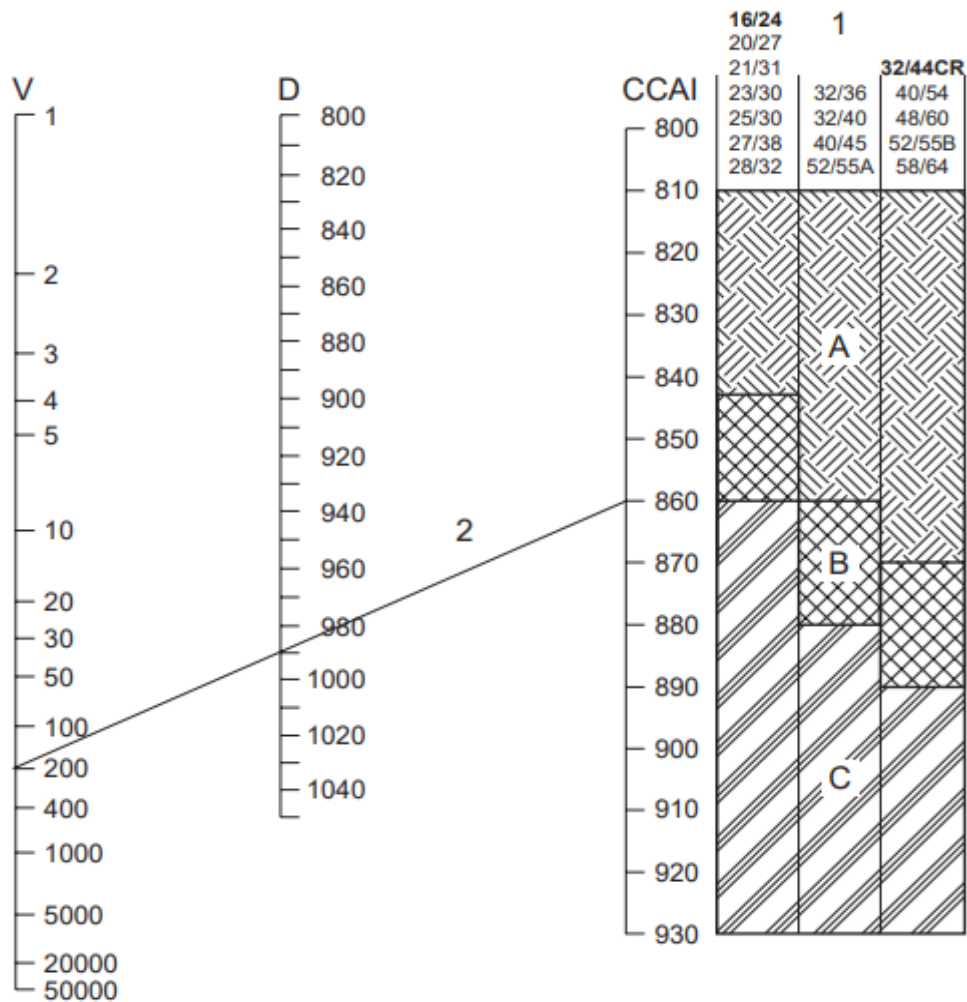
$$CCAI = d - 80,6 - 140,6 * \log(\log(v + 0,85)) - 483 * \log\left(\frac{T + 273,15}{323}\right) \quad (\text{Εξ. 1.9})$$

όπου: d είναι η πυκνότητα του καυσίμου σε θερμοκρασία 15 °C σε kg/m<sup>3</sup>

v είναι το κινηματικό ιξώδες του καυσίμου σε cSt (mm<sup>2</sup>/s)

T είναι η θερμοκρασία σε °C για την οποία είναι γνωστή η τιμή του ιξώδους

Επίσης, ο δείκτης αρωματικότητας ενός υπολειμματικού καυσίμου, εκτός από τον υπολογισμό του, μέσω της εξίσωσης που περιγράφηκε, μπορεί να βρεθεί και μέσω διαγραμμάτων, γνωστά και ως νομογράφημα, μέσω της τιμής της πυκνότητας και του κινηματικού ιξώδους του καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα, ένα νομογράφημα αναπαρίσταται στο Διάγραμμα 2 [34]:



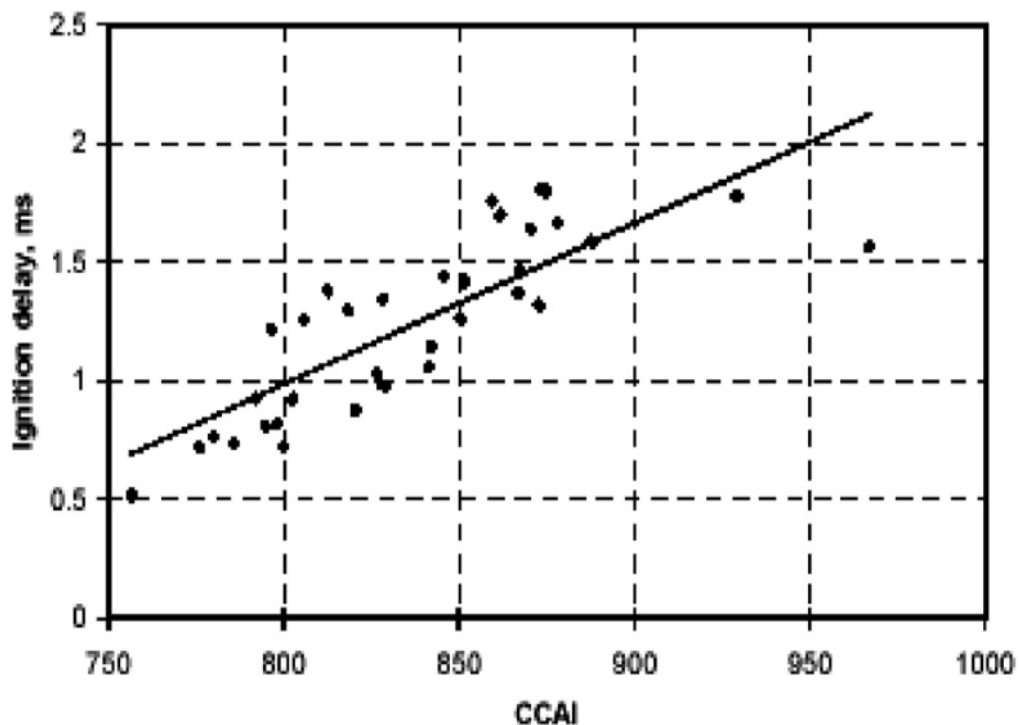
Διάγραμμα 2. Νομογράφημα του δείκτη αρωματικότητας, μέσω της πυκνότητας και του ιξώδους του καυσίμου.

Πηγή: MAN Diesel, Updated Quality of Fuel Oil.

Στο Διάγραμμα 2, με V συμβολίζεται το κινηματικό ιξώδες του υπολειμματικού καυσίμου σε cSt (mm<sup>2</sup>/s) στους 50 °C και με D η πυκνότητά του σε kg/m<sup>3</sup> στους 15 °C. Έτσι, γνωρίζοντας τις δύο αυτές τιμές – σημεία, σχεδιάζεται η ευθεία (που συμβολίζεται με τον αριθμό 2) που

περνάει από αυτά και η προέκτασή της καθορίζει τον δείκτη αρωματικότητας του καυσίμου. Με τον αριθμό 1 συμβολίζεται ο τύπος του κινητήρα που χρησιμοποιείται, ενώ μέσω των γραμμάτων A, B και C, αξιολογείται η ποιότητα καύσης του καυσίμου και πιο συγκεκριμένα, όταν η προέκταση της ευθείας 2, που καθορίζει τον δείκτη αρωματικότητας, βρίσκεται εντός της περιοχής A, ο κινητήρας δεν αντιμετωπίζει κάποιο πρόβλημα λόγω του καυσίμου, ενώ όταν βρίσκεται στην περιοχή B, είναι πιθανό να εμφανιστούν δυσλειτουργίες στον κινητήρα. Στην περιοχή C, το καύσιμο οδηγεί σε μη κανονική λειτουργία του κινητήρα, ενώ η περαιτέρω χρήση του ακόμα και για μικρό χρονικό διάστημα μπορεί να του προκαλέσει σοβαρές βλάβες [34].

Ο δείκτης αρωματικότητας (CCAI) είναι μια υπολογιστική παράμετρος και αποτελεί έναν αρχικό χαρακτηρισμό της ποιότητας ανάφλεξης ενός υπολειμματικού καυσίμου, ενώ είναι απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση του καυσίμου για να χαρακτηριστεί πλήρως η ποιότητά του. Πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος και το εύρος τιμών του κυμαίνεται από την τιμή 790 μέχρι την τιμή 950 περίπου. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη αυτού τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων που είναι συνήθως καύσιμα παραφινικής βάσης, ενώ όσο αυξάνεται η τιμή του, η ποιότητα ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων μειώνεται [1]. Στο Διάγραμμα 3, φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ του δείκτη αρωματικότητας (CCAI) και της καθυστέρησης ανάφλεξης του καυσίμου δεν είναι ιδανική [31].



Διάγραμμα 3. Σχέση μεταξύ της καθυστέρησης ανάφλεξης και του δείκτη CCAI υπολειμματικών καυσίμων.

Πηγή: Arvelo, F., Armas, I. P., Ignition Quality of Residual Fuel Oils.

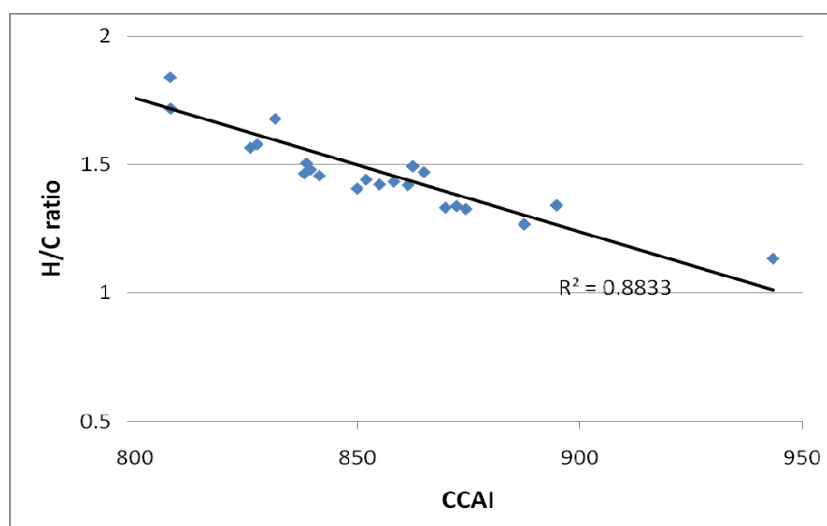
Σύμφωνα με τον δείκτη CCAI, τα υπολειμματικά καύσιμα διαχωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες [1]:

Πίνακας 3. Κατηγοριοποίηση υπολειμματικών καυσίμων με βάση τις τιμές του δείκτη αρωματικότητας (CCAI).

Τιμή CCAI	Ποιότητα Ανάφλεξης
790 – 830	Πολύ Καλή έως Καλή
830 - 850	Καλή ως Ικανοποιητική
850 – 870	Μέτρια ως Κακή
870 - 950	Κακή έως Μη Αποδεκτή

Πηγή: Λόης, Ε., Ζαννίκος, Φ., Καρόνης, Δ., Τεχνολογία Καυσίμων Και Λιπαντικών.

Επίσης, εκτός τη σχέση της τιμής του δείκτη αρωματικότητας (CCAI) με την ποιότητα ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων, έχει βρεθεί η σχέση μεταξύ του λόγου υδρογόνου προς άνθρακα (H/C) με τις τιμές του δείκτη CCAI, που αναπαριστάται στο Διάγραμμα 4 [30].



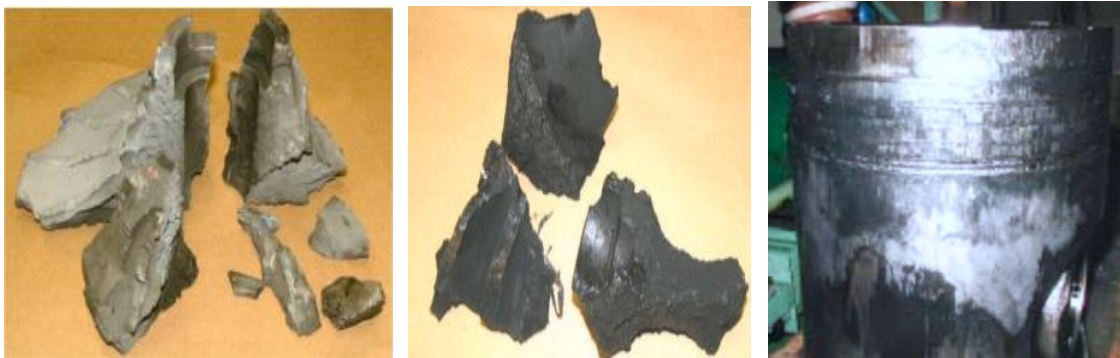
Διάγραμμα 4. Σχέση μεταξύ του λόγου υδρογόνου προς άνθρακα (H/C) και του δείκτη αρωματικότητας CCAI.

Πηγή: Hoog, P. de, Steernberg, K., Forget, S., Investigating the Ignition Properties of Marine Fuels by the Fuel Ignition Analyser and Its Comparison to Marine Engines.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4, γίνεται αντιληπτό ότι όσο μειώνεται ο λόγος υδρογόνου προς άνθρακα του καυσίμου, δηλαδή όσο το καύσιμο γίνεται πιο αρωματικό (μειώνεται ο αριθμός των ατόμων υδρογόνου στο μόριο), τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη αρωματικότητας και τόσο χειρότερη είναι η ποιότητα καύσης του καυσίμου [30].

Ωστόσο, είναι γνωστό ότι ο δείκτης αρωματικότητας (CCAI) αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο μέσο για τη γρήγορη και εύκολη πρόβλεψη της ποιότητας της ανάφλεξης ενός υπολειμματικού καυσίμου, δεν μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί ως το μόνο μέσο και ως αξιόπιστος δείκτης για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας ενός καυσίμου [13]. Λόγω της πολύπλοκης σύνθεσης των

μειγμάτων των υπολειμματικών καυσίμων, παρατηρείται το φαινόμενο ότι αρκετά καύσιμα με παρόμοιες τιμές ιξώδους και πυκνότητας, δηλαδή με παρόμοιες τιμές CCAI, εμφανίζουν σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά της ανάφλεξης τους, ενώ αντίθετα καύσιμα με διαφορετικές τιμές ιξώδους και πυκνότητας, δηλαδή διαφορετικές τιμές CCAI, εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά καύσης [32]. Επίσης, δεν είναι λίγες οι φορές, που υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ της ποιότητας του καυσίμου σύμφωνα με τον δείκτη CCAI και της πραγματικής ποιότητάς του [35]. Υπολειμματικά καύσιμα με χαμηλή τιμή CCAI, δηλαδή καλή ποιότητα ανάφλεξης, εμφανίζουν προβλήματα κατά την καύση τους, ενώ αντίθετα καύσιμα με υψηλή τιμή CCAI, δηλαδή καύσιμα με όχι και τόσο καλή ποιότητα ανάφλεξης, παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά κατά την καύση τους στους κινητήρες [32]. Έρευνες που έγιναν για να βρεθούν οι αιτίες των προβλημάτων που δημιουργήθηκαν σε ναυτικούς κινητήρες, έδειξαν ότι υπολειμματικά καύσιμα με αποδεκτές τιμές (χαμηλές τιμές) δείκτη αρωματικότητας, που υποδεικνύουν κατάλληλες ιδιότητες καύσης, κατά την καύση τους στους ναυτικούς κινητήρες παρουσίασαν σοβαρά προβλήματα που οδήγησαν σε καταστροφή του εξοπλισμού των κινητήρων. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 8 φαίνεται ο εξοπλισμός των κινητήρων που υπέστη βλάβες [24].



Εικόνα 8. Φθорές εξοπλισμού ναυτικού κινητήρα, από τη χρήση καυσίμου με προβληματική συμπεριφορά καύσης.

Πηγή: Chybowski Leszek, Analysis of fuel properties in the context of the causes of three marine auxiliary engines failure (για τις δύο πρώτες εικόνες) και Steernberg Koen, The effects of a changing oil industry on marine fuel quality and how new and old analytical techniques can be used to ensure predictable performance in marine diesel engines (για την τελευταία εικόνα)

Έτσι, για την αντιμετώπιση του ανακριβούς προσδιορισμού των χαρακτηριστικών της καύσης και της ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων, μέσω του δείκτη αρωματικότητας, έχει αναπτυχθεί μία νέα μέθοδος, σύμφωνα με το πρότυπο IP 541/06. Γίνεται χρήση μίας συσκευής θαλάμου καύσης σταθερού όγκου (Constant Volume Combustion Chamber - CVCC), γνωστή ως FIA – 100/FCA που μετρά την καθυστέρηση ανάφλεξης και την καθυστέρηση καύσης των υπολειμματικών καυσίμων και το αποτέλεσμα που δίνει, μετά το τέλος της καύσης, είναι ο δείκτης ECN (Estimated Cetane Number – Εκτιμώμενος Αριθμός Κετανίου). Ο δείκτης αυτός, αποτελεί μέσο αξιολόγησης της ποιότητας ανάφλεξης, ο οποίος προέρχεται από την κλίμακα του αριθμού κετανίου και χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιήσει τα χαρακτηριστικά της ανάφλεξης των καυσίμων [10], [35].

## 2. Πειραματικό Μέρος

### 2.1. Σκοπός

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση της ποιότητας ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων. Πιο συγκεκριμένα, ο τρόπος με τον οποίο αξιολογείται η ποιότητα ανάφλεξης τέτοιων καυσίμων, είναι μέσω της χρήσης συσκευής θαλάμου καύσης σταθερού όγκου (Constant Volume Combustion Chamber – CVCC) που μετρά την καθυστέρηση ανάφλεξης και την καθυστέρηση καύσης υπολειμματικών καυσίμων, σύμφωνα με το πρότυπο IP 541/06. Στο τέλος, τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν με τη συσκευή FIA – 100/FCA της Fueltech Solutions AS, θα συγκριθούν με τις τιμές του δείκτη αρωματικότητας (CCAI) των αντίστοιχων καυσίμων όπως υπολογίστηκε.

### 2.2. Όργανα και συσκευές

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, έγινε χρήση αρκετών βασικών εργαστηριακών οργάνων και συσκευών. Ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

- i. Ποτήρια ζέσεως των 100 και 250 mL
- ii. Σιφόνια πλήρωσης των 50 mL
- iii. Σιφόνια μέτρησης των 10, 20 και 25 mL
- iv. Πουάρ
- v. Σύριγγες των 5 και 10 mL
- vi. Γυάλινη ράβδος ανάδευσης
- vii. Ογκομετρικός κύλινδρος των 250 mL
- viii. Σύστημα φίλτρου 75 micron
- ix. Ηλεκτρονικός αναλυτικός ζυγός ακριβείας
- x. Φούρνος ξήρανσης
- xi. Ποδιά εργασίας
- xii. Μάσκα προστασίας
- xiii. Προστατευτικά γάντια

Όσον αφορά στις συσκευές, ήταν οι εξής:

- i. FIA – 100/FCA της Fueltech Solution AS για τον προσδιορισμό του δείκτη ECN των υπολειμματικών καυσίμων
- ii. Stabinger Viscometer 3000 της Anton Paar (SVM 3000) για τον προσδιορισμό του κινηματικού ιξώδους και της πυκνότητας των υπολειμματικών καυσίμων
- iii. Spectro Xeros της Ametek για την περιεκτικότητα των υπολειμματικών καυσίμων σε θείο



## 2.3. Πρώτες Ύλες – Αντιδραστήρια

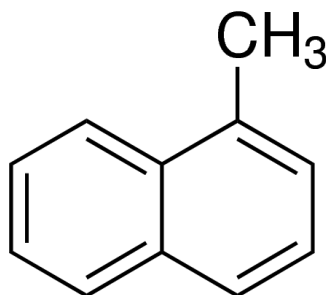
Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν αρκετές μετρήσεις με πρότυπα δείγματα ώστε να διαπιστωθεί η ακρίβεια της συσκευής FIA – 100/FCA. Αυτά, είναι η 1-μέθυλο-ναφθαλίνη καθαρότητας 96 και 97,5%, το 2, 2, 4, 4, 6, 8, 8 επτά-μέθυλο-εννεάνιο καθαρότητας 98%, το μεθυλοκυκλοεξάνιο καθαρότητας 99% και το κανονικό δεκαεξάνιο καθαρότητας 99% όπως φαίνονται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9. Πρότυπα αντιδραστήρια. 1-μέθυλο-ναφθαλίνη, κανονικό δεκαεξάνιο, μέθυλο-κυκλοεξάνιο και 2, 2, 4, 4, 6, 8, 8 επτά-μέθυλο-εννεάνιο (από αριστερά προς τα δεξιά).

### 2.3.1. 1-μέθυλο-ναφθαλίνη

Η 1-μέθυλο-ναφθαλίνη έχει μοριακό τύπο  $C_{11}H_{10}$  και συντακτικό τύπο της Εικόνας 10.



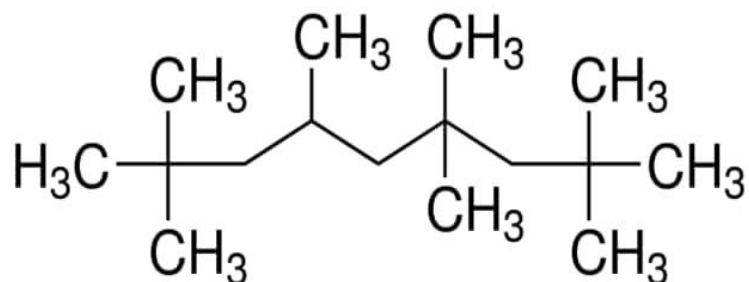
Εικόνα 10. Συντακτικός τύπος της 1-μέθυλο-ναφθαλίνης.

Πηγή: Sigmaaldrich, 1-Methylnaphthalene.

Αποτελεί ενδιάμεσο προϊόν στη διεργασία εξανθράκωσης του άνθρακα και στη βιομηχανική σύνθεση ελαφρών αρωματικών υδρογονανθράκων [36]. Πρόκειται για ένα υγρό με άχρωμο ή διαγές κίτρινο χρώμα με χαρακτηριστική μυρωδιά αυτή της ναφθαλίνης. Έχει μοριακό βάρος ίσο με 142,20 g/mol, πυκνότητα στους 25 °C ίση με 1,02 g/cm<sup>3</sup>, σημείο βρασμού στους 240 με 243 °C, σημείο ανάφλεξης στους 82 °C και σημείο πήξης στους -22 °C [37]. Παλαιότερα, χρησιμοποιούταν ως ένα από τα δύο καύσιμα αναφοράς για τον προσδιορισμό του αριθμού κετανίου στα καύσιμα, αλλά λόγω της κακής ποιότητας ανάφλεξής του, αφού έχει αριθμό κετανίου ίσο με 0, δεν χρησιμοποιείται από το 1964 και μετά [1].

### 2.3.2. 2, 2, 4, 4, 6, 8, 8 επτά-μέθυλο-εννεάνιο

Το 2, 2, 4, 4, 6, 8, 8 επτά-μέθυλο-εννεάνιο έχει μοριακό τύπο  $C_{16}H_{34}$  και συντακτικό τύπο της Εικόνας 11.



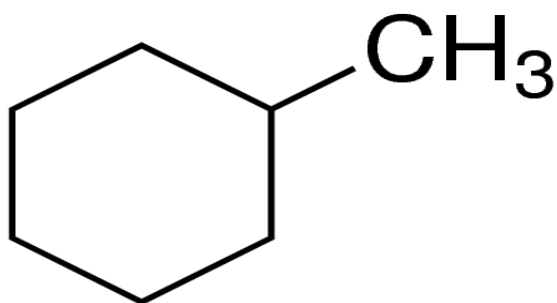
Εικόνα 11. Συντακτικός τύπος του 2, 2, 4, 4, 6, 8, 8 επτά-μέθυλο-εννεανίου.

Πηγή: Sigmaaldrich, 2,2,4,4,6,8,8-Heptamethylnonane.

Πρόκειται για ένα άχρωμο και άοσμο υγρό με μοριακό βάρος ίσο με 226,44 g/mol, πυκνότητα στους 25 °C ίση με 0,793 g/cm<sup>3</sup>, σημείο βρασμού στους 240 °C, σημείο ανάφλεξης στους 96 °C και σημείο πήξης στους -3,71 °C [38]. Χρησιμοποιείται ως ένα από τα δύο καύσιμα αναφοράς για τον προσδιορισμό του αριθμού κετανίου ενός καυσίμου και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ως το καύσιμο με την κακή ποιότητα ανάφλεξης, αφού έχει αριθμό κετανίου ίσο με 15 και είναι η ουσία που αντικατέστησε την 1-μέθυλο-ναφθαλίνη [1].

### 2.3.3. Μέθυλο-κυκλοεξάνιο

Το μέθυλο-κυκλοεξάνιο έχει μοριακό τύπο  $C_7H_{14}$  και συντακτικό τύπο της Εικόνας 12.



Εικόνα 12. Συντακτικός τύπος του μέθυλο-κυκλοεξανίου.

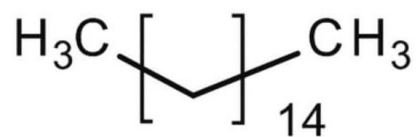
Πηγή: Sigmaaldrich, Methylcyclohexane.

Είναι ένα διαυγές άχρωμο υγρό με ελαφριά οσμή πετρελαίου. Το μοριακό του βάρος ισούται με 98,19 g/mol, η πυκνότητά του στους 25 °C είναι ίση με 0,77 g/cm<sup>3</sup>, σημείο βρασμού έχει στους 101 °C, σημείο ανάφλεξης στους -3,89 °C και σημείο πήξης στους -126 °C [39]. Χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση της συσκευής FIA – 100/FCA.



### 2.3.4. Κανονικό δεκαεξάνιο

Το κανονικό δεκαεξάνιο έχει μοριακό τύπο  $C_{16}H_{34}$  και συντακτικό τύπο της Εικόνας 13.



Εικόνα 13. Συντακτικός τύπος του κανονικού δεκαεξανίου.

Πηγή: Sigmaaldrich, n-Hexadecane.

Πρόκειται για άχρωμο υγρό που δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη οσμή, με μοριακό βάρος ίσο με 226,44 g/mol, πυκνότητα στους 25 °C ίση με 0,773 g/cm<sup>3</sup>, σημείο βρασμού στους 286,9 °C, σημείο ανάφλεξης στους 135 °C και σημείο πήξης στους 18,18 °C. Το σημείο πήξης του είναι αρκετά υψηλό και γι' αυτό απαιτείται συχνά η προθέρμανσή του πριν τη χρήση [40]. Αποτελεί το ένα από τα δύο καύσιμα αναφοράς για τον προσδιορισμό του αριθμού κετανίου ενός καυσίμου και πιο συγκεκριμένα το καύσιμο αναφοράς με την καλή ποιότητα ανάφλεξης, αφού ο αριθμός κετανίου του ισούται με 100 [1].

## 2.4. Αρχές μεθόδων ανάλυσης

### 2.4.1. Μέθοδος IP 541/06 για τον προσδιορισμό της ποιότητας ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων

Η τυποποιημένη μέθοδος IP 541/06 έχει αναπτυχθεί για την αξιολόγηση της ποιότητας ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων. Περιγράφει τη διαδικασία μέσω της οποίας γίνεται ο ποσοτικός προσδιορισμός της ανάφλεξης και των χαρακτηριστικών της καύσης των υπολειμματικών καυσίμων για χρήση τους σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση. Χρησιμοποιεί μία συσκευή θαλάμου καύσης σταθερού όγκου (Constant Volume Combustion Chamber - CVCC), η οποία μετρά τις παραμέτρους ανάφλεξης και καύσης ενός καυσίμου υπό συγκεκριμένες συνθήκες δοκιμής. Το παράρτημα ΣΤ της μεθόδου δοκιμής επιτρέπει τη χρήση ενός δείκτη που ονομάζεται Εκτιμώμενος Αριθμός Κετανίου (Estimated Cetane Number - ECN) και υπολογίζεται από ορισμένες παραμέτρους που μετρώνται κατά τη διάρκεια της δοκιμής [32].

Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται στα υπολειμματικά καύσιμα πετρελαϊκής προέλευσης με κινηματικό ιξώδες έως 2000 cSt (mm<sup>2</sup>/s) στους 50 °C. Ωστόσο, η μέθοδος παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια για υπολειμματικά καύσιμα με εύρος κινηματικού ιξώδους από 25 έως 800 cSt στους 50 °C. Κυρίως εφαρμόζεται σε προϊόντα που πληρούν τις προδιαγραφές του προτύπου ISO 8217, σχετικά με τα υπολειμματικά καύσιμα και της σύστασης αριθμού 21 της CIMAC (Διεθνές Συμβούλιο για κινητήρες εσωτερικής καύσης), ενώ η χρήση της έχει ευρεία εφαρμογή και σε άλλου είδους υπολειμματικά καύσιμα [41].

#### 2.4.1.1. Τεχνικοί όροι και ορισμοί της μεθόδου

Οι τεχνικοί όροι και ορισμοί που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μέθοδο είναι οι ακόλουθοι:

**Accopted **Reference **Vale** (**ARV**): Αναφέρεται στην τιμή που συμφωνήθηκε ως σημείο αναφοράς για σύγκριση. Η συμφωνία για την τιμή αυτή έχει προέλθει είτε από επιστημονικές κοινότητες, είτε από διαπιστευμένο οργανισμό, είτε από πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν από ομάδες επιστημόνων και μηχανικών [41].****

**Accumulated **Rate of **Heat Release** (**AR**): Αναφέρεται στο εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από το θετικό τμήμα της καμπύλης της παραγώγου της πίεσης. Ο συσσωρευμένος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Accumulated Rate of Heat Release) είναι μέτρο της συνολικής ποσότητας της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της καύσης της ποσότητας του καυσίμου που εγχύθηκε στη συσκευή [41].****

**After **Burning **Period**** (**ABP**): Αναφέρεται στη χρονική διαφορά, σε ms, μεταξύ του τέλους της καύσης (EC) και του τέλους της κύριας καύσης (EMC), δηλαδή στη χρονική διαφορά EC – EMC [41].**

**Calibration **Reference **Fliuid** (**CRF**): Αναφέρεται στο ρευστό, με το οποίο βαθμονομήθηκε η συσκευή καύσης, το οποίο είναι το μέθυλο-κυκλοεξάνιο (MCH) [41].****

**End of **Combustion** (**EC**): Αναφέρεται στη χρονική διαφορά, σε ms, μεταξύ της έναρξης της έγχυσης του καυσίμου και του σημείου στο οποίο η αύξηση της πίεσης έχει φθάσει στο μέγιστό της, λόγω της καύσης και η παράγωγός της επανέρχεται στο μηδέν. Η περίοδος αυτή καθορίζεται από την έναρξη της έγχυσης του καυσίμου με βάση την καταγεγραμμένη κίνηση της βελόνας του εγχυτήρα (injector needle) και των αισθητήρων πίεσης του οργάνου [41].**

**End of **Main Combustion** (**EMC**): Αναφέρεται στη χρονική διαφορά, σε ms, μεταξύ της έναρξης της έγχυσης του καυσίμου και του σημείου στο οποίο το μεγαλύτερο μέρος του καυσίμου έχει καεί. Η περίοδος αυτή καθορίζεται από την έναρξη της έγχυσης του καυσίμου με βάση την καταγεγραμμένη κίνηση της βελόνας του εγχυτήρα (injector needle) και των αισθητήρων πίεσης του οργάνου. Ορίζεται ως η χρονική στιγμή κατά την οποία η αύξηση της πίεσης, σε σχέση με την αρχική πίεση, φτάνει στο 90% της μέγιστης πίεσης που καταγράφηκε στο τέλος της καύσης [41].**

**Ignition **Delay** (**ID**): Αναφέρεται στη χρονική διαφορά, σε ms, μεταξύ της έναρξης της έγχυσης του καυσίμου και της έναρξης της καύσης. Η περίοδος αυτή καθορίζεται από την κίνηση της βελόνας του εγχυτήρα (injector needle) και των αισθητήρων πίεσης του οργάνου. Ορίζεται ως η χρονική στιγμή κατά την οποία η αύξηση της πίεσης, σε σχέση με την αρχική πίεση, φτάνει το 1% της μέγιστης πίεσης που καταγράφηκε στο τέλος της καύσης [41].**

**Main **Combustion **Delay**** (**MCD**): Αναφέρεται στη χρονική περίοδο, σε ms, μεταξύ της έναρξης της έγχυσης του καυσίμου και την έναρξη της κύριας καύσης. Η περίοδος αυτή καθορίζεται από την κίνηση της βελόνας του εγχυτήρα (injector needle) και των αισθητήρων πίεσης του οργάνου. Ορίζεται ως η χρονική στιγμή κατά την οποία η αύξηση της πίεσης, σε σχέση με την αρχική πίεση, φτάνει το 10% της μέγιστης πίεσης που καταγράφηκε στο τέλος της καύσης [41].**

**Main Combustion Period (MCP)**: Αναφέρεται στη χρονική διαφορά, σε ms, μεταξύ του τέλους της κύριας καύσης (EMC) και της καθυστέρησης της κύριας καύσης (MCD), δηλαδή στη χρονική διαφορά EMC – MCD [41].

**Maximum Rate of Heat Release (maxROHR)**: Αναφέρεται στον μέγιστο ρυθμό μεταβολής της πίεσης, σε MPa/ms, που συναντάται κατά τη διάρκεια της καύσης [41].

**Net Heat of Combustion (NHC)**: Αναφέρεται στην καθαρή ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώνεται ανά μονάδα ποσότητας καυσίμου που εγχέεται. Η καθαρή θερμότητα καύσης (NHC) υπολογίζεται από τον λόγο του εμβαδού της επιφάνειας της παραγώγου της πίεσης, μιας ουσίας με επακριβώς γνωστή καθαρή θερμότητα καύσης και του εμβαδού της επιφάνειας του αγνώστου δείγματος, κατά την έγχυση ακριβώς του ίδιου όγκου [41].

**Position of Maximum Rate of Heat Release (PMR)**: Αναφέρεται στη χρονική περίοδο, σε ms, μεταξύ της κίνησης της βελόνας και του σημείου όπου ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης ανά μονάδα χρόνου είναι μέγιστος. Η ιδιότητα αυτή ορίζεται και μετράται από τη θέση της κορυφής της παραγώγου της καμπύλης της πίεσης [41].

**Pre-Combustion Period (PCP)**: Αναφέρεται στη χρονική διαφορά, σε ms, μεταξύ της καθυστέρησης της κύριας καύσης (MCD) και της καθυστέρησης ανάφλεξης (ID), δηλαδή στη χρονική διαφορά MCD – ID [41].

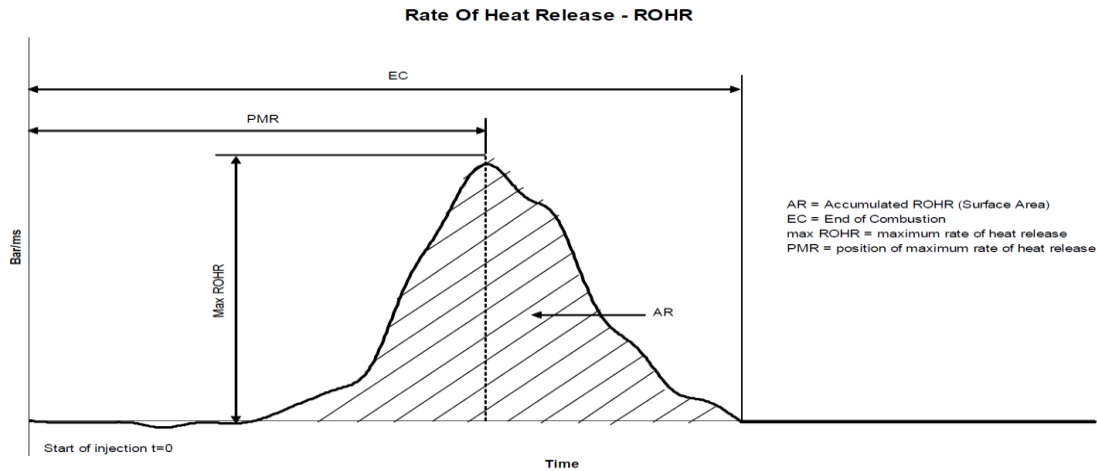
**Quality Control Sample**: Αναφέρεται στο σταθερό και ομοιογενές υλικό (-ά) που είναι κατάλληλα αποθηκευμένο (-α) για να διασφαλίζεται η ακεραιότητα της συσκευής και είναι διαθέσιμο (-α) σε επαρκή ποσότητα για επαναλαμβανόμενες μακροχρόνιες δοκιμές [41].

**Rate of Heat Release (ROHR)**: Αναφέρεται στην παράγωγο της αύξησης της πίεσης, σε MPa/ms, ως αποτέλεσμα της καύσης [41].

**Standard Reference Temperature (SRT)**: Αναφέρεται στην καθορισμένη θερμοκρασία του θαλάμου καύσης, σε °C, κάτω από πρότυπες συνθήκες λειτουργίας. Η πρότυπη θερμοκρασία αναφοράς ορίζεται στους 500 °C [41].

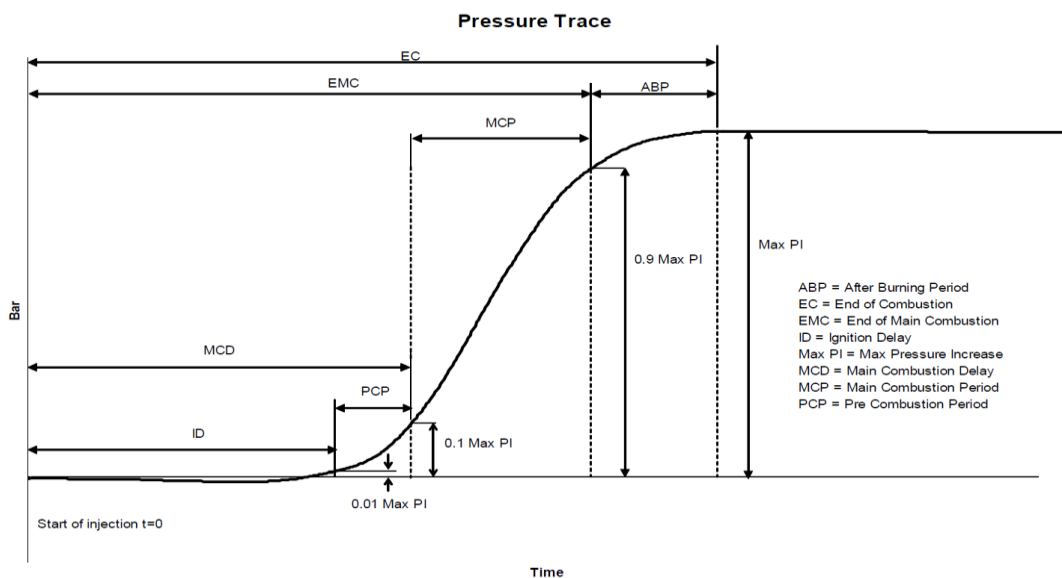
**Verification Fluid**: Αναφέρεται στο σταθερό και ομοιογενές υλικό που χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της σωστής ρύθμισης της θερμοκρασίας του αέρα του θαλάμου καύσης. Η θερμοκρασία του αέρα του θαλάμου καύσης ελέγχεται έμμεσα με τη μέτρηση του χρόνου αντίδρασης μιας καλά καθορισμένης ουσίας υπό πρότυπες συνθήκες [41].

Στην Εικόνα 14 και στην Εικόνα 15 αναπαρίστανται γραφικά τα διαγράμματα του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (ROHR) με τον χρόνο και της πίεσης με τον χρόνο, που λαμβάνονται μετά από κάθε μέτρηση του οργάνου, καθώς επίσης και η σχηματική απεικόνιση των τεχνικών όρων που αναλύθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 14. Καμπύλη του ROHR σε σχέση με τον χρόνο, με τη σχηματική απεικόνιση των τεχνικών όρων.

Πηγή: IP 541/06, Constant Volume Combustion Chamber method.



Εικόνα 15. Καμπύλη της πίεσης σε σχέση με τον χρόνο, με τη σχηματική απεικόνιση των τεχνικών όρων.

Πηγή: IP 541/06, Constant Volume Combustion Chamber method.

#### 2.4.1.2. Πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο

**Ρευστό για το σύστημα ψύξης:** Το ρευστό για το σύστημα ψύξης είναι ένα μείγμα 50:50% (v/v) αιθυλενογλυκόλης με απιονισμένο νερό (σύμφωνα με την κατηγορία 3 του προτύπου ISO 3696). Το μείγμα αυτό πληροί την απαιτούμενη τιμή του σημείου βρασμού και παρέχει μία επαρκή προστασία του συστήματος ψύξης από τη διάβρωση και από τα άλατα που μπορούν να τροποποιήσουν τη μεταφορά θερμότητας και τα αποτελέσματα της μέτρησης [41].

**Ρευστό αναφοράς για τη βαθμονόμηση του οργάνου:** Το ρευστό αναφοράς για τη βαθμονόμηση του οργάνου αποτελεί το μεθυλοκυκλοεξάνιο καθαρότητας τουλάχιστον 99,0% m/m που πρέπει να ικανοποιεί τις τιμές 12,50 ms για τον όρο PMR (Position of Maximum Rate

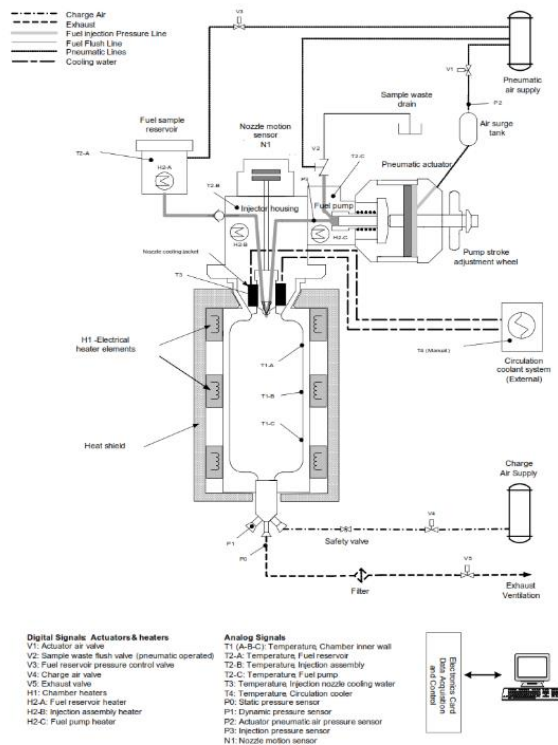
of Heat Release) και 7,55 για τον AR (Accumulated Rate of Heat Release). Γενικά, παρατηρείται ότι μερικές παρτίδες μεθυλοκυκλοεξανίου που πληρούν τις παραπάνω προδιαγραφές καθαρότητας, παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από την καθορισμένη τιμή των 12,50 ms για PMR. Για τον λόγο αυτόν συνιστάται μια διαδικασία επαλήθευσης της καθαρότητας κάθε νέας παρτίδας μεθυλοκυκλοεξανίου, πριν από τη χρήση του ως υλικό αναφοράς βαθμονόμησης ή ως υλικό επαλήθευσης του προτύπου [41].

**Δείγμα ποιοτικού ελέγχου:** Το δείγμα ποιοτικού ελέγχου πρέπει να είναι σταθερό και ομοιογενές ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μακροχρόνια. Για τον ποιοτικό έλεγχο, συνιστάται να μην γίνεται χρήση κάποιου υπολειμματικού καυσίμου, αλλά ένα σταθερό απόσταγμα (π.χ. diesel) με χαμηλό αριθμό κετανίου, στην περιοχή 25 – 30 [41].

**Συμπιεσμένος αέρας:** Αέρας με περιεκτικότητα σε οξυγόνο 21,0% (v/v) ± 1,0% (v/v), σε υδρογονάνθρακες λιγότερο από 0,0030% (v/v) και σε νερό λιγότερο από 0,0250% (v/v) [41].

### 2.4.1.3. Σύστημα αναλυτή καυσίμου

Το πρότυπο σύστημα (Εικόνα 16 και Εικόνα 17) αποτελείται από έναν θερμαινόμενο θάλαμο καύσης με υγρό ψύξης σε συγκεκριμένα σημεία του, εξωτερική είσοδο του θαλάμου, βαλβίδες εξαγωγής και σωληνώσεις, μία πνευματικά κινούμενη αντλία έγχυσης του καυσίμου, ένα ελεγχόμενης θερμοκρασίας σύστημα μεταφοράς καυσίμου, ένα σύστημα ανακυκλοφορίας του ψυκτικού, ηλεκτρομαγνητικά πηνία, αισθητήρες και σύστημα ελέγχου και εξαρτήματα σύνδεσης για τον συμπιεσμένο αέρα [41].



Εικόνα 16. Σχηματική απεικόνιση του αναλυτή καύσης.

Πηγή: IP 541/06, Constant Volume Combustion Chamber method.



Εικόνα 17. Συσκευή FIA – 100/FCA της Fueltech Solutions AS.

#### 2.4.1.4. Αρχή μέτρησης της μεθόδου

Μία σχετικά μικρή ποσότητα καυσίμου, περίπου 60 mL, εγχέεται σε έναν σταθερού όγκου θάλαμο καύσης, που είναι πληρωμένος με πεπιεσμένο αέρα. Οι αισθητήρες ανιχνεύουν την έναρξη της έγχυσης και τις μεταβολές της πίεσης κατά την καύση για κάθε κύκλο μέτρησης. Μία πλήρης δοκιμή αποτελείται από 5 αρχικούς κύκλους καύσης για να διασφαλιστεί η ισορροπία του οργάνου, από τους οποίους δεν λαμβάνονται αποτελέσματα και 25 «πραγματικούς» κύκλους, από τους οποίους λαμβάνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και προσδιορίζονται οι τιμές της καθυστέρησης ανάφλεξης. Τα χαρακτηριστικά της ανάφλεξης και της καύσης του καυσίμου υπολογίζονται από τις καμπύλες της πίεσης και της παραγώγου της, που προέκυψαν μετά το τέλος της μέτρησης [41].

#### 2.4.1.5. Αποτελέσματα και υπολογισμοί

Μόλις τελειώσει μία μέτρηση, το σύστημα συλλογής δεδομένων καταγράφει τις καμπύλες της πίεσης με τον χρόνο και της παραγώγου της πίεσης με τον χρόνο καθώς και τις απαιτούμενες παραμέτρους, όπως το τέλος της καύσης (EC) σε ms, το τέλος της κύριας καύσης (EMC) σε ms, την καθυστέρηση ανάφλεξης (ID) σε ms, την καθυστέρηση κύριας καύσης (MCD) σε ms, τον μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας (maxROHR) σε MPa/ms και τη θέση του μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας (PMR) σε ms. Στη συνέχεια, το όργανο υπολογίζει και καταγράφει τον συσσωρευμένο ρυθμό έκλυσης θερμότητας (AR) σε αδιάστατες μονάδες, την περίοδο κύριας καύσης (MCP) σε ms, την περίοδο πριν την καύση (PCP) σε ms και την περίοδο μετά την καύση (ABP) [41].

Επίσης, εκτός από τα παραπάνω, μπορεί να υπολογιστεί και η καθαρή θερμότητα καύσης (NHC). Πρώτος τρόπος υπολογισμού της είναι μέσω του υπολογισμού της πυκνότητας του καυσίμου προς μέτρηση στη θερμοκρασία της αντλίας (στους 50 °C όταν το κινηματικό ιξώδες του καυσίμου είναι μικρότερο από 25 cSt στους 50 °C, στους 125 °C όταν το κινηματικό ιξώδες

του καυσίμου είναι από 25 έως 800 cSt στους 50 °C ή στους 145 °C όταν το κινηματικό ιξώδες του καυσίμου είναι από 800 έως 2000 cSt στους 50 °C) [41].

Εκτός από αυτόν τον τρόπο υπολογισμού της καθαρής θερμότητας καύσης του καυσίμου, υπάρχει και ένας υπολογιστικός τρόπος μέσω της χρήσης της Εξίσωσης 1.10 [41]:

$$NHC = \frac{AR_{\text{sample}} * D_{\text{sample}}}{AR_{\text{cal}} * D_{\text{cal}}} * NEC_{\text{cal}} \quad (\text{Εξ. 1.10})$$

όπου: NHC είναι η καθαρή θερμότητα καύσης του δείγματος, σε MJ/kg στους 25 °C

$AR_{\text{sample}}$  είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του δείγματος, σε αδιάστατες μονάδες

$D_{\text{sample}}$  είναι η πυκνότητα του δείγματος στη θερμοκρασία της αντλίας, σε kg/L

$AR_{\text{cal}}$  είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του ρευστού βαθμονόμησης, σε αδιάστατες μονάδες

$D_{\text{cal}}$  είναι η πυκνότητα του ρευστού βαθμονόμησης στη θερμοκρασία της αντλίας, σε kg/L

$NEC_{\text{cal}}$  είναι η καθαρή θερμότητα καύσης του ρευστού βαθμονόμησης, σε MJ/kg στους 25 °C

Σημειώνεται ότι η καθαρή θερμότητα καύσης του ρευστού βαθμονόμησης, δηλαδή του μέθυλο-κυκλοεξανίου, ισούται με 43,35 MJ/kg στους 25 °C και η πυκνότητά του στους 50 °C είναι ίση με 0,7428 kg/L [41].

Τέλος, η σχέση με την οποία υπολογίζεται ο εκτιμώμενος αριθμός κετανίου (ECN) μέσω της καθυστέρησης της κύριας καύσης (MCD) δίνεται από την Εξίσωση 1.11 [41]:

$$ECN = 153,15 * e^{-0,2861 * MCD} \quad (\text{Εξ. 1.11})$$

όπου: ECN είναι ο εκτιμώμενος αριθμός κετανίου

MCD είναι η καθυστέρηση της κύριας καύσης, σε ms

#### 2.4.1.6. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Είναι απαραίτητο να παρουσιαστούν η καθυστέρηση ανάφλεξης (ID), η καθυστέρηση της κύριας καύσης (MCD), η θέση του μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας (PMR), το τέλος της κύριας καύσης (EMC), το τέλος της καύσης (EC), η περίοδος πριν την καύση (PCP) και η περίοδος μετά την καύση (ABP), σε ms. Επίσης, πρέπει να παρουσιαστεί και ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (maxROHR), σε MPa/ms. Τέλος, στις περιπτώσεις που είναι διαθέσιμη, συνιστάται να παρουσιάζεται και η καθαρή θερμότητα της καύσης σε MJ/kg στους 25 °C [41].

Όσον αφορά στην επαναληψιμότητα (r), αυτή ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ δύο αποτελεσμάτων της μέτρησης που λαμβάνονται από τον ίδιο χειριστή, με το ίδιο όργανο, με το ίδιο δείγμα, υπό τις συνθήκες που ορίζει η μέθοδος της μέτρησης [41].



Με τον όρο αναπαραγωγιμότητα (R) καλείται η διαφορά μεταξύ δύο αποτελεσμάτων της μέτρησης που λαμβάνονται από διαφορετικούς χειριστές, σε διαφορετικά εργαστήρια, με το ίδιο δείγμα υπό τις συνθήκες που ορίζει η μέθοδος της μέτρησης [41].

Η μέτρηση αρκετών δειγμάτων διεργαστηριακού ελέγχου και η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών των μετρήσεων, οδήγησε στην κατασκευή του Πίνακα 4, στον οποίο φαίνονται το αποδεκτό εύρος καθώς επίσης οι τιμές επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας για κάθε παράμετρο. Το κινηματικό ιξώδες των δειγμάτων αυτών κυμαινόταν από 25 cSt έως 800 cSt [41].

Πίνακας 4. Εύρος των παραμέτρων των μετρήσεων και τιμές επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας.

Παράμετρος (μονάδες)	Αποδεκτό εύρος	Επαναληψιμότητα, r	Αναπαραγωγιμότητα, R
ID (ms)	2,7 – 7,6	0,01979 * ID	0,0632 * ID
MCD (ms)	3,1 – 9,7	0,02292 * MCD	0,08315 * MCD
PMR (ms)	3,1 – 11,8	0,0004406 * (PMR) <sup>3</sup>	0,0095 * (PMR) <sup>2</sup>
EMC (ms)	9,6 – 18,9	0,03228 * EMC	0,09803 * EMC
EC (ms)	15,3 – 28,6	1,1648	3,5346
PCP (ms)	0,28 – 2,06	0,07373 * PCP	0,2491 * PCP
MCP (ms)	3,6 – 9,3	0,06226 * MCP	0,1815 * MCP
ABP (ms)	5,3 – 9,7	0,9531	2,6765
maxROHR (MPa/ms)	0,11 – 0,48	0,08502 * maxROHR	0,2558 * maxROHR
AR (-)	7,2 – 8,3	0,09228	0,7299 * (8,6 – AR)
NHC (kJ/kg, 25 °C)	47,0 – 56,5	0,8374	-

Πηγή: IP 541/06, Constant Volume Combustion Chamber method.

#### 2.4.1.7. Χαρακτηριστικά ανάφλεξης και καύσης

**Καθυστέρηση Ανάφλεξης (ID):** Η καθυστέρηση ανάφλεξης συνδέεται άμεσα με την απόδοση του κινητήρα καθώς και τα επίπεδα εκπομπών των καυσαερίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση ανάφλεξης ενός καυσίμου, τόσο μεγαλύτερες είναι οι πιθανότητες να εμφανιστούν βλάβες στη λειτουργία ενός κινητήρα. Επίσης, η καθυστέρηση ανάφλεξης αυξάνεται, καθώς μειώνεται η θερμοκρασία του αέρα της καύσης, ενώ μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του αέρα της καύσης (Η θέρμανση του αέρα της συσκευής επιτυγχάνεται με θέρμανση του τοιχώματος του θαλάμου, που σημαίνει ότι η πραγματική θερμοκρασία του αέρα είναι λίγο χαμηλότερη από τη ρυθμιζόμενη θερμοκρασία) [41].



**Καθυστέρηση κύριας καύσης (MCD):** Η καθυστέρηση κύριας καύσης (MCD) διαφέρει από την καθυστέρηση ανάφλεξης (ID) στο γεγονός ότι η πρώτη ορίζεται σε ένα σημείο όπου η καύση βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη [41].

**Περίοδος πριν την καύση (PCP):** Η περίοδος πριν την καύση αποτελεί μία ένδειξη για το αν η καύση είναι σταδιακή. Τέτοια καύση εμφανίζεται συνήθως σε καύσιμα που περιέχουν ελαφρείς υδρογονάνθρακες. Πιο συγκεκριμένα, κατά το φαινόμενο αυτό, η ενέργεια που παράγεται στην αρχική περίοδο της καύσης δεν είναι επαρκής για να επιταχύνει την εξάτμιση των κύριων-βαρύτερων συστατικών του καυσίμου. Το γεγονός αυτό μπορεί να παρατηρηθεί από το διάγραμμα της πίεσης με τον χρόνο καθώς και από τον μειωμένο ρυθμό έκλυσης θερμότητας πριν από τη χρονική στιγμή που η ενέργεια που εκλύεται φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο για την ανάφλεξη των κύριων συστατικών του καυσίμου (γνωστή ως MCD). Ωστόσο, ύστερα από αυτή την περίοδο που η έκλυση θερμότητας γίνεται με αργό ρυθμό, η καύση των κύριων συστατικών του καυσίμου πραγματοποιείται με κανονικούς ρυθμούς. Επομένως, τα καύσιμα που εμφανίζουν σταδιακή καύση, μπορεί να θεωρηθούν ως καύσιμα χαμηλότερης ποιότητας, διότι η ακανόνιστη έκλυση θερμότητας μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη θερμική φόρτιση του εξοπλισμού του κυλίνδρου, σε μειωμένη απόδοση του κινητήρα, σε αυξημένο θόρυβο αυτού και μετέπειτα σε βλάβη του [41].

**Μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (maxROHR):** Ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας, δηλαδή ο μέγιστος ρυθμός αύξησης της πίεσης κατά τη διάρκεια της καύσης (σε bar/ms), είναι ένας δείκτης της συνολικής ποιότητας του καυσίμου. Η υψηλή τιμή maxROHR υποδεικνύει ότι το υπολειμματικό καύσιμο αυταναφλέγεται κατάλληλα (good combustibility), ενώ χαμηλή τιμή maxROHR υποδεικνύει ότι το καύσιμο καίγεται ανομοιόμορφα με αποτέλεσμα να δημιουργείται τοπική θερμική φόρτιση στο εσωτερικό του κινητήρα και βλάβες σε αυτόν [41].

**Περίοδος κύριας καύσης (MCP):** Όπως και ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας, η περίοδος κύριας καύσης αποτελεί έναν δείκτη της ποιότητας ενός υπολειμματικού καυσίμου. Υψηλές τιμές MCP είναι χαρακτηριστικό ατελούς καύσης, που οδηγεί σε σχηματισμό καταλοίπων, αυξημένα επίπεδα εκπομπών καυσαερίων και σχηματισμό αιθάλης [41].

**Τέλος της κύριας καύσης (EMC) και τέλος της καύσης (EC):** Ο λόγος EC/EMC εμφανίζει την πιθανότητα ατελούς καύσης και σχηματισμού αιθάλης και αποθέσεων. Επίσης, ο λόγος EC/EMC θεωρείται ότι αποδίδει παρόμοιες πληροφορίες με τον προσδιορισμό του εξανθρακώματος του καυσίμου, που αποτελεί μέτρο της τάσης του καυσίμου για τον σχηματισμό καταλοίπων (κοκ) [41].

#### 2.4.2. Μέθοδος EN ISO 3104 (ή ASTM D7042) για τον προσδιορισμό του κινηματικού και δυναμικού ιξώδους αλλά και της πυκνότητας των καυσίμων

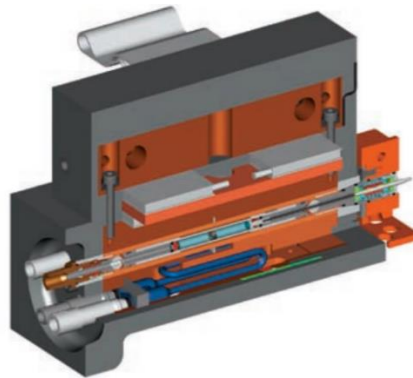
Η μέθοδος EN ISO 3104 (ή ASTM D7042) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του δυναμικού ιξώδους και της πυκνότητας των υγρών πετρελαϊκών προϊόντων και των αργών πετρελαίων (διαφανών ή αδιάφανων). Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων που προαναφέρθηκαν και φαίνεται στην Εικόνα 18, είναι η Stabinger

Viscometer 3000 της εταιρείας Anton Paar (SVM 3000), η οποία έχει τη δυνατότητα να μετράει το δυναμικό ιξώδες ( $\eta$ ) σε  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  και την πυκνότητα ( $\rho$ ) σε  $\text{g}/\text{cm}^3$  του δείγματος σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία και να υπολογίζει αυτόματα το κινηματικό ιξώδες ( $\nu$ ) του δείγματος στην ίδια θερμοκρασία, σε  $\text{mm}^2/\text{s}$  (ή  $\text{cSt}$ ), μέσω του πηλίκου του δυναμικού ιξώδους με την πυκνότητα [42], [43].



Εικόνα 18. Συσκευή Stabinger Viscometer 3000 της Anton Paar.

Το εσωτερικό της συσκευής αποτελείται από τρία κελιά, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 19, όπου στο πρώτο γίνεται ο έλεγχος της θερμοκρασίας, στο δεύτερο πραγματοποιείται η μέτρηση του δυναμικού ιξώδους και στο τρίτο η μέτρηση της πυκνότητας του δείγματος.



Εικόνα 19. Το εσωτερικό της συσκευής SVM 3000 της Anton Paar.

Πηγή: Anto Paar, SVM (Stabinger Viscometer) 3000.

Όσον αφορά στη μέτρηση του δυναμικού ιξώδους, το ιξωδόμετρο Stabinger 3000, αποτελείται από ένα σύστημα μέτρησης περιστροφικών ομοαξονικών κυλίνδρων. Ο εξωτερικός κύλινδρος, που περιέχει και την απαιτούμενη ποσότητα του δείγματος προς ανάλυση, περιστρέφεται, με τη βοήθεια ενός κινητήρα, με σταθερή και γνωστή ταχύτητα, ενώ ο εσωτερικός κύλινδρος, που είναι ένας ρότορας χαμηλής πυκνότητας, δεν περιστρέφεται, αλλά παραμένει σταθερός στον άξονα περιστροφής, λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων που δημιουργούνται και της χαμηλής τιμής της πυκνότητάς του, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει τριβή. Επίσης, ο ρότορας παραμένει σταθερός και στον οριζόντιο άξονα, μέσω της χρήσης ενός μαλακού σιδερένιου δακτυλίου και ενός μαγνήτη. Με την έναρξη της μέτρησης, ο

ρότορας (ο εσωτερικός κύλινδρος) αρχίζει να περιστρέφεται και η ταχύτητα, στην οποία αυτός θα φτάσει καθορίζεται από την ισορροπία των διατμητικών δυνάμεων που εμφανίζονται στο δείγμα και την επιβραδυντική ροπή των δινορευμάτων, τα οποία προκαλούνται από τον μαγνήτη. Έτσι, μέσω της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα, που μετράται με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού συστήματος, γνωστό ως Hall effect sensor, το οποίο μετρά τη συχνότητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, προκύπτει η τιμή του δυναμικού ιξώδους του δείγματος [42], [43].

Σχετικά με τη μέτρηση της πυκνότητας, αυτή γίνεται μέσω της ταλάντωσης ενός δειγματοληπτικού σωλήνα σχήματος U. Η ταλάντωση του σωλήνα σχήματος U ξεκινάει με τη βοήθεια ενός συστήματος ηλεκτρονικής διέγερσης, ενώ μέσω ενός καταγραφικού συχνοτήτων, καταγράφεται η συχνότητα της ταλάντωσης και προκύπτει έτσι η τιμή της πυκνότητας του δείγματος [42].

Το εύρος της συσκευής αυτής για το δυναμικό ιξώδες κυμαίνεται από την περιοχή των 0,2 mPa·s έως αυτή των 20000 mPa·s και για την πυκνότητα από 0,65 g/cm<sup>3</sup> έως 3 g/cm<sup>3</sup>, ενώ το εύρος της θερμοκρασίας, η οποία ελέγχεται μέσω ενός χάλκινου περιβλήματος που περιβάλλει τα κελιά μέτρησης του ιξώδους και της πυκνότητας, κυμαίνεται από την περιοχή των 15 °C (ή και πιο χαμηλά) έως τους 105 °C. Επισημαίνεται επίσης ότι, η ποσότητα του δείγματος που απαιτείται για να αναλυθεί είναι μόλις 2,5 mL, γεγονός που εξασφαλίζει τις γρήγορες θερμοκρασιακές αλλαγές και τους μικρούς χρόνους ισορροπίας [43].

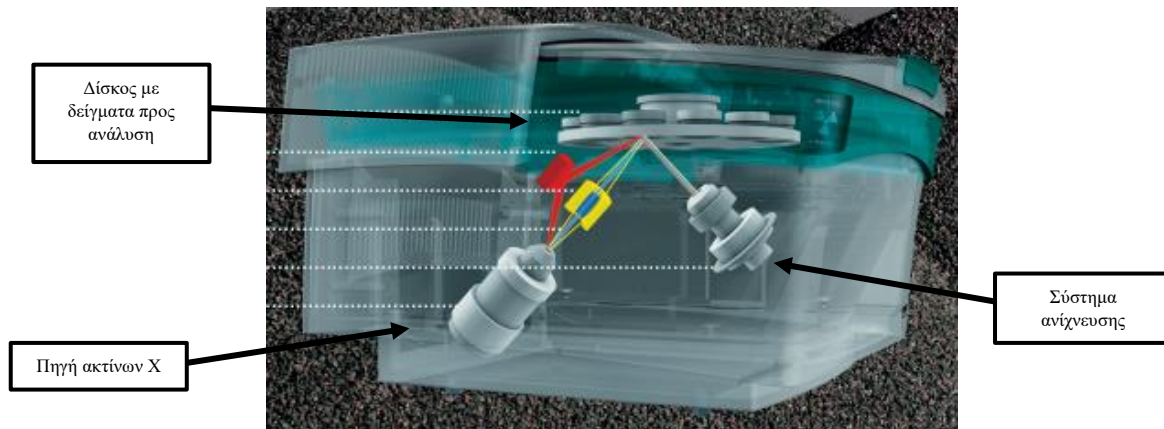
#### 2.4.3. Μέθοδος EN ISO 8754 (ή ASTM D4294) για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο

Η μέθοδος EN ISO 8754 (ή ASTM D4294) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των δειγμάτων σε θείο, μέσω της φασματομετρίας φθορισμού ακτίνων X. Τα δείγματα που μπορούν να αναλυθούν με αυτήν τη μέθοδο είναι diesel (κίνησης, θέρμανσης και ναυτιλιακό), νάφθα, κηροζίνη, βενζίνη και άλλα αποστάγματα, υπολειμματικά καύσιμα, λιπαντικά, βιοντήζελ και αργά πετρέλαια. Επίσης, το εύρος που καλύπτει η μέθοδος αυτή είναι για συγκεντρώσεις θείου από 0 έως 50000 ppm (ή 5,0% m/m). Ωστόσο, αυτή η μέθοδος παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια στο εύρος από 17 ppm (mg/kg) έως 4,6% m/m. Τα καύσιμα που έχουν περιεκτικότητα σε θείο μεγαλύτερη του 5,0% m/m μπορούν να αραιωθούν, ώστε η συγκέντρωση του θείου του αραιωμένου δείγματος να βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων της μεθόδου. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο, σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D4294, αναπαρίσταται στην Εικόνα 20 και είναι η Spectro Xepos της εταιρείας Ametek [17].



Εικόνα 20. Συσκευή Spectro Xepos της Ametek για τον προσδιορισμό θείου σε πετρελαιϊκά προϊόντα.

Σύμφωνα με τη μέθοδο που προαναφέρθηκε, το δείγμα καυσίμου τοποθετείται στον υποδοχέα και αυτός με τη σειρά του στην κατάλληλη θέση της συσκευής, ώστε να δεχτεί μία δέσμη ακτίνων X, από μία πηγή χαμηλής ενέργειας. Η ακτινοβολία αυτή απορροφάται από τα άτομα του θείου, με αποτέλεσμα αυτά να διεγείρονται και μεταπίπτοντας στην αρχική τους κατάσταση να εκπέμπουν ακτινοβολία. Μετράται η ένταση της ακτινοβολίας αυτής από το σύστημα ανίχνευσης και καταγράφεται, αφού πρώτα έχει γίνει η κατάλληλη βαθμονόμηση της συσκευής, με τα απαραίτητα πρότυπα βαθμονόμησης που έχουν γνωστή περιεκτικότητα θείου. Το αποτέλεσμα της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο δίνεται ή σε ppm (mg/kg) ή σε % m/m. Επισημαίνεται ότι, ο δίσκος της συσκευής πάνω στον οποίο τοποθετούνται τα δείγματα καυσίμου προς ανάλυση, το σύστημα ανίχνευσης της ακτινοβολίας που εκπέμπεται καθώς επίσης η πηγή ακτίνων X, παριστάνονται στην Εικόνα 21 [17].



Εικόνα 21. Εσωτερικό μέρος της συσκευής Spectro Xepos της Ametek.

Πηγή: Spectro Ametek, Spectro Xepos: ED-XRF Spectrometers.

## 2.5. Πειραματική διαδικασία

### 2.5.1. Σχετικά με τη συσκευή FIA – 100/FCA

1. Ενεργοποιείται η συσκευή FIA – 100/FCA της Fueltech Solutions AS
2. Ενεργοποιείται το σύστημα ψύξης της συσκευής

3. Ανοίγεται η φιάλη του πεπιεσμένου αέρα
4. Γίνεται εισαγωγή του Η/Υ στο λογισμικό της συσκευής και τίθεται σε κατάσταση προθέρμανσης που διαρκεί μία ώρα και δέκα λεπτά περίπου
5. Τα δείγματα μαζούτ προθερμαίνονται για περίπου 30 λεπτά, στους 60 °C, ώστε να έχουν την κατάλληλη ρευστότητα (για να μπορούν να αναδευτούν και να ανακινηθούν)
6. Αφού προθερμαθούν, στη συνέχεια ανακινούνται ώστε να ομογενοποιηθούν όσο το δυνατόν καλύτερα και να μην υπάρχουν διακριτές φάσεις σε όλο τον όγκο τους
7. Η απαιτούμενη ποσότητα των δειγμάτων μαζούτ για τη μέτρηση, που είναι περίπου 60 mL φιλτράρεται μέσω του συστήματος φίλτρου 75 micron που παρέχεται από την κατασκευάστρια εταιρεία
8. Στη συνέχεια, πληρώνεται η δεξαμενή καυσίμου με την απαιτούμενη ποσότητα δείγματος (είτε τα φιλτραρισμένα μαζούτ ή τα πιο ελαφριά υπολειμματικά καύσιμα) και σφραγίζεται
9. Επιλέγεται στο λογισμικό της συσκευής στον Η/Υ, ο τύπος της μέτρησης (αν είναι κανονική μέτρηση ή μέτρηση για έλεγχο ποιότητας της συσκευής ή για βαθμονόμηση ή για επαλήθευση), το εύρος του κινηματικού ιξώδους μέσα στο οποίο ανήκει το κινηματικό ιξώδες του δείγματος που μετράται και επιλέγεται το όνομα του δείγματος που θα μετρηθεί
10. Αρχίζει η μέτρηση και μετά από περίπου 45 λεπτά ολοκληρώνεται και λαμβάνονται τα αποτελέσματα σχετικά με τις παραμέτρους του οργάνου (όπως η θερμοκρασία των τοιχωμάτων και οι πιέσεις σε αρκετά μέρη του εξοπλισμού του οργάνου) και με τα αποτελέσματα της μέτρησης του δείγματος καυσίμου. Επίσης, λαμβάνονται και δύο διαγράμματα: ένα της πίεσης του θαλάμου καύσης σε συνάρτηση με τον χρόνο και ένα του ρυθμού έκλυσης της θερμότητας που απελευθερώνεται με τον χρόνο
11. Αφού ολοκληρωθεί η μέτρηση, είναι απαραίτητο να γίνει έκπλυση της δεξαμενής, στην οποία εισάγεται η απαιτούμενη ποσότητα του δείγματος, δύο φορές με διαλύτη ξυλόλιο
12. Για την απενεργοποίηση της συσκευής, επιλέγεται η κατάλληλη εντολή από το λογισμικό στον Η/Υ, πληρώνεται η δεξαμενή με ένα εύφλεκτο απόσταγμα, συνήθως diesel και η συσκευή αφού κάνει πέντε εγχύσεις με το καύσιμο αυτό, τίθεται αυτόματα σε κατάσταση τερματισμού λειτουργίας
13. Η συσκευή ψύχεται για παραπάνω από μία ώρα και είναι απαραίτητο στο διάστημα αυτό να μην απενεργοποιηθεί το σύστημα ψύξης ούτε να κλείσει η φιάλη του πεπιεσμένου αέρα
14. Μόλις ψυχθεί η συσκευή, απενεργοποιείται το σύστημα ψύξης, κλείνει το λογισμικό της συσκευής στον Η/Υ, απενεργοποιείται το όργανο και κλείνει και η φιάλη του πεπιεσμένου αέρα

#### 2.5.2. Σχετικά με τη συσκευή Stabinger Viscometer 3000

1. Τα δείγματα μαζούτ αρχικά προθερμαίνονται για περίπου 30 λεπτά, στους 60 °C
2. Αφού προθερμαθούν, στη συνέχεια ανακινούνται ώστε να ομογενοποιηθούν όσο το δυνατόν καλύτερα και να μην υπάρχουν διακριτές φάσεις σε όλο τον όγκο τους



3. Ενεργοποιείται η συσκευή SVM 3000 της Anton Paar και ρυθμίζεται η θερμοκρασία στους 50 °C
4. Με τη βοήθεια μιας σύριγγας των 5 ή 10 mL πληρώνεται η συσκευή με τον απαιτούμενο όγκο του δείγματος προς ανάλυση
5. Πραγματοποιούνται δύο μετρήσεις του εκάστοτε δείγματος στις θερμοκρασίες των 50, 60, 70 και 80 °C
6. Καταγράφονται οι μετρήσεις του δυναμικού και του κινηματικού ιξώδους, αλλά και της πυκνότητας του δείγματος σε κάθε θερμοκρασία
7. Αφού ολοκληρωθεί ο κύκλος των μετρήσεων, απομακρύνεται το δείγμα από το σύστημα εισαγωγής της συσκευής και εκπλένεται με τη βοήθεια διαλύτη, που συνήθως είναι τολουόλιο
8. Για την απενεργοποίηση της συσκευής ρυθμίζεται η θερμοκρασία του οργάνου στους 15 °C και μόλις αυτή επιτευχθεί, απενεργοποιείται και η συσκευή

### 2.5.3. Σχετικά με τη συσκευή Spectro Xepos της Ametek

1. Ενεργοποιείται η συσκευή Spectro Xepos της Ametek και τίθεται σε κατάσταση προθέρμανσης που διαρκεί περίπου 45 λεπτά
2. Τα δείγματα μαζούτ προθερμαίνονται για περίπου 30 λεπτά, στους 60 °C
3. Αφού προθερμαθούν, στη συνέχεια ανακινούνται ώστε να ομογενοποιηθούν μέχρι να μην υπάρχουν διακριτές φάσεις σε όλο τον όγκο τους
4. Το δείγμα καυσίμου προς ανάλυση τοποθετείται στον ειδικό υποδοχέα, αφού πρώτα έχει τοποθετηθεί η κατάλληλη μεμβράνη που απαιτείται
5. Ανοίγεται το προστατευτικό κάλυμμα (θάλαμος) της συσκευής
6. Στη συνέχεια, ο υποδοχέας, με τη μεμβράνη και το δείγμα προς ανάλυση, τοποθετείται στην κατάλληλη θέση του δίσκου της συσκευής
7. Κλείνεται ο θάλαμος της συσκευής και πληρώνεται με αδρανές αέριο που είναι Ήλιο ελάχιστης καθαρότητας 99,999% v/v
8. Επιλέγεται η κλίμακα που θα χρησιμοποιήσει η συσκευή προκειμένου το αποτέλεσμα της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο να είναι εντός της κλίμακας την οποία χρησιμοποιεί (σε δείγματα που η περιεκτικότητά τους σε θείο είναι εντελώς άγνωστη, επιλέγεται μία κλίμακα με συνήθως υψηλό όριο για τη συγκέντρωση του θείου στο δείγμα) και στη συνέχεια αν το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο από το ανώτατο όριο της κλίμακας, επιλέγεται η μεγαλύτερη κλίμακα που έχει ανώτατο όριο τα 5,0% m/m
9. Πραγματοποιούνται δύο μετρήσεις για κάθε δείγμα καυσίμου και λαμβάνεται ο μέσος όρος τους ως περιεκτικότητα του δείγματος καυσίμου σε θείο
10. Απομακρύνεται ο υποδοχέας με το δείγμα που μετρήθηκε, από τη συσκευή και στη συνέχεια απενεργοποιείται το λογισμικό της συσκευής από τον Η/Υ, απενεργοποιείται η συσκευή και τέλος κλείνεται η φιάλη του αέρα

### 3. Αποτελέσματα

#### 3.1. Σχετικά με τη συσκευή FIA – 100/FCA

Αφού ολοκληρώνεται η μέτρηση του κάθε δείγματος στη συσκευή FIA – 100/FCA της Fueltech Solutions AS, τα πιο σημαντικά αποτελέσματα που κρίνεται σημαντικό να αναφερθούν βάσει της μεθόδου IP 541/06 και παρουσιάζονται παρακάτω είναι αρχικά, η καθυστέρηση ανάφλεξης (ID), η καθυστέρηση της κύριας καύσης (MCD), ο χρόνος της κύριας καύσης (EMC), ο χρόνος της καύσης (EC), η περίοδος πριν την καύση (PCP), η περίοδος της κύριας καύσης (MCP), η περίοδος μετά την καύση (ABP), ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (maxROHR), η θέση του μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας (PMR), ο συσσωρευμένος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (AR) και ο εκτιμώμενος αριθμός κετανίου (Estimated Cetane Number - ECN) [41].

Στον Πίνακα 5, παρουσιάζονται κατά αύξοντα αριθμό τα δείγματα και τα μείγματα, με την κωδικοποίησή τους, όπως παρασκευάστηκαν και αναλύθηκαν καθώς και πρόσθετα στοιχεία αυτών (προέλευση, χαρακτηρισμός ως προς το θείο, σύσταση μειγμάτων).



Πίνακας 5. Κατάταξη δειγμάτων και μειγμάτων καυσίμων που μετρήθηκαν με τη συσκευή FIA – 100/FCA.

A/A	Κωδικοποίηση	Δείγμα	Περιγραφή καυσίμου
1	Δ-MCH	Δείγμα MCH	Πρότυπο δείγμα βαθμονόμησης της συσκευής
2	Δ-HMN	Δείγμα επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN)	Καύσιμο αναφοράς της πρότυπης μεθόδου του Α.Κ.
3	Δ-A	Μείγμα 30% v/v n-C <sub>16</sub> και 70% v/v AMN	Μείγμα καυσίμων αναφοράς, με θεωρητικό Α.Κ ίσο με 30
4	Δ-B	Μείγμα 17,65% v/v n-C <sub>16</sub> και 82,35% v/v HMN	Μείγμα καυσίμων αναφοράς, με θεωρητικό Α.Κ ίσο με 30
5	Δ-Γ	Μείγμα 25% v/v n-C <sub>16</sub> και 75% v/v AMN	Μείγμα καυσίμων αναφοράς, με θεωρητικό Α.Κ ίσο με 25
6	Δ-Δ	Μείγμα 11,76% v/v n-C <sub>16</sub> και 88,24% v/v HMN	Μείγμα καυσίμων αναφοράς, με θεωρητικό Α.Κ ίσο με 25
7	Δ-E	Μείγμα 20% v/v n-C <sub>16</sub> και 80% v/v AMN	Μείγμα καυσίμων αναφοράς, με θεωρητικό Α.Κ ίσο με 20
8	Δ-ΣΤ	Μείγμα 5,88% v/v n-C <sub>16</sub> και 94,12% v/v HMN	Μείγμα καυσίμων αναφοράς, με θεωρητικό Α.Κ ίσο με 20
9	Δ1	Δείγμα 1	Μαζούτ χαμηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
10	Δ2	Δείγμα 2	Μαζούτ υψηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
11	Δ3	Δείγμα 3	Μαζούτ υψηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
12	Δ4	Δείγμα 4	Μαζούτ υψηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
13	Δ5	Δείγμα 5	Μαζούτ υψηλού θείου από διεργαστηριακό έλεγχο
14	Δ6	Δείγμα 6	Μαζούτ υψηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
15	Δ7	Δείγμα 7	Μαζούτ υψηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
16	Δ8	Δείγμα 8	Μαζούτ υψηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
17	Δ9	Δείγμα 9	Μαζούτ υψηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
18	Δ10	Δείγμα 10	Μαζούτ υψηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
19	Δ11	Δείγμα 11	Μαζούτ υψηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
20	Δ12	Δείγμα 12	Μαζούτ υψηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
21	Δ13	Δείγμα 13	Μαζούτ χαμηλού θείου από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
22	Δ14	Δείγμα 14 (LCO)	Κλάσμα Light Cycle Oil (LCO) από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου
23	M1	Μείγμα 1	Μείγμα 95% m/m δείγμα 1 και 5% m/m δείγμα 14 (LCO)
24	M2	Μείγμα 2	Μείγμα 90% m/m δείγμα 1 και 10% m/m δείγμα Slurry FCC
25	M3	Μείγμα 3	Μείγμα 85% m/m δείγμα 4 και 15% m/m δείγμα 14 (LCO)
26	M4	Μείγμα 4	Μείγμα 80% m/m δείγμα 2 και 20% m/m δείγμα 14 (LCO)
27	M5	Μείγμα 5	Μείγμα 90% m/m δείγμα 6 και 10% m/m δείγμα Slurry FCC
28	M6	Μείγμα 6	Μείγμα 95% m/m δείγμα 12 και 5% m/m δείγμα 14 (LCO)
29	M7	Μείγμα 7	Μείγμα 95% m/m δείγμα 12 και 5% m/m δείγμα diesel
30	M8	Μείγμα 8	Μείγμα 80% m/m δείγμα 10 και 20% m/m δείγμα Slurry FCC
31	M9	Μείγμα 9	Μείγμα 80% m/m δείγμα 7 και 20% m/m δείγμα 3

Τα δείγματα με A/A 1 έως 8 του Πίνακα 5 (Δ-MCH έως Δ-ΣΤ), συμπεριλήφθηκαν στον πειραματικό προγραμματισμό για τον έλεγχο της συμπεριφοράς της συσκευής. Χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή, ως μέτρο σύγκρισης του γνωστού θεωρητικού αριθμού κετανίου τους με τα πειραματικά αποτελέσματα, χρησιμοποιώντας τη συσκευή FIA – 100/FCA.

Τα δείγματα με A/A 9 έως 22 του Πίνακα 5 (Δ1 έως Δ14) που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις, αποτελούσαν διαθέσιμα προϊόντα των ελληνικών διυλιστηρίων τη χρονική περίοδο εκπόνησης της παρούσας εργασίας και εντάσσονται στον πειραματικό προγραμματισμό της, λόγω των ιδιοτήτων τους ως υπολειμματικά καύσιμα.

Πραγματοποιήθηκε μία μέτρηση ενός δείγματος Light Cycle Oil – LCO (Δ14, A/A 22 στον Πίνακα 5), που αποτελεί απόσταγμα της διεργασίας της καταλυτικής πυρόλυσης FCC ενός διυλιστηρίου και χρησιμοποιήθηκε ως συστατικό ανάμειξης στα μείγματα που παρασκευάστηκαν.

Τα μείγματα με A/A 23 έως 31 του Πίνακα 5 (M1 έως M9) παρασκευάστηκαν και αναλύθηκαν με σκοπό την κάλυψη μεγαλύτερου εύρους τιμών του δείκτη CCAI, δείκτης μέσω του οποίου αξιολογείται η ποιότητα ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων.

Συστατικά ανάμειξης για την παρασκευή των μειγμάτων αποτέλεσαν καύσιμο diesel και Slurry FCC, που αποτελεί το υπόλειμμα της διεργασίας της καταλυτικής πυρόλυσης FCC ενός διυλιστηρίου. Δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για να προσδιοριστεί η ποιότητα αυτών, διότι το diesel έχει πολύ καλή ποιότητα καύσης και σίγουρα ανώτερης των υπολειμματικών καυσίμων που μετρήθηκαν, ενώ το δείγμα Slurry FCC έχει πολύ κακή ποιότητα καύσης και η πιθανότητα πρόκλησης βλάβης στη συσκευή υπήρξε αυξημένη.

#### Επαναληψιμότητα

Ο έλεγχος της επαναληψιμότητας μεταξύ των μετρήσεων του εκάστοτε δείγματος θεωρείται επιβεβλημένος. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα της μεθόδου IP 541/06. Προέκυψαν μέσω μετρήσεων δειγμάτων διεργαστηριακού ελέγχου και τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν υπολειμματικά καύσιμα με κινηματικό ιξώδες στους 50 °C να βρίσκεται μεταξύ του εύρους 25 με 800 cSt.

Γίνεται φανερό πως ο έλεγχος της επαναληψιμότητας των μετρήσεων των καυσίμων, μπορεί να πραγματοποιηθεί στα δείγματα 1 μέχρι και 14 και στα μείγματα 1 έως και 9, ενώ είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί στα δείγματα μέθυλο-κυκλοεξανίου (MCH), επτά-μέθυλο-εννεανίου (HMN) και στα μείγματα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), αφού είναι εκτός του πεδίου εφαρμογής της συσκευής (το κινηματικό τους ιξώδες είναι εκτός του εύρους 25 με 800 cSt στους 50 °C· είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με το κατώτατο όριο των 25 cSt) και δεν υπάρχουν δεδομένα στην πρότυπη μέθοδο σχετικά με την επαναληψιμότητα. Οπότε, για κάθε δείγμα και μείγμα που το κινηματικό του ιξώδες βρίσκεται εντός του επιθυμητού εύρους και έχουν πραγματοποιηθεί δύο μετρήσεις, δημιουργείται πίνακας με το εύρος των τιμών της κάθε παραμέτρου (με – συμβολίζεται η κατώτατη τιμή, ενώ με + η ανώτατη τιμή της κάθε παραμέτρου). Για να είναι επαναλήψιμες λοιπόν, οι δύο μετρήσεις πρέπει το εύρος της κάθε

παραμέτρου της πρώτης μέτρησης να συμπίπτει με αυτό της ίδιας παραμέτρου της δεύτερης. Σχετικά με τον έλεγχο και της αναπαραγωγιμότητας των μετρήσεων, αυτός δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί, διότι όλες οι μετρήσεις έγιναν από τον ίδιο χειριστή και στο ίδιο εργαστήριο.

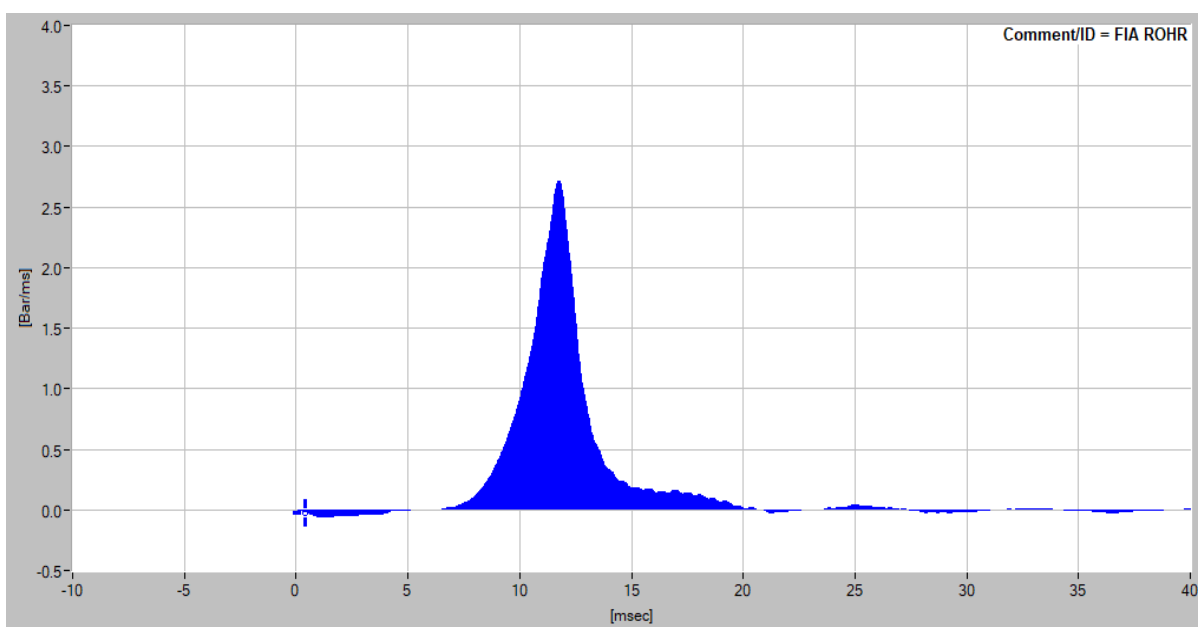
Τέλος, παρουσιάζεται και το διάγραμμα του ρυθμού έκλυσης θερμότητας σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time) της κάθε μέτρησης του εκάστοτε δείγματος. Η παρουσίαση του διαγράμματος ROHR – Time είναι σημαντική, διότι λαμβάνονται στοιχεία για το αν το υπολειμματικό καύσιμο αναφλέγεται κατάλληλα, αν η καύση του ακολουθεί κανονική πορεία και δεν εμφανίζονται ανωμαλίες στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης.

Επομένως, όλα τα παραπάνω παρατίθενται στους Πίνακες 6 έως και 56 και στα Διαγράμματα 5 έως και 63.

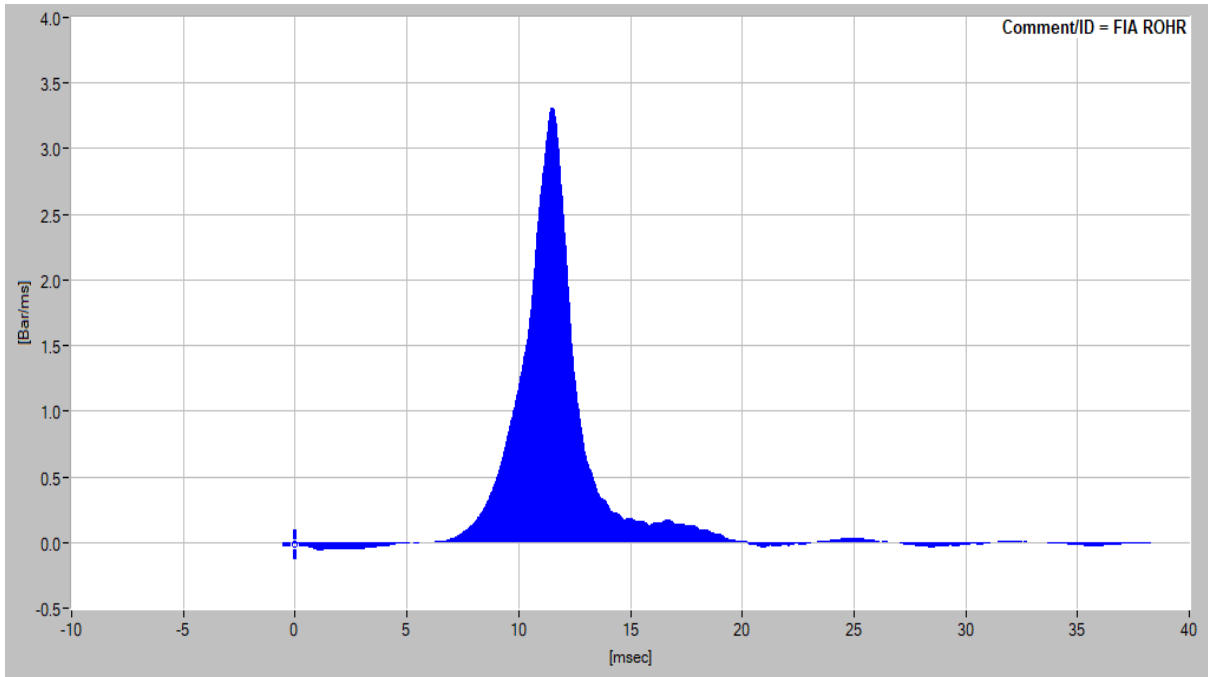
### 3.1.1. Μέτρηση δείγματος μέθυλο-κυκλοεξανίου (MCH)

Πίνακας 6. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος MCH.

Δείγμα MCH	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	9,06	10,11	14,55	19,69	1,06	4,43	5,14	2,71	11,81	7,21	8,5
2 <sup>η</sup> μέτρηση	8,97	9,99	13,84	18,44	1,02	3,85	4,60	3,32	11,58	8,04	8,8



Διάγραμμα 5. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος MCH σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.

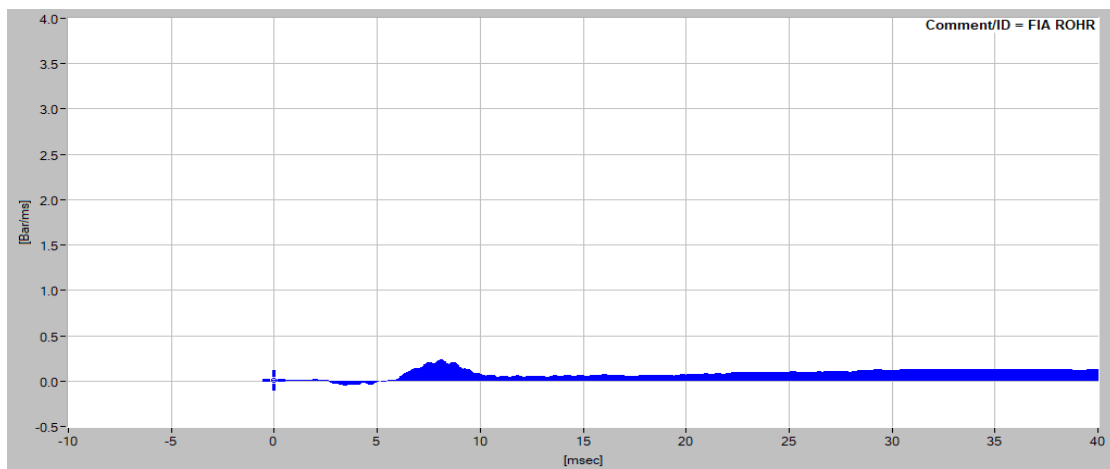


Διάγραμμα 6. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος MCH σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

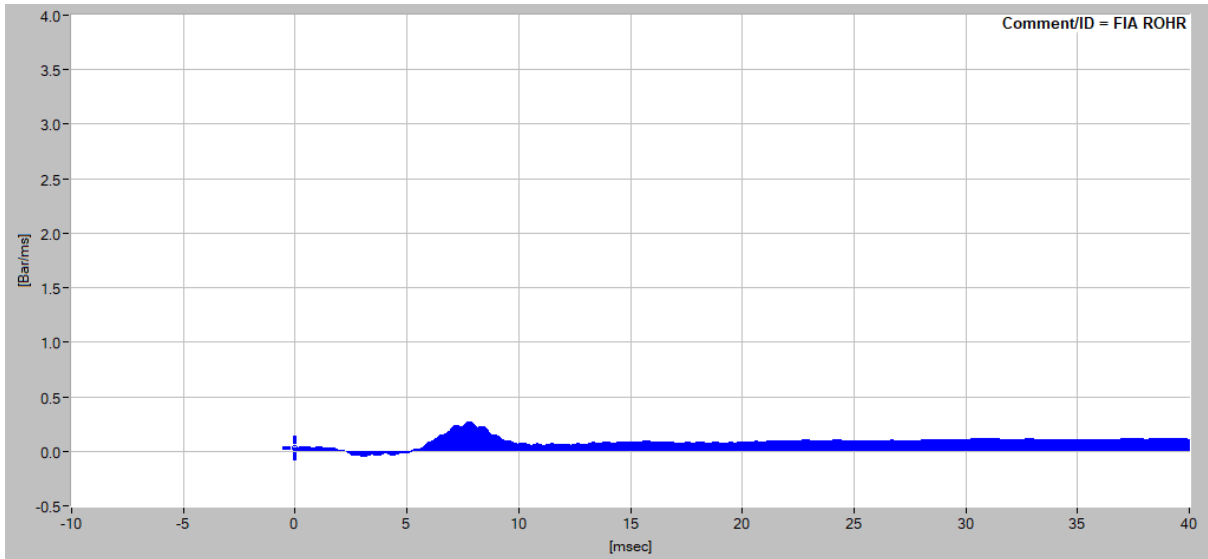
### 3.1.2. Μέτρηση δείγματος επτά-μέθυλο-εννεανίου (HMN)

Πίνακας 7. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος HMN.

Δείγμα HMN	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,72	9,41	39,92	42,81	3,69	30,51	2,89	0,23	8,15	3,58	10,4
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,92	9,43	39,63	42,81	3,51	30,20	3,18	0,27	7,86	3,73	10,3



Διάγραμμα 7. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.

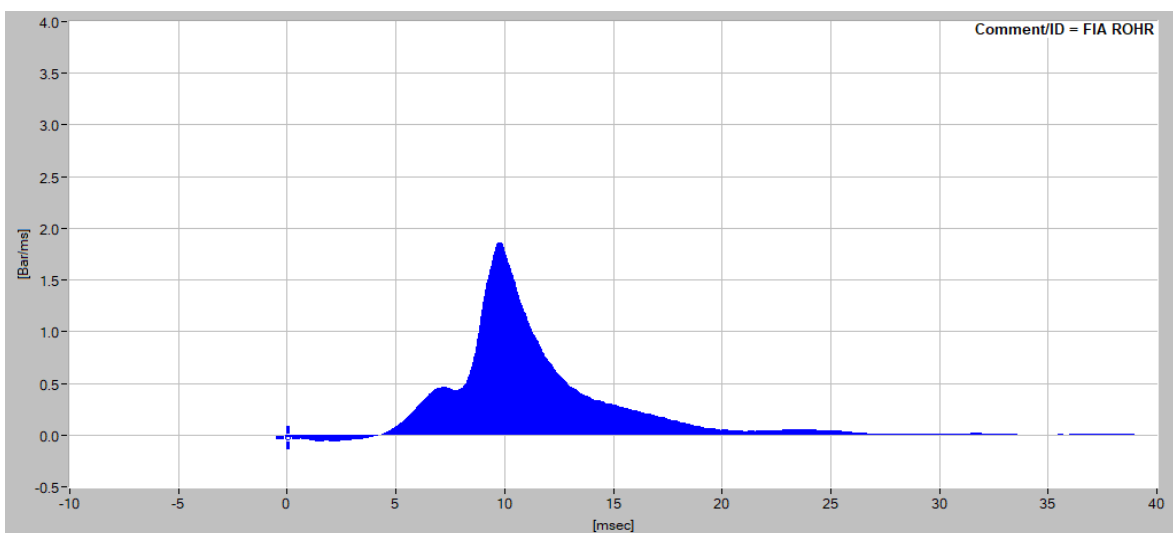


Διάγραμμα 8. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

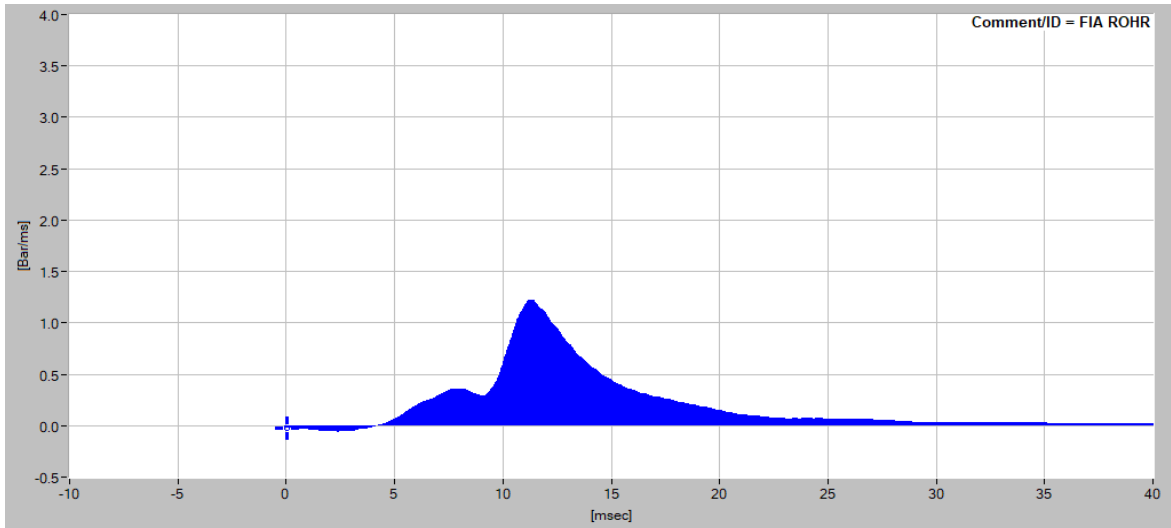
### 3.1.3. Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) (30% v/v n-C<sub>16</sub> και 70% v/v AMN)

Πίνακας 8. Αποτελέσματα πρώτης μέτρησης του μείγματος 30% v/v n-C<sub>16</sub> με 70% v/v AMN.

Μείγμα n-C <sub>16</sub> με AMN	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	6,47	8,02	16,57	28,04	1,55	8,55	11,47	1,86	9,80	7,75	15,4
2 <sup>η</sup> μέτρηση	6,85	8,65	21,66	37,12	1,79	13,02	15,46	1,23	11,35	7,54	12,9



Διάγραμμα 9. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 30% v/v n-C<sub>16</sub> με 70% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.

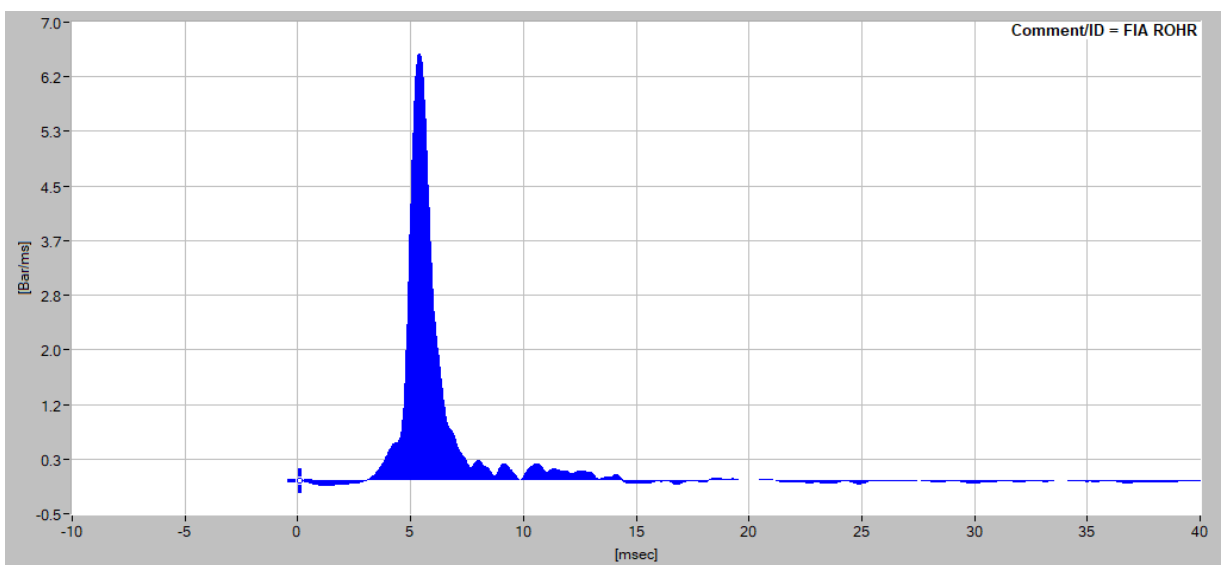


Διάγραμμα 10. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 30% v/v n-C<sub>16</sub> με 70% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

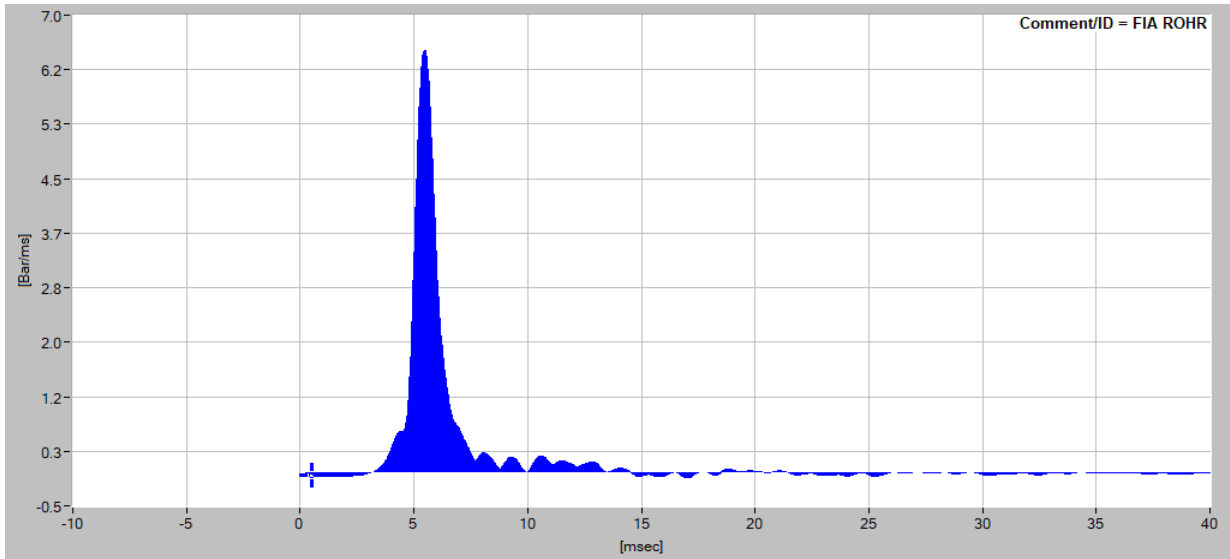
### 3.1.4. Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN) (17,65% v/v n-C<sub>16</sub> με 82,35% v/v HMN)

Πίνακας 9. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 17,65% v/v n-C<sub>16</sub> με 82,35% v/v HMN.

Μείγμα n-C <sub>16</sub> με HMN	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,25	4,98	7,96	13,02	0,73	2,98	5,05	6,52	5,43	8,53	36,8
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,35	5,06	8,03	13,02	0,71	2,97	4,99	6,46	5,54	8,41	36,0



Διάγραμμα 11. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 17,65% v/v n-C<sub>16</sub> με 82,35% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.

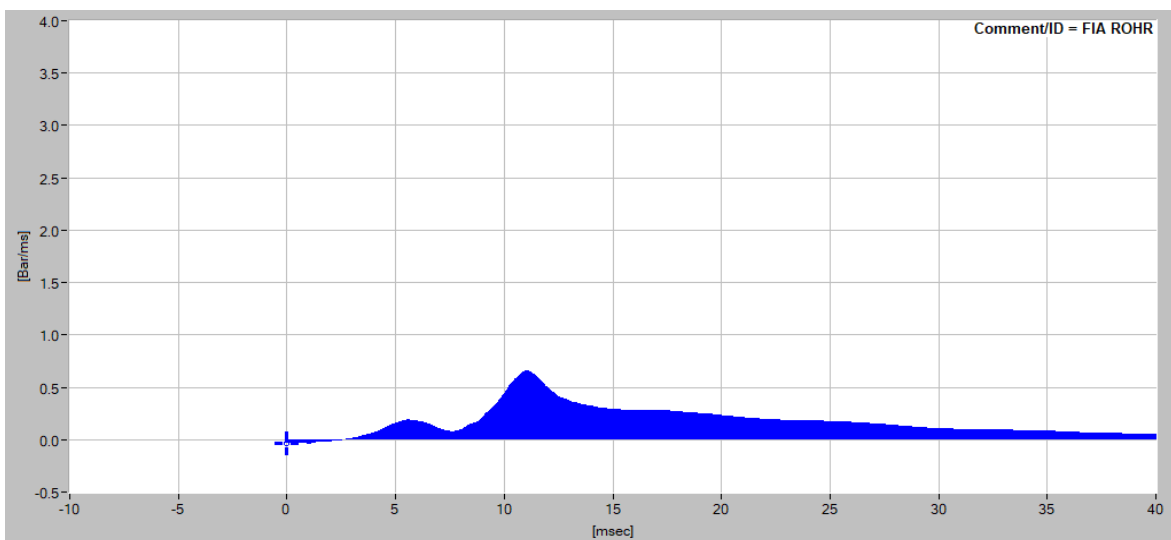


Διάγραμμα 12. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 17,65% v/v n-C<sub>16</sub> με 82,35% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

### 3.1.5. Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) (25% v/v n-C<sub>16</sub> και 75% v/v AMN)

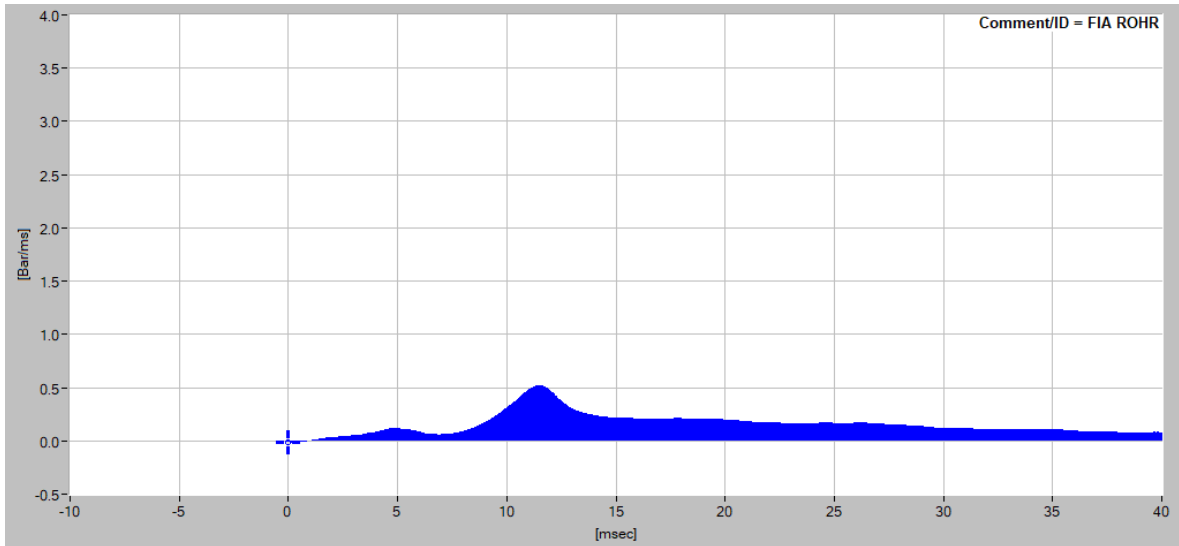
Πίνακας 10. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 25% v/v n-C<sub>16</sub> με 75% v/v AMN.

Μείγμα n-C <sub>16</sub> με AMN	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	7,16	9,17	31,19	41,84	2,01	22,03	10,65	0,66	11,12	6,97	11,1
2 <sup>η</sup> μέτρηση	7,34	9,30	34,53	42,52	1,96	25,23	7,99	0,52	11,53	6,28	10,7



Διάγραμμα 13. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 25% v/v n-C<sub>16</sub> με 75% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



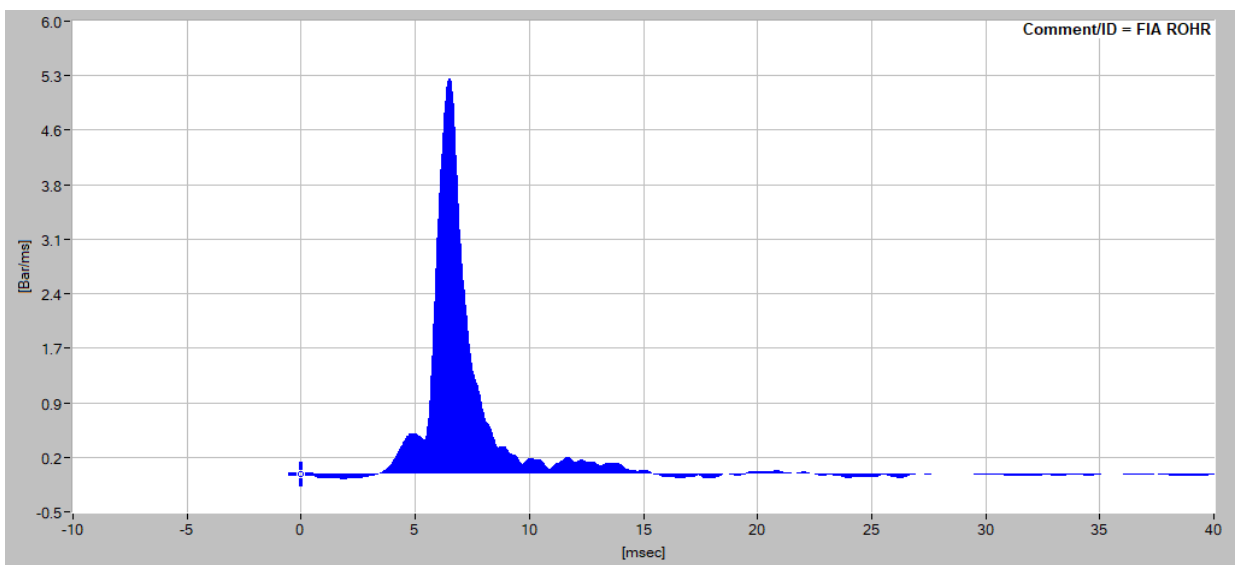


Διάγραμμα 14. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 25% v/v n-C<sub>16</sub> με 75% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

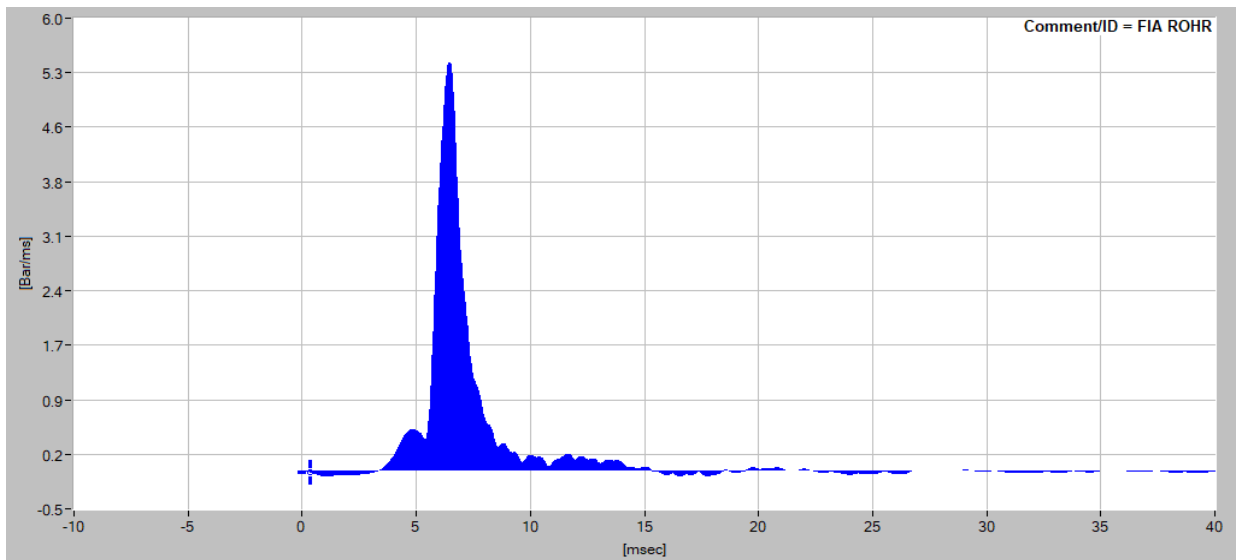
### 3.1.6. Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN) (11,76% v/v n-C<sub>16</sub> με 88,24% v/v HMN)

Πίνακας 11. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 11,76% v/v n-C<sub>16</sub> με 88,24% v/v HMN.

Μείγμα n-C <sub>16</sub> με HMN	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,67	5,83	9,07	13,92	1,16	3,24	4,85	5,24	6,50	8,28	28,9
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,69	5,87	9,04	13,85	1,18	3,17	4,81	5,41	6,54	8,24	28,6



Διάγραμμα 15. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 11,76% v/v n-C<sub>16</sub> με 88,24% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.

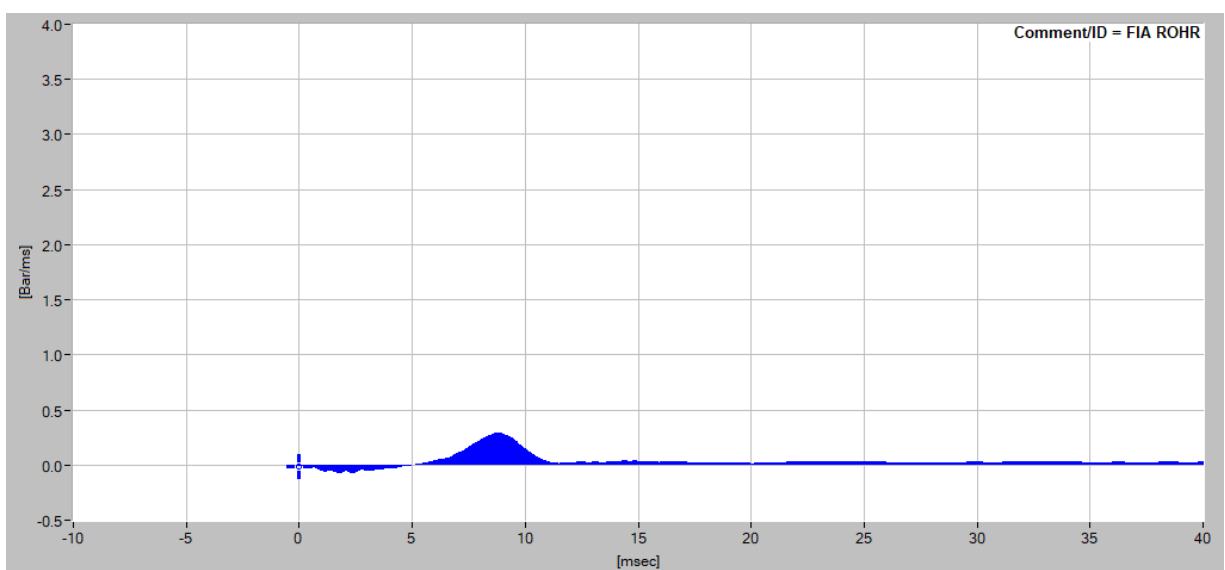


Διάγραμμα 16. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 11,76% v/v n-C<sub>16</sub> με 88,24% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

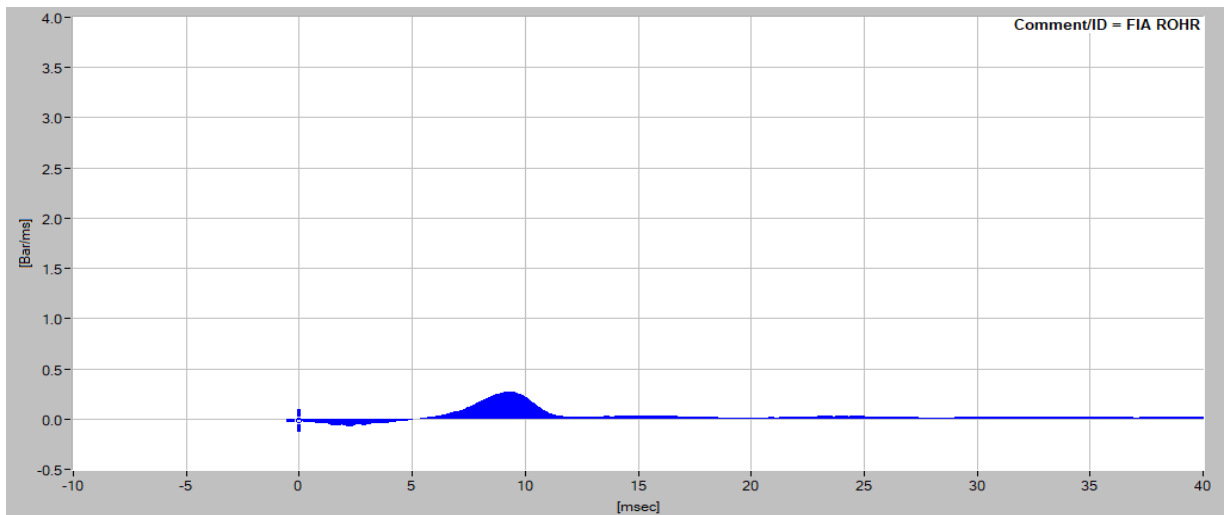
### 3.1.7. Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) (20% v/v n-C<sub>16</sub> και 80% v/v AMN)

Πίνακας 12. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 20% v/v n-C<sub>16</sub> με 80% v/v AMN.

Μείγμα n-C <sub>16</sub> με AMN	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	8,03	8,54	37,70	43,31	0,50	29,16	5,61	0,29	8,85	1,35	13,3
2 <sup>η</sup> μέτρηση	8,31	8,77	37,11	43,21	0,46	28,34	6,10	0,27	9,26	1,15	12,5



Διάγραμμα 17. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 20% v/v n-C<sub>16</sub> με 80% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.

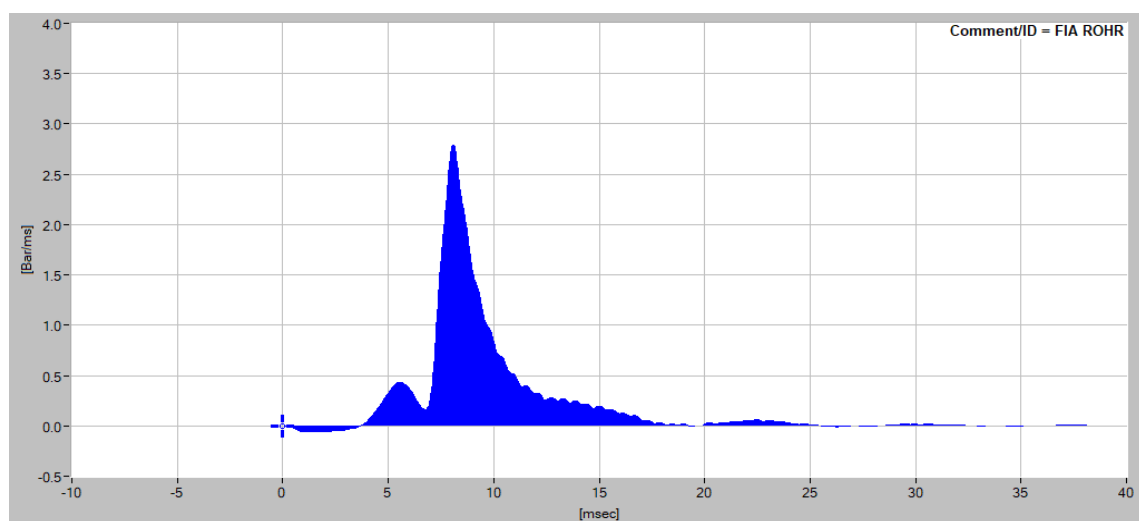


Διάγραμμα 18. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 20% v/v n-C<sub>16</sub> με 80% v/v AMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

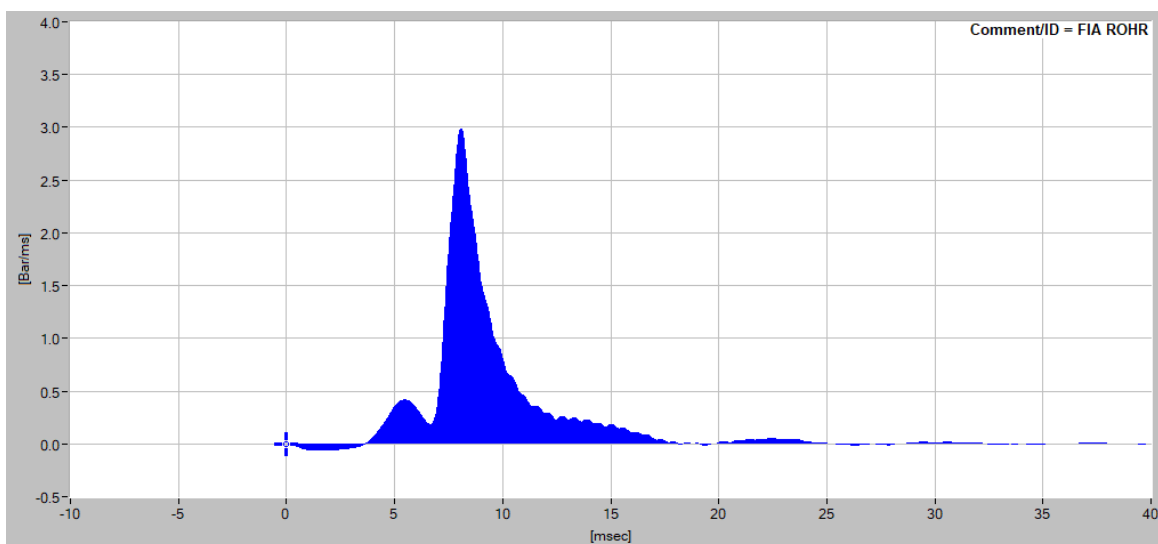
### 3.1.8. Μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN) (5,88% v/v n-C<sub>16</sub> με 94,12% v/v HMN)

Πίνακας 13. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 5,88% v/v n-C<sub>16</sub> με 94,12% v/v HMN.

Μείγμα n-C <sub>16</sub> με HMN	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,29	7,34	13,77	23,87	2,04	6,44	10,09	2,79	8,13	7,58	18,8
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,22	7,27	13,19	21,97	2,05	5,92	8,77	2,98	8,12	7,59	19,1



Διάγραμμα 19. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 5,88% v/v n-C<sub>16</sub> με 94,12% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 20. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 5,88% v/v n-C<sub>16</sub> με 94,12% v/v HMN σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

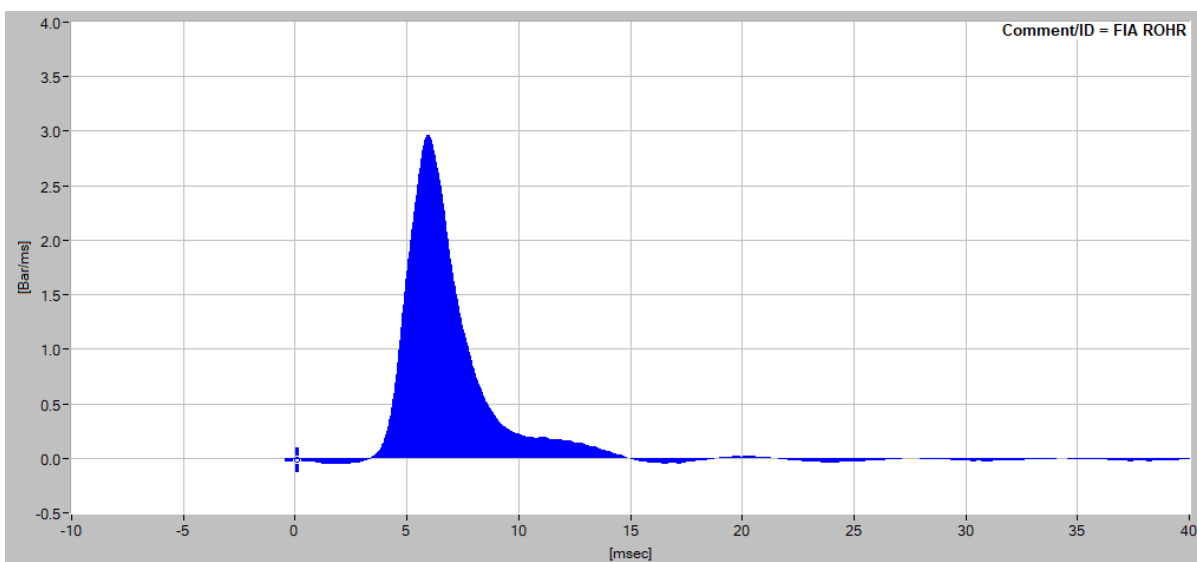
### 3.1.9. Μέτρηση δείγματος 1 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου

Πίνακας 14. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 1.

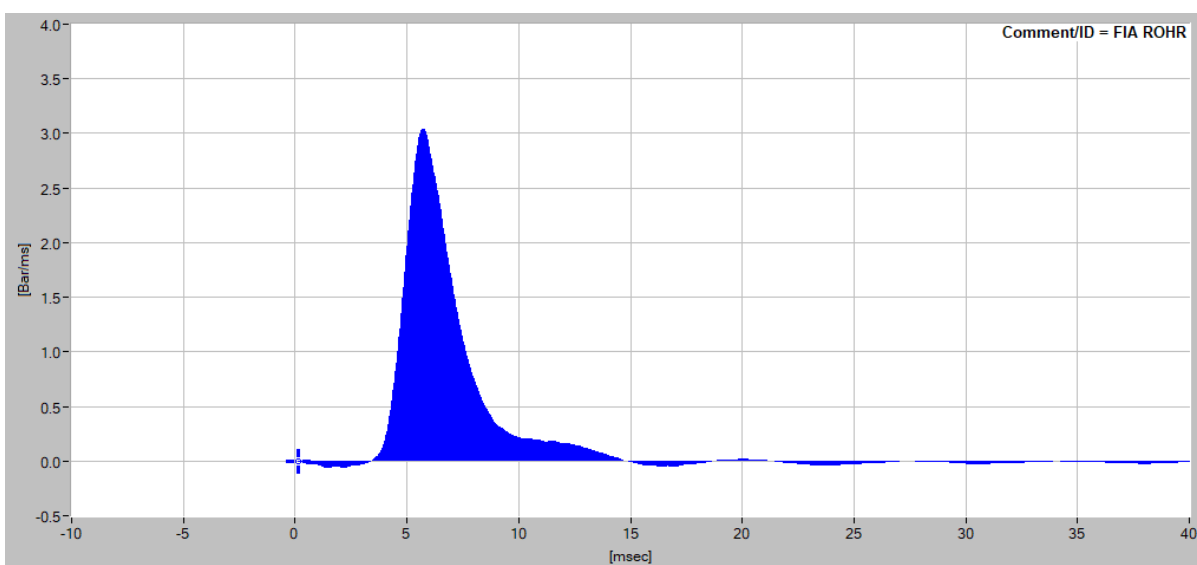
Δείγμα 1	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,68	5,18	9,24	13,37	0,50	4,06	4,13	2,97	6,01	7,99	34,8
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,61	5,07	9,16	13,21	0,47	4,09	4,05	3,04	5,77	8,03	35,9

Πίνακας 15. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 1.

Δείγμα 1	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,59	4,77	5,06	5,30	8,94	9,54	12,21	14,53	0,46	0,54	3,81	4,31	3,18	5,08	2,72	3,22	5,91	6,11	7,90	8,08
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,52	4,70	4,95	5,19	8,86	9,46	12,05	14,37	0,44	0,50	3,84	4,34	3,10	5,00	2,78	3,30	5,77	5,93	7,94	8,12



Διάγραμμα 21. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 1 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 22. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 1 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

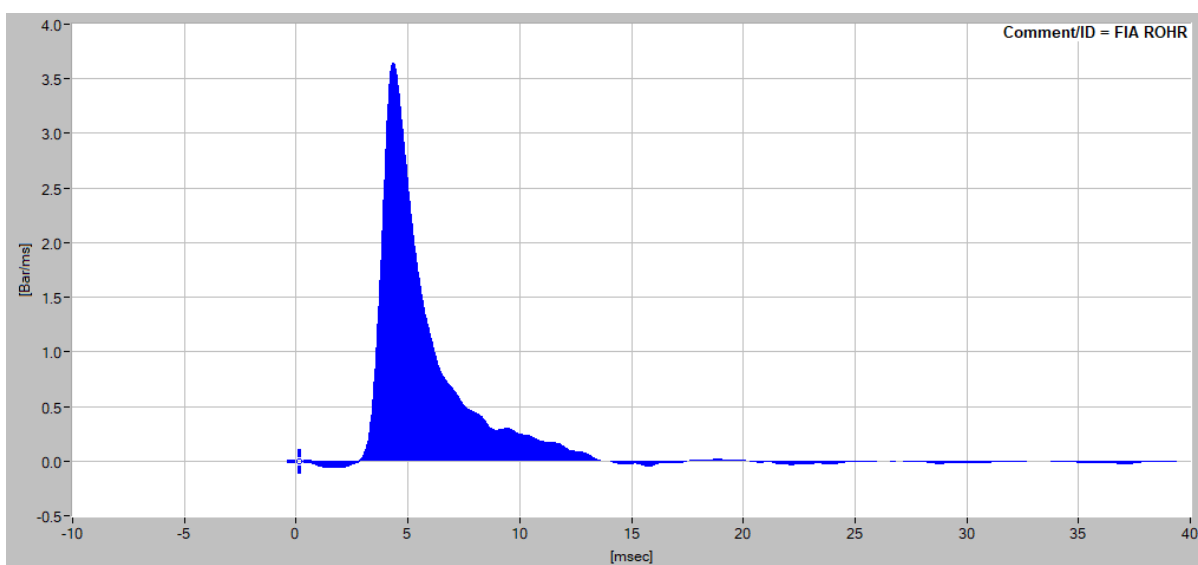
### 3.1.10. Μέτρηση δείγματος 2 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου

Πίνακας 16. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 2.

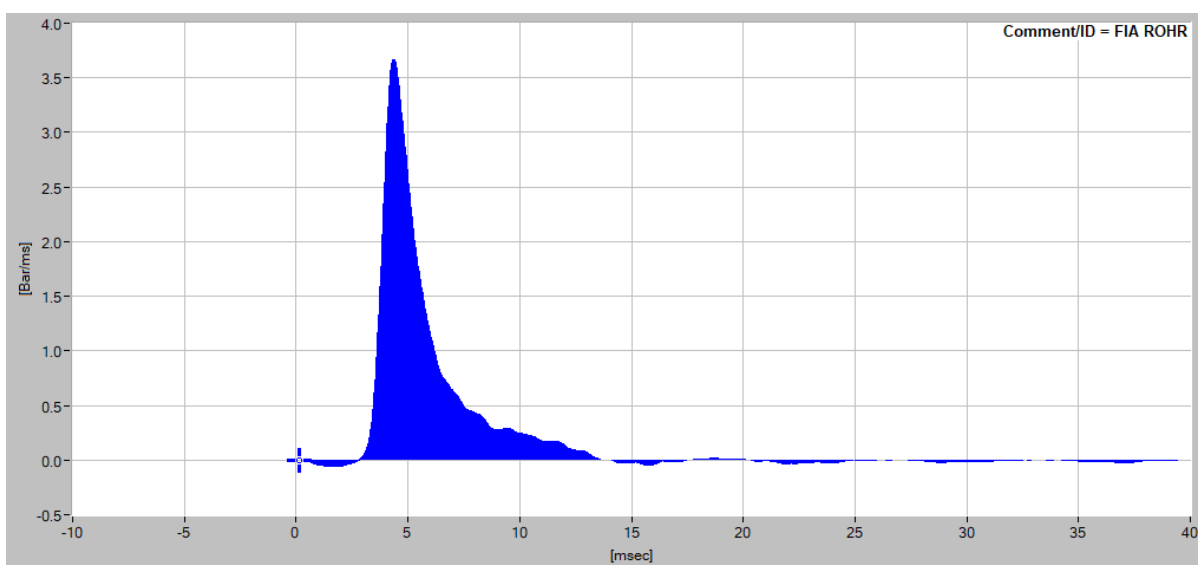
Δείγμα 2	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	3,71	4,04	8,85	12,29	0,33	4,81	3,43	3,66	4,39	8,03	48,2
2 <sup>η</sup> μέτρηση	3,74	4,07	8,85	12,32	0,34	4,78	3,47	3,68	4,42	8,01	47,8

Πίνακας 17. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 2.

Δείγμα 2	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	3,64	3,78	3,95	4,13	8,56	9,14	11,13	13,45	0,31	0,35	4,51	5,11	2,48	4,38	3,35	3,97	4,35	4,43	7,94	8,12
2 <sup>η</sup> μέτρηση	3,67	3,81	3,98	4,16	8,56	9,14	11,16	13,48	0,31	0,37	4,48	5,08	2,52	4,42	3,37	3,99	4,38	4,46	7,92	8,10



Διάγραμμα 23. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 2 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 24. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 2 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

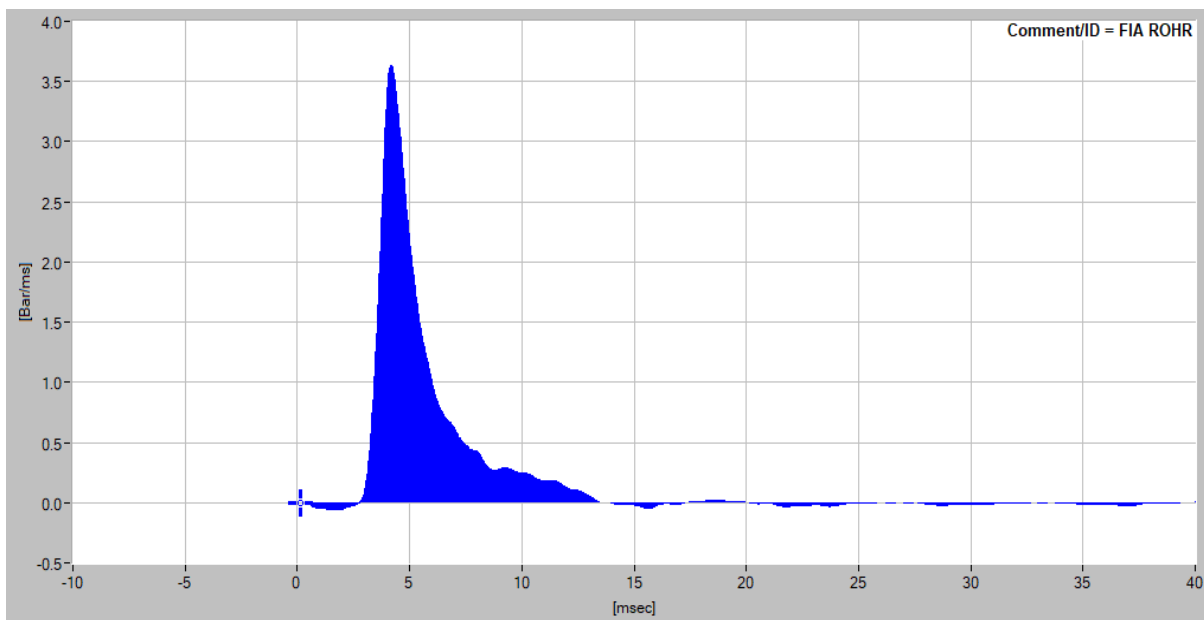
### 3.1.11. Μέτρηση δείγματος 3 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου

Πίνακας 18. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 3.

Δείγμα 3	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	3,61	3,94	8,87	12,30	0,32	4,93	3,44	3,63	4,28	7,99	49,6
2 <sup>η</sup> μέτρηση	3,54	3,86	8,71	12,20	0,32	4,85	3,49	3,47	4,16	8,00	50,8

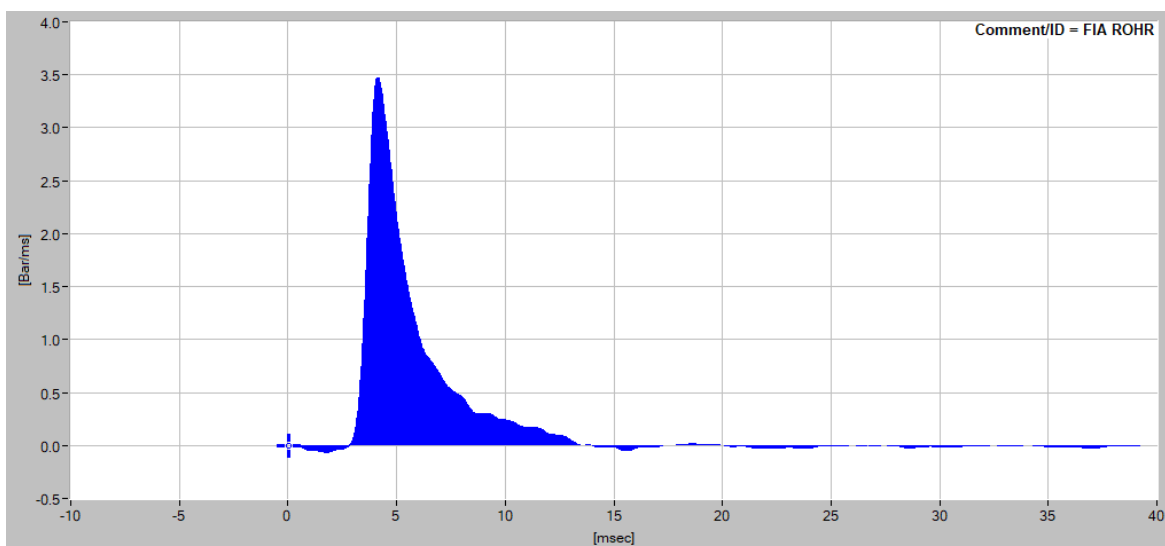
Πίνακας 19. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 3.

Δείγμα 3	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
	1 <sup>η</sup> μέτρηση	3,54	3,68	3,85	4,03	8,58	9,16	11,14	13,46	0,30	0,34	4,62	5,24	2,49	4,39	3,32	3,94	4,25	4,31	7,90
2 <sup>η</sup> μέτρηση	3,47	3,61	3,77	3,95	8,43	8,99	11,04	13,36	0,30	0,34	4,55	5,15	2,54	4,44	3,17	3,77	4,21	4,27	7,91	8,09



Διάγραμμα 25. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 3 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.





Διάγραμμα 26. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 3 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

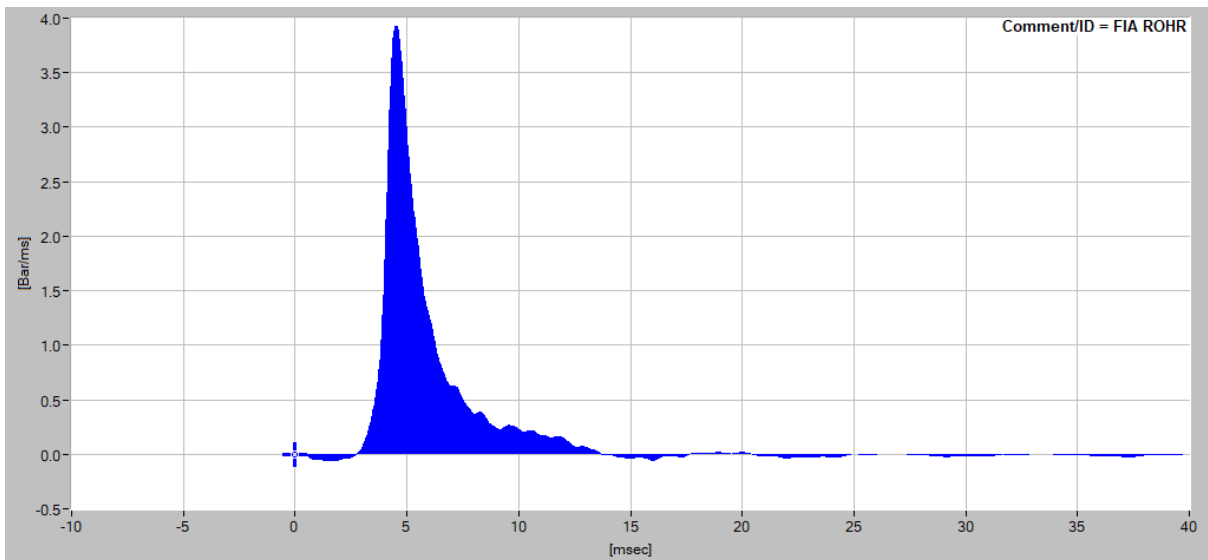
### 3.1.12. Μέτρηση δείγματος 4 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου

Πίνακας 20. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 4.

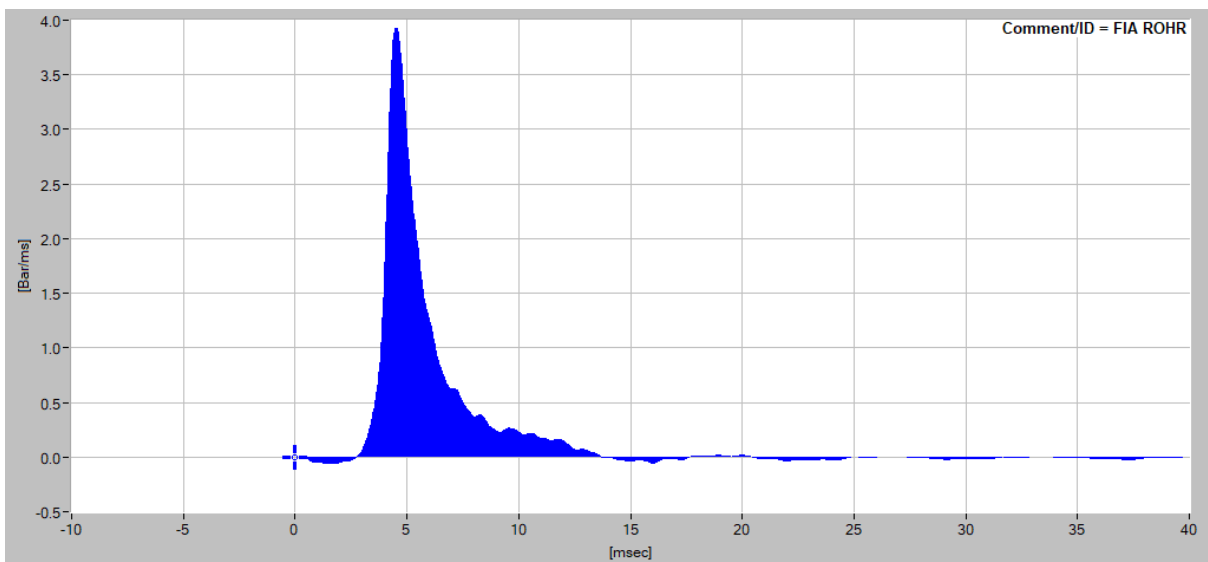
Δείγμα 4	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	3,93	4,31	8,79	12,35	0,37	4,48	3,56	3,95	4,65	7,76	44,6
2 <sup>η</sup> μέτρηση	3,95	4,36	8,88	12,45	0,41	4,52	3,57	3,93	4,66	7,77	44,0

Πίνακας 21. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 4.

Δείγμα 4	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	3,85	4,01	4,21	4,41	8,51	9,07	11,19	13,51	0,34	0,40	4,20	4,76	2,61	4,51	3,61	4,29	4,61	4,69	7,67	7,85
2 <sup>η</sup> μέτρηση	3,87	4,03	4,26	4,46	8,59	9,17	11,29	13,61	0,38	0,44	4,24	4,80	2,62	4,52	3,60	4,26	4,62	4,70	7,68	7,86



Διάγραμμα 27. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 4 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



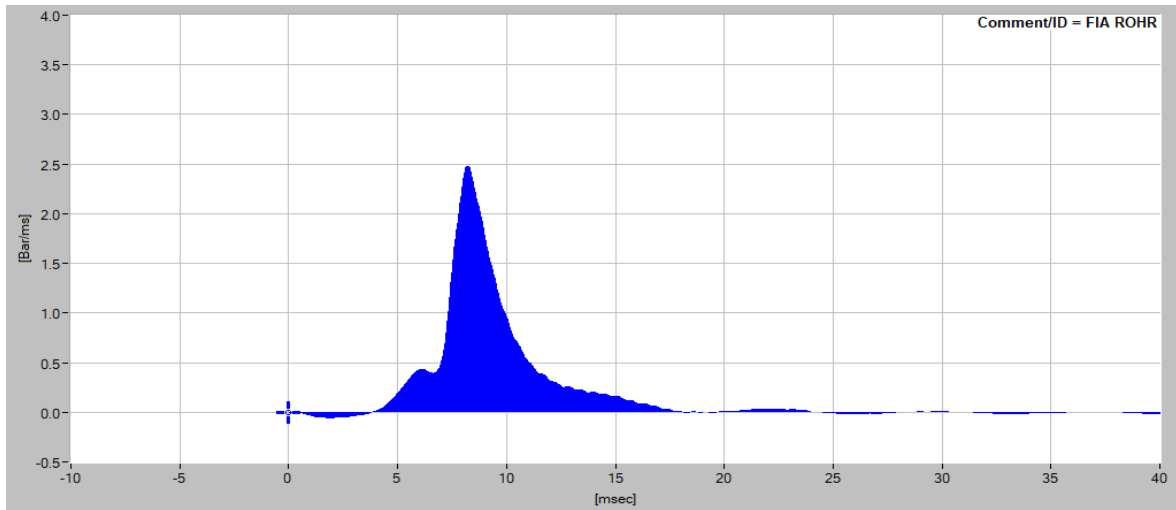
Διάγραμμα 28. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 4 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

### 3.1.13. Μέτρηση δείγματος 5 από διεργαστηριακό έλεγχο

Για το δείγμα 5, που αποτελεί δείγμα διεργαστηριακού ελέγχου, πραγματοποιήθηκε μία μόνο μέτρηση.

Πίνακας 22. Αποτελέσματα μέτρησης του δείγματος 5.

Δείγμα 5	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,55	7,16	12,60	18,90	1,61	5,44	6,30	2,49	8,14	7,39	19,7



Διάγραμμα 29. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 5 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time).

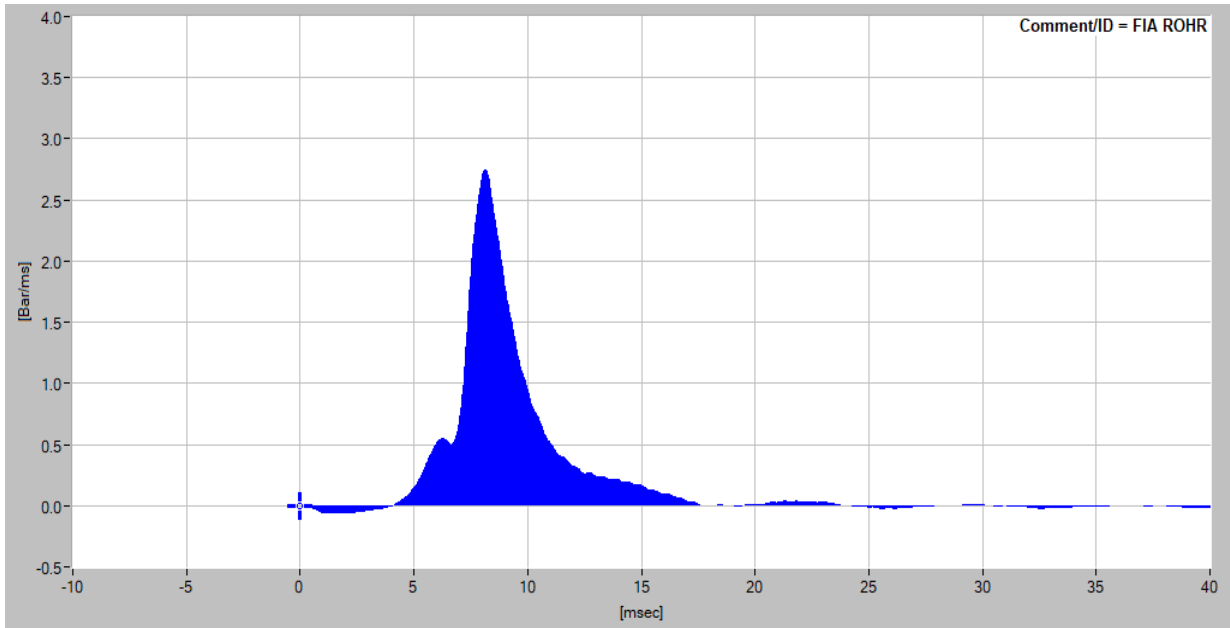
### 3.1.14. Μέτρηση δείγματος 6 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου

Πίνακας 23. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 6.

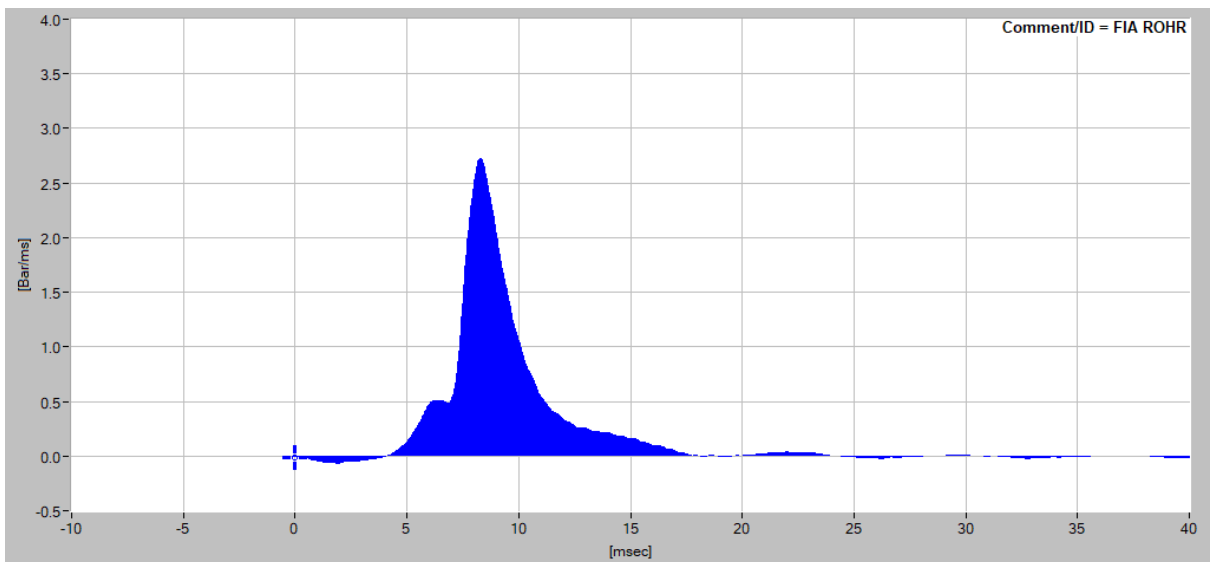
Δείγμα 6	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,91	7,27	12,56	18,68	1,36	5,29	6,12	2,75	8,24	8,00	19,1
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,96	7,39	12,65	18,53	1,43	5,26	5,88	2,73	8,36	8,00	18,5

Πίνακας 24. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 6.

Δείγμα 6	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,79	6,03	7,10	7,44	12,15	12,97	17,52	19,84	1,26	1,46	4,96	5,62	5,17	7,07	2,52	2,98	7,99	8,49	7,91	8,09
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,84	6,08	7,22	7,56	12,24	13,06	17,37	19,69	1,32	1,54	4,93	5,59	4,93	6,83	2,50	2,96	8,10	8,62	7,91	8,09



Διάγραμμα 30. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 6 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 31. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 6 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.

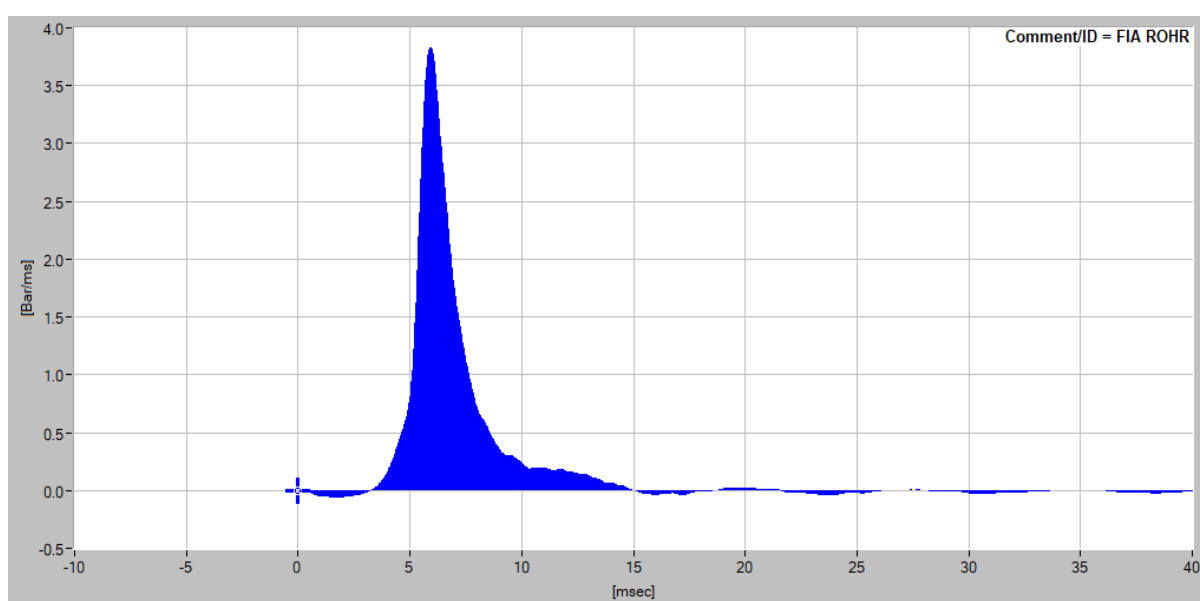
### 3.1.15. Μέτρηση δείγματος 7 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου

Πίνακας 25. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 7.

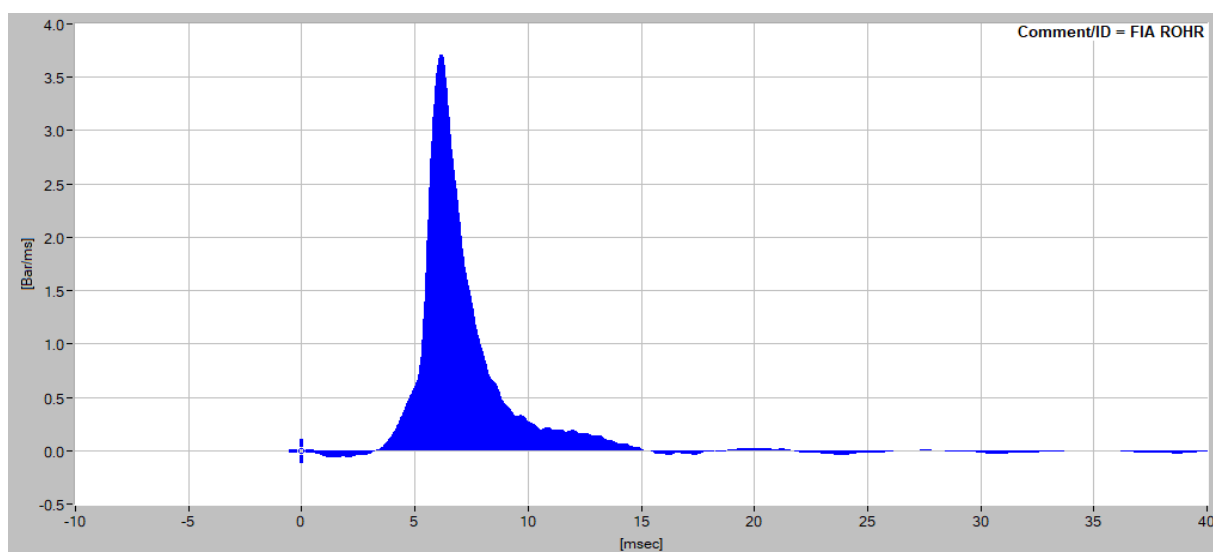
Δείγμα 7	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,71	5,46	9,39	13,46	0,75	3,92	4,08	3,84	6,00	7,93	32,1
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,83	5,68	9,76	13,73	0,85	4,08	3,96	3,72	6,28	7,97	30,2

Πίνακας 26. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 7.

Δείγμα 7	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
	1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,62	4,80	5,33	5,59	9,09	9,69	12,30	14,62	0,69	0,81	3,68	4,16	3,13	5,03	3,51	4,17	5,98	6,18	7,84
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,73	4,93	5,55	5,81	9,44	10,08	12,57	14,89	0,79	0,91	3,83	4,33	3,01	4,91	3,40	4,04	6,17	6,39	7,88	8,06



Διάγραμμα 32. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 7 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 33. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 7 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

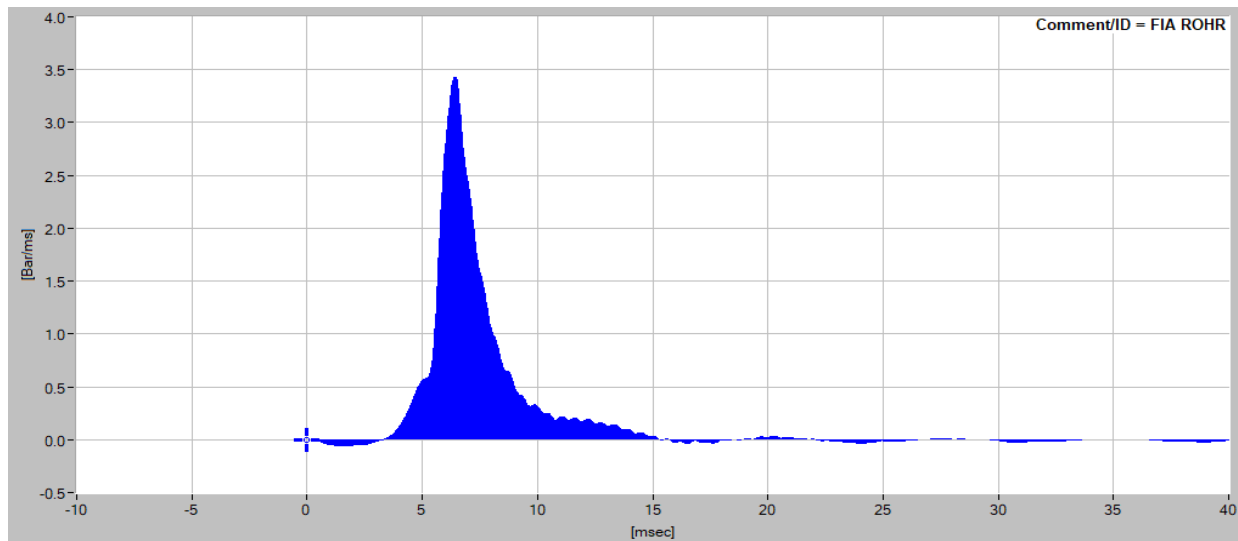
### 3.1.16. Μέτρηση δείγματος 8 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου

Πίνακας 27. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 8.

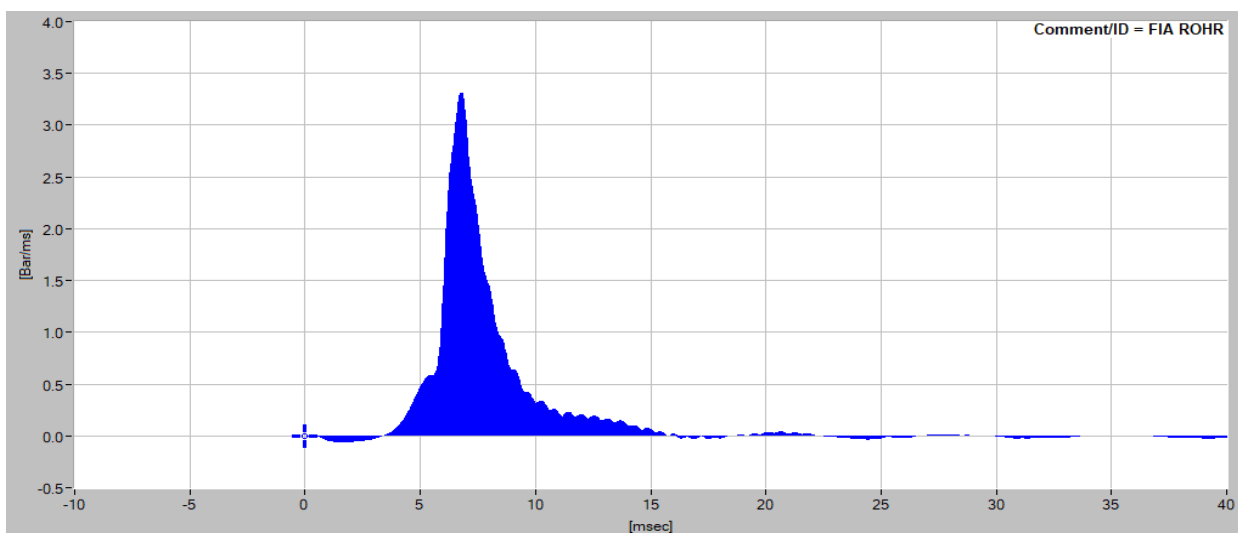
Δείγμα 8	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,83	5,81	9,95	13,91	0,97	4,14	3,96	3,45	6,50	7,74	29,1
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,96	6,05	10,42	14,87	1,09	4,37	4,45	3,31	6,82	7,63	27,1

Πίνακας 28. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 8.

Δείγμα 8	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,73	4,93	5,68	5,94	9,63	10,27	12,75	15,07	0,90	1,04	3,88	4,40	3,01	4,91	3,16	3,74	6,46	6,70	7,65	7,83
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,86	5,06	5,91	6,19	10,08	10,76	13,71	16,03	1,01	1,17	4,10	4,64	3,50	5,40	3,03	3,59	6,68	6,96	7,54	7,72



Διάγραμμα 34. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 8 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 35. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 8 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

### 3.1.17. Μέτρηση δείγματος 9 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου

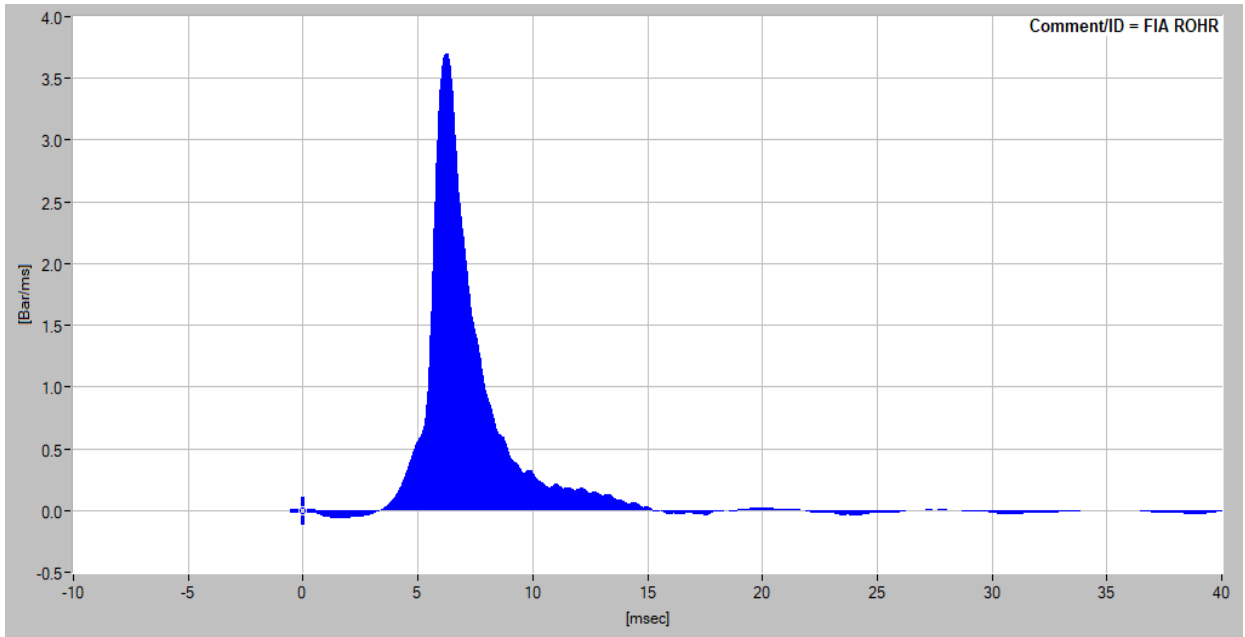
Πίνακας 29. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 9.

Δείγμα 9	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,88	5,74	9,72	13,71	0,87	3,98	3,99	3,71	6,32	7,79	29,6
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,83	5,64	10,10	14,17	0,81	4,47	4,07	3,33	6,30	7,85	30,5

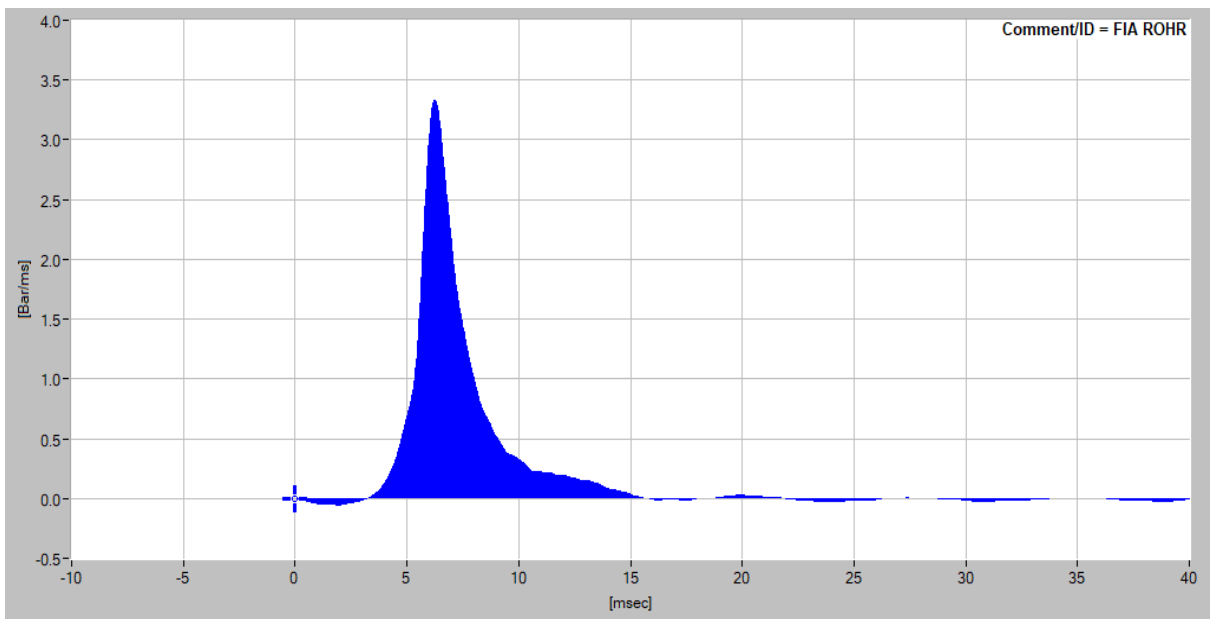
Πίνακας 30. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 9.

Δείγμα 9	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,78	4,98	5,61	5,87	9,41	10,03	12,55	14,87	0,81	0,93	3,73	4,23	3,04	4,94	3,39	4,03	6,21	6,43	7,70	7,88
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,73	4,93	5,51	5,77	9,77	10,43	13,01	15,33	0,75	0,87	4,19	4,75	3,12	5,02	3,05	3,61	6,19	6,41	7,76	7,94





Διάγραμμα 36. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 9 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 37. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 9 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

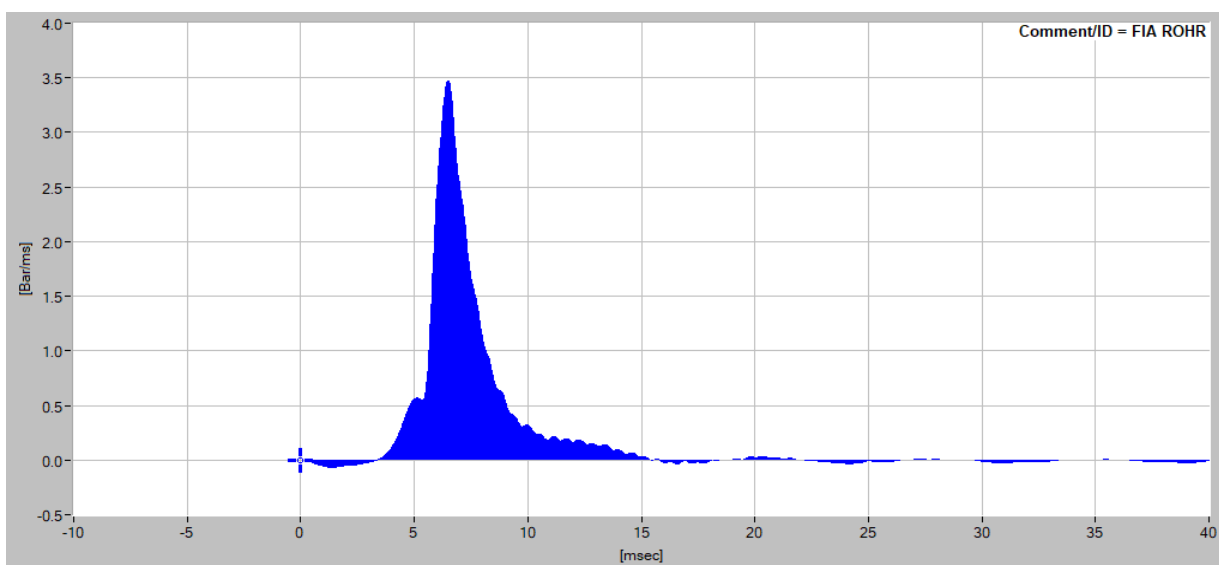
### 3.1.18. Μέτρηση δείγματος 10 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου

Πίνακας 31. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 10.

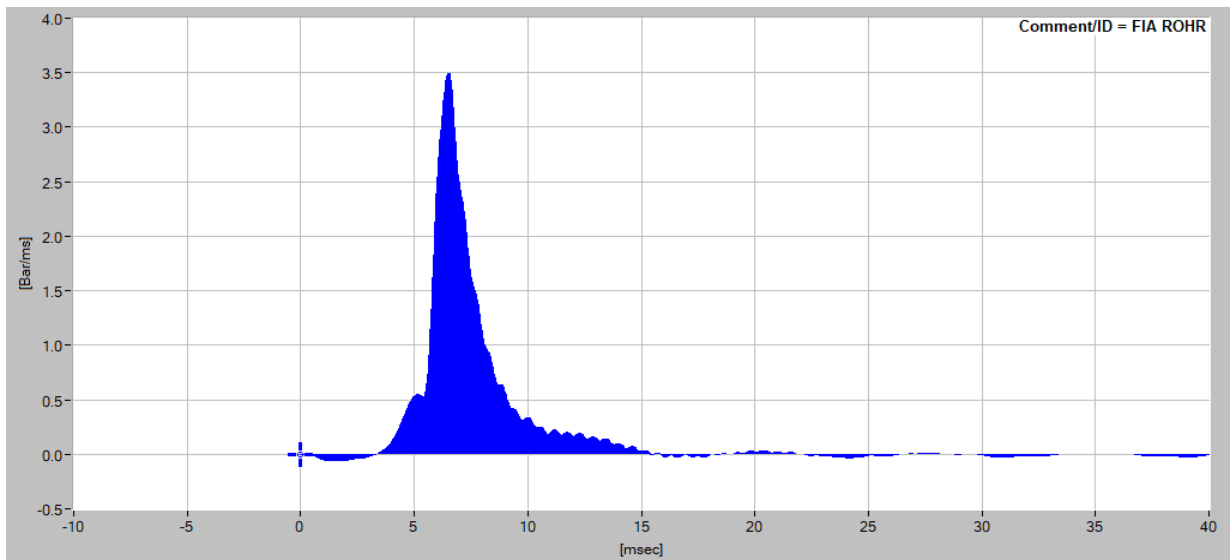
Δείγμα 10	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,90	5,93	10,01	13,98	1,04	4,08	3,97	3,49	6,62	7,67	28,1
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,86	5,90	10,07	14,08	1,04	4,17	4,01	3,50	6,58	7,66	28,3

Πίνακας 32. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 10.

Δείγμα 10	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,80	5,00	5,79	6,07	9,69	10,33	12,82	15,14	0,96	1,12	3,83	4,33	3,02	4,92	3,19	3,79	6,49	6,75	7,58	7,76
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,76	4,96	5,76	6,04	9,74	10,40	12,92	15,24	0,96	1,12	3,91	4,43	3,06	4,96	3,20	3,80	6,45	6,71	7,57	7,75



Διάγραμμα 38. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 10 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 39. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 10 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

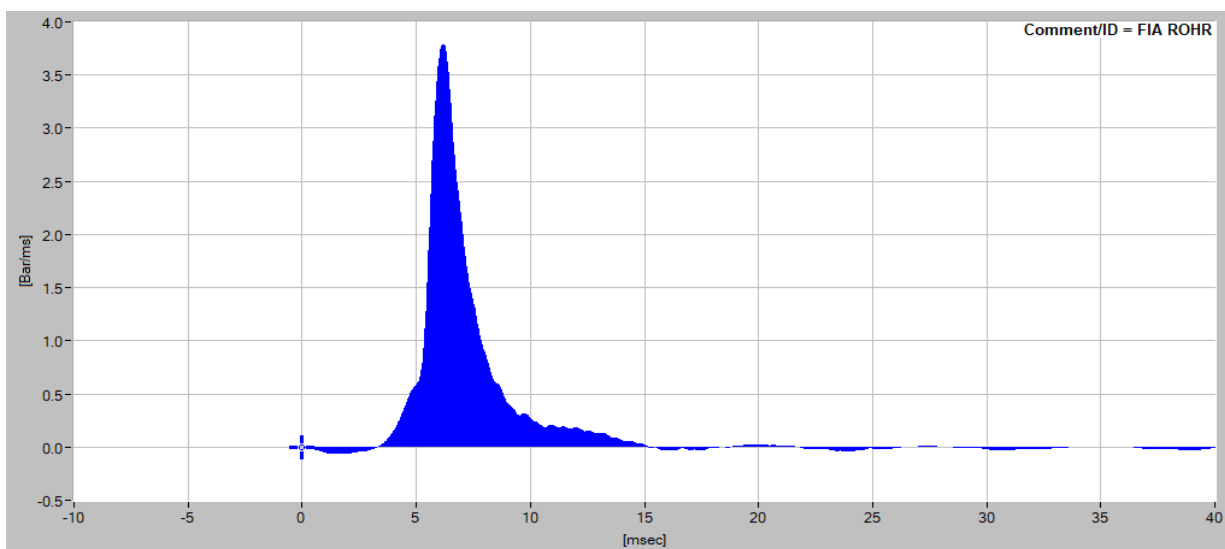
### 3.1.19. Μέτρηση δείγματος 11 από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου

Πίνακας 33. Αποτελέσματα πρώτης μέτρησης του δείγματος 11.

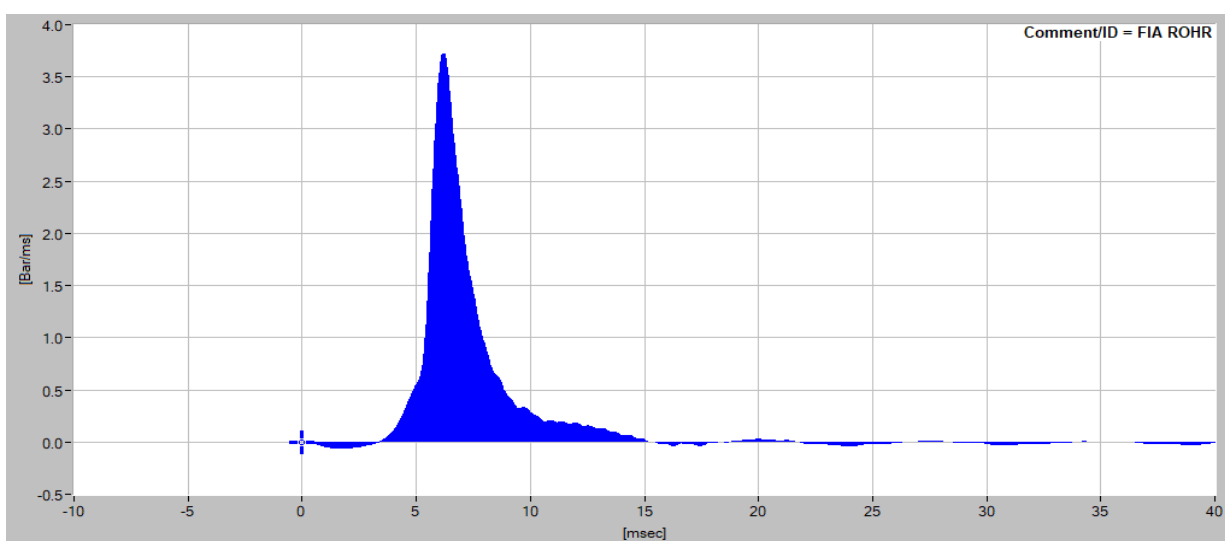
Δείγμα 11	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,82	5,70	9,67	13,72	0,88	3,97	4,05	3,80	6,31	7,86	30,0
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,85	5,68	9,68	13,76	0,83	4,00	4,07	3,73	6,23	7,84	30,2

Πίνακας 34. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 11.

Δείγμα 11	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,72	4,92	5,57	5,83	9,36	9,98	12,56	14,88	0,82	0,94	3,72	4,22	3,10	5,00	3,48	4,12	6,20	6,42	7,77	7,95
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,75	4,95	5,55	5,81	9,37	9,99	12,60	14,92	0,77	0,89	3,75	4,25	3,12	5,02	3,41	4,05	6,12	6,34	7,75	7,93



Διάγραμμα 40. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 11 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 41. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 11 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

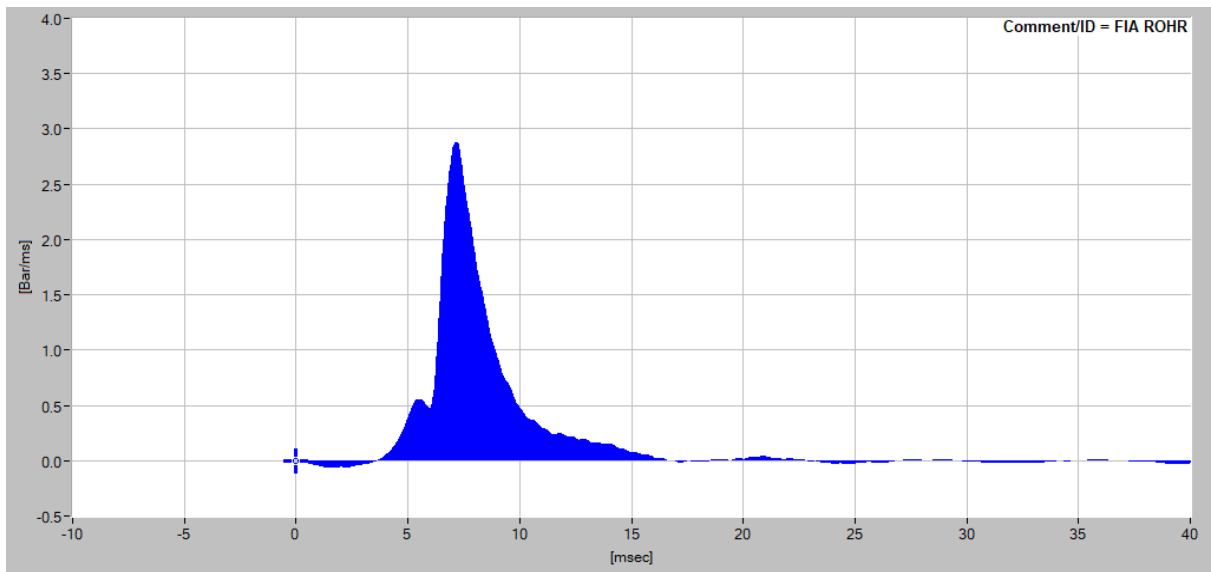
### 3.1.20. Μέτρηση δείγματος 12 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου

Πίνακας 35. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 12.

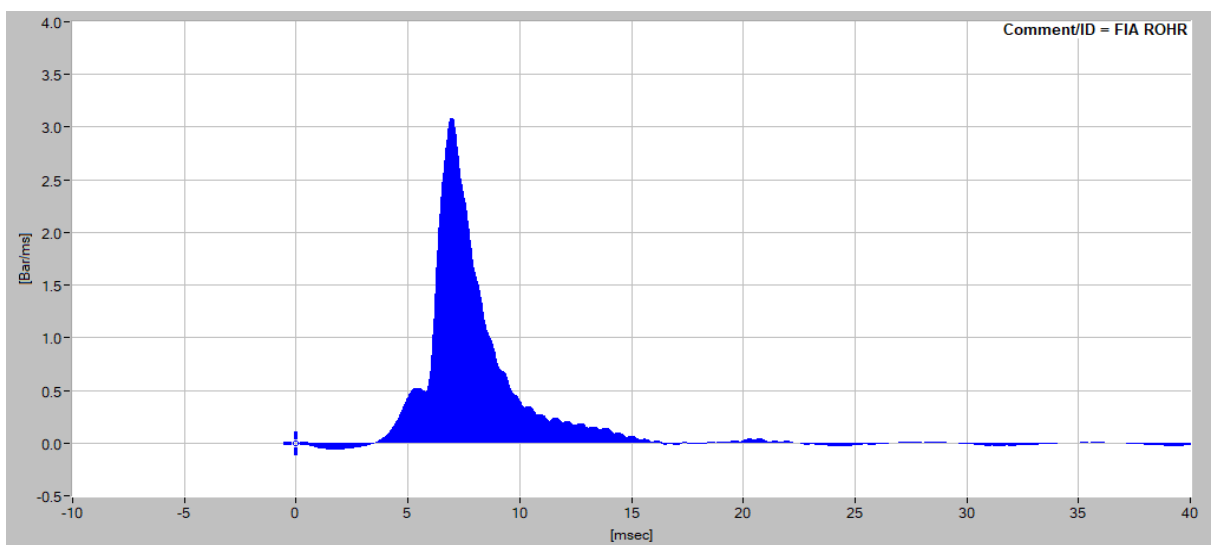
Δείγμα 12	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,23	6,45	11,25	16,20	1,23	4,80	4,95	2,88	7,24	7,57	24,2
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,10	6,29	10,78	15,57	1,18	4,49	4,79	3,09	7,05	7,53	25,3

Πίνακας 36. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 12.

Δείγμα 12	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,13	5,33	6,30	6,60	10,89	11,61	15,04	17,36	1,14	1,32	4,50	5,10	4,00	5,90	2,64	3,12	7,07	7,41	7,48	7,66
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,00	5,20	6,15	6,43	10,43	11,13	14,41	16,73	1,09	1,27	4,21	4,77	3,84	5,74	2,83	3,35	6,90	7,20	7,44	7,62



Διάγραμμα 42. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 12 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 43. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 12 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

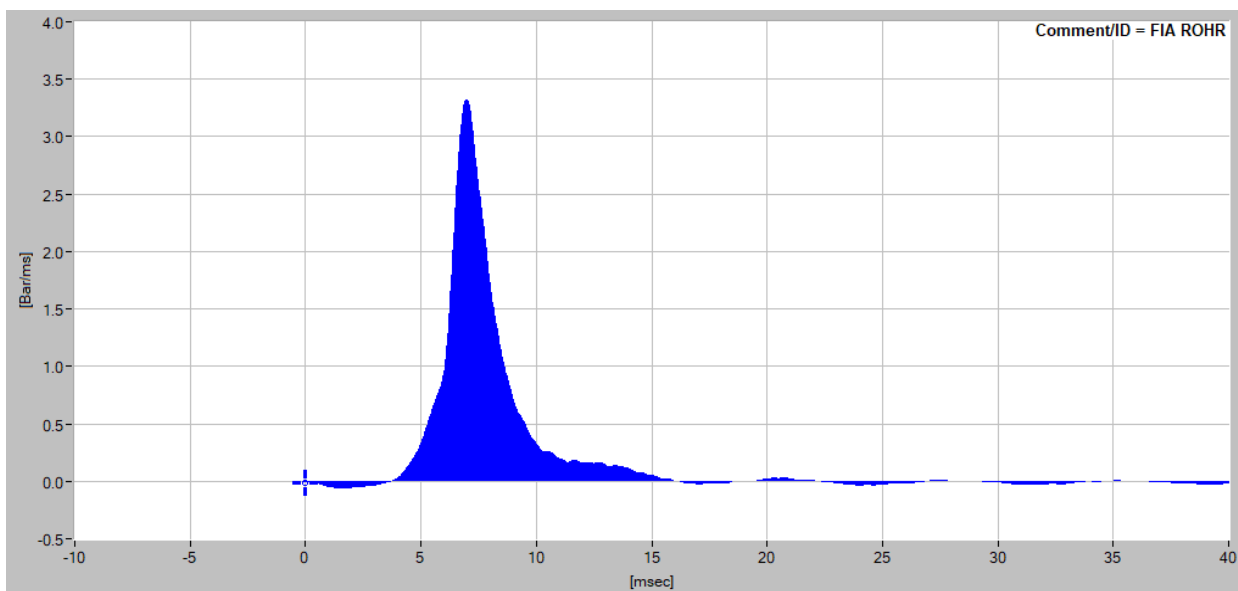
### 3.1.21. Μέτρηση δείγματος 13 από δεξαμενή ελληνικού διωλιστηρίου

Πίνακας 37. Αποτελέσματα μετρήσεων του δείγματος 13.

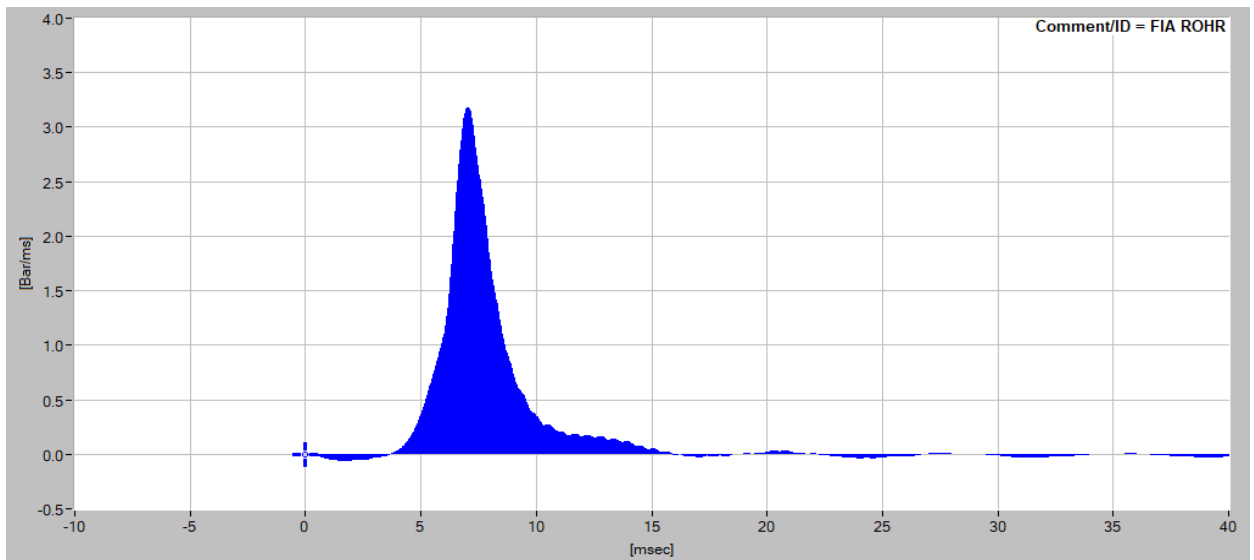
Δείγμα 13	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,42	6,33	10,22	14,63	0,91	3,89	4,40	3,33	7,12	7,63	25,0
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,32	6,19	10,10	14,46	0,86	3,92	4,36	3,18	7,08	7,70	26,1

Πίνακας 38. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του δείγματος 13.

Δείγμα 13	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,31	5,53	6,18	6,48	9,89	10,55	13,47	15,79	0,84	0,98	3,65	4,13	3,45	5,35	3,05	3,61	6,96	7,28	7,54	7,72
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,21	5,43	6,05	6,33	9,77	10,43	13,30	15,62	0,80	0,92	3,68	4,16	3,41	5,31	2,91	3,45	6,92	7,24	7,61	7,79



Διάγραμμα 44. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 13 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



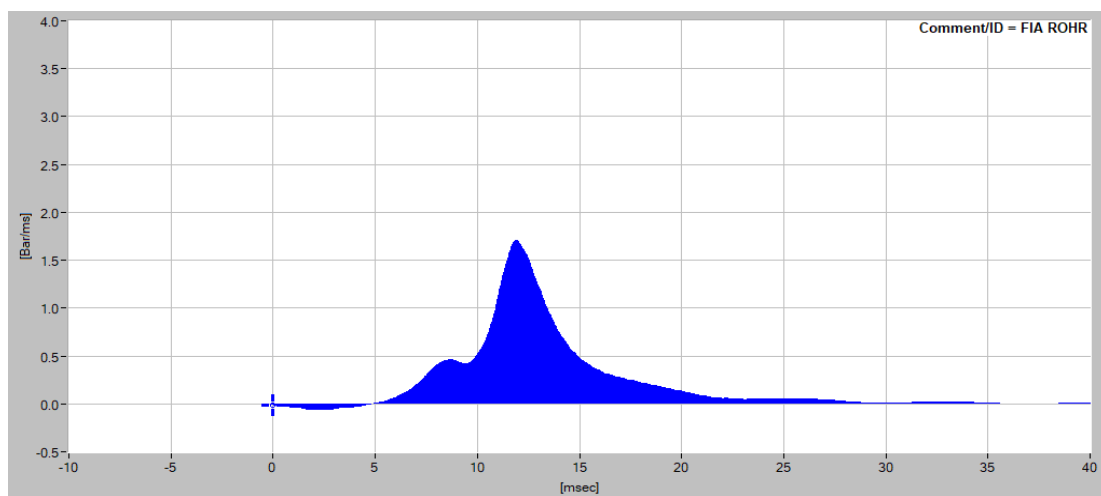
Διάγραμμα 45. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 13 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

### 3.1.22. Μέτρηση δείγματος 14 (LCO) από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου

Για το δείγμα 14, που αποτελεί κλάσμα Light Cycle Oil (LCO) από δεξαμενή ελληνικού διυλιστηρίου, πραγματοποιήθηκε μία μόνο μέτρηση, λόγω ενδεχόμενης βλάβης στη συσκευή (παρουσιάζει πολύ κακή ποιότητα καύσης αφού η σύστασή σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες φτάνει το 60% περίπου).

Πίνακας 39. Αποτελέσματα μέτρησης του δείγματος 14 (LCO).

Δείγμα 14 (LCO)	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	7,75	9,30	18,71	30,56	1,54	9,41	11,85	1,71	11,92	8,06	10,7



Διάγραμμα 46. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του δείγματος 14 (LCO) σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time).

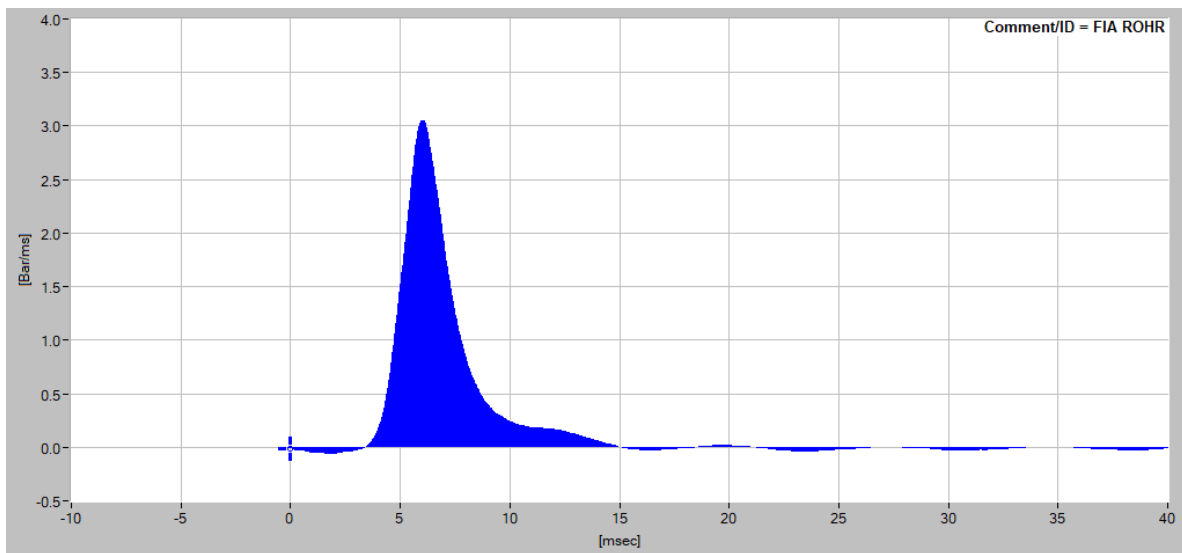
### 3.1.23. Μέτρηση μείγματος 1 – 95% m/m δείγματος 1 με 5% m/m δείγματος 14 (LCO)

Πίνακας 40. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 1.

Μείγμα 1	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,75	5,27	9,35	13,38	0,52	4,08	4,03	3,06	6,12	8,08	33,9
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,64	5,14	9,32	13,30	0,50	4,18	3,98	2,94	5,97	8,09	35,2

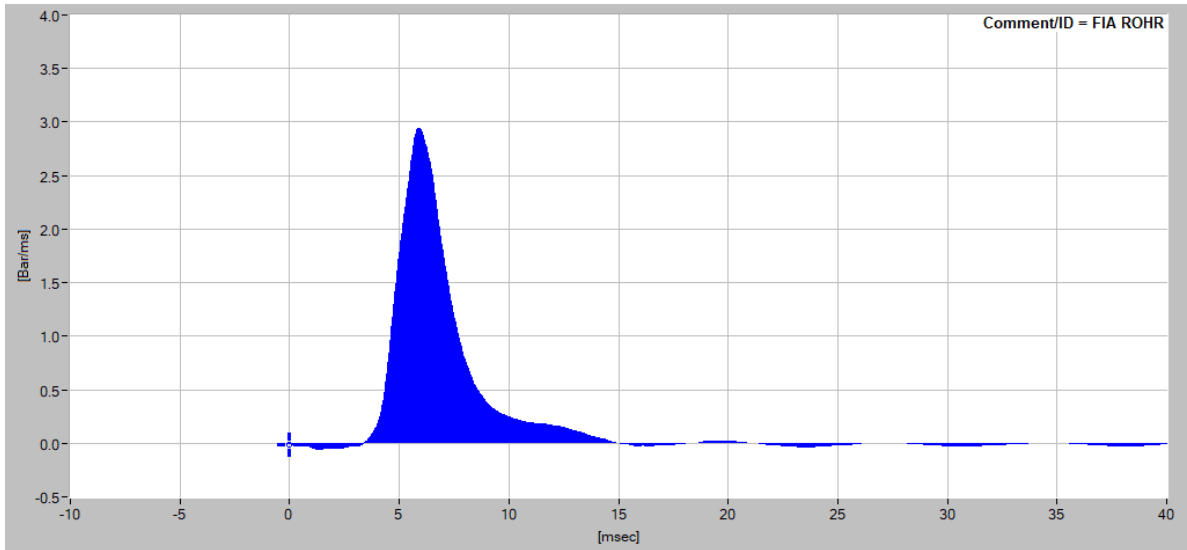
Πίνακας 41. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 1.

Μείγμα 1	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,66	4,84	5,15	5,39	9,05	9,65	12,22	14,54	0,48	0,56	3,83	4,33	3,08	4,98	2,80	3,32	6,02	6,22	7,99	8,17
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,55	4,73	5,02	5,26	9,02	9,62	12,14	14,46	0,46	0,54	3,92	4,44	3,03	4,93	2,69	3,19	5,88	6,06	8,00	8,18



Διάγραμμα 47. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 1 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.





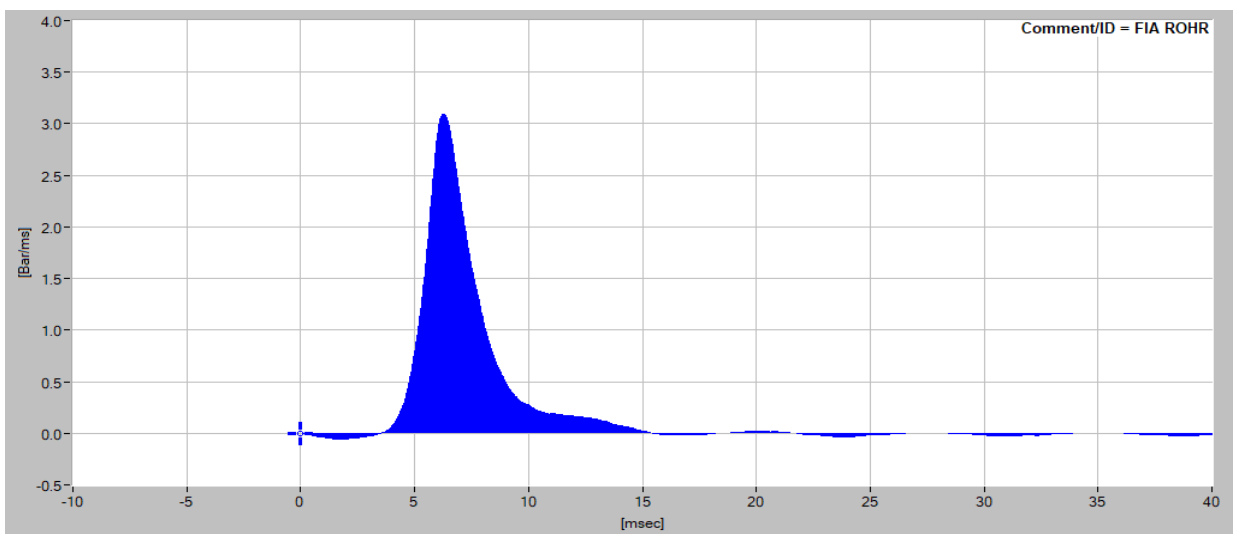
Διάγραμμα 48. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 1 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

### 3.1.24. Μέτρηση μείγματος 2 – 90% m/m δείγματος 1 με 10% m/m δείγματος Slurry FCC

Για το μείγμα 2, του οποίου η σύσταση ήταν 90% m/m δείγμα 1 και 10% m/m δείγμα Slurry FCC, πραγματοποιήθηκε μία μόνο μέτρηση.

Πίνακας 42. Αποτελέσματα μέτρησης του μείγματος 2.

Μείγμα 2	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,03	5,63	9,64	13,77	0,60	4,00	4,14	3,10	6,35	7,95	30,6



Διάγραμμα 49. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 2 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time).

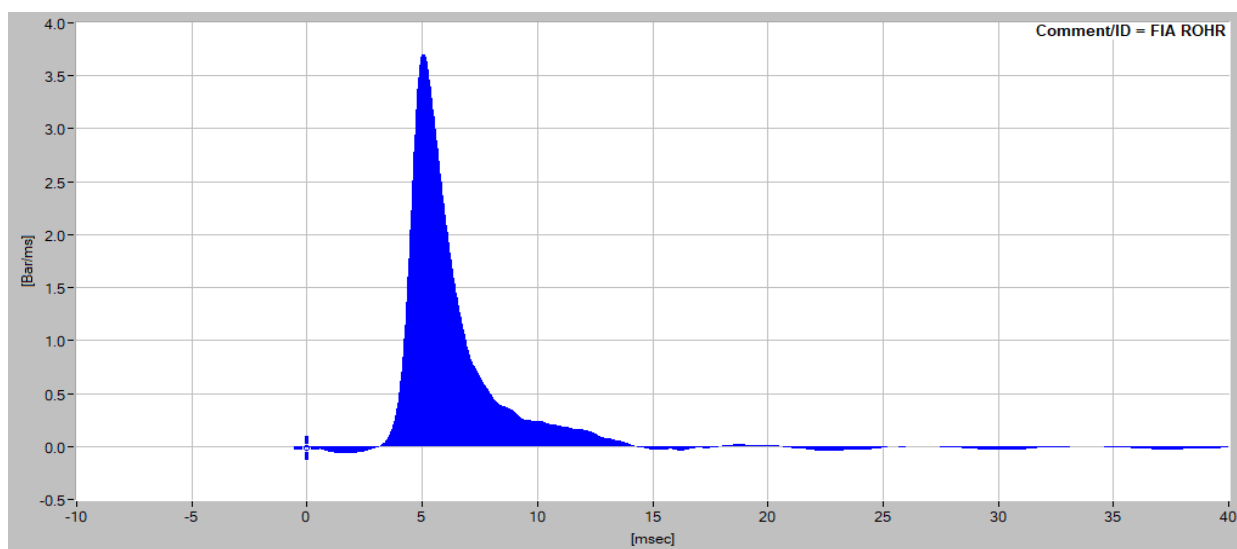
### 3.1.25. Μέτρηση μείγματος 3 – 85% m/m δείγματος 4 με 15% m/m δείγματος 14 (LCO)

Πίνακας 43. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 3.

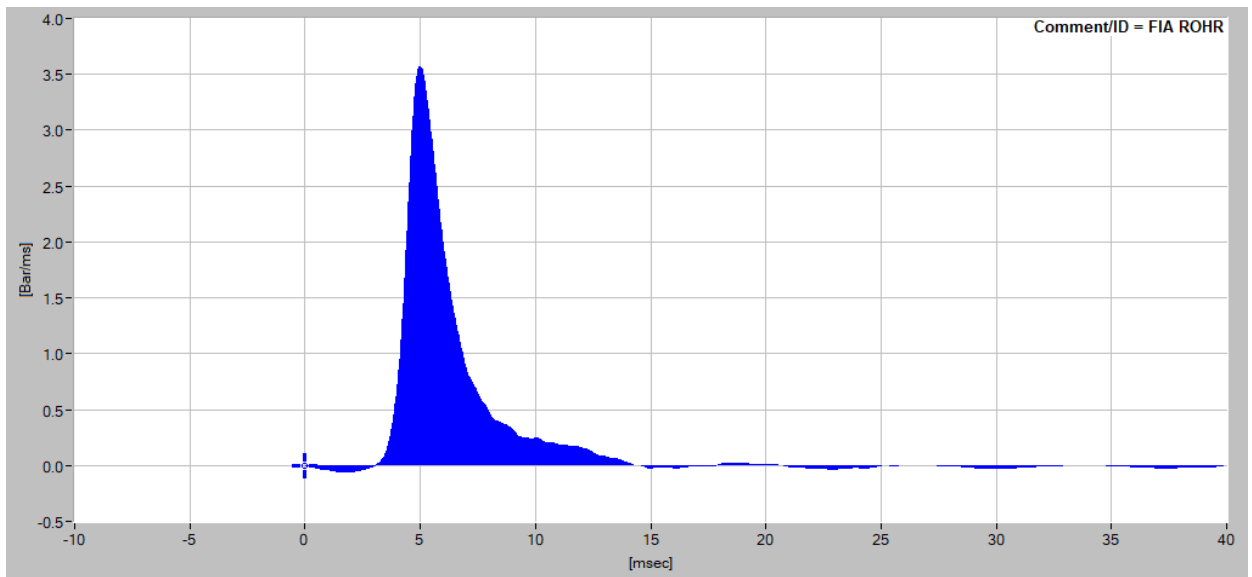
Μείγμα 3	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,33	4,72	8,92	12,70	0,39	4,20	3,78	3,70	5,14	8,11	39,7
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,23	4,62	9,00	12,85	0,39	4,38	3,85	3,57	5,08	8,12	40,8

Πίνακας 44. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 3.

Μείγμα 3	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,24	4,42	4,61	4,83	8,63	9,21	11,54	13,86	0,36	0,42	3,94	4,46	2,83	4,73	3,39	4,01	5,08	5,20	8,02	8,20
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,15	4,31	4,51	4,73	8,71	9,29	11,69	14,01	0,36	0,42	4,11	4,65	2,90	4,80	3,27	3,87	5,02	5,14	8,03	8,21



Διάγραμμα 50. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 3 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 51. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 3 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

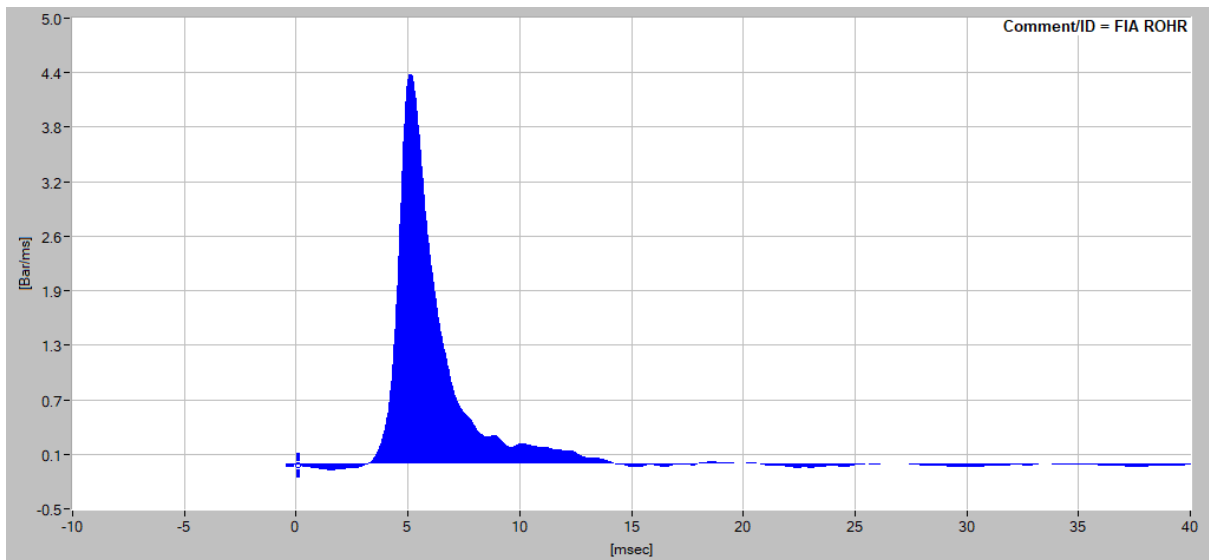
### 3.1.26. Μέτρηση μείγματος 4 – 80% m/m δείγματος 2 με 20% m/m δείγματος 14 (LCO)

Πίνακας 45. Αποτελέσματα πρώτης μέτρησης του μείγματος 4.

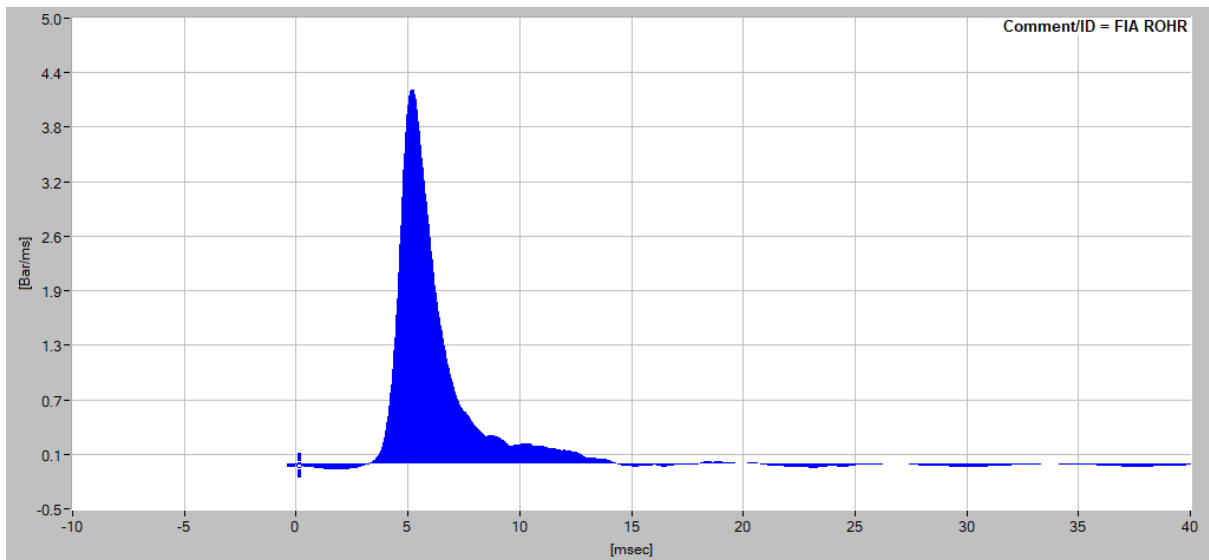
Μείγμα 4	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,40	4,80	8,75	12,91	0,40	3,96	4,16	4,39	5,22	8,43	38,8
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,39	4,78	8,81	12,95	0,39	4,03	4,14	4,20	5,24	8,39	39,0

Πίνακας 46. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 4.

Μείγμα 4	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,31	4,49	4,69	4,91	8,47	9,03	11,75	14,07	0,37	0,43	3,71	4,21	3,21	5,11	4,02	4,76	5,16	5,28	8,34	8,52
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,30	4,48	4,67	4,89	8,53	9,09	11,79	14,11	0,36	0,42	3,78	4,28	3,19	5,09	3,84	4,56	5,18	5,30	8,30	8,48



Διάγραμμα 52. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 4 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 53. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 4 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

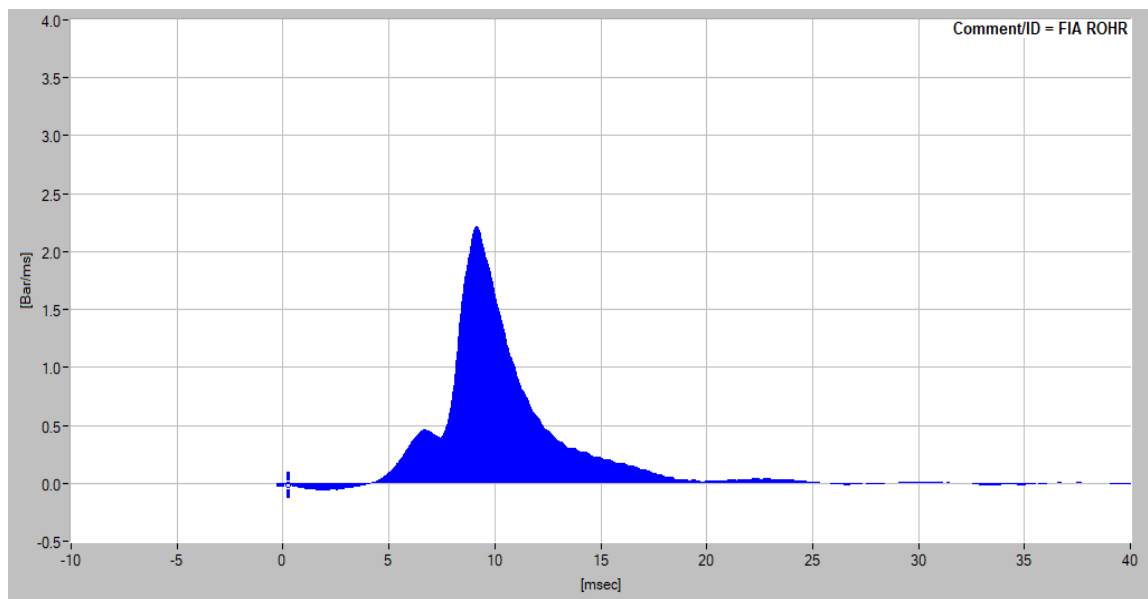
### 3.1.27. Μέτρηση μείγματος 5 – 90% m/m δείγματος 6 με 10% m/m δείγματος Slurry FCC

Πίνακας 47. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 5.

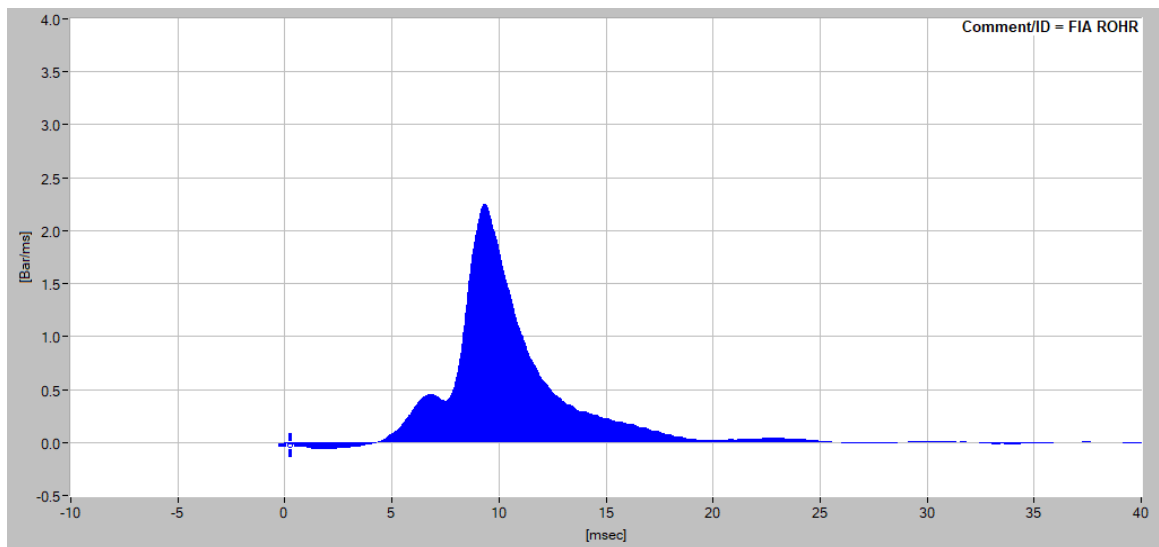
Μείγμα 5	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	6,25	7,97	14,25	21,42	1,72	6,27	7,17	2,22	9,22	7,85	15,7
2 <sup>η</sup> μέτρηση	6,36	8,11	14,39	22,22	1,75	6,28	7,83	2,25	9,41	7,92	15,0

Πίνακας 48. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 5.

Μείγμα 5	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
	1 <sup>η</sup> μέτρηση	6,13	6,37	7,79	8,15	13,79	14,71	20,26	22,58	1,59	1,85	5,88	6,66	6,22	8,12	2,03	2,41	8,87	9,57	7,76
2 <sup>η</sup> μέτρηση	6,23	6,49	7,92	8,30	13,93	14,85	21,06	23,38	1,62	1,88	5,89	6,67	6,88	8,78	2,06	2,44	9,04	9,78	7,83	8,01



Διάγραμμα 54. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 5 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 55. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 5 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

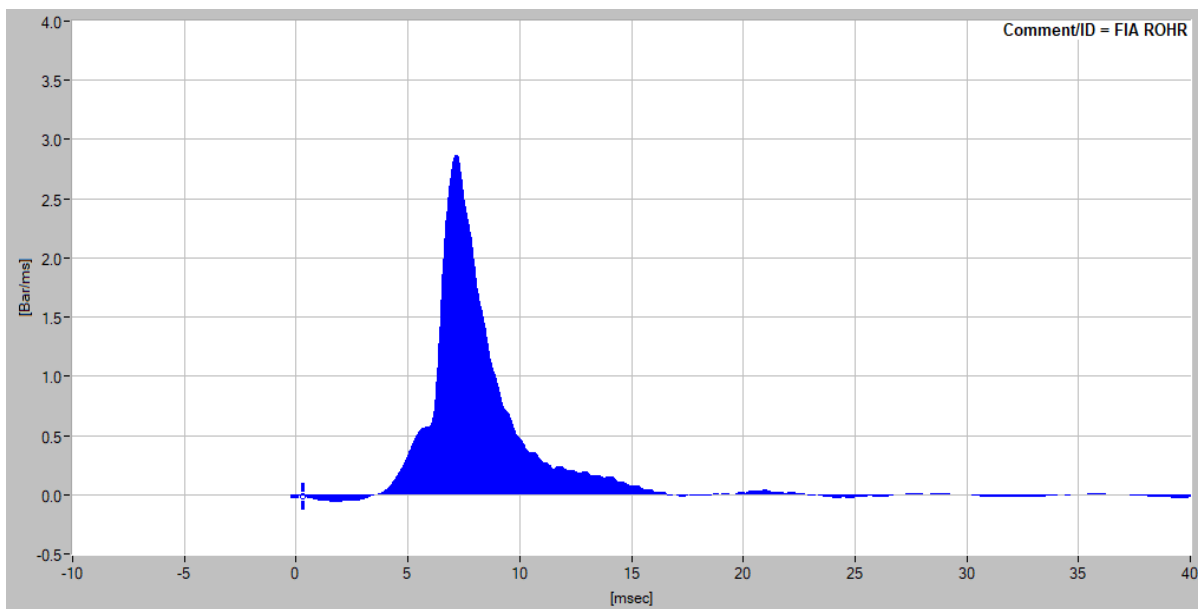
### 3.1.28. Μέτρηση μείγματος 6 – 95% m/m δείγματος 12 με 5% m/m δείγματος 14 (LCO)

Πίνακας 49. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 6.

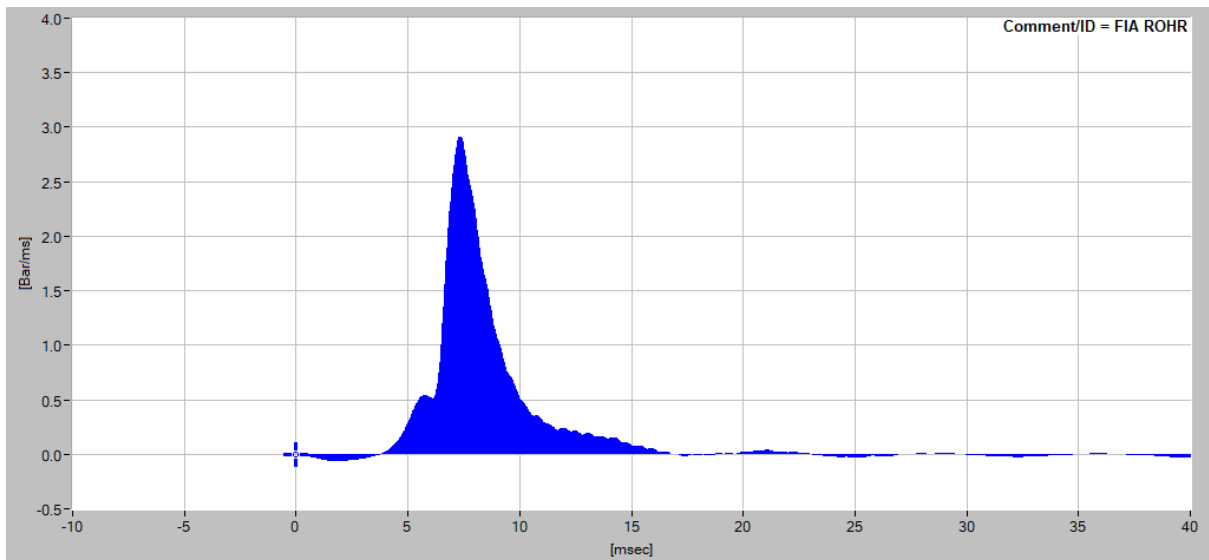
Μείγμα 6	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,33	6,48	11,18	15,85	1,14	4,71	4,67	2,88	7,27	7,56	24,0
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,39	6,57	11,27	16,27	1,18	4,70	5,00	2,91	7,35	7,60	23,4

Πίνακας 50. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 6.

Μείγμα 6	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,22	5,44	6,33	6,63	10,82	11,54	14,69	17,01	1,06	1,22	4,42	5,00	3,72	5,62	2,64	3,12	7,10	7,44	7,47	7,65
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,28	5,50	6,42	6,72	10,91	11,63	15,11	17,43	1,09	1,27	4,41	4,99	4,05	5,95	2,66	3,16	7,18	7,52	7,51	7,69



Διάγραμμα 56. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 6 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 57. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 6 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

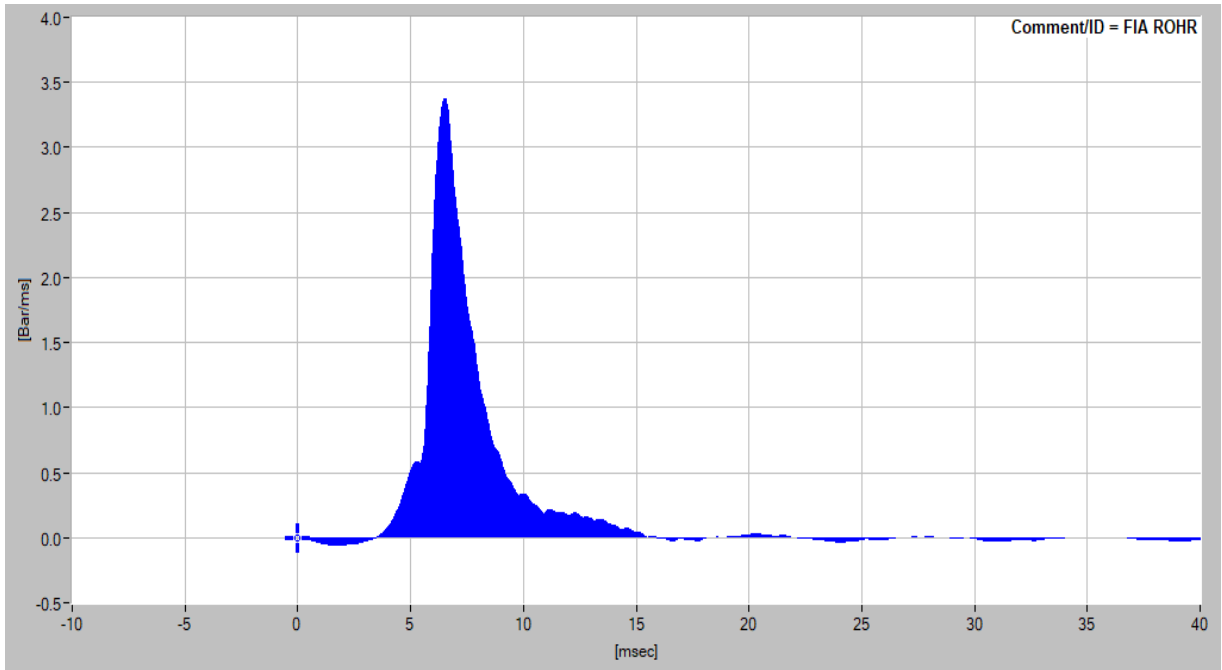
### 3.1.29. Μέτρηση μείγματος 7 – 95% m/m δείγματος 12 με 5% m/m δείγματος diesel

Πίνακας 51. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 7.

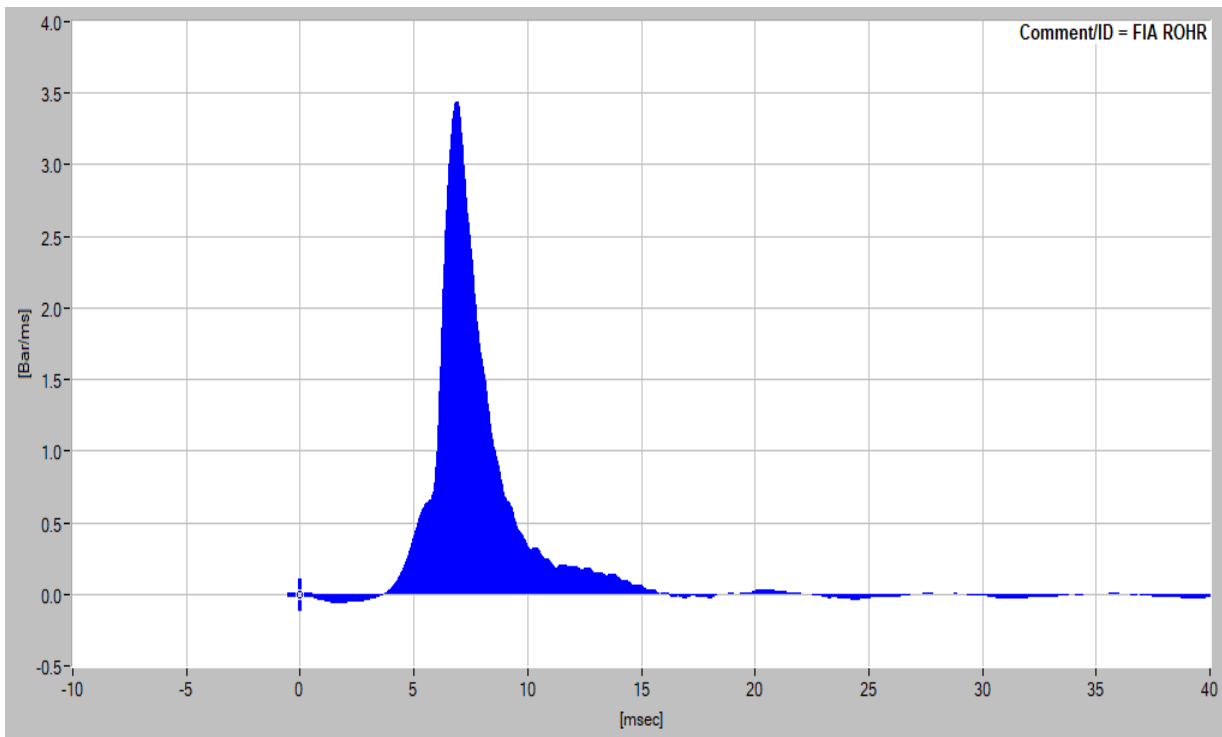
Μείγμα 7	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,00	5,96	10,17	14,41	0,96	4,21	4,24	3,38	6,60	7,75	27,8
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,20	6,21	10,35	14,49	1,01	4,14	4,14	3,44	6,93	7,90	25,9

Πίνακας 52. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 7.

Μείγμα 7	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,90	5,10	5,82	6,10	9,84	10,50	13,25	15,57	0,89	1,03	3,95	4,47	3,29	5,19	3,09	3,67	6,55	6,81	7,66	7,84
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,10	5,30	6,07	6,35	10,02	10,68	13,33	15,65	0,94	1,08	3,88	4,40	3,19	5,09	3,15	3,73	6,78	7,08	7,81	7,99



Διάγραμμα 58. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 7 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 59. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 7 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.



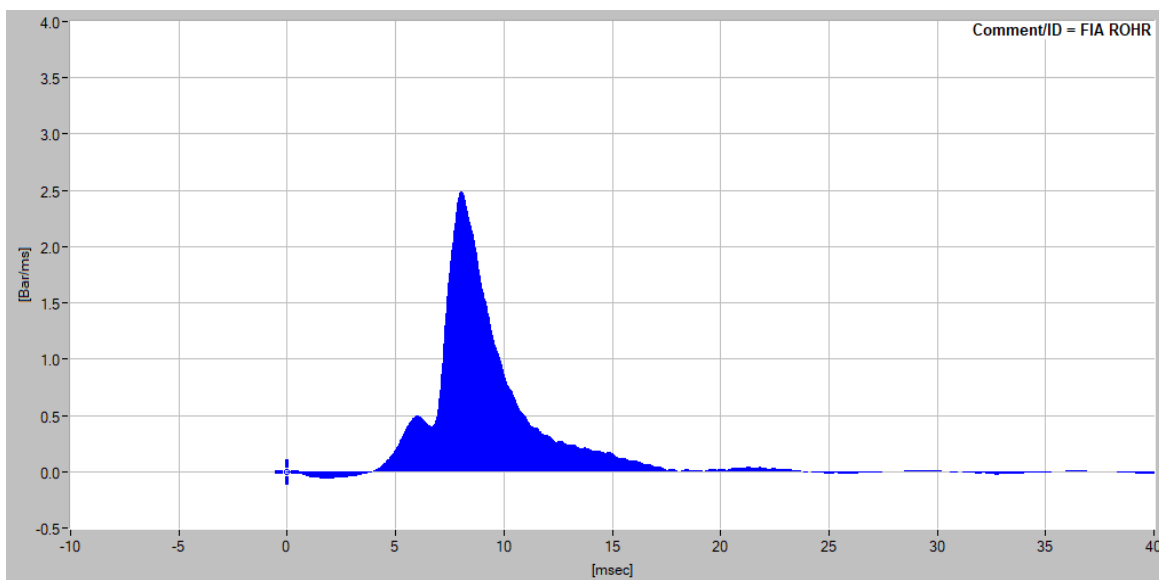
### 3.1.30. Μέτρηση μείγματος 8 – 80% m/m δείγματος 10 με 20% m/m δείγματος Slurry FCC

Πίνακας 53. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 8.

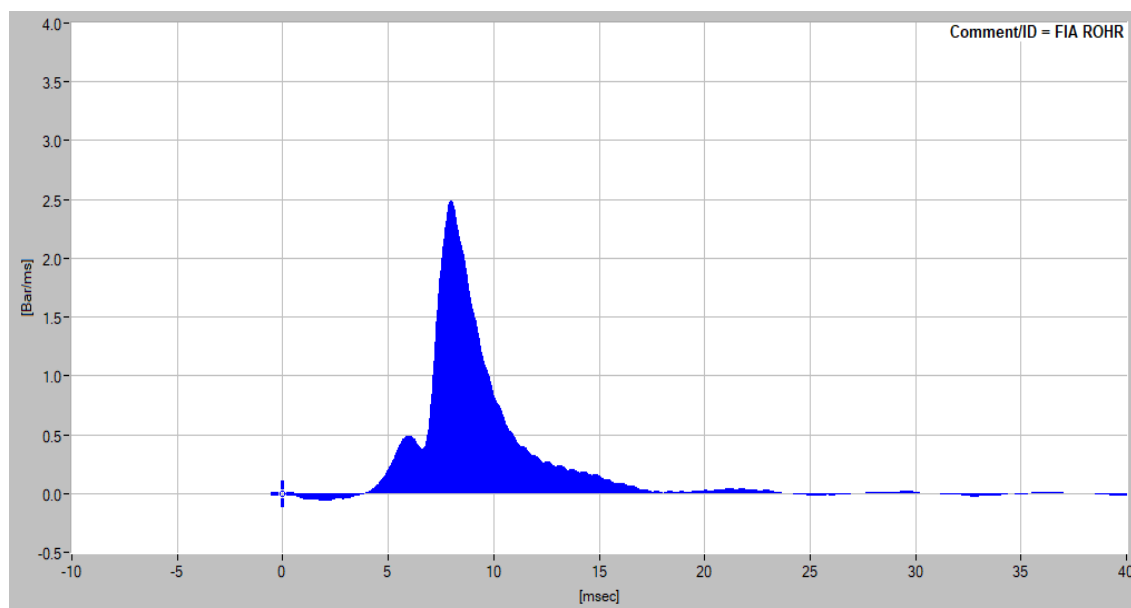
Μείγμα 8	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,59	7,11	12,67	19,39	1,51	5,57	6,71	2,49	8,04	7,47	20,0
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,62	7,12	12,67	20,25	1,49	5,55	7,58	2,48	8,03	7,46	20,0

Πίνακας 54. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 8.

Μείγμα 8	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	5,48	5,70	6,95	7,27	12,26	13,08	18,23	20,55	1,40	1,62	5,22	5,92	5,76	7,66	2,28	2,70	7,81	8,27	7,38	7,56
2 <sup>η</sup> μέτρηση	5,51	5,73	6,96	7,28	12,26	13,08	19,09	21,41	1,38	1,60	5,20	5,90	6,63	8,53	2,27	2,69	7,80	8,26	7,37	7,55



Διάγραμμα 60. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 8 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 61. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 8 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

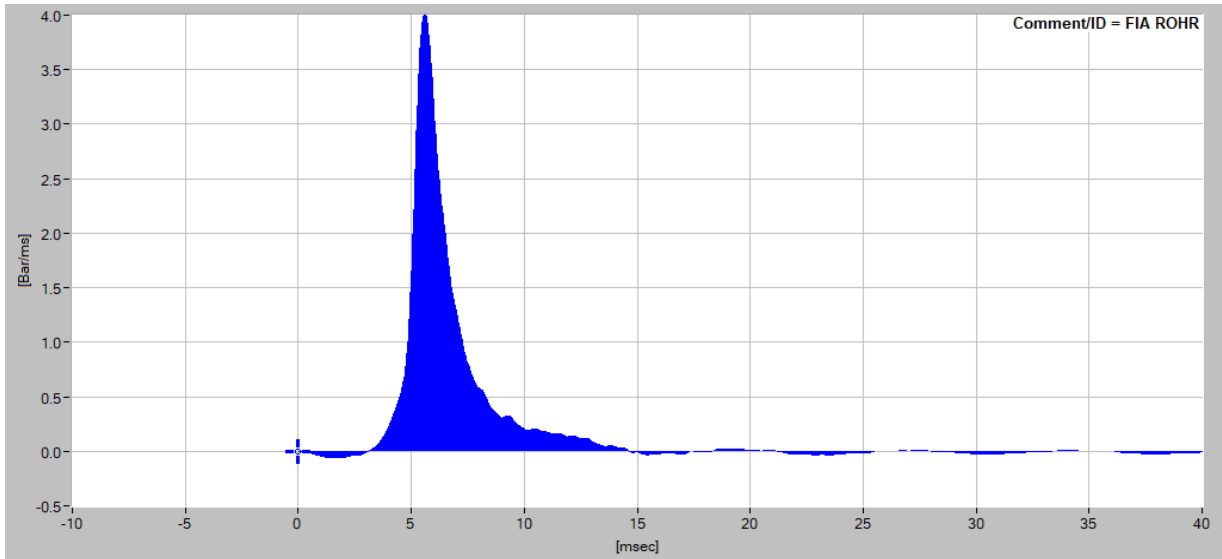
### 3.1.31. Μέτρηση μείγματος 9 – 80% m/m δείγματος 7 με 20% m/m δείγματος 3

Πίνακας 55. Αποτελέσματα μετρήσεων του μείγματος 9.

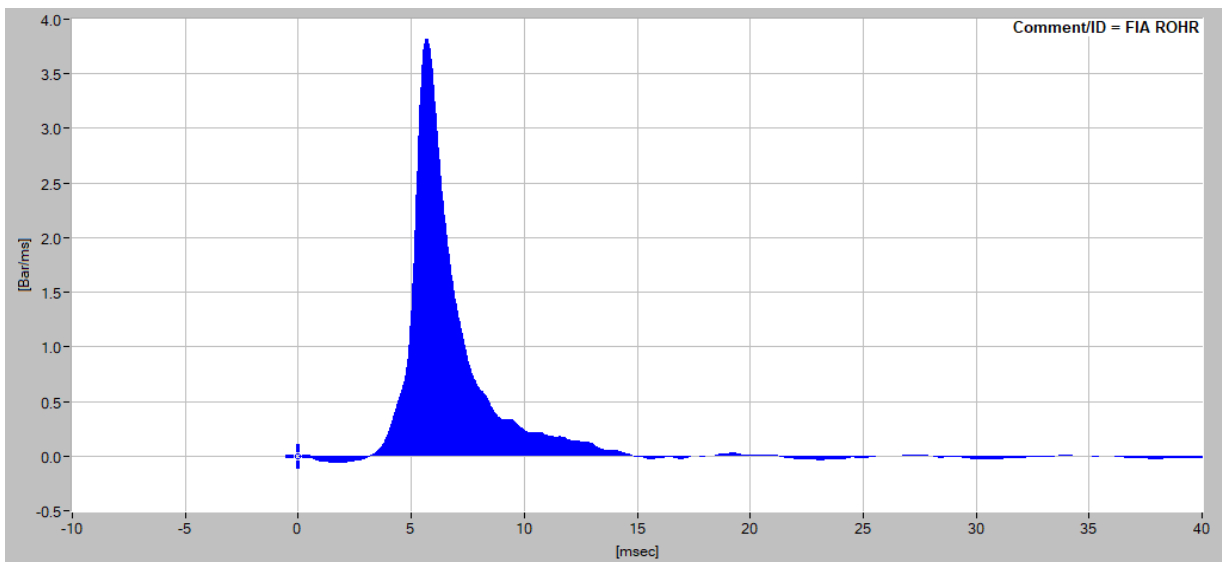
Μείγμα 9	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,57	5,24	9,12	13,00	0,66	3,88	3,88	4,01	5,69	7,69	34,2
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,54	5,22	9,35	13,22	0,68	4,13	3,88	3,82	5,72	7,78	34,4

Πίνακας 56. Έλεγχος επαναληψιμότητας των παραμέτρων του μείγματος 9.

Μείγμα 9	ID (ms)		MCD (ms)		EMC (ms)		EC (ms)		PCP (ms)		MCP (ms)		ABP (ms)		maxROHR (bar/ms)		PMR (ms)		AR (bar)	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1 <sup>η</sup> μέτρηση	4,48	4,66	5,12	5,36	8,83	9,41	11,84	14,16	0,61	0,71	3,64	4,12	2,93	4,83	3,67	4,35	5,61	5,77	7,60	7,78
2 <sup>η</sup> μέτρηση	4,45	4,63	5,10	5,34	9,05	9,65	12,06	14,38	0,63	0,73	3,87	4,39	2,93	4,83	3,50	4,14	5,64	5,80	7,69	7,87



Διάγραμμα 62. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 9 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά την πρώτη μέτρηση.



Διάγραμμα 63. Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του μείγματος 9 σε σχέση με τον χρόνο (ROHR – Time), κατά τη δεύτερη μέτρηση.

### 3.2. Σχετικά με τη συσκευή Stabinger Viscometer 3000

Με τη συσκευή Stabinger Viscometer 3000 της Anton Paar προσδιορίστηκε το δυναμικό και κινηματικό ιξώδες και η πυκνότητα όλων των δειγμάτων από το 1 μέχρι και το 14, καθώς επίσης του δείγματος Slurry FCC και του δείγματος diesel. Οι ιδιότητες αυτές προσδιορίστηκαν και για όλα τα μείγματα από το 1 έως και το 9. Ακολουθούν οι μετρήσεις του κινηματικού ιξώδους (που είναι πιο σημαντικό από το δυναμικό, αφού αναφέρεται και στις προδιαγραφές του προτύπου ISO 8217) σε cSt (ή mm<sup>2</sup>/s) και της πυκνότητας σε g/cm<sup>3</sup> όλων των δειγμάτων και μειγμάτων, σε θερμοκρασίες των 50, 60, 70 και 80 °C (στο δείγμα 14 – LCO και στο δείγμα diesel οι μετρήσεις έγιναν στους 15, 40 και 50 °C).

Η σχέση του κινηματικού ιξώδους και της θερμοκρασίας ενός υπολειμματικού καυσίμου, σύμφωνα με τον νόμο του Walther παρουσιάζεται γραφικά (στον κάθετο άξονα βρίσκεται ο διπλός λογάριθμος του κινηματικού ιξώδους του εκάστοτε δείγματος ή μείγματος και στον οριζόντιο ο λογάριθμος της θερμοκρασίας, σε Kelvin).

Εκτός από αυτά, μπορεί να υπολογιστεί και ο δείκτης αρωματικότητας CCAI κάθε καυσίμου προς ανάλυση, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.9, βλ. παράγραφο 1.7. Γίνεται αντιληπτό ότι μοναδικός άγνωστος αποτελεί η πυκνότητα του εκάστοτε καυσίμου στους 15 °C. Από τη στιγμή που είναι γνωστή η τιμή της πυκνότητας στους 50 °C, μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της στους 15 °C, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho_{15\text{ }^{\circ}\text{C}} = \rho_{50\text{ }^{\circ}\text{C}} + k * (50 - 15)$$

όπου:  $\rho_{15\text{ }^{\circ}\text{C}}$  είναι η πυκνότητα του καυσίμου στους 15 °C

$\rho_{50\text{ }^{\circ}\text{C}}$  είναι η πυκνότητα του καυσίμου στους 50 °C

k είναι ο συντελεστής διόρθωσης

Ο συντελεστής διόρθωσης k είναι γνωστός για αρκετές τιμές πυκνότητας, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 57).

Πίνακας 57. Αναγωγή της τιμής της πυκνότητας ενός καυσίμου στους 15 °C.

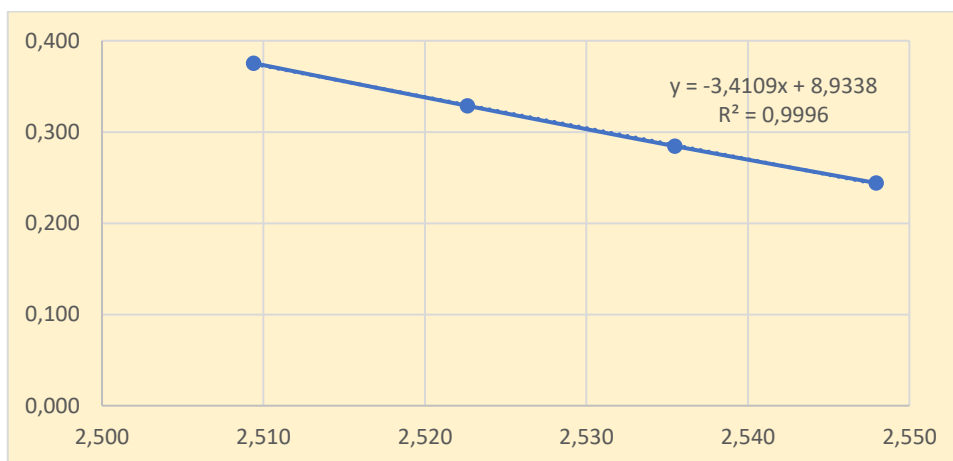
Πυκνότητα στους 15 °C (g/cm <sup>3</sup> )	Συντελεστής διόρθωσης ανά 1 °C
0,7422 – 0,7534	0,00079
0,7535 – 0,7646	0,00077
0,7647 – 0,7757	0,00076
0,7758 – 0,7866	0,00074
0,7867 – 0,7984	0,00072
0,7985 – 0,8020	0,00070
0,8021 – 0,8279	0,00068
0,8280 - 0,8594	0,00067
0,8595 - 0,9245	0,00065
0,9246 - 1,0243	0,00063
1,0244 - 1,0742	0,00061
1,0743 - 1,1241	0,00059

Στους πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα για τα δείγματα από το 1 μέχρι και το 14, καθώς επίσης του δείγματος Slurry FCC και του δείγματος diesel και για τα μείγματα από το 1 έως και το 9.

### 3.2.1. Δείγμα 1

Πίνακας 58. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 1.

Δείγμα 1				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	235,61	134,62	83,457	56,064
Ποκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9205	0,9139	0,9073	0,9006



Διάγραμμα 64. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 1.

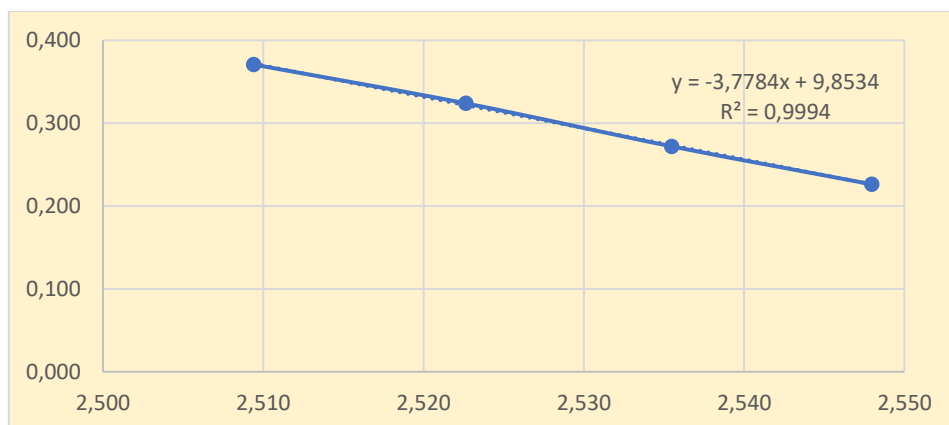
Πίνακας 59. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 1.

Δείγμα 1	
Ποκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	942,55
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	235,61
<b>CCAI</b>	<b>809</b>

### 3.2.2. Δείγμα 2

Πίνακας 60. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 2.

Δείγμα 2				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	222,62	127,76	73,600	47,595
Ποκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9240	0,9178	0,9115	0,9051



Διάγραμμα 65. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 2.

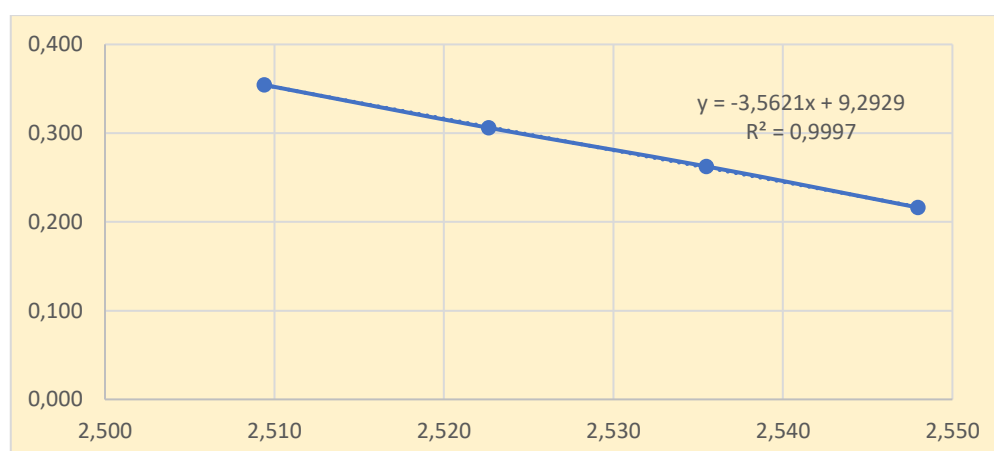
Πίνακας 61. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 2.

Δείγμα 2	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	946,05
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	222,62
<b>CCAI</b>	<b>813</b>

### 3.2.3. Δείγμα 3

Πίνακας 62. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 3.

Δείγμα 3				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	181,83	104,79	66,989	43,493
Πυκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9243	0,9182	0,9120	0,9055



Διάγραμμα 66. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 3.

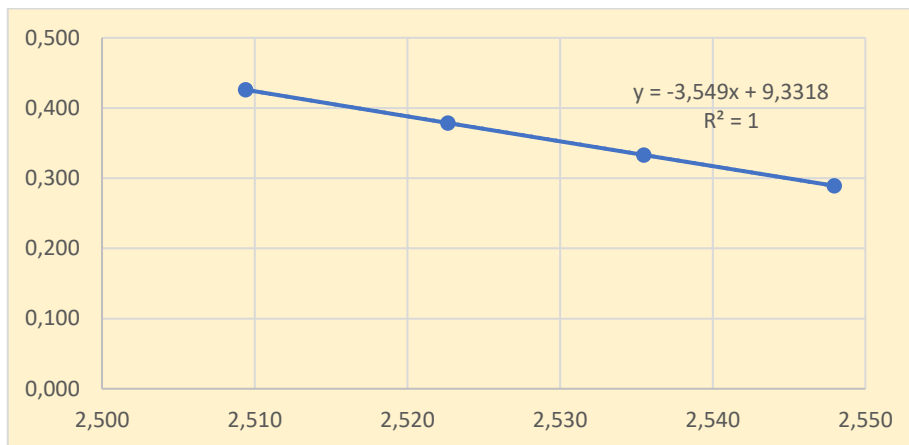
Πίνακας 63. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 3.

<b>Δείγμα 3</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	946,35
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	181,83
<b>CCAI</b>	<b>816</b>

### 3.2.4. Δείγμα 4

Πίνακας 64. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 4.

<b>Δείγμα 4</b>				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	463,80	245,73	141,63	87,661
Πυκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9387	0,9324	0,9262	0,9199



Διάγραμμα 67. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 4.

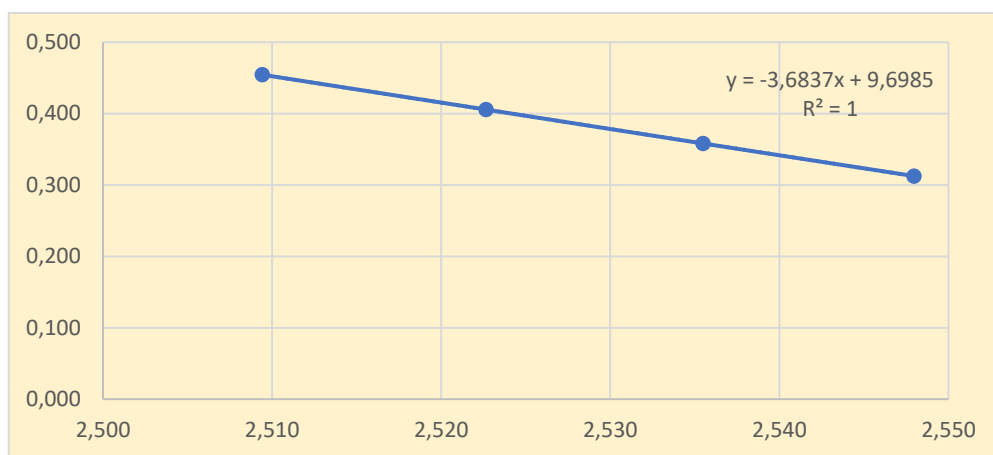
Πίνακας 65. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 4.

<b>Δείγμα 4</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	960,75
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	463,8
<b>CCAI</b>	<b>820</b>

### 3.2.5. Δείγμα 5

Πίνακας 66. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 5.

<b>Δείγμα 5</b>				
<b>Θερμοκρασία, °C</b>	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	704,28	350,24	190,45	112,56
<b>Ποκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9843	0,9779	0,9715	0,9651



Διάγραμμα 68. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 5.

Πίνακας 67. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 5.

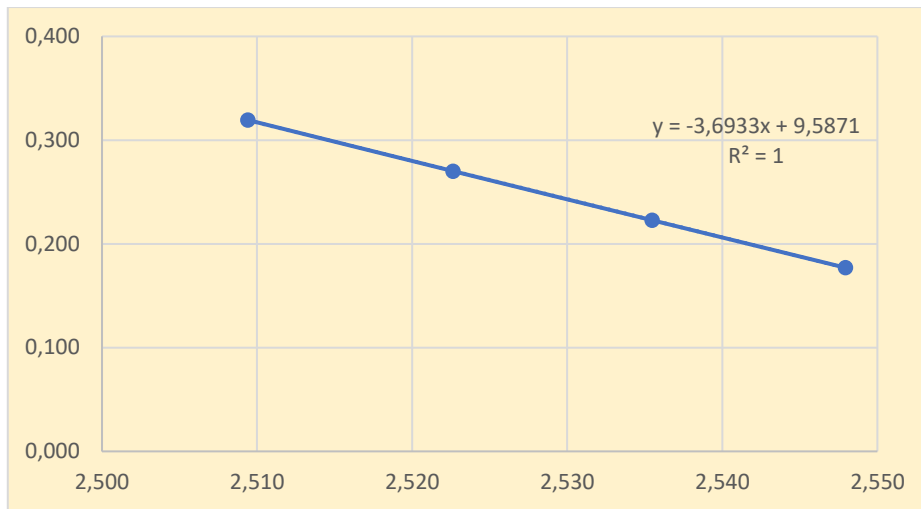
<b>Δείγμα 5</b>	
Ποκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	1006,35
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	704,28
<b>CCAI</b>	<b>862</b>

### 3.2.6. Δείγμα 6

Πίνακας 68. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 6.

<b>Δείγμα 6</b>				
<b>Θερμοκρασία, °C</b>	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	121,33	72,189	46,098	31,152
<b>Ποκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9639	0,9574	0,9510	0,9444





Διάγραμμα 69. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 6.

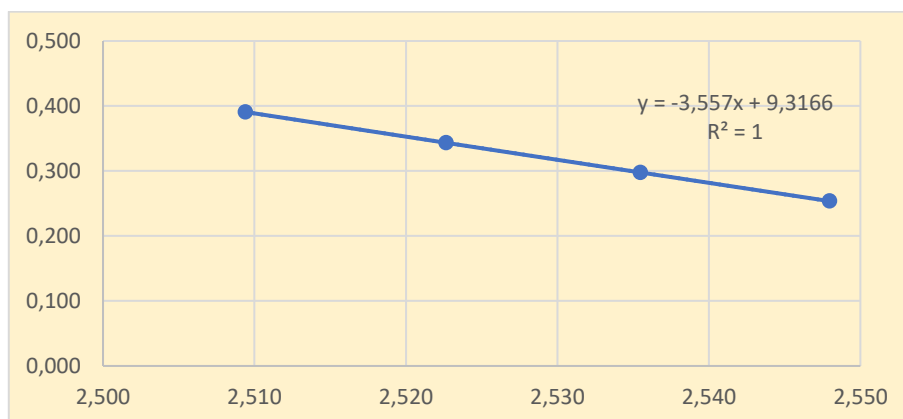
Πίνακας 69. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 6.

<b>Δείγμα 6</b>	
Ποκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	985,95
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	121,33
<b>CCAI</b>	<b>860</b>

### 3.2.7. Δείγμα 7

Πίνακας 70. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 7.

<b>Δείγμα 7</b>				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	287,08	159,63	95,851	61,422
Ποκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9595	0,9531	0,9468	0,94



Διάγραμμα 70. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 7.

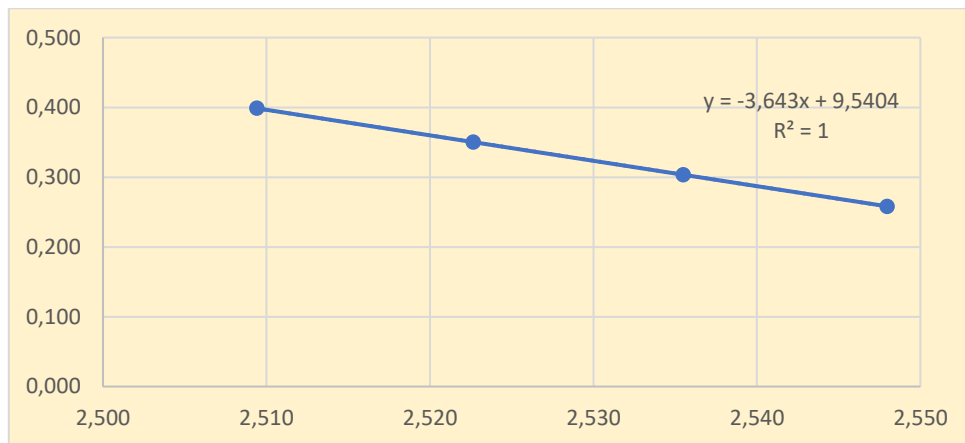
Πίνακας 71. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 7.

<b>Δείγμα 7</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	981,55
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	287,08
<b>CCAI</b>	<b>846</b>

### 3.2.8. Δείγμα 8

Πίνακας 72. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 8.

<b>Δείγμα 8</b>				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	318,89	173,16	101,98	64,238
Πυκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9700	0,9635	0,9571	0,9505



Διάγραμμα 71. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 8.

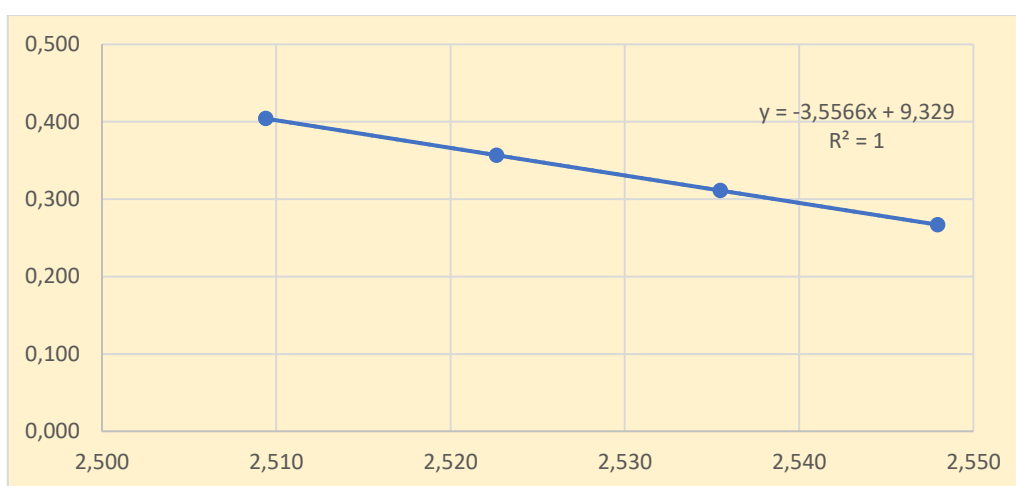
Πίνακας 73. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 8.

<b>Δείγμα 8</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	992,05
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	318,89
<b>CCAI</b>	<b>855</b>

### 3.2.9. Δείγμα 9

Πίνακας 74. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 9.

<b>Δείγμα 9</b>				
<b>Θερμοκρασία, °C</b>	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	342,55	187,24	110,76	69,941
<b>Πυκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9589	0,9527	0,9464	0,9399



Διάγραμμα 72. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 9.

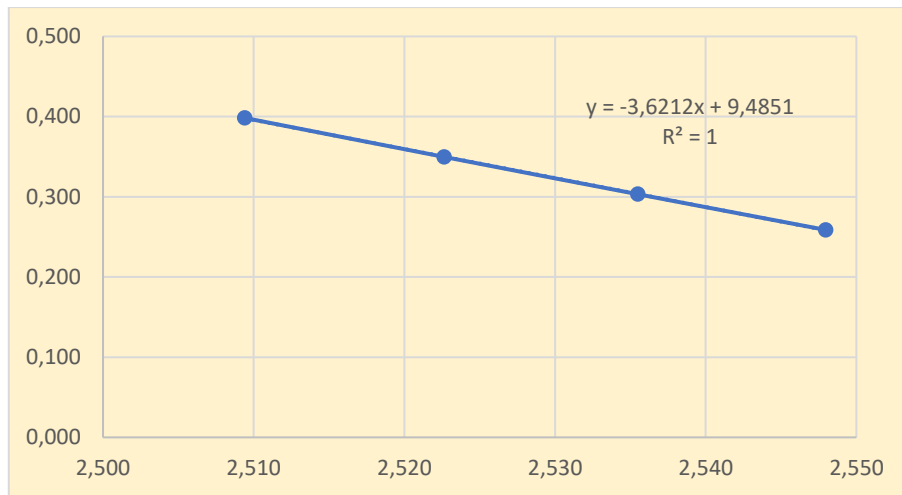
Πίνακας 75. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 9.

<b>Δείγμα 9</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	980,95
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	342,55
<b>CCAI</b>	<b>843</b>

### 3.2.10. Δείγμα 10

Πίνακας 76. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 10.

<b>Δείγμα 10</b>				
<b>Θερμοκρασία, °C</b>	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	317,18	172,03	101,71	64,512
<b>Πυκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9687	0,9625	0,9561	0,9491



Διάγραμμα 73. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 10.

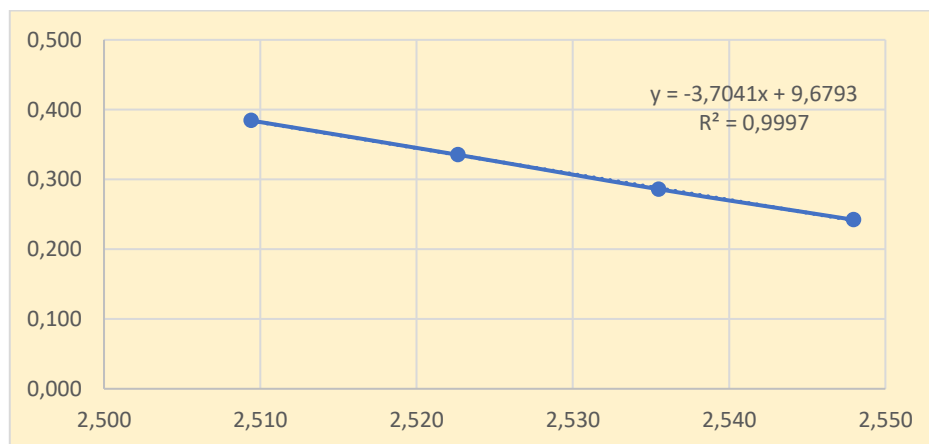
Πίνακας 77. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 10.

Δείγμα 10	
Ποκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	990,75
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	317,18
<b>CCAI</b>	<b>854</b>

### 3.2.11. Δείγμα 11

Πίνακας 78. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 11.

Δείγμα 11				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	264,32	145,32	84,780	55,104
<b>Ποκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9595	0,953	0,9459	0,9383



Διάγραμμα 74. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 11.

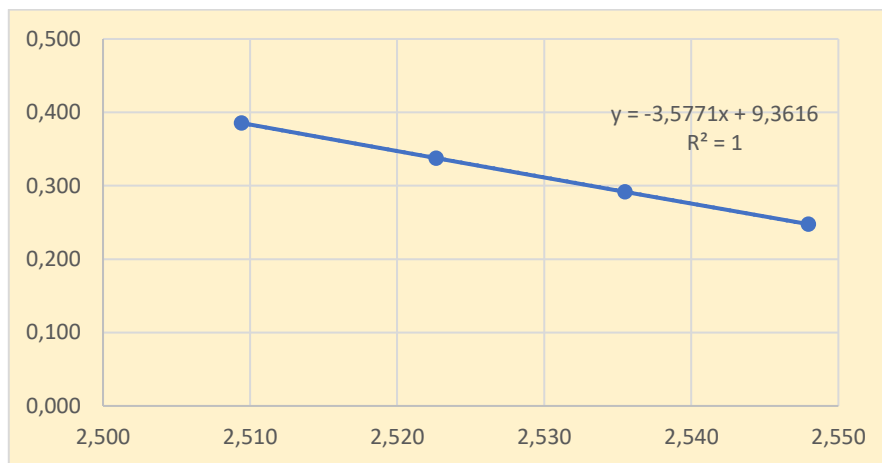
Πίνακας 79. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 11.

<b>Δείγμα 11</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	981,55
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	264,32
<b>CCAI</b>	<b>847</b>

### 3.2.12. Δείγμα 12

Πίνακας 80. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 12.

<b>Δείγμα 12</b>				
<b>Θερμοκρασία, °C</b>	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	268,39	149,39	90,005	58,035
<b>Πυκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9663	0,9598	0,9534	0,9466



Διάγραμμα 75. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 12.

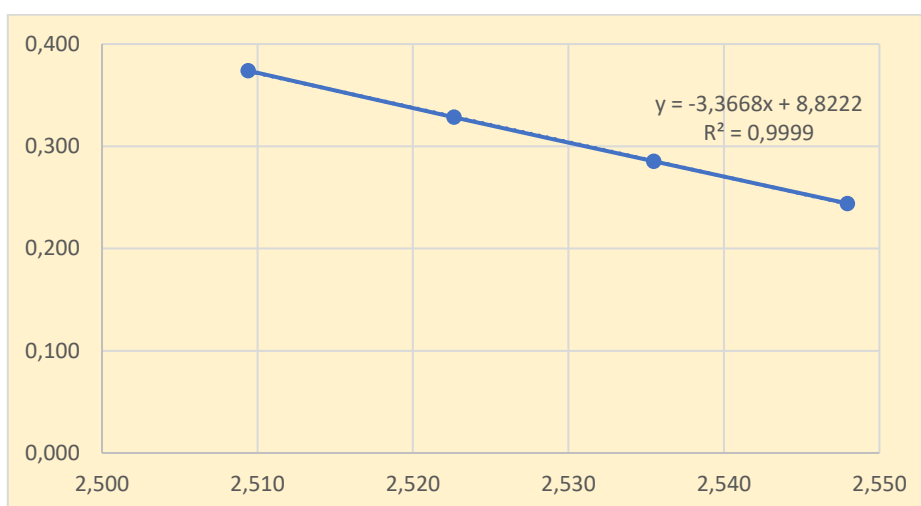
Πίνακας 81. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 12.

<b>Δείγμα 12</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	988,35
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	268,39
<b>CCAI</b>	<b>853</b>

### 3.2.13. Δείγμα 13

Πίνακας 82. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 13.

Δείγμα 13				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	231,25	134,12	84,226	56,053
Ποκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9310	0,9247	0,9184	0,9119



Διάγραμμα 76. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα 13.

Πίνακας 83. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 13.

Δείγμα 13	
Ποκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	953,05
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	231,25
<b>CCAI</b>	<b>820</b>

### 3.2.14. Δείγμα 14 (LCO)

Πίνακας 84. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα 14 (LCO).

Δείγμα 14 (LCO)			
Θερμοκρασία, °C	15	40	50
Κινηματικό ιξώδες, cSt	5,6408	2,9805	2,4192
Ποκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9232	0,9061	0,8982

Για το δείγμα 14 (LCO) δεν παριστάνεται γραφικά η σχέση μεταξύ του διπλού λογαρίθμου του κινηματικού ιξώδους του (στον κάθετο άξονα) και του λογαρίθμου της θερμοκρασίας, σε

Kelvin (στον οριζόντιο άξονα), διότι ο διπλός λογάριθμος του κινηματικού ιξώδους του από κάποιες τιμές της θερμοκρασίας και πάνω λαμβάνει αρνητικές τιμές και ως εκ τούτου παραλείφθηκε σκόπιμα.

Τα αποτελέσματα για τον δείκτη αρωματικότητας του δείγματος 14, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

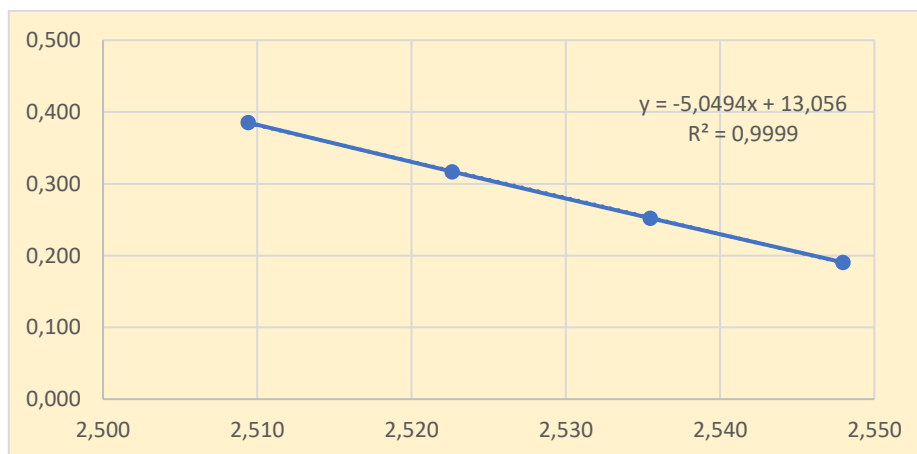
Πίνακας 85. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος 14 (LCO).

<b>Δείγμα 14</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	923,20
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	2,4192
<b>CCAI</b>	<b>883</b>

### 3.2.15. Δείγμα Slurry FCC

Πίνακας 86. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα Slurry FCC.

<b>Δείγμα Slurry FCC</b>				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	267,37	117,97	60,510	34,867
Πυκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	1,0469	1,0405	1,0342	1,0278



Διάγραμμα 77. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το δείγμα Slurry FCC.

Πίνακας 87. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του δείγματος Slurry FCC.

<b>Δείγμα Slurry FCC</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	1068,25
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	267,37
<b>CCAI</b>	<b>933</b>

### 3.2.16. Δείγμα diesel

Πίνακας 88. Αποτελέσματα μετρήσεων για το δείγμα diesel.

Δείγμα diesel			
Θερμοκρασία, °C	15	40	50
Κινηματικό ιξώδες, cSt	5,2650	2,8810	2,3591
Ποκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,8311	0,8139	0,8070

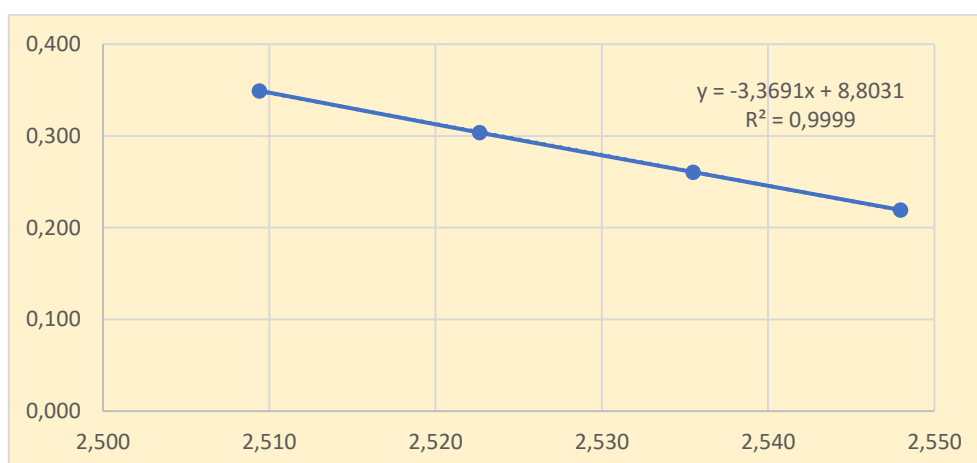
Επίσης, για το δείγμα diesel δεν παριστάνεται γραφικά η σχέση μεταξύ του διπλού λογαρίθμου του κινηματικού ιξώδους του (στον κάθετο άξονα) και του λογαρίθμου της θερμοκρασίας, σε Kelvin (στον οριζόντιο άξονα), διότι ο διπλός λογάριθμος του κινηματικού ιξώδους του από κάποιες τιμές της θερμοκρασίας και πάνω λαμβάνει αρνητικές τιμές και ως εκ τούτου παραλείφθηκε σκόπιμα.

Δεν υπολογίζεται ο δείκτης αρωματικότητας του δείγματος diesel, αφού δεν πρόκειται για υπολειμματικό καύσιμο.

### 3.2.17. Μείγμα 1

Πίνακας 89. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 1.

Μείγμα 1				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	171,01	102,07	65,694	44,676
Ποκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9203	0,9137	0,9072	0,9006



Διάγραμμα 78. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 1.



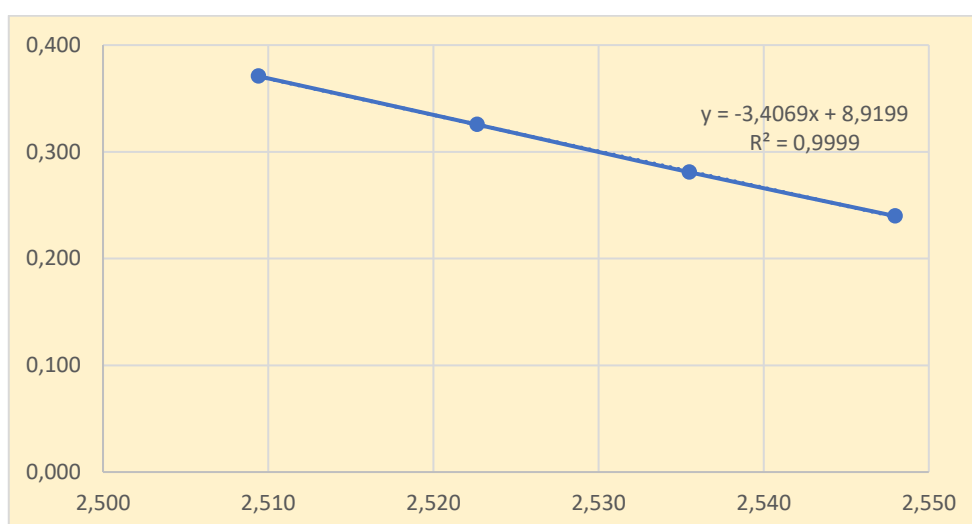
Πίνακας 90. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 1.

<b>Μείγμα 1</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	942,35
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	171,01
<b>CCAI</b>	<b>813</b>

### 3.2.18. Μείγμα 2

Πίνακας 91. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 2.

<b>Μείγμα 2</b>				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	222,6	130	80,512	53,883
Πυκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9254	0,9188	0,9122	0,9057



Διάγραμμα 79. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 2.

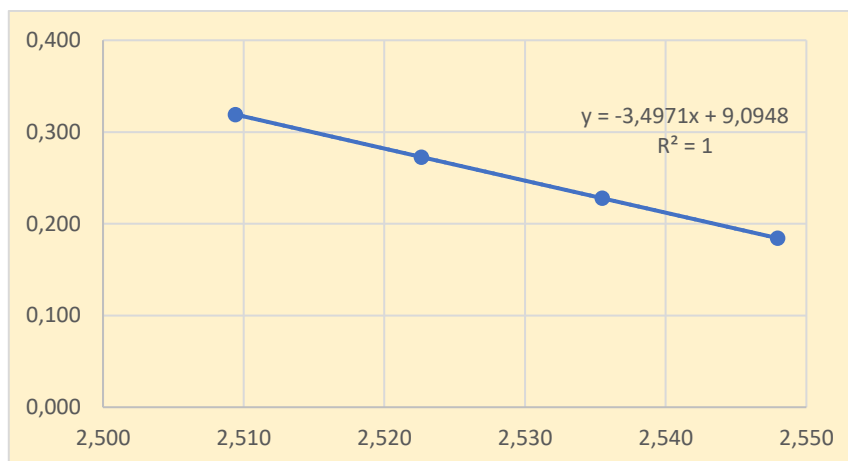
Πίνακας 92. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 2.

<b>Μείγμα 2</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	947,45
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	222,60
<b>CCAI</b>	<b>815</b>

### 3.2.19. Μείγμα 3

Πίνακας 93. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 3.

<b>Μείγμα 3</b>				
<b>Θερμοκρασία, °C</b>	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	120,96	74,075	48,248	33,077
<b>Πυκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9326	0,9263	0,92	0,9134



Διάγραμμα 80. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 3.

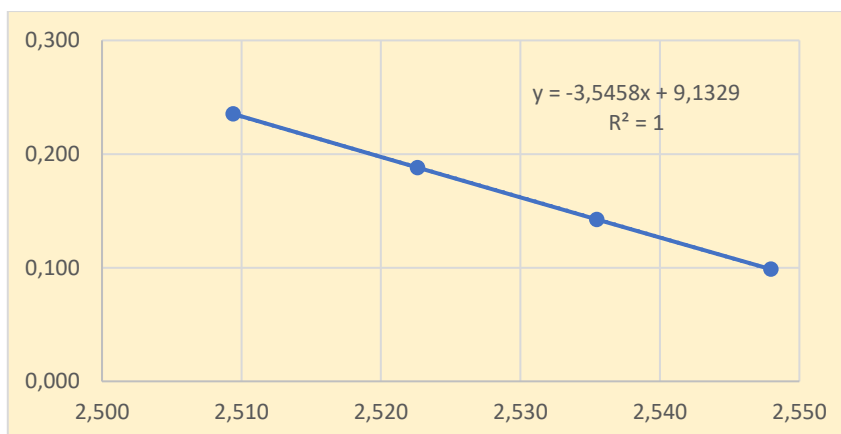
Πίνακας 94. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 3.

<b>Μείγμα 3</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	954,65
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	120,96
<b>CCAI</b>	<b>829</b>

### 3.2.20. Μείγμα 4

Πίνακας 95. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 4.

<b>Μείγμα 4</b>				
<b>Θερμοκρασία, °C</b>	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	51,686	34,126	23,744	17,29
<b>Πυκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9192	0,9126	0,906	0,8992



Διάγραμμα 81. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 4.

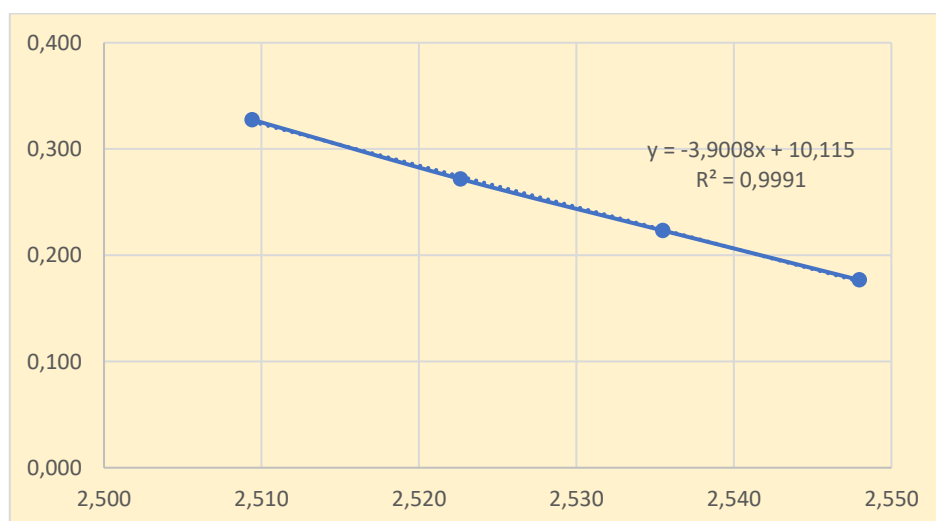
Πίνακας 96. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 4.

<b>Μείγμα 4</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	941,25
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	51,686
<b>CCAI</b>	<b>827</b>

### 3.2.21. Μείγμα 5

Πίνακας 97. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 5.

<b>Μείγμα 5</b>				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	133,03	73,355	46,295	31,086
Πυκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,972	0,9654	0,959	0,9523



Διάγραμμα 82. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 5.

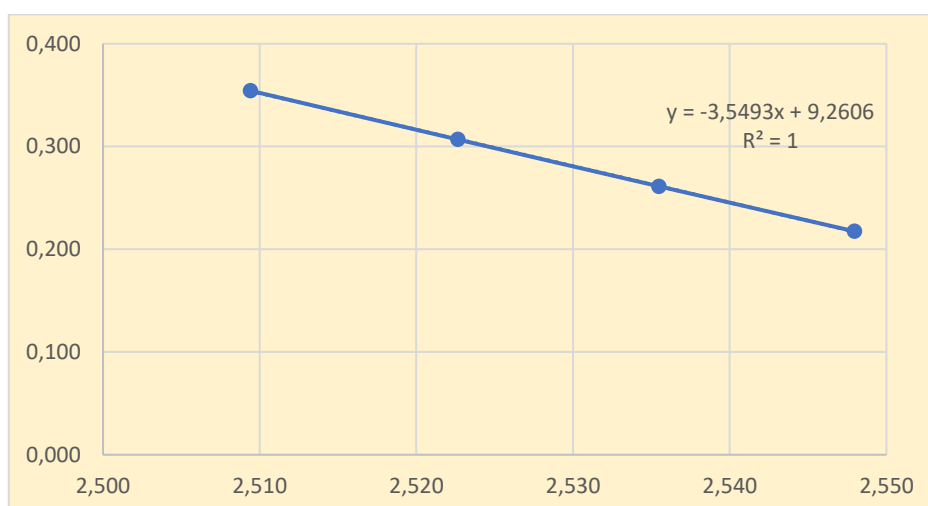
Πίνακας 98. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 5.

<b>Μείγμα 5</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	994,05
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	133,03
<b>CCAI</b>	<b>867</b>

### 3.2.22. Μείγμα 6

Πίνακας 99. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 6.

<b>Μείγμα 6</b>				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
Κινηματικό ιξώδες, cSt	181,75	105,73	66,145	43,973
Πυκνότητα, g/cm <sup>3</sup>	0,9637	0,9571	0,9508	0,944



Διάγραμμα 83. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 6.

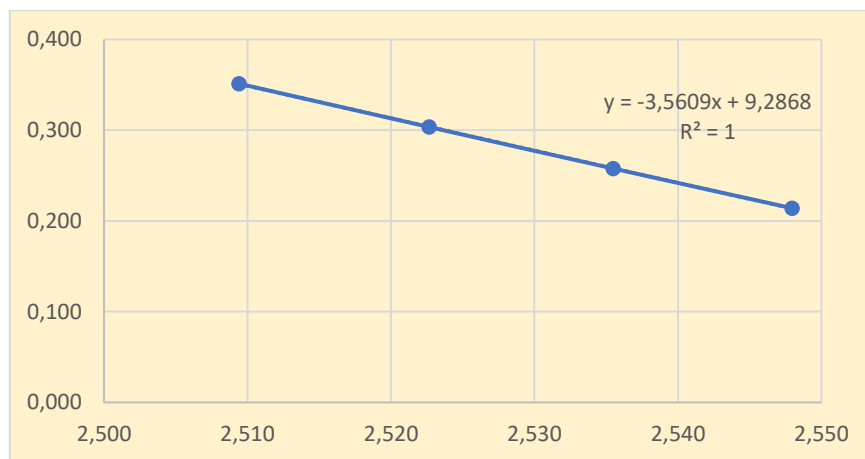
Πίνακας 100. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 6.

<b>Μείγμα 6</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	985,75
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	181,75
<b>CCAI</b>	<b>855</b>

### 3.2.23. Μείγμα 7

Πίνακας 101. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 7.

<b>Μείγμα 7</b>				
<b>Θερμοκρασία, °C</b>	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	175,23	102,11	63,945	42,645
<b>Ποκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9572	0,9508	0,9443	0,9376



Διάγραμμα 84. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 7.

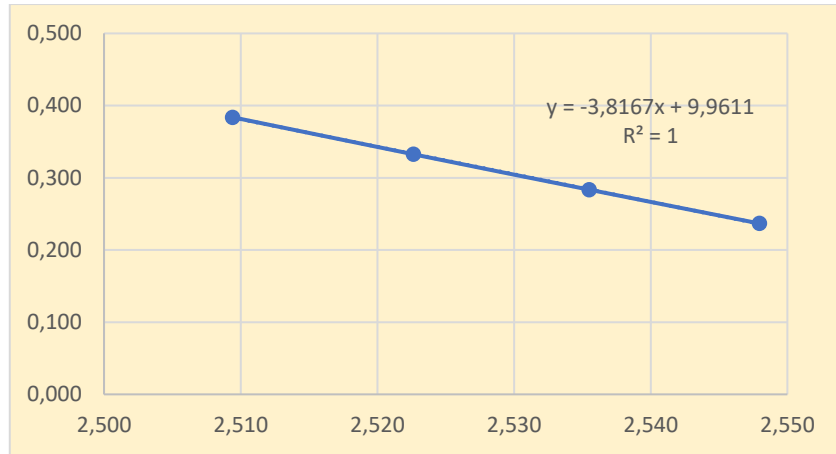
Πίνακας 102. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 7.

<b>Μείγμα 7</b>	
Ποκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	979,25
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	175,23
<b>CCAI</b>	<b>849</b>

### 3.2.24. Μείγμα 8

Πίνακας 103. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 8.

<b>Μείγμα 8</b>				
<b>Θερμοκρασία, °C</b>	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	262,45	140,73	82,718	52,342
<b>Ποκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9838	0,9772	0,9706	0,9638



Διάγραμμα 85. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 8.

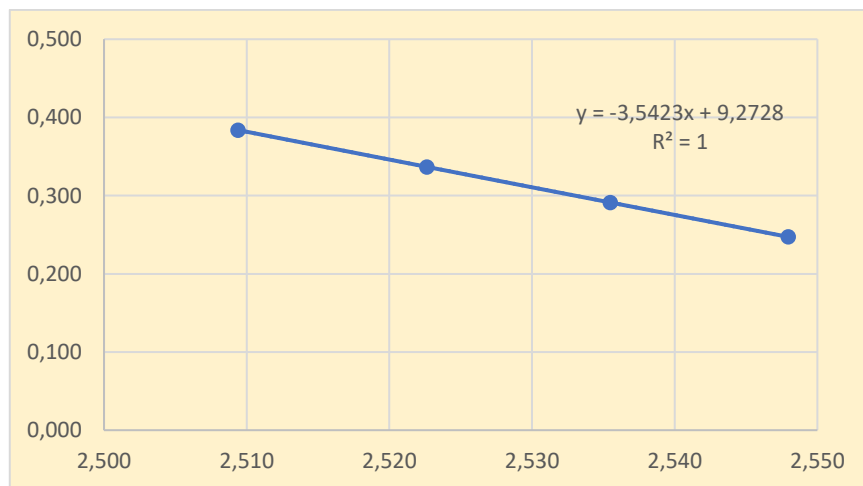
Πίνακας 104. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 8.

<b>Μείγμα 8</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	1005,85
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	262,45
<b>CCAI</b>	<b>871</b>

### 3.2.25. Μείγμα 9

Πίνακας 105. Αποτελέσματα μετρήσεων για το μείγμα 9.

<b>Μείγμα 9</b>				
Θερμοκρασία, °C	50	60	70	80
<b>Κινηματικό ιξώδες, cSt</b>	262,28	147,68	89,532	57,778
<b>Πυκνότητα, g/cm<sup>3</sup></b>	0,9523	0,946	0,9397	0,933



Διάγραμμα 86. Σχέση κινηματικού ιξώδους και θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον νόμο του Walther, για το μείγμα 9.

Πίνακας 106. Υπολογισμός του δείκτη CCAI του μείγματος 9.

<b>Μείγμα 9</b>	
Πυκνότητα στους 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	974,35
Κινηματικό ιξώδες στους 50 °C (cSt)	262,28
<b>CCAI</b>	<b>840</b>

### 3.3. Σχετικά με τη συσκευή Spectro Xeros της Ametek

Με τη συσκευή Spectro Xeros της Ametek προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα σε θείο των δειγμάτων μαζούτ, δηλαδή όλα τα δείγματα από το 1 μέχρι και το 13, καθώς επίσης προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα του δείγματος Slurry FCC σε θείο. Πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις για κάθε δείγμα, μέσω της συσκευής και επειδή και οι δύο τιμές σε όλα τα δείγματα ήταν παραπλήσιες, υπολογίστηκε ο μέσος όρος αυτών. Έτσι, στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 107), αναγράφεται η περιεκτικότητα του κάθε δείγματος σε θείο (σε ppm ή σε % m/m).

Πίνακας 107. Περιεκτικότητα δειγμάτων 1 έως και 13 και δείγματος Slurry FCC σε θείο.

<b>Δείγμα</b>	<b>Περιεκτικότητα σε θείο (% m/m)</b>
1	0,50
2	1,98
3	2,35
4	2,56
5	2,84
6	1,85
7	2,63
8	3,43
9	2,72
10	3,42
11	2,57
12	2,09
13	0,53
Slurry FCC	0,62

#### 4. Προβλήματα κατά τις μετρήσεις με τη συσκευή FIA – 100/FCA

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη συσκευή FIA – 100/FCA, προέκυψαν προβλήματα, που συσχετίστηκαν με τη χρήση καυσίμων κακής ποιότητας.

Κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων δείγματος επτά-μέθυλο-εννεανίου (HMN), παρουσιάστηκε δυσλειτουργία της συσκευής, ιδιαίτερα στο σύστημα φίλτρου που βρίσκεται εγκατεστημένο πριν την έξοδο των καυσαερίων. Τα στερεά σωματίδια των καυσαερίων του δείγματος εναποτέθηκαν στο φίλτρο αυτό (Εικόνα 22). Για την απομάκρυνση αυτών των στερεών σωματιδίων χρησιμοποιήθηκε λουτρό υπερήχων, πληρωμένο με διαλύτη (ξυλόλιο).



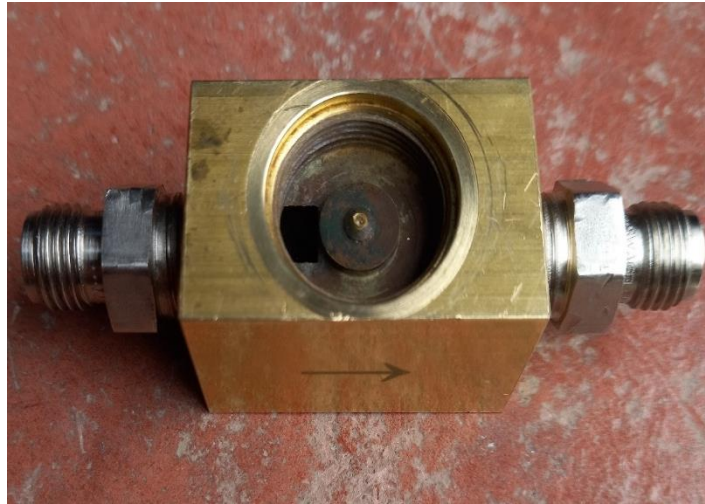
Εικόνα 22. Εναπόθεση στερεών σωματιδίων πάνω στο σύστημα φίλτρου της συσκευής FIA – 100/FCA.

Ωστόσο, κατά τη μέτρηση μείγματος κανονικού δεκαεξανίου ( $n\text{-C}_{16}$ ) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN), σύστασης 10% v/v  $n\text{-C}_{16}$  και 90% v/v AMN (με θεωρητικό αριθμό κετανίου 10), το πρόβλημα με την εναπόθεση στερεών σωματιδίων πάνω στο σύστημα φίλτρου έγινε εντονότερο, με αποτέλεσμα η μέτρηση να μην ολοκληρωθεί (η συσκευή σταμάτησε αυτόματα τη μέτρηση για λόγους προστασίας).

Η μέτρηση του επτά-μέθυλο-εννεανίου (HMN) ολοκληρώθηκε παρά της εμφάνισης του ίδιου προβλήματος. Κρίθηκε τελικά αναγκαία όμως η αντικατάσταση του συστήματος φίλτρου με νέο.

Ένα δεύτερο πρόβλημα που προέκυψε κατά τη μέτρηση του προαναφερθέντος μείγματος ήταν η εντόπιση σφάλματος στη λειτουργία της βαλβίδας εξάτμισης (exhaust valve), με αποτέλεσμα η συσκευή να μην επιτρέπει τη διεξαγωγή επιπλέον μετρήσεων. Το πρόβλημα με τη βαλβίδα εξάτμισης προέκυψε από την έντονη εκπομπή καυσαερίων, κατά την καύση του μείγματος, με αποτέλεσμα τη φραγή της πολύ μικρής οπής της βαλβίδας (Εικόνα 23). Κρίθηκε απαραίτητη η αντικατάσταση της βαλβίδας με νέα.

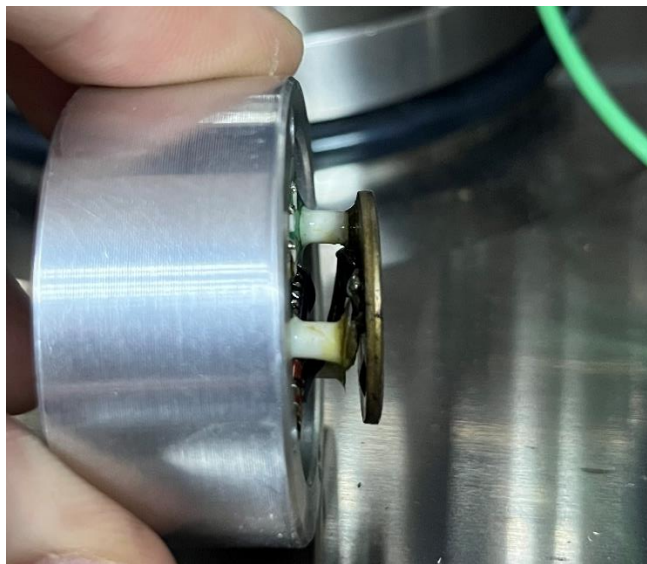




Εικόνα 23. Έμφραξη της οπής της βαλβίδας εξάτμισης (exhaust valve) της συσκευής FIA – 100/FCA.

Δεν ολοκληρώθηκαν επίσης οι μετρήσεις του δείγματος Slurry FCC και LCO (η μία από τις δύο), λόγω της κακής ποιότητας καύσης τους και την έντονη εκπομπή καυσαερίων που οδηγούσε στην έμφραξη του συστήματος φίλτρου.

Τέλος, άλλη δυσλειτουργία του συστήματος που παρατηρήθηκε ήταν η καταστροφή του αισθητήρα του ακροφυσίου (nozzle sensor), μετά από αρκετές μετρήσεις. Ο αισθητήρας αυτός αποτελείται από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα και μία πλάκα, τα οποία συνδέονται μέσω τριών στηριγμάτων. Για να λειτουργεί κανονικά, είναι απαραίτητο και τα τρία στηρίγματα να βρίσκονται σε επαφή με την πλάκα. Η Εικόνα 24 παρουσιάζει την εν λόγω βλάβη. Και πάλι κρίθηκε αναγκαία η αντικατάσταση του εξοπλισμού.



Εικόνα 24. Αποκόλληση των στηριγμάτων μεταξύ του ηλεκτρονικού κυκλώματος και της πλάκας του αισθητήρα ακροφυσίου της συσκευής FIA – 100/FCA.

## 5. Συμπεράσματα

### 5.1. Σχετικά με τις μετρήσεις στη συσκευή FIA – 100/FCA και στη SVM 3000

Για τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων των μετρήσεων από τις συσκευές FIA – 100/FCA και SVM 3000, είναι σημαντικό να παρουσιαστούν σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα τα αποτελέσματα των τιμών των παραμέτρων που μετρήθηκαν από τις συσκευές. Οι τιμές των παραμέτρων των δειγμάτων μεθυλοκυκλοεξανίου και επτά-μέθυλο-εννεανίου και των μειγμάτων κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), σχετικά με τις μετρήσεις από τη συσκευή FIA – 100/FCA φαίνονται στον Πίνακα 108.

Πίνακας 108. Αποτελέσματα των μετρήσεων της συσκευής FIA – 100/FCA σχετικά με τα δείγματα MCH και HMN και τα μείγματα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN).

Συσκευή		FIA – 100/FCA									
Δείγμα/ Παράμετροι	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
Δείγμα MCH	9,06	10,11	14,55	19,69	1,06	4,43	5,14	2,71	11,81	7,21	8,5
	8,97	9,99	13,84	18,44	1,02	3,85	4,60	3,32	11,58	8,04	8,8
Δείγμα HMN	5,72	9,41	39,92	42,81	3,69	30,51	2,89	0,23	8,15	3,58	10,4
	5,92	9,43	39,63	42,81	3,51	30,20	3,18	0,27	7,86	3,73	10,3
Μείγμα n-C <sub>16</sub> με AMN (A.K = 30)	6,47	8,02	16,57	28,04	1,55	8,55	11,47	1,86	9,80	7,75	15,4
	6,85	8,65	21,66	37,12	1,79	13,02	15,46	1,23	11,35	7,54	12,9
Μείγμα n-C <sub>16</sub> με HMN (A.K = 30)	4,25	4,98	7,96	13,02	0,73	2,98	5,05	6,52	5,43	8,53	36,8
	4,35	5,06	8,03	13,02	0,71	2,97	4,99	6,46	5,54	8,41	36,0
Μείγμα n-C <sub>16</sub> με AMN (A.K = 25)	7,16	9,17	31,19	41,84	2,01	22,03	10,65	0,66	11,12	6,97	11,1
	7,34	9,30	34,53	42,52	1,96	25,23	7,99	0,52	11,53	6,28	10,7
Μείγμα n-C <sub>16</sub> με HMN (A.K = 25)	4,67	5,83	9,07	13,92	1,16	3,24	4,85	5,24	6,50	8,28	28,9
	4,69	5,87	9,04	13,85	1,18	3,17	4,81	5,41	6,54	8,24	28,6
Μείγμα n-C <sub>16</sub> με AMN (A.K = 20)	8,03	8,54	37,70	43,31	0,50	29,16	5,61	0,29	8,85	1,35	13,3
	8,31	8,77	37,11	43,21	0,46	28,34	6,10	0,27	9,26	1,15	12,5
Μείγμα n-C <sub>16</sub> με HMN (A.K = 20)	5,29	7,34	13,77	23,87	2,04	6,44	10,09	2,79	8,13	7,58	18,8
	5,22	7,27	13,19	21,97	2,05	5,92	8,77	2,98	8,12	7,59	19,1

Οι τιμές των παραμέτρων όλων των δειγμάτων υπολειμματικών καυσίμων (από το 1 μέχρι και το 14) και όλων των μειγμάτων υπολειμματικών καυσίμων (από το 1 μέχρι και το 9), σχετικά και με τις δύο συσκευές φαίνονται στον Πίνακα 109.

Πίνακας 109. Αποτελέσματα των μετρήσεων των συσκευών FIA – 100/FCA και SVM 3000, σχετικά με τα δείγματα 1 έως και 14 και με τα μείγματα 1 έως και 9.

Συσκευή	FIA – 100/FCA											SVM 3000
	Δείγμα/ Παράμετροι	ID (ms)	MCD (ms)	EMC (ms)	EC (ms)	PCP (ms)	MCP (ms)	ABP (ms)	maxROHR (bar/ms)	PMR (ms)	AR (bar)	ECN
Δείγμα 1	4,68	5,18	9,24	13,37	0,50	4,06	4,13	2,97	6,01	7,99	34,8	809
	4,61	5,07	9,16	13,21	0,47	4,09	4,05	3,04	5,77	8,03	35,9	
Δείγμα 2	3,71	4,04	8,85	12,29	0,33	4,81	3,43	3,66	4,39	8,03	48,2	813
	3,74	4,07	8,85	12,32	0,34	4,78	3,47	3,68	4,42	8,01	47,8	
Δείγμα 3	3,61	3,94	8,87	12,30	0,32	4,93	3,44	3,63	4,28	7,99	49,6	816
	3,54	3,86	8,71	12,20	0,32	4,85	3,49	3,47	4,16	8,00	50,8	
Δείγμα 4	3,93	4,31	8,79	12,35	0,37	4,48	3,56	3,95	4,65	7,76	44,6	820
	3,95	4,36	8,88	12,45	0,41	4,52	3,57	3,93	4,66	7,77	44,0	
Δείγμα 5	5,55	7,16	12,60	18,90	1,61	5,44	6,30	2,49	8,14	7,39	19,7	862
Δείγμα 6	5,91	7,27	12,56	18,68	1,36	5,29	6,12	2,75	8,24	8,00	19,1	860
	5,96	7,39	12,65	18,53	1,43	5,26	5,88	2,73	8,36	8,00	18,5	
Δείγμα 7	4,71	5,46	9,39	13,46	0,75	3,92	4,08	3,84	6,00	7,93	32,1	846
	4,83	5,68	9,76	13,73	0,85	4,08	3,96	3,72	6,28	7,97	30,2	
Δείγμα 8	4,83	5,81	9,95	13,91	0,97	4,14	3,96	3,45	6,50	7,74	29,1	855
	4,96	6,05	10,42	14,87	1,09	4,37	4,45	3,31	6,82	7,63	27,1	
Δείγμα 9	4,88	5,74	9,72	13,71	0,87	3,98	3,99	3,71	6,32	7,79	29,6	843
	4,83	5,64	10,10	14,17	0,81	4,47	4,07	3,33	6,30	7,85	30,5	
Δείγμα 10	4,90	5,93	10,01	13,98	1,04	4,08	3,97	3,49	6,62	7,67	28,1	854
	4,86	5,90	10,07	14,08	1,04	4,17	4,01	3,50	6,58	7,66	28,3	
Δείγμα 11	4,82	5,70	9,67	13,72	0,88	3,97	4,05	3,80	6,31	7,86	30,0	847
	4,85	5,68	9,68	13,76	0,83	4,00	4,07	3,73	6,23	7,84	30,2	
Δείγμα 12	5,23	6,45	11,25	16,20	1,23	4,80	4,95	2,88	7,24	7,57	24,2	853
	5,10	6,29	10,78	15,57	1,18	4,49	4,79	3,09	7,05	7,53	25,3	
Δείγμα 13	5,42	6,33	10,22	14,63	0,91	3,89	4,40	3,33	7,12	7,63	25,0	820
	5,32	6,19	10,10	14,46	0,86	3,92	4,36	3,18	7,08	7,70	26,1	
Δείγμα 14 (LCO)	7,75	9,30	18,71	30,56	1,54	9,41	11,85	1,71	11,92	8,06	10,7	883
Μείγμα 1	4,75	5,27	9,35	13,38	0,52	4,08	4,03	3,06	6,12	8,08	33,9	813
	4,64	5,14	9,32	13,30	0,50	4,18	3,98	2,94	5,97	8,09	35,2	
Μείγμα 2	5,03	5,63	9,64	13,77	0,60	4,00	4,14	3,10	6,35	7,95	30,6	815
Μείγμα 3	4,33	4,72	8,92	12,70	0,39	4,20	3,78	3,70	5,14	8,11	39,7	829
	4,23	4,62	9,00	12,85	0,39	4,38	3,85	3,57	5,08	8,12	40,8	
Μείγμα 4	4,40	4,80	8,75	12,91	0,40	3,96	4,16	4,39	5,22	8,43	38,8	827
	4,39	4,78	8,81	12,95	0,39	4,03	4,14	4,20	5,24	8,39	39,0	
Μείγμα 5	6,25	7,97	14,25	21,42	1,72	6,27	7,17	2,22	9,22	7,85	15,7	867
	6,36	8,11	14,39	22,22	1,75	6,28	7,83	2,25	9,41	7,92	15,0	
Μείγμα 6	5,33	6,48	11,18	15,85	1,14	4,71	4,67	2,88	7,27	7,56	24,0	855
	5,39	6,57	11,27	16,27	1,18	4,70	5,00	2,91	7,35	7,60	23,4	
Μείγμα 7	5,00	5,96	10,17	14,41	0,96	4,21	4,24	3,38	6,60	7,75	27,8	849
	5,20	6,21	10,35	14,49	1,01	4,14	4,14	3,44	6,93	7,90	25,9	
Μείγμα 8	5,59	7,11	12,67	19,39	1,51	5,57	6,71	2,49	8,04	7,47	20,0	871
	5,62	7,12	12,67	20,25	1,49	5,55	7,58	2,48	8,03	7,46	20,0	
Μείγμα 9	4,57	5,24	9,12	13,00	0,66	3,88	3,88	4,01	5,69	7,69	34,2	840
	4,54	5,22	9,35	13,22	0,68	4,13	3,88	3,82	5,72	7,78	34,4	

### Δείγμα μέθυλο-κυκλοεξανίου (MCH)

Σχετικά με τις μετρήσεις του δείγματος μέθυλο-κυκλοεξανίου (MCH), γίνεται αντιληπτό ότι πρόκειται για ένα καύσιμο πολύ χαμηλής ποιότητας ανάφλεξης και καύσης. Αρχικά, μέσω των καμπυλών των διαγραμμάτων του ρυθμού έκλυσης θερμότητας με τον χρόνο (ROHR – Time) και τις τιμές των παραμέτρων, φαίνεται ότι η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση της κύριας καύσης είναι πολύ μεγάλες και γι' αυτό δικαιολογούνται οι πολύ χαμηλές τιμές του δείκτη ECN. Επιπλέον, η τιμή του μέγιστου ρυθμού έκλυσης θερμότητας δεν είναι μεγάλη, γεγονός που υποδεικνύει ότι το καύσιμο δεν αυταναφλέγεται κατάλληλα και μπορεί να προκαλέσει θερμική φόρτιση στον εξοπλισμό του κυλίνδρου.

Αναφέρεται ότι είναι η πρώτη φορά στην Ελλάδα που γίνεται προσπάθεια μέτρησης υπολειμματικών καυσίμων με τη συσκευή FIA – 100/FCA και η συμπεριφορά της δεν είναι γνωστή και ως εκ τούτου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις δειγμάτων με γνωστούς αριθμούς κετανίου όπως το επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN) και τα μείγματα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN) (με σύσταση τέτοια ώστε οι θεωρητικοί αριθμοί κετανίου να είναι ίσοι με 20, 25 και 30 κάθε φορά) με σκοπό να συγκριθούν τα πειραματικά αποτελέσματα με τις θεωρητικές τιμές.

### Δείγμα επτά-μέθυλο-εννεανίου (HMN)

Στη συνέχεια, μετρήθηκε το δείγμα επτά-μέθυλο-εννεανίου (HMN) που έχει γνωστό αριθμό κετανίου ίσο με 15. Από τα αποτελέσματα των τιμών των παραμέτρων και τις καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time, φαίνεται πως η καύση του επτά-μέθυλο-εννεανίου είναι πάρα πολύ κακή και σίγουρα μη αποδεκτή για χρήση σε οποιονδήποτε κινητήρα. Η καθυστέρηση ανάφλεξης και αυτή της κύριας καύσης είναι αρκετά μεγάλες, οπότε και ο δείκτης ECN είναι χαμηλός, καθώς επίσης ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας έχει πολύ χαμηλή τιμή, γεγονός που υποδεικνύει ότι δημιουργούνται πολλά προβλήματα στον κινητήρα κατά την καύση αυτού του καυσίμου. Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι η περίοδος της κύριας καύσης (MCP) έχει μία πολύ μεγάλη τιμή και αυτό δείχνει ότι η καύση είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό ατελής, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε σχηματισμό καταλοίπων, σε σχηματισμό αιθάλης και σε αυξημένα επίπεδα εκπομπών καυσαερίων. Παρουσιάστηκε εναπόθεση σημαντικής ποσότητας στερεών σωματιδίων στο σύστημα φίλτρου, με αποτέλεσμα να απαιτείται ο καθαρισμός του.

Η θεωρητική τιμή του αριθμού κετανίου του επτά-μέθυλο-εννεανίου δεν επαληθεύεται από τις τιμές του δείκτη ECN που προέκυψαν από τις μετρήσεις. Βασικός λόγος κρίνεται ότι είναι η χαμηλή ακρίβεια της συσκευής FIA – 100/FCA σε υπολειμματικά καύσιμα που το κινηματικό τους ιξώδες δεν ανήκει στην περιοχή 25 με 800 cSt στους 50 °C (το κινηματικό ιξώδες του επτά-μέθυλο-εννεανίου κυμαίνεται από 1,70 έως 2,30 cSt στους 50 °C) [41], [44]. Ένας επιπλέον λόγος που υπάρχει η απόκλιση μεταξύ της θεωρητικής τιμής και της τιμής των αποτελεσμάτων, πιθανόν να είναι η μειωμένη ποιότητα του δείγματος του επτά-μέθυλο-εννεανίου που χρησιμοποιήθηκε.

Μείγματα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN)

Ακολούθησαν οι μετρήσεις των μειγμάτων κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN). Η σύσταση των μειγμάτων που προαναφέρθηκαν ήταν η κατάλληλη ώστε οι θεωρητικοί αριθμοί κετανίου να είναι ίσοι με 20, 25 και 30 κάθε φορά.

Μείγμα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN), σύστασης 30% v/v n-C<sub>16</sub> και 70% v/v AMN

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για το μείγμα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN), σύστασης 30% v/v n-C<sub>16</sub> και 70% v/v AMN, που έχει θεωρητικό αριθμό κετανίου ίσο με 30. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, γίνεται αντιληπτό ότι το μείγμα αυτό δεν είναι καύσιμο με καλή ποιότητα καύσης. Αντίθετα, από τις τιμές των παραμέτρων και τις καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time, παρατηρείται ότι η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση κύριας καύσης έχουν υψηλές τιμές, με αποτέλεσμα ο δείκτης ECN να είναι χαμηλός. Επίσης, η καύση του συγκεκριμένου μείγματος είναι σταδιακή, που φαίνεται από την ύπαρξη ενός τοπικού ακροτάτου πριν το σημείο που εντοπίζεται ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Αυτό σημαίνει ότι η έκλυση θερμότητας αρχικά γίνεται με αργό ρυθμό μέχρι τη στιγμή που γίνεται μέγιστος ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και η καύση δεν είναι πλέον σταδιακή. Με πιο απλά λόγια, το τοπικό ακρότατο εμφανίζεται διότι αρχικά καίγεται η ποσότητα του κανονικού δεκαεξανίου (που αυταναφλέγεται εύκολα) και στη συνέχεια μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα μέχρι να ξεκινήσει η καύση της 1-μέθυλο-ναφθαλίνης που η ποιότητα καύσης της είναι πολύ κακή (όντας αρωματικός υδρογονάνθρακας που δεν αυταναφλέγεται εύκολα). Ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας δεν είναι υψηλός οπότε η θερμική φόρτιση του εξοπλισμού του κυλίνδρου είναι μεγάλη. Επίσης, ο χρόνος ολόκληρης της καύσης, δηλαδή η παράμετρος EC, είναι αρκετά μεγάλος, γεγονός που υποδεικνύει ότι αυτό το καύσιμο έχει αργό ρυθμό έκλυσης θερμότητας και απαιτεί αρκετό χρόνο για να καεί εντός του θαλάμου καύσης. Οπότε, για να καεί το καύσιμο αυτό, είναι απαραίτητο ο κινητήρας να είναι αργόστροφος, ώστε να εξασφαλίσει το απαραίτητο χρονικό διάστημα για να προλάβει να ολοκληρωθεί η καύση του καυσίμου αυτού. Τέλος, όπως και στο δείγμα του επτά-μέθυλο-εννεανίου η τιμή του δείκτη ECN δεν είναι η αναμενόμενη με βάση τη θεωρητική τιμή του αριθμού κετανίου (που ισούται με 30), γεγονός που οφείλεται ίσως στη μειωμένη ακρίβεια της συσκευής σε καύσιμα με χαμηλό κινηματικό ιξώδες και στη χαμηλή ποιότητα των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή και μέτρηση του δείγματος [41].

Μείγμα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), σύστασης 17,65% v/v n-C<sub>16</sub> και 82,35% v/v HMN

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η μέτρηση του μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), σύστασης 17,65% v/v n-C<sub>16</sub> και 82,35% v/v HMN, που ο θεωρητικός αριθμός κετανίου του ισούται και αυτός με 30. Οι τιμές των παραμέτρων και τις καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time, δείχνουν ότι το καύσιμο αυτό έχει πολύ καλύτερη συμπεριφορά και παρουσιάζεται βελτιωμένο σε όλες τις παραμέτρους σε σχέση με το

προηγούμενο (που αντί για n-C<sub>16</sub> και HMN αποτελούνταν από n-C<sub>16</sub> και AMN). Η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση κύριας καύσης έχουν μειωθεί σημαντικά, οπότε δικαιολογείται η υψηλή τιμή του δείκτη ECN, καθώς επίσης έχει εξαλειφθεί το τοπικό μέγιστο (που εμφανιζόταν στο προηγούμενο μείγμα), άρα η καύση γίνεται με ομαλό τρόπο και δεν είναι σταδιακή. Ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας εμφανίζει μία πολύ μεγάλη τιμή, γεγονός που δείχνει την ευκολία της αυτανάφλεξης του καυσίμου και ο μειωμένος χρόνος που διαρκεί ολόκληρη η καύση συντελεί στη χρήση του μείγματος αυτού ως καύσιμο σε μεσόστροφους ή και ταχύστροφους κινητήρες. Από τις μετρήσεις του δείγματος αυτού, παρατηρείται το παράδοξο ότι ο αριθμός κετανίου του μείγματος θεωρητικά ισούται με 30, ενώ από τις μετρήσεις προκύπτει μεγαλύτερη τιμή. Ο βασικός παράγοντας που ευθύνεται για το αποτέλεσμα αυτό είναι η αδυναμία μέτρησης με μεγάλη ακρίβεια δειγμάτων με χαμηλή τιμή κινηματικού ιξώδους.

Μείγματα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), με θεωρητικό αριθμό κετανίου 25

Σχετικά με τα μείγματα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), που έχουν αριθμό κετανίου ίσο με 25 θεωρητικά, παρατηρείται ότι η καύση και των δύο ειδών δειγμάτων χειροτερεύει.

Μείγμα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN), σύστασης 25% v/v n-C<sub>16</sub> και 75% v/v AMN

Τα αποτελέσματα του μείγματος κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN), σύστασης 25% v/v n-C<sub>16</sub> και 75% v/v AMN, δείχνουν ότι η καύση παρουσιάζει ακόμα περισσότερα προβλήματα σε σχέση με το μείγμα n-C<sub>16</sub> με AMN, με θεωρητικό αριθμό κετανίου 30, αφού η καύση είναι αρκετά πιο σταδιακή, η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση κύριας καύσης πιο μεγάλες και ο χρόνος που μεσολαβεί από την αρχική καύση του n-C<sub>16</sub> μέχρι την καύση της AMN είναι μεγαλύτερος. Ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας έχει μειωθεί αρκετά. Ο χρόνος ολόκληρης της καύσης και ο χρόνος της κύριας καύσης έχουν αυξηθεί σημαντικά, που σημαίνει ότι η καύση είναι σε μεγάλο βαθμό ατελής με συνέπεια τη δημιουργία αρκετών προβλημάτων στον κινητήρα. Τα αποτελέσματα σχετικά με τον δείκτη ECN απέχουν πολύ από τη θεωρητική τιμή του αριθμού κετανίου του μείγματος, γεγονός που οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη μικρή ακρίβεια μέτρησης της συσκευής καυσίμων με μικρό κινηματικό ιξώδες και σε μειωμένη ποιότητα των πρότυπων δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Μείγμα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), σύστασης 11,76% v/v n-C<sub>16</sub> και 88,24% v/v HMN

Το μείγμα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), σύστασης 11,76% v/v n-C<sub>16</sub> και 88,24% v/v HMN, με θεωρητικό αριθμό κετανίου 25, παρουσιάζει σαφώς καλύτερη ποιότητα καύσης σε σχέση με το αντίστοιχο θεωρητικού αριθμού κετανίου μείγμα n-C<sub>16</sub> με AMN. Σε σχέση με το μείγμα n-C<sub>16</sub> με HMN, με θεωρητικό αριθμό κετανίου 30, γίνεται αντιληπτό από τις τιμές των παραμέτρων και τις καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time, ότι η ποιότητα ανάφλεξης του είναι μειωμένη, αφού οι χρόνοι της

καθυστερήσης ανάφλεξης, της καθυστέρησης της κύριας καύσης, ολόκληρης της καύσης και της κύριας καύσης έχουν αυξηθεί, ενώ παράλληλα ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας μειώνεται. Επίσης, κατά την καύση του μείγματος αυτού είναι πλέον εμφανής μία δεύτερη κορυφή (τοπικό ακρότατο) που υποδηλώνει ότι η καύση αρχίζει να είναι σταδιακή και να καίγεται πρώτα η ποσότητα του n-C<sub>16</sub>, που αυταναφλέγεται εύκολα και να καθυστερεί η αυτανάφλεξη του HMN. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ οι τιμές του δείκτη ECN είναι μεγαλύτερες της θεωρητικής, γεγονός που οφείλεται σε παρόμοιους λόγους με το μείγμα n-C<sub>16</sub> με HMN, με θεωρητικό αριθμό κετανίου 30.

Μείγματα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), με θεωρητικό αριθμό κετανίου 20

Στην περίπτωση, τώρα των μειγμάτων κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN) και κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), που έχουν αριθμό κετανίου ίσο με 20 θεωρητικά, η καύση τους είναι κακή έως πολύ κακή.

Μείγμα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN), σύστασης 20% v/v n-C<sub>16</sub> και 80% v/v AMN

Το μείγμα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με 1-μέθυλο-ναφθαλίνη (AMN), σύστασης 20% v/v n-C<sub>16</sub> και 80% v/v AMN, εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά καύσης με αυτά του δείγματος επτά-μέθυλο-εννεανίου. Η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση κύριας καύσης είναι πολύ μεγάλες, η διάρκεια της κύριας καύσης και ολόκληρης της καύσης έχουν αυξηθεί σημαντικά και ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι πολύ χαμηλός. Οπότε, πρόκειται για ένα καύσιμο πολύ χαμηλής ποιότητας, που η καύση του είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό ατελής, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες αιθάλης και καταλοίπων μέσα στον κύλινδρο και η εκπομπή των καυσαερίων να είναι έντονη. Όπως και στο προηγούμενο μείγμα n-C<sub>16</sub> με AMN, οι τιμές του δείκτη ECN απέχουν πολύ από τη θεωρητική και οι λόγοι είναι παρόμοιοι με αυτούς των υπολοίπων μειγμάτων n-C<sub>16</sub> με AMN. Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι τιμές του δείκτη ECN του μείγματος n-C<sub>16</sub> με AMN, με θεωρητικό αριθμό κετανίου 20, είναι πιο υψηλές από αυτές του αντίστοιχου μείγματος, αλλά με θεωρητικό αριθμό κετανίου 25.

Μείγμα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), σύστασης 5,88% v/v n-C<sub>16</sub> και 94,12% v/v HMN

Όσον αφορά τώρα στο μείγμα κανονικού δεκαεξανίου (n-C<sub>16</sub>) με επτά-μέθυλο-εννεάνιο (HMN), σύστασης 5,88% v/v n-C<sub>16</sub> και 94,12% v/v HMN που έχει θεωρητικό αριθμό κετανίου ίσο με 20, τα προβλήματα σε σχέση με το αντίστοιχο μείγμα, με θεωρητικό αριθμό κετανίου 25, εντείνονται. Αυξάνεται η καθυστέρηση ανάφλεξης, η καθυστέρηση κύριας καύσης, ο χρόνος της κύριας καύσης και ο χρόνος ολόκληρης της καύσης, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Επιπλέον, η ύπαρξη δεύτερης κορυφής είναι πιο εμφανής και η καύση είναι ατελής σε μεγαλύτερο βαθμό. Στο μείγμα αυτό, ωστόσο, οι τιμές του δείκτη ECN δεν υπερβαίνουν τη θεωρητική τιμή του αριθμού κετανίου του μείγματος, αλλά εμφανίζουν μια μικρή απόκλιση. Η απόκλιση αυτή εμφανίζεται λόγω της αδυναμίας της συσκευής να αξιολογεί με ακρίβεια καύσιμα με χαμηλές τιμές κινηματικού ιξώδους.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δειγμάτων που προαναφέρθηκαν γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει απόκλιση των τιμών του δείκτη ECN που προέκυψαν από τις μετρήσεις σε σχέση με τις θεωρητικές τιμές του αριθμού κετανίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στη μειωμένη ακρίβεια της συσκευής στις μετρήσεις δειγμάτων με κινηματικό ιξώδες που απέχει πολύ από το εύρος 25 έως 800 cSt. Ειδικά στην περίπτωση της 1-μέθυλο-ναφθαλίνης (AMN), η απόκλιση μεταξύ μετρούμενης και θεωρητικής τιμής καθώς και μεταξύ των ίδιων των μετρήσεων οφείλεται αρχικά, στη μειωμένη καθαρότητα του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε (96%) και κατά κύριο λόγο στη σταθερότητα που παρουσιάζει το συστατικό αυτό κατά την καύση του.

Δείγματα 1 έως και 14 και όλα τα μείγματα, σχολιασμός διαγράμματος ρυθμού έκλυσης θερμότητας με τον χρόνο (ROHR – Time) και σύγκριση, μεταξύ του δείκτη αρωματικότητας (CCAI) και του δείκτη ECN

Από τους υπολογισμούς σχετικά με την επαναληψιμότητα μεταξύ των μετρήσεων των δειγμάτων και των μειγμάτων, παρατηρείται ότι τα εύρη των τιμών όλων των παραμέτρων συμπίπτουν στις δύο μετρήσεις. Αποτελεσματικά, αυτό δείχνει την πολύ καλή ανταπόκριση του οργάνου σε επαναληψιμότητα και ακρίβεια στο φάσμα των υπολειμματικών καυσίμων με περιοχή κινηματικού ιξώδους 25 με 800 cSt στους 50 °C.

Όσον αφορά στο δείγμα 1, από τα δύο διαγράμματα ROHR – Time, γίνεται αντιληπτό ότι οι δύο καμπύλες δείχνουν ότι η καύση του δείγματος 1 ακολουθεί κανονική πορεία και δεν παρουσιάζονται ανωμαλίες κατά τη διάρκειά της. Τα μέγιστα που εμφανίζουν επιτυγχάνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα, γεγονός που σημαίνει ότι η καθυστέρηση ανάφλεξης του καυσίμου δεν είναι μεγάλη, καθώς επίσης μετά τα μέγιστα σημεία οι καμπύλες τείνουν γρήγορα στο μηδέν, που σημαίνει ότι η έκλυση θερμότητας κατά την καύση του καυσίμου είναι πολύ γρήγορη. Από τα παραπάνω, καθώς και από τις τιμές του δείκτη ECN, το δείγμα 1 είναι ένα υπολειμματικό καύσιμο με πολύ καλά χαρακτηριστικά ανάφλεξης και καύσης. Επιπρόσθετα, ισχύουν τα ίδια χαρακτηριστικά και για τις μετρήσεις που έγιναν στο μείγμα 1 (95% m/m δείγμα 1 και 5% m/m δείγμα 14-LCO), με τη διαφορά ότι οι τιμές των παραμέτρων του μείγματος 1 είναι ελαφρώς αυξημένες, που είναι λογικό από τη στιγμή που αναμειχθηκε το δείγμα 1 με ένα δείγμα LCO που έχει χειρότερα χαρακτηριστικά ανάφλεξης και καύσης από αυτό. Όταν το δείγμα 1 αναμειχθεί με μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου χαμηλότερης ποιότητας από αυτό, όπως και έγινε στη μέτρηση του μείγματος 2 (90% m/m δείγμα 1 και 10% m/m δείγμα Slurry FCC), οι τιμές των παραμέτρων είναι ακόμα πιο αυξημένες σε σχέση με αυτές του μείγματος 1. Συμπερασματικά, καλύτερη ποιότητα ανάφλεξης παρουσίασε το δείγμα 1, ενώ χειρότερη το μείγμα 2. Αναφορικά, με τον δείκτη αρωματικότητας του δείγματος 1, αυτός βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, αφού η τιμή του είναι χαμηλή (είναι ίσος με 809), ενώ αυξάνεται ελαφρώς (στην τιμή 813) όταν το δείγμα 1 αναμειγνύεται με το δείγμα LCO και αυξάνεται περισσότερο (στην τιμή 815) όταν αναμειγνύεται με το δείγμα Slurry FCC.

Σχετικά με το δείγμα 2, παρατηρείται ότι έχει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του δείγματος 1. Ωστόσο, οι καμπύλες στα δύο διαγράμματα ROHR – Time και οι τιμές των παραμέτρων του δείγματος 2, υποδεικνύουν ένα καύσιμο που εμφανίζει μέγιστο σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα και σε πιο ψηλό σημείο σε σχέση με το δείγμα 1. Επίσης, μετά τα μέγιστα σημεία οι



καμπύλες τείνουν πιο γρήγορα στο μηδέν, από αυτές στο δείγμα 1, οπότε πρόκειται για ένα καύσιμο με καλύτερα χαρακτηριστικά καύσης και ανάφλεξης σε σχέση με το δείγμα 1. Τα παραπάνω, τα επιβεβαιώνει και ο δείκτης ECN του δείγματος 2 που είναι υψηλότερος. Ωστόσο, ο δείκτης αρωματικότητας του δείγματος 2, που ισούται με 813, είναι μεγαλύτερος από αυτόν του δείγματος 1, γεγονός που υποδεικνύει ότι το δείγμα 2 είναι χαμηλότερης ποιότητας από το 1, κάτι που δεν επαληθεύτηκε μέσω των μετρήσεων. Επίσης, όταν το δείγμα 2 αναμειγνύεται με δείγμα LCO, δηλαδή όταν μετρήθηκε το μείγμα 4 (80% m/m δείγμα 4 και 20% m/m δείγμα 14-LCO), οι τιμές των παραμέτρων του είναι ελαφρώς αυξημένες. Αυτό είναι λογικό αφού αναμειχθηκε με ένα δείγμα LCO που έχει χειρότερα χαρακτηριστικά ανάφλεξης και καύσης από αυτό, γεγονός που επαληθεύεται και από την τιμή του δείκτη CCAI του μείγματος 4 που είναι μεγαλύτερος (σε σχέση με αυτή που έχει μόνο του το δείγμα 2) και ισούται με 827.

Από τις καμπύλες των δύο διαγραμμάτων ROHR – Time και τις τιμές των παραμέτρων του δείγματος 3, γίνεται αρχικά αντιληπτό ότι το δείγμα 3 εμφανίζει μέγιστο σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα και σε περίπου ίδιο ύψος σε σχέση με το δείγμα 2 και ότι, μετά τα μέγιστα σημεία οι καμπύλες τείνουν πιο γρήγορα στο μηδέν, από αυτές στο δείγμα 2. Σύμφωνα με τα παραπάνω και με τις τιμές του δείκτη ECN του δείγματος 3, προκύπτει ότι το δείγμα 3 είναι υψηλότερης ποιότητας από το δείγμα 2. Το γεγονός αυτό όμως, δεν επαληθεύεται από την τιμή του δείκτη αρωματικότητας του δείγματος 3, που είναι μεγαλύτερος από αυτόν του δείγματος 2 (ισούται με 816, ενώ του δείγματος 2 είναι ίσος με 813). Επομένως, συγκρίνοντας τα δείγματα 1, 2 και 3, σύμφωνα με τις μετρήσεις, το καύσιμο με την καλύτερη ποιότητα είναι το δείγμα 3, ακολουθεί το 2 και τέλος το 1, ενώ σύμφωνα με τις τιμές του δείκτη αρωματικότητας η σειρά είναι ακριβώς η αντίθετη.

Αναφορικά με το δείγμα 4, όπως και τα προηγούμενα, δεν εμφανίζεται κάποια ανωμαλία κατά την καύση του, επέρχονται σε σύντομο χρονικό διάστημα τα μέγιστα, που φαίνονται στις καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time και μετά τα μέγιστα σημεία οι καμπύλες τείνουν σχετικά γρήγορα στο μηδέν. Επίσης, η τιμή της παραμέτρου maxROHR είναι αρκετά μεγάλη (η μεγαλύτερη σε σχέση με τις αντίστοιχες των προηγούμενων δειγμάτων), που σημαίνει ότι η αυτανάφλεξή του είναι πολύ καλή και εκλύεται μεγάλο ποσό θερμότητας. Πρόκειται για ένα καύσιμο με αρκετά καλή ποιότητα καύσης και αυτό φαίνεται και από την τιμή του δείκτη ECN που είναι σχετικά υψηλή για υπολειμματικό καύσιμο. Όπως και στα προηγούμενα δείγματα, ο δείκτης αρωματικότητας του καυσίμου δεν συμβαδίζει με τις μετρήσεις, αφού η τιμή του ισούται με 820 για το δείγμα 4, ενώ για το δείγμα 1 που είναι χαμηλότερης ποιότητας, σύμφωνα με τις μετρήσεις, είναι πιο χαμηλή και ίση με 809. Επιπλέον, όταν το δείγμα 4 αναμειγνύεται με το δείγμα LCO και δημιουργείται το μείγμα 3 (85% m/m δείγμα 4 και 15% m/m δείγμα 14-LCO), οι τιμές των παραμέτρων είναι μεγαλύτερες, που σημαίνει ότι η ποιότητα καύσης του μείγματος είναι ελαφρώς χειρότερη από αυτή του δείγματος, γεγονός λογικό αφού αναμειγνύεται με ένα καύσιμο με χαμηλή ποιότητα ανάφλεξης. Αυτό φαίνεται και από τον δείκτη CCAI, αφού η τιμή του για το μείγμα 3 ισούται με 829, που είναι μεγαλύτερη από αυτή του δείγματος 4.

Το δείγμα 5 που αποτελεί δείγμα διεργαστηριακού ελέγχου, δεν ακολουθεί κανονική πορεία καύσης. Από την καμπύλη στο διάγραμμα ROHR – Time, τις τιμές των παραμέτρων

και την τιμή του δείκτη ECN, παρατηρείται αρχικά ότι η καθυστέρηση ανάφλεξης είναι μεγάλη, που σημαίνει ότι δεν αυταναφλέγεται κατάλληλα το καύσιμο και ότι πριν επιτευχθεί το μέγιστο της καμπύλης, εμφανίζεται και ένα τοπικό μέγιστο (ακρότατο) που αποτελεί ένδειξη σταδιακής καύσης. Η εμφάνιση αυτού του ακροτάτου, πιθανόν συμβαίνει επειδή αυταναφλέγονται στην αρχή τα ελαφρύτερα συστατικά του καυσίμου και η ενέργεια που εκλύεται κατά την καύση αυτή δεν είναι επαρκής για να προκαλέσει την απευθείας αυτανάφλεξη των κύριων και βαρύτερων συστατικών του δείγματος 5. Όμως, από τη στιγμή που η έκλυση θερμότητας φτάσει στην απαιτούμενη τιμή για την καύση των κύριων συστατικών του καυσίμου, η καύση γίνεται με ομαλό τρόπο. Επίσης, οι μεγάλοι χρόνοι της κύριας καύσης και ολόκληρης της καύσης οδηγούν σε σχηματισμό αιθάλης και μικροσωματιδίων. Επιπλέον, με την προβληματική αυτή συμπεριφορά του καυσίμου βρίσκεται σε συμφωνία και η τιμή του δείκτη CCAI, που ισούται με 862 και δείχνει την όχι καλή ποιότητα ανάφλεξης του δείγματος 5.

Το δείγμα 6 εμφανίζει πολύ παρόμοια συμπεριφορά καύσης με το δείγμα 5 αν όχι και χειρότερη, αφού και ο χρόνος της καθυστέρησης ανάφλεξης και αυτός της καθυστέρησης της κύριας καύσης είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους του δείγματος 5. Ωστόσο, από τις καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time και από τις τιμές των παραμέτρων φαίνεται ότι η περίοδος της κύριας καύσης (MCP) του δείγματος 6 είναι μικρότερη από αυτή του δείγματος 5, γεγονός που υποδεικνύει ότι η καύση του πρώτου καυσίμου (δείγμα 6) είναι ελαφρώς πιο ομαλή και οδηγεί στον μειωμένο σχηματισμό καταλοίπων σε σχέση με την καύση του δείγματος 5. Σχετικά με την τιμή του δείκτη ECN του δείγματος 6 είναι πιο μικρή από αυτή του δείγματος 5, αλλά όμως ο δείκτης αρωματικότητας του δείγματος 6 είναι μικρότερος (860 έναντι 862), γεγονός που δηλώνει αντίφαση. Στη συνέχεια, μετρήθηκε και το μείγμα 5 (ήταν 90% m/m δείγμα 6 και 10% m/m δείγμα Slurry FCC) και τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα, δηλαδή να μειώνεται ακόμα περισσότερο η ποιότητα ανάφλεξης του δείγματος 6 με την προσθήκη δείγματος Slurry FCC που έχει πολύ κακή ποιότητα ανάφλεξης. Το ίδιο συμπέρασμα επέρχεται και με τη σύγκριση των δεικτών ECN, που στην περίπτωση του μείγματος είναι μικρότερος, αλλά και με τη σύγκριση των δεικτών CCAI, που στην περίπτωση του δείγματος είναι μικρότερος.

Όσον αφορά στο δείγμα 7, αυτό φαίνεται να έχει παρόμοια συμπεριφορά με το δείγμα 1. Πιο συγκεκριμένα, από τις τιμές των παραμέτρων και τα διαγράμματα ROHR – Time, φαίνεται ότι το δείγμα 7 έχει μεγαλύτερους χρόνους καθυστέρησης ανάφλεξης (ID) και καθυστέρησης κύριας καύσης (MCD) γι' αυτόν τον λόγο ο δείκτης ECN είναι μικρότερος. Παρατηρείται όμως ότι, η περίοδος της κύριας καύσης είναι ελαφρώς μικρότερη στην περίπτωση του δείγματος 7 και ότι ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι υψηλότερος στο δείγμα 7. Συμπερασματικά, αν και το δείγμα 7 έχει μικρότερο αριθμό ECN, εμφανίζει καλύτερη αυτανάφλεξη και πορεία καύσης από το δείγμα 1. Οι τιμές του δείκτη ECN επαληθεύονται από αυτές του δείκτη αρωματικότητας των δύο δειγμάτων, αφού το δείγμα 7 έχει μεγαλύτερο δείκτη CCAI και ίσο με 846, αλλά η διαφορά του με το 809 (που είναι ο δείκτης CCAI του δείγματος 1) είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τη διαφορά των δεικτών ECN των καυσίμων. Αναφορικά με το μείγμα 9, την ανάμειξη δηλαδή του δείγματος 7 με το δείγμα 3, με σύσταση 80% m/m δείγμα 7 και 20% m/m δείγμα 3, παρατηρείται από τις καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time και τις τιμές των παραμέτρων ότι βελτιώνονται σημαντικά όλες οι τιμές των

παραμέτρων και γενικά η ποιότητα καύσης του δείγματος 7, γεγονός που είναι λογικό, αφού το δείγμα 3 αποτελεί καύσιμο με πολύ καλή ποιότητα καύσης, Ο δείκτης αρωματικότητας του μείγματος 9 είναι μικρότερος από αυτόν του δείγματος 7 και ισούται με 840.

Αναφορικά με το δείγμα 8, από τις τιμές των παραμέτρων και τις καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time, γίνεται αντιληπτό ότι η καύση του δεν είναι τελείως ομαλή, διότι πριν από το μέγιστο της καμπύλης, εμφανίζεται και ένα τοπικό μέγιστο. Το τοπικό μέγιστο αυτό όμως δεν είναι τόσο διακριτό όπως στην περίπτωση των δειγμάτων 5 και 6, που σημαίνει ότι η καύση του είναι μεν σταδιακή, αλλά έχει αρκετά καλύτερη συμπεριφορά από αυτή των δειγμάτων 5 και 6. Η καύση στη συνέχεια γίνεται με ομαλό τρόπο, ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας έχει υψηλή τιμή και μετά από το σημείο αυτό, η καμπύλη τείνει σχετικά γρήγορα στο μηδέν, στοιχεία που υποδεικνύουν ότι η κυρίως καύση ακολουθεί την κανονική πορεία. Εμφανίζει ελάχιστα χαμηλότερη τιμή δείκτη ECN σε σχέση με το δείγμα 7, ενώ ο δείκτης αρωματικότητάς του ισούται με 855 και είναι υψηλότερος από αυτόν του δείγματος 7 (που ισούται με 846), γεγονός που βρίσκει σε συμφωνία τις τιμές των δεικτών ECN και CCAI.

Όσον αφορά στο δείγμα 9, η καύση του ακολουθεί κανονική πορεία. Οι τιμές των παραμέτρων και οι καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time, εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του δείγματος 7. Οι τιμές των παραμέτρων της καθυστέρησης ανάφλεξης και της καθυστέρησης της κύριας καύσης των δύο δειγμάτων είναι αρκετά παραπλήσιες, γι' αυτό και δικαιολογείται ότι έχουν παρόμοιες τιμές ECN, με τη μεγαλύτερη τιμή να την έχει το δείγμα 7. Ωστόσο, το αποτέλεσμα που λαμβάνεται για τα δύο καύσιμα από τον δείκτη αρωματικότητάς τους, είναι παραπλήσιο αλλά και αντίθετο, αφού αυτός είναι ελαφρώς μικρότερος στην περίπτωση του δείγματος 9 και ισούται με 843.

Οι τιμές των παραμέτρων και οι καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time του δείγματος 10 βρίσκονται σε συμφωνία με αυτές του δείγματος 8. Και τα δύο καύσιμα εμφανίζουν τοπικό μέγιστο πριν το μέγιστο των καμπυλών τους, στοιχείο που αποτελεί ένδειξη της όχι και τόσο ομαλής τους καύσης. Ωστόσο, μετά από αυτό, η καύση διεξάγεται με κανονικούς ρυθμούς και στα δύο καύσιμα. Η παραπλήσια συμπεριφορά τους εκφράζεται και από τις τιμές του δείκτη ECN, αλλά και από τον δείκτη αρωματικότητας που έχει διαφορά μία μονάδα (854 στην περίπτωση του δείγματος 10 και 855 σε αυτή του δείγματος 8). Στο μείγμα 8 (80% m/m δείγμα 10 και 20% m/m δείγμα Slurry FCC), το δείγμα 8 αναμείχθηκε με δείγμα Slurry FCC και όπως ήταν αναμενόμενο, η καύση του ήταν αρκετά πιο προβληματική σε όλα τα επίπεδα. Η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση της κύριας καύσης αυξήθηκαν, ο χρόνος μεταξύ των δύο ακροτάτων αυξήθηκε επίσης και μειώθηκε ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Τα συμπεράσματα αυτά συμβαδίζουν με τις τιμές του δείκτη ECN, που είναι αρκετά μικρότερες σε σχέση με αυτές του δείγματος 10 και με την τιμή του δείκτη αρωματικότητας, που είναι αρκετά υψηλότερη αυτή του μείγματος 8 (ίση με 871) από αυτή του δείγματος 10.

Η καύση του δείγματος 11 δεν παρουσίασε κάποια ανωμαλία. Δεν είναι εμφανής, από τις καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time, η ύπαρξη κάποιου τοπικού ακροτάτου και ούτε κάποια σοβαρή ένδειξη, από τις τιμές των παραμέτρων για ύπαρξη προβλημάτων κατά την καύση του. Η ποιότητα καύσης του δείγματος 11 έχει πολλά κοινά στοιχεία με αυτή του δείγματος 9, γι' αυτό και οι τιμές των δεικτών ECN είναι πολύ παραπλήσιες, όπως και οι τιμές των δεικτών αρωματικότητας (ο δείκτης CCAI του δείγματος 11 ισούται με 847).

Σχετικά τώρα, με το δείγμα 12, από τις τιμές των παραμέτρων και τις καμπύλες των διαγραμμάτων ROHR – Time, γίνεται αντιληπτό ότι η ποιότητα καύσης του δεν είναι ιδιαίτερα καλή. Εντοπίζεται τοπικό ακρότατο πριν το μέγιστο της καμπύλης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, που σημαίνει ότι η καύση του δείγματος 12 ήταν σταδιακή και επίσης ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ των δύο μεγίστων (του τοπικού και του ολικού) δεν είναι αμελητέος. Από τη στιγμή που ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας φτάσει στο μέγιστο σημείο, η καύση διεξάγεται κανονικά, χωρίς επιπλέον ανωμαλίες. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το δείγμα 12 αποτελεί καύσιμο χαμηλότερης ποιότητας, που δημιουργεί προβλήματα στον κινητήρα που χρησιμοποιείται. Η τιμή του δείκτη ECN δεν είναι υψηλή, γεγονός που επαληθεύεται και από τον δείκτη αρωματικότητας του καυσίμου που είναι υψηλός και ισούται με 853. Παρατηρείται επιπλέον ότι, η τιμή του δείκτη CCAI του δείγματος 12 σε σχέση με αυτή του δείγματος 10 (που ισούται με 854) είναι χαμηλότερη. Αυτό σημαίνει ότι το δείγμα 12 έχει καλύτερη ποιότητα καύσης από το δείγμα 10, ενώ ταυτόχρονα, από τις τιμές του δείκτη ECN προκύπτει το αντίθετο αποτέλεσμα. Για τον περαιτέρω έλεγχο της συμπεριφοράς του δείγματος 12 κατά την καύση, δημιουργήθηκαν τα μείγματα 6 (95% m/m δείγμα 12 και 5% m/m δείγμα 14-LCO) και 7 (95% m/m δείγμα 12 και 5% m/m δείγμα diesel), δηλαδή ένα χαμηλότερης ποιότητας και ένα καλύτερης ποιότητας αντίστοιχα από το δείγμα 12. Στην πρώτη περίπτωση (μείγμα 6), η συμπεριφορά του καυσίμου χειροτέρευσε, αφού η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση της κύριας καύσης αυξήθηκαν (άρα και η τιμή του δείκτη ECN μειώθηκε) και μειώθηκε ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Αντίθετα, στην περίπτωση του μείγματος 7, οι ιδιότητες του δείγματος 12 βελτιώθηκαν αρκετά, αφού η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση της κύριας καύσης μειώθηκαν (άρα και η τιμή του δείκτη ECN αυξήθηκε), αυξήθηκε ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας και σχεδόν εξαλείφθηκε η παρουσία του τοπικού μεγίστου, η εμφάνιση δηλαδή της σταδιακής καύσης. Τα αποτελέσματα από την καύση των μειγμάτων επαληθεύονται και από τις τιμές του δείκτη CCAI που είναι μεγαλύτερος από αυτή του δείγματος 12 και ισούται με 855, στην περίπτωση του μείγματος 6 και μικρότερος (ίσος με 849), στην περίπτωση του μείγματος 7.

Η συμπεριφορά του δείγματος 13 κατά την καύση του δεν φαίνεται να είναι η ιδανική, διότι η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση της κύριας καύσης δεν είναι μικρή και ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας δεν είναι υψηλός. Αυτό συμπεραίνεται επίσης από τις τιμές του δείκτη ECN που δεν είναι υψηλές. Όσον αφορά στον δείκτη αρωματικότητας του καυσίμου, αυτός ισούται με 820, που σημαίνει ότι πρόκειται για ένα καύσιμο με πολύ καλή ποιότητα ανάφλεξης, ενώ σύμφωνα με τις μετρήσεις δεν επαληθεύεται. Επίσης, σε σχέση με τα άλλα καύσιμα όπως τα δείγματα 8, 9 και 10 που σύμφωνα με τις μετρήσεις έχουν καλύτερη ποιότητα ανάφλεξης σε σχέση με το δείγμα 13, ο δείκτης αρωματικότητάς τους είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν του δείγματος 13.

Η μέτρηση του δείγματος 14 – LCO οδηγεί στα αναμενόμενα αποτελέσματα. Το LCO, όντας ένα κλάσμα που αποτελείται από 60% περίπου αρωματικούς υδρογονάνθρακες (που δεν αυταναφλέγονται εύκολα), παρουσιάζει κακή ποιότητα ανάφλεξης και καύσης. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τις τιμές των παραμέτρων και την καμπύλη του διαγράμματος ROHR – Time, που δείχνουν ότι η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση καύσης του είναι πολύ μεγάλες, ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι χαμηλός και ότι οι χρόνοι της κύριας καύσης αλλά και ολόκληρης της καύσης είναι αρκετά μεγάλοι. Επίσης, η εμφάνιση τοπικού

ακροτάτου υποδεικνύει ότι η καύση του είναι σταδιακή, γεγονός που οφείλεται στους αρωματικούς υδρογονάνθρακες, που περιέχει το κλάσμα αυτό και αργούν να αυταναφλεγούν. Τα παραπάνω στοιχεία δικαιολογούν και τη σημαντικά χαμηλή τιμή του δείκτη ECN, αλλά και αυτή του δείκτη αρωματικότητας που είναι πολύ υψηλός και ισούται με 883. Μάλιστα, η προσπάθεια για μία επιπλέον μέτρηση αυτού του δείγματος, οδήγησε στην αυτόματη διακοπή της, λόγω της εναπόθεσης σημαντικής ποσότητας στερεών καταλοίπων στο σύστημα φίλτρου.

Κρίνεται σημαντικό να αναφερθεί ότι η προσπάθεια ανάλυσης του δείγματος Slurry FCC δεν ολοκληρώθηκε, λόγω της έμφραξης του συστήματος φίλτρου της συσκευής, γεγονός που ίσως προέβλεπε και η πολύ υψηλή τιμή του δείκτη αρωματικότητάς του.

## 5.2. Σχετικά με τις μετρήσεις στη συσκευή Spectro Xepos

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τη συσκευή Spectro Xepos της Ametek οδηγούν στο συμπέρασμα ότι σχεδόν όλα τα δείγματα καυσίμων που μετρήθηκαν είναι καύσιμα υψηλού θείου. Τα δείγματα εκτός από το 1 και το 13, είναι καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, ενώ τα δείγματα 1 και 13 είναι τα μόνα που είναι χαμηλού θείου, με συγκέντρωση μικρότερη ή ελάχιστα μεγαλύτερη από 0,50% m/m. Επίσης, παρατηρείται ότι και το δείγμα Slurry FCC δεν έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε θείο, αφού η τιμή της συγκέντρωσης του θείου που βρίσκεται στο δείγμα αυτό, ισούται με 0,62% m/m. Η περιεκτικότητα των περισσότερων δειγμάτων σε θείο κυμαίνεται στην περιοχή 1,85 – 2,84% m/m, ενώ αυτή των δειγμάτων 8 και 10 είναι πολύ κοντά στην τιμή 3,5% m/m, που αποτελεί το ανώτατο όριο των καυσίμων υψηλού θείου.

## 5.3. Γενικά συμπεράσματα

Από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών, μέσω της συσκευής FIA – 100/FCA μπορούν να παρουσιαστούν κάποια γενικά αποτελέσματα για τον δείκτη αρωματικότητας των καυσίμων και τον δείκτη ECN.

Αποτελεί πλέον αποδεκτό γεγονός ότι ο δείκτης αρωματικότητας των καυσίμων, θα πρέπει να χρησιμοποιείται απλά ως μία αρχική ένδειξη της ποιότητας ανάφλεξης και καύσης ενός υπολειμματικού καυσίμου. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η τιμή του υποδηλώνει ένα καύσιμο με καλές ιδιότητες καύσης, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η συμπεριφορά του καυσίμου αυτού κατά την καύση του σε έναν κινητήρα θα είναι ανάλογη [13], [25].

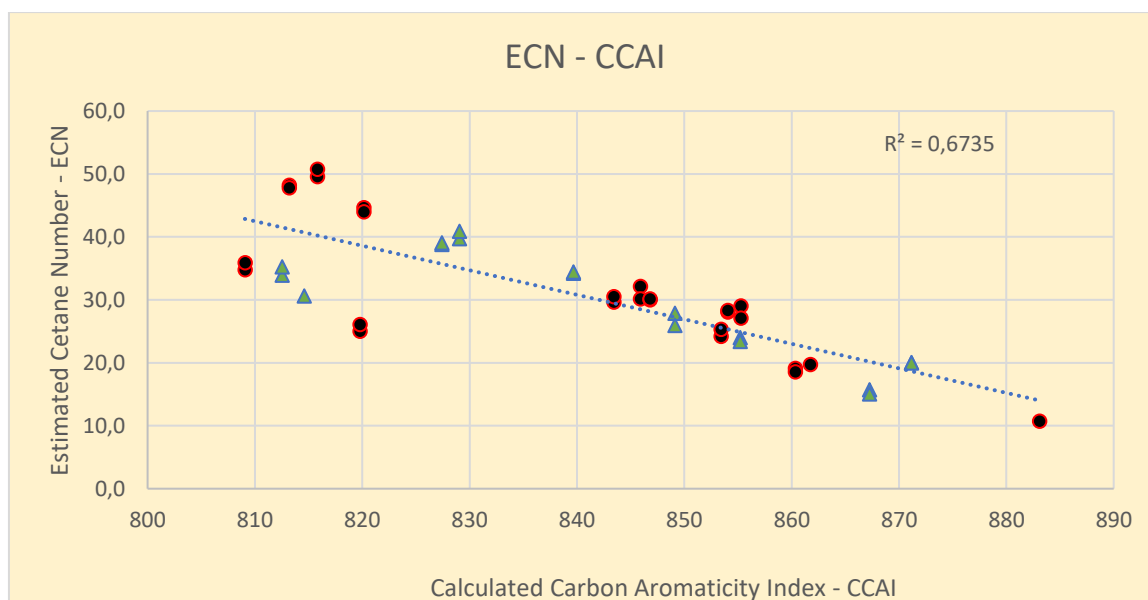
Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που υπολειμματικά καύσιμα με αρκετά διαφορετική τιμή δείκτη ECN, έχουν παρόμοια τιμή δείκτη αρωματικότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η σχέση μεταξύ των δειγμάτων 4 και 13. Η τιμή του δείκτη CCAI και των δύο δειγμάτων ισούται με 820, τη στιγμή που η διαφορά των τιμών του δείκτη ECN είναι περίπου 20 μονάδες. Η διαφορά αυτή είναι αρκετά μεγάλη και ενέχει κινδύνους. Αναλυτικότερα, σε περίπτωση που δεν πραγματοποιηθεί μέτρηση των δύο αυτών δειγμάτων σε συσκευή σταθερού όγκου θαλάμου καύσης, τότε τα καύσιμα θεωρείται ότι έχουν την ίδια ποιότητα καύσης,

σύμφωνα με τον δείκτη CCAI τους. Ωστόσο, ο δείκτης ECN του δείγματος 13, που είναι μικρότερος από αυτόν του δείγματος 4, το καθιστά ακατάλληλο για χρήση σε κάποιους κινητήρες. Επομένως, η ενδεχόμενη χρήση του καυσίμου αυτού, μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές βλάβες του κινητήρα. Οι βλάβες στον κινητήρα μπορούν να γίνουν και μόνιμες, αν γίνεται συστηματική χρήση του καυσίμου αυτού [32], [33].

Επιπρόσθετα, παρατηρείται συχνά το φαινόμενο όπου ένα καύσιμο έχει μικρότερο δείκτη αρωματικότητας από ένα άλλο (δηλαδή έχει καλύτερη ποιότητα ανάφλεξης), ενώ ο δείκτης ECN δείχνει το αντίθετο αποτέλεσμα, δηλαδή είναι υψηλότερος στη δεύτερη περίπτωση. Η αντίθεση αυτή εντοπίζεται ανάμεσα στα δείγματα 1, 2 και 3. Σύμφωνα με τις τιμές του δείκτη CCAI, καλύτερη συμπεριφορά εμφανίζει το δείγμα 1 και ακολουθούν με τη σειρά το 2 και το 3. Αντίθετα, υψηλότερο ECN εμφανίζει το δείγμα 3, ακολουθεί το 2 και τον χαμηλότερο δείκτη ECN εμφανίζει το δείγμα 1.

Μελέτες που έχουν γίνει, δείχνουν ότι ο δείκτης αρωματικότητας πυρολυμένων υπολειμματικών καυσίμων υποτιμά την ποιότητα ανάφλεξής τους [13]. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι ο δείκτης αρωματικότητας CCAI εμφανίζει αποκλίσεις ανάλογα με το είδος και τη σύνθεση των υπολειμματικών καυσίμων [13].

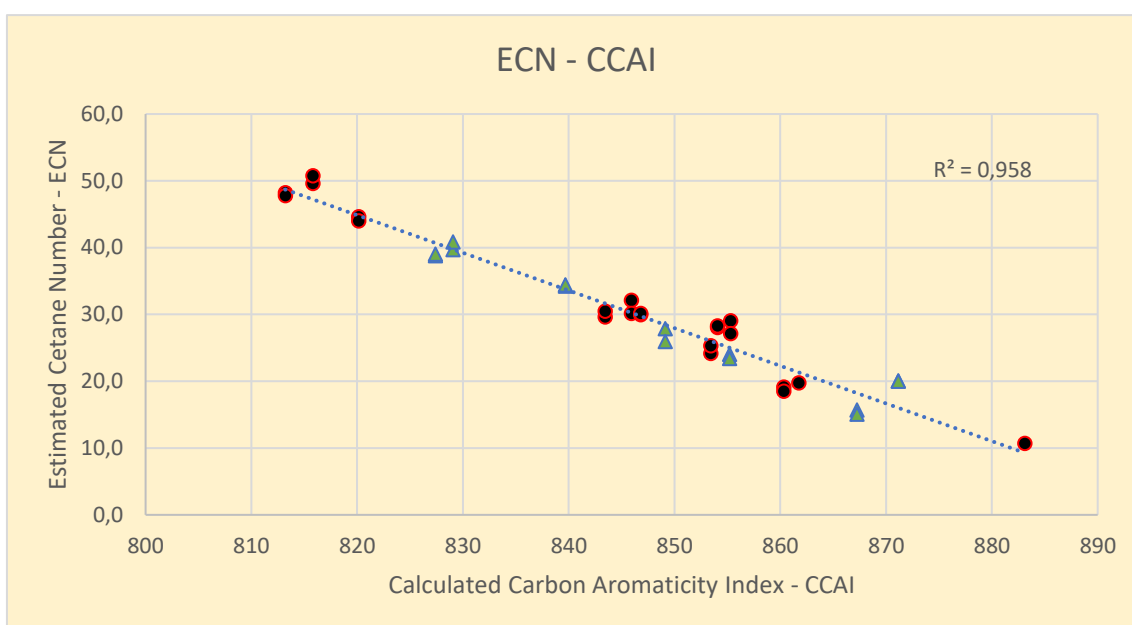
Οι μετρήσεις όλων των δειγμάτων και μειγμάτων των υπολειμματικών καυσίμων που έγιναν με τη βοήθεια της συσκευής FIA – 100/FCA και αυτές που έγιναν με τη βοήθεια της SVM 3000, δίνουν τη δυνατότητα σύγκρισης αυτών των καυσίμων. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να γίνει η συσχέτιση μεταξύ του δείκτη ECN και του δείκτη αρωματικότητας (CCAI) του κάθε δείγματος και μείγματος. Αυτή, μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά στο Διάγραμμα 87, όπου στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η τιμή του δείκτη αρωματικότητας και στον κάθετο η τιμή του δείκτη ECN. Τα δείγματα παρουσιάζονται με κυκλικό σχήμα, ενώ με ρόμβους τα μείγματα.



Διάγραμμα 87. Συσχέτιση μεταξύ δείκτη αρωματικότητας (CCAI) και εκτιμώμενου αριθμού κετανίου (ECN) για τα δείγματα και τα μείγματα που μετρήθηκαν.

Είναι γνωστό πως, σε ένα διάγραμμα, η τιμή της παραμέτρου  $R^2$  δείχνει το πόσο καλή είναι η συσχέτιση των μεγεθών που συγκρίνονται. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη και πιο κοντά στο 1

βρίσκεται αυτή, η συσχέτιση των δύο μεγεθών (που συγκρίνονται) είναι και καλύτερη. Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 87, παρατηρώντας την τιμή της παραμέτρου  $R^2$  που ισούται με 0,6735, γίνεται αντιληπτό ότι δεν είναι πολύ υψηλή, γεγονός που υποδεικνύει την όχι και τόσο καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών ECN και CCAI. Παρατηρείται επίσης ότι, τα δείγματα καυσίμων που βρίσκονται στις περιοχές όπου ο δείκτης CCAI κυμαίνεται μεταξύ 809 και 820 και ο δείκτης ECN μεταξύ 25,0 και 35,9 παρουσιάζουν ελαφρώς διαφορετική σχέση δεικτών CCAI – ECN από τα υπόλοιπα που φαίνεται ότι ακολουθούν μία φθίνουσα γραμμική καμπύλη (όσο μειώνεται η τιμή του ECN και αυξάνεται η τιμή του CCAI). Επομένως, αν αφαιρεθούν οι μετρήσεις των δειγμάτων αυτών από το διάγραμμα, η συσχέτιση των δύο μεγεθών θα βελτιωθεί. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα δείγματα με κυκλικό σχήμα, ενώ με ρόμβους τα μείγματα.



Διάγραμμα 88. Συσχέτιση μεταξύ δείκτη αρωματικότητας (CCAI) και εκτιμώμενου αριθμού κετανίου (ECN) για τα δείγματα και τα μείγματα που παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.

Πράγματι, από το Διάγραμμα 88 και από την τιμή της παραμέτρου  $R^2$  που αυτή τη φορά ισούται με 0,958, είναι φανερό ότι η συσχέτιση μεταξύ των δεικτών ECN και CCAI βελτιώθηκε με την απομάκρυνση των δειγμάτων καυσίμου που εμφανίζουν ελαφρώς διαφοροποιημένη σχέση μεταξύ των δύο δεικτών τους, ωστόσο παραμένει όχι ιδιαίτερα καλή. Τα δείγματα που εμφανίζουν ελαφρώς διαφοροποιημένη συμπεριφορά σε σχέση με τα άλλα δείγματα και απομακρύνθηκαν από το προηγούμενο διάγραμμα, είναι αυτά που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των δύο δεικτών τους. Πιο συγκεκριμένα, είναι το δείγμα 1 με τα μείγματα στα οποία περιέχεται (μείγμα 1 και 2) και το δείγμα 13, στα οποία ενώ ο δείκτης ECN τους δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλος (από 30,6 έως 35,9 για το δείγμα 1 και τα μείγματα 1 και 2 και από 25,0 έως 26,1 για το δείγμα 13), ο δείκτης αρωματικότητας είναι πολύ μικρός (809 για το δείγμα 1, 813 για το μείγμα 1, 815 για το μείγμα 2 και 820 για το δείγμα 13). Την ίδια στιγμή δείγματα καυσίμων όπως για παράδειγμα το δείγμα 3, που έχει μεγαλύτερους δείκτες ECN (από 49,6 έως 50,8), έχει μεγαλύτερο δείκτη αρωματικότητας (ίσο με 816).

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, λοιπόν, το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η αξιολόγηση της ποιότητας ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων χρησιμοποιώντας συσκευή θαλάμου καύσης σταθερού όγκου που μετρά την καθυστέρηση ανάφλεξης και την καθυστέρηση καύσης του, σύμφωνα με το πρότυπο IP 541/06, είναι πιο ακριβής και λαμβάνει υπόψη περισσότερες ιδιότητες των υπολειμματικών καυσίμων σε σχέση με την υπολογιστική μέθοδο του δείκτη αρωματικότητας. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν αποτελεί προδιαγραφή στο πρότυπο ISO 8217, λόγω του μειονεκτήματος που παρουσιάζει. Η μέτρηση εδώ, πραγματοποιείται σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας, ενώ οι συνθήκες λειτουργίας ενός κινητήρα συνεχώς μεταβάλλονται (όπως και αυτές σε πρότυπους κινητήρες diesel για τη μέτρηση της ποιότητας ανάφλεξης υπολειμματικών καυσίμων όπως είναι ο AVL Caterpillar 1Y540 και ο Bolnes 1 DNL190) [13]. Γενικά, η μεγάλη ποικιλία κινητήρων και οι συνθήκες λειτουργίας του καθενός διαφοροποιούν την έννοια της ποιότητας ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων. Υπολειμματικά καύσιμα που μπορεί να γίνονται αποδεκτά από κάποιους κινητήρες, σε άλλους κινητήρες μπορεί να δημιουργούν βλάβες και αντίστροφα, δηλαδή καύσιμα με χαμηλή ποιότητα ανάφλεξης μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα κατά την καύση σε κάποιους κινητήρες και όχι σε όλους [30].



## Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω καθώς και το γεγονός ότι είναι η πρώτη φορά στην Ελλάδα που γίνεται προσπάθεια αξιολόγησης της ποιότητας ανάφλεξης υπολειμματικών καυσίμων με τη χρήση της συσκευής FIA – 100/FCA, γίνεται εμφανής η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα.

Κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί εκτεταμένος αριθμός αναλύσεων υπολειμματικών καυσίμων με τη συσκευή FIA – 100/FCA, με έμφαση ίσως σε καύσιμα τα οποία προέρχονται από διεργασίες του διυλιστηρίου όπως αυτές της ατμοσφαιρικής απόσταξης, της απόσταξης υπό κενό, της καταλυτικής πυρόλυσης, της ιξωδόλυσης.

Προτείνεται να αναλυθούν μείγματα δύο ή περισσότερων κλασμάτων υπολειμματικών καυσίμων.

Τέλος, συνιστάται να πραγματοποιηθούν αναλύσεις με την FIA – 100/FCA σε υπολειμματικά καύσιμα χαμηλού θείου. Τα καύσιμα αυτά αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά, ειδικά στην ναυτιλία.

## Βιβλιογραφία

- [1] Ε. Λόης, Φ. Ζαννίκος, and Δ. Καρώνης, *Τεχνολογία Καυσίμων Και Λιπαντικών*. Αθήνα, 2014.
- [2] D. Karonis, I. Zahos-Siagos, D. Filimon, and F. Vasileiou, “A multivariate statistical analysis to evaluate and predict ignition quality of marine diesel fuel distillates from their physical properties,” *Fuel Processing Technology*, vol. 166, pp. 299–311, Nov. 2017.
- [3] M. Lapuerta, J. Rodríguez-Fernández, and E. F. de Mora, “Correlation for the estimation of the cetane number of biodiesel fuels and implications on the iodine number,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 11, pp. 4337–4344, Nov. 2009.
- [4] “diesel-fuel-tech-review.pdf.” Accessed: Aug. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/diesel-fuel-tech-review.pdf>
- [5] admin@cfr.com, “Cetane Rating Unit | CFR F5 Cetane Rating Unit | CFR Engines Inc.,” *CFR Engines*, Mar. 13, 2019. <https://cfrengines.com/cetane-rating-unit/> (accessed Aug. 09, 2023).
- [6] G. I. R. Wilson, “Comparison of ASTM D613 and ASTM D6890”.
- [7] S. A. Treese, P. R. Pujado, and D. S. Jones, *Handbook of Petroleum Processing*, Second Edition. Springer Reference, 2015.
- [8] “Stability, Combustion, and Compatibility of High-Viscosity Heavy Fuel Oil Blends with a Fast Pyrolysis Bio-Oil.” <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acs.energyfuels.0c00721>
- [9] K. E. Nielsen, J. Dittmer, A. Malmendal, and N. Chr. Nielsen, “Quantitative Analysis of Constituents in Heavy Fuel Oil by <sup>1</sup>H Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Spectroscopy and Multivariate Data Analysis,” *Energy Fuels*, vol. 22, no. 6, pp. 4070–4076, Nov. 2008.
- [10] A. Takeda *et al.*, “Combustion Quality of Marine Residual Fuel Trend, Control, Effect on Engine,” *CIMAC Congress*, no. 84, Bergen 2010.
- [11] Ν. Π. Κυρτάτος, *Ναυτικοί Κινητήρες Diesel, Θέματα Σχεδίασης και Λειτουργίας*, Πρώτη έκδοση. Εκδόσεις Συμμετρία, 1993.
- [12] “KYA\_128\_2016\_ΦΕΚ\_3958\_B\_9-12-2016.pdf.” Accessed: Aug. 09, 2023. [Online]. Available: [https://www.ynanp.gr/media/documents/%CE%9A%CE%A5%CE%91\\_128\\_2016\\_%CE%A6%CE%95%CE%9A\\_3958\\_%CE%92\\_9-12-2016.pdf](https://www.ynanp.gr/media/documents/%CE%9A%CE%A5%CE%91_128_2016_%CE%A6%CE%95%CE%9A_3958_%CE%92_9-12-2016.pdf)
- [13] K. Steernberg and S. Forget, “The effects of a changing oil industry on marine fuel quality and how new and old analytical techniques can be used to ensure predictable performance in marine diesel engines,” *CIMAC Congress*, no. 198, Vienna 2007.
- [14] “Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity).” <https://www.astm.org/d0445-21.html>
- [15] ExxonMobil, “Viscosity - Temperature Relationships (Marine Fuels).”
- [16] “Chevron\_Everything You Need To Know About Marine Fuels\_v8-21\_DESKTOP.pdf.” Accessed: Aug. 09, 2023. [Online]. Available: [https://www.chevronmarineproducts.com/content/dam/chevron-marine/fuels-brochure/Chevron\\_Everything%20You%20Need%20To%20Know%20About%20Marine%20Fuels\\_v8-21\\_DESKTOP.pdf](https://www.chevronmarineproducts.com/content/dam/chevron-marine/fuels-brochure/Chevron_Everything%20You%20Need%20To%20Know%20About%20Marine%20Fuels_v8-21_DESKTOP.pdf)

- [17] “Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry.” <https://www.astm.org/d4294-21.html>
- [18] “Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester.” <https://www.astm.org/d0093-20.html>
- [19] “Standard Test Method for Determination of Hydrogen Sulfide in Fuel Oils by Rapid Liquid Phase Extraction.” <https://www.astm.org/d7621-16r21.html>
- [20] “Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration.” <https://www.astm.org/d0664-18e02.html>
- [21] “Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products.” <https://www.astm.org/d0097-17br22.html>
- [22] “Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter.” <https://www.astm.org/d0240-19.html>
- [23] Z. Korczewski, “Methodology for determining the elemental composition, as well as energy and ignition properties of the low-sulfur marine fuels,” *Combustion Engines*, vol. 186, no. 3, pp. 96–102, Sep. 2021.
- [24] L. Chybowski, J. Myśków, and P. Kowalak, “Analysis of fuel properties in the context of the causes of three marine auxiliary engines failure – A case study,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 150, p. 107362, Aug. 2023.
- [25] “Standard Test Method for Ash from Petroleum Products.” <https://www.astm.org/d0482-19.html>
- [26] “ISO-8217-2017-Tables-1-and-2-1-1.pdf.” Accessed: Aug. 09, 2023. [Online]. Available: <https://marine.wfscorp.com/sites/default/files/d7/documents/sites/default/files/ISO-8217-2017-Tables-1-and-2-1-1.pdf>
- [27] L. Goldsworthy, “Computational Fluid Dynamics Modelling of Residual Fuel Oil Combustion in the Context of Marine Diesel Engines,” *International Journal of Engine Research*, vol. 7, no. 2, pp. 181–199, Apr. 2006.
- [28] “Standard Test Method for Determination of Asphaltenes (Heptane Insolubles) in Crude Petroleum and Petroleum Products.” <https://www.astm.org/d6560-17.html>
- [29] P. I. News, “Marine fuels compatibility testing by automated instrumentation according to ASTM D4740,” *Petro Online*. <http://www.petro-online.com/article/measurement-and-testing/14/ad-systems/marine-fuels-compatibility-testing-by-automated-instrumentation-according-to-astm-d4740/3081> (accessed Aug. 09, 2023).
- [30] P. de Hoog, K. Steernberg, and S. Forget, “Investigating the ignition properties of marine fuels by the Fuel Ignition Analyser and its comparison to marine engines.,” *CIMAC Congress*, no. 70, Bergen 2010.
- [31] F. Arvelo and I. P. Armas, “Ignition quality of residual fuel oils,” *Journal of Maritime Research*, vol. 2, no. 3, Art. no. 3, Dec. 2005.
- [32] “Fuel Quality Guide - Ignition and Combustion,” *CIMAC Congress*, 2011.
- [33] D. O. Halle, J. Stirling, A. Strom, and J. K. Paulsen, “Ignition and Combustion properties of Marine Fuels, potential Problems and Challenges. Will current and revised Fuel Specifications be able to ensure Ignition and Combustion characteristics will be adequately addressed?,” *CIMAC Congress*, no. 246, Bergen 2010.

- [34] “sl2010-527.pdf.” Accessed: Aug. 13, 2023. [Online]. Available: [https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2010-527.pdf?sfvrsn=dd5079f6\\_4](https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2010-527.pdf?sfvrsn=dd5079f6_4)
- [35] M. Vermeire, J. Spencer, and W. Ang, “Bench test techniques to assess the efficacy of marine fuel additives to improve combustion,” *CIMAC Congress*, no. 139, Vienna 2007.
- [36] H. Jin *et al.*, “Experimental and kinetic modeling study of  $\alpha$ -methyl-naphthalene pyrolysis: Part II. PAH formation,” *Combustion and Flame*, vol. 233, p. 111530, Nov. 2021.
- [37] O. Grummitt and A. C. Buck, “A Synthesis of 1-Methylnaphthalene,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 65, no. 2, pp. 295–296, Feb. 1943.
- [38] “2,2,4,4,6,8,8-HEPTAMETHYLNONANE | 4390-04-9.” [https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_EN\\_CB3251935.htm](https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB3251935.htm)
- [39] “Methylcyclohexane | 108-87-2,” *ChemicalBook*. [https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_EN\\_CB7852767.htm](https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB7852767.htm)
- [40] PubChem, “Hexadecane.” <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/11006>
- [41] “IP 541/06: Determination of ignition and combustion characteristics of residual fuels - Constant volume combustion Chamber method.”
- [42] “Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity).” <https://www.astm.org/d7042-21a.html> (accessed Aug. 31, 2023).
- [43] “1798-446.pdf.” Accessed: Aug. 31, 2023. [Online]. Available: <https://photos.labwrench.com/equipmentManuals/1798-446.pdf>
- [44] D. J. Luning Prak, S. M. Alexandre, J. S. Cowart, and P. C. Trulove, “Density, Viscosity, Speed of Sound, Bulk Modulus, Surface Tension, and Flash Point of Binary Mixtures of n-Dodecane with 2,2,4,6,6-Pentamethylheptane or 2,2,4,4,6,8,8-Heptamethylnonane,” *J. Chem. Eng. Data*, vol. 59, no. 4, pp. 1334–1346, Apr. 2014.