

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ**Γ. Νταντάσιος¹, Π. Σχοινάς¹, Δ. Καρώνης^{1*}**¹ Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα(*dkaronis@central.ntua.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η ποιότητα ανάφλεξης των βαρέων υπολειμματικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τη σωστή λειτουργία των κινητήρων των πλοίων. Με βάση τις προδιαγραφές που ορίζονται στο πρότυπο ISO 8217, η ποιότητα ανάφλεξης προσδιορίζεται έμμεσα μέσω του δείκτη αρωματικότητας (calculated carbon aromaticity index). Η εργασία αυτή παρουσιάζει μετρήσεις ποιότητας ανάφλεξης υπολειμματικών καυσίμων από διυλιστήρια της χώρας που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο IP 541. Η μέθοδος βασίζεται στη λογική του θαλάμου καύσης σταθερού όγκου (constant volume combustion chamber – CVCC) όπου σε συνθήκες υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας μετρούνται η καθυστέρηση ανάφλεξης και η καθυστέρηση καύσης. Μέσω αυτών των παραμέτρων υπολογίζεται η ποιότητα ανάφλεξης του υπολειμματικού καυσίμου. Αντίστοιχη διαδικασία χρησιμοποιείται πλέον και για τον προσδιορισμό του αριθμού κετανίου των ντήζελ. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε καύσιμα με διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους (περιεκτικότητα σε θείο, ιξώδες), καθώς και διαφορετική προέλευση (ατμοσφαιρική απόσταση, διεργασίες πυρόλυσης). Από τις μετρήσεις ήταν εμφανές πως η ποιότητα ανάφλεξης των υπολειμμάτων ατμοσφαιρικής απόσταξης είναι καλύτερη από αυτήν των υπολειμματικών καυσίμων που περιέχουν συστατικά που προέρχονται από μονάδα καταλυτικής πυρόλυσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ποιότητας ανάφλεξης επιχειρήθηκε να συσχετιστούν με τις τιμές του δείκτη αρωματικότητας των καυσίμων. Στο μεγαλύτερο αριθμό των δειγμάτων είναι εμφανής η τάση μείωσης της ποιότητας ανάφλεξης για καύσιμα με υψηλή τιμή δείκτη αρωματικότητας, κάτι που είναι αναμενόμενο. Επειδή οι σχετικές μετρήσεις στη διεθνή βιβλιογραφία είναι σχετικά περιορισμένες, χρειάζεται μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων με στόχο την εξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων ως προς τη συσχέτιση αυτών των δύο παραμέτρων

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Καύσιμα Ναυτιλίας, Υπολειμματικά Καύσιμα, Ποιότητα Ανάφλεξης, Ισοδύναμος Αριθμός Κετανίου

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ναυτιλία είναι ο βασικός τρόπος μεταφοράς κάθε είδους φορτίων σε μεγάλες ποσότητες και για μεγάλες αποστάσεις. Το βασικό καύσιμο που χρησιμοποιείται για την πρόωση των πλοίων είναι βαρύ υπολειμματικό καύσιμο, γνωστό διεθνώς ως heavy fuel oil (HFO), ενώ στη χώρα μας επικρατεί ο όρος μαζούτ ναυτιλίας (από τη γαλλική λέξη mazout). Πρόκειται για καύσιμο υψηλού ιξώδους που προέρχεται κατά κύριο λόγο από υπολείμματα απόσταξης πετρελαίου. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο σε αργόστροφους δίχρονους κινητήρες ντήζελ.

Ως καύσιμο που προορίζεται για χρήση σε μηχανές εσωτερικής καύσης, ο τελικός χρήστης ενδιαφέρεται να γνωρίζει πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορεί να καεί κάθε HFO που διακινείται ως καύσιμο ναυτιλίας. Ο κινητήρας ντήζελ λειτουργεί μέσω αυτανάφλεξης του καυσίμου επομένως το βασικό χαρακτηριστικό του καυσίμου που σχετίζεται με την καύση είναι η καθυστέρηση ανάφλεξης, ο χρόνος δηλαδή που μεσολαβεί μεταξύ της έγχυσης του καυσίμου και της έναρξης της καύσης. Στην περίπτωση των ταχύστροφων κινητήρων ντήζελ που χρησιμοποιούνται σε οχήματα, η ποιότητα ανάφλεξης προσδιορίζεται μετρώντας τον αριθμό κετανίου του καυσίμου. Ο αριθμός

κετανίου προσδιορίζεται μόνο σε αποστάγματα και δε μπορεί να προσδιοριστεί σε υπολειμματικά καύσιμα όπως το HFO. Για να δοθεί μια εκτίμηση της ποιότητας ανάφλεξης ενός υπολειμματικού καυσίμου, χρησιμοποιείται εδώ και πάνω από 30 χρόνια ο δείκτης αρωματικότητας (calculated carbon aromaticity index – CCAI), μια υπολογιστική παράμετρος που βασίζεται στην πυκνότητα και στο ιξώδες του καυσίμου. Ο δείκτης αρωματικότητας χρησιμοποιείται στο πρότυπο ISO 8217 που δίνει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καυσίμων της ναυτιλίας για το χαρακτηρισμό της ποιότητας ανάφλεξης των υπολειμματικών καυσίμων.

Ο προσδιορισμός του αριθμού κετανίου στα μέσα κλάσματα του πετρελαίου απαιτεί τη χρήση πρότυπου κινητήρα, αλλά η μέθοδος μέτρησης (ASTM D613) έχει μεγάλα περιθώρια επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές μέθοδοι μέτρησης που χρησιμοποιούν τη λογική του θαλάμου καύσης σταθερού όγκου (constant volume combustion chamber, CVCC) που μετρούν την καθυστέρηση ανάφλεξης του καυσίμου στο θάλαμο και μέσω αυτής υπολογίζουν τον αριθμό κετανίου. Υπάρχουν αυτή τη στιγμή τρεις συσκευές CVCC για τον προσδιορισμό του αριθμού κετανίου και για κάθε μία υπάρχουν και οι αντίστοιχες πρότυπες μέθοδοι. Σε αυτή τη λογική του CVCC, έχει αναπτυχθεί και μία αντίστοιχη συσκευή που μετρά την ποιότητα ανάφλεξης σε υπολειμματικά καύσιμα. Η μέτρηση γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο IP 541. Το Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών του ΕΜΠ έχει προμηθευτεί πρόσφατα μια τέτοια συσκευή κι έχουν πραγματοποιηθεί οι πρώτες μετρήσεις ποιότητας ανάφλεξης υπολειμματικών καυσίμων. Η εργασία αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων καθώς και την προσπάθεια συσχέτισης αυτών των μετρήσεων με τις τιμές δείκτη αρωματικότητας που υπολογίστηκαν για αυτά τα καύσιμα.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι μετρήσεις ποιότητας ανάφλεξης πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή FIA/FCA 100 της Fueltech Solutions AS σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο IP 541. Η συσκευή διαθέτει θάλαμο καύσης σταθερού όγκου που γεμίζει με αέρα σε συνθήκες υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας. Στο θάλαμο εισάγεται το προς μέτρηση καύσιμο μέσω αντλίας καυσίμου και ακροφυσίου ψεκασμού όπου και αυταναφλέγεται. Η συσκευή καταγράφει τη μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας ανά 0,01 ms και με τη βοήθεια του λογισμικού που διαθέτει προσδιορίζει την καθυστέρηση ανάφλεξης (ignition delay), την καθυστέρηση καύσης (combustion delay), το ρυθμό έκλυσης θερμότητας (rate of heat release, ROHR), και τον "εκτιμώμενο" αριθμό κετανίου (estimated cetane number, ECN). Η συσκευή πραγματοποιεί 25 ανεξάρτητους ψεκασμούς και υπολογίζει το μέσο όρο αυτών των μετρήσεων για την εκτίμηση των μεγεθών που προαναφέρθηκαν.

ΚΑΥΣΙΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Χρησιμοποιήθηκαν 14 καύσιμα για τις δοκιμές. 13 από αυτά προέρχονταν από διυλιστήρια της χώρας, και 1 ήταν καύσιμο διεργαστηριακού ελέγχου. Τα δείγματα περιλάμβαναν κατά κύριο λόγο υπολειμματικά υπολειμματικά καύσιμα (HFO), ενώ περιλαμβάνονταν και απόσταγμα χαμηλής ποιότητας ανάφλεξης (LCO). Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τόσο χαμηλής ποιότητας ανάφλεξης, όσο και καλής ποιότητας ανάφλεξης. Το μεγαλύτερο μέρος τους ήταν καύσιμα υψηλού θείου. Πέραν των 14 καυσίμων, παρασκευάστηκαν και 9 μίγματα μέσω ανάμιξης κάποιων από τα βασικά καύσιμα με άλλα συστατικά. Στόχος αυτών των μιγμάτων ήταν η κάλυψη τιμών δείκτη αρωματικότητας που δεν καλυπτόταν από τα διαθέσιμα καύσιμα. Οι βασικές ιδιότητες όλων των καυσίμων δίνονται στον Πίνακα 1.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Σε όλα τα καύσιμα και τα μίγματα που προαναφέρθηκαν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προσδιορισμού ποιότητας ανάφλεξης στη συσκευή FIA/FCA 100. Οι βασικές μετρήσεις ποιότητας ανάφλεξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Επισημαίνεται ότι η βασική παράμετρος που αφορά

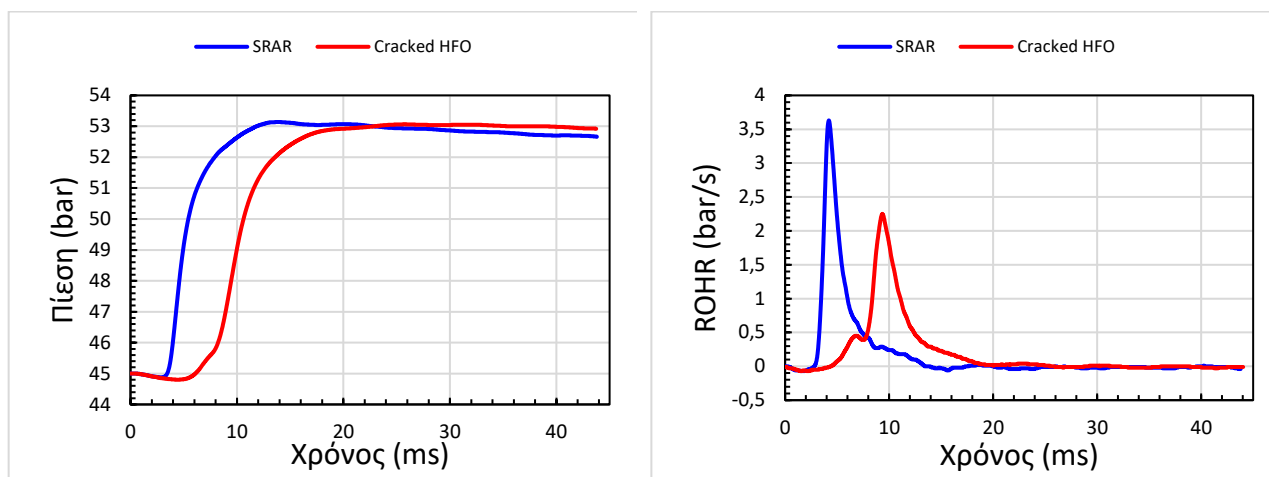
την ποιότητα ανάφλεξης ενός καυσίμου που χρησιμοποιείται σε κινητήρα ντήζελ είναι η καθυστέρηση ανάφλεξης, ο χρόνος δηλαδή που μεσολαβεί από την εισαγωγή του καυσίμου έως την έναρξη της ανάφλεξής του. Όσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση ανάφλεξης τόσο χαμηλότερη είναι η ποιότητα ανάφλεξης του καυσίμου. Ενδεικτικές καμπύλες μεταβολής της πίεσης συναρτήσει του χρόνου απεικονίζονται στο Σχήμα 1. Τα καύσιμα με μικρή ποιότητα ανάφλεξης παρουσιάζουν σχετικά σύντομα απότομη αύξηση της πίεσης (λόγω γρήγορης έναρξης της ανάφλεξης και ανάπτυξης της πλήρους καύσης του καυσίμου. Σε αντίθεση, καύσιμα με προβληματική ποιότητα ανάφλεξης εμφανίζουν πιο αργή έναρξη της ανάφλεξης, και πιο αργή μεταβολή της πίεσης με το χρόνο, καθώς ένα καύσιμο με προβληματική ποιότητα ανάφλεξης έχει σημαντικά βραδεία ανάπτυξη της καύσης μέσα στο θάλαμο.

Πίνακας 1. Ιδιότητες καυσίμων και μιγμάτων.

	Φυσικοχημικές Ιδιότητες				Μετρήσεις FIA/FCA				
	Ιξώδες (mm ² /s) (50 °C)	Ιξώδες (mm ² /s) (100 °C)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θείο (% m/m)	CCAI	ID (ms)	MCD (ms)	ROHR (bar/ms)	ECN
Δ1	235,6	56,06	942,6	0,50	809,2	4,65	5,13	3,01	35,4
Δ2	222,6	47,60	946,1	1,98	813,3	3,73	4,06	3,67	48,0
Δ3	181,8	43,49	946,4	2,35	815,9	3,58	3,90	3,55	50,2
Δ4	463,8	87,66	960,8	2,56	820,3	3,94	4,34	3,94	44,3
Δ5	704,3	115,6	1.006,4	2,84	861,8	5,55	7,16	6,30	19,7
Δ6	121,3	31,15	985,9	1,85	860,3	5,94	7,33	2,74	18,8
Δ7	287,1	61,42	981,6	2,63	846,0	4,77	5,57	3,78	31,2
Δ8	918,9	64,24	992,1	3,43	845,1	4,90	5,93	3,38	28,1
Δ9	342,6	69,94	981,0	2,72	843,5	4,86	5,69	3,52	30,1
Δ10	317,2	64,51	990,8	3,42	854,1	4,88	5,92	3,50	28,2
Δ11	264,3	55,10	981,6	2,57	846,9	4,84	5,69	3,77	30,1
Δ12	268,4	58,04	988,4	2,09	853,5	5,17	6,37	2,99	24,8
Δ13	231,3	56,05	953,1	0,53	819,9	5,37	6,26	3,26	25,6
Δ14	2,419	1,161	923,2	0,62	883,2	7,75	9,30	1,71	10,7
M1	171,0	44,68	942,4	0,51	812,7	4,70	5,21	3,00	34,6
M2	222,6	53,88	947,5	0,53	814,7	5,03	5,63	3,10	30,6
M3	121,0	33,08	954,7	2,27	829,2	4,28	4,67	3,64	40,3
M4	51,69	17,29	941,3	1,71	827,5	4,40	4,79	4,30	38,9
M5	133,0	31,09	994,1	1,70	867,4	6,31	8,04	2,24	15,4
M6	181,8	43,93	985,8	2,02	855,3	5,36	6,53	2,90	23,7
M7	175,2	42,65	979,3	1,99	849,3	5,10	6,09	3,41	26,9
M8	262,5	52,34	1.005,9	2,89	871,3	5,61	7,12	2,49	20,0
M9	262,3	57,78	974,4	2,60	839,8	4,56	5,23	3,92	34,3

Εάν απεικονιστεί το διαφορικό της πίεσης ως προς το χρόνο (dp/dt) συναρτήσει του χρόνου, (δεξιά στο Σχήμα 1) παρουσιάζεται μια καμπύλη που απεικονίζει το ρυθμό έκλυσης θερμότητας (rate of heat release – ROHR) μέσα στο θάλαμο καύσης. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο που καθορίζει ουσιαστικά την ταχύτητα λειτουργίας του κινητήρα αφού θα πρέπει να δίνεται επαρκής χρόνος για να μπορέσει να καεί το σύνολο του καυσίμου που εισάγεται μέσα στο θάλαμο καύσης ώστε να μπορέσει να αξιοποιηθεί πλήρως η παραγόμενη θερμότητα. Σε δείγματα με μικρή καθυστέρηση ανάφλεξης εμφανίζεται μια οξεία καμπύλη με το μέγιστό της βρίσκεται περίπου στο μέσο του χρόνου μεταβολής της πίεσης λόγω της καύσης να εμφανίζεται σε μικρό χρονικό διάστημα από την εισαγωγή του δείγματος στο θάλαμο καύσης. Στα δείγματα με μεγάλη καθυστέρηση ανάφλεξης, η καμπύλη ρυθμού έκλυσης θερμότητας είναι εμφανώς πιο

πλατιά, με σημαντικά χαμηλότερη μέγιστη τιμή μεταβολής πίεσης. Εδώ η καύση κρατά εμφανώς σημαντικά περισσότερο χρόνο σε σχέση με ένα καύσιμο με καλή ποιότητα ανάφλεξης.



Σχήμα 1. Μεταβολή πίεσης στο θάλαμο καύσης και ρυθμός έκλυσης θερμότητας στη συσκευή FIA/FCA 100.

Παρά το γεγονός ότι ο δείκτης αρωματικότητας αποτελεί την παράμετρο που υπάρχει στις προδιαγραφές, τα αποτελέσματα των μετρήσεων ποιότητας ανάφλεξης δείχνουν πως 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 ^[1-2].

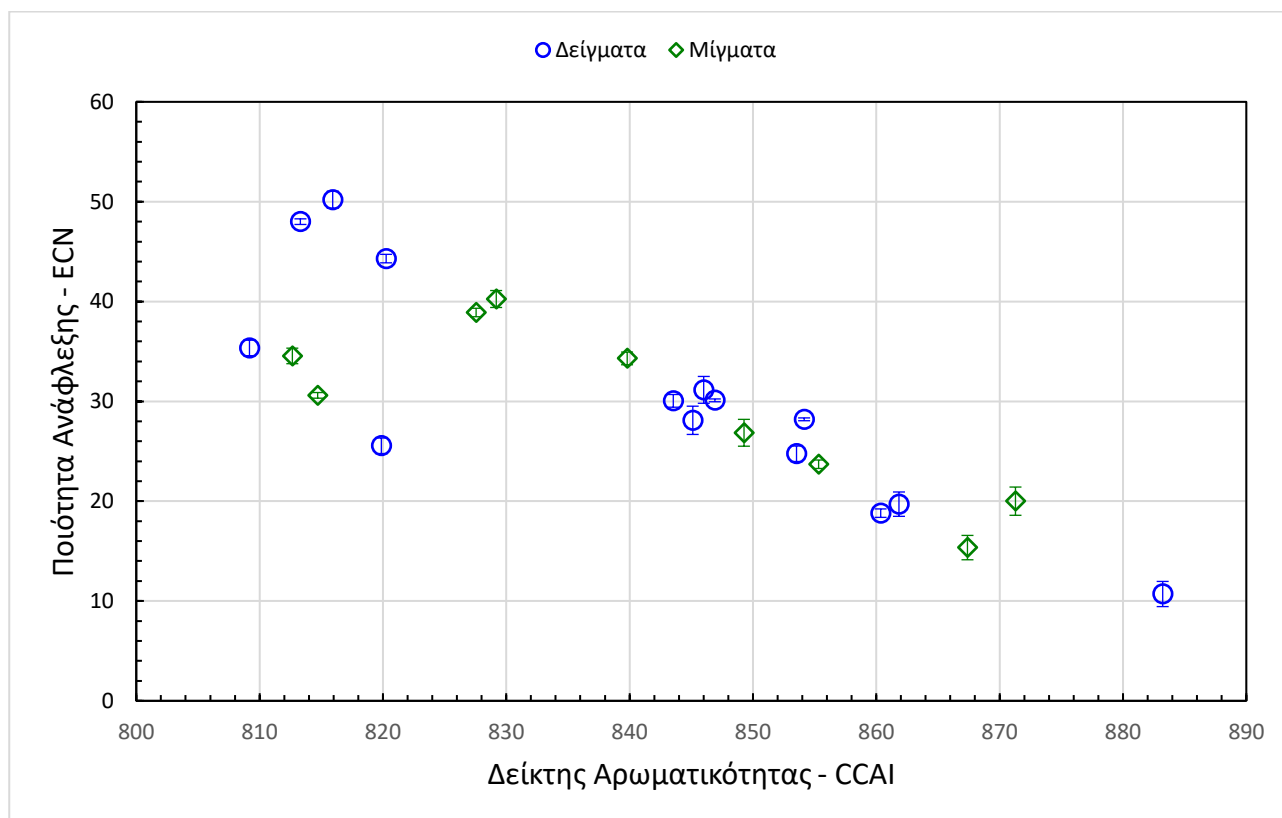
Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που υπολειμματικά καύσιμα με αρκετά διαφορετική τιμή δείκτη ECN, έχουν παρόμοια τιμή δείκτη αρωματικότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η σχέση μεταξύ των δειγμάτων 4 και 13. Η τιμή του δείκτη CCAI και των δύο δειγμάτων ισούται με 820, τη στιγμή που η διαφορά των 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 αρωματικότητας 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 ^[3-4].

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. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι ο δείκτης αρωματικότητας CCAI εμφανίζει αποκλίσεις ανάλογα με το είδος και τη σύνθεση των υπολειμματικών καυσίμων ^[2].

Οι μετρήσεις όλων των δειγμάτων και μιγμάτων των υπολειμματικών καυσίμων που έγιναν με τη βοήθεια της συσκευής FIA – 100/FCA σε συνδυασμό με τις τιμές του δείκτη αρωματικότητας 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 μίγματος.

Αυτή, μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά στο Σχήμα 2, όπου στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η τιμή του δείκτη αρωματικότητας και στον κάθετο η τιμή του δείκτη ECN.



Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων έχει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ δείκτη αρωματικότητας και δείκτη ECN. Υπάρχει όμως ένας αριθμός σημείων με τιμές δείκτη αρωματικότητας στην περιοχή 810 – 820 (καλή ποιότητα ανάφλεξης) όπου οι τιμές του δείκτη ECN είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις αναμενόμενες (της τάξης των 20 μονάδων). Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η συμπεριφορά του καυσίμου στον κινητήρα υπολείπεται σημαντικά σε σχέση με αυτό που αναμένεται, άρα η λειτουργία του κινητήρα θα μπορούσε να είναι προβληματική.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω παρατηρήσεις 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, 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, κάτι που καθιστά δύσκολη την επιβολή της μέτρησης, παρά την αποδοχή της από τους κατασκευαστές κινητήρων και τις εταιρίες που ασχολούνται με την αξιολόγηση της ποιότητας των καυσίμων της ναυτιλίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Takeda et al., "Combustion Quality of Marine Residual Fuel Trend, Control, Effect on Engine," CIMAC Congress, no. 84, Bergen 2010.
- [2] 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.
- [3] "Fuel Quality Guide - Ignition and Combustion," CIMAC Congress, 2011.

- [4] 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.
- [5] Spandagos C, Goudoulas TB, Luckham PF, Matar OK. (2012). *Langmuir*, 28, 7197–7211.