***ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ***

***ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ***

# *Προδιαγραφές Λιπαντικής Ικανότητας και Προβλήματα Ναυτιλιακών Καυσίμων μετά την Εφαρμογή των Νέων Απαιτήσεων*

***ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ***

***ΤΖΕΛΕΠΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ***

***ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ***
***ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Φ.ΖΑΝΝΙΚΟΣ***

***ΑΘΗΝΑ 2012***

| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | |
|---|---|
| **ΣΚΟΠΟΣ** | 4 |
| **ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ** | 5 |
| **ΠΕΡΙΛΗΨΗ** | 6 |
| **1. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ** | 9 |
| **ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ IMO - EMISSION CONTROL AREAS (ECA)** | 9 |
| **ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ISO 8217:2010 - MARINE DISTILLATE FUELS** | 12 |
| **ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ISO 8217:2010 - MARINE RESIDUAL FUELS** | 14 |
| **2. ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΕΙΟ** | 16 |
| **3. ΛΙΠΑΝΤΙΚΗ ΙΚΑΝΌΤΗΤΑ** | 18 |
| *Λίπανση* | 21 |
| *Ιξώδες και Ρευστά* | 22 |
| *Είδη λίπανσης* | 23 |
| *Η Καμπύλη Stribeck* | 24 |
| *Υδροδυναμική Λίπανση* | 25 |
| *Υδροδυναμική Ανύψωση* | 26 |
| *Υδροδυναμικά Έδρανα* | 27 |
| *Ελαστοϋδροδυναμική Λίπανση* | 28 |
| *Κυλιόμενα Στοιχεία Έδρασης* | 29 |
| *Οριακή λίπανση* | 29 |
| *Μεικτή Λίπανση* | 30 |
| *Αντλίες Εμβόλου/Κυλίνδρου* | 31 |
| *Αντλίες Οδοντωτού Τροχού/Κοχλία* | 31 |
| *Αντίσταση Ηλεκτρικής Επαφής (ECR – Electrical Contact Resistance)* | 32 |
| **4. ΔΗΛΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ** | 34 |
| *Κατασκευαστές Μηχανών Diesel Επίγειων Οχημάτων* | 34 |
| *Κατασκευαστές Μηχανών Diesel Πλοίων* | 35 |
| **5. ΥΔΡΟΓΟΝΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟΑΠΟΘΕΙΩΣΗ** | 39 |
| *Υδρογονοαποθείωση* | 39 |
| *Κατανάλωση Υδρογόνου –Απομάκρυνση Αζώτου, Οξυγόνου* | 40 |
| *Κατανάλωση – Κορεσμός Δεσμών –Απώλειες Υδρογόνου* | 40 |
| *Κατανάλωση Υδρογόνου* | 41 |
| *Συνοπτικά Στοιχεία – Ανάπτυξη Υδρογονοκατεργασίας* | 42 |
| *Τάσεις Υδρογονοκατεργασίας* | 42 |
| *Καταλύτες Υδρογονοκατεργασίας* | 43 |
| *Αντιδράσεις Υδρογονοκατεργασίας* | 44 |
| *Παράμετροι Λειτουργίας Υδρογονοκατεργασίας* | 46 |

| | |
|---|---|
| **6. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΚΑΥΣΙΜΑ ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΘΕΙΟΥ (0.1%)** | 47 |
| **7. ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΙ ΜΕΙΓΜΑΤΑ** | 51 |
| *Ιδιότητες Βιοκαυσίμων* | 53 |
| *Ιξώδες* | 54 |
| *Πυκνότητα* | 55 |
| *Ιδιότητες ψυχρής ροής* | 55 |
| *Αριθμός κετανίου* | 57 |
| *Τιμή ιωδίου* | 58 |
| *Σημείο ανάφλεξης* | 58 |
| *Θερμογόνος Τιμή* | 58 |
| *Λιπαντική Ικανότητα* | 59 |
| *Οξειδωτική Σταθερότητα* | 60 |
| **8. ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΙΠΑΝΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ** | 61 |
| *Χρήση της μεθόδου HFRR (High Frequency Reciprocating Rig)* | 62 |
| *Επιλεχθής Εξοπλισμός Ελέγχου* | 69 |
| *Επιλεχθείς Εξοπλισμός Μικροσκοπίου* | 80 |
| *Μέτρηση των επιμέρους διαμέτρων φθοράς στους άξονες X & Y* | 82 |
| *Υπολογισμός Διορθωμένης Διαμέτρου Φθοράς 1,4* | 83 |
| *Εναλλακτική Μέθοδος Εκτίμησης Λιπαντικότητας SL-BOCLE (Scuffing Load Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluation)* | 85 |
| *Αποτελέσματα μεθόδου HFRR* | 87 |
| *Common Rail System* | 91 |
| *Αποτελέσματα συσκευής HFRR με εφαρμογή τροποποιημένων παραμέτρων* | 97 |
| *Επίδραση βιοκαυσίμου στη Λιπαντική Ικανότητα* | 113 |
| **9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ** | 122 |
| **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ** | 124 |
| **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α** | |

## ΣΚΟΠΟΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία διεξήχθη στο εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια ελέγχου και εκτίμησης της λιπαντικής ικανότητας την οποία εμφανίζουν τα νέα εμπορικά ναυτιλιακά καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο χρησιμοποιώντας την μέθοδο που ορίζεται στο ISO 8217:2010. Έγιναν αξιολογήσεις των αποτελεσμάτων σύμφωνα με τις επιπτώσεις που είχε η χρήση των καυσίμων στις αντλίες των πλοίων και προτάθηκε μια παραλλαγή της μεθόδου η οποία ενδέχεται να έχει καλύτερες δυνατότητες περιγραφής της λιπαντικής ικανότητας των ναυτιλιακών καυσίμων.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο Καθηγητή **Φ. Ζαννίκο** για την ανάθεση του θέματος, για την άριστη συνεργασία που είχαμε και για την καθοδήγηση που μου προσέφερε, όπως επίσης και τον Επίκουρο Καθηγητή **Δ. Καρώνη** για τις πολύτιμες συμβουλές και τις πληροφορίες που μου παρείχε.

Επίσης, τον Υποψήφιο Διδάκτορα **Γ. Ντόντο** για τη βοήθειά του και την συνεργασία του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας, η οποία και στάθηκε καταλυτική για την ολοκλήρωσή της, καθώς και για και συνεχή υποστήριξη και ενθάρρυνσή του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. **Γ. Αναστόπουλο**, που ήταν πάντα πρόθυμος να λύσει τις οποιεσδήποτε απορίες είχα πάνω σε θέματα χημείας και ναυτιλιακών καυσίμων.

Δημήτριος Τζελέπης

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Από την 1η Ιανουαρίου 2010 η νομοθεσία ορίζει ότι σκάφη τα οποία θα αγκυροβολούν για περισσότερο από δύο ώρες σε λιμάνια τη Ευρωπαϊκής Ένωσης θα πρέπει να λειτουργούν με ναυτιλιακά καύσιμα τα οποία θα περιέχουν μέχρι 0.1% θείο. Επίσης, σε μερικές περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών (π.χ. Καλιφόρνια), απαιτείται τα πλοία να χρησιμοποιούν ναυτιλιακά καύσιμα με 0.1% περιεκτικότητα σε θείο όταν βρίσκονται σε ορισμένη απόσταση από το λιμάνι (στο παράδειγμα της Καλιφόρνιας η απόσταση ορίζεται στα 24 μίλια).

Η διαδικασία ξεκίνησε ήδη από τον Οκτώβριο του 2008, όταν ο IMO (International Maritime Organization) αποφάσισε να υιοθετήσει πολύ αυστηρά μέτρα για τον έλεγχο των βλαβερών αερίων που εκπέμπονται κατά τη λειτουργία των ναυτιλιακών μηχανών. Οι προδιαγραφές αυτές αναγράφονται στην Annex VI της MARPOL.

Η Annex VI είναι ένα πρόγραμμα το οποίο περιλαμβάνει δύο είδη προδιαγραφών για να ελέγχει τις εκπομπές πλοίων. Οι προδιαγραφές στο περιεχόμενο θείου των καυσίμων και τις εκπομπές οξειδίων αζώτου από τις μηχανές ισχύουν παγκοσμίως για τα πλοία σε όλες τις περιπτώσεις. Αναγνωρίζοντας ότι ορισμένες περιοχές χρίζουν περαιτέρω ελέγχου, περιέχονται επίσης και προδιαγραφές με βάση γεωγραφικά κριτήρια. Τα πλοία τα οποία λειτουργούν σε αναγνωρισμένες Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas – ECA) οφείλουν να λειτουργούν με περισσότερο αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά στο θείο και τις εκπομπές οξειδίων αζώτου.

Αυτές οι απαιτήσεις έχουν εφαρμοστεί παγκοσμίως για την βελτίωση της ποιότητας του αέρα και σκοπό έχουν να μειώσουν τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου και άλλων βλαβερών σωματιδίων που παράγονται κατά τη λειτουργία των ναυτικών μηχανών. Άμεσο αποτέλεσμα ήταν η στροφή προς τη δημιουργία καυσίμων που δεν θα προκαλούν προβλήματα κατά την καύση τους. Έτσι, ξεκίνησε η παραγωγή καυσίμων diesel χαμηλού θείου (ULSD – Ultra Low Sulfur Diesel).

Όμως, κατά την διάθεσή τους στην αγορά εμφανίστηκαν προβλήματα τα οποία είχαν άμεσες επιπτώσεις στη λειτουργία των μηχανών των πλοίων. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε επαναλαμβανόμενη αστοχία των αντλιών των πλοίων και διαπιστώθηκε ότι οι αντλίες είχαν υποστεί εκτεταμένη φθορά. Μετά από έρευνα, εκδόθηκαν συμπεράσματα τα οποία αποκάλυπταν πως τα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο συνοδευόντουσαν και από χαμηλές λιπαντικές ιδιότητες, πράγμα πολύ σημαντικό για τη προστασία των μηχανικών μερών των μηχανών και ακόμα περισσότερο των αντλιών εντός των οποίων τα καύσιμα κυκλοφορούν υπό υψηλές πιέσεις.

Έτσι, ο ISO (International Organization for Standardization) δημιούργησε το ISO 8217 το οποίο από το 2010 περιλαμβάνει και προδιαγραφές για τη λιπαντική ικανότητα των καυσίμων στα 520μm και για τις αντλίες των πλοίων. Βέβαια , το ISO αυτό πριν το 2010, λόγω του ότι ήταν βασισμένο στις συνθήκες λειτουργίας των αντλιών των αυτοκινήτων, φαίνεται να μην καλύπτει τις αντίστοιχες συνθήκες και ανάγκες υπό τις οποίες λειτουργούν οι αντλίες των πλοίων.

Σε πρώτη φάση, αναπτύχθηκαν τα χαρακτηριστικά παράγωγης και απόδοσης λειτουργίας των ναυτιλιακών καυσίμων χαμηλού θείου, εστιάζοντας στα προβλήματα υψηλού TAN, θερμικής σταθερότητας, συμβατότητας, εκπομπών και κυρίως λιπαντικής ικανότητας.

Δεύτερον, ελέγχθηκαν οι βασικές λύσεις που προτάθηκαν στην βιομηχανία οχημάτων ξηράς τα τελευταία 25 περίπου χρόνια και αυτό αντιπαρατέθηκε με τις προτάσεις και εφαρμογές που έχουν λάβει χώρα στην ναυτιλιακή βιομηχανία.

Τρίτον, αναλύθηκε η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται προς το παρόν για την ανάλυση και εκτίμηση της λιπαντικής ικανότητας των καυσίμων με κοινή αποδοχή των αποτελεσμάτων αυτής από τον κόσμο της ναυτιλιακής βιομηχανίας και τους κατασκευαστές. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση της συσκευής HFRR (High Frequency Reciprocating Rig). Αρχικά, με τη μέθοδο αυτή ελέγχθηκαν διάφορα δείγματα με τις συνθήκες τις οποίες της μεθόδου ISO 12156. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δείγματα δεν παρουσίασαν φθορά η οποία ήταν εκτός των αποδεκτών ορίων. Εφόσον διαπιστώθηκε ότι οι συνθήκες αυτές δεν παρουσιάζουν αποκλίσεις εκτός του επιτρεπτού και λαμβάνοντας υπόψιν τις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας των αντλιών οχημάτων ξηράς και των αντλιών πλοίων αναζητήθηκαν νέες παράμετροι οι οποίες θα δύνανται να περιγράψουν τις συνθήκες αυτές.

Εφόσον οι αντλίες πλοίων λειτουργούν σε πιέσεις αρκετά υψηλότερες από τις αντίστοιχες των αντλιών αυτοκινήτων, η πρώτη παράμετρος η οποία μεταβλήθηκε ήταν το επιβαλλόμενο φορτίο. Επίσης, οι αντλίες πλοίων λειτουργούν για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με αυτές των αυτοκινήτων, οπότε διπλασιάστηκε και ο χρόνος επιβολής του φορτίου. Έτσι, καταλήξαμε σε συνθήκες 150 λεπτών και φορτίων 200, 500 και 1000 γραμμαρίων. Συνεπώς, έγιναν έλεγχοι στα 75 λεπτά με φορτία 200, 500 και 1000 γραμμαρίων και οι αντίστοιχες μετρήσεις στα 150 λεπτά.

Δεν επιχειρήθηκε αλλαγή των υπολοίπων παραμέτρων της μεθόδου, δηλαδή του πλάτους ταλάντωσης, της συχνότητας και της θερμοκρασίας προθέρμανσης έτσι ώστε το είδος της φθοράς που εμφανίζεται να παραμείνει το ίδιο, δηλαδή φθορά «συγκόλλησης» (adhesive wear).

Παρατηρήθηκε ότι κατά τη διαδικασία η αύξηση του χρόνου είχε μεγαλύτερη επίδραση σε σχέση με την αύξηση του φορτίου. Ο διπλασιασμός του χρόνου, με σταθερό το επιβαλλόμενο φορτίο. Μάλιστα, ο πιο απαιτητικός συνδυασμός παραμέτρων οι οποίες και έδιδαν αυξημένη φθορά ήταν στα 500 γραμμάρια και 150 λεπτά. Με περαιτέρω αύξηση του φορτίου η εμφανιζόμενη φθορά δεν παρουσίαζε αξιόλογη μεταβολή.

Έπειτα, διερευνήθηκε η επίδραση της χρήσης βιοκαυσίμων σε διάφορα επίπεδα ανάμειξης (0.5%, 1%, 2% και 5% κ.ό.) με καύσιμα βάσης δύο από τα αρχικά δείγματα το DMA1 και το DMX1. Έγινε έλεγχος αυτών στις κλασσικές συνθήκες και καθώς οι πιο απαιτητικές παράμετροι ήταν τα 150 λεπτά με τα 500 γραμμάρια τα μείγματα καυσίμων – βιοκαυσίμων ελέγχθηκαν και σε αυτές τις συνθήκες με την συσκευή HFRR. Παρατηρήθηκε θετική επίδραση των βιοκαυσίμων στην προκαλούμενη φθορά στις κλασσικές συνθήκες.

Αντιθέτως, στο μείγμα με 2% βιοκαύσιμο κ.ό. η φθορά στις τροποποιημένες συνθήκες φαίνεται να μειώθηκε σε σχέση με τα υπόλοιπα μείγματα.

Συμπερασματικά, φαίνεται ότι, υπό το πρίσμα των νέων απαιτήσεων μείωσης της περιεκτικότητας του θείου στα καύσιμα ναυτιλίας, γίνεται αναγκαία η μεταβολή των συνθηκών υπό των οποίων ελέγχονται τα καύσιμα με τη συσκευή HFRR, ώστε οι νέες παράμετροι να μπορούν να αντικατοπτρίζουν την καταπόνηση την οποία υφίστανται οι αντλίες των πλοίων κατά τη λειτουργία τους με τα νέα καύσιμα αυτά χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

## 1. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

### ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ IMO - EMISSION CONTROL AREAS (ECA)[1]

Παρακάτω, παρατίθενται οι περιοχές αυτές (ECA) σύμφωνα με τα στοιχεία τα ανακοινωθέντα από τον IMO.

| Annex VI: Prevention of air pollution by ships (Emission Control Areas) | | | |
|---|---|---|---|
| Baltic Sea (SOx) | 26-Sep-97 | 19-May-05 | 19-May-06 |
| North Sea (SOx) | 22-Jul-05 | 22-Nov-06 | 22-Nov-07 |
| North American (SOx, and NOx and PM) | 26 Mar 2010 | 1 Aug 2011 | 1 Aug 2012 |
| United States Caribbean Sea ECA (SOx, NOx and PM) | 26 Jul 2011 | 1 Jan 2013 | 1 Jan 2014 |

Τα πλοία κατά τη λειτουργία τους στις περιοχές αυτές θα απαιτείται να λειτουργούν με καύσιμα τα οποία περιέχουν θείο σε ποσοστό 10000ppm. Το 2015 αυτή η περιεκτικότητα θα μειωθεί ακόμα περισσότερο σε 1000ppm. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα πλοία έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν δύο ή περισσότερα είδη καυσίμων. Όμως, σε ορισμένες περιπτώσεις θα χρειαστεί η μετατροπή ορισμένων σκαφών για να είναι δυνατή η αποθήκευση περισσοτέρων αποσταγμάτων. Επιπροσθέτως, μηχανές που θα κατασκευαστούν από το 2016 και έπειτα θα πρέπει να ικανοποιούν τις προδιαγραφές των ορίων NOx που αναγράφονται στην Annex VI Tier 3, κατά τη λειτουργία τους στις ECA. Αυτά τα όρια αναμένεται να οδηγήσουν στη χρήση τεχνολογιών μετεπεξεργασίας, όπως η επιλεκτική καταλυτική μείωση (selective catalytic reduction – SCR).

**International Ship Engine and Fuel Standards (MARPOL Annex VI)[2]**

| | **Year** | **Fuel Sulfur** | **NOx** |
|---|---|---|---|
| Emission Control Area | Έως Ιούλιο 2010 | 15,000 ppm | |
| | 2010 | 10,000 ppm | |
| | 2015 | 1,000 ppm | |
| | 2016 | | Tier 1 Μετεπεξεργασία |
| Global | Έως Ιαν 2012 | 45,000 ppm | |
| | 2012 | 35,000 ppm | |
| | 2020 | 5,000 ppm | |
| | 2011 | | Tier 2 Engine Controls |

- Tier 1: 17g/KWh
- Tier 2: μείωση κατά 20% από το Tier 1
- Tier 3: μείωση κατά 80% από το Tier 1

Πλήρη οικονομοτεχνική μελέτη των προβλημάτων που θα παρουσιαστούν στις περιοχές αυτές και ο βαθμός στον οποίο θα επηρεαστεί το εμπόριο και η υποδοχή πλοίων στα λιμάνια των περιοχών αυτών δεν έχει ολοκληρωθεί προς το παρόν. Όμως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι εάν τα μέτρα αυτά δεν λαμβάνονταν θα παρατηρηθεί μεγάλη αύξηση των ποσοστών οξειδίων αζώτου στην ατμόσφαιρα σε μεγέθη της τάξης των 2.1 εκατομμυρίων τόνων το χρόνο μέχρι το 2030, διπλάσια από τα σημερινά μεγέθη. Γίνεται έτσι εμφανές το πόσο σημαντική είναι η εφαρμογή της νομοθεσίας αυτής.

Τα κυριότερα προβλήματα τα οποία εμφανίζονται και απειλούν τις βασικές λειτουργίες των πλοίων είναι:

- Λιπαντική ικανότητα: Μειωμένη λιπαντική ικανότητα σε καύσιμα χαμηλού θείου θέτουν τον κίνδυνο μη επαρκούς λίπανσης των ναυτιλιακών αντλιών καυσίμου, με αποτέλεσμα εκτεταμένη φθορά και πρώιμη αστοχία.
- Συμβατότητα: Κατά την μετάβαση από λειτουργία με βαρέα καύσιμα σε καύσιμα απόσταξης χαμηλού θείου τίθεται ο κίνδυνος δημιουργίας προβλημάτων συμβατότητας καυσίμων, με αποτέλεσμα την εκτεταμένη μόλυνση συστημάτων καύσης.
- Ιξώδες: Αποστάγματα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο έχουν και σχετικά χαμηλό ιξώδες, που μεταβάλλεται σε εύρος 1.5 έως 3.0 centistokes (cst). Οι αντλίες καυσίμων βασίζονται στο ιξώδες για να ικανοποιούν την απαιτούμενη ογκομετρική χωρητικότητα, κάτι πολύ σημαντικό όσον αφορά την κατάλληλη τροφοδοσία των λεβήτων.
- Λιπαντικά: Οι μηχανές που λειτουργούν με βαρέα καύσιμα απαιτούν λιπαντικά με μεγαλύτερο συνολικό αριθμό βάσης (Total Base Number – TBN) για να διαχειριστούν την υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Εάν το λιπαντικό δεν αλλάξει σε κάποιο άλλο με χαμηλότερο TBN, μηχανές που λειτουργούν για εκτεταμένες περιόδους με 0.1% MGO ενώ παράλληλα χρησιμοποιούν λιπαντικό με υψηλό TBN διατρέχουν τον κίνδυνο να συσσωρευτούν άλατα ασβεστίου στο θάλαμο ανάφλεξης, εκτός άλλων φθορών.
- Λειτουργία λεβήτων: Για σκάφη με βοηθητικούς λέβητες, θα απαιτηθεί η εκτεταμένη τροποποίησή τους, συμπεριλαμβανομένων και αλλαγών σε καυστήρες, στον ψεκασμό και στην εγκατάσταση πρόσθετου εξοπλισμού άντλησης και αποθήκευσης καυσίμου.
- Υψηλός TAN (Αριθμός οξύτητας): Καύσιμα απόσταξης χαμηλού θείου είναι επιρρεπή σε υψηλά επίπεδα δημιουργίας περοξιδικών σχηματισμών, με αποτέλεσμα υψηλό συνολικό αριθμό οξύτητας. Με τη σειρά τους, οι αντλίες καύσιμων υφίστανται έντονη επίθεση από οξείδωση, διάβρωση και τελικά αστοχία. Υψηλός αριθμός οξύτητας επίσης προκαλεί πρώιμη αστοχία στην σφράγιση των αντλιών καυσίμων.
- Θερμική Σταθερότητα – Ποιότητα Ανάφλεξης: Η απουσία φυσικών αντιοξειδωτικών ουσιών σε καύσιμα χαμηλού θείου έχει ως αποτέλεσμα

μειωμένη θερμική σταθερότητα, υποβαθμισμένη ποιότητα ανάφλεξης και εκτεταμένη μόλυνση με άνθρακα και φθορά των μηχανικών μερών.

- Εκπομπές: Με υποβαθμισμένη την ποιότητα ανάφλεξης και μη αρκετή φυσική και θερμική σταθερότητα, τα ναυτιλιακά καύσιμα χαμηλού θείου συχνά παράγουν υπερβολικές ποσότητες υδρογονανθράκων που δεν υπέστησαν καύση και ορατές εκπομπές ποσοτήτων σωματιδίων (αδιαφάνεια καπνού).

Στην εμπορική ναυτιλιακή βιομηχανία πολλά από αυτά τα προβλήματα δεν έχουν αναλυθεί και εξηγηθεί πλήρως με συνέπεια να υπάρχουν πολλές λανθασμένες εντυπώσεις από μέρους των κατασκευαστών ναυτιλιακών μηχανών και ναυτιλιακών αντλιών καυσίμου.

Ευτυχώς από την πρώτη εισαγωγή της έννοιας καυσίμων χαμηλού θείου στα μέσα του 1980, στην αυτοκινητοβιομηχανία κυρίως, έχουν γίνει εκτενείς έρευνες όσον αφορά στις συνθήκες λειτουργίας των καυσίμων αυτών και προτάσεις για την επίλυση των προβλημάτων που παρουσιάζουν έχουν γίνει.

## ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ISO 8217:2010 - MARINE DISTILLATE FUELS[3]

| | ***Μονάδες*** | ***Όρια*** | ***DMX*** | ***DMA*** | ***DMB*** | ***DMZ*** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Ιξώδες στους 40°C*** | $mm^2/s$ | Max | 5.5 | 6 | 11 | 6 |
| ***Ιξώδες στους 40°C*** | $mm^2/s$ | Min | 1.4 | 2 | 2 | 3 |
| ***Πυκνότητα στους 15°C*** | $kg/m^3$ | Max | - | 890 | 900 | 890 |
| ***Υπόλειμμα (micro method)στο 10% υπόλειμμα απόσταξης*** | % m/m | Max | 0.3 | 0.3 | - | 0.3 |
| ***Υπόλειμμα (micro method)*** | % m/m | Max | - | - | 0.3 | - |
| ***Θείο*** | % m/m | Max | 1 | 1.5 | 2 | 1.5 |
| ***Νερό*** | % V/V | Max | - | - | 0.3 | - |
| ***Συνολικό Ίζημα*** | % m/m | Max | - | - | - | 0.1 |
| ***Τέφρα*** | % m/m | Max | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| ***Βανάδιο*** | mg/kg | | | | | |
| ***Αλουμίνιο+Πυρίτιο*** | mg/kg | | | | | |
| ***Σημείο Ανάφλεξης*** | °C | Min | 43 | 60 | 60 | 60 |
| ***Σημείο Ροής, Καλοκαίρι*** | °C | Max | - | 0 | 6 | 0 |
| ***Σημείο Ροής, Χειμώνας*** | °C | Max | - | -6 | 0 | -6 |
| ***Σημείο Θόλωσης*** | °C | Max | -16 | - | - | - |
| ***Αριθμός Κετανίου*** | | Min | 45 | 40 | 35 | 40 |
| ***Αριθμός Οξύτητας*** | mgKOH/g | Max | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| ***Σταθερότητα Οξείδωσης*** | $g/m^3$ | Max | 25 | 25 | 25 | 25 |
| ***Λιπαντικότητα, διορθωμένη διάμετρος wear scar (wsd 1.4 στους 60°C)*** | μm | Max | 520 | 520 | 520 | 520 |
| ***Υδρόθειο*** | mg/kg | Max | 2 | 2 | 2 | 2 |

Καθώς παρατηρείται έχουν ζητηθεί κάποιες αλλαγές στις προδιαγραφές των ναυτιλιακών καυσίμων με την πάροδο των χρόνων. Συγκεκριμένα, οι αλλαγές αυτές συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες στους οποίους και συγκρίνονται οι προδιαγραφές που ήταν σε ισχύ το 2005 με αυτές που είναι τώρα πλέον μετά την εφαρμογή του ISO 8217:2010 για τα ναυτιλιακά καύσιμα μετά από απόσταξη καθώς επίσης και για τα υπολειμματικά ναυτιλιακά καύσιμα .

| | | | ISO 8217:2010 | | | | ISO 8217:2005 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***Μονάδες*** | ***Όρια*** | ***DMX*** | ***DMA*** | ***DMB*** | ***DMZ*** | ***DMX*** | ***DMA*** | ***DMB*** | ***DMC*** |
| ***Ιξώδες στους 40°C*** | $mm^2/s$ | Max | 5.5 | 6 | 11 | 6 | 5.5 | 6 | 11 | 14 |
| ***Ιξώδες στους 40°C*** | $mm^2/s$ | Min | 1.4 | 2 | 2 | 3 | 1.4 | 1.5 | - | - |
| ***Πυκνότητα στους 15°C*** | $kg/m^3$ | Max | - | 890 | 900 | 890 | - | 890 | 900 | 920 |
| ***Υπόλειμμα (micro method)στο 10% υπόλειμμα απόσταξης*** | % m/m | Max | 0.3 | 0.3 | - | 0.3 | 0.3 | 0.3 | - | - |
| ***Υπόλειμμα (micro method)*** | % m/m | Max | - | - | 0.3 | - | - | - | 0.3 | 2.5 |
| ***Θείο*** | % m/m | Max | 1 | 1.5 | 2 | 1.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2 |
| ***Νερό*** | % V/V | Max | - | - | 0.3 | - | - | - | 0.3 | 0.3 |
| ***Συνολικό Ίζημα*** | % m/m | Max | - | - | - | 0.1 | - | - | 0.1 | 0.1 |
| ***Τέφρα*** | % m/m | Max | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.05 |
| ***Βανάδιο*** | mg/kg | | | | | | - | - | - | 100 |
| ***Αλουμίνιο+Πυρίτιο*** | mg/kg | | | | | | - | - | - | 25 |
| ***Σημείο Ανάφλεξης*** | °C | Min | 43 | 60 | 60 | 60 | 43 | 60 | 60 | 60 |
| ***Σημείο Ροής, Καλοκαίρι*** | °C | Max | - | 0 | 6 | 0 | - | 0 | 6 | 6 |
| ***Σημείο Ροής, Χειμώνας*** | °C | Max | - | -6 | 0 | -6 | - | -6 | 0 | 0 |
| ***Σημείο Θόλωσης*** | °C | Max | -16 | - | - | - | -16 | - | - | - |
| ***Αριθμός Κετανίου*** | | Min | 45 | 40 | 35 | 40 | 45 | 40 | 35 | - |
| ***Αριθμός Οξύτητας*** | mgKOH/g | Max | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | | | | |
| ***Σταθερότητα Οξείδωσης*** | $g/m^3$ | Max | 25 | 25 | 25 | 25 | | | | |
| ***Λιπαντικότητα, διορθωμένη διάμετρος wear scar (wsd 1.4 στους 60°C)*** | μm | Max | 520 | 520 | 520 | 520 | | | | |
| ***Υδρόθειο*** | mg/kg | Max | 2 | 2 | 2 | 2 | | | | |
| ***Ψευδάργυρος*** | | | | | | | - | - | - | 15 |
| ***Φώσφορος*** | | | | | | | - | - | - | 15 |
| ***Αβέστιο*** | | | | | | | - | - | - | 30 |

**ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ISO 8217:2010 - MARINE RESIDUAL FUELS**

| | | | ISO 8217:2010 | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Μονάδες | Όρια | RMA | RMB | RMD | RME | RMG | | | | RMK | | |
| | | | 10 | 30 | 80 | 180 | 180 | 380 | 500 | 700 | 380 | 500 | 700 |
| Ιξώδες στους 50° C | $mm^2/s$ | Max | 10 | 30 | 80 | 180 | 180 | 380 | 500 | 700 | 380 | 500 | 700 |
| Πυκνότητα στους 15° C | $kg/m^3$ | Max | 920 | 960 | 975 | 991 | 991 | | | | 1010 | | |
| Υπόλειμμα (micro method) | % m/m | Max | 2.5 | 10 | 14 | 15 | 18 | | | | 20 | | |
| Αλουμίνιο+Πυρίτιο | mg/kg | | 25 | 40 | | 50 | 60 | | | | | | |
| Νάτριο | % m/m | Max | 50 | 100 | | 50 | 100 | | | | | | |
| Τέφρα | % m/m | Max | 0.04 | 0.07 | | | 0.1 | | | | 0.15 | | |
| Βανάδιο | mg/kg | | 50 | 150 | | | 350 | | | | 450 | | |
| CCAI | | | 850 | 860 | | | 870 | | | | | | |
| Νερό | % V/V | Max | 0.3 | 0.5 | | | | | | | | | |
| Σημείο Ροής, Καλοκαίρι | °C | Max | 6 | 30 | | | | | | | | | |
| Σημείο Ροής, Χειμώνας | °C | Max | 0 | 30 | | | | | | | | | |
| Σημείο Ανάφλεξης | °C | Min | 60 | | | | | | | | | | |
| Θείο | % m/m | Max | Νομοθετική Απαίτηση | | | | | | | | | | |
| Συνολικό Ίζημα | % m/m | Max | 0.1 | | | | | | | | | | |
| Αριθμός Οξύτητας | mgKOH/g | Max | 2.5 | | | | | | | | | | |
| ULO | mg/kg | | Το καύσιμο δεν θα περιέχει ULOs, θεωρείται ότι περιέχει όταν: | | | | | | | | | | |
| Ασβέστιο+Ψευδάργυρος | | | Ασβέστιο>30 και Ψευδάργυρος>15 ή | | | | | | | | | | |
| Ασβέστιο+Φώσφορος | | | Ασβέστιο>30 και Φώσφορος>15 | | | | | | | | | | |
| Υδρόθειο | mg/kg | Max | 2 | | | | | | | | | | |

ULO: Used Lubricating Oil: Χρησιμοποιημένα Λιπαντικά

| | | | ISO 8217:2005 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Μονάδες | Όρια | RMA | RMB | RMD | RME | RMF | RMG | RMH | | RMK | |
| | | | 30 | 30 | 80 | 180 | 180 | 380 | 380 | 700 | 380 | 700 |
| Ιξώδεςστους 50° C | $mm^2/s$ | Max | 30 | 30 | 80 | 180 | 180 | 380 | 380 | 700 | 380 | 700 |
| Πυκνότητα στους 15° C | $kg/m^3$ | Max | 960 | 975 | 980 | 991 | | | | | 1010 | |
| Υπόλειμμα (micro method) | % m/m | Max | 10 | | 14 | 15 | 20 | 18 | 22 | | | |
| Αλουμίνιο+ Πυρίτιο | mg/kg | | 80 | | | | | | | | | |
| Τέφρα | % m/m | Max | 0.1 | | | | 0.15 | | | | | |
| Βανάδιο | mg/kg | | 150 | | 350 | 200 | 500 | 300 | 600 | | | |
| Νερό | % V/V | Max | 0.5 | | | | | | | | | |
| Σημείο Ροής, Καλοκαίρι | °C | Max | 6 | 24 | 30 | | | | | | | |
| Σημείο Ροής, Χειμώνας | °C | Max | 0 | 24 | 30 | | | | | | | |
| Σημείο Ανάφλεξης | °C | Min | 60 | | | | | | | | | |
| Θείο | % m/m | Max | 3.5 | | 4 | 4.5 | | | | | | |
| Συνολικό Ίζημα, πιθανό | % m/m | Max | 0.1 | | | | | | | | | |
| ULO | mg/kg | Max | Το καύσιμο δεν θα περιέχει ULOs,θεωρείται ότι περιέχει όταν ξεπερνιούνται τα ανώτατα όρια: | | | | | | | | | |
| Ψευδάργυρος | | | 15 | | | | | | | | | |
| Φώσφορος | | | 15 | | | | | | | | | |
| Ασβέστιο | mg/kg | | 30 | | | | | | | | | |

## 2. ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΕΙΟ

Από το μακρινό 1973 άρχισε να χειροτερεύει η ποιότητα των ναυτιλιακών καυσίμων. Η μόλυνση της ατμόσφαιρας η όξυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, οι κλιματικές αλλαγές, η άνοδος της στάθμης των υδάτων έγιναν θέματα της καθημερινότητας. Έτσι σήμερα όσον αφορά τα καύσιμα της ναυτιλίας χρειάζεται να αντιμετωπιστούν δύο θέματα: το πρώτο είναι η χαμηλή ποιότητα των ναυτιλιακών καυσίμων και το άλλο η αναγκαιότητα περιορισμού των εκπομπών βλαβερών αερίων που προέρχονται από την χρήση των ναυτιλιακών καυσίμων.

Για τον έλεγχο της ποιότητας και της καταλληλότητας των καυσίμων οι διεθνείς οργανισμοί έχουν θεσπίσει ποιοτικά όρια όπως π.χ. αυτά που περιέχονται στο πρότυπο ISO 8217. Το πρότυπο όμως δεν περιλαμβάνει στοιχεία που είναι υψηλής σημασίας για την ποιότητα των διεργασιών καύσεως στο εσωτερικό των μηχανών, όπως για παράδειγμα το C.C.A.I. Με τα σημερινά καύσιμα ο χρόνος καύσεως έχει επιμηκυνθεί γι' αυτό εμφανίζονται μετακαύσεις που είναι ένα συχνότατο πρόβλημα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ζημιές στις μηχανές των πλοίων.

Η προσπάθεια για την μείωση των βλαβερών αερίων οδήγησε σε περιορισμό της περιεκτικότητας των ναυτιλιακών καυσίμων σε θείο (Sulfur). Έτσι από το 5% που ήταν το όριο αρχικά μειώθηκε στο 4,5% και ειδικά για κλειστές θάλασσες στην Βόρεια Ευρώπη και τις περιοχές SECA το όριο έγινε 1,5%. Από την πρώτη Ιανουαρίου του 2010 ισχύει πια για τα λιμάνια η χρήση καυσίμου με 0,1% περιεκτικότητα σε θείο. Αυτό φυσικά επηρεάζει την λειτουργία των γεννητριών, των λεβήτων κλπ.

Η τάση για τον περιορισμό του περιεχόμενου θείου στο πετρέλαιο ναυτιλίας έφτασε στο σημείο όπου το πετρέλαιο ναυτιλίας που παρέχεται σήμερα στα πλοία περιέχει κατά μέσο όρο περίπου 2,7% θείο ή και σε πάρα πολλές περιπτώσεις στην Νότιο Αμερική να είναι και κάτω από το 1%.

Αυτό έχει σαν συνέπεια να τροφοδοτείται πολλές φορές στην μηχανή κυλινδρέλαιο με περισσότερο BN από όσο χρειάζεται γεγονός που μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Η παροχή του κυλινδρελαίου κατά την λειτουργία της μηχανής είναι λοιπόν από τα πλέον βασικά θέματα που απαιτούν την προσοχή μας. Παρακάτω θα παραθέσουμε απόψεις των κυριότερων κατασκευαστών μηχανών όπως επίσης και των προμηθευτών λιπαντελαίων σχετικά με την χρήση των κυλινδρελαίων.

*Παραγωγή και Χαρακτηριστικά Ναυτιλιακών Καυσίμων Περιεκτικότητας 0.1% Θείου*

Αποσταγμένα καύσιμα χαμηλού θείου παράγονται μέσω μιας μεθόδου γνωστής ως υδρογονοαποθείωσης. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της μεθόδου αυτής από διυλιστήριο σε διυλιστήριο αλλά η βασική μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η ίδια.

Σε αυτή την μέθοδο, το καύσιμο που αποτελεί την πρώτη ύλη διοχετεύεται μέσα από σωληνώσεις με υδρογόνο υπό εξαιρετικά υψηλή πίεση και θερμοκρασία σε μία μονάδα που ονομάζεται αντιδραστήρας. Στον αντιδραστήρα, οι πιο βαρείς μοριακές δομές διαχωρίζονται ή «σπάνε» σε ελαφρότερα μέρη, και το υδρογόνο αντιδρά με το θείο για να σχηματίσει υδρόθειο ($H_2S$), το οποίο και αφαιρείται και επεξεργάζεται για να παράξει στοιχειώδες θείο.

Όμως, αυτή η μέθοδος παράλληλα αφαιρεί:

- Τα πολικά στοιχεία του οξυγόνου και αζώτου τα οποία είναι άμεσα υπεύθυνα για τις λιπαντικές ιδιότητες του καυσίμου,
- Τα αρωματικά υπεύθυνα για την ποιότητα της ανάφλεξης του καυσίμου, και
- Τα φυσικώς παραγόμενα αντιοξειδωτικά στοιχεία που προσφέρουν στην φυσική και θερμική σταθερότητα του καυσίμου

Αυτές οι προκύπτουσες ελλείψεις είναι πολύ σημαντικές και προβληματικές όχι μόνο για τα καύσιμα αυτά καθαυτά, αλλά και για την λειτουργία της ίδιας της μηχανής.

Ανεπαρκής λιπαντική ικανότητα θα προκαλέσει εκτενή φθορά στις αντλίες καυσίμων, οδηγώντας σε μερικές περιπτώσεις σε καταστροφικές αστοχίες των αντλιών καυσίμου.

Υποβαθμισμένη ποιότητα ανάφλεξης μπορεί να προκαλέσει υπερβολικές θερμοκρασίες στα αέρια εξάτμισης, θερμικές πιέσεις στην μηχανή και υπερβολικές εναποθέσεις σωματιδίων.

Χαμηλή φυσική σταθερότητα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα συμβατότητας καυσίμου, ιδιαίτερα κατά την μετάβαση από βαρέα καύσιμα σε ναυτιλιακά καύσιμα χαμηλού θείου. Εφόσον κάποιες ποσότητες ναυτιλιακών καυσίμων θα αποθηκεύονται πάνω στα πλοία για εκτεταμένο χρονικό διάστημα, καύσιμα με χαμηλά χαρακτηριστικά σταθερότητας θα υφίστανται επιταχυμένη υποβάθμιση, με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της ποιότητας ανάφλεξης και κατ’ επέκταση την υποβαθμισμένη λειτουργία της μηχανής.

Χαμηλή θερμική σταθερότητα οδηγεί σε υπερβολικό σχηματισμό μαζών υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα το οποίο δεν καίγεται κατά την διαδικασία της ανάφλεξης. Κατά συνέπεια, παράγονται πιο πολλά ανθρακώδη συστατικά με αποτέλεσμα την αυξημένη μόλυνση των εξαρτημάτων της μηχανής, αυξημένη φθορά και εμφανή αύξηση της εκπομπής σωματιδίων καπνού τα οποία είναι και ορατά.

Συνολικός αριθμός οξύτητας (TAN) σε αυτά τα καύσιμα είναι συνήθως αυξημένος. Αυτό προκαλεί την παραγωγή μεγάλου αριθμού περοξιδικών σχηματισμών εξαιτίας της αστάθειας του καυσίμου. Σαν αποτέλεσμα, έχουμε καταστρεπτικές επιθέσεις λόγω οξέων στις αντλίες καυσίμων με μεγάλες πιθανότητες γρήγορης αστοχίας και εκτεταμένης διάβρωσης.

## 3. ΛΙΠΑΝΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί οι οποίοι έχουν υιοθετηθεί για την εξήγηση της έννοιας της λιπαντικής ικανότητας.

«Λιπαντική ικανότητα είναι μια ιδιότητα ενός υγρού, που έχει την ικανότητα να προσφέρει υδροδυναμική και/ή οριακή λίπανση ώστε να προστατεύσει τα κινούμενα μέρη από φθορά».

«Λιπαντική ικανότητα είναι η ικανότητα ενός υγρού να μειώνει την τριβή μεταξύ στερεών επιφανειών που βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους».

«Λιπαντική ικανότητα είναι η ιδιότητα που εμποδίζει την φθορά όταν δύο κινούμενα μεταλλικά μέρη έρθουν σε επαφή μεταξύ τους».

Οι Keith και Conley δήλωσαν ότι η παραγωγή ενός καθαρότερου καυσίμου diesel θα μπορούσε να μειώσει την λιπαντική ικανότητά του[4]. Μάλιστα, ανέφεραν σημαντική μείωση της λιπαντικής ικανότητας των καυσίμων Diesel το 1993 όταν οι Ηνωμένες Πολιτείες απαίτησαν τη χρήση καυσίμων Diesel τα οποία είχαν περιεκτικότητα σε θείο χαμηλότερη των 500ppm. Η πετρελαϊκή βιομηχανία αντιλήφθηκε την περαιτέρω μείωση της λιπαντικής ικανότητας των καύσιμων Diesel με τις νέες μειώσεις που έλαβαν χώρα στην περιεκτικότητα του θείου το 2006. Επίσης, η βιομηχανία ναυτιλιακών καυσίμων με τις καινούριες προδιαγραφές ναυτιλιακών καυσίμων που άρχισαν να ισχύουν από το 2010 πρέπει να βρει τρόπους να αντιμετωπίσει το πρόβλημα που δημιουργείται με την μείωση της λιπαντικής ικανότητας στα ναυτιλιακά καύσιμα.

Μάλιστα, όταν ετέθη για πρώτη φορά στην νομοθεσία η απαίτηση χρήσης καυσίμων στην βιομηχανία επίγειων οχημάτων με περιεκτικότητα σε θείο 0.5% στην Νότια Καλιφόρνια το 1985, πολλοί λίγοι ήταν προετοιμασμένοι για αυτό που ακολούθησε. Μέσα στις πρώτες εβδομάδες χρήσης του καυσίμου χαμηλού θείου, χιλιάδες οχήματα τα οποία χρησιμοποιούσαν Diesel για την κίνηση τους, κυρίως φορτηγά και λεωφορεία, «έμειναν» στην μέση του δρόμου όταν οι αντλίες καυσίμων τους υπέστησαν σοβαρές διαρροές και καταστροφικές αστοχίες.

Παρόλο που η λιπαντική ικανότητα των καυσίμων εθεωρείτο συνδεδεμένη με το ιξώδες, πολλοί ερευνητές πίστευαν ότι η λιπαντική ικανότητα του καυσίμου δεν παρέχεται από το ιξώδες του. Οι ερευνητές ανακάλυψαν ότι το ιξώδες παρέχεται από άλλα συστατικά του καυσίμου όπως «πολυκυκλικούς αρωματικούς τύπους με περιεχόμενα θείου, οξυγόνου και αζώτου». Σύμφωνα με τον Mitchell το οξυγόνο και το άζωτο προσδίδουν φυσική λιπαντική ικανότητα στα καύσιμα Diesel. Οι Barbour, Rickeard, και Elliot αναφέρουν ότι το οξυγόνο όντως προσφέρει στην λιπαντική ικανότητα του καυσίμου, αλλά το άζωτο είναι πιο ενεργός παράγοντας στην προσφορά λιπαντικής ικανότητας απ’ ότι το οξυγόνο. Συμπέραναν, ότι καύσιμα Diesel με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο αλλά με χαμηλή περιεκτικότητα σε άζωτο δεν είχαν καλές λιπαντικές ιδιότητες.

Εν ολίγοις, πριν λάβουν χώρα οι παραπάνω έρευνες, δηλαδή στα μέσα του 1980, όταν άρχισε να εφαρμόζεται η χρήση καυσίμων χαμηλού θείου, υπήρχαν δύο βασικές

λανθασμένες θεωρίες που αφορούσαν στην λιπαντική ικανότητα των καυσίμων – και τις οποίες θεωρίες ενστερνίζονταν και μερικές εταιρίες παραγωγής μηχανών ακόμη και το 2009:

- Πρώτον, εθεωρείτο ότι χαμηλό ιξώδες καυσίμου παίζει σημαντικό ρόλο στην χαμηλή λιπαντική ικανότητα
- Δεύτερον, ότι το θείο αυτό καθαυτό ήταν υπεύθυνο για την λιπαντική ικανότητα, και λόγω της απουσίας του, την συνεπαγόμενη αστοχία της αντλίας καυσίμου.

Αποδείχθηκαν σύντομα λάθος και οι δύο θεωρίες.

Εκτός από τους ερευνητές που αναφέρθηκαν παραπάνω, αποτελέσματα παρήχθεισαν και μετά από απαίτηση του Υπουργείου Εθνικής Αμύνης των Ηνωμένων Πολιτειών το 1992 για να εξηγηθεί ο λόγος για τον οποίο υπήρξε αστοχία στις αντλίες στρατιωτικών οχημάτων κατά την διάρκεια της επιχείρησης «Καταιγίδα της Ερήμου», η οποία άφησε τους στρατιώτες απομονωμένους στην έρημο το 1991. Το Southwest Research Institute (SWRI, San Antonio, Texas) συνέλεξε έναν μεγάλο αριθμό δειγμάτων στρατιωτικών καυσίμων τα οποία και τηρούσαν όλες τις στρατιωτικές προδιαγραφές και είχαν παρεμφερές ιξώδες με σκοπό να τα ελέγξει. Ανακάλυψαν πως το ιξώδες δεν έπαιζε κανένα ρόλο στην αστοχία των αντλιών και ότι η λιπαντική ικανότητα ήταν αυτή που καθόριζε τον βαθμό και το χρόνο φθοράς και αστοχίας των αντλιών.

Επιπλέον μετρήσεις και έλεγχοι από την Esso UK και το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθηνών από τότε έχουν επιβεβαιώσει το γεγονός ότι το ιξώδες δεν επηρεάζει στο ελάχιστο την λιπαντική ικανότητα των καυσίμων για την προστασία των αντλιών.

Σύμφωνα με την έρευνα η οποία διενεργήθηκε από μέρους της ESSO UK:

«Το ιξώδες του καυσίμου επηρεάζει ελάχιστα την λιπαντική ικανότητά του».

Όσον αφορά στο ρόλο του θείου, έρευνες που έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του ’80 άρχισαν να διαψεύδουν τον μύθο ο οποίος είχε δημιουργηθεί, παρόλο που μερικοί τον υποστήριζαν μέχρι και το 2009. Με τη χρήση ανεπτυγμένων αναλυτικών μεθόδων, ερευνητές απομόνωσαν τα συγκεκριμένα χημικά στοιχεία τα οποία και είναι υπεύθυνα για την πρόσδωση λιπαντικής ικανότητας στα καύσιμα.

Μέχρι το 1998, οι αποδείξεις και τα αποτελέσματα είχαν παραχθεί και οι ερευνητές συμπέραναν πως:

«Η μεγαλύτερη προσφορά λιπαντικής ικανότητας σε καύσιμα Diesel προέρχεται από στοιχειώδη ποσά επιφανειακώς ενεργών χημικών στοιχείων.

- Αυτά δρουν σχηματίζοντας ένα προστατευτικό στρώμα στην μεταλλική επιφάνεια, βελτιώνοντας έτσι την οριακή λίπανση.
- Τα ενεργά μόρια δεν παραμένουν στην επιφάνεια και πρέπει να ανανεώνονται συνεχώς.

- Τα πιο ενεργά πολικά στοιχεία τα οποία σχηματίζονται φυσικά στα καύσιμα diesel είναι ετεροστοιχεία που περιέχουν άζωτο και οξυγόνο.»

Στα παραπάνω αποτελέσματα ενέχεται και η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζει η παραγωγή ναυτιλιακών καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο.

Η μέθοδος κατά την οποία αφαιρείται το περιεχόμενο του θείου από το καύσιμο είναι η ίδια μέθοδος η οποία αφαιρεί και αυτά τα στοιχεία που προσδίδουν την φυσική λιπαντική ικανότητα στο καύσιμο, με αποτέλεσμα το παραγόμενο καύσιμο να έχει πολύ χαμηλές λιπαντικές ιδιότητες.

Αρχικές εκτιμήσεις ερευνητών συμπεριλάμβαναν το ότι μείωση του θείου ή αρωματικών στοιχείων των καυσίμων Diesel δεν θα προκαλέσει μείωση της λιπαντικής ικανότητας. Παρά ταύτα, έχουμε αποτελέσματα της μεθόδου υδρογονοκατεργασίας από το 1991 που καταδεικνύουν ότι μειώνει την λιπαντική ικανότητα καυσίμων Diesel. Το γεγονός αυτό αναφέρεται και σε έρευνες των Keith και Conley οι οποίοι έκανα χρήση της μεθόδου αυτής για την μείωση της περιεκτικότητας σε θείο καυσίμων Diesel και παρατήρησαν παράλληλη μείωση της λιπαντικής ικανότητας του υφιστάμενου την μέθοδο αυτήν καυσίμου. Επίσης, οι δύο αυτοί ερευνητές συμπέραναν ότι τα στοιχεία του οξυγόνου και αζώτου «μπορεί να γίνουν αναποτελεσματικά μετά από εκτενή χρήση της μεθόδου αποθείωσης του καυσίμου».

Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψιν ότι μερικές μηχανές Diesel βασίζονται σε μεγάλο βαθμό ή /και αποκλειστικά στην ικανότητα του καυσίμου και όχι στα λάδια της μηχανής για να λιπαίνει τα κινούμενα μέρη τα οποία με την σειρά τους λειτουργούν με μικρές ανοχές σε μεγάλες θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις. Η λιπαντική ικανότητα λειτουργεί και σαν δείκτης της φθοράς και τριβής που συμβαίνει μεταξύ κινούμενων μερών. Χαμηλή λιπαντική ικανότητα μπορεί να προκαλέσει υψηλή φθορά ενώ, εν αντιθέσει, υψηλή λιπαντική ικανότητα μειώνει την φθορά και εξασφαλίζει μεγαλύτερο χρόνο ζωής των μερών της μηχανής.

Η λιπαντική ικανότητα ενός καυσίμου Diesel μπορεί να μεταβάλλεται σε μεγάλο εύρος. Αυτό οφείλεται σε μια μεγάλη ποικιλία παραγόντων, που περιλαμβάνουν την πηγή αργού πετρελαίου από την οποία το καύσιμο Diesel παρήχθη, την διαδικασία διύλισής του για την παραγωγή του, τον τρόπο με τον οποίο διαχειρίστηκε το καύσιμο κατά την διαδικασία διανομής του και από το αν προσετέθησαν συστατικά αύξησης της λιπαντικής ικανότητας στο καύσιμο αυτό. Σαν παράδειγμα, μπορούν να ληφθούν υπόψιν μελέτες οι οποίες έγιναν το 1998 και αφορούσαν την λιπαντική ικανότητα καυσίμων σε διεθνές επίπεδο. Αυτές έδειξαν ότι τα καύσιμα Diesel των Ηνωμένων Πολιτειών, του Καναδά, της Ελβετίας, της Πολωνίας και της Ταϊβάν είχαν πολύ χαμηλή λιπαντικότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες που έλαβαν μέρος στην έρευνα σε σύνολο 27 χωρών.

Μέχρις στιγμής, σοβαρά προβλήματα που οδήγησαν σε αστοχία των μηχανικών μερών μιας μηχανής πλοίου λόγω χρήσης καυσίμου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο δεν έχουν αναφερθεί, αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η νομοθεσία που απαιτεί την χρήση καυσίμων χαμηλού θείου σε πλοία έχει σχετικά μικρό χρόνο εφαρμογής. Γι’ αυτό και πρέπει

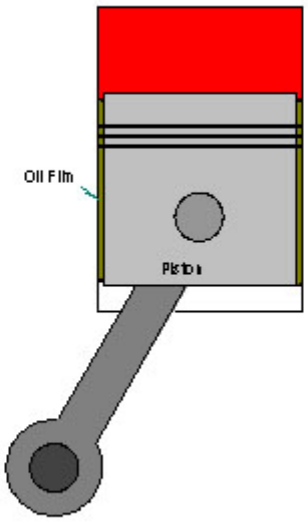
να γίνουν μελέτες εκτενείς οι οποίες να μπορούν να ορίσουν τα όρια και τα καύσιμα τα οποία είναι κατάλληλα για χρήση σε ναυτιλιακές μηχανές. Πρέπει να σημειωθεί σοβαρά το γεγονός ότι η αστοχία μιας μηχανής σε ένα πλοίο θα έχει πολύ πιο σοβαρές συνέπειες από ότι σε ένα αυτοκίνητο ή σε ένα φορτηγό και από άποψη κόστους άλλα ακόμη περισσότερο όσον αφορά στην ασφάλεια του πληρώματος και των επιβατών του πλοίου.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να δοθούν εκτιμήσεις της λιπαντικής ικανότητας των καυσίμων: (1) δοκιμές στην μηχανή, (2) δοκιμές έγχυσης καυσίμου σε εξοπλισμό ελέγχων καυσίμου, (3) δοκιμές σε εργαστήριο. Εκ των τριών τα 2 πρώτα απαιτούν μεγάλο χρόνο δοκιμών, ενώ οι εργαστηριακές δοκιμές εκτός του ότι έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος, δίνουν πολύ ικανοποιητικά και ακριβή αποτελέσματα σε μικρό χρονικό διάστημα (από μερικές ώρες μέχρι κάποιες μέρες).

*Λίπανση[5]*

Από πρακτική εμπειρία, έχει γίνει πλέον γνωστό ότι η προσθήκη κάποιου λιπαντικού σε μία διεπαφή στερεού – στερεού θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση της τριβής. Η μειωμένη τριβή με τη σειρά της οδηγεί σε μείωση της φθοράς, της παραγόμενης θερμότητας και της απώλειας ενέργειας – τα οποία μειώνουν το κόστος λειτουργίας και την αδράνεια των μηχανικών μερών. Παρακάτω γίνεται μια ανάλυση του μηχανισμού ο οποίος επιτρέπει αυτή τη λειτουργία των λιπαντικών.

Η πρωταρχική λειτουργία ενός λιπαντικού είναι να προσφέρει προστασία στα κινούμενα μέρη – με συνέπεια τη μείωση της τριβής και της φθοράς της μηχανής. Η ψύξη και η απομάκρυνση ακαθαρσιών είναι τα άλλα σημαντικά οφέλη τα οποία παρέχονται από ένα υγρό λιπαντικό. Λιπαντικά χρησιμοποιούνται σε σχεδόν όλα τα μηχανικά μέρη, από τα πιστόνια της μηχανής μέχρι και τα γρανάζια.




*Πιστόνι μηχανής*

*Γρανάζια μηχανής*

*Ιξώδες και ρευστά*

Με απλούς όρους, ένα ρευστό είναι ένα υλικό το οποίο μπορεί να είναι είτε υγρό είτε αέριο και τα ρευστά περιλαμβάνουν τον αέρα, το νερό και το λάδι. Η λίπανση, κατά βάση, είναι το αποτέλεσμα ενός ρευστού φιλμ που δημιουργείται μεταξύ δύο στερεών επιφανειών οι οποίες βρίσκονται σε σχετική κίνηση η μία με την άλλη. Το ρευστό φιλμ στην υπό λίπανση περιοχή μπορεί να έχει ένα πάχος που μεταβάλλεται από μερικά νανόμετρα (δισεκατομμυριοστά του μέτρου) σε μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα (εκατομμυριοστά του μέτρου). Ως μέτρο αναφοράς, μπορεί να ληφθεί το η διάμετρος μίας ανθρώπινης τρίχας η οποία μεταβάλλεται από 50 έως 150 μικρόμετρα.

Η πιο σημαντική ιδιότητα ενός λιπαντικού είναι το ιξώδες. Αυθαίρετα ορισμένο, το ιξώδες είναι η ικανότητα ενός ρευστού να αντιστέκεται στην κίνηση. Υψηλό ιξώδες σημαίνει ότι ένα ρευστό είναι πιο παχύρευστο και έτσι η ροή του δεν είναι τόσο πολύ εύκολη. Παραδείγματος χάριν, η μελάσα ή το μέλι έχουν πιο υψηλό ιξώδες από το νερό, το οποίο με τη σειρά του έχει πιο υψηλό ιξώδες από τον αέρα. Το ιξώδες του λαδιού έχει σχετικές τιμές μεταξύ αυτών του νερού και της μελάσας. Ένα ρευστό με τυπικά υψηλότερο ιξώδες θα δημιουργεί ένα πιο παχύ φιλμ μεταξύ των στερεών κινούμενων επιφανειών και θα μπορεί να υποστηρίζει μεγαλύτερα φορτία.

Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι το ιξώδες δεν είναι μια σταθερή ιδιότητα των ρευστών, άλλα όπως πολλές από τις ιδιότητές τους εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία, κυρίως από τη θερμοκρασία. Τα λάδια της μηχανής έχουν πιο αυξημένο ιξώδες σε χαμηλές θερμοκρασίες απ’ ότι μετά την εκκίνηση της μηχανής και την προκύπτουσα θέρμανσή τους.

Βεβαίως, το ιξώδες και μόνο δεν είναι αρκετό για να οριστεί ένα ρευστό σαν κατάλληλο για χρήση ως λιπαντικό. Γι’ αυτό και άλλωστε δεν χρησιμοποιείται η μελάσα ή το μέλι στη μηχανή. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες του ρευστού καθώς επίσης και οι συνθήκες που επικρατούν στην διεπαφή ορίζουν τις απαιτήσεις για την επιλογή του κατάλληλου λιπαντικού.

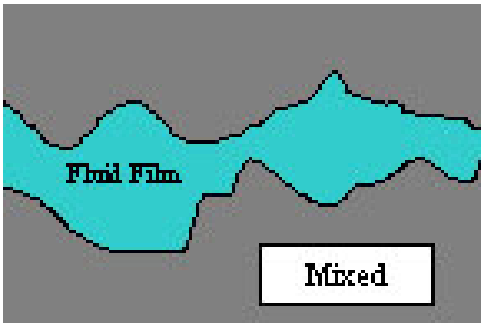
*Είδη Λίπανσης*

Το πάχος του ρευστού φιλμ ορίζει και το είδος λίπανσης. Τα βασικά είδη λίπανσης είναι:

a) *Υδροδυναμική λίπανση:* οι δύο επιφάνειες χωρίζονται από ένα ρευστό φιλμ
b) *Ελαστοϋδροδυναμική λίπανση:* οι δύο επιφάνειες χωρίζονται από ένα πολύ λεπτό ρευστό φιλμ
c) *Μεικτή λίπανση:* οι δύο επιφάνειες είναι μερικώς διαχωρισμένες και μερικώς σε επαφή
d) *Οριακή λίπανση:* οι δύο επιφάνειες είναι κυρίως σε επαφή η μία με την άλλη παρά την παρουσία ενός ρευστού

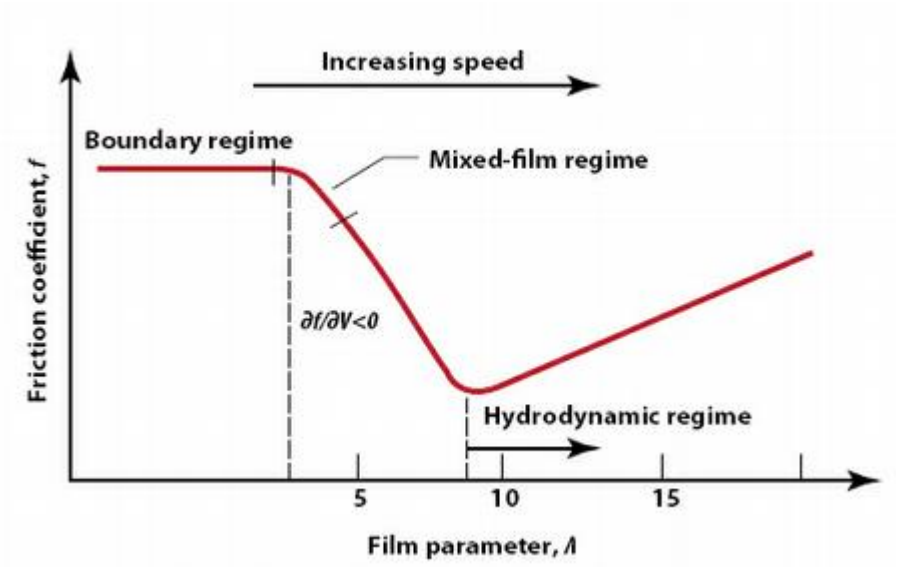
Εκτός της λίπανσης ρευστού φιλμ, υπάρχει και η λίπανση στερεού φιλμ, κατά την οποία ένα λεπτό στερεό φιλμ χωρίζει τις δύο κινούμενες επιφάνειες.

Το ιξώδες του ρευστού, το φορτίο που επιβάλλεται στις δύο κινούμενες επιφάνειες καθώς και η ταχύτητα με την οποία κινούνται οι δύο επιφάνειες η μία σε σχέση με την άλλη συνδυάζονται και διαμορφώνουν το πάχος του ρευστού φιλμ. Αυτό με τη σειρά του διαμορφώνει και το είδος λίπανσης. Πως όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν τις απώλειες τριβής και πως ανταποκρίνονται στα διάφορα είδη απεικονίζεται στην καμπύλη του Stribeck. Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν την καμπύλη Stribeck για να αξιολογήσουν λιπαντικά, για να σχεδιάσουν έδρανα και για να κατανοήσουν είδη λίπανσης.




*Είδη λίπανσης*

*Η Καμπύλη Stribeck*




Η καμπύλη Stribeck είναι ένα διάγραμμα το οποίο απεικονίζει το συσχετισμό της τριβής με το ιξώδες, την ταχύτητα και το φορτίο. Στον κάθετο άξονα είναι ο συντελεστής τριβής (friction coefficient, f). Ο οριζόντιος άξονας δείχνει ένα συνδυασμό των υπολοίπων παραμέτρων $\Lambda = \mu N/P$, όπου:

- μ: το ιξώδες
- N: η σχετική ταχύτητα των επιφανειών
- P: το φορτίο στη διεπαφή

Συνεπώς, όσο πιο δεξιά μεταφέρεται ο οριζόντιος άξονας τόσο πιο ορατά γίνονται τα αποτελέσματα της αυξημένης ταχύτητας, του αυξημένου ιξώδους και του μειωμένου φορτίου. Η αρχή των αξόνων αντικατοπτρίζει τη στατική τριβή.

Ο συνδυασμός χαμηλής ταχύτητας, χαμηλού ιξώδους και αυξημένου φορτίου θα οδηγήσει σε οριακή λίπανση. Η οριακή λίπανση χαρακτηρίζεται από μικρή ποσότητα ρευστού στη διεπαφή και αυξημένη επιφάνεια επαφής. Παρατηρώντας την καμπύλη Stribeck είναι εμφανές ότι αυτό οδηγεί σε αυξημένη τριβή.

Καθώς μεγαλώνει η ταχύτητα και το ιξώδες, ή καθώς μειώνεται το φορτίο, οι επιφάνειες θα αρχίσουν να διαχωρίζονται και ένα ρευστό φιλμ αρχίζει να σχηματίζεται. Το φιλμ αρχικά είναι πολύ λεπτό, άλλα μπορεί και υποστηρίζει όλο και μεγαλύτερο ποσοστό του εφαρμοζόμενου φορτίου. Το αποτέλεσμα είναι η μεικτή λίπανση, και διακρίνεται καθαρά στην καμπύλη Stribeck ως μία απότομη πτώση του συντελεστή τριβής. Η πτώση αυτή είναι αποτέλεσμα της μείωσης της επιφάνειας επαφής και της αύξησης της λίπανσης από το ρευστό. Οι επιφάνειες θα συνεχίσουν να χωρίζονται όσο αυξάνεται η ταχύτητα και το ιξώδες μέχρι να σχηματιστεί ένα πλήρες φιλμ ρευστού και να εξαλειφθεί η επαφή των δύο επιφανειών. Ο συντελεστής τριβής θα φτάσει την ελάχιστη τιμή του και το σύστημα θα υποστεί μετάβαση στην υδροδυναμική λίπανση. Σε αυτό το σημείο το φορτίο στη διεπαφή

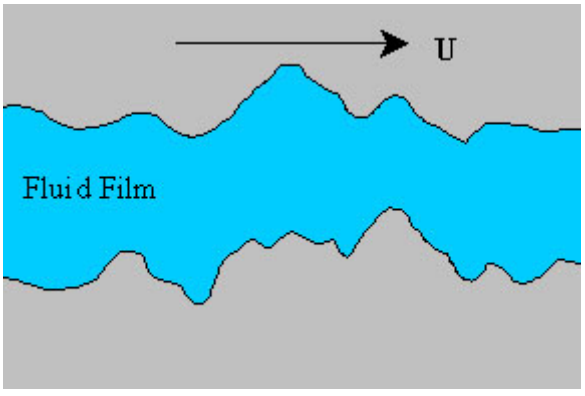
υποστηρίζεται πλήρως από το ρευστό φιλμ. Υπάρχει μικρή τριβή και καθόλου φθορά στη υδροδυναμική λίπανση καθώς το φιλμ του ρευστού είναι πλήρες και τα δύο μηχανικά μέρη δεν έρχονται σε επαφή.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η καμπύλη Stribeck απεικονίζει μία αύξηση της τριβής στη περιοχή της υδροδυναμικής λίπανσης. Αυτό συμβαίνει λόγω της τριβής ρευστού. Η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μεγαλύτερο πάχος του ρευστού φιλμ, αλλά παράλληλα αυξάνει και την τριβή του ρευστού με τις κινούμενες επιφάνειες. Για παράδειγμα, αρκεί κάποιος να σκεφτεί πόσο πιο δύσκολο είναι να τρέξει μέσα στο νερό από ότι είναι να περπατήσει. Ομοίως, αυξημένο ιξώδες θα ευεργετήσει το πάχος του ρευστού φιλμ, αλλά επίσης θα αυξήσει και την τριβή. Πάλι, αρκεί να σκεφτεί κάποιος το να περπατάει περιβαλλόμενος από αέρα και από νερό αντίστοιχα.

Στης μηχανές έχουμε οριακή λίπανση στην εκκίνηση και στο κλείσιμο (χαμηλές ταχύτητες και λεπτό φιλμ), πριν την μετάβαση στη υδροδυναμική λίπανση σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας (υψηλές ταχύτητες και παχύ φιλμ). Η παρατήρηση της καμπύλης Stribeck θα δείξει ότι ένα μηχάνημα θα υποστεί την μεγαλύτερη τριβή και φθορά κατά την εκκίνηση και κλείσιμο.

*Υδροδυναμική Λίπανση*

Στις παραπάνω παραγράφους διευκρινίστηκε ότι η παρουσία ενός πλήρους ρευστού φιλμ και η απουσία επιφάνειας επαφής υποδεικνύει υδροδυναμική λίπανση. Η υδροδυναμική λίπανση έχει οριστεί με την ονομασία αυτή διότι το ρευστό φιλμ παράγεται από τη σχετική κίνηση των στερεών επιφανειών και την προκύπτουσα αύξηση της πίεσης του ρευστού.




*Ρευστό φιλμ υδροδυναμικής λίπανσης*

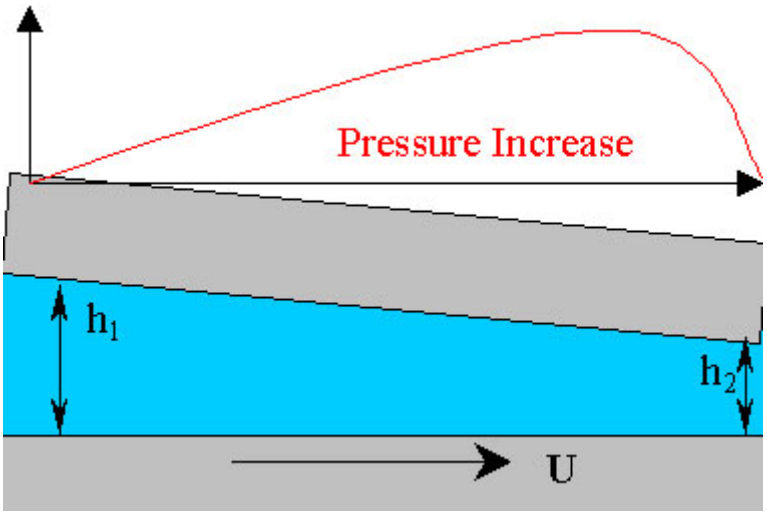
Η υδροδυναμική λίπανση θα γίνει πιο κατανοητή αν παρατηρηθεί η ανωτέρω εικόνα. Είναι γνωστό ότι μία επιφάνεια θα έχει μικρές κορυφές οι οποίες θα έρθουν σε επαφή όταν τα δύο μηχανικά μέρη τοποθετηθούν μαζί. Εάν το ένα ολισθήσει πάνω στο όλο, τότε η τριβή θα αυξηθεί, οι κορυφές θα σπάσουν και οι επιφάνειες θα φθαρούν. Στην υδροδυναμική λίπανση, ένα ρευστό φιλμ διαχωρίζει τις επιφάνειες, μειώνει την τριβή και εμποδίζει τη φθορά.

Το υδροδυναμικό φιλμ σχηματίζεται όταν η γεωμετρία, η επιφανειακή κίνηση και το ιξώδες του υγρού συνδυάζονται για να αυξήσουν την πίεση του ρευστού σε τέτοιο βαθμό ώστε αυτό με τη σειρά του να υποστηρίζει το φορτίο. Η αυξημένη πίεση εξαναγκάζει τις επιφάνειες να απομακρυνθούν και εμποδίζει την περαιτέρω επαφή τους. Συνεπώς, στην υδροδυναμική λίπανση, η μία επιφάνεια επιπλέει πάνω στην άλλη. Η αύξηση στην πίεση του υγρού που απομακρύνει την μία επιφάνεια από την άλλη είναι η υδροδυναμική ανύψωση.

*Υδροδυναμική Ανύψωση*

Έστω ότι δύο δοκίμια παραλληλόγραμμης γεωμετρίας βρίσκονται σε σχετική κίνηση: εάν η μία επιφάνεια είναι υπό γωνία εκεί όπου η περιοχή εισόδου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την περιοχή εξόδου, τότε δημιουργείται ένα κενό σφηνοειδούς μορφής. Αυτό είναι ένα συγκλινόμενο κενό και αποτελεί την απαραίτητη γεωμετρία ώστε να παραχθεί υδροδυναμική ανύψωση. Όμως, είναι σημαντικό να δοθεί προσοχή στο γεγονός ότι η διαφορά ανάμεσα στην περιοχή εισροής και εκροής είναι εξαιρετικά μικρή (το πολύ μερικά μικρόμετρα), έτσι ώστε στο γυμνό μάτι οι επιφάνειες θα παρουσιάζονται παράλληλες. Παρακάτω παρατίθεται μία εικόνα της οποίας οι διαστάσεις απεικονίζονται σε υπερβάλλονται βαθμό για πλήρη κατανόηση της έννοιας. Επιφάνειες οι οποίες έρχονται σε τόσο κοντινή απόσταση σχηματίζουν μία σύμμορφη επαφή.

Όταν κινείται μια επιφάνεια πάνω σε ένα ρευστό, ή όταν ένα ρευστό ρέει πάνω σε μια επιφάνεια, τότε το άμεσα γειτονικό στην επιφάνεια ρευστό θα κινηθεί στην ίδια ταχύτητα με την επιφάνεια. Επομένως, εάν δύο επιφάνειες βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους με την ταυτόχρονη παρουσία ενός ρευστού, τότε αυτό θα παρασυρθεί στη διεπαφή. Ένα ρευστό το οποίο εισέρχεται σε ένα συγκλινόμενο κενό με τον τρόπο αυτό θα υποστεί μία αύξηση στην πίεση του καθώς το κενό συγκλίνει, γεγονός που δημιουργεί υδροδυναμική ανύψωση και διαχωρίζει τις επιφάνειες σαν σφήνα.




*Υδροδυναμική Ανύψωση*

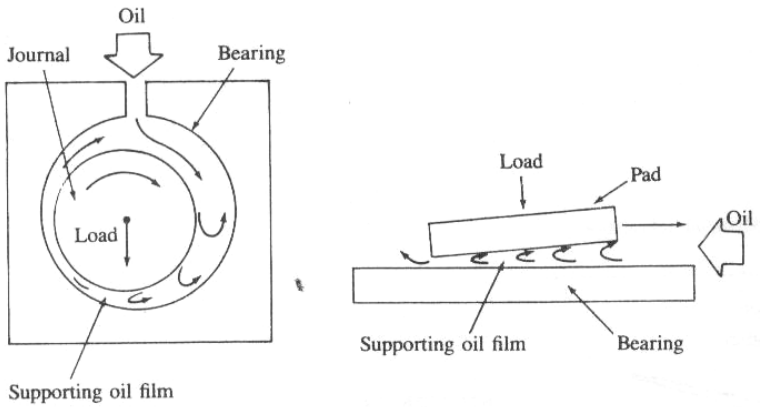
Υδροστατική ανύψωση εμφανίζεται όταν ένα ρευστό υψηλής πίεσης εισέρχεται μεταξύ δύο επιφανειών. Σε αυτήν την περίπτωση, ο διαχωρισμός των επιφανειών προκαλείται από την στατική πίεση ρευστού και μπορεί να λάβει χώρα επιφανειακή κίνηση.

*Υδροδυναμικά Έδρανα*

Το έδρανο είναι ένα στοιχείο της μηχανής το οποίο υποστηρίζει ή φέρει το φορτίο μιας υπό κίνηση διεπαφής. Παραδείγματα εδράνων ρευστού φιλμ περιλαμβάνουν τα ρουλεμάν, τα περιστρεφόμενα έδρανα και τα έδρανα ώσης. Τα έδρανα ρευστού φιλμ χωρίζονται σε υδροδυναμικά, υδροστατικά και ελαστοϋδροδυναμικά έδρανα. Τα υδροδυναμικά έδρανα υποστηρίζονται από την υδροδυναμική ανύψωση. Τα πιο αναγνωρίσιμα υδροδυναμικά έδρανα είναι τα περιστρεφόμενα έδρανα (journal bearing) και τα έδρανα ολίσθησης (slider bearing).

Μία απλή περιγραφή ενός εδράνου ολίσθησης είναι ένα δοκίμιο το οποίο κινείται πάνω από μία ακίνητη επιφάνεια σε ένα λεπτό ρευστό φιλμ. Σε ένα έδρανο ολίσθησης, η κινούμενη επιφάνεια «ολισθαίνει» πάνω στην σταθερή επιφάνεια – εξ' ου και το όνομα. Αυτή η διαρρύθμιση χρησιμοποιείται για την παροχή υποστήριξης του φορτίου σε πολλές μηχανές.

Έστω ότι το συγκλινόμενο κενό τυλίσσεται – το αποτέλεσμα θα είναι η δημιουργία ενός περιστρεφόμενου εδράνου. Το περιστρεφόμενο έδρανο περιλαμβάνεται από έναν άξονα (το έδρανο) και ένα δακτύλιο (το ρουλεμάν). Ένα περιστρεφόμενο έδρανο χρησιμοποιείται για να υποστηρίξει το φορτίο σε ένα περιστρεφόμενο άξονα. Το φορτίο προκαλεί μια μικρή αντιστάθμιση του εδράνου σε σχέση με το ρουλεμάν έτσι ώστε να δημιουργείται το συγκλινόμενο κενό. Καθώς τροφοδοτείται λιπαντικό στο ρουλεμάν και παρασύρεται από τον άξονα στο συγκλινόμενο κενό, αυξάνεται η πίεση του ρευστού και δημιουργείται υδροδυναμική ανύψωση. Αφού το ρευστό εξέλθει από το στενότερο μέρος του κενού, η πίεση του ρευστού μειώνεται και θύλακες ατμού μπορεί να σχηματιστούν στο φιλμ (μια δυσμενής κατάσταση γνωστή ως σπηλαίωση). Το προστιθέμενο ρευστό στην είσοδο του λιπαντικού αντικαθιστά το λιπαντικό το οποίο διαρρέει από το περιστρεφόμενο έδρανο.

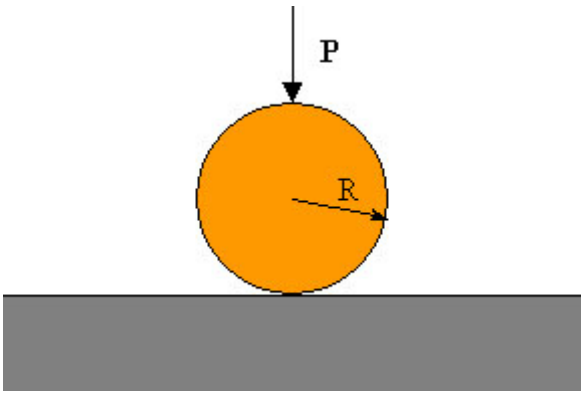



*Σχηματική αναπαράσταση ενός λιπαινόμενου περιστρεφόμενου εδράνου καθώς και ενός εδράνου ολίσθησης*

*Ελαστοϋδροδυναμική Λίπανση*

Ένα ρευστό φιλμ με μεγάλο πάχος, χαμηλή τριβή και απουσία φθοράς είναι τα καθοριστικά χαρακτηριστικά της υδροδυναμικής λίπανσης, η οποία συμβαίνει στις

σύμμορφες επαφές. Μία υπό λίπανση ασύμμορφη επαφή θα υποστεί ελαστοϋδροδυναμική λίπανση.




*Ασύμμορφη Επαφή*

Η κλασσική περιγραφή της ασύμμορφης επαφής είναι η σφαίρα πάνω σε επίπεδη επιφάνεια (ball-on-flat). Είναι επίσης γνωστή και ως Ερτζιανή επαφή, η οποία είναι μια σημειακή επαφή με εξαιρετικά υψηλή πίεση. Παραδείγματος χάριν, μια χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου 19mm τοποθετημένη πάνω σε μία επίπεδη χαλύβδινη επιφάνεια έχει μέγιστη σημειακή πίεση 950 MPa (138000 psi) για ένα φορτίο 30 N.Αυτό είναι 9300 φορές μεγαλύτερο από την ατμοσφαιρική πίεση, η οποία είναι μόλις 14,7psi. Διαφαίνεται ότι η ασύμμορφη επαφή μπορεί να παράγει πιέσεις τόσο μεγάλες που μπορούν προσωρινά να παραμορφώσουν την στερεή χαλύβδινη επιφάνεια.

Η τεράστια πίεση που παράγεται κατά την ασύμμορφη πίεση προκαλεί μια αρκετά ενδιαφέρουσα συμπεριφορά στα λιπαντικά. Ενώ η πίεση είναι αρκετά μεγάλη για να παραμορφώσει τα στερεά, θα επηρεάσει επίσης το ιξώδες του λιπαντικού. Αναφέρθηκε, ανωτέρω, ότι το ιξώδες αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, οι επιπτώσεις της πίεσης είναι ελάχιστα αξιοπρόσεχτες, όμως, οι ελαστοϋδροδυναμικές πιέσεις είναι αρκετά υψηλές για να έχουν σημαντικές επιδράσεις στο ιξώδες του ρευστού. Στην πραγματικότητα, το λιπαντικό στην ελαστοϋδροδυναμική επαφή μπορεί να μετατραπεί σε ημιστερέα μορφή, αντίστοιχη αυτής του τυριού. Αυτό επιτρέπει το σχηματισμού ενός πολύ λεπτού φιλμ λιπαντικού το οποίο μπορεί και να υποστηρίξει το εφαρμοζόμενο φορτίο.

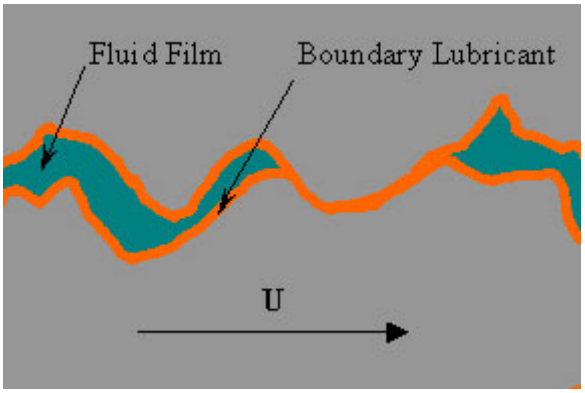
*Κυλιόμενα Στοιχεία Έδρασης*

Όπως αναφέρει και το όνομα, τα έδρανα αυτά περιέχουν κυλιόμενα στοιχεία τα οποία φέρουν το φορτίο. Τα στοιχεία αυτά έχουν διάφορες μορφές όπως σφαίρες ή κυλίνδρους, ή και ενδιάμεσες μορφές, άλλα πάντα θα υφίστανται ασύμμορφη επαφή και ελαστοϋδροδυναμική λίπανση. Η ασύμμορφη επαφή συνήθως δεν είναι του τύπου σφαίρα πάνω σε επίπεδο εφόσον το κυλιόμενα στοιχείο μπορεί να εφάπτεται σε μία καμπύλη επιφάνεια. Παρά ταύτα, η καμπυλότητα της επιφάνειας είναι τέτοια που και πάλι θεωρείται ασύμμορφη επαφή.

Τα κυλιόμενα στοιχεία και τα έδρανα είναι κατασκευασμένα από σκληρυμένο χάλυβα ο οποίος είναι ικανός να υπομείνει τις εξαιρετικές πιέσεις που εμφανίζονται στην ασύμμορφη επαφή. Το υλικό του εδράνου και η αύξηση στο ιξώδες του ρευστού επιτρέπουν στα κυλιόμενα στοιχεία έδρασης να υποστηρίξουν τα φορτία ομαλά και αξιόπιστα σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπου υπάρχει ένας περιστρεφόμενος άξονας, όπως τα οχήματα, οι αντλίες, οι συμπιεστές και οι στρόβιλοι.

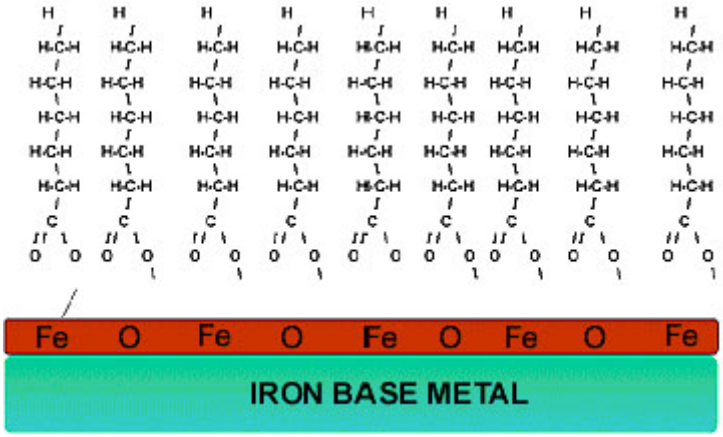
*Οριακή Λίπανση*

Η οριακή λίπανση λαμβάνει χώρα όταν το λιπαντικό φιλμ αποκτήσει το ίδιο πάχος με την τραχύτητα της επιφάνειας, έτσι ώστε τα εξέχοντα σημεία της επιφάνειας των δύο στερεών να έρχονται σε επαφή. Αυτό σε γενικές γραμμές είναι ανεπιθύμητο σύστημα λειτουργίας για ένα υδροστατικό ή υδροδυναμικό έδρανο, αφού οδηγεί σε αυξημένη τριβή, απώλεια ενέργειας, φθορά και απώλεια υλικού. Όμως, η πλειοψηφία των μηχανημάτων θα υποστούν οριακή λίπανση κατά τη λειτουργία τους, ειδικά κατά την εκκίνηση, το κλείσιμο και την λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες. Συγκεκριμένα λιπαντικά και πρόσθετα έχουν πλέον αναπτυχθεί για να μειώσουν τις αρνητικές επιπτώσεις της οριακής λίπανσης.




*Οριακή Λίπανση*

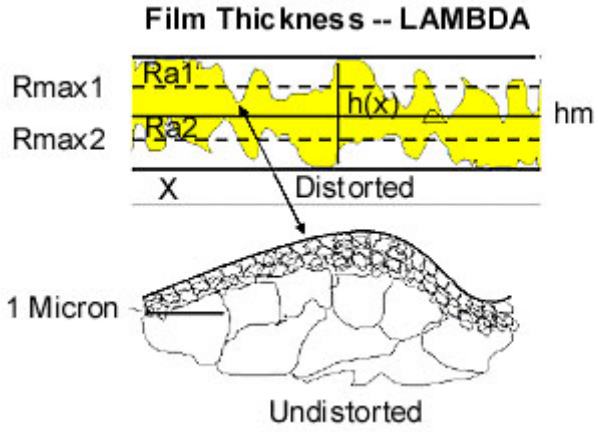
Τα οριακά λιπαντικά έχουν γενικώς μακριά, ευθεία, πολικά μόρια τα οποία θα συνδεθούν άμεσα στις μεταλλικές επιφάνειες. Τα λιπαντικά μόρια θα δημιουργήσουν ένα παχύ προστατευτικό στρώμα το οποίο ομοιάζει σε ένα μοριακό τραχύ «χαλί». Η μορφή αυτή παρατίθεται στην ακόλουθη εικόνα:



Τα λεπτά στρώματα εμποδίζουν τις μεταλλικές επιφάνειες από το να έρθουν σε επαφή, αλλά τα στρώματα του οριακού λιπαντικού θα έρθουν σε επαφή το ένα με το άλλο προκαλώντας φθορά. Το λιπαντικό στρώμα, στην ουσία, φθείρεται για να προστατεύσει το μέταλλο και να μειώσει τη μεταλλική φθορά άλλα και για να επιμηκύνει τη ζωή της μηχανής.

*Μεικτή Λίπανση*

Η μεικτή λίπανση παρουσιάζεται ανάμεσα στην οριακή λίπανση και την υδροδυναμική, όπως φαίνεται και από το όνομά της. Το πάχος του ρευστού φιλμ είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από την επιφανειακή τραχύτητα, έτσι ώστε να υπάρχει πολύ μικρή επαφή των εξεχόντων σημείων, άλλα οι επιφάνειες είναι πάλι πολύ κοντά ώστε να επηρεάζουν η μία την άλλη. Σε ένα μεικτό είδος λίπανσης, τα εξέχοντα σημεία της επιφάνειας αυτά καθαυτά μπορούν να διαμορφώσουν μικροσκοπικές ασύμμορφες επαφές, οι οποίες, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οδηγούν σε ελαστοϋδροδυναμική λίπανση. Όμως, αφού στην περίπτωση αυτή πρόκειται για επιφανειακά σημεία και όχι για έδρανα το φαινόμενο είναι αρκετά εντοπισμένο και ονομάζεται μικροελαστοϋδροδυναμική λίπανση.



*Αντλίες Εμβόλου/Κυλίνδρου*

Πολλοί κατασκευαστές ναυτικών μηχανών έχουν την λανθασμένη εντύπωση ότι ανεπαρκές ιξώδες είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνο για τη σωστή λίπανση των αντλιών εμβόλου/κυλίνδρου. Αυτό είναι λάθος.

Στην πραγματικότητα, σωστή λίπανση στις αντλίες εμβόλου/κυλίνδρου εξαρτάται από μία ισορροπία ανάμεσα στην ***υδροδυναμική λίπανση*** και στην ***οριακή λίπανση***.

***Υδροδυναμική λίπανση*** συμβαίνει, όπως αναφέρθηκε όταν δύο επιφάνειες είναι σε σχετική κίνηση η μία με την άλλη και χωρίζονται από ένα υγρό φιλμ το οποίο φέρει το επιβαλλόμενο φορτίο. Το αποτέλεσμα είναι χαμηλή τριβή και σχεδόν ελάχιστη φθορά ανάμεσα στις δύο επιφάνειες.

***Οριακή λίπανση*** συμβαίνει, σύμφωνα με τα παραπάνω, όταν αυτό το υγρό φιλμ γίνει τόσο λεπτό που αποκτά το ίδιο πάχος όσο η επιφανειακή τραχύτητα των εξεχόντων σημείων των δύο διαδραστικών στερεών επιφανειών. Για σωστή προστασία ενάντια σε αυτήν την επαφή επιφάνειας με επιφάνεια, το καύσιμο πρέπει να έχει επαρκή λιπαντική ικανότητα για να εμποδίσει αυξημένη τριβή και φθορά.

*Λειτουργία με Βαρέα Καύσιμα:* Όταν αντλούνται βαρέα καύσιμα, το τυπικό ιξώδες του καυσίμου που περνάει από μία ναυτική αντλία καυσίμου έχει τιμές από 12-16 centistokes (cSt). Το ιξώδες αυτό είναι βεβαίως αρκετό για να προσφέρει επαρκή υδροδυναμική λίπανση.

Όμως η οριακή λίπανση παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο σε τρία συγκεκριμένα στάδια:

1. Στην αρχική εκκίνηση όταν το υγρό φιλμ δεν είναι επαρκές
2. Στη λειτουργία με χαμηλές ταχύτητες οπότε και δεν αντλείται αρκετό καύσιμο για να προσφέρει ικανοποιητική ποσότητα φιλμ
3. Στη λειτουργία με πολύ υψηλές ταχύτητες οπότε και οι υψηλές πιέσεις μέσα στην αντλία μειώνουν το πάχος του φιλμ

Ευτυχώς, τα βαρέα καύσιμα περιέχουν αρκετές ποσότητες φυσικών λιπαντικών ουσιών ώστε να προσφέρουν επαρκή προστασία κατά τη φάση της οριακής λίπανσης.

*Λειτουργία με 0.1% Ναυτιλιακά Καύσιμα:* Η σωστή ισορροπία μεταξύ υδροδυναμικής και οριακής λίπανσης διαταράσσεται όταν η αντλία αλλάζει τη λειτουργία της και μεταβαίνει από βαρύ καύσιμο σε απόσταγμα χαμηλού θείου. Πολύ απλά, το ιξώδες του ναυτιλιακού καυσίμου χαμηλού θείου κυμαίνεται μεταξύ 1.5-3.0 centistokes (cSt). Με μείωση του ιξώδους που φτάνει μέχρι και το 80% από αυτό του βαρέου καυσίμου, το προστατευτικό φιλμ ανάμεσα στις επιφάνειες του εμβόλου και του κυλίνδρου γίνεται επικίνδυνα πιο λεπτό.

Αυτό, φυσικά, οδηγεί σε αυξημένη επαφή μετάλλου με μέταλλο, ειδικά στην εκκίνηση, στις χαμηλές ταχύτητες, στις πολύ υψηλές και κατά τη διάρκεια εναλλαγών φορτίου. Οπότε, όταν έχουμε λειτουργία με ναυτιλιακά καύσιμα χαμηλού θείου, ο

καταλυτικός παράγοντας που καθορίζει την φθορά στις αντλίες καυσίμου είναι η οριακή λίπανση.

Όμως, εν αντιθέσει με τα βαρέα καύσιμα που έχουν πληθώρα φυσικών λιπαντικών στοιχείων, τα ναυτιλιακά καύσιμα χαμηλού θείου στερούνται των πολικών στοιχείων του αζώτου και του οξυγόνου που συνήθως σχηματίζουν ένα λεπτό αλλά πολύ ισχυρό και προστατευτικό φράγμα ανάμεσα στις δύο επιφάνειες.

Ακόμα και αν το ιξώδες του καυσίμου αυξηθεί με μείωση θερμοκρασίας, και ακόμα και αν ένα ειδικό ναυτιλιακό καύσιμο χαμηλού θείου παραχθεί το οποίο θα έχει μεγάλη αρχική τιμή ιξώδους, το ναυτιλιακό καύσιμο χαμηλού θείου στερείται τα πολικά στοιχεία του οξυγόνου και του αζώτου για να προστατεύσει επαρκώς τα εσωτερικά εξαρτήματα όταν η αντλία λειτουργεί στη φάση της οριακής λίπανσης.

*Αντλίες Οδοντωτού Τροχού/Κοχλία*

Το είδος των αντλιών αυτών βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στην οριακή λίπανση για τη λειτουργία του. Οι αντλίες αυτού του τύπου έχουν σχεδιαστεί για λειτουργία εκμεταλλευόμενες τα οφέλη που προσφέρουν τα φυσικά λιπαντικά συστατικά τα οποία περιέχονται στα βαρέα καύσιμα. Όμως, αφού στα ναυτιλιακά καύσιμα με 0.1% θείο έχουμε σοβαρή έλλειψη φυσικών λιπαντικών στοιχείων, είναι αναμενόμενη η εκτεταμένη φθορά των αντλιών αυτών. Με την πάροδο του χρόνου, προοδευτική φθορά θα οδηγήσει σε απώλεια πίεσης άντλησης και της ογκομετρικής δυνατότητας.

*Αντίσταση Ηλεκτρικής Επαφής (ECR – Electrical Contact Resistance)*

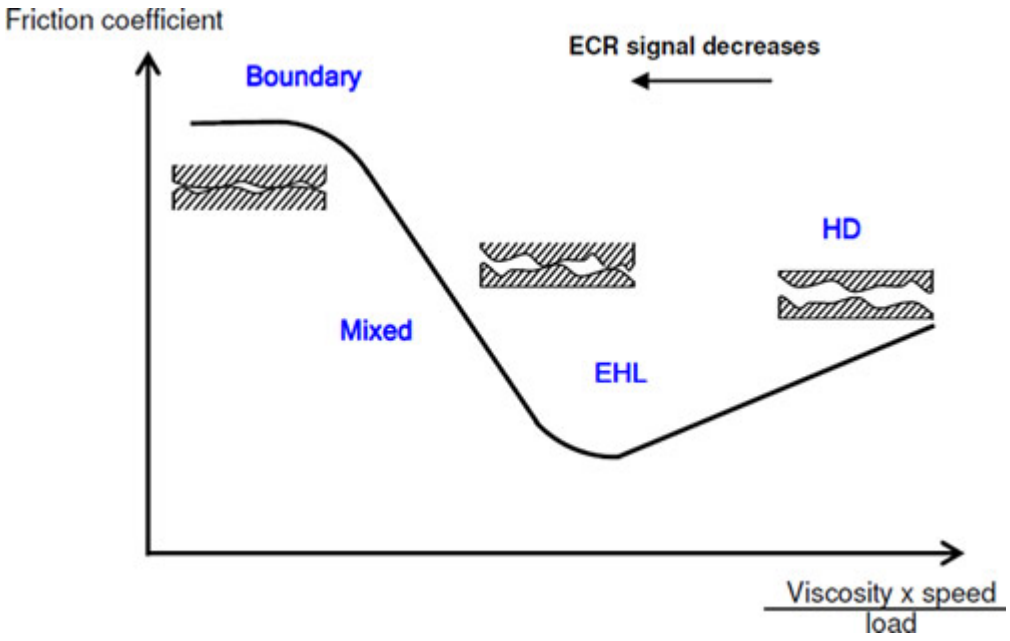
Η αντίσταση επαφής είναι συνάρτηση των εξής στοιχείων:

- *Επιφάνεια επαφής:* όσο πιο μικρή η επιφάνεια επαφής, τόσο πιο μεγάλη και η αντίσταση η οποία και αναπτύσσεται. Η επιφάνεια επαφής εξαρτάται τόσο από το υλικό των επιμέρους στοιχείων που έρχονται σε επαφή όσο και από τη γεωμετρία αυτών καθώς επίσης και από το φορτίο το οποίο εφαρμόζεται στα στοιχεία αυτά.
- *Η έμφυτη ηλεκτρική αντίσταση των στοιχείων που έρχονται σε επαφή*
- *Η έμφυτη ηλεκτρική αντίσταση του λιπαντικού υλικού*
- *Η διαδραστικότητα της τραχύτητας/πάχους του φιλμ:* αυτό είναι άμεσα συνδεδεμένο με το είδος λίπανσης της επαφής

Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα Stribeck το οποίο αντικατοπτρίζει τα διάφορα είδη λίπανσης. Όταν η ταχύτητα παράσυρσης και/ή το ιξώδες είναι αυξημένα (υδροδυναμικό HD και ελαστοϋδροδυναμικό EHL είδος λίπανσης), οι επιφάνειες στην επαφή είναι πλήρως διαχωρισμένες από το λιπαντικό φιλμ. Η ηλεκτρική αντίσταση επαφής θα είναι περίπου ή ίση με 100%.

Καθώς η ταχύτητα και/ή το ιξώδες μειώνεται, το πάχος του φιλμ μειώνεται και η επαφή εισέρχεται στο μεικτό MIXED είδος λίπανσης, όπου οι επιφανειακές τραχύτητες είναι μόνο διαχωρισμένα λεπτά επιφανειακά οριακά φιλμ. Με την αύξηση του φιλμ επαφής η ηλεκτρική αντίσταση επαφής μειώνεται.

*Καμπύλη Stribeck με απεικόνιση της ECR*



## 4. ΔΗΛΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Πρώτον, θα εξεταστούν δηλώσεις που έγιναν από κατασκευαστές μηχανών Diesel που λειτουργούν σε οχήματα ξηράς. Αυτοί οι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει ξεκάθαρες πολιτικές και στάνταρ που βασίζονται σε έρευνα και εμπειρία που απέκτησαν μετά από 20 χρόνια χρήσης και εξέτασης των καυσίμων χαμηλού θείου.

Δεύτερον, θα εξεταστούν αντίστοιχες δηλώσεις από κατασκευαστές ναυτικών μηχανών. Αυτές έρχονται σε εμφανή αντιπαράθεση με τις δηλώσεις των ομολόγων τους – κάτι το οποίο καταδεικνύει ότι οι κατασκευαστές ναυτικών μηχανών θα πρέπει να εξετάσουν και να μελετήσουν πιο εκτεταμένα την έρευνα η οποία έχει γίνει και να αναπτύξουν κατάλληλες προτάσεις για να διαφυλάξουν την λειτουργική ακεραιότητα των ναυτικών αντλιών καυσίμων.

*Κατασκευαστές Μηχανών Diesel Επίγειων Οχημάτων*

- «Κατά τις διαδικασίες διύλισης που αφαιρούν τα στοιχεία του θείου έχουμε σύγχρονη μείωση στοιχείων του καυσίμου Diesel τα οποία και προσδίδουν φυσικές λιπαντικές ικανότητες στο καύσιμο. Καθώς τα επίπεδα θείου στο καύσιμο μειώνονται, ο κίνδυνος ανεπαρκούς λιπαντικής ικανότητας αυξάνεται. Όμως, χαμηλή λιπαντική ικανότητα έχει παρατηρηθεί και σε καύσιμα με πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Πρόσθετα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτύχουμε την απαιτούμενη λιπαντική ικανότητα, αντί την αλλαγή της διαδικασίας διύλισης του καυσίμου. Ανεπαρκής λιπαντική ικανότητα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες εκπομπές αερίων από το σύστημα εξάτμισης, υπερβολική φθορά αντλιών και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και καταστροφική αστοχία.» -World Wide Fuel Charter
- «Καύσιμα χαμηλού θείου ή/και χωρίς θείο με περιεκτικότητες θείου <50mg/kg ή <10mg/kg είναι επιτρεπτές. Τα προβλήματα φθοράς στο σύστημα ανάφλεξης τα οποία συνήθως λαμβάνουν χώρα λόγω της χαμηλής λιπαντικής ικανότητας των καυσίμων χαμηλού θείου (ιδιαίτερα σε συστήματα ανάφλεξης που βασίζονται στην λιπαντική ικανότητα των καυσίμων) καλύπτονται από τη χρήση των κατάλληλων προσθέτων σύμφωνα με τα ASTM 975 ή EN 590. Σε καύσιμα χαμηλού θείου τα οποία δεν συμμορφώνονται με τα προηγούμενα πρότυπα, η λιπαντική ικανότητα πρέπει να εξασφαλίζεται από τα κατάλληλα πρόσθετα καυσίμου.» - Deutz Diesel
- «Η διαδικασία της υδρογονοαποθείωσης εκτός από το θείο αφαιρεί και άλλα συστατικά του καυσίμου Diesel. Συγκεκριμένα, στοιχεία αζώτου, δικυκλικά αρωματικά, πολυκυκλικά αρωματικά και στοιχεία οξυγόνου. Ενώ η αφαίρεση του θείου δεν έχει επιδείξει επιβλαβείς επιδράσεις στη μηχανή, η αφαίρεση των υπολοίπων στοιχείων που αναφέρθηκαν έχει μειώσει την λιπαντική ικανότητα των καυσίμων. Σαν αποτέλεσμα το καύσιμο έχει μικρότερες ανοχές στο νερό και στις ακαθαρσίες. Οδηγεί επίσης σε έντονη φθορά των μερών του συστήματος καύσης. Καύσιμα τα οποία δεν έχουν ικανοποιητική λιπαντική ικανότητα δεν παρέχουν αρκετή λίπανση στα έμβολα, στους κυλίνδρους και στους αναφλεκτήρες. Η λιπαντική ικανότητα μπορεί να βελτιωθεί με πρόσθετα.» - Caterpillar

Εν κατακλείδι, οι κατασκευαστές μηχανών Diesel που λειτουργούν σε οχήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας με καύσιμα χαμηλού θείου συμπεραίνουν ότι:

- Η διαδικασία διύλισης αφαιρεί στοιχειά του καυσίμου που προσδίδουν λιπαντική ικανότητα και σταθερότητα σε αυτό με κίνδυνο την αστοχία των αντλιών καυσίμου είτε σε αντλίες που λειτουργούν με έμβολα/κυλίνδρους είτε σε περιστροφικές αντλίες.
- Μειωμένη σταθερότητα καυσίμου μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη παραγωγή εκπομπών αερίου.
- Χαμηλή λιπαντική ικανότητα των καυσίμων μπορεί να διορθωθεί με πρόσθετα.

*Κατασκευαστές Μηχανών Diesel Ναυτικών Οχημάτων*

Για κάποιους κατασκευαστές δίχρονων και τετράχρονων ναυτικών μηχανών, οι λύσεις δεν είναι και τόσο εμφανείς παρόλο που έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες στην πάροδο 25 χρόνων πάνω στο συγκεκριμένο θέμα.

*DAIHATSU*

«Το θείο στα καύσιμα μπορεί να λειτουργήσει σαν παράγοντας ο οποίος βελτιώνει την λιπαντική ικανότητα του καυσίμου. Όσο πιο χαμηλή η περιεκτικότητα σε θείο, τόσο πιο χαμηλή και η λιπαντική ικανότητα του καυσίμου. Τα καύσιμα πρέπει να δίνουν τιμές χαμηλότερες των 460μm στην HFRR.”

Ο εκπρόσωπος της εταιρίας λανθασμένα δηλώνει ότι το θείο στο καύσιμο βοηθάει στην παροχή λιπαντικής ικανότητας.

Το θείο δεν προσφέρει τίποτα στην λιπαντική ικανότητα του καυσίμου.

Ο εκπρόσωπος επίσης προτείνει ότι το καύσιμο δεν πρέπει να ξεπερνά τα 460μm κατά τον έλεγχό του με το πρότυπο HFRR. Δυστυχώς, το πρότυπο αυτό αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του ’90 για να προσφέρει αποτελέσματα τα οποία αφορούσαν ένα τελείως διαφορετικό είδος αντλίας – μια περιστροφική αντλία οχήματος ξηράς σχεδιασμού της δεκαετίας αυτής.

Προς το παρόν δεν υπάρχει πρότυπο HFRR το οποίο να μπορεί να προσφέρει απευθείας αποτελέσματα για αντλίες ναυτικών οχημάτων – αντλίες που υφίστανται αρκετά μεγαλύτερα εσωτερικά φορτία και πιέσεις σε σχέση με τα αντίστοιχα οχημάτων ξηράς.

*MAN DIESEL & TURBO*

«Η διαδικασία αφαίρεσης του θείου από το καύσιμο δεν μειώνει μόνο το ιξώδες του αλλά επηρεάζει και τα συστατικά τα οποία προσφέρουν λιπαντική ικανότητα στο καύσιμο. Μειωμένη λιπαντική ικανότητα μπορεί να προκαλέσει κραδασμούς αντλιών. Παρόλο που αρκετά διυλιστήρια προσθέτουν συστατικά βελτίωσης της λιπαντικής ικανότητας σε αποστάγματα, η MAN DIESEL προτείνει τον έλεγχο της λιπαντικής ικανότητας πριν γίνει χρήση καυσίμων με περιεκτικότητα σε θείο πιο χαμηλή του 0.05%. Ανεξάρτητα εργαστήρια

καυσίμων μπορούν να ελέγξουν την λιπαντική ικανότητα σύμφωνα με το ISO 12156-1 (High Frequency Reciprocating Rig, HFRR). Το HFRR έχει ανώτατο όριο τα 460μm».

Ο εκπρόσωπος ορθώς δηλώνει ότι η διαδικασία αφαίρεσης του θείου «επηρεάζει» την λιπαντική ικανότητα και ότι «Μειωμένη λιπαντική ικανότητα μπορεί να προκαλέσει κραδασμούς αντλιών».

Όμως, κάνει λάθος όταν δηλώνει πως «αρκετά διυλιστήρια προσθέτουν συστατικά βελτίωσης της λιπαντικής ικανότητας σε αποστάγματα». Αυτή η δήλωση μπορεί να δώσει την εντύπωση στους χειριστές ναυτικών μηχανών ότι τα συστήματα αντλιών μπορεί να μην υποστούν ζημιές από ανεπαρκή λιπαντική ικανότητα.

Τα διυλιστήρια στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ευρωπαϊκή Ένωση δεν προσθέτουν βελτιωτικές ουσίες λιπαντικής ικανότητας κατά την παραγωγή του καυσίμου στο διυλιστήριο. Τα πρόσθετα αυτά χρησιμοποιούνται από χειριστές σε τερματικούς σταθμούς καυσίμων ξηράς όπου τα πρόσθετα αυτά εγχέονται σε καύσιμα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν από οχήματα ξηράς.

Οι λόγοι για την ανωτέρω διαδικασία είναι ήδη εδραιωμένοι. Πολύ απλά, οι κατασκευαστές μηχανών αεροσκαφών εξέφρασαν ανησυχίες που αφορούσαν την πιθανή μόλυνση των σωληνώσεων στα διυλιστήρια λόγω της χρήσης των προσθέτων αυτών μετά από έρευνες που έλαβαν χώρα και διαπιστώθηκε ότι ορισμένα πρόσθετα μπορεί να προκαλέσουνν ζημιά σε τουρμπίνες αεροσκαφών. Κατά συνέπεια, τα διυλιστήρια σταμάτησαν την έγχυση προσθέτων στα καύσιμα το 2005.

Τέλος, όπως και στην περίπτωση της DAIHATSU, η MAN DIESEL προτείνει τη χρήση του τωρινού προτύπου HFRR για τον έλεγχο των ναυτιλιακών καυσίμων κάτι το οποίο δεν προσφέρει απολύτως αδιαμφισβήτητα αποτελέσματα για την λιπαντική ικανότητα ναυτιλιακών καυσίμων. Η εταιρία δε φαίνεται να έχει προβεί σε δικές της ενέργειες μέχρις στιγμής για να διευκρινίσει αν το πρότυπο αυτό είναι κατάλληλο και αρκετό για να διαπιστωθεί η λιπαντική ικανότητα των υπό χρήση καυσίμων για τις συνθήκες πίεσης και φορτίων στις ναυτικές αντλίες.

Επίσης, ο εκπρόσωπος της εταιρίας προτείνει ότι το μειωμένο ιξώδες στα ναυτιλιακά καύσιμα χαμηλού θείου μπορεί να προκαλέσει αστοχίες όπως «η διάσπαση του υδροδυναμικού φιλμ του καυσίμου» - υπονοώντας έτσι ότι η έλλειψη ιξώδους είναι πρωτίστως υπεύθυνη για την αστοχία αντλιών καυσίμου.

Όμως οι αντλίες εμβόλου/κυλίνδρου εξαρτώνται από την ισορροπία ανάμεσα στην υδροδυναμική και οριακή λίπανση. Όταν η υδροδυναμική λίπανση είναι ανεπαρκής, η κατάλληλη οριακή λίπανση καλύπτει την ανεπάρκεια αυτή. Η αστοχία αντλιών συμβαίνει μόνο επειδή ένα καύσιμο στερείται επαρκούς λιπαντικής ικανότητας για να προσφέρει κατάλληλη οριακή λίπανση.

*MITSUI - MAN B&W*

Όπως και η προηγούμενη εταιρία, κάτω από την άδεια της οποίας κατασκευάζει και αυτή μηχανές με την επωνυμία MAN DIESEL, προτείνει την χρήση του προτύπου ISO 12156-1 (High Frequency Reciprocating Rig, HFRR) με την επιπρόσθετη διευκρίνηση ότι, στην περίπτωση ανεπαρκούς λιπαντικής ικανότητας, το πρόσθετο που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να ελεγχθεί.

*WARTSILA / SULZER*

«Σύμφωνα με την εμπειρία ης εταιρίας μας η λιπαντική ικανότητα δεν τίθεται ως πρόβλημα για τις τετράχρονες μηχανές εφόσον το περιεχόμενο σε θείο είναι πάνω των 100ppm (0.01%). Για την στιγμή αυτή (Ιανουάριος 2006) τεκμηριωμένη εμπειρία για καύσιμα με περιεχόμενο θείου κάτω των 100ppm δεν είναι διαθέσιμη. Σε ακραίες περιπτώσεις πρόσθετα λιπαντικής ικανότητας μπορούν εγχυθούν σε καύσιμα πολύ χαμηλής λιπαντικής ικανότητας από τον παραγωγό/διανομέα του καυσίμου.»

Όταν η εταιρία εξέδωσε την δήλωση αυτή (Ιανουάριος 2006), τα ναυτιλιακά καύσιμα τα οποία ήταν διαθέσιμα στη αγορά δεν είχαν περιεχόμενο σε θείο χαμηλότερο των 500ppm (0.5%). Υπό φυσιολογικές συνθήκες, καύσιμα με αυτό το περιεχόμενο θείου έχουν ικανοποιητική λιπαντική ικανότητα για να προσφέρουν ορθή και ακίνδυνη λειτουργία στις αντλίες καυσίμων των πλοίων.

Άρα είναι αναμενόμενο ότι δεν υπάρχει «τεκμηριωμένη εμπειρία» πριν τον Ιανουάριο του 2006 σε καύσιμα με περιεχόμενο θείου της τάξης των 100ppm. Δεν αναφέρεται όμως το γεγονός ότι δεν θα υπάρχει «τεκμηριωμένη εμπειρία» και για καύσιμα που κυμαίνονται από 100-500 ppm – η τυπική περιεκτικότητα σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων 0.1% η οποία και νομοθετήθηκε από τον Ιανουάριο του 2010 σε Ευρώπη και Καλιφόρνια.

Όμως, από τον Ιούλιο του 2009, οπότε και η CARB απαίτησε την χρήση ναυτιλιακών καυσίμων με περιεχόμενο θείου στο 0.5% ή λιγότερο στην Πολιτεία της Καλιφόρνια, περιπτώσεις αστοχίας των αντλιών κατασκευής από τις εταιρίες Wartsila και Sulzer έχουν αναφερθεί. Μερικά παραδείγματα:

- Στις αρχές του Ιουλίου 2009, ένα κρουαζιερόπλοιο το οποίο λειτουργούσε στην διαδρομή San Diego-Ensenada υπέστη αστοχία σε όλες σχεδόν τις αντλίες καυσίμου του οι οποίες χρησιμοποιούντο από τις τετράχρονες μηχανές του κατασκευής της εταιρίας Sulzer.
- Τον Αύγουστο του 2009, ένα δεξαμενόπλοιο κατά την είσοδό στα ύδατα της Καλιφόρνια έκανε επιτυχώς την μετάβαση από την καύση ενός βαρέως καυσίμου 380 cST σε ένα καύσιμο χαμηλού θείου περιεκτικότητας 0.44% σε θείο. Η RLB δίχρονη μηχανή της Sulzer λειτούργησε χωρίς κανένα πρόβλημα για τις επόμενες έξι ώρες. Όμως, κατά την έβδομη ώρα λειτουργίας της με το καύσιμο αυτό, και οι έξι αντλίες καυσίμου αστόχησαν.

Οι εταιρίες αυτές δεν έχουν κάνει κάποια πρόταση για τον έλεγχο λιπαντικής ικανότητας των καυσίμων με το πρότυπο HFRR, είτε το τωρινό είτε για κάποια μελλοντική του αλλαγή.

*CIMAC*

Το 2004 με ένα γράμμα το οποίο απεστάλη στην CARB (California Air Resources Board) και στο Υπουργείο Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, η CIMAC Fuels Working Group δήλωσε ότι:

«Έχουμε συμπεράνει ότι είναι αναμενόμενο να αντιμετωπίσουμε αρκετά σοβαρά προβλήματα, όταν τα πλοία θα υποχρεωθούν να χρησιμοποιήσουν τα καύσιμα αυτά. Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ανησυχίες μας οι οποίες είναι:

Μπορεί να παρουσιαστεί πρόβλημα με χαμηλή λιπαντική ικανότητα στα καύσιμα χαμηλού θείου. Για καύσιμα τα οποία προορίζονται για χρήση από οχήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας, το καύσιμο έχει μια απαίτηση ελάχιστης λιπαντικής ικανότητας και συνήθως θα περιέχει πρόσθετα συστατικά τα οποία θα καλύπτουν την ανεπάρκεια του καυσίμου όσον αφορά σε αυτήν την παράμετρο.

Το ίδιο δεν ισχύει για τα ελαφρά ναυτιλιακών καυσίμων. Στα ναυτιλιακά καύσιμα δεν δίνεται συγκεκριμένος περιορισμός και όρια τα οποία να διευκρινίζουν την λιπαντική ικανότητα του καυσίμου. Υπάρχει λίγη ή καθόλου εμπειρία με τη χρήση καυσίμων χαμηλού θείου χωρίς πρόσθετα λιπαντικής ικανότητας σε ναυτιλιακές εφαρμογές. Πιστεύουμε ότι περαιτέρω διεργασίες απαιτούνται για να διευκρινιστεί ότι τέτοια καύσιμα χαμηλού θείου που να είναι σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς έχουν και κατάλληλη και επαρκή λιπαντική ικανότητα.»

Μέχρι και το 2009, λίγα πράγματα έγινα από μέρους των κατασκευαστών ναυτικών μηχανών ώστε να διευκρινιστούν ορθώς τα λιπαντικά χαρακτηριστικά των ναυτιλιακών καυσίμων με θείο στο 0.1%, και πως η ανεπαρκής λιπαντική ικανότητα μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία των συστημάτων αντλιών καυσίμου των πλοίων.

Ευτυχώς, πάνω από 25 χρόνια πειραματισμών έχουν λάβει ήδη χώρα όσον αφορά στα θέματα της λιπαντικής ικανότητας – οι κύριες αιτίες και μερικές λύσεις. Οι κατασκευαστές ναυτικών μηχανών μπορούν να εκμεταλλευτούν αυτόν τον μεγάλο όγκο πληροφοριών ώστε να διευκρινίσουν τα απαραίτητα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία των ναυτιλιακών συστημάτων.

## 5. ΥΔΡΟΓΟΝΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟΑΠΟΘΕΙΩΣΗ[6]

Κατά την διαδικασία της υδρογονοκατεργασίας συμβαίνει απομάκρυνση ετεροατόμων και κορεσμός δεσμών άνθρακα – άνθρακα. Συγκεκριμένα έχουμε:

- Απομάκρυνση αζώτου, οξυγόνου και μετάλλων.
- Κορεσμός ολεφινικών και αρωματικών δεσμών.

Επίσης, έχουμε μείωση του μέσου μοριακού βάρους και παραγωγή ελαφρών καυσίμων σε υψηλότερες αποδόσεις.

Κατά την διαδικασία της Υδρογονοαποθείωσης (Hydrodesulphurization) λαμβάνουν χώρα τα παρακάτω:

- Απομάκρυνση ενώσεων
- Ελαχιστοποίηση μετατροπής της τροφοδοσίας σε ελαφρύτερα προϊόντα.
- Μετατροπή 10% ως 20%.

*Υδρογονοαποθείωση*

Η ποσότητα υδρογόνου που καταναλίσκεται εξαρτάται από τους δεσμούς που πρέπει να διασπαστούν – κορεστούν και την απώλεια στα προϊόντα. Έτσι έχουμε:

- Κατανάλωση στις αντιδράσεις υδρογόνωσης.
- Οι αντιδράσεις υδρογόνωσης είναι γενικά εξώθερμες.

Η διαχείριση της θερμότητας της αντίδρασης είναι σημαντική για την ασφάλεια και τη λειτουργική σταθερότητα της μονάδας. Κατά την Υδρογονοαποθείωση το θείο μετατρέπεται σε υδρόθειο ($H_2S$). Συγκεκριμένα:

- Το προστιθέμενο υδρογόνο διασπά τους δεσμούς άνθρακα – θείου και προκαλεί κορεσμό των υδρογονανθρακικών ομάδων.
- Δημιουργεί σε μικρή ποσότητα ελαφρά κλάσματα.

Τα βαρύτερα κλάσματα δημιουργούν περισσότερα ελαφρά συστατικά από τη διάσπαση σύνθετων θειούχων ενώσεων. Οι μορφές θειούχων ενώσεων:

- Στη νάφθα βρίσκεται κυρίως στη μορφή μερκαπτανών και σουλφιδίων.
- Στα βαρύτερα κλάσματα το περισσότερο θείο βρίσκεται στη μορφή δισουλφιδίων και θειοφαινίων.

*Κατανάλωση Υδρογόνου –Απομάκρυνση Αζώτου, Οξυγόνου*

1. *Απομάκρυνση αζώτου*: Το άζωτο μετατρέπεται σε αμμωνία (NH3).

- Οι κύριες ενώσεις αζώτου είναι πυριδίνες και πυρρόλες.
- Η απομάκρυνση αζώτου στην υδρογονοκατεργασία νάφθας είναι ελάχιστη.
- Καθώς η τροφοδοσία γίνεται βαρύτερη, η απομάκρυνση αζώτου γίνεται πιο σημαντική, όπως στην υδρογονοκατεργασία gasoil κενού (VGO).
- Η απομάκρυνση αζώτου απαιτεί περίπου 4 φορές περισσότερο υδρογόνο από την ισοδύναμη απομάκρυνση θείου.

2. *Απομάκρυνση οξυγόνου*: Το οξυγόνο μετατρέπεται σε νερό (H2O).

- Ενώσεις οξυγόνου είναι οι φαινόλες και τα υπεροξείδια.
- Όπως και στην απομάκρυνση αζώτου, η απομάκρυνση οξυγόνου είναι ασήμαντη στη νάφθα, αλλά σημαντική στην υδρογονοκατεργασία βαρέων κλασμάτων.
- Η απομάκρυνση οξυγόνου απαιτεί περίπου 2 φορές περισσότερο υδρογόνο από την ισοδύναμη απομάκρυνση θείου.

*3. Άλλα ετεροάτομα:*

- Το οργανικό χλώριο μετατρέπεται σε υδροχλώριο (HCl).
- Τα χλωρίδια υπάρχουν σε πολύ μικρές ποσότητες και η κατανάλωση υδρογόνου είναι αντίστοιχη αυτής της υδρογονοαποθείωσης.

*Κατανάλωση – Κορεσμός Δεσμών –Απώλειες Υδρογόνου*

Οι ολεφίνες μετατρέπονται στις αντίστοιχες παραφίνες:

- Η κατανάλωση είναι στοιχειομετρική με προσθήκη 1 mole υδρογόνου ανά διπλό δεσμό.
- Οι ολεφίνες είναι το κύριο συστατικό των ελαφρών προϊόντων πυρόλυσης όπως νάφθα καταλυτικής πυρόλυσης, νάφθα ιξωδόλυσης και νάφθα εξανθράκωσης.
- Υπάρχουν διαθέσιμοι καταλύτες με κατάλληλη εκλεκτικότητα για την υδρογονοαποθείωση της νάφθας καταλυτικής πυρόλυσης χωρίς ταυτόχρονο κορεσμό των ολεφινών για να διατηρηθεί ο επιθυμητός αριθμός οκτανίου.

Οι αρωματικοί δακτύλιοι υδρογονώνονται προς ναφθένια.

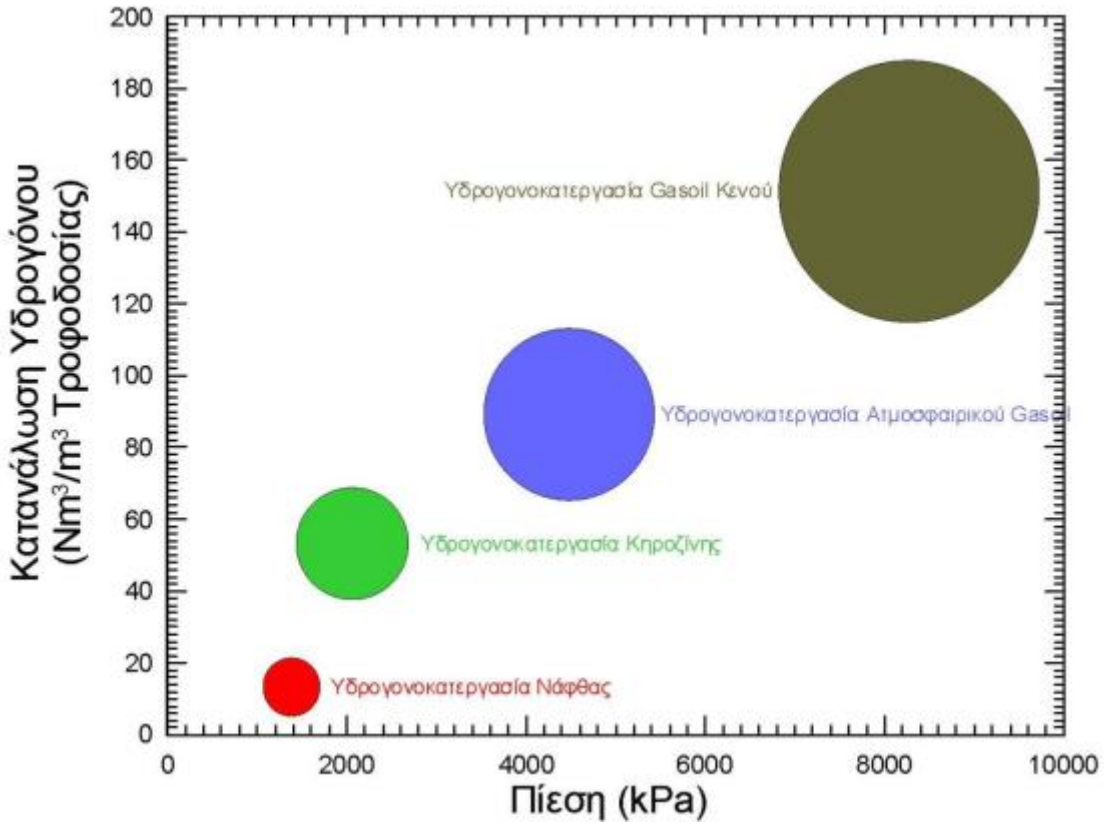
- Είναι μια έντονη διεργασία και η κατανάλωση υδρογόνου εξαρτάται από την πολυπλοκότητα των αρωματικών συστατικών.
- Ο κορεσμός αρωματικών δακτυλίων πραγματοποιείται κατά την υδρογονοκατεργασία και υδρογονοπυρόλυση gasoil.

Υπάρχει απώλεια υδρογόνου, που βρίσκεται σε ισορροπία με τα ελαφρά αέρια.

- Η ποσότητα αυτή είναι σημαντική και μπορεί να είναι διπλάσια της απαιτούμενης για την αποθείωση.

- Τα υγρά προϊόντα απορροφούν υδρογόνο, αλλά σε μικρή ποσότητα σε σχέση με αυτό που απαιτείται για την αποθείωση
- Το υδρογόνο απομακρύνεται με αέριο καθαρισμού (purge gas) χρησιμοποιείται για να διατηρήσει την απαιτούμενη ποσότητα υδρογόνου, καθώς οι ελαφροί υδρογονάνθρακες που παράγονται μειώνουν τη μερική πίεση του υδρογόνου.

*Κατανάλωση Υδρογόνου*



*Τάσεις Υδρογονοκατεργασίας*

Σε ένα τυπικό διυλιστήριο, υπάρχει έλλειψη υδρογόνου για το σύνολο των διεργασιών υδρογονοκατεργασίας. Όσο πιο διαδεδομένη γίνεται η υδρογονοκατεργασία, τόσο αυξάνει αυτή η έλλειψη.

Καθώς αυξάνει η ένταση της υδρογονοπυρόλυσης, οι απαιτήσεις σε υδρογόνο αυξάνουν δραματικά.

Η τάση για περισσότερη και εντονότερη υδρογονοκατεργασία οφείλεται σε:

- Επεξεργασία βαρύτερου αργού πετρελαίου και υψηλότερης περιεκτικότητας σε θείο.
- Μείωση της ζήτησης μαζούτ.
- Αυξημένη χρήση υδρογονοαποθείωσης για την παραγωγή καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (περιβαλλοντικές απαιτήσεις)
- Μεγαλύτερη προστασία των καταλυτών καταλυτικής πυρόλυσης.
- Αυξημένη απαίτηση για μαζούτ χαμηλού θείου (ιδίως στην Ευρωπαϊκή Ένωση).

*Συνοπτικά Στοιχεία – Ανάπτυξη Υδρογονοκατεργασίας*

Είναι κατάλληλη για τροφοδοσίες χαμηλής περιεκτικότητας σε αρωματικά και ετεροάτομα. Κατά τη διεξαγωγή της συμβαίνει απομάκρυνση ετεροατόμων και διάσπαση αρωματικών δακτυλίων:

- Το θείο απομακρύνεται ως υδρόθειο.
- Τα μέταλλα αποτίθενται στον καταλύτη.

Συγκεκριμένα, κατά τη διάσπαση αρωματικών δακτυλίων έχουμε:

- Μείωση του μέσου μοριακού βάρους.
- Παραγωγή ελαφρών καυσίμων σε υψηλότερες αποδόσεις.

Επίσης, συμβαίνει ελάχιστη πυρόλυση και έχουμε και την παραγωγή προϊόντων κατάλληλων για περαιτέρω επεξεργασία:

- Αναμόρφωση
- Καταλυτική πυρόλυση
- Υδρογονοπυρόλυση

Στη δεκαετία του 1940, υπήρχε πλεόνασμα υδρογόνου από την καταλυτική αναμόρφωση. Το υδρογόνο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την υδρογονοκατεργασία των μέσων κλασμάτων.

- Βασικός στόχος: αποθείωση.
- Ο κορεσμός αρωματικών δακτυλίων βελτίωσε το σημείο καπνού της κηροζίνης και τον αριθμό κετανίου του ντήζελ.

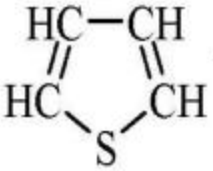
Υπάρχουν διαθέσιμες πάνω από 20 εμπορικά αξιοποιήσιμες τεχνολογίες.

*Καταλύτες Υδρογονοκατεργασίας*

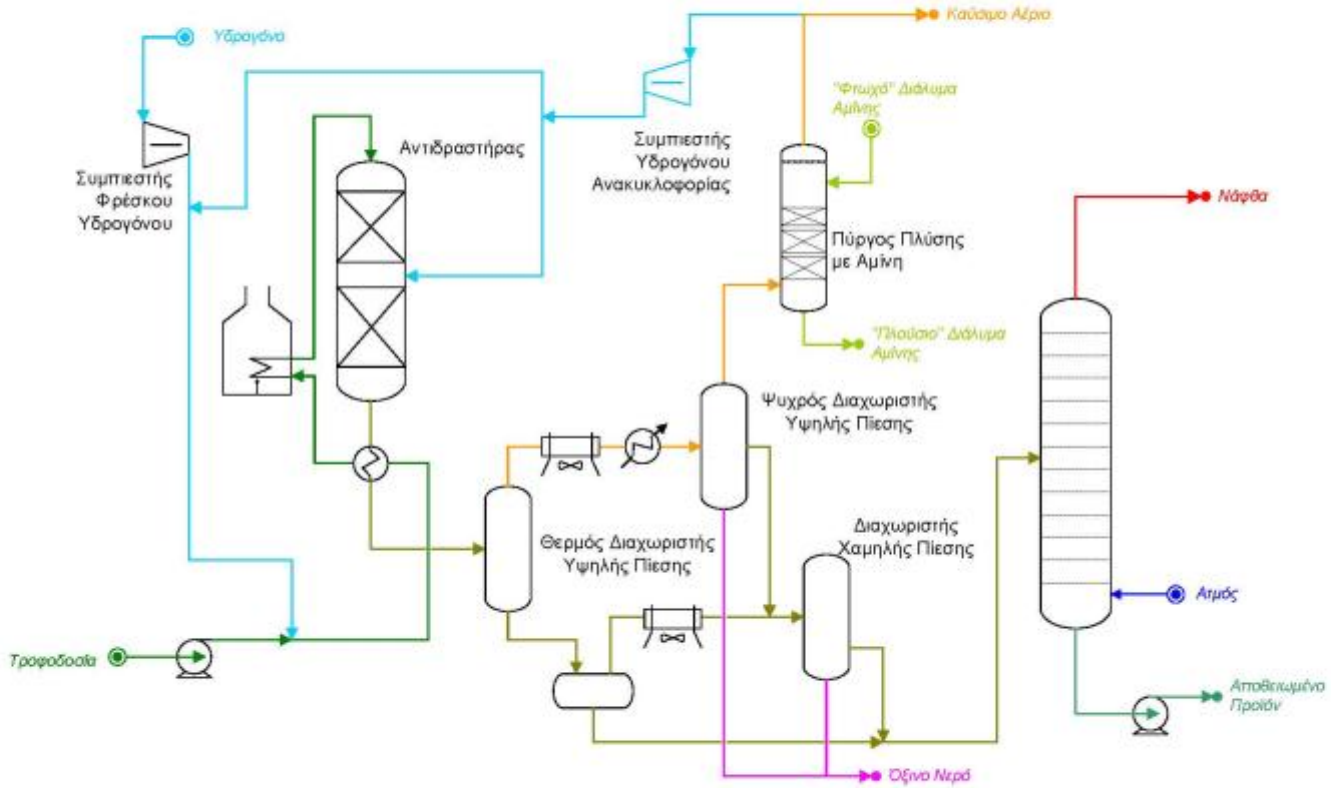
Υπάρχουν δύο τύποι καταλυτών οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά την διεργασία της υδρογονοκατεργασίας:

- Οι καταλύτες κοβαλτίου μολυβδενίου προτιμούνται για αποθείωση και κορεσμό ολεφινών. Αυτό συμβαίνει διότι απαιτούν λιγότερο υδρογόνο για ήπια λειτουργία.
- Οι καταλύτες νικελίου μολυβδενίου χρησιμοποιούνται για απαζώτωση και κορεσμό αρωματικών.

| Διεργασία | Τύπος Καταλύτη | Μερική Πίεση $H_2$, MPa | LHSV, vol/vol |
|---|---|---|---|
| Υδρογονοκατεργασία νάφθας | Co – Mo | 0.5 – 0.8 | 5 – 8 |
| Υδρογονοκατεργασία κηροζίνης | Co – Mo | 0.8 – 1.2 | 4 – 6 |
| Υδρογονοαποθείωση gasoil | Co – Mo | 1.0 – 2.0 | 4 – 6 |
| Υδρογονοαποθείωση VGO | Co – Mo | 2.5 – 4.0 | 1 – 3 |
| Υδρογονοαποθείωση – Υδρογονοαπαζώτωση νάφθας | Ni – Mo | 2.0 – 3.0 | 2 – 3 |
| Υδρογονοαποθείωση – Υδρογονοαπαζώτωση gasoil | Ni – Mo | 2.0 – 3.0 | 1.5 – 2.5 |
| Βελτίωση σημείου καπνού κηροζίνης | | | |
| Μέση | Ni – W | 2.0 – 3.0 | 1 – 3 |
| Υψηλή | Ni – W | 3.0 – 4.0 | 1 – 1.5 |
| Υδρογονοαποθείωση Πυρολυμένων | | | |
| Νάφθας | Ni – Mo | 2.0 – 3.0 | 1.5 – 3 |
| Gasoil | Ni – W | | |

1. Αποθείωση
   a. Μερκαπτάνες: $RSH + H_2 \longrightarrow RH + H_2S$
   b. Σουλφίδια: $R_1SR_2 + H_2 \longrightarrow R_1H + R_2H + H_2S$
   c. Δισουλφίδια: $R_1SSR_2 + 3H_2 \longrightarrow R_1H + R_2H + 2H_2S$
   d. Θειοφαίνια:  $+ 4H_2 \longrightarrow C_4H_{10} + H_2S$
2. Απαζώτωση
   a. Πυρόλη: $C_4H_4NH + 4H_2 \longrightarrow C_4H_{10} + NH_3$
   b. Πυριδίνη: $C_5H_5N + 5H_2 \longrightarrow C_5H_{12} + NH_3$
3. Αφαίρεση Οξυγόνου
   a. Φαινόλη: $C_6H_5OH + H_2 \longrightarrow C_6H_6 + H_2O$
   b. Υπεροξείδια: $C_7H_{13}OOH + 3H_2 \longrightarrow C_7H_{16} + 2H_2O$
4. Αφαίρεση Αλογόνων
   Χλωρίδια: $RCl + H_2 \longrightarrow RH + HCl$
5. Υδρογόνωση:
   Πεντένιο: $C_5H_{10} + H_2 \longrightarrow C_5H_{12}$
6. Υδρογονοπυρόλυση:
   $C_{10}H_{22} + H_2 \longrightarrow C_4H_{10} + C_6H_{14}$

# Διάγραμμα Ροής Υδρογονοκατεργασίας Αποστάγματος



*Παράμετροι Λειτουργίας Υδρογονοκατεργασίας*

- Θερμοκρασία και πίεση εισόδου στον αντιδραστήρα:

  - Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την υδρογόνωση αλλά μειώνει τον αριθμό ενεργών κέντρων του καταλύτη.
  - Ο έλεγχος της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τη σταδιακή μείωση της ενεργότητας του καταλύτη.
  - Αύξηση της πίεσης αυξάνει τη μερική πίεση του υδρογόνου και αυξάνει την ένταση της υδρογόνωσης.
  - Ανακυκλοφορία υδρογόνου.

- Απαιτεί υψηλή συγκέντρωση υδρογόνου στην έξοδο του αντιδραστήρα.

  - Η διαθέσιμη ποσότητα υδρογόνου είναι πολύ πάνω από τη στοιχειομετρική.
  - Απαιτείται υψηλή συγκέντρωση υδρογόνου για να αποφευχθεί η εναπόθεση κοκ και η δηλητηρίαση του καταλύτη.
  - Το πρόβλημα είναι σοβαρότερο στην περίπτωση βαρύτερης τροφοδοσίας που περιέχει ρητίνες και ασφαλτένια.

- Υδρογόνο καθαρισμού (purge hydrogen).

  - Απομακρύνει τα ελαφρά κλάσματα και βοηθά στη διατήρηση υψηλής συγκέντρωσης υδρογόνου.

## 6. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΚΑΥΣΙΜΑ ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΘΕΙΟΥ (0,1%)

### *A. Κόλλημα των αντλιών πετρελαίου*

Είναι γνωστό ότι το θείο που υπάρχει στο πετρέλαιο καύσεως έχει και ευεργετικές ιδιότητες για την μηχανή και ειδικά για τις αντλίες πετρελαίου γιατί βοηθάει στη λίπανση των κινούμενων μερών και αποφεύγονται τα κολλήματα. Ήδη κυκλοφορούν αρκετά πρόσθετα στην αγορά που βελτιώνουν την λιπαντική ικανότητα των καυσίμων, ειδικά όταν το καύσιμο είναι πολύ χαμηλού θείου.

### *B. Χαμηλό ιξώδες και επακόλουθες δυσκολίες καύσης*

Το καύσιμο περιεκτικότητας σε θείο 0,1% που προβλέπεται να χρησιμοποιείται στα λιμάνια, χαρακτηρίζεται συνήθως από ένα ιξώδες της τάξεως του 1 – 3 $mm^2/s$. Οι μηχανές όμως μέχρι σήμερα έχουν σχεδιασθεί να χρησιμοποιούν κατά την καύση ιξώδες από 10 – 20 $mm^2/s$. Η περίπτωση της αντικατάστασης του συνηθισμένου καυσίμου (HFO) από το ελαφρύ MGO στα λιμάνια θα είναι μια συχνή πραγματικότητα. Ήδη καύσιμο πολύ χαμηλού θείου και χαμηλού ιξώδους χρησιμοποιείται και σε εγκαταστάσεις ξηράς αλλά εκεί έχουν τοποθετηθεί ψύκτες για τον σκοπό της διόρθωσης του ιξώδους του καυσίμου.

### *C. Θερμοκρασία και εξαέρωση των καυσίμων*

Όταν κανείς γυρίζει μια μηχανή από χρήση καυσίμου HFO σε MGO ή MDO όπου δεν απαιτείται προθέρμανση, λόγω της υπολειμματικής θερμότητας στο κύκλωμα καυσίμου, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν προβλήματα στις αντλίες από εξαέρωση του ελαφρού καυσίμου εξαιτίας της αυξημένης θερμοκρασίας. Πρέπει λοιπόν να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή κατά το γύρισμα από HFO σε MGO ή MDO.

### *D. Διαρροές από τις αντλίες και είσοδος καυσίμου στο λιπαντέλαιο*

Οι κανονισμοί πλέον απαιτούν κατά τον ελλιμενισμό την χρήση καυσίμου με την περιεκτικότητα σε θείο 0,1%. Είναι προφανές ότι το μόνο καύσιμο που πληροί αυτούς τους όρους είναι το MGO. Είναι όμως πιθανό ότι θα υπάρχουν διαρροές καυσίμου από τις αντλίες εφ' όσον οι αντλίες είναι σχεδιασμένες για ιξώδη 10 – 20 $mm^2/s$ ενώ τα χαμηλού θείου καύσιμα έχουν ιξώδη από 1 – 3 $mm^2/s$. Τα κάτωθι μπορούν να συμβούν ως επακόλουθο των διαρροών :

1. Πτώση της πιέσεως στις αντλίες
2. Περιορισμός στην ποσότητα εκχύσεως καυσίμου
3. Φαινόμενα Εξαερώσεως
4. Διαρροές καυσίμου
5. Βραδυπορία στην ανάφλεξη για μηχανές που έχουν σχεδιασθεί σύμφωνα με τους κανονισμούς $NO_X$.

Η ανάμειξη του καυσίμου με το λιπαντικό της μηχανής θα επιφέρει και τα κάτωθι προβλήματα:

1. Πτώση του ιξώδους του λιπαντελαίου
2. Πτώση του Σημείου Αναφλέξεως. Αυτό μπορεί να γίνει και αιτία ανάφλεξης
3. Επειδή το καύσιμο αυτό έχει χαμηλά αρωματικά δεν είναι φιλικό σε πολλά λάστιχα στεγανοποίησης και αυτό μπορεί να δημιουργεί προβλήματα στεγανοποίησης στο κύκλωμα καυσίμου

*Αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζονται κατά την λειτουργία των ναυτιλιακών μηχανών σύμφωνα με τις προτάσεις από μέρους των κατασκευαστών*

Ενώ οι κατασκευαστές αντλιών και μηχανών συνεχίζουν να αξιολογούν τα προβλήματα που προκύπτουν από την ανεπάρκεια ικανοποιητικών τιμών του ιξώδους και από την μειωμένη λιπαντική ικανότητα, οι περισσότεροι τώρα πλέον έχουν ορίσει τις ελάχιστες προδιαγραφές για το ιξώδες του καυσίμου και συγκεκριμένες προτάσεις για την αλλαγή από βαρέα καύσιμα σε MGO κατά τη λειτουργία των σκαφών.

Γενικώς προτείνεται η χρήση πρόσθετων βελτίωσης της λιπαντικής ικανότητας και/ή χρήση κυλινδρέλαιων με BN 70.

Το 2001, η Exxon Chemical Ltd διεξήγαγε μία εκτεταμένη μελέτη διαφόρων τεχνολογιών που αφορούν σε πρόσθετα λιπαντικής ικανότητας. Τα αποτελέσματα αυτά είναι διαθέσιμα σε ένα έγγραφο του Rinaldo Carpotti από την SAE – Society of Automotive Engineers. Ο Capotti βρήκε ότι ενώ τα πρόσθετα αυτά μπορούν να προσφέρουν οφέλη στον τομέα της λίπανσης, πολλές από της χημικές διεργασίες ορισμένων καρβοξυλικών οξέων μπορούν να προκαλέσουν δυσμενή μακροχρόνια προβλήματα, συμπεριλαμβανομένων των: έμφραξη φίλτρων καυσίμου, αυξημένα επίπεδα λείανσης της μηχανής και «απενεργοποίηση» άλλων προσθέτων που σκοπό έχουν την βελτίωση της επίδοσης του καυσίμου.

Η Wärtsilä προειδοποιεί για μειωμένη θερμική σταθερότητα κατά τη λειτουργία με MGO χαμηλού θείου. Χαμηλή θερμική σταθερότητα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένα ποσά εκπομπών αερίων, ιδιαίτερα σε χαμηλές διακυμάνσεις του φορτίου της μηχανής.

Ο Det Norske Veritas Petroleum Services (DNVPS) έχει επίσης εκδώσει ανακοινώσεις προειδοποιώντας τους πλοιοκτήτες ότι αυτού του είδους τα καύσιμα μπορεί να προκαλέσουν αυξημένα προβλήματα με αστάθεια, ασυμβατότητα και μειωμένη ποιότητα ανάφλεξης.

Η MAN DIESEL προτείνει ότι οι χειριστές των σκαφών θα πρέπει να διεξάγουν ένα πείραμα συμβατότητας στα βαρέα καύσιμα και το MGO που θα αναμειχθούν πριν αλλάξουν το καύσιμο στο MGO την ώρα που το σκάφος βρίσκεται στη θάλασσα, προειδοποιώντας ότι κατά την αλλαγή από ένα HFO σε ένα απόσταγμα καυσίμου με χαμηλό αρωματικό υδρογονοανθρακικό περιεχόμενο, διατρέχεται ο κίνδυνος ασυμβατότητας μεταξύ των δύο προϊόντων.

Όσον αφορά στη χρήση κυλινδρελαίων οι κατασκευαστές ναυτιλιακών μηχανών έχουν εκδώσει τις εξής προτάσεις όσον αφορά στο Total Base Number που είναι αποδεκτό για τη χρήση τους καθώς επίσης και την ανεκτή παροχή του κυλινδρελαίου σε σχέση με την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο[7]:

*I.* *<u>Για καύσιμα με περιεκτικότητες θείου από 1,0 – 1,5%</u>*

- Wartsila (Sulzer): Προτείνει να ελαττώσουμε την παροχή του κυλινδρελαίου στα 0,7 g/bhph (Wartsila, αναφορά RTA – 3).

- MAN: προτείνει να μην αυξάνεται η παροχή σε κυλινδρέλαια όταν η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο ελαττώνεται.

- Mitsubishi: Προτείνει να παρακολουθείται στενά η κατάσταση της μηχανής και εφόσον παρατηρηθεί ότι υπάρχει αυξημένη περιεκτικότητα του καυσίμου σε Al + Si να αυξάνεται η παροχή του κυλινδρελαίου.

- Προμηθευτές κυλινδρελαίων: Συνιστούν η παροχή του κυλινδρελαίου να μην ξεπερνά το 1,0 έως 1,2 g/bhph. Προτρέπουν όμως να μην αυξάνεται η παροχή των κυλινδρελαίων όταν χρησιμοποιούνται καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

*II.* *<u>Για καύσιμα με περιεκτικότητες θείου από 0,5 – 1,0%</u>*

Από όλους σχεδόν τους κατασκευαστές μηχανών είναι αποδεκτή η χρήση κυλινδρελαίου BN 40 έως 50. Όλοι όμως συμφωνούν ότι θα πρέπει να παρακολουθείται η λειτουργία της μηχανής πολύ στενά. Ειδικότερα:

- Wartsila: Προτείνει την χρήση κυλινδρελαίου BN 40 – 50.

- MAN: Σχετίζει την χρήση του κυλινδρελαίου BN 40 – 50 βασισμένο σε δύο παραμέτρους:

  - Πόσο σκληρά χρησιμοποιείται η μηχανή.

  - Εάν η λειτουργία της με καύσιμο χαμηλού θείου ξεπερνά τις 48 ώρες.

  - Για πετρέλαια περιεκτικότητας σε θείο 1% η χρήση BN 70 δεν παρουσιάζει κανένα πρόβλημα εφ’ όσον η παροχή έχει ρυθμιστεί στο κατώτερο όριο. Υπό την προϋπόθεση ότι η λειτουργία της μηχανής δεν θα ξεπεράσει τις 1 – 2 εβδομάδες σε λειτουργία με το καύσιμο χαμηλού θείου.

- Mitsubishi: Δεν συνιστούν την χρησιμοποίηση κυλινδρελαίου με BN 40 – 50. Ο επιλεγόμενος τύπος κυλινδρελαίου θεωρείται ότι είναι ευθύνη των ιδιοκτητών.

Από όλα τα παραπάνω διακρίνουμε μια ασάφεια όσον αφορά τις οδηγίες από τους κατασκευαστές των μηχανών. Όλοι όμως συμφωνούν ότι θα πρέπει να γίνεται μια στενή παρακολούθηση της λειτουργίας των μηχανών. Στον τομέα αυτό το τμήμα μελετών της ΝΑΪΑΣ πριν από αρκετά χρόνια προχώρησε στην δημιουργία του προγράμματος Cylinder Oil Drain Analysis (CODA) που δίνει στους Τεχνικούς Υπεύθυνους όλα τα στοιχεία που χρειάζονται σχετικά με την λειτουργία των μηχανών και την ορθότητα της παροχής κυλινδρελαίου και του BN σε αυτές, σε συνδυασμό με την ποιότητα των χρησιμοποιούμενων καυσίμων.

*Συμπεράσματα*

Από όσα αναφέραμε παραπάνω το θέμα της ποιότητας και των χαρακτηριστικών των καυσίμων ναυτιλίας μέρα με την ημέρα γίνεται περισσότερο πολύπλοκο για την ομαλή λειτουργία των μηχανών. Είναι ανάγκη, περισσότερο από κάθε άλλη φορά, να είναι λεπτομερώς γνωστή η ποιότητα των καυσίμων του πλοίου, να τηρούνται όλοι οι κανονισμοί και να παρακολουθείται η λειτουργία των μηχανών, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των ναυτιλιακών καυσίμων ανελλιπώς και να ελέγχεται προσεκτικά η παροχή BN στις μηχανές μέσω της ρύθμισης της ροής και του BN των χρησιμοποιούμενων κυλινδρελαίων.

## 7. ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΙ ΜΕΙΓΜΑΤΑ

*Εισαγωγή*

Τα βιοπαραγώμενα καύσιμα και τα μείγματα βιοπαραγόμενων καυσίμων περιλαμβάνονται στο εύρος εναλλακτικών πηγών ενέργειας που εξετάζονται από ορισμένους τομείς της ναυτιλιακής βιομηχανίας αφού πρόκειται για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μπορούν να οδηγήσουν σε μειώσει των αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gases – GHG) και εκπομπές $SO_X$.

Το κύριο μέρος των βιοπαραγόμενων καυσίμων είναι προς το παρόν διαθέσιμα σαν προϊόντα της διαδικασίας της μετεστεροποίησης η οποία αφαιρεί το κλάσμα της γλυκερίνης για να παραχθούν τα Fatty Acid Methyl Esters (FAME) ή αλλιώς τα βιοντήζελ όπως είναι γνωστά με την κοινή τους ονομασία. Τα βιοντήζελ μπορούν να περιέχουν και Fatty Acid Ethyl Esters (FAEE), για τους οποίους αναπτύσσονται μέθοδοι ελέγχου και προδιαγραφές προτυποποίησης.

Τα βιοπαραγώμενα καύσιμα μπορούν να παραχθούν και με άλλες μεθόδους. Όμως, δεν υπάρχει γενικά εκτεταμένη εμπειρία με την εφαρμογή βιοπαραγώμενων καυσίμων σε ναυτιλιακά συστήματα και μηχανήματα. Κατά συνέπεια, στο ISO 8217 δεν εξετάζεται το θέμα αυτό, αλλά αναφέρονται ορισμένα από τα θέματα που έχουν ανακύψει σε άλλες αγορές όπου τα βιοπαραγώμενα καύσιμα έχουν υπαγορευθεί.

Μολονότι τα FAME έχουν καλή ποιότητα ανάφλεξης, λιπαντική ικανότητα και αποδεκτά περιβαλλοντικά οφέλη, υπάρχουν πιθανώς ειδικές περιπλοκές που αφορούν στην αποθήκευσή τους και το χειρισμό τους σε ένα θαλάσσιο περιβάλλον όπως:

- Η τάση οξείδωσης και τα προβλήματα μακροχρόνιας αποθήκευσης
- Η συγγενή «έλξη» προς το νερό και ο κίνδυνος μικροβιακής μόλυνσης
- Οι υποβαθμισμένες ιδιότητες ροής σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Η εναπόθεση υλικού του FAME σε εκτεθειμένες επιφάνειες, συμπεριλαμβανομένων και στοιχείων φιλτραρισμού

Επιπροσθέτως, υπάρχει μία ποικιλία διαφόρων πηγών παραγωγής FAME το καθένα με τα δικά του ειδικά χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν την αποθήκευση, χειρισμό, τη συμπεριφορά τους, την μηχανική τους λειτουργία και τις εκπομπές τους.

Στις περιπτώσεις που η χρήση καυσίμων τα οποία περιέχουν FAME εξετάζεται, θα πρέπει να βεβαιωθεί ότι τα συστήματα αποθήκευσης, χειρισμού, κατεργασίας και μηχανισμού του πλοίου σε συνδυασμό με οποιαδήποτε άλλα μηχανικά στοιχεία είναι συμβατά με ένα τέτοιο προϊόν.

Το ISO 8217 αφορά μόνο σε παράγωγα του πετρελαίου αποκλειστικά και μόνο, με άμεση συνέπεια τον αποκλεισμό οποιουδήποτε βιοπαραγώμενου υλικού. Η πρακτική ανάμειξης FAME σε Diesel κίνησης και θέρμανσης καθιστά σχεδόν αναπόφευκτο, κάτω από τις παρούσες συνθήκες της λογιστικής, το γεγονός ότι ορισμένα αποστάγματα τα οποία προωθούνται στην αγορά ναυτιλιακών καυσίμων θα περιέχουν FAME. Ακόμα και ορισμένα

υπολειμματικά καύσιμα μπορεί να περιέχουν FAME ως αποτέλεσμα των διαδικασιών διύλισης ή ανάμειξης με απόσταγμα το οποίο θα περιέχει FAME.

Καθώς δεν υπάρχει γενικευμένη εμπειρία όσον αφορά στη συμπεριφορά κατά την αποθήκευση, το χειρισμό, την κατεργασία και τη χρήση στο ευρύ φάσμα του θαλασσίου περιβάλλοντος, θεωρείται αναγκαία η υιοθέτηση της αρχής της πρόληψης για οποιουσδήποτε λόγους ασφαλείας κατά τη χρήση είτε μειγμάτων καυσίμων/FAME είτε 100% FAME. Επιπλέον, τίθενται και θέματα που αφορούν τις πιθανές επιδράσεις προϊόντων FAME σε ένα εύρος ναυτιλιακού μηχανικού και άλλων ειδών εξοπλισμού οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στα πλοία. Συνεπώς, το ISO 8217 περιορίζει το περιεχόμενο FAME στο επίπεδο «de minimis».

Το επίπεδο «de minimis»[3] ορίζεται σαν αυτό το οποίο δε θα καθιστά το καύσιμο μη αποδεκτό για χρήση σε θαλάσσιες εφαρμογές. Το FAME θα πρέπει να υπάγεται στις απαιτήσεις που ορίζονται από το EN 14214.

- Στην περίπτωση αποσταγμάτων (DMX, DMA, DMZ, και DMB όταν είναι καθαρό) συνιστάται το επίπεδο αυτό να μην ξεπερνά το ποσοστό 1% κ.ό. όταν ορίζεται σύμφωνα με το EN 14708
- Στην περίπτωση που το DMB δεν είναι καθαρό, το επίπεδο δεν μπορεί να εκφραστεί με αριθμητικούς όρους αφού δεν υπάρχει διαθέσιμη πειραματική μέθοδος με επίσημα δηλωμένη ακρίβεια.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι ιδιότητες των βιοκαυσίμων όπως αυτές αναγράφονται σε βιβλιογραφικές μελέτες [8].

*Ιδιότητες Βιοκαυσίμων*

Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των βιοκαυσίμων μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από την μία πρώτη ύλη στην άλλη. Λόγω της σημαντικής περιεκτικότητάς του σε οξυγόνο (τυπικά στο 11%) τα βιοκαύσιμα έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα και υδρογόνο σε σχέση με το Diesel, με αποτέλεσμα να έχει 10% χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ενέργεια μάζας. Όμως, λόγω της υψηλότερης πυκνότητας καυσίμου στα βιοντήζελ, η ογκομετρική περιεκτικότητα ενέργειας είναι μόνο 5-6% χαμηλότερη από αυτή του Diesel πετρελαίου. Τυπικά, το βιοντήζελ έχει υψηλότερο μοριακό βάρος από το Diesel πετρελαίου, το οποίο αντικατοπτρίζεται σε ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες απόσταξης. Περιέχοντας κυρίως εστέρες ευθέων αλυσίδων, τα περισσότερα βιοντήζελ έχουν πολύ καλούς αριθμούς κετανίου – συνήθως μεγαλύτερους από καύσιμα Diesel No 2. Το ιξώδες των περισσότερων βιοκαυσίμων είναι επίσης σημαντικά υψηλότερο από των καυσίμων Diesel, συχνά κατά ένα παράγονται της τάξης του 2.

Το ανανεώσιμο Diesel περιέχει κυρίως παραφινικούς υδρογονάνθρακες, συνήθως κυριαρχούμενους από περιττούς αριθμούς άνθρακα. (Ανάλογα με τις συνθήκες παρασκευής, μπορούν να παραχθούν υδρογονάνθρακες και ζυγού αριθμού). Ενώ μερικά ανανεώσιμα Diesel περιέχουν κυρίως συνήθεις παραφίνες ευθείας αλυσίδας, άλλα περιέχουν αξιόλογες ποσότητες διακλαδισμένων αλυσίδων. Σαν συνέπεια του υψηλού παραφινικού περιεχομένου τους, τα ανανεώσιμα Diesel έχουν συνήθως αριθμούς κετανίου πολύ υψηλότερους από αυτούς των βιοκαυσίμων. Με βάση τη μάζα τους, το ενεργειακό περιεχόμενο των ανανεώσιμων Diesel είναι υψηλότερο των βιοκαυσίμων (όπως και με το Diesel πετρελαίου). Σε ογκομετρική βάση, το ενεργειακό περιεχόμενο του βιοκαυσίμου και του ανανεώσιμου Diesel είναι παρόμοια.

Όταν ελέγχονται οι ιδιότητες του βιοκαυσίμου το οποίο έχει παραχθεί από διαφορετικές πρώτες ύλες, είναι σημαντικό να έχουμε υπόψιν μας τις βασικές προδιαγραφές που έχουν οριστεί από διάφορους οργανισμούς, συγκεκριμένα ο ASTM (στις Ηνωμένες Πολιτείες) και η CEN (στην Ευρωπαϊκή Ένωση). Ο ASTM έχει καθορίσει προδιαγραφές χαρακτηριστικών για τα μείγματα βιοκαυσίμων (B100) για μέσα αποστάγματα καυσίμων, όπως και για μείγματα βιοκαυσίμων από B6 μέχρι B20 σε Diesel πετρελαίου, ονομαζόμενο ASTM D7467. Μείγματα από B5 και κάτω, επιτρέπονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές για καύσιμα Diesel No.2 ASTM D975. Μέχρι σήμερα, η CEN έχει καθορίσει προδιαγραφές μόνο για τα μείγματα B100, που ονομάζεται EN 14214, αλλά όχι για μείγματα μέσου επιπέδου όπως το B20. Οι Ευρωπαϊκές προδιαγραφές για συμβατικά καύσιμα Diesel No. 2 (EN 590) επιτρέπει μείγματα από B7 και κάτω. Συζητήσεις βρίσκονται σε εξέλιξη για να αυξηθεί το όριο σε B10.

*Ιξώδες*

Το ιξώδες είναι ένας τρόπος μέτρηση της αντίστασης ροής ενός υγρού λόγω της εσωτερικής τριβής ενός μέρους του υγρού καθώς κινείται πάνω από ένα άλλο. Αυτό είναι μια σημαντική ιδιότητα διότι επηρεάζει την συμπεριφορά της έγχυσης καυσίμου. Γενικά, υψηλότερο ιξώδες οδηγεί σε χαμηλότερη ικανότητα ψεκασμού του καυσίμου. Υψηλό ιξώδες μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερα μεγέθη σταγονιδίου, χαμηλότερη εξάτμιση, στενότερη γωνία ψεκασμού έγχυσης, και μεγαλύτερη διείσδυση του ψεκασμού καυσίμου στον κύλινδρο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε γενικά χαμηλότερη ικανότητα ανάφλεξης, υψηλότερες εκπομπές, και αυξημένη αραίωση καυσίμου. Το ιξώδες των βιοκαυσίμων είναι τυπικά υψηλότερο από αυτό του Diesel πετρελαίου – συχνά κατά μία τάξη του 2. Το ιξώδες των μειγμάτων βιοντήζελ αυξάνεται καθώς το επίπεδο του μείγματος (επίπεδο-Β) αυξάνεται. (Το ιξώδες των άμεσων ελαίων από λαχανικά είναι ακόμα υψηλότερο, και είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο τέτοια έλαια δεν είναι αποδεκτά ως πρώτες ύλες βιοντήζελ.)

Έχει δειχθεί ότι σε ένα ελαφρών καθηκόντων, κοινό σύστημα έγχυσης, υψηλό ιξώδες στα FAME οδηγεί σε αυξημένη καθυστέρηση στην εκκίνηση της έγχυσης, μειωμένο όγκο έγχυσης, και αυξημένη μεταβλητότητα έγχυσης. Το ιξώδες επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία. Επομένως, πολλά από τα προβλήματα που προκαλούνται από υψηλό ιξώδες παρατηρούνται πολύ πιο εύκολα σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και κατά την ψυχρή εκκίνηση της μηχανής. Μια πρόσφατη μελέτη έδειξε ότι καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, η διανομή των καυσίμων Β100 μεταξύ ατομικών εγχυτών σε μία συνδεσμολογία εγχυτών γίνεται πολύ άνιση. Αυτό, με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα εκπομπών και επιδόσεων της μηχανής.

Το ιξώδες ατομικών μορίων FAME φαίνεται να αυξάνεται με τον αριθμό άνθρακα FA. Όμως, η μέση τιμή του αριθμού άνθρακα των πιο κοινών τύπων βιοντήζελ δεν μεταβάλλεται σε ευρεία ακτίνα. Οι επιδράσεις του αυξημένου αριθμού άνθρακα στην αλκοόλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή FAME είναι μικρότερες και λιγότερο ευδιάκριτες. Αρκετοί ερευνητές έχουν αναφέρει ελαφρές αυξήσεις στο ιξώδες καθώς αλλάζει η χρησιμοποιούμενη αλκοόλη από μεθανόλη, σε αιθανόλη, σε προπανόλη.

Ένας μεγάλος βαθμός συσχέτισης ανάμεσα στην πυκνότητα βιοντήζελ και το ιξώδες έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία, με την μεγαλύτερη πυκνότητα να οδηγεί σε χαμηλότερο ιξώδες. Όμως, η συσχέτιση ανάμεσα στη πυκνότητα και στη σχετική βαρύτητα δεν είναι πολύ υψηλή. Το ιξώδες συσχετίζεται πιο ισχυρά με το βαθμό ακορεστότητας, με την υψηλότερη ακορεστότητα να οδηγεί σε χαμηλότερη πυκνότητα (παρόλο που τα παραγόμενα από καρύδα FAME είναι εξαίρεση). Επιπλέον, η διαμόρφωση διπλού δεσμού επηρεάζει το ιξώδες, με τις trans configurations να δίνουν υψηλότερο ιξώδες από τις cis. Τα περισσότερα φυσικά έλαια κυριαρχούνται από διπλούς δεσμούς cis, αλλά μερικά κίτρινα λίπη (υπολείμματα μαγειρικών ελαίων) μπορούν να έχουν σημαντικά επίπεδα trans configuration. Η θέση του διπλού δεσμού μέσα στην αλυσίδα των FA έχει προφανώς λίγες επιρροές στο ιξώδες.

*Πυκνότητα*

Η πυκνότητα του καυσίμου είναι μια ιδιότητα κλειδί που επηρεάζει τις επιδόσεις των μηχανών. Επειδή οι αντλίες έγχυσης καυσίμου μετρούν τα καύσιμα με τον όγκο, όχι με την μάζα, μία μεγαλύτερη ή μικρότερη μάζα καυσίμου εγχέεται αναλόγως με την πυκνότητά του. Επομένως, η αναλογία αέρα-καυσίμου και το ενεργειακό περιεχόμενο μέσα στο θάλαμο ανάφλεξης επηρεάζονται από την πυκνότητα καυσίμου.

Γενικά, οι πυκνότητες των καυσίμων βιοντήζελ είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτές των καυσίμων πετρελαίου, και αυξάνοντας το επίπεδο-Β των δειγμάτων βιοντήζελ αυξάνεται η πυκνότητα του δείγματος. Φαίνεται, γενικώς, πως η πυκνότητα των FAME επηρεάζεται ισχυρά από το βαθμό ακορεστότητας, με μεγαλύτερη ακορεστότητα να οδηγεί σε αυξημένη πυκνότητα.

*Ιδιότητες ψυχρής ροής*

Οι επιδόσεις στις χαμηλές θερμοκρασίες είναι ένα από τα πιο σημαντικά πράγματα που λαμβάνονται υπόψιν από τους χρήστες των βιοντήζελ. Όπως και με τα συμβατικά καύσιμα Diesel, προφυλάξεις πρέπει να ληφθούν για να διαβεβαιωθεί η ικανοποιητική λειτουργικότητα του βιοντήζελ και των μειγμάτων του κατά τη λειτουργία του σε χαμηλές θερμοκρασίες. Φτωχές επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να παρουσιαστούν με διάφορους τρόπους, αλλά κυρίως με έμφραξη του φίλτρου λόγω σχηματισμού κεριού, και λιμός μηχανής λόγω μειωμένης ροής καυσίμου. Δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος και απόλυτα καλύτερος τρόπος για να εκτιμηθεί η επίδοση στις χαμηλές θερμοκρασίες, και οι υπάρχουσες τυποποιήσεις (σε Ηνωμένες Πολιτείες άλλα και σε Ευρώπη) δεν περιλαμβάνουν αυστηρές προδιαγραφές για τις ιδιότητες ψυχρής ροής – είτε για συμβατικά Diesel είτε για βιοντήζελ. Όμως, ο πάροχος του καυσίμου γενικά απαιτείται να δίνει μία ένδειξη για τις ιδιότητες κατά την ψυχρή ροή αναφέροντας το σημείο ροής του καυσίμου.

Πρώτες ύλες με δομές FA υψηλού κορεσμού (όπως το φοινικέλαιο και τα ζωικά λίπη) παράγουν καύσιμα βιοντήζελ με χαμηλές ιδιότητες ψυχρής ροής, ενώ οι πρώτες ύλες με υψηλά ακόρεστες δομές λιπαρών οξέων (όπως η ελαιοκράμβη και το έλαιο από κρημνό) παράγουν καύσιμα με καλύτερες επιδόσεις. Παρόλο που η σχέση ανάμεσα στο μήκος αλυσίδας άνθρακα και στις ιδιότητες χαμηλής θερμοκρασίας είναι αρκετά δυνατή για εξαγνισμένες ενώσεις FAME, τα αποτελέσματα γίνονται πιο ευδιάκριτα όταν λαμβάνουμε υπόψιν περίπλοκα μείγματα FAME σε πραγματικά δείγματα βιοντήζελ. Για παράδειγμα, αποτελέσματα ελέγχων του σημείου νέφωσης δεν αποκαλύπτουν κάποια σημαντική συσχέτιση με το μέσο μήκος αλυσίδας. Πολύ παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται όταν χρησιμοποιούνται το σημείο ροής και το σημείο έμφραξης ψυχρού φίλτρου ως δείκτες επιδόσεων σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στην πραγματικότητα, τα τρία μεγέθη αυτά έχουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ τους, υποδηλώνοντας ότι οποιοδήποτε εκ των τριών θα μπορούσε να χρησιμοποιείται σαν δείκτης των υπολοίπων.

Η ανάλυση περίπλοκων υλικών FAME δεν υποδεικνύει μία δυνατότερη σχέση ανάμεσα στο μήκος αλυσίδας και στις ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες διότι η μέτρηση του μέσου μήκους αλυσίδας δεν λαμβάνει υπόψιν τις διαφορές ανάμεσα στις αλυσίδες κορεσμένου και ακόρεστου FA. Επίσης ο βαθμός ακορεστότητας έχει μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες χαμηλής θερμοκρασίας, με την μεγαλύτερη ακορεστότητα να οδηγεί σε πολύ βελτιωμένες ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια, η επίδραση της ακορεστότητας επικαλύπτει την επίδραση του μήκους αλυσίδας στα υλικά FAME. Πιο εξελιγμένες τεχνικές ανάλυσης δεδομένων απαιτούνται για να διευκρινιστούν οι επιμέρους επιδράσεις πολλαπλών μεταβλητών στις σχέσεις ιδιοτήτων καυσίμων.

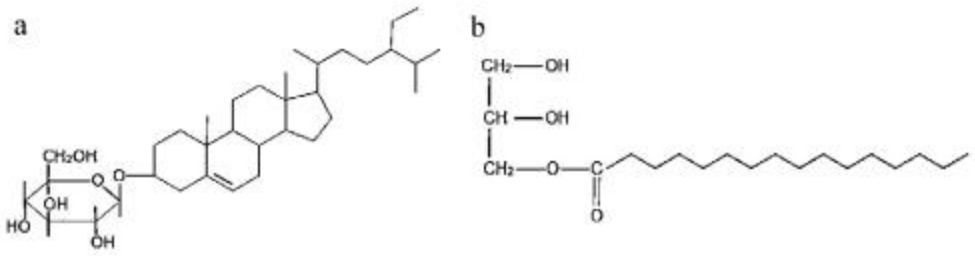
Υπάρχει σχέση μεταξύ του σημείου νέφωσης και ακορεστότητας, όπως επίσης και με το σημείο ροής και το σημείο έμφραξης ψυχρού φίλτρου. Από αυτές τις τρεις ιδιότητες χαμηλών θερμοκρασιών, μόνο το σημείο νέφωσης μπορεί να διευκρινιστεί θερμοδυναμικά, καθώς κυριαρχείται από ισοζύγιο στερεού-υγρού ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. (Συνθήκες πραγματικού ισοζυγίου μπορεί στην πραγματικότητα να μην επιτευχθούν κατά την διενέργεια των σχετικά γρήγορων εν-ψυχρώ πειραμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί το σημείο νέφωσης). Το σημείο νέφωσης είναι η θερμοκρασία στην οποία το λιγότερο διαλυτό συστατικό του βιοντήζελ κρυσταλλοποιείται από το δείγμα. Επομένως, στο αγνό βιοντήζελ, το σημείο νέφωσης ορίζεται από το είδος και το ποσό κορεσμένων εστέρων λιπαρών οξέων, με τα υπόλοιπα συστατικά του βιοντήζελ να έχουν μικρές επιδράσεις. Αρκετοί ερευνητές έχουν αναπτύξει προγνωστικά μοντέλα για το σημείο νέφωσης, βασισμένα σε αυτές τις θερμοδυναμικές σχέσεις.

Η κρυσταλλοποίηση σε κερί εκκινείται από το «στρίμωγμα» των μορίων. Επομένως, παράγοντες οι οποίοι διακόπτουν ή εμποδίζουν το στρίμωγμα των υψηλά διατεταγμένων μορίων θα μειώσουν το σημείο νέφωσης. Τέτοιες δομικές διαταραχές αυξάνονται με το διακλαδισμό είτε στην αλυσίδα του FA είτε στην αλκοόλη του FAME. Η αντικατάσταση της μεθανόλης από αιθανόλη για να παραχθούν FAME οδηγεί σε ελαφρώς βελτιωμένες επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες καθώς οι εθυλεστέρες έχουν σημεία τήξης $5^o$ – $10^o$ βαθμούς χαμηλότερα από τους αντίστοιχους μεθυλεστέρες. Η εισαγωγή διπλού δεσμού επίσης διακόπτει το «στρίμωγμα» των μορίων. Επιπλέον, διαφορές στον προσανατολισμό των διπλών δεσμών έχουν παρατηρηθεί με τη cis configuration να προσφέρει καλύτερες επιδόσεις στις δοκιμές σε χαμηλές θερμοκρασίες από τη trans configuration.

Αυξάνοντας το επίπεδο-Β του βιοντήζελ οδηγεί τυπικά σε μείωση των επιδόσεων σε χαμηλές θερμοκρασίες. Όμως, η ανάμειξη διαφορετικών συστατικών συχνά οδηγεί σε μη-γραμμικά αποτελέσματα όσον αφορά στις ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, έχει αναφερθεί ότι οι πολύ φτωχές επιδόσεις σε χαμηλή θερμοκρασία βιοντήζελ από φοίνικα μπορεί να βελτιωθεί αναμειγνύοντάς το με καύσιμα βασισμένα στο καθάρσιο καρυοκάρπων (jatropha).

Στα πρόσφατα χρόνια, έχει αναγνωριστεί άλλο ένα πρόβλημα κατά τη λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες, το οποίο προκύπτει από τη δημιουργία μη διαλυτών σωματιδίων κατά την αποθήκευση σε ψυχρές θερμοκρασίες – αν και γενικά υψηλότερα από το σημείο

νέφωσης. Αυτά τα αδιάλυτα στοιχεία δημιουργούνται από στοιχειώδεις προσμίξεις μη μεθυλεστερικών στοιχείων, όχι από τα μείζονα στοιχεία FAME αυτά καθαυτά. Λόγω αυτών των λειτουργικών προβλημάτων, η ASTM έχει υιοθετήσει μία καινούρια δοκιμή εμβάπτισης ψυχρού φίλτρου μέσα στις προδιαγραφές του βιοντήζελ, D6751. Οι δύο μεγάλες οικογένειες προσμίξεων που αναγνωρίζονται να προκαλούν τέτοια προβλήματα κατακρημνίσεων είναι τα κορεσμένα μονογλυκερίδια και οι στερόλες γλυκοσιδίων. Η ακόλουθη εικόνα είναι αντιπροσωπευτική αυτών των στοιχείων.




*(a) στερόλες γλυκοσιδίων, (b)κορεσμένα μονογλυκερίδια*

*Αριθμός κετανίου*

Ο αριθμός κετανίου είναι ένας τρόπος εκτίμησης των χαρακτηριστικών ποιότητας αυτανάφλεξης του καυσίμου. Αφού το βιοντήζελ αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από ομάδες υδρογονανθράκων μακριάς αλυσίδας (με πρακτικά καθόλου αρωματικές ή διακλαδισμένες δομές) έχει τυπικά μεγαλύτερο αριθμό κετανίου από το Diesel πετρελαίου, και αυξάνοντας το επίπεδο-Β των μειγμάτων του βιοντήζελ αυξάνει και τον αριθμό κετανίου του μείγματος.

Το βιοντήζελ που παράγεται από πρώτες ύλες πλούσιες σε κορεσμένα λιπαρά οξέα (όπως τα ζωικά λίπη και ο φοίνικας) έχουν υψηλότερο αριθμό κετανίου από τα καύσιμα που παράγονται από λιγότερο κορεσμένες πρώτες ύλες (όπως ο λιναρόσπορος και η σόγια). Το αποτέλεσμα στον αριθμό κετανίου του διακλαδισμού στην αλκοόλη που χρησιμοποιείται για να παραχθεί το βιοντήζελ είναι πολύ μικρό και δύσκολο να διακριθεί. Ο αριθμό κετανίου αγνών σωματιδίων FAME αυξάνεται με το μήκος αλυσίδας, αλλά αυτό το φαινόμενο καλύπτεται όταν λαμβάνονται υπόψιν περίπλοκα μείγματα καυσίμων FAME. Από την άλλη μεριά, ο αριθμός κετανίου των μεθυλεστερικών καυσίμων ποικίλει φανερά με το μέσο βαθμό ακορεστότητας.

*Τιμή ιωδίου*

Η τιμή ιωδίου διευκρινίζεται μετρώντας το ποσό $I_2$ που αντιδρά με την πρόσθεση διπλού δεσμού άνθρακα. Επομένως, η τιμή ιωδίου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ακορεστότητα του FAME. Η τιμή ιωδίου περιλαμβανόταν αρχικά σαν προδιαγραφή στα Ευρωπαϊκά πρότυπα βιοντήζελ, EN 14214, για να εξασφαλιστεί η ικανοποιητική οξειδωτική σταθερότητα του καυσίμου. Όμως, η τιμή ιωδίου είναι απλά ένας τρόπος μέτρησης της συνολικής ακορεστότητας, ενώ η οξειδωτική σταθερότητα επηρεάζεται πιο σημαντικά από το ποσό μορίων FAME που έχουν πολλαπλούς διπλούς δεσμούς. Γι' αυτό το λόγο, γίνονται συζητήσεις για το αν χρειάζεται να υπάρχει πρότυπο για την τιμή ιωδίου εξ' ολοκλήρου και σίγουρα για την αρκετά περιοριστική μέγιστη τιμή των $120gI_2$ / 100g βιοντήζελ καθώς καθαρίζεται από το EN 14214.

Το Worldwide Fuel Charter – το οποίο δημιουργήθηκε από μία συνεργασία Ευρωπαϊκών, Αμερικανικών και Ιαπωνικών οργανισμών κατασκευής αυτοκινήτων – επίσης προτείνει μια προδιαγραφή για την τιμή ιωδίου, αλλά με λιγότερο περιοριστική μέγιστη τιμή στα $130gI_2$ / 100g βιοντήζελ. Μερικά βιοκαύσιμα παραγόμενα από σόγια μπορεί να μην πληρούν την Ευρωπαϊκή προδιαγραφή, αλλά θα ικανοποιούσαν πολύ ευκολότερα τα υψηλότερα όρια που τίθενται από το Worldwide Fuel Charter. Το πρότυπο βιοκαυσίμου ASTM δεν περιλαμβάνει προδιαγραφές για την τιμή ιωδίου, πιστεύοντας ότι η οξειδωτική σταθερότητα του βιοκαυσίμου ελέγχεται σε καλύτερο βαθμό από το πείραμα οξειδωτικής σταθερότητας Rancimat (μέθοδος EN 14112). Άλλοι έχουν επιχειρηματολογήσει ότι δεν υπάρχει λόγος για προδιαγραφή τιμής ιωδίου διότι η προδιαγραφή στον αριθμό κετανίου έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό της ακορεστότητας.

*Σημείο ανάφλεξης*

Το σημείο ανάφλεξης είναι αντίστροφα ανάλογο με την μεταβλητότητα του καυσίμου. Η προδιαγραφή για το σημείο ανάφλεξης έχει σκοπό να προφυλάξει έναντι στην μόλυνση από υψηλά πτητικές προσμίξεις – ειδικά υπερβολική μεθανόλη που παραμένει μετά τις διαδικασίες εξαγνισμού του προϊόντος.

*Θερμογόνος Τιμή*

Λόγω του υψηλού περιεχομένου σε οξυγόνο, το βιοντήζελ έχει χαμηλότερες τιμές ενεργειακού περιεχομένου μάζας από το Diesel πετρελαίου. Κατά συνέπεια, αυξάνοντας το επίπεδο-Β των μειγμάτων βιοντήζελ οδηγεί σε μείωση του ενεργειακού περιεχομένου. (Οι ίδιες σχέσεις προκύπτουν είτε πρόκειται για υψηλές είτε για χαμηλές τιμές θέρμανσης.) Καθώς αυξάνεται η αλυσίδα άνθρακα του FA (για ένα σταθερό επίπεδο ακορεστότητας) το κλάσμα μάζας του οξυγόνου μειώνεται, ενώ η τιμή θερμότητας αυξάνεται.

Το επίπεδο ακορεστότητας έχει μια σχετικά υψηλότερη επίδραση στις τιμές θέρμανσης. Σε σύγκριση με τους κορεσμένους εστέρες, οι ακόρεστοι εστέρες έχουν χαμηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο μάζας (MJ/kg), αλλά υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο όγκου (MJ/gal). Αυτό μπορεί να προκαλέσει σύγχηση, αφού το ενεργειακό

περιεχόμενο μάζας μετριέται συνήθως στο εργαστήριο, ενώ τα καύσιμα μετριούνται και πωλούνται με ογκομετρική βάση.

*Λιπαντική Ικανότητα*

Η λιπαντική ικανότητα αναφέρεται στην μείωση της τριβής μεταξύ δύο στερεών επιφανειών σε σχετική κίνηση. Δύο γενικοί μηχανισμοί προσφέρουν στη λιπαντική ικανότητα: (1) η υδροδυναμική λίπανση και (2) η οριακή λίπανση. Στην υδροδυναμική λίπανση ένα στρώμα υγρού (όπως στα καύσιμα Diesel με εγχυτές καυσίμου) εμποδίζει την επαφή αντιτιθέμενων επιφανειών. Τα οριακά λιπαντικά είναι συστατικά που εφάπτονται των μεταλλικών επιφανειών, σχηματίζοντας ένα λεπτό, προστατευτικό στρώμα που προστατεύει από τη φθορά. Η οριακή λίπανση γίνεται σημαντική όταν η υδροδυναμική λίπανση έχει τελειώσει ή έχει με κάποιο τρόπο απενεργοποιηθεί από τις αντιτιθέμενες επιφάνειες.

Η καλή λιπαντική ικανότητα στα καύσιμα Diesel είναι πολύ σημαντική για να προστατευθεί το σύστημα έγχυσης καυσίμου. Σε πολλές περιπτώσεις, το μόνο λιπαντικό που υπάρχει στον εγχυτήρα είναι το καύσιμο αυτό καθαυτό. Με τις αυξανόμενες λειτουργικές απαιτήσεις των σύγχρονων συστημάτων έγχυσης – όπως οι υψηλότερες πιέσεις, η διαμόρφωση του ρυθμού έγχυσης καυσίμου, οι πολλαπλές εγχύσεις ανά κύκλο, και άλλα χαρακτηριστικά – η διατήρηση της ικανοποιητικής λιπαντικής ικανότητας είναι πιο σημαντική από ποτέ. Όμως, καθώς αυξάνεται η ανάγκη για βελτιωμένη λιπαντική ικανότητα, η φυσική λιπαντική ικανότητα των καυσίμων Diesel μειώνεται.

Ο υψηλός βαθμός υδρογονοκατεργασίας που χρειάζεται για την παραγωγή καυσίμων Diesel πολύ χαμηλού θείου αφαιρεί ουσιαστικά όλα τα μόρια ετεροατόμων (οξυγόνου, αζώτου και θείου) τα οποία έχουν βελτιώσει την λιπαντική ικανότητα σε σχέση με τους υδρογονάνθρακες. Γενικά, η αποτελεσματικότητα της λιπαντικής ικανότητας μειώνεται με την αφαίρεση των παραπάνω στοιχείων με την εξής σειρά:

***O > N >S>C***

***ή***

***οξυγόνο > άζωτο > θείο > άνθρακας***

Το βιοντήζελ που προέρχεται από όλες τις πρώτες ύλες θεωρείται γενικά να έχει πάρα πολύ καλή λιπαντική ικανότητα, και η λιπαντική ικανότητα των ULSD (Ultra Low Sulfur Diesel) μπορεί να βελτιωθεί με την ανάμειξη με βιοκαύσιμα. Λόγω της φυσικά υψηλής λιπαντικής ικανότητάς τους, δεν υπάρχει προδιαγραφή για τη λιπαντική ικανότητα για τα B-100 ούτε στα πρότυπα βικαυσίμων της Ευρώπης ούτε των Ηνωμένων Πολιτειών. Όμως, τα πρότυπα των Ηνωμένων Πολιτειών για τα μείγματα B6-B20 (ASTM D7467) περιλαμβάνουν προδιαγραφή για τη λιπαντική ικανότητα, όπως και το πρότυπο για τα συμβατικά καύσιμα Diesel, ASTM D975. Χαμηλά επίπεδα B (συχνά στο 1-2%) προσφέρουν μια τυπικά ικανοποιητική λιπαντική ικανότητα στα ULSD.

Εν μέρει, η καλή λιπαντική ικανότητα των βιοκαυσίμων μπορεί να αποδοθεί στην ομάδα εστέρων η οποία περιέχεται στα μόρια των FAME, αλλά ένας μεγαλύτερος βαθμός λιπαντικής ικανότητας αποδίδεται σε ίχνη ακαθαρσιών στα βιοκαύσιμα. Συγκεκριμένα, ελεύθερα λιπαρά οξέα και μονογλυκερίδια λειτουργούν ως υψηλά αποτελεσματικά λιπαντικά. Έχει σημειωθεί ότι ο εξαγνισμός βιοκαυσίμων μέσω της μεθόδου της απόσταξης μειώνει τη λιπαντική ικανότητα διότι αυτές οι ακαθαρσίες αφαιρούνται. Η επίδραση της ακορεστότητας στη λιπαντική ικανότητα δεν είναι ξεκάθαρη, με ορισμένους ερευνητές να αναφέρουν θετικές επιδράσεις διπλών δεσμών άνθρακα – άνθρακα ενώ άλλοι αναφέρουν ότι δεν υπάρχουν επιδράσεις.

Η θετική επίπτωση των ακαθαρσιών βιοκαυσίμου στη λιπαντική ικανότητα είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτη, καθώς ορισμένες από αυτές τις ακαθαρσίες (όπως τα μονογλυκερίδια) είναι υπεύθυνες για τα λειτουργικά προβλήματα που εμφανίζονται στις χαμηλές θερμοκρασίες. Προσπάθειες για να μειωθούν αυτές οι ακαθαρσίες (και να βελτιωθεί η λειτουργικότητα στις χαμηλές θερμοκρασίες) θα μπορούσαν να έχουν ανεπιθύμητες επιπτώσεις στις ιδιότητες της λιπαντικής ικανότητας, συγκεκριμένα την επιδείνωσή τους.

*Οξειδωτική Σταθερότητα*

Η οξειδωτική σταθερότητα είναι μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες του καυσίμου όσον αφορά στις επιδόσεις του βιοκαυσίμου κατά τη διάρκεια χρήσης του. Καύσιμο το οποίο διακρίνεται από αστάθεια μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο ιξώδες, όπως επίσης σχηματισμό κολλώδων ουσιών, ιζημάτων και άλλων εναποθέσεων. Παρά αυτή τη σημασία της, η οξειδωτική σταθερότητα δεν περιλαμβάνεται στους πίνακες ή στις γραφικές απεικονίσεις των ιδιοτήτων των FAME. Ο λόγος για αυτήν την παράλειψη είναι το γεγονός ότι η οξειδωτική σταθερότητα δεν οφείλεται μόνο στις συνθετικές ιδιότητες των FAME, αλλά επίσης στην ηλικία του βιοκαυσίμου και στις συνθήκες υπό τις οποίες έγινε η αποθήκευσή του. Επιπλέον, πολλά δείγματα βιοκαυσίμου περιέχουν πρόσθετα που βελτιώνουν την σταθερότητα χωρίς να επηρεάζουν την γενική σύνθεσή του.

Η οξειδωτική σταθερότητα επηρεάζεται από την ακορεστότητα. Γενικά υψηλότερη ακορεστότητα οδηγεί σε χαμηλότερη σταθερότητα, παρόλο που η αυτοοξείδωση ενώσεων ακόρεστων λιπαρών προχωρά σε διαφορετικούς ρυθμούς ανάλογα με τη θέση και των αριθμό των διπλών δεσμών. Οι διαδικασίες οξειδωτικής υποβάθμισης εκκινούνται από την εξαγωγή ενός ατόμου υδρογόνου από έναν γειτονικό σε διπλό δεσμό άνθρακα – η επονομαζόμενη αλλυλική θέση. Ακολουθώντας την αφαίρεση αυτού του υδρογόνου, ταχεία αντίδραση με μοριακό οξυγόνο οδηγεί σε σχηματισμό αλλυλικών υδροπεροξειδίων. Επακόλουθες αντιδράσεις οι οποίες περιέχουν ισομερισμό και ριζοσπαστικό πολλαπλασιασμό αλυσίδων παράγουν πολυπληθή δευτερογενή προϊόντα οξείδωσης όπως αλδεΰδες, αλκόολες και καρβοξυλικά οξέα.

## 8. ΈΛΕΓΧΟΣ ΛΙΠΑΝΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Στις εταιρίες παρασκευής μηχανών υπάρχει ανάγκη για την ύπαρξη μιας γρήγορης, αξιόπιστης και οικονομικής μεθόδου για να μπορέσουμε να προβλέψουμε την απόδοση και την αποτελεσματικότητα του καυσίμου υπό πραγματικές συνθήκες. Δύο είδη δοκιμών προέκυψαν: το High Frequency Reciprocating Rig (HFRR), το οποίο αναπτύχθηκε με την συνεργασία της εταιρίας PCS Instruments Ltd, London και του Imperial College of Science and Technology, και το Scuffling Load Ball On Cylinder Lubricity Evaluator (SL-BOCLE), το οποίο αναπτύχθηκε στο Southwest Research Institute.

Οι ευρωπαϊκές εταιρίες παραγωγής μηχανών ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων τα οποία παρείχαν αυτές οι δύο μέθοδοι ώστε να προσδιοριστεί ποια εκ των δύο ήταν η πιο ακριβής. Το συμπέρασμα ήταν ότι η HFRR παρείχε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά στην αντοχή των αντλιών έγχυσης καυσίμου. Η μέθοδος αυτή υιοθετήθηκε σαν το στάνταρ της CEC (Commission on European Communities) το 1996. Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα τροποποίησε το πρότυπο EN 590 ώστε να περιλαμβάνει και δοκιμές λιπαντικής ικανότητας. Το HFRR επιλέχθηκε με όριο μεγίστης διαμέτρου φθοράς 520μm στα ναυτιλιακά καύσιμα όπως αναγράφεται στο ISO:8217/2010.

Η χρήση της μεθόδου HFRR απαιτεί και μικρότερη επέμβαση του χειριστή κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε σχέση με την SL-BOCLE. Αφού οι περισσότερες διαφορές και διακυμάνσεις εμφανίζονται στην μέθοδο SL-BOCLE κατά την επέμβαση του χειριστή, η HFRR φαίνεται να είναι πιο αξιόπιστη σαν επιλογή για την εκτίμηση λιπαντικής ικανότητας. Η αποδοχή και χρήση της μεθόδου αυτής από το σύνολο των κατασκευαστών ναυτιλιακών μηχανών και συστημάτων αντλιών θα δώσει την δυνατότητα πιο άμεσης και εύκολης σύγκρισης αποτελεσμάτων.

*Χρήση της μεθόδου HFRR (High Frequency Reciprocating Rig)*

*ISO / CD 12156-1*
*ISO / TC 28 N 2215*

Ο ISO (International Organization of Standardization) είναι ένας διεθνής οργανισμός εθνικών πρότυπων μελών (ISO member bodies). Η διαδικασία προετοιμασίας διεθνών προτύπων συνήθως διεξάγεται από τις τεχνικές επιτροπές του ISO. Κάθε μέλος το οποίο ενδιαφέρεται για ένα αντικείμενο για το οποίο μια τεχνική επιτροπή έχει εδραιωθεί έχει το δικαίωμα να έχει έναν αντιπρόσωπο στην επιτροπή αυτή. Διεθνείς οργανισμοί, κυβερνητικοί και μη κυβερνητικοί, σε συνεργασία με τον ISO, επίσης παίρνουν μέρος στις διεργασίες. Ο ISO συνεργάζεται πολύ στενά με τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission – ICE) σε όλα τα θέματα ηλεκτροτεχνικής προτυποποίησης.

Τα προσχέδια Διεθνών Προτύπων τα οποία υιοθετούνται από τις τεχνικές επιτροπές κυκλοφορούν και διαμοιράζονται στα μέλη για να ψηφιστούν. Η αποδοχή και έκδοση ενός προσχεδίου ως αποδεκτό Διεθνές Πρότυπο απαιτεί την ψήφο τουλάχιστον του 75% των μελών.

Το Διεθνές Πρότυπο ISO / CD 12156-1 προετοιμάστηκε με την συνεργασία της τεχνικής επιτροπής ISO / TC 22, Οχήματα Δρόμου – Road Vehicles, Υποεπιτροπή SC 7, Εξοπλισμός έγχυσης και φίλτρα για χρήση σε οχήματα δρόμου – Injection equipment and filters for use on road vehicles και ISO / TC 28, Παράγωγα πετρελαίου και λιπαντικά – Petroleum products and lubricants.

Το ISO 12156 περιλαμβάνει τα επόμενα μέρη, κάτω από το γενικό τίτλο Diesel Fuel – Assessment of lubricity using the High Frequency Reciprocating Rig (HFRR).

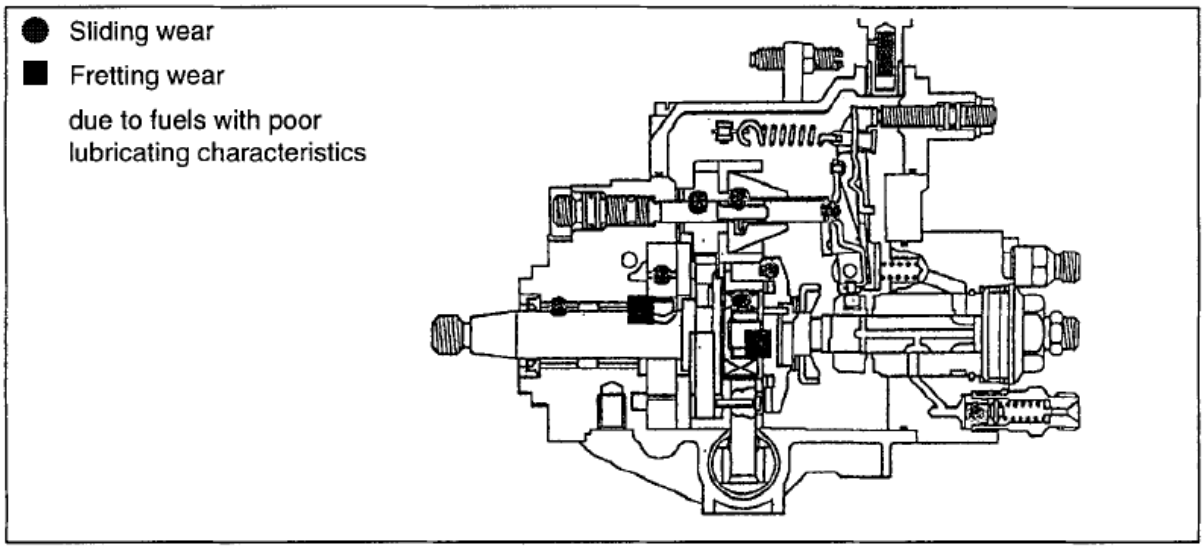
*Εισαγωγή*

Όλοι οι εξοπλισμοί έγχυσης καυσίμου στηρίζονται μέχρι ενός βαθμού στις λιπαντικές ιδιότητες των καυσίμων Diesel. Η φθορά λόγω υπερβολικής τριβής με αποτέλεσμα τη μείωση ζωής των επί μέρους μερών της μηχανής, όπως οι αντλίες έγχυσης καυσίμου Diesel και οι εγχυτήρες, έχει πολλές φορές αποδοθεί στην έλλειψη λιπαντικής ικανότητας του καυσίμου.

Η σχέση των αποτελεσμάτων των πειραματισμών με την επιβάρυνση των στοιχείων του εξοπλισμού έγχυσης καυσίμου Diesel έχει αποδειχθεί για κάποιους συνδυασμούς καυσίμου / υλικών όπου η οριακή λιπαντική ικανότητα είναι ένας παράγοντας στη λειτουργία του στοιχείου.

Τα αποτελέσματα των πειραματισμών από καύσιμα που ελέγχθηκαν με αυτή τη διαδικασία έχει αποδειχθεί να σχετίζονται με πολλούς συνδυασμούς καυσίμων / υλικών και παρέχουν μία επαρκή πρόβλεψη της λιπαντικής ικανότητας του καυσίμου.

*Σκαριφηματική Αναπαράσταση του τύπου αντλίας πάνω στον οποίο βασίστηκε η ανάπτυξη του ISO 12156-1[9]*



*Μεθοδολογία πειραματισμού*

*Προειδοποιήσεις: κατά τη διαδικασία εφαρμογής του μέρους αυτού του πειραματισμού του ISO 12156 γίνεται χρήση επικίνδυνων συστατικών, διαδικασιών και εξοπλισμού. Αυτό το μέρος του ISO 12156 δεν σκοπεύει να επισημάνει όλα τα προβλήματα ασφάλειας τα οποία σχετίζονται με τη χρήση του. Είναι η ευθύνη του χρήστη αυτού του μέρους του ISO 12156 να εφαρμόσει τις κατάλληλες πρακτικές ασφάλειας και υγείας και να διευκρινίσει τους εφαρμόσιμους ρυθμιστικούς περιορισμούς πριν την εκκίνηση της διαδικασίας.*

*Σκοπός*

Αυτό το κομμάτι του ISO 12156 ορίζει την μέθοδο πειραματισμού με τον εξοπλισμό ταλάντωσης υψηλής συχνότητας (high frequency reciprocating rig – HFRR), για να εκτιμηθεί η λιπαντική ικανότητα καυσίμων Diesel συμπεριλαμβανομένων και των καυσίμων αυτών τα οποία μπορεί να περιέχουν πρόσθετα βελτίωσης της λιπαντικής ικανότητας.

Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν σε μηχανές καυσίμων που χρησιμοποιούν Diesel.

(Υποσημείωση: Δεν έχει διευκρινιστεί και δεν είναι γνωστό εάν αυτή η μέθοδος προβλέπει τη συμπεριφορά, τη λιπαντική ικανότητα και τις επιδόσεις όλων των συνδυασμών καυσίμων / προσθέτων.)

*Κανονιστικές Αναφορές*

Τα ακόλουθα πρότυπα περιλαμβάνουν διατάξεις οι οποίες, μέσω αναφοράς σε αυτό το κείμενο, αποτελούν διατάξεις αυτού του μέρους του ISO 12156. Μέχρι τη στιγμή της δημοσιοποίησης, οι ακόλουθες εκδόσεις ήταν έγκυρες. Όλα τα πρότυπα υπόκεινται αναθεωρήσεις και τα μέλη συμφωνιών που βασίστηκαν σε αυτό το πρότυπο ενθαρρύνονται να ερευνήσουν την εφαρμογή των πιο πρόσφατων εκδόσεων των κατωτέρω αναφερομένων προτύπων. Τα μέλη του IEC και του ISO διατηρούν αρχεία των πιο επίκαιρων έγκυρων Διεθνών Προτύπων.

- *ISO 4259:1992, Petroleum products – Determination and application of precision data in relation to methods of test*
- *ISO 5272:1979, Toluene for industrial use – Specifications*
- *ISO 6507 – 1:1997, Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1 : Test Method*
- *ISO 6508 – 1:1999, Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 1 : Test Method (scales A – B – C – D – E – F – G – H – K – N – T)*
- *ISO Guide 33:2000, Uses of certified reference materials*
- *ISO Guide 34:2000, General requirements for the competence of reference material producers*
- *ISO Guide 35:1989, Certification of reference materials – General and statistical principles*
- *ASTM D329 – 02, Standard Specification for acetone*
- *AISI E – 52100, Chromium alloy steel*
- *ANSI B3.12, Metal balls*

*Ορισμοί*

Για τους σκοπούς του μέρους αυτού του ISO 12156 ισχύουν οι παρακάτω ορισμοί:

- *Λιπαντική Ικανότητα: μία ιδιότητα του υγρού, η οποία υπολογίζεται από την παραγόμενη διάμετρο φθοράς σε ένα ταλαντευόμενο σφαιρικό δοκίμιο από την επαφή με ένα σταθερό επίπεδο δοκίμιο εμβαπτισμένο στο υγρό και λειτουργώντας σε πολύ ελεγχόμενες συνθήκες*
- *MWSD:* μετρηθείσα *μέση διάμετρος της φθοράς που παράγεται στη σφαίρα του πειράματος*
- *WS1.4: υπολογισμένη τιμή της διαμέτρου φθοράς διορθωμένη στην προτυποποιημένη πίεση ατμών νερού των 1,4kPa.*

*Αρχή*

Ένα μείγμα του υγρού υπό έλεγχο τοποθετείται σε μία δεξαμενή πειραματισμού η οποία διατηρείται στην ορισμένη θερμοκρασία του πειραματισμού. Ένα σταθερό χαλύβδινο σφαιρικό δοκίμιο διατηρείται σε ένα κάθετα τοποθετημένο βραχίονα και εφαρμόζεται απέναντι σε ένα σταθερά οριζόντια τοποθετημένο χαλύβδινο επίπεδο δοκίμιο υπό ορισμένο φορτίο. Το σφαιρικό δοκίμιο που χρησιμοποιείται ταλαντώνεται με σταθερή συχνότητα και μήκος χτυπήματος ενώ το χαλύβδινο επίπεδο δοκίμιο είναι πλήρως εμβαπτισμένο στο υγρό. Οι συνθήκες περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του πειράματος χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση του μεγέθους της διαμέτρου φθοράς που δημιουργείται στη σφαίρα σε ένα πρότυπο συνδυασμό περιβαλλοντικών συνθηκών.

*Αντιδραστήρια και Υλικά*

- *Πεπιεσμένος αέρας:* εάν χρησιμοποιείται για το στέγνωμα του εξοπλισμού θα πρέπει να παρέχεται σε πίεση 140kPa – 210kPa και να περιέχει λιγότερο από 0.1 ml/$m^3$ υδρογονάνθρακες και λιγότερο από 50ml/$m^3$ νερό.
- *Τολουόλιο:* σύμφωνα με το ISO 5272.
- *Ακετόνη:*σύμφωνα με το ISO 5272.
- *Υγρά αναφοράς:* Δύο υγρά αναφοράς, τα οποία έχουν παραχθεί σύμφωνα με τις μεθόδους που ορίζονται στα ISO Guide 34 και ISO Guide 35, θα χρησιμοποιηθούν για να επιβεβαιώσουν την επίδοση του εξοπλισμού ελέγχου. Τα υγρά αυτά θα πρέπει να έχουν σημαντικά διαφορετικές επιδόσεις λιπαντικής ικανότητας, καθώς αυτή ορίζεται από το αυτό το Διεθνές Πρότυπο. Θα είναι σαφώς σημειωμένα με την HFRR τιμή (WS1,4) και την εκτεταμένη αβεβαιότητά τους, εκφρασμένη σε μικρόμετρα, και με την τιμή HCF εκφρασμένη σε μικρόμετρα ανά κιλοπασκάλ. Τα δύο υγρά αναφοράς θα πρέπει να έχουν μια ελάχιστη διαφορά στην τιμή HFRR των 200 μικρομέτρων, καθώς οριζόντια σε αυτό το μέρος του ISO 12156.

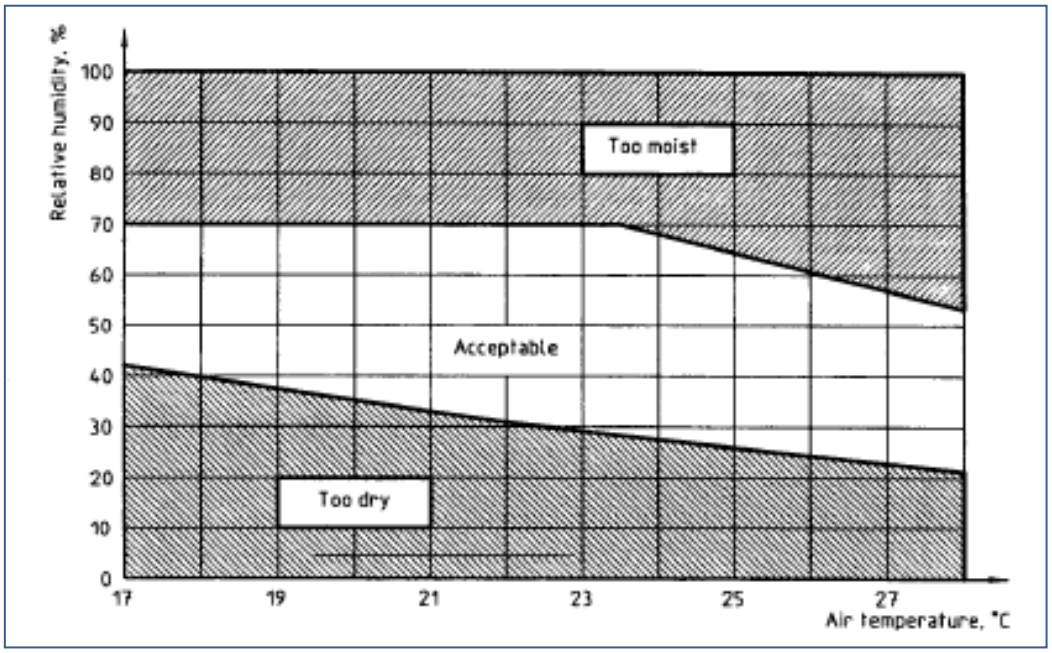
*Εξοπλισμός*

- *Εξοπλισμός ελέγχου:* Ο εξοπλισμός ελέγχου θα είναι ικανός να εφαρμόσει ένα χαλύβδινο σφαιρικό δοκίμιο έναντι ενός ακίνητου χαλύβδινου επίπεδου δοκιμίου με ένα εφαρμοζόμενο φορτίο και το οποία θα ταλαντώνεται με σταθερή συχνότητα και μήκος χτυπήματος ενώ η επιφάνεια επαφής είναι πλήρως εμβαπτισμένη σε ένα υγρό σύμφωνα με τις συνθήκες οι οποίες ορίζονται στον παρακάτω πίνακα. Η δεξαμενή του υγρού θα πρέπει να είναι ικανή στο να κρατά το επίπεδο δοκίμιο ελέγχου ακίνητο και να περιέχει επίσης το υγρό ελέγχου. Η θερμοκρασία της δεξαμενής αυτής, και κατά συνέπεια του περιεχόμενου σε αυτήν υγρού, θα πρέπει να επιτυγχάνεται διαμέσου ενός ηλεκτρικά ελεγχόμενου θερμαντικού εξοπλισμού στον οποίο η δεξαμενή του υγρού θα είναι άμεσα συνδεδεμένη. Η συσκευή ελέγχου του εξοπλισμού η οποία θα ελέγχει τις διάφορες παραμέτρους θα πρέπει να περιέχει και δυνατότητα για αποθήκευση και ανάκτηση των αποτελεσμάτων πειραματισμού.
- *Επίπεδο δοκίμιο ελέγχου:* Πρέπει να είναι κατασκευασμένο από χάλυβα AISIE-52100, προερχόμενο από ανοπτημένη ράβδο, με σκληρότητα κατά Vickers “HV 30” από 190 έως 210 και στιλβωμένο με τραχύτητα επιφάνειας Ra< 0,02 μm.
- *Σφαιρικό δοκίμιο ελέγχου:* Πρέπει να έχει 6 mm διάμετρο, grade 28 χάλυβα σύμφωνα με το ANSIB3.12 του AISIE-52100. Θα έχει σκληρότητα κατά Rockwell “C” από 50 έως 66 με τραχύτητα επιφάνειας Ra< 0,05μm.
- *Μικροσκόπιο:* Μεταλλουργικού τύπου ικανό να μετρήσει την διάμετρο φθοράς του άνω δείγματος με ακρίβεια 1 μm.
- *Ξηραντήρας:* Θα περιέχει ξηραντικό παράγοντα, ικανό να αποθηκεύσει τα σφαιρικά και τα επίπεδα δοκίμια, όπως επίσης και τον υπόλοιπο εξοπλισμό.
- *Λουτρό καθαρισμού* , υπερηχητικού τύπου, ομογενούς ανοξείδωτης χαλύβδινης δεξαμενής, επαρκούς χωρητικότητας και δύναμης καθαρισμού των 40W ή και ανώτερης.
- *Λοχεία καυσίμου* εποξικού χάλυβα, εκτός και αν δεικνύεται ότι εναλλακτικά υλικά δίδουν ισοδύναμα αποτελέσματα.
- *Συσκευή χρονομέτρησης* μηχανικού ή ηλεκτρονικού τύπου, ικανή να μετρήσει σε λεπτά (75 ± 0.1min).
- *Μάζα ελέγχου* 200 γραμμαρίων συμπεριλαμβανομένης και οποιασδήποτε συσκευής για προσάρτηση στο βραχίονα ταλάντωσης.

*Συνθήκες Ελέγχου*

| ***Παράμετρος*** | ***Τιμή*** |
|---|---|
| Όγκος υγρού, ml | 2 ± 0.2 |
| Μήκος Χτυπήματος, mm | 1 ±0.02 |
| Συχνότητα, Hz | 50 ± 1 |
| Αέρας εργαστηρίου | Παρακάτω διάγραμμα |
| Θερμοκρασία Υγρού, $^{o}$C | 60 ±2 |
| Μάζα ελέγχου, g | 200 ± 1 |
| Διάρκεια ελέγχου, min | 75 ±0.1 |
| Επιφάνεια δεξαμενής, mm$^2$ | 600 ± 100 |

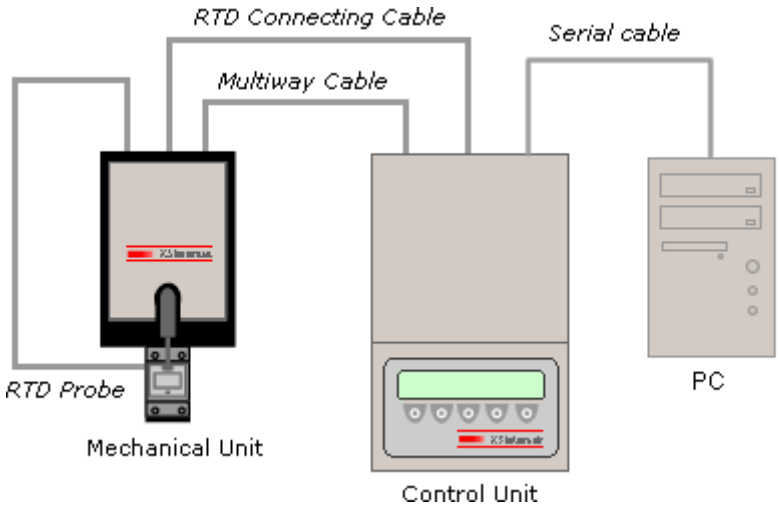
*Διάγραμμα Συνθηκών Περιβάλλοντος*



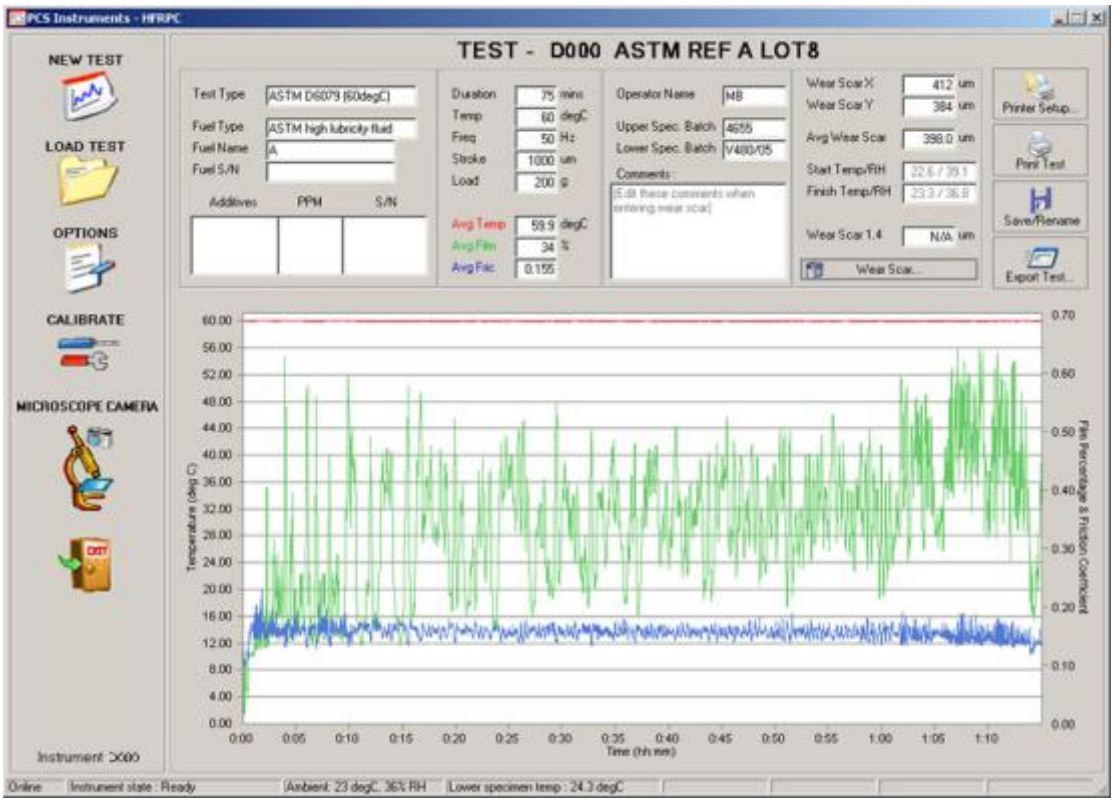
*Επιλεχθής Εξοπλισμός Ελέγχου*

Επιλέχθηκε η συσκευή HFRR η οποία κατασκευάζεται από την εταιρία PCS Instruments.

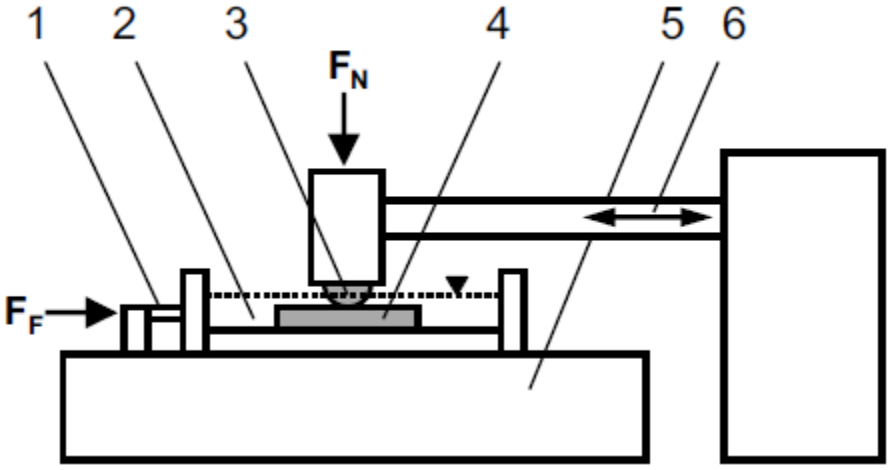
Περιέχει ένα μικροεπεξεργαστή ο οποίος ελέγχει το σύστημα ελέγχου τριβής και φθοράς παρέχοντας άμεση, επαναλαμβανόμενη εκτίμηση της επίδοσης διαφόρων λιπαντικών και καυσίμων. Στους ελέγχους του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω διαμόρφωση:




Επιλέγχθηκε η διαμόρφωση διότι προσφέρει και εκμεταλλεύεται στο μέγιστο τις δυνατότητες που προσφέρει η συσκευή. Συγκεκριμένα είναι δυνατή η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων που καταγράφονται καθώς επίσης και η ψηφιακή αποθήκευση των δεδομένων. Παρακάτω παρατίθεται μία τέτοια αναπαράσταση τυχαίου ελέγχου.


PCS Instruments - HFRPC
TEST - D000 ASTM REF A LOT8
NEW TEST
LOAD TEST
OPTIONS
CALIBRATE
MICROSCOPE CAMERA
Test Type
ASTM D6079 (60degC)
Fuel Type
ASTM high lubricity fluid
Fuel Name
A
Fuel S/N
Additives
PPM
S/N
Duration
75 mins
Temp
60 degC
Freq
50 Hz
Stroke
1000 um
Load
200 g
Avg Temp
59.9 degC
Avg Fltn
34 %
Avg Fric
0.155
Operator Name
MB
Upper Spec. Batch
4655
Lower Spec. Batch
V480/05
Comments :
Edit these comments when entering wear scar
Wear Scar X
412 um
Wear Scar Y
384 um
Avg Wear Scar
398.0 um
Start Temp/RH
22.6 / 39.1
Finish Temp/RH
23.3 / 36.8
Wear Scar 1.4
N/A um
Wear Scar...
Printer Setup...
Print Test
Save/Rename
Export Test...
Temperature (deg C)
Film Percentage & Friction Coefficient
Time (hh:mm)
Instrument 3000
Online
Instrument state : Ready
Ambient: 23 degC, 36% RH
Lower specimen temp : 24.3 degC

*Σκαριφηματική αναπαράσταση του μηχανισμού της συσκευής HFRR*

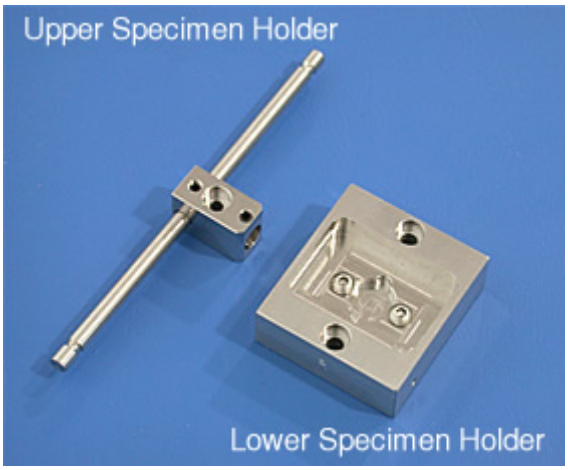



1. Αισθητήρας τριβής
2. Δεξαμενή υγρού δείγματος
3. Σφαιρικό δοκίμιο
4. Επίπεδο δοκίμιο
5. Βάση θέρμανσης κάτω δείγματος
6. Ταλαντωτική κίνηση

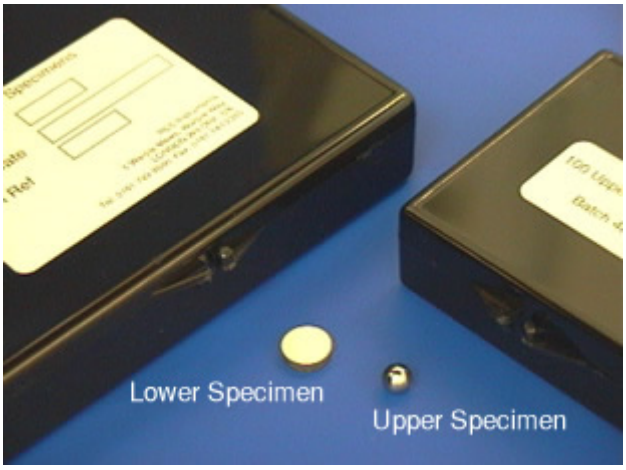
*Προετοιμασία για τη διεξαγωγή πειράματος*

Απαιτούμενα συστατικά:

- *Βάσεις άνω και κάτω δείγματος*



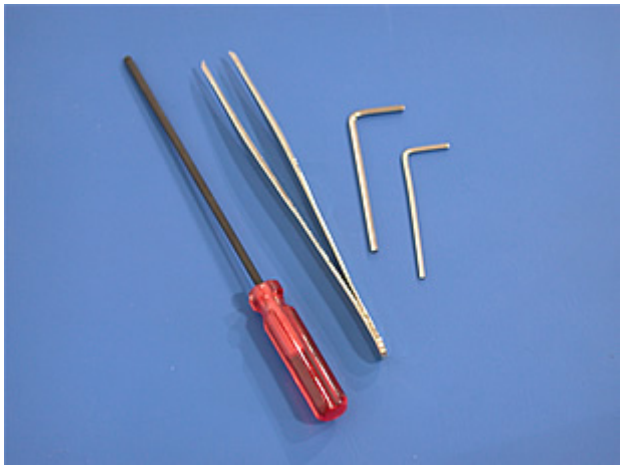

- *Άνω και κάτω δοκίμια* (όπως περιγράφτηκαν παραπάνω):




- *Απαραίτητοι κοχλίες:*

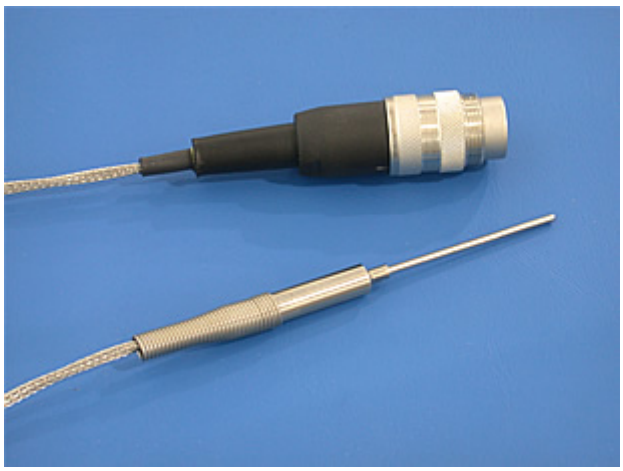
Οι κοχλίες με τη μαύρη κεφαλή χρησιμοποιούνται για να ασφαλίσουν την άνω βάση (x1) και την κάτω βάση (x2) στο μηχανισμό. Οι δύο μικροί ανοξείδωτοι κοχλίες χρησιμοποιούνται για να ασφαλίσουν το επίπεδο δοκίμιο στην κάτω βάση, ενώ ένας από τους πιο μικρούς κοχλίες ασφαλίζει το σφαιρικό δοκίμιο στην άνω βάση.

- *Απαραίτητα εργαλεία:*



Το εξάγωνο κατσαβίδι χρησιμοποιείται με τους κοχλίες που έχουν μαύρη κεφαλή, ενώ τα δύο μικρά εξάγωνα κλειδιά χρησιμοποιούνται για να ασφαλίσουν το άνω και κάτω δείγμα. Οι τσιμπίδες για να κρατούνται τα δείγματα (το επίπεδο δοκίμιο και το σφαιρικό) καθώς επίσης και οι κοχλίες.

- *Βασικό θερμοστοιχείο:*



Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της βάσης του κάτω δείγματος.

- *Κορδόνι συγκράτησης βάρους:*

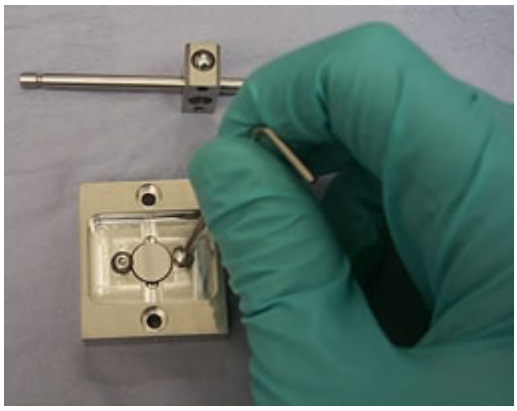
Σε αυτό το κορδόνι εφαρμόζεται και συγκρατείται το βάρος ελέγχου.

- *Συλλογή βαρών:*

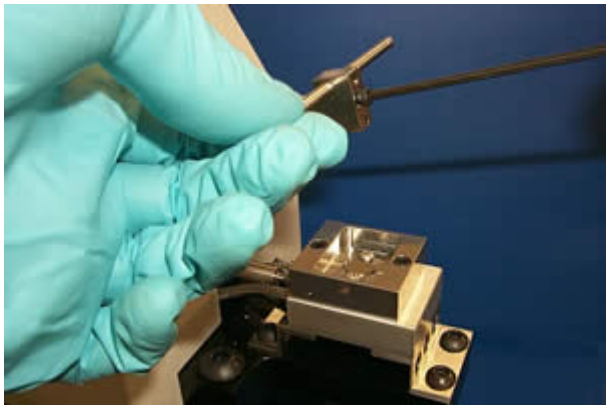
Περιέχει βάρη 100gr.

*Σύνδεση των επιμέρους κομματιών της συσκευής προ της διεξαγωγής του πειράματος:*

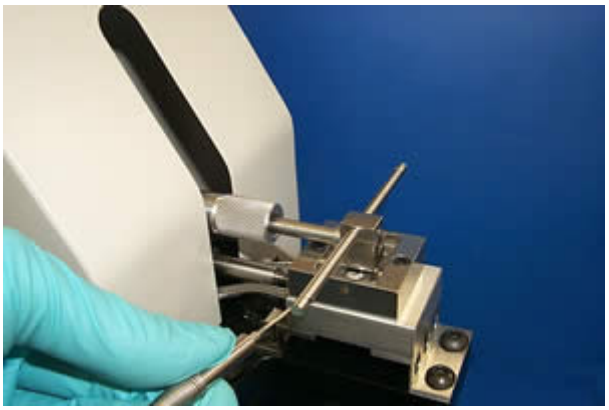
1. Χρησιμοποιώντας τις τσιμπίδες τοποθετείται το σφαιρικό δοκίμιο στην άνω βάση και το επίπεδο δοκίμιο στην κάτω βάση. Έπειτα λαμβάνονται με τις τσιμπίδες οι δύο ανοξείδωτοι κοχλίες και με αυτούς ασφαλίζονται το κάτω δείγμα στη βάση του με το αντίστοιχο εξάγωνο κλειδί. Επόμενο βήμα είναι να χρησιμοποιηθεί μικρότερος κοχλίας και να ασφαλιστεί το άνω δείγμα στη βάση του με το μικρότερο εξάγωνο κλειδί. Τα δείγματα χρειάζεται να είναι ασφαλισμένα σε βαθμό που να μην επιτρέπεται η περιστροφή του σφαιρικού δοκιμίου και η μετατόπιση του επίπεδου δοκιμίου. Εντέλει, τα δύο δείγματα συντίθενται σε αυτή τη μορφή:



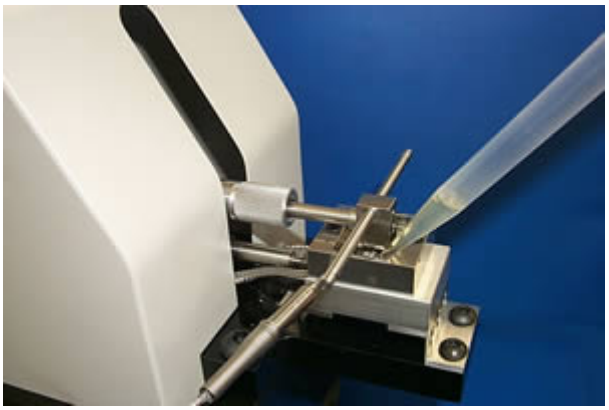
2. Τα δύο δείγματα μεταφέρονται στη συσκευή. Το κάτω δείγμα ασφαλίζεται με 2 από τους κοχλίες που έχουν μαύρη κεφαλή και το άνω δείγμα με έναν εξ' αυτών χρησιμοποιώντας το εξάγωνο κατσαβίδι.



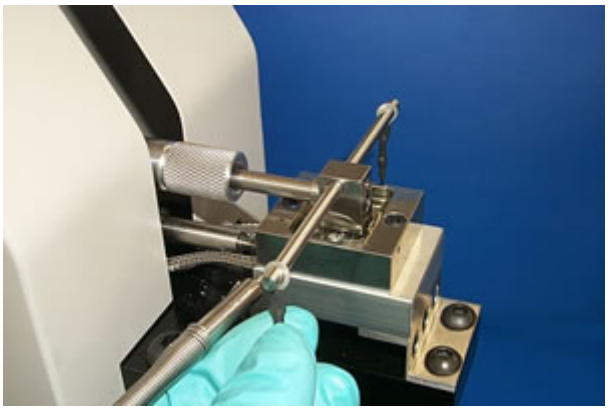
3. Το θερμογόνο στοιχείο εισάγεται στην οπή η οποία διακρίνεται στη μία πλευρά της βάσης του κάτω δείγματος. ΠΡΟΣΟΧΗ: Το στοιχείο περιέχει ένα σένσορα κατασκευασμένο από κεραμικό υλικό στην άκρη το οποίο μπορεί να καταστραφεί μόνιμα αν το στοιχείο λυγίσει έστω και ελάχιστα.



4. Με τη χρήση σύριγγας προστίθενται 2ml του υπό έλεγχο υγρού.



5. Εντοπίζονται οι εγκοπές στα άκρα της βάσης του άνω δείγματος και σε αυτές τοποθετούνται οι δύο δακτύλιοι που βρίσκονται στα άκρα του κορδονιού συγκράτησης βάρους. Έπειτα εφαρμόζεται το απαραίτητο βάρος που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

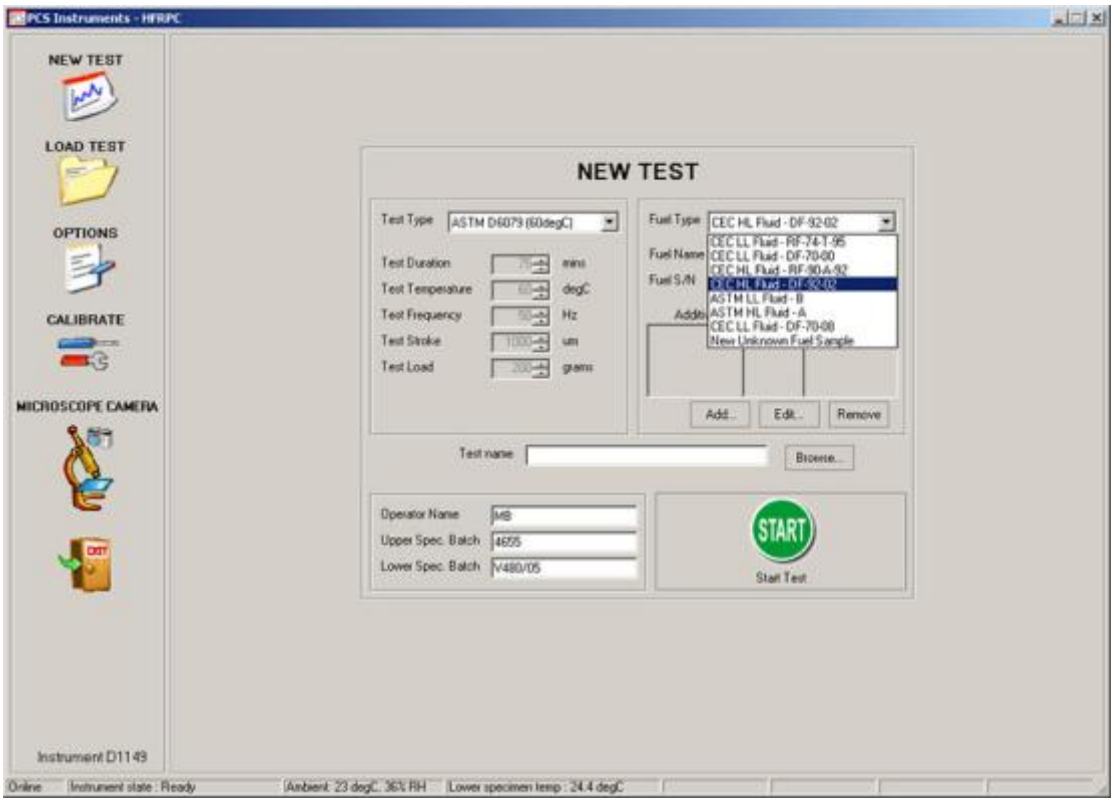


*Διεξαγωγή του πειράματος:*

Το λογισμικό της συσκευής είναι προγραμματισμένο με 5 βασικά προκαθορισμένα τεστ. Αυτά μπορούν να επιλεχθούν στην οθόνη εκκίνησης και περιλαμβάνουν τους εξής ελέγχους:

- CEC F-06-A-96
- ISO 121516-1
- ASTM D6079 25°C
- ASTM D6079 60°C
- GASOLINE - Test procedure at 25°C suitable for testing gasoline

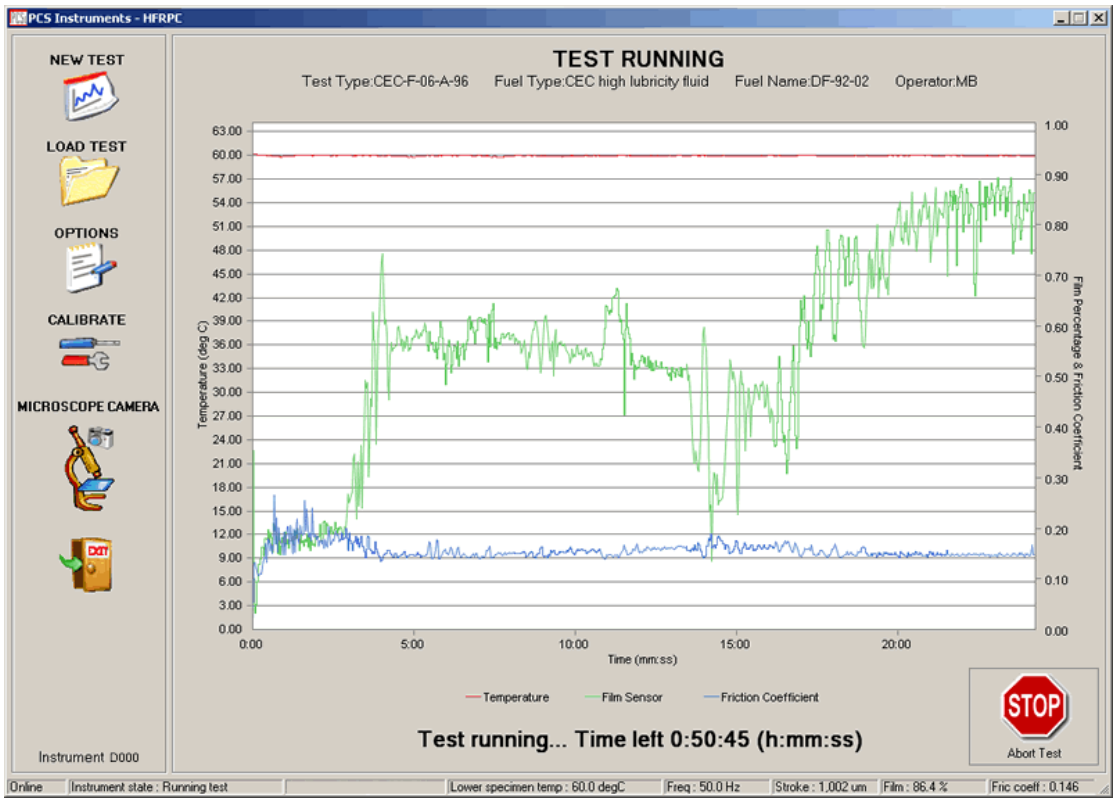
Η οθόνη εκκίνησης έχει την παρακάτω μορφή:



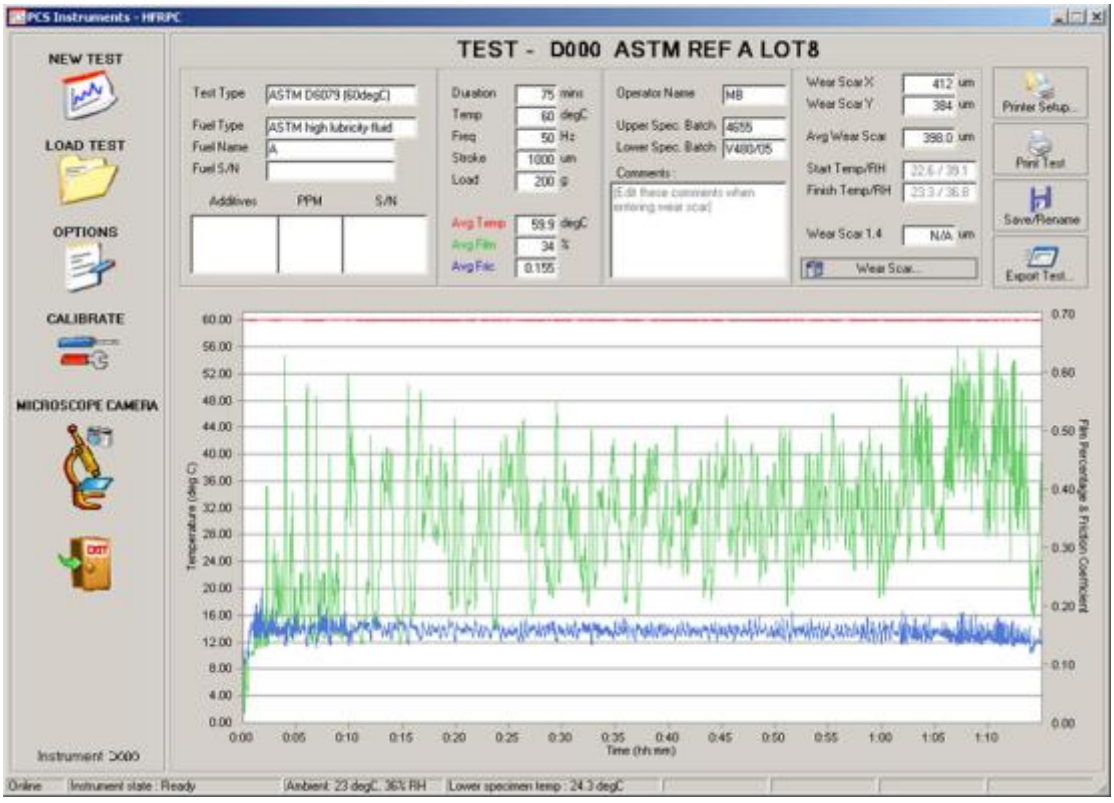

Από αυτήν μπορούμε να επιλέξουμε ένα εκ των πέντε προκαθορισμένων ελέγχων ή και να δώσουμε τις δικές μας παραμέτρους. Επίσης επιλέγεται το είδος καυσίμου, καταχωρούνται διάφορες πληροφορίες αναγνώρισης του υγρού και δεδομένα που αφορούν το πρόσθετα, αν περιέχονται σε αυτό. Τέλος, δίδεται και ένα όνομα για το αρχείο στο οποίο θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα του ελέγχου και επιλέγεται το κουμπί εκκίνησης για να ξεκινήσει ο έλεγχος του υγρού.

Το πρόγραμμα καταχωρεί τα δεδομένα ανά δευτερόλεπτο και αυτά αφορούν στο συντελεστή τριβής, στο ποσοστό του φιλμ που δημιουργείται μεταξύ του άνω και κάτω

δείγματος και στις μεταβολές της θερμοκρασίας του κάτω δείγματος. Παρατίθεται εικόνα η οποία είναι ενδεικτική της διεξαγωγής του πειράματος από πλευράς λογισμικού:



Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου η οθόνη αποτελεσμάτων έχει την εξής μορφή:




Σε αυτήν παρατίθενται οι συνθήκες του πειράματος, τα αποτελέσματα του πειράματος και δίδεται η δυνατότητα υπολογισμού της φθοράς Wear Scar 1,4. Είναι απαραίτητη η γνώση των διαμέτρων φθοράς στους άξονες X και Y καθώς επίσης και οι εξής παράμετροι:

- Αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Τελική θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Αρχική υγρασία περιβάλλοντος
- Τελική υγρασία περιβάλλοντος

Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο λογισμικό υπολογίζεται η προκληθείσα Wear Scar Diameter 1,4.

*Επιλεχθείς Εξοπλισμός Μικροσκοπίου*

Το μικροσκόπιο που επιλέχθηκε για να χρησιμοποιηθεί κατά την φωτογράφιση και καταχώρηση των δεδομένων αυτών είναι το μοντέλο Leica M165C της εταιρίας Leica Microsystems.

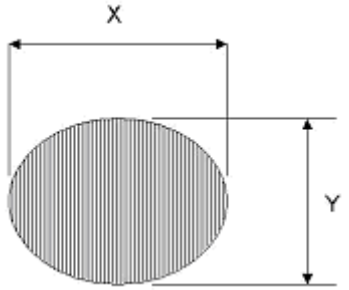
Παρακάτω παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροσκοπίου όπως αυτά παρέχονται από την εταιρία:

| | **Leica M165 C** |
|---|---|
| **Optical Data** | 16.5 : 1 manual |
| Zoom | |
| Data with standard optics (1× objective/10× eyepieces)<br>– Zoom range<br>– Resolution<br>– Working distance<br>– Object field | <br>7.3×–120×<br>max. 453lp/mm<br>61.5mm (planapochromatic)<br>∅ 31.5 mm – 1.92 mm |
| Maximum values (based on optics combination)<br>– Magnification<br>– Resolution<br>– Visible structural width<br>– Numerical aperture<br>– Object field | <br>960×<br>906 lp/mm<br>551 nm<br>0.302<br>∅ 63mm |
| Working distances | 135 mm (0.5× planachromatic)<br>112 mm (0.8× planachromatic)<br>67 mm (0.63× planapochromatic)<br>61.5 mm (1× planapochromatic)<br>30.5 mm (1.6× planapochromatic)<br>20.1 mm (2× planapochromatic) |
| **Optics carrier** | |
| 100% apochromatic optical system | CMO (Common Main Objective) lead-free |
| Coded/motorized function | Zoom, iris diaphragm, objective nosepiece (coded only) |
| Specific surface resistivity (housing) | $2 \times 10^{11}$ Ω/mm²<br>discharge time <2 seconds<br>from 1000V to 100V |
| Engageable zoom notches | 13 for repetitive tasks |
| Double-iris diaphragm for depth of field control | Built-in and encoded |

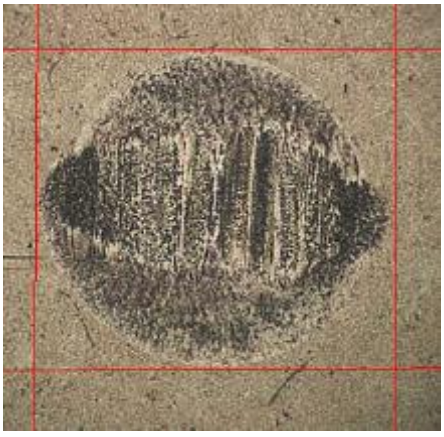
1. *Επιλέκτης μεγέθυνσης*
2. *Διακόπτης βηματικής μεγέθυνσης*
3. *Εστίαση*
4. *Κοχλίας για την εφαρμογή διάφορων παρελκόμενων*
5. *Εναλλάκτης αντικειμένου*
6. *Ρυθμιζόμενες διόπτρες*
7. *Διόπτρες για μυωπικούς με διόρθωση διοπτρικής εστίασης*
8. *Κοχλίες για την εφαρμογή των διοπτρών*
9. *Τριοπτική σήραγγα*
10. *Ενσωματωμένο διάφραγμα ίριδος*

*Μέτρηση των επιμέρους διαμέτρων φθοράς στους άξονες X & Y*

Με την ολοκλήρωση του πειράματος αφαιρείται η βάση του άνω δείγματος. Η βάση υφίσταται πλύση στο μηχάνημα υπερήχων σε τολουόλιο και σε ακετόνη. Μετά την ολοκλήρωση της πλύσης μπορεί να τεθεί υπό το μικροσκόπιο για να ελεγχθούν και να καταχωρηθούν οι δύο διάμετροι ουλής φθοράς στους άξονες X και Y.




Ενδεικτικές φωτογραφίες που απεικονίζουν την κατάσταση της σφαίρας και τη μορφή της ουλής φθοράς μετά το πέρας του πειράματος παρατίθενται κατωτέρω:



*Υπολογισμός Διορθωμένης Διαμέτρου Φθοράς 1,4[10]*

- *Μέση Διάμετρος Φθοράς*

$$\mathrm{MWSD} = \frac{(\mathrm{X} + \mathrm{Y})}{2}$$

Όπου:

X: η διάμετρος φθοράς η κάθετη στην διεύθυνση της ταλάντωσης σε μm και
Y: η διάμετρος φθοράς η οριζόντια στην διεύθυνση της ταλάντωσης σε μm

- *Αρχική Απόλυτη Πίεση Ατμών*

$$AVP_1 = \frac{\%RH_1 * 10^v}{750}$$

Όπου:

$RH_1$: η σχετική υγρασία στη αρχή του πειράματος

$$v = 8.017352 - \frac{1705.984}{231.864 + T_1}$$

$T_1$: η θερμοκρασία στην αρχή του πειράματος σε βαθμούς κελσίου

- *Τελική Απόλυτη Πίεση Ατμών*

$$AVP_2 = \frac{\%RH_2 * 10^v}{750}$$

Όπου:

$RH_2$: η σχετική υγρασία στη αρχή του πειράματος

$$v = 8.017352 - \frac{1705.984}{231.864 + T_2}$$

$T_2$: η θερμοκρασία στην αρχή του πειράματος σε βαθμούς κελσίου

- *Μέση Απόλυτη Πίεση Ατμών*

$$AVP = \frac{AVP_1 + AVP_2}{2}$$

- *Διορθωμένη Διάμετρος Φθοράς*

$$WS1.4 = MWSD + HCF * (1.4 - AVP)$$

Όπου:

HCF=60 για άγνωστα δείγματα καυσίμου.

*Εναλλακτική Μέθοδος Εκτίμησης Λιπαντικότητας[11]*
*SL-BOCLE (Scuffing Load Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluation)*

Εδώ γίνεται και μια αναφορά στη μέθοδο SL-BOCLE για την εκτίμηση λιπαντικής ικανότητας. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και τα αποτελέσματά της είναι εφάμιλλης σημασίας στην απέναντι μεριά του Ατλαντικού με τα αντίστοιχα της HFRR.

*Συνοψισμός της μεθόδου ελέγχου*

- Ένα δείγμα 50mL καυσίμου τοποθετείται στη δεξαμενή ελέγχου και ρυθμίζεται στους 25$^{o}$C.
- Όταν η θερμοκρασία του δείγματος έχει σταθεροποιηθεί, αέρας σχετικής υγρασίας 50% χρησιμοποιείται για να αεριστεί το καύσιμο στα 0.5L/min ενώ 3.3L/min ρέουν πάνω από το καύσιμο για 15 λεπτά. Κατά το υπόλοιπο της διαδικασίας ελέγχου ο αέρας σχετικής υγρασίας 50% ρέει πάνω από το καύσιμο σε ένα ρυθμό 3.8L/min.
- Ένας βραχίονας φόρτισης στον οποίο έχει εφαρμοστεί μια μη περιστρεφόμενη χαλύβδινη σφαίρα και οποίος φέρει μία μάζα 500gr χαμηλώνεται μέχρι να έρθει σε επαφή με έναν μερικώς εμβαπτισμένο στιλπνό χαλύβδινο δακτύλιο ελέγχου ο οποίος περιστρέφεται με ταχύτητα 525rpm. Η σφαίρα εξαναγκάζεται σε τριβή με τον περιστρεφόμενο δακτύλιο για 30 δευτερόλεπτα πριν ξεκινήσει το πείραμα με διαδοχικά αυξανόμενο φορτίο ή με σταθερό φορτίο.
- Οι έλεγχοι φθοράς διεξάγονται κρατώντας σε επαφή τη σφαίρα με τον περιστρεφόμενο δακτύλιο για 60 δευτερόλεπτα. Για ελέγχους διαδοχικά αυξανομένης φόρτισης, ο δακτύλιος ελέγχου μετακινείται τουλάχιστον 0.75mm για κάθε καινούριο φορτίο πριν έρθει σε επαφή με τη σφαίρα.
- Η εφαπτομενική τριβή καταγράφεται ενόσω η σφαίρα είναι σε επαφή με τον δακτύλιο ελέγχου και έπειτα υπολογίζεται ο συντελεστής τριβής.
- Στην περίπτωση διαδοχικά αυξανομένης φόρτισης, το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο εφαρμογής για την παραγωγή ενός συντελεστή τριβής μεγαλύτερου του 0.175 είναι μία εκτίμηση της λιπαντικής ικανότητας του καυσίμου ντήζελ.
- Στην περίπτωση σταθερού φορτίο, ένας συντελεστής τριβής ίσος ή μικρότερος του 0.175 υποδεικνύει ότι το καύσιμο ικανοποιεί τις απαιτήσεις λιπαντικής ικανότητας, ενώ ο συντελεστής τριβής με τιμή μεγαλύτερη του 0.175 υποδεικνύει ότι το καύσιμο δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις αυτές.

*Σημασία και χρήση της μεθόδου*

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε εκτεταμένο βαθμό ανωτέρω, ο εξοπλισμός έγχυσης καυσίμου βασίζεται στις λιπαντικές ιδιότητες αυτού.

Ο συσχετισμός αποτελεσμάτων τα οποία παρέχονται κατά των έλεγχο καυσίμων με την μέθοδο SL-BOCLE με τη φθορά η οποία παρουσιάζεται μηχανικά μέρη του μηχανισμού έγχυσης καυσίμου έχει ήδη αποδειχθεί σε δοκιμαστικές εγκαταστάσεις ελέγχου αντλιών για συγκεκριμένους συνδυασμούς καυσίμων/μηχανών στους οποίους η οριακή λίπανση ήταν σημαντικός παράγοντας κατά τη λειτουργία του μηχανισμού

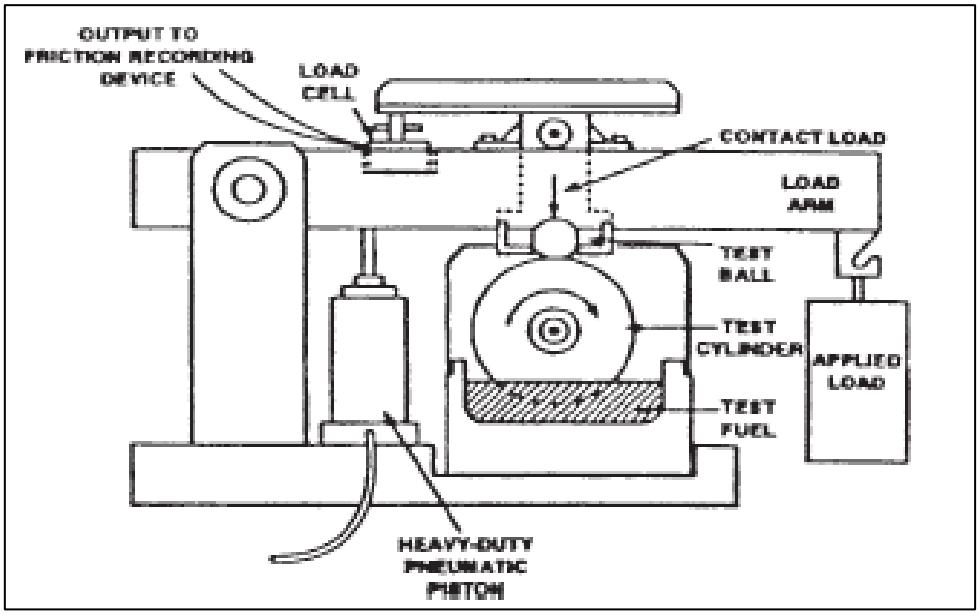
Η εφαπτομενική τριβή, καθώς μετράται από την SL-BOCLE, είναι ευαίσθητη στην μόλυνση των ρευστών και των υλικών του πειράματος, την παρουσία νερού και οξυγόνου στην ατμόσφαιρα και την θερμοκρασία του πειράματος. Η εκτίμηση της λιπαντικής ικανότητας επηρεάζεται επίσης από στοιχεία μόλυνσης τα οποία εισέρχονται στο ρευστό κατά την αποθήκευσή του άλλα και κατά τη συλλογή του προς έλεγχο.

Προς το παρόν δεν έχουν αναπτυχθεί μοντέλα τα οποίο αποδεικνύουν το συσχετισμό των αποτελεσμάτων τα οποία παρέχονται από τις δύο μεθόδους την HFRR (High Frequency Reciprocating Rig) και την SL-BOCLE (Scuffing Load Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluation).

Η μέθοδος SL-BOCLE μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της σχετικής ικανότητας ενός καυσίμου να εμποδίσει τη φθορά κάτω από τις συνθήκες που λαμβάνει χώρα και ο έλεγχος. Ο έλεγχος με σταθερό φορτίο παρέχει αποτελέσματα σε μεγαλύτερη ταχύτητα από τον έλεγχο με διαδοχικά αυξανόμενο φορτίο. Ο βαθμός συσχετισμού των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις επιδόσεις των συστημάτων έγχυσης καυσίμου δεν έχει διευκρινιστεί.

Αυτή ή μέθοδος έχει σχεδιαστεί για να εκτιμηθούν οι ικανότητες οριακής λίπανσης του καυσίμου. Ενώ οι επιδράσεις του ιξώδους στη λιπαντική ικανότητα δεν έχουν εξαλειφθεί πλήρως, έχουν περιοριστεί σε μεγάλο βαθμό.

*Σκαριφηματική αναπαράσταση της συσκευής SL-BOCLE*



*Αποτελέσματα μεθόδου HFRR*

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα διάφορων δειγμάτων τα οποία ελέχθηκαν με τη μέθοδο της HFRR. Οι συνθήκες ελέγχου ορίζονται από το ISO 12156-1.

Συγκεκριμένα, ισχύουν οι εξής συνθήκες και ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

- *Χρόνος διεξαγωγής του πειράματος*: 75 λεπτά
- *Θερμοκρασία κάτω δείγματος:* 60$^{o}$C
- *Συχνότητα ταλάντωσης:* 50 Hz
- *Πλάτος ταλάντωσης:* 1000 μm
- *Εφαρμοζόμενο φορτίο:* 200 γραμμάρια

Οι συνθήκες αυτές είναι αυτές που ορίζονται από την προτυποποιημένη μέθοδο ελέγχου λιπαντικής ικανότητας με την συσκευή HFRR:

- ASTM D6079-04 (USA)
- CEC-F-06-A-96 (EU)

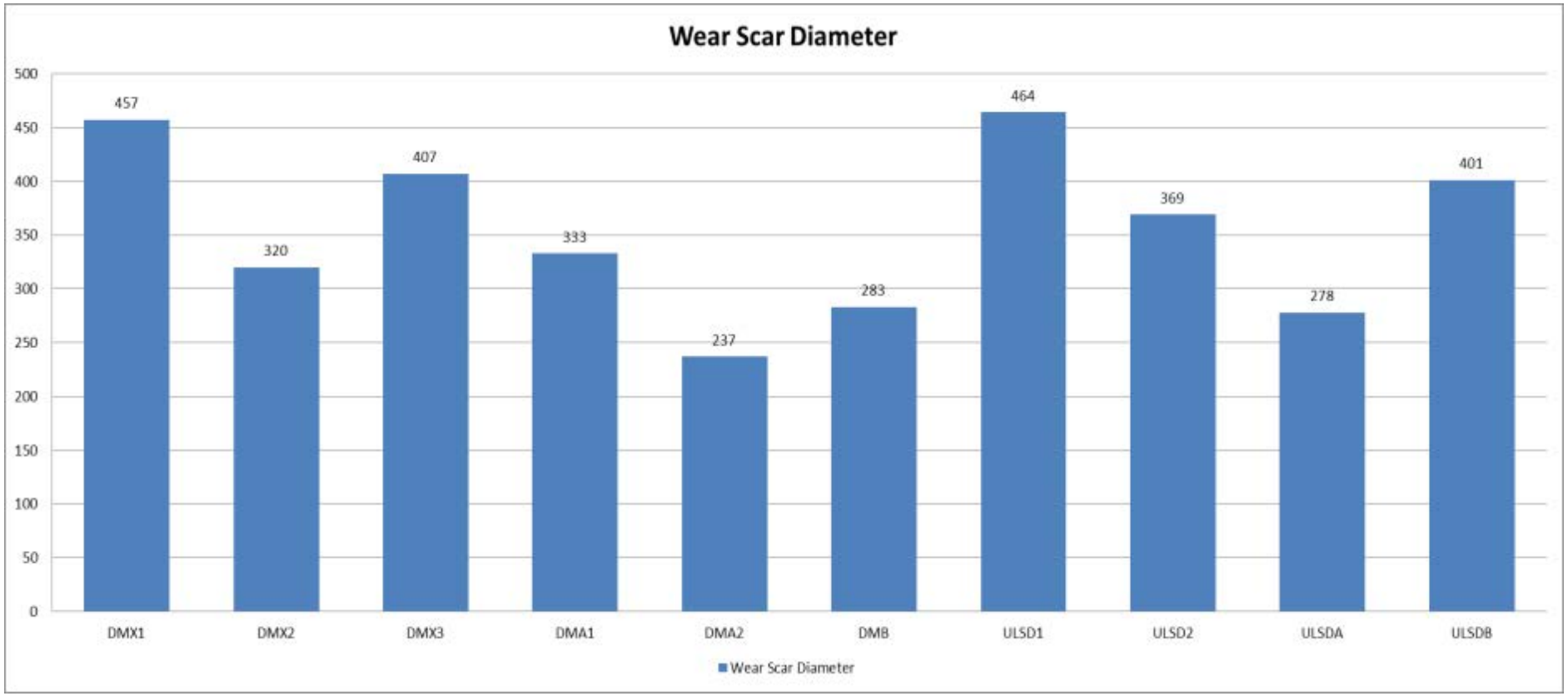
Τα δείγματα που ελέγχθηκαν παρατίθενται στον κατώθι πίνακα που περιλαμβάνει τις τιμές του συντελεστή τριβής, του ποσοστού του φιλμ που σχηματίζεται μεταξύ των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή, τις διαμέτρους φθοράς στους άξονες X και Y και τη μέση διάμετρο φθοράς.

Στον πίνακα έχουν καταχωρηθεί δείγματα τα οποία αποτελούν εμπορικά ναυτιλιακά καύσιμα. Ακόμα, καύσιμα τα οποία ελήφθησαν αμέσως μετά την διαδικασία υδρογονοαποθείωσης και καύσιμα μετά την διαδικασία της υδρογονοπυρόλησης. Τα δείγματα αυτά ελέγχθηκαν με τις κλασσικές συνθήκες.

| ΔΕΙΓΜΑ | Scar X (μm) | Scar Y (μm) | Scar Av. (μm) | *WS 1.4 (μm) IP* | Av. Friction co. | Av. Film % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| DMX1 | 487 | 428 | 457 | ***457*** | 182,8 | 88 |
| DMX2 | 367 | 255 | 311 | ***320*** | 128 | 55 |
| DMX3 | 450 | 420 | 435 | ***407*** | 0,163 | 36 |
| DMA1 | 394 | 322 | 358 | ***333*** | 133,2 | 51 |
| DMA2 | 304 | 219 | 262 | ***237*** | 94,8 | 84 |
| DMB | 322 | 314 | 318 | ***283*** | 113,2 | 53 |
| ULSD1 | 450 | 438 | 444 | ***464*** | 0,197 | 81 |
| ULSD2 | 432 | 365 | 399 | ***369*** | 147,6 | 60 |
| ULSDA | 316 | 254 | 285 | ***278*** | 0,138 | 88 |
| ULSDB | 427 | 402 | 414 | ***401*** | 0,141 | 81 |

Σε προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε ότι τα όρια τα οποία έχουν τεθεί για τις τιμές τις λιπαντικής ικανότητας του ντήζελ αυτοκίνησης είναι τα 460μm στην Ευρωπαϊκή Ένωση και τα 520μm στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Το ISO 8217:2010 ορίζει τα 520μm σαν το αποδεκτό όριο.

Ακολουθεί μία γραφική αναπαράσταση των διαμέτρων φθοράς των δειγμάτων που ελέγχθηκαν:



Διακρίνεται ότι από τα δείγματα τα οποία ελέγχθηκαν ούτε ένα από αυτά δεν παρουσίασε απόκλιση από τα όρια τα οποία έχουν προτυποποιηθεί για τις αποδεκτές τιμές λιπαντικής ικανότητας. Συνεπώς, θα μπορούσε κάποιος να συμπεράνει ότι τα ναυτιλιακά καύσιμα που κυκλοφορούν στην αγορά δεν παρουσιάζουν κάποιο κίνδυνο κατά τη χρήση τους στις ναυτιλιακές μηχανές και λόγοι ανησυχίας δεν υφίστανται. Ωστόσο, έχουν παρουσιαστεί ενδεχόμενα κατά τα οποία εμπορικά ναυτιλιακά καύσιμα Diesel δημιούργησαν προβλήματα κατά τον ελλιμενισμό πλοίων. Μάλιστα, προκάλεσαν και εκτενείς αστοχίες στο σύστημα αντλιών των πλοίων στα οποία χρησιμοποιήθηκαν εντός ολίγων ορών.

Μετά τα συμβάντα αυτά, έγινε συλλογή δειγμάτων από τα καύσιμα αυτά και έγινε έλεγχός τους με την συσκευή HFRR – High Frequency Reciprocating Rig. Ο έλεγχος έγινε σύμφωνα με τις παραμέτρους που ορίζουν τα πρότυπα που αναγράφονται παραπάνω. Εντούτοις, τα καύσιμα αυτά όχι μόνο δεν παρουσίασαν προβλήματα στις τιμές της διαμέτρου φθοράς, αλλά όπως και τα δείγματα των οποίων τα αποτελέσματα αναρτήθηκαν στο γράφημα ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις λιπαντικής ικανότητας σε πολύ καλό βαθμό.

Συνετό θα είναι σε αυτό το σημείο να αναφερθεί, όπως και σε προηγούμενο μέρος αυτού του συγγράμματος ότι το πρότυπο CEC-F-06-A-96 και η μέθοδος ISO 12156-1 που χρησιμοποιήθηκε, βασίστηκαν και αναπτύχθηκαν σύμφωνα με μηχανές Diesel επίγειων οχημάτων (αυτοκίνητα, φορτηγά κτλ.). Ομολογουμένως, οι αρχές λειτουργίας των δύο ειδών μηχανών Diesel – επιγείων οχημάτων και πλοίων – είναι παρεμφερείς. Πάραυτα, θα πρέπει να γίνουν ορισμένες μεταβολές στις παραμέτρους οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά την διαδικασία πειραματισμού για να μπορέσει η μέθοδος να αποδώσει φερέγγυα αποτελέσματα όσον αφορά στη φθορά η οποία λαμβάνει χώρα στις αντλίες των ναυτιλιακών, πλέον, μηχανών. Αναφορά πρέπει να γίνει και στις συνθήκες οι οποίες επικρατούν κατά την έγχυση του καυσίμου στις ναυτιλιακές μηχανές σε σχέση με τις μηχανές επίγειων οχημάτων. Αυτό αναλύεται στις επόμενες παραγράφους.

*Common Rail System*

Το σύστημα Common Rail είναι η εξέλιξη του συστήματος έγχυσης καυσίμου (Fuel Injection System) το οποίο και έχει αρχίσει να υιοθετείται από τους κατασκευαστές ναυτιλιακών μηχανών. Στις μηχανές Diesel περιλαμβάνει ηλεκτρονικά ελεγχόμενες βαλβίδες οι οποίες εγχέουν το καύσιμο υπό υψηλή πίεση. Οι πιέσεις αυτές στις αντλίες των πλοίων φτάνουν μεγέθη της τάξης των 1000bar. Το σύστημα Common Rail τρίτης γενιάς περιλαμβάνει πιεζοηλεκτρικούς εγχυτές, οι οποίοι δίνουν ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στον έλεγχο του καυσίμου με δυνατότητα πιέσεων η οποία αγγίζει ακόμα και τα 1800bar.

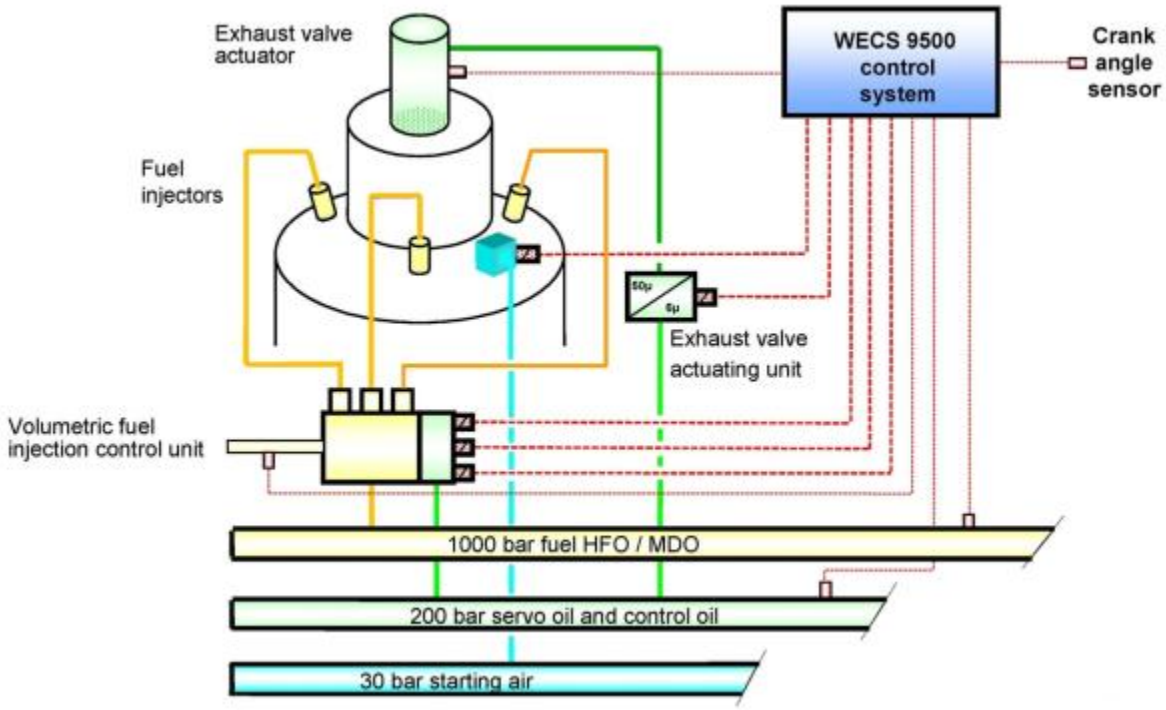
*Αρχή λειτουργίας*

Σωληνοειδείς ή πιεζοηλεκτρικές βαλβίδες κάνουν δυνατό τον ακριβή ηλεκτρονικό έλεγχο του χρόνου και της ποσότητας έγχυσης καυσίμου και η υψηλότερη πίεση η οποία καθίσταται δυνατή με το σύστημα αυτό παρέχει καλύτερο ψεκασμό του καυσίμου. Για τη μείωση του θορύβου της μηχανής, το ηλεκτρονικό σύστημα μπορεί να εγχύσει ένα μικρό ποσοστό καυσίμου πριν την εκκίνηση της κύριας διαδικασίας έγχυσης, μειώνοντας έτσι την εκρηκτικότητα και τον κραδασμό της διαδικασίας, καθώς επίσης και να βελτιστοποιήσει το συγχρονισμό και την ποσότητα έγχυσης για μεταβολές στην ποιότητα του καυσίμου, όπως σε περίπτωση ψυχρής εκκίνησης.

Οι μηχανές Common Rail χρειάζονται είτε πολύ μικρό (<10 δευτερόλεπτα) είτε σχεδόν καθόλου προθέρμανση, αναλόγως της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και παράγουν χαμηλότερο θόρυβο αλλά και λιγότερες εκπομπές αερίων σε σχέση με άλλες μηχανές που βασίζονται σε παλαιότερα συστήματα.

Στα συστήματα common rail, μία αντλία υψηλής πίεσης αποθηκεύει ένα ποσό καυσίμου σε υψηλή πίεση – μέχρι ή/και πάνω από 2000bar. Ο όρος common rail αναφέρεται στο γεγονός ότι όλοι οι εγχυτές καυσίμου τροφοδοτούνται από μία κοινή «πηγή» καυσίμου, η οποία δεν είναι τίποτα παραπάνω από ένα συμπιεστή όπου το καύσιμο αποθηκεύεται υπό υψηλή πίεση. Αυτός ο συμπιεστής τροφοδοτεί όλους τους εγχυτές με καύσιμο υψηλής πίεσης. Αυτό απλοποιεί και το σκοπό της αντλίας υψηλής πίεσης στο ότι χρειάζεται απλά να διατηρεί την ορισμένη πίεση σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο (είτε μέσω μηχανικού είτε ηλεκτρονικού ελέγχου). Όταν οι εγχυτές καυσίμου ενεργοποιούνται ηλεκτρικά, μία υδραυλική βαλβίδα (που περιλαμβάνει ένα στόμιο και ένα έμβολο) ανοίγει υδραυλικά ή μηχανικά και το καύσιμο ψεκάζεται στους κυλίνδρους υπό την επιθυμητή πίεση. Αφού η ενέργεια της πίεσης του καυσίμου αποθηκεύεται εξ' αποστάσεως και οι εγχυτές ενεργοποιούνται ηλεκτρικά, η πίεση έγχυσης στην αρχή και στο τέλος της έγχυσης είναι σχεδόν ίδια με αυτή που διατηρείται στον συμπιεστή, εξασφαλίζοντας έτσι μία σταθερή πίεση έγχυσης. Αν ο συμπιεστής, η αντλία και οι σωληνώσεις έχουν τα σωστά μεγέθη, τότε η πίεση και ο βαθμός έγχυσης θα είναι ο ίδιος για όλες τις εγχύσεις καυσίμου.

Ήδη κυκλοφορούν πλοία τα οποία είναι εξοπλισμένα με μηχανές που βασίζονται στο σύστημα Common Rail. Ένα από αυτά είναι το Bulk Carrier "Gypsum Centennial" στο οποίο έχει εγκατασταθεί μία μηχανή RT-flextης εταιρίας Wartsila/Sulzer.




*Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος Common Rail της μηχανής Sulzer RT-flex που έχει εγκατασταθεί στο πλοίο Gypsum Centennial[12]*

Όπως αναφέρθηκε στις αντλίες των μηχανών των πλοίων οι πιέσεις που αναπτύσσονται αγγίζουν τιμές της τάξης από 1000bar έως και 2000bar ή και παραπάνω. Οι πιέσεις αυτές είναι υπερβολικά μεγαλύτερες των αντίστοιχων πιέσεων που αναπτύσσονται στις αντλίες των μηχανών των επίγειων οχημάτων. Στα αυτοκίνητα οι πιέσεις οι οποίες εμφανίζονται είναι της τάξης των 10bar και στα φορτηγά ίσως αγγίξουν τιμές της τάξης των 30 με 40bar. Είναι εμφανές ότι οι τιμές πίεσης των αντλιών των ναυτιλιακών μηχανών είναι πολλαπλάσιες από τις αντίστοιχες των οχημάτων δρόμου.

*Πίεση Επαφής (Hertzian Contact Pressure)[13]*

Επιζητήθηκε κάποια βάση για να γίνει μεταβολή των παραμέτρων ώστε να συμβαδίζουν με τις συνθήκες που επικρατούν στις αντλίες των πλοίων. Η βάση αυτή βρέθηκε στην πίεση επαφής που εμφανίζεται μεταξύ δύο σημείων. Στην περίπτωση της συσκευής HFRR πίεση επαφής αναπτύσσεται στο σημείο στο οποίο το σφαιρικό δείγμα εφάπτεται του οριζοντίου δείγματος. Αν και μιλάμε για ελάχιστη επιφάνεια επαφής, πρέπει να σημειωθεί ότι στο σημείο αυτό το οριζόντιο δείγμα υφίσταται παραμόρφωση. Στην διεπιφάνεια αυτή αναπτύσσεται η Hertzian Contact Pressure με βάση την οποία μπορούμε να ορίσουμε τις τροποποιημένες παραμέτρους στις οποίες και θα διεξαχθούν οι νέοι έλεγχοι στη συσκευή HFRR.

Εφόσον στις αντλίες των πλοίων οι πιέσεις είναι πολλαπλάσιες από τις αντίστοιχες των αυτοκινήτων θα διαπιστωθεί αν η αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου κατά την ταλάντωση του βραχίονα επηρεάζει τη φθορά.

Υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

*Young's Modulus*: E = 210 GPα, το οποίο έχει την ίδια τιμή και για το σφαιρικό δοκίμιο και για το επίπεδο αφού πρόκειται για το ίδιο υλικό.

*Poisson's Ratio:* u = 0.3, το οποίο έχει την ίδια τιμή και για το σφαιρικό δοκίμιο και για το επίπεδο αφού πρόκειται για το ίδιο υλικό.

*Ακτίνα Σφαιρικού Δοκιμίου:* $R_A = 3*10^{-3}$ m, αφού η διάμετρος του σφαιρικού δοκιμίου είναι ίση με $6*10^{-3}$ m.

*Ακτίνα Επίπεδου Δοκιμίου:* Θεωρείται άπειρη αφού πρόκειται για επίπεδο.

*Μειωμένη Ακτίνα Καμπυλότητας*

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y}$$

Όπου

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{ax}} + \frac{1}{R_{bx}} = \frac{1}{3 * 10^{-3}} + \frac{1}{\infty} = 333.333 \Rightarrow R_x = 0.003$$

Και

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{ay}} + \frac{1}{R_{by}} = \frac{1}{3 * 10^{-3}} + \frac{1}{\infty} = 333.333 \Rightarrow R_y = 0.003$$

Άρα

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} = \frac{1}{0.003} + \frac{1}{0.003} = 666.667 \Rightarrow R' = 1.5 * 10^{-3} m$$

Με τους δείκτες a και b να απεικονίζουν τα στοιχεία του σφαιρικού και του επίπεδου δοκιμίου αντίστοιχα.

*Μειωμένο Young's Modulus*

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} * \left[\frac{1-u_A^2}{E_A} + \frac{1-u_B^2}{E_B}\right]$$

Όπου για ακόμη μια φορά οι δείκτες Α και Β απεικονίζουν τα στοιχεία του σφαιρικού και του επίπεδου δοκιμίου αντίστοιχα.

Έτσι τα μεγέθη παίρνουν τις τιμές αυτές:

$$u = u_A = u_B = 0.3 \text{ και}$$

$$E = E_A = E_B = 210\ GPa$$

Συνεπώς

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} * \left[\frac{1-u_A^2}{E_A} + \frac{1-u_B^2}{E_B}\right] = \frac{1}{2} * \left[\frac{1-0.3^2}{210} + \frac{1-0.3^2}{210}\right] = \frac{1}{2} * 0.00867 = 0.004335$$
$$\Rightarrow E' = 2.308 * 10^{11} Pa$$

Υπολογίζονται τα παρακάτω μεγέθη για τα τρία διαφορετικά φορτία τα οποία θα επιβληθούν στο εξής κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

*Διαστάσεις Επιφάνειας Επαφής*

- *200 grammars = 1.96 Newtons*

$$a = \left(\frac{3WR'}{E'}\right)^{1/3} = \left(\frac{3 * 1.96N * (1.5 * 10^{-3}m)}{2.308 * 10^{11} Pa}\right)^{1/3} \Rightarrow a = 0.03 * 10^{-3} m$$

- *500 grammars = 4.9 Newtons*

$$a = \left(\frac{3WR'}{E'}\right)^{1/3} = \left(\frac{3 * 4.9N * (1.5 * 10^{-3}m)}{2.308 * 10^{11} Pa}\right)^{1/3} \Rightarrow a = 0.05 * 10^{-3} m$$

- *1000 grammars = 9.81 Newtons*

$$a = \left(\frac{3WR'}{E'}\right)^{1/3} = \left(\frac{3 * 9.81N * (1.5 * 10^{-3}m)}{2.308 * 10^{11}Pa}\right)^{1/3} \Rightarrow a = 0.06 * 10^{-3}m$$

*<u>Μέση και Μέγιστη Πίεση Επαφής</u>*

- *200 grammars = 1.96 Newtons*

$$P_{max} = \frac{3W}{2\pi a^2} = \frac{3 * 1.96N}{2\pi(0.03 * 10^{-3})^2} \Rightarrow P_{max} = 0.82GPa$$

$$P_{average} = \frac{W}{\pi a^2} = \frac{1.96N}{\pi(0.03 * 10^{-3})^2} \Rightarrow P_{average} = 0.55GPa$$

- *500 grammars = 4.9 Newtons*

$$P_{max} = \frac{3W}{2\pi a^2} = \frac{3 * 4.9N}{2\pi(0.05 * 10^{-3})^2} \Rightarrow P_{max} = 1.12GPa$$

$$P_{average} = \frac{W}{\pi a^2} = \frac{4.9N}{\pi(0.05 * 10^{-3})^2} \Rightarrow P_{average} = 0.75GPa$$

- *1000 grammars = 9.81 Newtons*

$$P_{max} = \frac{3W}{2\pi a^2} = \frac{3 * 9.81N}{2\pi(0.06 * 10^{-3})^2} \Rightarrow P_{max} = 1.41GPa$$

$$P_{average} = \frac{W}{\pi a^2} = \frac{9.81N}{\pi(0.06 * 10^{-3})^2} \Rightarrow P_{average} = 0.94GPa$$

*Χρόνος Επιβολής Φόρτισης*

Λαμβάνοντας, επίσης, υπόψιν τους χρόνους λειτουργίας παρατηρείται πως οι αντλίες των πλοίων λειτουργούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Τα πλοία μπορεί να εκτελούν δρομολόγια τα οποία διαρκούν από μερικές μόνο ώρες σε μέρες ή/και μήνες. Γίνεται έτσι κατανοητό πως οι αντλίες των πλοίων καταπονούνται για πολύ περισσότερες ώρες σε σχέση με τις αντίστοιχες αντλίες των οχημάτων δρόμου.

Με γνώμονα το γεγονός αυτό αυξήθηκαν και οι χρόνοι επιβολής του φορτίου στις αντλίες. Συγκεκριμένα, ο χρόνος διπλασιάστηκε από τα 75 λεπτά στα 150 λεπτά.

*Αποτελέσματα συσκευής HFRR με εφαρμογή τροποποιημένων παραμέτρων*

Σε επόμενο βήμα επιλέχθηκαν 7 δείγματα, 5 εμπορικά ναυτιλιακά καύσιμα (DMX1, DMX2, DMA1, DMA2, DMB) και 2 καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (ULSD1, ULSD2) τα οποία ετέθησαν υπό έλεγχο στη συσκευή HFRR με το συνδυασμό των παραμέτρων. Οι παράμετροι που μετεβλήθησαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι ο χρόνος πειραματισμού και το φορτίο το οποίο επιβάλλεται κατά τη διάρκεια του πειράματος. Για να μη μεταβληθεί το είδος της φθοράς το οποίο αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής ενός ελέγχου με τη συσκευή HFRR, δηλαδή της τριβής «συγκόλλησης» (adhesive wear) δεν επιχειρήθηκε περαιτέρω αλλαγή στις υπόλοιπες παραμέτρους του πειράματος. Τουτέστιν, στο πλάτος της προκαλούμενης ταλάντωσης, στην συχνότητα της ταλάντωσης και στη θερμοκρασία προθέρμανσης του δείγματος.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν δύο τιμές χρονικής διάρκειας, τα 75 λεπτά και τα 150 λεπτά, και σε αυτές τις δύο τιμές εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές τιμές φορτίου, στα 200 γραμμάρια, στα 500 γραμμάρια και στο 1 κιλό. Επομένως, δημιουργείται ένα εύρος περιπτώσεων στις οποίες τα καύσιμα αυτά ελέγχονται για να διαπιστωθεί η ικανότητα τους να προστατεύουν τα μηχανικά μέρη τα οποία καταπονούνται σε διαφορετικές συνθήκες.

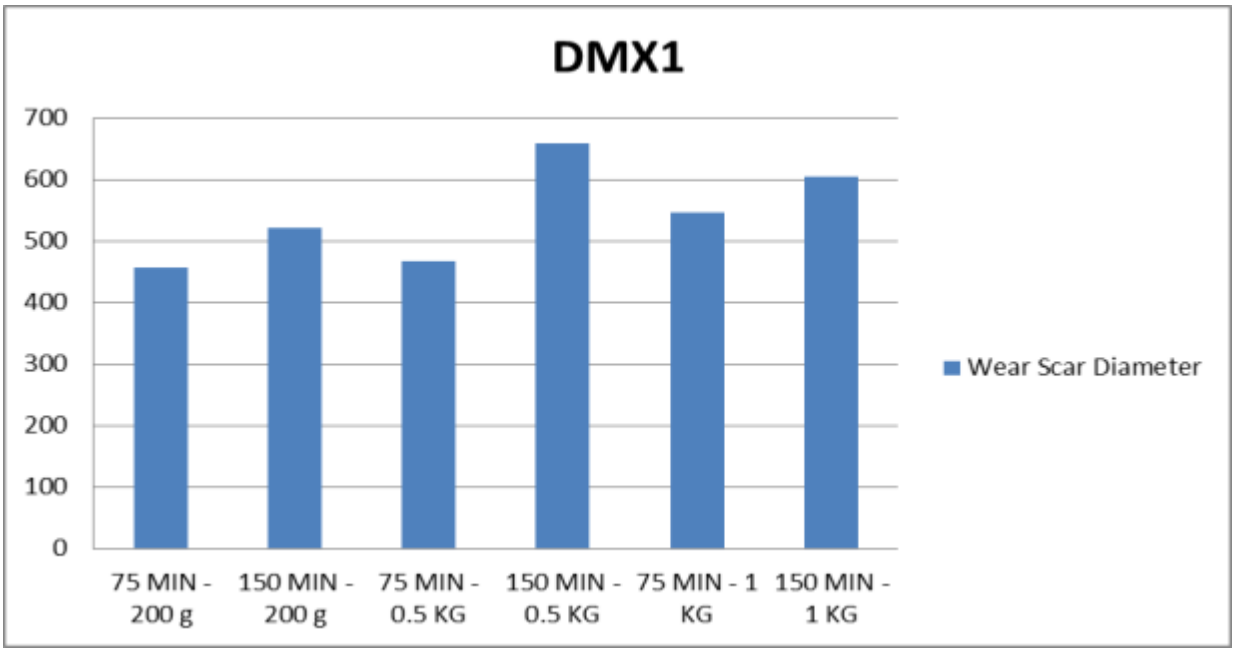
| ***Χρόνος (minutes)*** | ***Φορτίο (grammars)*** |
|---|---|
| 75 | 200 |
| | 500 |
| | 1000 |
| 150 | 200 |
| | 500 |
| | 1000 |

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων μπορεί να απεικονισθεί πλήρως η μεταβολή της φθοράς από τον ένα συνδυασμό χρόνου – φορτίου στον άλλο.

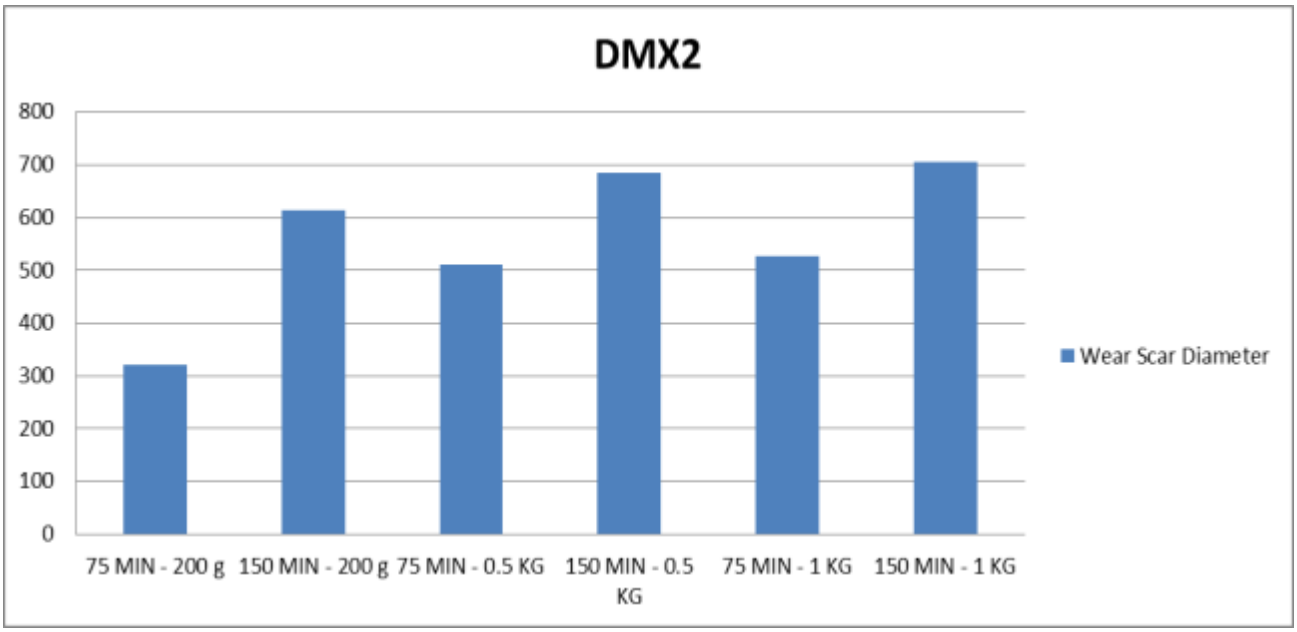
Παρατίθεται πίνακας με τις ιδιότητες των δειγμάτων τα οποία και ελέγχθηκαν:

| ***ΙΔΙΟΤΗΤΑ*** | ***Κινηματικό ιξώδες στους 40°C*** | ***Πυκνότητα στους 15°C*** | ***Νερό*** | ***Ποσοστό θείου*** | ***Αγωγιμότητα*** | ***Αριθμός Οξύτητας*** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ***ΔΕΙΓΜΑ*** | $mm^2$ / sec | $g/cm^3$ | ppm | % | pS/m | mg KOH/g |
| ***DMX1*** | 2,57 | 0,8365 | 53,5 | 0,08 | 20 | 0,10 |
| ***DMX2*** | 2,98 | 0,841 | 40 | 0,035 | 15 | 0,20 |
| ***DMA1*** | 5,93 | 0,8506 | 56,4 | 0,07 | 17 | 0,17 |
| ***DMA2*** | 3,60 | 0,8739 | 45,1 | 1,1 | 285 | 0,40 |
| ***DMB*** | 10,08 | 0,8748 | 139 | 1 | 40 | 0,35 |
| ***ULSD1*** | 3,34 | 0,8253 | 38 | 4,5ppm | 120 | 0,21 |
| ***ULSD2*** | 3,70 | 0,8385 | 30 | 5,5ppm | 2 | 0,25 |

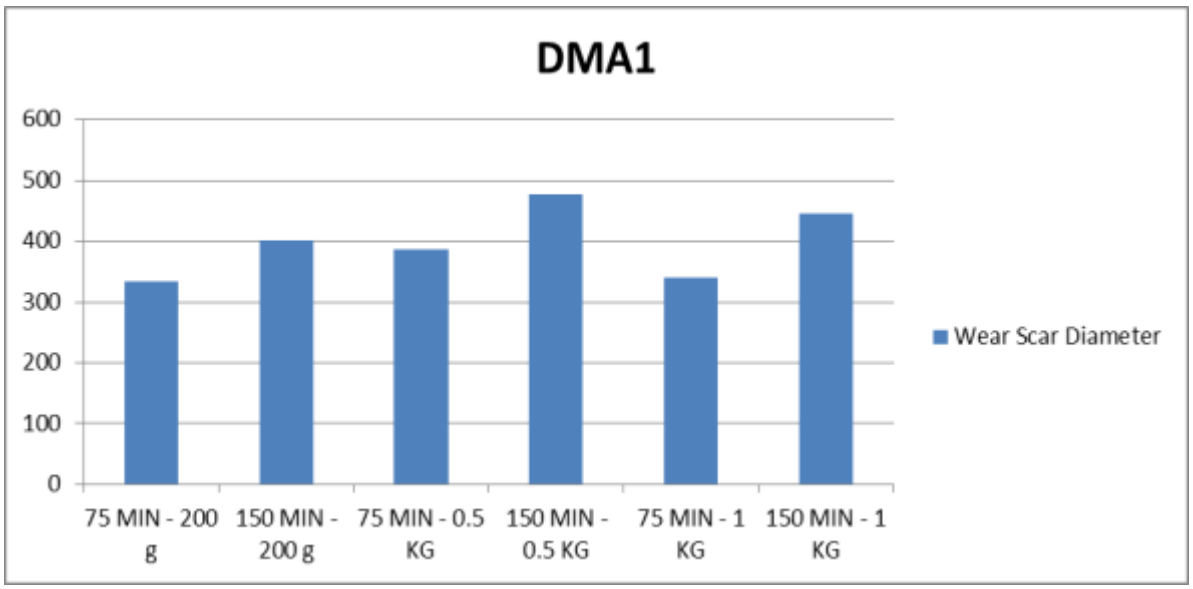
| ΔΕΙΓΜΑ DMX1 | |
|---|---|
| Παράμετροι | Διάμετρος φθοράς |
| ***75 MIN - 200 g*** | ***457*** |
| ***150 MIN - 200 g*** | ***522*** |
| ***75 MIN - 0.5 KG*** | ***467*** |
| ***150 MIN - 0.5 KG*** | ***659*** |
| ***75 MIN - 1 KG*** | ***548*** |
| ***150 MIN - 1 KG*** | ***606*** |



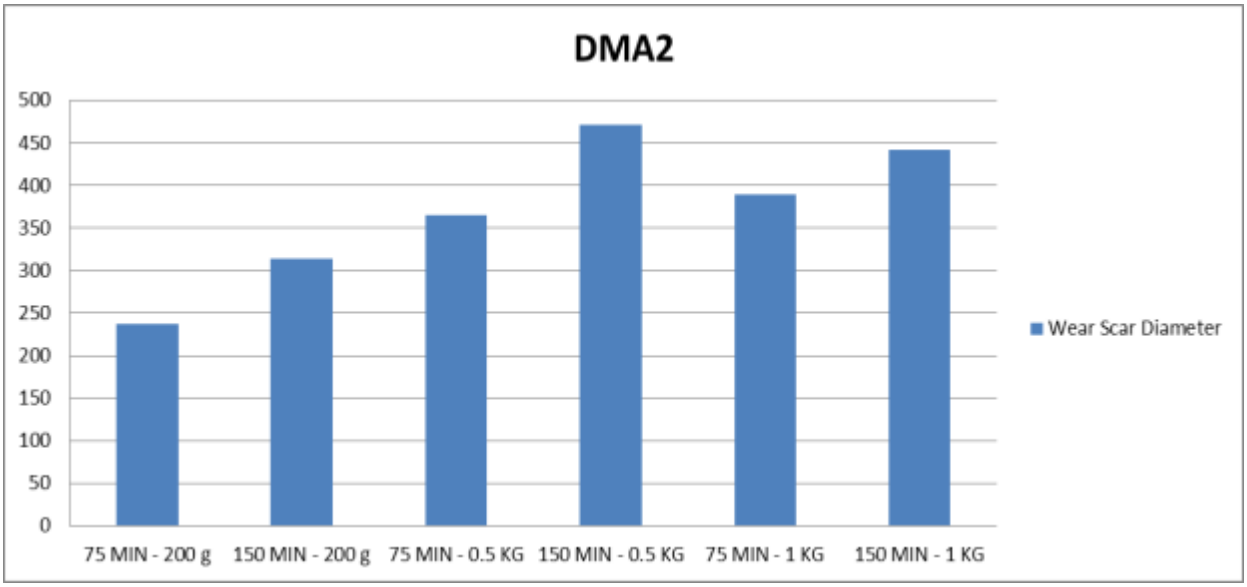
| ΔΕΙΓΜΑ DMX2 | |
|---|---|
| Παράμετροι | Διάμετρος φθοράς |
| ***75 MIN - 200 g*** | ***320*** |
| ***150 MIN - 200 g*** | ***614*** |
| ***75 MIN - 0.5 KG*** | ***512*** |
| ***150 MIN - 0.5 KG*** | ***685*** |
| ***75 MIN - 1 KG*** | ***527*** |
| ***150 MIN - 1 KG*** | ***705*** |



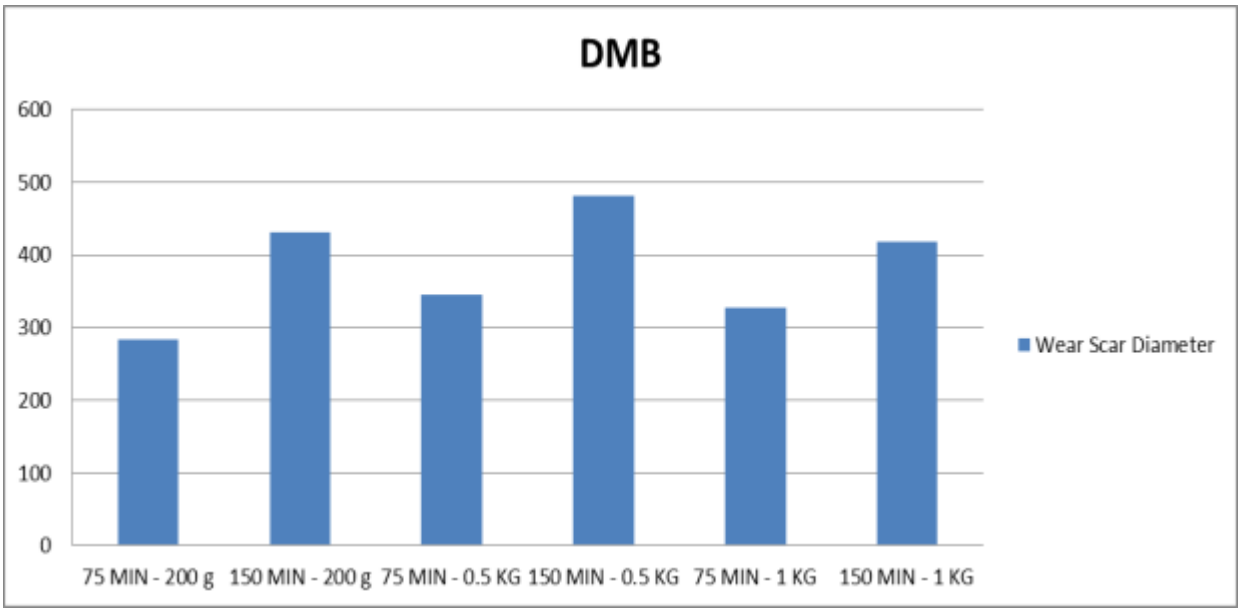
| ΔΕΙΓΜΑ DMA1 | |
|---|---|
| Παράμετροι | Διάμετρος φθοράς (μm) |
| ***75 MIN - 200 g*** | ***333*** |
| ***150 MIN - 200 g*** | ***402*** |
| ***75 MIN - 0.5 KG*** | ***386*** |
| ***150 MIN - 0.5 KG*** | ***477*** |
| ***75 MIN - 1 KG*** | ***340*** |
| ***150 MIN - 1 KG*** | ***446*** |



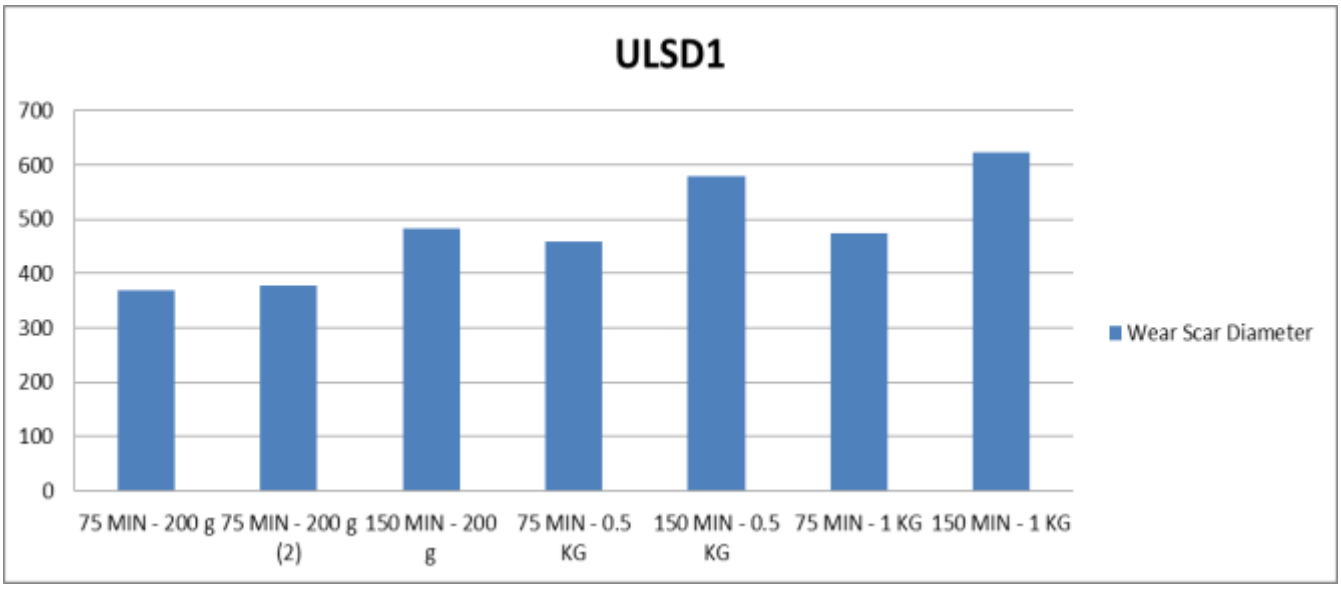
| ΔΕΙΓΜΑ DMA2 | |
|---|---|
| Παράμετροι | Διάμετρος φθοράς (μm) |
| ***75 MIN - 200 g*** | ***237*** |
| ***150 MIN - 200 g*** | ***314*** |
| ***75 MIN - 0.5 KG*** | ***366*** |
| ***150 MIN - 0.5 KG*** | ***472*** |
| ***75 MIN - 1 KG*** | ***390*** |
| ***150 MIN - 1 KG*** | ***442*** |



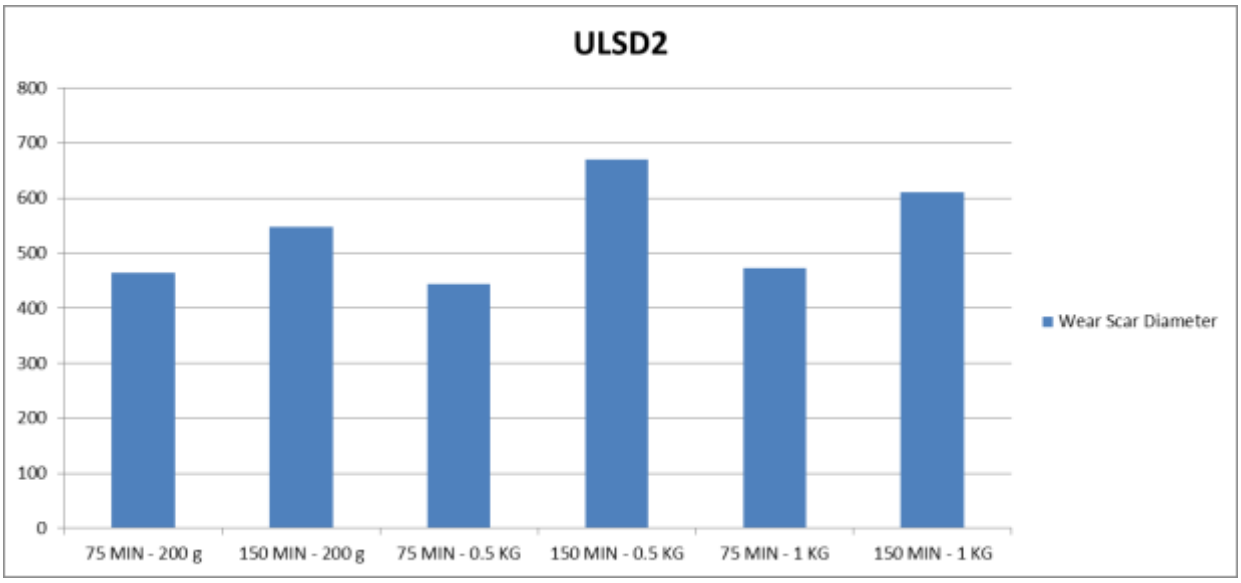
| ΔΕΙΓΜΑ DMB | |
|---|---|
| Παράμετροι | Διάμετρος φθοράς (μm) |
| ***75 MIN - 200 g*** | ***283*** |
| ***150 MIN - 200 g*** | ***432*** |
| ***75 MIN - 0.5 KG*** | ***345*** |
| ***150 MIN - 0.5 KG*** | ***481*** |
| ***75 MIN - 1 KG*** | ***328*** |
| ***150 MIN - 1 KG*** | ***419*** |



| ΔΕΙΓΜΑ ULSD1 | |
|---|---|
| Παράμετροι | Διάμετρος φθοράς (μm) |
| ***75 MIN - 200 g*** | ***369*** |
| ***150 MIN - 200 g*** | ***482*** |
| ***75 MIN - 0.5 KG*** | ***459*** |
| ***150 MIN - 0.5 KG*** | ***578*** |
| ***75 MIN - 1 KG*** | ***474*** |
| ***150 MIN - 1 KG*** | ***623*** |



| ΔΕΙΓΜΑ ULSD2 | |
|---|---|
| Παράμετροι | Διάμετρος φθοράς (μm) |
| ***75 MIN - 200 g*** | ***464*** |
| ***150 MIN - 200 g*** | ***548*** |
| ***75 MIN - 0.5 KG*** | ***444*** |
| ***150 MIN - 0.5 KG*** | ***671*** |
| ***75 MIN - 1 KG*** | ***473*** |
| ***150 MIN - 1 KG*** | ***611*** |

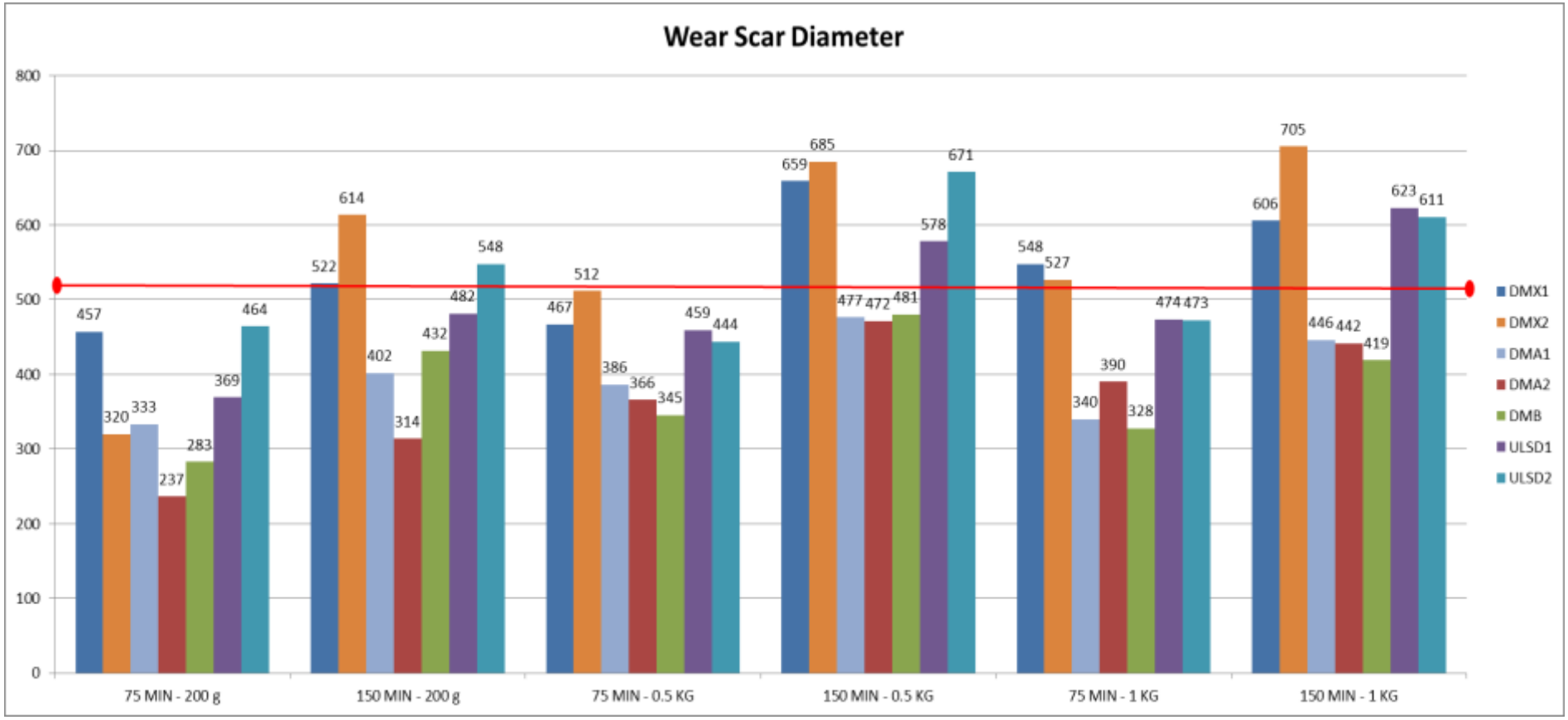


Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται όλα τα στοιχεία των δειγμάτων τα οποία ελέγχθηκαν και απεικονίζονται σε διαγράμματα οι μεταβολές των διαμέτρων φθοράς, του συντελεστή τριβής και του ποσοστού του φιλμ που δημιουργείται. Τα διαγράμματα έχουν σχεδιαστεί απεικονίζοντας τα δείγματα σε συγκεντρωτική μορφή ώστε να είναι ευδιάκριτες οι μεταβολές και από συνδυασμό σε συνδυασμό παραμέτρων αλλά και από δείγμα σε δείγμα.

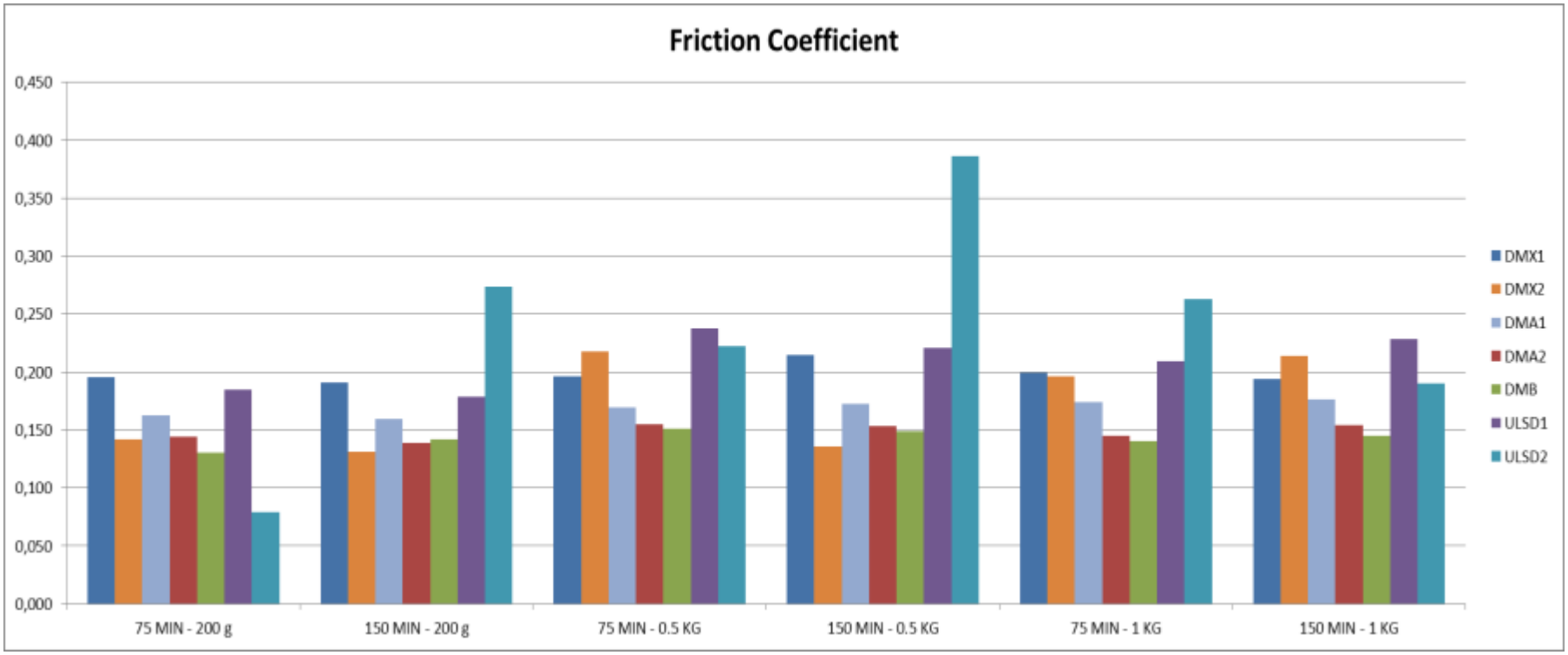
*Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων πειραματισμών*

| | ΔΕΙΓΜΑ | WS 1.4 (μm) IP | Av. Friction co. | Av. Film % |
|---|---|---|---|---|
| 75 MIN - 200 g | DMX1 | 457 | 0,196 | 55 |
| 150 MIN - 200 g | DMX1 | 522 | 0,191 | 65 |
| 75 MIN - 0.5 KG | DMX1 | 467 | 0,196 | 28 |
| 150 MIN - 0.5 KG | DMX1 | 659 | 0,214 | 12 |
| 75 MIN - 1 KG | DMX1 | 548 | 0,199 | 10 |
| 150 MIN - 1 KG | DMX1 | 606 | 0,194 | 16 |
| | ΔΕΙΓΜΑ | WS 1.4 (μm) IP | Av. Friction co. | Av. Film % |
| 75 MIN - 200 g | DMX2 | 320 | 0,142 | 88 |
| 150 MIN - 200 g | DMX2 | 614 | 0,131 | 44 |
| 75 MIN - 0.5 KG | DMX2 | 512 | 0,218 | 12 |
| 150 MIN - 0.5 KG | DMX2 | 685 | 0,136 | 16 |
| 75 MIN - 1 KG | DMX2 | 527 | 0,196 | 10 |
| 150 MIN - 1 KG | DMX2 | 705 | 0,214 | 13 |
| | ΔΕΙΓΜΑ | WS 1.4 (μm) IP | Av. Friction co. | Av. Film % |
| 75 MIN - 200 g | DMA1 | 333 | 0,1624 | 51 |
| 150 MIN - 200 g | DMA1 | 402 | 0,1596 | 59 |
| 75 MIN - 0.5 KG | DMA1 | 386 | 0,1692 | 25 |
| 150 MIN - 0.5 KG | DMA1 | 477 | 0,1724 | 21 |
| 75 MIN - 1 KG | DMA1 | 340 | 0,174 | 11 |
| 150 MIN - 1 KG | DMA1 | 446 | 0,1764 | 6 |
| | ΔΕΙΓΜΑ | WS 1.4 (μm) IP | Av. Friction co. | Av. Film % |
| 75 MIN - 200 g | DMA2 | 237 | 0,144 | 83 |
| 150 MIN - 200 g | DMA2 | 314 | 0,138 | 87 |
| 75 MIN - 0.5 KG | DMA2 | 366 | 0,155 | 49 |
| 150 MIN - 0.5 KG | DMA2 | 472 | 0,154 | 52 |
| 75 MIN - 1 KG | DMA2 | 390 | 0,145 | 33 |
| 150 MIN - 1 KG | DMA2 | 442 | 0,154 | 43 |
| | ΔΕΙΓΜΑ | WS 1.4 (μm) IP | Av. Friction co. | Av. Film % |
| 75 MIN - 200 g | DMB | 283 | 0,130 | 53 |
| 150 MIN - 200 g | DMB | 432 | 0,142 | 42 |
| 75 MIN - 0.5 KG | DMB | 345 | 0,151 | 16 |
| 150 MIN - 0.5 KG | DMB | 481 | 0,148 | 21 |
| 75 MIN - 1 KG | DMB | 328 | 0,140 | 26 |
| 150 MIN - 1 KG | DMB | 419 | 0,145 | 14 |
| | ΔΕΙΓΜΑ | WS 1.4 (μm) IP | Av. Friction co. | Av. Film % |
| 75 MIN - 200 g | ULSD1 | 369 | 0,184 | 60 |
| 150 MIN - 200 g | ULSD1 | 482 | 0,179 | 67 |
| 75 MIN - 0.5 KG | ULSD1 | 459 | 0,237 | 42 |
| 150 MIN - 0.5 KG | ULSD1 | 578 | 0,220 | 21 |
| 75 MIN - 1 KG | ULSD1 | 474 | 0,210 | 30 |
| 150 MIN - 1 KG | ULSD1 | 623 | 0,228 | 27 |
| | ΔΕΙΓΜΑ | WS 1.4 (μm) IP | Av. Friction co. | Av. Film % |
| 75 MIN - 200 g | ULSD2 | 464 | 0,079 | 81 |
| 150 MIN - 200 g | ULSD2 | 548 | 0,274 | 84 |
| 75 MIN - 0.5 KG | ULSD2 | 444 | 0,222 | 47 |
| 150 MIN - 0.5 KG | ULSD2 | 671 | 0,386 | 17 |
| 75 MIN - 1 KG | ULSD2 | 473 | 0,263 | 7 |
| 150 MIN - 1 KG | ULSD2 | 611 | 0,190 | 8 |

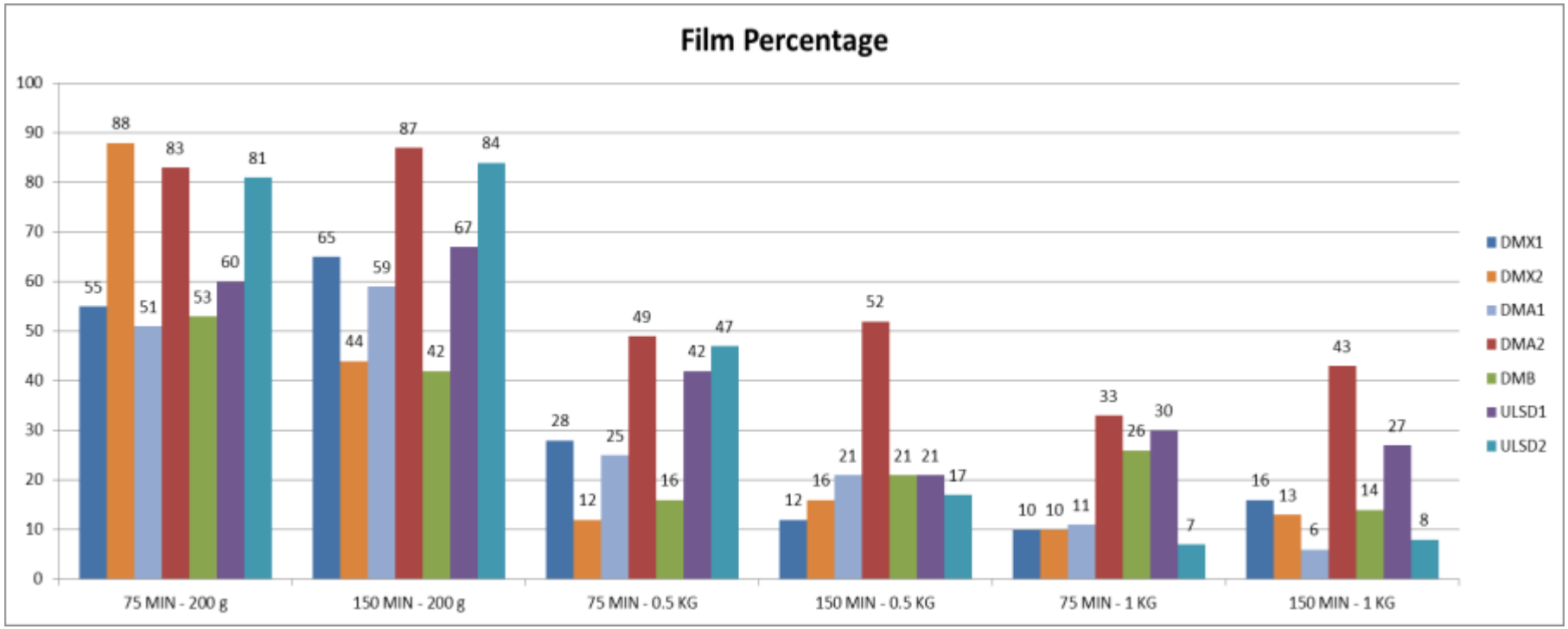
*Συγκεντρωτική απεικόνιση διαμέτρου φθοράς των μειγμάτων*



*Συγκεντρωτική απεικόνιση συντελεστή τριβής των μειγμάτων*



*Συγκεντρωτική απεικόνιση ποσοστού φιλμ των μειγμάτων*



Παρατηρείται από το συγκεντρωτικό διάγραμμα διαμέτρων φθοράς ότι πιο πολύ επιβαρύνονται τα δείγματα όταν έχουμε συνδυασμούς στην αύξηση και του χρόνου του πειράματος αλλά και του επιβαλλόμενου φορτίου. Μάλιστα, κατά την αύξηση μόνο μίας εκ των δύο παραμέτρων, δηλαδή κατά την αύξηση από 200 γραμμάρια σε 500 γραμμάρια με σταθερό το χρόνο των 75 λεπτών παρατηρείται αύξηση, η οποία όμως δεν είναι υπερβολική. Ομοίως, και κατά την αύξηση του χρόνου επιβολής του φορτίου από 75 σε 150 λεπτά κρατώντας το επιβαλλόμενο φορτίο σταθερό στα 200 γραμμάρια, αλλά η αύξηση του χρόνου παρουσιάζεται να είναι πιο δραστική στην πρόκληση φθοράς σε σχέση με την αύξηση του φορτίου. Σε συνδυασμούς παράλληλης αύξησης φορτίου και χρόνου επιβολής αυτού διακρίνεται αύξηση στην δημιουργούμενη διάμετρο φθοράς.

Όσον αφορά στις μεταβολές των παραμέτρων επιβαλλόμενου φορτίου από τα 500 γραμμάρια στο 1 κιλό είναι εμφανές ότι η αύξηση στη διάμετρο της φθοράς δεν παρουσιάζει υπερβολικές ανόδους. Αντιθέτως, στην μετάβαση από 500 γραμμάρια στο 1 κιλό με σταθερό χρόνο (είτε 75 είτε 150 λεπτά) η διάμετρος της φθοράς εμφανίζει και μείωση σε ορισμένα δείγματα. Συγκεκριμένα στα:

- 75 λεπτά
    - DMB
    - DMA1
- 150 λεπτά
    - DMX1
    - DMA1
    - DMA2
    - DMB
    - ULSD2

παρουσιάζεται και μείωση από τη φθορά που είχαν στους αντίστοιχους χρόνους με το μισό επιβαλλόμενο φορτίο.

Γενικά, ο διπλασιασμός του χρόνου επιβολής του φορτίου παρουσιάζεται πιο δραστικός στην αύξηση της διαμέτρου φθοράς. Η εφαρμογή μεγαλύτερου φορτίου εμφανίζει και αυτή αύξηση της προκαλούμενης φθοράς.

Όπως είναι εμφανές από το διάγραμμα διαμέτρου φθοράς, η επίδραση της αλλαγής του χρόνου επιφέρει μεγαλύτερες φθορές. Ειδικά στην περίπτωση του DMX2 η φθορά από το δείγμα που ελέγχεται στα 75 λεπτά και 200 γραμμάρια φαίνεται να διπλασιάζεται σχεδόν με το διπλασιασμό του χρόνου στα 150 λεπτά κρατώντας σταθερό το φορτίο.

Επίσης, παρατηρείται ότι η πιο μεγάλη αύξηση στην προκαλούμενη φθορά εμφανίστηκε σε ένα συνδυασμό δύο παραμέτρων του χρόνου και του φορτίου. Στις συνθήκες των 150 λεπτών και 500 γραμμαρίων όλα τα δείγματα παρουσιάζουν αύξηση της φθοράς.

Τα δείγματα DMX και ULSD ξεπερνούν και τα αποδεκτά όρια λιπαντικής ικανότητας για καύσιμα. Τα δείγματα DMA και DMB είναι εντός των αποδεκτών ορίων λιπαντικής ικανότητας σύμφωνα με το ISO 8217, που είναι τα 520μm, όμως και τα τρία δείγματα υπερβαίνουν το Ευρωπαϊκό όριο των 460μm.

Η περαιτέρω αύξηση του βάρους από τα 500 γραμμάρια στο 1 κιλό δεν εμφανίζει μεγάλες μεταβολές στη προκαλούμενη φθορά. Η διάμετρος φθοράς κρατείται στα ίδια επίπεδα όπως με τα 500 γραμμάρια με την τιμή του χρόνου να είναι σταθερή. Είναι αξιοπρόσεχτο το ότι σε πολλές περιπτώσεις, κρατώντας τον χρόνο σταθερό, η φθορά μειώνεται με την άνοδο του φορτίου στο 1 κιλό.

Εν κατακλείδι, οι τροποποιημένες συνθήκες αυτές των 150 λεπτών και 500 γραμμαρίων θα ήταν ιδανικές για χρήση σε περισσότερα δείγματα εμπορικών ναυτιλιακών καυσίμων για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά τους και η λειτουργία των καυσίμων αυτών μέσω της συσκευής HFRR και σε τι βαθμό πληροί η λιπαντική τους ικανότητα το όρια που τέθηκαν σε ισχύ με το ISO 8217:2010.

*Επίδραση βιοκαυσίμου στη Λιπαντική Ικανότητα*

Διεξήχθησαν περαιτέρω μετρήσεις με τη συσκευή HFRR άλλα τώρα πλέον οι παράμετροι ελέγχου μετεβλήθησαν. Επιλέχθηκαν δύο εκ των προηγουμένων δειγμάτων (DMX1 και DMA1) και αυτά συνδυάστηκαν με ένα βιοκαύσιμο. Συγκεκριμένα, έγινε έλεγχος του βιοκαυσίμου αυτού καθαυτού για να διαπιστωθούν οι λιπαντικές του ιδιότητες. Στη συνέχεια έγιναν μετρήσεις των καυσίμων DMX1 και DMA1 τα οποία και είχαν αναμειχθεί με το βιοκαύσιμο σε διάφορες αναλογίες (0.5%, 1%, 2% και 5%).

Οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν, αρχικά αντιστοιχούν σε αυτές που περιλαμβάνει η μέθοδος ISO 12156-1. Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψιν τις προηγούμενες παραγράφους αναζητήθηκε να γίνει έλεγχος των δειγμάτων και με τις τροποποιημένες συνθήκες των 150 λεπτών και 500 γραμμαρίων ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση της ανάμειξης του βιοκαυσίμου στη λιπαντική ικανότητα του καυσίμου βάσης.

Οι ιδιότητες του βιοκαυσίμου και των καυσίμων βάσης αναρτώνται στους ακόλουθους πίνακες.

| ***ΔΕΙΓΜΑ*** | ***Κινηματικό ιξώδες στους 40° C*** | ***Πυκνότητα στους 15° C*** | ***Νερό*** | ***Ποσοστό θείου*** |
|---|---|---|---|---|
| | mm² / sec | g/cm³ | ppm | % |
| ***DMX*** | 2,57 | 0,8365 | 53,5 | 0,08 |
| ***DMX +0,5% Biodiesel*** | 2,55 | 0,8365 | 47 | 0,08 |
| ***DMX +1% Biodiesel*** | 2,55 | 0,8373 | 48,2 | 0,08 |
| ***DMX +2% Biodiesel*** | 2,56 | 0,8375 | 50 | 0,08 |
| ***DMX +5% Biodiesel*** | 2,6 | 0,8381 | 61,4 | 0,08 |

| ***ΔΕΙΓΜΑ*** | ***Κινηματικό ιξώδες στους 40° C*** | ***Πυκνότητα στους 15° C*** | ***Νερό*** | ***Ποσοστό θείου*** |
|---|---|---|---|---|
| | mm² / sec | g/cm³ | ppm | % |
| ***DMA1*** | 5,93 | 0,8506 | 56,4 | 0,07 |
| ***DMA1 +0,5% Biodiesel*** | 5,91 | 0,8509 | 51 | 0,07 |
| ***DMA1 +1% Biodiesel*** | 5,89 | 0,8514 | 56,4 | 0,07 |
| ***DMA1 +2% Biodiesel*** | 5,86 | 0,8517 | 57,9 | 0,07 |
| ***DMA1 +5% Biodiesel*** | 5,76 | 0,8525 | 68,3 | 0,06 |

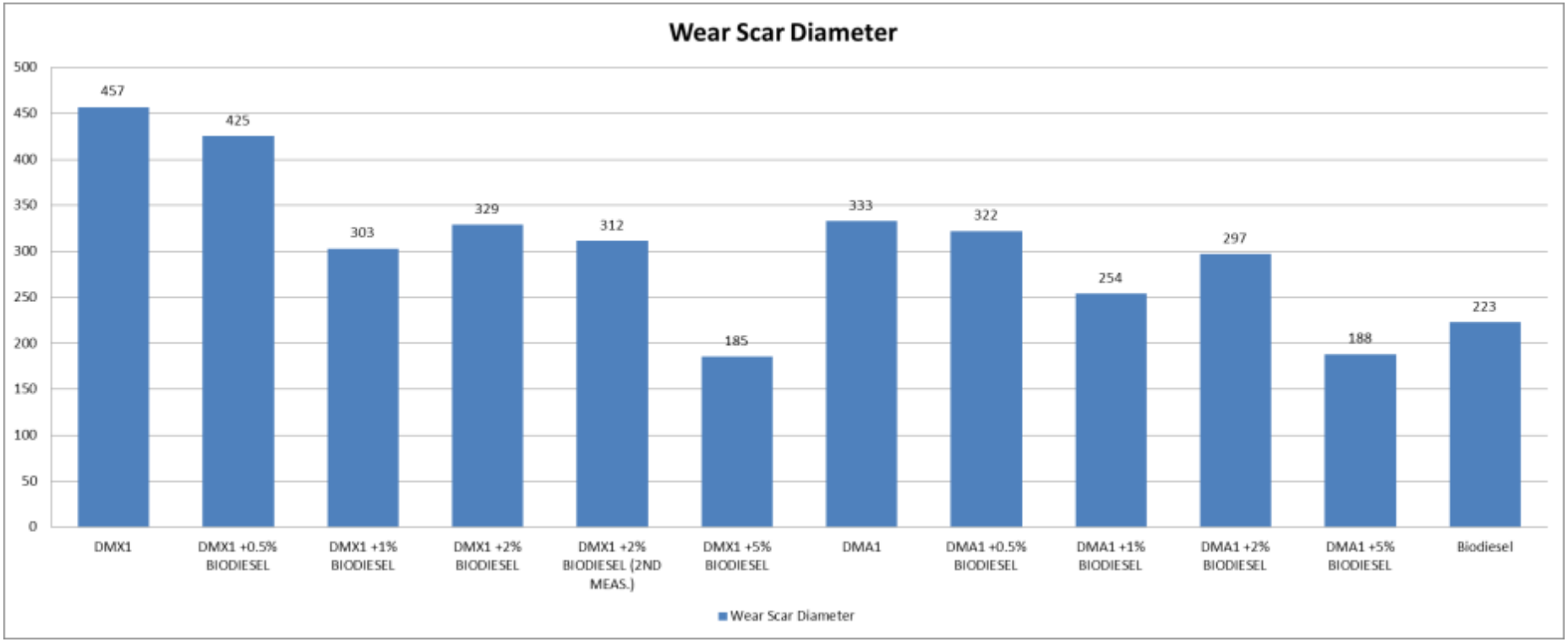
| ***BIODIESEL*** | | |
|---|---|---|
| ***ΙΔΙΟΤΗΤΑ*** | ***ΜΟΝΑΔΕΣ*** | ***ΤΙΜΗ*** |
| ***Κινηματικό ιξώδες στους 40°C*** | mm² / sec | 4,24 |
| ***Πυκνότητα στους 15°C*** | g/cm³ | 0,8849 |
| ***Νερό*** | ppm | 58,1 |
| ***Ποσοστό θείου*** | % | 0,0002 |

*Έλεγχος μειγμάτων με τις προτυποποιημένες συνθήκες*

Όπως και πριν, παρατίθεται πίνακας που περιλαμβάνει τις αρχικές και τελικές τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και τις αρχικές και τελικές τιμές της υγρασίας περιβάλλοντος. Επίσης, τις τιμές του συντελεστή τριβής και του ποσοστού του φιλμ που σχηματίζεται μεταξύ των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Τέλος, αναγράφονται οι διάμετροι φθοράς στους άξονες X και Y.

| ΔΕΙΓΜΑ | Scar X (μm) | Scar Y (μm) | Scar Av. (μm) | *WS 1.4 (μm) IP* | Av. Friction co. | Av. Film % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| DMX1 | 486,5 | 428,2 | 457,4 | ***457*** | 0,196 | 55 |
| DMX1 +0.5% BIODIESEL | 465,1 | 391,5 | 428,3 | ***425*** | 0,177 | 55 |
| DMX1 +1% BIODIESEL | 333,9 | 274,7 | 304,3 | ***303*** | 0,149 | 89 |
| DMX1 +2% BIODIESEL | 385 | 282 | 333,5 | ***329*** | 0,150 | 81 |
| DMX1 +2% BIODIESEL (2ND MEAS.) | 374,8 | 312,2 | 343,5 | ***312*** | 0,151 | 74 |
| DMX1 +5% BIODIESEL | 222,2 | 154,1 | 188,2 | ***185*** | 0,122 | 95 |
| DMA1 | 393,9 | 322,1 | 358,0 | ***333*** | 0,162 | 51 |
| DMA1 +0.5% BIODIESEL | 406,3 | 312,5 | 359,4 | ***322*** | 0,157 | 49 |
| DMA1 +1% BIODIESEL | 330,5 | 242,7 | 286,6 | ***254*** | 0,147 | 77 |
| DMA1 +2% BIODIESEL | 332,3 | 293,0 | 312,7 | ***297*** | 0,143 | 80 |
| DMA1 +5% BIODIESEL | 266,9 | 204,4 | 235,7 | ***188*** | 0,127 | 69 |
| Biodiesel | 260,0 | 182,0 | 221,0 | ***223*** | 0,114 | 99 |

Ακολουθεί μία γραφική αναπαράσταση των διαμέτρων φθοράς των δειγμάτων που ελέγχθηκαν:



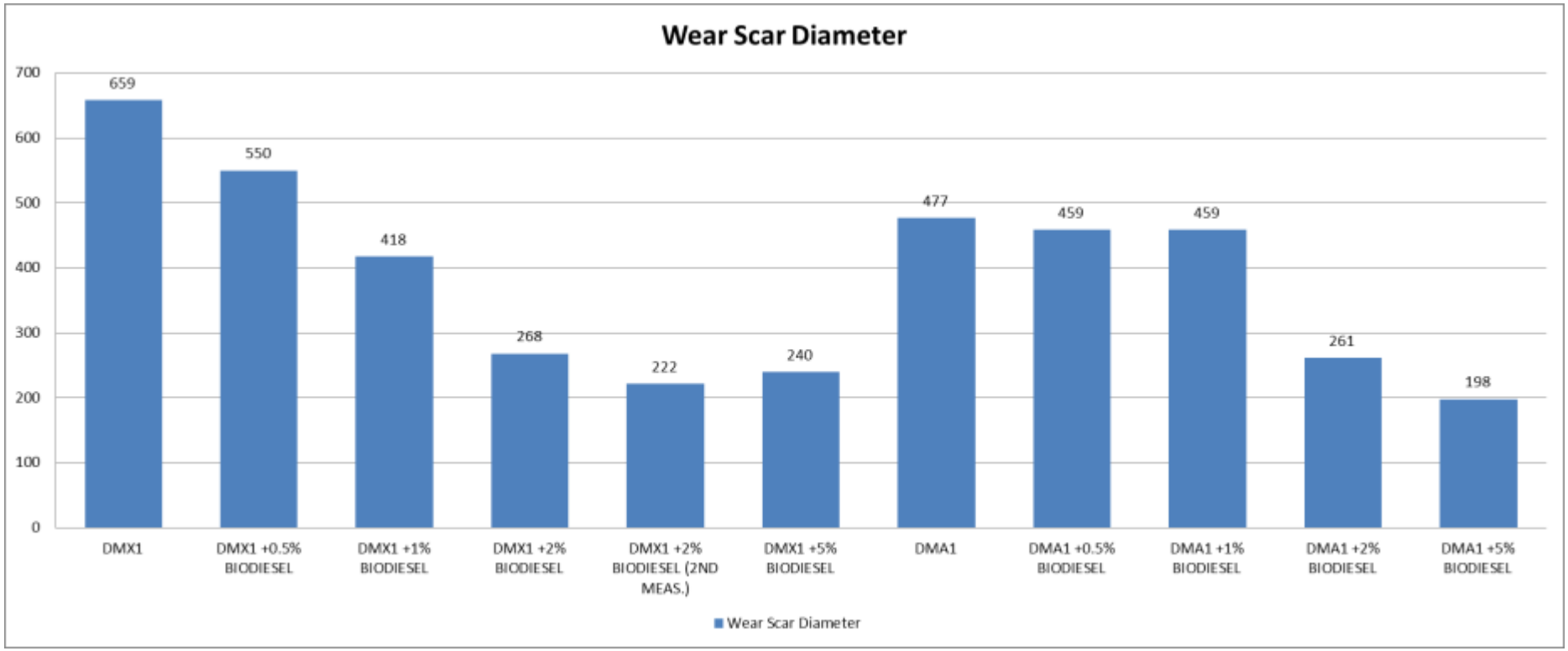

Όπως ήταν αναμενόμενο, προσθήκη βιοκαυσίμου ώστε να έχουμε το σχηματισμό μείγματος με το καύσιμο βάσης βελτιώνει τις λιπαντικές ιδιότητες του καυσίμου βάσης. Μάλιστα, αισθητή αρχίζει και γίνεται η επίδραση του βιοκαυσίμου στα δείγματα της τάξης του 1% όπου και η φθορά εμφανίζει αισθητή μείωση. Βέβαια, πριν η πτώση αυτή φτάσει στα επίπεδα του μείγματος 5%, παρουσιάζει μικρή άνοδο και στα δυο δείγματα DMX1 – βιοκαυσίμου και DMA1 – βιοκαυσίμου όπου η περιεκτικότητα είναι στο 2%.

*Έλεγχος μειγμάτων με τις τροποποιημένες συνθήκες*

Εν συνεχεία, έγινε διεξαγωγή των ελέγχων στις συνθήκες οι οποίες διαπιστώθηκε προηγουμένως ότι καταπονούν πιο δραστικά το σύστημα, δηλαδή στο συνδυασμό 150 λεπτών και 500 γραμμαρίων.

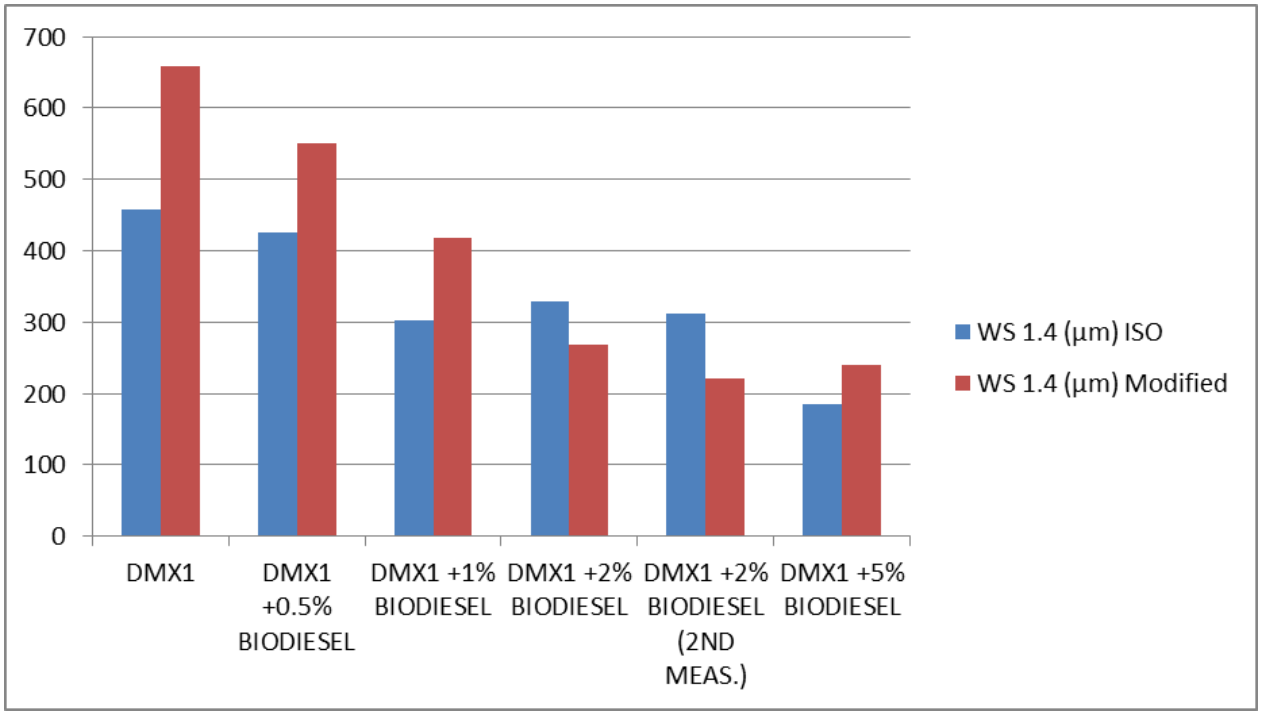
| ΔΕΙΓΜΑ | Scar X (μm) | Scar Y (μm) | Scar Av. (μm) | *WS 1.4 (μm) IP* | Av. Friction co. | Av. Film % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| DMX1 | 718,1 | 644,9 | 681,5 | ***659*** | 0,2144 | 12 |
| DMX1 +0.5% BIODIESEL | 603,0 | 538,0 | 570,5 | ***550*** | 0,1792 | 58 |
| DMX1 +1% BIODIESEL | 483,1 | 404,7 | 443,9 | ***418*** | 0,152 | 68 |
| DMX1 +2% BIODIESEL | 321,4 | 225,0 | 273,2 | ***268*** | 0,1344 | 90 |
| DMX1 +2% BIODIESEL (2ND MEAS.) | 268,5 | 196,8 | 232,7 | ***222*** | 0,1356 | 95 |
| DMX1 +5% BIODIESEL | 271,6 | 200,8 | 236,2 | ***240*** | 0,1188 | 96 |
| DMA1 | 518,7 | 485,6 | 502,2 | ***477*** | 0,1724 | 21 |
| DMA1 +0.5% BIODIESEL | 527,0 | 442,2 | 484,6 | ***459*** | 0,1624 | 39 |
| DMA1 +1% BIODIESEL | 537,5 | 445,3 | 491,4 | ***459*** | 0,152 | 40 |
| DMA1 +2% BIODIESEL | 311,0 | 241,0 | 276,0 | ***261*** | 0,1312 | 92 |
| DMA1 +5% BIODIESEL | 288,4 | 200,0 | 244,2 | ***198*** | 0,1248 | 94 |

Ακολουθεί μία γραφική αναπαράσταση των διαμέτρων φθοράς των δειγμάτων που ελέγχθηκαν στα 150 λεπτά και 500 γραμμάρια:



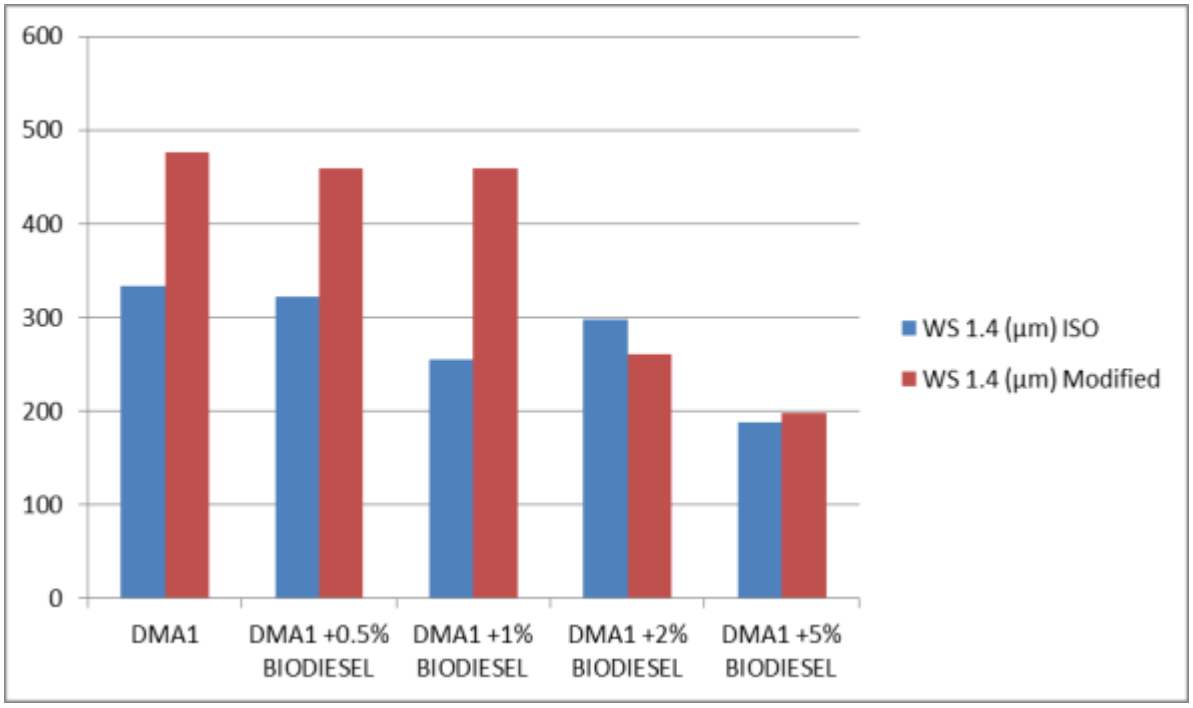
*Δείγμα DMX1*

| ΔΕΙΓΜΑ | *WS 1.4 (μm) ISO* | *WS 1.4 (μm) Modified* |
|---|---|---|
| DMX1 | ***457*** | ***659*** |
| DMX1 +0.5% BIODIESEL | ***425*** | ***550*** |
| DMX1 +1% BIODIESEL | ***303*** | ***418*** |
| DMX1 +2% BIODIESEL | ***329*** | ***268*** |
| DMX1 +2% BIODIESEL (2ND MEAS.) | ***312*** | ***222*** |
| DMX1 +5% BIODIESEL | ***185*** | ***240*** |

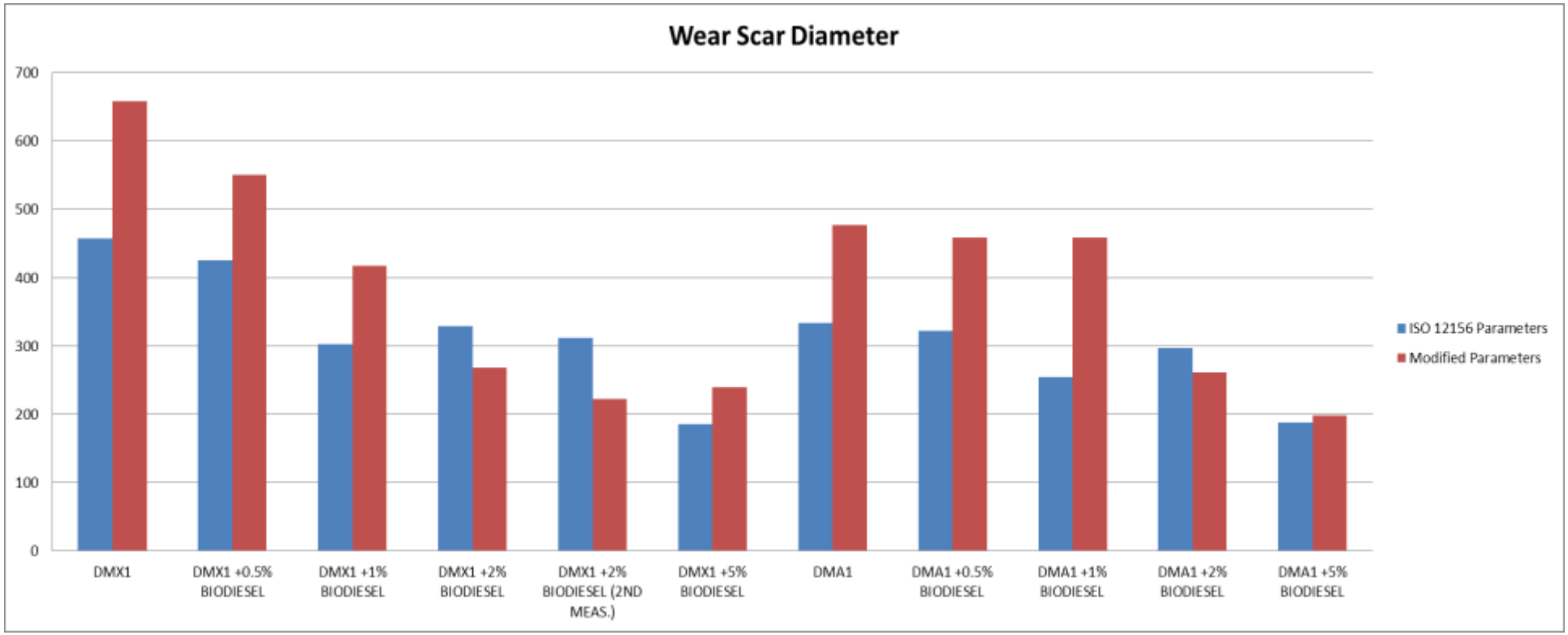


*Δείγμα DMA1*

| ΔΕΙΓΜΑ | *WS 1.4 (μm) ISO* | *WS 1.4 (μm) Modified* |
|---|---|---|
| DMA1 | ***333*** | ***477*** |
| DMA1 +0.5% BIODIESEL | ***322*** | ***459*** |
| DMA1 +1% BIODIESEL | ***254*** | ***459*** |
| DMA1 +2% BIODIESEL | ***297*** | ***261*** |
| DMA1 +5% BIODIESEL | ***188*** | ***198*** |



Παρακάτω, γίνεται μια συγκριτική απεικόνιση των διαμέτρων φθοράς για τα δείγματα που ελέγχθηκαν και στις δύο περιπτώσεις. Στις παραμέτρους του ISO 12156 και τις νέες παραμέτρους που ορίστηκαν για τη διεξαγωγή του καινούριου ελέγχου με 150 λεπτά και φορτίο 500 γραμμαρίων.



Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα γίνεται φανερό πως η φθορά ακολουθεί την ίδια μεταβολή είτε στις κλασσικές συνθήκες είτε στις τροποποιημένες μέχρι το μείγμα του 1% βιοκαυσίμου. Η διαφορά στη φθορά που παρουσιάζεται ανάμεσα στις κλασσικές συνθήκες και στις τροποποιημένες δεν μειώνεται μέχρι και τη μέτρηση για το μείγμα 1% κ.ό. με τη φθορά στις τροποποιημένες συνθήκες να είναι σταθερά πιο μεγάλη.

Όμως, στο μείγμα 2% κ.ό. έχουμε αντιστροφή των αποτελεσμάτων με τη φθορά στις κλασσικές συνθήκες να είναι πιο αυξημένη από την αντίστοιχη των τροποποιημένων. Για να επιβεβαιωθεί το αποτέλεσμα και να εξασφαλιστεί πως δεν συνέβησαν λάθη κατά τη διεξαγωγή της μέτρησης επιχειρήθηκε επανάληψη του πειράματος με τη συσκευή HFRR, κατά την οποία και ελήφθησαν αποτελέσματα εντός της επαναληψιμότητας, καθώς διακρίνεται και στο διάγραμμα αλλά και στους προηγούμενους πίνακες. Ορθό είναι να αναφερθεί σε αυτό το σημείο πως η χρήση της συσκευής HFRR για την εκτίμηση της λιπαντικής ικανότητας καυσίμων περιλαμβάνει και τον παράγοντα του κόστους. Μία και μόνο μέτρηση με τη συσκευή αυτή κοστίζει περισσότερο από ότι κοστίζουν όλοι οι βασικοί έλεγχοι και μετρήσεις που μπορούν να ζητηθούν για ένα καύσιμο. Εν συνεπεία, δεν μπορούν να γίνουν επαναλαμβανόμενοι έλεγχοι σε μεγάλο βαθμό για τα ίδια δείγματα χωρίς να υπάρχει κάποιος λόγος. Γι’ αυτό και ο επανέλεγχος διεξήχθη μόνο για ένα εκ των δύο δειγμάτων που περιέχουν βιοκαύσιμο σε ποσοστό 2% κ.ό., δηλαδή το DMX1, παρόλο που την ίδια συμπεριφορά παρουσίασε και το μείγμα με καύσιμο βάσης το DMA1.

Σε μεγαλύτερα ποσοστά ανάμειξης, δηλαδή στα μείγματα με περιεκτικότητα 5%, η λιπαντική ικανότητα του μείγματος φαίνεται να επανέρχεται στην ίδια συμπεριφορά με τα προηγούμενα μείγματα του 0.5% και 1%.

## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απαίτηση για καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο με τις τωρινές ή/και επικείμενες προδιαγραφές ναυτιλιακών καυσίμων έχουν μεταβάλλει τη λιπαντική τους ικανότητα σε μεγάλο βαθμό.

Τα νέα εμπορικά ναυτιλιακά καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο ίσως να απαιτούν διαφορετική αντιμετώπιση όσον αφορά στα προβλήματα που προκύπτουν από τη μείωση της λιπαντικής τους ικανότητας, είτε αυτό αφορά σε αλλαγή του τρόπου εκτίμησης της λιπαντικής ικανότητας ή σε αναζήτηση εναλλακτικών μεθόδων προστασίας των αντλιών. Ήδη αναφέρθηκε πως το πρότυπο το οποίο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της λιπαντικής ικανότητας των ναυτιλιακών καυσίμων βασίστηκε σε δεδομένα που αφορούν αντλίες οχημάτων ξηράς και κατά συνέπεια, δεν είναι δυνατόν να προσομοιώσει στο μέγιστο τις συνθήκες οι οποίες επικρατούν κατά τη λειτουργία των ναυτικών μηχανών diesel και των αντλιών έγχυσης καυσίμου αυτών.

Τελικά, η παρούσα διπλωματική εργασία συνιστά ένα πρώτο βήμα, μία πρώτη προσπάθεια για την ανάλυση και την μελέτη του θέματος της λιπαντικής ικανότητας με χρήση της συσκευής HFRR υπό το πρίσμα των νέων και, πιθανώς, μελλοντικών προδιαγραφών που θα εφαρμοστούν όσον αφορά τα εμπορικά ναυτιλιακά καύσιμα. Όσο συνεχίζουν να υπάρχουν προβλήματα εκπομπών αερίων στο περιβάλλον και όσο όλο και περισσότερες περιοχές στρέφονται προς τον IMO για να εισέλθουν στις Special Emission Control Areas, θα γίνεται όλο και πιο αναγκαία η περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας των χρησιμοποιούμενων καυσίμων και η τροποποίησή τους ώστε να είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον, ακόμα και αν η ευχρηστία τους υπεισέλθει σε δεύτερη μοίρα.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας υποδεικνύουν πως ναυτιλιακά καύσιμα τα οποία φαίνεται πως ικανοποιούν τις απαιτήσεις λιπαντικής ικανότητας του ISO 8217:2010, επιδεικνύουν υψηλή φθορά στις τροποποιημένες συνθήκες της μεθόδου ISO 12156-1 με τη συσκευή HFRR και ενδέχεται η χρήση τους να επιδρά δυσμενώς στη λειτουργία των αντλιών των πλοίων. Στην ελλιπή εκτίμηση της λιπαντικής ικανότητας μπορούν να αποδοθούν και μία πληθώρα αστοχιών και βλαβών συστημάτων αντλιών σε πλοία, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο σημείο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η χρήση βιοκαυσίμων σε συνδυασμό με τα καύσιμα βάσης ως απάντηση στα προβλήματα λιπαντικής ικανότητας έχει αρχίσει και έρχεται στο προσκήνιο. Όμως, εκτενείς μελέτες οι οποίες να προσφέρουν φερέγγυα αποτελέσματα για τη δυνατότητα χρήσης βιοκαυσίμων στο θαλάσσιο περιβάλλον δεν είναι διαθέσιμες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε έλεγχος για την επίδραση της χρήση βιοκαυσίμου ώστε να αυξηθεί η λιπαντική ικανότητα. Βεβαίως, περιορισμοί και διαθεσιμότητας δειγμάτων βιοκαυσίμου αλλά και κόστους επέτρεψαν τη χρήση μόνο ενός βιοκαυσίμου σε συνδυασμό με μόλις δύο καύσιμα βάσης. Αν ληφθεί υπόψιν το εύρος διαθέσιμων βιοπαραγώγων και οι παράμετροι που αφορούν στην παραγωγή τους, στην αποθήκευσή τους και στη μεταφορά τους γίνεται απαραίτητη η εκτενής έρευνα ώστε να διαπιστωθούν επακριβώς οι επιδράσεις της χρήσης

τους για ανάμειξη με καύσιμα βάσης. Αυτό γίνεται ακόμη πιο σημαντικό όταν συνδυαστεί με την έλλειψη δεδομένων της συμπεριφοράς των βιοκαυσίμων στο θαλάσσιο περιβάλλον και στις ναυτικές μηχανές. Επιπροσθέτως, πρέπει να εξεταστούν και άλλες ιδιότητες των βιοκαυσίμων με βάση την αρχή του «di minimis» όσον αφορά στο ISO 8217:2010.

Εν κατακλείδι, το θέμα των νέων προδιαγραφών ναυτιλιακών καυσίμων αποτελεί πρόσφορο έδαφος για μια πληθώρα μελετών, καθώς τα προβλήματα που ανακύπτουν με τη μείωση της περιεκτικότητας σε θείο περιόρισαν το εύρος των καυσίμων που είναι αποδεκτή η χρήση τους αλλά αύξησαν και το κόστος, αφού η παραγωγή καυσίμων χαμηλού θείου είναι πιο ακριβή. Στα πλοία η λιπαντική ικανότητα είναι ακόμη πιο σημαντική, αφού υπεισέρχεται και ο παράγοντας της ασφάλειας. Οι συνθήκες εκτίμησης της λιπαντικής ικανότητας που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σα βάση για περαιτέρω μελέτη της λιπαντικής ικανότητας των ναυτιλιακών καυσίμων, ώστε να δημιουργηθεί ένα πρότυπο ελέγχου αποκλειστικά για τις αντλίες καυσίμων των πλοίων και να αποφευχθούν αστοχίες των αντλιών στο μέλλον.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

[1] IMO – INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION http://www.imo.org/ourwork/environment/pollutionprevention/specialareasundermarpol/ Pages/ Default.aspx.

[2] Frequently Asked Questions about the Emission Control Area Application Process, Office of Transportation and Air Quality, EPA-420-F-09-001, January 2009.

[3] ISO 8217: Standards for Marine Distillate and Marine Residual Fuels.

[4] Safety and Integrity of Marine Fuel Pumps Operating on 0.1% Sulfur Marine Gas Oil, Ralph E. Lewis, Power Research Inc, December 27, 2009.

[5] http://www.stle.org/resources/lubelearn/lubrication/default.aspx#stribeck. STLE – Society of Tribologists and Lubrication Engineers.

[6] Τεχνολογία Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου, Υδρογονοκατεργασία – Υδρογονοπυρόλυση, Ε. Λόης, Δ. Καρώνης.

[7] Νέες Προδιαγραφές Ναυτιλιακών Καυσίμων και η Εφαρμογή των Νέων Κανονισμών, Νάϊας**,** Ημερομηνία μη Διαθέσιμη.

[8] Review of biodiesel composition, properties, and specifications - Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 1, January 2012.

[9] Development of Laboratory Tests to Predict the Lubricity Properties of Diesel Fuels and their Application to the Development of Highly Refined Diesel Fuels, C. Bovington and R. Caprotti, Exxon Chemicals, Abingdon, UK/ K. Meyer, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany / H.A. Spikes, Imperial College, London, UK, Tribotest journal 2-2, December 1995.

[10] ISO 12156-1: Diesel Fuel – Assessment of Lubricity using the High Frequency Reciprocating Rig (HFRR).

[11] ASTM D6078: Standard Test Method for Evaluating Lubricity of Diesel Fuels by the Scuffing Load Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluator (SL-BOCLE).

[12] Sulzer Common Rail Electronically-Controlled Engines for Today and the Future Sulzer RT-flex System, Edition May 2003.

[13] Engineering Tribology, Third Edition, Gwidon W. Stachowiak School of Mechanical Engineering, University of Western Australia, Perth, Australia / Andrew W. Bachelor School of Engineering, Monash University Malaysia, Bandar Sunway, Selangor, Malaysia
ISBN – 13: 978-0-7506-7836-0.

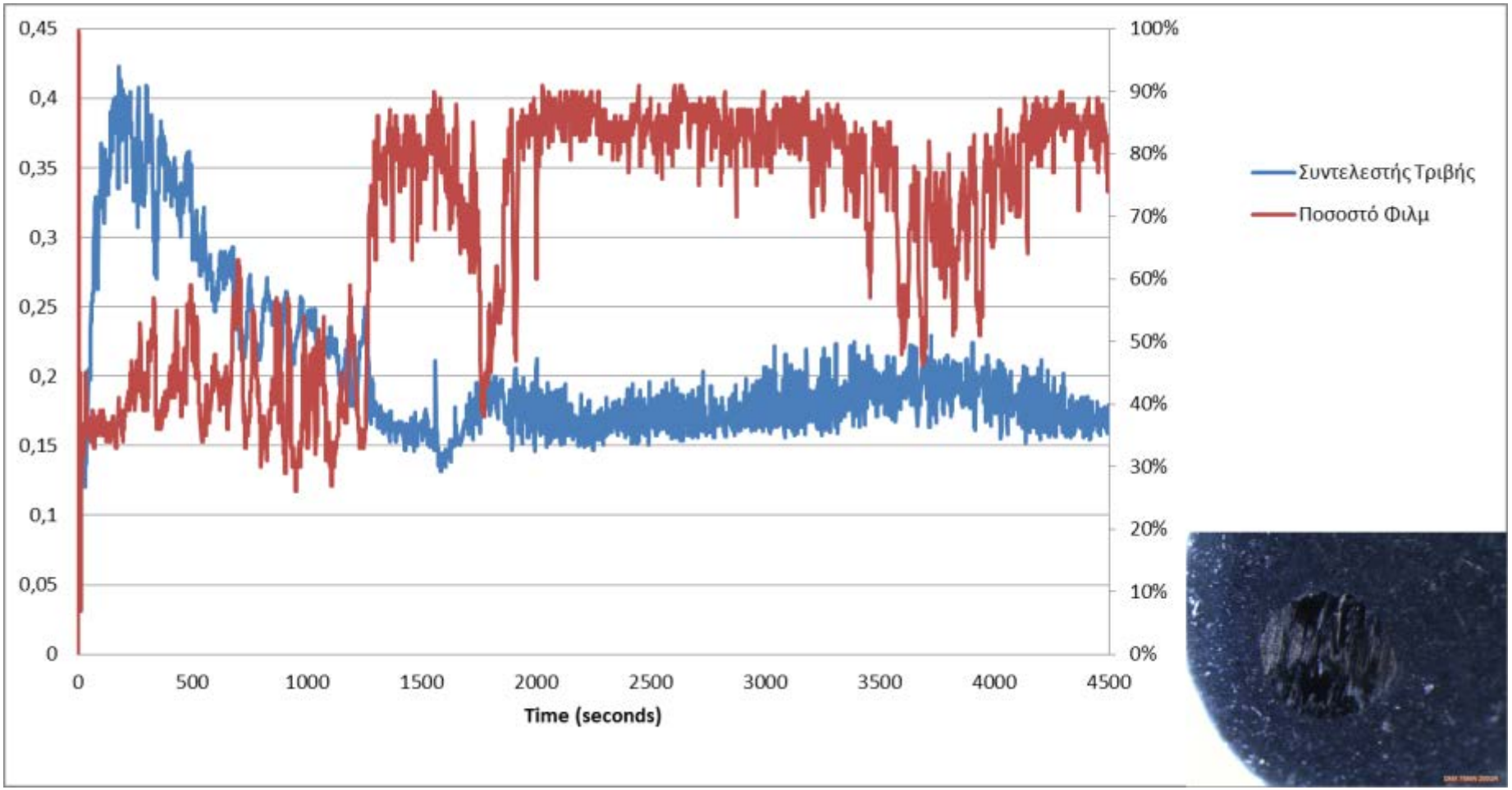
Χρήσιμα Βιβλιογραφικά Κείμενα και Μελέτες – Έρευνες:


- Common Rail At Sea: The Sulzer RT-flex Engine, Kaspar Aeberli, Wartsila Switzerland Ltd, Winterthur.
- Use of Common Rail Injection Systems in Large Diesel Engines for Marine Applications, Lambros Kaiktsis, Laboratory of Marine Engineering, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens, SNAME Technical Resource Library, May 2004.
- Impact of MARPOL Annex VI Regulations on Marine Fuels Supply, Maoqi Feng, Chemical Engineering Department, Division of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Research Institute, San Antonio.
- The Characterisation of Engine Liner Wear Using Novel Bearing Area Curve Parameters.
- Effects of specific fatty acid methyl esters on diesel fuel lubricity, Daniel P. Geller, John W. Goodrum, Department of Biological and Agricultural Engineering, Dritmier Engineering Center, University of Georgia, 10 July 2004.
- Lubricity of Components of Biodiesel and Petrodiesel. The Origin of Biodiesel Lubricity, Gerhard Knothe, Kevin R. Steidley, National Center for Agricultural Utilization Research, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, February 18, 2005.
- Fuel Ratings Symposium 2010 "HFRR Workshop – Testing and Best Practices", October 2010, Matthew Berwick.
- Biodiesel from Various Vegetable Oils as the Lubricity Additive for Ultra Low Sulphur Diesel (ULSD), Subongkoj Topaiboul*, Nuwong Chollacoop, and Kanit Treesuwan, Energy Research Group, National Metal and Materials Technology Centre (MTEC).

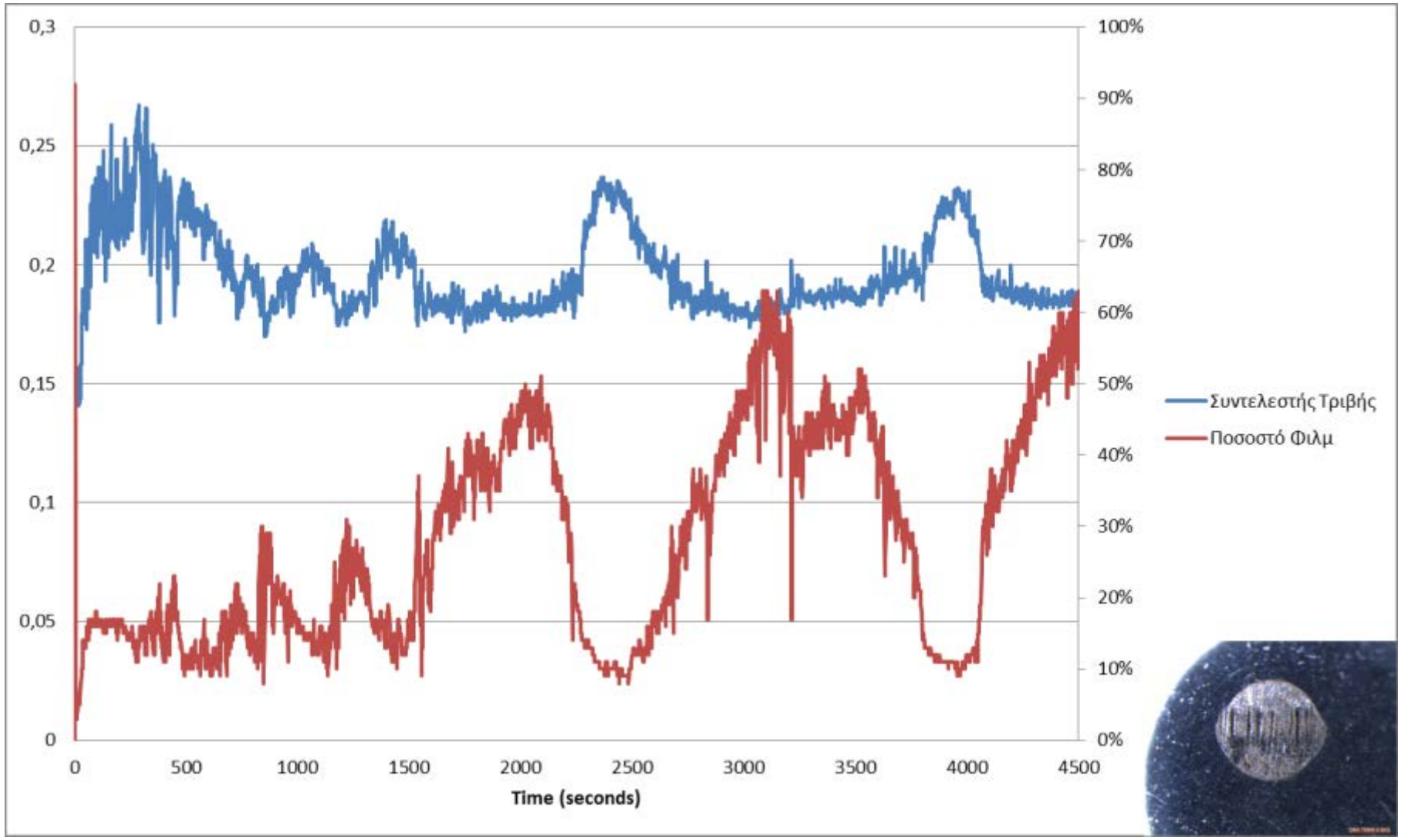
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

# ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

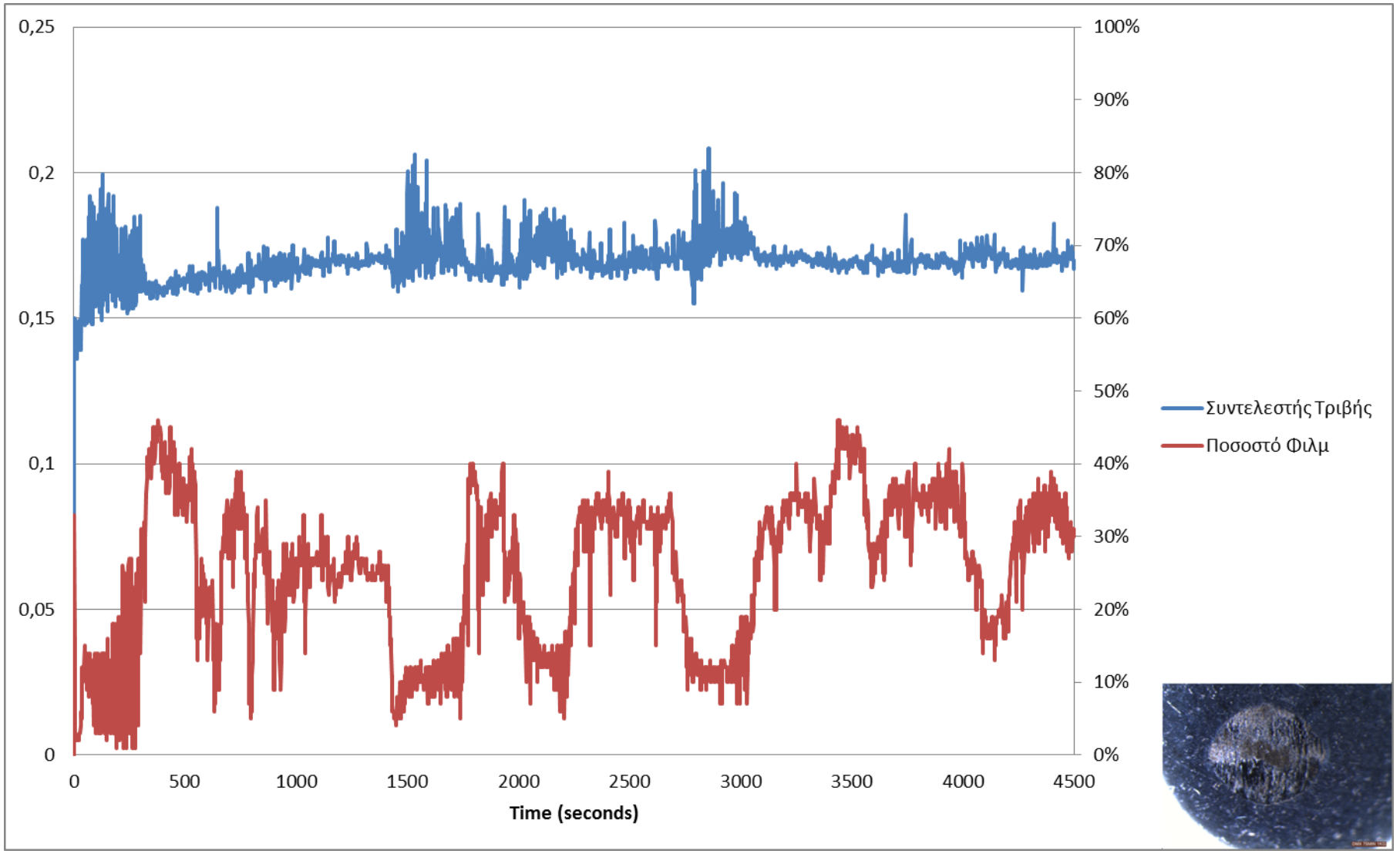
***Δείγμα DMX1***


0,45
0,4
0,35
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
4500
Time (seconds)
Συντελεστής Τριβής
Ποσοστό Φιλμ

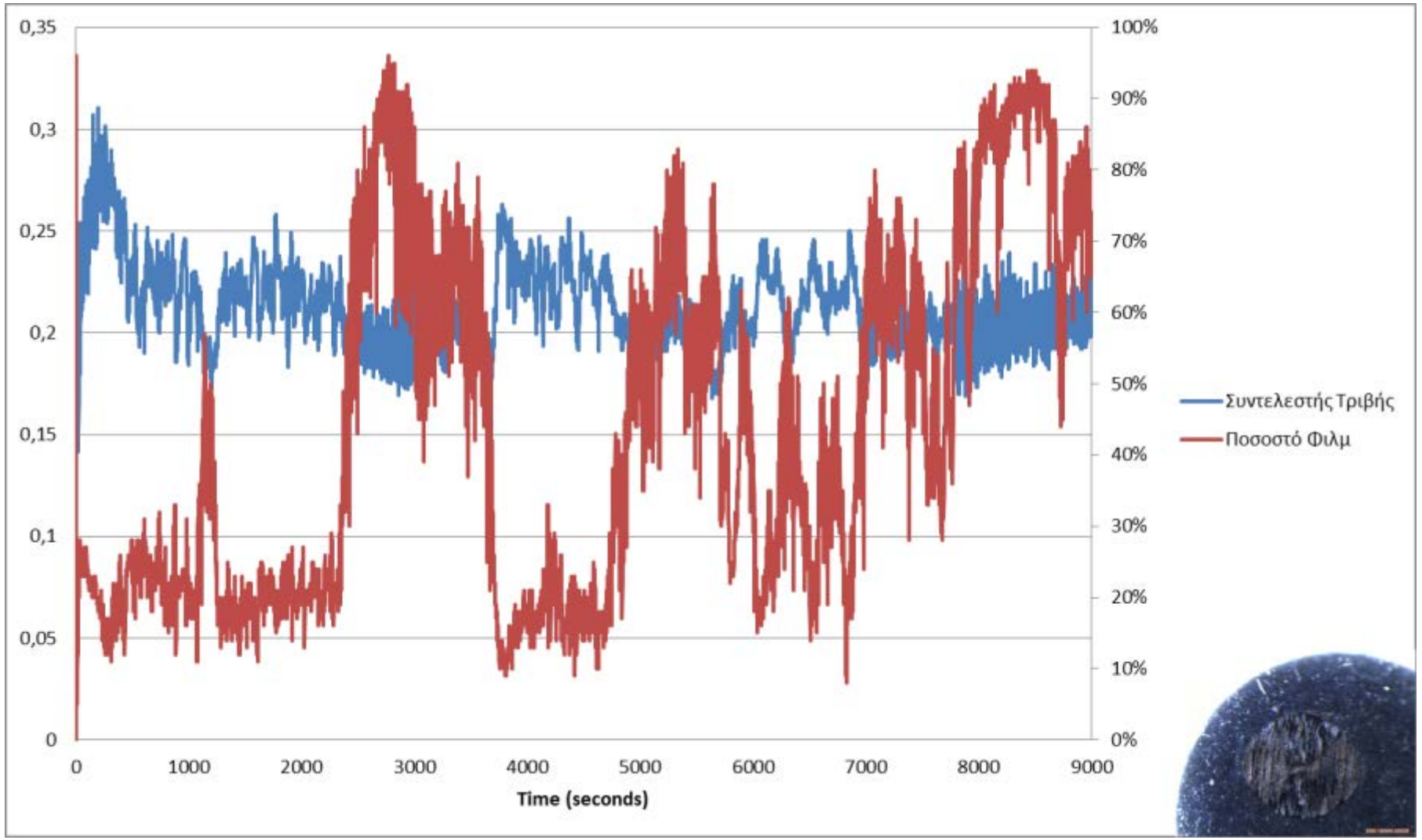
***Δείγμα DMX1 (75min 0.5Kg)***



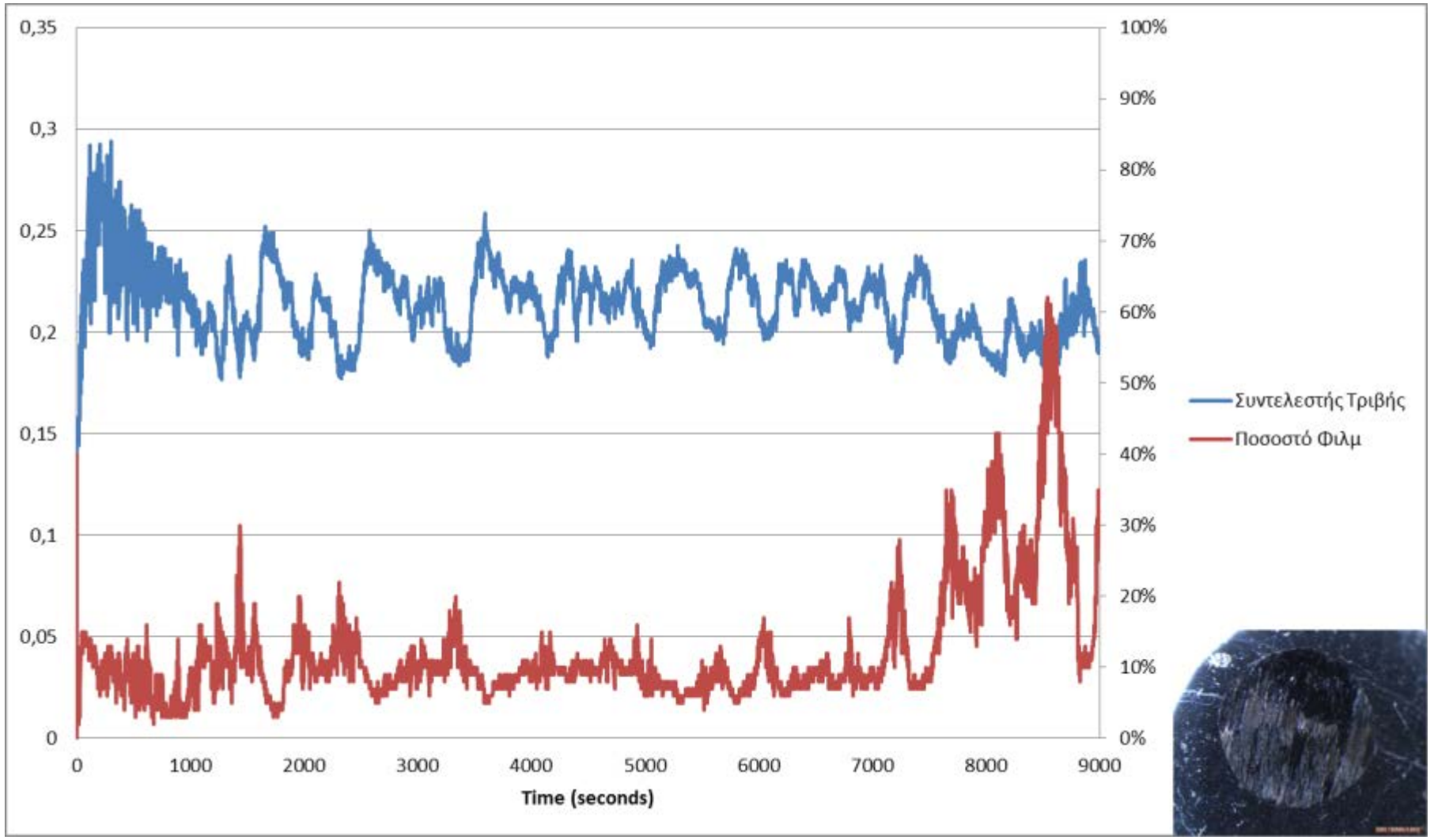
***Δείγμα DMX1 (75min 1Kg)***



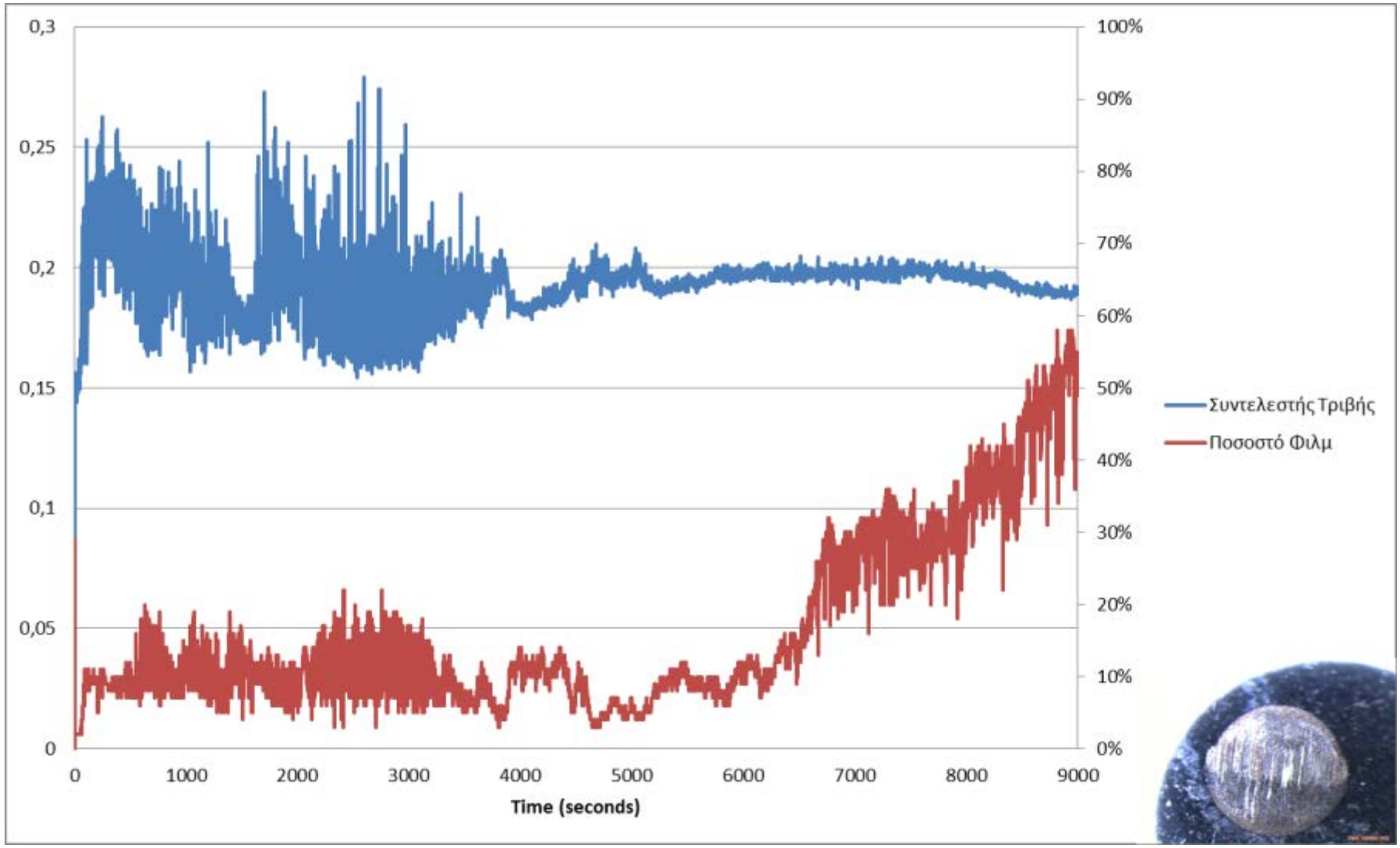
***Δείγμα DMX1 (150min 200gr)***



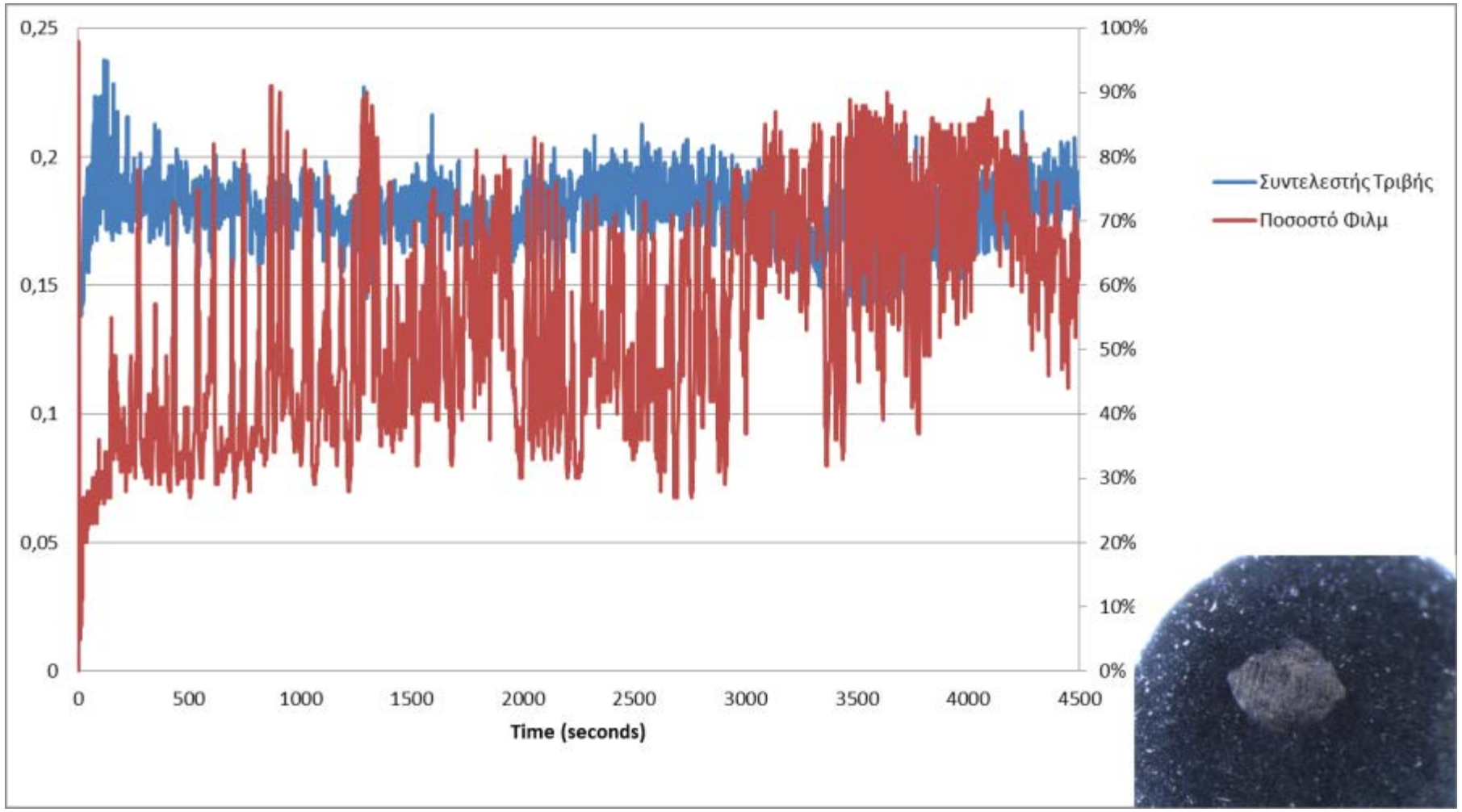
***Δείγμα DMX1 (150min 0.5Kg)***



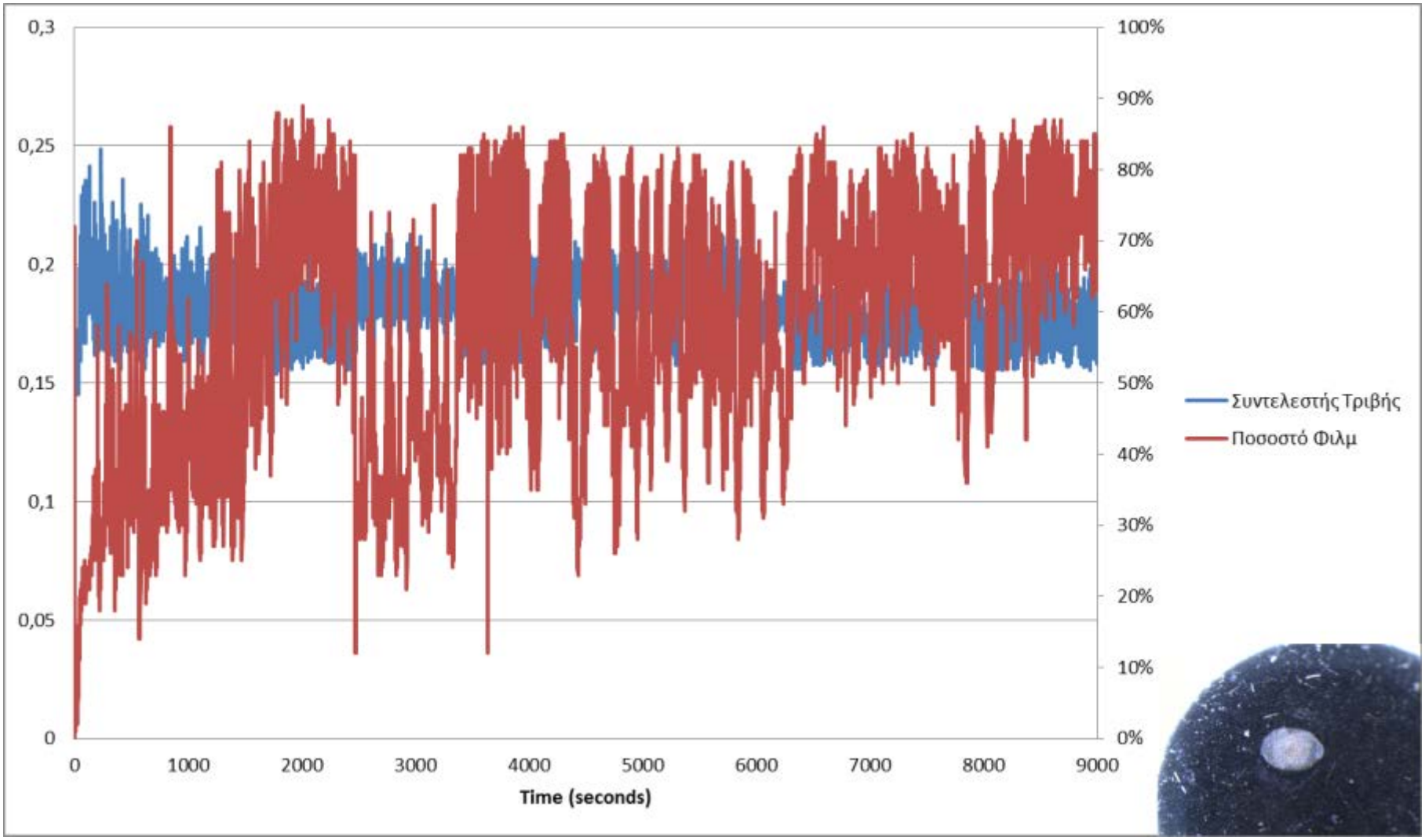
***Δείγμα DMX1 (150min 1Kg)***



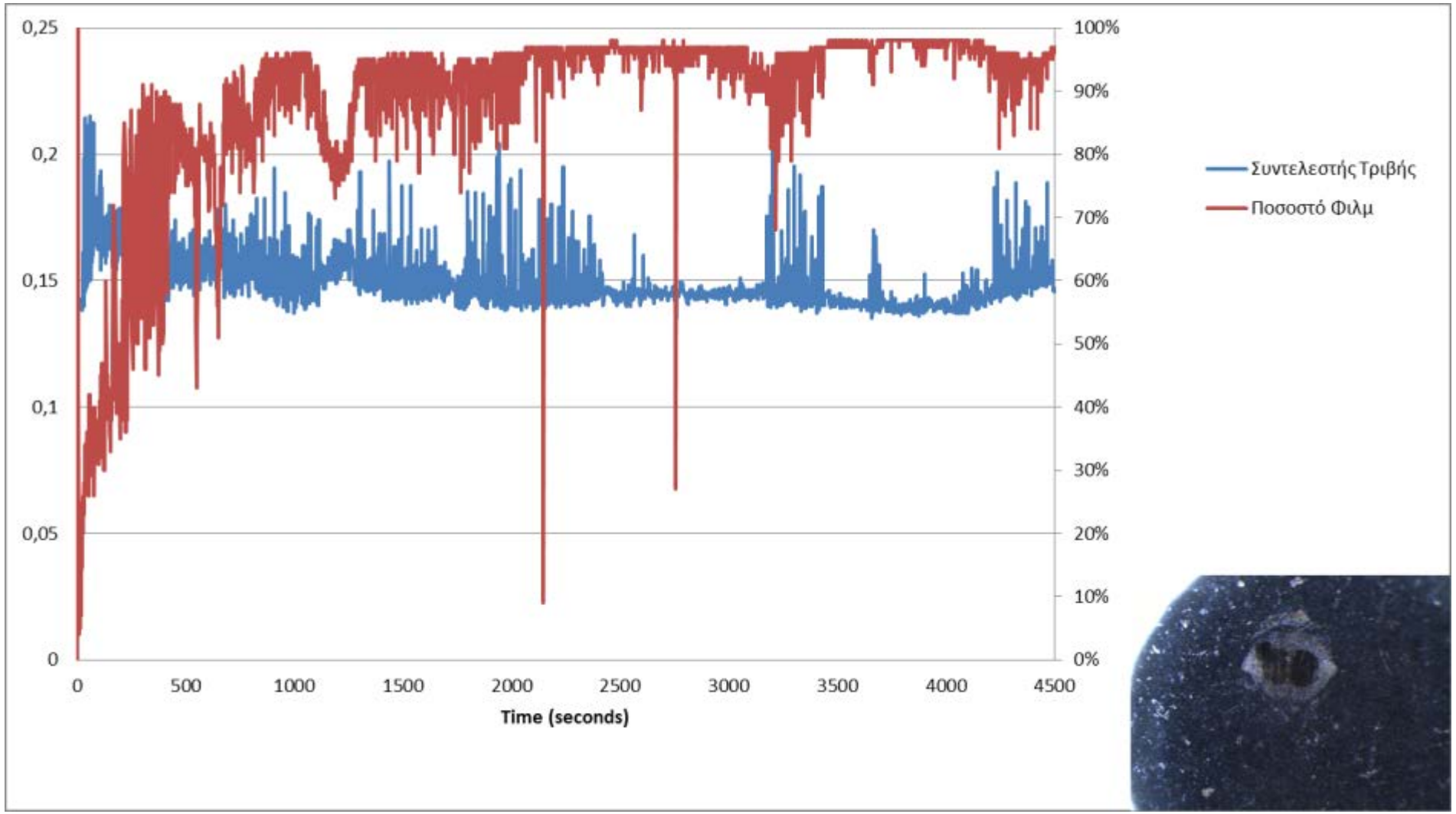
***Δείγμα DMX1 – 0.5% Biodiesel***



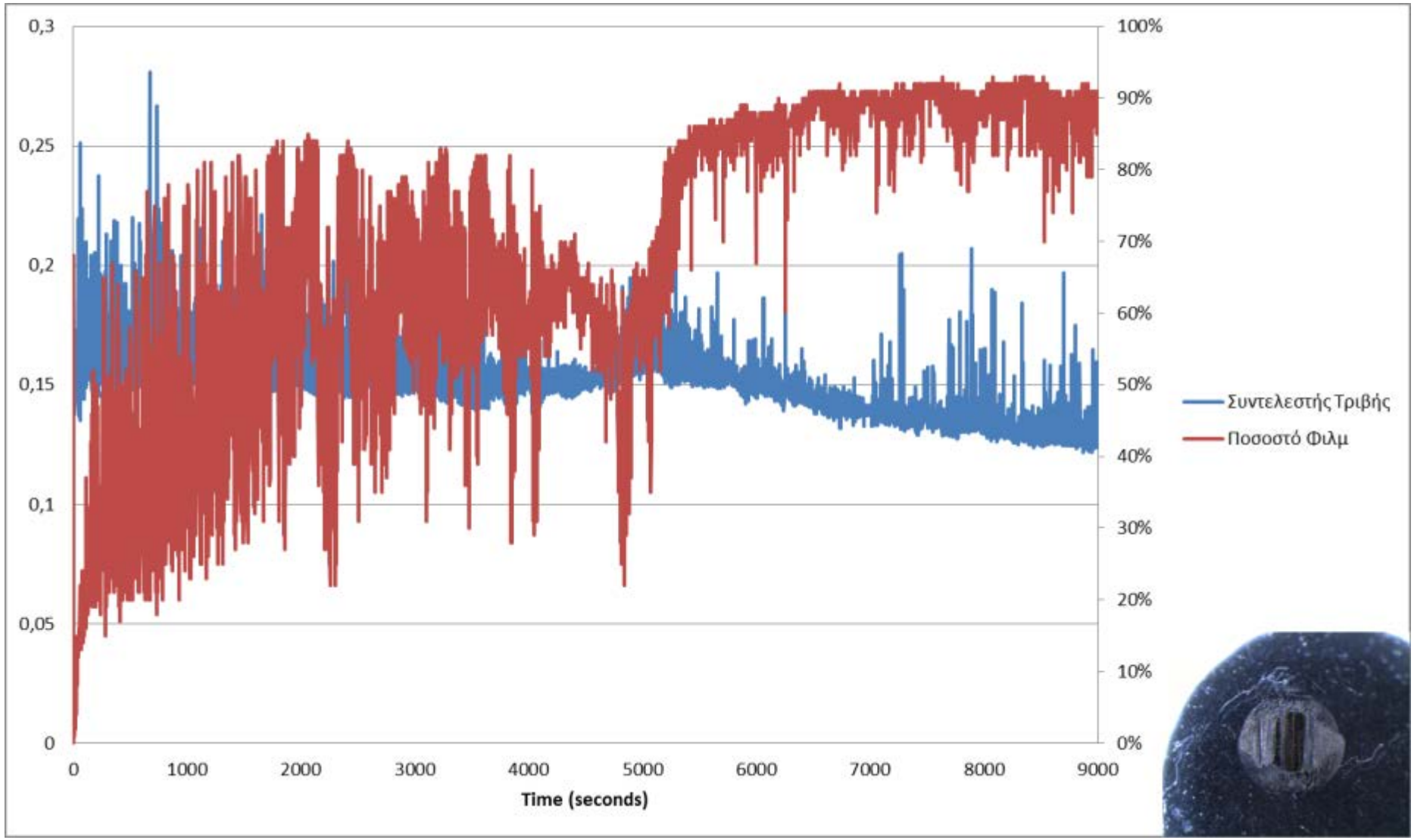
***Δείγμα DMX1 – 0.5% Biodiesel (150min 0.5Kg)***



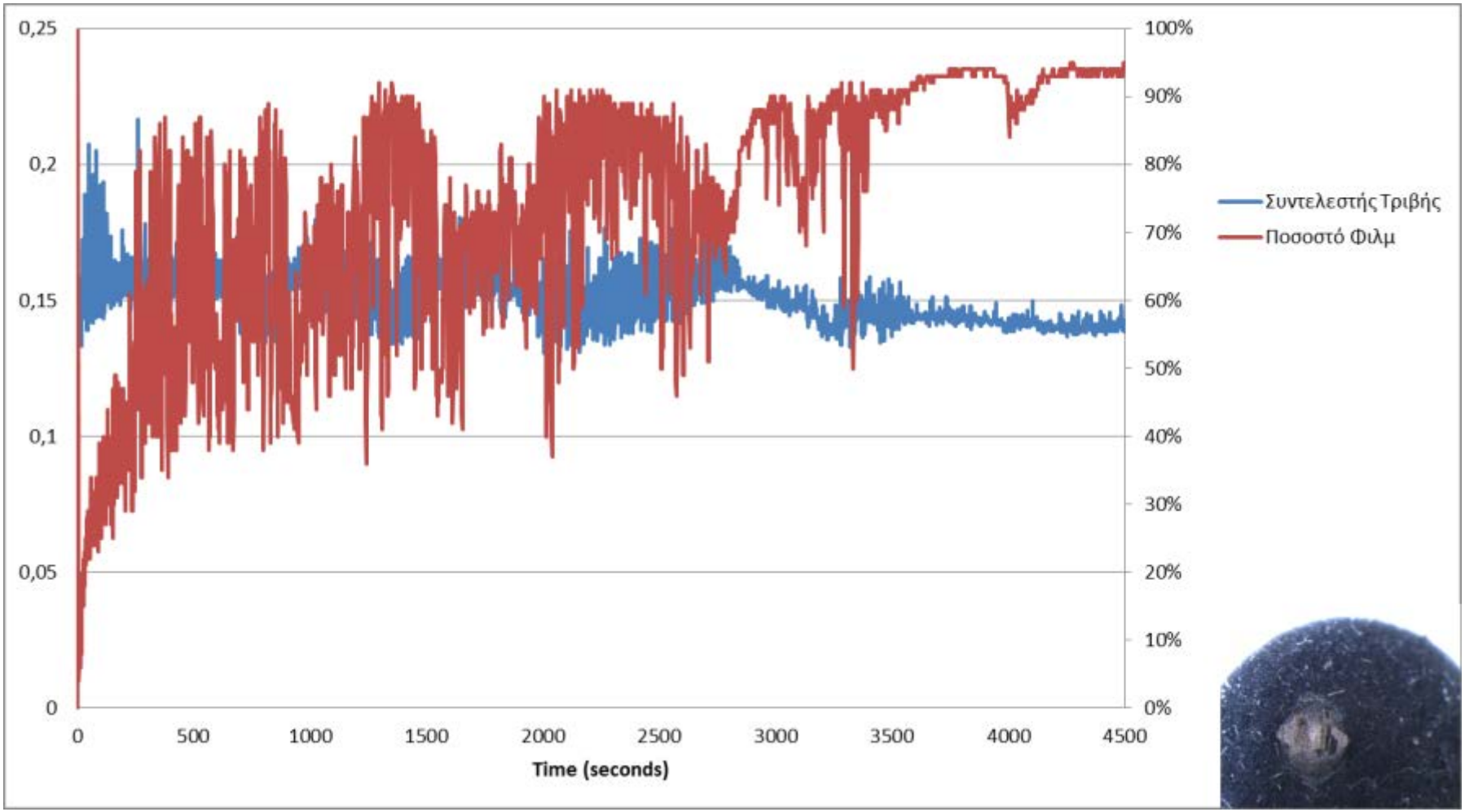
***Δείγμα DMX1 – 1% Biodiesel***



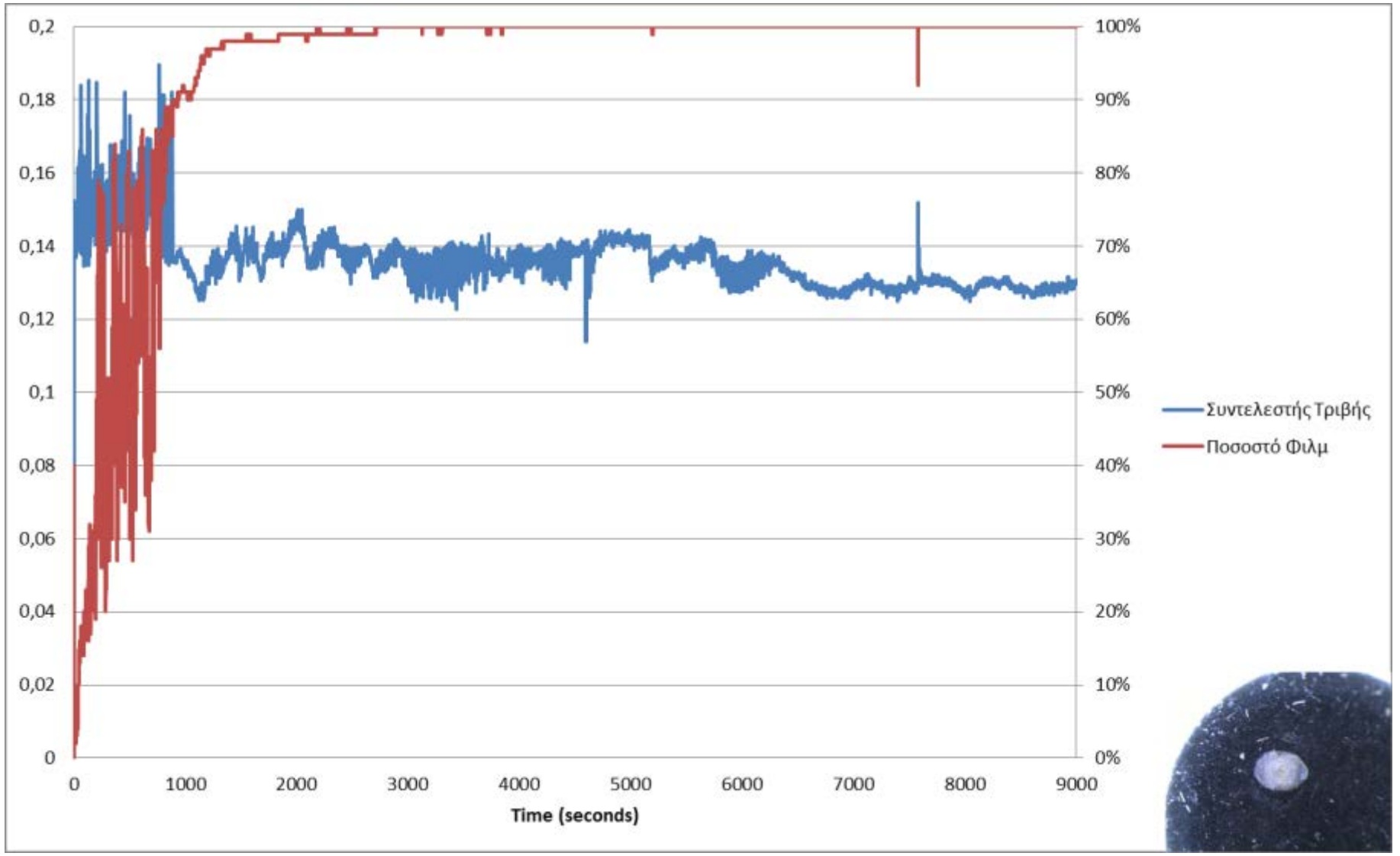
***Δείγμα DMX1 – 1% Biodiesel (150min 0.5Kg)***



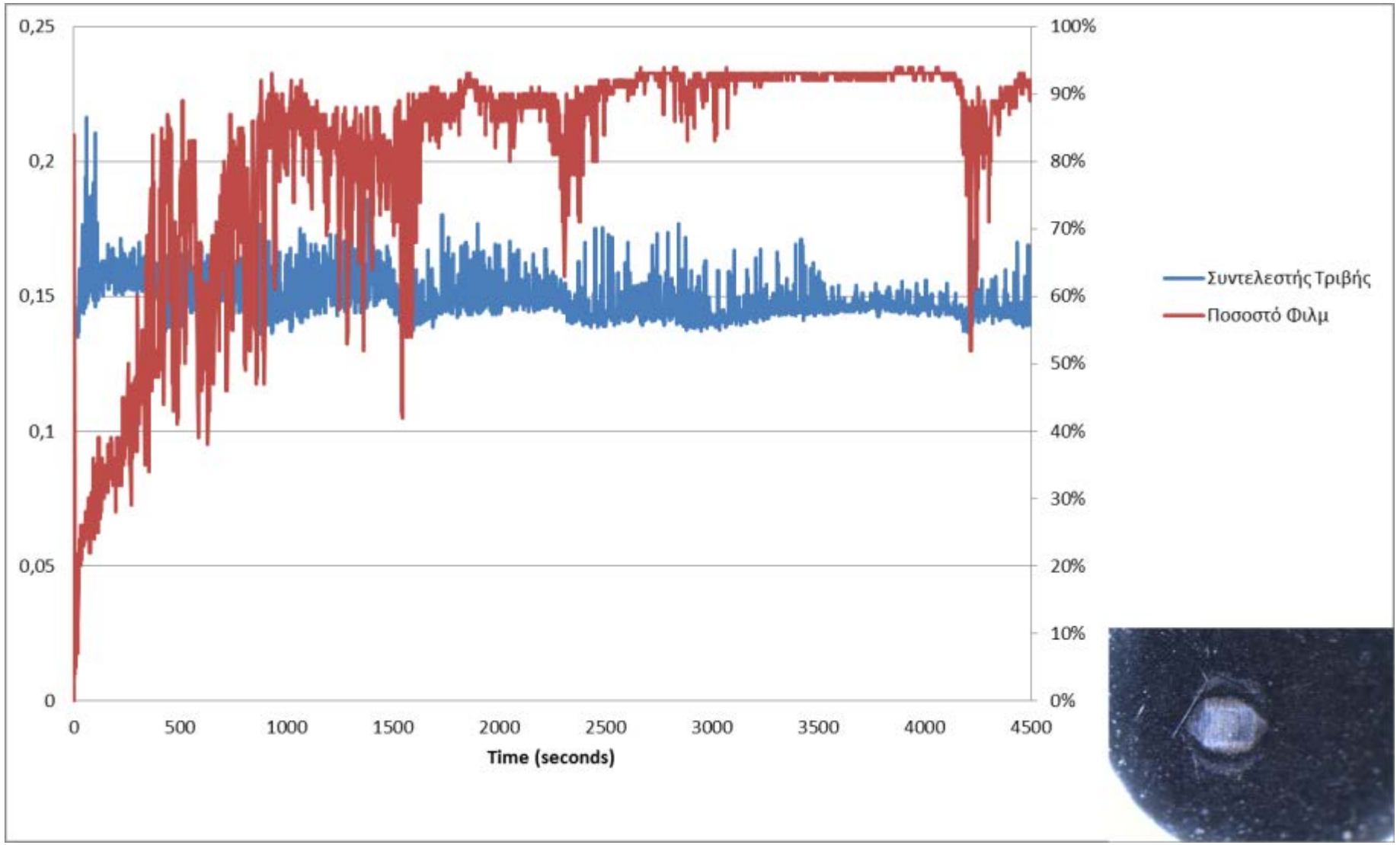
***Δείγμα DMX1 – 2% Biodiesel***



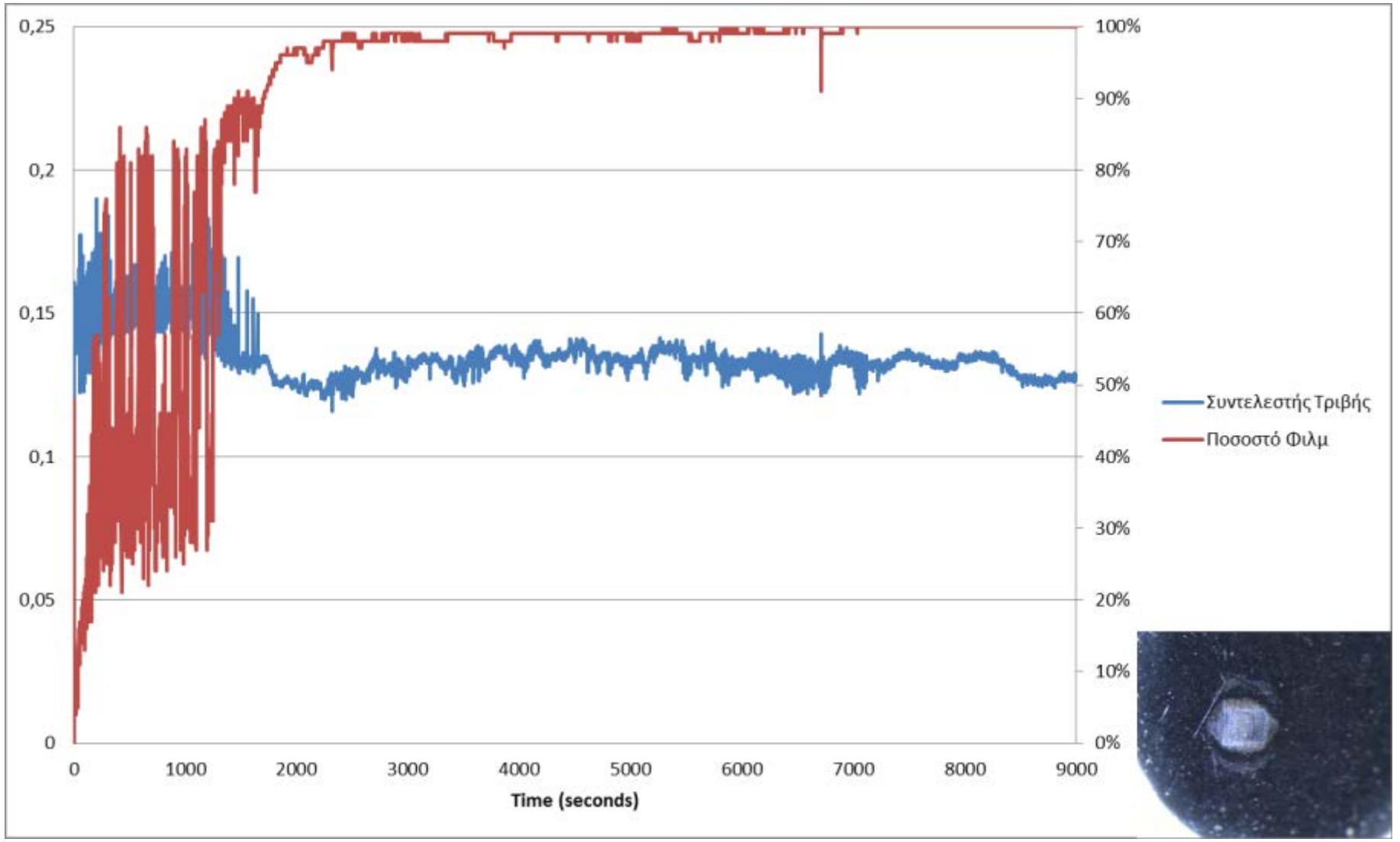
***Δείγμα DMX1 – 2% Biodiesel (150min 0.5Kg)***



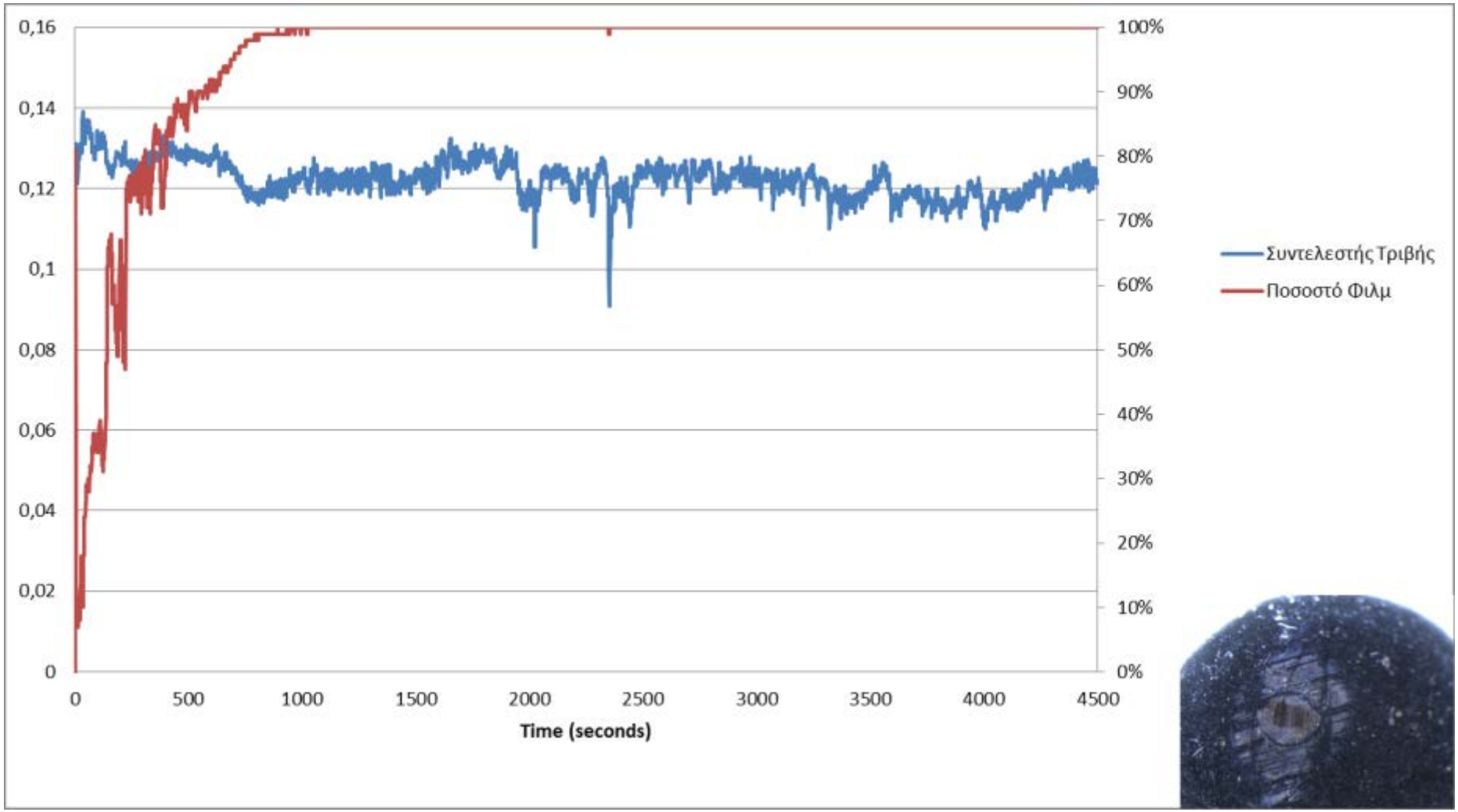
***Δείγμα DMX1 – 2% Biodiesel (2nd Measurement)***



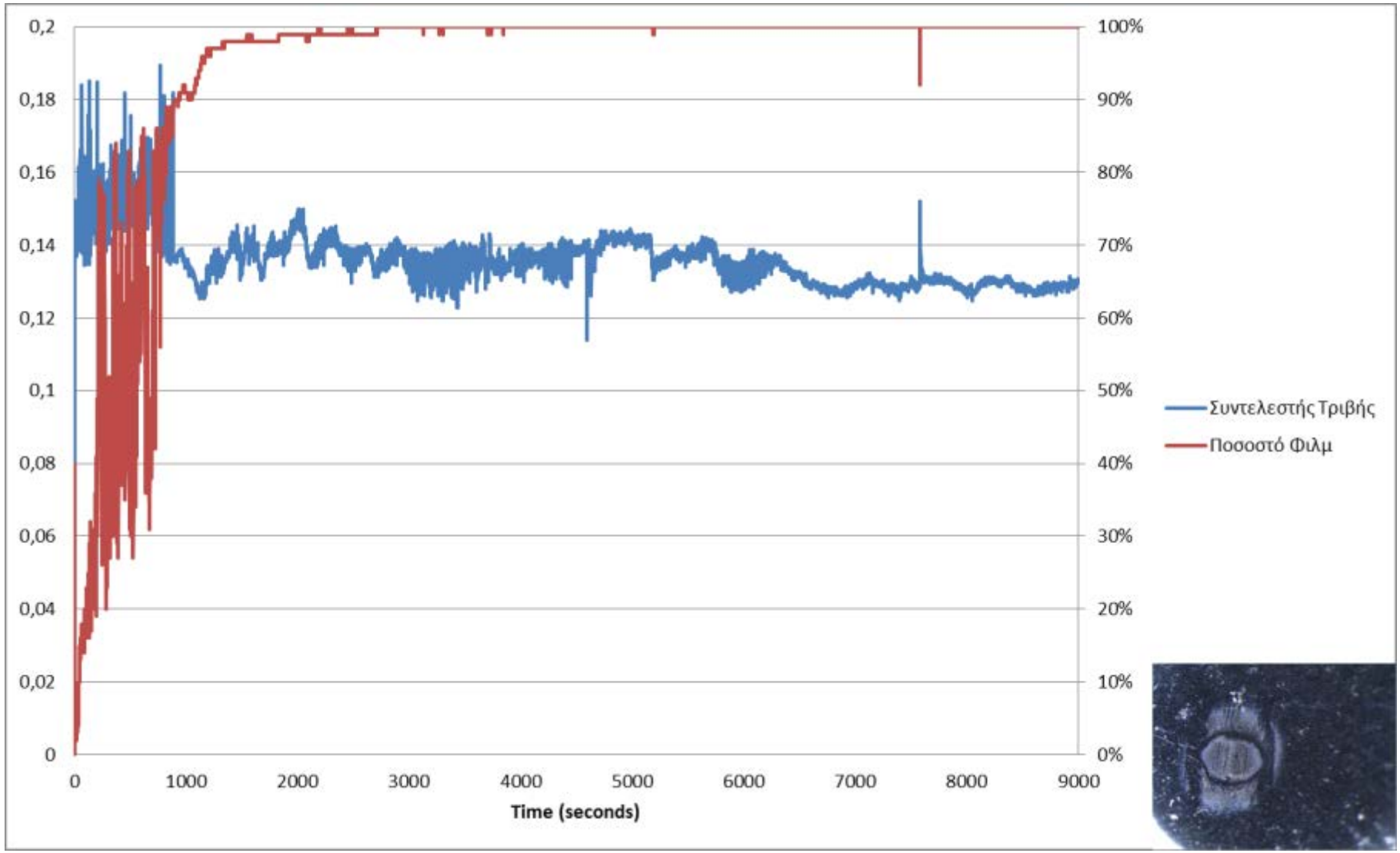
***Δείγμα DMX 1– 2% Biodiesel (2nd Measurement) (150min 0.5Kg)***



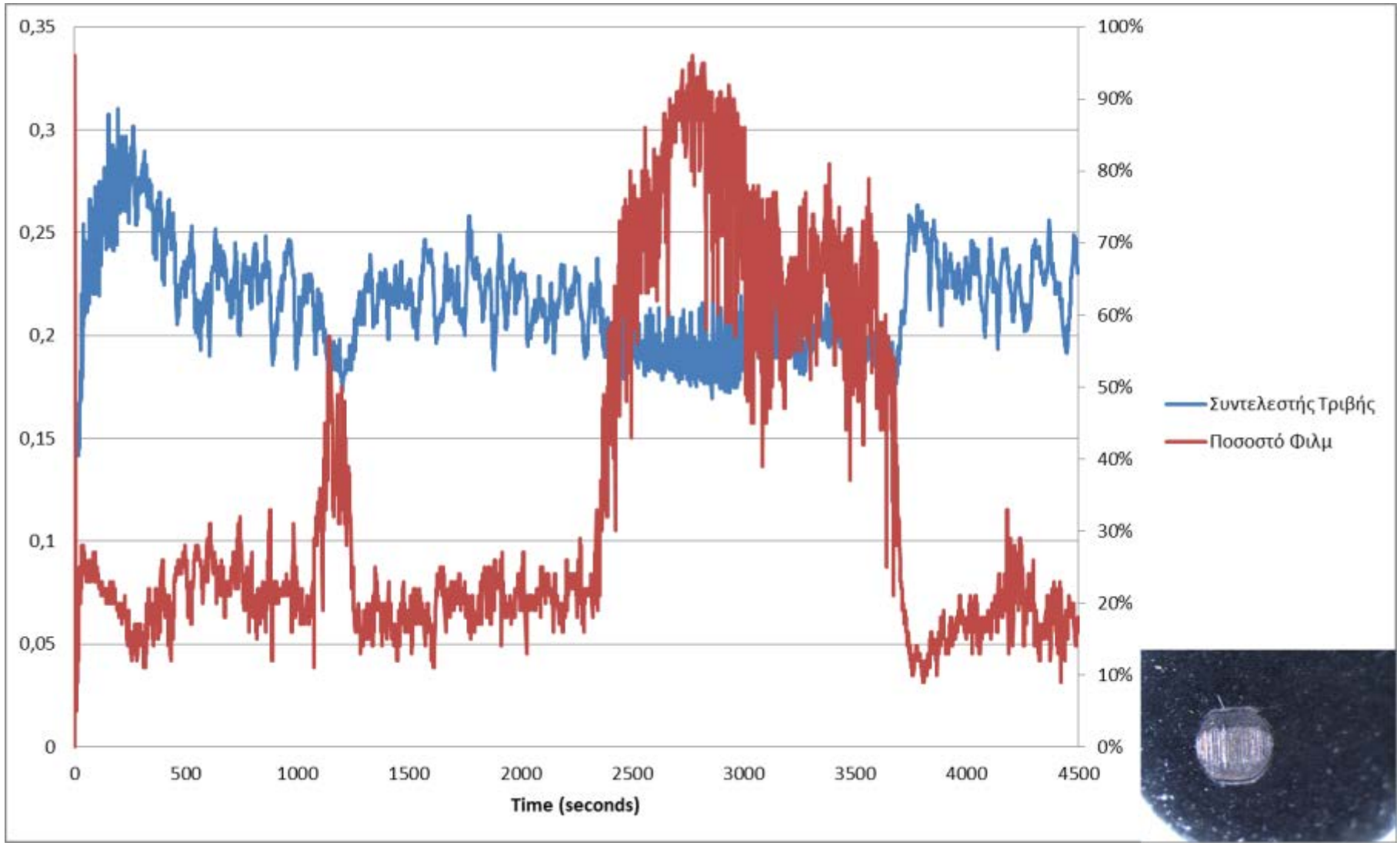
***Δείγμα DMX1 – 5% Biodiesel***



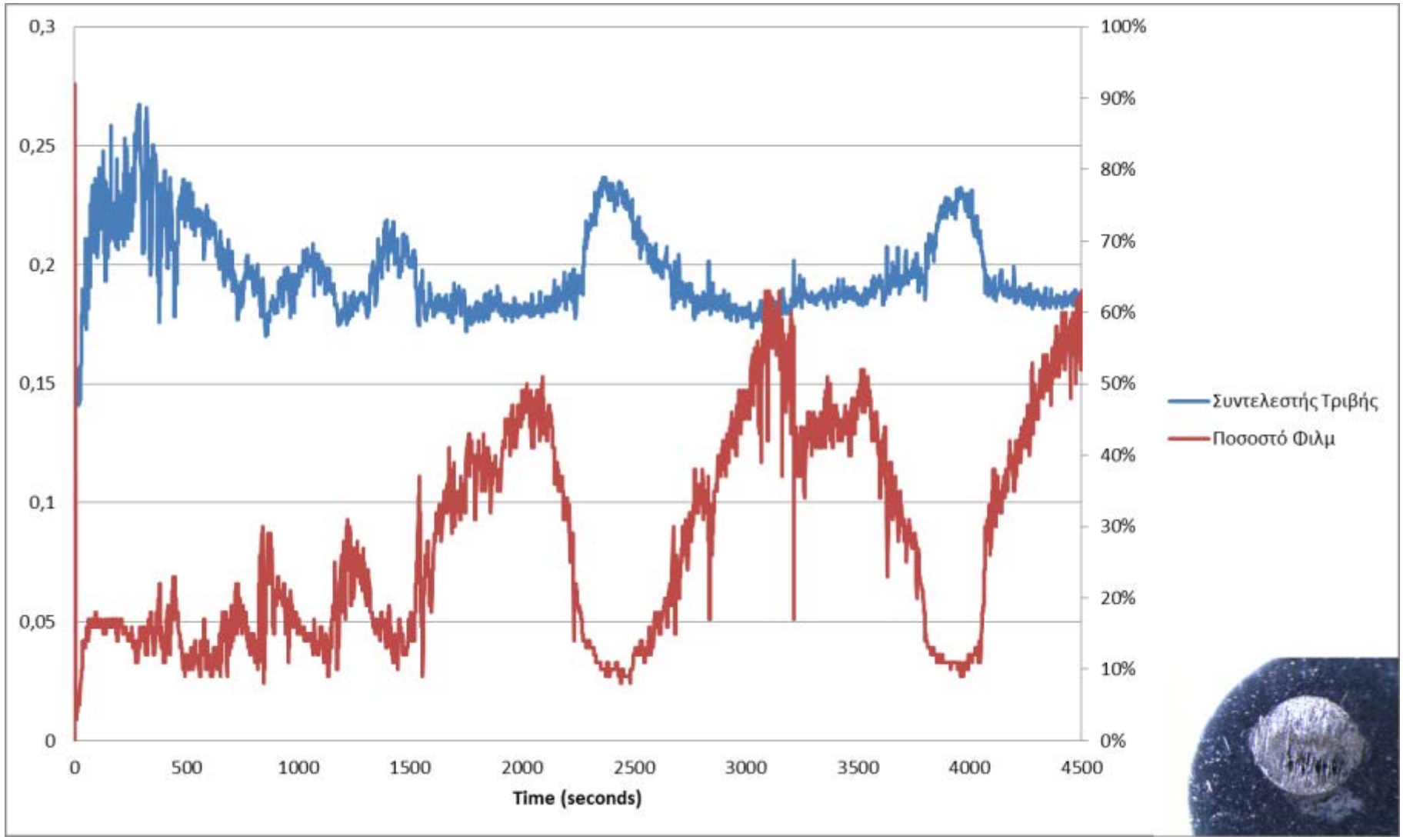
***Δείγμα DMX1 – 5% Biodiesel (150min 0.5Kg)***



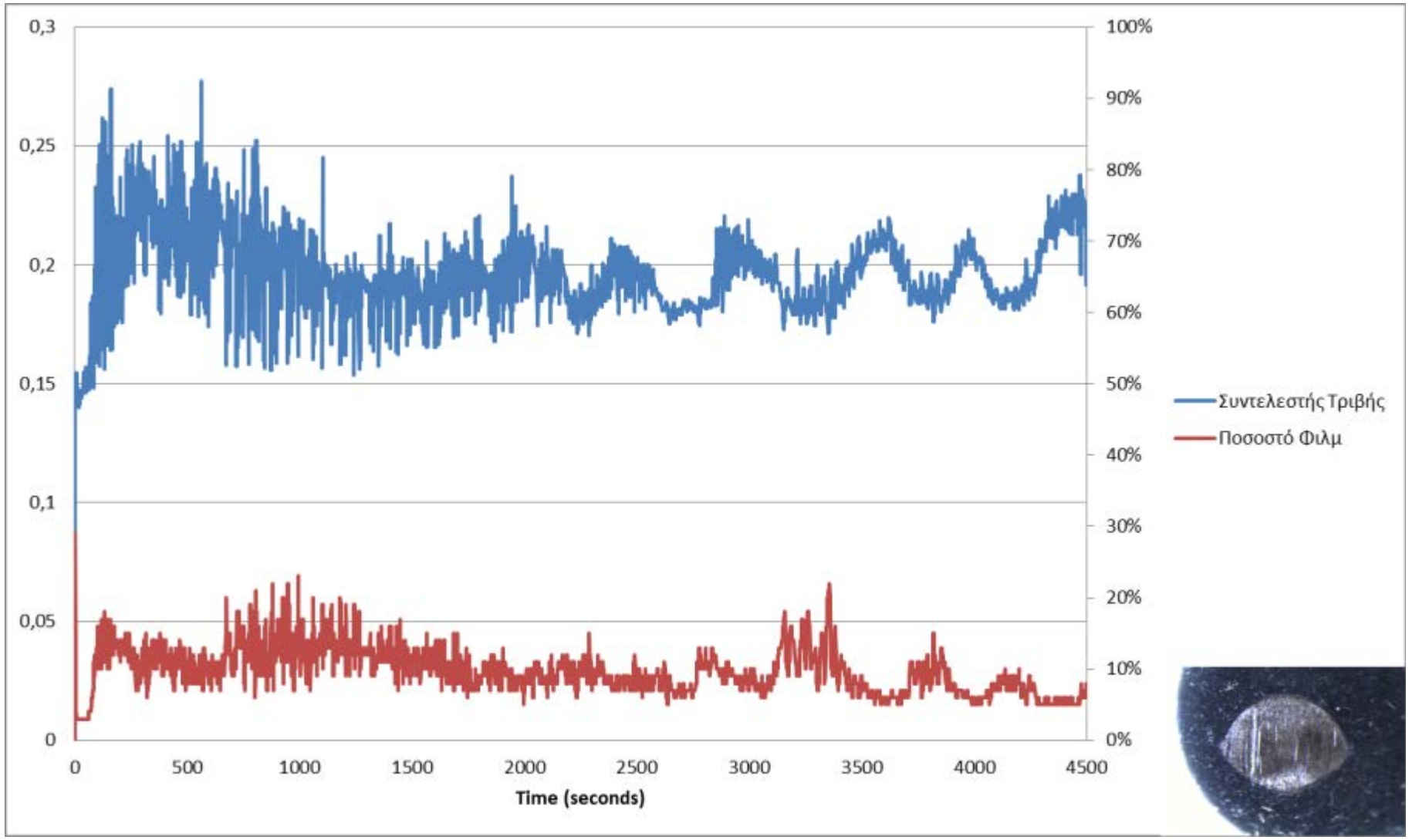
***Δείγμα DMX2***


0,35
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
4500
Time (seconds)
Συντελεστής Τριβής
Ποσοστό Φιλμ

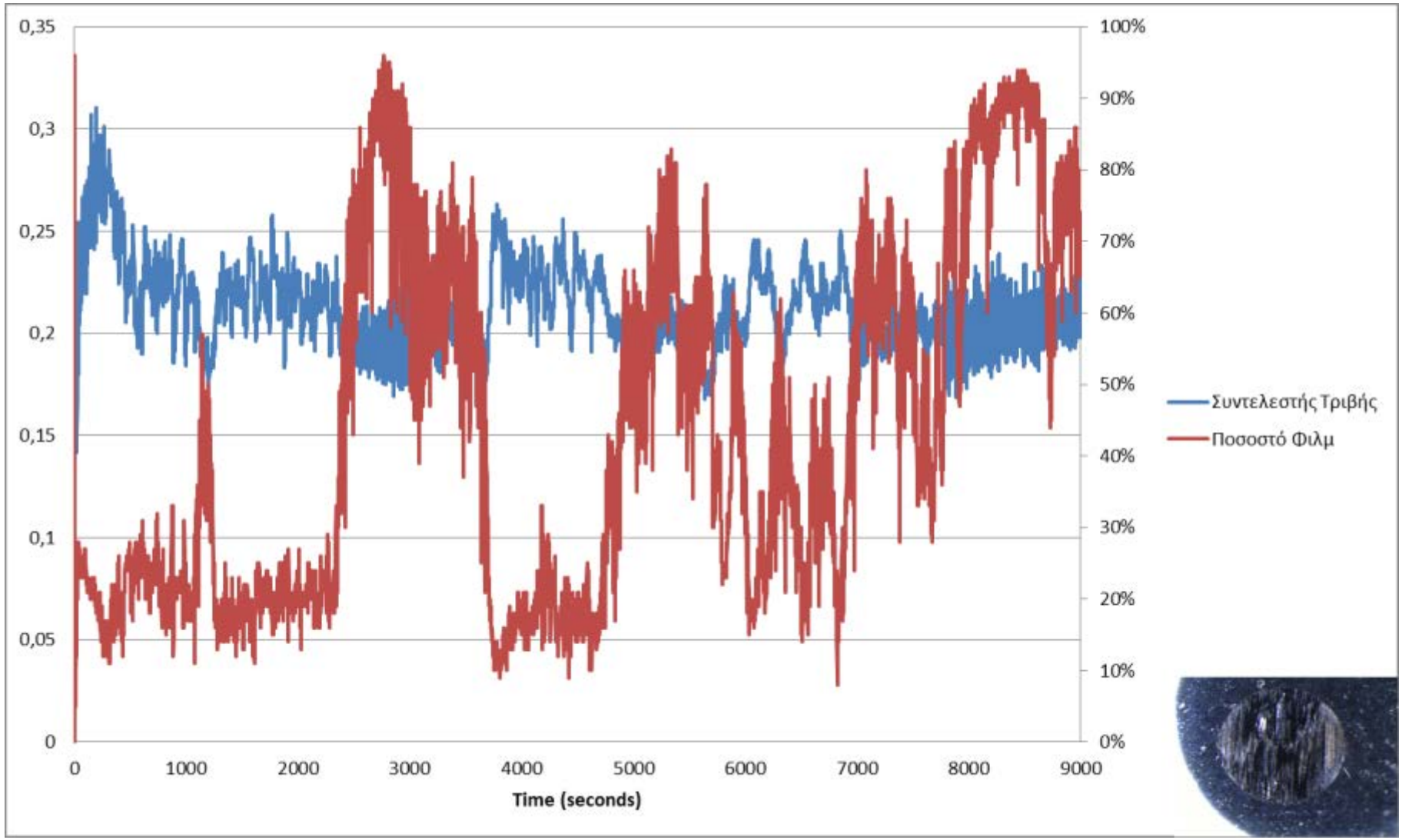
***Δείγμα DMX2 (75min 0.5Kg)***



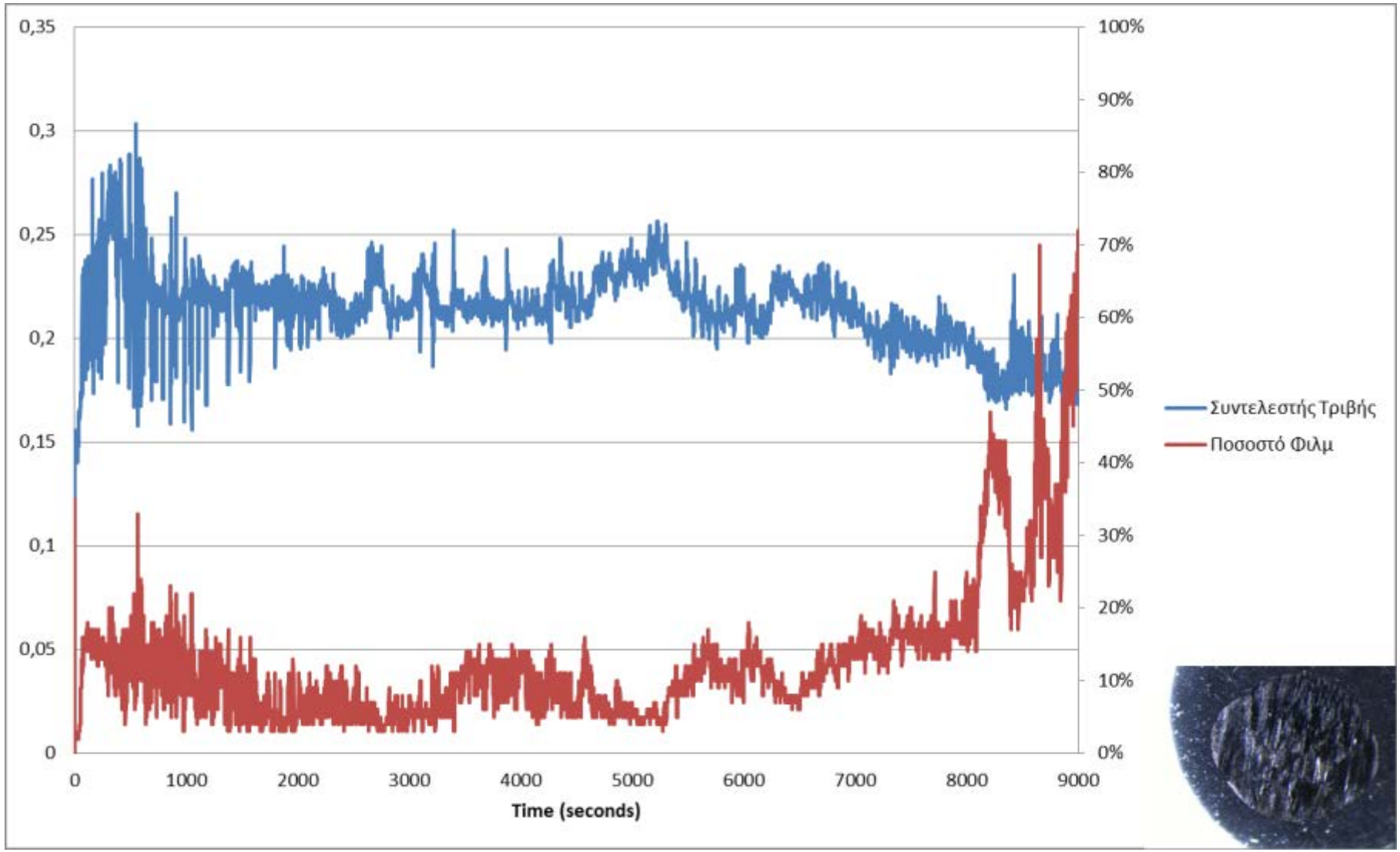
***Δείγμα DMX2 (75min 1Kg)***



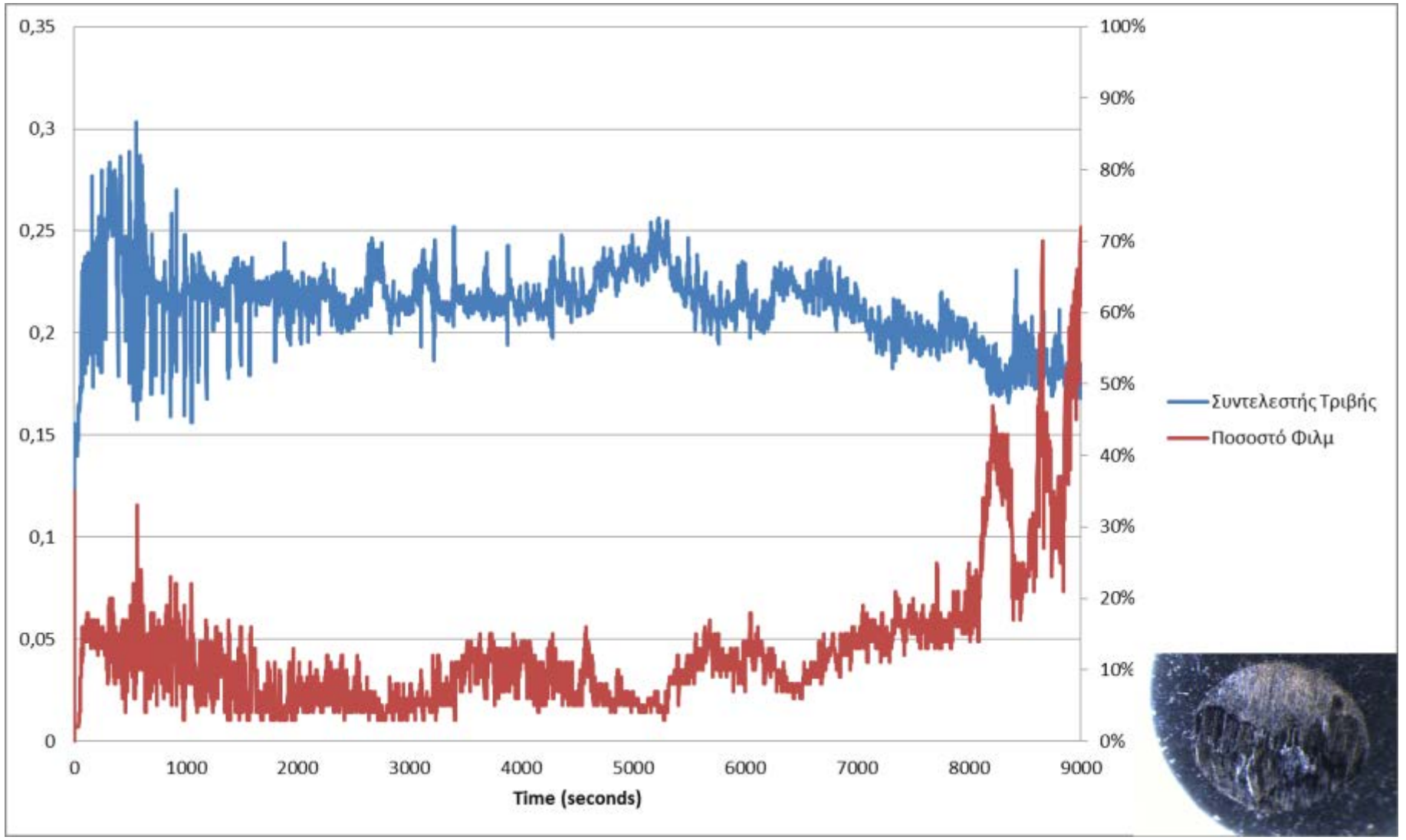
***Δείγμα DMX2 (150min 200gr)***



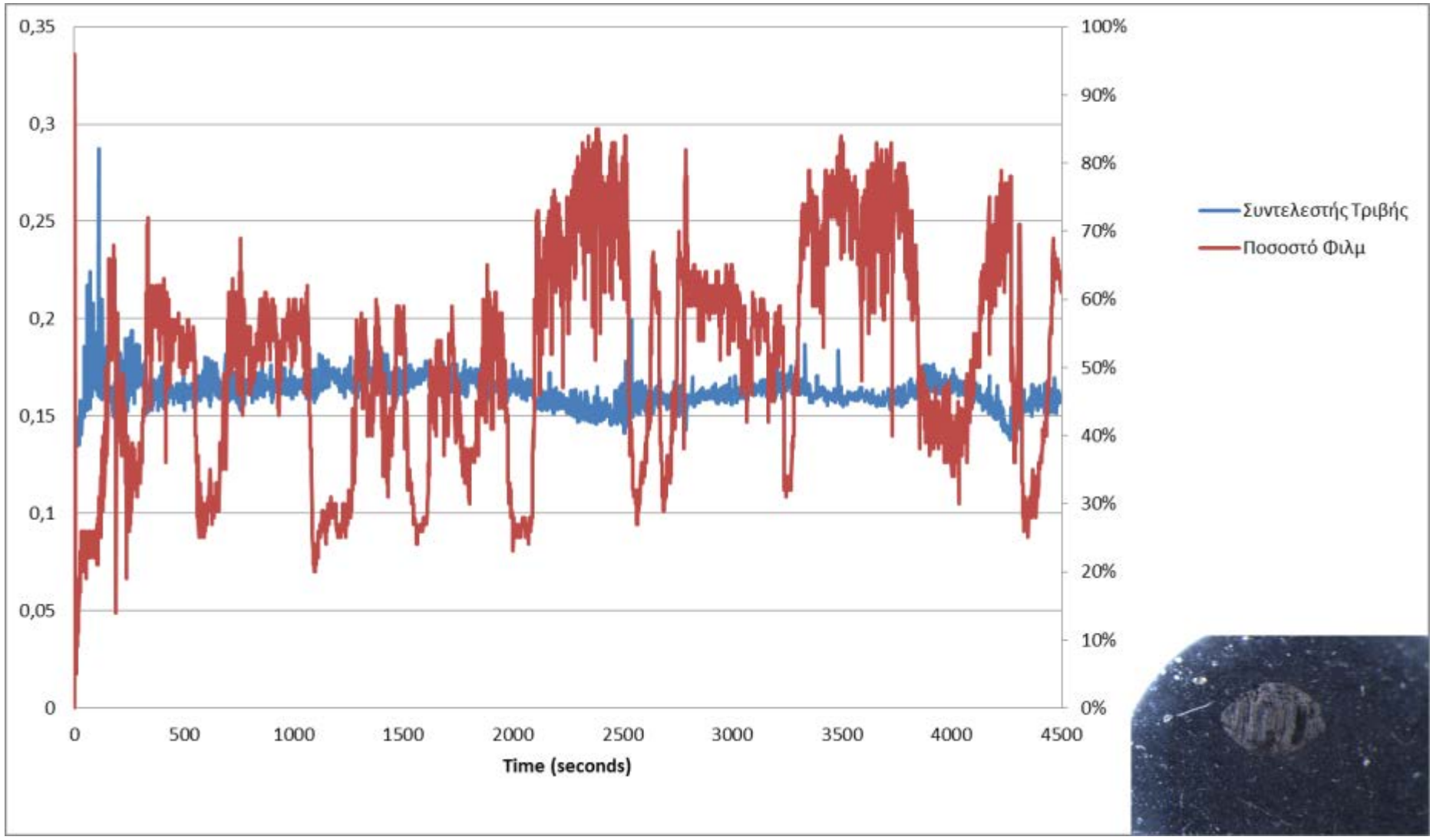
***Δείγμα DMX2 (150min 0.5Kg)***



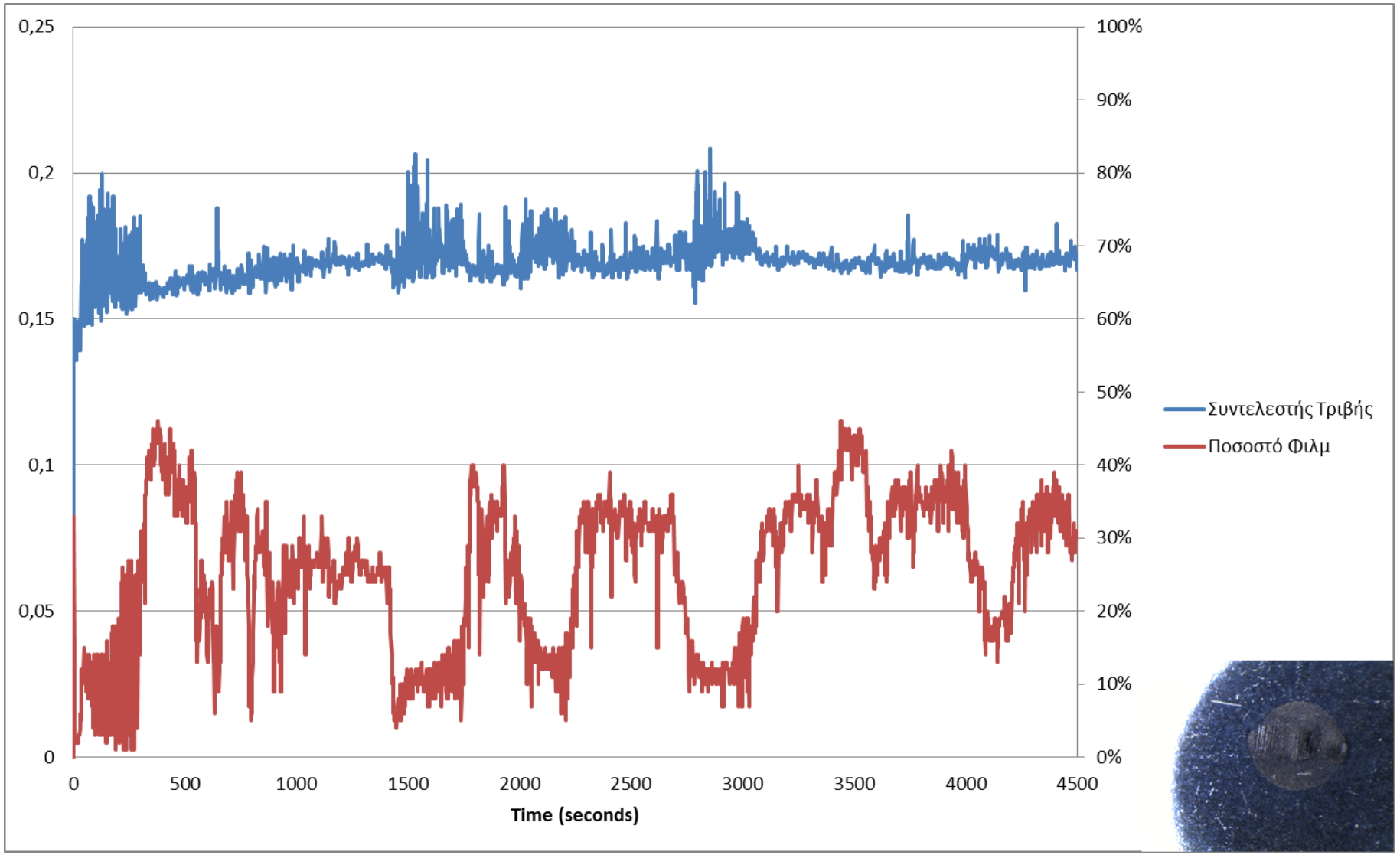
***Δείγμα DMX2 (150min 1Kg)***



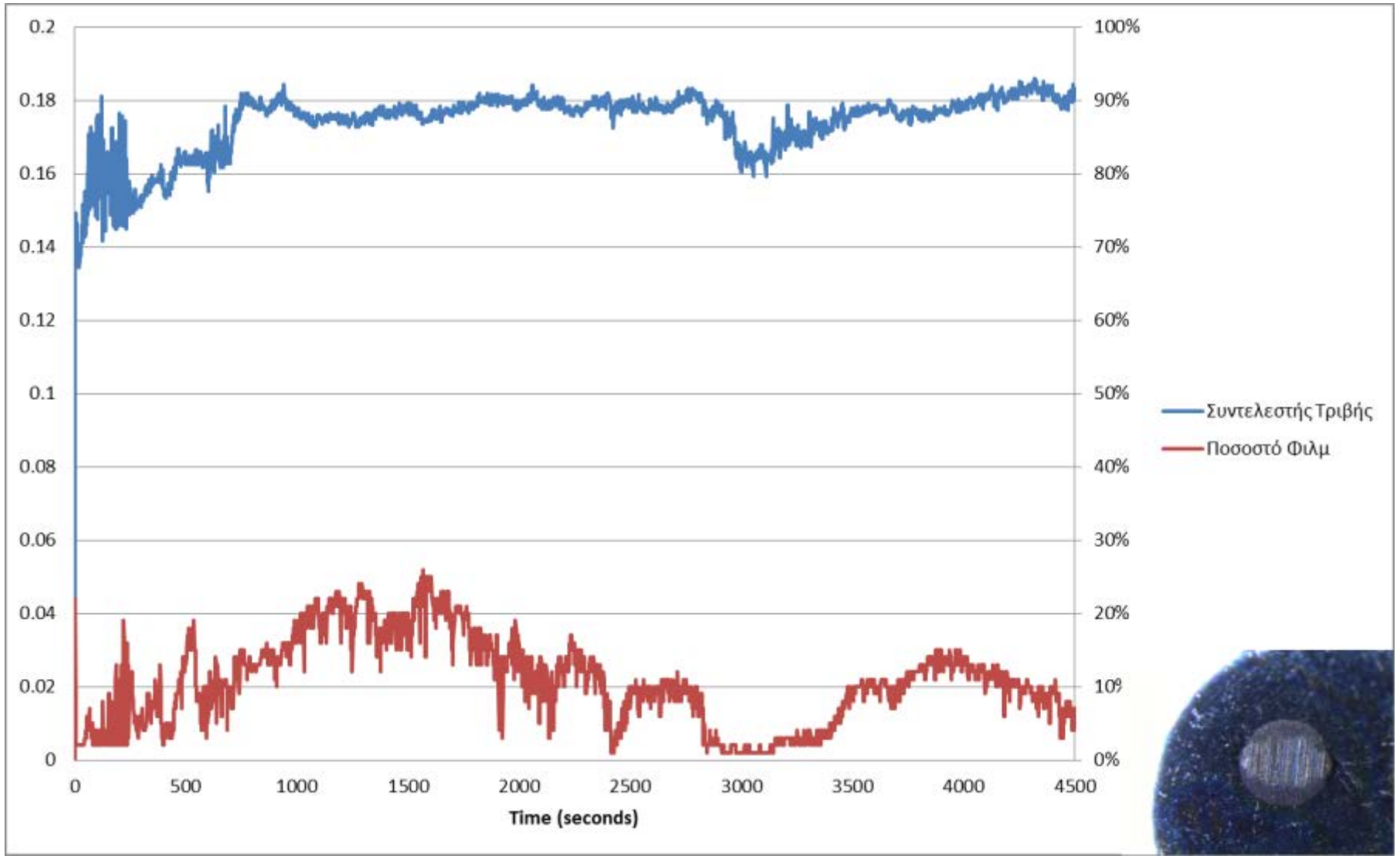
***Δείγμα DMA1***


0,35
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
4500
Time (seconds)
Συντελεστής Τριβής
Ποσοστό Φιλμ

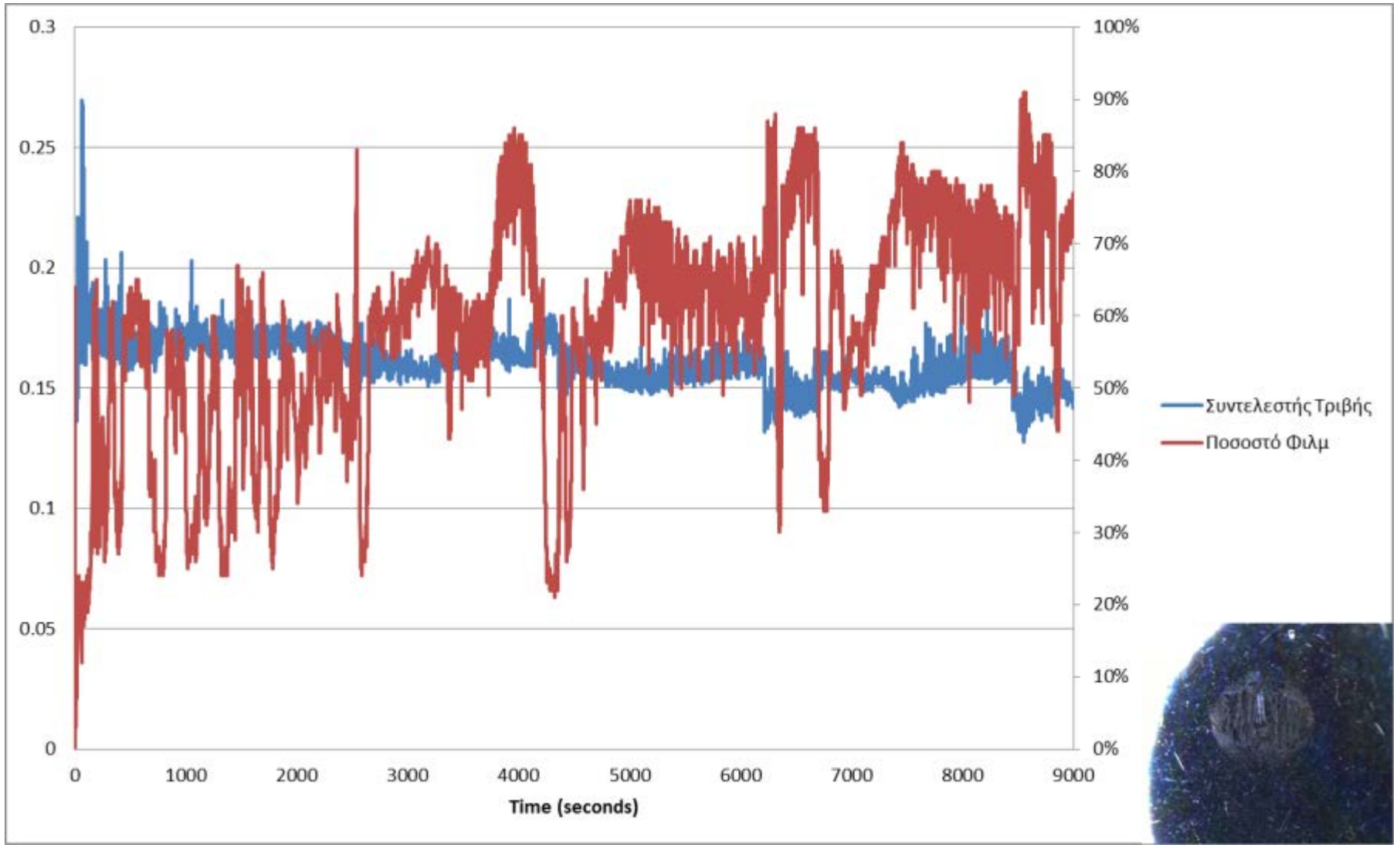
***Δείγμα DMA1 (75min 0.5Kg)***



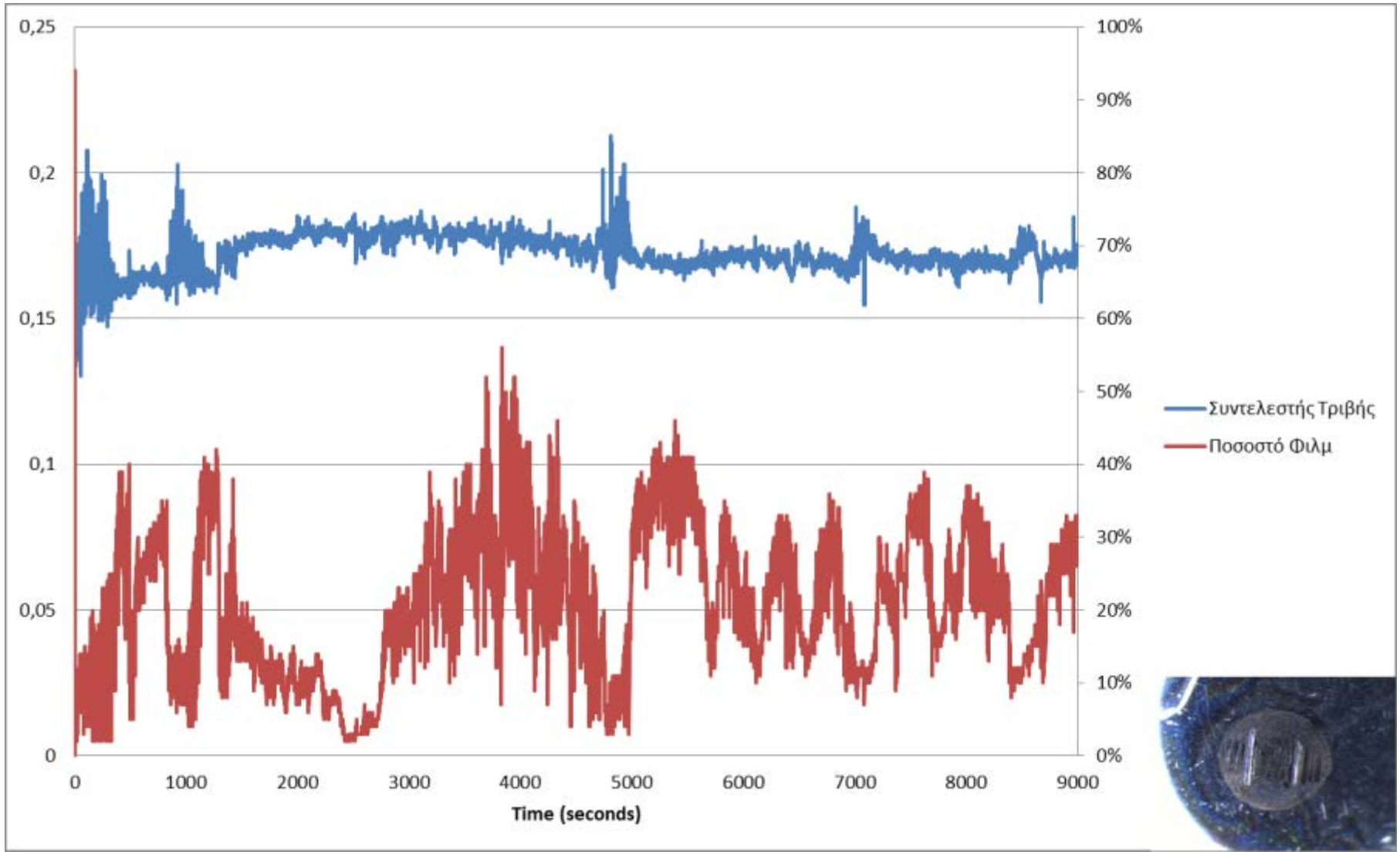
***Δείγμα DMA1 (75min 1Kg)***



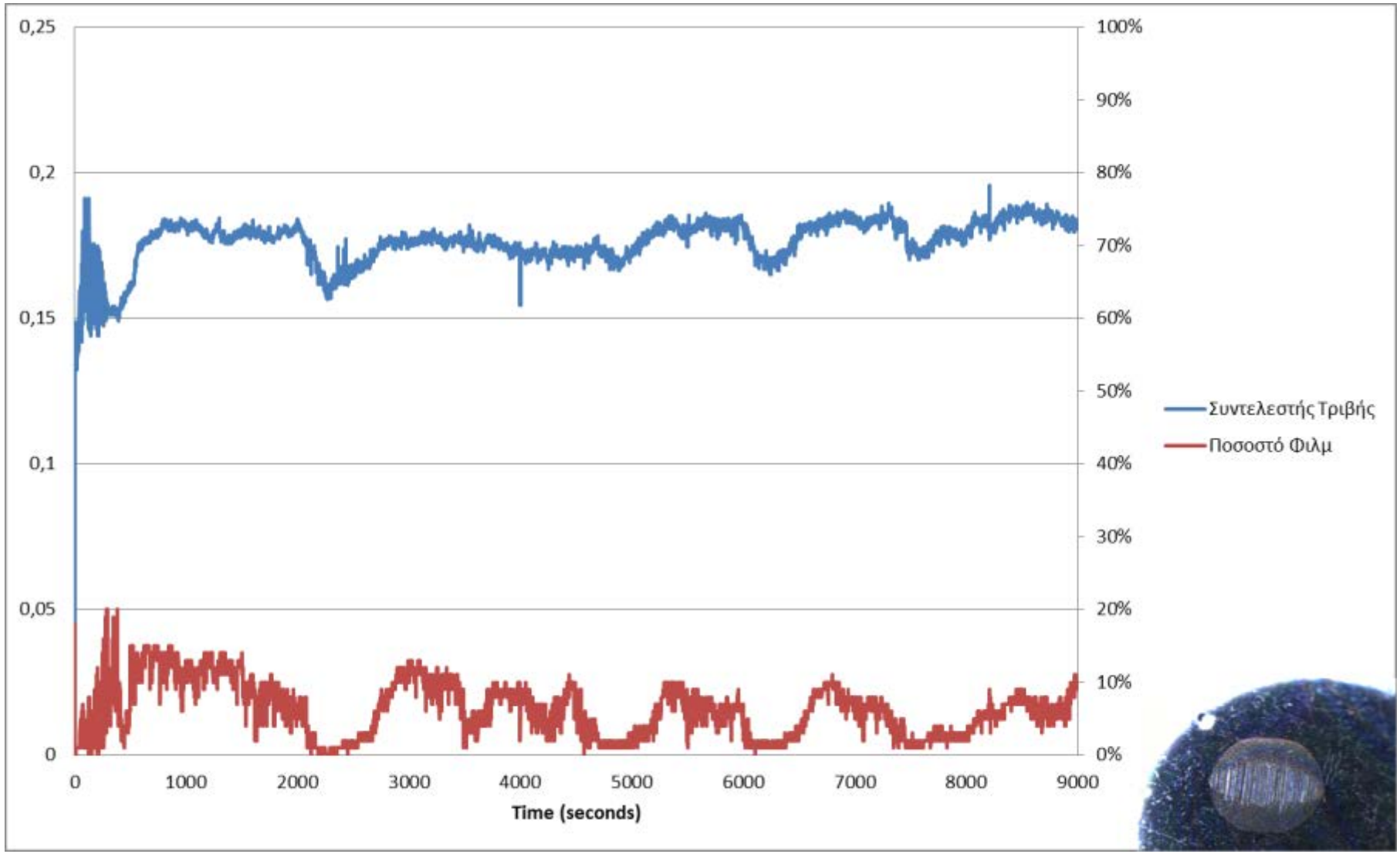
***Δείγμα DMA1 (150min200gr)***



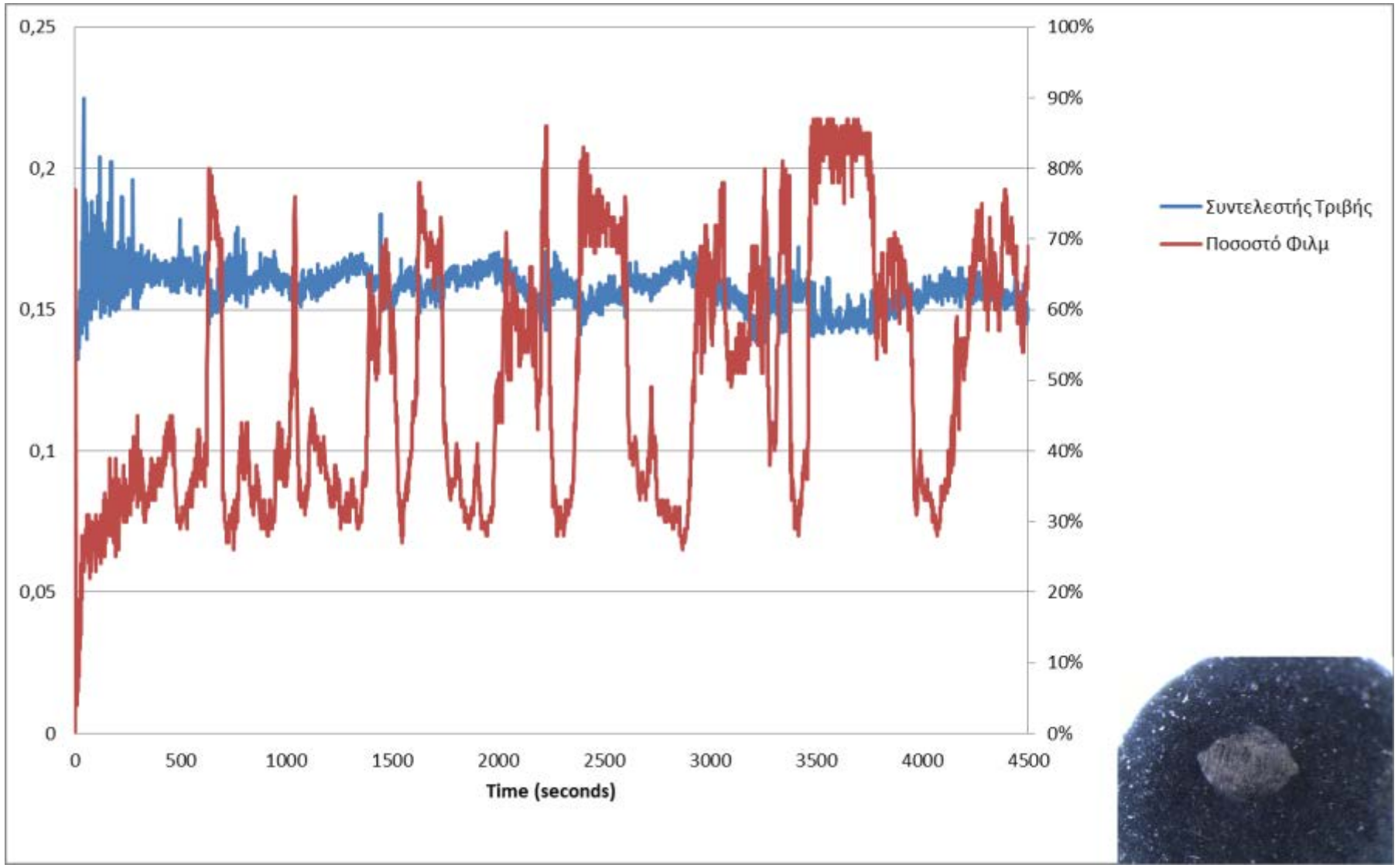
***Δείγμα DMA1 (150min 0.5Kg)***



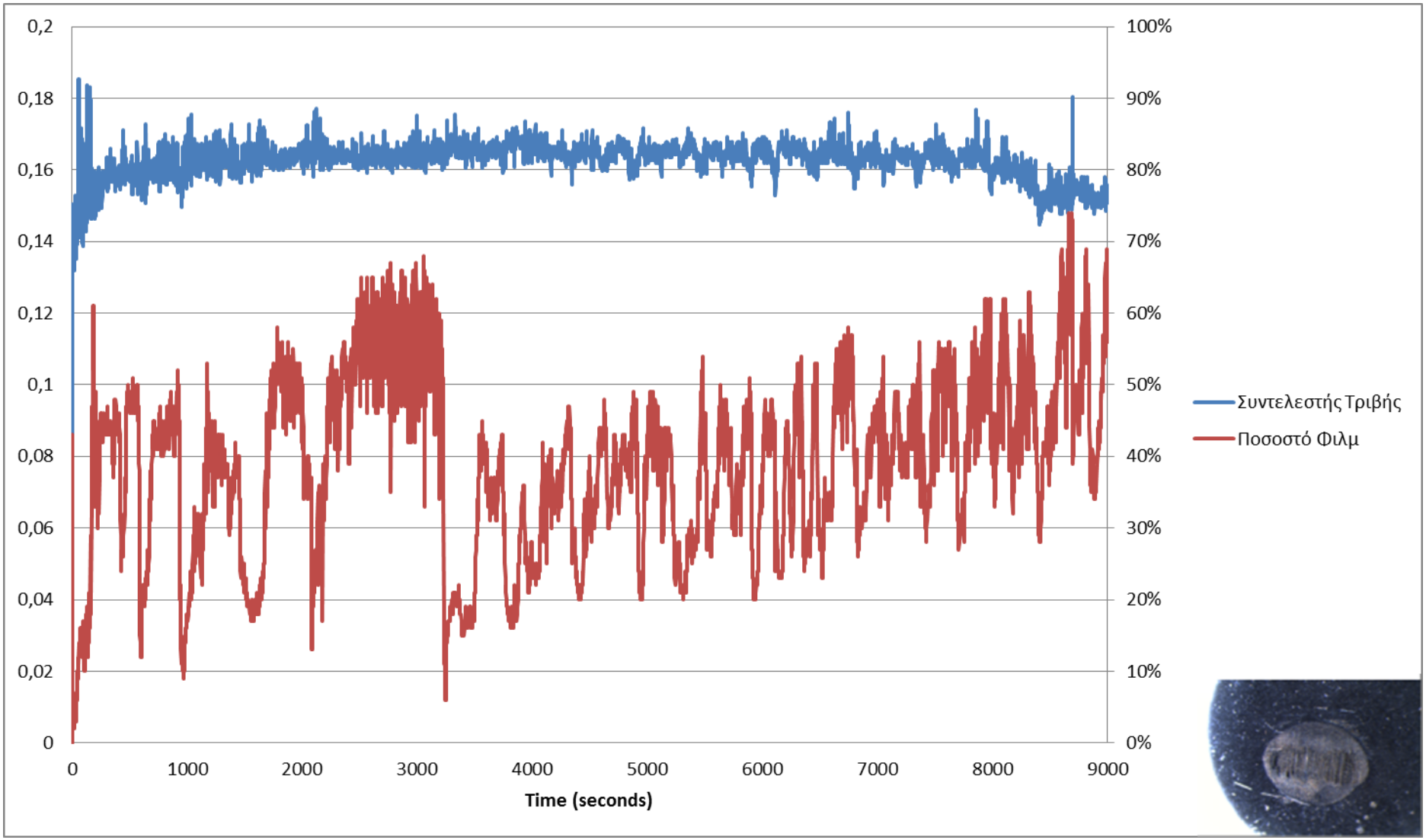
***Δείγμα DMA1 (150min 1Kg)***



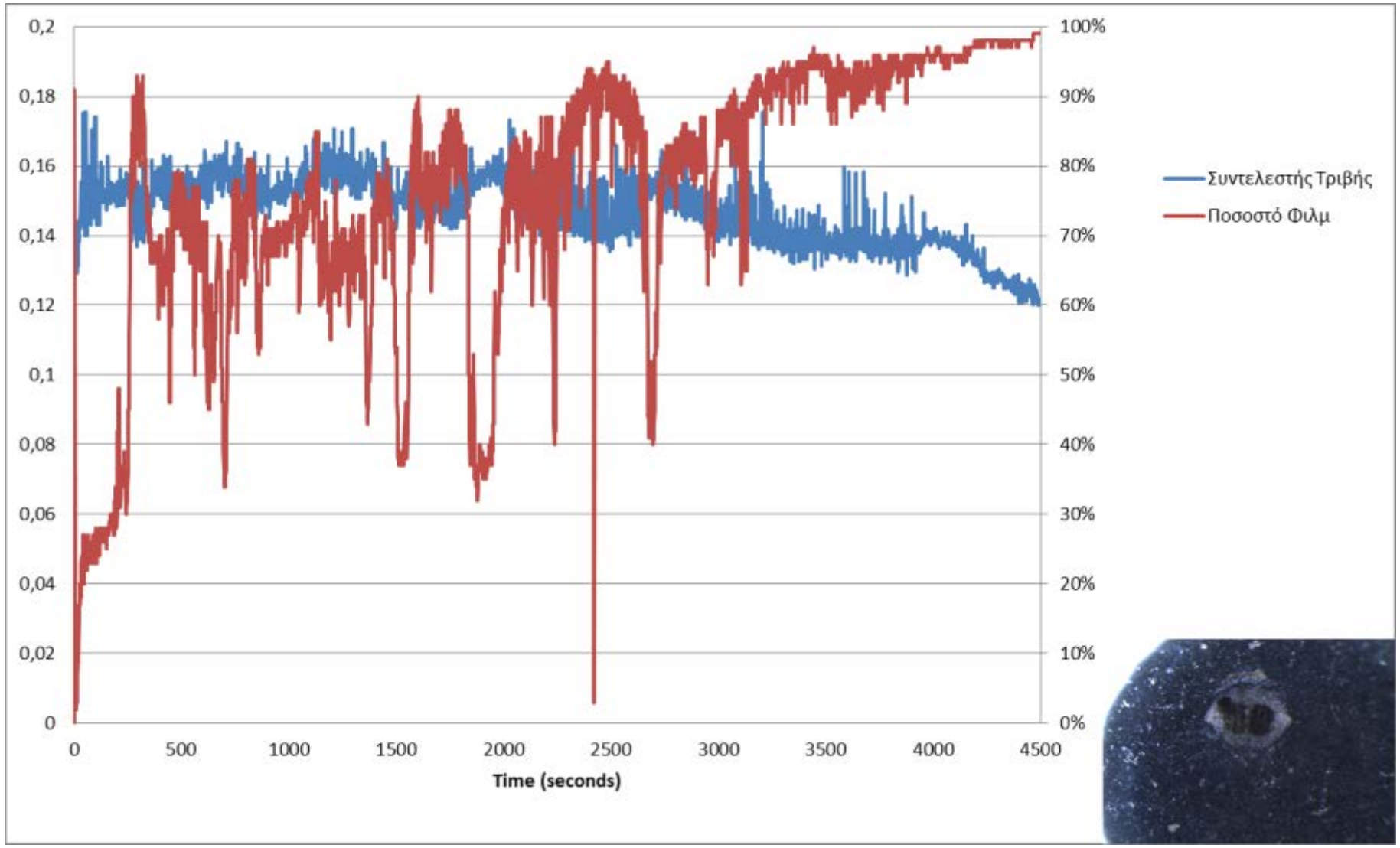
***Δείγμα DMA1 – 0.5% Biodiesel***



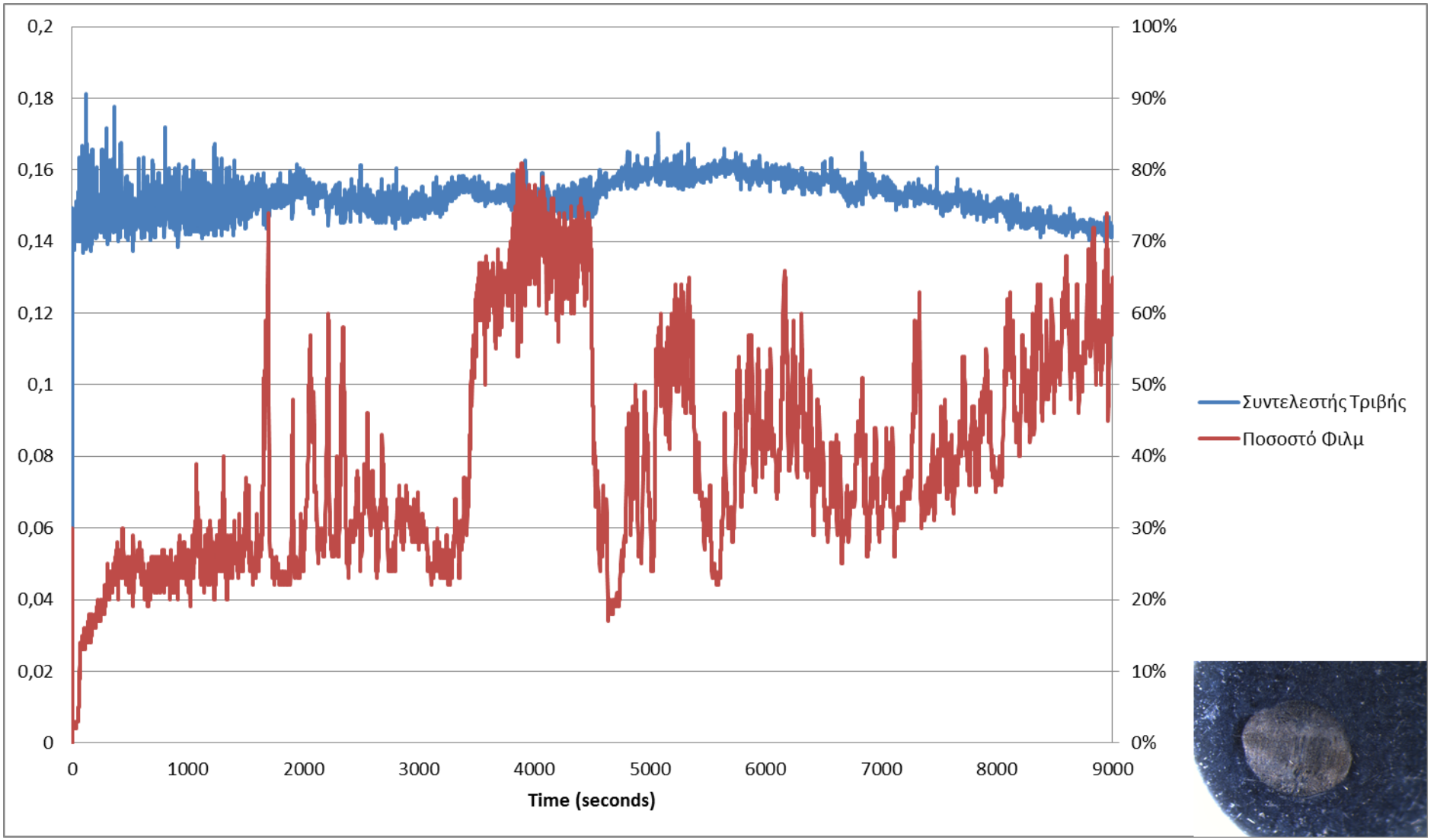
***Δείγμα DMA1 – 0.5% Biodiesel (150min 0.5Kg)***



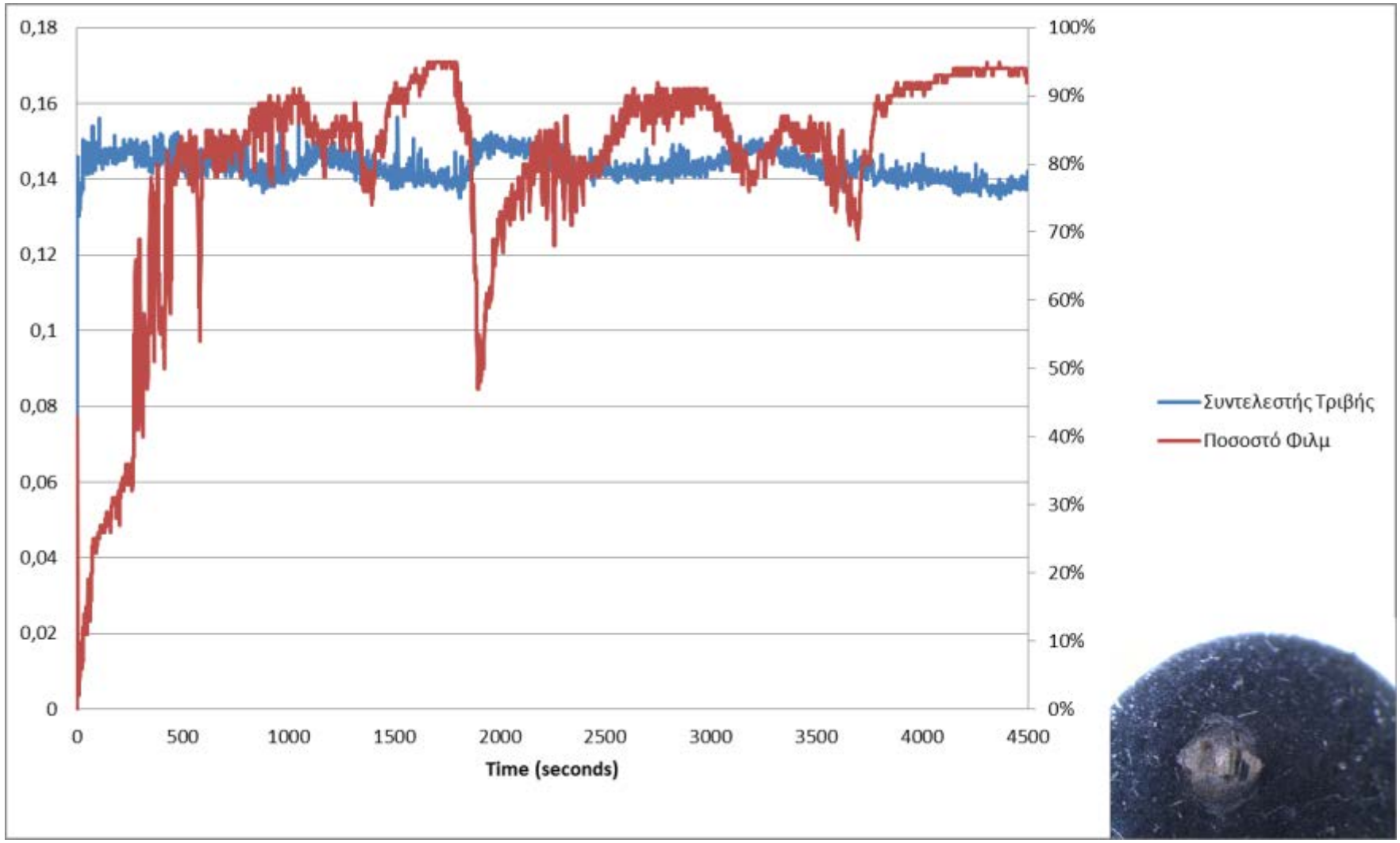
***Δείγμα DMA1 – 1% Biodiesel***



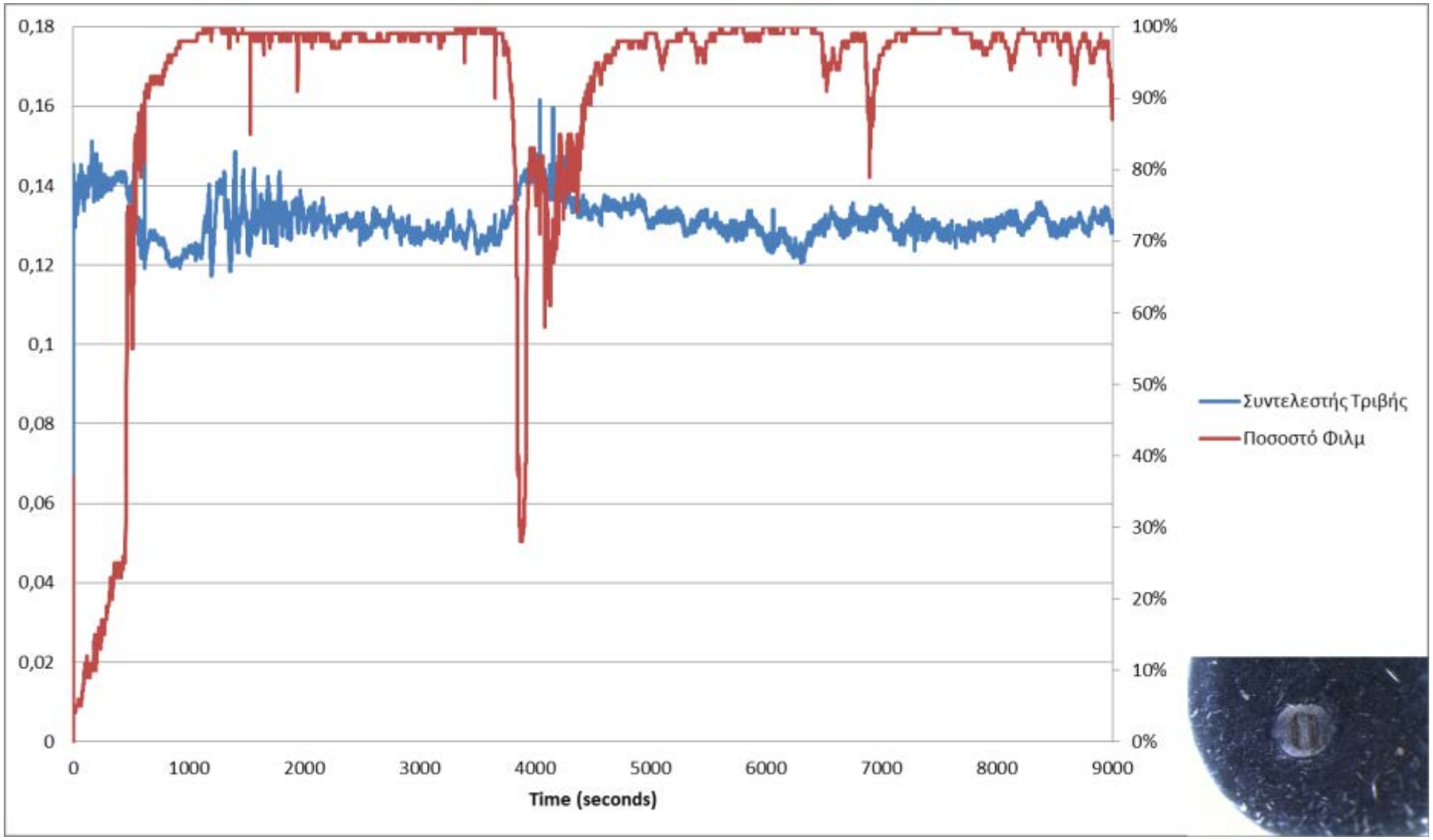
***Δείγμα DMA1 – 1% Biodiesel (150min 0.5Kg)***



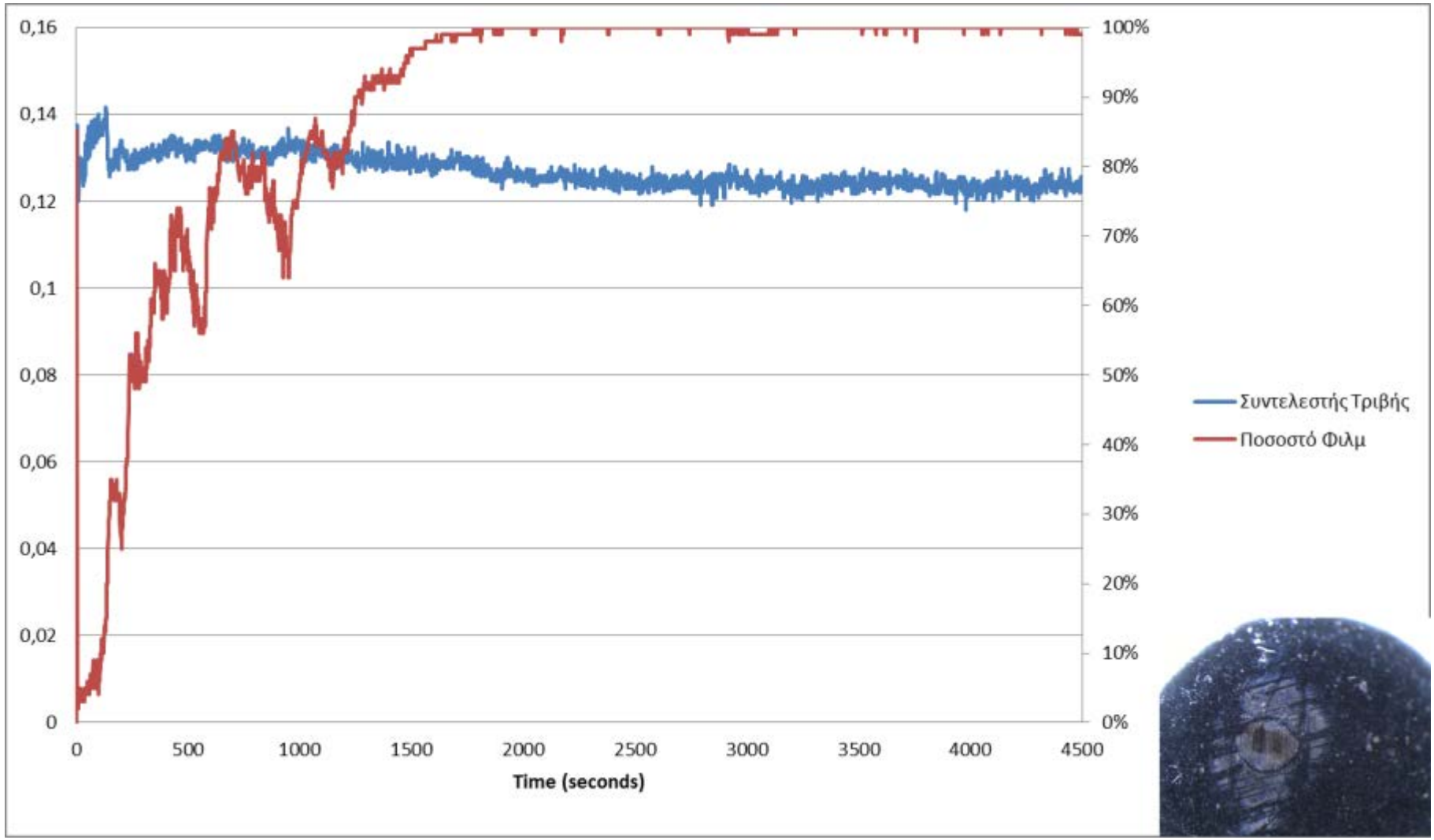
***Δείγμα DMA1 – 2% Biodiesel***



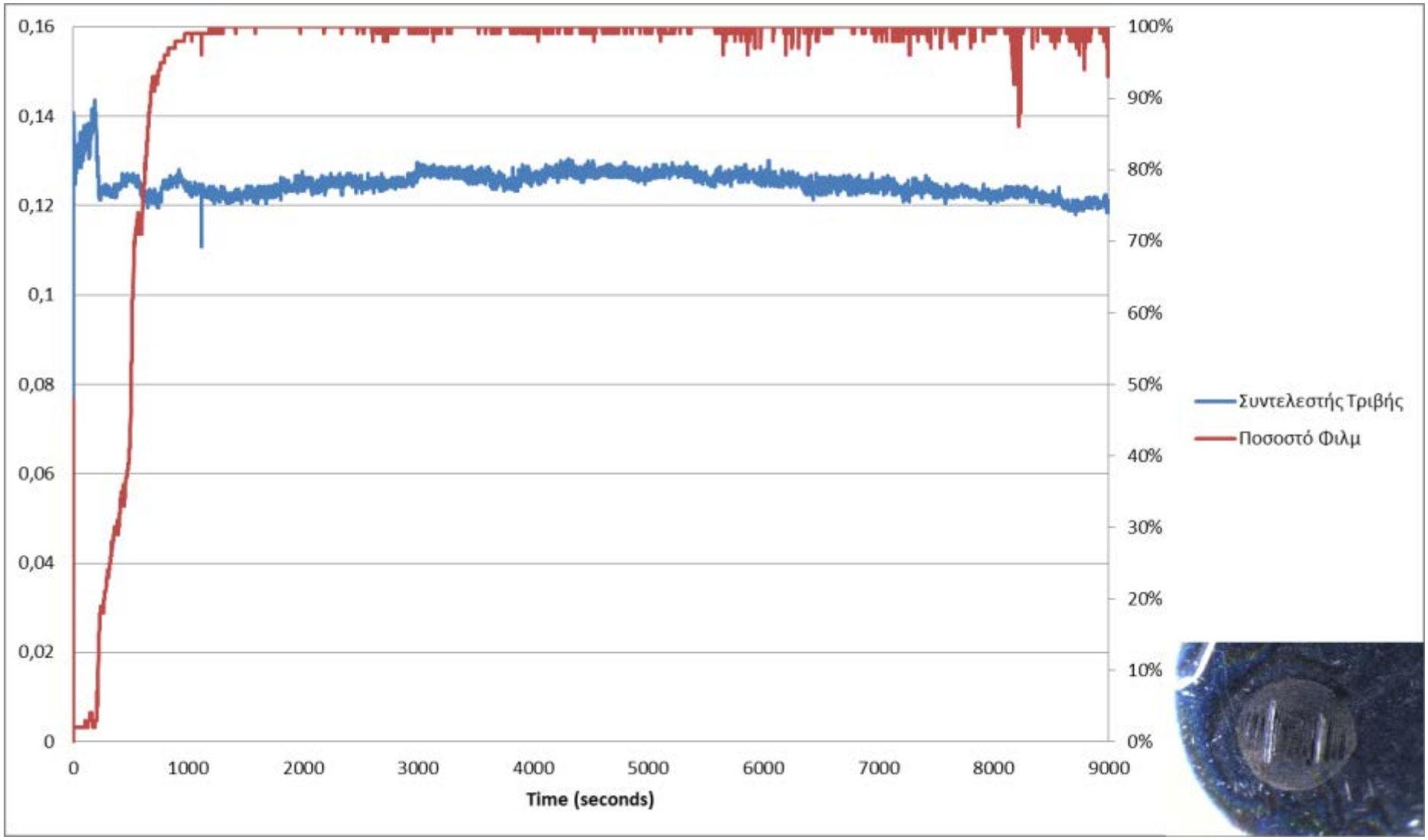
***Δείγμα DMA1 – 2% Biodiesel (150min 0.5Kg)***



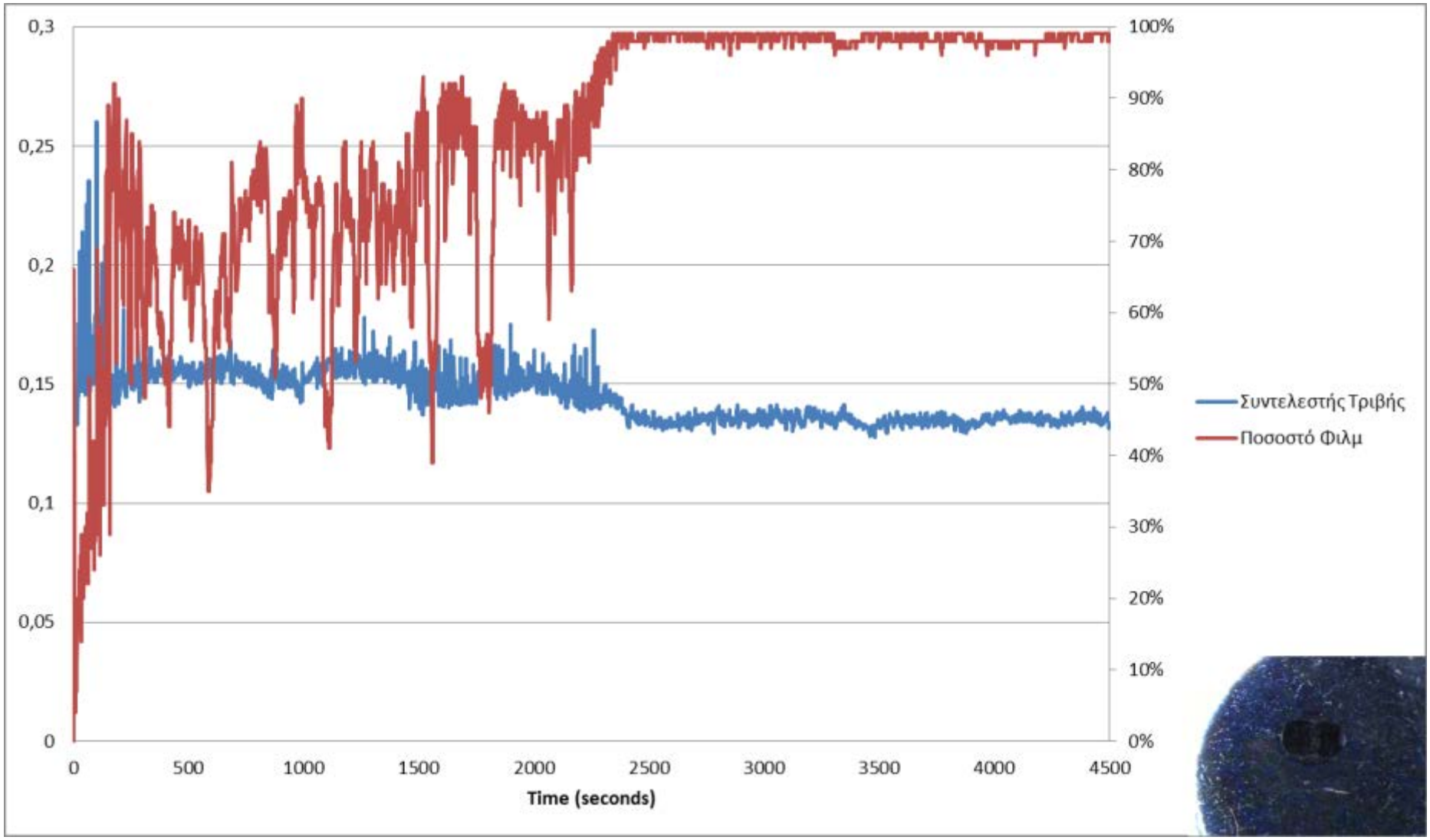
***Δείγμα DMA1 – 5% Biodiesel***



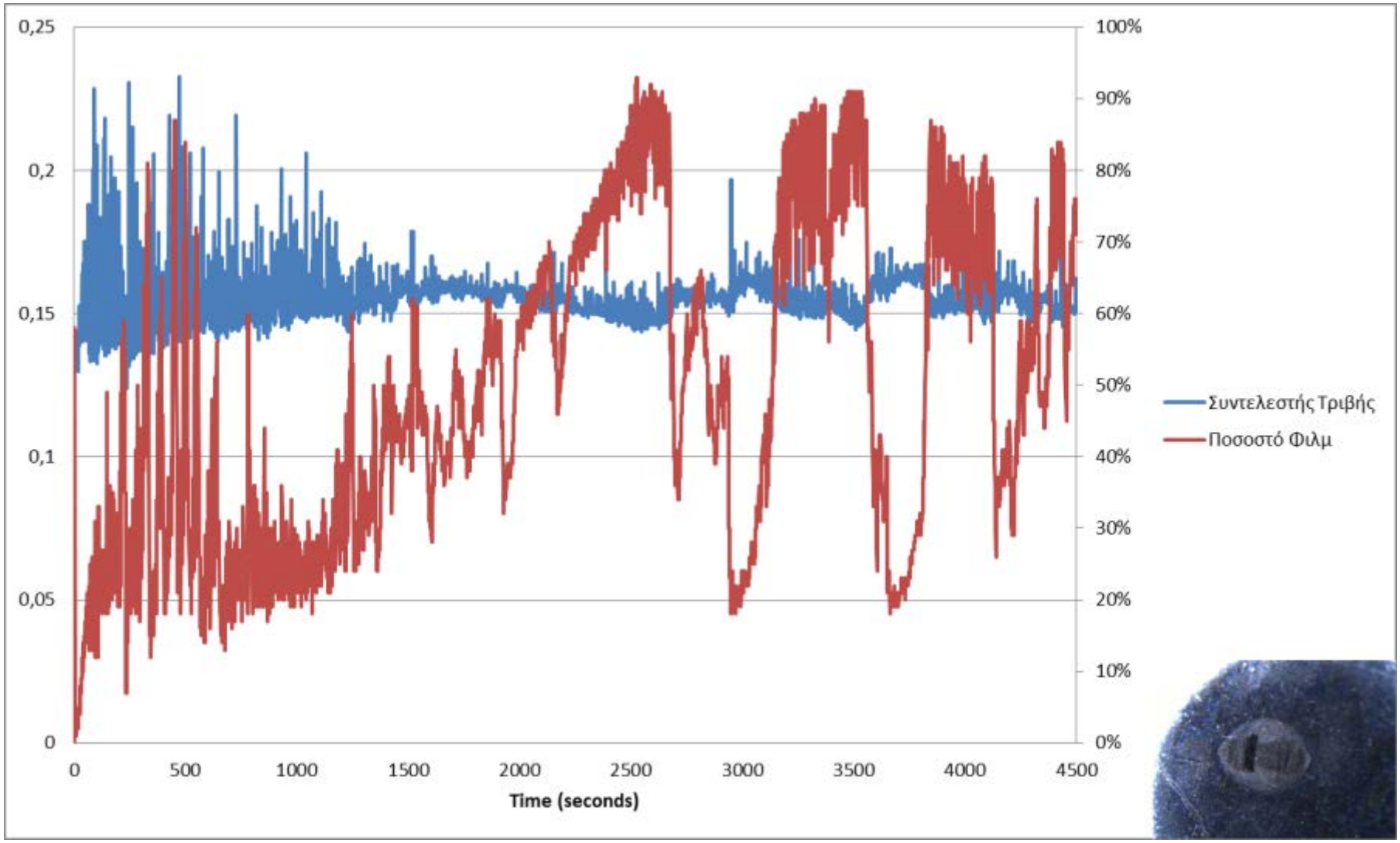
***Δείγμα DMA1 – 5% Biodiesel (150min 0.5Kg)***



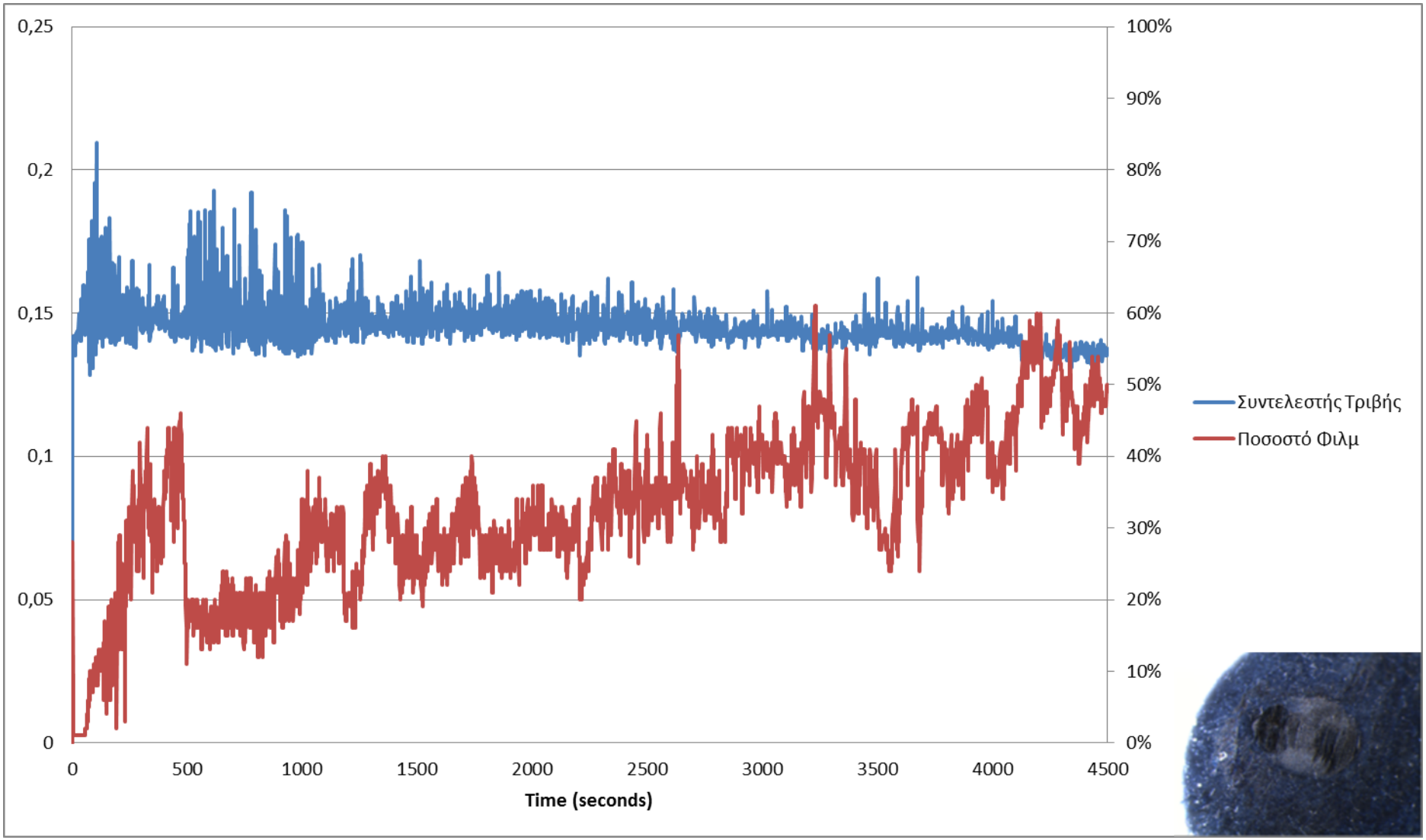
***Δείγμα DMA2***


0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
4500
Time (seconds)
Συντελεστής Τριβής
Πσοστό Φιλμ

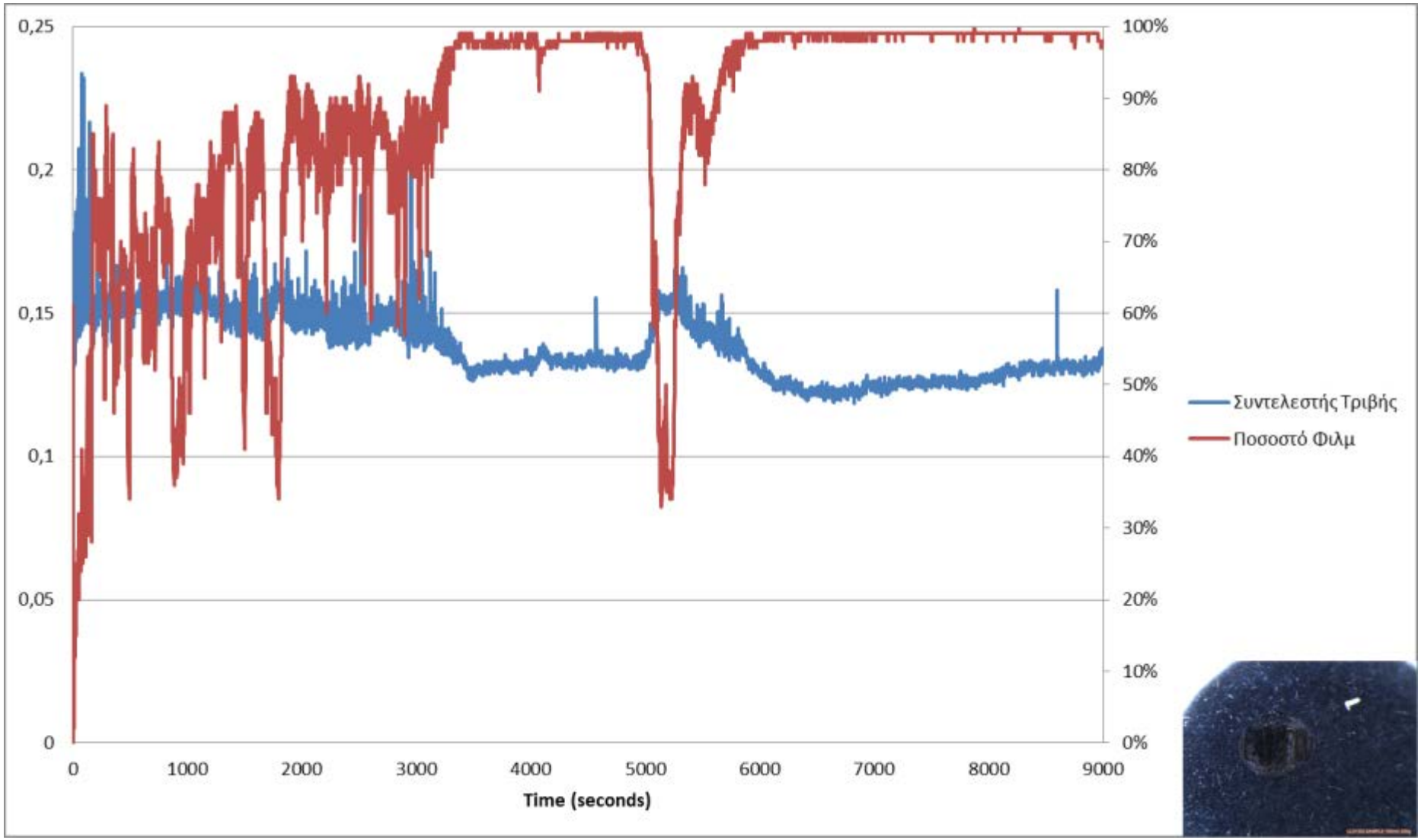
***Δείγμα DMA2 (75min 0.5Kg)***



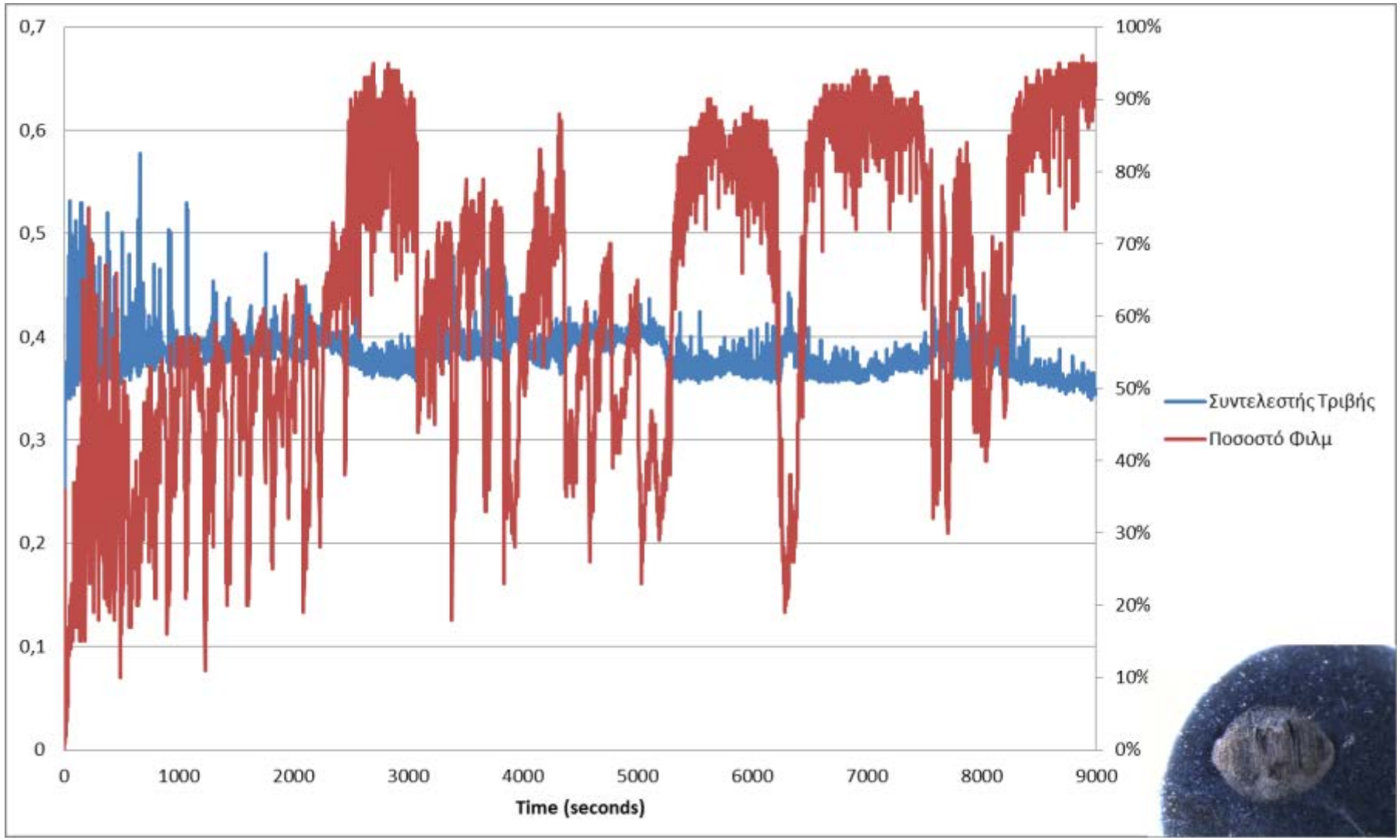
***Δείγμα DMA2 (75min 1Kg)***



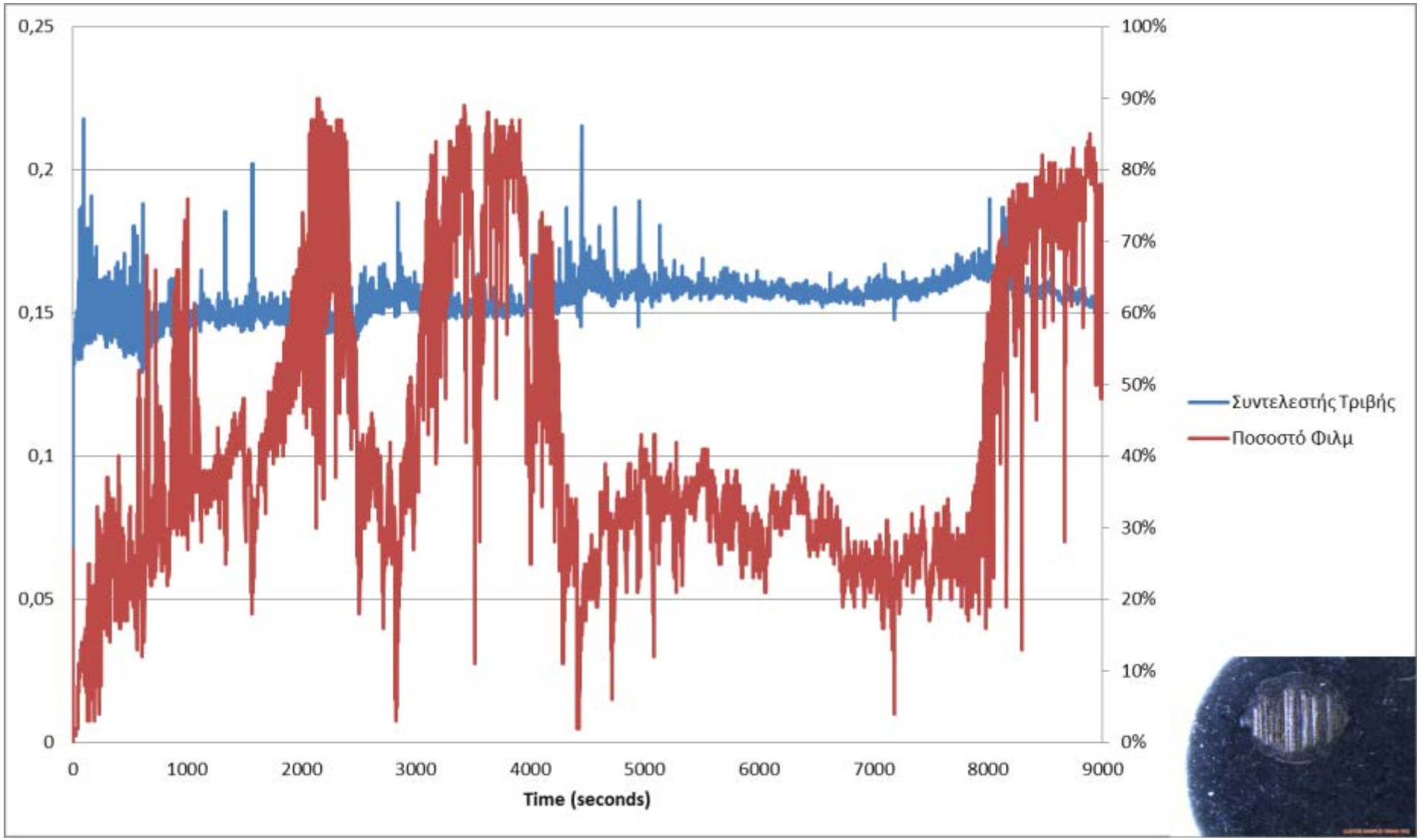
***Δείγμα DMA2 (150min200gr)***



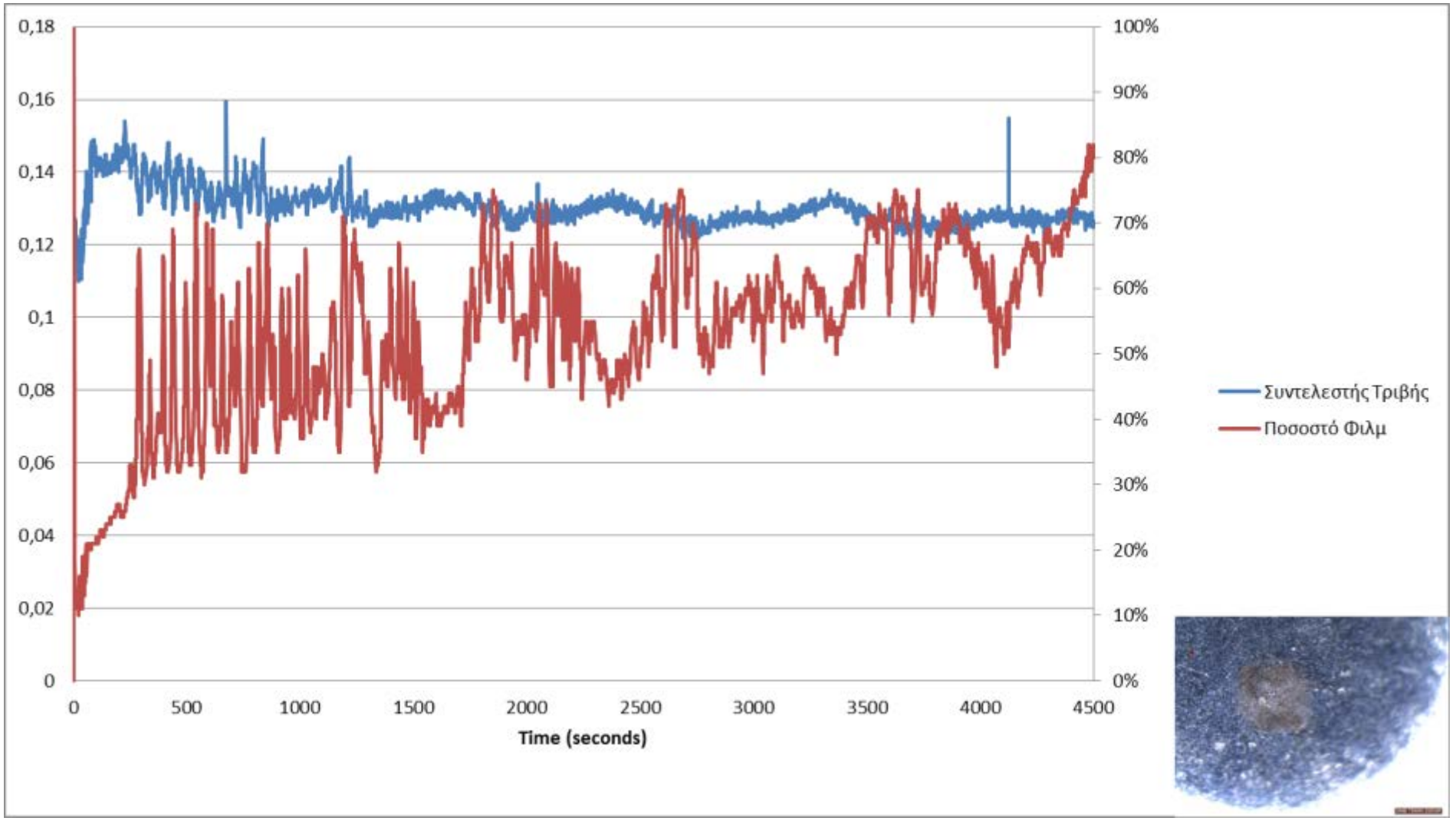
***Δείγμα DMA2 (150min 0.5Kg)***



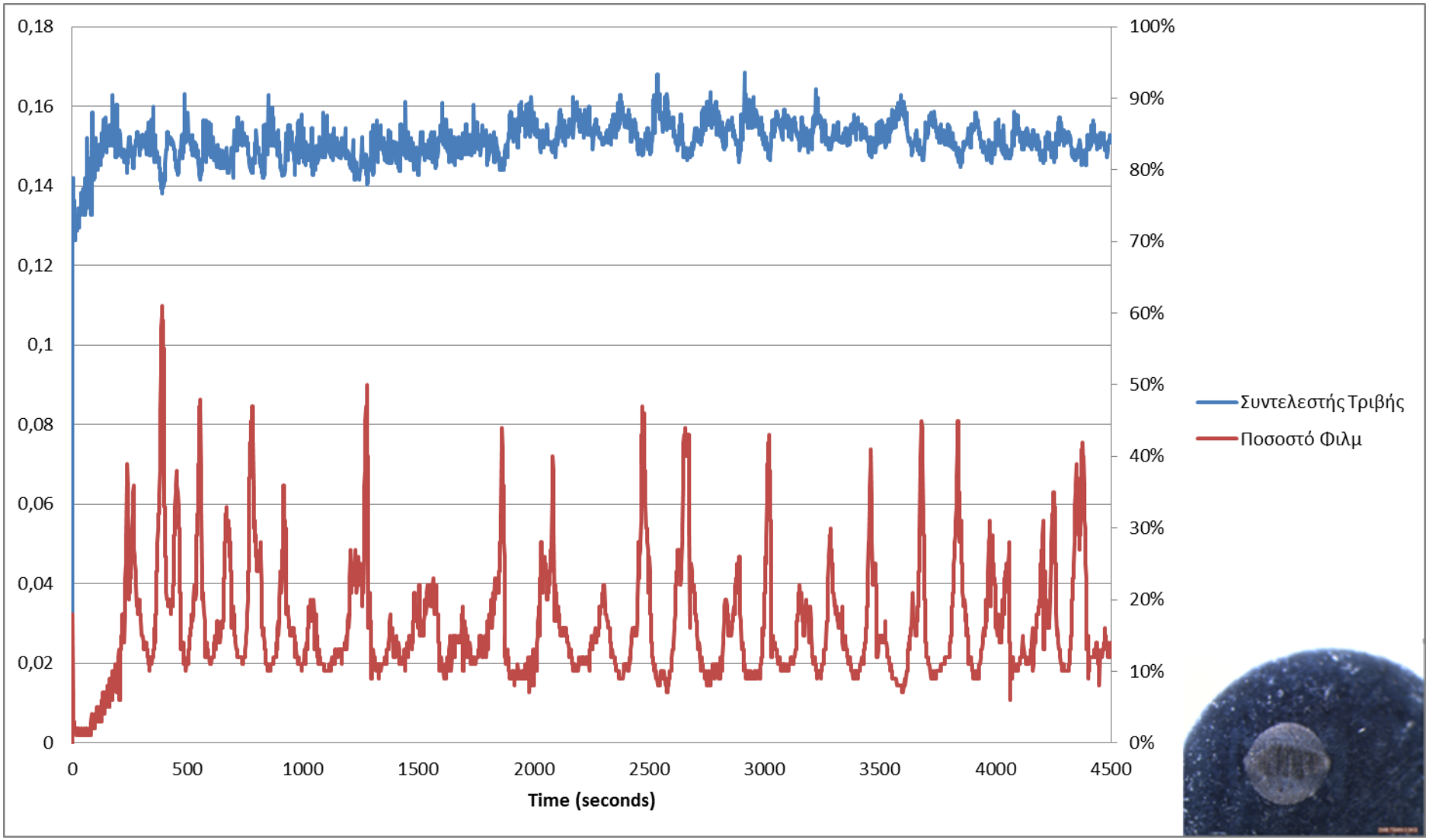
***Δείγμα DMA2 (150min1Kg)***



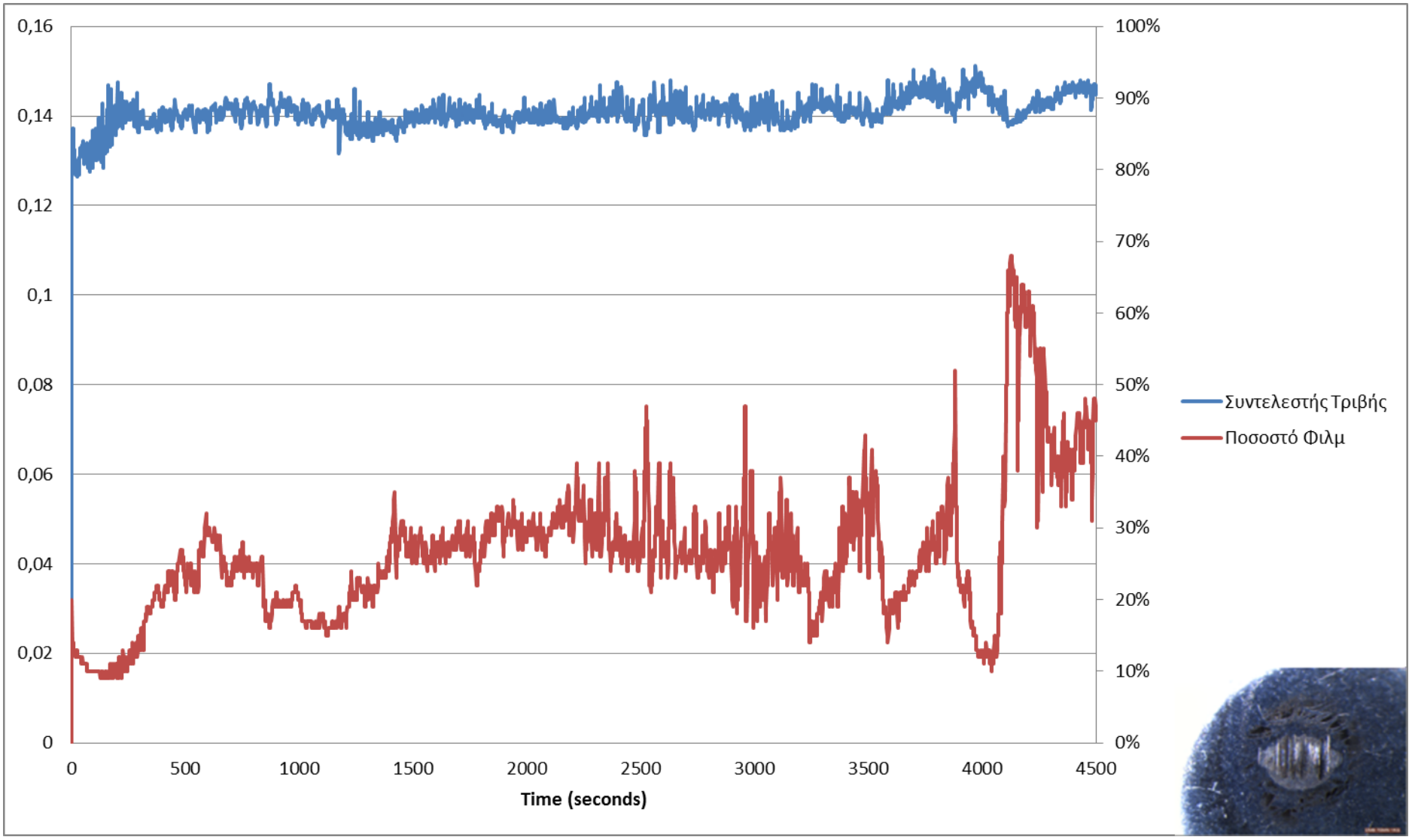
***Δείγμα DMB***


0,18
0,16
0,14
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
4500
Time (seconds)
Συντελεστής Τριβής
Ποσοστό Φιλμ

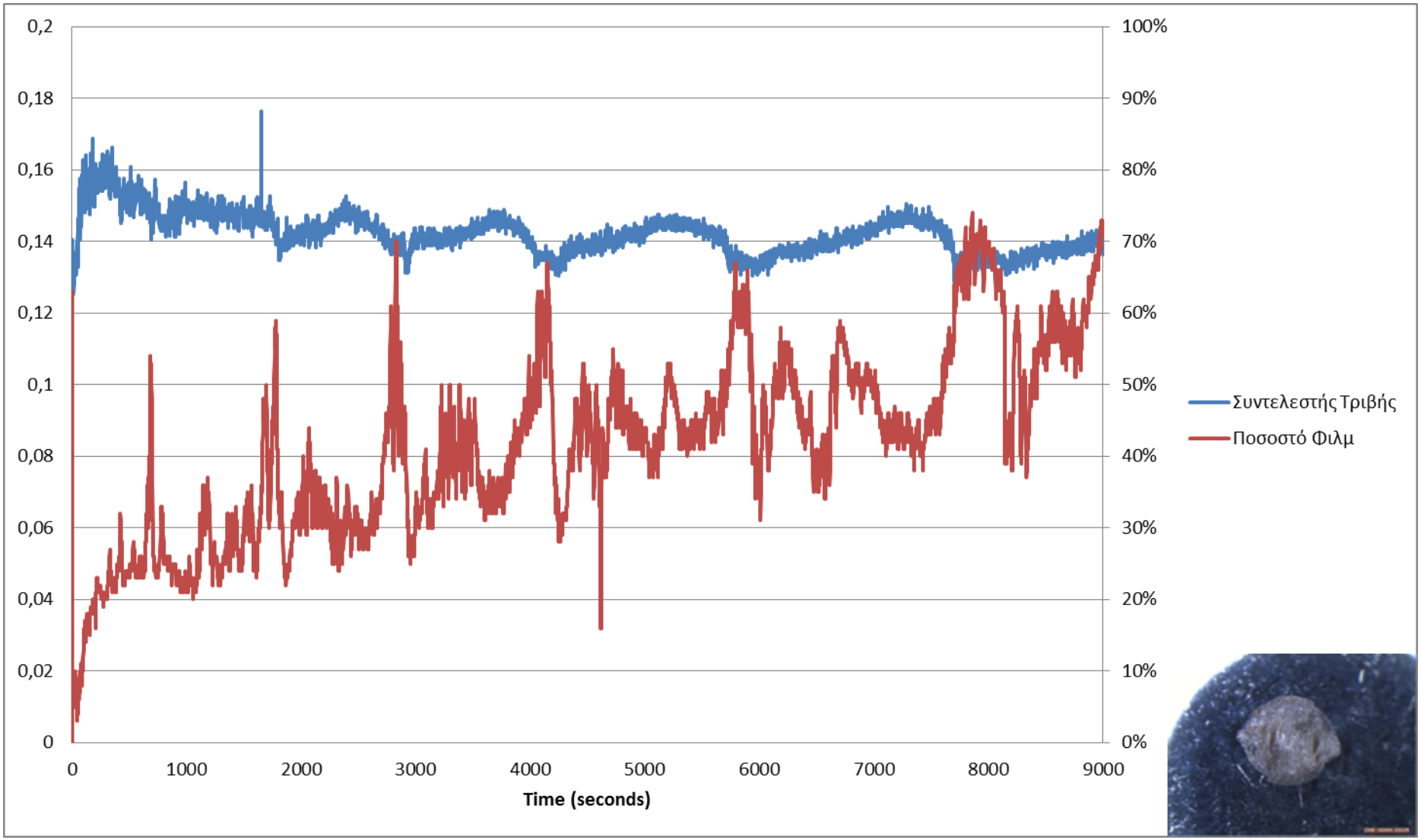
***Δείγμα DMB (75min 0.5Kg)***



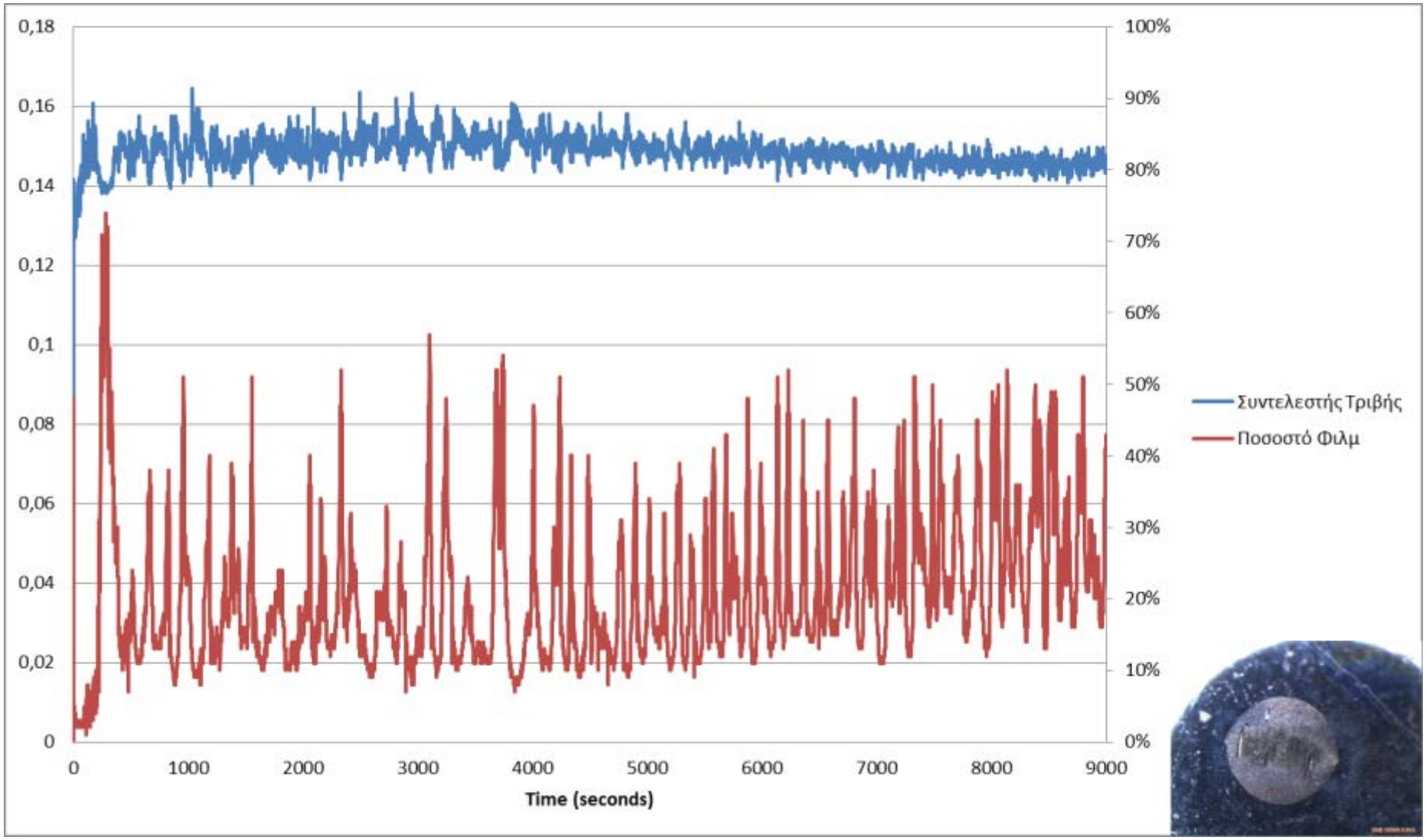
***Δείγμα DMB (75min 1Kg)***



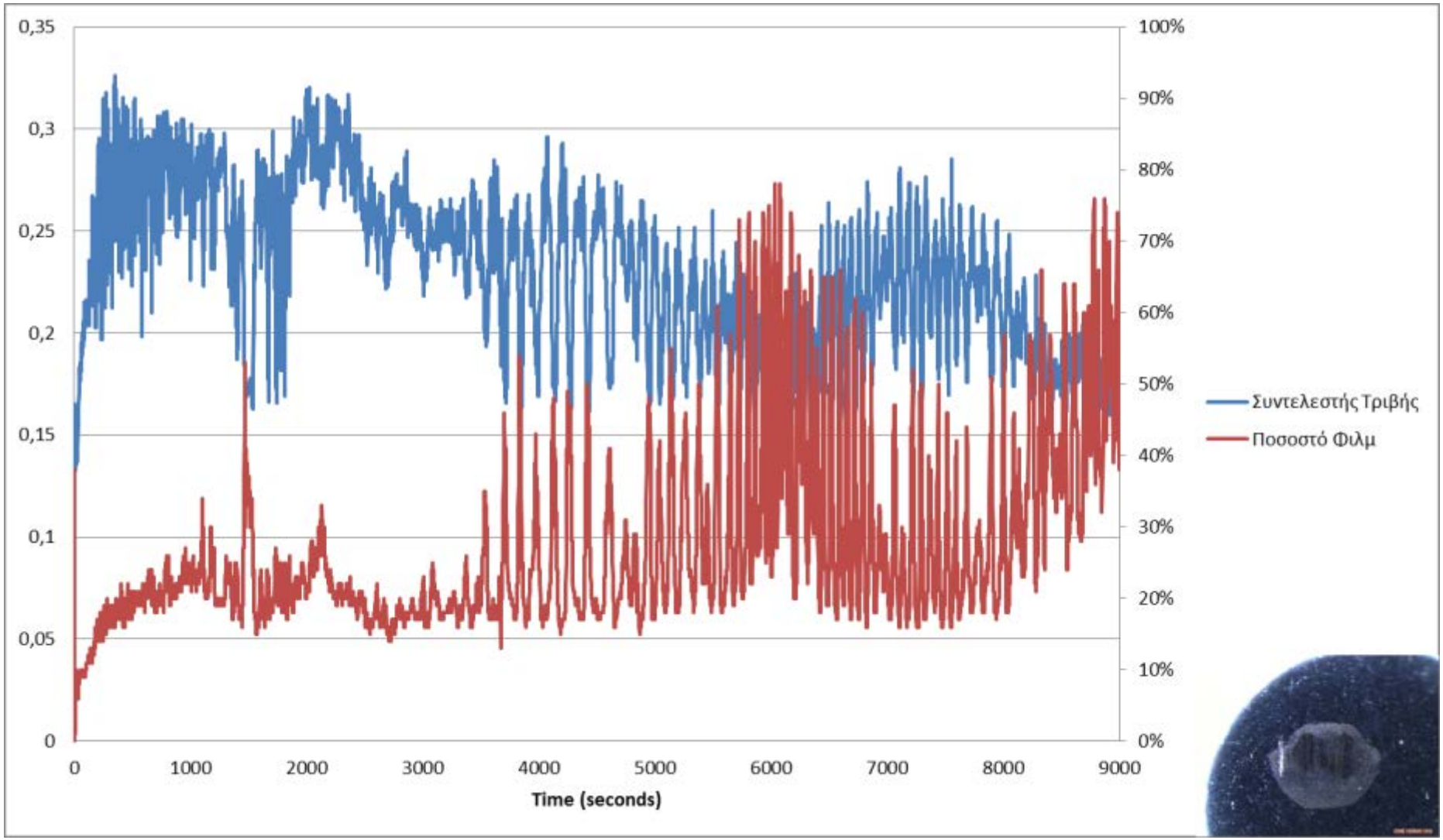
***Δείγμα DMB (150min 200gr)***



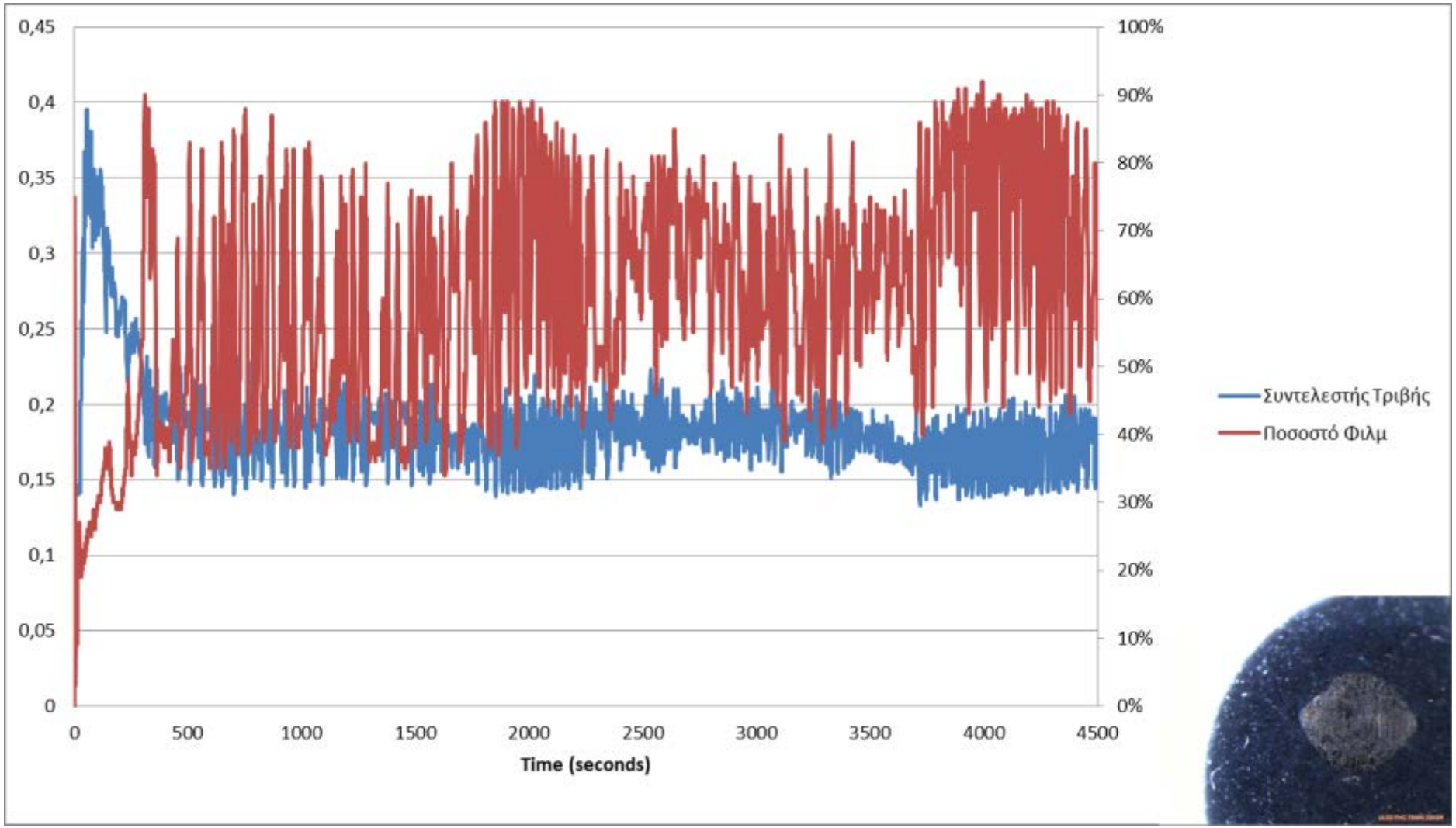
***Δείγμα DMB (150min 0.5Kg)***



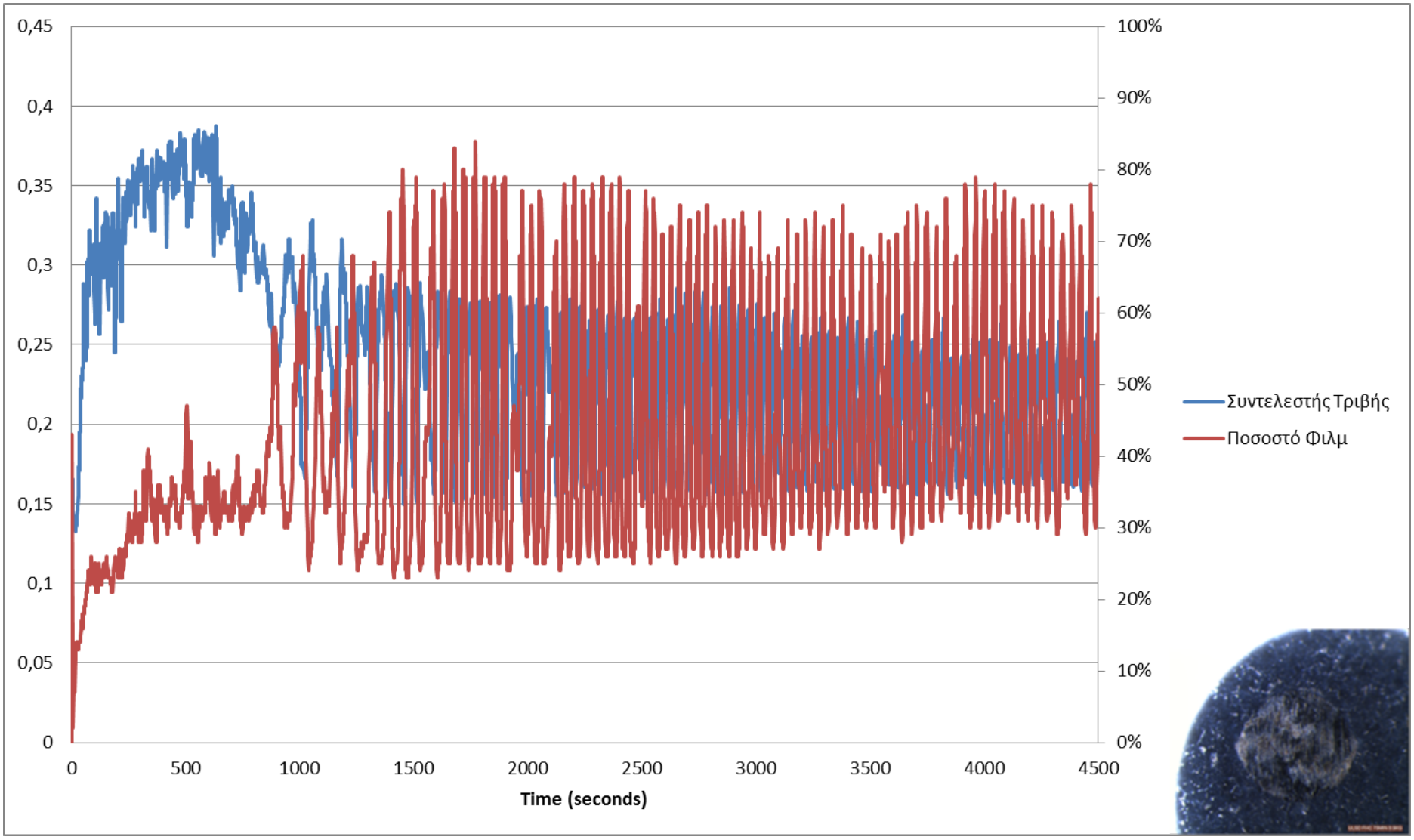
***Δείγμα DMB (150min 1Kg)***



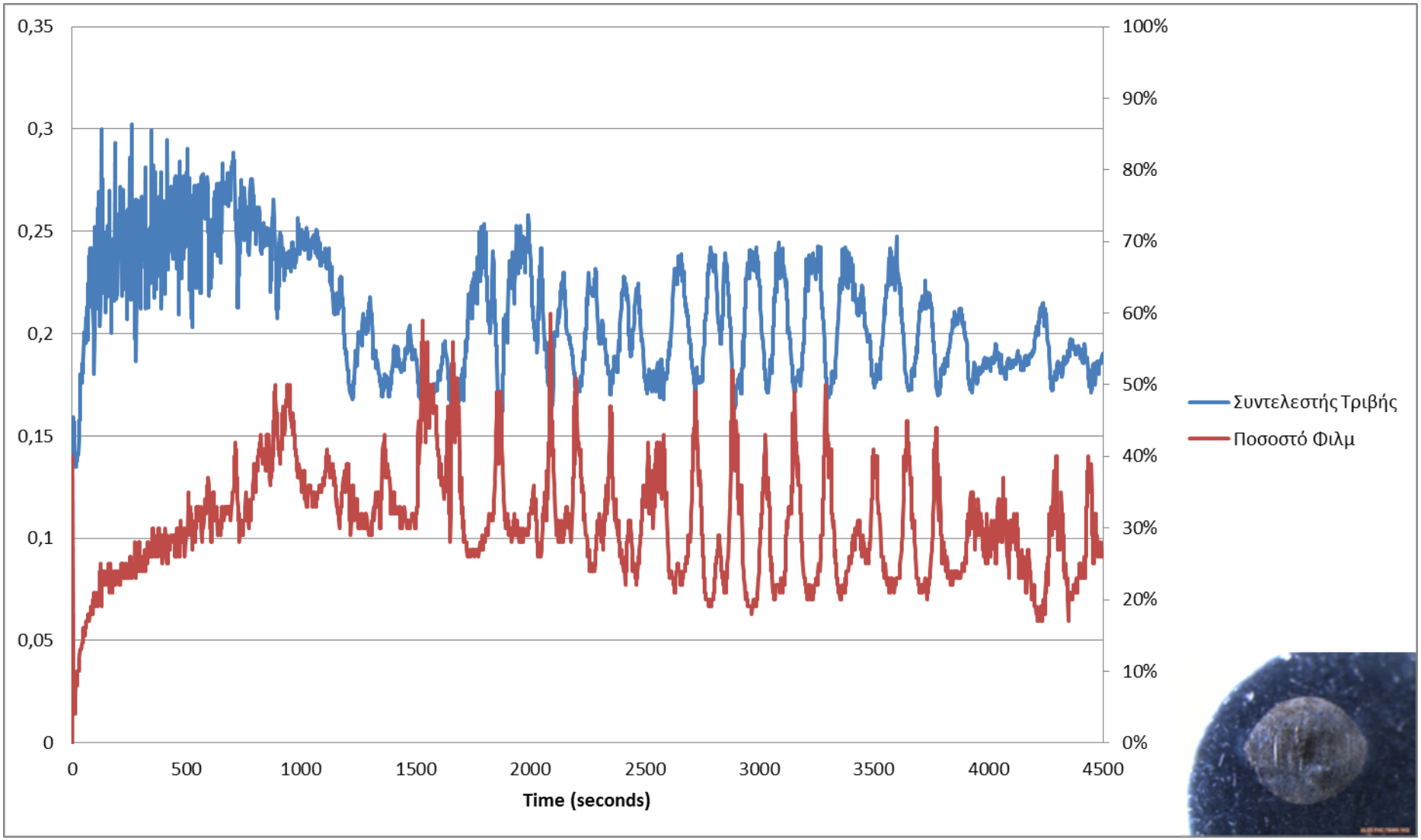
***Δείγμα ULSD1***



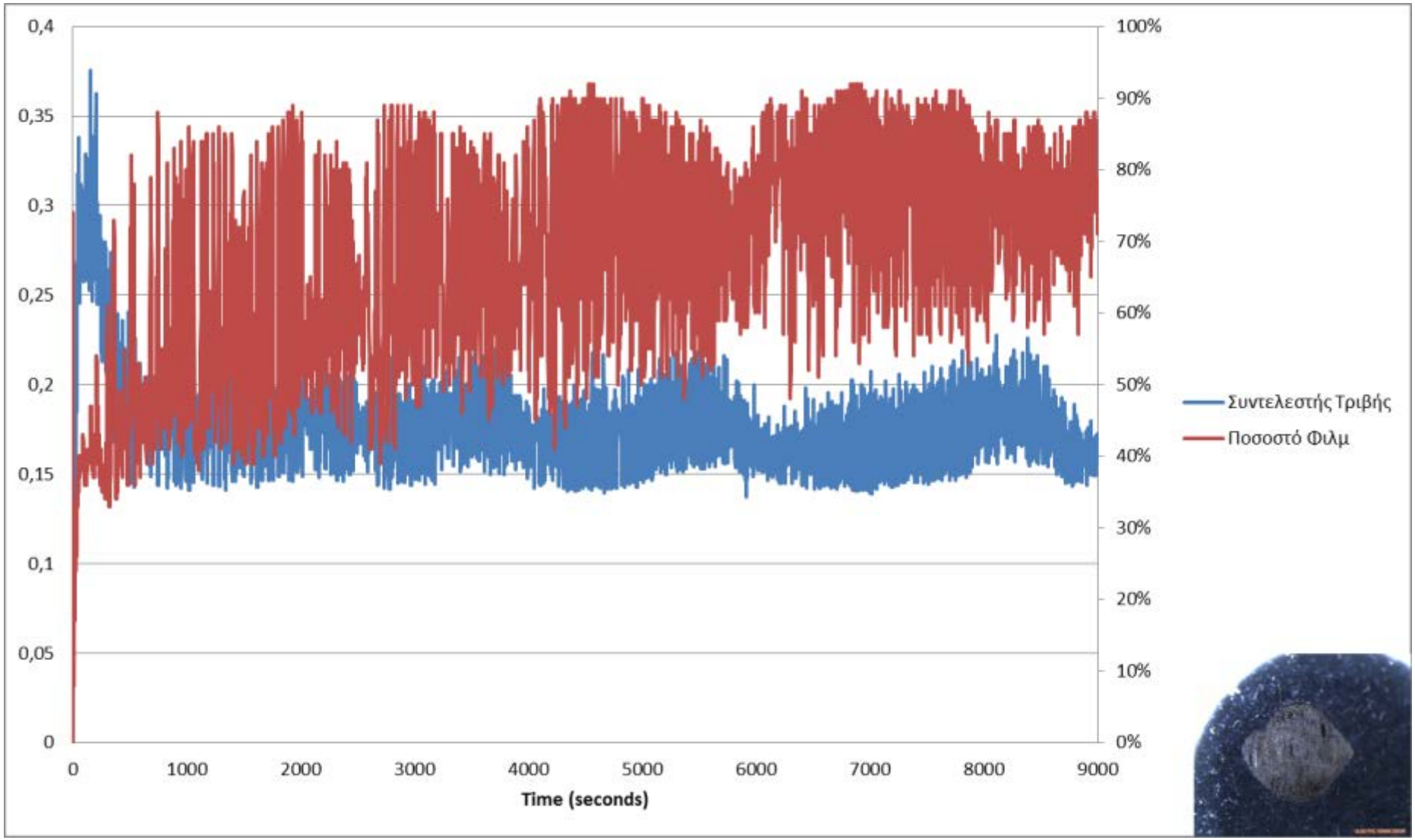
***Δείγμα ULSD1 (75min 0.5Kg)***



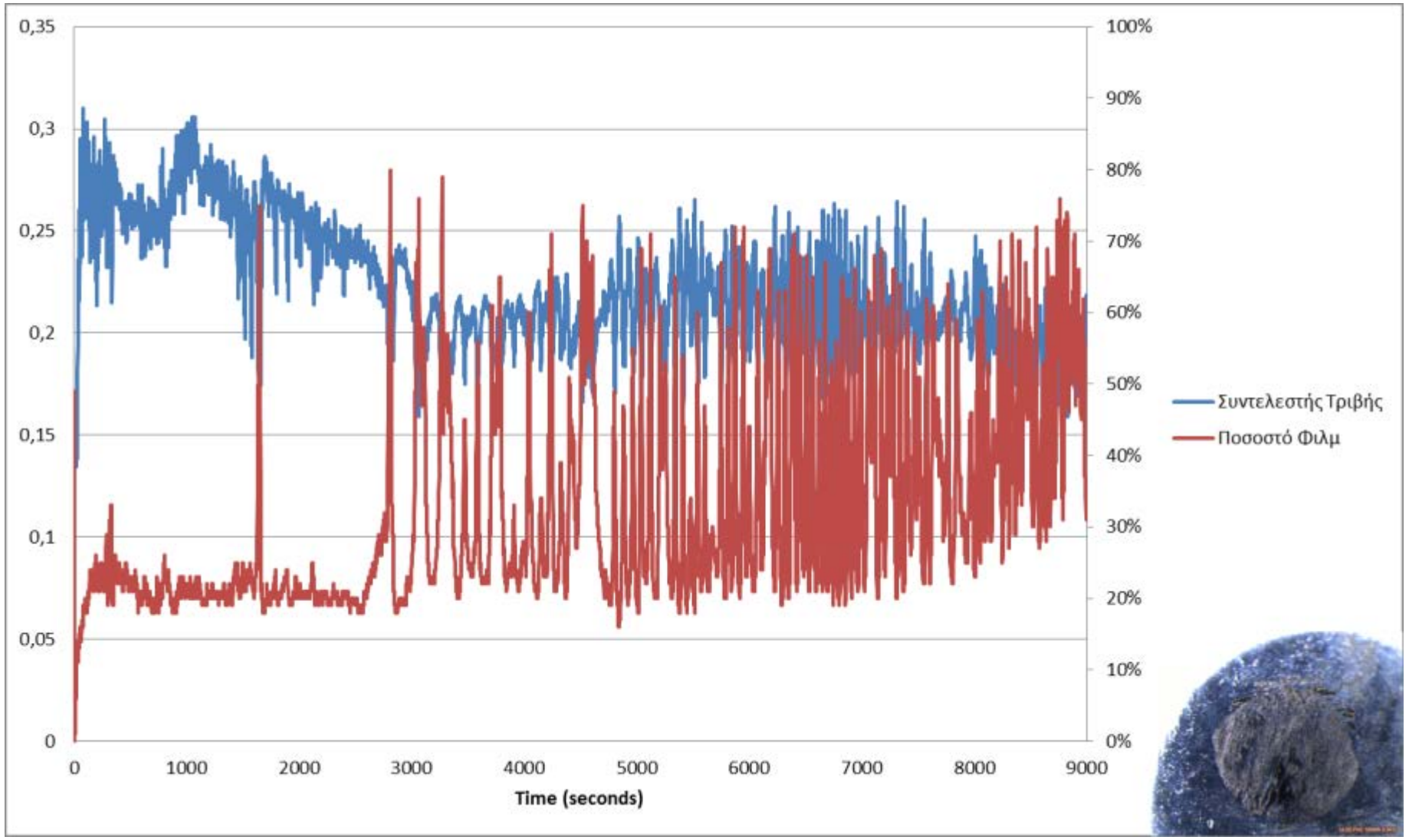
***Δείγμα ULSD1 (75min 1Kg)***



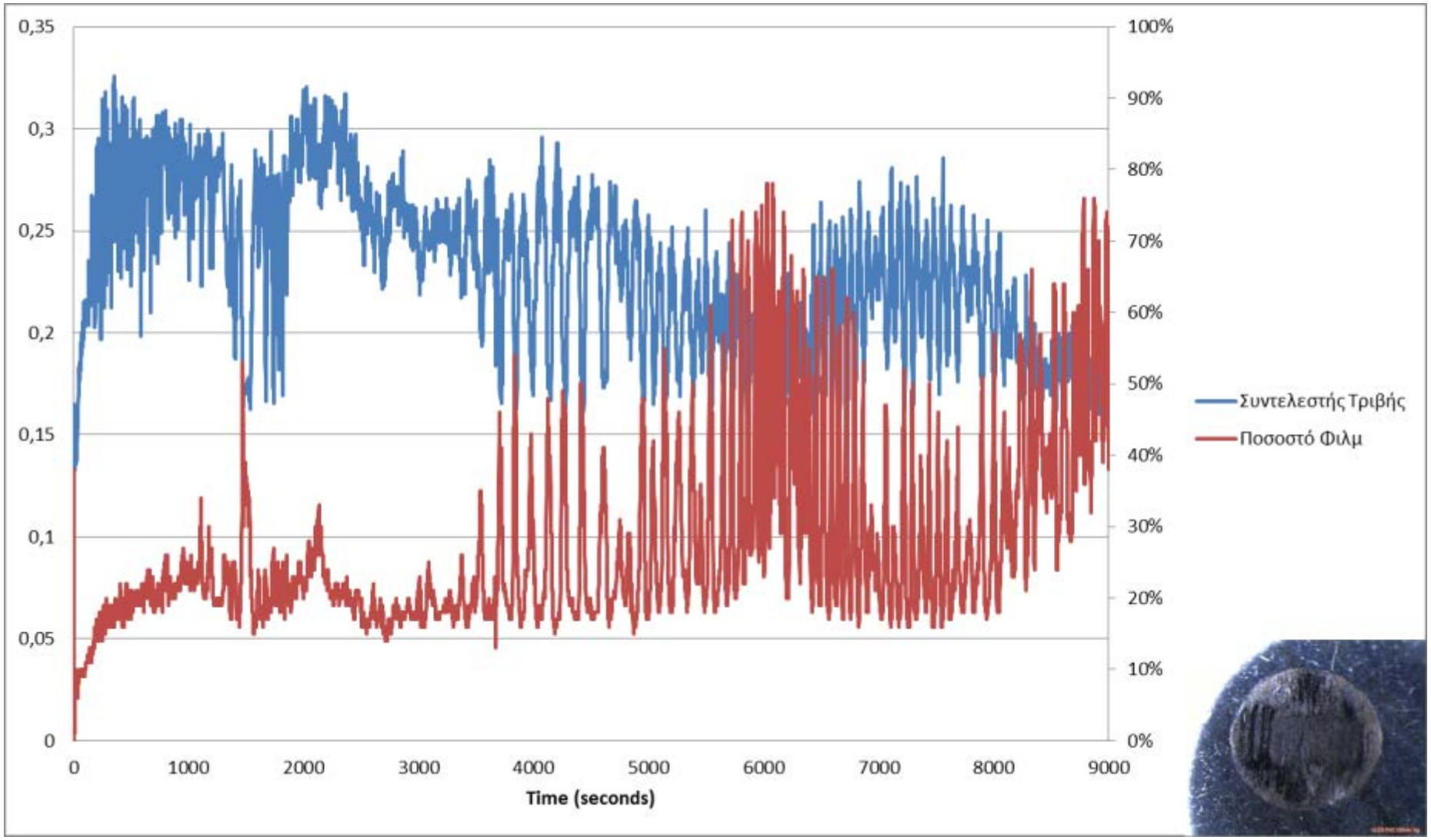
***Δείγμα ULSD1 (150min 200gr)***



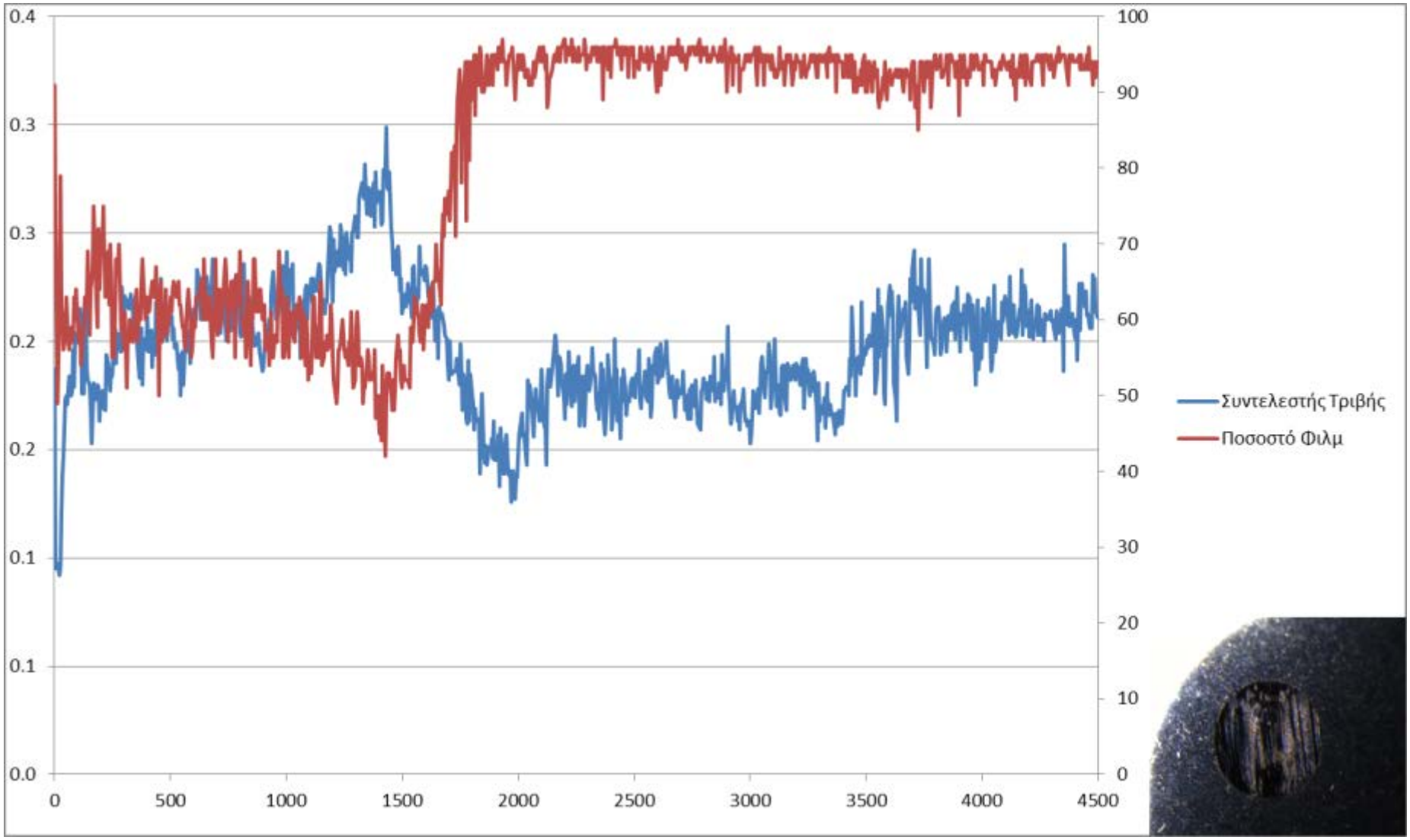
***Δείγμα ULSD1 (150min 0.5Kg)***



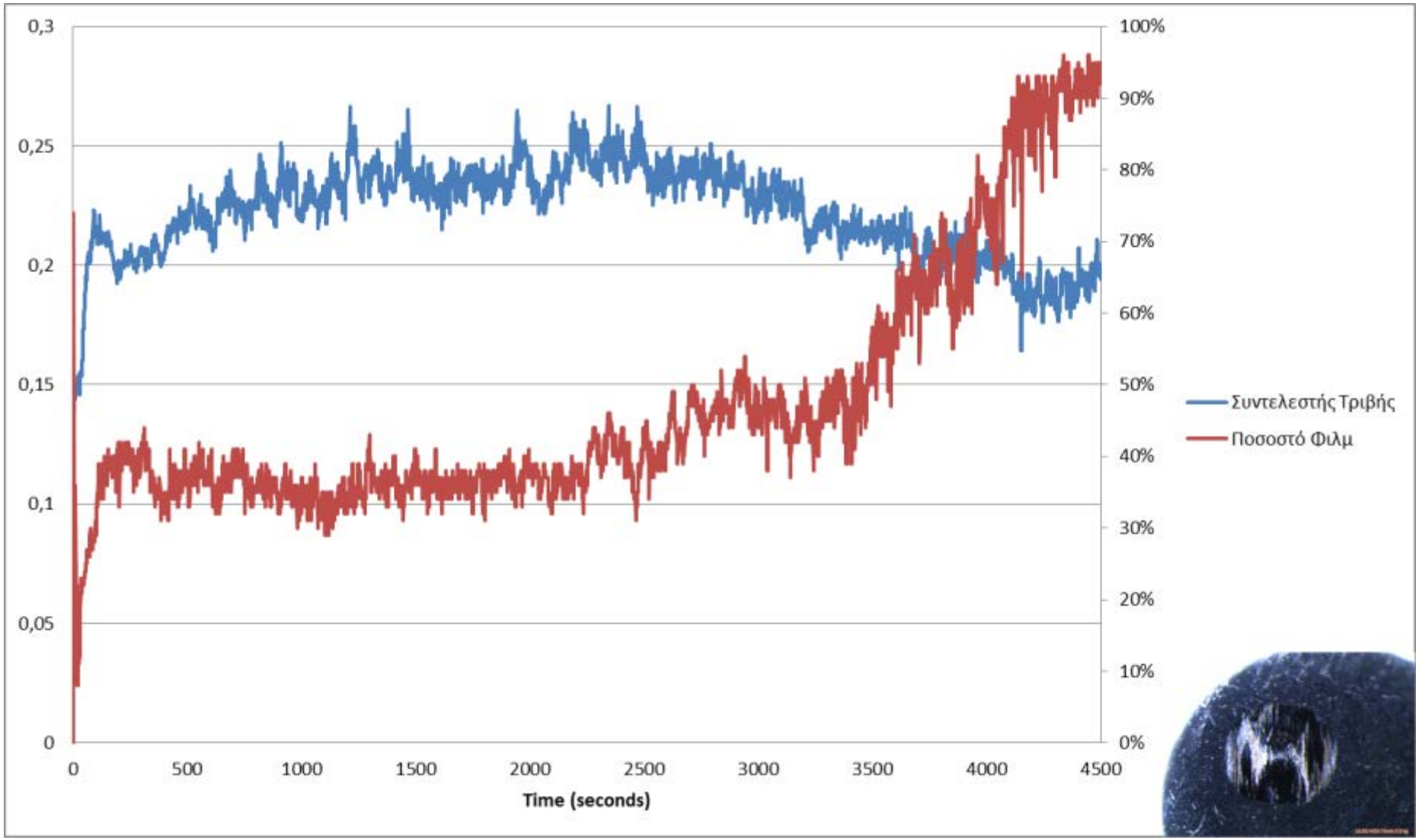
***Δείγμα ULSD1 (150min 1Kg)***



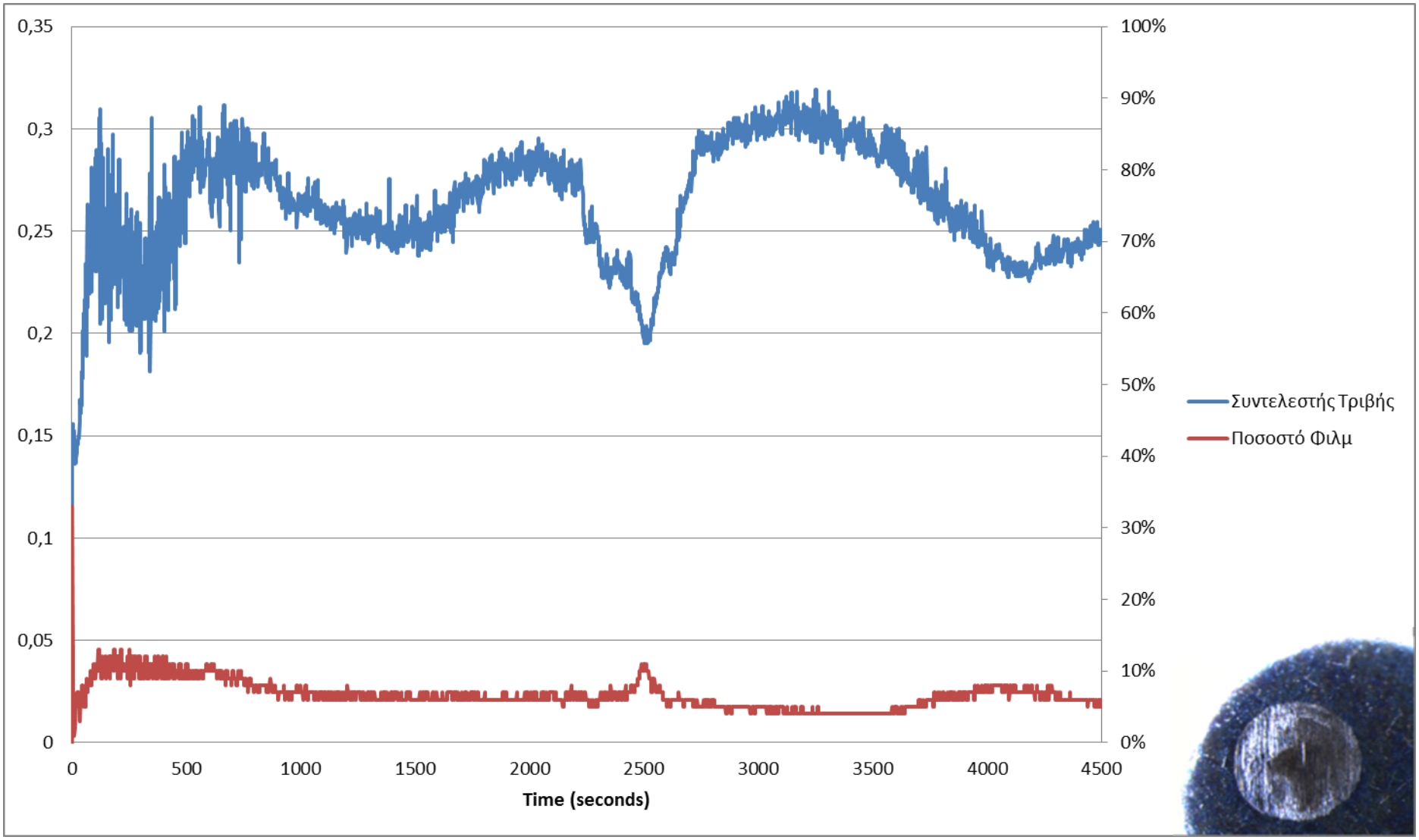
***Δείγμα ULSD2***



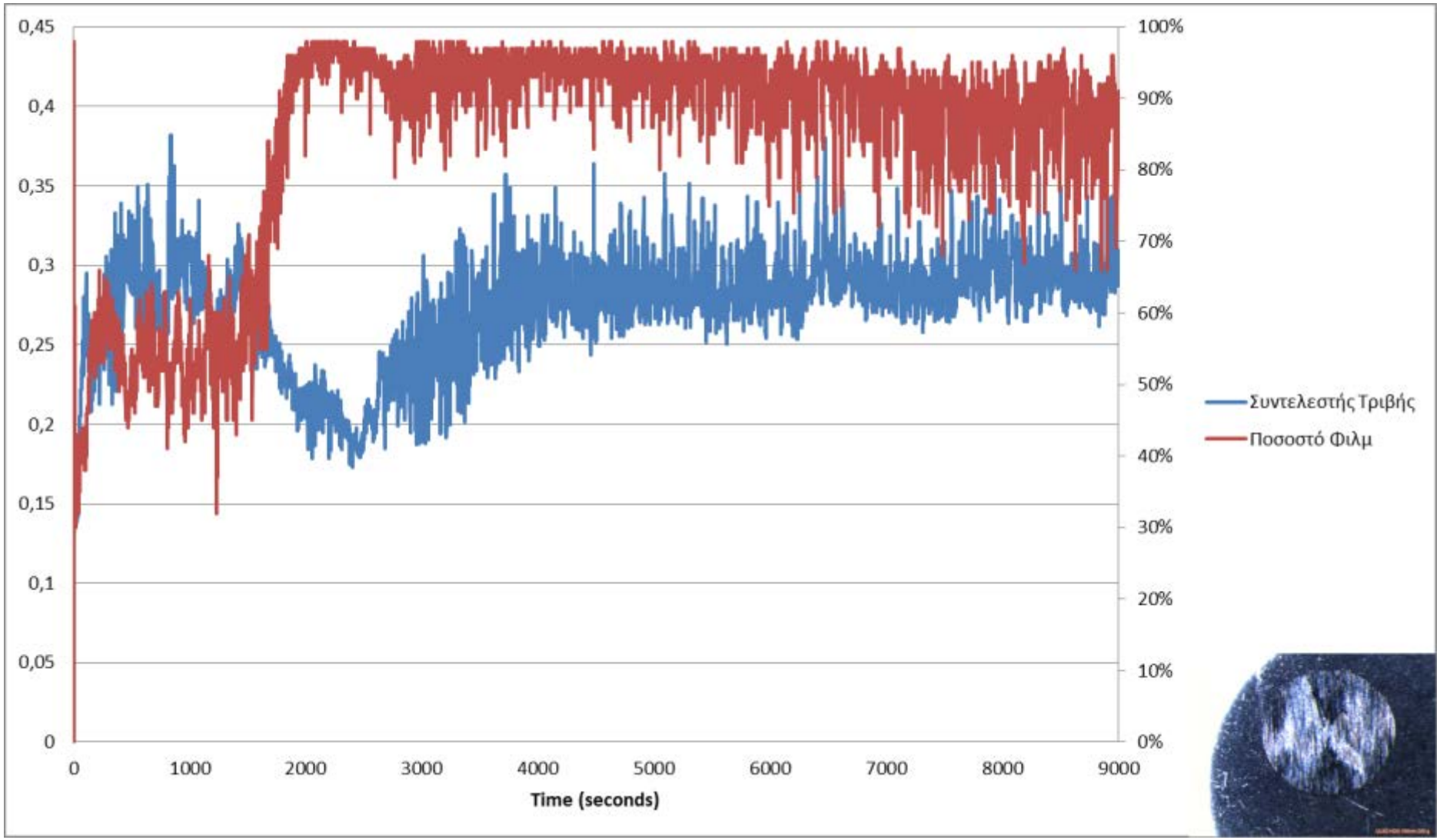
***Δείγμα ULSD2 (75min 0.5Kg)***



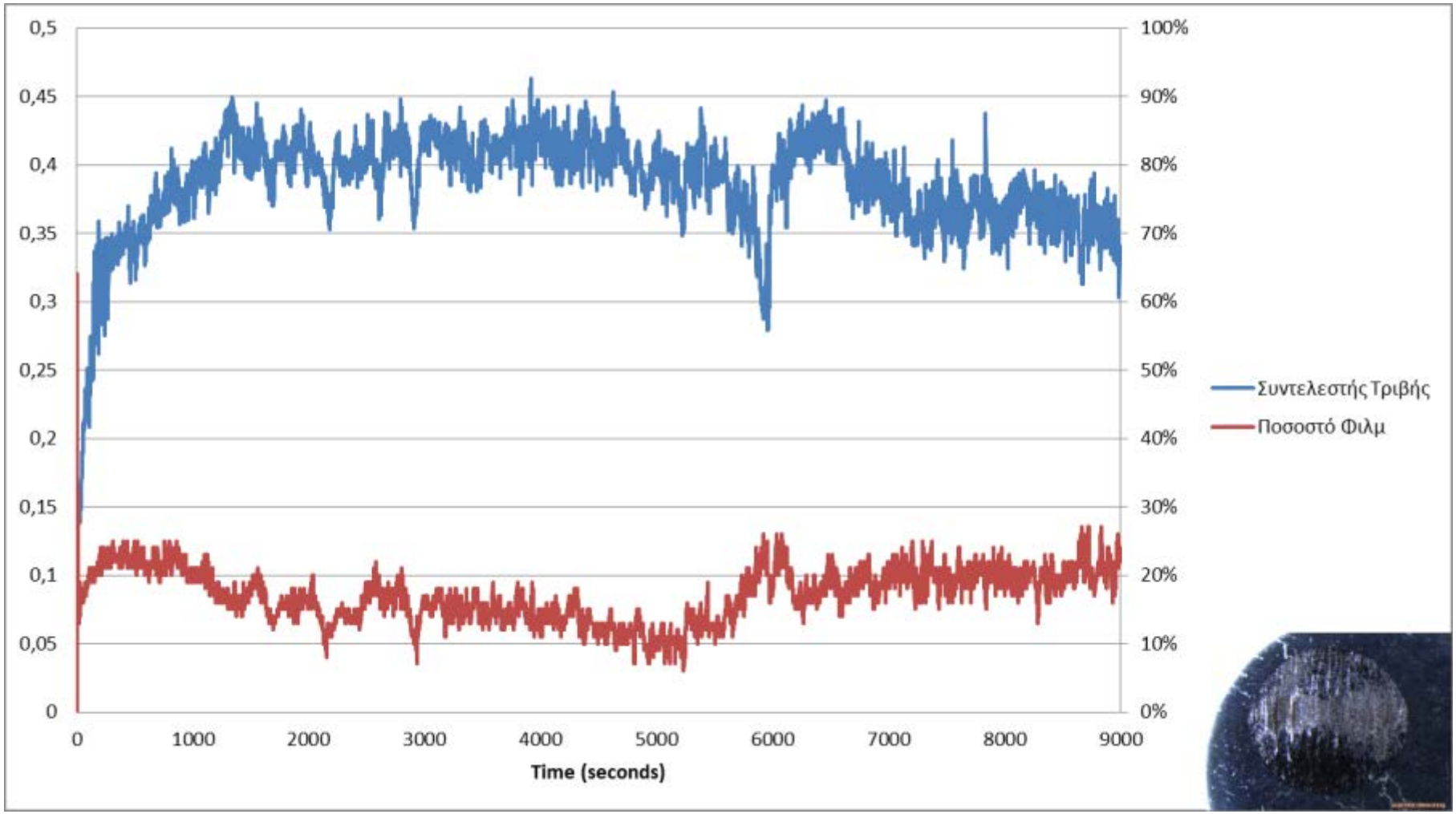
***Δείγμα ULSD2 (75min 1Kg)***



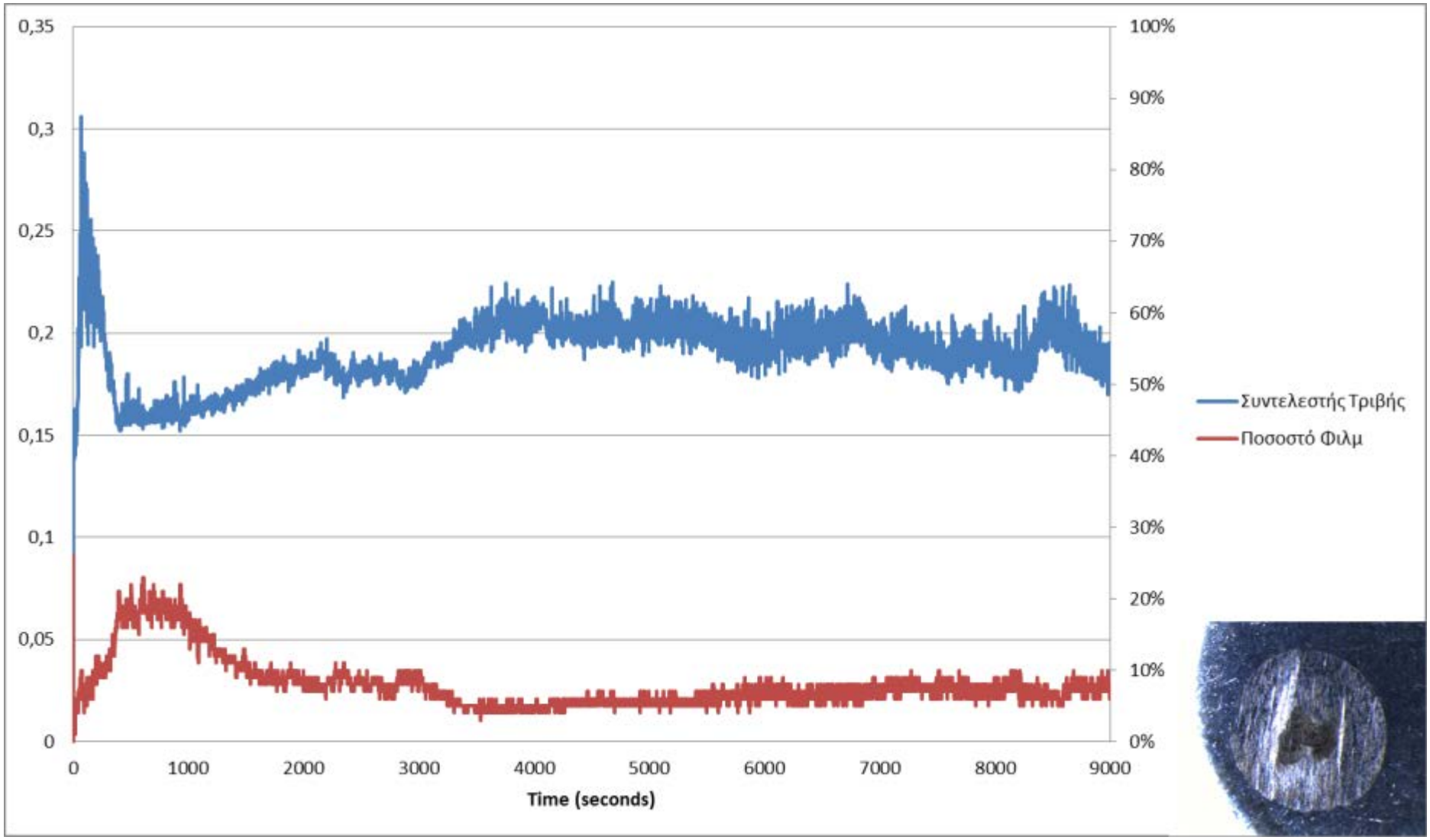
***Δείγμα ULSD2 (150min200gr)***



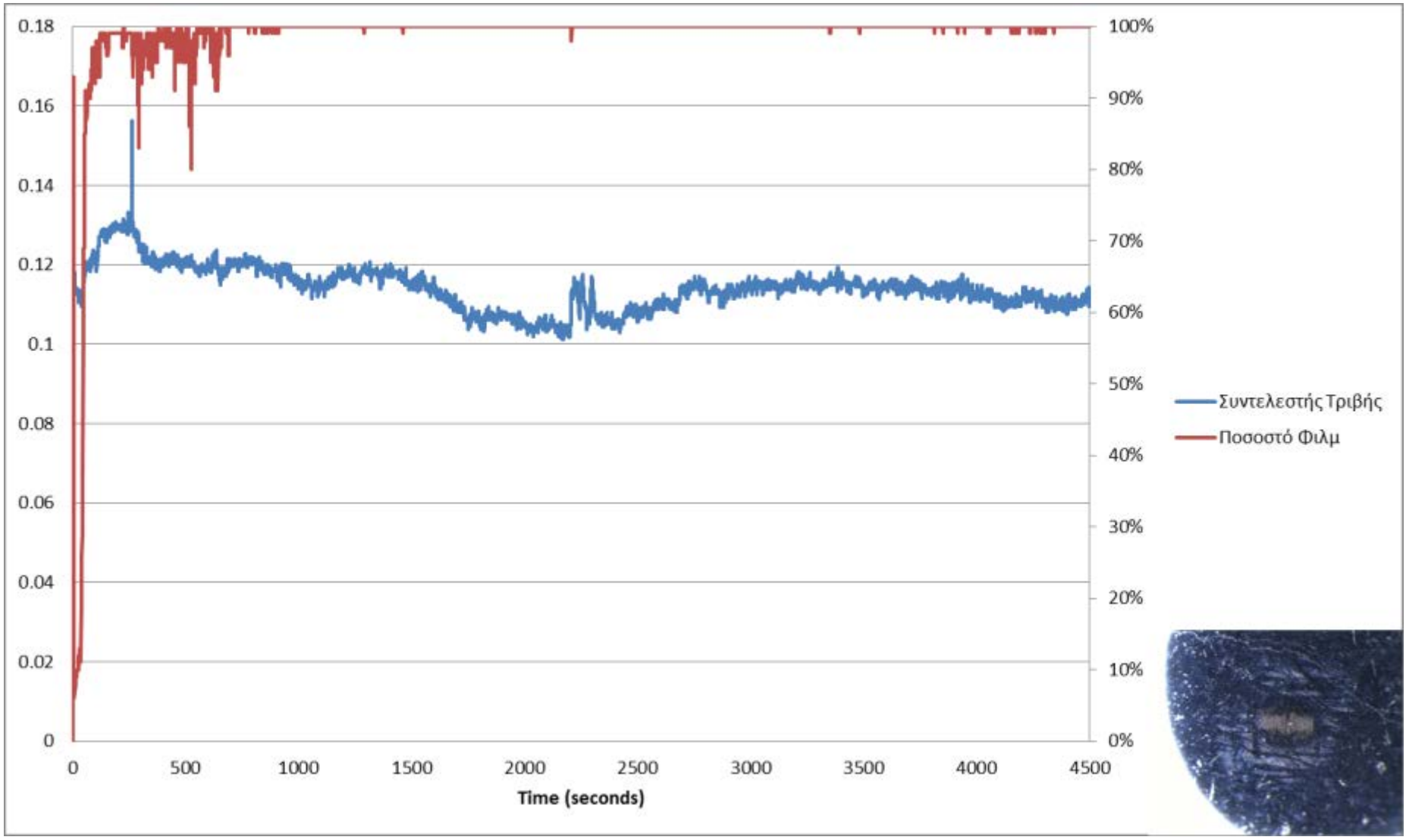
***Δείγμα ULSD2 (150min 0.5Kg)***



***Δείγμα ULSD2 (150min 1Kg)***



***Biodiesel***


0.18
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
4500
Time (seconds)
Συντελεστής Τριβής
Ποσοστό Φιλμ