

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΒΟΥΤΑΝΟΛΗΣ ΣΤΗΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΝΤΗΖΕΛ-ΑΙΘΑΝΟΛΗΣ

Η. Ζάχος – Σιάγκος¹, Σ. Παυλόπουλος¹, Γ. Σ. Ντόντος¹, Δ. Καρώνης^{1*}

¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

(*dkaronis@central.ntua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση της ισορροπίας και των χαρακτηριστικών των τριαδικών μειγμάτων ντήζελ – αιθανόλης –βουτανόλης. Η κύρια ιδέα είναι η σύνθεση σταθερών μειγμάτων τα οποία να πληρούν τις προϋποθέσεις για χρήση σε κινητήρες ντήζελ. Ως καύσιμα βάσης χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τύποι πετρελαϊκών ντήζελ πολύ χαμηλού θείου (ULSD) καθώς και ένα ανανεώσιμο παραφινικό ντήζελ από υδρογόνωση φυτικών ελαίων (HVO) για την προετοιμασία των μειγμάτων ντήζελ – αιθανόλης με την προσθήκη κ-βουτανόλης ως συνδιαλύτη. Η απαιτούμενη ποσότητα βουτανόλης εξαρτάται από τη σύσταση του καυσίμου βάσης, με την περιεκτικότητα σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες να διαφαίνεται ως μια κρίσιμη παράμετρος. Περαιτέρω εξετάστηκε η επίδραση σε ιδιότητες όπως η οξειδωτική συμπεριφορά και ποιότητα ανάφλεξης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσθήκη των οξυγονούχων επηρεάζει την οξειδωτική συμπεριφορά του καυσίμου βάσης, ενώ παρατηρείται μείωση του αριθμού κετανίου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τους στόχους που έχουν τεθεί από την Ε.Ε στον τομέα των μεταφορών, μέχρι το 2020, το 10% του ενεργειακού περιεχομένου των καυσίμων θα πρέπει να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές/πρώτες ύλες^[1]. Η (βιο) –αιθανόλη, ένα από τα πιο δημοφιλή βιοκαύσιμα, πέρα από την χρήση της στην υποκατάσταση της αμόλυβδης βενζίνης, δύναται να προστεθεί επίσης – εν είδει ανανεώσιμου καυσίμου – στο ντήζελ κίνησης, λόγω της θετικής επίδρασης κυρίως στις εκπομπές καυσαερίων. Εντούτοις η χρήση της παρουσιάζει κάποια ζητήματα τα οποία απορρέουν από την περιορισμένη αναμειξιμότητα της με το ντήζελ λόγω σημαντικής διαφοράς στην πολικότητα. Για αυτό το λόγο στα δυαδικά αυτά μείγματα προστίθεται ένας συνδιαλύτης και ένας τέτοιος είναι η βουτανόλη. Η βουτανόλη – μια οξυγονούχος ένωση η οποία δύναται να παραχθεί και από ανανεώσιμες πρώτες ύλες – είναι αναμειξίμη τόσο με το ντήζελ και όσο και την αιθανόλη και επιπλέον παρουσιάζει θετική συμπεριφορά κατά την καύση^[2-5].

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της προσθήκης αιθανόλης στις ιδιότητες καυσίμου ντήζελ πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (ULSD) σε συνδυασμό με την επίδραση της κ-βουτανόλης ως συνδιαλύτη. Στόχος είναι η παρασκευή μειγμάτων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στους σύγχρονους κινητήρες ντήζελ χωρίς μετατροπές. Η μεθοδολογία ανάμειξης περιλαμβάνει την προσθήκη αιθανόλης σε δυο διακριτές συγκεντρώσεις: 5% v/v και 10% v/v.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Καύσιμα Βάσης

Τα καύσιμα βάσης που χρησιμοποιήθηκαν αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς τύπους καυσίμων ντήζελ που είναι διαθέσιμοι σε ένα σύγχρονο διυλιστήριο, συμπεριλαμβανομένου και ενός βιοκαυσίμου δεύτερης γενιάς. Τα καύσιμα βάσης δεν περιείχαν FAME καθώς και κανένα βελτιωτικό πρόσθετο.

Συμβατικά καύσιμα ντήζελ – ULSD

- **LP-HT:** Προϊόν υδρογονοκατεργασίας ατμοσφαιρικού gasoil σε χαμηλή πίεση. Έχει αυξημένο αριθμό κετανίου, χαμηλή περιεκτικότητα σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες και υψηλό CFPP
- **HP-HT:** Προϊόν υδρογονοκατεργασίας μείγματος αποτελούμενο από βαρύ ατμοσφαιρικό gasoil και ελαφρύ gasoil θερμικής πυρόλυσης σε υψηλή πίεση. Είναι καύσιμο με μέσο αριθμό κετανίου και την υψηλότερη περιεκτικότητα σε αρωματικά από όλα τα εξεταζόμενα καύσιμα
- **HP-HC:** Προϊόν υδρογονοπυρόλυσης υψηλής πίεσης και πλήρους μετατροπής μείγματος αποτελούμενο από gasoil κενού και βαρύ gasoil θερμικής πυρόλυσης. Χαρακτηρίζεται από υψηλό αριθμό κετανίου, χαμηλή συγκέντρωση αρωματικών και σχεδόν μηδενική περιεκτικότητα σε θείο.

Ανανεώσιμο καύσιμο ντήζελ

- **HVO:** Προϊόν υδρογονοκατεργασίας φυτικών ελαίων αποτελούμενο από γραμμικούς και διακλαδισμένους παραφινικούς υδρογονάνθρακες. Έχει μηδενική περιεκτικότητα σε θείο και πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες και πολύ υψηλό αριθμό κετανίου. Η βελτίωση των ιδιοτήτων ψυχρής ροής επιτυγχάνεται μέσω ισομερισμού.

Τα τρία δείγματα ULSD ικανοποιούν την πλειονότητα των απαιτήσεων του ευρωπαϊκού προτύπου EN590, με εξαίρεση τις ιδιότητες του CFPP και της ανάκτησης του 95% v/v στην απόσταση αναφορικά με το δείγμα LP-HT λόγω των βαρέων συστατικών που περιέχει. Όσον αφορά στο HVO, όλες οι ιδιότητές του πληρούν τις σχετικές προδιαγραφές του ευρωπαϊκού προτύπου EN15940. Σημειώνεται ότι όλα τα δείγματα ντήζελ είναι προϊόντα είτε υδρογονοκατεργασίας είτε υδρογονοπυρόλυσης επομένως δεν περιέχουν ολεφίνες.

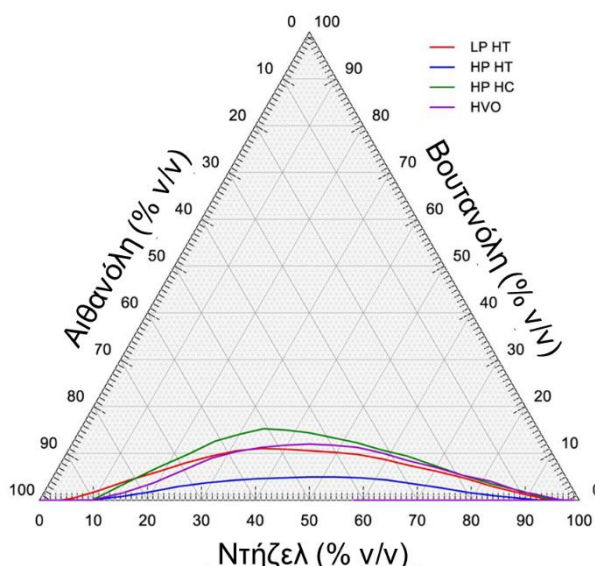
Αλκοόλες

- **Αιθανόλη:** μετουσιωμένη βιο-αιθανόλη σύμφωνη με τις προδιαγραφές του προτύπου EN15376 που αφορούν σε αιθανόλη για χρήση ως καύσιμο. (Tarımsal Kimya Teknolojileri A.Ş. (TARKİM), Turkey)
- **Βουτανόλη:** κ-βουτανόλη, αναλυτικής καθαρότητας, >99,4% m/m (Acros Organics)

Μελέτη Ισορροπίας Φάσεων

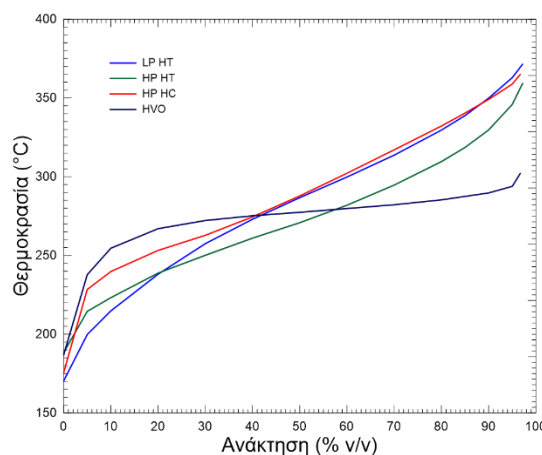
Αρχικά διεξήχθη μια προκαταρκτική διερεύνηση της ισορροπίας των μειγμάτων ντήζελ-αιθανόλης ώστε να εξασφαλιστεί η ομοιογένεια και να αποφευχθεί ο διαχωρισμός των φάσεων. Ως συνδιαλύτης χρησιμοποιήθηκε η κ-βουτανόλη. Η απαιτούμενη ποσότητα της κ-βουτανόλης για τη σταθεροποίηση των μειγμάτων ντήζελ-αιθανόλης προσδιορίστηκε σε κάθε περίπτωση μέσω τιτλοδοτήσεων (τέσσερις επαναλήψεις) σε σταθερή θερμοκρασία 25°C. Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων αναπαρίσταται γραφικά στο διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του Σχήματος 1.

Όλα τα δείγματα στις συγκεντρώσεις αιθανόλης που εξετάζεται (5% και 10% v/v) προϋποθέτουν την προσθήκη κ-βουτανόλης έτσι ώστε να παραχθούν σταθερά μίγματα. Εντούτοις, η ποσότητα της κ-βουτανόλης που απαιτείται για τη σταθεροποίηση του μείγματος αιθανόλης-ντήζελ φαίνεται ότι επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του καυσίμου ντήζελ που χρησιμοποιείται ως συστατικό ανάμιξης. Το δείγμα HP-HT (υδρογονοκατεργασία υψηλής πίεσης) απαιτεί μικρότερη ποσότητα κ-βουτανόλης, ενώ το LP-HT (υδρογονοκατεργασία χαμηλής πίεσης) απαιτεί μεγαλύτερη ποσότητα η-βουτανόλης. Το καύσιμο HP-HT έχει την υψηλότερη περιεκτικότητα σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες - μία κατηγορία υδρογονανθράκων με περισσότερο πολικό χαρακτήρα σε σύγκριση με τις άλλες ομάδες υδρογονανθράκων στα καύσιμα (κ- και ισο-παραφίνες, ναφθένια) - συνεπώς η μεγαλύτερη συνάφεια με την αιθανόλη αποδίδεται πιθανώς στο αυξημένο περιεχόμενο σε αρωματικά.



Σχήμα 1. Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων των τριαδικών συστημάτων ντήζελ-αιθανόλης-κβουτανόλης (25°C)

Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι το δείγμα HP-HC (υδρογονοπυρόλυση υψηλής πίεσης) απαιτεί περισσότερη κ-βουτανόλη σε σύγκριση με το HVO. Εφόσον το HVO έχει σχεδόν μηδενική περιεκτικότητα αρωματικών, θα αναμενόταν ότι αυτό το καύσιμο βάσης θα απαιτούσε περισσότερη κ-βουτανόλη για σταθεροποίηση των μιγμάτων ντήζελ-αιθανόλης. Καθώς αυτό δεν συμβαίνει, μια πιθανή εξήγηση μπορεί να αναζητηθεί στο μέγεθος των μορίων. Από τις καμπύλες απόσταξης των καυσίμων βάσης όπως αποτυπώνονται στο Σχήμα 2, είναι εμφανείς οι χαμηλότερες θερμοκρασίες ανάκτησης του HVO σε σύγκριση με το HP-HC στο εύρος 30-95% v/v. Αυτό υποδηλώνει τη σαφή διαφορά που υπάρχει στο μέγεθος των υδρογοναθρακικών αλυσίδων μεταξύ των δύο αυτών καυσίμων (μεγαλύτερες στα μόρια του δείγματος HP-HC).



Σχήμα 2. Καμπύλες απόσταξης των καυσίμων βάσης

Ιδιότητες Τριαδικών Μειγμάτων

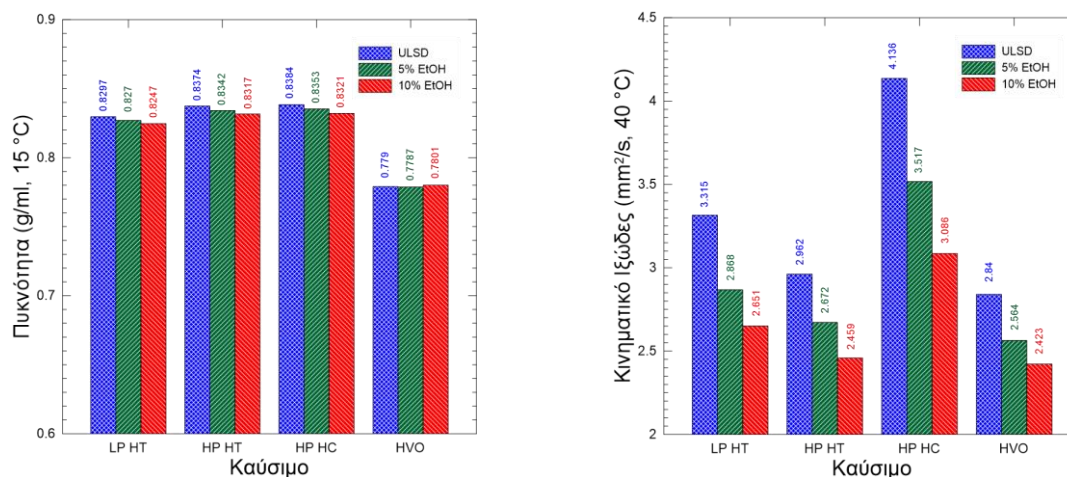
Ακολούθως, παρασκευάστηκαν τριαδικά μίγματα ντήζελ-αιθανόλης-βουτανόλης, με την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα κ-βουτανόλης για τη σταθεροποίηση των συστημάτων σύμφωνα με τις αναλογίες που παρατίθενται στον Πίνακα 1. Τα μίγματα αποθηκεύτηκαν σε πωματισμένες γυάλινες φιάλες υπό σταθερή θερμοκρασία και αφέθηκαν για δύο ημέρες ώστε να ελεγχθεί η σταθερότητά τους. Καθώς δεν παρατηρήθηκε διαχωρισμός φάσεων, το επόμενο βήμα ήταν η ανάλυση των δειγμάτων για να προσδιοριστεί η επίδραση της αιθανόλης στις κύριες ιδιότητες των μιγμάτων.

Πίνακας 1. Σύσταση των σταθερών τριαδικών μειγμάτων ντήζελ – αιθανόλης – βουτανόλης

	Καύσιμο βάσης	Ντήζελ	Αιθανόλη	κ-Βουτανόλη
E5	LP-HT	94.8	5.0	0.2
	HP-HT	94.0	4.9	1.1
	HP-HC	94.4	5.0	0.6
	HVO	94.1	5.0	1.0
E10	LP-HT	89.6	10.0	0.4
	HP-HT	87.5	9.7	2.7
	HP-HC	88.4	9.8	1.8
	HVO	88.0	9.8	2.2

Πυκνότητα - Ιξώδες

Η προσθήκη αιθανόλης είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας των μιγμάτων ντήζελ / αιθανόλης, στην περίπτωση των συμβατικών καυσίμων βάσης. Η πυκνότητα της αιθανόλης είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή των ντήζελ, επομένως, καθώς αυξάνεται η ποσότητα αιθανόλης, η πυκνότητα του μείγματος μειώνεται. Στην περίπτωση του HVO, η πυκνότητα των μιγμάτων με αιθανόλη παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Ο λόγος είναι ότι και τα δύο συστατικά ανάμειξης έχουν παρόμοιες τιμές πυκνότητας. Όσον αφορά το πρότυπο EN 590, όλα τα μείγματα ντήζελ / αιθανόλης (εκτός από τα μείγματα με HVO ως καύσιμο βάσης) είχαν τιμές πυκνότητας εντός των ορίων του ευρωπαϊκού προτύπου. Σε όλες τις περιπτώσεις, η προσθήκη αιθανόλης στο ντήζελ οδήγησε σε σημαντική μείωση του ιξώδους των μειγμάτων, σε σύγκριση με τις σχετικές τιμές των καυσίμων βάσης. Η αιθανόλη έχει χαμηλή τιμή ιξώδους ($1.035 \text{ mm}^2/\text{s}$), πολύ κάτω από το ελάχιστο όριο $2.000 \text{ mm}^2/\text{s}$ σύμφωνα με το πρότυπο EN 590. Εντούτοις, όλα τα μείγματα που μετρήθηκαν είχαν τιμές ιξώδους εντός των ορίων του προτύπου EN 590.

**Σχήμα 3.** Πυκνότητα και ιξώδες των τριαδικών μειγμάτων (ASTM D7042)

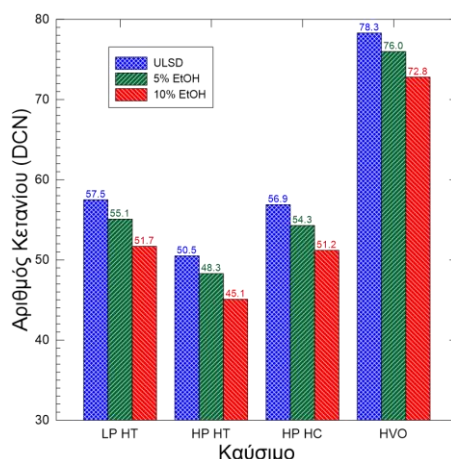
Σημείο ανάφλεξης

Το σημείο ανάφλεξης (EN ISO 2719) άλλαξε δραματικά με την προσθήκη αιθανόλης στο ντήζελ. Συγκεκριμένα, το σημείο ανάφλεξης όλων των μειγμάτων μειώθηκε κάτω από τη θερμοκρασία δωματίου, καθιστώντας αδύνατη την εκτέλεση μετρήσεων με ακρίβεια. Η μείωση του σημείου ανάφλεξης παρατηρήθηκε σε όλα τα μίγματα ντήζελ - αιθανόλης, ανεξάρτητα από το καύσιμο βάσης και το ποσοστό αιθανόλης στο μείγμα. Η αιθανόλη είναι πτητική ένωση με σημείο ζέσεως στους 78°C και σημείο ανάφλεξης 13°C . Η βουτανόλη είναι λιγότερο πτητική από την αιθανόλη αλλά πιο πτητική από το ντήζελ (σημείο ζέσεως 118°C , σημείο ανάφλεξης 35°C).

Ποιότητα ανάφλεξης

Η ποιότητα ανάφλεξης προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D7170-16 κατά την οποία η μετρούμενη καθυστέρηση ανάφλεξης χρησιμοποιείται ως μοναδική μεταβλητή σε μια εξίσωση για

τον υπολογισμό του «παραγόμενου» αριθμού κετανίου (Derived Cetane Number). Το Σχήμα 4 καταδεικνύει το γεγονός ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο DCN μειώνεται με την αύξηση στην περιεκτικότητα της αιθανόλης. Η αιθανόλη είναι συστατικό με υψηλό αριθμό οκτανίων, συνεπώς η απόδοση της σε έναν κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση είναι προβληματική^[6]. Καθώς τα τρία βασικά καύσιμα (LP-HT, HP-HC και HVO) είχαν τιμές DCN πολύ πάνω από 51 - το ελάχιστο όριο σύμφωνα με το πρότυπο EN 590 - η μείωση του DCN δεν έθεσε την ποιότητα ανάφλεξης των μιγμάτων ντίζελ –αιθανόλης εκτός προδιαγραφών. Στην περίπτωση του δείγματος HP-HT, η ποιότητα ανάφλεξης του βασικού καυσίμου ήταν οριακά χαμηλότερη από το όριο των προδιαγραφών. Η προσθήκη αιθανόλης μείωσε περαιτέρω την ποιότητα ανάφλεξης και συνεπώς και τα δύο μείγματα με αιθανόλη 5% και 10% v/v είχαν πολύ χαμηλές τιμές DCN .



Σχήμα 4. Αριθμός κετανίου (DCN) των τριαδικών μειγμάτων

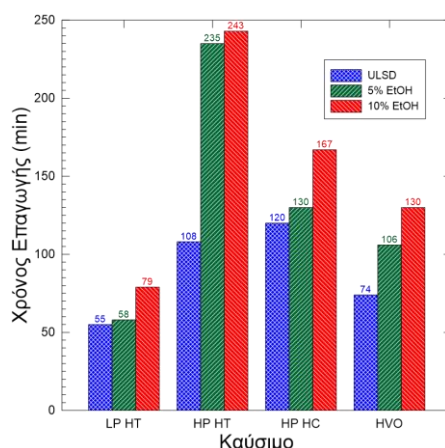
Ιδιότητες Ψυχρής Ροής

Η επίδραση της προσθήκης αιθανόλης στο Σημείο Απόφραξης Ψυχρού Φίλτρου (CFPP) ήταν διαφορετική για τα βασικά καύσιμα. Για το καύσιμο με τη χαμηλότερη τιμή CFPP (LP-HT), δεν υπήρξαν μεταβολές από την προσθήκη της αλκοόλης. Για τα καύσιμα HP-HT και HP-HC, παρατηρήθηκε μικρή μείωση κατά 2°C για προσθήκη αιθανόλης 5% v/v και ακόμη μικρότερη μείωση κατά 1°C για προσθήκη 10% v/v αιθανόλης. Όσον αφορά στο HVO, η τιμή του CFPP αυξήθηκε κατά 2°C και για τα δύο μείγματα με 5% v/v και 10% v/v αιθανόλη. Συνολικά οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν από την προσθήκη αλκοόλης στις ιδιότητες ψυχρής ροής φαίνεται επίσης να συσχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του βασικού καυσίμου^[7].

Οξειδωτική σταθερότητα

Η σχετική αντίσταση των εξεταζόμενων μιγμάτων στην οξειδωτική υποβάθμιση εκτιμήθηκε σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ASTM D7545 / EN16091 στη συσκευή RSSOT. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 5. Αρχικά προσδιορίστηκε η οξειδωτική σταθερότητα των καυσίμων βάσης και η σειρά αυξανόμενης σταθερότητας ήταν: LPHT > HPHC > HVO > HPHT. Ιδιαίτερα για τα συμβατικά καύσιμα ULSD αυτή η αλληλουχία συμφωνεί με τα ευρήματα προηγούμενης μελέτης από τους συγγραφείς^[8]. Η προσθήκη αιθανόλης σε όλες τις περιπτώσεις οδήγησε σε επιβράδυνση του ρυθμού οξείδωσης και η υψηλότερη συγκέντρωση της αναβάθμιση περαιτέρω το χρόνο επαγωγής. Η θετική επίδραση της αιθανόλης ήταν περισσότερο εμφανής στο καύσιμο HP-HC ακόμη και στην χαμηλότερη αναλογία ανάμιξης. Αντίθετα, καύσιμα βάσης από διεργασίες υδρογονοκατεργασίας δεν επηρεάστηκαν εξίσου από την προσθήκη αιθανόλης. Όσον αφορά το HVO παρατηρήθηκε ικανοποιητική αύξηση της οξειδωτικής σταθερότητας. Γενικά, είναι προφανές ότι η αιθανόλη έχει την ικανότητα να ενισχύει την οξειδωτική σταθερότητα τόσο των συμβατικών όσο και των ανανεώσιμων καυσίμων ντίζελ, τουλάχιστον όταν προστίθενται στις εξεταζόμενες

συγκεντρώσεις. Παρόμοιες παρατηρήσεις αναφέρθηκαν και σε προηγούμενη μελέτη σχετικά με την επίδραση της κ-βουτανόλης στην σταθερότητα ενός καυσίμου ULSD^[9].



Σχήμα 5. Οξειδωτική σταθερότητα των τριαδικών μειγμάτων

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αιθανόλη είναι ένα πολικό μόριο, το οποίο δεν αναμιγνύεται ευχερώς με το καύσιμο ντήζελ και συνεπώς η χρήση ενός σταθεροποιητή καθίσταται υποχρεωτική. Η κ-βουτανόλη εκτιμήθηκε ως συν-διαλύτης και αποδείχθηκε αποτελεσματικός. Τα αποτελέσματα της μελέτης ισορροπίας φάσεων έδειξαν ότι η σύσταση του καυσίμου βάσης έχει επίδραση στη διαλυτότητα της αιθανόλης. Καύσιμα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες απαιτήσαν λιγότερη ποσότητα κ-βουτανόλης για την παραγωγή σταθερών μιγμάτων ντήζελ -αιθανόλης. Το μέγεθος των μορίων του καυσίμου βάσης φαίνεται επίσης να επηρεάζει τη διαλυτότητα της αιθανόλης. Ως γενικό συμπέρασμα που βασίζεται στα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, η προσθήκη αιθανόλης στο ντήζελ έχει αξιοσημείωτο αντίκτυπο στις βασικές ιδιότητες του καυσίμου ντήζελ. Οι περισσότερες από τις ιδιότητες των μιγμάτων παραμένουν εντός των ορίων του προτύπου EN 590, με εξαίρεση το σημείο ανάφλεξης. Δεδομένου ότι το σημείο ανάφλεξης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο ασφαλείας για την αποθήκευση και το χειρισμό των καυσίμων ντήζελ, τα μείγματα ντήζελ-αιθανόλης πρέπει να χρησιμοποιούνται ως ένας ειδικός τύπος καυσίμων με πρόσθετα μέτρα προφύλαξης και να αντιμετωπίζεται με αυστηρότερους κανονισμούς ασφαλείας σε σύγκριση με εκείνους που ισχύουν για τα κανονικά καύσιμα ντήζελ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς εκφράζουν ευχαριστίες προς την εταιρία Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. για την προμήθεια των συμβατικών καυσίμων βάσης καθώς και την εταιρία Neste Oyj (Finland) για την προμήθεια του HVO.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009.
- [2] Yusri, I.M. Mamat, R. Najafi, G. Razman, A. Awad, Omar I. Azmi, W.H. Ishak, W.F.W. Shaiful, A.I.M., Renewable and Sustainable Energy Reviews 77 (2017) 169-181,
- [3] Corkwell, K.C. Jackson, M.Daly, D.T., SAE Technical Paper 2003-01-3283.
- [4] Gerdes, K.R. Suppes, G.J." Industrial and Engineering Chemistry Research 40(3) (2001) 949-956
- [5] Reyes, Y.Aranda, D.A.G. Santander, L.A.M. Cavado, A. Belchior, C.R.P., Energy&Fuels 23 (2009) 2731-2735
- [6] Hansen, A.C. Zhang, Q.Lyne, P. W., Bioresource Technology 9 (2005) 277-285
- [7] Lapuerta, M. García-Contreras, R. Campos-Fernández, J. Dorado, M.P Energy&Fuels 24 (2010)4497-4502
- [8] Dodos, G.S. Karonis, D. Zannikos, F. Lois, E., SAE Technical Paper, 2014-01-2758
- [9] Dodos, G.S. Tsesmeli, C. Zahos-Siagos, I. Tyrovolas, T. Karonis, D. Zannikos, F., SAE Technical Paper 2017-01-2320