

ΣΥΝΔΥΡΟΓΟΝΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΙΠΙΔΙΩΝ ΜΕ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΟ ΚΛΑΣΜΑ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΥΤΗ

Α. Δημητριάδης^{1*}, Σ. Μπεζεργιάννη¹, Β. Δημητρόπουλος², Μ. Μαγγιλιώτου², Σ. Κιαρτζής²

¹Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ), Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

²Ελληνικά Πετρέλαια (ΕΛ.ΠΕ.), Ελλάδα

(*adimitr@cperi.certh.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, εξετάστηκε η επίδραση των λιπιδίων κατά την συν-υδρογονοεπεξεργασία με ένα πετρελαϊκό κλάσμα στην απόδοση της διεργασίας. Το πετρελαϊκό κλάσμα που επιλέχθηκε ήταν ένα βαρύ αερίελλαιο (Heavy Atmospheric Gas Oil - HAGO) σε συνδυασμό με τρεις διαφορετικές τροφοδοσίες λιπιδίων/ελαίων. Τα έλαια που εξετάστηκαν ήταν ένα ακατέργαστο τηγανέλαιο, ένα ραφινάρισμένο τηγανέλαιο και ένα ηλιέλαιο. Ο στόχος της μελέτης ήταν να διερευνηθεί η επίδραση των διαφόρων τροφοδοσιών βιομάζας κατά την ενσωμάτωση τους κατά 5%κ.ο. στην τροφοδοσία του HAGO για την παραγωγή υβριδικών καυσίμων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη λιπιδίων στην τροφοδοσία HAGO είναι εφικτή οδηγώντας σε προϊόντα υψηλής ποιότητας με χαμηλή περιεκτικότητα θείου (<10 wppm).

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής εξάντληση των πετρελαϊκών αποθεμάτων του πλανήτη έχει κατευθύνει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στα βιοκαύσιμα^[1]. Σήμερα τα βιοκαύσιμα θεωρούνται ως η σημαντικότερη πηγή εναλλακτικών καυσίμων στον τομέα των μεταφορών^[2]. Το πιο διαδεδομένο υποκατάστατο του πετρελαίου είναι το βιοντίζελ 1^{ης} γενιάς, γνωστό ως FAME (Fatty Acids Methyl Esters), το οποίο παράγεται μέσω της μετεστερεοποίησης φυτικών λαδιών. Ωστόσο κατά τη χρήση του, λόγω της σύστασης και των ιδιοτήτων του, προκαλεί διάφορα λειτουργικά προβλήματα στους κινητήρες των αυτοκινήτων^[3]. Τα μειονεκτήματα του FAME είχαν σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη των βιοκαυσίμων 2^{ης} γενιάς με νέες εναλλακτικές τεχνολογίες έναντι της μετεστερεοποίησης. Μία από τις τεχνολογίες 2^{ης} γενιάς είναι και η υδρογονοεπεξεργασία φρέσκων φυτικών λαδιών, τηγανελαιών και ζωικών λοιπών. Τα 2^{ης} γενιάς βιοκαύσιμα είναι παραφίνες με υψηλό αριθμό κετανίου και θερμογόνο δύναμη και λοιπές ιδιότητες παραπλήσιες του ορυκτού ντίζελ^[4].

Ωστόσο, η καταλυτική υδρογονοεπεξεργασία φυτικών λαδιών απαιτεί μεγάλα κεφάλαια επένδυσης σε κατασκευή νέων μονάδων^[5]. Το μειονέκτημα αυτό οδήγησε στην διερεύνηση της συν-υδρογονοεπεξεργασίας των φυτικών λαδιών με πετρελαϊκά κλάσματα αξιοποιώντας τις ήδη υπάρχουσες μονάδες υδρογονοεπεξεργασίας των διυλιστηρίων^[4]. Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης ήταν η διερεύνηση της επίδρασης των λιπιδίων στη διάρκεια ζωής του καταλύτη κατά την συν-υδρογονοεπεξεργασία τους με πετρελαϊκά κλάσματα.

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τρεις τροφοδοσίες βιομάζας εξετάστηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας, ένα ακατέργαστο τηγανέλαιο, ένα ραφινάρισμένο τηγανέλαιο και ένα ηλιέλαιο σε συν-υδρογονοεπεξεργασία με πετρελαϊκό HAGO. Κατά τη μελέτη έλαβαν χώρα τρία πειράματα, ένα για την κάθε τροφοδοσία, σε μονάδα μικρής πιλοτικής κλίμακας του Εθνικού Κέντρου Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ). Στα τρία αυτά πειράματα εξετάστηκε ξεχωριστά η συν-υδρογονοεπεξεργασία της κάθε τροφοδοσίας βιομάζας (5%κ.ο.) με το HAGO. Σκοπός ήταν να μελετηθεί η επίδραση των ελαίων αυτών στην ενεργότητα του καταλύτη, στην ποιότητα των

προϊόντων αλλά και στην κατανάλωση υδρογόνου. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται μερικές ιδιότητες του HAGO και των τριών λιπιδίων που εξετάστηκαν.

Πίνακας 1. Ιδιότητες τροφοδοσιών

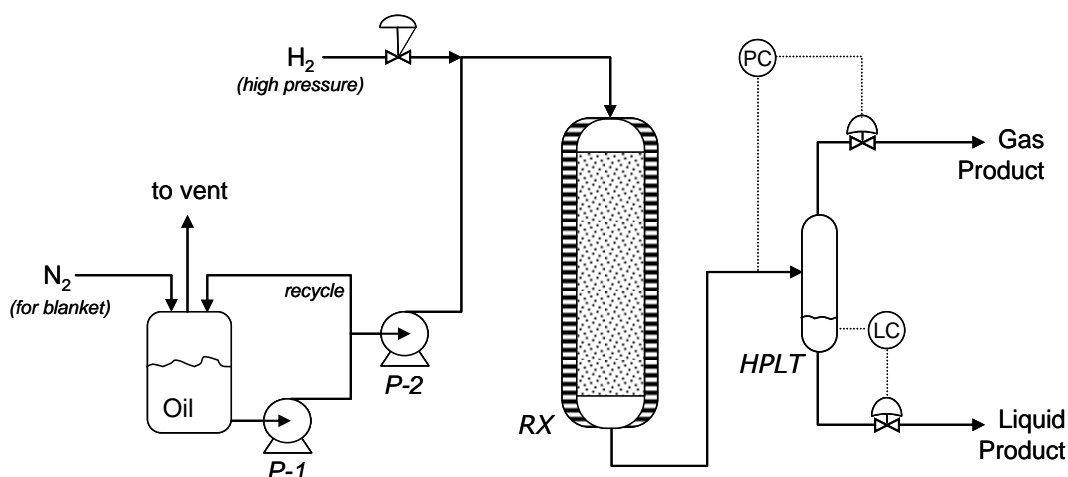
Ιδιότητες	Μονάδες	HAGO	Ηλιέλαιο	Ακατεργ. Τηγανέλαιο	Ραφιν. Τηγανέλ.
Ειδικό βάρος	g/ml	0.861	0.923	0.928	0.923
Θείο	wppm	12850	-	-	-
Υδρογόνο	wt%	12.99	11.3	11.5	11.4
Άνθρακας	wt%	85.14	77.1	77.3	77.2
Οξειδωτ. σταθερότητα	hr	168.2	3.3	1.4	5.4
Αριθμός Br		1.6	30	41	46
Υγρασία	wppm	157	400	178	74
TAN	mgKOH/g	-	<0.10	0.51	0.19

Σε δεύτερο στάδιο δοκιμών πραγματοποιήθηκε μια πιο εκτεταμένη χρονικά μελέτη της επίδρασης των λιπιδίων στην ενεργότητα και σταθερότητα του καταλύτη κατά την συνεπεξεργασία με HAGO. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε το ραφινρισμένο τηγανέλαιο ενώ οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ημι-πλοτική μονάδα του ΕΚΕΤΑ.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για τους σκοπούς της μελέτης χρησιμοποιήθηκε η πλοτική μονάδα καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας μικρής κλίμακας VB01 του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Καυσίμων και Υδρογονανθράκων (ΕΠΚΥ) του Εθνικού Κέντρου Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ). Στο Σχήμα 1 φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της μονάδας που αποτελείται από τα επιμέρους συστήματα :

1. Σύστημα τροφοδοσίας υδρογόνου και υγρής τροφοδοσίας.
2. Σύστημα αντίδρασης.
3. Σύστημα διαχωρισμού προϊόντων.
4. Σύστημα δειγματοληψίας (δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Πλοτική μονάδα υδρογονοεπεξεργασίας του ΕΚΕΤΑ

Η παραπάνω μονάδα χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο στάδιο των δοκιμών για την επιλογή της καταλληλότερης τροφοδοσίας λιπιδίων. Αντίστοιχης διάταξης μονάδα αλλά μεγαλύτερης κλίμακας (ημι-πλοτική) χρησιμοποιήθηκε στο δεύτερο στάδιο των δοκιμών.

Ο καταλύτης που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δοκιμές ήταν ένας εμπορικός καταλύτης τύπου CoMo και τον προμήθευσε ο Όμιλος Ελληνικών Πετρελαίων (ΕΛ.ΠΕ.). Κατά τη φόρτωση του

καταλύτη προστέθηκε στον αντιδραστήρα και καρβίδιο του πυριτίου για την καλύτερη διασπορά του καταλύτη μέσα στη κλίνη του αντιδραστήρα. Η προθείωση έγινε σύμφωνα με το πρωτόκολλο προθείωσης που παραχωρήθηκε από τα ΕΛ.ΠΕ.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

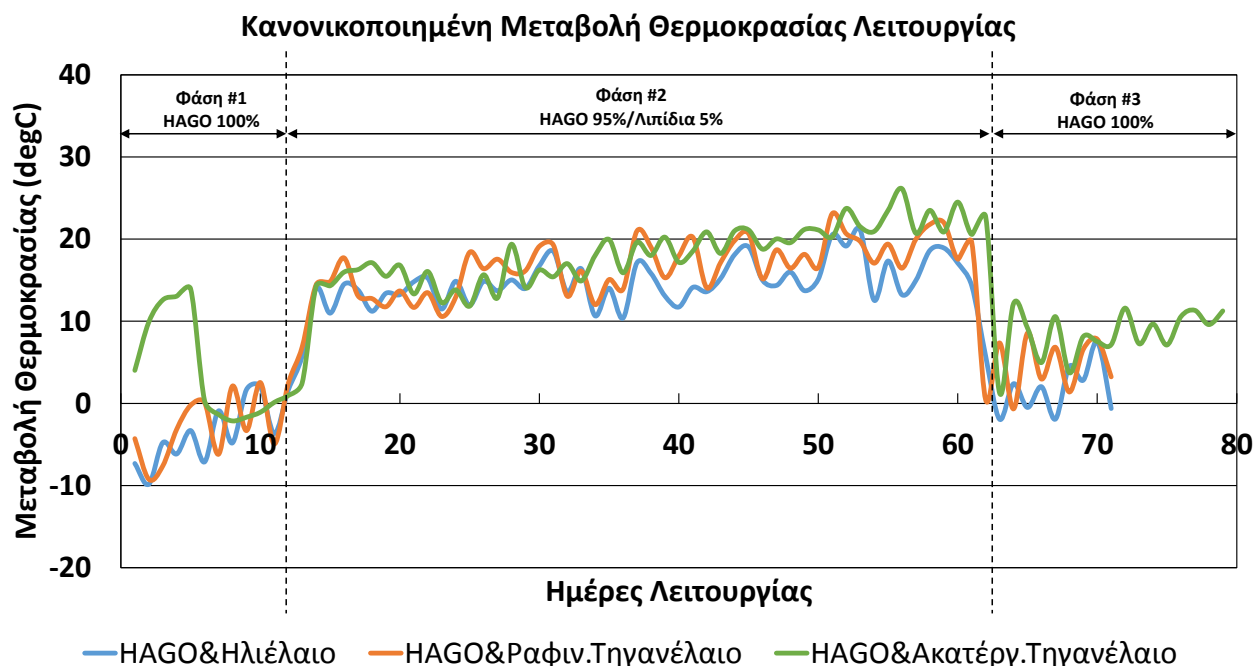
Στο πρώτο στάδιο της μελέτης έλαβαν χώρα τρεις πειραματικές δοκιμές, μία για κάθε τροφοδοσία λιπιδίων.

Το κάθε πείραμα αποτελούνταν από τρεις φάσεις. Η φάση #1 αποτελούσε τη συνθήκη σταθεροποίησης του καταλύτη με τροφοδοσία 100% HAGO. Η διάρκεια της φάσης #1 διαρκούσε 12 ημέρες.

Στη συνέχεια ξεκινούσε η φάση #2 με το μείγμα HAGO+Λιπίδια5%, με στόχο να μελετηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας που απαιτείται για να διατηρηθεί το θείο στα επίπεδα που επιτυγχάνονται κατά τη φάση #1. Η διάρκεια της φάσης #2 ήταν περίπου 50 ημέρες.

Τέλος, στη φάση #3 γινόταν επαναφορά της τροφοδοσίας σε 100% HAGO και ρύθμιση της θερμοκρασίας έως ότου το θείο στο προϊόν να έχει τιμές όμοιες με της φάσης #1, που αποτελούσε το σημείο αναφοράς.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα που απαιτήθηκαν για την επίτευξη θείου <10wppm στο προϊόν. Ως σημείο αναφοράς των θερμοκρασιακών μεταβολών χρησιμοποιήθηκε η θερμοκρασία λειτουργίας κατά την ολοκλήρωση της φάσης #1 σταθεροποίησης του καταλύτη.

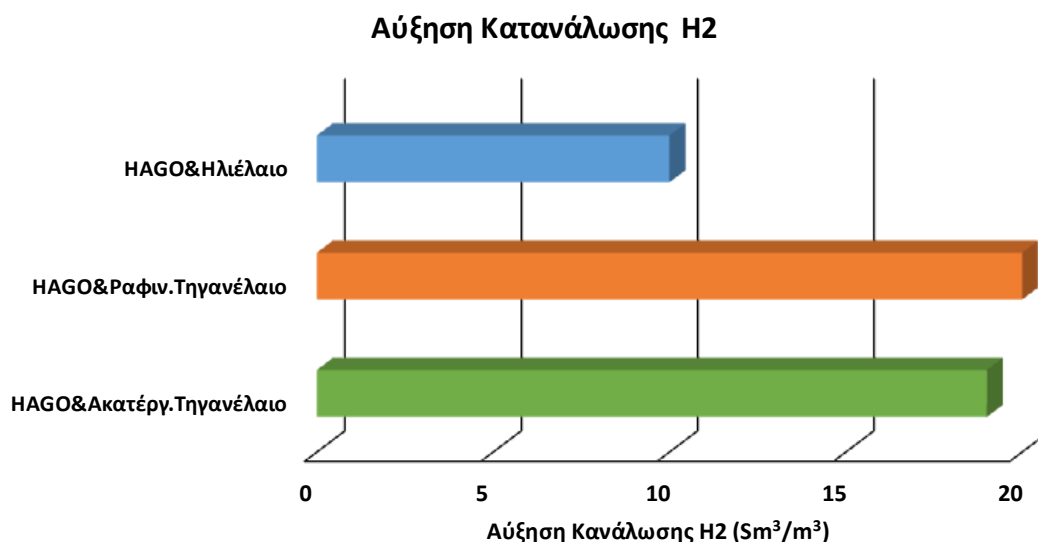


Σχήμα 2. Επίδραση της προσθήκης λιπιδίων 5%κ.ο. στη θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα για επίτευξη 10wppm S στο τελικό προϊόν.

Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε μείωση της ενεργότητας του καταλύτη όσον αφορά τις αντιδράσεις αποθείωσης κατά την εισαγωγή 5% λιπιδίων στο πετρελαϊκό HAGO και αποκατάσταση της μετά την αφαίρεση τους (προσωρινή απενεργοποίηση – παρεμπόδιση). Το σημείο επαναφοράς ωστόσο της θερμοκρασίας λειτουργίας μετά την απομάκρυνση των λιπιδίων στη φάση #3 δεν συμπίπτει με τη φάση #1 λόγω μόνιμης απενεργοποίησης του καταλύτη. Πιο συγκεκριμένα, η μόνιμη απενεργοποίηση που προκάλεσε το ηλιέλαιο ήταν 3°C ενώ η προσωρινή 13°C, για το ραφιναρισμένο τηγανέλαιο οι αντίστοιχες τιμές εκτιμήθηκαν σε 6°C και 14°C ενώ για το ακατέργαστο τηγανέλαιο 8°C και 15°C αντίστοιχα.

Κατά την συν-υδρογονοεπεξεργασία των λιπιδίων με HAGO παράγονται ως παρα-προϊόντα H_2O , CO_2 και CO ^[6]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία^{[7][8]}, η εμφάνιση των CO_2 και CO ως παρα-προϊόντα περιορίζει τις αντιδράσεις αποθείωσης και κορεσμού καθώς προκαλεί απενεργοποίηση στα ενεργά κέντρα του καταλύτη. Επίσης, η περιεκτικότητα των λιπιδίων σε οξυγόνο προκαλεί αντιδράσεις αποξυγόνωσης οι οποίες λαμβάνουν χώρα στα ίδια ενεργά κέντρα που λαμβάνουν χώρα και οι αντιδράσεις αποθείωσης με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα φαινόμενο παράλληλων αντιδράσεων που ανταγωνίζονται μεταξύ τους. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που παρατηρείται πτώση της ενεργότητας του καταλύτη όσον αφορά τις αντιδράσεις αποθείωσης κατά την προσθήκη των λιπιδίων στην τροφοδοσία. Επίσης, η αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας κατά την συνεπεξεργασία λιπιδίων επιταχύνει τη μόνιμη απενεργοποίηση του καταλύτη η οποία παραμένει και μετά τη διακοπή εισαγωγής των λιπιδίων.

Πέρα από τις αντιδράσεις αποθείωσης μελετήθηκε και η κατανάλωση του υδρογόνου η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 για τις τρεις περιπτώσεις. Σύμφωνα με τα πειράματα των τριών τροφοδοσιών, η προσθήκη κατά 5 κ.ο. % λιπιδίων στη τροφοδοσία HAGO προκαλεί αύξηση στην κατανάλωση υδρογόνου ανά m^3 συνολικού μίγματος τροφοδοσίας κατά μέσο όρο $10Sm^3/m^3$ για το ηλιέλαιο, $19Sm^3/m^3$ για το ακατέργαστο τηγανέλαιο και $20Sm^3/m^3$ για το ραφινάρισμένο τηγανέλαιο, η οποία ωστόσο είναι αναστρέψιμη όταν αφαιρούνται τα λιπίδια από την τροφοδοσία. Με τη προσθήκη των λιπιδίων στην τροφοδοσία, πέραν των συνηθισμένων αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την υδρογονοεπεξεργασία των πετρελαϊκών κλασμάτων, προστίθενται και οι αντιδράσεις αποξυγόνωσης, αποκαρβοξυλίωσης και αποκαρβονυλίωσης, οι οποίες προκαλούν αύξηση στην κατανάλωση του υδρογόνου^[6]. Επίσης, η παρατηρούμενη αύξηση της κατανάλωσης φαίνεται να συσχετίζεται και με το βαθμό ακορεστότητας των λιπιδίων όπως εκτιμάται με βάση τον αριθμό Br (Πίνακας 1).



Σχήμα 3. Επίδραση προσθήκης λιπιδίων 5%κ.ο. στην κατανάλωση υδρογόνου έναντι υδρογονοεπεξεργασίας 100% πετρελαϊκού HAGO.

Από τις τρεις τροφοδοσίες λιπιδίων επιλέχθηκε για το επόμενο στάδιο δοκιμών το ραφινάρισμένο τηγανέλαιο λόγω του ότι αποτελεί υπολειμματική βιομάζα ενώ με εξαίρεση την κατανάλωση H_2 τα επίπεδα παρεμπόδισης/απενεργοποίησης του καταλύτη αποθείωσης ήταν αντίστοιχα αυτών του ηλιελαίου. Στο δεύτερο στάδιο δοκιμών το ραφινάρισμένο τηγανέλαιο εξετάστηκε σε μία δεύτερη μονάδα ημι-πilotικής κλίμακας στο ΕΚΕΤΑ για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η διάρκεια της ημι-πilotικής δοκιμής εξαρτήθηκε από την ενεργότητα/διάρκεια ζωής του καταλύτη

και κράτησε 103 ημέρες. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν παρόμοια με τις πιλοτικές δοκιμές μικρής κλίμακας και αποτελούνταν από τρεις φάσεις. Η φάση #1 είχε συνολική διάρκεια 19 ημέρες και η τροφοδοσία ήταν 100% HAGO. Η φάση #2 είχε στόχο την μελέτη της επίδρασης 5%κ.ο. ραφινარიσμένου τηγανελαίου στην τροφοδοσία HAGO, και είχε διάρκεια 63 ημέρες. Η θερμοκρασία εκκίνησης της φάσης #2 ήταν 15°C υψηλότερη της φάσης #1 και η τελική θερμοκρασία ήταν κατά 33°C υψηλότερη της φάσης #1. Στόχος της φάσης #2 ήταν το προϊόν να έχει θείο χαμηλότερο των 10 wppm σε καθημερινή βάση. Με αυτόν τον τρόπο γινόταν σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας ώστε να διατηρείται το θείο χαμηλό (<10wppm) μέχρι να φτάσει η μονάδα κοντά στη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (380-385°C). Τέλος, η φάση #3 είχε σαν τροφοδοσία 100 % HAGO και στόχο την εύρεση της θερμοκρασίας στην οποία το προϊόν θα είχε περιεκτικότητα σε θείο χαμηλότερη των 10 wppm για δύο συνεχόμενες ημέρες. Η θερμοκρασία αυτή, που είναι ενδεικτική της μόνιμης απενεργοποίησης του καταλύτη, ήταν υψηλότερη κατά περίπου 20°C έναντι της φάσης #1. Ο βαθμός παρεμπόδισης (προσωρινή απενεργοποίηση) που παρατηρήθηκε ήταν αντίστοιχος του πρώτου σταδίου δοκιμών στη μικρή πιλοτική μονάδα, ωστόσο η μόνιμη απενεργοποίηση ήταν συγκριτικά μεγαλύτερη λόγω της αυξημένης διάρκειας της δοκιμής.

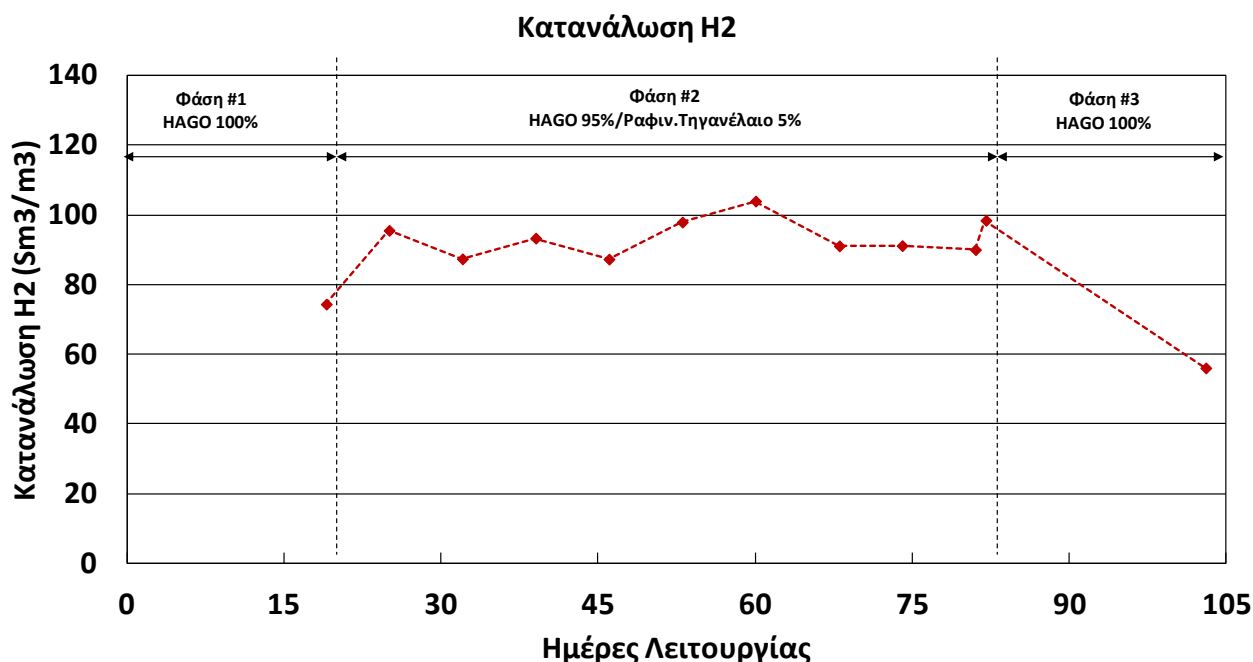
Στην ημι-πιλοτική δοκιμή, το θείο κατά τη διάρκεια της φάσης #1 παρέμεινε σταθερό για αρκετές συνεχόμενες ημέρες που αποδεικνύει ότι η σταθεροποίηση του καταλύτη ήταν επιτυχής. Με τη προσθήκη του ραφινარიσμένου τηγανελαίου (φάση #2), το θείο αυξήθηκε κατά +15 wppm σε σχέση με τη τιμή βάσης που ήταν τα 10 wppm (φάση #1). Παρόλα αυτά η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε τιμές θείου της τάξεως των <10 wppm. Είναι εμφανές ότι η προσθήκη του ραφινარიσμένου τηγανελαίου επιβαρύνει το βαθμό αποθείωσης λόγω των παράλληλων αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα (αποξυγόνωσης, αποκαρβονυλίωσης και αποκαρβοξυλίωσης)^[6]. Επίσης παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση των αρωματικών που επίσης δηλώνει σταδιακή απενεργοποίηση του καταλύτη όσον αφορά τις αντιδράσεις κορεσμού των αρωματικών η οποία επιβεβαιώνεται και από την αύξηση του δείκτη βρωμίου.

Όσον αφορά την κατανάλωση υδρογόνου, αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Παρατηρήθηκε αύξηση στη κατανάλωση του υδρογόνου με τη προσθήκη των λιπιδίων (φάση #2) λόγω των επιπλέον αντιδράσεων (αποξυγόνωσης, αποκαρβονυλίωσης και αποκαρβοξυλίωσης) που λαμβάνουν χώρα. Η αύξηση ήταν της τάξης των 19Sm³/m³ επιβεβαιώνοντας τα ευρήματα του πρώτου σταδίου των δοκιμών. Ωστόσο στο Σχήμα 4 παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης του υδρογόνου κατά τη φάση #3 συγκριτικά με τη φάση #1 η οποία οφείλεται στη μόνιμη μείωση της ενεργότητας που έχει υποστεί ο καταλύτης. Το παραπάνω συμπέρασμα εξηγεί και τη μείωση της υδρογόνωσης των αρωματικών που παρατηρήθηκε, η οποία είναι και η κύρια αιτία κατανάλωσης υδρογόνου κατά την υδρογονοεπεξεργασία πετρελαϊκών κλασμάτων^[6].

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η προσθήκη κατά 5%κ.ο. λιπιδίων στη τροφοδοσία HAGO προκάλεσε αύξηση στην κατανάλωση υδρογόνου κατά 10-20Sm³/m³ ενώ απαιτήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας κατά περίπου 15°C. Παρατηρήθηκε μείωση της ενεργότητας του καταλύτη όσον αφορά τις αντιδράσεις αποθείωσης και κορεσμού λόγω των παράλληλων αντιδράσεων αποξυγόνωσης, αποκαρβονυλίωσης και αποκαρβοξυλίωσης που εμφανίζονται με τη προσθήκη των λιπιδίων στην τροφοδοσία. Από τις τρεις τροφοδοσίες λιπιδίων που εξετάστηκαν, την μικρότερη επίδραση στον καταλύτη την είχε το ηλιέλαιο, έναντι του ραφινარიσμένου και του ακατέργαστου τηγανελαίου, κυρίως αναφορικά με την κατανάλωση H₂. Το ραφινარიσμένο τηγανέλαιο χρησιμοποιήθηκε στο δεύτερο στάδιο πειραμάτων ημι-πιλοτικής κλίμακας λόγω της αυξημένης αειφορικότητας του καθώς αποτελεί υπολειμματική βιομάζα. Τα αποτελέσματα της ημι-πιλοτικής δοκιμής επιβεβαίωσαν σε μεγάλο βαθμό τα αντίστοιχα του πρώτου σταδίου των δοκιμών. Γενικότερα, από το σύνολο των πειραμάτων, η προσθήκη λιπιδίων

στην τροφοδοσία HAGO είναι εφικτή οδηγώντας σε προϊόντα υψηλής ποιότητας με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (<10 wppm).



Σχήμα 4. Επίδραση λιπιδίων στην κατανάλωση υδρογόνου κατά την ημι-πilotική δοκιμή.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ιδιωτικού ερευνητικού έργου «Πilotικές δοκιμές ΕΛΠΕ» που προήλθε από την συνεργασία του ΕΚΕΤΑ με τον Όμιλο Ελληνικών Πετρελαίων και συγκεκριμένα με το διυλιστήριο της Θεσσαλονίκης. Το ΕΚΕΤΑ θα ήθελε να ευχαριστήσει τα ΕΛ.ΠΕ. για τις τροφοδοσίες και τους καταλύτες που παρείχε καθώς και όλη την συμβουλευτική ομάδα των ΕΛ.ΠΕ. για τη βοήθεια τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. Sunde, A. Brekke, B. Solberg. *Energies* 4 (2011) 845–77.
- [2] S. Bezergianni and A. Dimitriadis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21 (2013) 110-116
- [3] A. Dimitriadis, I. Natsios, A. Dimaratos, D. Katsaounis, Z. Samarasm S. Bezergianni, K. Lehto. *Frontiers in Mechanical Engineering* (2018) <https://doi.org/10.3389/fmech.2018.00007>
- [4] S. Bezergianni, A. Dimitriadis, L. P. Chryssikou. *Int. J. Global Warming* 13 (2017) 473-487
- [5] L.P. Chryssikou, V. Dagonikou, A. Dimitriadis, S. Bezergianni. *Journal of Cleaner Production* 10 (2019) 566-575
- [6] S. Bezergianni, A. Dimitriadis. O. Kikhtyanin, D Kubicka. *Progress in Energy and Combustion Science* 68 (2018) 29-64
- [7] S. Bezergianni, V. Dagonikou. *Journal of Chemical Engineering* 93 (2015) 1017-23
- [8] S. Bezergianni, V. Dagonikou, S. Sklari. *Fuel Processing Technology* 144 (2016) 20-6.