

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΗΓΑΝΕΛΑΙΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ

Α. Δημητριάδης^{1*}, Λ.Π. Χρυσικού¹, Β. Νταγκωνίκου¹, Σ. Μπεζεργιάννη¹

¹Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ), Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
(*adimitr@cperi.certh.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάστηκαν τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη της ενσωμάτωσης τηγανελαίου “WCO” (Waste Cooking Oil) σε ένα διυλιστήριο προς παραγωγή υβριδικού καύσιμου ντίζελ που περιέχει 10% κ.ο. βιομάζα. Σκοπός της έρευνας ήταν η σύγκριση τριών διαφορετικών προσεγγίσεων παραγωγής ντίζελ κίνησης με 10% κ.ο. βιομάζα. Η πρώτη προσέγγιση αφορά τη υπάρχουσα τεχνολογία παραγωγής ντίζελ κίνησης με περιεκτικότητα 10% κ.ο. FAME (Fatty Acids Methyl Esters) βιοντίζελ πρώτης γενιάς από φυτικά έλαια. Η δεύτερη προσέγγιση εξετάζει την παραγωγή ντίζελ κίνησης μέσω της ανάμιξης πετρελαιοκινώμενου ντίζελ με 5% κ.ο. FAME και 2.5% κ.ο. παραφινικό βιοκαύσιμο 2^{ης} γενιάς παραγόμενο από υδρογονοεπεξεργασία τηγανελαίου (Hydrotreating WCO). Η τρίτη προσέγγιση αφορά στην παραγωγή ντίζελ κίνησης μέσω της συν-υδρογονοεπεξεργασίας (Co-hydrotreating) 5% κ.ο. τηγανελαίου με πετρελαιοκινώμενο καύσιμο σε υπάρχουσα μονάδα ενός διυλιστηρίου. Καθώς ένα μικρό ποσοστό του τηγανελαίου μετά τη διεργασία μετατρέπεται σε νερό, το παραγόμενο υβριδικό καύσιμο, στο τέλος αναμειχθήκε με επιπλέον 1.5% κ.ο. FAME βιοντίζελ ώστε η τελική του περιεκτικότητα σε βιομάζα να είναι 10% κ.ο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βέλτιστη από οικονομικής και περιβαλλοντικής σκοπιάς προσέγγιση είναι η συν-υδρογονοεπεξεργασία υπολειμματικής βιομάζας με πετρελαιοκινώμενο καύσιμο σε υπάρχουσα μονάδα διυλιστηρίου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στις εναλλακτικές τεχνολογίες παραγωγής βιοκαυσίμων. Το πιο διαδεδομένο βιοκαύσιμο σήμερα είναι το FAME βιοντίζελ που παράγεται μέσω της μετεστεροποίησης φυτικών ελαίων, ζωικών λιπών και/ή χρησιμοποιημένων ελαίων ^[1]. Το FAME βιοντίζελ είναι εμπορικά διαθέσιμο στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες. Ωστόσο, λόγω της σύστασης του (αποτελείται από εστέρες και οξυγόνο) προκαλεί ανεπιθύμητα προβλήματα στους κινητήρες αυτοκινήτων και στα επιμέρους συστήματα τους εάν χρησιμοποιηθεί σε ποσοστά μεγαλύτερα του 7% κ.ο. σε ανάμιξη με το συμβατικό ντίζελ κίνησης ^[2].

Επομένως, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στην εξέλιξη των βιοκαυσίμων 2^{ης} γενιάς μέσω τεχνολογιών όπως είναι η υδρογονοεπεξεργασία (Hydrotreating) που οδηγεί στην παραγωγή παραφινικών βιοκαυσίμων σε αντίθεση με τους εστέρες της 1^{ης} γενιάς. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία 2^{ης} γενιάς είναι η καταλυτική υδρογονοεπεξεργασία υπολειμματικών λιπιδίων ^[1]. Ωστόσο, καθώς η συγκεκριμένη τεχνολογία απαιτεί τη κατασκευή νέων μονάδων υδρογονοεπεξεργασίας οδηγώντας σε υψηλά κόστη επένδυσης, διερευνάται η συν-υδρογονοεπεξεργασία λιπιδίων με κάποιο πετρελαιοκινώμενο καύσιμο αξιοποιώντας τις υπάρχουσες μονάδες των διυλιστηρίων ^[3], εκμηδενίζοντας σχεδόν το κόστος επένδυσης.

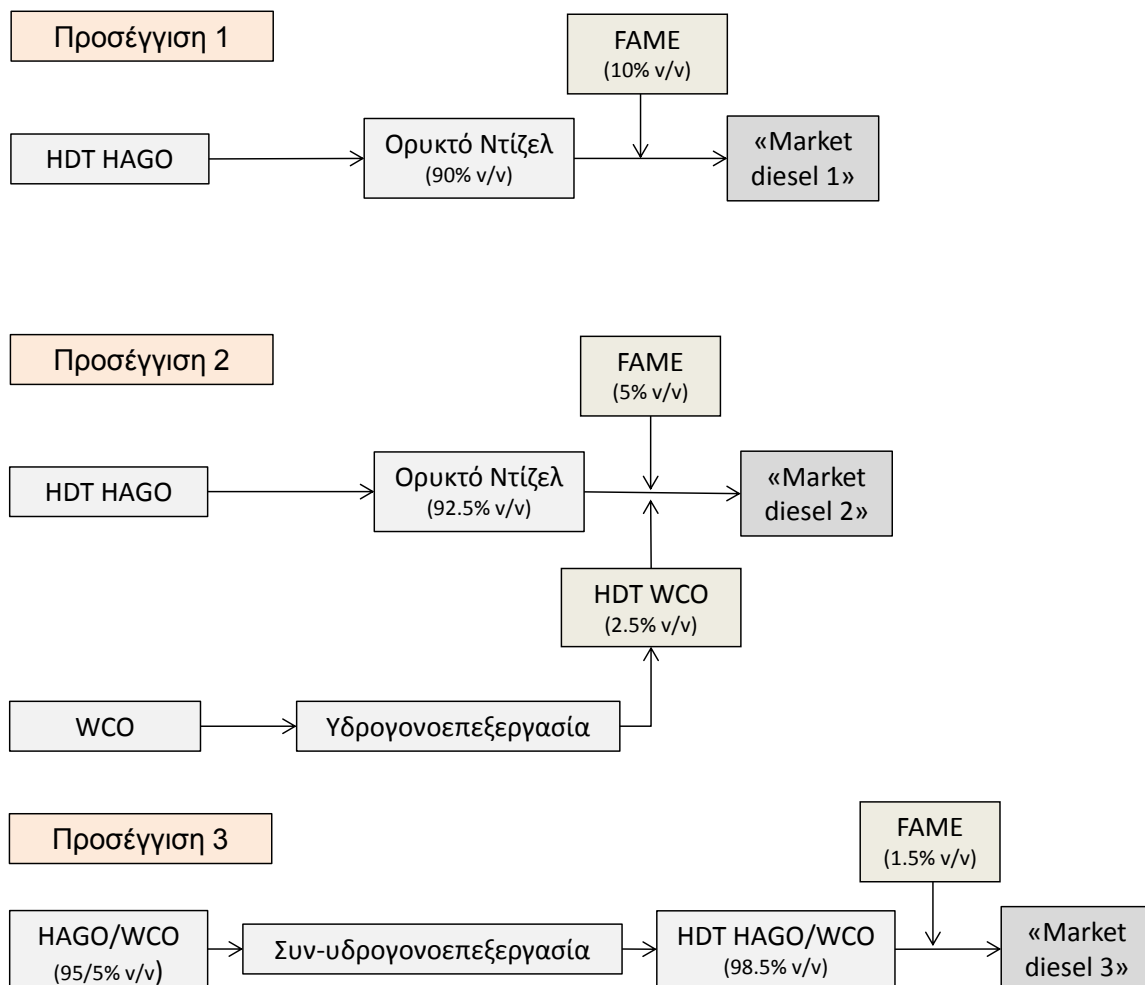
Η παρούσα εργασία εξετάζει τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις από οικονομική και περιβαλλοντική σκοπιά στοχεύοντας τη παραγωγή ενός καυσίμου ντίζελ με περιεκτικότητα 10% κ.ο. βιοκαύσιμο. Για την εκπόνηση της έρευνας πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση των τριών προσεγγίσεων στο πρόγραμμα Aspen Plus (Version 2006). Επιπρόσθετα, μέρος της παρούσας μελέτης αποτελεί και η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εξεταζόμενων διεργασιών, μέσω της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ), που αποτελεί μία συστηματική

μέθοδο καταγραφής και ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μίας διεργασίας.

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σκοπός της έρευνας ήταν η σύγκριση τριών διαφορετικών προσεγγίσεων παραγωγής εμπορικού ντίζελ κίνησης με 10% κ.ο. βιοκαύσιμο όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Το πετρελαϊκό κλάσμα που επιλέχθηκε είναι το βαρύ αερίελλαιο ή αλλιώς HAGO (Heavy Atmospheric Gas Oil). Η πρώτη προσέγγιση αφορά τη παραγωγή συμβατικού ντίζελ κίνησης «Market diesel 1» από 90% κ.ο. υδρογονοεπεξεργασμένο HAGO (HDT HAGO) και 10% κ.ο. FAME βιοντίζελ 1^{ης} γενιάς από φυτικά έλαια.

Η δεύτερη προσέγγιση εξετάζει την παραγωγή εμπορικού ντίζελ κίνησης «Market diesel 2» μέσω της ανάμιξης πετρελαϊκού ντίζελ (HDT HAGO) με 5% κ.ο. FAME και 2.5% κ.ο. βιοκαύσιμο 2^{ης} γενιάς παραγόμενο από υδρογονοεπεξεργασία τηγανελαίου (HDT WCO). Καθώς το WCO αποτελεί υπολειμματική βιομάζα το ποσοστό ανάμειξης του προσμετράται διπλά σύμφωνα με την οδηγία Directive 2009/28/EC^[4] της Ευρωπαϊκής Ένωσης και το 2,5% κ.ο. μετατρέπεται σε 5% κ.ο. Ο σκοπός της δεύτερης προσέγγισης είναι η αντικατάσταση ενός ποσοστού του FAME με παραφινικό βιοκαύσιμο 2^{ης} γενιάς (HDT WCO). Τέλος, η τρίτη προσέγγιση αφορά στην παραγωγή εμπορικού ντίζελ κίνησης «Market diesel 3» μέσω της συν-υδρογονοεπεξεργασίας 5% κ.ο. WCO με πετρελαϊκό κλάσμα HAGO (HDT HAGO/WCO) σε υπάρχουσα μονάδα ενός διυλιστηρίου. Καθώς ένα μικρό ποσοστό του WCO μετά τη διεργασία μετατρέπεται σε νερό, το παραγόμενο καύσιμο HDT HAGO/WCO, στο τέλος αναμείχθηκε με επιπλέον 1.5% κ.ο FAME, ώστε η τελική του περιεκτικότητα σε βιομάζα να είναι 10% κ.ο.



Σχήμα 1. Εξεταζόμενες μεθοδολογίες παραγωγής εμπορικού ντίζελ κίνησης με 10% κ.ο. βιοκαύσιμο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για την εκπόνηση της μελέτης και τη κατασκευή των μοντέλων προσομοίωσης των μονάδων υδρογονοεπεξεργασίας επιλέχθηκε ένα μέσου όρου δυναμικότητας διυλιστήριο της τάξεως των 23848 m³/d σε προϊόντα, εκ των οποίων το 30% ανταποκρίνεται στην παραγωγή του πετρελαϊκού ντίζελ (7154m³/d)^[5]. Θεωρώντας ότι το 50% αυτής της δυναμικότητας αντιστοιχεί στη μονάδα υδρογονοεπεξεργασίας του HAGO, η δυναμικότητα της μονάδας που προσομοιώθηκε είναι 3577m³/d. Η προσομοίωση της διεργασίας της υδρογονοεπεξεργασίας στις εξεταζόμενες διεργασίες έγινε με το Aspen Plus (Version 2006.5). Χρησιμοποιώντας πειραματικά αλλά και βιβλιογραφικά δεδομένα, για την πρώτη προσέγγιση προσομοιώθηκε στο Aspen Plus το μοντέλο μίας μονάδα υδρογονοεπεξεργασίας HAGO με δυναμικότητα 3577m³/d^[3,6]. Για τη δεύτερη προσέγγιση σχεδιάστηκε ένα μοντέλο μίας μονάδας υδρογονοεπεξεργασίας τηγανελαίου προς παραγωγή βιοκαυσίμου 2^{ης} γενιάς με δυναμικότητα 41m³/d σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα από προηγούμενες μελέτες των συγγραφέων^[6]. Τέλος, για την τρίτη προσέγγιση προσομοιώθηκε μία μονάδα συν-υδρογονοεπεξεργασίας HAGO με WCO δυναμικότητας 3577m³/d βασισμένη σε πειραματικά δεδομένα προγενέστερων ερευνών των συγγραφέων^[3]. Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις των διεργασιών αποτέλεσαν τη βάση για την οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγησή τους. Ειδικότερα, για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εξεταζόμενων παραγωγικών διεργασιών των νέων καυσίμων, σχεδιάστηκαν διαγράμματα ροής, που περιελάμβαναν τα όρια των υπό μελέτη συστημάτων, ενώ χρησιμοποιήθηκε και το πρόγραμμα GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems, Version 4.9). Ο περιβαλλοντικός δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εκάστοτε εξεταζόμενης παραγωγικής διεργασίας είναι το δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential, GWP), που εκφράζεται σε ισοδύναμες ποσότητες CO₂ (CO₂ eq-).

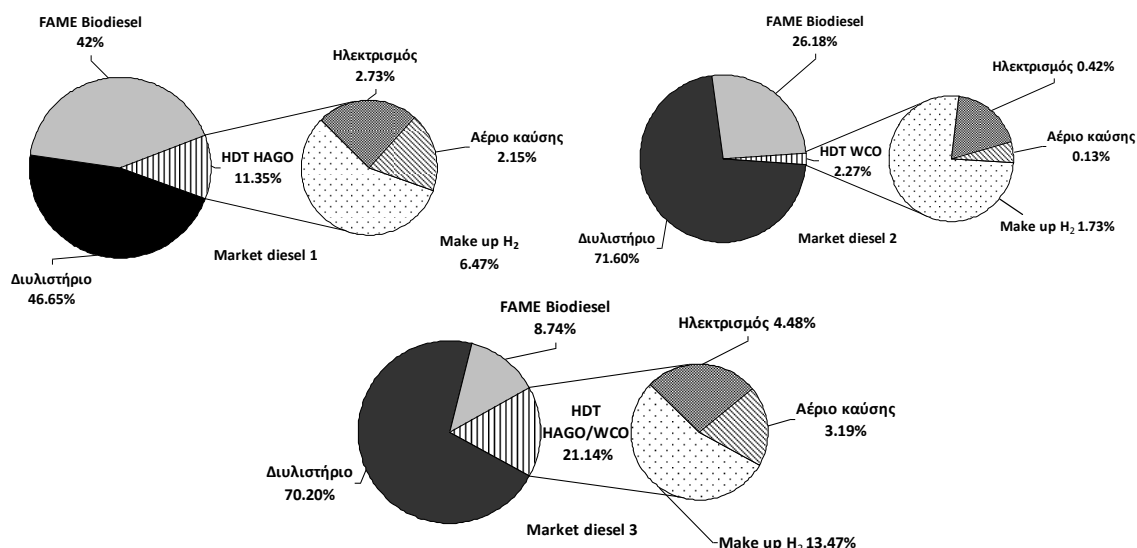
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εξεταζόμενων διεργασιών δίνονται στον Πίνακα 1 και η συνεισφορά των επιμέρους σταδίων απεικονίζεται στο Σχήμα 2.

Πίνακας 1. Εκπομπές GWP των εξεταζόμενων νέων καυσίμων (kgCO₂ eq/m³)

Στάδιο διεργασίας	Market diesel 1	Market diesel 2	Market diesel 3
Διυλιστήριο	149	117	180
HDT HAGO	33	69	-
HDT HAGO/WCO	-	-	43
HDT WCO	-	5	-
FAME	136	68	20
Σύνολο	318	259	243

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι τα καύσιμα των περιπτώσεων μελέτης 2 (259 kgCO₂ eq/m³) και 3 (243 kgCO₂ eq/m³) έχουν χαμηλότερες εκπομπές σε σύγκριση με την περίπτωση 1 (318 kgCO₂ eq/m³), που απεικονίζει την υπάρχουσα κατάσταση παραγωγής του ντίζελ. Επομένως, η σύγκριση αυτή αναδεικνύει την περιβαλλοντική υπεροχή της ενσωμάτωσης της βιομάζας στο διυλιστήριο και της συν-υδρογονοεπεξεργασίας της με πετρελαϊκό κλάσμα. Σημαντική είναι η συνεισφορά των εκπομπών του διυλιστηρίου στις συνολικές εκπομπές των υπό μελέτη διεργασιών, ενώ ειδικότερα στις περιπτώσεις που περιλαμβάνεται υδρογονοεπεξεργασία της βιομάζας είναι αξιόλογη η συνεισφορά των εκπομπών παραγωγής του H₂ (περιπτώσεις 2 και 3) (Σχήμα).



Σχήμα 2. Συνεισφορά των επιμέρους σταδίων στις συνολικές εκπομπές των εξεταζόμενων παραγωγικών διεργασιών των νέων καυσίμων

Για την εκπόνηση της οικονομικής μελέτης επιλέχθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα όσον αφορά το κόστος των τροφοδοσιών. Σήμερα στην Ελλάδα το κόστος παραγωγής του FAME περιλαμβάνοντας και το κόστος της τροφοδοσίας είναι περίπου 1.3 €/kg, ενώ η τιμή πώλησης του από τα βιο-διυλιστήρια στα διυλιστήρια είναι περίπου 1.5 €/kg^[7]. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πυκνότητα του FAME είναι 880 kg/m³, τα διυλιστήρια αγοράζουν το FAME 1320 €/m³ (η τιμή περιλαμβάνει και το κόστος μεταφοράς).

Το πετρελαϊκό κλάσμα HAGO παράγεται από το αργό πετρέλαιο και είναι προϊόν της αποστακτικής στήλης. Σύμφωνα με δεδομένα διυλιστηρίων, το κόστος του HAGO κυμαίνεται από 700 έως 730 €/m³ εξαρτώμενο από τη δυναμικότητα του διυλιστηρίου και την ποιότητα του αργού πετρελαίου. Ας σημειωθεί ότι από το HAGO μόνο το ποσοστό ~47% κ.ο. βρίσκεται στο εύρος βρασμού του ντίζελ, επομένως ένας συντελεστής 0.47 χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου στο Aspen Plus, για την παραγωγή 1 m³ ντίζελ από την υδρογονοεπεξεργασία του HAGO το κόστος είναι περίπου 744.77 €/m³.

Σχετικά με το κόστος παραγωγής του υδρογονοεπεξεργασμένου WCO (τηγανελαιίου) αυτό εξαρτάται άμεσα από το κόστος αγοράς του. Η τιμή του WCO στην Ελλάδα για το 2014 και 2015 περιλαμβάνοντας και το κόστος μεταφοράς στο διυλιστήριο κυμαίνεται από 0.62 έως 0.58 €/kg^[8]. Σήμερα το κόστος του WCO είναι ακόμα υψηλότερο και εκτιμάται ~0.65 €/kg. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιωμένων διεργασιών στο Aspen Plus το κόστος παραγωγής του υδρογονοεπεξεργασμένου WCO (βιοκαυσίμου 2^{ης} γενιάς) είναι ~760.33 €/kg.

Τέλος, η τρίτη προσέγγιση περιλαμβάνει την ενσωμάτωση του WCO στο διυλιστήριο μέσω της συν-υδρογονοεπεξεργασίας του WCO με το HAGO, σε ποσοστό ανάμειξης 5% και 95% κ.ο., αντίστοιχα. Θεωρώντας ότι το προϊόν της συν-υδρογονοεπεξεργασίας WCO με HAGO αντιστοιχεί σε ~50% κ.ο. σε προϊόντα ντίζελ, ένας συντελεστής 0.5 χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς. Ως αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής του υδρογονοεπεξεργασμένου μίγματος WCO/HAGO είναι ~744.96 €/m³.

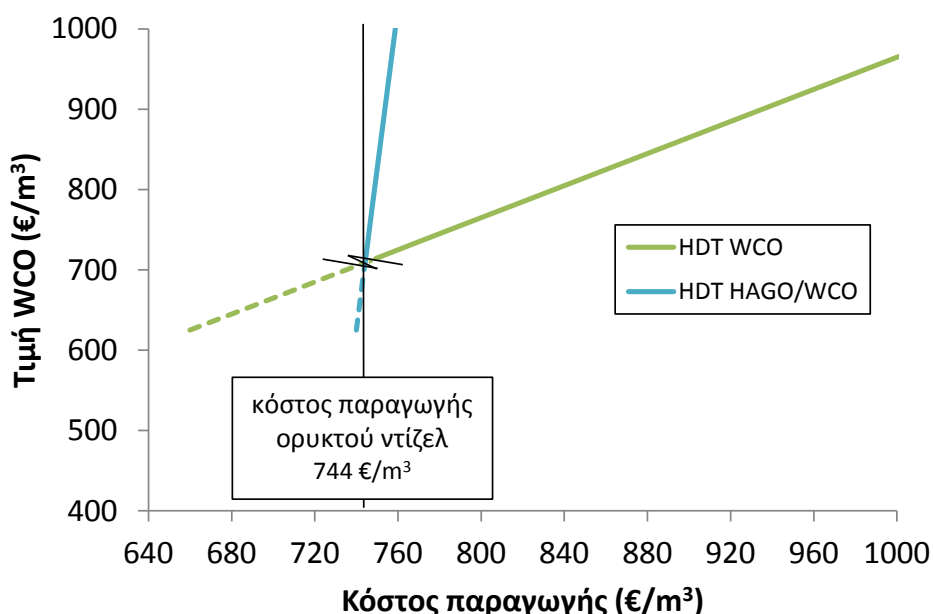
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 1, το «Market diesel 1», προϊόν της πρώτης προσέγγισης που αποτελείται από 90% κ.ο. ορυκτό ντίζελ (HDT HAGO) και 10% κ.ο. FAME είναι 802.3 €/m³. Το «Market diesel 2», προϊόν της δεύτερης προσέγγισης, αποτελείται από 92.5% κ.ο. HDT HAGO, 5% κ.ο. FAME και 2.5% κ.ο. HDT WCO. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το WCO ως υπολειμματική βιομάζα προσμετράται διπλά^[4], επομένως το ποσοστό βιοκαυσίμου και της δεύτερης προσέγγισης είναι 10% κ.ο. Το κόστος παραγωγής του «Market diesel 2» της δεύτερης

προσέγγισης ανέρχεται στα 773.93 €/m³. Τέλος το κόστος παραγωγής του «Market diesel 3», της τρίτης προσέγγισης ανέρχεται στα 753.59 €/m³.

Πίνακας 2. Κόστος παραγωγής τελικού προϊόντος ντίζελ των τριών προσεγγίσεων

Τροφοδοσίες	Κόστος (€/m ³)	Market diesel 1	Market diesel 2	Market diesel 3
HDT HAGO	744.77	90.0%	92.5%	-
FAME Biodiesel	1320	10.0%	5.0%	1.5%
HDT WCO	760.34	-	2.5%	-
HDT HAGO/WCO	744.96	-	-	98.5%
Συνολικό κόστος παραγωγής		802.3 €/m ³	773.93 €/m ³	753.59 €/m ³

Όπως είναι εμφανές με τη δεύτερη προσέγγιση το κόστος παραγωγής του «Market diesel 2» είναι χαμηλότερο συγκριτικά με το «Market diesel 1» που αποτελεί και την υπάρχουσα τεχνολογία της αγοράς. Εντούτοις, το κόστος παραγωγής του «Market diesel 3» είναι χαμηλότερο και από τις τρεις διερευνώμενες προσεγγίσεις. Παρόλα αυτά το κόστος παραγωγής του «Market diesel 2» και του «Market diesel 3» είναι άμεσα εξαρτώμενο από την τιμή αγοράς του WCO. Για τιμές WCO χαμηλότερες των 725 €/m³ η πιο συμφέρουσα οικονομικά προσέγγιση είναι η τρίτη όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Εξάρτηση του κόστους παραγωγής του υδρογονοεπεξεργασμένου τηγανέλαιου καθώς και του υδρογονοεπεξεργασμένου μείγματος HAGO/τηγανέλαιο από την τιμή πώλησης του τηγανέλαιου

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, η ενσωμάτωση των λιπιδίων σε υπάρχουσα εγκατάσταση διυλιστηρίου (τρίτη προσέγγιση) επιφέρει περιβαλλοντικά οφέλη μειώνοντας τις εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων κατά 23% συγκριτικά με την υπάρχουσα διεργασία παραγωγής ντίζελ. Όσον αφορά στην οικονομική ανάλυση, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κόστος παραγωγής του τελικού καυσίμου κίνησης (€/m³) της τρίτης προσέγγισης είναι 2-6% χαμηλότερο συγκριτικά με τις άλλες δύο προσεγγίσεις.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Sustain Diesel-09SYN-32-328», και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους. Οι συγγραφείς εκφράζουν θερμές ευχαριστίες προς τον Όμιλο Ελληνικών Πετρελαίων και συγκεκριμένα το διυλιστήριο της Θεσσαλονίκης για την προμήθεια του HAGO καθώς και δεδομένων σχετικά με τη λειτουργία του διυλιστηρίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S. Bezergianni and A. Dimitriadis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 21 (2013) 110-116.
- [2] 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>
- [3] S. Bezergianni, A. Dimitriadis, D. Karonis. Fuel 136 (2014) 366-373.
- [4] European Commission, 209. Directive 2009/28/EC
- [5] Global energy Observatory US, 2017. Current list of Crude Oil Refineries Resources.
- [6] S. Bezergianni, A. Dimitriadis, L.P. Chrysikou. Fuel 118 (2014) 300-307.
- [7] <http://www.agroenergy.gr/en/content> (Accessed: 5 July 2018).
- [8] V. Dimitropoulos, K. Karasavva. School of economics, business administration & legal studies, (A thesis submitted for the degree of Executive MBA).