



ΕΘΝΙΚΟ  
ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. : 34438  
Αθήνα, 18/7/2023

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της  
Σχολής Μηχ/γων  
Μηχ/κών

### ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. κ. ΧΟΥΝΤΑΛΑ Θεοφάνη, διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού του ΕΜΠ και κατόχου Μεταπτυχιακού Διπλώματος από το Imperial College of London στην επιστημονική περιοχή Advanced Mechanical Engineering, την οποία εκπόνησε στον Τομέα Θερμότητας. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Τρίτη 25 Ιουλίου 2023 ώρα 12:00 το μεσημέρι στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, στο 1ο όροφο του κτιρίου Ο, αίθουσα σεμιναρίων. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής:

**«Διερεύνηση νέων τεχνικών μείωσης εκπομπών για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κινητήρων πλοίων χρήσης υγρών ή αερίων καυσίμων»**

και ο Αγγλικός ως εξής

**«Investigation of novel emission reduction technologies and use of liquid or gaseous fuels for curbing marine engines environmental impact».**

Ο Κοσμήτορας της Σχολής

N. Μαρμαράς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

## Ph.D. Thesis

### **Title: Investigation of novel emission reduction technologies and use of liquid or gaseous fuels for curbing marine engines environmental impact**

by Ph.D. candidate Theofanis Chountalas

Supervisor: Prof. Maria Founti

#### **ABSTRACT**

In this thesis emissions reduction technologies for marine sector use were examined targeting CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> output of engines operating on liquid and gaseous fuels. The basis for investigation is direct measurements on marine engines conducted either on-board or during the factory acceptance procedure accompanied, where appropriate with multi-zone combustion model simulations for in depth analysis. In total 19 engines were considered, the majority of which 2-stroke slow speed propulsion engines. Two abatement technologies for each pollutant were examined: for CO<sub>2</sub> biofuels and liquified natural gas (LNG), and for NO<sub>x</sub> control exhaust gas recirculation (EGR) and selective catalytic reduction (SCR). All the aforementioned are newly introduced in the marine sector and considered state-of-the-art solutions.

The use of biofuels was examined by on-board trials on a series of 2-stroke and 4-stroke engines using a 30% biodiesel blend with crude oil and accompanying measurements using typical marine fuels. Its impact on marines engines, especially 2-stroke ones, was mostly undocumented up to the present research. The effect on engine performance and the combustion process was found minimal, with a small fuel efficiency penalty. Consistent increase was measured for NO<sub>x</sub> emissions, attributed to biofuel increased O<sub>2</sub> content, based on the measurement data analysis and on a detailed investigation via the multizone model. The negative effect on fuel consumption and emissions was higher for the 4-stroke units. For all engines the increase was only moderate allowing operation within regulation limits. Minimal CO<sub>2</sub> emission improvement was measured on-site, but well-to-wake data show roughly 25% improvement for carbon emissions using the fuel.

The high-pressure gas injection dual-fuel engine variant was tested in the LNG viability study. Performance and emission measurements were conducted on two consecutive generation large 2-stroke engines for diesel only and dual fuel operation. The measurements were acquired during official Factory Acceptance Tests (FAT). Analysis showed that the previous generation engine was capable of nearly identical performance between dual-fuel and diesel only operation with a minimal efficiency penalty. The diesel fuel pilot amount required for stable operation was low. The only major difference was higher initial and peak combustion rate. The overall tuning was aimed to match diesel operation. For the new generation engine considerable improvement was found in terms of required pilot fuel amount, and fuel efficiency was higher than diesel mode. The previous was due to injector design improvements and different engine tuning. The effect on combustion was notable with very high premixed combustion rate. The maximum cylinder combustion pressure was increased compared to diesel operation and to the past generation engine. NO<sub>x</sub> emissions were relatively close between diesel and dual fuel mode and were found to be affected by fuel pilot injection strategy, peak pressure values and the lower methane flame temperature. The benefit on exhaust CO<sub>2</sub> emissions was close to 23% for both engines comparing diesel and dual-fuel mode. The gen-on-gen improvement was close to 7%.

EGR, as a means to satisfy NO<sub>x</sub> emission legislation, was tested on a diesel and on a dual-fuel large 2-stroke engine during FAT tests. Very high overall effect on combustion was confirmed for this technique. Combustion rate was slower and duration was increased in both engines. Considerable alterations to engine tuning were required. The impact on combustion efficiency led to increased fuel consumption, close to 5% for the diesel and 4% for the dual-fuel engine. Overall efficiency of NO<sub>x</sub> reduction was high, close to 80%. Practically no difference was found between the dual-fuel and diesel only engines. The EGR percentage was estimated using measured data approximations and a multizone model. Both methods showed high rate requirements while injection timing was also retarded to aid in NO<sub>x</sub> formation reduction. The information acquired from the present analysis covers the lack of detailed performance and emission data for the specific technological solution on slow speed marine engines. A theoretical investigation was conducted using a multi-zone combustion model to explain and understand on a fundamental basis NO<sub>x</sub> reduction when using EGR. Last, a theoretical analysis was conducted to minimize the fuel consumption penalty from the use of EGR.

SCR was tested in two configurations, Low Pressure and high pressure, before and after the turbine in large 2-stroke engines. The investigation was conducted during the attendance of official sea trials and FATs. Effect on engine operation

was minimal and only a 1.5% fuel consumption increase was found. Some tuning change requirements were confirmed to increase gas inlet temperature at the catalyst that contributed to the fuel consumption increase. Furthermore, for the first time the use of a SCR solution for crude oil operation was examined and evaluated. Efficiency of NO<sub>x</sub> reduction was good, 85% and 80% for catalyst before and after the turbine respectively. Operation required use of urea and consumption was high close to 18g/kWh on average. This will lead to high operating costs for the system. A comparison between EGR and SCR showed considerably higher cost of the SCR system based on modern fuel and urea price trends, when also factoring in the requirement of catalyst replacement every few years.

Overall, the investigated technologies were found to provide tangible benefits on emissions reduction while being mature enough for current use and also having considerable prospects for future advancements.

## Διδακτορική Διατριβή

### Τίτλος: Διερεύνηση νέων τεχνικών μείωσης εκπομπών για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κινητήρων πλοίων χρήσης υγρών ή αερίων καυσίμων

Από Υ.Δ. Θεοφάνης Χουντάλας  
Επιβλέπουσα: Καθ. Μαρία Φούντη

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διατριβή μελετήθηκαν τεχνολογίες μείωσης εκπομπών για τον ναυτιλιακό τομέα, με στόχο τα CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> παραγόμενα από κινητήρες που λειτουργούν με υγρά και αέρια καύσιμα. Η βάση για την έρευνα ήταν μετρήσεις σε ναυτικούς κινητήρες που πραγματοποιήθηκαν είτε σε πλοίο είτε κατά τη διάρκεια εργοστασιακών δοκιμών, και συνοδεύτηκαν από περαιτέρω ανάλυση με τη χρήση πολυζωνικού μοντέλου για την προσομοίωση καύσης. Συνολικά 19 κινητήρες μελετήθηκαν, οι περισσότεροι μεγάλοι 2-χρονοι κινητήρες πρόωσης. Εξετάστηκαν δύο τεχνικές μείωσης εκπομπών για κάθε ρύπο. Για το CO<sub>2</sub> βιοκαύσιμα και υδροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), και για τον έλεγχο των NO<sub>x</sub> ανακύκλωση καυσαερίων (EGR) και εκλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR). Όλα τα προαναφερθέντα εισήχθησαν πρόσφατα στο ναυτιλιακό τομέα και θεωρούνται προηγμένες τεχνικές.

Η χρήση βιοκαυσίμων εξετάστηκε μέσω δοκιμών σε πλοία σε 2-χρόνους και 4-χρόνους κινητήρες χρησιμοποιώντας μείγμα 30% βιοντίζελ και βαρύ πετρέλαιο, και με συνοδευτικές μετρήσεις με τυπικά ναυτικά καύσιμα. Η επίδραση στους ναυτικούς κινητήρες, ειδικά 2-χρονους, δεν είχε αναλυθεί εκτενώς μέχρι την παρούσα έρευνα. Ελάχιστη επίδραση βρέθηκε στην απόδοση του κινητήρα και στη διαδικασία καύσης, με μια μικρή αύξηση κατανάλωσης. Μετρήθηκε αύξηση στις εκπομπές NO<sub>x</sub>, που αποδόθηκε στο αυξημένο περιεχόμενο του βιοκαυσίμου σε O<sub>2</sub> βάσει ανάλυσης των μετρημένων δεδομένων και έρευνας με χρήση ενός πολυζωνικού μοντέλου. Ο αρνητικός αντίκτυπος στην κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ήταν μεγαλύτερος για τους 4-χρονους κινητήρες. Για όλους τους κινητήρες, η αύξηση ήταν μέτριου επιπέδου, επιτρέποντας τη λειτουργία εντός των θεσπισμένων ορίων εκπομπών. Μετρήθηκε ελάχιστη βελτίωση εκπομπών CO<sub>2</sub>, αλλά αναλύσεις κύκλου ζωής δείχνουν περίπου 25% βελτίωση στις συνολικές εκπομπές άνθρακα χρησιμοποιώντας βιοκαύσιμο.

Η μελέτη χρήσης LNG πραγματοποιήθηκε σε κινητήρες διπλού καυσίμου με έγχυση του αερίου σε υψηλή πίεση. Οι μετρήσεις λειτουργίας και εκπομπών πραγματοποιήθηκαν σε 2-χρονους κινητήρων δύο συνεχόμενων γενεών κατά τη λειτουργία μόνο με πετρέλαιο και με χρήση πετρελαίου και αερίου. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια εργοστασιακών δοκιμών. Η ανάλυση έδειξε ότι ο προηγούμενης γενεάς κινητήρας ήταν ικανός για σχεδόν ίδια απόδοση μεταξύ των δύο τρόπων λειτουργίας. Μία ελάχιστη μείωση αποδοτικότητας βρέθηκε κατά τη λειτουργία δύο καυσίμων. Η ποσότητα πιλοτικής έγχυσης πετρελαίου που απαιτείται για σταθερή λειτουργία διπλού καυσίμου ήταν χαμηλή. Η κυριότερη διαφορά κατά τη λειτουργία διπλού καυσίμου ήταν υψηλότερος αρχικός και μέγιστος ρυθμός καύσης. Γενικά η ρύθμιση του κινητήρα αυτού είχε ως στόχο να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές μεταξύ λειτουργίας ενός και δύο καυσίμων. Στον κινητήρα νέας γενεάς μετρήθηκε σημαντική βελτίωση όσον αφορά την απαιτούμενη ποσότητα πιλοτικής έγχυσης. Η οικονομία καυσίμου ήταν σημαντικά καλύτερη κατά τη χρήση φυσικού αερίου. Τα παραπάνω αποδόθηκαν σε βελτιώσεις στο σχεδιασμό του εγχυτήρα και σε διαφορετική ρύθμιση του κινητήρα. Η επίδραση των προηγούμενων στην καύση ήταν εμφανής, με πολύ υψηλότερο ρυθμό καύσης προανάμειξης. Η μέγιστη πίεση στους κυλίνδρους αυξήθηκε σε σχέση με τη λειτουργία με πετρέλαιο και με τον προηγούμενης γενεάς κινητήρα. Οι εκπομπές NO<sub>x</sub> ήταν σχετικά κοντά για τους δύο τρόπους λειτουργίας. Κατά τη λειτουργία διπλού καυσίμου οι εκπομπές επηρεάστηκαν από τη μορφή και χρονισμό της πιλοτικής έγχυσης, τις μέγιστες τιμές πίεσης και τη χαμηλότερη θερμοκρασία φλόγας του μεθανίου. Το οφέλη στις εκπομπές CO<sub>2</sub> ήταν περίπου 23% και για τους δύο κινητήρες κατά τη λειτουργία με φυσικό αέριο. Η βελτίωση γενεάς προς γενεά ήταν περίπου 7% αναφορικά με τις εκπομπές άνθρακα.

Το EGR δοκιμάστηκε σε έναν μεγάλο 2-χρονο κινητήρα πετρελαίου και έναν διπλού καυσίμου κατά τη διάρκεια εργοστασιακών δοκιμών. Η τεχνική της ανακυκλοφορίας είχε μεγάλη επίδραση στο μηχανισμό καύσης. Ο ρυθμός καύσης ήταν πιο αργός και η διάρκειά της αυξήθηκε και στους δύο κινητήρες. Απαιτήθηκαν σημαντικές αλλαγές στη ρύθμιση του κινητήρα. Η επίδραση στο μηχανισμό καύσης οδήγησε σε αύξηση της κατανάλωσης, περίπου 5% για τον κινητήρα με πετρέλαιο και 4% για τον κινητήρα αερίου. Η συνολική αποδοτικότητα μείωσης NO<sub>x</sub> ήταν υψηλή, κοντά στο 80%. Πρακτικά δεν βρέθηκε διαφορά μεταξύ του κινητήρα αερίου και του κινητήρα πετρελαίου. Το ποσοστό EGR εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας μία προσεγγιστική μέθοδο με μετρημένα δεδομένα και ένα πολυζωνικό μοντέλο. Και οι δύο μέθοδοι

έδειξαν υψηλές απαιτήσεις σε ποσοστό ανακυκλοφορίας, ενώ παράλληλα η έγχυση καυσίμου ξεκινούσε αργότερα προκαλώντας επιπλέον μείωση του σχηματισμού  $\text{NO}_x$ . Οι πληροφορίες που προέκυψαν από την παρούσα ανάλυση καλύπτουν την έλλειψη λεπτομερών δεδομένων απόδοσης και εκπομπών για τη συγκεκριμένη τεχνολογική λύση σε 2-χρονους ναυτικούς κινητήρες. Θεωρητική έρευνα διεξήχθη χρησιμοποιώντας ένα πολυζωνικό μοντέλο καύσης για να εξηγηθεί και να κατανοηθεί σε θεμελιώδη βάση η μείωση των  $\text{NO}_x$  όταν χρησιμοποιείται EGR. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική ανάλυση για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου που προκαλείται κατά τη χρήση του EGR.

Το SCR δοκιμάστηκε σε δύο διαμορφώσεις πριν και μετά τον τουρμπίνα σε μεγάλους 2-χρονους κινητήρες με μετρήσεις κατά τις δοκιμές σε πλοία και εργοστασιακές δοκιμές. Η επίδραση στη λειτουργία του κινητήρα ήταν ελάχιστη. Βρέθηκε μόνο μια αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου περίπου στο 1,5%. Επιβεβαιώθηκαν ορισμένες απαιτήσεις αλλαγής ρυθμίσεων για αύξηση της θερμοκρασίας εισαγωγής αερίου στον καταλύτη, οι οποίες συνέβαλαν στην αύξηση της κατανάλωσης. Επίσης για πρώτη φορά αξιολογήθηκε η χρήση καταλύτη ικανού να λειτουργεί με βαρύ καύσιμο. Η απόδοση της μείωσης των  $\text{NO}_x$  ήταν καλή, 85% και 80% για τον καταλύτη πριν και μετά τον στρόβιλο αντίστοιχα. Το σύστημα απαιτούσε τη χρήση ουρίας και η κατανάλωση ήταν υψηλή, κατά μέσο όρο 18 g/kWh. Αυτό θα οδηγήσει σε υψηλό κόστος λειτουργίας του συστήματος. Μια σύγκριση μεταξύ EGR και SCR έδειξε σημαντικά υψηλότερο κόστος του συστήματος SCR με βάση τις σύγχρονες τάσεις των τιμών καυσίμων και ουρίας, και λαμβάνοντας επίσης υπόψη την απαίτηση αντικατάστασης καταλύτη κάθε λίγα χρόνια.

Συνολικά, οι τεχνολογίες που διερευνήθηκαν διαπιστώθηκε ότι παρέχουν απτά οφέλη στη μείωση των εκπομπών, ενώ είναι αρκετά ώριμες για τρέχουσα χρήση ενώ ορισμένες έχουν επίσης σημαντικές προοπτικές για μελλοντική εξέλιξη.