

## MỤC LỤC

DANH SÁCH BẢNG BIỂU.....	3
DANH SÁCH HÌNH VẼ.....	3
DANH SÁCH THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT.....	5
MỞ ĐẦU.....	6
i)    Tính cấp thiết của đề tài.....	6
ii)   Mục đích nghiên cứu.....	6
iii)  Phương pháp nghiên cứu.....	7
iv)   Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	7
v)   Ý nghĩa của đề tài.....	7
<b>1. TỔNG QUAN VỀ CẶN LẮNG TRONG BUỒNG ĐỐT ĐỘNG CƠ DIESEL.....</b>	<b>8</b>
1.1.  Cặn lắng động cơ.....	9
1.2.  Nguồn gốc của cặn lắng.....	11
1.3.  Đặc tính của cặn.....	14
1.4.  Tính chất của cặn lắng.....	16
<b>2. CẶN LẮNG TRÊN ÔNG LÓT XY LẠNH ĐỘNG CƠ DIESEL TÀU THỦY.....</b>	<b>18</b>
2.1.  Cặn lắng trên ống lót xy lanh.....	18
2.2.  Lịch sử nghiên cứu và khảo sát cặn lắng trên ống lót xy lanh.....	21
2.3.  Các yếu tố ảnh hưởng tới sự hình thành cặn trên ống lót xy lanh.....	21
2.3.1  Ảnh hưởng của loại động cơ và thiết kế tới sự hình thành cặn.....	21
2.3.2  Ảnh hưởng của nhiên liệu đối với cặn ống lót.....	22
2.3.3  Ảnh hưởng của quá trình đốt cháy.....	22
2.3.4  Ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu bôi trơn.....	22
2.3.5  Ảnh hưởng của tải trọng và điều kiện khai thác động cơ.....	23
2.4.  Nguồn gốc và thành phần cặn.....	24
2.5.  Giả thuyết về cơ chế hình thành cặn.....	27
2.5.1  Động học hóa học cơ bản.....	27
2.5.2  Lý thuyết sự oxi hóa hydrocacbon.....	28
2.5.3  Quá trình cracking nhiệt.....	32
2.5.4  Ảnh hưởng của Nitơ oxit.....	32
2.5.5  Trùng hợp oxy hóa.....	33
2.6.  Môi trường làm việc của ống lót xy lanh.....	33
2.6.1  Thiết kế xy lanh động cơ.....	33
2.6.2  Sự cháy và truyền nhiệt.....	35
2.6.3  Nhiệt độ ống lót xy lanh.....	37
2.6.4  Tính toán nhiệt độ màng dầu và ống lót.....	38
2.6.5  Tổn thất do hóa hơi và sự biến chất hóa học.....	38
2.6.6  Thời gian cư trú của màng dầu.....	39

2.6.7.	Chiều dày màng dầu .....	39
2.6.8.	Cơ chế tiêu hao dầu bôi trơn .....	40
<b>3.</b>	<b>CƠ SỞ PHÂN TÍCH VÀ KHẢO SÁT CẶN ỐNG LÓT XY LẠNH .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.</b>	<b>Kỹ thuật phân tích đặc tính của cặn ống lót xy lạnh .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.</b>	<b>Sự phân bố cặn ống lót.....</b>	<b>41</b>
3.2.1.	Dạng nhìn thấy của cặn ống lót.....	41
3.2.2.	Sự phân bố cặn trên quy mô lớn.....	44
3.2.3.	Dạng cặn phân bố theo nguyên tố hóa học.....	48
<b>3.3.</b>	<b>Thành phần của cặn ống lót .....</b>	<b>48</b>
3.3.1.	Lấy mẫu.....	48
3.3.2.	Phân tích cặn bằng quang phổ hồng ngoại .....	49
<b>4.</b>	<b>KHẢO SÁT VÀ ĐÁNH GIÁ CẶN TRÊN ỐNG LÓT XY LẠNH CỦA MỘT SỐ ĐỘNG CƠ THỦY TRUNG TỐC .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.</b>	<b>Đánh giá các trường hợp nghiên cứu .....</b>	<b>50</b>
4.1.1.	Danh sách các trường hợp nghiên cứu .....	51
4.1.2.	Các đặc tính của tải động cơ.....	52
4.1.3.	Các yếu tố thiết kế động cơ .....	53
4.1.4.	Các thuộc tính nhiên liệu.....	55
4.1.5.	Các đặc tính của dầu bôi trơn cơ bản .....	58
<b>4.2.</b>	<b>Khảo sát cặn lacquer trên ống lót xy lạnh của động cơ lắp trên phà.....</b>	<b>59</b>
4.2.1.	Khái quát .....	59
4.2.2.	Mô tả hệ thống.....	61
4.2.3.	Quá trình khai thác .....	62
4.2.4.	Lịch sử sơ lược về động cơ .....	62
4.2.5.	Khảo sát các thông số khai thác .....	62
4.2.6.	Phân tích nhiên liệu .....	64
4.2.7.	Phân tích dầu bôi trơn đã dùng trên động cơ.....	65
4.2.8.	Hình ảnh quan sát.....	68
4.2.9.	Đo độ nhám bề mặt .....	73
4.2.10.	Đánh giá .....	74
<b>KẾT LUẬN.....</b>		<b>76</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>		<b>77</b>

## DANH SÁCH BẢNG BIỂU

No	Tên	Trang
Bảng 2.1	Nhiệt độ ống lót xy lanh của các động cơ	37
Bảng 4.1	Danh sách các khảo sát	51
Bảng 4.2	Các trường hợp nghiên cứu bổ sung	51
Bảng 4.3	Phân tích nhiên liệu “tiêu chuẩn”	55
Bảng 4.4	Các đặc tính của dầu	59
Bảng 4.5	Tiến trình khảo sát động cơ	61
Bảng 4.6	Các thông số trong biên bản khảo sát	62

## DANH SÁCH HÌNH VẼ

No	Tên	Trang
Hình 1.1	Cặn lắng trên các bộ phận khác nhau của buồng đốt	10
Hình 1.2	Ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu nhớt đối với sự hình thành CCD	11
Hình 1.3	Lượng kềm hấp thụ bởi phụ gia dầu bôi trơn	13
Hình 1.4	Sự phân bố kích thước lỗ xốp của cặn tạo bởi nhiên liệu không phụ gia trên các chi tiết khác nhau của động cơ	15
Hình 1.5	So sánh kích thước của lỗ cặn tạo thành từ nhiên liệu có phụ gia khác nhau với cùng nồng độ	15
Hình 1.6	Lớp cặn	16
Hình 1.7	Độ dẫn điện giảm do cặn tích tụ	14
Hình 1.8	Độ dày của CCD tại các điểm tại đầu xi lanh ứng với độ dẫn nhiệt	17
Hình 2.1	Các loại cặn ống lót khác nhau	19
Hình 2.2	Dấu vết trên bề mặt của bề mặt ống lót điển hình. (a) với cặn (b) không cặn.	20
Hình 2.3	Lượng tiêu thụ dầu bôi trơn trong động cơ với cặn ống lót	20
Hình 2.4	Ảnh hưởng của tốc độ động cơ lên việc hình thành cặn	24
Hình 2.5	Ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu nhớt đối với sự hình thành CCD	25
Hình 2.6	Lượng kềm hấp thụ bởi phụ gia dầu bôi trơn	26
Hình 2.7	Kết cấu xy lanh động cơ và các rãnh xéc măng trên piston	34

Hình 2.8	Màng dầu đóng vai trò như lớp cách nhiệt	37
Hình 3.1	Dấu vết của xéc măng trên ống lót xy lanh	42
Hình 3.2	Dấu vết sự chuyển động của dầu	43
Hình 3.3	Mức độ tập trung của cặn nhìn thấy và bước nhảy của cặn	43
Hình 3.4	Sự biến màu của cặn	44
Hình 3.5	Mẫu phân phối độ nhám	45
Hình 3.6	Sự phân bố cặn theo sự dịch chuyển piston	46
Hình 3.7	Sự thay đổi độ nhám bề mặt sau khi vệ sinh ống lót bằng axit acetic	47
Hình 3.8	Mô tả cặn lacquer trên mẫu động cơ A	47
Hình 3.9	Các hình ảnh thu được từ máy quét chùn điện tử	48
Hình 3.10	Quang phổ IR của cặn ống lót xy lanh	49
Hình 4.1	Mức độ phát triển tiêu hao dầu trong tàu trang bị hai động cơ (trường hợp E)	53
Hình 4.2	Lượng tiêu hao dầu tương đối và chỉ số cetan	56
Hình 4.3	Lượng tiêu hao dầu tương đối và mật độ	57
Hình 4.4	Lượng tiêu hao dầu tương đối và nhiên liệu lưu huỳnh	57
Hình 4.5	Lượng tiêu hao dầu tương đối và FBP (ASTM D-2886)	58
Hình 4.6	Quá trình tiêu hao dầu bôi trơn của động cơ lắp đặt trên phà	60
Hình 4.7	Diễn biến nhiệt độ khí nạp và sự tiêu hao dầu bôi trơn. Mức độ cặn lacquer trong tháng thứ 19 và 20. (Chất phụ gia được đưa vào từ tháng 21)	63
Hình 4.8	Diễn biến nhiệt độ làm mát ống lót xi lanh và tiêu hao dầu bôi trơn. Mức độ cặn lacquer trong tháng thứ 19 và 20. (Chất phụ gia được đưa vào từ tháng 21)	64
Hình 4.9	Dữ liệu phân tích nhiên liệu theo hệ số cetan	65
Hình 4.10	Dữ liệu phân tích nhiên liệu theo thành phần lưu huỳnh	65
Hình 4.11	Sự tiêu hao dầu theo TBN của dầu bôi trơn đã qua sử dụng	66
Hình 4.12	TBN và hàm lượng canxi	67
Hình 4.13	Thành phần soot và sự tiêu hao dầu bôi trơn	67
Hình 4.14	Độ nhớt và sự tiêu hao dầu bôi trơn	
Hình 4.15	Ống lót xy lanh trong lần khảo sát đầu tiên, trước thời	68

	<i>điểm xử lý chất phụ gia trong nhiên liệu</i>	
Hình 4.16	Hình ảnh chi tiết về ống lót trong lần khảo sát đầu tiên	69
Hình 4.17	Hình ảnh ống lót xy lanh trước và sau thời điểm xử lý chất phụ gia trong nhiên liệu	69
Hình 4.18	Hình ảnh chi tiết tại đỉnh của ống lót	70
Hình 4.19	Ống lót xy lanh B5 trước và sau 8 tháng khảo sát với chất phụ gia. Cặn lacquer thay thế lớp bồ hóng ở phía trên xéc măng đối đầu	70
Hình 4.20	Sự xuất hiện trở lại của cặn trong điều kiện sử dụng chất phụ gia không liên tục	71
Hình 4.21	Sự xuất hiện trở lại của cặn dịch chuyển rắn được quan sát thấy sau 6 tháng không xử lý chất phụ gia nhiên liệu	72
Hình 4.22	Đo độ nhám trung bình xung quanh chu vi ống lót	74

### **DANH SÁCH THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT**

ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Combustion Chamber Deposits
CEC	Coordinating European Council
Cetane Index	Prediction of fuel autoignitability based upon distillation and density data.
C <sub>F</sub>	Concentration of involatile material in oil film
CIMAC	International Council on Combustion Engines
DMA	Standard 'distillate' quality gas oil specified by ISO 8217
FBP	Final boiling point
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
MCR	Maximum continuous rating
SA	Sulphated Ash. Weight of ash converted to sulphate
SAE	Society of Automotive Engineers (Also: viscosity grade)
SEM	Scanning Electron Microscopy
TBN	Total Base Number. Alkaline reserve in oil measured by titration and expressed as KOH equivalent [mg KOH/g]
TBN index	Used oil TBN / Fresh oil TBN

## MỞ ĐẦU

### i) Tính cấp thiết của đề tài

Các động cơ diesel được ứng dụng trong ngành công nghiệp hàng hải trên 50 năm và đang tiếp tục phát triển. Theo thời gian, động cơ nhỏ nhẹ hơn cùng với nhiệt độ làm việc và áp suất cao hơn. Sự phát triển của các quá trình tinh chế nhiên liệu mới với chất xúc tác tốt hơn và quá trình kiểm soát được cải thiện dẫn đến sự thay đổi trong thành phần nhiên liệu hàng hải theo hướng các hỗn hợp có nồng độ hydrocarbon chuyển đổi lớn hơn. Những năm gần đây, các thỏa thuận quốc tế nhằm giảm ô nhiễm biển với Bộ luật IMO-NOx và các hạn mức lưu huỳnh trong nhiên liệu đã tác động sâu sắc đến thiết kế động cơ và thành phần nhiên liệu. Quy định về lượng lưu huỳnh có ảnh hưởng đến các thành phần của tất cả các loại nhiên liệu chung cất được sử dụng trong ngành hàng hải.

Công nghệ động cơ diesel kết hợp kinh nghiệm và kiến thức với bề dày nền tảng lý thuyết. Thành phần động cơ đã được hưởng lợi từ việc sử dụng ngày càng tăng và khả năng của FEM, tuy nhiên quá trình đốt, sự sụt giảm tính bôi trơn và sự hình thành các chất gây ô nhiễm gây khó khăn cho việc mô hình và các dự đoán từ thời điểm trước đó và sự phát triển trong các thử nghiệm và thực nghiệm. Sự phát triển thách thức các kiến thức sẵn có và việc xác định nguyên nhân của các vấn đề nảy sinh. Sự hình thành cặn tại ống lót xy lanh là một vấn đề đáng quan tâm.

Cặn tại ống lót xy lanh làm gia tăng lượng dầu tiêu hao tăng gây lãng phí và tăng lượng bồ hóng. Hơn nữa, lớp cặn ống lót xy lanh đòi hỏi việc làm sạch thường xuyên kết cấu bên trong động cơ hoặc gây ra các hư hỏng kèm theo.

Các giải pháp giúp khắc phục cặn trong ống lót xy lanh sẽ giúp tiết kiệm dầu, giảm tần suất và chi phí bảo dưỡng cũng như bảo vệ môi trường khỏi muội và các chất thải thoát ra do quá trình đốt cháy dầu bôi trơn quá mức.

Nghiên cứu sự hình thành của cặn lắng trong buồng đốt nói chung và trên bề mặt ống lót xy lanh của động cơ diesel nói riêng để tìm ra các giải pháp nhằm giảm lượng cặn buồng đốt và giảm các tác động xấu của chúng tới các thông số công tác của động cơ và tác động tới môi trường là cấp thiết.

### ii) Mục đích nghiên cứu

- Nghiên cứu và khảo sát sự hình thành cặn lắng trong buồng đốt động cơ diesel nói chung và tại ống lót xy lanh động cơ diesel thủy trung tốc nói riêng.

- Tìm ra các nguyên nhân và cơ chế hình thành cặn lắng tại ống lót xy lanh động cơ.
- Đề xuất các giải pháp kiểm soát và giảm lượng cặn lắng ống lót xy lanh.

### **iii) Phương pháp nghiên cứu**

Trong quá trình nghiên cứu, các phương pháp được sử dụng là: phương pháp thống kê, phương pháp so sánh, phương pháp phân tích tổng hợp.

### **iv) Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

- Đối tượng nghiên cứu của đề tài là động cơ diesel tàu thủy trung tốc và nhiên liệu (MDO, FO), dầu bôi trơn sử dụng trên động cơ diesel tàu thủy;
- Phạm vi nghiên cứu của đề tài là cặn lắng trên ống lót xy lanh;

### **v) Ý nghĩa của đề tài**

- Phục vụ công tác giảng dạy học phần động cơ diesel tàu thủy tại Trường đại học Hàng hải Việt Nam.
- Làm tài liệu tham khảo cho sinh viên, học viên và các cá nhân nghiên cứu về động cơ diesel tàu thủy nói chung và cặn lắng trong buồng đốt động cơ nói riêng.

## **1. TỔNG QUAN VỀ CẶN LẮNG TRONG BUỒNG ĐỐT ĐỘNG CƠ DIESEL.**

Các nghiên cứu về cặn trong động cơ đã được tiến hành cách đây từ 40 năm trước. Các nghiên cứu này được tiến hành nhằm tìm hiểu các tác động của cặn lắng đến động cơ và cách thức phát triển cặn lắng trong động cơ. Cặn trong buồng đốt được chứng minh là có thể hình thành qua ba giai đoạn khác nhau: (1) sự ngưng tụ của các khí cháy không hết trên vách buồng đốt; (2) sự tác động của những giọt nhiên liệu chưa cháy; (3) dòng chảy nhiên liệu (tại xupap nạp, đầu vòi phun và lỗ phun).

Hiện tại, có ba hướng nghiên cứu chính về cặn được các nhà nghiên cứu thực hiện, bao gồm: (1) ảnh hưởng của cặn lên động cơ; (2) các yếu tố hình thành cặn; (3) đặc tính của cặn. Những ảnh hưởng của cặn trên động cơ bao gồm phát thải, mất nhiệt, hiệu suất động cơ và các mối nguy hiểm cho động cơ. Tuy nhiên, các yếu tố ảnh hưởng hình thành cặn, như loại nhiên liệu, điều kiện vận hành động cơ, nhiệt độ thành vách buồng đốt và tỉ lệ không khí/nhiên liệu vẫn đang được nghiên cứu trên nhiều loại động cơ khác nhau. Đặc tính của cặn cũng đã được nghiên cứu để tìm hiểu thêm về tính chất nhiệt và cấu trúc của nó. Độ xốp của cặn có liên quan chặt chẽ đến lượng khí thải và mất nhiệt. Hơn nữa, cấu trúc cặn và các thành phần xác định mài mòn và phá hủy động cơ.

Hầu hết các nghiên cứu hiện nay về cặn được thực hiện bằng cách sử dụng các kiểm tra trên động cơ thực. Thử nghiệm động cơ thực có thể được thực hiện theo hai cách: thử nghiệm trên bộ thử và thử nghiệm trên phương tiện. Cả hai cách đều đòi hỏi thời gian dài và khoảng cách di chuyển xa. Một số nghiên cứu thực nghiệm về cặn trên bộ thử động cơ yêu cầu phải có khoảng 200 giờ hoạt động [1, 2]. Trong các nghiên cứu khác, chẳng hạn Hutchings [3] tiến hành nghiên cứu việc kiểm soát cặn trên động cơ mới có lượng phát thải nhỏ trong thời gian 360 giờ hoạt động. Khi nghiên cứu thực nghiệm trên phương tiện cơ giới, để có một lượng cặn đáng kể và có thể xem xét những yếu tố ảnh hưởng thì



cần quãng đường di chuyển đủ dài. Tarkowski [4] đã thực hiện nghiên cứu xác định ảnh hưởng của các loại nhiên liệu đến thành phần cặn trong buồng đốt động cơ diesel với quãng đường di chuyển 70000 km. Như vậy, có thể thấy rằng thời gian dài và số km di chuyển nhiều khiến chi phí trong cả hai loại thử nghiệm trên rất cao và gây thiệt hại động cơ trong quá trình thử nghiệm cặn lắng đọng.

Sự hình thành cặn trong động cơ phụ thuộc vào sự kết hợp của các thông số khác nhau, chẳng hạn như nhiên liệu, vật liệu bề mặt, nhiệt độ, áp suất, môi trường buồng đốt. Tuy nhiên, nhiệt độ vách là một trong những thông số quan trọng nhất ảnh hưởng sự hình thành cặn đó. Jonkers [5] đề cập đến sự ảnh hưởng của các thông số vận hành khác nhau trong việc tạo cặn như tải động cơ, công suất, nhiệt độ bề mặt, nhiệt độ nước làm mát và thời gian phun. Không có kết luận cụ thể được đưa ra đối với từng loại tham số trong việc giải thích sự hình thành cặn. Đối với mỗi tham số, cặn có thể tăng hoặc giảm tùy thuộc vào sự tương tác giữa các thông số khác, vị trí tương tác cũng có thể khác nhau với nhiều loại động cơ khác nhau. Do nhiều yếu tố và các thông số có thể tạo cặn trong động cơ, tạo cặn là một quá trình rất phức tạp. Vì thế, việc chỉ ra cơ chế chi tiết liên quan tới việc cặn lắng đọng như thế nào là rất cần thiết và có ý nghĩa.

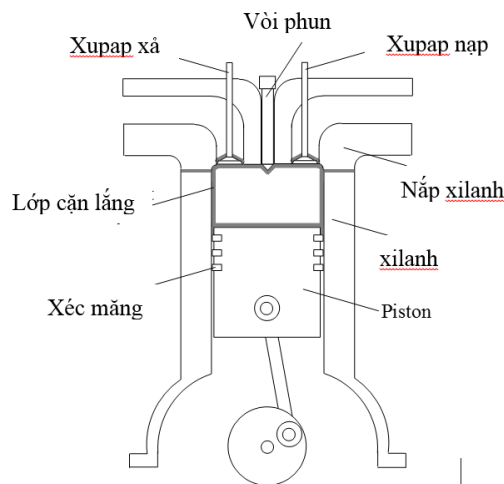
Để hiểu được cơ chế hình thành cặn và để tìm ra giải pháp hiệu quả hơn để giảm cặn, cả hai công cụ thực nghiệm và nghiên cứu lý thuyết là cần thiết. Một số nghiên cứu đã được thực hiện trên sự bay hơi của nhiên liệu, đặc biệt là nhiên liệu thuần khiết hay nhiên liệu nhiều thành phần [6, 7] có thể bổ sung kiến thức cơ bản trong quá trình nghiên cứu việc hình thành cặn.

Trên thực tế, trong thảo luận về cặn, có ít các khía cạnh liên quan như quá trình bay hơi, quá trình làm nóng, tạo cặn và phản ứng hóa học (phân hủy nhiệt, trùng hợp, quá trình oxy hóa, vv) được đề cập đến. Trong số những khía cạnh này, tỷ lệ bay hơi được thảo luận rộng rãi trong các tài liệu về lý thuyết, mô hình và kết quả thực nghiệm [8-12].

## **1.1. Cặn lắng động cơ**

Cặn lắng (deposit) hay cặn lắng carbon thường được định nghĩa là một hỗn hợp không đồng nhất gồm tro, bồ hóng và các chất hữu cơ dạng keo [13]. Nó cũng có thể bao gồm cả các tạp chất hoặc cặn tích tụ trên các chi tiết chính của động cơ như nắp xi lanh, piston, các xupap nạp-thải, đầu vòi phun (hình 1.1) [14].

Cặn lắng trên các chi tiết khác nhau của động cơ gây tác động đáng kể đến hiệu suất động cơ, suất tiêu hao nhiên liệu, khởi động nguội, kích nổ, và lượng khí thải thông qua các vấn đề khác nhau như hạ thấp tỷ lệ không khí/nhiên liệu, hạn chế lưu lượng không khí, tăng tỉ số nén, thay đổi mô hình phun, kích nổ, làm giảm tính dẫn nhiệt, và giảm hoạt tính của chất xúc tác [15]. Ngoài ra, việc mảng cặn trong buồng đốt kẹt vào nắm xupap xả đã được ghi nhận bởi Kalghatgi [16]. Các mảnh cặn gây khó khăn trong việc khởi động và kích nổ, gia tăng phát thải hydrocarbon và chạy thô (rough running) [17, 18], cuối cùng sẽ gây ra một sự thiếu hụt trong quá trình nén trong xi lanh.



*Hình 1.1. Cặn lắng trên các bộ phận khác nhau của buồng đốt.*

Xét về hư hại động cơ, cặn bám bản trên các chi tiết trong động cơ, đặc biệt là trên đỉnh piston và xi lanh như đã đề cập bởi Muzikus và cộng sự [19] và Artemiev [20]. Cặn bám vào piston có thể gây ra kẹt xéc măng và mài mòn, gây cản trở hoạt động bình thường của động cơ [21]. Eilts [22] cho rằng cặn sinh ra trong động cơ gây hư hại nghiêm trọng cho các động cơ diesel phun trực tiếp khi làm việc ở chế độ tải thấp trong thời gian dài. Trong động cơ hiện đại, cặn trong động cơ làm tăng lượng HC chưa cháy do sự hút bám và sự giải hấp của HC

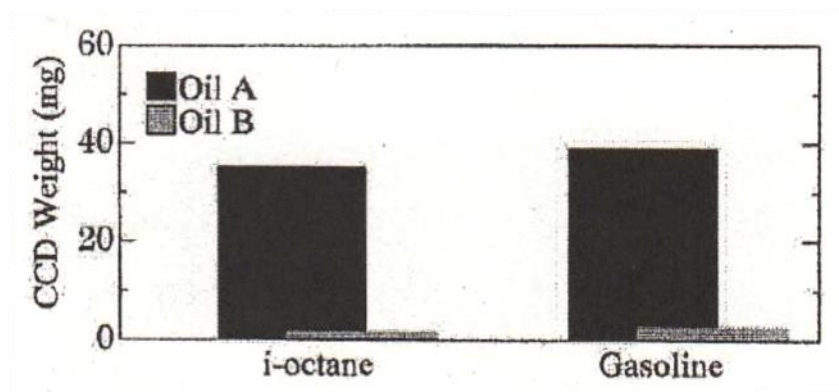
bằng cặn. Lượng khí thải  $\text{NO}_x$  cũng tăng do các tác dụng cách nhiệt và giữ nhiệt của cặn, làm tăng nhiệt độ khí trong buồng đốt. Ngày nay, trong các hệ thống động cơ hiện đại như hệ thống phun nhiên liệu thì ảnh hưởng của cặn lắng đến đặc tính làm việc của hệ thống càng rõ nét. Chỉ cần một lượng nhỏ cặn lắng cũng có thể ảnh hưởng xấu tới tính năng làm việc của động cơ.

## **1.2. Nguồn gốc của cặn lắng**

Nói chung, yếu tố đóng góp nhiều nhất trong việc tạo cặn trong buồng đốt là nhiên liệu, dầu bôi trơn hoặc từ sự kết hợp của cả hai. Tuy nhiên, lượng nhiên liệu và dầu bôi trơn trong cặn lắng phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau như loại động cơ và vị trí các chi tiết trong buồng đốt. Theo Lepperhoff và cộng sự [23], vị trí cặn tại các khu vực nhiệt độ cao của động cơ chủ yếu là quặng khoáng còn lại từ quá trình bay hơi hoặc đốt nhiên liệu hoặc dầu bôi trơn.

Các nghiên cứu khác nhau cho kết quả rất khác nhau về lượng nhiên liệu và dầu bôi trơn trong cặn. Một số nghiên cứu cho biết dầu bôi trơn là nguyên nhân chính của cặn buồng đốt (CCD) [24-26]. Sự có mặt của các thành phần dầu bôi trơn và các yếu tố như dư lượng tro, lượng dư vật liệu vô cơ và hydrocarbon có điểm sôi cao tìm thấy trong các nghiên cứu đã chứng minh sự đóng góp của dầu bôi trơn trong quá trình tạo cặn.

Fukui và cộng sự [26] nghiên cứu sự ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu bôi trơn vào trọng lượng CCD trong động cơ một xi lanh, hai thì cháy cưỡng bức chạy bằng xăng và iso-octan, dầu A và B làm dầu bôi trơn. Các kết quả trong hình 1.2 cho thấy ảnh hưởng của dầu bôi trơn vào sự tích lũy CCD trong các động cơ lớn hơn so với các hydrocarbon không bão hòa có trong nhiên liệu.



Hình 1.2. Ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu nhớt đối với sự hình thành CCD [26].

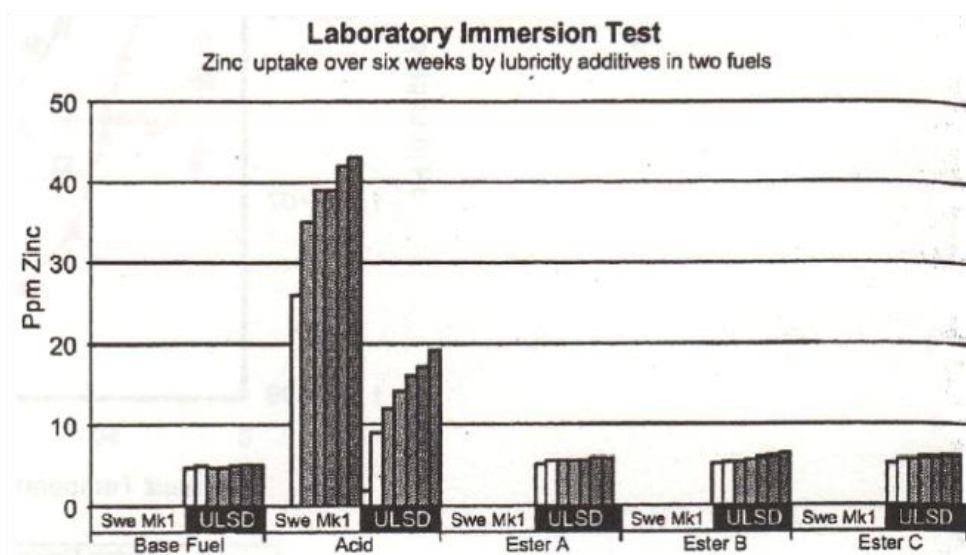
Trong một công trình khác, Diaby và cộng sự [27] đã nghiên cứu cặn ở rãnh xéc măng đầu tiên của một động cơ diesel bốn xi lanh. Khi phân tích thành phần hóa học của chúng, các tác giả thấy rằng không có yếu tố nào liên quan đến thành phần nhiên liệu. Nghiên cứu đã kết luận lượng cặn trên rãnh xéc măng đầu tiên của động cơ diesel chủ yếu là carbon và hình thành do sự phân hủy của dầu bôi trơn với sự có mặt của các nguyên tố kim loại được tìm thấy. Trong một nghiên cứu khác [28], các muội than được tạo ra từ việc đốt khuếch tán nhiên liệu diesel chiếm 20% của cặn, số còn lại là thành phần có nguồn gốc từ dầu bôi trơn.

Trong một số loại động cơ diesel, động cơ được bôi trơn bằng dầu diesel, vì thế không có ion kim loại trong cặn [24]. Nhiên liệu diesel ngày nay có chứa nhiều thành phần có tính axit như axit béo, với mức độ chưa bão hòa khác nhau thường được sử dụng làm phụ gia bôi trơn trong nhiên liệu diesel. Axit sẵn sàng phản ứng với các tạp chất kim loại trong nhiên liệu để tạo thành muối kim loại (xà phòng). Theo Ullmann và cộng sự [24], các loại muối kim loại gắn liền với sự hình thành cặn trong đầu vòi phun/lỗ phun.

Trong khi đó, Ra và cộng sự [29] lại tập trung vào nghiên cứu sự hình thành bồ hóng và lắng đọng cặn trên thành xi lanh trong quá trình phun nhiên liệu (đỉnh piston và bề mặt đỉnh, mặt quy-lát và phần lót xi lanh tiếp xúc với khí đốt). Các tác động của dòng chảy trên kẽ hở trên xéc măng và sự bay hơi của dầu bôi trơn trong động cơ diesel được khảo sát thông qua các mô hình quá trình đốt, sự hình thành bồ hóng, quá trình tạo cặn và các mô hình dầu bay hơi. Kết quả nghiên cứu cho biết, với một lượng đáng kể bồ hóng lắng đọng trong các kẽ hở của xéc-

mãng piston, có thể kết luận rằng nhiên liệu hydrocarbon trong kẽ hở đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành cặn trên bề mặt piston/kẽ hở.

Về ảnh hưởng của nhiên liệu lên cặn trên vòi phun, Leedham và cộng sự [30] cho rằng một lượng nhỏ các kim loại có liên quan đến cơ chế hình thành cặn. Kết quả thử nghiệm động cơ trong nghiên cứu này cho thấy nhiên liệu cơ sở không có ý nghĩa quyết định đến việc hình thành cặn. Tuy nhiên, khi có một lượng nhỏ kẽm, cặn đã được tạo ra đáng kể. Các chất phụ gia bôi trơn có thể đóng một vai trò trong sự hấp thu kẽm vào nhiên liệu. Các chất phụ gia dạng ester không ảnh hưởng đến nồng độ kẽm của nhiên liệu, trong khi các chất phụ gia bôi trơn dạng axit có ảnh hưởng đến sự hấp thu kẽm (hình 1.3). Đồng thời, chì (Pb) và kẽm (Zn) là các kim loại dễ bị hấp thu vào nhiên liệu, trong khi các kim loại khác hầu như không phát hiện được.



Hình 1.3. Lượng kẽm hấp thụ bởi phụ gia dầu bôi trơn [30].

Hơn nữa, trong vấn đề về sự tham gia của nhiên liệu để hình thành cặn, Ebert [31] cho rằng nhiên liệu cháy không hết, kết hợp với dầu cacte, bị oxy hóa và cô đọng, hình thành sơn và bùn. Một nghiên cứu của Cloud và cộng sự [32] cho rằng lưu huỳnh được chuyển thành lưu huỳnh triôxít lần lượt thâm nhập vào dầu bôi trơn và sau đó tạo bùn và cuối cùng sản sinh cặn loại sơn (varnish). Như vậy, từ những chứng cứ này, có rất nhiều yếu tố liên quan đến nhiên liệu và chất bôi trơn đóng góp phần lớn trong cặn ở buồng đốt.

### **1.3. Đặc tính của cặn**

#### **1.3.1. Cấu trúc của cặn**

Cấu trúc của cặn nhạy cảm với nhiều thông số, bao gồm thành phần cơ bản của nhiên liệu, nhiệt độ làm việc của động cơ, và sự có mặt của các chất phụ gia nhiên liệu [33]. Đặc tính của cặn đóng góp vào các hiệu ứng khác nhau trong buồng đốt như thay đổi truyền nhiệt và nguồn HC. Cấu trúc xốp của cặn kích hoạt các cơ chế lưu trữ nhiên liệu và đóng vai trò quan trọng về mức độ phát thải HC [15]. Hơn nữa, khối lượng cặn đã được tìm thấy tương quan tốt với khí thải HC như đã đề cập trong lý thuyết của Eilts [22].

##### ***a. Ảnh hưởng tới nhiệt độ thành buồng đốt***

Tùy theo nhiệt độ tại vị trí hình thành, cặn sẽ có cấu trúc khác nhau. Nagao và cộng sự [35] cho rằng chất lượng của cặn thay đổi theo nhiệt độ thành. Nếu nhiệt độ của vách cao ( $> 550^{\circ}\text{C}$ ), cặn hình thành rất mỏng, mềm, khô và dễ dôi nên được loại bỏ do lực đẩy của dòng khí thể tồn tại trong buồng đốt. Về chất lượng, cặn chủ yếu là carbon. Ở nhiệt độ thấp ( $< 200^{\circ}\text{C}$ ), cặn bám chặt vào thành buồng đốt và được làm ẩm do nhiên liệu. Cặn bao gồm nhiên liệu, chất kết dính và carbon.

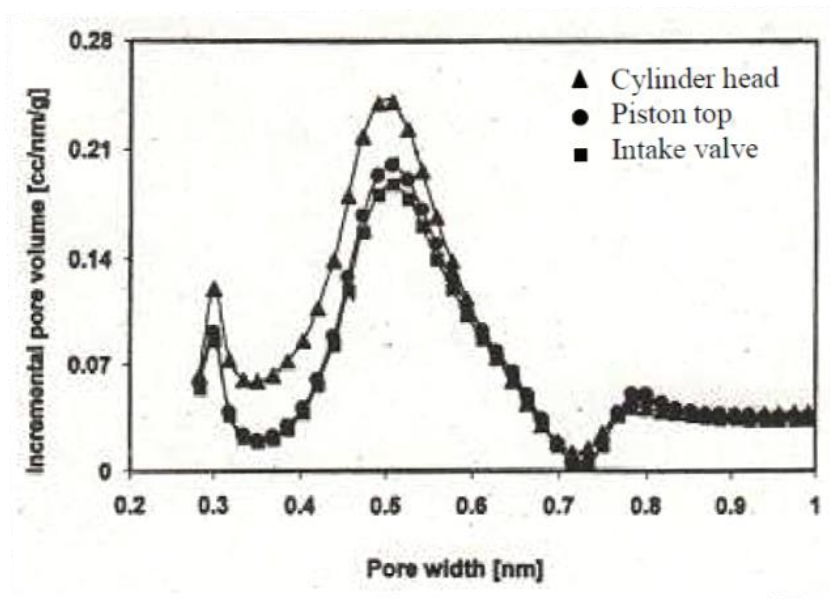
Tương tự, Lepperhoff và cộng sự [23] cũng nhất trí với những kết luận trên đây, nhưng khoảng nhiệt cao có khác. Ở nhiệt độ cao ( $> 300^{\circ}\text{C}$ ), lượng cặn nhỏ có màu sắc khó có thể nhìn thấy và tạo ra một lớp mỏng cặn rất đặc trưng. Tuy nhiên, ở mức nhiệt độ thấp ( $< 200^{\circ}\text{C}$ ), vật liệu tối bao gồm carbon màu đen, hydrocarbons ướt và bồ hóng dễ nhận thấy.

##### ***b. Vị trí cặn***

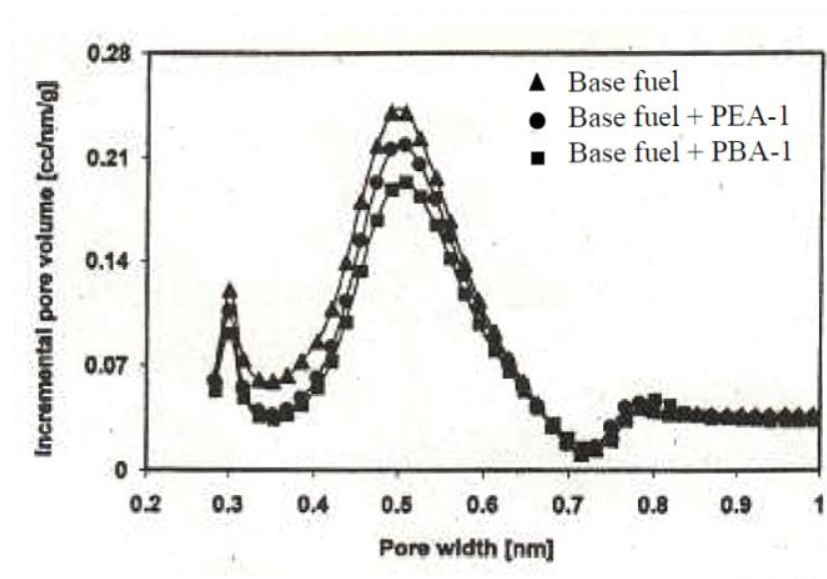
Zerda và cộng sự [34] đã chứng minh rằng hình thái của các loại cặn khác nhau thay đổi theo vị trí của nó trong buồng đốt. Diện tích bề mặt và tổng số lỗ (pore) phụ thuộc vào vị trí cặn, sự loại bỏ cặn khỏi mặt quy-lát, đỉnh piston, hoặc các xupap nạp (hình 1.4). Cấu trúc của cặn tại nắp xi lanh buồng đốt xốp hơn so với cặn ở đỉnh piston. Tương tự như vậy, cặn ở xupap nạp được xem là ít xốp hơn so



với vị trí cận trong buồng đốt. Kích thước của lỗ xốp ở nắp xi lanh là lớn nhất, tiếp theo là đỉnh piston và xupap nạp.



Hình 1.4. Sự phân bố kích thước lỗ xốp của cận tạo bởi nhiên liệu không phụ gia trên các chi tiết khác nhau của động cơ [34].



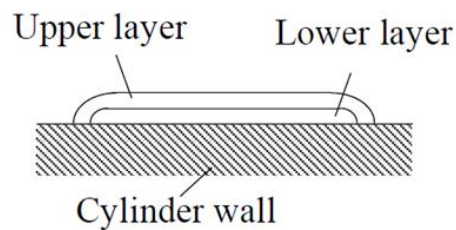
Hình 1.5. So sánh kích thước của lỗ cận tạo thành từ nhiên liệu có phụ gia khác nhau với cùng nồng độ [34].

Các tác giả cũng đã khảo sát sự ảnh hưởng của các chất phụ gia tới cấu trúc cận (hình 1.5), trong đó nồng độ chất phụ gia PEA-1 (polyether amin-based) và PBA-1 (polybutane amin-based) là bằng nhau. Kết quả nghiên cứu cho biết khi tăng nồng độ của các chất phụ gia dẫn tới giảm diện tích bề mặt, do đó làm

lượng cặn cũng tăng nhẹ. Điều này có thể được giải thích rằng chất phụ gia hoặc các thành phần của nó lấp đầy và chặn các lỗ cặn.

### *c. Cấu trúc cặn ở các lớp khác nhau*

Hai hình thái CCD khác nhau đã được xác định trong một nghiên cứu trước đó khi cặn ở nhiệt độ cao hơn [25, 36] như trong hình 1.6.



*Hình 1.6. Lớp cặn [36]*

Lớp đầu tiên là lớp thấp hơn, gần hơn với các bề mặt kim loại, trong đó có ngưng tụ của các hợp chất rất dễ bay hơi từ nhiên liệu và dầu. Cặn trong lớp này có cấu trúc giống sơn mài và rất khó để loại bỏ. Lớp này cũng có một phần chất béo cao hơn so với các lớp tiếp theo, có cấu trúc giống như than. Cặn trong lớp này là đồng nhất hơn và duy trì sự gắn kết giữa chúng.

Lớp thứ hai là các lớp trên với sự kết hợp của các phân tử có khuynh hướng liên kết lỏng lẻo và dễ loại bỏ hơn. Lớp này mang tính chất của cacbon và có cấu trúc hóa học giống như bồ hóng. Trong lớp này, có chứa các chất thơm tương tự như bồ hóng. Trong lớp cặn này, cặn tồn tại dưới các dạng cấu trúc lỏng lẻo hơn và được phủ bởi một lớp chất lỏng nhớt hay polymer.

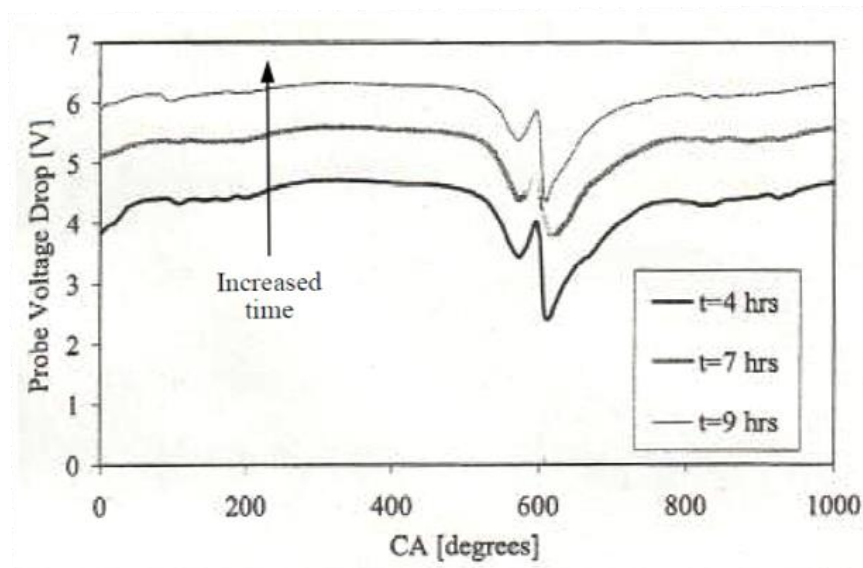
### **1.4. Tính chất của cặn lắng**

Độ xốp của cặn lắng buồng đốt có thể quyết định tính dẫn nhiệt, dẫn điện và nhiệt dung dẫn đến sự cách nhiệt của các phần kim loại và lưu trữ nhiệt.

Jonkers và cộng sự [25] đã sử dụng một cảm biến đo độ dẫn nhiệt của cặn được cài đặt nắp xi lanh động cơ diesel DI để khảo sát độ dẫn điện của cặn lắng trên động cơ thực. Nghiên cứu cho biết, trong quá trình hình thành cặn lắng, độ dẫn điện của cặn giảm thể hiện qua sự sụt giảm điện áp ở bộ cảm biến (hình 1.7). Điều này có thể giải thích bởi sự gia tăng nồng độ của nhóm béo và giảm



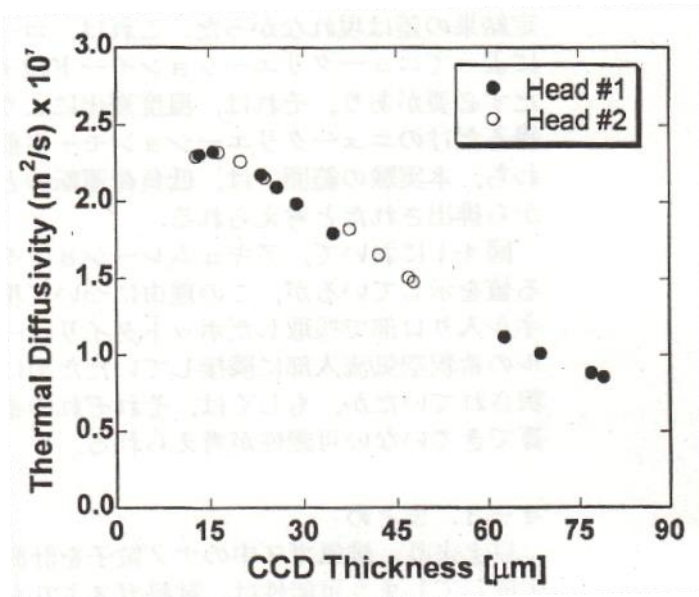
polyaromatics trong carbon đen mà dẫn đến sự suy giảm khả năng dẫn điện của cặn.



Hình 1.7. Độ dẫn điện giảm do cặn tích tụ [25]

Kết quả về khả năng dẫn nhiệt thu được từ Guralp và cộng sự [14] trên hình 1.8 thể hiện mối quan hệ giữa quãng nhiệt cao nhất tại các điểm và độ dày của cặn trong buồng cháy. Các tác giả cho rằng có sự tương quan mạnh mẽ giữa độ dày của cặn và khả năng khuếch tán của lớp cặn trong buồng đốt tại hai vị trí đầu phun của động cơ HCCI (homogenous charge compression ignition). Lớp vật liệu càng dày thì tính dẫn nhiệt càng kém vì khi cặn hình thành thì hình thái của nó cũng liên tục thay đổi. Độ rỗng, tính thống nhất và thành phần các loại phân tử HC tạo thành các lớp khác nhau và các lớp đó liên tục thay đổi.

Nishiwaki và cộng sự [37] lại xác định độ dẫn nhiệt và khuếch tán của cặn trong động cơ cháy cưỡng bức và động cơ nén cháy dựa trên một chiều dẫn không ổn định trên một vật chất có tính nhiệt không đổi. Đối với cả hai loại động cơ, tính dẫn nhiệt chịu ảnh hưởng bởi tải trọng. Ngoài ra, đối với các động cơ cháy cưỡng bức, các thuộc tính bị ảnh hưởng bởi tỷ lệ tương đương (equivalence ratio) và tốc độ động cơ. Xét về khả năng dẫn nhiệt, cặn trong động cơ cháy cưỡng bức cũng phụ thuộc vào tỷ lệ tương đương, tải và tốc độ động cơ. Ngược lại, đối với động cơ nén cháy, nghiên cứu không đưa ra yếu tố nào được xác định là có ảnh hưởng đến tính dẫn nhiệt.



Hình 1.8. Độ dày của CCD tại các điểm tại đầu xi lanh ứng với độ dẫn nhiệt

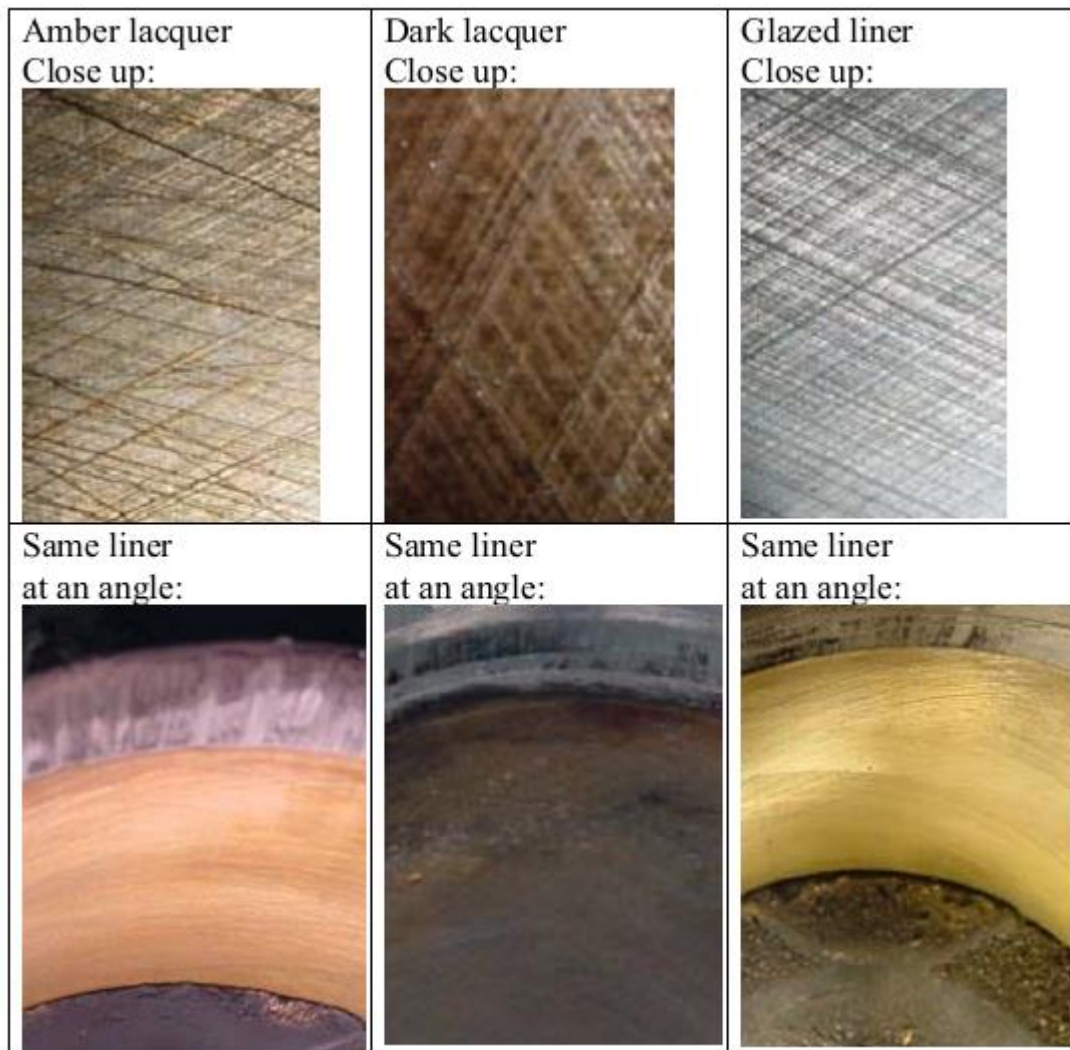
[14]

## 2. CẶN LẮNG TRÊN ÔNG LÓT XI LANH ĐỘNG CƠ DIESEL TÀU THỦY

### 2.1. Cặn lắng trên ống lót xi lanh

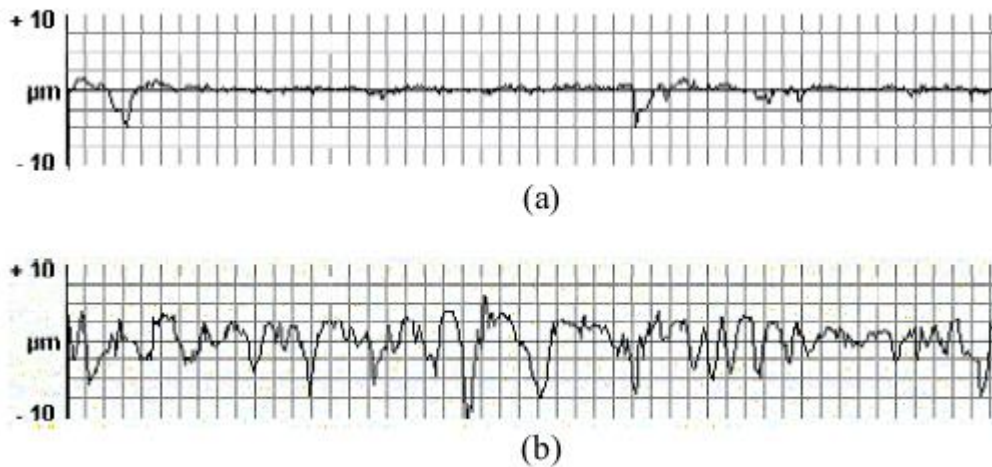
Tùy từng trường hợp mà cặn trên ống lót xuất hiện với màu sắc và các đặc điểm nhận dạng khác nhau. Theo các nghiên cứu và khảo sát trên các động cơ tàu thủy, cặn trên ống lót được định nghĩa là "lacquer" tức cặn có màu hồ phách và vàng nâu, trong khi thuật ngữ "bore glazing" được sử dụng để mô tả các cặn "vô hình". Việc phân loại các loại cặn như trên cũng được sử dụng trong nghiên cứu này. Tuy nhiên, cặn lacquer và cặn glaze được sử dụng trong các trường hợp nghiên cứu cụ thể khác nhau để mô tả các loại cặn khác nhau.

Cặn cũng có thể khiến ống lót đổi màu hoàn toàn, nhưng nghiên cứu kỹ hơn ta sẽ thấy lượng cặn phân bố khác nhau ở tất cả các trường hợp khảo sát. Cặn thường có màu sẫm hơn ở 1 góc độ, có lẽ bởi vì ánh sáng phản chiếu từ các rãnh liền kề. Một số hình ảnh mẫu được cung cấp trong hình 2.1.



*Hình 2.1. Các loại cặn ống lót khác nhau*

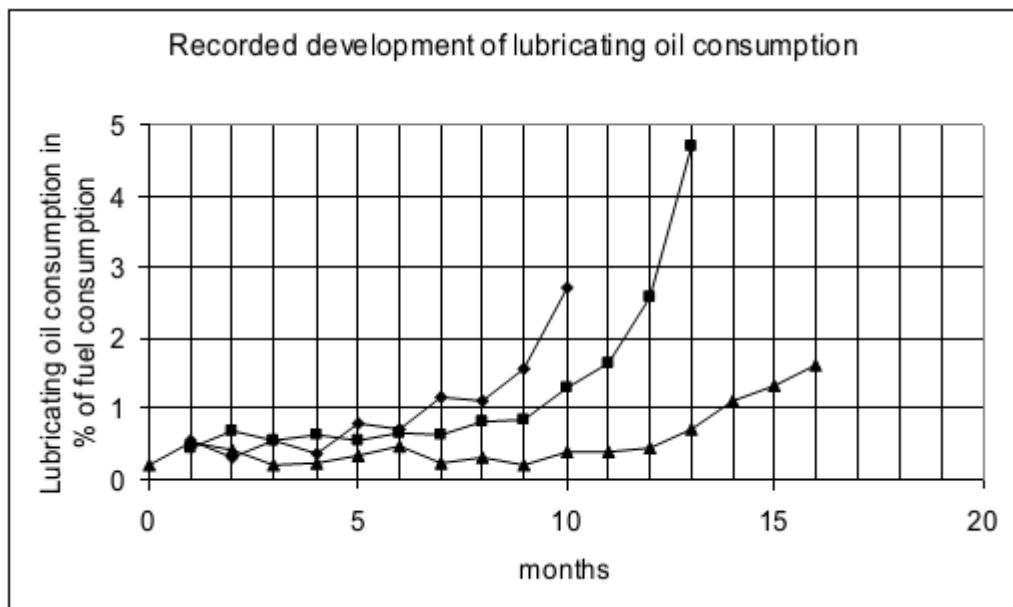
Ống lót xi lanh có một bề mặt gương xi lanh được gia công với độ bóng và chính xác rất cao, trong khi đó nó thường xuyên tiếp xúc trực tiếp với các xéc măng với các rãnh nhằm giữ lại dầu trong ống lót. Các rãnh được gia công theo hai hướng trong theo mô hình rãnh chéo song song (crosshatch). Cặn ống lót tích lũy trong các rãnh, qua đó ngăn cản việc bôi trơn cặp piston xi lanh. Do đó, nhiều dầu bôi trơn trộn lẫn với khí thể công tác bị đẩy ra qua ống xả. Dầu vết trên bề mặt cho thấy bề mặt cặn trước và sau khi làm sạch bằng axit acetic được thể hiện trong hình 2.2.



Hình 2.2. Dấu vết trên bề mặt của bề mặt ống lót điển hình. (a) với cặn (b) không cặn.

Lượng cặn khác nhau theo từng trường hợp. Bản ghi chép lượng tiêu hao dầu của 3 tàu được thể hiện trong hình 2.3. Việc tiêu hao dầu được thể hiện như một tỷ lệ phần trăm của mức tiêu hao nhiên liệu nhằm giảm tác động của động cơ hoạt động. Việc đo lượng tiêu hao dầu kém chính xác cũng như sự khác nhau trong các lần ghi chép nên rất khó để xác định việc tạo cặn bắt đầu từ lúc nào.

Sự gia tăng phi tuyến lượng tiêu hao dầu trong đó phát triển dần dần trong một khoảng thời gian dài là dấu hiệu cho thấy có tồn tại cặn. Lượng dầu tiêu hao lớn có thể dẫn tới hình thành cặn tại các điểm khác do quá trình đốt cháy không hoàn toàn của dầu bôi trơn, đặc biệt là trên đỉnh piston.



Hình 2.3. Lượng tiêu thụ dầu bôi trơn trong động cơ với cặn ống lót

## **2.2. Lịch sử nghiên cứu và khảo sát cặn lắng trên ống lót xi lanh.**

Cặn lacquer ở ống lót không được ghi chép một cách có hệ thống. Vấn đề liên quan đến việc ống lót đổi màu được báo cáo ít nhất từ hai nhà sản xuất động cơ kể từ giữa những năm bảy mươi, nhưng các báo cáo của CEC [38] cho thấy một sự gia tăng đáng kể tần số vấn đề này trong các thập niên tám mươi. Một khảo sát viên người Hà Lan [39] đã báo cáo rằng "sự ngả màu vàng trên bề mặt ống lót xy lanh (cặn lacquering và bore polishing) theo kinh nghiệm của ông là nghiêm trọng nhất từ 1985-1992 lúc mà các vấn đề khác còn nghiêm trọng hơn. Một cuộc khảo sát được tiến hành bởi CEC chỉ ra rằng vấn đề được báo cáo từ những khu vực khác nhau trên thế giới, và các quan sát viên tìm thấy cặn ống lót trên động cơ của các tàu hoạt động ở châu Âu, châu Á và Mỹ cho thấy rằng hiện tượng này đã trở thành một vấn đề khá phổ biến trong động cơ tàu thủy. Một nhà sản xuất động cơ cho rằng hiện tượng xảy ra giữa những năm chín mươi gần như là hiện tượng toàn cầu, trong khi ống lót ngả màu được đề cập là một vấn đề khá nghiêm trọng trong các hội nghị về Hàng hải ở châu Âu, trong đánh giá đăng tại Tạp chí hàng hải Nhật Bản năm 1998 đã đề cập tới nó như một hiện tượng phổ biến trên động cơ tàu thủy. Ngoài ra các nghiên cứu khác [40] cho thấy rằng cặn bore glaze xuất hiện trên các động cơ diesel máy kéo, xe tải cũng như động cơ thủy.

## **2.3. Các yếu tố ảnh hưởng tới sự hình thành cặn trên ống lót xi lanh**

### **2.3.1 Ảnh hưởng của loại động cơ và thiết kế tới sự hình thành cặn**

Vấn đề hình thành cặn trên ống lót xi lanh xảy ra nhiều nhất ở động cơ trung tốc bốn kỳ. Vấn đề này được phát hiện ở nhiều loại động cơ của nhiều nhà sản xuất khác nhau. Một số yếu tố tổng hợp và xem như dấu hiệu làm gia tăng cặn ống lót trong động cơ, như là: [38] [41]

- Động cơ được thiết kế với áp suất có ích trung bình cao (> 20 bar);
- Động cơ được thiết kế để suất tiêu hao dầu bôi trơn và nhiên liệu thấp;
- Áp suất phun nhiên liệu cao hơn;
- Giảm nhiệt độ ống lót xi lanh;
- Thay đổi độ nhám của mặt gương xi lanh;
- Các thiết kế xéc măng ;
- Buồng đốt phẳng

Nhiệt độ ống lót thấp được xác định là vấn đề trong các thử nghiệm ở quy mô đầy đủ, nơi góc phun nhiên liệu đã được nâng lên đến mức sự đốt cháy nhiên liệu tác động lên vách xi lanh khiến cặn ống lót tăng. [42]

Một nhà sản xuất tuyên bố rằng việc sử dụng các xéc măng khí có thể làm giảm cặn lacquer ở ống lót. Cặn trong ống lót cũng xuất hiện trong động cơ 2 kỳ. Một

nghiên cứu trường hợp về cặn trên ống lót xi lanh đã được trình bày trong nghiên cứu [43].

### **2.3.2. Ảnh hưởng của nhiên liệu đối với cặn ống lót**

Cặn ống lót thường được hình thành trong các động cơ sử dụng nhiên liệu với nồng độ lưu huỳnh thấp. Dù nồng độ chính xác chưa được xác định nhưng vấn đề này xuất hiện khi nồng độ lưu huỳnh nhỏ hơn 0,5% trọng lượng. Ngày nay, hàm lượng lưu huỳnh trong nhiên liệu nhỏ hơn 0,2% được quy định trong các điều luật của khu vực Biển Bắc, do đó tất cả các nhiên liệu được sử dụng trong vận tải hàng hải có thể được coi là "nhiên liệu có nồng độ lưu huỳnh thấp". Nó đôi khi được mặc nhiên công nhận rằng tác động của lưu huỳnh trong nhiên liệu là để ngăn ngừa tích tụ cặn trong một cơ chế loại trừ liên tục.

Cặn ống lót lacquer được tìm thấy trong quá trình cháy ở động cơ trung tốc sử dụng dầu diesel, và bore glaze trong động cơ xăng. Tuy nhiên, Allen [41], cũng như trong các nghiên cứu ứng dụng [44] và khảo sát [45], cho rằng việc hình thành cặn ống lót có liên quan đến nhiệt độ sôi cao và thành phần hydrocarbon thơm trong nhiên liệu. Tuy nhiên, một báo cáo từ năm 1993 [38] nói rằng "ta chưa thể xác định được việc sử dụng dầu diesel được gia nhiệt có ảnh hưởng đến vấn đề cặn ống lót lacquer hay không. Không có bất cứ số liệu nào về hydrocarbon thơm có liên quan đến hỗn hợp nhiên liệu". Các nghiên cứu và khảo sát mới hơn sau này cũng không được chứng minh bằng các dữ liệu đã thu thập.

Ảnh hưởng của nguyên liệu pha trộn được nghiên cứu một cách đầy đủ trong [42]. Trong đó, những loại nhiên liệu khác nhau có sự phân bố cặn khác nhau giữa ống lót xi lanh và piston, và nhiên liệu có ảnh hưởng đáng kể đến việc hình thành lớp cặn lacquer, mặc dù sự khác biệt giữa các nhiên liệu là rất nhỏ. Theo một nghiên cứu ứng dụng [45] cho rằng cặn ống lót tổng hợp có thể tạo ra bằng cách sử dụng anthraquinon như một mô hình cho việc ngưng tụ nhiên liệu.

### **2.3.3. Ảnh hưởng của quá trình đốt cháy**

Quá trình đốt cháy nhiên liệu phụ thuộc vào sự tương tác giữa động cơ thiết kế, tải, thành phần nhiên liệu và điều kiện môi trường xung quanh động cơ. Sự hình thành cặn được giả định có liên quan đến sự ngưng tụ của các sản phẩm trong quá trình đốt cháy không đầy đủ hoặc tăng tải nhiệt từ việc đốt các màng dầu lót. Một nghiên cứu cho rằng cặn lacquer ống lót là kết quả trực tiếp của quá trình đốt cháy không hoàn toàn của các thành phần hydrocarbon cao phân tử thường có trong nhiên liệu dung trong tàu thủy[45].

### **2.3.4. Ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu bôi trơn**

Mayo và cộng sự nghiên cứu sự đóng góp của gôm xăng hòa tan trong quá trình tạo cặn cứng trên các bộ phận nóng của động cơ. Sự hình thành gôm xăng luôn diễn ra trước khi cặn được tạo thành với số lượng lớn hơn, nơi hydrocarbon



thơm là một nguyên tố quan trọng đối với sự hình thành gôm xăng. Sự hình thành của các tiền tố cặn dựa trên tính chất của hydrocacbon thơm và dung môi phân hủy nhiên liệu và gôm xăng.

Ullmann và cộng sự [24] nghiên cứu sự ảnh hưởng của phụ gia nhiên liệu diesel đối với quá trình tạo cặn. Các dữ liệu thu được trong nghiên cứu này cho thấy rằng khi phụ gia có mặt một mình, chúng không thể tạo ra bất kỳ sản phẩm phân hủy và do đó không tạo cặn. Tuy nhiên, sự kết hợp của các chất phụ gia có thể gây ra một lượng cặn nhất định. Ví dụ, sự kết hợp của các chất làm sạch trong nhiên liệu diesel và các axit béo dư thừa như là yếu tố nổi bật và có thể hình thành cặn polymer giống gôm xăng. Điều này càng trầm trọng hơn khi có axit formic.

Một số dầu bôi trơn được đánh giá là tốt hơn so với loại khác khi xét đến khả năng chống tạo cặn. Phân tích thực hiện bởi một nhà máy sản xuất động cơ cho thấy dầu SA và TBN nhiều thì khả năng hình thành cặn càng cao. Xu hướng tương tự cũng được quan sát thấy trong các thử nghiệm động cơ thực hiện bởi một công ty dầu khí [8], tuy nhiên việc giảm tốc độ xử lý phụ gia sẽ dẫn đến những vấn đề khác. Một công ty đã đề xuất phạm vi sử dụng TBN tùy thuộc vào mức độ lưu huỳnh trong nhiên liệu giúp ngăn chặn cặn ở ống lót và các vấn đề khác [12]. Các nhà sản xuất dầu bôi trơn khác không cung cấp các hướng dẫn rõ ràng như vậy. Có lẽ là do một mình TBN không phải là một chỉ số chung phù hợp để đánh giá chất lượng dầu, như đã thảo luận trong [11], do đó mối quan hệ này có thể chỉ có giá trị khi ta xét đến một số dầu bôi trơn nhất định.

Sự khác biệt về hiệu năng giữa các loại dầu cũng có thể liên quan đến sự khác biệt trong sự ổn định của quá trình oxy hóa. Điều này đã được đề cập trong báo cáo CEC [4] và trong một số quảng bá cho dầu chất lượng cao. Tuy nhiên, công nghệ chống oxy hóa chất phụ gia khác nhau bao gồm cả chất chống muội và chất phân hủy hydroperoxide được đánh giá trong các thử nghiệm động cơ đã báo cáo trong [8], nhưng không có thử nghiệm chống oxy hóa có tác động đến sự hình thành cặn trong các thử nghiệm tích lũy.

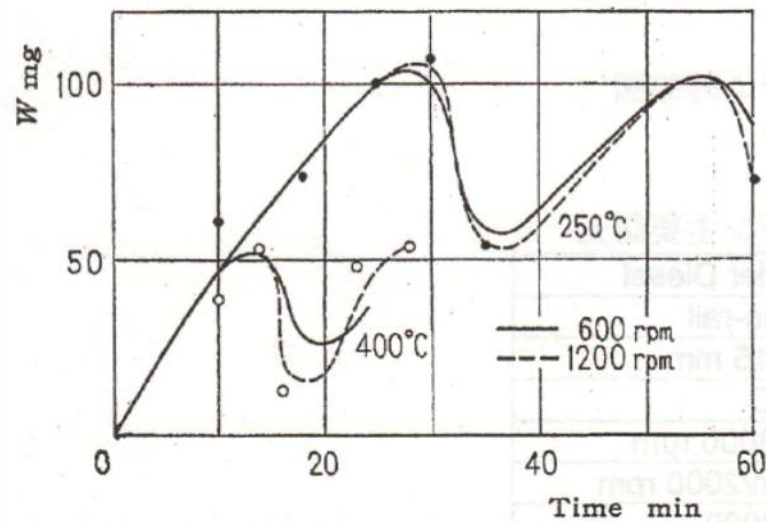
Đại diện của một nhà sản xuất động cơ có đỉnh piston hình nón sử dụng các loại dầu có TBN / SA thấp hơn phản ánh rằng họ không gặp phải vấn đề về loại cặn màu hổ phách (amber) hay cặn màu tối nhưng có thu được cặn glaze. Gần đây, một nhà sản xuất phụ gia đã tuyên bố rằng lacquer ở ống lót có thể được giảm bằng cách sử dụng các chất tẩy rửa tổng hợp [15].

### **2.3.5. Ảnh hưởng của tải trọng và điều kiện khai thác động cơ**

Cặn ống lót thường được quan sát thấy trong các động cơ vận hành với tải tuần hoàn(cyclic loading), tải trọng cao thường là 100% tải định mức hoặc quá tải. Các khảo sát động cơ thực hiện bởi một công ty sản xuất nhiên liệu chỉ ra rằng hoạt động tải cao liên tục nguy hiểm hơn tải tuần hoàn. Khi tải động cơ giảm thì

lượng dầu tiêu hao cũng giảm (và do đó cặn lacquer giảm). Một số nguồn khác cho rằng động cơ không bị tải nặng ở tốc độ thấp, vì điều này sẽ gây ra tình trạng cháy bất lợi. Nhiệt độ không khí đầu vào cũng không nên 'quá thấp'.

Nhiều nghiên cứu đã được tiến hành để khảo sát tác động của điều kiện khai thác động cơ đến sự hình thành cặn. Nagao và cộng sự [35] thấy rằng, sự tích cặn không bị ảnh hưởng khi giảm tốc độ động cơ từ 1200 rpm đến 600 rpm mặc dù số lượng nhiên liệu tăng gấp đôi trên mỗi đơn vị thời gian (hình 2.4).



Hình 2.4. Ảnh hưởng của tốc độ động cơ lên việc hình thành cặn [35]

Lepperhoff và cộng sự [23] cho rằng vấn đề hình thành cặn mới xuất hiện ở trong cả động cơ mới và động cơ đã qua sử dụng là kết quả của những thay đổi trong điều kiện hoạt động khi thay đổi kết cấu động cơ và /hoặc các quá trình cháy. Ví dụ, các vòi phun trong động cơ diesel DI có thể làm việc kém, ngay cả ở tải thấp trong khoảng cách dài. Một hệ thống nhiên liệu áp suất cao và lỗ phun hẹp dẫn đến tăng nhiệt độ tại vùng đầu phun có thể là nguyên nhân. Điều này cũng đúng với kết luận của Eilts [22], trong đó qua thay đổi hệ thống phun, chẳng hạn giảm đường kính lỗ phun và tăng áp suất phun thì không có tác dụng giảm quá trình hình thành cặn.

## 2.4. Nguồn gốc và thành phần cặn

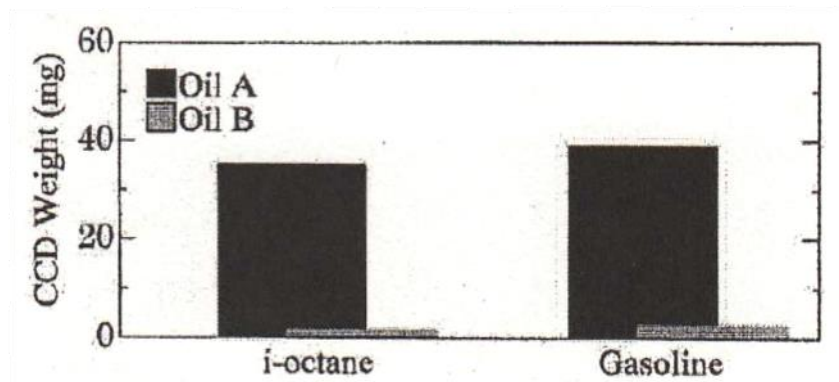
Nói chung, yếu tố đóng góp nhiều nhất trong việc tạo cặn trong buồng đốt là nhiên liệu, dầu bôi trơn hoặc từ sự kết hợp của cả hai. Tuy nhiên, lượng nhiên liệu và dầu bôi trơn trong cặn lắng phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau như loại động cơ và vị trí các chi tiết trong buồng đốt. Theo Lepperhoff và cộng sự [23], vị trí cặn tại các khu vực nhiệt độ cao của động cơ chủ yếu là quặng khoáng còn lại từ quá trình bay hơi hoặc đốt nhiên liệu hoặc dầu bôi trơn.

Các nghiên cứu khác nhau cho kết quả rất khác nhau về lượng nhiên liệu và dầu bôi trơn trong cặn. Một số nghiên cứu cho biết dầu bôi trơn là nguyên nhân chính của cặn buồng đốt (CCD) [24-26]. Sự có mặt của các thành phần dầu bôi



trơn và các yếu tố như dư lượng tro, lượng dư vật liệu vô cơ và hydrocarbon có điểm sôi cao tìm thấy trong các nghiên cứu đã chứng minh sự đóng góp của dầu bôi trơn trong quá trình tạo cặn.

Fukui và cộng sự [26] nghiên cứu sự ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu bôi trơn vào trọng lượng CCD trong động cơ một xi lanh, hai thì cháy cưỡng bức chạy bằng xăng và iso-octan, dầu A và B làm dầu bôi trơn. Các kết quả trong hình 2.5 cho thấy ảnh hưởng của dầu bôi trơn vào sự tích lũy CCD trong các động cơ lớn hơn so với các hydrocarbon không bão hòa có trong nhiên liệu.



Hình 2.5. Ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu nhớt đối với sự hình thành CCD [26].

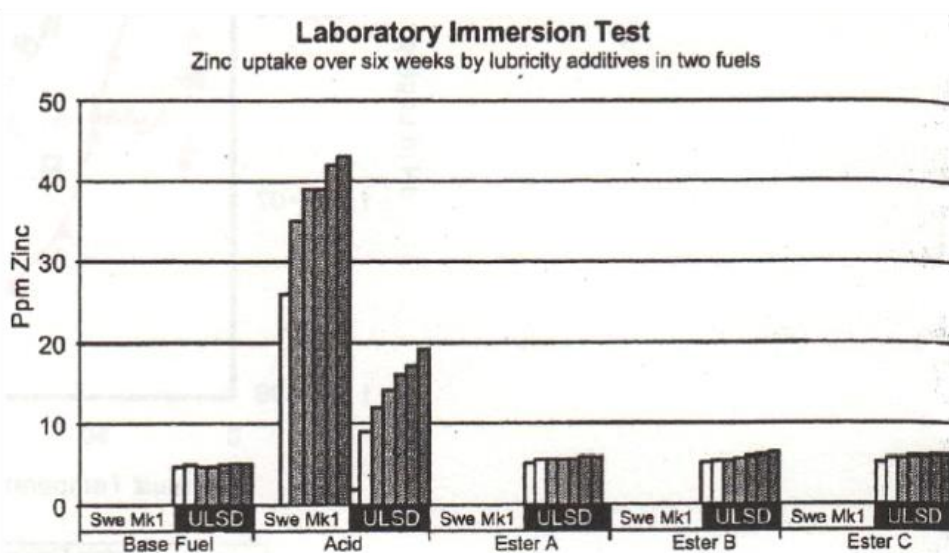
Trong một công trình khác, Diaby và cộng sự [27] đã nghiên cứu cặn ở rãnh xéc măng đầu tiên của một động cơ diesel bốn xi lanh. Khi phân tích thành phần hóa học của chúng, các tác giả thấy rằng không có yếu tố nào liên quan đến thành phần nhiên liệu. Nghiên cứu đã kết luận lượng cặn trên rãnh xéc măng đầu tiên của động cơ diesel chủ yếu là carbon và hình thành do sự phân hủy của dầu bôi trơn với sự có mặt của các nguyên tố kim loại được tìm thấy. Trong một nghiên cứu khác [28], các muối than được tạo ra từ việc đốt khuếch tán nhiên liệu diesel chiếm 20% của cặn, số còn lại là thành phần có nguồn gốc từ dầu bôi trơn.

Trong một số loại động cơ diesel, động cơ được bôi trơn bằng dầu diesel, vì thế không có ion kim loại trong cặn [24]. Nhiên liệu diesel ngày nay có chứa nhiều thành phần có tính axit như axit béo, với mức độ chưa bão hòa khác nhau thường được sử dụng làm phụ gia bôi trơn trong nhiên liệu diesel. Axit sẵn sàng phản ứng với các tạp chất kim loại trong nhiên liệu để tạo thành muối kim loại (xà phòng). Theo Ullmann và cộng sự [24], các loại muối kim loại gắn liền với sự hình thành cặn trong đầu vòi phun/lỗ phun.

Trong khi đó, Ra và cộng sự [29] lại tập trung vào nghiên cứu sự hình thành bồ hóng và lắng đọng cặn trên thành xi lanh trong quá trình phun nhiên liệu (đỉnh piston và bề mặt đỉnh, mặt quy-lát và phần lót xi lanh tiếp xúc với khí đốt). Các tác động của dòng chảy trên kẽ hở trên xéc măng và sự bay hơi của dầu bôi trơn

trong động cơ diesel được khảo sát thông qua các mô hình quá trình đốt, sự hình thành bồ hóng, quá trình tạo cặn và các mô hình dầu bay hơi. Kết quả nghiên cứu cho biết, với một lượng đáng kể bồ hóng lắng đọng trong các kẽ hở của xéc-măng piston, có thể kết luận rằng nhiên liệu hydrocarbon trong kẽ hở đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành cặn trên bề mặt piston/kẽ hở.

Về ảnh hưởng của nhiên liệu lên cặn trên vòi phun, Leedham và cộng sự [30] cho rằng một lượng nhỏ các kim loại có liên quan đến cơ chế hình thành cặn. Kết quả thử nghiệm động cơ trong nghiên cứu này cho thấy nhiên liệu cơ sở không có ý nghĩa quyết định đến việc hình thành cặn. Tuy nhiên, khi có một lượng nhỏ kẽm, cặn đã được tạo ra đáng kể. Các chất phụ gia bôi trơn có thể đóng một vai trò trong sự hấp thu kẽm vào nhiên liệu. Các chất phụ gia dạng ester không ảnh hưởng đến nồng độ kẽm của nhiên liệu, trong khi các chất phụ gia bôi trơn dạng axit có ảnh hưởng đến sự hấp thu kẽm (hình 2.6). Đồng thời, chì (Pb) và kẽm (Zn) là các kim loại dễ bị hấp thu vào nhiên liệu, trong khi các kim loại khác hầu như không phát hiện được.



Hình 2.6. Lượng kẽm hấp thụ bởi phụ gia dầu bôi trơn [30].

Hơn nữa, trong vấn đề về sự tham gia của nhiên liệu để hình thành cặn, Ebert [31] cho rằng nhiên liệu cháy không hết, kết hợp với dầu cacte, bị oxy hóa và cô đọng, hình thành sơn và bùn. Một nghiên cứu của Cloud và cộng sự [32] cho rằng lưu huỳnh được chuyển thành lưu huỳnh triôxít lần lượt thâm nhập vào dầu bôi trơn và sau đó tạo bùn và cuối cùng sản sinh cặn loại sơn (varnish). Như vậy, từ những chứng cứ này, có rất nhiều yếu tố liên quan đến nhiên liệu và chất bôi trơn đóng góp phần lớn trong cặn ở buồng đốt.

Cặn ống lót bao gồm các thành phần vô cơ có nguồn gốc từ dầu bôi trơn. Theo [8] các chất vô cơ có thể tạo thành 80% khối lượng cặn, hầu hết là muối của Zn và Ca. Tài liệu tham khảo [4] cho biết canxi ở dạng canxi cacbonat đã được phát

hiện ở mức đáng kể. Cặn lacquer trên ống lót cũng được tìm thấy và rõ ràng là không bao gồm muối/bồ hóng.

Cặn thông thường gồm các chất hữu cơ được cho là hydrocarbon bị polyme hóa. Hợp chất này liên quan đến một loại nhựa và có thể hoạt động như một chất kết dính các muối vô cơ. Dù nhựa hydrocarbon chủ yếu có nguồn gốc từ các dầu bôi trơn hoặc nhiên liệu có được tạo thành hay không, sulphonate glaze canxi vẫn được tìm thấy.

Cặn ống lót có thể được loại bỏ bằng axit acetic có cặn. Điều này đã được giải thích tại sao các muối vô cơ là thành phần chiếm ưu thế.

Việc cặn phân bố đều khắp hay ở dưới ống lót chưa được quan sát. Nhưng có thể biết là cặn ban đầu xuất hiện tại đỉnh ống lót ở bên chống va đập (anti thrust side) của động cơ, và cuối cùng nó phủ 1/3 ống lót. Cặn lacquer còn thường được đi kèm với hợp chất dầu không hòa tan và cặn.

## **2.5. Giả thuyết về cơ chế hình thành cặn**

Cặn lacquer được cho rằng hình thành khi nhựa bám chặt vào ống lót. Hợp chất này được hình thành bởi một trong hai hoặc cả hai cơ chế sau:

- Các màng dầu bôi trơn bị phân hủy do tiếp xúc liên tục với các loại khí cháy công tác và ứng suất nhiệt tăng mạnh.
- Các phản ứng hình thành từ sự bẻ gãy mạch cacbon và cháy không hoàn toàn của nhiên liệu đặc hoặc tác động va chạm với ống lót xi lanh.

Nhựa được hình thành bởi phản ứng oxy hóa và trùng hợp trong màng dầu. Chất phụ gia của nhiên liệu dính hoặc liên kết với nhựa và phân phối trên các xéc măng [4] [8]. Cơ chế này giải thích sự hình thành cặn glaze trong các động cơ diesel tàu thủy, và nó sẽ làm sáng tỏ các câu hỏi chưa được trả lời trong các nghiên cứu trước đây.

### **2.5.1. Động học hóa học cơ bản**

Lý thuyết cơ bản về động học hóa học và cơ chế chuyển đổi của hydrocarbon trong nhiên liệu và dầu bôi trơn là cơ sở lý thuyết cơ bản để xây dựng cơ chế hình thành cặn trên ống lót xi lanh.

Phản ứng hóa học được cho là xảy ra khi các phân tử va chạm với năng lượng đủ ở điều kiện thích hợp. Lý thuyết này được thể hiện trong phương trình Arrhenius nơi tốc độ phản ứng hóa học  $k$  được thể hiện như:

$$k = Ae^{-E^*/RT}$$

$A$  là tần số va chạm hình học chính xác, là hàm lũy thừa của năng lượng va chạm.

$E^*$  là năng lượng kích hoạt trong khi  $R$  là hằng số khí thực và  $T$  là nhiệt độ tuyệt đối.

Nhiệt độ cao sẽ làm tăng chuyển động phân tử và năng lượng trong các lần va chạm; do đó va chạm càng nhiều sẽ dẫn đến phản ứng ngược. Tăng nồng độ của chất phản ứng sẽ dẫn đến việc tăng số lượng phản ứng tương tác giữa các loại phản ứng, đồng thời đẩy nhanh tốc độ phản ứng. Ngoài ra, nồng độ và nhiệt độ, chất xúc tác, chất ức chế và diện tích bề mặt của các chất phản ứng cũng sẽ ảnh hưởng đến tốc độ của phản ứng.

Phản ứng hóa học thường liên quan đến nhiều bước và những trạng thái biến đổi tạm thời, tuy nhiên bước chậm nhất sẽ xác định tốc độ phản ứng tổng thể; như vậy mà phương trình Arrhenius thích hợp để mô tả các phản ứng phức tạp. Phương trình Arrhenius đã được áp dụng đối với cận động cơ [46], và cũng được sử dụng bởi một số tác giả trong một hình thức sửa đổi bao tính đến áp lực để mô tả sự cháy trì hoãn trong động cơ diesel. [47]

### **2.5.2. Lý thuyết sự oxy hóa hydrocacbon**

Quá trình đốt nhiên liệu và quá trình oxy hóa của dầu bôi trơn dạng lỏng chủ yếu bị chi phối bởi cơ chế phản ứng trùng hợp (similar fundamental reaction mechanisms), tuy nhiên sự khác biệt về nhiệt độ, áp suất và khả năng đáp ứng của oxy ảnh hưởng lớn đến tốc độ và quá trình oxy hóa hoàn thiện cũng như cách phản ứng.

#### **a, Cơ chế dây chuyền của gốc tự do**

Quá trình oxy hóa hydrocarbon dầu bôi trơn có thể được mô tả như là một cơ chế dây chuyền của gốc tự do gồm bốn bước. Lý thuyết này được trình bày rõ ràng trong các tài liệu và sách ở [48] và [49]. Quá trình oxy hóa bắt đầu bằng sự hình thành của các gốc tự do. Các gốc tự do tham gia vào một chu trình phản ứng trong đó các hydrocacbon bị oxy hóa. Phản ứng chậm lại khi nồng độ của hydrocarbon giảm, và các gốc tự do phản ứng với nhau tạo ra những thành phần thụ động. Lúc đó phản ứng tạm dừng. Trong thời gian ngắn, cơ chế gốc tự do có thể được mô tả như sau:

- Sự tạo thành các gốc tự do,
- Phản ứng dây chuyền của gốc,
- Tạo chuỗi nhánh,
- Sự kết thúc chuỗi,

#### **➤ Sự tạo thành các gốc tự do**

Các gốc tự do được hình thành trong dầu bôi trơn trong phản ứng giữa xúc tác kim loại giữa oxy hòa tan và hydrocacbon hoặc trong các phản ứng không chất xúc tác giữa dị vòng không ổn định hoặc tạp chất thơm, từ quá trình cracking, hoặc từ liên kết bị đứt do bức xạ điện từ.

#### ➤ **Phản ứng dây chuyền của gốc**

Các gốc tự do phản ứng nhanh với oxy để tạo thành một gốc peroxy. Các phản ứng dây chuyền của gốc tiếp tục khi các gốc tự do peroxy ngậm một nguyên tử hydro từ hydrocarbon khác để tạo thành một gốc hydrocarbon mới. Tốc độ phản ứng này thấp hơn so với phản ứng liên quan đến oxy. Do đó, sự tập trung các gốc peroxy cao hơn so với các gốc khác, và tỷ lệ phản ứng thường sẽ xác định tỷ lệ tổng thể của quá trình oxy hóa.

#### ➤ **Phản ứng dây chuyền phân nhánh**

Các loại hydroperoxides được tạo ra trong giai đoạn đầu của quá trình oxy hóa. Những hydroperoxides có thể tách đồng đẳng để tạo thành một alkoxy và một gốc hydroxy. Cơ chế này xảy ra rất chậm ở nhiệt độ thấp, nhưng phản ứng diễn ra mạnh ở nhiệt độ trên ~ 120°C, hoặc dưới ảnh hưởng của một chất xúc tác kim loại. Sự phân nhánh dây chuyền hydrocacbon dẫn đến việc gia tăng số lượng gốc hoạt động và có thể gây cháy 'nổ' cũng như quá trình oxy hóa nhanh chóng của dầu bôi trơn ở nhiệt độ cao.

Ở nồng độ cao, hydroperoxides có thể phản ứng với nhau theo cơ chế lưỡng phân tử kéo theo các gốc khác và nước. Radical hình thành trong các phản ứng chuỗi phân nhánh tách hydrogen từ các hydrocacbon khác để tạo thành các radical khác, các hydrocacbon bị oxy hóa hoặc nước trong trường hợp của các gốc hydroxy.

#### ➤ **Cắt chuỗi**

Các chuỗi gốc bị cắt khi các phản ứng mà trong đó các gốc tự do phản ứng với nhau hình thành các chất trơ chiếm ưu thế. Điều này xảy ra khi nồng độ hydrocacbon không phản ứng giảm. Trong các loại dầu bôi trơn, quá trình oxy hóa dừng trước khi hydrocarbon được tiêu hao hoàn toàn.

#### ➤ **Tác dụng của dầu gốc tới quá trình phản ứng**

Quá trình phản ứng sẽ phụ thuộc vào các thành phần của dầu gốc. Sự hiện diện của một số hydrocarbon thơm với liên kết C-H yếu có thể làm tăng sự hình thành gốc ban đầu; tuy nhiên khi các gốc hydrocacbon được chuyển đổi thành vòng thơm trong phản ứng dây chuyền, tốc độ oxy hóa giảm do các gốc tự do ổn

định hơn. Cơ chế này tương tự như hợp chất chống oxy hóa khử (hoặc chất ức chế gốc tự do) như mô tả dưới đây. [22]

### **b, Tác động của cơ chế phản ứng dây truyền của gốc**

Các bước phản ứng mô tả ở trên minh họa cho lý thuyết cơ bản về sự oxy hóa hydrocarbon. Ở nhiệt độ thấp, tốc độ phản ứng chuỗi sẽ xác định tốc độ trung bình quá trình oxy hóa. Ở nhiệt độ cao hơn (trên ~ 120°C), hoặc có xúc tác, việc phân nhánh chuỗi quyết định tốc độ phản ứng.

Quá trình oxy hóa nhanh sẽ chỉ xảy ra sau khi một lượng vừa đủ của các gốc được hình thành. Sự trễ trong khoảng thời gian mà các driving radical được hình thành được gọi là thời gian cảm ứng.

Giai đoạn đầu đóng vai trò quan trọng tới sự cháy trì hoãn trong động cơ diesel. Sự phụ thuộc về nhiệt độ và áp suất của các phản ứng cơ bản trong chuỗi gốc tự do bị chi phối bởi các nguyên tắc cơ bản bao hàm trong phương trình Arrhenius, đã cho thấy rằng đối với hỗn hợp hydrocarbon đơn giản, giai đoạn cháy trì hoãn phụ thuộc theo mà số mũ e của nhiệt độ [48]. Mối quan hệ này được tận dụng trong đặc tính của pha cháy trì hoãn[47]. Cơ chế phản ứng gốc tự do cũng là nền tảng để thiết lập tính năng các chất phụ gia của dầu bôi trơn - chất chống oxy hóa hoạt động bằng cách phân hủy gốc hydroperoxide hoặc hấp thụ gốc.

### **c, Chống oxy hóa trong dầu bôi trơn**

Sự oxy hóa dầu bôi trơn được giới hạn bởi:

- Hạn chế nhiệt độ dầu bôi trơn và sự tiếp xúc với oxy.
- Hạn chế tiếp xúc dầu bôi trơn tới các chất xúc tác kích ứng oxy hóa như nước muối, hạt kim loại và gỉ sắt.
- Sử dụng các chất phụ gia dầu bôi trơn chống oxy hóa

Các phụ gia chống oxy hóa bằng cách tác động vào các phản ứng chuỗi gốc tự do.

#### **➤ Chống oxy hóa khử gốc tự do**

Các phân tử khử gốc phản ứng mạnh với các gốc tự do hơn các hydrocarbon. Sản phẩm cuối cùng của phản ứng gốc tự do và khử gốc ổn định về mặt hóa học; do đó phản ứng phát triển mạch bị ức chế. Ví dụ về các chất khử gốc tự do là:

- Các Phenol cản trở quá trình hình thành cấu trúc không gian
- Amin thơm

### ➤ **Chống oxy hóa phân hủy hydroperoxide**

Các phân hủy hydroperoxide ngăn chặn cơ chế phân nhánh chuỗi bởi phản ứng và loại bỏ các hydroperoxides. Ví dụ về các chất phụ gia phân hủy hydroperoxide là:

- Hợp chất của lưu huỳnh
- Muối kẽm
- Hợp chất photpho

Kết hợp phụ gia hoạt động theo cơ chế giống nhau hoặc khác nhau đôi khi có thể tăng tác dụng của chúng gấp bội. Sự đồng bộ của các chất chống oxy hóa là do thực tế rằng quá trình oxy hóa xảy ra cùng với vô số các quá trình hóa học khác và khả năng của các phụ gia ức chế các phản ứng khác nhau [51]. Tuy nhiên, bất kỳ sự kết hợp các phụ gia chống oxy hóa nào cũng làm chậm quá trình oxy hóa; chúng không thể ngăn chặn hoàn toàn sự oxy hóa dầu.

### **d, Sản phẩm của quá trình oxy hóa**

#### ➤ **Sản phẩm của quá trình đốt cháy không hoàn toàn của nhiên liệu**

Toàn bộ quá trình oxy hóa trong buồng cháy động cơ diesel diễn ra không hoàn toàn chủ yếu là do sự không hoàn hảo trong việc hình thành hỗn hợp khí nhiên liệu. Cháy không hoàn toàn dẫn đến sự hình thành của các hạt bụi. Ở nhiệt độ cao, các hạt này chủ yếu là carbon, nhưng khi nhiệt độ giảm xuống, phân tử hữu cơ nặng ngưng tụ trên các hạt này. Do đó, chúng dính với nhau tạo muối. Tóm lại, việc cháy không hoàn toàn khiến:

- Hình thành bồ hóng
- Hình thành các hydrocacbon bị oxy hóa như andehit và xeton
- Phản ứng ngưng tụ hydrocarbon.
- Phát thải các hạt bụi và HC.

Lưu huỳnh trong nhiên liệu có liên quan đến phân tử khí thải do đó đốt nhiên liệu với lượng lưu huỳnh thấp sẽ thu được hạt bụi nhỏ hơn trong khí thải.

#### ➤ **Sản Phẩm của quá trình oxy hóa dầu bôi trơn**

Quá trình oxy hóa của dầu bôi trơn có thể dẫn đến việc hình thành xeton và rượu. Các phân tử này có thể được oxy hóa thành axit hoặc bị phân hủy gây ra sự phát xạ của các chất dễ bay hơi bao gồm nước và CO<sub>2</sub>. Tóm lại, quá trình oxy hóa dầu bôi trơn gây ra:

- Hình thành các axit,
- Tăng độ nhớt do trùng hợp và trùng ngưng,

- Hình thành của các sản phẩm không hòa tan như bùn và véc-ni,
- Phát thải hydrocacbon dễ bay hơi và các mảnh vỡ hydrocarbon

### **2.5.3. Quá trình cracking nhiệt**

Quá trình cracking nhiệt của nhiên liệu sau đó ngưng tụ trên ống lót được là bước đầu để hình thành các loại nhựa, một phần cặn lacquer. Cracking nhiệt hoặc nhiệt phân là sự phân hủy của các hydrocarbon ở nhiệt độ cao.

Năng lượng để phá vỡ liên kết hihydrocarbon tương đối cao; do đó điều kiện phản ứng là cần nhiệt độ cao. Năng lượng để phá vỡ hydrocacbon no xấp xỉ bằng năng lượng tỏa ra khi liên kết bị phá vỡ. [52]

Cơ chế cracking trở nên phức tạp với phân tử hydrocarbon lớn. Kết quả hình thành gốc tự do, và kéo theo phản ứng gốc dây chuyền. Chuỗi phản ứng kết thúc khi các phản ứng gốc tự do trung gian thu được sản phẩm không có gốc tự do.

Phản ứng cracking của các phân tử nặng hơn dẫn đến một lượng lớn các phản ứng có khả năng xảy ra (possible reactions) và có nhiều hơn các phản ứng phụ. Năng lượng để phá vỡ liên kết C-C thấp hơn nhiều so với liên kết C-H. Một phân tử bị phá vỡ khi liên kết C-C bị phá vỡ. Phân tử lớn hơn có lượng liên kết lớn hơn trên mỗi phân tử cacbon so với các phân tử nhỏ hơn. Điều này giải thích một phần lý do tại sao các phân tử lớn dễ dàng đứt hơn các phân tử nhỏ. Các gốc hydrocarbon lớn có thể chia olefin thành các đơn phân tử và các gốc hydrocacbon nhỏ hơn, do đó quá trình cracking nhiên liệu thu được nhiều olefin hơn.

### **Cracking hydrocacbon thơm**

Hydrocacbon thơm ổn định hơn so với các hydrocacbon khác, mặc dù các nhóm alkyl gắn vào vòng benzen dễ đứt hơn so với các mạch vòng. Phản ứng nhiệt phân có thể làm cho các chất thơm biến thành các chất có cấu trúc đa vòng. Những cấu trúc này có trọng lượng phân tử cao. Hydrocacbon thơm đa vòng có thể phản ứng tạo chất không hòa tan như hắc ín và than cốc.

### **2.5.4. Ảnh hưởng của Nitơ oxit**

Nitơ oxit được hình thành trong quá trình cháy và có mặt trong khí thải. Nếu oxi dư, một lượng đáng kể oxi sẽ chuyển hóa thành  $\text{NO}_2$  và các gốc  $\text{NO}_x$ . Các gốc đioxit rất dễ phản ứng và đóng vai trò như chất khởi đầu quá trình oxy hóa [53]. Trong đó, các oxit nitơ tạo ra các gốc hydrocarbon không ổn định bằng cách tách nguyên tử hydro trong khi nitơ không liên kết với hydrocarbon. Tuy nhiên, các cơ chế khác có thể dẫn đến việc hình thành các axit nitơ trong dầu bôi trơn, một hiện tượng được gọi là nitrat hóa.



### **2.5.5. Trùng hợp oxy hóa**

Hydrocarbon không bão hòa có thể liên kết với nhau trong mạch thẳng hoặc mạch nhánh trong điều kiện thuận lợi. Quá trình này được gọi là trùng hợp. Nếu một phân tử nhỏ (như nước) được tham gia, quá trình này được gọi là sự trùng ngưng. Trùng hợp và trùng ngưng là phản ứng dây chuyền của các gốc hidrocacbon và chúng xảy ra nhiều hơn khi có các gốc tự do. Phản ứng trùng hợp sẽ kèm theo các phản ứng oxy hóa. Trùng hợp oxy hóa nhiên liệu và dầu bôi trơn có thể tạo ra các phân tử lớn, thường lớn hơn 10000 đơn vị khối lượng nguyên tử.

Các tính chất của mono polyme phụ thuộc vào cấu trúc của phân tử polyme. Các phân tử có nhiều liên kết cắt ngang có cấu trúc mạnh và bền vững hơn để tồn tại trong dung môi và nhiệt độ cao.

Phản ứng trùng hợp oxy hóa dẫn đến sự hình thành cặn không tan. Vấn đề này sẽ được làm rõ trong phần sau của nghiên cứu.

## **2.6. Môi trường làm việc của ống lót xy lanh.**

### **2.6.1. Thiết kế xy lanh động cơ**

Ngoại trừ một số động cơ có cấu trúc đặc biệt, các động cơ diesel tàu thủy trung tốc hầu hết gồm 4 xupap và một vòi phun được bố trí tại trung tâm của nắp xy lanh. Các động cơ có buồng cháy tương đối phẳng, trong đó nhiên liệu được phun theo hướng ngang tới thành ống lót xi lanh và phun xiên một góc nhất định tới các phần đỉnh lõm hoặc lồi của piston. Hầu hết các động cơ thủy trung tốc hiện đại được trang bị các xéc măng khí tại phần đỉnh của piston. Chúng được thiết kế để cạo và gạt các cặn bám trên mặt gương xy lanh do đó gây ra mài mòn ống lót xy lanh. Trong trường hợp đó một phần dầu bôi trơn của ống lót xy lanh sẽ được cách ly hoàn toàn với khí thể công tác trong buồng cháy. Ống lót xy lanh với các xéc măng khí được thể hiện trên hình 2.7.

Ống lót xy lanh thường được bôi trơn bằng lớp màng dầu bôi trơn lấy từ cacte. Dầu bôi trơn đó được làm mát, lọc sạch và bơm với tỉ lệ kiểm soát từ két dầu hệ thống tới các gối đỡ trục khuỷu và các hốc làm mát trong piston. Dầu này được phân tán dưới dạng sương trong khi piston và các gối đỡ di chuyển rất nhanh tại điều kiện áp suất được gia tăng. Một số lượng màng dầu này bám trên ống lót xy lanh khi piston di chuyển từ dưới lên trên. Trong các động cơ thủy trung tốc, được biết là động cơ cỡ lớn, có thể dầu bôi trơn được cấp trực tiếp lên bề mặt ống lót xy lanh thông qua các lỗ được khoan trên piston hoặc xy lanh.

Các xéc măng hình thành một sự kín kít giữa ống lót xy lanh và piston. Xéc măng thấp nhất là xéc măng kiểm soát dầu bôi trơn, nó được thiết kế để gom và

phân phối dầu bôi trơn trên ống lót xy lanh. Trên một số động cơ dầu bôi trơn chảy vào trong rãnh dầu của xéc măng kiểm soát dầu, trong khi đó một số động cơ khác có bố trí các lỗ xả dầu hợp lý để cho phép lượng lớn dầu ở trong hoặc ở trên xéc măng dầu thoát ra ngoài.



*Hình 2.7. Kết cấu xy lanh động cơ và các rãnh xéc măng trên piston*

Sự phân phối dầu bôi trơn trên ống lót xy lanh được duy trì bởi xéc măng dầu, nó vừa thực hiện nhiệm vụ cấp dầu khi piston đi lên và vừa gạt dầu khi piston đi xuống, để lại lớp màng dầu mỏng bôi trơn cho các xéc măng khí phía trên. Trong quá trình làm việc xéc măng khí có khả năng làm kín khí tốt, nhưng không có khả năng ngăn ngừa dầu sục lên buồng cháy.

Khi dầu bôi trơn bị bơm lên buồng cháy sẽ làm tăng suất tiêu hao, đồng thời gây nên hiện tượng cháy kết kốc trên đỉnh piston, làm tăng nhiệt độ phần đỉnh và đầu, có khả năng dẫn tới rạn nứt bề mặt đỉnh. Lúc piston đi xuống từ điểm chết trên, dưới tác dụng của lực quán tính và trở lực ma sát, mép trên của rãnh tỉ sát mép trên xéc măng, do đó tạo thành khe hở nằm trong không gian giữa hai xéc măng. Lúc piston đi xuống xéc măng sẽ gạt dầu trên thành xi lanh, điền đầy không gian khe hở này. Khi piston dịch chuyển đi lên, vị trí xéc măng dịch chuyển ngược lại, dầu bị ép lên phía trên. Trong quá trình làm việc piston vận động không ngừng, dầu được bơm lên buồng cháy theo rãnh khe hở giữa piston và xéc măng. Để tránh hiện tượng này cần phải lắp xéc măng dầu lên piston. Xéc măng dầu được lắp vào cuối phần đầu và phía đuôi piston. Thông thường lắp 1 đến 2 xéc măng dầu đối với động cơ cao, trung tốc và 2 đến 4 đối với động cơ thấp tốc.

Sự di chuyển của xéc măng được xác định thông qua lực quán tính và áp lực gây ra bởi sự dịch chuyển của piston, mà điều này phụ thuộc vào tốc độ và tải động cơ. Điều này làm cho việc dự đoán trạng thái màng dầu và thời gian tiếp xúc của

dầu với bề mặt ống lót xy lanh là rất khó, hơn thế nữa dầu bôi trơn chịu ảnh hưởng của ứng suất nhiệt và sự oxi hóa hidrocarbon trong dầu.

## **2.6.2. Sự cháy và truyền nhiệt**

Quá trình cháy và trạng thái của môi chất công tác có ảnh hưởng rất lớn tới điều kiện làm việc của ống lót xy lanh. Quá trình cháy mãnh liệt nhất xảy ra khi piston tới gần điểm chết trên và ống lót xy lanh làm việc dưới điều kiện khắc nghiệt nhất.

### **2.6.2.1. Quá trình cháy trong động cơ diesel**

Quá trình cháy trong động cơ diesel được phân làm 4 giai đoạn:

#### **- Giai đoạn cháy trì hoãn:**

Được tính từ lúc bắt đầu phun nhiên liệu vào xi lanh đến thời điểm tách đường cong áp suất trong xi lanh khỏi đường nén đa biến. Trong thời kỳ này trong xi lanh diễn ra hàng loạt các quá trình lý hóa phức tạp: phát triển chùm tia nhiên liệu phun trong thể tích buồng cháy, sấy nóng và bay hơi các hạt nhiên liệu, phân rã các phân tử nhiên liệu thành các gốc, các nguyên tử chịu tác động của nhiệt độ cao, oxi hóa các nguyên tố cháy bằng ôxy không khí.

Theo lý thuyết chuỗi về sự bốc cháy nhiên liệu thì quá trình ôxy hóa diễn ra trong điều kiện tự tăng tốc lũy tiến kèm theo tỏa nhiệt các sản phẩm xúc tác trung gian của các phản ứng hóa học. Ban đầu quá trình diễn ra kèm theo tiêu hao nhiệt. Sự tích lũy nồng độ các sản phẩm trung gian tới hạn dẫn tới nổ chất ôxy hóa của chúng kèm theo tỏa nhiệt dẫn tới sự tự bốc cháy.

#### **- Giai đoạn cháy bắt đầu:**

Được tính từ lúc bắt đầu bốc cháy đến thời điểm đạt áp suất cực đại trong xi lanh. Thời kỳ này đặc trưng bằng sự bùng cháy nổ và cháy hơi nhiên liệu đã được phun và bay hơi chủ yếu trong thời kỳ cháy trì hoãn. Sự cháy diễn ra kèm theo tốc độ tỏa nhiệt cao và tăng áp suất đột ngột trong xi lanh khi phun tiếp tục và nồng độ của nhiên liệu trong hỗn hợp công tác tăng lên.

#### **- Giai đoạn cháy chính:**

Giai đoạn này tính từ lúc đạt áp suất cháy cực đại  $p_z$  trong xi lanh đến thời điểm đạt nhiệt độ cháy cực đại của chu trình  $T_{zmax}$ . Giai đoạn này quá trình cháy mạnh nhất trong toàn bộ thể tích buồng cháy với tốc độ tỏa nhiệt cao. Thời gian này thường kết thúc phun nhiên liệu, phần nhiên liệu được phun rơi vào môi trường có áp suất, nhiệt độ cao nhờ vậy phần chủ yếu nhiên liệu cháy với thời gian trì

hoãn nhỏ, nồng độ sản vật cháy không hoàn toàn trong xi lanh tăng lên. Sự thay đổi áp suất phụ thuộc vào tỷ số giữa đặc tính phun với độ tăng thể tích xi lanh. Giai đoạn này áp suất thay đổi không lớn. Công chỉ thị của xi lanh phụ thuộc chủ yếu vào áp suất khí cháy trong xi lanh ở giai đoạn này.

Cháy nhiên liệu mang đặc tính không điều khiển được. Cường độ tăng áp suất trong thời kỳ này đặc trưng cho động lực học quá trình công tác, tính động lực học đánh giá mức độ tin cậy của động cơ.

#### **- Giai đoạn cháy rớt nhiên liệu:**

Được tính từ lúc trong xi lanh đạt nhiệt độ cực đại đến kết thúc quá trình cháy. Thời điểm kết thúc quá trình cháy được tính theo góc quay trục khuỷu, khi đó tốc độ tỏa nhiệt bằng không.

Thời kỳ cháy rớt có ở tất cả các loại động cơ diesel, nhưng đối với động cơ thấp tốc thời kỳ này ngắn hơn, còn ở động cơ cao tốc thời kỳ này kéo dài, có khi đến cuối quá trình giãn nở, có nghĩa là đến lúc bắt đầu xả. Thời kỳ này thôi cấp nhiên liệu, áp suất trong xi lanh, nồng độ ôxy và tốc độ tỏa nhiệt giảm, tăng nồng độ sản vật cháy. Cháy rớt trên đường giãn nở làm tăng ứng suất nhiệt các chi tiết nhóm piston xi lanh, tổn thất nhiệt và giảm tính kinh tế của động cơ.

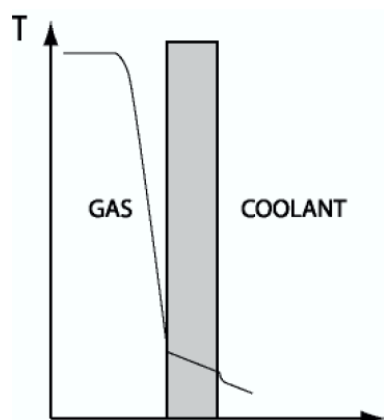
#### **2.6.2.2. Chức năng truyền nhiệt**

Nhiệt được truyền từ quá trình cháy theo 3 cơ chế cơ bản:

- Cơ chế dẫn nhiệt;
- Cơ chế đối lưu;
- Cơ chế bức xạ nhiệt;

Sự dẫn nhiệt của phía trong xy lanh (mặt tiếp xúc với khí thể công tác) thấp nên dẫn tới hình thành một lớp biên với sự suy giảm nhanh nhiệt độ gần với bề mặt màng dầu như là một lớp cách nhiệt hình 2.8.

Lớp biên sẽ giới hạn truyền nhiệt dẫn và đối lưu trừ khi nó bị phá vỡ bởi cơ chế như là một sự chuyển động hỗn độn dữ dội, các sóng áp suất hoặc sự va chạm của chùm tia nhiên liệu sẽ được tìm hiểu sau.



Hình 2.8. Màng dầu đóng vai trò như lớp cách nhiệt

### 2.6.3. Nhiệt độ ống lót xy lanh

Dữ liệu về nhiệt độ động cơ diesel được công bố thường tập chung vào các khu vực có nhiệt độ cao như lắp xy lanh, đầu piston và phía trên của ống lót.

Một số dữ liệu nhiệt độ phần đầu của ống lót được cho dưới bảng 2.1. Khoảng cách từ bề mặt ống lót đến cảm biến nhiệt đã sử dụng được ghi lại để đánh giá mức độ ảnh hưởng của thiết bị đo.

Bảng 2.1. Nhiệt độ ống lót xy lanh của các động cơ

Động cơ	Loại nhiên liệu	Tốc độ (rpm)	Tải (bmep, MPa)	Độ sâu của cảm biến nhiệt (mm)	Nhiệt độ lớn nhất của ống lót (°C)	Ref.
Matsui Iron Works MU323DGSC	FO	420	1,55	0,5	240-290	44
					287	45
Ruston 6APC	FO	750	1,72	2-3	171-180	46
		750	0,86	2-3	141-151	
		750	0,43	2-3	120-128	
Ruston 6APC	MDO	750	1,72	2-3	168	46
		750	0,86	2-3	139	
		750	0,43	2-3	126	

Sự khác biệt đáng kể về nhiệt độ ống lót khi sử dụng hai loại nhiên liệu khác nhau, khi dùng MDO cho nhiệt độ thấp hơn FO. Thông qua bảng thông kê thấy rằng nhiệt độ cao nhất khi cảm biến nhiệt được đặt gần đỉnh của ống lót và thấp hơn khi di chuyển nó ra xa. Bên cạnh đó, nhiệt độ ống lót tăng khi tăng tải.

#### **2.6.4. Tính toán nhiệt độ màng dầu và ống lót.**

Nhiệt độ ống lót cho ở bảng 2.1 là nhiệt độ của kim loại làm ống lót. Nhiệt độ của màng dầu rất khó để thiết lập khi có sự tiếp xúc với khí nạp mới và môi chất nóng công tác thay đổi liên tục. Nhiệt độ của ống lót sẽ ổn định hơn nhiệt độ của màng dầu bởi “quán tính nhiệt” của kim loại.

Các mô hình toán học có thể dự đoán được mức độ nhiệt độ tức thời trên bề mặt ống lót mà không cần đo. Một trong các mô hình đó được trình bày bởi Gouhau, Wang và Heywood tại hội nghị khoa học CIMAC lần thứ 19 [54]. Mô hình phần tử hữu hạn (FEM) giải quyết được bài toán truyền nhiệt không ổn định do truyền nhiệt dẫn và đối lưu.

Nhiệt độ ước tính tại đỉnh ống lót tăng trong quá trình cháy nhưng tốc độ tăng tương đối thấp. Trong khi đó nhiệt độ đo được trên bề mặt ống lót lại tương đối ổn định do “quán tính nhiệt” của kim loại, nhiệt độ đo được tại vùng đỉnh thể hiện sự phù hợp theo tải nhiệt hơn là nhiệt độ đo tại các vùng thấp hơn của ống lót, nơi mà nhiệt độ dao động tương đối lớn.

Nhiệt độ của màng dầu ở giữa piston và vách xy lanh tăng khi xác định theo mô hình FEM khi piston đi lên. Điểm đặc biệt là mô hình này có thể ước tính được nhiệt độ lớn nhất của màng dầu trong quá trình nạp.

Nhiệt độ màng dầu ước tính tại vị trí giữa piston và vách xy lanh thấp hơn trên bề mặt ống lót. Nhiệt độ màng dầu mặc dù không độc lập được với khí thể công tác trong quá trình cháy nhưng nó cũng tiệm cận với nhiệt độ của ống lót đo được bởi vì sự ảnh hưởng cách nhiệt của lớp biên.

#### **2.6.5. Tổn thất do hóa hơi và sự biến chất hóa học**

Màng dầu của ống lót sẽ bị thất thoát do sự bay hơi của các thành phần chứa bazo nhẹ và do sự phân hủy nhiệt dầu bôi trơn. Các tổn thất màng dầu do bay hơi làm cho nồng độ các chất phụ gia có mặt trong dầu bôi trơn tăng và làm cho cặn ống lót nhiều hơn. Điều này trái ngược với mong muốn giảm lượng tiêu hao dầu bôi trơn trong các động cơ hiện đại.

Thành phần của màng dầu phụ thuộc vào hàm lượng nước, phần nhiên liệu bị oxy hóa, lưu huỳnh, soot và các thành phần khác. Tính nhạy của màng dầu là một đặc điểm nổi bật, nó phụ thuộc vào loại dầu gốc, các chất phụ gia và thời gian cư trú của màng dầu trên ống lót. Phân tích đối với một loại dầu cụ thể trên động cơ thủy trung tốc, hai kỳ Bolnes 3DNL [55] có đường kính xy lanh 190mm cho thấy rằng nồng độ canxi trong màng dầu ống lót lớn hơn dầu mới và tăng khi nhiên liệu nặng hơn được đốt cháy ở nhiệt độ cao hơn. Khảo sát trên cũng

cho thấy, dầu bôi trơn ống lót có chứa  $\text{CaSO}_4$  và  $\text{FeSO}_4$ , hai thành phần chính có trong cặn của ống lót.

➤ **Xét mẫu rãnh xéc măng:**

Rãnh xéc măng là khu vực hình thành cặn phổ biến và điều kiện (tình trạng) của dầu bôi trơn trong rãnh là đối tượng được nghiên cứu chủ yếu. Cặn ở rãnh xéc măng thường liên qua tới nhiệt độ cao của piston và sự dò lọt dầu.

Phân tích mẫu dầu từ rãnh xéc măng cho thấy dầu trong rãnh xéc măng có nồng độ các chất phụ gia thấp và chứa một lượng đáng kể cacbonyl [56]. Các nhà nghiên cứu khác cũng nhận thấy mất dầu bôi trơn trong các rãnh xéc măng và có sự gia tăng các chất như canxi và photpho tại đó. Một nghiên cứu gần đây về đặc tính của dầu bôi trơn trên ống lót xy lanh bằng phương pháp FT-IR. Công nghệ này giúp các nhà nghiên cứu phân tích được tình trạng của dầu bôi trơn qua các kỳ khác nhau của động cơ, và nó cũng chỉ ra rằng màng dầu ống lót bị thay đổi từ các mẫu rãnh xéc măng thông qua sự có mặt nhiều của các sản phẩm nitro hóa.[57]

#### **2.6.6. Thời gian cư trú của màng dầu.**

Sự suy giảm của màng dầu ống lót phụ thuộc vào thời gian tồn tại của màng dầu cũng như các yếu tố môi trường. Quá trình trao đổi dầu liên quan đến sự hòa tan, hòa trộn cũng như bay hơi và suy giảm cơ khí trong hỗn hợp không đồng nhất, do đó thời gian cư trú màng dầu của dầu bôi trơn là một vấn đề rất đáng quan tâm.

Thời gian trung bình của dầu trên ống lót rất khó để đánh giá và đo. Cách đo trực tiếp thời gian cư trú của màng dầu chưa từng được đề cập và nghiên cứu. Thay vào đó, việc xác định chiều dày màng dầu và sự tiêu hao dầu được nghiên cứu, theo đó nó như một cách gián tiếp để xác định thời gian cư trú của màng dầu.

#### **2.6.7. Chiều dày màng dầu**

Khảo sát chiều dày màng dầu được thực hiện bằng cách đo lượng dầu bôi trơn qua một lỗ nhỏ dùng huỳnh quang tia laser(LIF) hoặc khoảng cách giữa xéc măng và ống lót bằng cảm biến điện dung. Các nghiên cứu đó cho thấy có một lớp màng dầu mỏng trên cả piston và ống lót xy lanh và có thể có lớp bọt xốp và sương sau các xéc măng. Không phải kiểu đo này là lý tưởng để xác định lượng dầu trên ống lót bằng phương pháp điện dung đo được chiều dày dưới các xéc măng trong khi LIF chỉ xác định được tại một vị trí.

Chiều dày của lớp màng dầu giữa xéc măng và ống lót phụ thuộc phần lớn vào độ nhớt, tốc độ trượt, cấu trúc hình học và tải. Lý thuyết động học cổ điển về dầu bôi trơn dự đoán rằng chiều dày màng dầu là lớn hơn khi tốc độ cao hơn, tuy nhiên theo nghiên cứu của Takeguchi [58] lại cho thấy rằng ở các tốc độ thấp có ảnh hưởng mạnh nhất đến chiều dày màng dầu, có thể do sự suy giảm độ nhớt gây ra bởi sự tăng nhiệt độ màng dầu ở tốc độ cao. Chiều dày màng dầu bôi trơn thường thay đổi giữa mặt lắc và chống lắc của piston do ảnh hưởng của chuyển động piston. Phương pháp đo hiện vật xác định được ảnh hưởng chuyển động của piston tới chiều dày màng dầu trên động cơ 2 kỳ thấp tốc [59]. Cụ thể, chiều dày màng dầu đo được trong khoảng 1-10 micron. Màng dầu tại vị trí xéc măng đầu tiên mỏng hơn tại xéc măng đầu dưới cùng.

Phân tích vận chuyển dầu dựa trên phương pháp đo chiều dày màng dầu đã chỉ ra rằng vận chuyển dầu cục bộ cao hơn 35-500 lần sự tiêu hao dầu [60]. Phân tích đó dựa trên phương pháp LIF xác định chiều dày màng dầu lớn hơn trong hành trình đi lên của piston. Các kết quả đó không được chấp nhận toàn bộ khi đo bằng phương pháp LIF hoặc điện dung. Chúng được coi như các dữ liệu đáng để quan tâm khi nghiên cứu.

#### **2.6.8. Cơ chế tiêu hao dầu bôi trơn.**

Sự tiêu hao dầu bôi trơn trong động cơ diesel bao gồm nhiều cơ chế phức tạp. Xét về thiết kế của piston, xéc măng và đường kính, có thể có ít nhất 40 yếu tố ảnh hưởng đến sự tiêu hao dầu [53]. Xét một cách tổng quát có thể chia ra 4 cơ chế cơ bản [54]

- Sự bay hơi của dầu bôi trơn trên ống lót,
- Các cặn bẩn tích tụ trên mặt trước của xéc măng,
- Hơi sương của dầu được mang đi nhờ sự thổi ngược,
- Sự gạt dầu của piston ra khỏi ống lót xy lanh,

Sự mài sẽ làm dầu tích tụ tại mặt trước của xéc măng và làm gia tăng lượng cặn. Biến dạng lỗ sẽ tác động lên sự gia tăng chiều dày màng dầu và có thể làm gia tăng lượng cặn. Sự bất ổn định của xéc măng gây ra bởi cặn trên piston hoặc phụ tải và tình trạng tốc độ mở đường thoát cho dầu bôi trơn dạng sương. Sự di chuyển thứ hai của piston ảnh hưởng tới mối quan hệ hình học giữa xéc măng và ống lót nên tác động đến sự tiêu hao dầu bôi trơn. Sự gia tăng tiêu hao dầu bôi trơn do các gradient nhiệt không thuận trong ống lót của động cơ thủy trung tốc [57].

Vai trò của mỗi cơ chế khác nhau trong mỗi trường hợp. Sự tiêu hao do bay hơi phụ thuộc chủ yếu vào sự tiêu hao dầu, nhiệt độ, áp suất. Cặn bẩn gây ra bởi các



tác động quán tính và có thể là tốc độ. Các thử nghiệm thực nghiệm cho thấy độ nhớt của dầu tác động tới sự tiêu hao dầu và độ nhớt tối ưu sẽ giảm thiểu tới mức thấp nhất sự tiêu hao dầu. Trong các động cơ hiện đại, lượng dầu trên ống lót thấp và các cơ chế chính nên là sự tổn thất bay hơi và sương gây ra sự dò lọt ngược [58]. Trong trường hợp này, sự tiêu hao dầu có thể phụ thuộc đáng kể vào tốc độ cũng như gia tăng tải, yếu tố sẽ gây ra sự gia tăng nhiệt và áp suất và lưu lượng bên trong xéc măng.

Mô hình toán học thể hiện sự tiêu hao do hóa hơi của dầu diesel. Mô hình này được dự đoán là sự hóa hơi của dầu diễn ra chủ yếu vào quá trình nạp và nén và ít hơn trong quá trình giãn nở và xả. Kết quả lý thuyết tương tự cũng được công bố bởi các nhà nghiên cứu khác.

### **3. CƠ SỞ PHÂN TÍCH VÀ KHẢO SÁT CẶN ỐNG LÓT XY LẠNH**

#### **3.1. Kỹ thuật phân tích đặc tính của cặn ống lót xy lạnh.**

Các kỹ thuật phân tích được sử dụng dựa trên tất cả các dụng cụ có sẵn đáp ứng được các yêu cầu của nghiên cứu. Trong khi các dụng cụ thí nghiệm thường dễ để khai thác, sự bảo dưỡng và hiệu chuẩn đòi hỏi phải chuẩn bị các mẫu và hiểu các dữ liệu. Các kỹ thuật được sử dụng bao gồm:

1. Quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR)
2. Kính hiển vi điện tử quét (SEM)
3. Kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM)
4. Quang phổ tán xạ năng lượng (EDS)
5. Quang phổ nhiễu xạ tia X (XRD)
6. Chụp ảnh kỹ thuật số
7. Đo biến dạng bề mặt

Sự chuẩn bị, phân tích và tìm hiểu mẫu được hoàn thành dưới qua các thí trên ngoại trừ phân tích XRD.

#### **3.2. Sự phân bố cặn ống lót**

Sự phân bố cặn ống lót khác nhau trong các trường hợp nghiên cứu, tuy nhiên có vài dạng mang tính tuần hoàn.

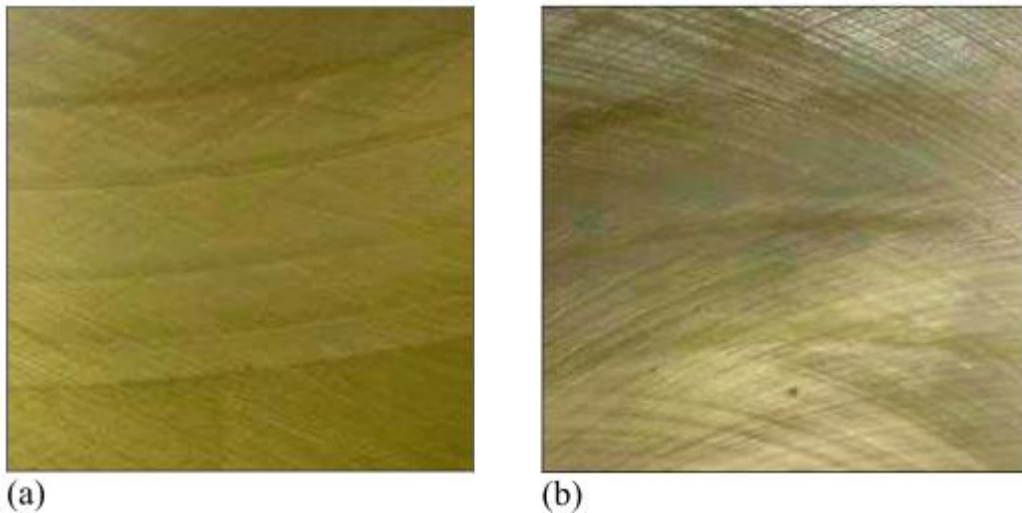
##### **3.2.1. Dạng nhìn thấy của cặn ống lót**

Cặn ống lót có rất nhiều màu khác nhau từ màu sáng không nhìn thấy cho đến màu nâu tối. Như đã giới thiệu ở phần đầu, loại phổ biến của cặn ống lót là “lacquer” có màu hồ phách và nâu, còn loại “bore glazing” được xem là loại cặn không thể nhìn được bằng mắt thường. Cặn có thể làm đổi màu toàn bộ ống lót,

nhưng nếu quan sát kỹ thì thấy rằng cặn nhìn thấy không đồng đều và sự phân bố của cặn trong các trường hợp được khảo sát cũng không đồng đều.

#### **a, Các đường nằm ngang – dấu vết của xéc măng**

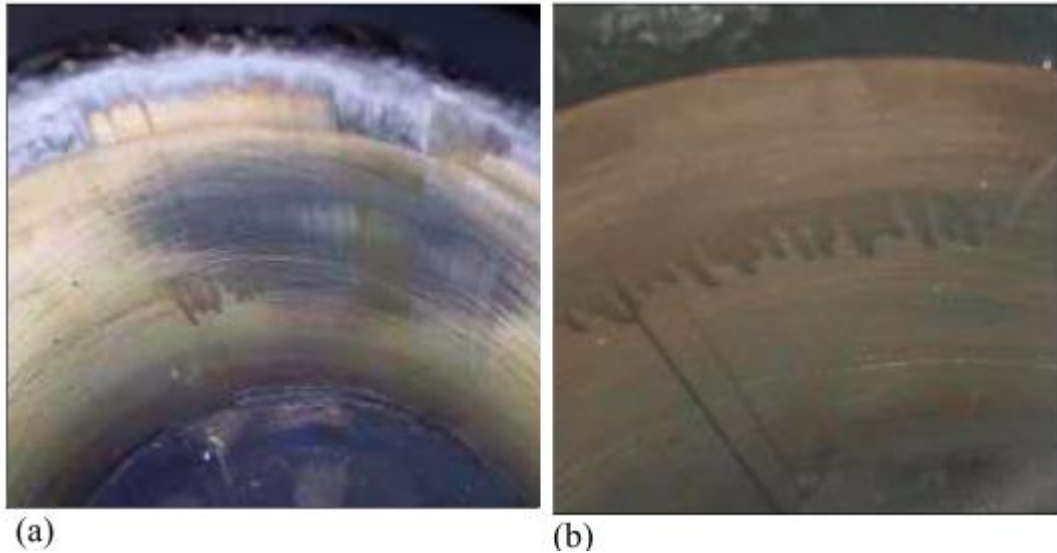
Cặn có thể có các đường nằm ngang. Khoảng cách giữa các đường, bề rộng của các đường được xem như chính là các dấu vết để lại của xéc măng. Theo đó, cặn có thể được mang đi bởi các xéc măng. Ý tưởng này là chính xác bởi quan sát thấy cặn màu vàng, giòn, dày và cứng trên một số mặt trước của xéc măng động cơ, tại các chỗ đó không tiếp xúc với ống lót xy lanh. Hình ảnh đường cặn theo phương ngang được thể hiện như hình 3.1



*Hình 3.1. Dấu vết của xéc măng trên ống lót xy lanh*

#### **b, Sự chuyển động của dầu**

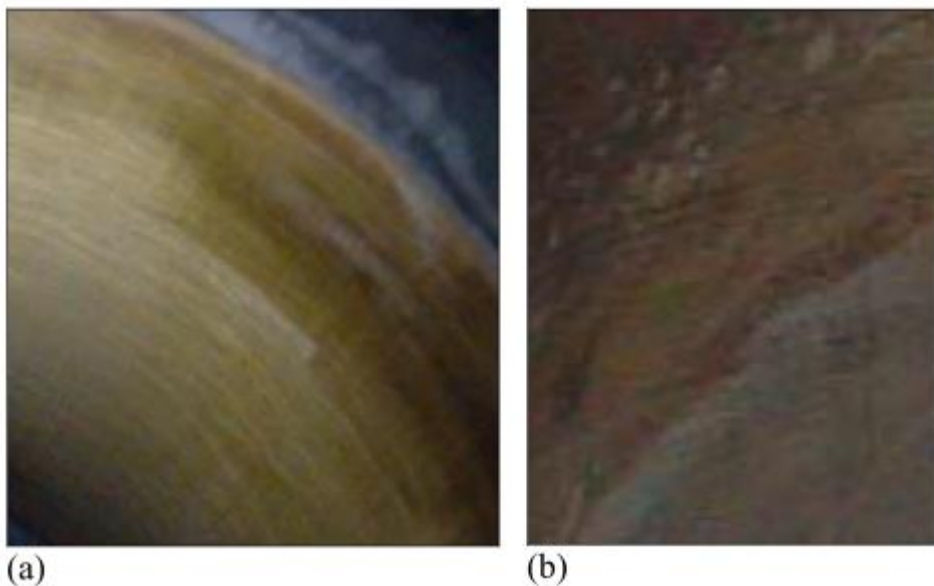
Cặn lacquer của ống lót xy lanh thường thể hiện dấu vết sự chuyển động của dầu. Dầu xuất hiện bắt nguồn từ vùng có muối nằm trên xéc măng trên cùng hoặc từ một số điểm cục bộ trên ống lót.



*Hình 3.2. Dấu vết sự chuyển động của dầu*

### **c, Các vùng và bước cặn**

Trong một số trường hợp, cặn dường như tập trung tại vùng biên sắc như hình 3.3. Cặn lacquer nhìn thấy thường tập trung tại phía đỉnh của xy lanh.

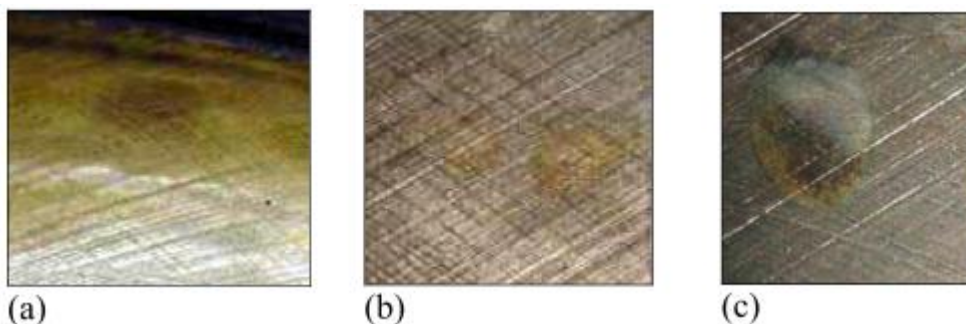


*Hình 3.3. Mức độ tập trung của cặn nhìn thấy và bước nhảy của cặn*

Các phương pháp bề mặt được thể hiện độ nhám bề mặt không cần thay đổi nhiều khi các đường biên sắc nhìn thấy trong hình 3.3 là đường cắt ngang. Quá trình khảo sát dùng kính hiển vi quang học và điện tử đã cho thấy sự khác biệt trong màu sắc có liên quan chủ yếu tới lượng cặn trên ống lót. Hình 3.3a có các đường sọc thẳng đứng với đường dốc đứng. Điều đó có thể liên quan tới sự bất tương quan của xéc măng tới ống lót.

Trong trường hợp các đường sọc dọc, khoảng cách giữa các bước thấy trong hình 3.3a và các hình khác thể hiện tương quan khoảng cách xéc măng được đề xuất có liên quan đến các xéc măng.

Cặn đang mờ dần do dầu thay đổi hoặc sử dụng các chất phụ gia nhiên liệu được quan sát để những chỗ phòng lên. Ông lót có thể có các điểm hoặc chất gỉ biến màu trên ông lót, như được trình bày trong hình 3.4.

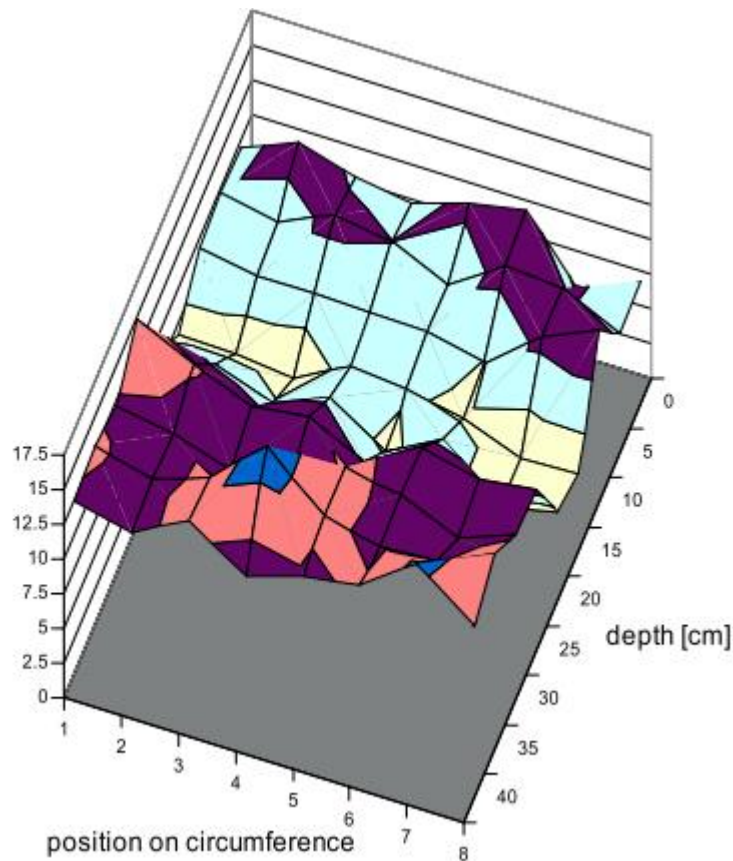


*Hình 3.4. Sự biến màu của cặn*

### **3.2.2. Sự phân bố cặn trên quy mô lớn**

Sự phân bố cặn trên ông lót xy lanh được thể hiện bởi biểu đồ nhám bề mặt, độ nhám thấp chỉ thị cặn. Biểu đồ cặn chi tiết được tạo lên từ các mẫu ông lót được sử dụng đo đặc tại phòng thí nghiệm với chiều cao khoảng 5cm, chu vi khoảng 4,9 hoặc 9,8cm. Mỗi điểm dữ liệu trên biểu đồ là giá trị trung bình của 5 lần đo.

Sự phân bố độ nhám “glazed” của ông lót của một mẫu được trình bày trong hình 3.5. Từ biểu đồ thấy rõ một xu hướng, độ nhám cao tại vùng thấp của ông lót và độ nhám thấp tại vùng đỉnh của ông lót xét theo cùng một vị trí theo phương chu vi. Hiệu ứng này không mạnh và không thấy được trên các ông lót khác, sử dụng giá trị nhám trung bình theo chu vi để miêu tả cặn được xem như là phù hợp.



Hình 3.5. Mẫu phân phối độ nhám

Hình 3.6 thể hiện độ lệch của độ nhám tính từ giá trị trung bình mức chuẩn (45cm dưới xéc măng khí) xung quanh chu vi của 4 ống lót và tính tổng trung bình các đường dày hơn. Số liệu này thể hiện cặn dày hơn ở vùng giữa của ống lót. Màng dầu bôi trơn được kỳ vọng là dày nhất tại vùng của ống lót mà tốc độ của piston cao nhất, giúp thúc đẩy hình thành màng dầu thủy động. Để kiểm chứng độ nhám giảm tại vùng giữa bởi vì cặn bị mòn nhiều hơn là các yếu tố khác, việc thay đổi độ nhám bề mặt do sự làm sạch của một xy lanh như hình 3.7.

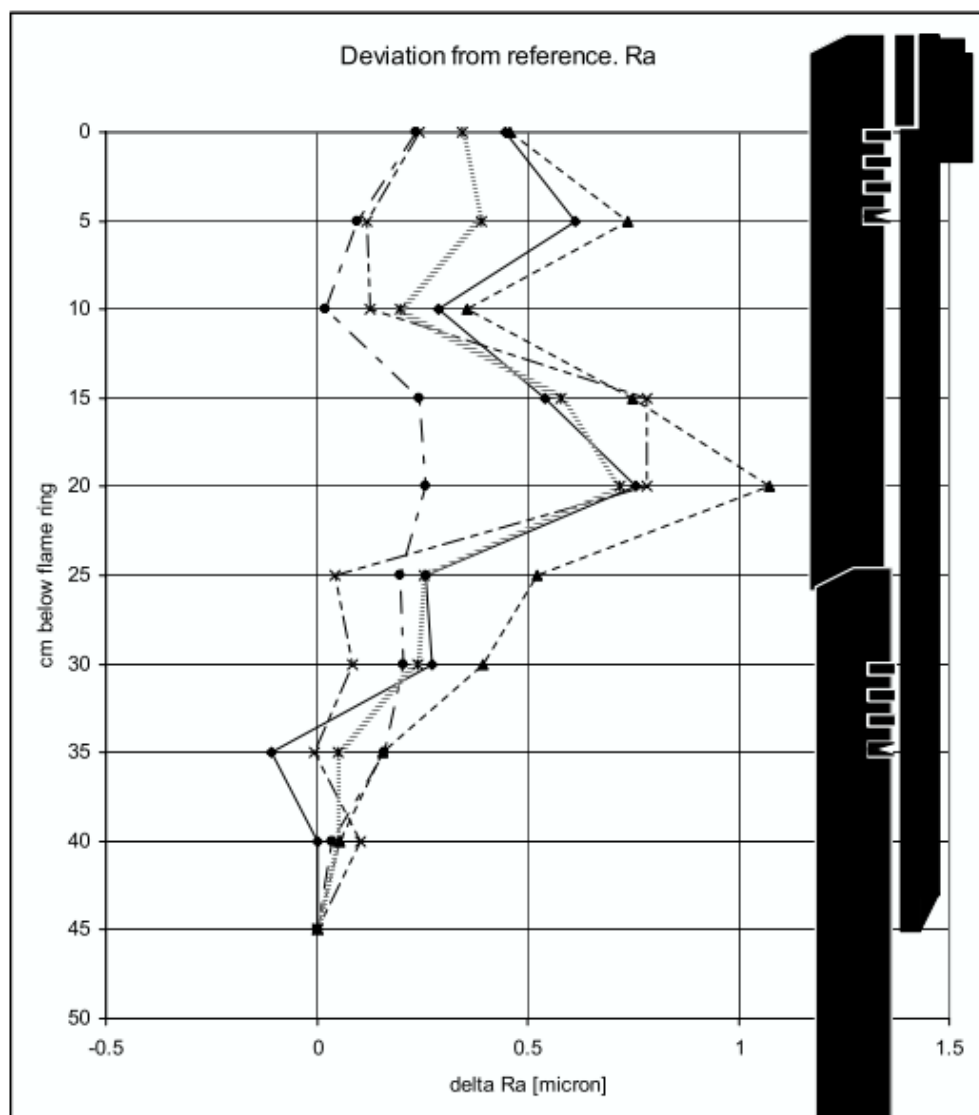
### Sự biến thiên theo chu vi mật độ phân bố cặn

Dạng phân bố cặn theo hướng thẳng đứng được thể hiện trong hình 3.6 được nhận bằng đo thực nghiệm các động cơ khác, tuy nhiên tính đồng đều tương đối quanh chu vi thể hiện trong hình 3.5 không được thấy trong tất cả các động cơ có cùng kiểu thiết kế.

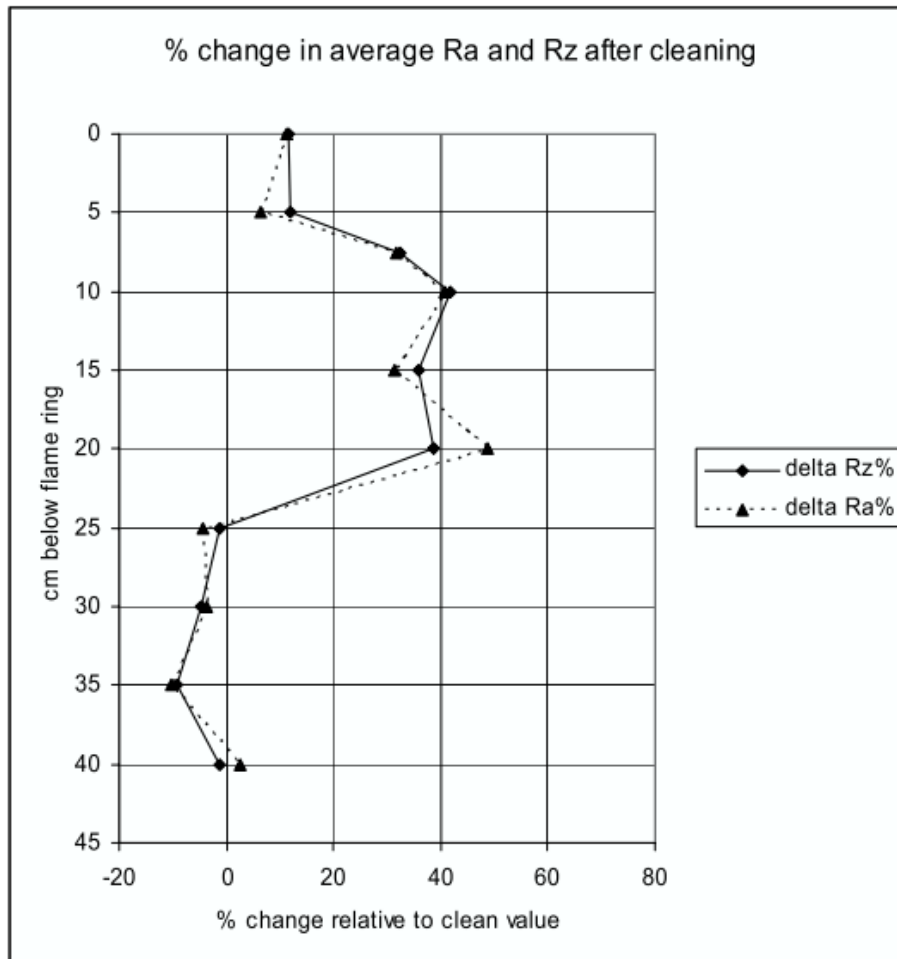
Hình 3.8 thể hiện dạng quan sát được cặn lacquer của ống lót dựa trên phương pháp thực nghiệm. Số liệu phương pháp độ nhám được tính theo Rz (microns) tại các khoảng cách khác nhau bên dưới đỉnh của ống lót theo các phương khác nhau với gia số góc là  $90^\circ$ .

Độ lệch của ống lót từ các quan sát trước được nhìn nhận là đối xứng của độ nhám theo chu vi, tuy nhiên các phép đo độ nhám chỉ ra rằng có một lượng cặn nhỏ ở vùng thấp nhất( thấp hơn 27,5 cm so với đỉnh xy lanh), nhưng lượng cặn là khá nhiều tại vùng giữa thấp hơn đỉnh 14,5cm liên quan đến hướng.

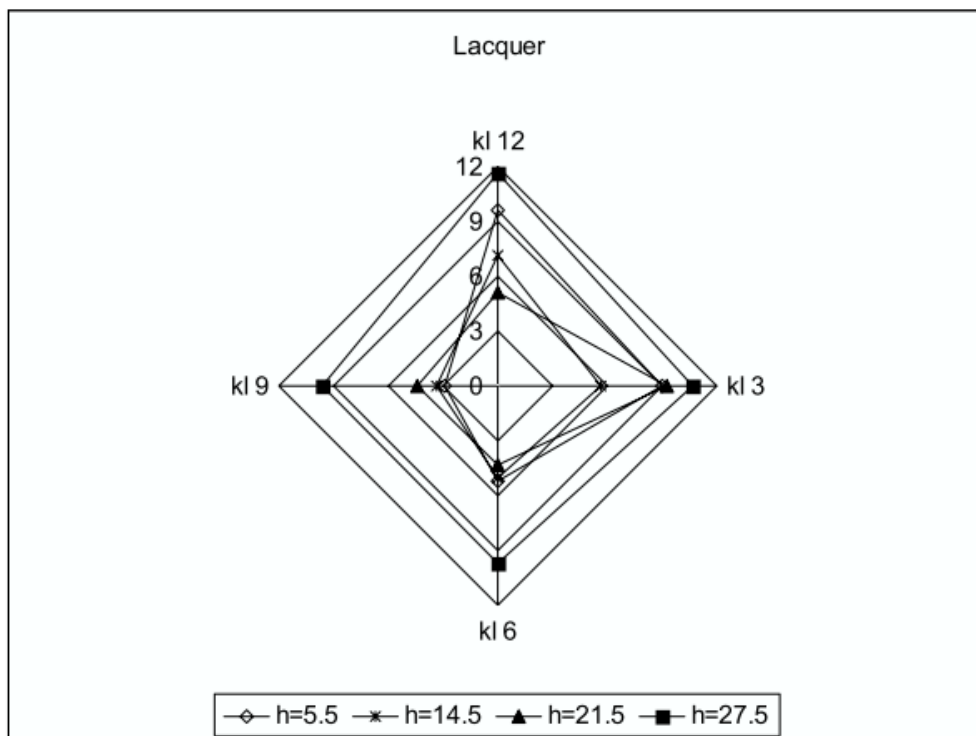
Dạng cặn này được thấy trên động cơ 2 kỳ với hướng đối diện của vòng quay, vì thế ảnh hưởng tới mặt lắc và chống lắc không thể có sự phân bố cặn đối xứng. Các phép đo nhiệt độ động cơ trên bộ thử được cung cấp bởi các nhà sản xuất động cơ cho thấy rằng nhiệt độ ống lót được đo bằng cảm biến nhiệt đặt dưới bề mặt xy lanh 2mm tại các vị trí cao hơn trên ống lót thay đổi theo chu vi. Đo tại vị trí hướng góc 6 giờ và 9 giờ thường thấp hơn hướng góc 3 giờ và 12 giờ. Do đó cặn thường tập trung ở mặt lạnh của xy lanh.



Hình 3.6. Sự phân bố cặn theo sự dịch chuyển piston



Hình 3.7: Sự thay đổi độ nhám bề mặt sau khi vệ sinh ống lót bằng axit acetic.



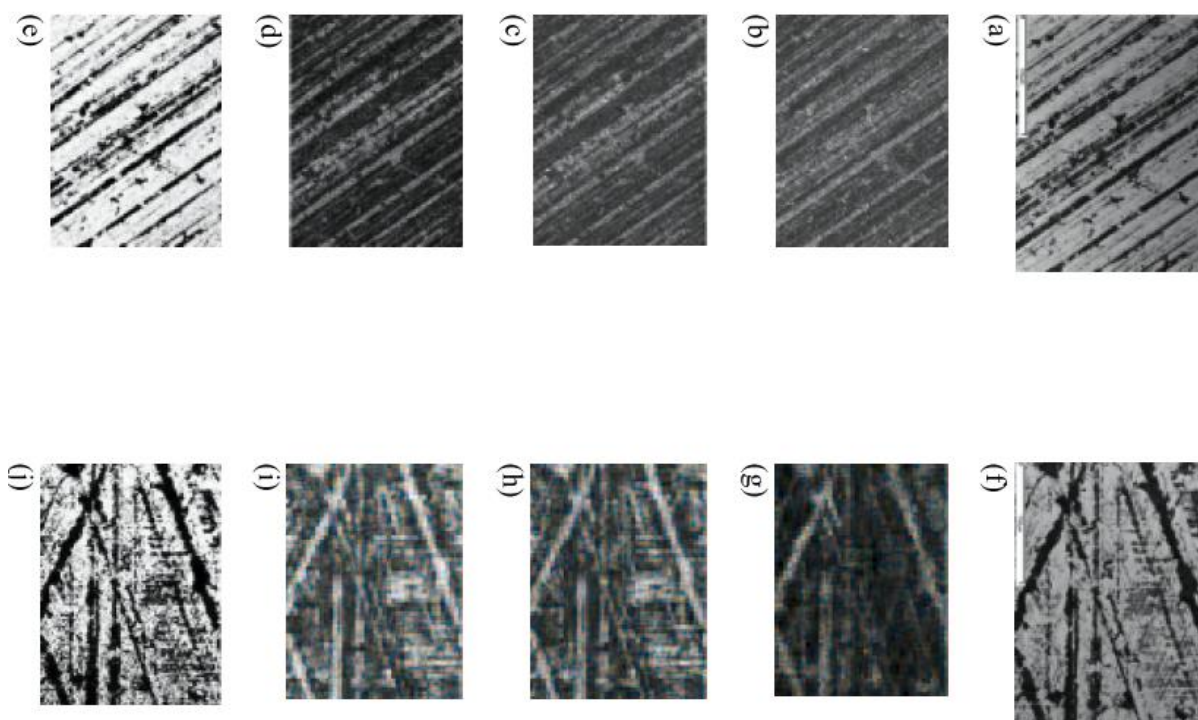
Hình 3.8. Mô tả cặn lacquer trên mẫu động cơ A



### 3.2.3. Dạng cận phân bố theo nguyên tố hóa học

Sự kết hợp giữa máy quét chùm điện tử và đầu dò EFS và xử lý tín hiệu số để tạo ra biểu đồ phân bố cận theo nguyên tố. Độ chính xác của các biểu đồ này phụ thuộc vào thời gian nhận tín hiệu gửi đi, trong trường hợp này là hàng giờ. Sự xuất hiện của các biểu đồ này còn phụ thuộc vào năng lượng của chùm điện tử ảnh hưởng chiều sâu của độ thâm nhập và khả năng tìm kiếm các nguyên tố.

Sự phân phối của hầu hết các nguyên tố trong cận lacquer và glaze được thể hiện trong hình 3.9. Độ sáng và độ tương phản của các hình ảnh được điều chỉnh để hiển thị rõ ràng. Hình ảnh thể hiện C, Ca và S được tìm thấy trong các rãnh mài, các nguyên tố này cùng tham gia vào sự tạo cận. Lớp màng dầu mỏng chứa Ca và S bao phủ đoạn bằng bề mặt ống lót bởi cận lacquer. Đây là đặc điểm nổi bật của cận lacquer, tuy nhiên sự bao phủ đoạn bằng mặt ống lót còn thấy có cả cận glaze.



Hình 3.9. Các hình ảnh thu được từ máy quét chùm điện tử

### 3.3. Thành phần của cận ống lót

Thành phần của cận ống lót được khảo sát và phân tích bằng các kỹ thuật phân tích được đề cập ở trên. Kết quả từ phân tích mẫu cận sử dụng quang phổ biến đổi hồng ngoại (IR), quang phổ nhiễu xạ tia X (XRD) và quang phổ tán xạ năng lượng (EDS), kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM) được trình bày dưới đây.

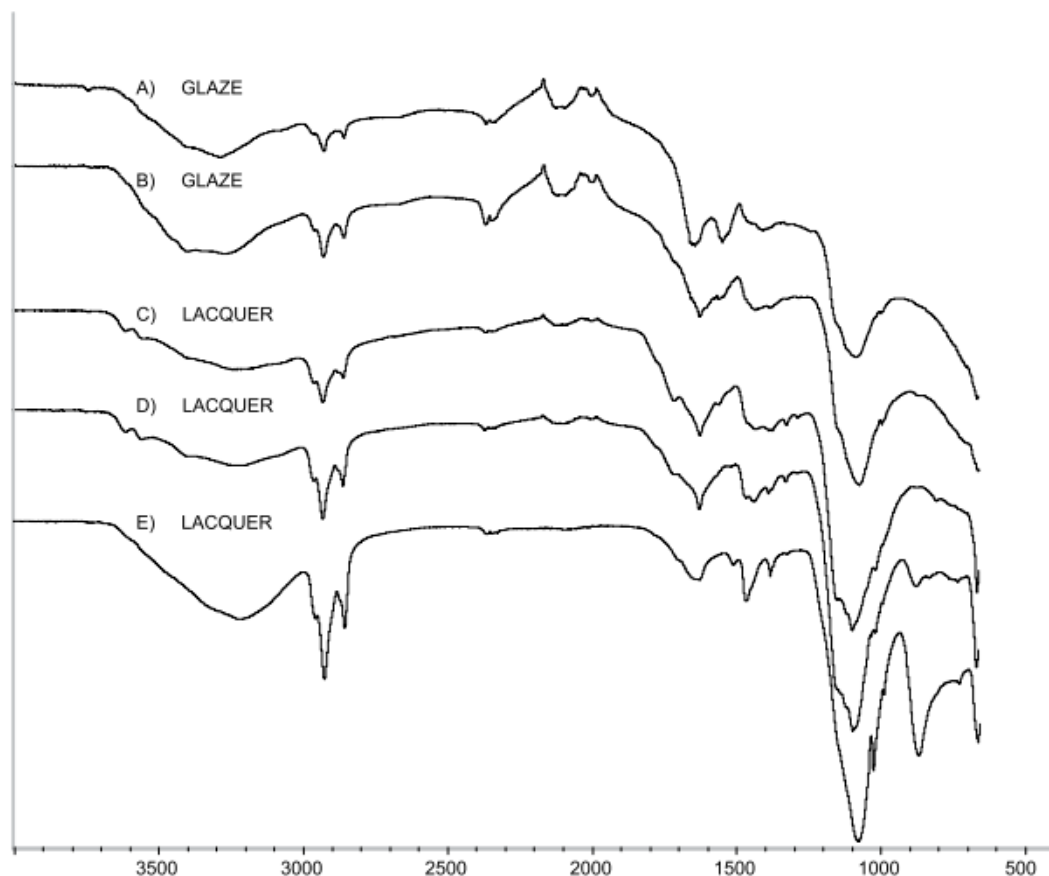
#### 3.3.1. Lấy mẫu



Một số kỹ thuật phân tích yêu cầu các mẫu phải lấy ra khỏi ống lót xy lanh để đưa tới máy phân tích. Để đảm bảo mục tiêu này, các mẫu cặn lacquer và glaze được lấy thông qua đĩa đặc thù. Khảo sát SEM của ống lót xy lanh sau khi cạo lấy hầu hết cặn bằng các gàu xúc chuyên dụng. Toàn bộ quá trình được thực hiện bằng các máy móc chuyên dùng, riêng các mẫu nhỏ có thể lấy mẫu bằng tay.

### 3.3.2. Phân tích cặn bằng quang phổ hồng ngoại

Cặn ống lót được lấy mẫu từ các khu vực khác nhau của ống lót bằng gàu xúc và được phân tích bằng dụng cụ quang học FTIR. Các mẫu nhận được được phân tích tại ống lót xy lanh và trong phòng thí nghiệm. Phổ IR của các mẫu cặn được thể hiện trong hình 3.10. Các phổ này có bề rộng đồng dạng là  $4000-650\text{ cm}^{-1}$  số sóng, nhưng có sự khác biệt rõ ràng giữa phổ của cặn lacquer và cặn glaze.



Hình 3.10. Quang phổ IR của cặn ống lót xy lanh

## **4. KHẢO SÁT VÀ ĐÁNH GIÁ CẶN TRÊN ỐNG LÓT XY LANH CỦA MỘT SỐ ĐỘNG CƠ THỦY TRUNG TỐC**

Phần này trình bày các dữ liệu thu thập được trong 5 lĩnh vực nghiên cứu và gồm cả một số thông tin từ 3 trường hợp tác giả không tiến hành khảo sát động cơ, nhưng dữ liệu được lưu bằng văn bản đáng tin cậy.

Những con tàu này đều nằm trong dịch vụ và việc khảo sát phải được thực hiện tại thời điểm mà chúng chưa bị can thiệp bởi các nhu cầu thương mại. Vì lý do này, thời gian giữa các đợt khảo sát không bình thường và nhu cầu đặt ra là phải ngay lập tức khắc phục được vấn đề. Việc theo dõi và khảo sát sự phát triển của cặn trong động cơ với hy vọng có thể làm giảm thiểu vấn đề mà không tạo ra sự thay đổi.

### **4.1. Đánh giá các trường hợp nghiên cứu**

Các lĩnh vực nghiên cứu liên quan đến các phép đo bề mặt, kiểm tra khả năng hòa tan, dữ liệu hình ảnh cũng như dịch vụ thu thập các thông tin như đặc điểm hoạt động, các vấn đề hoạt động trước đó, lịch sử tiêu hao dầu cũng như dữ liệu vận hành động cơ.

Hồ sơ dịch vụ này thường được ghi lại trong các bản báo cáo từ các nhà máy sửa chữa; tuy nhiên dữ liệu hay bị thất lạc hoặc thiếu sót nhiều so với mong đợi. Cụ thể, các thông tin sẽ bị thất lạc khi tàu thay đổi chủ sở hữu và đoàn thủy thủ vận hành. Những thông tin có sẵn cũng thường thiên về ghi chép những gì được sửa chữa hoặc thay thế chứ không phải giải thích chuyên sâu. Vì lý do này, việc khảo sát và đánh giá lịch sử dịch vụ giúp chỉ ra có tồn tại những vấn đề đó hay không; nhưng những thông tin này vẫn còn đôi khi vẫn thiếu các nội dung quan trọng và cần thiết. Tuy vậy, rõ ràng mức tiêu hao dầu cao là một hiện tượng mang tính chu kỳ. Trong một số trường hợp, vấn đề được giải quyết tạm thời và sẽ quay trở lại sau vài năm vận hành. Một số trường hợp khác, mức độ tiêu hao dầu đã ổn định thì có thời điểm cao bất thường trong thời gian dài.

Tất cả các tàu được khảo sát dữ liệu động cơ được ghi lại khi đầy tải để theo dõi hiệu suất của động cơ. Những dữ liệu này bao gồm nhiệt độ, áp suất không khí, nước làm mát xy lanh, nhiệt độ khí thải và một số dữ liệu khác, tất cả đã được nghiên cứu chi tiết.

Mức tiêu hao dầu được ghi lại bởi số lượng dầu cần thiết để chuyển tiếp vào nhằm duy trì ở mức dầu bình thường. Thời gian trung bình giữa các lần chuyển tiếp dầu là không cố định nên lượng dầu bổ sung mỗi tháng cũng biến động.

Ảnh hưởng này cũng như sự thiếu chính xác trong các bản ghi chép mức dầu gây ra sự không liên tục của đường cong tiêu hao dầu điển hình ở mức tiêu hao dầu thấp. Mức độ ảnh hưởng của các lỗi này giảm dần ở mức tiêu hao dầu cao.

Việc tiêu hao dầu của động cơ phụ thuộc vào tải, trong đó có thể thay đổi. Hơn nữa tải động cơ thường không được ghi lại. Tuy nhiên hiệu ứng này có thể phần nào được khắc phục bằng cách liên hệ tiêu hao dầu bôi trơn với tiêu hao nhiên liệu vì chúng tăng cùng với tải.

Trong trường hợp phân tích dầu đã qua sử dụng, thời gian giữa lần bổ sung dầu cuối cùng tại thời điểm lấy mẫu thường biến đổi; do đó hiệu ứng pha loãng dầu mới vào mẫu là thay đổi. Hiệu ứng này và sự lấy mẫu kém có thể gây ra một sự thay đổi đột ngột trong chất lượng dầu rõ rệt.

#### 4.1.1. Danh sách các trường hợp nghiên cứu

Năm tàu đã được kiểm tra, một số trong số này đã kiểm tra nhiều lần như thể hiện trong bảng 4.1. Các trường hợp A - C được xem xét một cách chi tiết trong phần sau của đề tài.

Ngoài các thông tin thu được từ các cuộc khảo sát trong bảng 4.1, một số trường hợp nghiên cứu tài liệu cũng đã được xem xét dựa trên các thông tin thu được từ những người sử dụng có vấn đề về cặn hoặc các báo cáo dịch vụ thu được từ những nhà sản xuất thiết bị.

Bảng 4.1: Danh sách các khảo sát

Trường hợp	Loại hình dịch vụ	Số lần giám sát
A	Tàu khách/phà	5
B	Tàu đánh cá	5
C	Tàu phục vụ offshore	3
D	Tàu phục vụ offshore	1
E	Tàu phục vụ offshore	1

Bảng 4.2: Các trường hợp nghiên cứu bổ sung

Trường hợp	Loại hình dịch vụ
F	Tàu phục vụ offshore

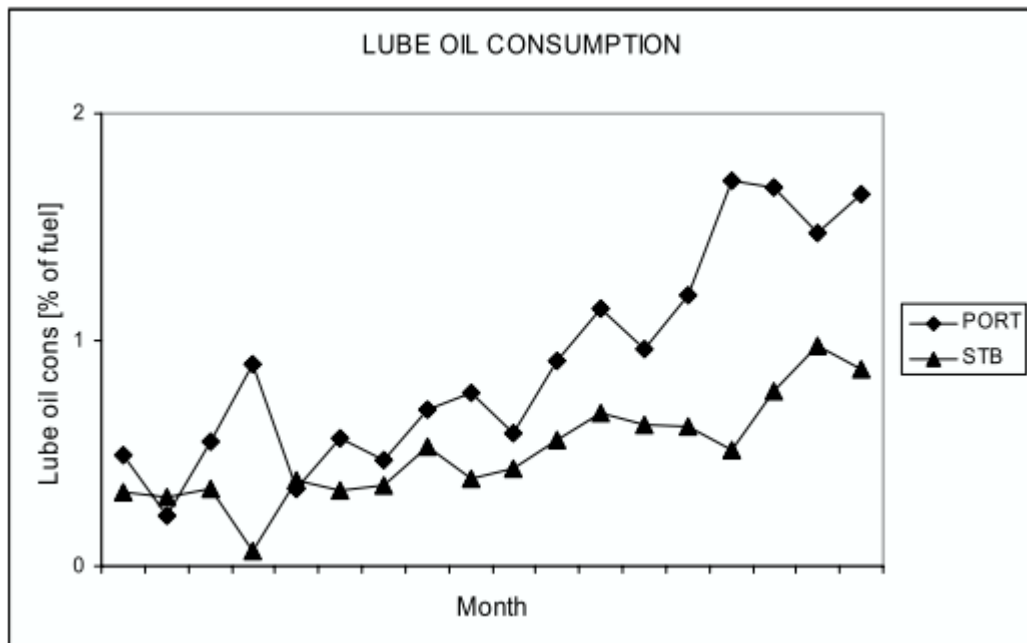
G	Tổ máy phát điện
H	Tàu phục vụ offshore

Sự hình thành cặn lacquer của ống lót được mô tả như sự tương tác phức tạp liên quan đến tải động cơ, thiết kế động cơ, đặc tính nhiên liệu và tính chất dầu bôi trơn. Đánh giá này giải quyết các yếu tố đó như chúng xuất hiện trong các trường hợp nghiên cứu. Các yếu tố khác như việc sử dụng chất phụ gia nhiên liệu sẽ được thảo luận trong từng trường hợp.

#### 4.1.2. Các đặc tính của tải động cơ

Trong tất cả các trường hợp, động cơ đều hoạt động ở tải thấp trong suốt một khoảng thời gian đáng kể. Các tàu biển phục vụ ngoài phụ thuộc một phần đáng kể thời gian chờ vào thời tiết hoặc lượt phục vụ lắp đặt ngoài khơi trong khi các phà lại có thời gia nghỉ tại bến. Các trường hợp đặc biệt nhất là các tàu đánh cá thường có khoảng 65% thời gian kéo một đường thẳng khoảng 2 hải lý, khi đó tải động cơ chỉ đạt 17% - 30% MCR tùy thuộc vào việc có sử dụng máy phát điện đồng trục. Các trường hợp quá tải không được báo cáo ở bất kỳ động cơ khảo sát nào, vì hồ sơ hoạt động có hệ thống tải trên MCR không xảy ra. Bảy trong số tám động cơ này hoạt động ở tốc độ không đổi: tải được thay đổi bằng cách thay đổi bước của chân vịt trong khi điều tốc duy trì tốc độ động cơ ổn định. Các động cơ còn lại hoạt động theo đặc tính của chân vịt, nhưng lại thêm một máy phát điện đồng trục thông qua bộ truyền động thủy lực.

Đối với tàu phục vụ offshore trang bị hai động cơ giống nhau cùng với một máy phát đồng trục thì có dấu hiệu cho thấy ảnh hưởng của tải đến tỷ lệ hình thành cặn. Cả hai động cơ có cùng chế độ bảo trì, sử dụng cùng một loại dầu bôi trơn và nhiên liệu. Mặc dù vậy, mức tiêu hao dầu tăng nhanh hơn trong một động cơ như thể hiện trong hình 4.1. Tương ứng với mức tiêu hao dầu cao và thấp quan sát được trong tháng 4 cho thấy một lỗi trong kiểm duyệt; tuy nhiên, điều này có thể không được ghi chép lại. Mức độ tiêu hao dầu được đưa ra là tỷ lệ phần trăm của mức tiêu hao nhiên liệu và dầu bôi trơn. Xét về tổng lượng tiêu hao, động cơ bên mạn trái có giá trị trung bình là 60 lít/24 giờ, trong khi động cơ bên mạn phải sử dụng khoảng 40 lít/ 24 giờ. Do đó cả mức tiêu hao dầu riêng biệt và tổng cao hơn trong động cơ bên mạn trái.



Hình 4.1. Mức độ phát triển tiêu hao dầu trong tàu trang bị hai động cơ (trường hợp E)

Kết quả khảo sát cho thấy lý do thực tế là động cơ bên mạn phải luôn phải lái máy phát điện đồng trục ở chế độ chờ. Việc sử dụng các máy phát điện đồng trục trong tình trạng chờ dẫn đến sự gia tăng nhiệt độ không khí nạp từ 41-43°C lên 58-60 °C và tăng áp suất khí nạp. Điều này sẽ cải thiện đáng kể quá trình cháy. Sự khác biệt của hệ thống tải được ghi nhận bằng lượng tiêu hao nhiên liệu trung bình. Trong 18 tháng khảo sát, mức tiêu hao nhiên liệu trung bình của động cơ bên mạn phải là 161 kg/h trong khi bên mạn trái chỉ tiêu hao 138 kg/h. Cả hai động cơ đều chạy cùng một lúc và đã tích lũy được cùng số giờ chạy.

Trong tám trường hợp khảo sát cạn ống lót, tải thấp là phần quan trọng trong hồ sơ hoạt động trong khi quá tải là rất hiếm gặp hoặc không tồn tại. Điều này không có trong thỏa thuận với các quan sát được báo cáo trong [7], [8] đã tập trung vào tình trạng quá tải hoặc tải theo chu kỳ. Tuy nhiên, các trường hợp lựa chọn trong đề tài, không thể coi là thực sự ngẫu nhiên khi chúng tạo thành các nhóm tàu với cạn ống lót có kết nối gián tiếp với NTNU và các chủ tàu quan tâm đến việc tham gia vào các khảo sát. Tải thấp làm tăng cơ chế hình thành cạn; tuy nhiên kết luận khẳng định duy nhất của đề tài là cạn ống lót hoàn toàn có thể tích tụ trong động cơ ở tải thấp.

#### 4.1.3. Các yếu tố thiết kế động cơ

Thiết kế động cơ đã được báo cáo có ảnh hưởng đến sự hình thành cạn. Do các loại động cơ được ưu tiên lựa chọn trong một số ứng dụng, với điều kiện khai thác khác nhau có thể gây ra sự khác biệt giữa các loại động cơ.

Cặn ống lót được phát hiện trong các thiết kế khác nhau. Giống như hầu hết tất cả các động cơ trung tốc, với thiết kế gồm 4 xupap và một vòi phun nhiên liệu nhiều lỗ được đặt ở giữa nắp xy lanh và được trang bị bơm nhiên liệu kiểu xung kích. Bên cạnh đó, đại diện cho các thiết kế về đặc tính của buồng đốt được liệt kê dưới đây:

- Có hoặc không có xéc măng khí,
- Thiết kế đỉnh piston phẳng hoặc lõm,
- Các vòi phun khác nhau,
- Dòng môi chất công tác song song hoặc vuông góc với trục khuỷu,
- Các biến thể trong thiết kế xéc măng,

Các động cơ có vấn đề về cặn đã được khảo sát có tỷ lệ hành trình piston/đường kính là 1,2 hoặc cao hơn và áp suất có ích trung bình là 17-22 bar. Mọi quan hệ giữa các đặc tính thiết kế và cặn ống lót không được thực hiện. Đặc tính không rõ ràng nhưng có liên quan là tỷ lệ nén, thời gian phun nhiên liệu, thời lượng, áp lực và thời gian đóng mở các xupap.

So sánh động cơ có cặn ống lót với một động cơ gắn trên tàu tương tự được sử dụng trong thương mại tương tự ở cùng khu vực cho thấy rằng báo cáo cho tàu cũ hơn không có vấn đề cặn mặc dù có thời gian phun nhiên liệu khác nhau. Các con tàu không có vấn đề bắt đầu phun nhiên liệu sớm 9 độ góc quay trục khuỷu nên có nhiều thời gian phun hơn, áp suất phun nhiên liệu thấp hơn và cũng cho phép nhiên liệu có nhiều thời gian hơn ở mức áp suất thuận lợi cho việc đốt cháy. Trong trường hợp E, mức tiêu hao dầu cao ở lần đầu tiên được quan sát sau lần đại tu động cơ mà trong đó các quá trình cháy trễ 2 độ góc quay trục khuỷu nên giảm sự hình thành NOx.

Những quan sát này nằm trong thỏa thuận với báo cáo CEC [4] trong đó xác định áp suất phun cao hơn và thời gian phun được điều chỉnh khi có ảnh hưởng tiêu cực đối với cặn ống lót. Báo cáo này cũng xác định việc giảm nhiệt độ ống lót khi có ảnh hưởng tiêu cực.

Các trường hợp nghiên cứu trong đề tài không đưa ra một dấu hiệu rõ ràng về vấn đề này. Trong trường hợp F, bộ ổn nhiệt bị lỗi gây ra sự làm việc bất thường của hệ thống làm mát không khí nạp và ống lót xi lanh, trong khi đó sự hình thành cặn lacquer cũng gia tăng. Trong trường hợp A, nhiệt độ không khí nạp và ống lót cao khi có nhiều lượng chất bẩn trong bộ phận trao đổi nhiệt, điều này làm tăng sự hình thành cặn. Trong đa số các trường hợp, nhiệt độ ống lót quy định vẫn được duy trì. Do đó, nếu tổng quát hóa liên quan đến nhiệt độ ống lót là không hợp lý trên cơ sở các nghiên cứu trường hợp trong đề tài.

Các điều kiện bề mặt của ống lót xy lanh cũng được khẳng định có ảnh hưởng đến hình thành cặn [4]. Hai ống lót có công nghệ bề mặt khác nhau đã được thử nghiệm trong một trường hợp nghiên cứu được thảo luận ở phần dưới.

Các điều kiện của vòi phun nhiên liệu đã được khảo sát, tuy nhiên ngoài cặn mềm trên vòi đầu vòi phun nhiên liệu không giảm. Trong một vài trường hợp, chức năng của chúng đã được kiểm tra trên bang thử vòi phun khi đó chúng thực hiện tốt chức năng của chúng.

Đa số các tàu đã gặp vấn đề với sự hình thành muội quá mức. Một phần, muội này có thể là kết quả của quá trình đốt cháy nhiên liệu kém, tuy nhiên một phần có thể coi là sự tiêu hao dầu bôi trơn do bị đốt cháy.

#### 4.1.4. Các thuộc tính nhiên liệu

Một số mẫu nhiên liệu dùng phân tích xu hướng tạo cặn được thu thập trong hai trường hợp nghiên cứu. Thông tin chi tiết của các phân tích nhiên liệu được thể hiện trong bảng 4.3.

Bảng 4.3. Phân tích nhiên liệu “tiêu chuẩn”

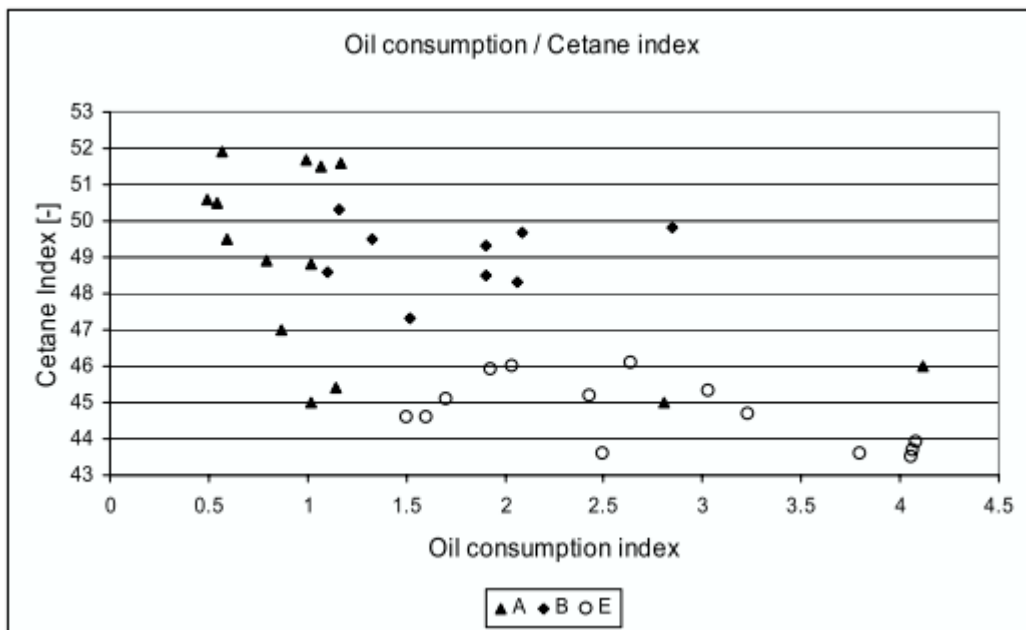
Property	Method	Unit
Density	ASTM D-4052	kg/l
Sulphur (XRF)	ASTM D-4292	mass%
Kin.visc. @ 40°C	ASTM D-445	cSt
Centane Index	ASTM D-47737	-
Total Aromatics	IP-391/95	% mass
Mono Aromatics	IP-391/95	% mass
Diaromatics	IP-391/95	% mass
Tri + aromatics	IP-391/95	% mass
Distillation	D-86	-
Simulated Distillation	D-2887	-

Bên cạnh đó, các giấy chứng nhận kết quả phân tích nhiên liệu thu được trong trường hợp nghiên cứu thứ ba. Các giấy chứng nhận này không bao gồm thành phần các chất thơm hoặc chưng cất được mô phỏng.

Chỉ số tiêu hao dầu được dùng để đánh giá ảnh hưởng của các đặc tính nhiên liệu tiêu hao dầu và cho phép so sánh giữa các trường hợp. Chỉ số này là mức tiêu hao dầu tại một thời gian nhất định chia cho tiêu hao dầu trung bình hàng năm.

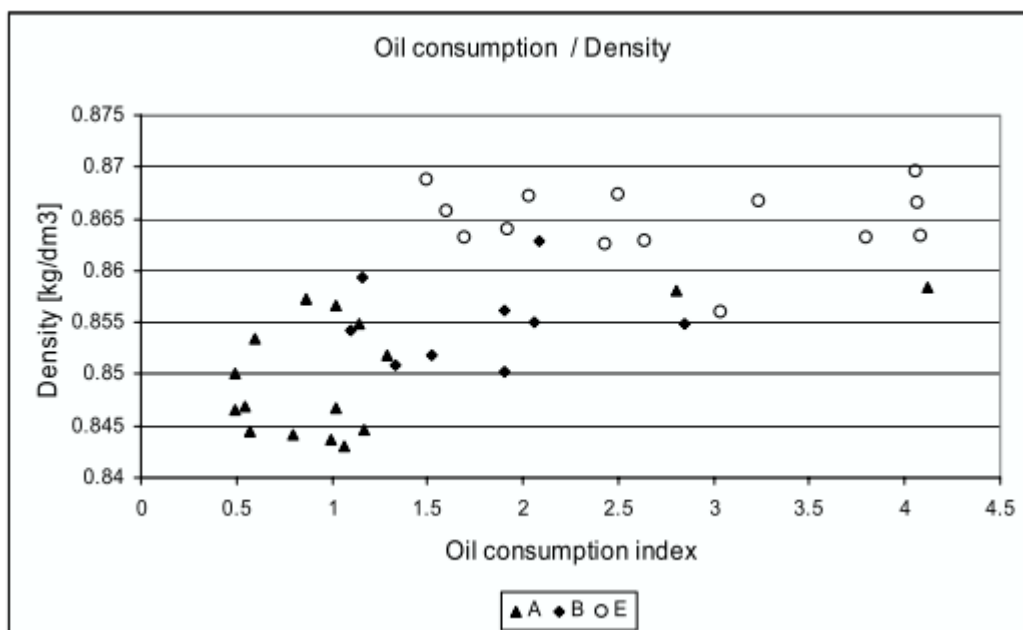
Vì sự gia tăng tiêu hao dầu đến mức nào đó là kết quả của sự tích lũy cặn, nên có sự trễ giữa thời điểm bắt đầu hình thành cặn và sự gia tăng trong tiêu hao

dầu. Do đó một sự thay đổi trong thành phần nhiên liệu sẽ xảy ra trước một thời gian khi có sự gia tăng tiêu hao dầu. Khi cặn đã được hình thành, nhiên liệu được cải thiện không dẫn đến sự loại bỏ cặn do đó mức tiêu hao dầu không giảm. Tuy nhiên không thể dự đoán chính xác các đặc điểm cháy của nhiên liệu dựa trên phân tích hóa học; do vậy đặc tính nhiên liệu không trực tiếp đại diện trong kiểu phân tích này. Vì những lý do này, các mối tương quan không nên dự đoán ngay khi một số thành phần nhiên liệu không đóng một vai trò quyết định. Các mối quan hệ giữa chỉ số cetan và tiêu hao dầu có liên quan tại thời điểm lấy mẫu nhiên liệu được hiển thị trong hình 4.2. Nhìn chung điều này chỉ ra rằng một chỉ số cetan giảm là không tốt, nhưng trong trường hợp B tiêu hao dầu là độc lập với chỉ số cetan.

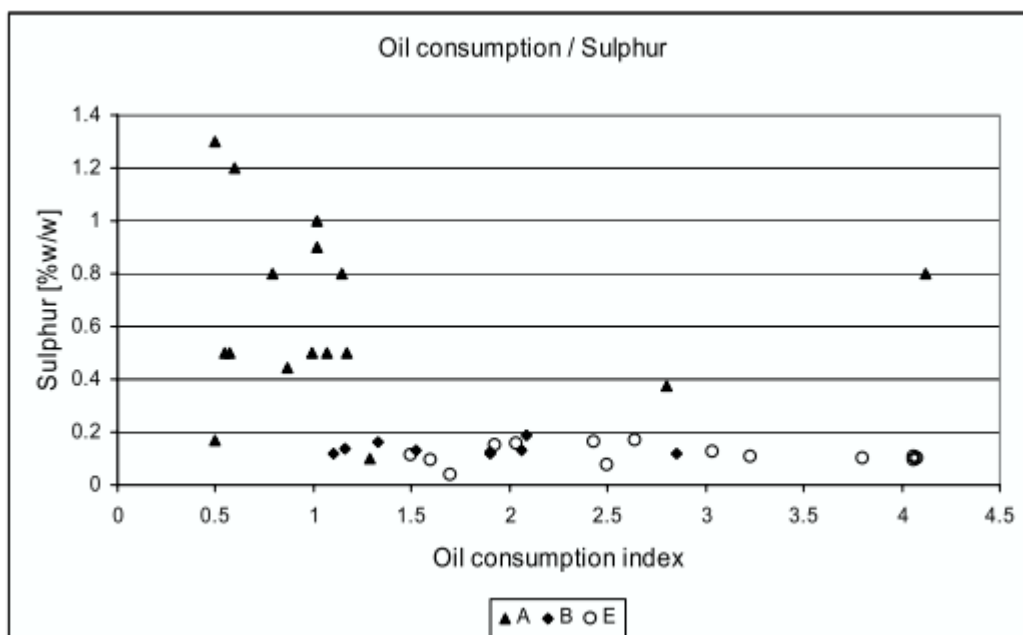


Hình 4.2. Lượng tiêu hao dầu tương đối và chỉ số cetan.



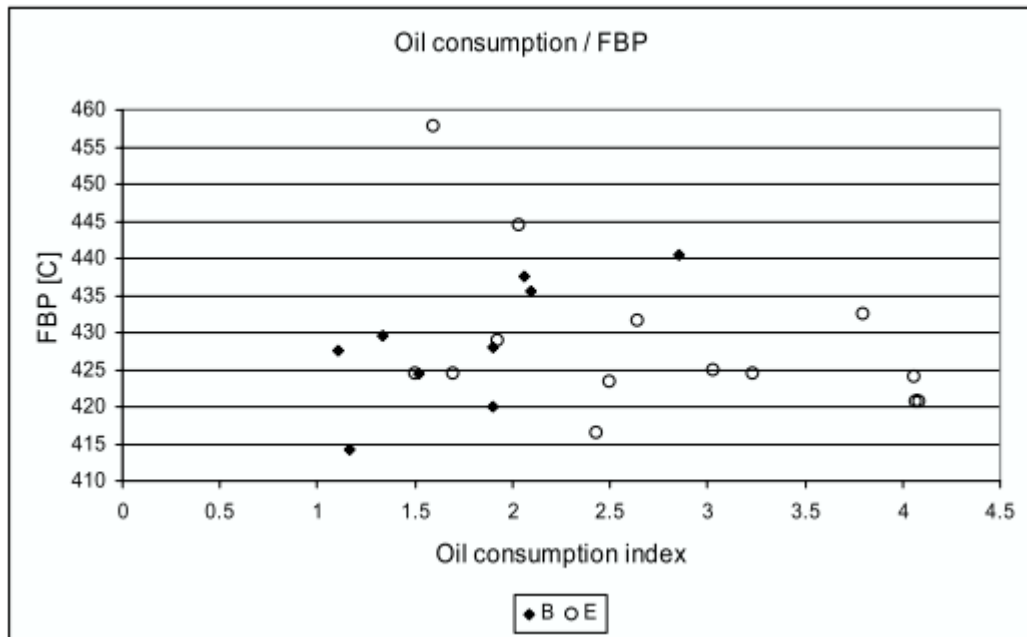


Hình 4.3. Lượng tiêu hao dầu tương đối và mật độ.



Hình 4.4. Lượng tiêu hao dầu tương đối và nhiên liệu lưu huỳnh.

Mối quan hệ giữa mật độ và mức tiêu hao dầu được thể hiện trong hình 4.3. Tăng mật độ làm cho mức tiêu hao dầu tăng cao trong trường hợp A và B, nhưng mật độ không ảnh hưởng đến tiêu hao dầu trong trường hợp E. Ảnh hưởng của nhiên liệu chứa lưu huỳnh được trình bày trong hình 4.4. Tiêu hao dầu có thể được coi là độc lập với nhiên liệu chứa lưu huỳnh trong trường hợp B và E.



Hình 4.5. Lượng tiêu hao dầu tương đối và FBP (ASTM D-2886)

Các điểm sôi cuối được xác định bằng phương pháp chưng cất mô phỏng thể hiện trong hình 4.5. Từ hình này, sự tăng FBP góp phần làm tăng mức tiêu hao dầu trong trường hợp B trong khi diễn ra ngược lại trong trường hợp E.

Nói một cách khoa học, bất kỳ xu hướng và bộ dữ liệu không thể chứng minh một cơ chế, tuy nhiên các tập dữ liệu nhỏ cũng có thể bác bỏ giả thuyết này. Các dữ liệu phân tích nhiên liệu đã thu được không cung cấp một mối quan hệ phù hợp giữa dữ liệu phân tích dầu và tiêu hao dầu. Vì vậy, một mối quan hệ trực tiếp giữa các biến phân tích nhiên liệu và tiêu hao dầu tăng cao rõ ràng không tồn tại. Tuy nhiên, điều này không có nghĩa là nhiên liệu không thể ảnh hưởng đến sự hình thành cặn, chỉ đơn thuần là các yếu tố khác cũng có liên quan và tầm quan trọng của các cơ chế là khác nhau theo từng trường hợp.

#### 4.1.5. Các đặc tính của dầu bôi trơn cơ bản

Vấn đề cặn ống lót không là giới hạn đối với hãng dầu hay công thức dầu nhất định. Các loại dầu dao động trong cấp độ nhớt từ SAE 30 đến 40 và độ kiềm mức 10,4-15. Những loại dầu này bao gồm các công thức tiêu chuẩn và chất bôi trơn đặc biệt với mức độ tro thấp. Chỉ có L1 và L6 là những loại dầu thông thường, các loại sản phẩm hàng đầu khác được lựa chọn để chống cặn lacquer của ống lót. Thông tin cụ thể về thành phần của các chất bôi trơn là thông tin độc quyền; tuy nhiên, giá trị đặc trưng của dữ liệu cơ bản về những loại dầu này đều được thể hiện trong bảng 4.4.

Bảng 4.4: Các đặc tính của dầu

OIL CODE	SAE	TBN	SA
L1	30	14.5	1.95
L2	30	15.0	2.1
L3	30	11.2	1.35
L4	40	15.0	1.65
L5	40	15.0	2.1
L6	40	12.0	1.65
L7	40	15.0	2.2
L8	30	10.6	1.3
L9	40	15.0	-
L10	40	10.6	1.3

Dầu nhớt L4 khác với các loại dầu khác bởi một hàm lượng tro tương đối thấp so với độ kiềm của nó. Điều này có thể liên quan đến các loại chất tẩy rửa cũng như loại và số lượng phụ gia phân tán.

#### 4.2. Khảo sát cặn lacquer trên ống lót xy lanh của động cơ lắp trên phà

Nghiên cứu này tập trung khảo sát và phân tích cặn lacquer trên bề mặt ống lót của hai động cơ được lắp đặt trên một chiếc phà. Khảo sát được tiến hành và theo dõi từ tháng 9 năm 2012 đến tháng 3 năm 2014; như vậy thời gian khảo sát là 18 tháng với xấp xỉ khoảng 7600 giờ khai thác động cơ. Cặn lacquer hình thành trong sự đối nghịch của hai thành phần chất xúc tác cho sự cháy và chất tẩy rửa cặn bám có trong phụ gia nhiên liệu. Việc sử dụng phụ gia nhiên liệu được dừng lại sau 12 tháng, nhưng việc giám sát và theo dõi cặn vẫn được tiếp tục thêm 6 tháng tiếp theo.

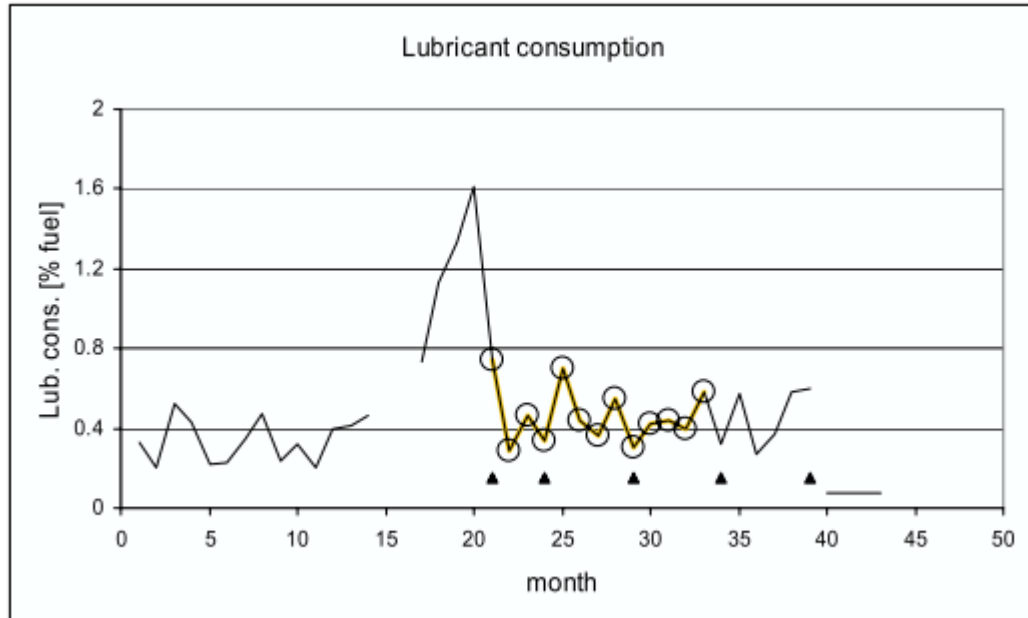
Sự tiêu hao dầu bôi trơn giảm khi chất phụ gia nhiên liệu được sử dụng, nhưng tác động đó làm xáo trộn sự giảm đồng thời không khí nạp và nhiệt độ nước làm mát ống lót xi lanh. Các khu vực trên đỉnh đảo của xéc măng khí trên ống lót xi lanh là sạch hơn đáng kể khi phụ gia nhiên liệu được làm sạch đáng kể khi sử dụng chất phụ gia. Sự xuất hiện của cặn giống như một dòng chảy chất lỏng hóa rắn thấp khi phụ gia nhiên liệu đã được sử dụng.

##### 4.2.1. Khái quát.

Sự tiêu hao dầu bôi trơn đã tăng lên 5 lần tính trung bình đến năm 2014 tính từ lúc bắt đầu khảo sát. 24 xi lanh được khảo sát bởi hình ảnh và được thể hiện qua biên độ cặn. Hai mặt quy nắp được tháo rời và vệ sinh bằng axit axetic. Cặn dễ dàng được làm sạch bởi axit axetic nhưng không thể thực hiện bằng dầu bôi trơn, dầu diesel hoặc các sản phẩm dầu mỡ. Do đó, có thể kết luận rằng cặn lacquer có mặt là do sự tiêu hao dầu bôi trơn cao. Sự biến màu được quan sát

thấy trên tất cả các phần của ống lót khi piston di chuyển xuống dưới điểm chết dưới.

Diễn biến tiêu hao dầu bôi trơn theo phần trăm tiêu hao nhiên liệu trong trường hợp được khảo sát như hình 4.6.



Hình 4.6. Quá trình tiêu hao dầu bôi trơn của động cơ lắp đặt trên phà

Trong hình vẽ tháng thứ 15 và 16 tàu được khảo sát không hoạt động; các dấu tròn thể hiện thời điểm có chất phụ gia nhiên liệu; ký hiệu tam giác thể hiện các lần khảo sát với xy lanh động cơ; bước nhảy thể hiện sự tiêu hao dầu bôi trơn giảm tại tháng thứ 40 là do động cơ được đại tu hoàn toàn.

Khi xét tới giá và tác động môi trường liên quan tới việc tiêu hao dầu bôi trơn ở mức cao cũng như các hậu quả xấu thúc đẩy hành động cần thiết để giảm lượng cặn lacquer. Chất phụ gia trong nhiên liệu được thiết kế nhằm chống lại sự tạo cặn lacquer đã được sử dụng trong khảo sát này. Chất phụ gia gồm các thành phần phụ gia với đặc tính nâng cao hiệu quả cháy và khả năng làm sạch. Thông tin về các chất phụ gia được miêu tả trong tài liệu tham khảo[19]. Chất phụ gia được trộn vào nhiên liệu trong quá trình dự trữ nhiên liệu với tỉ lệ xử lý là 670 ppm. Suất tiêu hao nhiên liệu giảm rõ rệt khi pha thêm chất phụ gia, tuy nhiên các tác động đó trùng hợp với sự làm sạch của nước biển làm mát.

Sự tiêu hao dầu bôi trơn được đánh giá vào cuối tháng bằng cách tính lượng dầu đã thêm vào để duy trì mực dầu trong két dầu tuần hoàn. Sự tiêu hao dầu sau đó được phân theo sự tiêu hao nhiên liệu để có được đánh giá liên quan đến sự tiêu hao dầu nhìn thông qua so sánh. Tháng 1 năm 2011 là tháng khảo sát đầu tiên, tháng 2 năm 2011 là tháng thứ hai, và cứ theo tần suất thời gian khảo sát đó để

thu được kết quả thực nghiệm trong trường hợp nghiên cứu này. Trong quá trình đó, cặn lacquer được tìm thấy trong tháng 19 và 20 ứng với tháng 7 và 8 năm 2014.

Xử lý chất phụ gia cho nhiên liệu được tạm dừng khoảng 1 năm sau. Sự tiêu hao dầu bôi trơn được duy trì trong giai đoạn 6 tháng; tuy nhiên mức dầu bôi trơn tiêu hao cao hơn khoảng 30% so với mức tiêu hao của năm trước. Nguyên nhân của sự tiêu hao dầu bôi trơn cao được cho là do thành phần của chất làm bóng và cặn ống lót. Các ống lót xi lanh này vẫn tiếp tục được khảo sát vào tháng 4 năm 2014 và công thức dầu bôi trơn được thay bằng một loại dầu mới sẽ được trình bày trong trường hợp nghiên cứu thứ 2. Sau khi thay đổi dầu bôi trơn thì mức tiêu hao dầu bôi trơn giảm xuống.

Quá trình khảo sát động cơ trong trường hợp nghiên cứu này được thể hiện như bảng 4.5:

Bảng 4.5: Tiến trình khảo sát động cơ

Số lần khảo sát	Ngày khảo sát	Nội dung	Tháng
1	04/09/2012	Cặn lacquer trong động cơ trước xử lý	21
2	12/12/2012	Sau 3 tháng xử lý với chất phụ gia	24
3	04/05/2013	Sau 8 tháng xử lý với chất phụ gia	29
4	05/10/2013	Sau khi dừng chất phụ gia	34
5	21/03/2014	Sau 6 tháng không dùng chất phụ gia	39

Sự khảo sát động cơ liên quan đến việc tháo một xy lanh của mỗi động cơ. Cặn được kiểm tra thông qua độ hòa tan và hình ảnh chụp cận cảnh của chúng. Các phép đo độ nhám bề mặt được tiến hành từ khảo sát thứ 3 trở lên, kỹ thuật chụp cận cảnh theo 4 hướng của ống lót và tại 2 vị trí cao độ được sử dụng trong các khảo sát.

#### 4.2.2. Mô tả hệ thống

Các động cơ được khảo sát trên phà là động cơ lai chân vịt và lai máy phát. Các động cơ này đều được sản xuất năm 2000, là các động cơ chữ V, 12 xy lanh, với áp suất cháy trung bình là 17 bar tại vòng quay 825 rpm. Các động cơ này có buồng cháy phẳng và không được lắp đặt xéc măng khí. Áp suất toàn tải danh nghĩa của khí nạp vào tua bin tăng áp là 1,6 bar, nhiệt độ khí nạp được điều

chính đến 40°C tại điều kiện khai thác thường. Các xy lanh được làm mát bởi nước làm mát trong block xy lanh ở 70°C. Tỉ số hành trình trên đường kính là 1,30.

Động cơ bôi trơn cacte khô và có một két chứa dầu bôi trơn duy nhất. Sự tiêu hao dầu bôi trơn của cả 2 loại động cơ được ghi lại bằng nhật ký. Két dầu bôi trơn được kết nối với 2 cụm làm sạch dầu bôi trơn nhờ sự làm việc đồng thời của máy phân ly dầu. Các thiết bị lọc kiểu lắng có công suất lọc 30 lần trên phút. Lưu lượng danh nghĩa của cụm thiết bị là 600 l/h, với nhiệt độ phân ly là 80°C.

#### 4.2.3. Quá trình khai thác

Chu trình hoạt động của động cơ được thay đổi theo mùa. Tàu hoạt động trong tuyến ngắn, khoảng 4 giờ. Động cơ thường hoạt động ở 80% tải định mức, đôi khi tải có thể tăng lên 90% trong các trường hợp đặc biệt như điều kiện sóng lớn và mưa gió. Động cơ được giữ ở trạng thái hoạt động không tải khi tàu đến bến. Tính trung bình, động cơ của tàu dùng 24 tiếng vào mùa hè và 48 tiếng vào mùa đông.

#### 4.2.4. Lịch sử sơ lược về động cơ

Các động cơ gặp vấn đề về tiêu hao dầu bôi trơn cao liên quan đến cạn ống lót cao gấp đôi những năm trước, 1996 và 1998. Động cơ cũng có một số vấn đề như cạn cacbon và mòn cam nhiên liệu.(Các vấn đề này không liên quan tới nhau). Phân tích dầu bôi trơn thường kỳ cũng không liên quan đến các vấn đề đó. Các động cơ này sử dụng dầu bôi trơn có công thức từ những năm 1995 hoặc lâu hơn. Toàn bộ lượng dầu được thay đổi lần cuối vào năm 2012. Công thức dầu bôi trơn được thay đổi vào tháng 4 năm 2014.

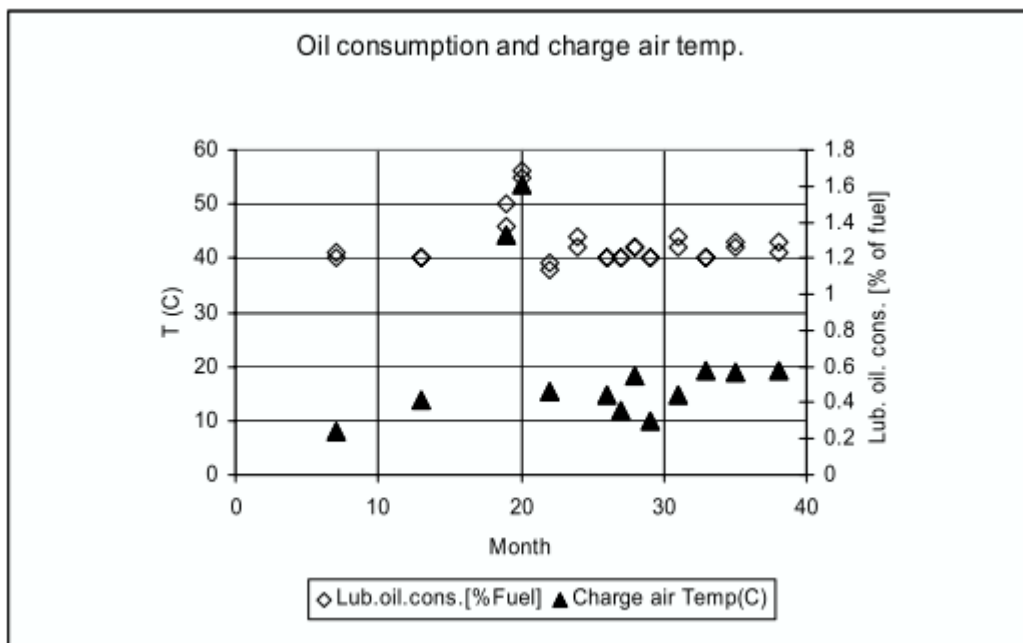
#### 4.2.5. Khảo sát các thông số khai thác

Các thông số khai thác động cơ được khảo sát sử dụng các báo cáo ghi chép trong buồng máy bao gồm cả điều kiện thời tiết và dữ liệu tải của tàu. Các thông số phù hợp cho phân tích được trình bày trong bảng 4-6.

Bảng 4.6. Các thông số trong biên bản khảo sát

Tàu	Làm mát nước biển	Xy lanh riêng lẻ
Tốc độ tàu	Áp suất nước vào	Áp suất cháy chỉ thị
Tải trọng hàng	Nhiệt độ nước vào	Áp suất nén chỉ thị
Các điều kiện biên	Nhiệt độ nước ra	Nhiệt độ khí xả

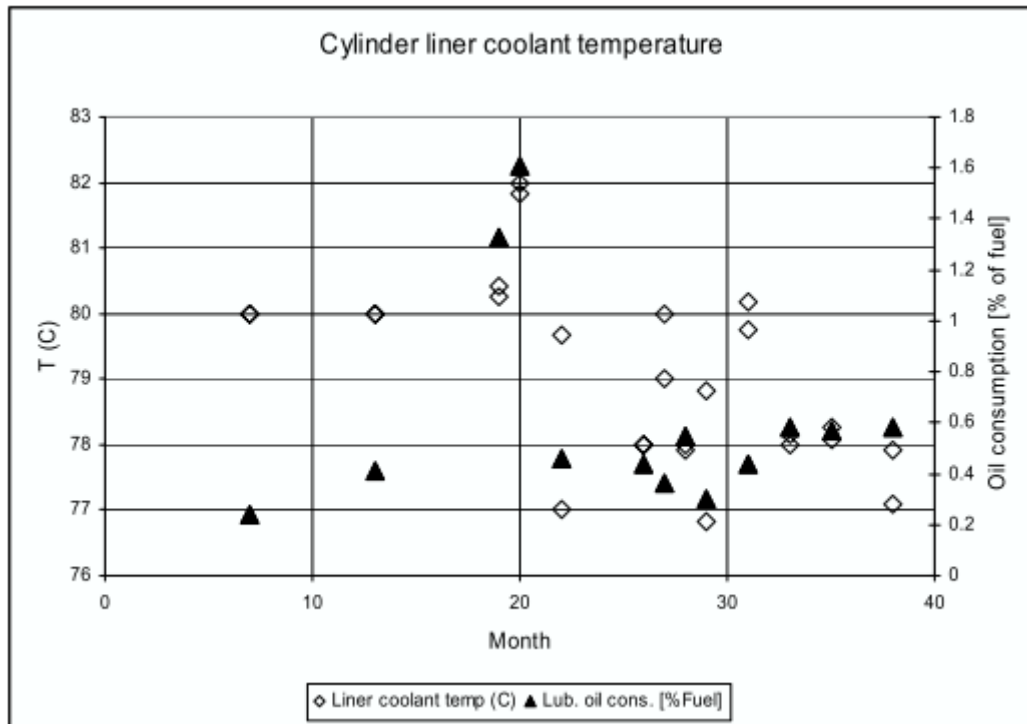
<b>Động cơ</b>	<b>Làm mát khí nạp</b>	<b>Dầu bôi trơn</b>
Tốc độ	Áp suất khí vào	Áp suất trước bộ lọc
Vị trí thanh rang nhiên liệu	Nhiệt độ khí vào	Nhiệt độ sau bơm
Tốc độ T C	Nhiệt độ khí ra	Áp suất sau bộ lọc
Nhiệt độ khí xả		
Áp suất nhiên liệu sau bộ lọc		



Hình 4.7. Diễn biến nhiệt độ khí nạp và sự tiêu hao dầu bôi trơn. Mức độ cặn lacquer trong tháng thứ 19 và 20. (Chất phụ gia được đưa vào từ tháng 21)

Các dữ liệu hoạt động được phân tích tương quan với sự tiêu hao dầu bôi trơn của động cơ. Mọi quan hệ rõ ràng giữa việc tiêu hao dầu và không khí nạp và nhiệt độ nước nước làm mát ống lót xialnh đã được khảo sát và báo cáo. Các thông số được thể hiện trong hình 4.7 và hình 4.8. Các dữ liệu nhiệt độ được ghi nhận riêng cho mỗi động cơ, tuy nhiên giá trị trung bình được thể hiện trong hình. Sự gia tăng nhiệt độ trùng với sự hình thành cặn lacquer gây ra bởi các thành phần có trong nước biển làm mát, nó là nguyên nhân phổ biến trong làm mát khí nạp và ống lót xy lanh. Làm mát được làm sạch ngay lập tức; nó diễn ra

trong thời gian giữa tháng 20 và 21 trong số liệu. Sự gia tăng nhiệt độ khí thải kết hợp với nhiệt độ không khí nạp cao cũng được chỉ ra.

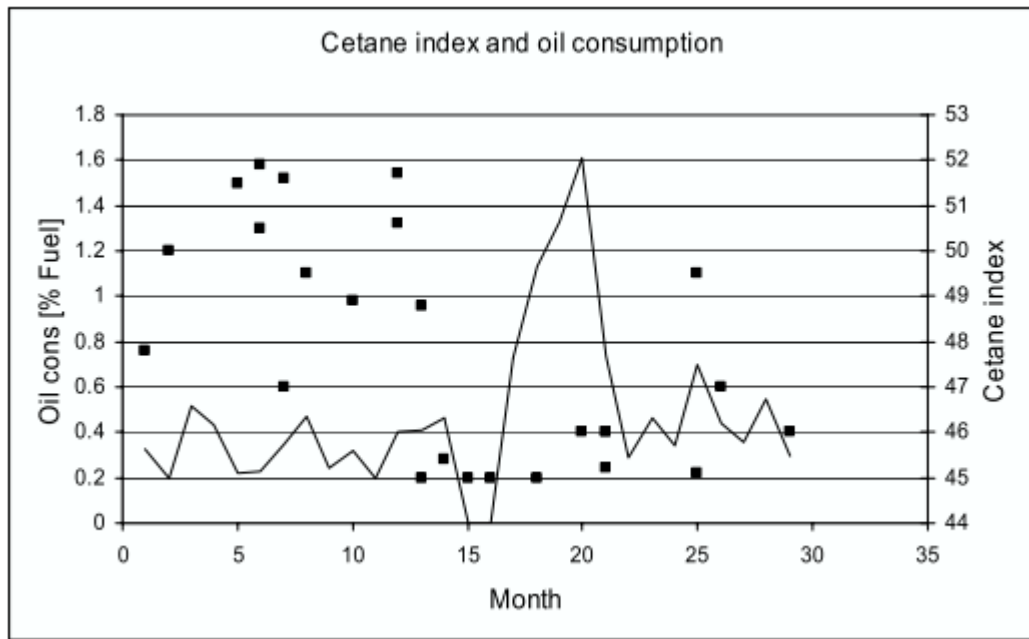


Hình 4.8. Diễn biến nhiệt độ làm mát ống lót xi lanh và tiêu hao dầu bôi trơn. Mức độ cặn lacquer trong tháng thứ 19 và 20. (Chất phụ gia được đưa vào từ tháng 21)

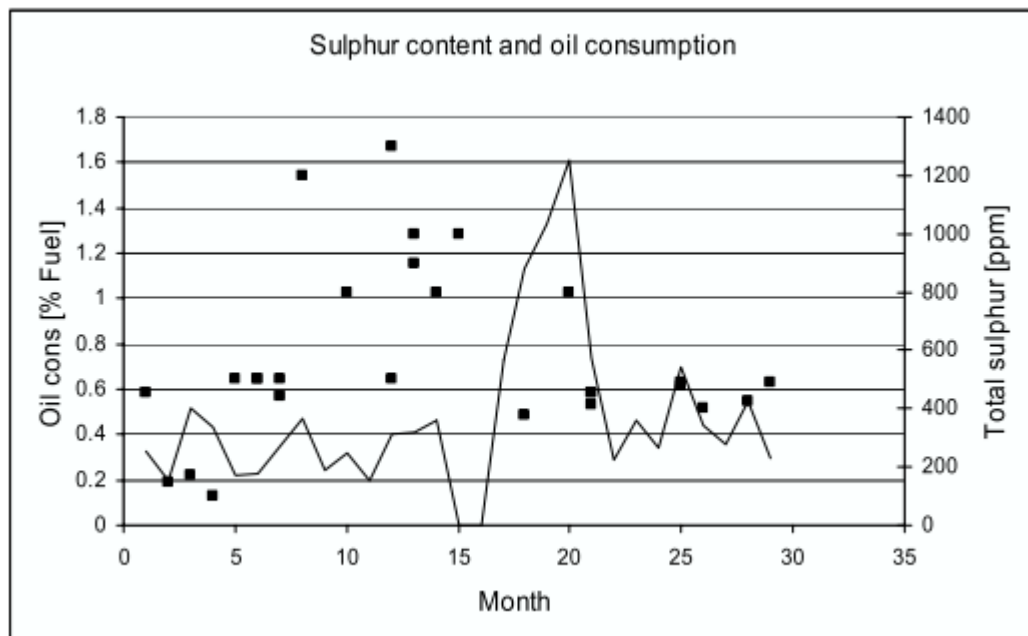
#### 4.2.6. Phân tích nhiên liệu

Dữ liệu phân tích nhiên liệu nhận được từ các chứng nhận nhiên liệu được cấp bởi các nhà cung cấp nhiên liệu. Trong khi sự chưng cất mô phỏng và thành phần các chất thơm không bao gồm phân tích tiêu chuẩn, một tiến bộ lớn đối với dữ liệu nhiên liệu có thể đã nhận được.





Hình 4.9. Dữ liệu phân tích nhiên liệu theo hệ số cetan

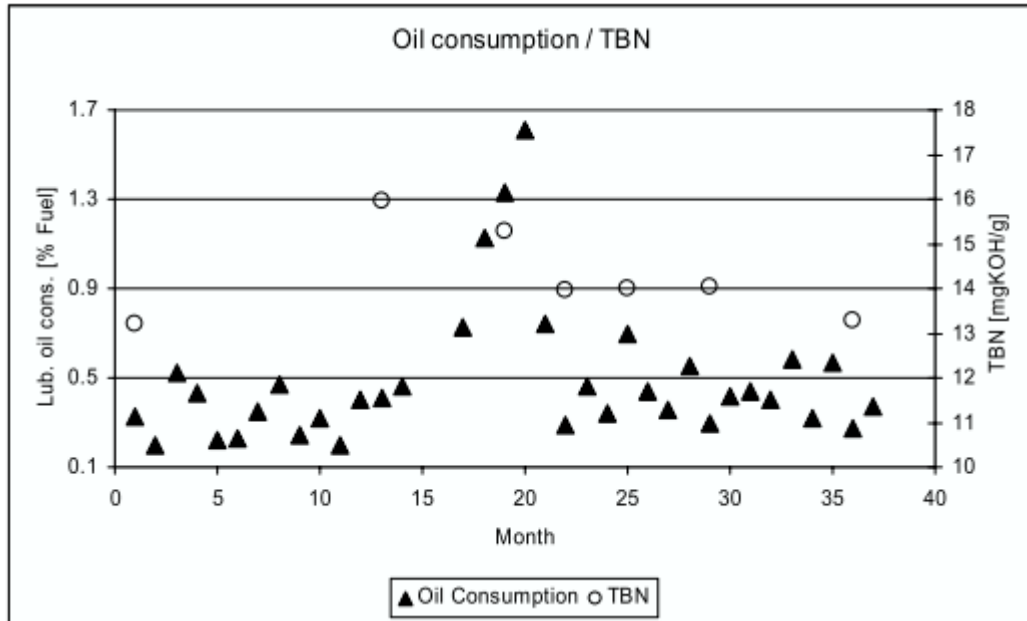


Hình 4.10. Dữ liệu phân tích nhiên liệu theo thành phần lưu huỳnh

Phân tích này liên quan tới từng bước thay đổi hệ số cetan xảy ra trong khu vực trước hình thành cặn ống lót được trình bày trên hình 4.9, tuy nhiên hệ số cetan vẫn cao hơn 10 điểm so với mức độ chỉ số quốc tế cho nhiên liệu tốt nhất được sử dụng thường xuyên (DMA). Hàm lượng lưu huỳnh thấp khá phù hợp với cặn lacquer. Tuy nhiên trong trường hợp nhiên liệu có chứa lưu huỳnh được nâng lên trước và trong quá trình hình thành cặn (hình 4.10).

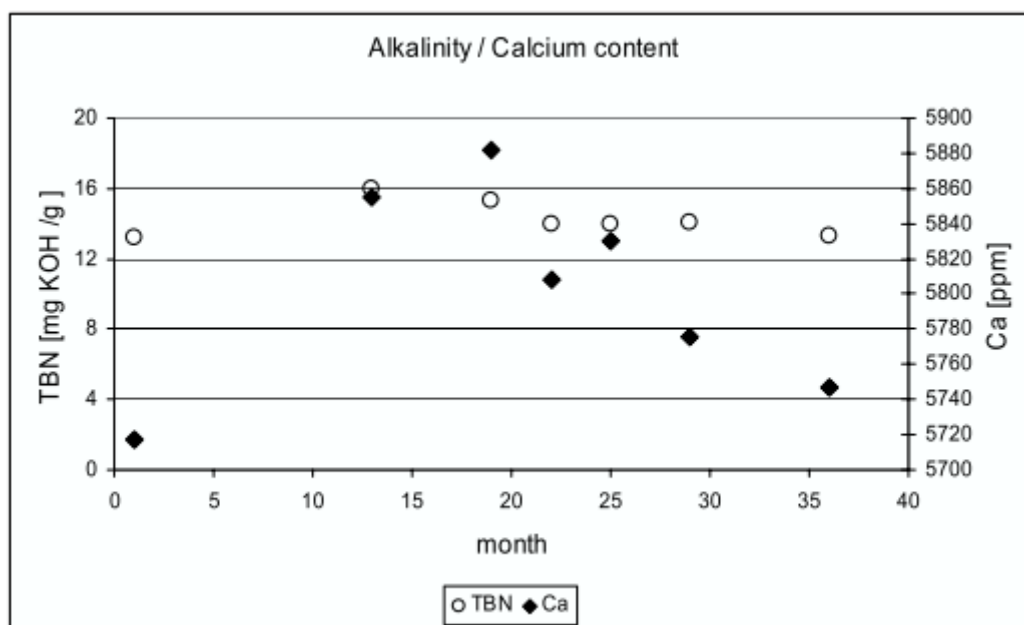
#### 4.2.7. Phân tích dầu bôi trơn đã dùng trên động cơ.

Mức độ TBN tăng trên 15 lần khi xét về sự tiêu hao dầu bôi trơn so với mức độ bình thường của dầu sạch, tuy nhiên chỉ số này quay lại mức bình thường khi nhiên liệu có sử dụng chất phụ gia. Điều này được thể hiện trong hình 4.11. Hệ số kiềm trong kết lắng đạt tới đỉnh trong vài tháng trước khi mức độ tiêu hao dầu bôi trơn tăng. Sự giảm tương đối về tính kiềm khi sự tiêu hao dầu bôi trơn tăng nhanh có thể là kết quả của việc tăng sự pha loãng dung dịch đã chống lại các mất mát do bay hơi.

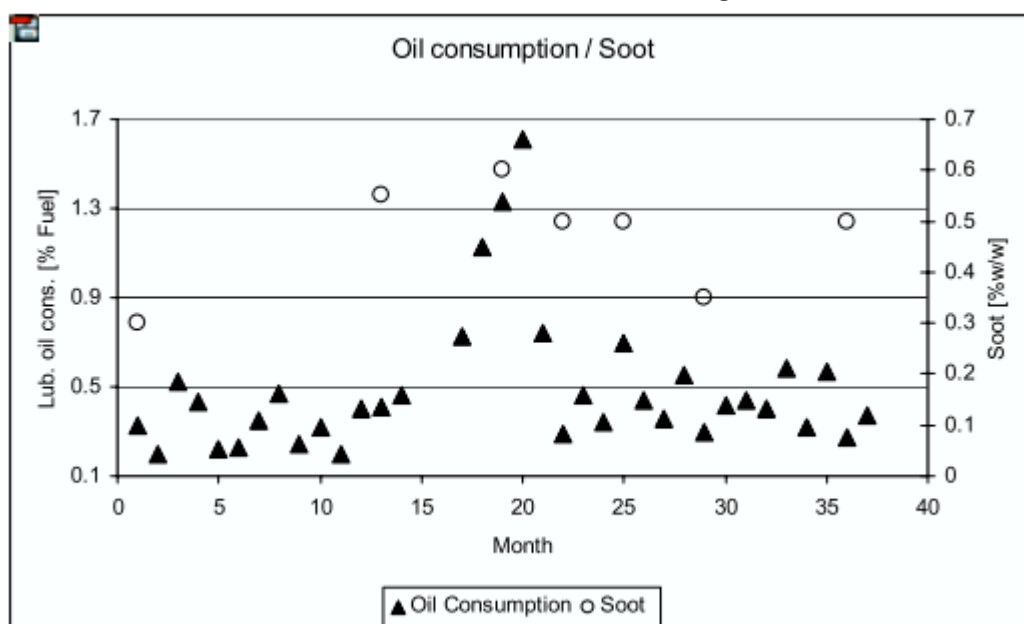


Hình 4.11. Sự tiêu hao dầu theo TBN của dầu bôi trơn đã qua sử dụng

Hàm lượng kiềm và canxi của các mẫu dầu được thể hiện trong hình 4.12. Hình này cho thấy các mức đỉnh của hàm lượng canxi trong mẫu dầu bôi trơn được xét khi sự tiêu hao dầu bôi trơn là cực đại, nhưng giảm dần theo thời gian khi lượng tiêu hao dầu phục hồi. TBN không bị ảnh hưởng, do đó dầu được tình chế dần bằng cách loại bỏ các phần tử canxi bằng cách phân tán canxi sunphat và canxi cacbonat.



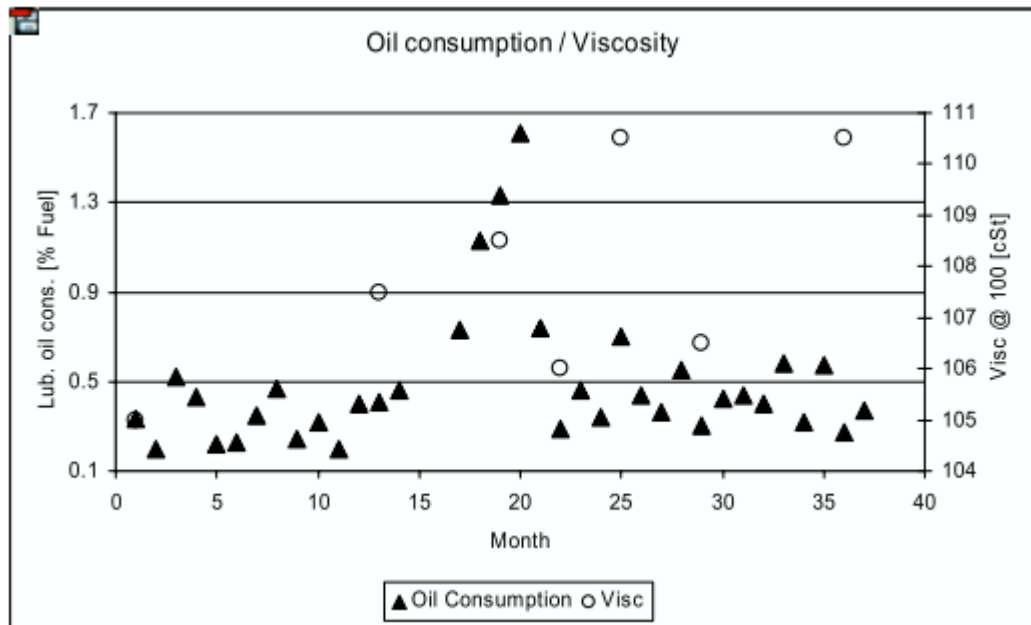
Hình 4.12. TBN và hàm lượng canxi



Hình 4.13. Thành phần soot và sự tiêu hao dầu bôi trơn

Phần lớn dầu bôi trơn được mô tả tăng vượt quá 100ppm trong lượng đã được mô tả như “canxi đã dùng” trong sự hình thành cặn. Sự gia tăng này khá tương quan và có mối liên quan đến mức lưu huỳnh trong nhiên liệu. Giả sử rằng hàm lượng kiềm của dầu ban đầu không vượt quá mức độ danh nghĩa là 15, sự gia tăng độ kiềm trong tháng 13 là kết quả của sự hao hụt do sự bay hơi mạnh kết hợp với sự tiêu hao dầu xảy ra trước các lỗi về làm mát được nhận ra và cũng trước sự thay đổi thành phần nhiên liệu. Lượng bồ hóng gia tăng nhẹ cùng với sự tiêu hao dầu bôi trơn cao như hình 4.13. Hình 4.14 thể hiện độ nhớt của các mẫu dầu. Độ nhớt 105cSt ở tháng thứ nhất xấp xỉ độ nhớt của dầu sạch. Độ nhớt và sự tiêu hao dầu cao cùng tăng, tuy nhiên độ nhớt dao động đáng kể khi thay đổi mẫu dầu.

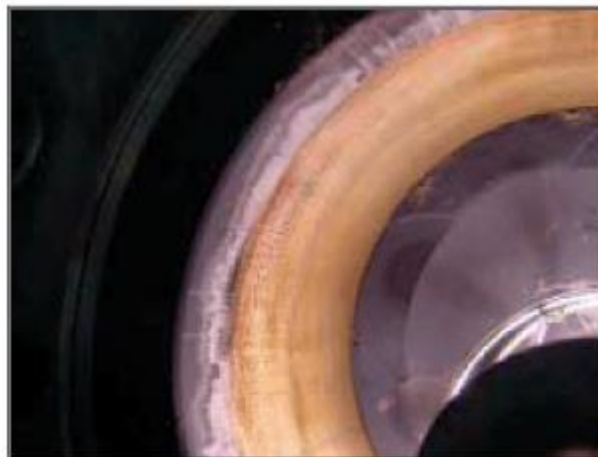
Không có lời giải thích rõ ràng về điều này, nhưng độ nhớt là rất nhạy cảm với sự pha loãng để mức dầu sạch trong két chứa dầu (hay chứa mẫu) có thể góp phần thay đổi mà không ảnh hưởng đáng kể đến giá trị phân tích khác.



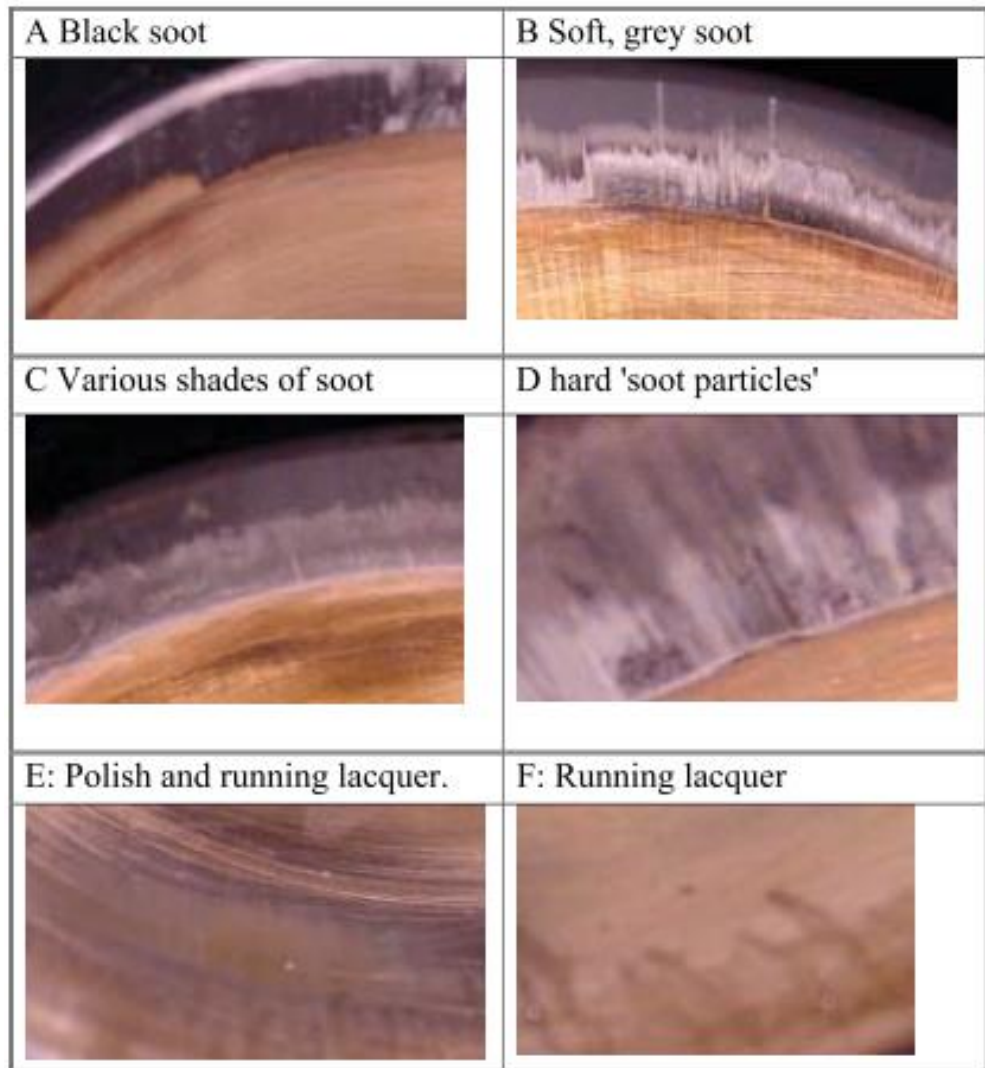
Hình 4.14. Độ nhớt và sự tiêu hao dầu bôi trơn

#### 4.2.8. Hình ảnh quan sát

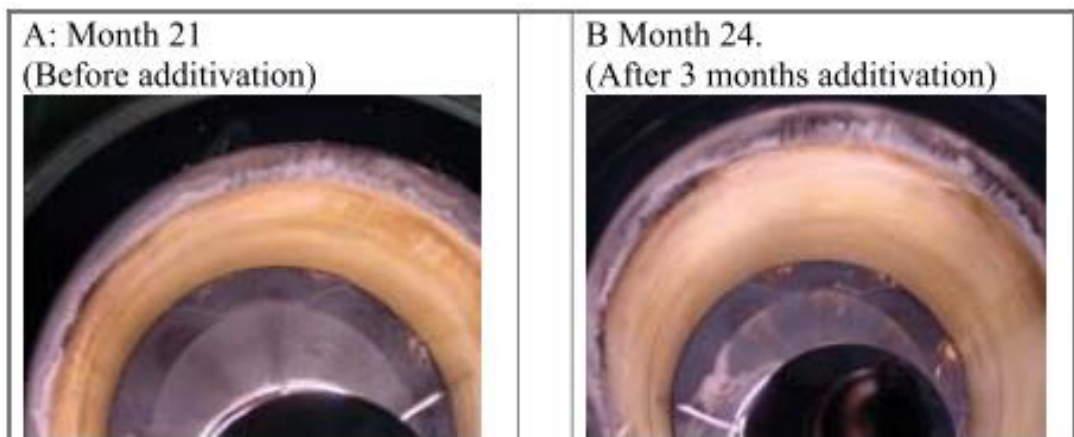
Sự tiêu hao dầu bôi trơn là cao và cặn lacquer màu hổ phách được thấy ở những phần nhìn thấy của ống lót trong lần khảo sát đầu tiên. Cường độ của màu sắc khác nhau như trong hình 4.15. Chi tiết hơn được thể hiện trong hình 4.16.



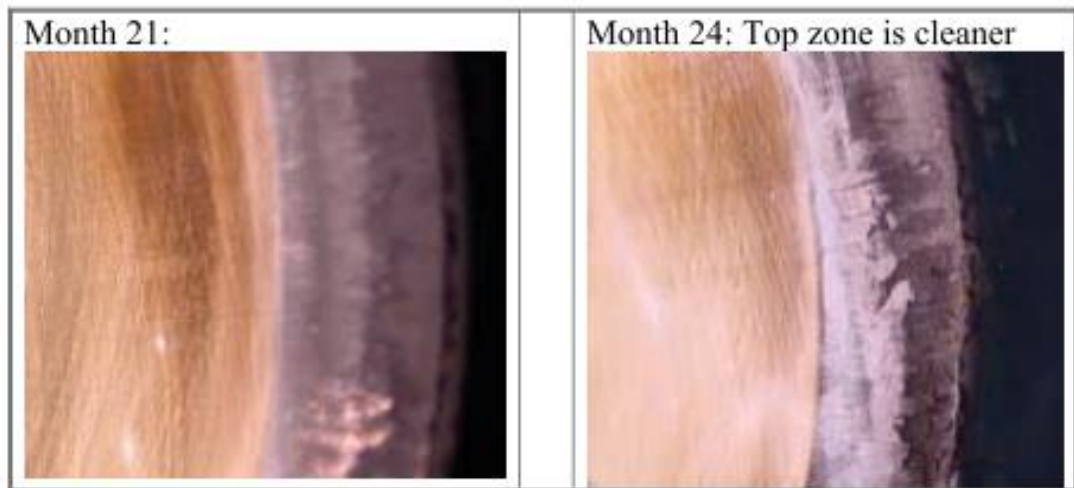
Hình 4.15. Ống lót xy lanh trong lần khảo sát đầu tiên, trước thời điểm xử lý chất phụ gia trong nhiên liệu



Hình 4.16. Hình ảnh chi tiết về ống lót trong lần khảo sát đầu tiên



Hình 4.17. Hình ảnh ống lót xy lạnh trước và sau thời điểm xử lý chất phụ gia trong nhiên liệu



Hình 4.18. Hình ảnh chi tiết tại đỉnh của ống lót



Hình 4.19. Ống lót xy lanh B5 trước và sau 8 tháng khảo sát với chất phụ gia. Cặn lacquer thay thế lớp bồ hóng ở phía trên xéc măng đối đầu.

Các hình ảnh cận cảnh của ống lót xy lanh trong hình 4.16 cho thấy muội đen cũng như muội xám mềm so với điểm xéc măng đối đầu của ống lót. Ngoài ra có một số mài mòn trong vùng này. Sự mài mòn này kết hợp với cặn tại đỉnh piston.

Ở một số vùng, cặn được nhìn thấy như các dòng chảy dọc xuống ống lót và hóa rắn (trong trường hợp E và F trong hình 4.16). Cặn này tương tự cặn lacquer về màu sắc và độ hòa tan.

Tàu thường phục vụ liên tục khoảng 3 tháng trước khi các xi lanh được kiểm tra vào tháng 12. Các hình trong 4.17 cho thấy ống lót xy lanh A5 của động cơ trước và sau ba tháng xử lý chất phụ gia. Các chỉ dẫn trực quan của cặn ống lót đáng để chú ý mặc dù mức độ tiêu hao dầu bôi trơn đã giảm xuống một phần tư so với mức độ lớn nhất.

Hình ảnh tại phần đỉnh của ống lót xy lanh được thể hiện trên hình 4.18. Lớp lót xuất hiện để được sạch hơn phía trên vị trí đảo ngược chuyển động của xéc



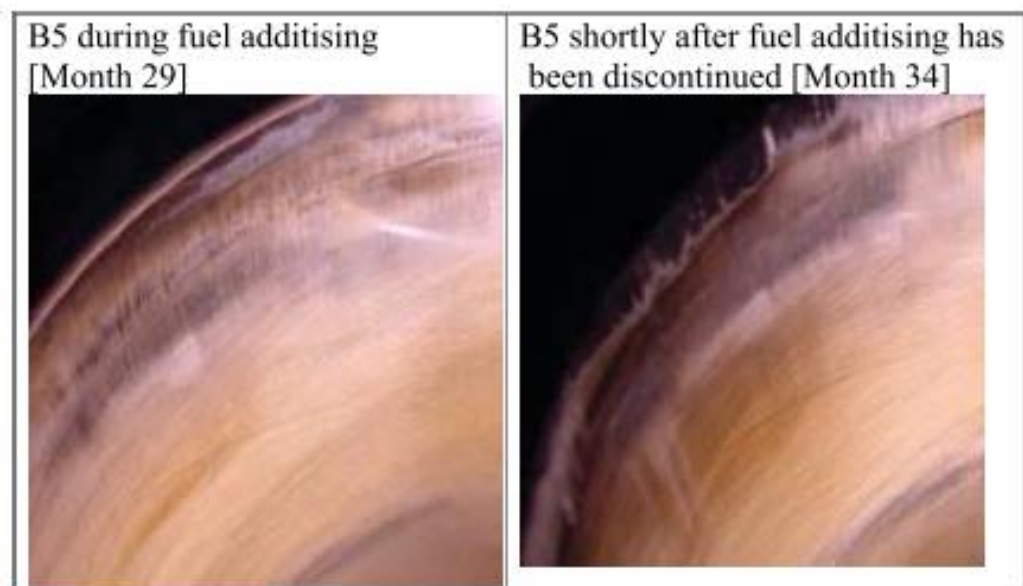
măng và các chấm cặn lacquer tối màu thấy được giảm về kích thước. Một số dấu vết của những gì xuất hiện cặn lỏng cũng được tìm thấy trong khảo sát này, nhưng ở mức độ thấp hơn so với khảo sát đầu tiên.

Cuộc khảo sát lần 3 được tiến hành vào tháng thứ 29 khi mà động cơ được tháo khảo sát để định mức hạn ngạch. Mức độ tiêu hao dầu bôi trơn của động cơ ổn định trong khoảng 0,43% mức độ của lần trước. Khu vực phía trên tại vị trí đảo ngược chuyển động của xéc măng được làm sạch bề hóng. Tuy nhiên cặn lacquer vẫn còn hiện diện tại vị trí đó, và sự dịch chuyển cặn đã được xác định là không có. So sánh về tình trạng trên được thể hiện trong hình 4.19.

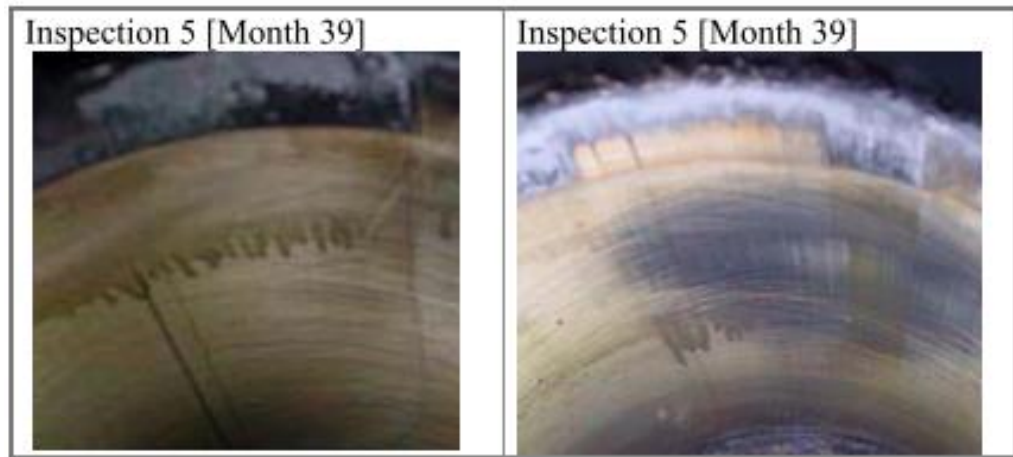
Chất phụ gia nhiên liệu được dùng hơn 4 tháng. Con tàu hoạt động liên tục, mực dầu trong két luôn được duy trì ở mức trên 50%. Khi thêm chất phụ gia vào nhiên liệu thì nó được tạm dừng để tiến hành hòa chọn các chất phụ gia vào trong két nhiên liệu trực nhật.

Do đó, xử lý chất phụ gia hiệu quả đã giảm nhanh chóng khi chất phụ gia được pha loãng và tiêu hao. Tính đến ngày 5 tháng 10 năm 2003, con tàu khảo sát đã hoạt động gần một tháng mà không cần thêm chất phụ gia mới. Ước tính rằng nồng độ chất phụ gia nhiên liệu có thể đã giảm xuống thấp hơn 6,25% so với trước đó.

Hình 4.20 cho thấy cặn tại vị trí đảo chuyển động của xéc măng lại xuất hiện trở lại và nó phát triển thành các chấm lacquer. Mức độ tiêu hao trung bình của dầu bôi trơn của tháng hiện tại và trước đó bằng 0,45% mức độ tiêu hao nhiên liệu.



Hình 4.20. Sự xuất hiện trở lại của cặn trong điều kiện sử dụng chất phụ gia không liên tục



Hình 4.21. Sự xuất hiện trở lại của cặn dịch chuyển rắn được quan sát thấy sau 6 tháng không sử dụng chất phụ gia nhiên liệu

Lần khảo sát thứ 5 và thứ 6 được tiến hành sau khi con tàu khai thác 6 tháng không sử dụng chất phụ gia trong nhiên liệu.

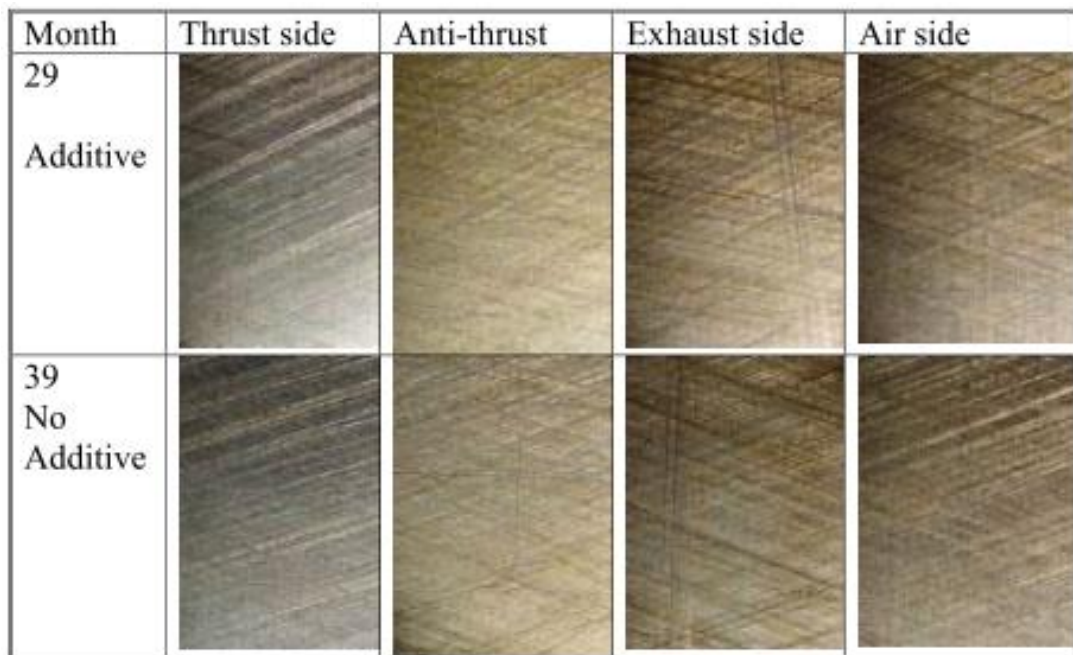
Cặn xuất hiện ở dạng lỏng tại lần quan sát vào lần khảo sát thứ 5, như hình 4.21. Một chi tiết thú vị trong bức ảnh bên phải của hình 4.22 đó là cặn được thấy chảy ra từ cặn đen ở trên vị trí đảo ngược chuyển động của xéc măng. Sự khác biệt của cặn trong piston gây mòn xung quanh chu vi ống lót không xuất hiện như một số giải thích được công bố trước đây về cặn ống lót, thực tế là hình dạng như giọt bất thường của cặn màu hổ phách kết thúc thấp hơn.

Bảng 4.7: Các hình ảnh cặn cặn của vùng phía trên

Month	Thrust side	Anti-thrust	Exhaust side	Air side
29 Additive				
39 No Additive				



Bảng 4.8: Các hình ảnh cận cảnh tại vị trí phía dưới đỉnh 10cm



Trong trường hợp nghiên cứu này, kỹ thuật chụp cận cảnh ống lót xy lanh được sử dụng. Tám vị trí trong xy lanh động cơ đã được nhận dạng theo tiến trình được mô tả trong phần các kỹ thuật phân tích.

Các bức ảnh chụp cận cảnh thể hiện sự khác biệt về độ sạch trên vị trí đảo ngược chuyển động của xéc măng, như trong bảng 4.7. Các bức hình đó cũng chỉ ra sự khác biệt về cấu trúc cặn xung quanh ống lót xy lanh. Rõ ràng cặn là hạt nhỏ khi nó không nằm tại mặt lắc và chống lắc của piston.

Các mẫu được thiết lập ở vị trí dưới 10cm so với đỉnh được thể hiện trong bảng 4.8. Những hình ảnh đó cho thấy sự không ảnh hưởng của xử lý chất phụ gia; tuy nhiên tại mặt lắc của piston được quan sát thấy các vệt cạo đáng kể, đó có thể là kết quả của mài bóng.

Các điều kiện trên ống lót sau 6 tháng không xử lý chất phụ gia nhiên liệu giống như những gì đã được quan sát trước khi xử lý phụ gia (trong sự hình thành cặn ống lót) đối với sự hình thành cặn vị trí đảo ngược dịch chuyển của xéc măng và cặn dịch chuyển nhìn thấy được. Tuy nhiên sự tiêu hao dầu bôi trơn không tăng đáng kể và lượng 'canxi trung gian' giảm.

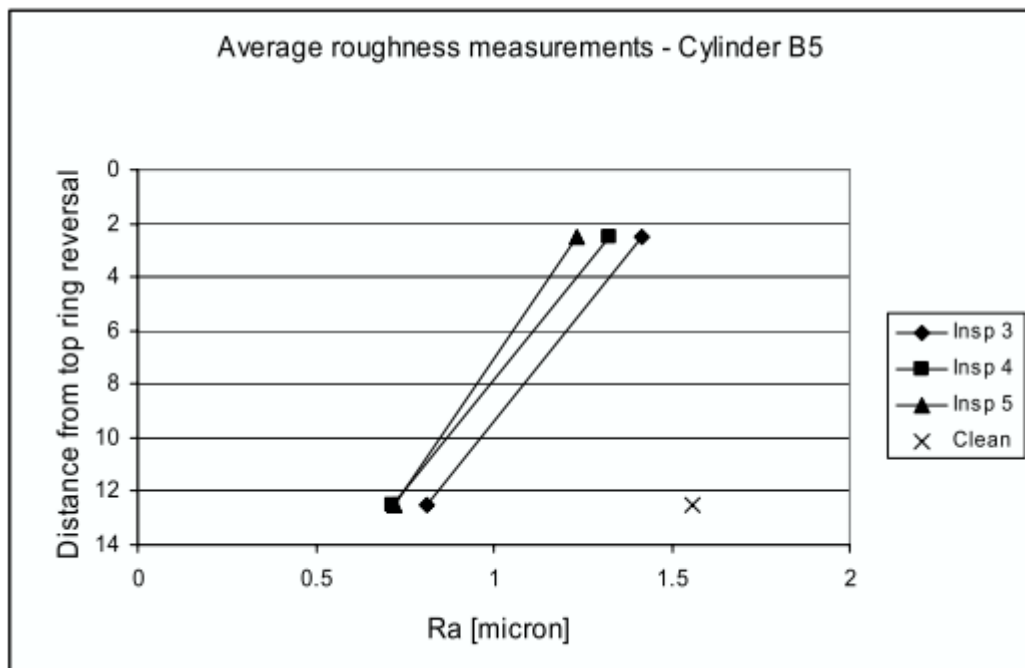
#### 4.2.9. Đo độ nhám bề mặt

Dữ liệu đo bề mặt nhận được từ động cơ này không được ghi nhận bằng hình ảnh hoặc xu hướng rõ ràng theo sự thay đổi chu vi ống lót. Tuy nhiên các dữ

liệu này cũng là thông số phù hợp khi tính trung bình chiều cao các nhấp nhô theo chu vi ống lót như hình 4.22.

Độ nhám bề mặt cao hơn tại đỉnh của ống lót và giảm xuống khi dịch xuống dưới, điều này phù hợp với các quan sát trên các động cơ khác. Đo độ nhám được bắt đầu ở giai đoạn sau trong nghiên cứu này, do đó các phép đo trước khi dùng chất phụ gia nhiên liệu là không phù hợp. Như đã trình bày trên, khảo sát lần ba được tiến hành khi đang sử dụng chất phụ gia trong nhiên liệu, khảo sát lần bốn được thực hiện sau một tháng kết thúc xử lý chất phụ gia trong nhiên liệu, khảo sát lần 5 được tiến hành sau 6 tháng không xử lý chất phụ gia nhiên liệu.

Độ nhám bề mặt trung bình thương giảm theo thời gian, đó là kết quả của sự mài bóng ở một số khu vực và cũng có thể là của các tích tụ về cặn. Làm sạch các vị trí thấp với axit axetic vào cuối đợt khảo sát này mang lại một sự gia tăng đáng kể độ nhám, do đó độ nhám bề mặt không hoàn toàn giảm ở phần dưới của ống lót khi sử dụng các nhiên liệu phụ gia. Đây cũng có thể giống trường hợp ở phần trên của ống lót mặc dù độ nhám bề mặt 'sạch' có thể thấp hơn ở phía trên; do đó như sự khác biệt về độ nhám-nếu tồn tại- nhỏ hơn ở phía trên hơn phía dưới.



Hình 4.22. Đo độ nhám trung bình xung quanh chu vi ống lót

#### 4.2.10. Đánh giá

Độ kiềm và lượng canxi bị hấp thụ vào dầu bôi trơn tăng trước khi sự tiêu hao dầu tăng. Điều đó là kết quả của sự tiêu hao do bay hơi thường gắn liền với sự tiêu hao dầu bôi trơn. Sự gia tăng các chất cặn bản trong nước biển làm mát gây

ra sự tăng nhiệt độ động cơ, điều này giải thích cho sự gia tăng các tiêu hao do bay hơi, tuy nhiên sự chênh lệch về nhiệt độ không được phát hiện ra cho tới tận sau này khi mà nồng độ kiềm tăng.

Tuy nhiên, nhiệt độ trên ống lót xy lanh tăng bao gồm cả sự gia tăng nồng độ trong dầu của các thành phần cặn như là canxi và các chất không bay hơi làm gia tăng sự hình thành cặn trên ống lót.

Các hình ảnh thu được từ khảo sát cho thấy khu vực phía trên xéc măng trên cùng hoạt động như là một nơi gom dầu, tại đó nhiên liệu và dầu bôi trơn có thể lưu trú và oxi hóa trước khi chảy xuống bề mặt ống lót xy lanh. Trong trường hợp này, cặn cacbon trong khu vực này tăng theo thời gian mà nhiên liệu và dầu bôi trơn tiêu hao tại đó, do đó gia tăng độ oxi hóa của các chất khi tiếp xúc với thành ống lót.

Các bức ảnh chụp được trong quá trình khảo sát cho thấy chất phụ gia trong nhiên liệu làm sạch hiệu quả khu vực phía trên vị trí đảo ngược chuyển động của xéc măng. Hiệu quả làm sạch mở rộng xuống cả khu vực phía dưới, nhưng các phép đo bề mặt chỉ ra rằng có một lượng cặn ống lót đáng kể vẫn còn lưu trú ở các vị trí thấp hơn trong quá trình xử lý chất phụ gia nhiên liệu. Từ mức độ tiêu hao dầu bôi trơn là ổn định, các cặn thấp đó có thể xem là cặn nghiêm trọng của động cơ.

Trong nghiên cứu này đã chứng minh một cách rõ ràng sự phức tạp của quá trình hình thành cặn. Một mặt cho thấy xử lý chất phụ gia trong nhiên liệu có hiệu quả trong việc làm sạch hoặc tẩy bỏ các cặn, mặt khác sự hình thành cặn không gây ra sự tiêu hao lớn dầu bôi trơn trong giai đoạn 6 tháng khảo sát không có xử lý chất phụ gia nhiên liệu. Có thể, sự hình thành cặn là rất chậm hoặc không tồn tại trong sự vắng mặt của các yếu tố kích thích như là sự gia tăng quá mức chất bẩn trong nước làm mát.

## KẾT LUẬN

1. Sự hình thành cặn trên ống lót xy lanh trong động cơ tàu thủy trung tốc đã được khảo sát. Cặn đó được tìm thấy ở mức độ hạn chế trong khu vực giữa hành trình của ống lót xy lanh của động cơ khai thác ở chế độ thấp tải. Chúng chứa lượng đa dạng các chất không tan trong dầu bôi trơn, bao gồm một lượng đáng kể canxi sunfat ngậm nước và các hạt kim loại do mài mòn.
2. Bên cạnh đó, cặn “bore glaze” không nhìn thấy trong nghiên cứu này bao gồm sắt sunfat, muối cacboxylat và bồ hóng (soot), trong đó chỉ ra các chất tẩy rửa có tính kiềm đã tiêu hao hoàn toàn, trong khi cặn lacquer của ống lót dạng màu hổ phách chứa nhiều thành phần oxy hóa của hydrocacbon. Sự chuyển đổi giữa cặn lacquer và cặn glaze thể hiện qua các vết trượt thu được trên hình ảnh khảo sát.
3. Nguồn gốc gây ra cặn ống lót là sự không phù hợp giữa quá trình oxy hóa và sự nhiễm bẩn đã tạo ra sức ép cho màng dầu bôi trơn trên ống lót và sự phân tán năng lượng và tỉ lệ chuyển đổi của bản thân nó.
4. Phương pháp cân bằng khối lượng hỗn hợp và động hóa học được dùng để lấp đầy khoảng trống giữa lý thuyết cặn cơ bản và các yếu tố xác thực. Nó góp phần vào việc hợp lý hóa sự hình thành cặn trên ống lót động cơ và chỉ ra mối liên hệ giữa các yếu tố hình thành cặn như là thiết kế động cơ, hoạt động và các thành phần nhiên liệu. Dựa trên các hiểu biết đó mà có thể xây dựng được các biện pháp ngăn chặn sự hình thành cặn và đồng thời đưa ra giả thuyết hợp lý về sự hình thành cặn thông qua các nội dung được thực hiện trong nghiên cứu này.
5. Sự hiện diện của cặn chỉ ra rằng sự phân tán năng lượng và tỉ lệ chuyển đổi của màng dầu bôi trơn là không đủ để giải thích cho sự hình thành các tiền tố cặn. Điều đó còn liên quan đến chế độ khai thác ở tải thấp, nó phù hợp với cả nhiệt độ thấp của ống lót và mức độ tiêu hao dầu định danh thấp của động cơ. Nhiệt độ ống lót thấp sẽ thúc đẩy sự hình thành canxi sunfat do sự ngưng tụ của các tiền tố axit sunfuric trong khi mức dầu tiêu hao thấp chứng tỏ sự vận chuyển màng dầu chậm. Sự chuyển đổi màng dầu chậm sẽ góp phần oxy hóa màng dầu do sự kéo dài thời gian tiếp xúc với khí thể công tác trong buồng cháy.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Kalghatgi GT, Sutkowski A, Pace S, Schwahn H, Nierhauve B. ASTM unwashed gum and the propensity of a fuel to form combustion chamber deposit. SAE paper 2000; No. 2000-01-2026.
- [2] Hopwood AB, Chynoweth S, Kalghatgi GT. A technique to measure thermal diffusivity and thickness of combustion chamber deposits in-situ. SAE paper 1998; No. 982590.
- [3] Hutchings M, Chasan D, Burke R, Odorisio P, Rovani M, Wang W. Heavy duty diesel deposit control...Preventive as a cure. SAE paper 1997; No.972954.
- [4] Tarkowski P, Sarzynski J, Budzynski J, Paluch R, Wiertel M. Influence of the kind of fuel oil on the deposit composition in the diesel engine combustion chamber. Fuel 2001; 80: 1399-1403.
- [5] Jonkers RK, Bardon MF, Gardiner DP. Techniques for predicting combustion chamber deposits in a direct injection diesel engine. SAE paper 2002; No.2002-01-2673.
- [6] Morin C, Chauveau C, Gokalp I. Droplet vaporization characteristic of vegetable oil derived biofuels at high temperatures. Experimental Thermal and Fluid Science 2000; 21: 41-50.
- [7] Elkotb MM, Aly SL, Elsalrawy HA. Evaporation characteristics of fuel and multifuel droplets. Combustion and Flame 1991; 85: 300-308.
- [8] Renksizbulut M and Bussman M. Multicomponent droplet evaporation at intermediate Reynolds numbers. Int. J. Heat Mass Transfer 1993; 36: 2827-2835.
- [9] Tong AY. Multicomponent droplet vaporization in a high temperature gas. Combustion and Flame 1986; 66: 221-235.
- [10] Hallett WLH. A simple model for the vaporization of droplets with large numbers of components. Combustion and Flame 2000; 121: 334-344.
- [11] Sazhin S. Modelling of heating, evaporation and ignition of fuel droplets: combined analytical, asymptotic and numerical analysis. Journal of Physics: Conference Series 2005; 22: 174-193.
- [12] Kneer R, Schneider M, Noll B, Wittig S. Diffusion controlled evaporation of a multicomponents droplet: theoretical studies on the importance of variable liquid properties. Int. J. Heat Mass Transfer 1993; 36: 2403-2415.
- [13] Shurvell HF, Clague ADH, Southby MC. Method for determination of the composition of diesel engine piston deposits by infrared spectroscopy. Journal of Applied Spectroscopy 1997; 51(6):827-835.
- [14] Guralp O, Hoffman M, Assanis D, Filipi Z, Kuo TW, Najt P, Rask R. Characterizing the effect of combustion chamber deposits on a gasoline HCCI engine. SAE paper 2006; No.2006-01-3277.
- [15] Ye Z, Meng Q, Mohamadia HP, Wang JT, Chen L, Zhu L. Investigation of deposits formation mechanisms for engine in-cylinder combustion and

- exhaust system using quantitative analysis and sustainability study. *Int. J. Thermophys* 2007; 28: 1056-1066.
- [16] Kalghatgi GT. Combustion chamber deposit flaking- Studies using a road test procedure. SAE paper 2002; No.2002-01-2833.
- [17] Hoard J and Moilanen P. Exhaust valve seat leakage. SAE paper 1997; No.971638.
- [18] Kalghatgi GT and Price RJ. Combustion chamber deposit flaking. SAE paper 2000; No. 2000-01-2858.
- [19] Muzikus SM, Fedorov MI, Frolov EI. Standard allowable limit for carbon-deposit formation in diesel engines. *Khimiya I Teknologiya Topliv I Masel* 1975; No. 10: 55-56.
- [20] Artemiev VA. Evaluation of thermodynamic processes of carbon deposition on diesel pistons. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 1998; 34 (5): 280-284.
- [21] Devlin MT, Baren RE, Sheets RM, McIntosh K, Turner TL and Jao T-C. Characterization of deposits formed on sequence IIIG pistons. SAE paper 2005; No.2005-01-3820.
- [22] Eilts P. Investigation on deposit formation during low load operation of high supercharged diesel engines. *Int. Symposium COMODIA90*: 517-522 (1990).
- [23] Lepperhoff G and Houben M. Mechanisms of deposit formation in internal combustion engines and heat exchangers. SAE paper 1993; No.931032.
- [24] Ullmann J, Geduldig M, Stutzenberger H, Caprotti R, Balfour G. Investigation into formation and prevention of internal diesel injector deposits. SAE paper 2008; No.2008-01-0926.
- [25] Jonkers RK, Bardon MF, Gardiner DP. Techniques for predicting combustion chamber deposits in a direct injection diesel engine. SAE paper 2002; No.2002-01-2673.
- [26] Fukui M, Sato T, Fujita N, Kitano M. Examination of lubricant oil components affecting the formation of combustion chamber deposit in two-stroke engine. *JSAE* 2001; 22: 281-285.
- [27] Diaby M, Sablier M, Le Negrate A, El Fassi M, Bocquet J. Understanding carbonaceous deposit formation resulting from engine oil degradation. *Carbon* 2009; 47: 355-366.
- [28] McGeehan JA and Fontana BJ. Effect of soot on piston deposits and crankcase oils- Infrared spectrometric technique for analyzing soot. SAE paper 1980; No. 801368.
- [29] Ra Y, Reitz RD, Jarret MW, Shyu TP. Effects of piston crevice flows and lubricant oil vaporization on diesel engine deposits. SAE paper 2006; No.2006-01-1149.
- [30] Leedham A, Caprotti R, Graupner O, Klaua T. Impact of fuel additives on diesel injector deposits. SAE paper 2004; No. 2004-01-2935.

- [31] Ebert LB. Chemistry of engine combustion deposits, New York: Plenum Press, 1985.
- [32] Cloud GH and Blackwood AJ. The influence of diesel fuel on engine deposits and wear. SAE Journal (Transactions) 1943; 51 (11).
- [33] Moore SM, Sabourin ET, Yeh SW. Extended abstract, 1st International Colloquium, Germany: Technische Akademie Esslingen 1997;73.
- [34] Zerda TW, Yuan X, Moore SM. Effects of fuel additives on the microstructure of combustion engine deposits. Carbon 2001; 39: 1589-1597.
- [35] Nagao F, Ikegami M, Tokunaga A. Temperature dependence of carbon deposits in diesel combustion chamber. The Japan Society of Mechanical Engineers 1966; 9 (35): 573-579.
- [36] Daly DT, Fog DA, Bannon SA, Harold SM. Mechanism of combustion chamber deposit formation. SAE paper 1994; No. 941889.
- [37] Nishiwaki K and Hafnan M. The determination of thermal properties of engine combustion chamber deposits. SAE paper 2000; No. 2000-01-1215
- [38] Bos, A B F, Verhelst, A, Voogdt, D, Cannon, MJ. Mechanisms of loss of oil consumption control during operation of medium speed diesel engines. CEC IL-21 Investigation Report rev 6. February 1993
- [39] Hans Van Bodegraven Diesel Combustion Performance and related damages influenced by fuel oil/lubricating oil/engine design. D. Touw Expertise-En Ingenieursbureau BV.Havenstraete ZZ10 38 HH Rotterdam.
- [40] Japanese marine engineering society. Annual Review of the Bulletin of Japanese marine engineering society. Bulletin of the MESJ Vol 27. No 2. The Japan Institution of Marine Engineering. 1998
- [41] Allen, R.W. The influence of Marine Fuel Quality on Lubricatin Oil Performance. 20th CIMAC world congress. London 1993.
- [42] Cannon, MJ, Logtenberg, J, Dilks, A. Cylinder liner lacquering in high output medium speed diesel engines. Shell Marine Service Publication.
- [43] Sayles R. S. A Case study of cylinder liner wear in relation to 'varnish' films in a large long stroke marine diesel engine. SAE Paper 2000-01-1783. Warrendale, PA. 2000.
- [44] BP Chemicals Ltd. Process for reducing liner lacquering in a marine diesel engine and a fuel therefor. International patent application WO 96/15209. May 23 1996.
- [45] Products Serviced notice 'Cure for liner lacquering problems' MER - Marine Engineering Review pp50. April 1995.
- [46] McGeehan J. A., Fontana B. J., Kramer J. D., The effects of piston temperature and fuel sulfur on diesel engine deposits. SAE paper 821216 Society of Automotive Engineeres, Warrendale, PA. 1982
- [47] Heywood, J. B., Internal combustion engine fundamentals. ISBN 0-07-100499-8, McGraw Hill International Editions 1988.

- [48] Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. (ed.), Combustion ISBN 3-540-65228-0 Springer 1999
- [49] Mortier R. M., Orszulik S. T., Chemistry and Technology of lubricants. 2.ed. ISBN 0 7514 0246 X, Blackie Academic and Professional. Chapman & Hall 1997
- [50] Malville X., Faure D., Legros A., Hipeaux J. C., Oxidation of Mineral Base oils of petroleum origin: The relationship between chemical composition, thickening, and composition of degradation products. Lubrication Science, 9-1 1996.
- [51] Caines A., Haycook R., Automotive lubricants reference book ISBN 1 86058 049 1, Mechanical Engineering Publications, 1996
- [52] Denis J., Briant J., Hipeaux J. C., Lubricant Properties analysis and testing. ISBN 2-7108-0746-7, Editions Technip 2000
- [53] Denis J., Briant J., Hipeaux J. C., Lubricant Properties analysis and testing. ISBN 2-7108-0746-7, Editions Technip 2000
- [54] Guohua C., Wang V. W, Heywood J. B. A study of a multidimensional instantaneous heat transfer model for the combustion chamber of a diesel engine. Paper D55 CIMAC 1991
- [55] Miyazaki M, Takeshima A, Okuyama S, Tanaka M. Evaluation of marine engine lubricating conditions using a cylinder liner surface oil sampling apparatus. CIMAC 1993 Paper D 27
- [56] Fox M. F., Jones C. J., Hickford D., Picken D. J., Kelley F. A., Copp D. E., Lubricant Mechanisms and Degradation in the ring pack of operating diesel engines. Proceedings of annual automotive technology development contractors coordinating meeting, Dearborn MI. SAE SP-289, ISBN 1-56091-654-0, 1995.
- [57] Thompson, D M. Nattrass S.R. Full mid IR spectral characterization of lubricant in the ring pack of a running diesel engine by time-resolved FTIR spectrometry. SAE962003, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1996
- [58] Takiguchi M., Sasaki R. Takahashi I., Ishibashi F., Furuhamas S., Kai R., Sato M., Oil film thickness measurement and analysis of a three ring pack in an operating diesel engine SAE 2000-01-1787, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 2000
- [59] Moore S., Oil film thickness measurement and analysis of a three ring pack in an operating diesel engine. Congres International des Machines a Combustion (CIMAC) Volume 3 page 575-586 (1998)
- [60] Lux J. P., Hoult D. P., Olechowski M. J., Lubricant film thickness measurements in a diesel engine piston ring zone. Lubrication Engineering 47, 5, 353-364.