

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả trình bày trong Luận án này là trung thực và chưa được ai công bố trong bất cứ công trình nào khác.

Tôi xin cam đoan rằng mọi sự giúp đỡ cho việc thực hiện luận án này đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong luận án đều được chỉ rõ nguồn gốc.

Hải Phòng, ngày 26 tháng 03 năm 2019

Tác giả



Phạm Văn Việt

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin chân thành cảm ơn Ban Giám hiệu, Viện Đào tạo Sau đại học, tập thể giảng viên Khoa Máy tàu biển và Viện Cơ khí - Trường Đại học Hàng hải Việt Nam; Ban chủ nhiệm Viện Cơ khí Động lực, Bộ môn Động cơ đốt trong - Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, luôn dành cho tôi những điều kiện hết sức thuận lợi để hoàn thành Luận án.

Tôi xin tỏ lòng kính trọng và chân thành biết ơn GS.TS. Lương Công Nhó, PGS.TS Trần Quang Vinh đã nhận hướng dẫn tôi thực hiện Luận án này.

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến quý Thầy phản biện, quý Thầy trong Hội đồng chấm Luận án đã đồng ý đọc, duyệt và đóng góp ý kiến để tôi hoàn chỉnh Luận án và định hướng nghiên cứu trong tương lai. Tôi xin chân thành cảm ơn gia đình, đồng nghiệp và thân hữu đã ủng hộ, động viên tôi trong suốt thời gian thực hiện Luận án này.

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT	vi
THUẬT NGỮ VÀ KÍ HIỆU	viii
DANH MỤC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ	xii
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	xv
MỞ ĐẦU	xvii
i. Lý do chọn đề tài.....	xvii
ii. Mục tiêu của đề tài	xvii
iii. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của đề tài	xviii
iv. Phương pháp nghiên cứu của đề tài	xviii
v. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài	xix
vi. Điểm mới của luận án	xix
vii. Bố cục chính của luận án	xix
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	1
1.1. Cặn lắng trong buồng cháy động cơ.....	1
1.1.1. Đặc điểm của cặn lắng.....	1
1.1.2. Yếu tố hình thành cặn lắng	8
1.1.3. Các tác động xấu của cặn lắng đến động cơ.....	14
1.2. Tổng quan về tình hình nghiên cứu cặn lắng trong động cơ.....	18
1.3. Kết luận chương	22
CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT SỰ HÌNH THÀNH CẶN LẮNG TRONG BUỒNG CHÁY ĐỘNG CƠ DIESEL	24
2.1. Cơ sở lý thuyết về sự hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ	24
2.1.1. Lý thuyết về sự hình thành và lắng đọng của các hạt.....	24
2.1.2. Lý thuyết sự hình thành màng lỏng khi giọt tương tác với vách.....	26
2.1.3. Lý thuyết cơ chế hình thành soot.....	34

2.1.4. Giả thuyết cơ chế hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ.....	38
2.2. Phương pháp nghiên cứu cặn lắng trong buồng cháy động cơ	45
2.2.1. Phương pháp thực nghiệm.....	45
2.2.2. Phương pháp số	47
2.2.3. Phương pháp qui hoạch thực nghiệm	47
2.3. Kết luận chương	56
CHƯƠNG 3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM TẠO CẶN LẮNG TRÊN VÁCH BUỒNG CHÁY	57
3.1. Đặt vấn đề.....	57
3.1.1. Giới thiệu chung	57
3.1.2. Mục tiêu.....	60
3.1.3. Cơ sở thiết kế.....	61
3.2. Xây dựng mô hình thực nghiệm.....	63
3.2.1. Thiết lập mô hình.....	63
3.2.2. Trang thiết bị	66
3.2.3. Quy trình và chế độ thử nghiệm	68
3.3. Mô hình thực nghiệm đối chứng TNCBC.....	72
3.3.1. Mô hình và trang thiết bị	73
3.3.2. Quy trình thử nghiệm	74
3.4. Phương trình hồi quy của sự hình thành và phát triển cặn lắng.....	74
3.4.1. Mô hình toán mô tả sự hình thành và phát triển cặn lắng của mô hình TNCMH 75	
3.4.2. Mô hình toán mô tả sự hình thành và phát triển cặn lắng của mô hình TNCBC .	80
3.5. Tính tương đồng giữa mô hình TNCMH và TNCBC	81
3.5.1. Sự phát triển của cặn lắng.....	82
3.5.2. Điều kiện thử nghiệm	83
3.6. Kết luận chương	85
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM.....	86
4.1. Phương pháp và quy trình thử nghiệm tạo cặn lắng trên bề mặt vách buồng cháy	86
4.1.1. Quy trình và điều kiện thử nghiệm.....	86
4.1.2. Đặc tính bay hơi của các nhiên liệu thử nghiệm	87

4.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ vách buồng cháy đến sự hình thành và phát triển cặn lắng	92
4.2.1. Khối lượng cặn lắng tích lũy	93
4.2.2. Cấu trúc của lớp cặn	96
4.2.3. Nhiệt độ lớp cặn.....	97
4.2.4. Hàm tỷ lệ tạo cặn xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ vách buồng cháy.....	99
4.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của thành phần nhiên liệu đến sự hình thành và phát triển cặn lắng.....	102
4.3.1. Khối lượng cặn tích lũy	102
4.3.2. Tính chất của lớp cặn.....	106
4.3.3. Cơ chế hình thành cặn lắng	109
4.3.4. Hàm tỷ lệ tạo cặn xét đến ảnh hưởng của thành phần nhiên liệu	113
4.4. Nghiên cứu ảnh hưởng của lượng dầu bôi trơn trong buồng cháy đến sự hình thành và phát triển cặn lắng	115
4.4.1. Khối lượng cặn tích lũy	115
4.4.2. Nhiệt độ lớp cặn.....	116
4.4.3. Hàm tỷ lệ tạo cặn xét đến ảnh hưởng của lượng dầu bôi trơn trong buồng cháy	118
4.5. Kết luận chương	119
KẾT LUẬN	122
HƯỚNG PHÁT TRIỂN	124
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ	125
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	127
PHỤ LỤC	136

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Kí hiệu	Tiếng Anh	Tiếng Việt
Å	Ångström	Đơn vị độ dài
AIC	Akaike info criterion	Tiêu chuẩn thông kê Akaike
A/F	Air/fuel	Tỷ số không khí/nhiên liệu
B100C		Nhiên liệu 100% dầu dừa
B100		Nhiên liệu 100% dầu cọ
B50		Nhiên liệu diesel pha trộn với 50% khối lượng B100
B20		Nhiên liệu diesel pha trộn với 20% khối lượng B100
B5		Nhiên liệu diesel pha trộn với 5% khối lượng B100
CCD	Combustion chamber deposit	Cặn lắng buồng cháy
CHEMKIN		Phần mềm mô phỏng các phản ứng hóa học của quá trình cháy
CME	Coconut methyl ester	Dầu dừa
CPO	Crude palm oil	Dầu cọ thô
DI	Direct injection	Phun trực tiếp
DDC	Dodecane (C ₁₂ H ₂₆)	
DO		Nhiên liệu diesel
DO+1%L		Dầu diesel pha trộn với 1% dầu bôi trơn về khối lượng
DO+2%L		Dầu diesel pha trộn với 2% dầu bôi trơn về khối lượng
ESR	Electron spin resonance	Sự cộng hưởng chuyển động quay của điện tử
FTIR	Fourier Transform Infra-Red	Phân tích hồng ngoại biến đổi Fourier
fps	Frame per second	Số khung hình trên giây
HC	Hydrocarbon	Phát thải hydrocacbon

HCCI	Homogeneous charge compression ignition	Động cơ nén cháy hỗn hợp đồng nhất
LO	Lubricated oil	Dầu bôi trơn
MEP	Maximum evaporation rate point	Điểm có tốc độ hóa hơi cực đại
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Cơ quan hàng không, vũ trụ quốc gia Hoa Kỳ
Pb		Chì
PBA	Polybutane amine-based additive	Phụ gia gốc polybutan amin
PEA	Polyether amine-based additive	Phụ gia gốc polyeste amin
PM	Particulate matter	Phát thải hạt
PME	Palm methyl ester	Metyl este dầu cọ
OH		Gốc hiđroxit
R		Ngôn ngữ lập trình R
SI	Spark ignition	Cháy cưỡng bức (đánh lửa)
SEM	Scanning Electron Microscopes	Kính hiển vi điện tử quét
tb		Trung bình
TEM	Transmission electron microscopy	Kính hiển vi điện tử truyền dẫn
TGA	Thermo-Gravimetric	Phương pháp phân tích nhiệt
TNCBC		Thử nghiệm xác định lượng cặn buồng cháy động cơ thực
TNCMH		Thử nghiệm tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy

THUẬT NGỮ VÀ KÍ HIỆU

Kí hiệu	Giải thích	Đơn vị
a	Hệ số của phương trình Arrhenius	
A_i	Giá trị thực nghiệm thứ i	
\bar{A}	Giá trị thực nghiệm trung bình	
B_i	Số Biot	
b	Hệ số của phương trình Arrhenius	
C	Hằng số không thứ nguyên xét đến khuếch tán	
c	Số lượng kích thước riêng phần	
d	Đường kính hạt soot	mm
D_a	Số Damkohler	
D_d	Đường kính của giọt nhiên liệu	mm
d_c	Đường kính xilanh	m
D_i	Hệ số khuếch tán riêng phần của chất i	
D_0	Kích thước ban đầu của giọt	mm
D_p	Hệ số khuếch tán	
d_p	Đường kính của hạt	m
$\frac{dN}{dt}$	Tốc độ kết tụ của các hạt soot	m/s
E_a	Năng lượng kích hoạt phản ứng	J
f	Tần suất va chạm của giọt với vách	
f_s	Hệ số “hút nhiệt”	
g	Gia tốc trọng trường	m/s^2
G'	Hệ số xét đến sự gia tăng sự va chạm do lực điện từ và phân tán	
h_{LF}	Độ dày của lớp chất lỏng	mm
k	Hằng số Boltzmann	
k_c	Hệ số truyền nhiệt của xilanh	W/Km
Kn	Hệ số dòng trượt	
k_g	Hệ số truyền nhiệt của khí thể trong xilanh	W/Km
k_p	Hệ số mật độ phân tử khí	

k_{tn}	Hệ số kết tụ của các hạt soot	
$k_a, k_b, k_t,$	Các hệ số thực nghiệm liên quan đến hệ số tốc độ cho các	
k_z	phản ứng thay đổi trong cơ chế	
K_{rc}	Tiêu chuẩn không thứ nguyên về kích thước giọt	
L_h	Khoảng cách từ đầu kim đến tâm bề mặt mô hình vách	mm
l_r	Chiều dài của độ nhám	mm
M_R	Tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách	g
M_D	Tổng khối lượng các giọt nhiên liệu	g
M_d	Khối lượng tích lũy của các giọt nhiên liệu	g
m_D	Khối lượng của một giọt nhiên liệu	g
N	Mật độ số lượng hạt soot	
N_D	Số giọt nhiên liệu va chạm với bề mặt	
Nu_m	Hệ số đặc trưng cho tác động đồng thời của sự khuếch tán	
N_{sd}	Không thứ nguyên của hiệu ứng khuếch tán	
N_{se}	Không thứ nguyên của hiệu ứng điện di	
N_{st}	Không thứ nguyên của khuếch tán nhiệt Stokes	
N_{sg}	Không thứ nguyên khi xét đến trọng lực	
Oh	Số không thứ nguyên Ohnesorge	
p	Số lượng nút lưới trên mỗi chiều	
Pe_s	Số Peclet	
P_i	Áp suất riêng phần của chất i	MPa
r	Hệ số tương quan	
R	Tham số tổng hợp liên quan đến hiệu suất thu thập sự lắng đọng hạt trên một xilanh	
Re_c	Hệ số xét đến sự đồng dạng về đường kính	
R^2	Tổng bình phương sai số	
St_k	Không thứ nguyên Stokes	
R_s	Độ nhám bề mặt	
T	Nhiệt độ trong xilanh	K
t	Thời gian xét đến sự chuyển động ngẫu nhiên của hạt	s

t_c	Thời gian tính toán trong mô hình 1 chiều	s
t_{dmax}	Giá trị kiểm định phân phối Student	
t_{MEP}	Nhiệt độ MEP	°C
t_{ct}	Nhiệt độ chỉ thị	°C
t_{bm}	Nhiệt độ bề mặt vách	°C
t_c	Nhiệt độ bề mặt cặn	°C
$t_{vách}$	Nhiệt độ bề mặt vách sạch	°C
T90	Nhiệt độ chưng cất 90%	°C
T_{PA}	Nhiệt độ khi chất lỏng ở trạng thái bám dính hoàn toàn	°C
T_c	Nhiệt độ xilanh	°C
T_g	Nhiệt độ khí thể trong xilanh	°C
T_{sat}	Nhiệt độ bão hòa	°C
T_{crit}	Nhiệt độ tới hạn	°C
T_{leid}	Nhiệt độ Leidenfrost	°C
T_W	Nhiệt độ vách được hâm nóng	°C
Δt	Nhiệt độ thứ cấp ($t_{bm} - t_{MEP}$)	°C
U_{cr}	Vận tốc của giọt	m/s
v_0	Tốc độ tương đối của hạt soot	m/s
x_0	Khoảng cách giới hạn từ bề mặt xilanh	mm
x_i	Các yếu tố đầu vào (điều khiển)	
\bar{x}	Sự dịch chuyển do chuyển động ngẫu nhiên của hạt soot	mm
y_i	Thông số tối ưu	
We	Số không thứ nguyên Weber	
W_c	Khối lượng phân tử C	
W_i	Đại lượng ngẫu nhiên	
α	Hệ số đặc trưng cho sự tạo cặn ban đầu	
α_1	Hệ số đặc trưng cho sự tạo cặn ban đầu xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ bề mặt vách	
α_2	Hệ số đặc trưng cho sự tạo cặn ban đầu xét đến ảnh hưởng của nhiên liệu	

α_3	Hệ số đặc trưng cho sự tạo cặn ban đầu xét đến ảnh hưởng của dầu bôi trơn	
α	Hệ số liên quan đến sự đa tán sắc tự nhiên của hệ thống	
α_T	Hệ số tỏa nhiệt	W/m ² K
α_{bd}	Hệ số đặc trưng cho sự tạo cặn ban đầu ở giai đoạn đầu	
α_s	Hệ số đặc trưng cho sự tạo cặn ban đầu ở giai đoạn sau	
β	Hệ số đặc trưng cho sự phát triển cặn	
β_1	Hệ số đặc trưng cho sự phát triển cặn xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ bề mặt vách	
β_2	Hệ số đặc trưng cho sự phát triển cặn xét đến ảnh hưởng của nhiên liệu	
β_3	Hệ số đặc trưng cho sự phát triển cặn xét đến ảnh hưởng của dầu bôi trơn	
β_{bd}	Hệ số đặc trưng cho sự phát triển cặn ở giai đoạn đầu	
β_s	Hệ số đặc trưng cho sự phát triển cặn ở giai đoạn sau	
σ_n	Độ lệch ước lượng của tập hợp mẫu	
ε_0	Hệ số điện môi	
ε_d	Tốc độ tiêu hao năng lượng rời	
δ	Độ dày của màng chất lỏng	mm
μ	Độ nhớt động học	Pa s
$\eta_{0,D}$	Hiệu suất thu thập hạt của khuếch tán Brown	
$\eta_{0,I}$	Hiệu suất thu thập hạt của cơ chế điện di	
ρ	Mật độ hạt	
ρ_p	Khối lượng riêng của hạt	kg/m ³
ρ_{nl}	Khối lượng riêng của nhiên liệu	kgm ⁻³
\emptyset	Phân lượng thể tích soot	
ϕ	Phân lượng thể tích của pha lơ lửng	
τ_{tt}	Thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu	giây
τ_{vc}	Thời gian va chạm	giây
$\nu_{trộn}$	Độ nhớt động học của nhiên liệu DO hòa trộn với dầu bôi trơn	mm ² /s
ω	Tốc độ oxi hóa bề mặt	

DANH MỤC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

Hình 1.1. Cặn lắng trên các vị trí khác nhau của buồng cháy.....	1
Hình 1.2. Ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu bôi trơn đến lượng cặn tích lũy	3
Hình 1.3. Lượng kềm hấp thụ bởi phụ gia dầu bôi trơn	4
Hình 1.4. Sự phân bố kích thước lỗ xốp của cặn buồng cháy	5
Hình 1.5. Tương quan kích thước lỗ cặn với nhiên liệu có phụ gia	6
Hình 1.6. Cấu trúc lớp cặn.....	6
Hình 1.7. Sự sụt giảm khả năng dẫn điện khi cặn tích tụ	7
Hình 1.8. Độ dẫn nhiệt phụ thuộc độ dày lớp cặn trên nắp xilanh	8
Hình 1.9. Sự hình thành cặn trên bề mặt piston	10
Hình 1.10. Quan hệ giữa nhiệt độ vòi phun và sự sụt giảm dòng nhiên liệu	11
Hình 1.11. Ảnh hưởng của dòng chảy chất lỏng đến sự hình thành cặn.....	12
Hình 1.12. Tương quan giữa lượng cặn và nhiệt độ piston	13
Hình 1.13. Ảnh hưởng của tốc độ động cơ đến sự hình thành cặn	13
Hình 1.14. Sự truyền nhiệt của lớp cặn	15
Hình 1.15. Sự tương quan giữa khối lượng cặn và lượng phát thải HC.....	17
Hình 2.1. Sự sôi và thời gian tồn tại của giọt chất lỏng	31
Hình 2.2. Mối quan hệ giữa We và T_w	34
Hình 2.3. Cơ chế hình thành hạt soot trong buồng cháy	35
Hình 2.4. Cấu trúc của hạt cacbon.....	36
Hình 2.5. Giả thuyết cơ chế hình thành cặn lắng trong buồng cháy	39
Hình 2.6. Mô hình một chiều.....	40
Hình 2.7. Giả thuyết cơ chế hình thành và loại bỏ cặn trong buồng cháy	42
Hình 2.8. Hình chiếu SEM của cặn trên xéc măng thứ nhất	46
Hình 2.9. Sơ đồ hộp đen	49
Hình 2.10. Đồ thị phân phối Student.....	51
Hình 3.1. Quá trình hình thành cặn trên bề mặt vách buồng cháy động cơ	57
Hình 3.2. Quá trình tích tụ cặn lắng trên bề mặt vách.....	59

Hình 3.3. Quá trình nghiên cứu sự hình thành cặn lắng.....	60
Hình 3.4. Sơ đồ thử nghiệm tạo cặn trên mô hình bề mặt vách buồng cháy.....	64
Hình 3.5. Bộ thiết bị thử nghiệm TNCMH	65
Hình 3.6. Mô hình TNCMH	65
Hình 3.7. Trang thiết bị của TNCMH	66
Hình 3.8. Đặc tính bay hơi chung của nhiên liệu trong thử nghiệm	69
Hình 3.9. Đặc tính bay hơi của các giọt nhiên liệu DO đơn và kép.....	70
Hình 3.10. Sự tương quan về nhiệt độ T_i và T_s	71
Hình 3.11. Quá trình đo nhiệt độ bề mặt cặn.....	72
Hình 3.12. Bảng thử động cơ DY41DS.....	73
Hình 3.13. Bố trí thiết bị trên động cơ DY41DS.....	74
Hình 3.14. Tương quan về sự phát triển cặn dựa trên dữ liệu M_R	77
Hình 3.15. Tương quan về sự phát triển cặn dựa trên dữ liệu tương đối M_R / M_D	78
Hình 3.16. Tương quan về sự phát triển cặn với dữ liệu tương đối M_R / M_d	79
Hình 3.17. Tương quan về sự phát triển cặn với dữ liệu tương đối M_R / m_D	79
Hình 3.18. Sự phát triển của cặn DO và hỗn hợp DO với SAE30 trong TNCBC	81
Hình 3.19. So sánh giá trị α và β	83
Hình 3.20. Cách thức tương tác của hạt nhiên liệu trên bề mặt vách.....	84
Hình 4.1. Thiết bị trong quá trình thử nghiệm TNCMH.....	86
Hình 4.2. Đặc tính bay hơi của dodecane.....	88
Hình 4.3. Đặc tính bay hơi nhiên liệu diesel DO	89
Hình 4.4. Đặc tính bay hơi của DO, B100, B50, B20 và B5.....	90
Hình 4.5. Đặc tính bay hơi của DO, DO+1%L và DO+2%L.....	92
Hình 4.6. Phát triển cặn DO ở nhiệt độ bề mặt vách khác nhau	93
Hình 4.7. Các dạng phát triển của cặn.....	94
Hình 4.8. Cặn nhiên liệu diesel tại 1000 và 9000 giọt có dạng phát triển.....	95
Hình 4.9. Cặn nhiên liệu diesel tại 1000 và 9000 giọt có dạng phát triển.....	96
Hình 4.10. Cấu trúc của cặn DO tại $t_{bm} = 367^\circ\text{C}$ với 19000 giọt.....	97

Hình 4.11. Nhiệt độ bề mặt cặn và thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu	98
Hình 4.12. Giá trị α và β tại những mức nhiệt độ thứ cấp khác nhau	100
Hình 4.13. Phát triển cặn tại $\tau_{vc} = 5s$	103
Hình 4.14. Phát triển cặn tại $\tau_{vc} = 8s$	104
Hình 4.15. Sự phát triển cặn DO ở nhiệt độ và khoảng thời gian va chạm.....	105
Hình 4.16. Cặn B100, B50, B20 và B5 tại 3000 và 8000 giọt với $\tau_{vc} = 5s$,	107
Hình 4.17. Cặn B100, B50, B20 và B5 tại 3000 và 8000 giọt với $\tau_{vc} = 8s$,.....	108
Hình 4.18. Cặn DO tại 3000 và 8000 giọt $\tau_{vc} = 5s$, $t_{bm}=306^{\circ}C$	109
Hình 4.19. Nhiệt độ bề mặt cặn B100 và DO, thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu ..	110
Hình 4.20. Nhiệt độ bề mặt cặn B100, B50, B20 và B5 với $\tau_{vc} = 5s$ và $\tau_{vc} = 8s$	112
Hình 4.21. Lượng cặn DO, DO+1%L, DO+2%L trong TNCMH	116
Hình 4.22. Nhiệt độ bề mặt cặn trong TNCMH	117
Hình 4.23. So sánh giá trị của α_3 và β_3	118
Hình PL 1. Kết quả thực nghiệm bằng mô hình TNCMH được xác nhận bởi chỉ cục tiêu chuẩn đo lường chất lượng Hải Phòng	24/PL
Hình PL 2. Hình dạng và vị trí của chốt trên nắp xi lanh.....	25/PL
Hình PL 3. Kích thước và vị trí chốt trên động cơ DY41DS	25/PL
Hình PL 4. Bản vẽ thiết kế mô hình thử nghiệm TNCMH	26/PL
Hình PL 5. Bản vẽ các chi tiết trong mô hình thử nghiệm TNCMH	27/PL
Hình PL 6. Bản vẽ thiết kế kết cấu chứa nhiên liệu của mô hình thử nghiệm.....	28/PL
Hình PL 7. Hình ảnh mô hình TNCMH khi bắt đầu quá trình thử nghiệm	29/PL
Hình PL 8. Hình ảnh mô hình TNCMH khi có cặn.....	29/PL
Hình PL 9. Hình ảnh mô hình TNCMH khi có cặn.....	30/PL
Hình PL 10. Hình ảnh toàn mô hình TNCMH	30/PL
Hình PL 11. Hình ảnh trang thiết bị mô hình TNCMH	31/PL
Hình PL 12. Hình ảnh trang thiết bị mô hình TNCMH	31/PL
Hình PL 13. Hình ảnh tác giả thực hiện thử nghiệm.....	32/PL
Hình PL 14. Hình ảnh tác giả thực hiện thử nghiệm tại phòng thí nghiệm.....	32/PL

Hình PL 15. Hình ảnh các giảng viên và nhà khoa học Bộ môn Máy tàu thủy chứng kiến quá trình thử nghiệm TNCMH	33/PL
Hình PL 16. Hình ảnh các sinh viên, giảng viên và nhà khoa học Bộ môn Máy tàu thủy chứng kiến quá trình thử nghiệm TNCMH	33/PL

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. Cạnh hình thành trên piston của các động cơ diesel khác nhau.....	9
Bảng 3.1. Sự ảnh hưởng của số We đến cơ chế phân rã [115].....	62
Bảng 3.2. Thông số kỹ thuật của cảm biến WRET-01	66
Bảng 3.3. Thông số kỹ thuật bộ điều khiển nhiệt độ gia nhiệt cho piston	66
Bảng 3.4. Thông số kỹ thuật của nhiệt kế Beta 1760/IR 1600.....	67
Bảng 3.5. Thông số kỹ thuật của cân điện tử vi lượng ABS 220-4N.....	67
Bảng 3.6. Thông số kỹ thuật của kính hiển vi điện tử quét Jeol SEM 5410 LV.....	67
Bảng 3.7. Thông số camera Canon 70D.....	68
Bảng 3.8. Điều kiện thử nghiệm của TNCMH.....	72
Bảng 3.9. Các thông số chính của động cơ DY41DS	73
Bảng 3.10. Hệ số tương quan	76
Bảng 3.11. Kết quả kiểm định mô hình hồi quy trong R trong TNCMH.....	77
Bảng 3.12. Kết quả kiểm định mô hình hồi quy trong R trong TNCBC.....	80
Bảng 4.1. Điều kiện thử nghiệm TNCMH	87
Bảng 4.2. Hệ số α và β đối với nhiệt độ bề mặt vách khác nhau	99
Bảng 4.3. Giá trị α_2 và β_2	113
Bảng PL 1. Kết quả phân tích nhiên liệu diesel (DO).....	1/PL
Bảng PL 2. Kết quả phân tích của dầu bôi trơn SAE 30	1/PL
Bảng PL 3. Kết quả phân tích của Dodecane	2/PL
Bảng PL 4. Tính chất lý hóa của nhiên liệu B100 (QCVN 1:2015/BKHCN)	2/PL
Bảng PL 5. Kết quả phân tích nhiên liệu B5, B10, B20 và B50	3/PL
Bảng PL 6. Tính toán We , v và L_h	4/PL

Bảng PL 7. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu DO và.....	5/PL
Bảng PL 8. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu DO+2%L	6/PL
Bảng PL 9. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu Dodecan	7/PL
Bảng PL 10. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu B100.....	8/PL
Bảng PL 11. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu B50.....	9/PL
Bảng PL 12. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu B20.....	10/PL
Bảng PL 13. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu B5	11/PL
Bảng PL 14. Điều kiện thử nghiệm với TNCMH của các nhiên liệu	12/PL
Bảng PL 15. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên TNCMH của nhiên liệu DO.....	12/PL
Bảng PL 16. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên TNCMH của nhiên liệu	13/PL
Bảng PL 17. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên TNCMH của nhiên liệu	13/PL
Bảng PL 18. Điều kiện thử nghiệm với TNCMH của nhiên liệu DO	14/PL
Bảng PL 19. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên TNCMH của nhiên liệu DO.....	14/PL
Bảng PL 20. Điều kiện thử nghiệm với TNCMH của nhiên liệu B100,	15/PL
Bảng PL 21. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên TNCMH của nhiên liệu	15/PL
Bảng PL 22. Nhiệt độ bề mặt cặn trong TNCMH của nhiên liệu	17/PL

MỞ ĐẦU

i. Lý do chọn đề tài

Một trong những nghiên cứu quan trọng về việc sử dụng nhiên liệu trong động cơ diesel là nghiên cứu cơ bản về sự tạo cặn lắng trong buồng cháy động cơ. Quá trình tạo cặn lắng trong buồng cháy động cơ là một hiện tượng phức tạp gây ra nhiều vấn đề khác nhau như giảm hiệu suất, tăng lượng phát thải và gây hư hỏng động cơ diesel. Do đó việc nghiên cứu cơ chế hình thành và phát triển của cặn lắng trong buồng cháy động cơ khi sử dụng nhiên liệu diesel truyền thống hay diesel sinh học là rất cần thiết, bởi điều đó giúp tìm ra các biện pháp phù hợp nhằm ngăn ngừa sự hình thành của cặn lắng, để đảm bảo việc sử dụng động cơ lâu dài.

Các nghiên cứu về cặn trên động cơ được tiến hành nhằm tìm hiểu các tác động của cặn đến động cơ và cách thức hình thành, phát triển của chúng. Hầu hết các nghiên cứu hiện nay về cặn được thực hiện bằng cách sử dụng kết quả thống kê từ các khảo sát và kiểm tra trên động cơ thực. Thử nghiệm trên 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 dẫn tới chi phí thử nghiệm rất cao và thường gây hư hỏng cho động cơ trong quá trình thử nghiệm cặn lắng. Việc nghiên cứu và xây dựng một mô hình thực nghiệm đơn giản hơn, tiết kiệm chi phí mà vẫn đáp ứng được các yêu cầu đặt ra của các khảo sát, kiểm tra sự hình thành cặn và đánh giá được các yếu tố hình thành nên chúng là rất cần thiết.

Những vấn đề đặt ra ở trên chính là các lý do để NCS lựa chọn đề tài: *“Nghiên cứu cơ chế hình thành và phát triển cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel”*.

Luận án này tập trung nghiên cứu cơ chế hình thành và phát triển của cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel thông qua các thử nghiệm tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy được thiết lập nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố tiên quyết (nhiệt độ bề mặt vách, loại nhiên liệu, ...) đến sự tích tụ cặn lắng trên các bề mặt vách buồng cháy và xây dựng được mô hình toán để tiên lượng xu hướng hình thành và phát triển của cặn lắng theo thời gian.

ii. Mục tiêu của đề tài

- a) Mục tiêu nghiên cứu cơ bản
 - Nghiên cứu cơ chế hình thành và phát triển của cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel khi sử dụng một số nhiên liệu phổ biến ở Việt Nam như diesel và diesel sinh học.
- b) Mục tiêu lý thuyết

- Xác định và phân tích được các yếu tố ảnh hưởng đến sự hình thành và phát triển của cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel.

c) Mục tiêu thực nghiệm

- Xây dựng được mô hình thực nghiệm xác định sự tạo cặn lắng trên bề mặt vách được gia nhiệt;
- Xây dựng được mô hình toán để đánh giá xu hướng hình thành và phát triển của cặn lắng theo thời gian.

iii. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của đề tài

a) Đối tượng nghiên cứu:

- Nhiên liệu diesel sẵn có trên thị trường Việt Nam: diesel và diesel sinh học;
- Một số loại động cơ diesel cỡ nhỏ điển hình (kết cấu buồng cháy và điều kiện làm việc);

b) Phạm vi nghiên cứu:

- Nghiên cứu cơ bản cơ chế hình thành cặn lắng của các giọt nhiên liệu lỏng khi tương tác với vách buồng cháy động cơ diesel thông qua mô hình tạo cặn trên bề mặt vách được gia nhiệt;
- Dựa trên cơ sở là các hiện tượng vật lý (hóa hơi, lắng đọng,...), nghiên cứu tập trung vào cơ chế hình thành cặn lắng trên bề mặt vách được gia nhiệt khi xét đến các tham số chính là nhiệt độ và thành phần nhiên liệu.

iv. Phương pháp nghiên cứu của đề tài

- Nghiên cứu tổng quan các công trình đã được công bố gần đây trên thế giới liên quan đến cơ chế hình thành và phát triển cặn lắng trong buồng cháy động cơ làm cơ sở định hướng nội dung chi tiết của nghiên cứu;
- Nghiên cứu lý thuyết về cơ chế hình thành và phát triển cặn lắng trong buồng cháy động cơ;
- Nghiên cứu quy hoạch thực nghiệm để xây dựng và đánh giá tính đúng đắn của mô hình thực nghiệm. Dùng lý thuyết thống kê để xây dựng mô hình toán mô tả và tiên lượng được lượng cặn lắng hình thành theo thời gian;
- Nghiên cứu thực nghiệm nhằm đánh giá các yếu tố tác động đến cơ chế hình thành và phát triển của cặn lắng.

v. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

- Góp phần làm rõ cơ chế hình thành và phát triển cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel khi sử dụng các loại nhiên liệu khác nhau có sẵn ở Việt Nam;
- Từ kết quả nghiên cứu, xây dựng một giải pháp tổng thể cho các nhà sản xuất cũng như người vận hành để giảm thiểu lượng cặn lắng có thể hình thành trong buồng cháy động cơ.

vi. Điểm mới của luận án

- Là nghiên cứu cơ bản đầu tiên tại Việt Nam về cơ chế hình thành và phát triển cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel;
- Xây dựng được một mô hình thực nghiệm đơn giản và tiết kiệm chi phí mà vẫn đảm bảo tính đúng đắn trong việc xác định sự tạo cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel;
- Xây dựng được mô hình toán học mô tả xu hướng hình thành và phát triển của cặn lắng trong buồng cháy động cơ.

vii. Bố cục chính của luận án

Mở đầu

Chương 1. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

Chương 2. Cơ sở lý thuyết sự hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel

Chương 3. Xây dựng mô hình tạo cặn trên bề mặt vách buồng cháy

Chương 4. Nghiên cứu thực nghiệm

Kết luận

Hướng phát triển

Các công trình đã công bố

Tài liệu tham khảo

Phụ lục

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Cặn lắng trong buồng cháy động cơ

1.1.1. Đặc điểm của cặn lắng

Cặn lắng (deposit) hay cặn lắng cacbon là một hỗn hợp không đồng nhất gồm tro, soot và các chất hữu cơ dạng keo [5][6]. Nó có thể bao gồm các tạp chất hoặc cặn tích tụ trên các chi tiết chính của buồng cháy động cơ như nắp xilanh, piston, các xupap, đầu vòi phun (Hình 1.1) [7].



Hình 1.1. Cặn lắng trên các vị trí khác nhau của buồng cháy.

Cặn lắng trên các chi tiết khác nhau của động cơ làm giảm hệ số dư lượng không khí, hạn chế lưu lượng không khí, tăng tỉ số nén, thay đổi đặc tính phun, kích nổ, giảm tính dẫn nhiệt và hoạt tính của chất xúc tác, do đó 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 đã được Ye nêu ra [8]. Ngoài ra, các mảng cặn buồng cháy bám vào nắp xupap xả và làm kẹt xupap đã được ghi nhận bởi Kalghatgi [9][10]. Các lớp cặn bám trên bề mặt vách buồng cháy làm khó khởi động động cơ, gây kích nổ, gia tăng phát thải hydrocarbon và chạy không tải rung giật [11][12].

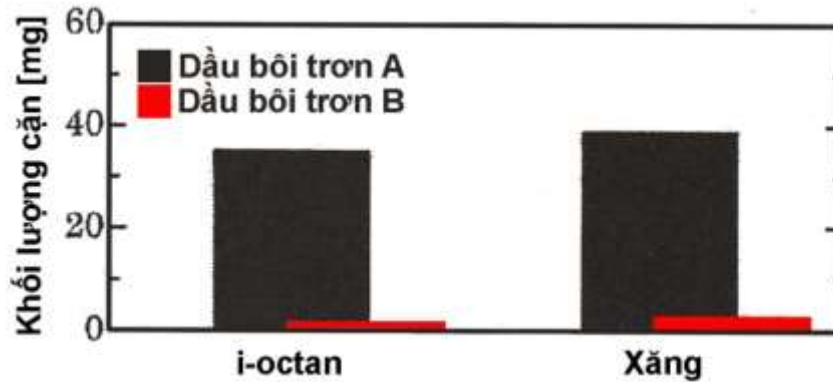
Xét về mức độ hư hại cho động cơ, cặn bám trên các chi tiết, đặc biệt là trên đỉnh piston và xilanh, có thể gây ra kẹt xéc măng và mài mòn, gây cản trở hoạt động bình thường của động cơ [13][14]. Cặn sinh ra trong buồng cháy cũng gây hư hại nghiêm trọng với các động cơ diesel buồng cháy thống nhất khi làm việc ở chế độ tải thấp trong thời gian dài [15]. Trên các động cơ hiện đại, cặn trong buồng cháy làm tăng lượng HC chưa cháy do quá trình hấp phụ và giải hấp phụ (ngược của quá trình hấp phụ) các khí của lớp cặn xốp. Lượng phát thải NO_x cũng tăng lên do các tác dụng cách nhiệt và giữ nhiệt của cặn, làm tăng nhiệt độ khí thể bên trong buồng cháy [16]. Ngày nay, trên các động cơ hiện đại, các chi tiết có độ chính xác rất cao như hệ thống phun nhiên liệu, ảnh hưởng của cặn lắng đến đặc tính làm việc của hệ thống càng rõ rệt. Chỉ cần một lượng nhỏ cặn lắng cũng có thể ảnh hưởng xấu tới tính năng làm việc của động cơ.

1.1.1.1. Nguồn gốc của cặn lắng

Hai thành phần đóng góp nhiều nhất vào việc tạo cặn trong buồng cháy là nhiên liệu và dầu bôi trơn. Tuy nhiên, lượng cặn lắng còn phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác như loại động cơ, chế độ làm việc và vị trí trong buồng cháy. Theo Lepperhoff và cộng sự [17], vị trí cặn tại các vùng nhiệt độ cao của động cơ chủ yếu là quặng khoáng còn lại từ quá trình bay hơi hay đốt cháy 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 khẳng định dầu bôi trơn là nguyên nhân chính của cặn buồng cháy (CCD - Combustion Chamber Deposit) [18][19]. Các thành phần như dư lượng tro, vật liệu vô cơ cùng hydrocacbon có nguồn gốc từ dầu bôi trơn được tìm thấy trong cặn chứng tỏ dầu bôi trơn đã tham gia vào quá trình tạo cặn.

Fukui và cộng sự [20] nghiên cứu ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu bôi trơn đến khối lượng CCD trên động cơ một xilanh, hai kỳ, cháy cưỡng bức chạy bằng xăng và iso-octan. Hai mẫu dầu bôi trơn sử dụng được gọi là dầu bôi trơn A và dầu bôi trơn B. Kết quả thử nghiệm trên Hình 1.2 cho thấy ảnh hưởng của dầu bôi trơn đến sự tích lũy CCD lớn hơn so với các hydrocacbon không bão hòa có trong nhiên liệu.



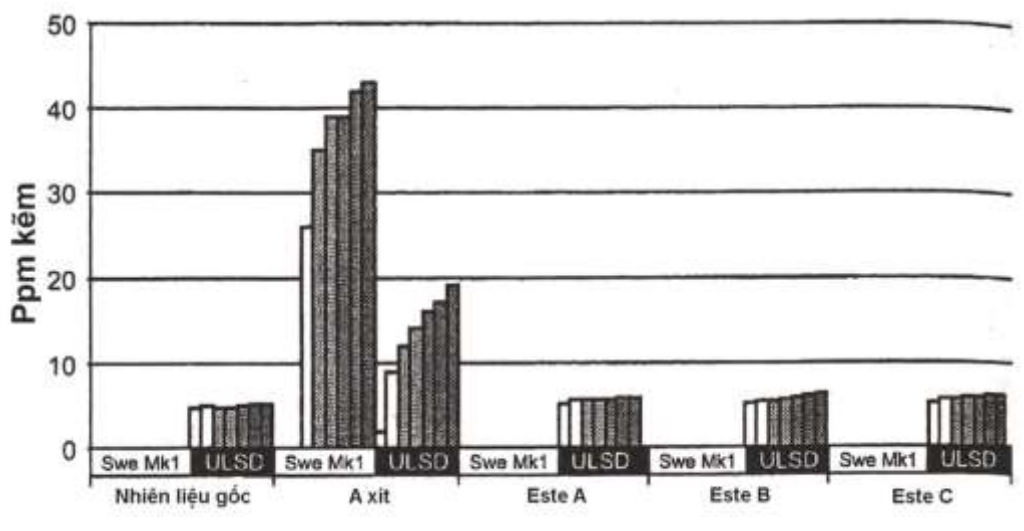
Hình 1.2. Ảnh hưởng của nhiên liệu và dầu bôi trơn đến lượng cặn tích lũy [20]

Trong một công trình khác, Diaby và cộng sự [21] đã nghiên cứu cặn ở rãnh xéc măng trên cùng của động cơ diesel bốn xilanh. Khi phân tích thành phần hóa học của cặn, 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 trên cùng của động cơ diesel chủ yếu là cacbon 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 [22][23], soot được tạo ra từ việc đốt cháy khuếch tán nhiên liệu diesel chiếm 20% của cặn, còn lại là thành phần có nguồn gốc từ dầu bôi trơn.

Trong một số loại động cơ diesel sử dụng nhiên liệu để bôi trơn, có sự xuất hiện của các ion kim loại trong cặn [20]. 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. Các axit đó sẵn sàng phản ứng với các tạp chất kim loại trong nhiên liệu để tạo thành muối kim loại. Theo Ullmann và cộng sự [24], các loại muối kim loại gắn liền với sự hình thành cặn ở đầu vòi phun và lỗ phun.

Trong khi đó, Ra và cộng sự [25] lại tập trung nghiên cứu sự hình thành soot và cặn lắng trên vách xilanh trong quá trình phun nhiên liệu (giả thuyết rằng đỉnh piston, nắp xilanh và phần ống lót xilanh tiếp xúc với khí cháy). Tác động của dòng chảy trên rãnh xéc măng và sự bay hơi của dầu bôi trơn trong động cơ diesel được khảo sát thông qua các mô hình cháy, sự hình thành soot, quá trình bay hơi và tạo cặn. Kết quả nghiên cứu cho thấy có một lượng soot đáng kể lắng đọng trong các khe hở của rãnh xéc măng,

do đó nhiên liệu hydrocarbon đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành cặn trên bề mặt rãnh xéc măng.



Hình 1.3. Lượng kềm hấp thụ bởi phụ gia dầu bôi trơn [26]

Về ảnh hưởng của nhiên liệu đến sự tạo cặn trên vòi phun, Leedham và cộng sự [25] cho rằng với lượng nhỏ các kim loại có thể ảnh hưởng đến cơ chế hình thành cặn. Kết quả thử nghiệm trên động cơ ở nghiên cứu này chỉ ra rằng nhiên liệu gốc không quyết định sự hình thành cặn. Tuy nhiên, khi có sự tham gia của một lượng nhỏ kềm thì lượng cặn được hình thành là đáng kể. Các chất phụ gia dạng este không ảnh hưởng đến nồng độ kềm có trong nhiên liệu, trong khi các chất phụ gia bôi trơn dạng axit có ảnh hưởng đến sự hấp thụ kềm (Hình 1.3). Chì (Pb) và kềm (Zn) là các kim loại dễ bị hấp thụ vào nhiên liệu, trong khi các kim loại khác hầu như không được phát hiện [20].

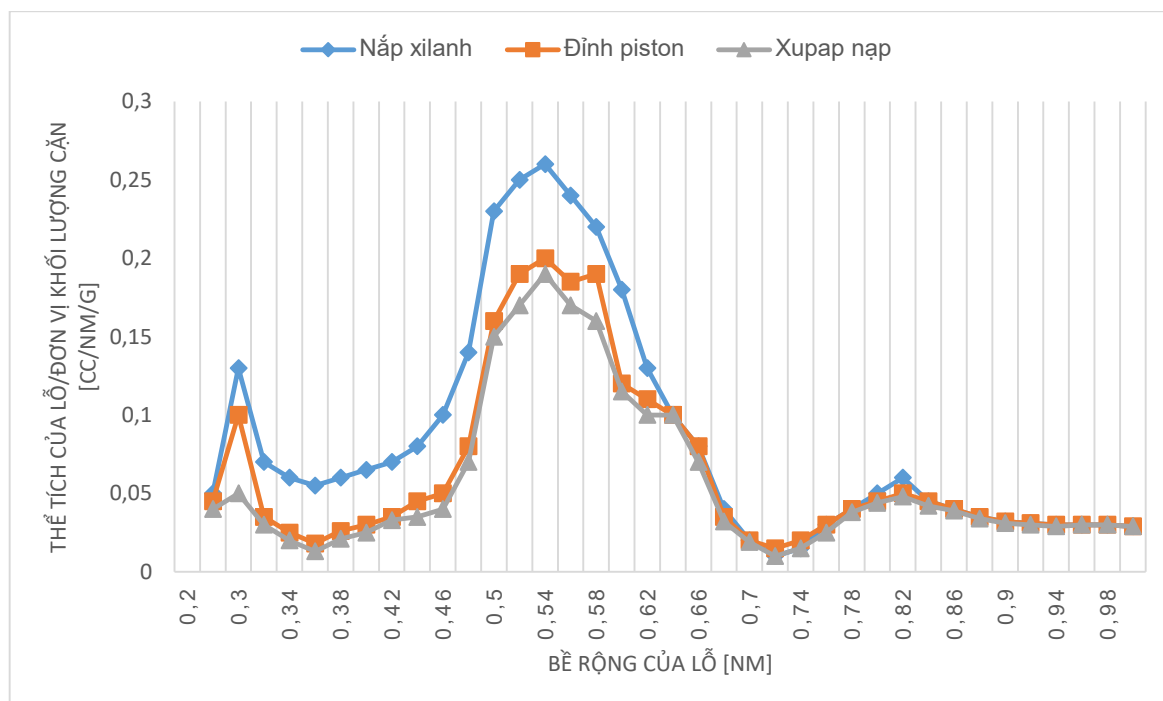
Khi nghiên cứu về ảnh hưởng của nhiên liệu tới việc hình thành cặn, Ebert [27] cho rằng nhiên liệu cháy không hết, kết hợp với dầu cácte sẽ bị oxi hóa và lắng đọng để hình thành cặn dạng bùn. Nghiên cứu của Cloud và cộng sự [28] cho rằng lưu huỳnh được chuyển thành lưu huỳnh triôxít lần lượt thâm nhập vào dầu bôi trơn để tạo cặn dạng bùn và cuối cùng sản sinh cặn dạng sơn (lacquer) và dạng vecni (varnish). Như vậy, từ những nghiên cứu đã công bố, có thể thấy rằng có rất nhiều yếu tố về nhiên liệu và dầu bôi trơn tham gia và quá trình tạo cặn ở buồng cháy.

1.1.1.2. Cấu trúc của cặn lắng

Cấu trúc của cặn phụ thuộc nhiều thông số như thành phần nhiên liệu, nhiệt độ làm việc của động cơ và thành phần chất phụ gia trong nhiên liệu [29]. Cấu trúc xốp của cặn

thúc đẩy các cơ chế lưu trữ nhiên liệu và đóng vai trò quan trọng về mức độ phát thải HC [8]. Hơn nữa, khối lượng cặn còn có mối liên hệ mật thiết với lượng phát thải HC như đã đề cập trong lý thuyết của Eilts [15]. Như vậy, đặc tính của cặn có tác động trực tiếp đến các hiệu ứng khác nhau trong buồng cháy như thay đổi sự truyền nhiệt và phát thải HC.

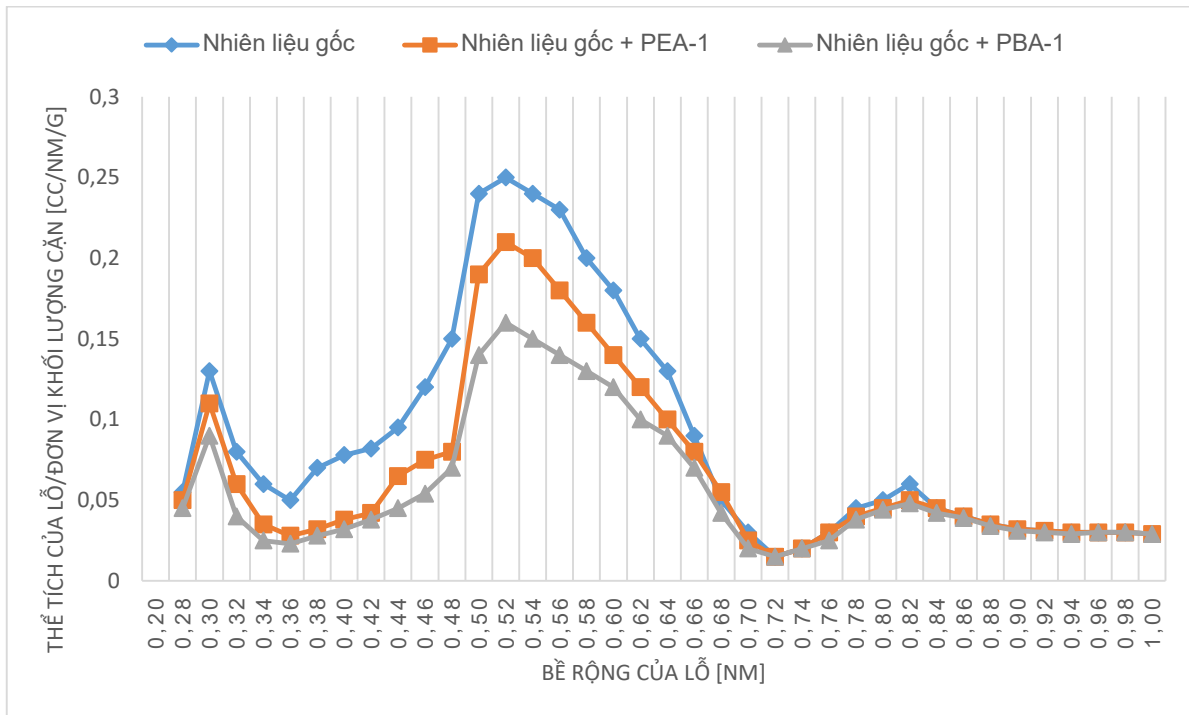
Tùy theo nhiệt độ tại vị trí hình thành, cặn sẽ có cấu trúc khác nhau. Nagao và cộng sự [30] cho rằng lượng và hình thái cặn thay đổi theo nhiệt độ vách buồng cháy. Nếu nhiệt độ của vách cao ($> 550^{\circ}\text{C}$), lớp cặn hình thành rất mỏng, mềm, khô và dễ bong nên bị thổi đi do lực đẩy của dòng khí thể trong buồng cháy. Về thành phần, cặn trong trường hợp này chủ yếu là cacbon. Ở nhiệt độ thấp hơn ($< 200^{\circ}\text{C}$), cặn bám chặt vào thành buồng cháy và được làm ẩm bằng nhiên liệu. Thành phần cặn khi này gồm nhiên liệu, chất kết dính và cacbon. Lepperhoff và cộng sự [17] cũng đưa ra những kết luận tương tự như trên, tuy có khác một chút ở vùng nhiệt độ cao. Ở nhiệt độ cao ($> 300^{\circ}\text{C}$), lượng cặn nhỏ có màu sắc khó quan sát và tạo ra một lớp cặn mỏng đặc trưng. Tuy nhiên, ở mức nhiệt độ thấp ($< 200^{\circ}\text{C}$), dễ dàng quan sát thấy vùng vật liệu tối bao gồm cacbon màu đen, hydrocacbon ướt và soot.



Hình 1.4. Sự phân bố kích thước lỗ xóp của cặn buồng cháy [29]

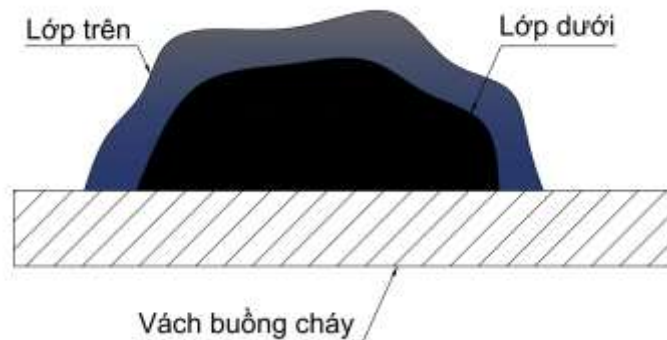
Zerda và cộng sự [29] đã chứng minh rằng hình thái của các loại cặn khác nhau thay đổi theo vị trí của nó trong buồng cháy. Diện tích bề mặt và tổng số lỗ phụ thuộc

vào vị trí cặn, sự bóc tách cặn khỏi bề mặt nắp xilanh, đỉnh piston hoặc xupap nạp (Hình 1.4). Cấu trúc của cặn tại nắp xilanh thường xốp hơn so với cặn ở đỉnh piston. Tương tự như vậy, cặn ở xupap nạp có độ xốp nhỏ hơn so với cặn ở các vị trí khác. Kích thước lỗ xốp của cặn ở nắp xilanh là lớn nhất, tiếp theo là đỉnh piston và xupap nạp.



Hình 1.5. Tương quan kích thước lỗ cặn với nhiên liệu có phụ gia [29]

Kết quả khảo sát sự ảnh hưởng của các chất phụ gia tới cấu trúc cặn (Hình 1.5), trong đó nồng độ chất phụ gia PEA-1 (polyether amin-based) và PBA-1 (polybutane amin-based) là bằng nhau cho thấy khi tăng nồng độ các chất phụ gia thì diện tích bề mặt giảm, do đó lượng cặn cũng tăng nhẹ. Nguyên nhân chính là do các chất phụ gia hoặc các thành phần của nó đã lấp đầy và chặn các lỗ cặn [29].



Hình 1.6. Cấu trúc lớp cặn [30]

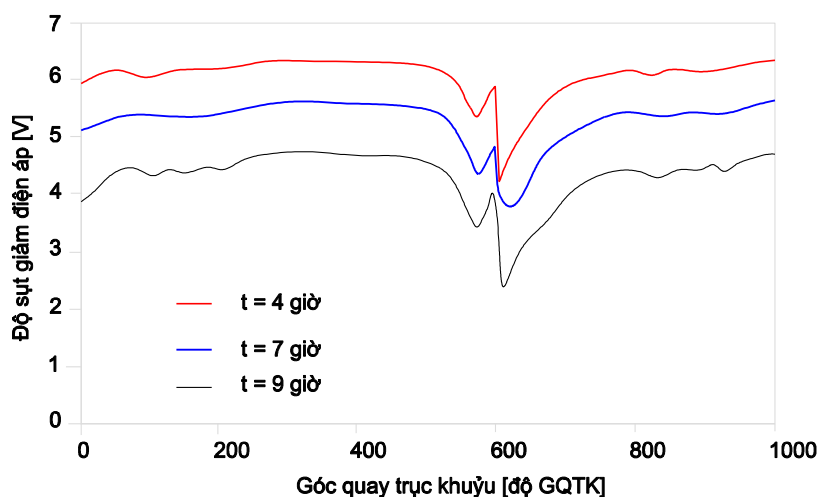
Theo nghiên cứu Nagao và cộng sự [30] cho rằng có hai hình thái CCD khác nhau đã được xác định ở nhiệt độ cao hơn như trong Hình 1.6.

Lớp đầu tiên bám sát bề mặt kim loại (lớp dưới), hình thành từ sự ngưng tụ của các hợp chất rất dễ bay hơi từ nhiên liệu và dầu bôi trơn. Cặn trong lớp này có cấu trúc giống sơn mài (lacquer) và rất khó để loại bỏ. Lớp này cũng chứa thành phần chất béo cao hơn so với các lớp tiếp theo, có cấu trúc giống như than. Cặn trong lớp này đồng nhất hơn và luôn duy trì sự kết dính.

Lớp thứ hai (lớp trên) có sự kết hợp của các phân tử có khuynh hướng liên kết lỏng lẻo và dễ bóc tách hơn. Lớp này mang tính chất của cacbon và có cấu trúc hóa học của hydrocacbon thơm giống như soot, thường được phủ một lớp chất lỏng nhớt hay polyme.

1.1.1.3. Tính chất của cặn lắng

Độ xốp của cặn lắng buồng cháy có ảnh hưởng lớn tới tính dẫn nhiệt, dẫn điện và nhiệt dung, từ đó tạo ra lớp cách nhiệt với các phần kim loại và gia tăng khả năng trữ nhiệt.



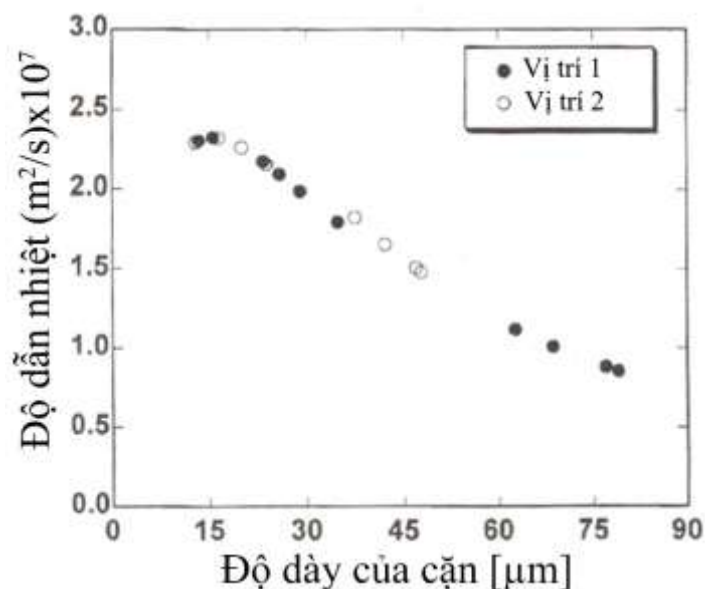
Hình 1.7. Sự sụt giảm khả năng dẫn điện khi cặn tích tụ [31]

Jonkers và cộng sự [31] đã khảo sát độ dẫn điện của cặn buồng cháy bằng cách sử dụng cảm biến đo độ dẫn điện của cặn gắn trên nắp xilanh động cơ diesel có buồng cháy thống nhất. 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 chất béo và giảm các chất thơm đa vòng trong soot, dẫn đến sự suy giảm khả năng dẫn điện của cặn.

Kết quả về mối quan hệ giữa độ dẫn nhiệt của cặn và lượng cặn tích lũy (Hình 1.8) được Guralp [7] và các cộng sự tính toán thông qua kết hợp kết quả thực nghiệm và công thức tính độ dẫn nhiệt. Kết luận được rút ra là có sự tương quan tốt giữa độ dày của lớp cặn và khả năng dẫn nhiệt của lớp cặn buồng cháy tại hai vị trí trên nắp xilanh của động cơ nén cháy hỗn hợp đồng nhất (HCCI). Lớp cặn càng dày thì tính dẫn nhiệt càng kém vì độ xốp và các thành phần của HC tạo thành các lớp khác nhau và liên tục thay đổi.

Nishiwaki và cộng sự [32] đã xác định độ dẫn nhiệt và khuếch tán của cặn trong động cơ cháy cưỡng bức và động cơ nén cháy dựa trên mô hình một chiều không ổn định của lớp cặn ở điều kiện nhiệt độ của kim loại nền không đổi. Kết quả cho thấy trên cả hai loại động cơ, tính dẫn nhiệt phụ thuộc vào tải. Ngoài ra, với các động cơ cháy cưỡng bức, lượng cặn trong buồng cháy còn phụ thuộc vào hệ số dư lượng không khí và tốc độ động cơ. Ngược lại, đối với động cơ nén cháy, nghiên cứu không đưa ra yếu tố có ảnh hưởng đến tính dẫn nhiệt của cặn.



Hình 1.8. Độ dẫn nhiệt phụ thuộc độ dày lớp cặn trên nắp xilanh [7]

1.1.2. Yếu tố hình thành cặn lắng

Sự hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ là một vấn đề phức tạp, phụ thuộc vào các yếu tố như nhiên liệu, dầu bôi trơn, chất phụ gia, điều kiện dòng khí thể,

sự chuẩn bị hòa trộn, gradient nồng độ khí thể gần vách,... [7][17]. Tuy nhiên, tùy thuộc kiểu động cơ và điều kiện khai thác sẽ dẫn đến mức độ tạo thành cặn lắng khác nhau, như trong Bảng 1.1. Các số liệu này do Sevast'yanov [33] đưa ra khi khảo sát cặn hình thành trên piston của các động cơ diesel đầu kéo tàu hỏa chạy với các loại dầu khác nhau.

Bảng 1.1. Cặn hình thành trên piston của các động cơ diesel khác nhau [33]

Động cơ	Loại dầu	Khối lượng cặn (g) hình thành trên piston động cơ tàu hỏa sau 100000 km hoạt động		
		Đỉnh piston	Rãnh xéc măng	Rãnh dẫn dầu làm mát
2D100	M-12	0,7	13,0	7,7
2D100	M-12V	10,8	12,5	3,3
10D100	M-14V	12,6	14,6	6,4
11D45	M-14V	15,6	25,4	52,8
11D45	M-14Vts	14,2	20,4	1,5

Các nghiên cứu khác về sự hình thành cặn trong buồng cháy của động cơ đều chỉ ra rằng các yếu tố như sự hình thành lớp nhiên liệu lỏng, nhiệt độ bề mặt thành buồng cháy, hệ số dư lượng không khí, điều kiện vận hành động cơ, thành phần nhiên liệu và dầu bôi trơn đều ảnh hưởng tới quá trình tích tụ và phát triển cặn lắng.

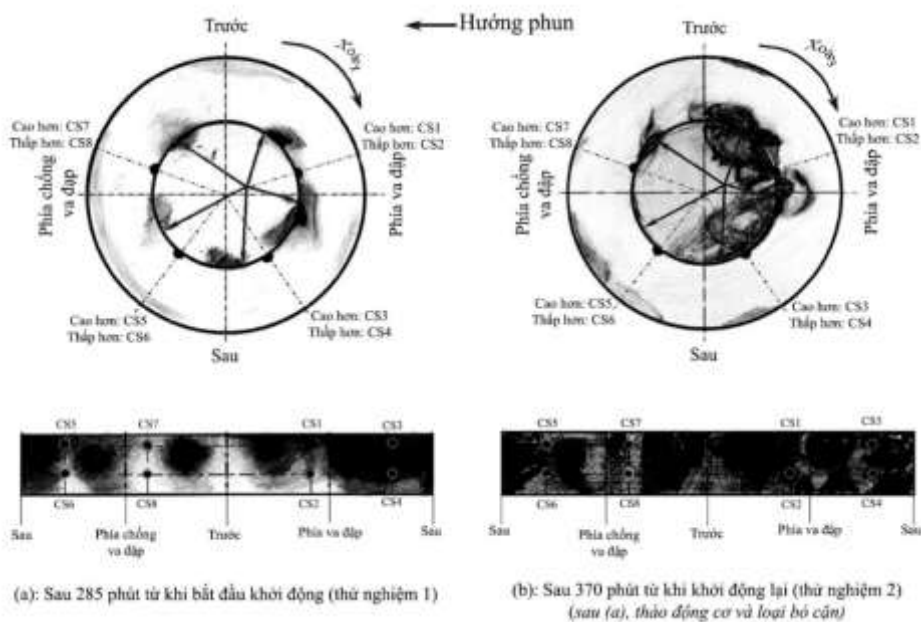
1.1.2.1. Quá trình hình thành lớp màng nhiên liệu lỏng

Lớp màng nhiên liệu lỏng trên bề mặt vách buồng cháy là một trong những nguyên nhân chính tạo ra cặn lắng. Lớp màng này có tác dụng như lớp trung gian được hình thành từ nhiên liệu, dầu bôi trơn thông qua va chạm, ngưng tụ hoặc tạo dòng chảy chất lỏng trên các chi tiết bên trong buồng cháy.

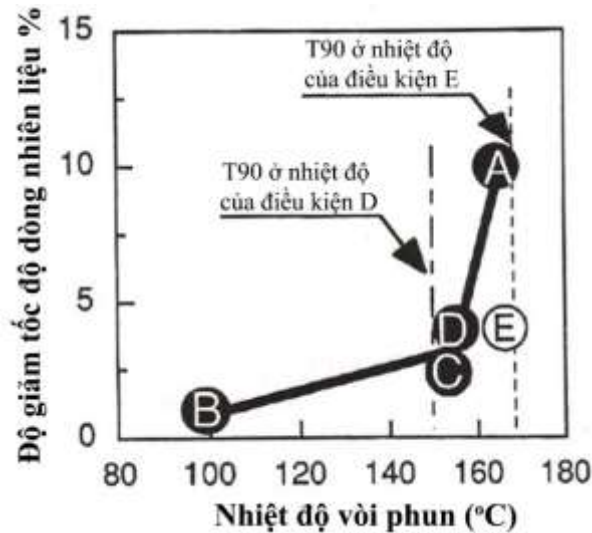
Lớp màng nhiên liệu này được tạo thành do sự va chạm giữa các phân tử nhiên liệu ở tốc độ cao trong quá trình phun. Khi trong buồng cháy động cơ tồn tại lớp màng nhiên liệu lỏng, lượng cặn tích tụ và độ dày lớp cặn trên bề mặt vách buồng cháy phụ thuộc vào nhiệt độ bề mặt và diện tích va chạm. Khu vực diện tích vách tiếp xúc trực tiếp với các giọt nhiên liệu lỏng của chùm tia phun có xu hướng hình thành nhiều cặn hơn. Tương tự các điều kiện tạo cặn trên bề mặt piston động cơ diesel một xilanh, buồng cháy thống nhất (Hình 1.9), Yamada và cộng sự [34] chỉ ra rằng vị trí phun nhiên liệu

có ảnh hưởng đến lượng cặn bám dính trên bề mặt vách. Khi thời gian khai thác động cơ tăng, lượng cặn tích lũy tại các khu vực phun nhiên liệu cũng tăng lên.

Do nhiệt độ và áp suất trong buồng cháy cao nên điểm sôi của các hydrocarbon trong nhiên liệu và dầu bôi trơn cao hơn. Tùy thuộc vào chất lượng hòa trộn của hỗn hợp không khí/nhiên liệu trong quá trình cháy, một phần trong số này không bị đốt cháy, chúng tương tác với vách có nhiệt độ thấp sẽ ngưng tụ và hình thành lớp màng lỏng trên bề mặt vách. Hơn nữa, lớp màng lỏng này cũng liên quan đến các quá trình khác tham gia vào sự tạo cặn. Đối với lớp màng lỏng nhiên liệu, nhiên liệu lắng lại có thể là phần còn lại của quá trình đốt cháy không hoàn toàn hoặc phần nhiên liệu tích lũy thêm trong quá trình phun và va chạm trực tiếp [7]. Nhiệt độ sôi của nhiên liệu là một tham số quan trọng để đánh giá xu hướng hình thành cặn trong quá trình ngưng tụ. Nhiên liệu có nhiệt độ sôi cao thường dễ ngưng tụ hơn, dẫn đến khả năng hình thành cặn lớn hơn so với nhiên liệu có nhiệt độ sôi thấp hơn.



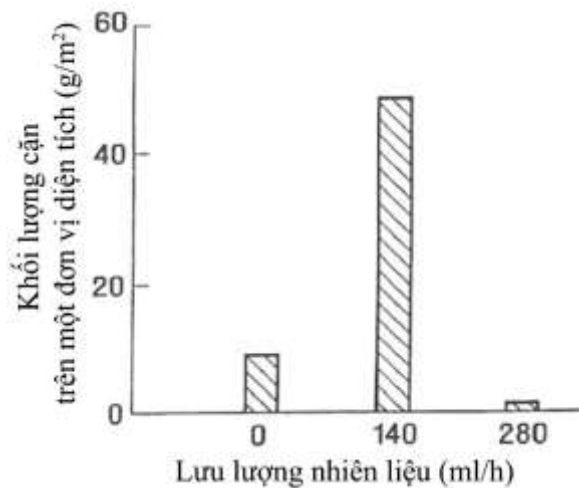
Hình 1.9. Sự hình thành cặn trên bề mặt piston [34]



Hình 1.10. Quan hệ giữa nhiệt độ vòi phun và sự sụt giảm dòng nhiên liệu [35]

Kết quả nghiên cứu của Kinoshita và cộng sự [35] trên Hình 1.10 cho thấy sự hình thành cặn trên các lỗ phun đã làm giảm tốc độ dòng nhiên liệu được phun vào buồng cháy. Càng nhiều cặn thì tốc độ dòng nhiên liệu càng thấp. Kết quả thực nghiệm cho thấy khi nhiệt độ vòi phun gần với nhiệt độ T90 sẽ làm giảm tốc độ dòng nhiên liệu do lượng cặn hình thành nhiều hơn. Như vậy, nhiệt độ vách có ảnh hưởng mạnh đến sự tạo cặn, cơ chế tạo cặn của chúng là khác so với quá trình tạo cặn thông qua sự phun và ngưng tụ.

Lepperhoff và cộng sự [17] nghiên cứu tác động của dòng chảy nhiên liệu đến sự tạo cặn trong đường ống được làm mát. Tại những nơi có lưu lượng chất lỏng nhỏ hơn, do có sự gắn kết của các hạt đã làm gia tăng độ nhớt nên làm giảm tốc độ dòng chảy, sau đó hình thành một lớp kết dính các hạt. Mật độ các hạt kết dính tăng làm cho lớp kết dính chặt chẽ hơn, do đó các tiền tố cặn và chất kết dính cặn càng nhiều thì khả năng tạo cặn càng cao. Vách được bao phủ lớp chất lỏng với lưu lượng đủ lớn có thể rửa trôi các hạt tiền tố cặn lắng liên tục, làm giảm mức độ hình thành cặn trên vách. Cơ chế trên có thể giải thích quá trình hình thành cặn tại các xupap, đầu vòi phun và trong lỗ vòi phun. Tác dụng của dòng chảy chất lỏng lên sự hình thành cặn thể hiện trên Hình 1.11.



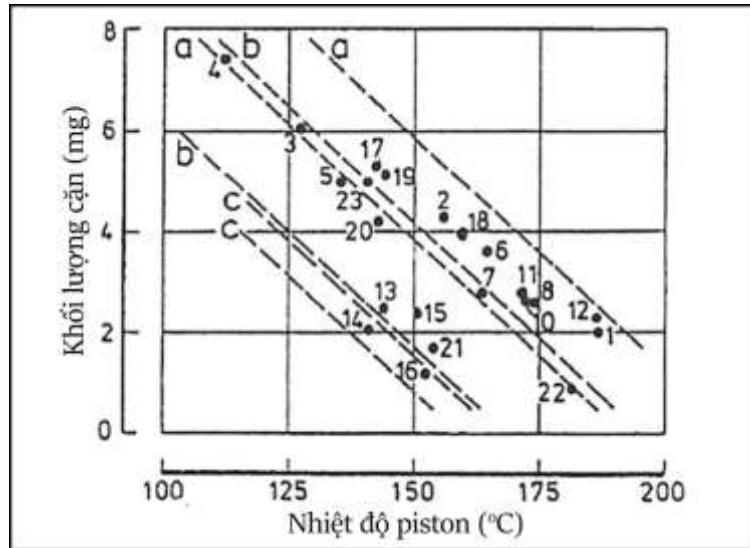
Hình 1.11. Ảnh hưởng của dòng chảy chất lỏng đến sự hình thành cặn [17]

Tóm lại, sự hình thành lớp màng chất lỏng, lượng cặn tích lũy trong khi động cơ hoạt động là khác nhau ở các vị trí khác nhau trong buồng cháy do có cơ chế hình thành và nhiệt độ bề mặt vách khác nhau.

1.1.2.2. Nhiệt độ bề mặt vách buồng cháy

Nhiệt độ vách là một trong những yếu tố quan trọng quyết định khả năng hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ. Nghiên cứu của Ye và cộng sự [8] cho rằng nhiệt độ ngọn lửa và nhiệt độ bề mặt xilanh là những yếu tố quan trọng để hình thành cặn trong xilanh. Nhiệt độ cao của ngọn lửa và buồng cháy đã gây ra quá trình cacbon hóa rất mạnh. Các chi tiết khác nhau của buồng cháy có nhiệt độ vách khác nhau và tương tác với các thành phần tạo cặn theo những cách khác nhau.

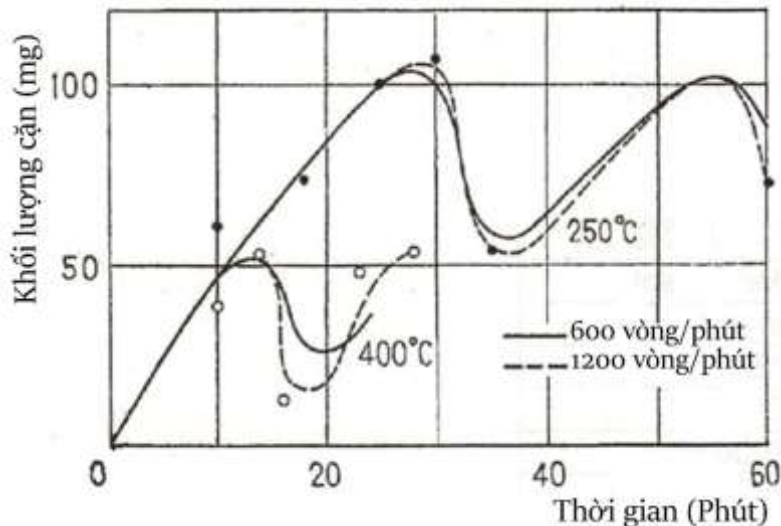
Thực nghiệm cho thấy mật độ dòng nhiệt cao nhất xảy ra ở trung tâm của mặt nắp xilanh, gần đế xupap xả và ở trung tâm của đỉnh piston [36]. Lượng lớn cặn thường tích tụ trên piston nơi có ứng suất nhiệt cao và gần vòi phun [34]. Chiều dày lớn nhất của lớp cặn thường được tìm thấy ở rìa piston nơi mà nhiệt độ vách thấp. Lượng cặn ít hơn tại các vị trí như xupap nạp và xupap xả do nhiệt độ bề mặt cao hơn. Lượng cặn lắng ít hơn khi nhiệt độ piston tăng lên (Hình 1.12) [17]. Trong quá trình hoạt động, tại mỗi vị trí trong buồng cháy sẽ tương ứng với các chế độ nhiệt khác nhau và có sự tích tụ cặn khác nhau. Kết quả thể hiện trên Hình 1.12 đã chứng tỏ nhiệt độ bề mặt vách có tác động rất lớn đến sự hình thành cặn trong buồng cháy.



Hình 1.12. Tương quan giữa lượng cặn và nhiệt độ piston [17]

1.1.2.3. Điều kiện khai thác động cơ

Nhiều nghiên cứu đã được tiến hành để khảo sát tác động của điều kiện khai thác động cơ đến sự hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ. Nagao và cộng sự [30] thấy rằng, sự tích tụ cặn không bị ảnh hưởng khi giảm tốc độ động cơ từ 1200 vòng/phút đến 600 vòng/phút mặc dù số lượng nhiên liệu tăng gấp đôi trên mỗi đơn vị thời gian (Hình 1.13).



Hình 1.13. Ảnh hưởng của tốc độ động cơ đến sự hình thành cặn [30]

1.1.2.4. Nhiên liệu và dầu bôi trơn

Ullmann và cộng sự [24] đã nghiên cứu ảnh hưởng của chất phụ gia trong nhiên liệu diesel đối với quá trình tạo cặn. Kết quả thực nghiệm thu được trong nghiên cứu

này cho thấy khi phụ gia có mặt một mình, chúng không thể tạo ra bất kỳ sản phẩm phân hủy nên không tạo cặn. Tuy nhiên, sự kết hợp của các chất phụ gia có thể gây ra một lượng cặn nhất định. Thật vậy, sự kết hợp của các chất làm sạch trong nhiên liệu diesel và các axit béo được xem như là yếu tố then chốt để có thể hình thành cặn polyme, điều này càng rõ ràng hơn khi có sự tham gia của axit formic [19].

Diaby và các cộng [21] đã nghiên cứu ảnh hưởng của dầu bôi trơn tới quá trình tạo cặn trên một động cơ diesel 4 xi lanh, họ nhận thấy ảnh hưởng của sự suy thoái dầu bôi trơn lên sự hình thành cặn lắng tại rãnh xéc măng đầu tiên. Thử nghiệm trên sử dụng dầu bôi trơn 5W-30 và nhiên liệu là dầu diesel lưu huỳnh thấp. Khoảng 6% phụ gia xeri (được cung cấp bởi Rhodia Electronics and Catalysis) dưới dạng hạt nano xeri oxit phân tán trong một dung môi hữu cơ đã được thêm vào trong nhiên liệu để đánh giá sự tham gia của nhiên liệu trong sự hình thành cặn lắng. Kết quả cho thấy, các lớp cặn với cấu trúc của vecni hình thành chủ yếu là do sự xuống cấp của dầu bôi trơn. Phân tích SEM, EDX, TGA, quang phổ tán sắc, quang phổ khối và quang phổ FTIR được sử dụng để nghiên cứu các đặc tính vật lý và hóa học của cặn. Kết quả phân tích tính chất hóa học của cặn trong rãnh xéc măng đầu tiên cho thấy cặn cacbon được hình thành chủ yếu từ sự thoái hóa của chất bôi trơn. Cặn này có một tỷ lệ đáng kể các nguyên tố kim loại sinh ra từ sự mòn của động cơ. Qua các nghiên cứu này có thể thấy rằng dầu bôi trơn có vai trò quan trọng trong việc hình thành cặn.

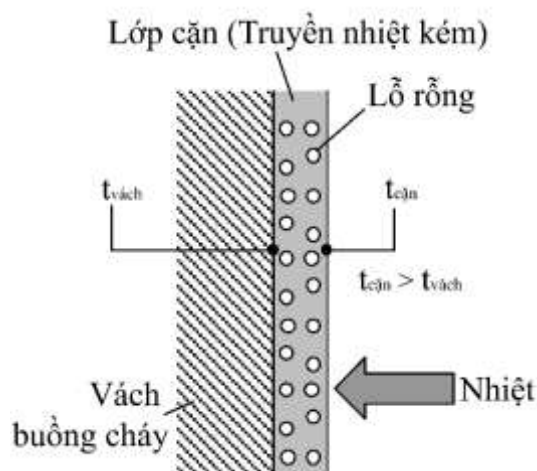
1.1.3. Các tác động xấu của cặn lắng đến động cơ

1.1.3.1. Sự truyền nhiệt trong buồng cháy

Điều kiện của bề mặt vách buồng cháy đóng vai trò kiểm soát tỷ lệ tạo cặn trong buồng cháy. Nhiên liệu cháy không hết sẽ bám dính trên bề mặt vách buồng cháy và tham gia vào quá trình gia nhiệt, bay hơi để tạo cặn trên bề mặt vách.

Khi lớp cặn được hình thành, nó đóng vai trò như một lớp cách nhiệt và gây ảnh hưởng đến khả năng thoát nhiệt trong buồng cháy. Nếu lượng cặn lớn sẽ gây ra sự thay đổi lớn về nhiệt độ bề mặt và mật độ dòng nhiệt. Lớp cặn có khả năng dẫn nhiệt thấp bởi tác dụng cách nhiệt của các tiền tố cặn nên nó làm giảm tốc độ truyền nhiệt và làm chậm khả năng thoát nhiệt từ buồng cháy, đồng thời nhiệt độ bề mặt của cặn ($t_{cặn}$) cao hơn so với nhiệt độ vách ($t_{vách}$) như trên Hình 1.15. Lượng nhiệt tỏa ra và sự khác biệt nhiệt độ giữa $t_{cặn}$ và $t_{vách}$ phụ thuộc vào tính chất nhiệt của cặn. Sự dẫn nhiệt kém của

cặn bám trên vách buồng cháy là do cấu trúc xốp và có chứa các thành phần không bay hơi bên trong cặn [34].



Hình 1.14. Sự truyền nhiệt của lớp cặn [34]

Sự gia tăng nhiệt độ bề mặt cặn khiến gradient nhiệt độ của khí thể giảm [17]. Kết quả là bề mặt của xilanh trong buồng cháy quá nóng, có thể gây ra kích nổ trong động cơ và làm nhiên liệu biến chất nên tạo nhiều cặn hơn, đồng thời làm gia tăng nhiệt độ ngọn lửa và khí thải [7].

1.1.3.2. Quá trình phun nhiên liệu

Các lỗ phun trên vòi phun nhiên liệu thường xuyên tiếp xúc với khí cháy và soot ở nhiệt độ cao bên trong buồng cháy, đồng thời cơ chế nhiệt cũng tham gia vào quá trình tạo cặn lắng trên đầu vòi phun. Lớp cặn lắng ở đầu vòi phun và các lỗ phun sẽ làm thay đổi hình dạng chùm tia phun [37] và lượng nhiên liệu cấp cho một chu trình [35]. Hơn nữa, cặn lắng còn làm giảm các thông số động học của vòi phun, gây trở ngại trong việc đóng kim phun, có tác động xấu nhất khi thời gian phun ngắn. Ngoài ra, ở chế độ toàn tải và áp suất phun cao, cặn lắng bên trong vòi phun có thể làm giảm lượng nhiên liệu cấp dẫn đến giảm công suất động cơ [24].

1.1.3.3. Quá trình cháy

Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng cặn lắng trong buồng cháy hình thành trên đỉnh piston và nắp xilanh có ảnh hưởng xấu đến quá trình cháy trong động cơ. Cặn buồng cháy làm thay đổi khả năng truyền nhiệt, nhiệt độ và áp suất trong quá trình nạp và nén, như sự sấy nóng môi chất bởi cặn lắng động cơ ở các kỳ nạp và nén, điều đó ảnh hưởng

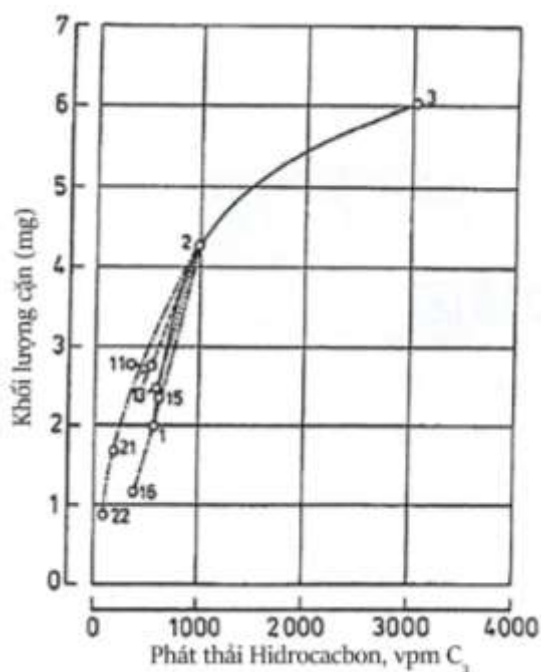
đáng kể đến giai đoạn cháy trễ [8]. Hơn nữa, do sự thay đổi điều kiện vùng biên sát vách nên cặn lắng còn tác động mạnh lên diễn biến quá trình cháy chính của động cơ [7].

Các ảnh hưởng nêu trên có thể dẫn đến một số dạng cháy bất thường trong quá trình cháy của động cơ. Thứ nhất, các điểm nóng nhỏ tạo ra bởi cặn lắng gây ra cháy không kiểm soát trên bề mặt dẫn đến sự kích nổ [29]. Thứ hai, quá trình cháy bất thường do ảnh hưởng của sự hoàn nhiệt và cách nhiệt sẽ đòi hỏi nhiên liệu có chỉ số cetane cao hơn [36] và làm giảm công suất động cơ [29]. Thứ ba, là hiện tượng cháy bề mặt trong động cơ diesel sử dụng lưỡng nhiên liệu, hiện tượng này xảy ra khi hỗn hợp môi chất công tác gồm nhiên liệu và không khí nạp được gia nhiệt bởi xupap bị quá nhiệt, nguyên nhân là do cặn lắng bám trên bề mặt các xupap, hiện tượng cháy bề mặt cũng có thể gây ra hiện tượng kích nổ [38]. Một tác dụng điển hình gây ra bởi cặn là hiện tượng kích nổ, khi đó sự biến thiên áp suất cao kèm theo sự xung động giữa các sóng áp suất của các đám cháy với nhau và với thành vách xilanh sẽ tạo nên tiếng va đập, do đó gây ra tiếng ồn, rung động lớn trên động cơ. Xu hướng kích nổ tăng nhanh chóng khi lượng cặn tích tụ trên vách buồng cháy gia tăng [39].

1.1.3.4. Tỷ số nén

Khi cặn hình thành trong buồng cháy làm giảm thể tích của buồng cháy tại điểm chết trên nên tăng tỉ số nén và nhiệt độ bề mặt vách dẫn đến hâm nóng hỗn hợp môi chất công tác. Nghiên cứu cho thấy cặn lắng của động cơ làm tăng tỉ số nén cũng như nhiệt độ thành vách xilanh cho tới khi lượng cặn tích tụ đạt đến một mức độ nhất định [8]. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng của cặn lắng đến tỉ số nén là khác nhau trên các loại động cơ khác nhau.

1.1.3.5. Phát thải



Hình 1.15. Sự tương quan giữa khối lượng cặn và lượng phát thải HC [15]

Liên quan đến vấn đề ô nhiễm do phát thải, cặn lắng trên đỉnh piston và bề mặt nắp xilanh [39] có ảnh hưởng tiêu cực đến phát thải hydrocarbon (HC) và phát thải dạng hạt (PM) ra ngoài môi trường. Các nhà nghiên cứu cho rằng các cơ chế hấp phụ và giải hấp phụ hydrocarbon gây ra bởi cặn đã làm gia tăng lượng phát thải ngoài ý muốn [36]. Theo Eilts [15], mức HC cao thải ra trong quá trình cháy là do thành vách buồng cháy ở trạng thái ướt quá mức, sự duy trì trạng thái ướt hay khô trên vách buồng cháy cũng là nguyên nhân giải thích cho sự hình thành và phát triển cặn trong buồng cháy. Hình 1.16 cho thấy mối tương quan về sự gia tăng của phát thải HC với lượng cặn tích lũy trên vách buồng cháy động cơ [15].

Sự tích tụ cặn buồng cháy có thể dẫn đến sự gia tăng các nitơ ôxít (NO_x) [40][41]. Khi lớp cặn tích lũy dày hơn thì khả năng cách nhiệt của nó tăng lên và làm cho nhiệt độ xilanh tăng, điều này làm nhiệt độ khí thể tăng cao trong quá trình cháy, tức là khả năng hình thành NO_x lớn hơn [31].

Soot trong buồng cháy với điều kiện áp suất và nhiệt độ cao được tạo thành dạng hạt mịn, chúng bám dính trên xupap, đỉnh piston và vách xilanh dẫn đến hình thành lớp cặn cacbon, trong khi đó lớp cặn trước sẽ làm cho chúng không bị oxi hóa hoàn toàn

[40]. Sự hình thành cặn trong buồng cháy động cơ có thể ảnh hưởng nhất định đến sự gia tăng phát thải soot của động cơ.

1.1.3.6. Các hư hỏng động cơ

Sự hình thành cặn lắng có khả năng gây ra hư hỏng cho các chi tiết bên trong buồng cháy động cơ. Khi trong buồng cháy có lớp cặn, nếu động cơ hoạt động trong thời gian dài có thể gây ra hư hỏng cơ học trong khi khởi động nguội do va chạm giữa piston và nắp xilanh [42]. Trong động cơ diesel, cặn lắng có thể dẫn đến mài mòn và xước mặt gương xilanh.

Khi động cơ đã cũ, các chi tiết mòn nhiều dẫn tới lượng dầu bôi trơn rò lọt vào buồng cháy tăng lên làm gia tăng cặn lắng hình thành từ dầu bôi trơn và các phụ gia của nó [43] nên các hư hỏng nghiêm trọng hơn có thể sẽ xảy ra.

1.2. Tổng quan về tình hình nghiên cứu cặn lắng trong động cơ

Các nghiên cứu về cặn trong động cơ đã được tiến hành cách đây khoảng 50 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 cháy được chứng minh là có thể hình thành qua ba giai đoạn khác nhau:

- (1) Sự ngưng tụ của nhiên liệu cháy không hoàn toàn trên vách buồng cháy;
- (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, tổn thất nhiệt, hiệu suất động cơ và các mối nguy hiểm cho động cơ. Tuy nhiên, các yếu tố hình thành cặn, như loại nhiên liệu, điều kiện vận hành động cơ, nhiệt độ thành vách buồng cháy 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 tổn thất nhiệt. Hơn nữa, cấu trúc cặn và các thành phần của nó cho phép chuẩn đoán sự mài mòn và các hư hỏng của 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 thời gian hoạt động tối thiểu khoảng 200 giờ hoạt động [44][43][37][9]. Trong các nghiên cứu khác, chẳng hạn Hutching [45] 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 [46] đã thực hiện nghiên cứu xác định ảnh hưởng của các loại nhiên liệu đến thành phần cặn trong buồng cháy động cơ diesel với quãng đường di chuyển 70000 km. Như vậy, có thể thấy rằng thời gian dài và số kilomet di chuyển nhiều khiến chi phí trong cả hai loại thử nghiệm trên rất cao và có thể gây hư hỏng động cơ trong quá trình thử nghiệm tạo cặn lắng.

Sự hình thành cặn trong động cơ phụ thuộc vào các thông số khác nhau, chẳng hạn như nhiên liệu, vật liệu bề mặt, nhiệt độ, áp suất, môi trường buồng cháy. Tuy nhiên, nhiệt độ vách là một trong những thông số quan trọng nhất ảnh hưởng sự hình thành cặn đó. Jonkers [31] đề cập đến sự ảnh hưởng của các thông số vận hành khác nhau trong việc tạo cặn như chế độ tải, 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 mức độ ảnh hưởng của các thông số, vị trí tương tác và loại động cơ khác nhau. Như vậy, cơ chế hình thành cặn trong buồng cháy động cơ là một quá trình rất phức tạp. Vì thế, việc chỉ ra cơ chế cụ thể mô tả được quá trình cặn lắng hình thành như thế nào là rất cần thiết và có ý nghĩa. Hơn nữa, hiện nay các nghiên cứu lý thuyết cơ bản về quá trình tạo cặn trong động cơ còn ít. Do đó, lượng kiến thức về sự hình thành cặn trong buồng cháy còn hạn chế và cần có các nghiên cứu thêm.

Trong các nghiên cứu về cặn lắng trong buồng cháy động cơ, các vấn đề về quá trình bay hơi, quá trình làm nóng, tạo cặn và phản ứng hóa học (nhiệt phân, trùng hợp, oxi hóa,...) ít được đề cập đến. Trong số các vấn đề trên, đặc tính bay hơi được đề cập rộng rãi hơn trong các nghiên cứu về lý thuyết, mô phỏng và thực nghiệm [6][44][49][50][51]. Trong giai đoạn trước và sau khi cháy, quá trình bay hơi và lắng đọng của các loại nhiên liệu là quan trọng. Do nhiệt độ vách buồng cháy tương đối thấp, ở điều kiện đó, nhiệt lượng tích lũy trong nhiên liệu còn lại bám trên bề mặt buồng cháy trong quá trình gia nhiệt và quá trình bay hơi tạo thành cặn trên bề mặt của nó. Như đã đề cập bởi Eilts [15], cặn hình thành chủ yếu từ nhiên liệu được lắng đọng trên các bề mặt vách ở trạng thái lỏng và bay hơi không hoàn toàn. Tuy nhiên, trước khi xem xét quá trình hình thành cặn một cách chi tiết, ta cần hiểu được quá trình bay hơi của các thành phần dễ bay hơi bởi quá trình này là cơ sở xác định lượng nhiên liệu còn lại tham gia vào sự tạo cặn. Một số nghiên cứu về mối quan hệ giữa đặc tính bay hơi của nhiên liệu thuần khiết và nhiên liệu nhiều thành phần và sự tạo cặn như nghiên cứu đặc tính bay hơi của nhiên liệu với mô hình tạo giọt của Elkotb và các cộng sự [47] hay nghiên cứu đặc tính hóa hơi của nhiên liệu sinh học ở điều kiện nhiệt độ cao của Morin và các cộng sự [48] là cơ sở để hỗ trợ quá trình nghiên cứu sự hình thành cặn.

Để hiểu được cơ chế hình thành cặn và tìm ra các giải pháp hiệu quả để giảm thiểu lượng cặn lắng trong động cơ, cần có các nghiên cứu cơ bản trong đó có sự kết hợp của lý thuyết và thực nghiệm. Do đó, phương pháp thử nghiệm đơn giản hơn mà vẫn có thể tạo ra kết quả tương tự về xu hướng hình thành và phát triển cặn đã được đề xuất như các nghiên cứu của O'Brien [14] về cơ chế hình thành cặn trong một mô hình buồng cháy thể tích, tuy nhiên nghiên cứu này cũng đòi hỏi cần sự hỗ trợ của các mô hình số phức tạp như CHEMKIN. Việc kết hợp các nghiên cứu về đặc tính hóa hơi của nhiên liệu với cơ chế hình thành cặn có thể được xem là hướng đi mới khi nghiên cứu sự tạo cặn của các giọt nhiên liệu đơn hóa hơi trên bề mặt kim loại được gia nhiệt, như các nghiên cứu của Senda và các cộng sự [122] và Furuhashi và các cộng sự [123]. Như vậy, để giải quyết các khó khăn trên cần hiểu được cơ chế tạo cặn của các hạt nhiên liệu đơn bởi quá trình tạo cặn trên vách buồng cháy là sự tích tụ của thành phần không bay hơi hoặc khó bay hơi của rất nhiều hạt nhiên liệu đơn. Việc thiết lập một mô hình thử nghiệm tạo cặn lắng của các giọt nhiên liệu đơn để đánh giá và phân tích quá trình hình

thành cặn lắng hay cơ chế tạo cặn lắng là cần thiết và khả thi. Một phương pháp đơn giản gọi là thử nghiệm tạo cặn lắng trên mô hình vách buồng cháy sẽ là công cụ để xây dựng các thử nghiệm tạo cặn trên bề mặt vách được gia nhiệt. Dữ liệu thu được từ các thử nghiệm là cơ sở để nghiên cứu cơ chế hình thành và phát triển của cặn lắng trong buồng cháy động cơ sử dụng nhiên liệu diesel và nhiên liệu diesel sinh học do sự va chạm và tác động của phần nhiên liệu chưa cháy hết trên bề mặt vách. Mô hình thử nghiệm này có thể là bước nghiên cứu ban đầu trong việc phát triển các phương pháp đơn giản để nghiên cứu cặn lắng động cơ đối với các loại nhiên liệu khác nhau.

Dựa vào lý thuyết quy hoạch thực nghiệm để xây dựng mô hình thực nghiệm đơn giản và khả thi nhằm đạt được mục tiêu của nghiên cứu mà không cần thực hiện các thử nghiệm tạo cặn lắng phức tạp trên động cơ. Phương pháp này trở nên quan trọng hơn khi nhiên liệu sử dụng trong động cơ là nhiên liệu sinh học, loại nhiên liệu có xu hướng tích tụ cặn trong buồng cháy nhiều hơn so với nhiên liệu diesel thông thường. Phương pháp này giúp giảm thời gian và chi phí tốn kém trong thử nghiệm, đồng thời giảm nguy cơ gây hư hỏng động cơ do lượng cặn tích lũy lớn khi sử dụng nhiên liệu diesel sinh học.

Nghiên cứu này tập trung vào sự tương tác liên tục của giọt nhiên liệu với bề mặt vách và quá trình bay hơi của chúng. Điều kiện tương tác của các giọt trong quá trình hình thành cặn, khả năng khả thi của phương pháp sẽ được thảo luận trong các chương sau cùng với các kết quả so sánh và đánh giá xu hướng tạo cặn của mô hình thực nghiệm đối chứng trên động cơ thực. Từ đó các khuynh hướng tạo cặn lắng của nhiên liệu diesel, nhiên liệu diesel sinh học và nhiên liệu diesel sinh học pha trộn sẽ được nghiên cứu bằng phương pháp này. Để làm rõ cơ chế hình thành cặn lắng, các đặc tính bay hơi của nhiên liệu và nhiệt độ bề mặt cặn lắng cũng được phân tích và đánh giá. Những điều này sẽ đóng góp đáng kể vào việc củng cố một phần lý thuyết cơ bản về sự tạo cặn lắng trong các động cơ. Qua nghiên cứu này, sự hình thành cặn do các hạt nhiên liệu va chạm liên tục với bề mặt vách ở các mức nhiệt khác nhau cũng được nghiên cứu. Đồng thời, nghiên cứu tác động của các vùng nhiệt độ bề mặt vách buồng cháy đến khả năng hình thành cặn lắng cũng sẽ được chỉ ra để làm cơ sở đề xuất các biện pháp giảm sự tích tụ cặn lắng trong buồng cháy động cơ. Đặc tính của cặn, cơ chế hình thành cặn và các yếu tố ảnh hưởng đến sự hình thành cặn khi dùng nhiên liệu diesel, nhiên liệu diesel sinh

học và nhiên liệu diesel sinh học pha trộn và dầu bôi trơn sẽ được nghiên cứu, đánh giá và thảo luận trong luận án này. Bên cạnh đó, loại nhiên liệu ít có khả năng tạo cặn lắng cũng sẽ được đề xuất trong nghiên cứu này.

Quá trình đốt cháy trong động cơ trên thực tế liên quan đến nhiệt lượng, quá trình bay hơi và sự cháy nhiên liệu. Tuy nhiên, trong nghiên cứu tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy, quá trình này cũng có hạn chế do các thử nghiệm được tiến hành trong điều kiện không có quá trình cháy. Vì vậy, tạo cặn trên bề mặt vách buồng cháy chỉ đề cập đến sự tạo cặn lắng do sự va chạm của nhiên liệu cháy không hết với bề mặt vách. Các quá trình của cơ chế tạo cặn được đề xuất bởi [17], như sự hình thành liên kết hoặc nén các hạt và hấp phụ của các thành phần khí thể bị bỏ qua. Tuy nhiên, các quá trình khác như sự hình thành màng lỏng và phản ứng của hydrocarbon, được đề cập đến trong nghiên cứu này.

1.3. Kết luận chương

Quá trình tạo cặn lắng trong buồng cháy của động cơ là một hiện tượng phức tạp gây ra nhiều vấn đề khác nhau cho động cơ như giảm hiệu suất, tăng lượng phát thải và có thể dẫn đến hư hỏng động cơ diesel. Có rất nhiều nguyên nhân sinh ra cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel, nguyên nhân chủ yếu là do sự cháy không hoàn toàn của nhiên liệu diesel, bên cạnh đó dầu bôi trơn, nhiên liệu hoặc sự kết hợp của cả hai là nguyên nhân chính của cặn buồng cháy. Sự phát triển cặn lắng trên bề mặt vách buồng cháy phụ thuộc vào trạng thái tương tác giữa các giọt nhiên liệu, nhiệt độ bề mặt vách, loại nhiên liệu, trạng thái cặn lắng ban đầu, giai đoạn đầu của quá trình lắng đọng, điều kiện chống chất và các cơ chế cạnh tranh trong suốt quá trình hình thành cặn như tác dụng làm mát, tác dụng truyền nhiệt và hiệu ứng của phản ứng hóa học. Như vậy, các yếu tố như nhiệt độ bề mặt vách, thành phần nhiên liệu và sự có mặt của dầu bôi trơn trong nhiên liệu sẽ có những tác động nhất định đến sự hình thành và gia tăng lượng cặn tích lũy trên các bộ phận trong buồng cháy động cơ.

Trên thế giới đã thực hiện nhiều các nghiên cứu về vấn đề cặn lắng trong động cơ, nhưng các nghiên cứu này thường được thực hiện trực tiếp trên động cơ thực với thời gian dài, chi phí lớn, khả năng định lượng cặn khó và có thể gây hư hỏng động cơ. Trong khi đó, tại Việt Nam hiện nay chưa có một nghiên cứu đáng kể nào về cơ chế hình thành và phát triển cặn lắng trong buồng cháy động cơ. Do đó, nghiên cứu thực nghiệm sự tạo cặn trên mô hình đơn giản, phù hợp và khả thi để đánh giá xu hướng hình

thành và phát triển của cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel là cấp thiết, có nhiều ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT SỰ HÌNH THÀNH CẶN LẮNG TRONG BUỒNG CHÁY ĐỘNG CƠ DIESEL

2.1. Cơ sở lý thuyết về sự hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ

2.1.1. Lý thuyết về sự hình thành và lắng đọng của các hạt

Sự hình thành cặn trong buồng cháy có thể được giải thích dựa trên các cơ chế sau: khuếch tán Brown, nhiệt điện, quang điện, quán tính và lắng đọng trọng lực. Các cơ chế này được đặc trưng bởi một đại lượng không thứ nguyên, đó là tỉ số của lực gây ra sự lắng đọng hạt và ma sát chất lỏng của môi trường liên tục. Để ước tính tác động của từng cơ chế, có thể tính toán hiệu quả thu được của chúng. Hiệu quả thu gom là tỉ lệ khối lượng của cặn thu được đối với khối lượng soot tạo ra trong khu vực buồng cháy được nghiên cứu và được bao phủ bởi xilanh theo hướng lưu lượng khí đi vào.

Khuếch tán Brown là một cơ chế lắng đọng quan trọng để ngưng tụ và kết tụ soot trên bề mặt vách được làm mát trong các hệ thống buồng cháy, Kneer và các cộng sự [52] đã đề xuất phương trình (2.1).

$$\eta_{0,D} = (1 + R) - \frac{1}{1 + R} \quad (2.1)$$

Trong đó:

$\eta_{0,D}$ là hiệu suất thu thập sự lắng đọng hạt trên một xilanh tác dụng đơn tại đường kính xilanh với giả định rằng dòng chảy rằng đó là dòng có thể;

R là tham số tổng hợp $2x_0/d_c$, tỉ số giữa khoảng cách giới hạn từ bề mặt xilanh tại $\theta = 2\pi$ và đường kính xilanh mà các hạt tại đó sẽ kết tụ lại bởi sự khuếch tán.

Có thể tính toán gần đúng $\eta_{0,D}$ bằng cách áp dụng biểu thức của [53]. Theo đó, R có thể xác định từ phương trình (2.2), trong đó \bar{x} là sự dịch chuyển do chuyển động ngẫu nhiên trong khoảng thời gian t (s).

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{4D_p t}{\pi}} \quad (2.2)$$

Sử dụng biểu thức Einstein-Stokes tính hệ số khuếch tán D_p và ước tính thời gian t cho $Re_c > 1$ (trong khi Langmuir xem xét $Re_c < 1$), tham số thu thập R có thể tính theo biểu thức sau:

$$\frac{1}{2}R = \frac{x_0}{d_c} = \frac{1}{2} \left(\frac{3,52D_p}{v_0 d_c} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

Để ước tính thời gian t , giả thiết các hạt khuếch tán trong một dòng chảy có độ nhớt đến xilanh với góc từ 30^0 đến 150^0 có cùng một tốc độ tiếp xúc như là nhiên liệu khí. Lấy kết quả phương trình (2.3) áp dụng vào phương trình (2.1) thì hiệu suất thu thập cho vận chuyển hạt phân tán đến bề mặt xilanh có thể được tính toán cho dòng chảy có thể. Tỷ số $D_p = v_0/d_c$ trong phương trình (2.3) là không thứ nguyên N_{sd} của hiệu ứng khuếch tán như được chỉ ra trong phương trình (2.4).

$$N_{sd} = \frac{CkT}{3\pi\mu d_p d_c v_0} \quad (2.4)$$

Sự điện di là sự chuyển động của các hạt có kích thước nhỏ hơn $0,1 \mu\text{m}$ chịu ảnh hưởng bởi lực tĩnh điện của các hạt tích điện trong buồng cháy. Các hạt trong dòng chảy bên trong buồng cháy chỉ bị suy yếu do sự khuếch tán các ion vào bề mặt hạt (sự khuếch tán ion) và cũng có thể là do trao đổi điện tử ở các bề mặt lỏng và rắn, sau đó là tách thành hai pha (cơ chế điện phân). Theo công bố của Dennis [54], điện tích tối đa có thể giảm nhanh xuống dưới $10e$ cho các hạt có kích thước nhỏ hơn $0,1 \mu\text{m}$. Xét về khía cạnh cơ học và giới hạn vật lý cho thấy các lực tĩnh điện trong các hệ thống buồng cháy là khá yếu. Tham số không thứ nguyên cho sự điện di có dạng [48]:

$$N_{se} = \frac{CQ^2}{3\pi^2\mu\epsilon_0 d_p d_c^2 v_0} \quad (2.5)$$

Đối với tác động quán tính, việc so sánh giữa hiệu quả thu thập thực nghiệm và lý thuyết có thể dựa trên các công thức thực nghiệm khác nhau, chẳng hạn công thức đưa ra bởi Langmuir và Blodgett [53]:

$$\eta_{0,I} = \frac{S_{tk}^2}{(S_{tk} + 0,25)^2} \quad (2.6)$$

Biểu thức của Stokes không thứ nguyên cho thời gian nghỉ: S_{tk} , cũng là kí hiệu của tham số quán tính không thứ nguyên được tính theo phương trình (2.7). Nó đặc trưng cho tỷ số của lực cần thiết để ngăn chặn một hạt hình cầu ở khoảng cách đặc trưng của chương ngại vật (kích thước đặc trưng xét trong xilanh là bán kính của nó ($d_c/2$)) với ma sát chất lỏng tại vận tốc tương đối v_0 [55]:

$$S_{tk} = N_{si} = \frac{C\rho_p d_p^2 v_0}{18\mu d_c} \quad (2.7)$$

Lắng trọng lực: ảnh hưởng này có thể bị bỏ qua. Đại lượng không thứ nguyên N_{sg} là tỉ lệ trọng lực đối với ma sát chất lỏng trên một hạt hình cầu được tính theo phương

trình (2.8). Đối với phạm vi kích thước giả định cho hạt tro bay N_{sg} có độ lớn tối thiểu nhỏ hơn giá trị tương ứng cho quán tính va chạm.

$$N_{sg} = \frac{C\rho_p d_p^2 g}{18\mu v_0} \quad (2.8)$$

Khuếch tán nhiệt (thermophoresis) sinh ra bởi gradient nhiệt độ trong khối khí cháy gần bề mặt được làm mát [56]. Các hạt trong vùng chuyển tiếp này bị hấp dẫn bởi vách do chuyển động quán tính không ổn định vì sự phân bố không đồng đều của các phân tử khí xung quanh. Đối với dòng trượt ($Kn \leq 1$) sức hút khuếch tán nhiệt sẽ mạnh hơn so với vùng liên tục ($Kn \gg 1$). Đại lượng khuếch tán nhiệt không thứ nguyên N_{st} được định nghĩa là tỷ số của lực khuếch tán nhiệt với lực ma sát của chất lỏng ở tốc độ v_0 .

$$N_{st} = \left(\frac{T_g - T_c}{T_g} \right) \left(\frac{\mu}{C\rho d_p v_0} \right) \left(\frac{k_g}{2k_g + k_c} \right) \quad (2.9)$$

Hiệu suất thu thập được tính toán dựa trên hiệu suất thu thập khuếch tán coi là một hệ số "hút nhiệt" f_s được đề xuất bởi Rosner [56]. Hệ số này cho phép điều chỉnh tuyến tính sự vận chuyển khối lượng khuếch tán, đặc trưng bởi $Nu_{m,0}$ cho tác động đồng thời của khuếch tán nhiệt (Nu_m):

$$Nu_m = Nu_{m,0} f_s \quad (2.10)$$

$$f_s = \frac{Pe_s}{1 - e^{-Pe_s}} \quad (2.11)$$

Pe_s là số Peclet được tính toán từ tốc độ dời nhiệt $(\alpha_T D)_p \nabla T/T$ ở lớp biên xung quanh các hạt và vật cản, hằng số khuếch tán D_p . Sự khuếch tán nhiệt $(\alpha_T D)_p$ của tốc độ chuyển dời được tính bởi Talbot [57]:

$$(\alpha_T D)_p = \frac{2C_s v \left(\frac{k_g}{k_p} + C_t Kn \right) \left[1 + Kn(A + B e^{-\frac{CR}{\lambda}}) \right]}{(1 + 3C_m Kn) \left(1 + 2 \frac{k_g}{k_p} + 2C_t Kn \right)} \left(\frac{k_g}{2k_g + k_c} \right) \quad (2.12)$$

2.1.2. Lý thuyết sự hình thành màng lỏng khi giọt tương tác với vách

2.1.2.1. Sự hình thành màng lỏng nhiên liệu trên bề mặt vách không gia nhiệt

Kết quả nghiên cứu của Arai [58] và Senda [59] cho thấy khi khoảng cách giữa vòi phun và vách tăng lên thì chất lượng phun sương tốt hơn, số lượng giọt nhiên liệu

đến vách ít hơn dẫn đến tỷ lệ nhiên liệu bám dính giảm đi trong khi diện tích của lớp màng nhiên liệu không đổi, do đó độ dày trung bình của lớp màng nhiên liệu giảm. Mặt khác, độ dày của màng lỏng nhiên liệu cũng đã được chứng minh là một thông số quan trọng trong quá trình tương tác của chùm tia phun với vách. Nó có thể dao động từ vài micron đến vài milimet tùy thuộc vào đặc tính phân rã của chùm tia nhiên liệu và điều kiện bề mặt vách. Độ dày của màng mỏng thường được biểu diễn như một tham số không thứ nguyên δ , được tính bằng tỷ số giữa độ dày của lớp chất lỏng h_{LF} và kích thước ban đầu của giọt D_0 :

$$\delta = \frac{h_{LF}}{D_0} \quad (2.13)$$

Kết quả nghiên cứu của Vander Wal [60] chỉ ra rằng đặc tính bề mặt vách có tác động đáng kể đến chiều dày của lớp màng mỏng nhiên liệu. Mức độ phụ thuộc đó đã được Tropea và Marengo [61] phân ra 4 mức độ:

- Lớp màng rất mỏng ($\frac{l_r}{D_0} < \delta < 3R_s^{0,16}$): trạng thái tương tác của giọt nhiên liệu phụ thuộc vào đặc tính hình học của bề mặt vách (trong đó l_r là chiều dài của độ nhám; R_s là độ nhám bề mặt).
- Lớp màng mỏng ($3R_s^{0,16} < \delta < 1,5$): trạng thái tương tác của giọt nhiên liệu ít phụ thuộc vào đặc tính hình học của bề mặt vách.
- Lớp màng dày ($1,5 < \delta < 4$): trạng thái tương tác của giọt nhiên liệu không phụ thuộc vào đặc tính hình học của bề mặt vách mà phụ thuộc vào độ dày của lớp màng.
- Lớp màng rất dày (tạo thành vũng) ($\delta > 4$): trạng thái tương tác của giọt nhiên liệu không phụ thuộc vào đặc tính hình học của bề mặt vách và độ dày của lớp màng.

Sự hình thành màng lỏng nhiên liệu gây ra các tương tác phức tạp giữa chùm tia phun với lớp chất lỏng, trong đó lớp chất lỏng tác động đến một số lượng lớn các tính chất của quá trình tương tác của chùm tia phun với vách bao gồm đặc tính của các giọt thứ cấp và sự bắn tóe của nhiên liệu. Các nghiên cứu thực nghiệm đều chỉ ra rằng khi lớp màng nhiên liệu dày hơn thì trạng thái bắn tóe của giọt nhiên liệu thứ cấp mạnh hơn, ngược lại khi các giọt thứ cấp tiếp xúc với bề mặt vách khô thì không xảy ra sự bắn tóe.

Yarin và Weiss [62] đã nghiên cứu tác động của sự phân rã các giọt nhiên liệu đến lớp màng lỏng nhiên liệu thông qua xây dựng mối qua hệ tương quan giữa vận tốc U_{cr} của giọt với tính chất của nhiên liệu và tần suất va chạm f của giọt với vách:

$$U_{cr} \gg 18 \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{0.25} \cdot \vartheta^{\frac{1}{8}} \cdot f^{\frac{3}{8}} \quad (2.14)$$

(trong đó: ϑ là độ nhớt động học, ρ là khối lượng riêng của nhiên liệu).

Khi đó kích thước giọt nhiên liệu đơn có thể được tính bằng biểu thức:

$$K_{cr} = We \cdot Oh^{-0.4} \gg 1 \quad (2.15)$$

Do đó, nếu giả định rằng nhóm không thứ nguyên hợp nhất hạt đơn kiểm soát sự bắn tóe của các giọt đơn mà có ảnh hưởng đến màng lỏng nhiên liệu đã tồn tại trước đó. Khi lượng bắn tóe thỏa mãn yêu cầu thì sự kết hợp của các số không thứ nguyên Weber (We) và Ohnesorge (Oh) là rất phù hợp để định lượng các điều kiện phân rã của các giọt tác động lên bề mặt vách ướt. Cossali và cộng sự [63] đã thiết lập tiêu chuẩn cho sự bắn tóe của giọt nhiên liệu tương tác trên lớp màng lỏng nhiên liệu đã tồn tại sẵn:

$$K_{cr} = 2100 + 5880\delta^{1.44} \quad (2.16)$$

Với $0,1 < \delta < 1$; $7 \cdot 10^{-3} < Oh$; $Re = 5 \cdot 10^{-5}$. Trong nghiên cứu gần đây của Motzkus và cộng sự [64], phương trình trên đã được điều chỉnh như sau: hệ số 5880 được thay thế bằng 2000, để phù hợp với các dữ liệu thực nghiệm. Tương tự vậy, Rioboo [65] đã tiến hành nghiên cứu sự bắt đầu bắn tóe của các giọt nhiên liệu khi tương tác với bề mặt vách ướt. Kết quả thực nghiệm thu được cho thấy sự phụ thuộc vào 2 thông số: chiều dày lớp màng lỏng không thứ nguyên (δ) và tham số K . Tiêu chuẩn chuyển đổi cho sự phân rã của giọt được đề xuất là $K_{cr} = 2100$ là phù hợp với phương trình 2.16 đối với chất lỏng có độ nhớt thấp. Tuy nhiên, theo Vander Wal và cộng sự [60], ranh giới phân định giữa vùng bắn tóe và vùng không bắn tóe của các giọt khi tương tác với lớp màng mỏng chất lỏng bao phủ trên bề mặt vách được thể hiện qua mối quan hệ sau:

$$We^{0,585} \cdot Oh^{-0,17} = 63 \quad (2.17)$$

Các kết quả nghiên cứu đều khẳng định sự hình thành màng lỏng nhiên liệu trên bề mặt vách đã gây ra một sự thay đổi đáng kể đến đặc tính bắn tóe của giọt khi tương tác với vách. Tuy nhiên, có một số nghiên cứu đã khẳng định rằng ranh giới của sự bắn tóe hay không bắn tóe của giọt tương tác không có quan hệ với độ dày màng lỏng được hình thành trên bề mặt vách.

Mặt khác, nghiên cứu của Huang và Zhang [66] đã chỉ ra rằng kích thước của giọt và chiều dày lớp màng lỏng có tác động đến trạng thái của các giọt nước hoặc nhiên liệu khi tương tác với vách. Nghiên cứu của Cossali và cộng sự [63] cũng khẳng định

có sự thay đổi đáng kể về trạng thái của giọt tương tác khi lớp màng mỏng chất lỏng mỏng hơn. Dựa trên các kết quả đã công bố trên, một phương trình tiêu chuẩn chuyển đổi đã được đề xuất để thiết lập mối quan hệ của We và Oh với chiều dày lớp màng mỏng chất lỏng trên bề mặt vách:

$$We^{0,375} \cdot Oh^{-0,25} = 25 + 7\delta^{1,44} \quad (2.18)$$

Ngoài ra, một phương pháp khác cũng được đề xuất trong nghiên cứu của Bai và Gosman [67], họ cho rằng chiều dày của lớp màng lỏng trên bề mặt vách không ảnh hưởng tới sự lắng đọng và bắn tóe của giọt chất lỏng. Thay vào đó, họ đề xuất một tiêu chuẩn mới thông qua cập nhật hằng số thực nghiệm như khi đánh giá tương tác của giọt chất lỏng trên bề mặt vách khô và giả định rằng sự tương tác của lớp màng lỏng như điều kiện bề mặt qua độ nhám bề mặt:

$$We \cdot Oh^{-0.366} = 1320 \quad (2.19)$$

Rõ ràng quan điểm này cần phải được cân nhắc và xem xét cẩn thận bởi độ dày màng lỏng có thể tác động đến độ nhám bề mặt của vách.

Bảng 2.1 tóm tắt các tiêu chuẩn chuyển tiếp về sự tương tác của các giọt trên bề mặt vách ướt đã được thiết lập từ các nghiên cứu trước đây. Bảng được chia thành hai phần: phần 1 thể hiện các phương trình theo hệ số K tổng quát, phần hai thể hiện các ngưỡng phân rã khác nhau tương ứng với các hệ số thực nghiệm và các số không thứ nguyên We và Oh khác nhau.

Bảng 2. 1: Tiêu chuẩn chuyển tiếp giữa các vùng phân rã khi giọt tương tác với vách ướt.

Thông số K	Tác giả	Kết quả thực nghiệm
$K_{cr} = We \cdot Oh^{-0.4}$	Cossali	$K_{cr} = 2100 + 5880\delta^{1.44}$
	Motzkus	$K_{cr} = 2100 + 2000\delta^{1.44}$
	Rioboo	$K_{cr} = 2100$
	Okawa	$K_{cr} = 2100$
Thông số K hiệu chỉnh		
$K_{cr}^* = We^a \cdot Oh^b$	Bai and Gosman	$We \cdot Oh^{-0.366} = 1320$

	Vander Wal	$We.Oh^{-0.290} = 1190,7$
	Huang and Zhang	$We.Oh^{-0,667} = (25 + 7\delta^{1,44})^{2,667}$

Tuy nhiên, việc sử dụng các tiêu chuẩn trên cần phải thận trọng bởi các số liệu được đưa ra của mỗi tác giả phù hợp với mỗi điều kiện và phạm vi nhất định. Do đó, việc liệt kê các kết quả nghiên cứu ở trên sẽ cung cấp một công cụ khách quan để có thể so sánh các phương pháp tiếp cận khác nhau.

Khi vận tốc của giọt tương tác là tương đối thấp thì giọt có thể bám dính vào vách hoặc nảy lại nếu bản thân nó vẫn còn năng lượng cho đến cuối của giai đoạn lan rộng lớp chất lỏng. Các tiêu chuẩn chuyển tiếp đề xuất bởi Bai và Gosman [67] đã thể hiện cả ranh giới của sự bám dính/nảy lại với $We = 2$ và nảy lại/lan rộng với $We = 5$ khi khảo sát các giọt nước tương tác trên bề mặt vách ướt. Tuy nhiên, sau đó các tác giả đã hiệu chỉnh số We lên tới 20 cho quá trình chuyển đổi giữa sự nảy lên và lan rộng khi xét đến các tác động của các giọt đã tương tác trước. Stanton và Rutland [23] đã có phương pháp tiếp cận tương tự nhưng kết quả thu được có sự khác biệt nhỏ: $We = 5$ đối với sự chuyển tiếp của bám dính/nảy lên và $We = 10$ đối với sự chuyển tiếp của nảy lên/lan rộng.

Theo Rioboo và cộng sự [65] sự nảy lên sẽ được thúc đẩy bởi sự gia tăng của sức căng bề mặt của chất lỏng và góc tiếp xúc của giọt với bề mặt vách. Trong khi đó, Sommerfeld và Huber [68] kết luận rằng độ nhám của bề mặt vách cũng làm thay đổi cơ chế nảy lên của các hạt. Tuy nhiên, các vấn đề trên chỉ thực sự có ảnh hưởng đến trạng thái tương tác của giọt với bề mặt vách khi mà cơ chế lan rộng mới bắt đầu hoặc khi cơ chế này kết thúc tức là khi mà trên bề mặt vách không tồn tại hoặc tồn tại rất ít lớp màng lỏng hay điều kiện bề mặt vách là khô.

2.1.2.2. Sự hình thành màng lỏng nhiên liệu trên vách được gia nhiệt

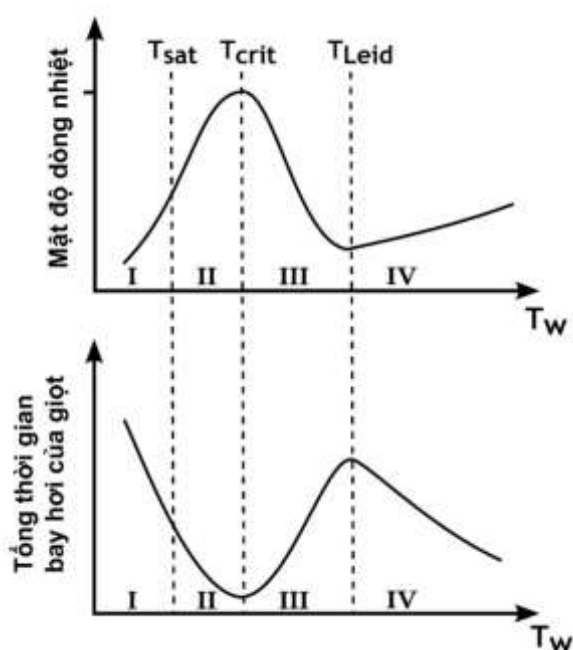
Xét tương tác của chùm tia phun với vách được gia nhiệt và hiệu ứng nhiệt tác động đến cơ chế thủy động của các giọt tương tác. Giọt sẽ được gia nhiệt bởi khí nóng trên bề mặt vách, nó sẽ nhận nhiệt và nóng lên.

Khi trao đổi nhiệt xảy ra, khối lượng chất lỏng sẽ giảm dần do quá trình bay hơi của nó diễn ra trong vùng khí nóng trên bề mặt vách. Các đặc điểm của quá trình chuyển pha đó sẽ ảnh hưởng lớn đến cơ chế tương tác của giọt với vách. Nếu khối lượng giọt chất lỏng không bay hơi hoàn toàn trong quá trình rơi trong vùng khí nóng thì một phần giọt sẽ tương tác với bề mặt vách nóng, khi đó các cơ chế truyền nhiệt tiếp theo có thể

xảy ra. Trong phạm vi nghiên cứu của đề tài, lý thuyết về cả hai cơ chế bay hơi và tương tác với vách được gia nhiệt sẽ được tập trung nghiên cứu dưới 2 chủ điểm: 1) Cơ chế truyền nhiệt xảy ra khi hạt chất lỏng lắng xuống bề mặt vách được gia nhiệt và 2) Sự bay hơi của các giọt phân tán trong môi trường khí nóng.

Cơ chế truyền nhiệt:

Theo lý thuyết sôi cổ điển của Dhir [69], Rein [70], Faghri và Zhang [71], quá trình sôi (*đường cong sôi*) của giọt chất lỏng khi rơi, tương tác với bề mặt vách được gia nhiệt nằm ngang và bao phủ bởi một lớp chất lỏng liên tục có 4 giai đoạn khác nhau: 1) sôi đối lưu tự nhiên, 2) sôi bên trong giọt, 3) sôi chuyển tiếp và 4) sôi màng. Đường cong sôi và thời gian tồn tại của giọt chất lỏng được thể hiện trên Hình 2.1.



Hình 2.1. Sự sôi và thời gian tồn tại của giọt chất lỏng [72]

Ở vùng I, nhiệt độ dưới nhiệt độ bão hòa của chất lỏng và không có dạng bong bóng. Cơ chế truyền nhiệt chính là đối lưu tự nhiên, không thay đổi pha.

Khi nhiệt độ bề mặt được nâng lên (trên nhiệt độ bão hòa), hệ thống đi vào giai đoạn sôi bên trong giọt (vùng II). Điều này được đi kèm với sự xuất hiện của bong bóng hơi tại các vị trí nhất định (thường được xác định là các vị trí bên trong) và sự gia tăng mật độ dòng nhiệt cho đến khi đạt được thông lượng nhiệt tới hạn.

Khi đạt tới cực đại của đường cong sôi, giai đoạn sôi chuyển tiếp bắt đầu diễn ra (vùng III). Từ thời điểm này, tốc độ bong bóng sinh ra vượt tốc độ tạo bong bóng tách ra từ bề mặt vách được gia nhiệt. Các bong bóng hình thành gần vách, sau đó di chuyển lên trên thông qua cơ chế nổi để bắt đầu hợp nhất và tạo thành màng hơi tại vùng tiếp giáp của 2 pha lỏng-rắn. Điều đó làm giảm diện tích tiếp xúc, tạo ra một lớp cách nhiệt

cản trở mật độ dòng nhiệt giữa hai pha và lắng đọng cục bộ ở nhiệt độ Leidenfrost. Kết quả là khi nhiệt độ bề mặt tăng thời gian bay hơi tăng lên trong khi mật độ dòng nhiệt giảm. Một đặc điểm khác của giai đoạn là trạng thái không ổn định của màng hơi dẫn đến đôi khi bong bóng vỡ ra khỏi bề mặt, bùng nổ ở vùng tiếp giáp của 2 pha khí - lỏng và dẫn đến hình thành các giọt nhỏ hơn.

Khi nhiệt độ vách được gia nhiệt đến mức độ đủ lớn để duy trì màng hơi ổn định, giọt lúc này tách hoàn toàn khỏi bề mặt vách. Điểm này - được gọi là điểm nhiệt độ Leidenfrost - đánh dấu sự khởi đầu của giai đoạn sôi màng (vùng IV) và được đặc trưng bởi giá trị thông lượng nhiệt cực tiểu. Sự truyền nhiệt diễn ra chủ yếu bằng cách truyền qua màng hơi. Do đó, khi nhiệt độ bề mặt vách tăng lên, mật độ dòng nhiệt được tăng cường vì gradient nhiệt giữa chất lỏng và bề mặt cao hơn.

Theo lý thuyết này, Bai và Gosman [67] bổ sung thêm hai nhiệt độ đặc trưng: nhiệt độ vùng bám dính (xét cho vùng bên dưới của giọt tương tác, tại đó các giọt có sự bám dính với phần chất lỏng bên dưới có năng lượng tương tác thấp); và nhiệt độ vùng nảy lên (xét cho vùng ở trên giọt tương tác, tại đó các giọt tương tác được đẩy lên ở năng lượng tương tác thấp). Mặt khác, một giả thuyết đơn giản hơn đã được Naber và Farrel [73] đề xuất khi kết hợp cơ chế truyền nhiệt với cơ chế thủy động học. Hai vùng đầu tiên (I và II) có nhiệt độ thấp hơn (tức là giai đoạn sôi đối lưu và sôi bên trong nhân) có liên quan đến cơ chế làm ướt, trong khi giai đoạn sôi màng liên quan đến cơ chế không ướt. Trong chế độ chuyển tiếp, tiếp xúc giữa giọt và bề mặt được giả định là không liên tục.

Hình 2.1 thể hiện định tính đường cong sôi và thời gian tồn tại của giọt, đồng thời cho thấy ranh giới của các vùng trong cơ chế truyền nhiệt. Tuy nhiên, các giá trị định lượng (như giá trị chính xác của T_{cr} , T_{sat} , T_{Leid}) phụ thuộc vào tính chất của quá trình tương tác [74]. Nếu xét cho các giọt nhiên liệu thì sự tự bốc cháy nên được xem xét đến khi nhiệt độ bề mặt vách cao [70].

Các nghiên cứu trước đây đều khẳng định rằng: trên đường cong sôi của chất lỏng, nhiệt độ Leidenfrost được xem là một điểm nhiệt độ nhạy cảm nhất. Trái ngược với nhiệt độ bão hòa, nhiệt độ Leidenfrost rất nhạy cảm với các điều kiện tương tác, như đặc tính hình học của bề mặt [75], tính chất của chất lỏng [76], góc tương tác [77] và áp suất xung quanh [78].

Cơ chế bay hơi:

Godsave và Spalding [79] là những người đầu tiên đề xuất mô hình bay hơi dựa trên nguyên tắc D^2 cho một giọt đơn. Kể từ đó, lý thuyết này đã được nhiều tác giả xem xét [80][81] nhưng nó chủ yếu dành riêng cho việc nghiên cứu động lực học của những

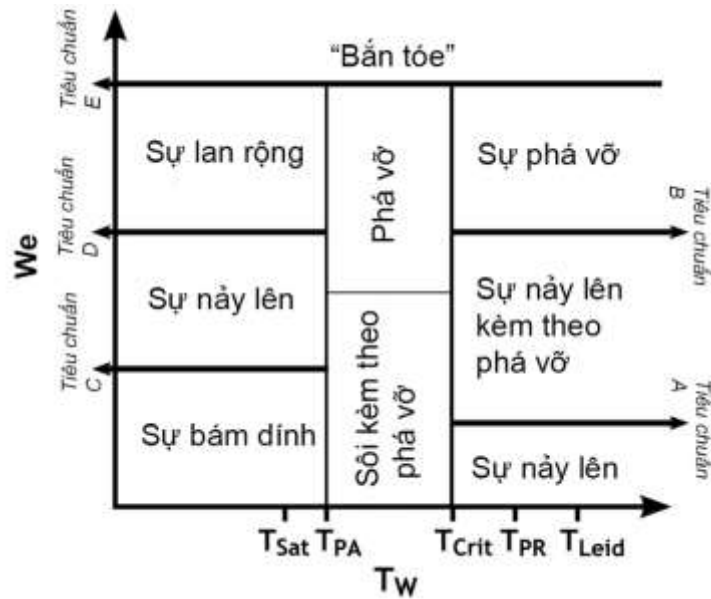
giọt đơn. Mặt khác, Abramzon và Sirignano [82] đã mở rộng phạm vi ứng dụng bằng cách đề xuất mô hình bay hơi của giọt khi phun. Các tác giả đã chứng minh rằng hiệu ứng đối lưu là thông số có liên quan nhất để xem xét.

Trong khi đó, nhiều nghiên cứu đã so sánh trực tiếp giữa các kết quả tính toán và các phép đo thực nghiệm với mức tương quan khá tốt [83], hay kết quả nghiên cứu của Barata [84] về sự bay hơi của nhiên liệu sinh học. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu gần đây đã quan tâm nhiều hơn đến các vấn đề liên quan đến sự gia nhiệt tức thời bề mặt thoáng phía trên vách [85] và sự phân bố nhiệt độ bên trong các hạt [86] [87] và dọc theo bề mặt [88].

Các nghiên cứu trên đã được thực hiện với các chất lỏng thuần khiết (đơn thành phần). Tuy nhiên, hầu hết các nhiên liệu được sử dụng trong động cơ là các chất lỏng đa thành phần và phức tạp. Trên thực tế, xăng dầu và nhiên liệu sinh học đều chứa hàng trăm thành phần hóa học khác nhau. Nếu xét đến tất cả các thành phần của nhiên liệu sẽ là quá tham vọng để đạt được mục tiêu nghiên cứu về cơ chế bay hơi. Tuy nhiên, nghiên cứu của Long và cộng sự [89] có thể phỏng theo các giá trị của nhiệt và khối lượng được quan sát trong quá trình bay hơi của một nhiên liệu cụ thể bằng cách sử dụng một mô hình hợp chất bao gồm một số lượng tương đối nhỏ các thành phần. Phân tích bay hơi của chất lỏng đa thành phần đã trở thành một chủ đề quan tâm chính đối với các nhà nghiên cứu. Ví dụ, Bhattacharya [90] đã tiến hành một nghiên cứu lý thuyết về nhiên liệu hydrocarbon hai thành phần trong môi trường khí xung quanh nhiệt độ cao, trong khi Maqua [87] đã đo sự phân bố nhiệt độ của các giọt hai thành phần trong các điều kiện nhiệt khác nhau. Gần đây hơn, Strotos [91] đề xuất một mô hình số của chất lỏng hydrocarbon hai thành phần được nhỏ lên bề mặt vách gia nhiệt và xác nhận nó dựa trên dữ liệu thực nghiệm. Các nghiên cứu gần đây đã xét thêm các thông số về điều kiện dòng chảy, nhiệt độ và nồng độ của nhiên liệu khi nghiên cứu cơ chế bay hơi của nhiên liệu đa thành phần.

Mặt khác, Sazhin đã tiến hành nghiên cứu thực nghiệm mô hình bay hơi của giọt đa thành phần dựa trên các giải pháp phân tích sự dẫn nhiệt và khuếch tán của các chất và lượng chất tùy ý [85]. Gần đây, xu hướng này đã được tiếp tục phát triển bởi một số nhóm nghiên cứu khác, như nghiên cứu của [92][93][93] đã bổ sung và làm rõ hơn về cơ chế bay hơi của các giọt nhiên liệu đa thành phần.

Lee và Ryu [94] đã đề xuất sơ đồ tổng quát thể hiện các chế độ tương tác và điều kiện chuyển tiếp với các mức nhiệt bề mặt vách khác nhau thông qua mối quan hệ giữa số We và nhiệt độ bề mặt vách được gia nhiệt T_w (Hình 2.2).



Hình 2.2. Mối quan hệ giữa We và T_w [77]

Theo nghiên cứu của Wachters và Westerling (1966) ranh giới giữa các cơ chế tương tác của giọt chất lỏng với bề mặt vách được gia nhiệt ở 400K tùy thuộc vào số We , giọt tương tác và nảy lên khi số $We < 30$, giọt bị phá vỡ và trải rộng trên bề mặt khi $We > 80$. Tiếp sau đó, nghiên cứu Naber và Farrel [73] đã thực hiện nhỏ giọt chất lỏng lên bề mặt vách kim loại được gia nhiệt ở các mức độ khác nhau, khi nhiệt độ bề mặt vách thuộc vào khoảng nhiệt độ từ điểm bão hòa của chất lỏng đến nhiệt độ Leidenfrost cho thấy có sự tương quan đơn giản giữa We và T_w . Các tác giả kết luận rằng giọt chất lỏng bị phá vỡ trong môi trường được gia nhiệt ứng với $We = 24$.

2.1.3. Lý thuyết cơ chế hình thành soot

Cơ chế cơ bản của sự hình thành soot trong ngọn lửa là vấn đề được rất nhiều nhà nghiên cứu về lý thuyết cháy quan tâm trong những năm qua. Những tiến bộ đáng kể được thực hiện từ những năm 1970 do áp dụng các kỹ thuật chuẩn đoán trong nghiên cứu. Các kỹ thuật này cho phép đo được số lượng khá lớn khối lượng của các hợp chất cao phân tử, các ion và gốc hydrocarbon không ổn định, những chất vốn được coi là các tiền tố hình thành các hạt soot, đặc biệt là các hạt soot có đường kính rất nhỏ khoảng 10Å. Kỹ thuật quang học và lấy mẫu chùm phân tử kết hợp với phân tích phổ khối là các phương pháp phổ biến nhất [95][96]. Mặc dù hầu hết các nghiên cứu này đã được thực hiện với ngọn lửa trộn trước ở áp suất thấp hơn nhiều so áp suất trong động cơ diesel trong các mô hình thực nghiệm. Kết quả thực nghiệm bao gồm kích thước và cấu trúc vi mô của các hạt soot được tạo ra, các ảnh hưởng định tính của sự thay đổi tỷ số cân bằng cục bộ, nhiệt độ, áp suất và ảnh hưởng của các chất phụ gia như các halogen hoặc kim loại kiềm. Điều này đã dẫn đến giả định rằng cơ chế của sự hình thành soot là tương tự nhau ở trong động cơ thực và mô hình thực nghiệm. Tuy nhiên, các nghiên

cứu gần đây về sự hình thành soot trong hỗn hợp khí propan trộn trước giàu soot trong buồng cháy ở áp suất cao hơn (0,45-1,0 MPa) trong bình thể tích không đổi đã cho thấy có nhiều khác biệt rõ rệt [95]. Sự mâu thuẫn giữa các kết quả của nghiên cứu này với các nghiên cứu về ngọn lửa trong phòng thí nghiệm sẽ được phân tích dưới đây.

Cơ chế hình thành soot từ pha hơi của ngọn lửa trong động cơ diesel được mô tả sơ bộ trên Hình 2.3. Soot dưới dạng các khối cầu gồm nhiều hạt hình cầu riêng lẻ trong xilanh động cơ diesel, trong khi đó trong những ngọn lửa trộn trước, dạng hình học của toàn bộ các hạt đã hình thành thường là một chuỗi mạch tổng hợp. Các mạch này được hình thành trong quá trình tổng hợp, với thời gian cư trú khoảng 100 ms. Thời gian cư trú tương đối ngắn (1-10 ms) [97] cùng với sự phát triển ban đầu và kết tụ nhanh hơn khi áp suất và tốc độ hòa trộn cao hơn.

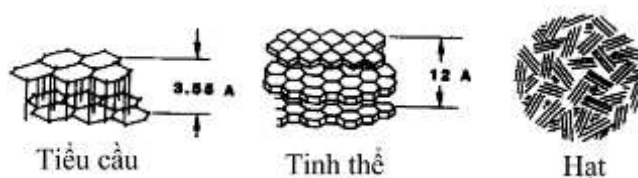
Sự hình thành các hạt bởi các phản ứng trùng hợp và cacbon hóa trong từng giọt chất lỏng đã được ghi nhận trong thí nghiệm [98]. Nếu thiết bị phun nhiên liệu được điều chỉnh đúng cách, sự đóng góp của cơ chế pha lỏng vào tổng lượng phát thải hạt của động cơ diesel (ngoại trừ ở tải nhẹ) là không đáng kể. Với quá trình hình thành soot được mô tả trong Hình 2.2, quá trình phá vỡ soot cũng đồng thời xảy ra trong khu vực ngọn lửa có các chất oxy hoá. Như Fenimore và Jones [99] đã nhận định, điều này rất quan trọng ngay cả trong các hệ thống ngọn lửa trộn trước giàu nhiên liệu. Chúng đóng một vai trò lớn trong động cơ diesel, thường hoạt động ít hơn ở tốc độ cân bằng tổng thể.



Hình 2.3. Cơ chế hình thành hạt soot trong buồng cháy

Khi nghiên cứu cơ chế hình thành soot trong động cơ diesel, các phân tử nhiên liệu điển hình có từ 12-22 nguyên tử C và tỉ lệ H/C bằng khoảng 2. Do đó, trong sự hình thành các hạt soot điển hình có chứa khoảng 10^5 nguyên tử cacbon và có tỉ lệ H/C khoảng 0,1. Các nguyên tử cacbon được tập hợp lại thành các mảng hình lục giác, gọi là các tiểu cầu [100]. Như minh họa trong Hình 2.4, khoảng cách giữa các lớp trung bình là $3,55\text{\AA}$, chỉ lớn hơn một chút so với thể graphite. Các tiểu cầu được sắp xếp thành

các lớp để hình thành tinh thể. Thông thường có 2-5 tiểu cầu trên mỗi tinh thể và 10^3 tinh thể sắp xếp có trật tự trên mỗi hạt soot hình cầu [101]. Các tinh thể được sắp xếp theo kiểu turbo tñnh, với các mặt phẳng song song với bề mặt hạt. Cấu trúc turbo tñnh này cũng là đặc trưng của than chì nhiệt phân và được cho là nguyên nhân của sự cản trở lớn bất thường của nó tới sự oxi hóa. Trong thời gian cư trú dài, các hạt soot hình cầu có thể kết tụ thành các chuỗi mạch C phân nhánh hoặc không phân nhánh.



Hình 2.4. Cấu trúc của hạt cacbon[101]

Sự phân hủy nhiệt

Với hầu hết các hydrocacbon, sự phân hủy và sắp xếp lại các phân tử và nguyên tử của phân tử nhiên liệu xảy ra trước khi hình thành soot. Các quá trình như vậy thường dẫn đến các hydrocacbon ít bão hòa, có khối lượng phân tử thấp hơn các gốc, chúng thường được gọi là pyrolytic, đặc biệt là khi chúng diễn ra trong môi trường không có oxy. Các phản ứng nhiệt phân nói chung là các phản ứng thu nhiệt, trong đó tốc độ phản ứng phụ thuộc nhiệt độ. Sự phân hủy thường diễn ra bằng cơ chế gốc tự do, vì vậy dù nồng độ O, O₂ hoặc OH nhỏ cũng có thể làm tăng đáng kể quá trình bổ sung cho sự hình thành các gốc tự do thông qua các phản ứng phân nhánh.

Sự tạo mầm hay tạo hạt

Sự tạo mầm trong quá trình hình thành soot liên quan đến sự hình thành của một phôi phát triển nhanh hơn do phản ứng phân hủy hoặc các phản ứng khác. Do đó, các tiền chất hydrocarbon cho hạt nhân của soot phải đủ ổn định để chống lại sự mất cân bằng ở nhiệt độ cao trong các hệ thống đốt, nhưng phản ứng đủ để tính đến tốc độ mà ở đó các hạt soot được hình thành (thời gian đặc trưng $\leq 1ms$). Glassman [102] và Thomas [103] đã đề xuất cấu trúc liên hợp cực cho các tiền tố trực tiếp của quá trình tạo mầm. Các phân tử nhiên liệu từ những chất liên hợp cực này được hình thành một cách trực tiếp, chẳng hạn như các chất thơm, nên tốc độ tạo hạt sẽ nhanh hơn.

Sự phát triển của soot

Sự phát triển của soot là sự bổ sung khối lượng vào một hạt soot (sau khi nhân của soot được hình thành) bằng các phản ứng với các phân tử nhiên liệu trong giai đoạn khí. Cũng như sự phát triển của hạt nhân soot, các hydrocarbon trong giai đoạn phản ứng chủ yếu là axetilen, trong đó các polyme có khối lượng phân tử cao hơn được bổ

sung nhiều hơn các polyme có khối lượng nhỏ hơn [96]. Các polyaxetilen nhỏ trải qua quá trình trùng hợp nhiều hơn, do cùng một cơ chế được nêu trong phần trước (hình thành nhân). Do kết hợp ưu thế của các polyme lớn hơn, tỷ lệ H/C của các hạt soot (ban đầu $\sim 0,4$ ở đường kính 15\AA) giảm xuống về giá trị phát triển của nó. Điều này cho thấy hầu hết polyaxetilen được thêm vào phải có khối lượng phân tử rất cao hoặc quá trình tách H cũng diễn ra.

Sự kết tụ

Các hạt soot nhỏ, mỗi hạt đều phát triển thông qua sự bổ sung từ pha khí, được thể hiện qua sự hợp nhất. Do mật độ hạt soot thấp so với các hidrocarbon ở pha khí trong giai đoạn phát triển, nên làm tăng đường kính trung bình của hạt trong giai đoạn này [104]. Khi sự kết tụ xảy ra các hạt nhanh chóng tạo thành dạng hình cầu. Quá trình này các hạt soot nhỏ hình cầu hình thành một hạt hình cầu lớn hơn, chúng ta gọi là sự hợp nhất. Sự kết tụ, chỉ diễn ra đối với những hạt nhỏ có tốc độ phát triển cao. Như đã đề cập ở phần trước, điều này xảy ra với hạt có đường kính 100\AA ở áp suất thấp trong hệ thống trộn trước.

Khi tốc độ tăng trưởng chậm do sự suy giảm của các hidrocarbon ở pha khí hoặc sự mất đi tính hoạt động của hạt, sự hợp nhất dẫn đến các chuỗi các hạt soot hình cầu. Quá trình này, đòi hỏi một mô tả toán học khác với sự động tụ gọi là sự tập hợp.

Sự thiêu kết

Sau quá trình phát triển hạt, chúng tiếp tục thiêu kết của các hạt soot dạng cầu dẫn đến hình thành chuỗi. Thực tế cho thấy các cấu trúc đó không được tìm thấy trong loại soot được lấy mẫu trong buồng cháy của động cơ diesel vì quá trình cháy trong động cơ diesel diễn ra quá ngắn để quá trình hình thành soot trên hoàn thành. Wersborg và các cộng sự [104] đã nhận thấy rằng khoảng 20% hạt trong khu vực xảy ra sự thiêu kết là tác nhân. Chúng chỉ ra rằng các tác nhân này nằm trên các chuỗi hạt, cho biết hình dạng của các cụm giống như vậy đối với một tác nhân cụ thể. Do không có sự tăng trưởng [105] hoặc tạo nhân trong quá trình thiêu kết, tốc độ thiêu kết tỉ lệ thuận với bình phương mật độ hạt.

Sự oxi hóa

Sự oxi hóa của các hạt soot, nhân và các tiền tố sẽ xảy ra trong vùng của ngọn lửa nơi mà các chất oxi hóa hiện diện. Fenimore và Jones [106] đã giải thích sự xâm nhập của phát thải soot từ ngọn lửa khuếch tán trộn trước khi xét đến sự tranh chấp giữa sự kết tụ và oxi hóa bởi OH. Quá trình chiếm ưu thế được giả định để kiểm soát bởi sự tranh chấp OH bởi CO và các hạt soot kết tụ. Với giả định rằng một gốc OH hướng tới

di chuyển một phân tử C từ các hạt soot trong 10 lần va chạm, chúng xuất phát từ các tiêu chí cho phát thải soot.

2.1.4. Giả thuyết cơ chế hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ

2.1.4.1. Giả thuyết thứ nhất

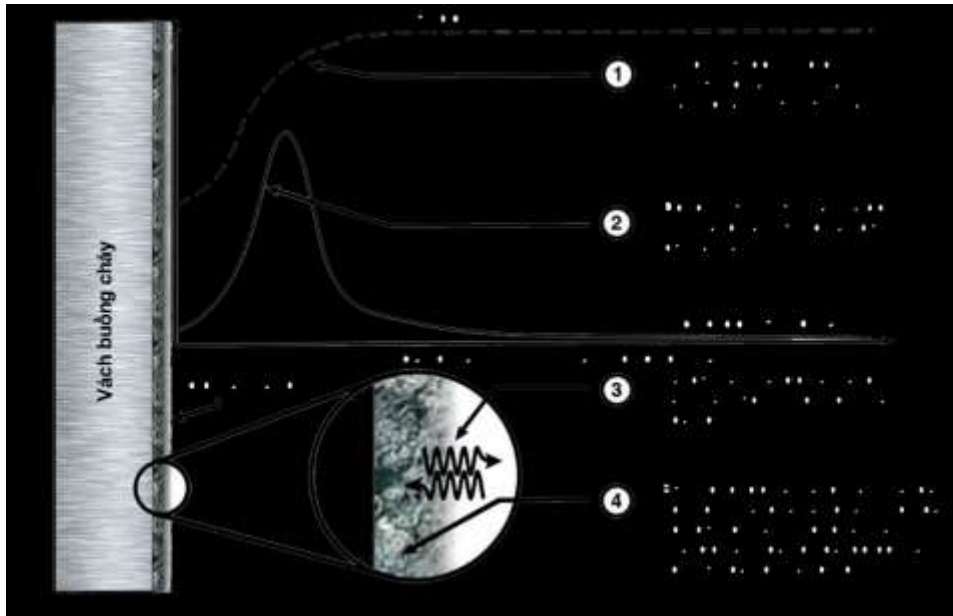
a, Nội dung giả thuyết

Từ các kết luận được rút ra từ các nghiên cứu trước đây có thể xây dựng một mô hình cơ bản của quá trình hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ. Cơ chế đề xuất được trình bày trên Hình 2.5, khi ngọn lửa ở phía trước gần vách buồng cháy của động cơ vào thời điểm cuối của chu trình, nó bắt đầu mất nhiệt và truyền cho nguồn lạnh, làm chậm tốc độ phản ứng và ngăn không cho ngọn lửa lan truyền ra xung quanh để tới vách của buồng cháy. Kết quả là một lượng hỗn hợp môi chất nhiên liệu và không khí trong khu vực lửa tắt tức thời không đủ nhiệt độ cao để quá trình oxi hóa xảy ra hoàn toàn. Các phản ứng cháy không hoàn toàn dẫn tới sản phẩm cháy thu được là các sản phẩm bay hơi thấp, các hydrocacbon bị oxi hóa một phần và chúng có khả năng ngưng tụ trên bề mặt vách và chúng có thể coi là các tiền tố của cặn.

Như trên Hình 2.6, khu vực có các tiền tố cặn hình thành không phải là khu vực liền kề bề mặt vách mà có khoảng cách khá nhỏ với vách để nhiệt độ đủ cao cho một số phản ứng diễn ra. Mật độ dòng nhiệt khuếch tán và đối lưu sẽ mang các tiền tố cặn ra khỏi khu vực chúng được hình thành, vào tận các khí bên trong, nơi chúng có khả năng bị oxi hóa thành các sản phẩm cháy cân bằng và hướng tới bề mặt vách, nơi mà chúng có thể ngưng tụ.

Nếu lượng tiền tố cặn đủ để hình thành thông qua các phản ứng oxi hóa từng phần và được vận chuyển đến bề mặt vách, áp suất riêng của các chất tại vách có thể vượt quá áp suất hơi của nó ở nhiệt độ của vách, do đó cho phép sự ngưng tụ diễn ra. Ngược lại nếu một chất được ngưng tụ trên vách hoặc lớp cặn không liên kết hóa học với phần cặn còn lại, nó có thể hóa hơi nếu áp suất riêng phần của nó trong pha khí thấp hơn áp suất hơi.

Mô hình này giả sử rằng ở giai đoạn đầu của sự hình thành cặn lắng, bằng cách quan sát các tiền tố cặn bao gồm các giọt chất lỏng gần như hình cầu với đường kính khoảng $10\mu\text{m}$, cho thấy ảnh hưởng mạnh mẽ của sức căng bề mặt. Những chất này có thể được giữ lại trên vách qua nhiều chu trình làm việc của động cơ và tiếp xúc với ngọn lửa buồng cháy để trải qua các phản ứng tiếp theo và trở thành một phần cấu trúc cặn dạng polyme. Khi cặn tiếp tục phát triển theo cách này, nó hoạt động như một lớp cách nhiệt và làm tăng nhiệt độ bề mặt của các phân tử khí cho đến khi tỉ lệ ngưng tụ trở lên quá thấp để tạo ra sự phát triển của cặn lắng vượt quá tốc độ loại bỏ cặn.



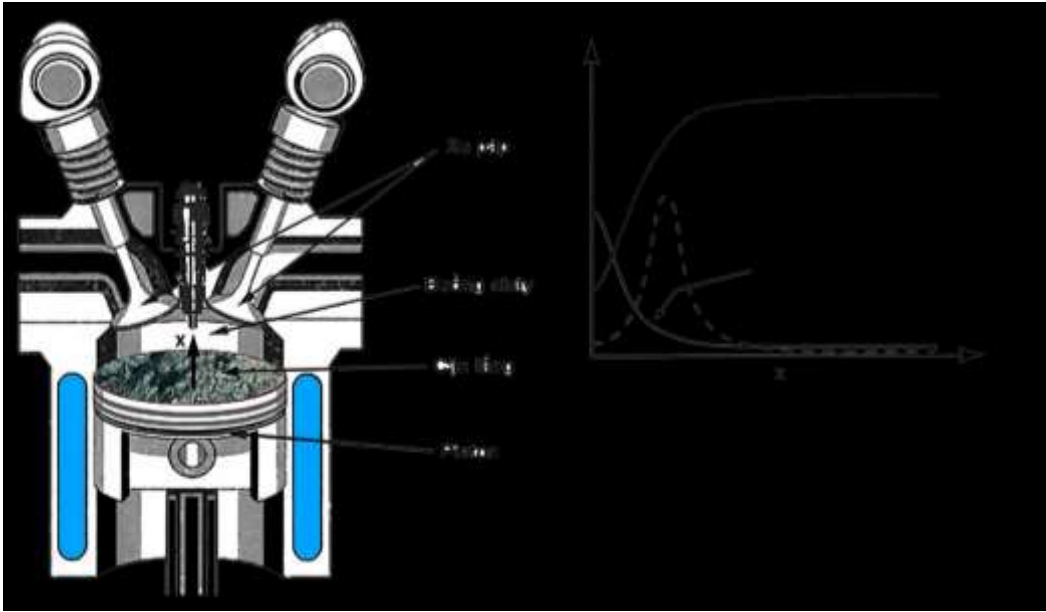
Hình 2.5. Giả thuyết cơ chế hình thành cặn lắng trong buồng cháy [14]

Bên cạnh đó một số quá trình khác cũng có thể góp phần vào sự hình thành cặn trên vách, như sự hấp thụ và phản ứng không đồng nhất. Mặc dù các hiệu ứng này không được xét đến trong mô hình này, dựa trên các bằng chứng thực nghiệm cho thấy sự ngưng tụ đóng vai trò chính trong cơ chế hình thành cặn lắng, bên cạnh đó không có bằng chứng tương ứng cho thấy sự hấp thụ và phản ứng không đóng góp vào sự hình thành cặn buồng cháy.

Mô hình khẳng định rằng sự hình thành cặn buồng cháy phụ thuộc vào bốn quá trình: sự hình thành các tiền tố cặn từ các thành phần của nhiên liệu và oxy trong khu vực lửa tắt tức thời, sự ngưng tụ và bay hơi của các tiền tố cặn tại vách buồng cháy hoặc bề mặt lớp cặn và các phản ứng trùng hợp bên trong cấu trúc lớp cặn. Sự cân bằng động giữa các quá trình này, cùng với sự xuất hiện liên tiếp của quá trình loại bỏ cặn theo các cơ chế hóa học và cơ học sẽ xác định được lượng và tỉ lệ cặn từ một loại nhiên liệu cụ thể dưới điều kiện hoạt động cụ thể của động cơ.

b, Mô hình không thứ nguyên và các thông số đặc trưng

Sự hình thành và loại bỏ cặn lắng trong buồng cháy thực tế có liên quan đến từ mười đến hàng trăm chất hóa học tương tác trong vùng tắt lửa gần với vách động cơ dưới điều kiện dòng rối và thay đổi rất nhanh. Tuy nhiên các thông số đặc trưng bắt nguồn từ một mô hình đơn giản hơn nhiều vẫn có thể mô tả toàn bộ quá trình. Loại phân tích này cũng có thể giúp làm rõ các mối quan hệ được mô tả trong phần trên giữa các quá trình vật lý khác nhau góp phần vào việc hình thành cặn, từ đó sẽ mang đến cho chúng ta một cái nhìn sâu sắc hơn về những quá trình mà có thể bị chi phối dưới các điều kiện khác nhau [14].



Hình 2.6. Mô hình một chiều [14]

Nếu chúng ta xem xét các chất khuếch tán và phản ứng một cách đơn lẻ (ví dụ như tiền tố cần có khối lượng phân tử cao được tạo ra bởi quá trình oxi hóa từng phần của nhiên liệu chưa cháy) trong lớp lửa bị dập tắt gần với vách lạnh của động cơ nơi mà có thể xảy ra ngưng tụ và bay hơi, các quá trình đó có thể được mô tả gần đúng bằng phương trình (giả định sự đối lưu là không đáng kể)[14]:

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 P_i}{\partial x^2} - k_{r,i}(x, t)P_i + k_{f,i}(x, t) \quad (2.27)$$

Trong đó P_i là áp suất riêng phần của chất i , D_i là hệ số khuếch tán của chất i vào trong hỗn hợp xung quanh (ở đây được giả định là độc lập với vị trí), k_f , k_r là các hằng số tỉ lệ để hình thành và loại bỏ một chất, chúng có thể phụ thuộc vào vị trí và thời gian và x là tọa độ không gian vuông góc với bề mặt vách buồng cháy (hệ thống được giả định là 1 chiều như Hình 2.5). Các điều kiện biên phù hợp cho phương trình này là tất cả các gradient tiến về không ở khoảng cách lớn so với vách (nghĩa là các khí cháy ở trung tâm), cùng với điều kiện biên là dòng chất lỏng ngưng tụ hoặc hóa hơi tại vách buồng cháy, sử dụng mối quan hệ Clausius-Clapeyron đối với áp suất hóa hơi của chất tại nhiệt độ T :

$$D_i \frac{\partial P_i}{\partial x} = k_c (P_{v,i}(T) - P_i) = k_c \left(P_{v,i}(T) e^{\frac{-\Delta H_v}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} - P_i \right) \quad (2.28)$$

Trong đó k_c là hằng số tỉ lệ của sự ngưng tụ hoặc hóa hơi, $P_{v,i}(T_0)$ là áp suất hơi của chất i tại nhiệt độ T_0 , $\Delta H_v/R$ là nhiệt hóa hơi của chất theo nhiệt độ Kelvin (cũng

tại T_0) và T là nhiệt độ của vách. Các phương trình cân bằng các phản ứng trong lớp cặn và cơ chế loại bỏ cặn hơn là ngoại trừ sự hóa hơi.

Việc không thứ nguyên hóa của các phương trình trên, sử dụng bề rộng của lớp ngọn lửa tắt như chiều dài đặc trưng và thời gian khuếch tán qua lớp lửa tắt, L^2/D_i , như là thời gian đặc trưng, dẫn tới phương trình dưới đây trong chiều dài không thứ nguyên ζ , thời gian τ và nồng độ của chất θ :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - Da_r \theta + Da_f \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} = Bi \left(e^{\frac{-\Delta H_v}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} - \theta \right) \quad (2.30)$$

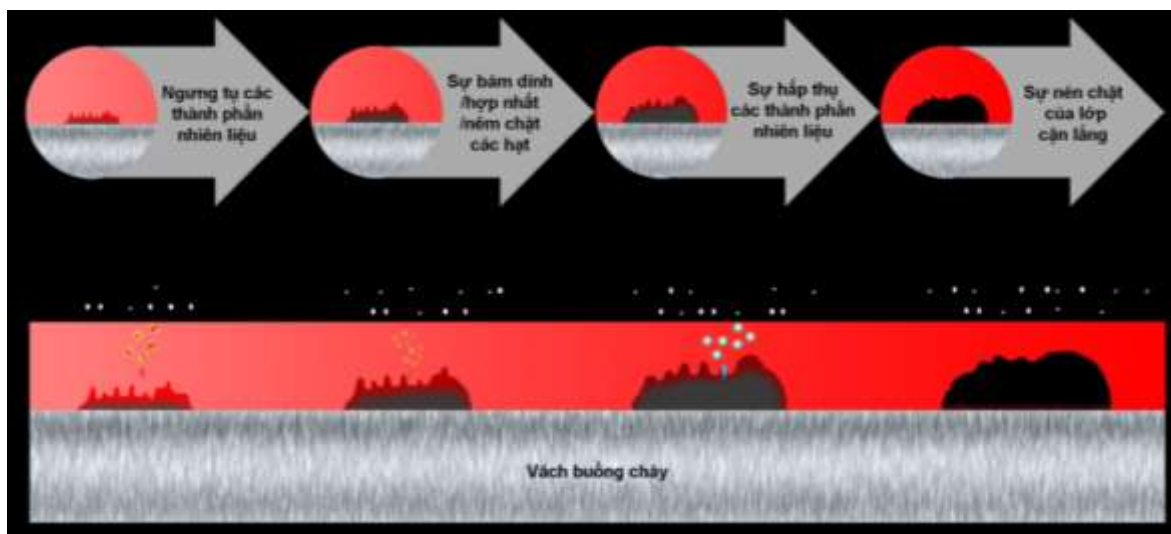
Có hai loại không thứ nguyên trong phương trình trên là số Damkohler, $Da_r = k_{r,i} L^2 / D_i$ và $Da_f = k_{f,i} L^2 / D_i$ là tỉ số của tốc độ phản ứng với tốc độ khuếch tán; số Biot, $Bi = k_c L / D_i$ là tỉ số của khối lượng chuyển đổi bởi sự ngưng tụ và hóa hơi với khối lượng chuyển đổi bởi sự khuếch tán tại vách. Độ lớn của hai số này được sẽ xác định quy trình chiếm ưu thế trong sự hình thành cặn; ví dụ, nếu Da_f , Da_i và Bi rất lớn so với thành phần khác (như là sự khuếch tán chậm hơn phản ứng trong lớp ngọn lửa tắt và sự ngưng tụ hoặc hóa hơi nhanh hơn sự khuếch tán tại vách), tốc độ hình thành cặn sẽ được xác định bởi thời gian cần thiết để các chất khuếch tán vào vách, trong khi đó số Bi là nhỏ, sự hình thành cặn sẽ bị giới hạn bởi tốc độ ngưng tụ tại vách. Biết được một trong những số đặc trưng này là lớn hoặc nhỏ sẽ cho phép phân tích đơn giản sự hình thành cặn bằng cách chỉ ra một hoặc nhiều quá trình liên quan có ảnh hưởng không đáng kể. Sử dụng các giá trị tiêu biểu cho nhiên liệu hydrocarbon trong lớp ngọn lửa tắt của động cơ $L = 1 \text{ mm}$, $D_i = 1 - 2 \text{ cm}^2 / \text{s}$, và $k_i = 10-1000 \text{ s}^{-1}$ (đại diện cho tỷ lệ oxy hoá từng phần), chúng ta có thể xác định một phạm vi có thể cho số Damkohler là $0,05 < Da < 10$, điều đó cho thấy phản ứng và các quá trình khuếch tán được cân bằng chặt chẽ trong điều kiện động cơ.

2.1.4.2. Giả thuyết thứ hai

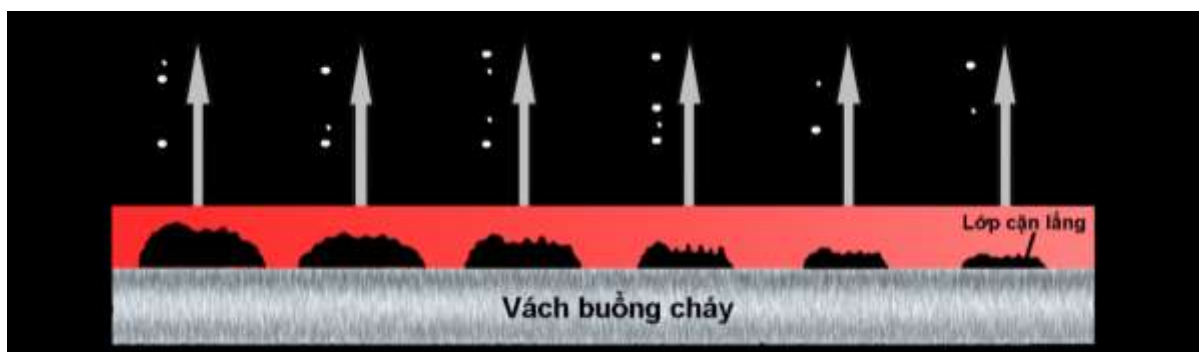
a, Cơ chế tạo cặn lắng

Quá trình hình thành cặn lắng như thế nào và những thông số nào ảnh hưởng đến cơ chế hình thành cặn lắng trong buồng cháy là những vấn đề đặt ra đầu tiên khi nghiên cứu cơ chế hình thành cặn lắng. Hơn nữa, khi các cơ chế cơ bản của quá trình tạo cặn trong buồng cháy của động cơ được hiểu rõ sẽ giúp cải thiện độ bền của động cơ.

Lepperhoff và cộng sự [17] đã đề xuất các cơ chế tạo cặn lắng trong buồng cháy động cơ bao gồm các cơ chế hình thành và loại bỏ như được minh họa trong Hình 2.7 (A) và Hình 2.7 (B).



(A) Cơ chế hình thành cặn lắng



(B) Cơ chế loại bỏ cặn lắng

Hình 2.7. Giả thuyết cơ chế hình thành và loại bỏ cặn trong buồng cháy [17]

Cơ chế hình thành cặn lắng diễn ra theo thời gian hoạt động của động cơ và những cơ chế này đều bị ảnh hưởng bởi các thông số như nhiệt độ, gradient nhiệt, điều kiện nồng độ của dòng chảy và gradient nồng độ của các thành phần có thể tạo cặn. Các thành phần này có thể được chia thành hai nhóm: (i) Các phân tử chất lỏng dạng khí theo sau dòng khí thể; và (ii) Các hạt không thể theo hướng của dòng khí thể.

- *Quá trình hình thành màng lỏng*

Quá trình hình thành lớp màng lỏng có thể được gây ra bởi sự ngưng tụ của các thành phần khí có khối lượng phân tử cao và sự tương tác của nhiên liệu với bề mặt vách buồng cháy. Các phản ứng và quá trình bay hơi của các thành phần chất lỏng trên bề mặt vách dẫn đến việc tạo cặn.

Trong trường hợp ngưng tụ, quá trình này chủ yếu chịu ảnh hưởng bởi điều kiện của vách buồng cháy. Gradient nhiệt độ gần vách được làm mát gây ra sự khuếch tán nhiệt các thành phần khí có khối lượng phân tử cao (gọi là khí nặng). Hiệu ứng này làm nồng độ của các thành phần khí nặng gần vách tăng. Những thành phần khí đó có nhiệt độ sôi cao, chủ yếu là các hydrocarbon. Các thành phần khí ngưng tụ và hấp thụ trên bề mặt vách do vách có nhiệt độ thấp. Sự hình thành cặn bắt đầu bởi chính những hydrocarbon có nhiệt độ sôi cao này.

Sự hình thành lớp nhiên liệu thông qua sự va chạm nhiên liệu cũng góp phần hình thành cặn trên bề mặt vách nơi mà chúng đóng vai trò như một chất kết dính các hạt trong buồng cháy. Do đó, các khu vực tiếp xúc trực tiếp với quá trình phun có khả năng tích tụ lớp cặn đầu tiên cao hơn.

- *Sự gắn kết, tạo lập và sự nêch chặt của các hạt*

Gradient nhiệt độ gần vách làm mát dẫn đến lượng lớn sự phân tử di chuyển trong gradient nhiệt độ mang theo các hạt tới vách. Sự gia gradient nhiệt độ làm cho các phân tử di chuyển trong vùng đó mạnh hơn. Hiệu ứng này gây ra sự gia tăng nồng độ hạt gần vách có nhiệt độ thấp. Các hạt này gắn kết và tác động lẫn nhau do có lượng chất kết dính trên vách. Tiếp theo đó các hạt hợp nhất và gắn chặt vào lớp chất lỏng trên bề mặt. Sự nêch chặt của các hạt vào vách là ảnh hưởng của các phân tử di chuyển trong gradient nhiệt độ.

Không có hạt cacbon dính chặt vào một vách khô và không có chất kết dính. Để tạo lên cặn lắng, cần phải có sự tương tác giữa bề mặt vách và hạt. Sự tương tác được hình thành suốt quá trình tạo lớp màng lỏng trên bề mặt vách. Lớp cặn dày lên liên tục bởi các chất kết dính bổ sung và gắn kết các hạt. Khi đạt đến một độ dày nhất định, hiệu ứng cô lập diễn ra. Nó làm lực liên kết giữa bề mặt vách và lớp màng lỏng nhiên liệu giảm nên hạn chế khả năng lắng đọng của các hạt.

- *Sự hấp phụ của các thành phần khí*

Việc tạo lập và nén chặt của các hạt có thể tạo thành cấu trúc cặn với hàm lượng soot cao. Độ rỗng của cặn đóng một vai trò quan trọng trong việc hấp phụ của các thành phần khí. Các thành phần khí khuếch tán qua lớp xốp của cặn và sẽ được hấp phụ hoặc bị ngưng tụ trong khoảng nhiệt thấp hơn. Điều này dẫn đến sự gia tăng mật độ của các lớp bằng sự bổ sung liên tục của các thành phần khí.

- *Phản ứng của hydrocarbon*

Khi cặn bám vào bề mặt vách, các phản ứng hóa học (oxi hóa, nhiệt phân, mất nước, trùng hợp...) [17][21] có thể xảy ra. Dưới tác dụng của nhiệt độ và thời gian tiếp xúc kéo dài các phản ứng hóa học sẽ diễn ra. Nếu nhiệt độ vách tương đối thấp, nhiên

liệu tích lũy được trên vách có thể bay hơi do nhiệt của khí thể bao quanh và những phần còn lại bám trên vách có cấu trúc dạng sơn mài [44].

- *Độ nén của lớp*

Quá trình nén của động cơ có ảnh hưởng đáng kể đến cơ chế hình thành cặn. Nó có thể làm thay đổi cấu trúc của cặn, như làm cho cấu trúc cặn trở lên nhỏ gọn hơn. Hơn nữa, nó cũng sẽ ảnh hưởng đến sự hình thành của các lớp cặn tiếp theo. Sau những lần tương tác ban đầu, các chất tạo cặn tích lũy và sau đó cô đặc lại thành cặn khô có thể dễ dàng loại bỏ bởi một số nguyên nhân cơ học như rung động, lực phun và lực cản của dòng khí [30].

b, Cơ chế loại bỏ

Lepperhoff và cộng sự [17] đề xuất 6 cơ chế loại bỏ trong quá trình hình thành cặn buồng cháy động cơ. Các cơ chế đó là:

Quá trình oxi hóa soot và hydrocarbon do nhiệt độ cao của khí thể và lớp cặn.

Sự bay hơi của phần dễ bay hơi khi nhiệt độ tăng.

Sự giải hấp phụ các thành phần khí trên bề mặt cặn do sự gia tăng nhiệt độ.

Mài mòn do lực dính thấp.

Phá vỡ bằng áp lực, chủ yếu là phần cặn có cấu trúc xốp.

Rửa sạch bằng dòng chất lỏng để loại bỏ các tiền thân của cặn.

Các cơ chế này không phải lúc nào cũng được sắp xếp theo thứ tự trên. Sự hiện diện của cơ chế nào trước phụ thuộc vào hoạt động của động cơ và các điều kiện trong buồng cháy. Thành phần cặn lắng đọng được loại bỏ chủ yếu bởi các cơ chế vật lý, cơ học và hóa học.

Cơ chế vật lý bao gồm sự bay hơi, giải hấp phụ và rửa trôi các thành phần dễ bay hơi và khí. Sự bay hơi và giải hấp phụ được khởi đầu bởi sự gia tăng nhiệt độ do tác động cách nhiệt của bản thân lớp cặn.

Cơ chế cơ học bao gồm sự mài mòn toàn phần hoặc một phần lớp cặn và sự phá hủy các tiền tố của cặn. Mài mòn diễn ra khi lực tác động lớn hơn lực liên kết của bản thân cặn. Các tác động phá vỡ bắt đầu bằng một sự thay đổi nhiệt độ, khiến lớp cặn và bề mặt vách mở rộng. Những phần mở rộng không đồng đều gây lực kéo giúp thực hiện cơ chế phá vỡ.

Cơ chế hóa học bao gồm việc rửa trôi của các chất hòa tan của cặn, oxi hóa cặn cacbon và hydrocarbon. Các chất lỏng như nước hay chất tẩy rửa trong nhiên liệu và dầu bôi trơn hòa tan phần cặn có thể hòa tan. Để oxi hóa cacbon và hydrocarbon cần

một môi trường giàu oxy, nhiệt độ và thời gian nhất định. Quá trình oxi hóa bắt đầu ở nhiệt độ trên 200°C đối với hydrocacbon và khoảng 500°C với cacbon. Trong buồng cháy động cơ nhiệt độ của khí thể và vách buồng cháy nằm trong vùng nhiệt độ đó, do vậy quá trình oxi hóa luôn diễn ra.

2.2. Phương pháp nghiên cứu cặn lắng trong buồng cháy động cơ

2.2.1. Phương pháp thực nghiệm

Phương pháp trực tiếp và dễ dàng nhất để nghiên cứu cặn là quan sát hình ảnh cặn [99][107]. Việc cân đong trực tiếp khối lượng cặn bám trên vách buồng cháy cũng được tiến hành khá phổ biến để định lượng cặn buồng cháy. Phương pháp phân tích thành phần và cấu trúc vi lượng của cặn thực hiện trong các nghiên cứu sâu hơn. Một số phương pháp nghiên cứu phổ biến được mô tả dưới đây.

2.2.1.1. Phương pháp nghiên cứu thành phần của cặn lắng

a, Phương pháp phân tích bằng nhiệt (Thermo-gravimetric - TGA)

TGA được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực để nghiên cứu sự phân huỷ và các quy luật hao tán khối lượng theo sự thay đổi nhiệt độ. Sử dụng TGA, các thành phần khác nhau của cặn lắng có thể được tách ra bằng phương pháp nhiệt [103][108]. Các chất dễ bay hơi bị hoá hơi do sự phân giải nhiệt mẫu cặn trong điều kiện không bị oxi hóa. Hàm lượng cacbon và tạp chất khác sẽ thu được trong môi trường oxi hóa.

b, Phân tích hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR)

Phân tích Fourier Transform Infra-Red (FTIR) được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực để phân tích đặc tính và chức năng hóa học của mẫu. Có thể dùng phân tích FTIR để so sánh các mẫu cặn khác nhau và đánh giá các yếu tố ảnh hưởng [109]. Dữ liệu chi tiết về sự thay đổi thành phần cặn trong buồng cháy của động cơ thu được thông qua phân tích quang phổ hồng ngoại, do đó FTIR là không thể thiếu trong nghiên cứu cặn.

c, Phân tích thành phần hóa học

Phân tích hóa học là phương pháp trực tiếp nhất để nghiên cứu thành phần của mẫu vật, nó cũng được sử dụng trong nghiên cứu quá trình tạo cặn. Bằng cách phân tích các thành phần của cặn cho phép xác định được hàm lượng các chất có trong cặn.

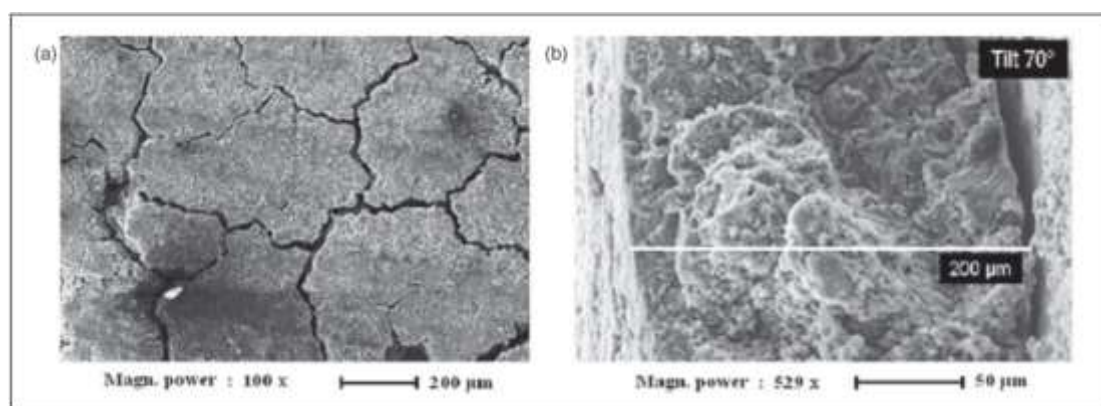
Hiện còn có nhiều phương pháp khác cũng được sử dụng để nghiên cứu thành phần của cặn, chẳng hạn như phân tích năng lượng phân tán tia X [21][110] và đo nhiễu xạ tia X. Đó là các phương pháp hiện đại và đòi hỏi trang thiết bị đắt tiền, năng lực thực nghiệm chuyên môn cao.

2.2.1.2. Phương pháp nghiên cứu cấu trúc của cặn lắng

Nghiên cứu trạng thái bề mặt và cấu trúc xốp bên trong của cặn để hiểu rõ cấu trúc chi tiết của chúng. Trên thế giới hiện nay, để nghiên cứu cấu trúc của cặn có thể sử dụng các phương pháp sau:

a, Sử dụng kính hiển vi điện tử

Đây là một công nghệ mới, kính hiển vi điện tử đã có những đóng góp to lớn trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu. Loại phổ biến nhất được sử dụng là kính hiển vi điện tử quét (SEM) [21][42] và kính hiển vi điện tử truyền dẫn (TEM)[111][112]. Đối với cặn trong buồng cháy động cơ, hình thái bề mặt của chúng có thể biết được thông qua hình ảnh thu được từ các kính hiển vi điện tử.



Hình 2.8. Hình chiếu SEM của cặn trên xéc măng thử nhất [21]

Hình 2.8 cho thấy kết quả điển hình của TEM và SEM. Hình 2.8 (a) cho thấy hình ảnh bóng mờ của cặn. Bề mặt dường như được đánh bóng bởi các chuyển động của xéc măng. Hình 2.8 (b) cho thấy mặt cắt ngang của cặn. Điều này rất có ý nghĩa để nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến sự hình thành của cặn.

b, Sự hấp thụ khí

Rất khó để quan sát được cấu trúc bên trong của cặn từ bề mặt. Hấp thụ là phương pháp được sử dụng phổ biến nhất để nghiên cứu cấu trúc bên trong của mẫu và nó được sử dụng rộng rãi trong việc nghiên cứu cấu trúc bên trong của cặn [112]. Cấu trúc bên trong của cặn, kích cỡ lỗ và các thông số khác có thể thu được gián tiếp bằng sự hấp thụ khí.

c, Phổ Raman

Phổ Raman được sử dụng rộng rãi trong việc phân tích cấu trúc của các phân tử mẫu mà không yêu cầu xử lý trước khi đo, giúp tránh được một số sai số. Đối với cặn, phổ Raman có thể đặc trưng cho các tinh thể nano graphitic xuất hiện trong cặn buồng cháy. Theo cách này, có thể so sánh các yếu tố ảnh hưởng đến sự hình thành cặn [29].

Nhiều phương pháp khác cũng được sử dụng trong nghiên cứu cận, ví dụ nhiễu xạ tia X, phân tán tia X và hấp thụ Mossbauer [46] và chúng đều là những phương pháp nghiên cứu hiện đại giúp ta có cái nhìn rõ ràng hơn về cấu trúc bên trong của cận.

Thông qua các phương pháp nghiên cứu cấu trúc ở trên cùng với các nghiên cứu về thành phần cho phép nghiên cứu các đặc tính của cận và để làm cơ sở đưa ra các biện pháp giảm tốc độ tạo cận trong buồng cháy động cơ.

2.2.2. Phương pháp số

Một trong những mục tiêu chính của phương pháp nghiên cứu này là khảo sát cơ chế hóa học quá trình hình thành cận lắng của buồng cháy một cách chi tiết, phù hợp với các điều kiện liên quan đến động cơ. Vì không thể đo được nồng độ các chất có trong lớp ngọn lửa tắt trong buồng cháy động cơ. Mô hình số được sử dụng để mô tả các mối liên hệ giữa các điều kiện thí nghiệm sẵn có và hệ thống động cơ.

Phân tích số tạo ra kết nối giữa mô hình thực nghiệm và động cơ thực với các yêu cầu nghiêm ngặt đối với mô phỏng số. Mô hình này phải có khả năng bao phủ một loạt các điều kiện vật lý, với phạm vi từ các quá trình trạng thái ổn định đến trạng thái bất ổn định nhất và từ áp suất thấp đến áp suất cao. Để cung cấp thông tin chi tiết về sự hình thành cận lắng, mô hình cần bao gồm các quá trình cạnh tranh về chuyển đổi khuếch tán và đối lưu, sự tạo thành sản phẩm và khử các chất thông qua các phản ứng hóa học và các tương tác biên như các dòng lắng đọng.

Để mô hình hệ thống thí nghiệm buồng cháy ngọn lửa phẳng giống như các chu trình thực của động cơ, cần phải cho phép luồng khí luân chuyển qua các ranh giới. Việc xác định thành phần hóa học và tỷ lệ hình thành các tiền chất cận là một trong những mục tiêu chính của phương pháp nghiên cứu này, do đó phản ứng hoá học phải được mô phỏng một cách chính xác nhất có thể, điều này bao gồm việc tích hợp các hệ thống lên tới hàng trăm phản ứng cơ bản, với năm mươi đến một trăm chất hóa học riêng biệt [113, 114].

Mô hình mô phỏng phải có khả năng tính toán tất cả các quá trình trên thông qua sự lan truyền ngọn lửa và sự dập tắt ngọn lửa, yêu cầu phải giải các gradient nhiệt độ và nồng độ các chất có thể đi qua toàn bộ miền tính toán. Với yêu cầu về mô tả chính xác hệ thống vật lý, mô hình cũng phải đáp ứng được yêu cầu về thời gian tính toán tương đối nhỏ, do đó một số lượng lớn các điều kiện hoạt động khác nhau có thể được xét đến.

2.2.3. Phương pháp qui hoạch thực nghiệm

Qui hoạch thực nghiệm là cơ sở phương pháp luận của nghiên cứu thực nghiệm hiện đại. Đó là phương pháp nghiên cứu mới, trong đó công cụ toán học giữ vai trò tích

cực. Cơ sở toán học của lý thuyết qui hoạch thực nghiệm là toán học xác suất thống kê với hai lĩnh vực quan trọng là phân tích phương sai và phân tích hồi qui [1].

Qui hoạch thực nghiệm là tập hợp các tác động nhằm đưa ra chiến thuật làm thực nghiệm từ giai đoạn đầu đến giai đoạn kết thúc của quá trình nghiên cứu đối tượng (từ nhận thông tin mô phỏng đến việc tạo ra mô hình toán, xác định các điều kiện tối ưu), trong điều kiện đã hoặc chưa hiểu biết đầy đủ về cơ chế của đối tượng [2].

Có thể nói, lý thuyết qui hoạch thực nghiệm từ khi ra đời đã thu hút sự quan tâm và nhận được nhiều đóng góp hoàn thiện của các nhà khoa học. Những ưu điểm rõ rệt của phương pháp này so với các thực nghiệm cổ điển là [1][2]:

- Giảm đáng kể số lượng thí nghiệm cần thiết;
- Hàm lượng thông tin nhiều hơn rõ rệt, nhờ đánh giá được vai trò qua lại giữa các yếu tố và ảnh hưởng của chúng đến hàm mục tiêu. Nhận được mô hình toán học thống kê thực nghiệm theo các tiêu chuẩn thống kê, đánh giá được sai số của quá trình thực nghiệm theo các tiêu chuẩn thống kê cho phép xét ảnh hưởng của các yếu tố với mức độ tin cậy cần thiết.
- Cho phép xác định được điều kiện tối ưu đa yếu tố của đối tượng nghiên cứu một cách khá chính xác bằng các công cụ toán học, thay cho cách giải gần đúng, tìm tối ưu cục bộ như các thực nghiệm thụ động.

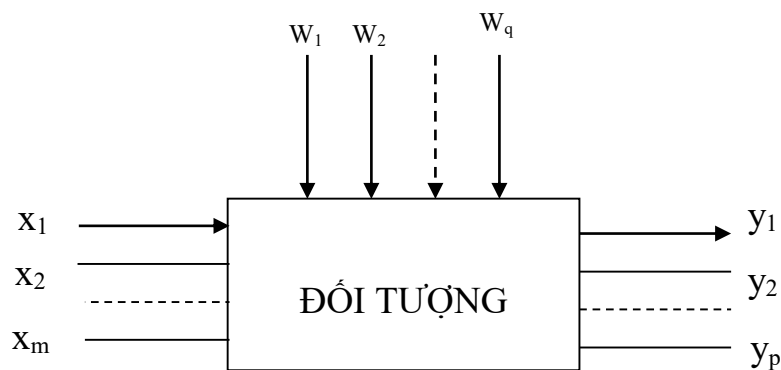
2.2.3.1. Phân tích hồi quy

Là phương pháp được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu kỹ thuật nhằm mục đích xây dựng mô hình toán thích hợp. Phương pháp phân tích hồi qui cho phép xác định yếu tố ảnh hưởng đến thông số đầu ra với mục đích tìm mô hình toán và tìm giá trị tối ưu của yếu tố ảnh hưởng được gọi là kế hoạch hóa thực nghiệm cực trị [2].

Một trong những thuận lợi của phương pháp thực nghiệm cực trị là tìm giá trị tối ưu của hàm, mặc dù chưa nghiên cứu toàn bộ hàm đó. Đối tượng nghiên cứu coi như một hệ thống điều khiển biểu diễn bằng “hộp đen” (Hình 2.9).

Giá trị Y_j ($j = 1, 2, \dots, m$) thể hiện đặc điểm nghiên cứu hay còn gọi là thông số tối ưu. Các yếu tố x_i ($i = 1, 2, \dots, m$) là yếu tố điều khiển được, không ngẫu nhiên, không phụ thuộc lẫn nhau.

Tác dụng vào “hộp đen” còn có đại lượng ngẫu nhiên W_n ($n = 1, 2, \dots, q$) gọi là đại lượng không điều khiển được (nhiều).



Hình 2.9. Sơ đồ hộp đen

Khi giữ nguyên yếu tố điều khiển x_i ($i = 1, 2, \dots, m$) mỗi một thông số ra sẽ mang đặc điểm ngẫu nhiên.

Do đó không chỉ nói về quan hệ giữa Y_i và các thông số x_i ($i = 1, 2, \dots, m$) mà phải xét cả mối quan hệ giữa kỳ vọng toán học có điều kiện: $m_1 [Y_j (x_1, x_2, \dots, x_m)]$ của thông số nghiên cứu với yếu tố điều khiển. Dạng tổng quát của mối liên quan này là:

$$m_1 [Y (x_1, x_2, \dots, x_m)] = \varphi (x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (2.33)$$

Phương trình (2.33) là phương trình tối ưu. Còn mặt tương ứng của nó trong không gian $(m + 1)$ gọi là mặt tối ưu.

Mỗi yếu tố điều khiển có thể nhận giá trị khác nhau gọi là mức. Ví dụ: có m yếu tố, mỗi yếu tố thay đổi trong p mức số lượng thí nghiệm p^m .

Lý thuyết kế hoạch hóa thực nghiệm đã chứng minh là để đạt mục đích đặt ra không cần tiến hành tất cả thí nghiệm mà chỉ thực hiện một số thí nghiệm.

2.2.3.2. Quy trình quy hoạch thực nghiệm

Các bước tiến hành:

Bước 1- Lập bảng ghi chép tài liệu ban đầu:

- + Xác định nhiệm vụ chọn thông số tối ưu;
- + Chọn yếu tố ảnh hưởng;
- + Tính toán tài liệu sơ bộ.

Bước 2- Thực hiện kế hoạch thực nghiệm:

- + Lập ma trận thực nghiệm;
- + Chuẩn bị thiết bị, phương tiện đo.

Bước 3- Sai số của thí nghiệm:

+ Sai số hệ thống: có thể xác định được về số lượng, bằng cách đưa ra các bảng hiệu đính về chỉ số của dụng cụ, sửa đổi, hoàn chỉnh phương pháp đo;

+ Sai số ngẫu nhiên: là loại sai số không biết trước nguyên nhân do đó không thể tính được với bảng hiệu đính. Cách xử lý đại lượng ngẫu nhiên trong khi đo lường được tiến hành thông qua những định luật của lý thuyết xác suất, toán thống kê.

Bước 4- Mối liên hệ giữa các đại lượng quan sát:

Khi thí nghiệm sẽ thu được n trị số hàm số và m trị số của biến số. Mỗi một cặp trong chúng sẽ có hàm số phân bố riêng của những trị số \bar{x}, σ . Sự liên hệ giữa chỉ tiêu, hiện tượng, đại lượng đang khảo sát tạo nên bởi quá trình công nghệ của máy, có thể là hàm số nếu mỗi trị số của đại lượng này ứng với trị số của đại lượng kia hay là hàm liên hệ, nếu mỗi trị số của đại lượng độc lập này ứng với trị số của một số đại lượng biến đổi khác, mỗi đại lượng biến đổi này biến động quanh giá trị trung bình của mình.

2.2.3.3. Phân tích và xử lý dữ liệu thực nghiệm

a, Xử lý số liệu thực nghiệm

Trong quá trình thực nghiệm với mỗi mô hình thực nghiệm sẽ nhận được các cặp số liệu thực nghiệm (x_k, y_k) . Mục tiêu đặt ra là cần tổng quát hóa các cặp số liệu thực nghiệm bằng một phương trình toán học thích hợp và phương trình thực nghiệm tìm ra sẽ được xem như quy luật của quá trình hay hiện tượng.

Trong quá trình thực hiện các thử nghiệm, các giá trị sẽ được ghi nhận và trong một số trường hợp do ảnh hưởng của nhiều yếu tố “bất thường” (ghi số liệu sai, điều kiện thí nghiệm không đúng,...) mà số liệu ghi nhận có thể không hợp lý. Do đó, trước khi tiến hành phân tích một tập hợp mẫu cần thiết phải đánh giá tính hợp lý của nó. Phương pháp thường được sử dụng là loại trừ giá trị lớn hay nhỏ bất thường dựa trên kiểm định giá trị t_{dmax} với phân phối Student (Hình 2.10) [3].

- Kiểm định giá trị t_{dmax} với phân phối Student:

Giả sử có tập hợp n số liệu thực nghiệm cho một đại lượng nghiên cứu A_i ($i = 1, n$). Khi đó độ lệch ước lượng của tập hợp mẫu σ_n :

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n - 1}} \quad (2.34)$$

Giá trị thực nghiệm A_i sẽ được xem như là lớn bất thường và sẽ bị loại ra khỏi tập hợp xét khi điều kiện sau đây xảy ra:

$$d_{max} = \max |A_i - \bar{A}| \quad (2.35)$$

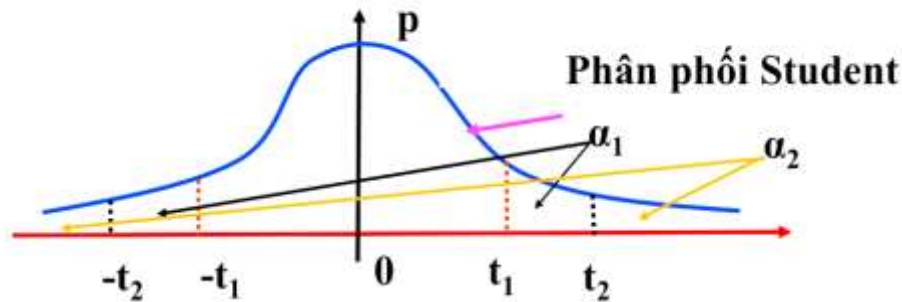
$$\Rightarrow t_{dmax} = \frac{d_{max}}{\sigma_n} \quad (2.36)$$

t_1, t_2 tra bảng phân phối Student với $\alpha_1 = 5\%$ và $\alpha_2 = 1\%$; bậc tự do $(n-2)$.

Nếu $t_{dmax} < t_1$ thì giá trị A_i là bình thường.

Nếu $t_{dmax} > t_2$ thì giá trị A_i là bất bình thường (loại).

Nếu $t_1 < t_{dmax} < t_2$ thì giá trị A_i là nghi ngờ.



Hình 2.10. Đồ thị phân phối Student [3]

- Kiểm tra mẫu:

Trước khi tiến hành phân tích giá trị một đại lượng nghiên cứu thực nghiệm cần phải tiến hành kiểm tra tính thông kê cho mẫu. Gọi n là số giá trị quan sát thực nghiệm cho một đại lượng nghiên cứu. Một tập hợp mẫu nghiên cứu chỉ có giá trị khi thỏa mãn điều kiện thống kê [2][3]:

$$v = \frac{\sigma_n}{A} < [v] \quad (2.37)$$

Trong đó v là hệ số biến động, $[v]$ là giá trị biến động cho phép phụ thuộc vào lĩnh vực và chỉ tiêu thực nghiệm.

b, Lựa chọn mô hình hồi qui

Để lựa chọn được mô hình hồi qui thích hợp với bộ số liệu và mục tiêu nghiên cứu, ta có thể tiến hành lần lượt theo các bước sau [2]:

- **Bước 1:** Xác định danh sách các biến độc lập có thể có trong mô hình. Dựa vào ý nghĩa thực tế của bài toán đã được đặt ra, ta cần liệt kê tất cả những biến có khả năng ảnh hưởng đến giá trị của biến phụ thuộc. Những biến này có thể đã có sẵn trong danh sách các biến của bộ số liệu, song cũng có thể là biến được tạo ra từ các biến trong danh sách đó thông qua các phép biến đổi.

- **Bước 2:** Kiểm tra sự vi phạm các giả thiết của mô hình hồi quy. Bước này bao gồm việc tiến hành kiểm định các vấn đề như đa cộng tuyến, phương sai thay đổi, tự tương quan, phân bố không chuẩn của sai số và khắc phục các vi phạm phát hiện được.

- **Bước 3:** Chọn dạng hàm hồi quy. Dạng hàm hồi quy có thể được xác định dựa trên kiến thức chuyên ngành liên quan đến số liệu hoặc dựa vào dạng hàm đã được sử dụng trong các nghiên cứu trước đó. Bên cạnh đó, có thể xác định dạng hàm hồi quy thông qua việc khảo sát các đồ thị biểu diễn sự bộ mối quan hệ giữa biến độc lập và biến phụ thuộc. Chẳng hạn nếu trên đồ thị, các chấm tương ứng với các quan sát của tập số liệu nằm tập trung hai bên một đường thẳng nào đó, thì có thể chọn dạng hàm hồi quy tuyến tính. Còn nếu các chấm đó lại nằm hai bên một đường cong thì có thể dựa vào dạng của đường cong đó mà đưa ra dạng hàm hồi quy phi tuyến phù hợp.

- **Bước 4:** Áp dụng các tiêu chuẩn để đánh giá và lựa chọn mô hình. Hệ số xác định là một thước đo thường được dùng đầu tiên để đánh giá chất lượng của mô hình hồi quy. Nếu hệ số xác định có giá trị lớn hơn 50% thì có thể coi mô hình khá phù hợp với tập số liệu. Còn nếu hệ số xác định nhỏ hơn 30% thì có thể khẳng định mô hình không phù hợp và nên tìm mô hình khác.

c, Kiểm định mô hình hồi quy [1][4]

- **Hệ số xác định R^2 (tổng bình phương sai số):**

$$R^2 = \frac{SS_E}{SS_T} = 1 - \frac{SS_R}{SS_T} = \frac{\sum_i^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2} \quad R^2 \in [0 \rightarrow 1] \quad (2.38)$$

Trong đó, tổng bình phương đầy đủ:

$$SS_T = S_{YY} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.39)$$

Tổng bình phương hồi quy:

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.40)$$

Tổng bình phương các phần dư (các sai số):

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.41)$$

R^2 càng tiến gần đến 1 thì mô hình càng tốt.

Hệ số xác định được dùng để đánh giá sự phù hợp của mô hình hồi quy nhiều khi chưa nói lên đầy đủ chất lượng của mô hình vì một số lý do sau đây:

- Nếu hai mô hình hồi quy chứa danh sách các biến độc lập khác nhau thì hệ xác định của hai mô hình đó (có thể bằng nhau) không giúp kết luận được mô hình nào tốt hơn;

- Có thể loại bỏ bớt một số biến nào đó ra khỏi phương trình hồi quy tuy làm giảm hệ số xác định, song về thực chất lại không là giảm đáng kể chất lượng của mô hình.

- Hệ số xác định R^2 hiệu chỉnh [1][4]:

Khi số liệu quan sát n nhỏ, giá trị R^2 được hiệu chỉnh như sau ($k=1$: hồi quy đơn):

$$\overline{R^2} = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} (1-R^2) \quad (2.42)$$

Khi n lớn thì $\overline{R^2} \cong R^2$, $\overline{R^2} \leq R^2$.

Hệ số R^2 hiệu chỉnh cho biết mức độ % sự biến thiên của biến phụ thuộc được giải thích bởi biến độc lập. Hệ số này càng cao càng tốt vì biến độc lập giải thích được nhiều biến phụ thuộc.

Ngoài hệ số xác định, còn có một số tiêu chuẩn khác có thể dùng để đánh giá các mô hình hồi quy như:

- Tiêu chuẩn log-hợp lý (log-likelihood) [3]:

$$L = -\frac{n}{2} \ln \sigma^2 - \frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n u_i^2 \quad (2.43)$$

Có thể chứng minh L có phân phối tiệm cận với phân phối khi bình phương. Giá trị L càng lớn (tương ứng với xác suất ý nghĩa càng nhỏ) thì càng tốt, do đó cho thấy mô hình đang xét rất khác biệt với mô hình đang xét rất khác biệt với mô hình “tầm thường” (là mô hình cho rằng không hề có quan hệ giữa các biến độc lập và biến phụ thuộc).

- Tiêu chuẩn AIC (Akaike info criterion) [3]:

$$AIC = \left(\frac{SS_R}{n} \right) \cdot e^{2k/n} \quad (2.44)$$

trong đó k là số tham số trong mô hình hồi quy. Nếu xét đến số liệu thời gian thì nên dùng tiêu chuẩn này để đánh giá mô hình. Giá trị AIC này càng nhỏ thì mô hình càng phù hợp với số liệu.

- Tiêu chuẩn Schwarz (Schwarz criterion) [3]:

$$SC = \left(\frac{SS_R}{n} \right) \cdot n^{k/n} \quad (2.45)$$

trong đó k là tham số trong mô hình hồi quy. Nếu chú ý đến độ phức tạp của mô hình thì không thể không xét tới tiêu chuẩn này. Giá trị SC này càng nhỏ thì mô hình càng phù hợp với số liệu.

- **Tiêu chuẩn F (F criterion) [3]:**

$$F = \frac{R^2/k}{(1 - R^2)/(n - k - 1)} \quad (2.46)$$

trong đó R^2 là hệ số xác định của mô hình hồi quy, k là tham số trong mô hình, n là số lượng các quan sát trong bộ số liệu. Tỷ số này có phân phối xấp xỉ phân phối Fisher với bậc tự do (k, n-k-1). Qua đó có thể xác định được xác suất ý nghĩa (p-value) tương ứng, được dùng so sánh với mức ý nghĩa đã cho (thường là 5%) để đưa ra kết luận chấp nhận hay bác bỏ giả thuyết.

- **Hệ số tương quan (r) [2][4]:**

Hệ số tương quan (r) là một chỉ số thống kê đo lường mối liên hệ tương quan giữa hai biến số, như số giọt nhiên liệu (x) và khối lượng cặn tích lũy (y). Hệ số tương quan có giá trị từ -1 đến 1. Hệ số tương quan bằng 0 (hay gần 0) có nghĩa là hai biến số không có liên hệ gì với nhau; ngược lại nếu hệ số bằng -1 hay 1 có nghĩa là hai biến số có một mối liên hệ tuyệt đối. Nếu giá trị của hệ số tương quan là âm ($r < 0$) có nghĩa là khi x tăng cao thì y giảm (và ngược lại, khi x giảm thì y tăng); nếu giá trị hệ số tương quan là dương ($r > 0$) có nghĩa là khi x tăng cao thì y cũng tăng, và khi x tăng cao thì y cũng giảm theo.

Trong thông kê có nhiều loại hệ số tương quan, nhưng loại hệ số tương quan Pearson được sử dụng phổ biến. Cho hai biến số x, y từ n mẫu, hệ số tương quan Pearson được tính bằng công thức:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.47)$$

2.2.3.4. Sử dụng phần mềm R để xác định và kiểm định mô hình hồi quy **a, Lựa chọn mô hình hồi quy bằng R**

R là một phần mềm mã nguồn mở, miễn phí và có nhiều packages chuyên dụng cho phân tích thống kê đã được kiểm định nghiêm ngặt, được sử dụng để mô tả, phân tích dữ liệu, mô phỏng và vẽ biểu đồ mang tính học thuật cao. R là ngôn ngữ lập trình hàm cao cấp, tất cả các công việc được thực hiện thông qua hàm và có thể truyền các thông số cho hàm. Trong phần mềm ngôn ngữ R cung cấp nhiều dạng mô hình hồi quy (khoảng 11 dạng mô hình cơ bản, nếu bổ sung đầy đủ các gói có thể có nhiều mô hình khác), đồng thời cung cấp các tiêu chí để kiểm định mô hình như tổng bình phương sai

số R^2 , hệ số R^2 điều chỉnh, giá trị Sig trong bảng Anova (phân tích phương sai) để đánh giá sự phù hợp của mô hình, giá trị Sig trong bảng Coefficients để đánh giá các hệ số hồi quy có ý nghĩa không, đồng thời cho biết giá trị hệ số tương quan giữa biến độc lập và biến phụ thuộc [4].

Các dạng mô hình hồi quy cơ bản trong R:

$$\text{Linear (đường thẳng):} \quad Y = \alpha + \beta X \quad (2.48)$$

$$\text{Logarithmic (hàm logarit):} \quad Y = \alpha + \beta \ln(X) \quad (2.49)$$

$$\text{Inverse (nghịch đảo):} \quad Y = \alpha + \beta/X \quad (2.50)$$

$$\text{Quadratic (bậc hai):} \quad Y = \alpha + \beta_1 X + \beta_2 X^2 \quad (2.51)$$

$$\text{Cubic (bậc ba):} \quad Y = \alpha + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 \quad (2.52)$$

$$\text{Power (hàm mũ):} \quad Y = \alpha X^\beta \quad (2.53)$$

$$\text{Compound (lũy thừa):} \quad Y = \alpha \beta^X \quad (2.54)$$

$$\text{S-curve:} \quad Y = e^{\alpha + \beta/X} \quad (2.55)$$

$$\text{Logistic:} \quad Y = \frac{1}{\frac{1}{u} + \alpha X^\beta} \quad (2.56)$$

$$\text{Growth:} \quad Y = e^{\alpha + \beta X} \quad (2.57)$$

$$\text{Exponential:} \quad Y = \alpha e^{\beta X} \quad (2.58)$$

Trong đó: α và β là hệ số hồi quy, X là biến độc lập, Y là biến phụ thuộc.

Để xác định mô hình hồi quy thích hợp cho bộ dữ liệu đã thu được từ thực nghiệm ta sẽ lần lượt khảo sát các mô hình hồi quy trên ứng với bộ dữ liệu trên gói Robust base package của phần mềm R, đồng thời dùng gói ggplot2 package để vẽ đồ thị tán xạ và các đường hồi quy. Như vậy kết hợp với quan sát trực quan đồ thị và dựa vào các tiêu chí kiểm định mô hình ta sẽ có được mô hình phù hợp.

b, Tiêu chí đánh giá mô hình hồi quy

Hệ số R bình phương hiệu chỉnh (adjusted R square) cho biết mức độ % sự biến thiên của biến phụ thuộc được giải thích bởi biến độc lập. R bình phương hiệu chỉnh càng cao càng tốt vì biến độc lập giải thích được cho nhiều biến phụ thuộc [3][4].

Giá trị Sig (P – value) của bảng Anova dùng để đánh giá sự phù hợp (tồn tại) của mô hình. Giá trị Sig nhỏ (thường nhỏ hơn 5%) thì mô hình tồn tại trong điều kiện độ tin cậy chấp nhận là 5% [4].

Giá trị Sig trong bảng Coefficients cho biết hệ số hồi quy có ý nghĩa hay không, với độ tin cậy 95% thì Sig < 5% là có ý nghĩa [4].

Hệ số tương quan cho biết mức độ tương quan giữa biến phụ thuộc và biến độc lập (thường sử dụng hệ số tương quan Pearson).

2.3. Kết luận chương

Cơ chế hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ theo giả thuyết 1 được đề xuất trong Hình 2.3 tập trung vào miêu tả các quá trình hình thành tiền tố cặn thông qua bốn quá trình (phản ứng, vận động khuếch tán và đối lưu, ngưng tụ và bốc hơi, và các phản ứng bên trong lớp lắng đọng). Tuy nhiên, việc nghiên cứu về cơ chế hình thành cặn lắng trong buồng cháy theo hướng phân tích các thành phần và chuỗi phản ứng oxi hóa của tiền tố cặn trong vùng ngọn lửa tắt là phức tạp và không khả thi trong điều kiện ở Việt Nam.

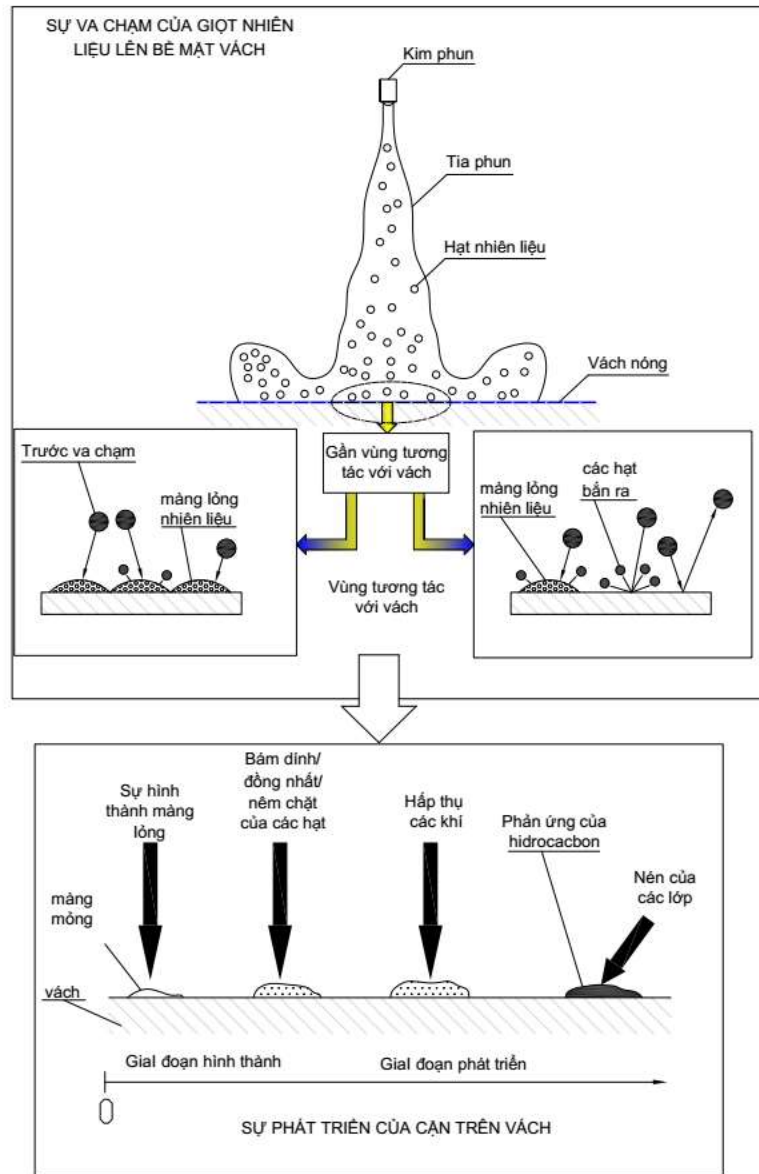
Từ cơ chế đưa ra ở Hình 2.4 có thể thấy rằng điều kiện nhiệt độ bề mặt của vách buồng cháy, trạng thái ướt/khô của bề mặt cặn trong giai đoạn đầu hình thành, khả năng hóa hơi của nhiên liệu trong điều kiện nhiệt độ của buồng cháy đóng vai trò then chốt trong việc tạo cặn.

Nghiên cứu về cặn lắng buồng cháy có thể dựa vào 3 phương pháp phổ biến: phương pháp thực nghiệm, phương pháp số và phương pháp qui hoạch thực nghiệm. Mỗi phương pháp đều thể hiện được ưu điểm riêng trong nghiên cứu vấn đề cụ thể về cặn lắng buồng cháy. Tuy nhiên, trong phạm vi nghiên cứu về cơ chế hình thành của cặn lắng buồng cháy động cơ và với các giả thuyết đề ra ở trên cho thấy để định lượng cặn trong buồng cháy là rất khó khăn do vậy rất cần thiết một mô hình thực nghiệm đơn giản mà vẫn phản ánh được đầy đủ các điều kiện hình thành cặn nêu trên. Do đó việc sử dụng phương pháp qui hoạch thực nghiệm kết hợp với một số phương pháp thực nghiệm là phù hợp với mục tiêu nghiên cứu của luận văn. Các dữ liệu thực nghiệm sau khi thu được sẽ được xử lý và hồi quy để xác định được hàm hồi quy và các hệ số tương quan của mô hình thực nghiệm.

CHƯƠNG 3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM TẠO CẶN LẮNG TRÊN VÁCH BUỒNG CHÁY

3.1. Đặt vấn đề

3.1.1. Giới thiệu chung



Hình 3.1. Quá trình hình thành cặn trên bề mặt vách buồng cháy động cơ [118, 120]

Trong động cơ thực, luôn có một số lượng lớn các giọt nhiên liệu tham gia trong quá trình phun nhiên liệu. Các giọt bay hơi và bị đốt cháy trong không gian buồng cháy. Tuy nhiên, một số trong những giọt va chạm vào bề mặt vách trong buồng cháy lắng lại (Hình 3.1). Sự tương tác giữa nhiên liệu với bề mặt vách buồng cháy có thể dẫn đến hình thành lớp màng nhiên liệu lỏng trên vách. Sự hình thành lớp màng lỏng này điều kiện cần thiết để tạo cặn trên bề mặt trong buồng cháy [118, 120].

Trong động cơ diesel, nhiên liệu phun va chạm với vách buồng cháy là không thể tránh khỏi. Nguyên nhân làm gia tăng sự va chạm của nhiên liệu phun với bề mặt vách trong buồng cháy động cơ có nhiệt độ cao là [14]:

Áp suất phun cao hơn làm gia tăng khả năng xuyên sâu của chùm tia phun.

Thời gian cháy trễ dài hơn thời gian phun nhiên liệu.

Khoảng cách giữa vòi phun và đỉnh piston ngắn như ở động cơ cao tốc cỡ nhỏ.

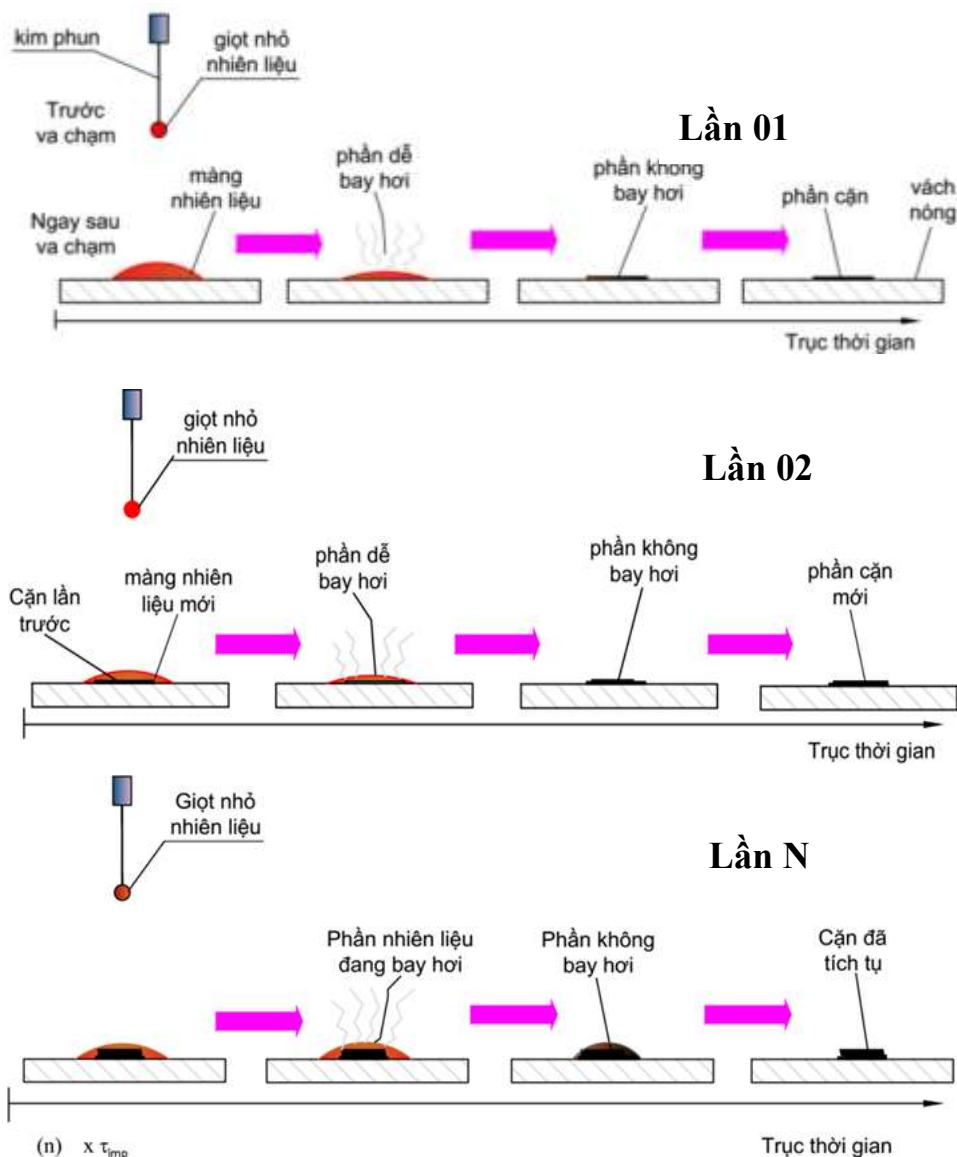
Các giọt nhiên liệu không được đốt cháy hoàn toàn (chẳng hạn như đối với nhiên liệu diesel sinh học).

Khi chùm tia nhiên liệu tác động lên bề mặt vách buồng cháy động cơ, lớp mỏng nhiên liệu lỏng được hình thành trên bề mặt. Lượng nhiên liệu bám dính và diễn biến tương tác với vách buồng cháy phụ thuộc vào nhiệt độ trên bề mặt vách. Hơn nữa, nhiệt độ vách quyết định số lượng thành phần các chất cao phân tử và không ổn định trong nhiên liệu bám dính trên. Lớp màng chất lỏng sẽ mỏng hơn nếu bề mặt có nhiệt độ cao và sự tương tác xảy ra trong giai đoạn sôi. Trong giai đoạn này, các giọt nhiên liệu di chuyển hỗn loạn nên va đập vào các khu vực bề mặt vách khác nhau trong buồng cháy hoặc sẽ bị đẩy ra ngoài trong quá trình thải của động cơ. Lớp màng lỏng đã bám dính trên bề mặt vách sẽ trải qua các quá trình vật lý (sôi truyền nhiệt, bay hơi, sự nén chặt,...) và hóa học (nhiệt phân, trùng hợp,...) trong điều kiện nhiệt độ cao [14].

Kết quả nghiên cứu của Grissom [103] cho thấy chùm tia nhiên liệu tương tác với bề mặt vách ở các trạng thái khác nhau bao gồm vách khô (*tất cả chùm tia phun đã bay hơi phía trên vùng tương tác*); vách ướt (*hình thành màng lỏng mỏng trên bề mặt*) và cơ chế Leidenfrost (*hình thành màng hơi mỏng trên bề mặt*). Do đó, tương tác giữa các hạt nhiên liệu với bề mặt vách và đặc tính bay hơi của nhiên liệu đóng vai trò quan trọng để tạo lập màng lỏng nhiên liệu – điều kiện tiên quyết của sự hình thành cặn lắng trên bề mặt vách. Đó cũng là cơ sở cần thiết lập các thử nghiệm về đặc tính bay hơi của nhiên liệu trước mỗi thử nghiệm tạo cặn.

Trong quá trình cháy, sự hình thành cặn, đặc biệt là hình thành cặn cacbon, là nghiêm trọng nhất do các khí thể ở nhiệt độ cao và ngọn lửa làm tăng quá trình cacbon hóa. Hơn nữa, các hạt soot cũng tích tụ trong quá trình này. Trên thực tế, nhiệt độ khí thể cao và ngọn lửa cũng tạo một phần cặn và lượng này dễ bị oxi hóa nhanh chóng, kết quả làm giảm lượng cặn trên vách buồng cháy. Đồng thời cặn cũng có thể bị bào mòn bằng các cách khác như sự vận động của dòng khí nạp, sự dịch chuyển của piston và các rung động. Khi đó một phần cặn được loại bỏ bằng tác động vật lý và quá trình thải. Đợt phun nhiên liệu kế tiếp sẽ tác động đến lớp cặn hình thành trước đó. Quá trình đó lặp đi lặp lại cho đến khi động cơ ngừng hoạt động.

Trong quá trình hoạt động, các lớp cặn liên tục được tích lũy và bao phủ bề mặt vách buồng cháy. Tuy nhiên, trong động cơ thực, sau một thời gian nhất định, lượng cặn tích lũy trên bề mặt sẽ dừng ở mức mà tỷ lệ cặn hình thành và tỷ lệ cặn bị loại bỏ cân bằng.



Hình 3.2. Quá trình tích tụ cặn lắng trên bề mặt vách [103]

Tạo cặn trong động cơ là một hiện tượng phức tạp và rất khó để quan sát sự phát triển và cơ chế hình thành của nó trong một động cơ thực. Vì thế, một phương pháp đơn giản hóa bằng thử nghiệm tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy được đề xuất trong nghiên cứu này. Về căn bản, phương pháp này là quá trình lặp của các giọt nhiên liệu liên tục tương tác với bề mặt vách buồng cháy dẫn đến sự tích tụ cặn trên bề mặt vách.

Sự lặp lại và các quá trình cặn tích lũy trong phương pháp này tương tự như quá trình lắng đọng cặn do va chạm nhiên liệu phun với bề mặt vách buồng cháy trong động cơ như đã mô tả trong Hình 3.2.

3.1.2. Mục tiêu

Mục đích của thử nghiệm tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy (TNCMH) là để mô tả diễn biến tạo cặn lắng trên bề mặt vách buồng cháy động cơ và để nghiên cứu cơ chế hình thành và sự phát triển của cặn lắng và các yếu tố ảnh hưởng sự hình thành cặn.

Hình 3.3 thể hiện tiến trình nghiên cứu thực nghiệm về sự hình thành và phát triển của cặn lắng. Mô hình TNCMH được xây dựng nhằm mục tiêu xây dựng một mô hình thực nghiệm đơn giản hơn, ít chi phí hơn mà vẫn đảm bảo được các mục tiêu nghiên cứu của đề tài. Bên cạnh đó mô hình thử nghiệm xác định lượng cặn buồng cháy động cơ thực (TNCBC) được xây dựng nhằm đánh giá tính đúng đắn của mô hình TNCMH.



Hình 3.3. Quá trình nghiên cứu sự hình thành cặn lắng

Các kết quả chính của TNCMH là sự phát triển của cặn lắng, nhiệt độ bề mặt cặn, thành phần và các đặc tính của nó. Trong nghiên cứu này, mô hình TNCMH được sử dụng để đánh giá các yếu tố khác nhau ảnh hưởng đến sự hình thành cặn trên bề mặt vách như nhiệt độ bề mặt vách buồng cháy, trạng thái ướt hay khô trên bề mặt vách, thành phần nhiên liệu và lượng dầu bôi trơn.

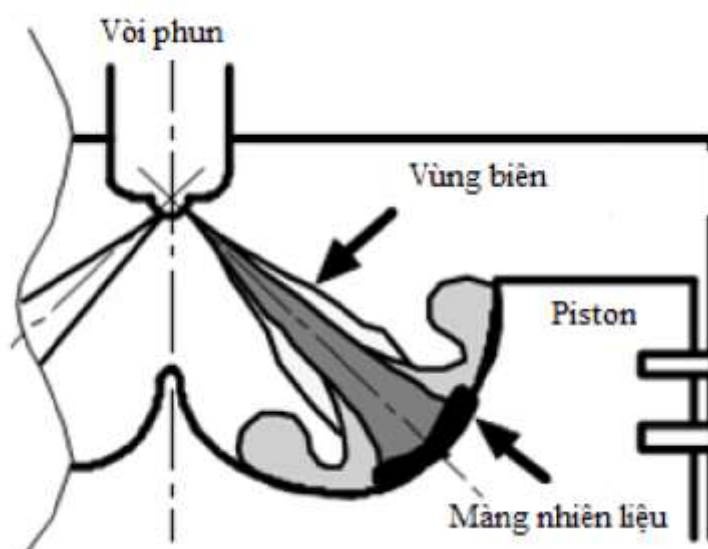
Việc xây dựng mô hình thực nghiệm TNCMH không nhằm mục tiêu mô phỏng lại toàn bộ diễn biến hình thành và phát triển của cặn lắng nhiên liệu trong buồng cháy động cơ diesel do việc thiết lập mô hình thực nghiệm để nghiên cứu tương đồng với động cơ thật quá phức tạp, tốn kém cả về chi phí và thời gian. Do đó, mô hình thực nghiệm TNCMH được thiết lập dựa trên các yếu tố quyết định sự hình thành và phát

triển cận lắng trên bề mặt vách như nhiệt độ bề mặt vách, trạng thái chông chất và tương tác của các giọt nhiên liệu, thành phần nhiên liệu và điều kiện trên bề mặt vách... mà không xét đến sự thay đổi áp suất, đặc tính của chùm tia phun và đặc tính tải của động cơ.

Các thử nghiệm trong mô hình thực nghiệm TNCMH có khả năng mô tả các hiện tượng vật lý và một số hiện tượng hóa học của cơ chế hình thành cận lắng, đồng thời tính đúng đắn của mô hình được đánh giá thông qua so sánh về xu hướng hình thành và phát triển cận lắng với thử nghiệm xác định lượng cận buồng cháy của động cơ thực, đó cũng là cơ sở khoa học để khẳng định tính khả thi của mô hình này.

3.1.3. Cơ sở thiết kế

Khi phun nhiên liệu trực tiếp vào xilanh động cơ, hai quá trình vật lý chính có thể xảy ra là sự tương tác tia phun với vách và hình thành màng mỏng. Cả hai quá trình này đều có thể ảnh hưởng đến hiệu suất cháy và sự hình thành các chất ô nhiễm. Tương tác tia phun – vách xảy ra hay không phụ thuộc vào độ dài của chùm tia phun và khoảng cách giữa vòi phun và vách buồng cháy. Tùy thuộc vào nhiệt độ vách buồng cháy và số lượng của chất lỏng đọng lại trên vách tương tác tia phun - vách có thể có cả tác động tiêu cực, tích cực (Hình 3.4) [119].



Hình 3.4. Tương tác của chùm tia nhiên liệu với vách buồng cháy[119]

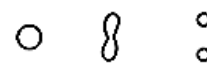
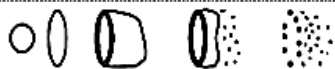
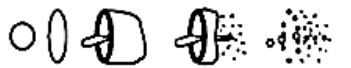
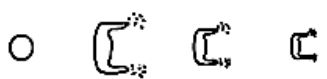


Cơ chế phân rã của chùm tia phun nhiên liệu: quá trình phân rã thứ cấp đóng vai trò quyết định sự hình thành lớp màng nhiên liệu lỏng trên bề mặt vách bởi nó chi phối khả năng tách của các hạt nhiên liệu ra khỏi chùm tia phun. Quá trình phân rã thứ cấp được xảy ra khi sức căng bề mặt của giọt nhiên liệu nhỏ, ảnh hưởng đến khả năng chống biến dạng của giọt nhiên liệu. Quá trình phân rã thứ cấp của giọt nhiên liệu xảy ra chủ yếu do tác động của lực khí động nên vận tốc tương đối của giọt nhiên liệu với

môi trường khí xung quanh đóng một vai trò quan trọng trong cơ chế phân rã thứ cấp. Quá trình phân rã này được thể hiện thông qua số Weber.

Arcoumanis và cộng sự [115] đã phát triển nghiên cứu của Wierzbka [116] và chỉ ra cơ chế phân rã giọt phụ thuộc vào giá trị số We khác nhau, số We nằm trong khoảng 100-1000 thì phân rã diễn ra theo quy luật, và phân rã hỗn loạn khi số $We \geq 1000$.

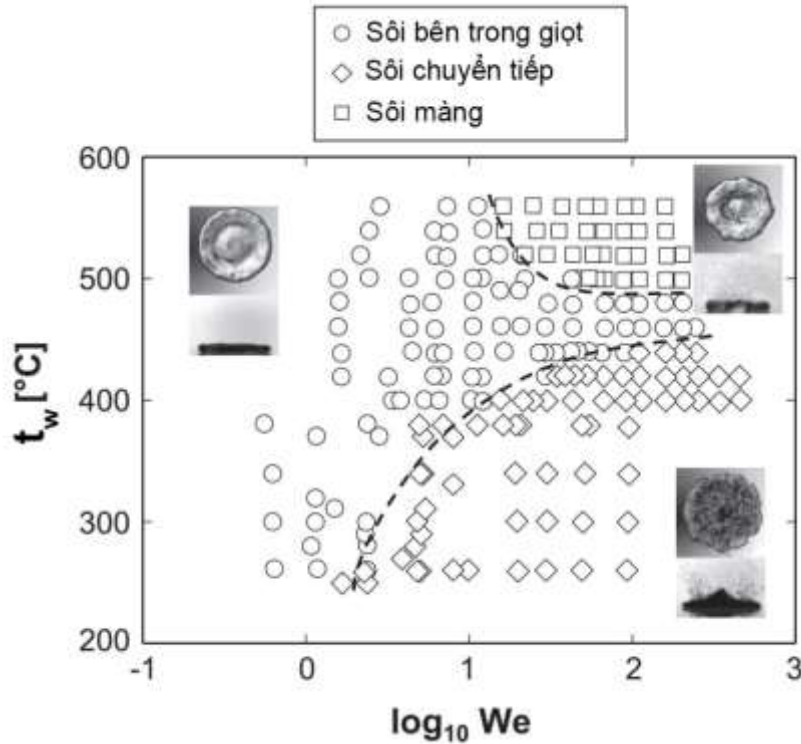
Từ Bảng 3.1 cho thấy, tại số We rất thấp ($We \approx 12$), giọt chỉ biến dạng mà không phân rã. Khi số We tăng lên ($12 \leq We < 45$), trong chùm tia phun xuất hiện một cơ chế phân rã bổ sung dạng túi hoặc túi màng hình đuôi nheo. Trong cơ chế phân rã này, các giọt nhiên liệu dao động với biên độ lớn dẫn đến phân rã thành các giọt nhỏ hơn và xảy ra hai phương thức phân bố kích thước giọt; nếu $We \geq 45$ thì cơ chế phân rã thành những giọt nhỏ diễn ra nhanh hơn thậm chí khi số $We \geq 1000$, sự phân rã xảy ra ngay tại miệng vòi phun [115].

Bảng 3.1. Sự ảnh hưởng của số We đến cơ chế phân rã [115]

Cơ chế phá vỡ tia phun	We	Sơ đồ Arcoumanis et, al
Phân rã rung động	≈ 12	
Phân rã dạng túi	$12 \leq We < 18$	
Phân rã dạng túi/màng	$18 \leq We < 45$	
Phân rã hỗn loạn, tách lớp	$45 \leq We < 350$	
Phân rã dạng sóng	$350 \leq We < 1000$	
Phân rã mảnh liệt	$1000 \leq We$	

Theo kết quả nghiên cứu của Westerling [74] và Farrel [73] để duy trì lớp màng lỏng trên bề mặt khi giọt nhiên liệu tương tác với bề mặt vách được gia nhiệt cần duy trì số We thỏa mãn: $80 < We < 150$.

Trong khi đó theo nghiên cứu của Tuan Tran và các cộng sự thì nhiệt độ bề mặt vách và số We có mối liên hệ chặt chẽ thông qua đồ thị sau (Hình 3.5) [117]:



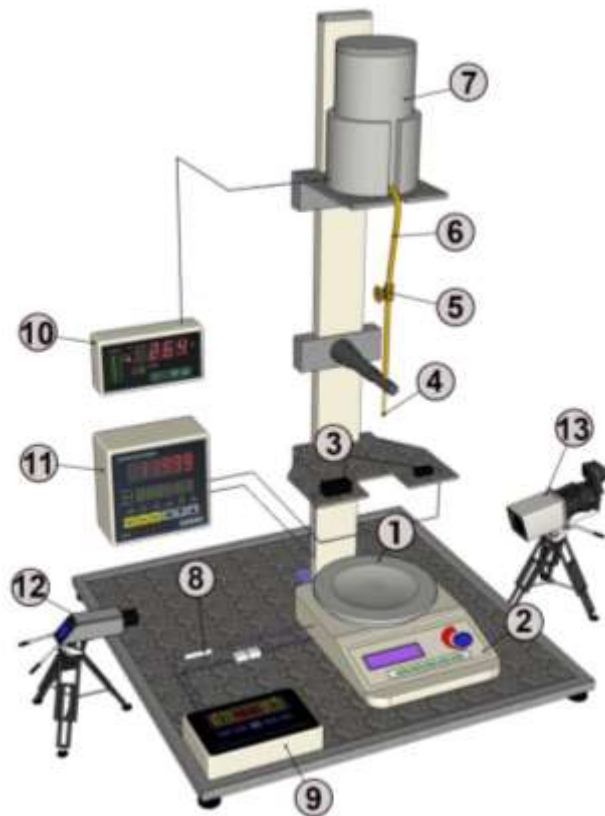
Hình 3. 5. Tác động của số We và nhiệt độ vách được gia nhiệt đến trạng thái tương tác của giọt [117]

Như vậy, khi đánh giá mối tương quan của số We với các hình thái của giọt nhiên liệu khi tương tác với vách trong cả buồng cháy động cơ và mô hình tạo giọt trên bề mặt vách được gia nhiệt cho thấy với $We = 110$ là phù hợp để lựa chọn thông số đầu vào và tiêu chuẩn khi xây dựng mô hình thực nghiệm tạo giọt nhiên liệu tương tác với nền kim loại được gia nhiệt. Đó cũng là cơ sở khẳng định sự tương đồng khi xét về cơ chế sôi truyền nhiệt và hình thành màng lỏng của giọt nhiên liệu trên bề mặt vách được gia nhiệt trong các mô hình thực nghiệm TNCMH và TNCBC được thiết lập trong luận án này. Kết quả tính các thông số cơ bản của mô hình TNCMH được thể hiện trong Bảng PL6.

3.2. Xây dựng mô hình thực nghiệm

3.2.1. Thiết lập mô hình

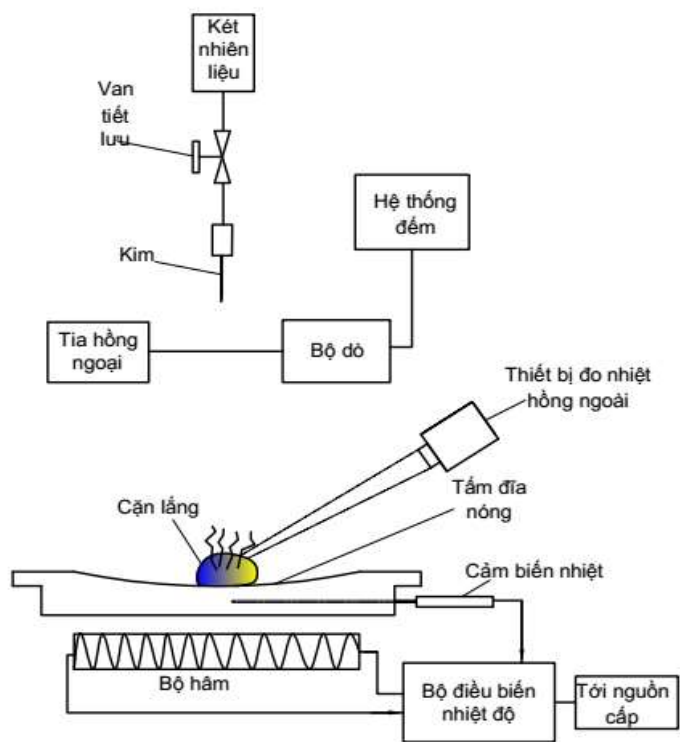
Mô hình thiết bị thử nghiệm tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy được bố trí như Hình 3.6, Hình 3.8 và Hình 3.9. Mô hình này được sử dụng để tiến hành 3 thử nghiệm là thử nghiệm tạo giọt, thử nghiệm bay hơi và thử nghiệm tạo cặn trên bề mặt vách buồng cháy.



1. Tấm nền hợp kim nhôm;
2. Bộ gia nhiệt;
3. Cảm biến phát hiện giọt;
4. Kim tạo giọt;
5. Van tiết lưu;
6. Ống dẫn nhiên liệu;
7. Kết nhiên liệu;
8. Cảm biến nhiệt độ;
9. Bộ điều khiển nhiệt độ;
10. Bộ hâm nhiên liệu;
11. Bộ thu tín hiệu phát hiện giọt;
12. Nhiệt kế hồng ngoại;
13. Camera

Hình 3.6. Sơ đồ thử nghiệm tạo cặn trên mô hình bề mặt vách buồng cháy

Tấm nền bằng hợp kim nhôm (AC9A) (với kết cấu và kích thước trong Hình PL5) được sử dụng như bề mặt của vách buồng cháy động cơ. Tấm nền được gia nhiệt bằng điện và nhiệt độ bề mặt của nó được điều khiển bởi một bộ điều khiển nhiệt độ. Nhiệt độ bề mặt được đo bằng một cặp nhiệt ngẫu, đầu đo của nó nằm tại tâm của tấm và về phía dưới của nó như Hình 3.7. Nhiệt độ đo bằng cặp nhiệt ngẫu thường không chuẩn với nhiệt độ bề mặt thực sự của tấm do mất nhiệt từ bề mặt của nó. Vì vậy, một nhiệt kế hồng ngoại được sử dụng để đo nhiệt độ bề mặt chính xác hơn. Đầu kim phun nhiên liệu nằm trên cách điểm tâm của tấm 80 mm (L_h) để tránh làm nóng nhiên liệu trước thử nghiệm, hạn chế lỗi xảy ra do sự thiếu hụt lượng giọt lớn trong quá trình va chạm và đảm bảo số Weber = 110. Khoảng thời gian va chạm (τ_{vc}) được kiểm soát bằng cách điều chỉnh van tiết lưu. Số giọt va chạm (N_D) được xác định bằng cách sử dụng một máy dò laze hồng ngoại và thiết bị đếm.



Hình 3.7. Bộ thiết bị thử nghiệm TNCMH



Hình 3.8. Mô hình TNCMH



Hình 3.9. Trang thiết bị của TNCMH

3.2.2. Trang thiết bị

3.2.2.1. Cảm biến nhiệt độ tấm nền

Thông số cảm biến nhiệt độ WRET-01 (K – type) (Bảng 3.2)

Bảng 3.2. Thông số kỹ thuật của cảm biến WRET-01

Nội dung	Thông số
Mã đầu dò	WRNT-01
Kiểu cảm biến nhiệt	K
Vật liệu	Ni, Cr, Si, Co
Chiều dài dây	1m
Dải đo nhiệt độ	0°C – 600°C
Độ chính xác	±0,5%

3.2.2.2. Bộ điều khiển nhiệt độ gia nhiệt cho tấm nền

Thông số bộ điều khiển nhiệt độ bằng relay hiển thị Led 7 đoạn, cài đặt được nhiệt độ trên và dưới cần đóng ngắt, điện áp làm việc 220VAC. Thông số module điều khiển trong Bảng 3.3.

Bảng 3.3. Thông số kỹ thuật bộ điều khiển nhiệt độ gia nhiệt cho piston

Nội dung	Thông số
Phạm vi nhiệt độ	200°C – 500°C
Độ phân giải	1°C
Độ chính xác	±0,5%
Thiết lập backlash	0,5°C – 20°C
Tốc độ lấy mẫu	1s
Nguồn cấp cho mạch	220VAC
Ngõ ra relay	10A dạng tiếp điểm thường mở

3.2.2.3. Nhiệt kế hồng ngoại

Nhiệt kế hồng ngoại Beta 1760/IR 1600 được sử dụng để đo nhiệt độ bề mặt căn lắng trong quá trình thử nghiệm. Thông số kỹ thuật của nhiệt kế được trình bày trong Bảng 3.4.

Bảng 3.4. Thông số kỹ thuật của nhiệt kế Beta 1760/IR 1600

Nội dung	Thông số
Phạm vi nhiệt độ	Từ -50°C đến +1600°C
Độ chính xác	±1,5%
Độ phân giải	0,1°C
Khả năng lặp lại	1°C
Thời gian phản ứng	500ms
Khoảng cách tới điểm	50:1
Nhiệt độ hoạt động	0°C-50°C
Giá đỡ kết nối với tripod	Có

3.2.2.4. Cân điện tử vi lượng

Cân điện tử ABS 220-4N được sử dụng để có cân được khối lượng căn lắng trong quá trình thử nghiệm. Thông số kỹ thuật của cân điện tử vi lượng trên được trình bày trong Bảng 3.5.

Bảng 3.5. Thông số kỹ thuật của cân điện tử vi lượng ABS 220-4N

Nội dung	Thông số
Khả năng đọc	0,00001g
Độ lặp lại	0,0002g
Độ tuyến tính	±0,0003g
Tải tối đa	220g
Thời gian ổn định	3s
Màn hình hiển thị	LCD
Điều kiện môi trường	10 – 30°C
Có lồng kính chắn gió	
Mặt đĩa cân	Thép không gỉ
Nguồn điện	AC 220V-50Hz

3.2.2.5. Kính hiển vi điện tử quét

Kính hiển vi điện tử quét Jeol SEM 5410 LV được sử dụng để chụp ảnh được cấu trúc bên trong của căn lắng. Thông số kỹ thuật của kính hiển vi điện tử này được trình bày trong Bảng 3.6.

Bảng 3.6. Thông số kỹ thuật của kính hiển vi điện tử quét Jeol SEM 5410 LV

Nội dung	Thông số
Độ phân giải	3,5nm tại điện thế thứ cấp 30kV, khoảng cách làm việc 8mm, SEI

Điện thế gia tốc	0,5 – 30kV: bước tăng 0,1kV 5 – 30kV: bước tăng 5kV
Độ phóng đại	15 đến 200000 lần (25 bước nhảy)
Tín hiệu hình ảnh	
Chế độ chân không cao (H-Vac)	- Hình ảnh điện tử thứ cấp (SEI) - Hình ảnh điện tử tán xạ ngược (BEI) - Hình ảnh điện tử tán xạ ngược (BEI): ảnh thành phần, hình học và ảnh bóng .
Chế độ chân không thấp (L-Vac)	- Hình ảnh điện tử tán xạ ngược (BEI): ảnh thành phần, hình học và ảnh bóng

3.2.2.6. Máy quay và chụp hình

Để có thể xác định được thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu, thời gian bay hơi, cần thiết phải thấy được diễn biến quá trình giọt nhiên liệu rơi xuống bề mặt vách và sự bay hơi của nhiên liệu thông qua hình ảnh thu được bằng máy quay và chụp hình Canon 70D với thông số kỹ thuật trình bày trong Bảng 3.7.

Bảng 3.7. Thông số camera Canon 70D

Nội dung	Thông số
Cảm biến	CMOS APS-C
Độ phân giải	20PM
ISO	100-12800
Tốc độ chụp hình	7fps
Quay phim	FHD 60fps, SD 240fps

3.2.3. Quy trình và chế độ thử nghiệm

3.2.3.1. Thử nghiệm bay hơi

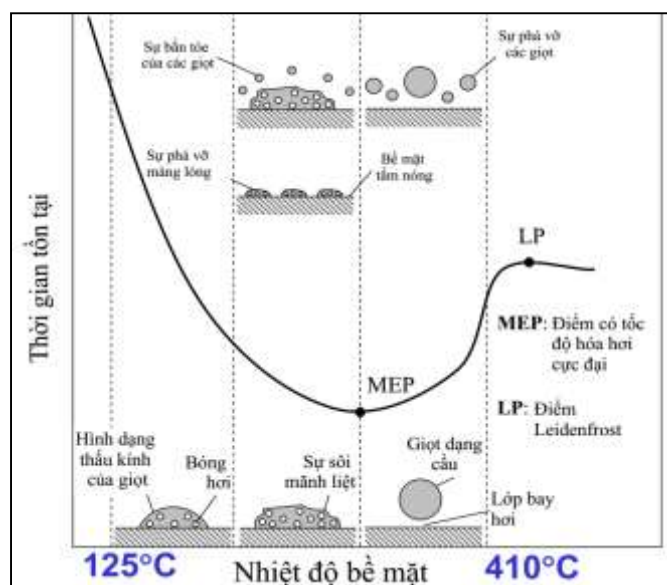
Thử nghiệm bay hơi (TNBH) nhằm xác định các đặc tính bay hơi của các loại nhiên liệu tham gia thử nghiệm. Nhiên liệu được sử dụng trong các TNBH là dodecane (DDC: $C_{12}H_{26}$) và tất cả các loại nhiên liệu trong thử nghiệm TNBMH.

Số lượng giọt nhiên liệu sẽ được xét đến trong thử nghiệm này là 100 giọt cho mỗi loại nhiên liệu. Khối lượng của mỗi giọt đơn nhiên liệu (m_D) và đường kính của nó (D_d) được tính toán và đánh giá tương quan với khối lượng riêng của mỗi nhiên liệu (ρ_{nl}). Khối lượng giọt của mỗi loại nhiên liệu khác nhau do khối lượng riêng của các nhiên liệu là không giống nhau. Đường kính của giọt nhiên liệu được xác định gần đúng thông qua đường kính miệng kim phun.

Phạm vi nhiệt độ của thử nghiệm bay hơi phụ thuộc vào loại nhiên liệu được thử nghiệm và khả năng cấp nhiệt của thiết bị gia nhiệt cho bề mặt vách. Khoảng nhiệt tối đa của thiết bị trong suốt quá trình thử nghiệm khoảng 125°C đến 410°C. Dao động nhiệt độ tối đa tại một điểm là 5°C do sự va chạm của các giọt nhiên liệu và độ trễ của

thiết bị gia nhiệt. Sau khi nhiệt độ yêu cầu đã được thiết lập, những giọt nhiên liệu được nhỏ từ đầu kim phun để va chạm với bề mặt vách. Đối với mỗi mức nhiệt, ít nhất ba lần thử nghiệm tiến hành để đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu. Để hiểu được diễn biến hóa hơi của các giọt nhiên liệu trên bề mặt vách, sự tương tác giữa những giọt dầu trên bề mặt cũng được quan sát và ghi lại bằng máy quay.

Thời gian tồn tại của giọt (τ_{tt}) của nhiên liệu thuần như DDC được đánh giá bởi khoảng thời gian từ khi những giọt dầu bắt đầu chạm vào bề mặt vách và kết thúc khi các giọt nhỏ bay hơi hết. Tuy nhiên, khi xét với các nhiên liệu đa thành phần thì thời gian đó được ghi nhận cho đến khi nhiên liệu còn lại phần khó bay hơi và không thể bay hơi được nữa. Đối với mỗi nhiên liệu thử nghiệm, mối tương quan giữa thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu và nhiệt độ bề mặt vách sẽ cho thấy đặc tính bay hơi đặc trưng của từng loại.



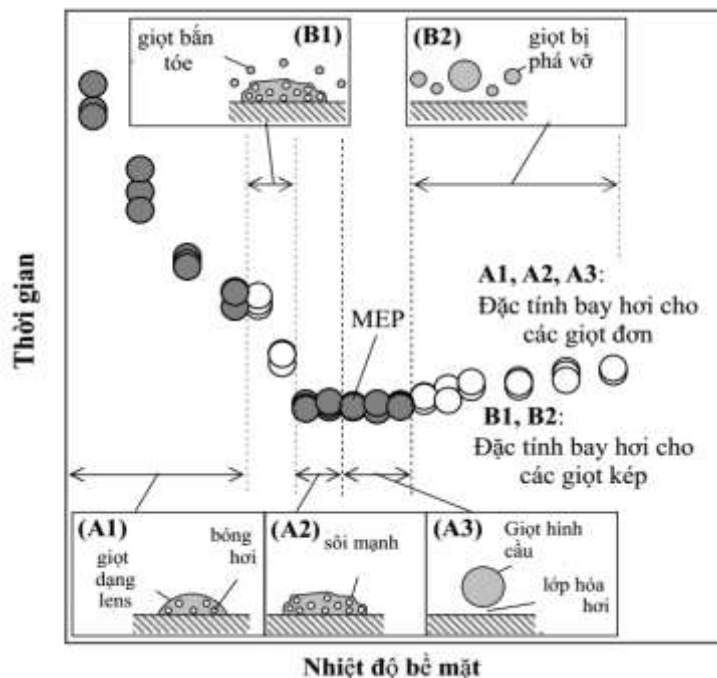
Hình 3.10. Đặc tính bay hơi chung của nhiên liệu trong thử nghiệm

Đặc tính bay hơi (Hình 3.10) của một loại nhiên liệu được đặc trưng bởi ba yếu tố bao gồm thời gian tồn tại của giọt tại một số nhiệt độ của bề mặt vách nhất định, điểm tốc độ bay hơi tối đa (MEP) và diễn biến tương tác của giọt với bề mặt vách.

Các dữ liệu thu được từ TNBH của các nhiên liệu là cơ sở quyết định nhiệt độ bề mặt và giải thích các quá trình xảy ra trong nghiên cứu sự hình thành cặn lắng của nhiên liệu sau này. Bên cạnh đó nó là cơ sở để thiết lập thời gian va chạm của một giọt nhiên liệu với bề mặt vách trong các thử nghiệm TNCMH.

Đặc tính bay hơi của các giọt nhiên liệu đơn và kép sau va chạm trước và sau vùng nhiệt độ MEP được minh họa trong Hình 3.11. Ở vùng nhiệt độ thấp khi giọt nhiên liệu ở trạng thái giọt đơn, giọt nhiên liệu thường bám dính trên các bề mặt vách khi

nhệt độ bề mặt thấp hơn nhiệt độ MEP như trong Hình 3.11A₁ (giọt dạng thấu kính) và Hình 3.11A₂ (giọt nhiên liệu sôi mạnh). Do sự hình thành của hơi nhiên liệu sau khi vượt quá nhiệt độ MEP, giọt nhiên liệu đơn bay hơi với hình dạng giọt hình cầu và tách ra từ bề mặt vách như trong Hình 3.11A₃.



Hình 3.11. Đặc tính bay hơi của các giọt nhiên liệu DO đơn và kép

Nhiệt độ thứ cấp được xem là một điều kiện quan trọng trong thử nghiệm, nó thể hiện mức nhiệt độ dưới nhiệt độ sôi của một nhiên liệu lỏng. Nó thường được sử dụng khi đề cập đến việc truyền nhiệt khi sôi và lắng đọng trên bề mặt vách kim loại. Do nhiên liệu nhiều thành phần được sử dụng trong nghiên cứu này, nhiệt độ thứ cấp được xác định theo biểu thức:

$$\Delta t = t_{bm} - t_{MEP} \quad (3.1)$$

Trong đó t_{bm} là nhiệt độ bề mặt vách, t_{MEP} là nhiệt độ tại điểm có tốc độ bay hơi tối đa.

Thông qua nhiệt độ này hiệu ứng nhiệt của quá trình bay hơi và lắng đọng của nhiên liệu trên bề mặt vách trong nghiên cứu này sẽ được mô tả rõ ràng hơn.

3.2.3.2. Thử nghiệm tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy (TN CMH)

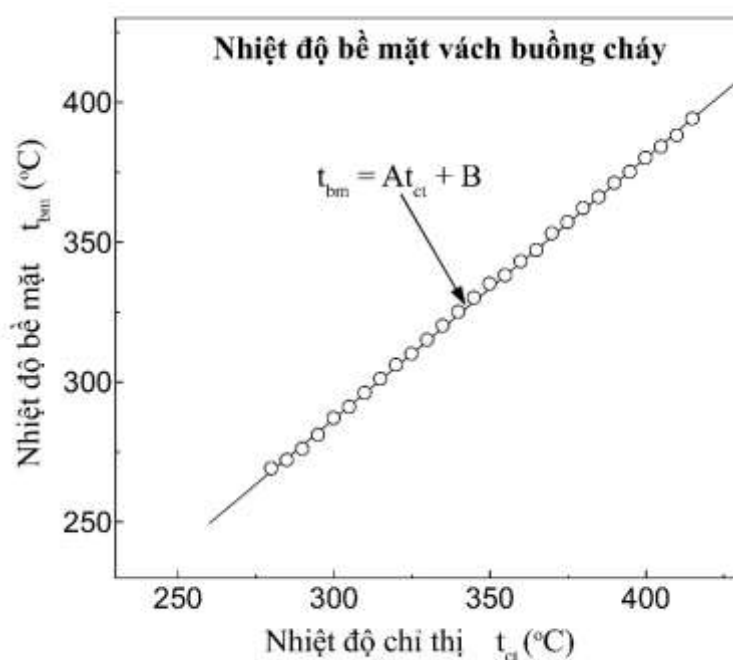
Các giọt nhiên liệu chảy từ két chứa và liên tục va chạm với bề mặt vách trong những khoảng thời gian và chạm khác nhau. Cứ sau 1000 giọt, khối lượng cặn được đo và hình ảnh cặn được chụp lại. Sự có mặt lượng cặn trên bề mặt vách và nhiệt lưu trên

bề mặt vách có thể ảnh hưởng đến kết quả dữ liệu thu được ở các lần thử nghiệm tiếp theo nên bề mặt vách cần được làm mát và vệ sinh sạch trước khi tiến hành thử nghiệm.

Tổng số giọt nhiên liệu trong mỗi thử nghiệm TNCMH là 19000 giọt cho mỗi loại nhiên liệu.

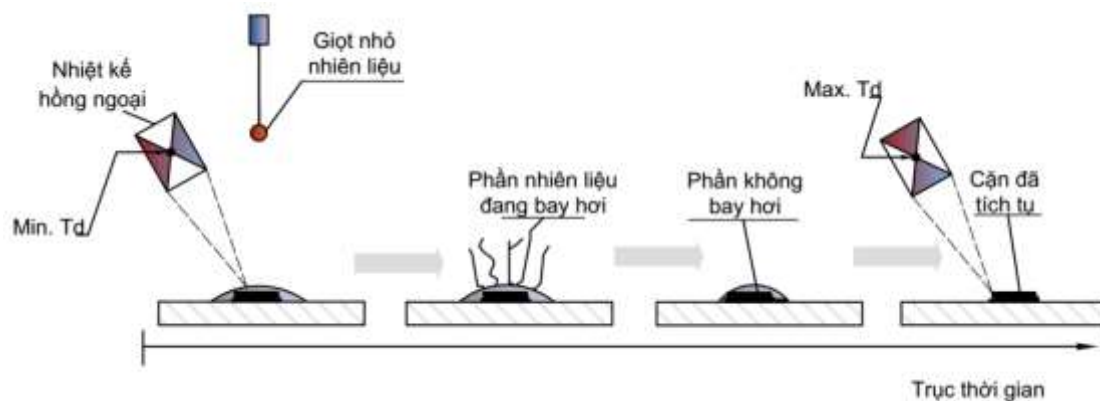
Lượng cặn tại mỗi 1000 giọt sau khi được cân sẽ được bảo quản trong tủ hút chân không và chống ẩm để đảm bảo độ tin cậy của mẫu, sau khi quá trình thử nghiệm kết thúc mẫu sẽ được gửi đi phân tích thành phần.

Dữ liệu cho nhiệt độ bề mặt tối đa và tối thiểu của cặn (t_c [°C]) trong khoảng thời gian va chạm đã được thu thập bằng cách sử dụng một nhiệt kế hồng ngoại (Beta 1760/IR1600) với phát xạ 0,90 để kiểm soát tác động của việc thay đổi nhiệt trong quá trình lắng đọng. Trong khi đó nhiệt độ bề mặt vách kim loại liên quan đến nhiệt độ chỉ thị (t_{ct} [°C]) thu được bằng cặp nhiệt ngẫu và nhiệt độ bề mặt (t_{bm} [°C]) đo qua một nhiệt kế hồng ngoại. Mối tương quan giữa t_{ct} và t_{bm} là cơ sở xác định nhiệt độ của bề mặt vách (Hình 3.12).



Hình 3.12. Sự tương quan về nhiệt độ t_{ct} và t_{bm}

Hình 3.13 cho thấy các phép đo nhiệt độ bề mặt bằng cách sử dụng nhiệt kế hồng ngoại. Nhiệt độ bề mặt cặn tối thiểu là nhiệt độ bề mặt của cặn được đo tại thời điểm ngay khi các giọt nhiên liệu va chạm với bề mặt cặn. Nhiệt độ bề mặt cặn tối đa là nhiệt độ bề mặt cặn được đo tại điểm va chạm ngay trước khi các giọt tiếp theo va chạm với bề mặt cặn. Nhiệt độ bề mặt cặn tối đa và các đặc tính bay hơi của nhiên liệu được sử dụng để ước lượng quãng đời của giọt nhiên liệu trong các thử nghiệm lắng đọng.



Hình 3.13. Quá trình đo nhiệt độ bề mặt cặn

Điều kiện thử nghiệm TNCMH được trình bày trong Bảng 3.8.

Bảng 3.8. Điều kiện thử nghiệm của TNCMH

Thí nghiệm	Loại nhiên liệu	Thời gian va chạm của giọt với vách	Nhiệt độ bề mặt vách
		τ_{vc} (s)	t_{bm} (°C)
Ảnh hưởng của nhiệt độ bề mặt vách buồng cháy	DO	5	270; 306; 327; 352; 367
Ảnh hưởng của thành phần nhiên liệu	DO	3 và 5	306; 352
	B100	5 và 8	352
	B50		
	B20		
B5			
Đánh giá tính khả thi của mô hình TNCMH; Ảnh hưởng của lượng dầu bôi trơn	DO	8	270
	DO + 1%L		
	DO + 2%L		

3.3. Mô hình thực nghiệm đối chứng TNCBC

Để đánh giá tính khả thi và đúng đắn của mô hình thực nghiệm TNCMH cần có một thực nghiệm đối chứng trên động cơ mà ở đó một số điều kiện thử nghiệm về sự tạo cặn lạnh được thiết lập là tương đồng nhau. Dữ liệu kết quả thực nghiệm từ hai mô hình được phân tích và xử lý bằng các tiêu chuẩn thống kê, từ đó xác định được hàm hồi quy tương ứng với dữ liệu thực nghiệm từ mỗi mô hình. Như vậy, việc đánh giá xu

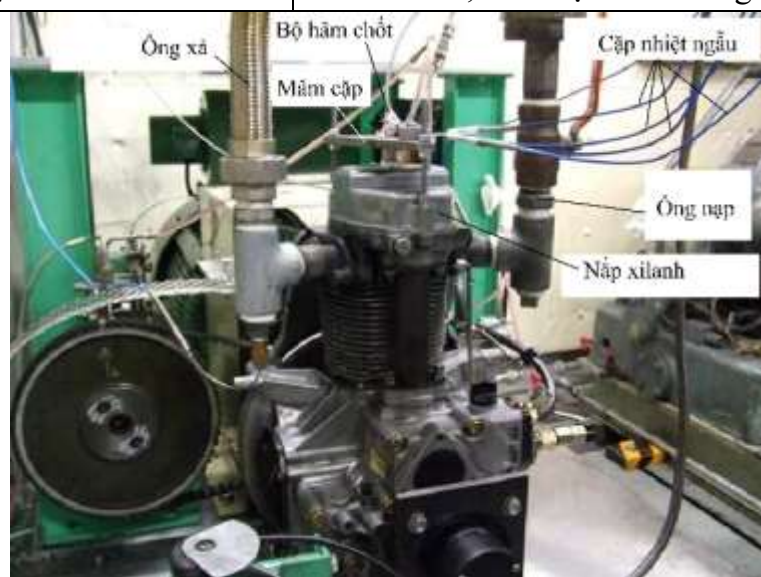
hướng hình thành của căn lắng dựa trên hàm hồi quy (bộ hệ số của hàm hồi quy) thu được từ hai mô hình là cơ sở khoa học tin cậy để khẳng định tính khả thi và đúng đắn của mô hình nghiên cứu.

3.3.1. Mô hình và trang thiết bị

Đối tượng thử nghiệm được lựa chọn là động cơ diesel Robin DY41DS với các thông số chính cho trong Bảng 3.9. Mô hình và sơ đồ bố trí động cơ trên băng thử được thể hiện trong Hình 3.14 và Hình 3.15. Để đo khối lượng căn trong buồng cháy mà không cần tháo dỡ nắp xilanh, một chốt nhôm được đặt trên nắp xilanh. Bốn cặp nhiệt ngẫu được gắn vào chốt để đo nhiệt độ chốt và thiết bị gia nhiệt được đưa vào bên trong chốt để kiểm soát nhiệt độ chốt. Vị trí chốt được đặt trong buồng cháy tại vị trí sao cho bề mặt chốt và mặt nắp xilanh đồng phẳng (Hình 3.15). Một cặp nhiệt ngẫu khác được đưa vào nắp xilanh để đo nhiệt độ nắp xilanh gần chốt. Thông số về kích thước của chốt được thể hiện trong Hình PL2 và Hình PL3.

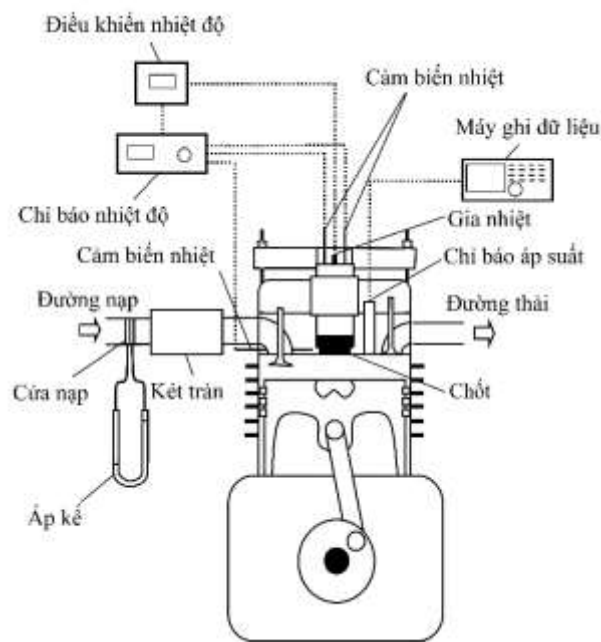
Bảng 3.9. Các thông số chính của động cơ DY41DS

Mô tả	Thông số
Loại động cơ	Diesel, 4 kỳ, 1 xilanh, làm mát cưỡng bức bằng không khí, phun nhiên liệu trực tiếp
Dung tích xilanh	412 ml
Đường kính x Hành trình piston	82 mm x 78 mm
Tỷ số nén	21:1
Công suất tối đa	6,3 kW tại 3600 vòng/phút
Mô men cực đại	19,7 Nm tại 2400 vòng/phút



Hình 3.14. Băng thử động cơ DY41DS

Nhiên liệu được sử dụng trong thử nghiệm là nhiên liệu diesel (DO) theo tiêu chuẩn TCVN 5689:2005 và dầu bôi trơn (SAE30) hòa trộn với nhiên liệu DO theo các tỉ lệ DO+1%L và DO+2%L. Tỉ lệ hòa trộn này phù hợp với suất tiêu hao dầu bôi trơn trên suất tiêu hao nhiên liệu của động cơ thực đã qua sử dụng [100], đồng thời được đề xuất dựa trên các nghiên cứu [101, 102]. Đặc điểm và tính chất của nhiên liệu diesel (DO) và dầu bôi trơn (SAE30) được trình bày trong Bảng PL1 và PL2 của phụ lục.



Hình 3.15. Bố trí thiết bị trên động cơ DY41DS

3.3.2. Quy trình thử nghiệm

Trong thử nghiệm này, một thiết bị gia nhiệt được gắn vào chốt và được thiết lập với nhiệt độ $t_h = 240^\circ\text{C}$ để duy trì nhiệt độ chốt t_{ch} cao hơn nhiệt độ nắp xilanh khoảng $5-10^\circ\text{C}$. Động cơ được duy trì ở chế độ tải 50%, hệ số dư lượng không khí được thiết lập ở 2,4, nhiên liệu được phun sớm 15 độ GQTK so với ĐCT. Tốc độ động cơ được thiết lập tại 1200 vòng/phút và thời gian hoạt động liên tục của động cơ là 20 giờ. Sau mỗi giờ, chốt được rút ra và lượng cặn bám trên chốt được đo. Khối lượng chốt được đo bằng cân điện tử vi lượng với độ phân giải $0,01\text{mg}$. Lượng cặn được xác định bằng sự khác biệt giữa khối lượng chốt trước và sau mỗi lần đo.

3.4. Phương trình hồi quy của sự hình thành và phát triển cặn lắng

Trước khi đánh giá tính đúng đắn và khả thi của mô hình thực nghiệm TNCMH cần thiết phải xây dựng và lựa chọn được mô hình toán phù hợp và tối ưu mô tả cơ chế hình thành và phát triển cặn lắng của nhiên liệu trên bề mặt vách. Thực tế việc so sánh kết quả thực nghiệm trên mô hình TNCMH và mô hình thử nghiệm xác định lượng cặn buồng cháy động cơ thực (TNCBC) để đối chứng sẽ khác xa nhau bởi cơ sở để xây

dựng mô hình TNCMH chỉ dựa trên các hiện tượng vật lý của cơ chế tạo cặn lắng với các điều kiện then chốt quyết định sự tạo cặn trên bề mặt vách. Bên cạnh đó việc xây dựng một buồng cháy thể tích trong mô hình thực nghiệm giống như buồng cháy động cơ chỉ phát huy được vai trò của nó khi nghiên cứu xét đến sự tham gia và biến đổi của các chất (tức xét đến các phản ứng hóa học diễn ra trong quá trình tạo cặn). Vì vậy, việc thiết lập một mô hình toán phù hợp mô tả được sự hình thành và phát triển của cặn lắng từ các dữ liệu thực nghiệm trên hai mô hình sẽ là cơ sở đáng tin cậy để đánh giá tính đúng đắn và khả thi của mô hình.

3.4.1. Mô hình toán mô tả sự hình thành và phát triển cặn lắng của mô hình TNCMH

Có rất nhiều mối tương quan có thể được sử dụng để mô tả sự phát triển của cặn lắng. Dựa trên cơ sở phân tích dữ liệu thực nghiệm và thuật toán xác định hàm hồi quy trên ngôn ngữ R đã thu được có bốn phương trình hồi quy mô tả tương quan giữa các dữ liệu thực nghiệm thu được ảnh hưởng đến sự phát triển của cặn gồm phương trình (3.1), (3.2), (3.3) và (3.4). Tất cả đều dựa trên dữ liệu thô, tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách (M_R), tổng khối lượng của những giọt nhiên liệu (M_D), khối lượng tích lũy của những giọt nhiên liệu (M_d) và khối lượng của một giọt nhiên liệu đơn (m_D).

$$M_R = \alpha N_D \quad (3.1)$$

$$\frac{M_R}{M_D} = \alpha N_D^\beta \quad (3.2)$$

$$\frac{M_R}{M_d} = \alpha N_D^\beta \quad (3.3)$$

$$\frac{M_R}{m_D} = \alpha N_D^\beta \quad (3.4)$$

Trong đó:

M_R = tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách [g];

M_D = tổng khối lượng các giọt nhiên liệu [g];

M_d = khối lượng tích lũy của các giọt nhiên liệu [g];

m_D = khối lượng của một giọt nhiên liệu đơn [g];

N_D = số giọt tương tác;

D_d = đường kính của một giọt [m];

α = hệ số đặc trưng cho sự tạo cặn ban đầu;

β = hệ số đặc trưng cho sự phát triển cặn.

Các mối tương quan trong sự phát triển cặn được mô tả bởi phương trình (3.1), (3.2), (3.3) và (3.4) được sử dụng để phối hợp các dữ liệu thu được trong nghiên cứu này, như thể hiện trong Hình 3.16, 3.17, 3.18 và 3.19. Các mối tương quan trong các số liệu thu được thông qua phương pháp hồi quy tuyến tính đơn giản được tính toán bằng cách sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất, trừ các mối tương quan đã nêu trong Hình 3.16, do để có được lượng cặn bằng không cho số giọt nhiên liệu là 0 giọt, các mối tương quan trong Hình 3.16 đã thu được thông qua một phương trình tuyến tính đơn giản liên quan đến điểm gốc với điểm dữ liệu trung bình cho mỗi nhiên liệu thử nghiệm.

Để so sánh các tương quan đó, giá trị hệ số tương quan (r) được tính toán và đưa ra trong Bảng 3.10 cho phương trình (3.2), (3.3) và (3.4). Các giá trị tuyến tính kỳ vọng của bộ dữ liệu ứng với các phương trình hồi quy được xác lập ở trên sẽ cho phép đánh giá mức độ mô hình phản ánh giá trị quan sát, tức là giá trị tiên lượng gần với giá trị quan sát ở mức độ nào. Các giá trị của r gần hơn với giá trị +1 hoặc -1 cho thấy rằng các phương trình hồi quy có mối tương quan tốt hơn với các dữ liệu thực nghiệm thu được.

Bảng 3.10. Hệ số tương quan

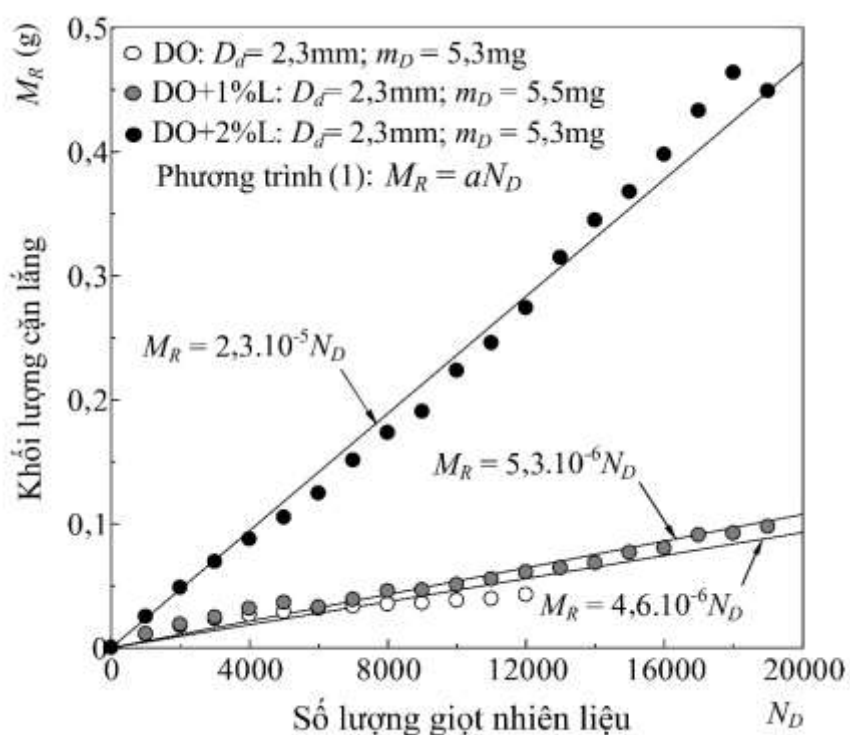
Nhiên liệu thử nghiệm	Hệ số tương quan (r)		
	Phương trình (3.2)	Phương trình (3.3)	Phương trình (3.4)
DO	0,99	-0,99	0,99
DO+1%L	0,99	-0,95	0,99
DO+2%L	0,99	-0,27	0,99

Xét về hệ số tương quan, phương trình (3.2) và (3.4) cho thấy mối tương quan tốt hơn với các dữ liệu thu được khi thử nghiệm với các loại nhiên liệu DO, DO + 1% L và DO + 2% L so với phương trình (3.3).

Bảng 3.11 thể hiện kết quả thu được từ kiểm định các tiêu chuẩn trong ngôn ngữ R xét với trường hợp dùng nhiên liệu diesel (DO) trong TNCMH.

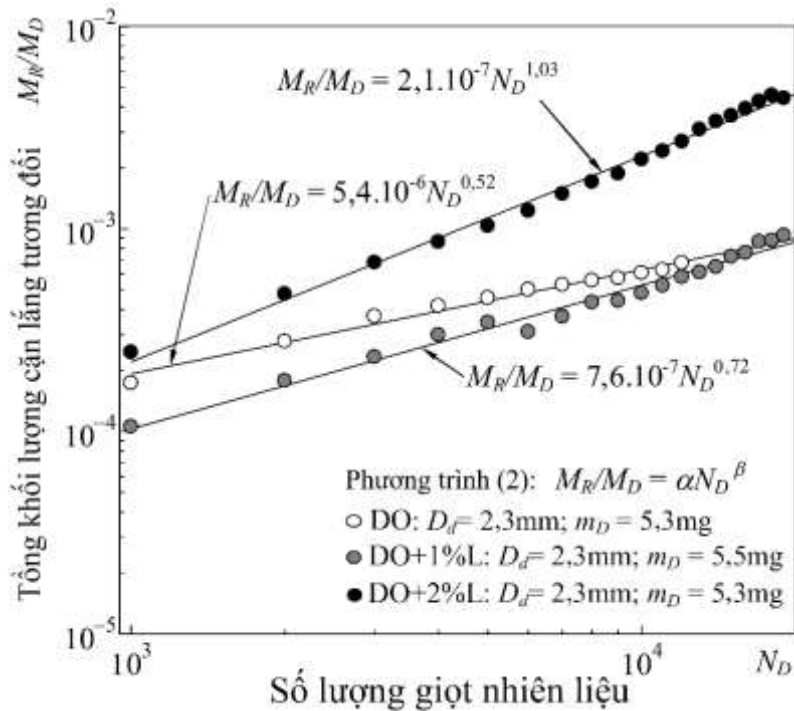
Bảng 3.11. Kết quả kiểm định mô hình hồi quy trong R với dữ liệu trong TNCMH

Loại kiểm định	(1) (DO)	(2) (DO)	(3) (DO)	(4) (DO)
Phần dư	0,12	0,09	-0,11	-0,05
Hệ số				
α	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	0,11	0,066
β	-	0,52	-0,54	0,50
Pr ($> t $)	0,032	$1,62 \cdot 10^{-5}$	0,0153	$1,06 \cdot 10^{-8}$
Sai số chuẩn phần dư	0,5431	0,6021	0,5062	0,3027
Kiểm định F	0,029	$1,60 \cdot 10^{-5}$	0,0151	$1,058 \cdot 10^{-8}$
R^2	0,213	0,462	0,213	0,8775



Hình 3.16. Tương quan về sự phát triển cặn dựa trên dữ liệu M_R

Phương trình (1) trong Hình 3.16 thể hiện tổng khối lượng cặn tích lũy trên bề mặt vách trong cả quá trình thử nghiệm. Tuy nhiên, trong quá trình tạo cặn không thể phân biệt rõ ràng sự phát triển cặn trong giai đoạn đầu của DO và DO + 1% L. Hơn nữa, ở những điều kiện có sự phát triển cặn chậm, lượng cặn nhỏ thì rất khó để phân biệt được kết quả thu được khi dựa trên các dữ liệu gốc.



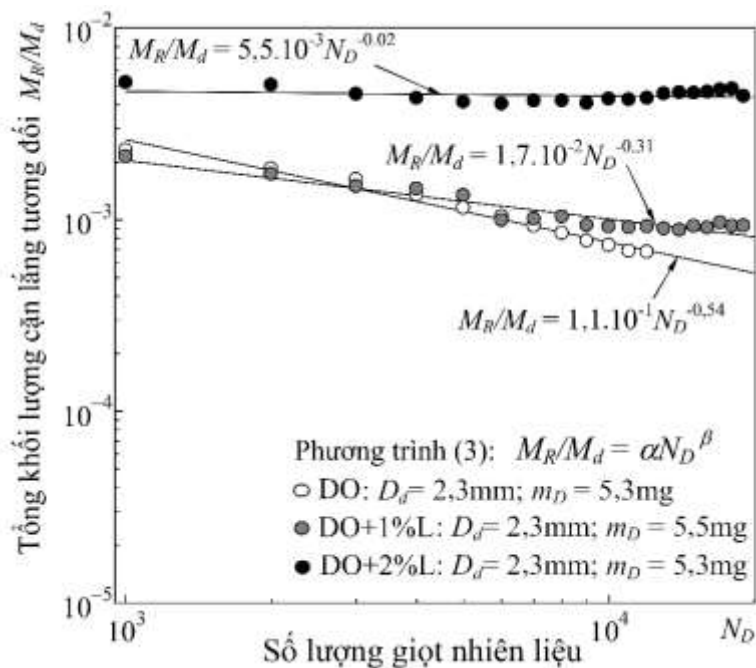
Hình 3.17. Tương quan về sự phát triển cặn dựa trên dữ liệu tương đối M_R/M_D

Mặc dù theo tính toán phương trình (3.2) có hệ số tương quan tốt nhưng thực tế kết quả thực nghiệm so với việc tính toán theo phương trình có sự sai khác trên những khoảng nhất định. So với các dữ liệu thực nghiệm được chỉ ra trên Hình 3.17, với số giọt dưới 12000 thì lượng cặn của DO nhỏ hơn so với DO+1% L. Tuy nhiên, khi số lượng giọt lớn hơn 12000 thì sự khác biệt về lượng cặn hai loại nhiên liệu là gần như nhau. Hơn nữa, tổng khối lượng giọt nhiên liệu tích lũy được sử dụng trong phương trình là không đổi trong suốt các lần lặp. Như vậy, sự tương quan mô tả và tính toán bởi phương trình (3.2) là không phù hợp do chưa mô tả chính xác bản chất của hiện tượng tạo cặn.

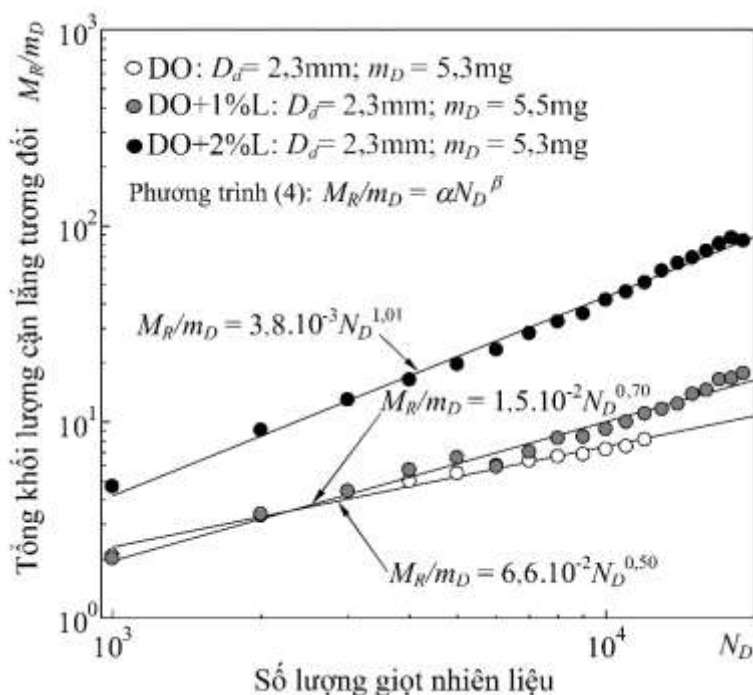
Giá trị của hệ số tương quan cho DO + 2% L chỉ ra trong Bảng 3.10 xa giá trị - 1, cho thấy mối tương quan kém với các dữ liệu thực nghiệm được thể hiện trên Hình 3.18. Hơn nữa, gradient âm thu được trong các phương trình ứng với các loại nhiên liệu thử nghiệm, nên phương trình (3.3) không thích hợp để mô tả sự gia tăng của cặn trong thời gian thử nghiệm tạo cặn.

Từ kết quả thực nghiệm cho thấy việc áp dụng phương trình (3.4) (Hình 3.19) phản ánh tốt quá trình phát triển cặn. Hơn nữa, với số lần lặp lại lớn trong quá trình thực nghiệm thì kết quả hầu như không thay đổi và nó phù hợp với tương quan của phương trình này. Điều này có thể giải thích là với phương trình (3.2) chỉ biểu diễn tương quan giữa tổng khối lượng cặn với tổng khối lượng các giọt nhưng thực tế do tính chất chong

chất lớp hạt nên đặc tính tạo cặn có thể thay đổi do sự thay đổi về trường nhiệt độ bề mặt vách.



Hình 3.18. Tương quan về sự phát triển cặn với dữ liệu tương đối M_R/M_d



Hình 3.19. Tương quan về sự phát triển cặn với dữ liệu tương đối M_R/m_D

Như vậy, các phân tích và xử lý dữ liệu thực nghiệm bằng phương pháp hồi quy tuyến tính kết hợp với công cụ xử lý bài toán thống kê bằng ngôn ngữ R đã cho thấy phương trình (3.4) là phù hợp để mô tả sự phát triển cặn lắng trong TNCMH, trong đó

giá trị của m_D là không đổi trong suốt quá trình thử nghiệm và chỉ phụ thuộc vào tính chất của các loại nhiên liệu thử nghiệm trong điều kiện TNCMH khác nhau.

3.4.2. Mô hình toán mô tả sự hình thành và phát triển cặn lắng của mô hình TNCBC

Bảng 3.12 thể hiện kết quả thu được từ kiểm định các tiêu chuẩn bằng phần mềm R xét với bộ dữ liệu (N_{ph} và M'_R/m_{ph}) trường hợp dùng các nhiên liệu DO, DO+1%L và DO+2%L trong TNCBC.

Bảng 3.12. Kết quả kiểm định mô hình hồi quy trong R với dữ liệu trong TNCBC

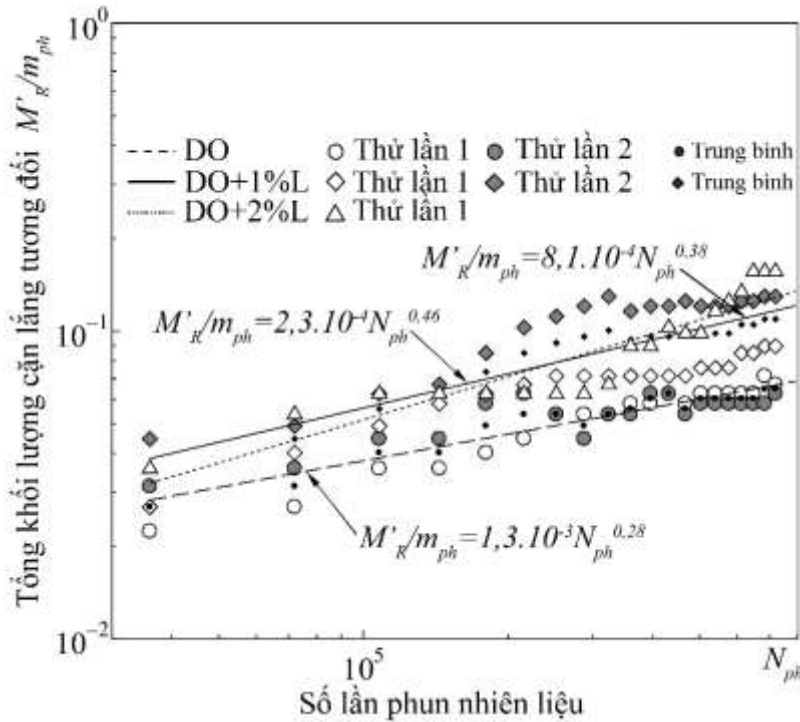
Loại kiểm định	DO	DO+1%L	DO+2%L
Hệ số tương quan r	0,78	0,75	0,76
Phần dư	-0,13	0,11	0,10
Hệ số			
α	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$
β	0,28	0,46	0,38
Pr ($> t $)	$2,23 \cdot 10^{-7}$	$1,74 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$
Sai số chuẩn phần dư	0,4315	0,4674	0,4034
Kiểm định F	$1,01 \cdot 10^{-7}$	$2,34 \cdot 10^{-7}$	$1,74 \cdot 10^{-7}$
R^2	0,7202	0,7051	0,7177

Kết quả phân tích và xử lý dữ liệu thực nghiệm thu được từ thử nghiệm xác định lượng cặn buồng cháy động cơ thực đã cho thấy rằng phương trình hồi quy (3.5) là phù hợp nhất trong việc mô tả cơ chế hình thành và phát triển cặn lắng trong buồng cháy động cơ.

$$\frac{M'_R}{m_{ph}} = \alpha N_{ph}^{\beta} \quad (3.5)$$

Trong đó:

- M'_R là tổng khối lượng cặn bám trên bề mặt chốt [g]
- m_{ph} là khối lượng nhiên liệu của một giọt đơn [g/lần phun]
- N_{ph} là số lần phun = $(1/2) \cdot (n/60)$
- n là tốc độ quay của động cơ [vòng/phút]



Hình 3.20. Sự phát triển của cặn DO và hỗn hợp DO với SAE30 trong TNCBC

Hình 3.20 mô tả kết quả thực nghiệm cũng như xu hướng hình thành và phát triển của cặn lắng ứng với các loại nhiên liệu khác nhau. Trên hình cũng thể hiện các phương trình hồi qui tương ứng với các cặp hệ số α và β mô tả sự hình thành và phát triển của cặn lắng theo số lượng giọt nhiên liệu tương tác với bề mặt chốt.

3.5. Tính tương đồng giữa mô hình TNCMH và TNCBC

Trong TNCBC, chùm tia nhiên liệu được phun ra liên tục trong một chu kỳ và chạm với bề mặt vách trong buồng cháy và đỉnh piston, một số hạt va chạm với vách trên buồng cháy do sự vận động của dòng khí, tiếp xúc với bề mặt chốt. Trong quá trình đó, bề mặt chốt chủ yếu tiếp xúc với hỗn hợp chất công tác và các chất khí ở nhiệt độ cao từ 2000-2500K, điều này dẫn đến sự hình thành các hạt soot và tiền tố của soot như PAH và chất bôi trơn bay hơi. Các thành phần này lắng đọng trên bề mặt nhiệt độ thấp của chốt trong khoảng mười phần nghìn giây và quá trình này cứ lặp đi lặp lại có tính chu kỳ trong suốt quá trình thử nghiệm động cơ. Trái lại, trong TNCMH, kích thước giọt nhiên liệu lớn tiếp xúc với bề mặt vách với tốc độ thấp và hình thành lớp màng mỏng nhiên liệu hoặc các hạt bị oxy hóa chậm trong khi lớp nhiên liệu lỏng bám lại bề mặt vách. Các thành phần cacbon và SOF tạo ra bởi quá trình oxy hóa chậm bám lại tạo thành cặn.

Từ các nội dung đã đề cập ở trên, TNCMH rõ ràng có sự khác biệt so với TNCBC. Tuy nhiên, có một số điểm tương đồng giữa hai thử nghiệm này về xu hướng hình thành, phát triển cặn lắng, nhiệt độ bề mặt cặn và một số điều kiện thử nghiệm.

3.5.1. Sự phát triển của cặn lắng

Phương trình hồi quy (3.4) và (3.5) được sử dụng để mô tả cơ chế hình thành và sự phát triển của cặn lắng trong TNCMH và TNCBC theo thời gian.

Phương trình (3.4) được áp dụng cho TNCMH với điều kiện: Khối lượng của mỗi giọt tương tác với bề mặt vách là không đổi; Sự hình thành cặn liên tục trên bề mặt vách; Tần suất va chạm liên tục của giọt với bề mặt vách trong khoảng thời gian va chạm không đổi.

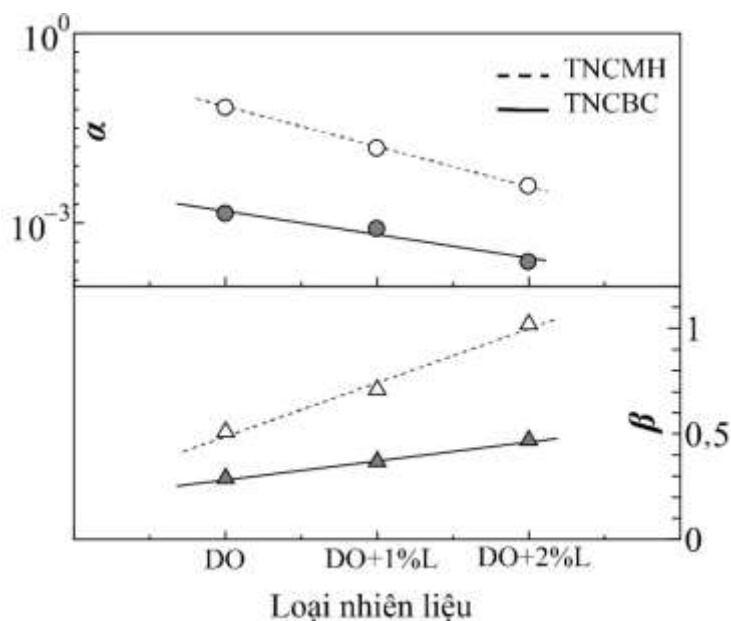
Phương trình (3.5) được áp dụng cho TNCBC với điều kiện: Lượng nhiên liệu phun không đổi trong mỗi đợt; Sự hình thành cặn liên tục trên bề mặt chốt thu cặn lắng; Tần suất liên tục của quá trình phun nhiên liệu với tốc độ không đổi.

Như vậy, phương trình (3.4) và (3.5) áp dụng với TNCMH và TNCBC có ý nghĩa vật lý và dạng hàm hồi quy tương tự nhau. Trong TNCBC, tần suất phun nhiên liệu với tốc độ không đổi và lượng nhiên liệu không đổi tương tự với những va chạm của giọt nhiên liệu với tần suất liên tục với khoảng cách và khối lượng hạt không đổi giữa các giọt trong TNCMH. Sự khác biệt là TNCMH tập trung mô tả tốt hơn sự lắng đọng của những giọt nhiên liệu đơn. Trong quá trình lắp trong cả TNCMH và TNCBC, cặn hình thành liên tục trên bề mặt vách.

Do hai phương trình có ý nghĩa vật lý tương tự, nên kết quả thực nghiệm về quá trình phát triển cặn giữa mô hình vách buồng cháy và động cơ cần so sánh số tỉ lệ cặn hình thành ở giai đoạn ban đầu (hệ số α) và tốc độ phát triển cặn (hệ số β). Kết quả cho thấy, cả hai thử nghiệm đều thu được xu hướng thay đổi hệ số α và β tương tự nhau đối với từng loại nhiên liệu thử nghiệm. Tuy nhiên, do quá trình cháy diễn ra trong động cơ nên nhiệt độ khí thể công tác cao và diện tích bề mặt chốt nhỏ trong TNCBC nên sự hình thành cặn trong TNCBC chậm hơn so với TNCMH.

Kết quả thực nghiệm từ TNCMH và TNCBC đều cho phép đánh giá tốc độ hình thành cặn của hỗn hợp nhiên liệu pha trộn DO với dầu bôi trơn. Trong TNCMH, giá trị β của DO+2% L và DO+1% L lần lượt là 1,01 và 0,70, cao hơn của DO với $\beta = 0,50$. Tuy nhiên, trong TNCBC các giá trị β thấp hơn trong TNCMH, cụ thể khi sử dụng DO+2% L là 0,46, DO+1% L là 0,38 và DO là 0,28.

Giá trị α và β đều có xu hướng chung khi thay đổi loại nhiên liệu như thể hiện trên Hình 3.21. Giá trị α giảm trong khi giá trị β tăng lên khi nhiên liệu thử nghiệm thay đổi trong cả TNCMH và TNCBC. Hình 3.19 cũng cho thấy sự chênh lệch tốc độ phát triển giữa DO+2% L và DO ở TNCMH và TNCBC lần lượt là 0,55 và 0,22. Do đó, tác động của loại nhiên liệu nên β rõ ràng trong TNCMH cao hơn TNCBC vì TNCMH không bị ảnh hưởng từ đốt cháy.



Hình 3.21. So sánh giá trị α và β

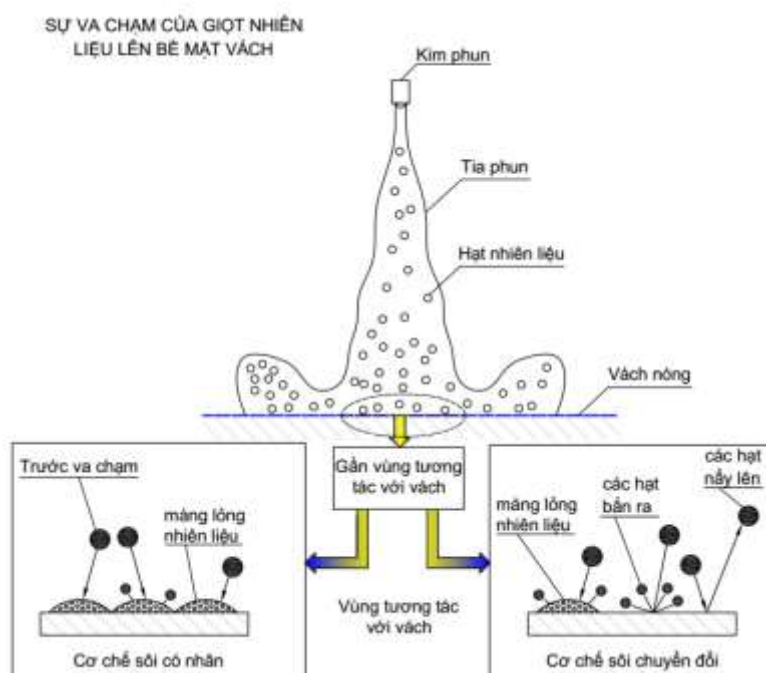
3.5.2. Điều kiện thử nghiệm

Các điều kiện thử nghiệm của TNCMH và TNCBC cũng có một số điểm tương đồng. TNCMH có điều kiện thử nghiệm tương tự TNCBC trong điều kiện nhiệt độ bề mặt vách, trạng thái ướt/khô, cơ chế truyền nhiệt sôi và một số điều kiện khác trong cơ chế tạo cặn trong quá trình thử nghiệm. Các so sánh trong phần này được thực hiện trên cơ sở tham khảo các thông tin thu được từ các tài liệu tham khảo [3, 10, 11, 12, 22, 120].

3.5.2.1. Nhiệt độ bề mặt vách và trạng thái ướt/khô

Đối với TNCMH, nhiệt độ bề mặt vách đã được thiết lập tại 270°C. Nhiệt độ này nằm trong phạm vi nhiệt độ bề mặt của vách buồng cháy động cơ diesel. Như đã đề cập trong các tài liệu, nhiệt độ bề mặt trong buồng cháy động cơ diesel là từ 127-327°C [22], 300- 350°C [120] và 200-450°C [3] (tùy thuộc vào loại và tình trạng vận hành động cơ). Nhiệt độ bề mặt vách thiết lập trong TNCMH trong chương này mô tả nhiệt độ bề mặt vách buồng cháy động cơ diesel thực. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, nhiệt độ bề mặt trong TNCBC đã được thiết lập tại 240°C, khác 30°C so với nhiệt độ bề mặt đã được thiết lập cho TNCMH. Vì TNCMH được tiến hành trong môi trường không khí, cần phải duy trì trạng thái ướt/khô của lớp cặn để mô phỏng một cách tương tự với điều kiện trong động cơ thực. Để thực hiện điều này, trong nghiên cứu thực nghiệm sẽ duy trì trạng thái ướt/khô bằng cách thiết lập khoảng thời gian va chạm nhỏ hơn so với thời gian giọt tồn tại ở nhiệt độ bề mặt 270°C.

3.5.2.2. Cơ chế sôi truyền nhiệt



Hình 3.22. Cách thức tương tác của hạt nhiên liệu trên bề mặt vách [120]

Xét về cơ chế sôi truyền nhiệt, nhiệt độ 270°C thiết lập trong TNCMH rơi vào khoảng nhiệt của giai đoạn sôi truyền nhiệt có nhân (sự hình thành các bóng khí độc lập tách khỏi bề mặt vách và di chuyển về phía màng giới hạn của hai pha lỏng-khí). Các bóng khí và cơ chế sôi truyền nhiệt chiếm ưu thế trong cơ chế sôi của nhiên liệu trong buồng cháy được đề cập bởi Senda [120] các cơ chế đó được minh họa trong Hình 3.22. Các đặc tính bay hơi của DO, DO+1% L và DO+2% L có mối quan hệ đến cơ chế tạo bóng khí và quá trình sôi chuyển đổi, nó giải thích tốc độ giải phóng nhiệt thu được khi sử dụng DO, DO+1% L và DO+2% L trong TNCBC. Mặc dù đặc tính bay hơi của nhiên liệu thử nghiệm thay đổi trong quá trình vận hành động cơ, nhưng nhiệt độ bề mặt chốt vẫn được duy trì trong khoảng 240°C đến 250°C tương tự trong quá trình sôi truyền nhiệt tạo nhân trong quá trình tạo cặn ở TNCBC.

3.5.2.3. Cơ chế tạo cặn

Trong TNCBC, nhiều yếu tố đồng thời có liên quan đến quá trình hình thành cặn như sự hình thành lớp màng mỏng lỏng, sự tương tác, gắn kết và nén chặt của các hạt, khả năng hấp phụ các thành phần khí, các phản ứng của hydrocarbon và sự nén của lớp cặn [51]. Điều đó cho thấy là tương đối khó để thiết lập được những điều kiện trong TNCMH tương tự như trong TNCBC. Tuy nhiên, xét về cơ chế hình thành, các giai đoạn của quá trình hình thành và loại bỏ cặn trong động cơ thật được đề xuất trong giải thuyết 1 đã được tích hợp trong TNCMH như sự hình thành lớp màng mỏng chất lỏng, sự bay hơi và các phản ứng của hydrocarbon trong cơ chế hình thành cặn. Sự hình thành

màng mỏng chất lỏng là cơ chế quan trọng nhất vì nó sẽ hoạt động như một phương tiện liên kết các thành phần có khả năng tạo cặn khác như soot. Nếu không có nó, không có thành phần tạo cặn nào trong buồng cháy có thể bám vào thành. Đối với cơ chế loại bỏ, quá trình oxy hóa của hydrocacbon, quá trình bay hơi của thành phần dễ bay hơi, sự phá huỷ cấu trúc cặn xốp và sự rửa trôi các thành phần còn lại cũng có trong TNCMH.

3.6. Kết luận chương

Xây dựng được mô hình thử nghiệm tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy TNCMH nhằm thay thế mô hình động cơ thực rất phức tạp và có chi phí thử nghiệm rất cao. Mô hình thực nghiệm này không mô phỏng toàn bộ diễn biến và điều kiện diễn ra quá trình hình thành và phát triển của cặn lắng trong buồng cháy động cơ mà tập trung tạo lập cơ chế vật lý và các điều kiện tiên quyết của sự hình thành cặn lắng khi các giọt nhiên liệu tương tác với bề mặt vách với $80 \leq We \leq 150$. Mặc dù không xét đến các yếu tố như áp suất buồng cháy, đặc tính phun nhiên liệu và chế độ tải của động cơ nhưng bằng nghiên cứu quy hoạch thực nghiệm dựa trên phương pháp hồi qui đã cho thấy xu hướng hình thành và phát triển cặn lắng trên mô hình thực nghiệm TNCMH và động cơ thực là tương quan khá tốt. Điều đó chứng tỏ tính đúng đắn của mô hình thực nghiệm đã được xây dựng.

Trong nghiên cứu này, việc sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm và với ưu thế của phương pháp hồi quy cùng sự chặt chẽ của công cụ phân tích thống kê là cơ sở để xây dựng mô hình toán học phù hợp nhằm mô tả cơ chế hình thành cặn trên bề mặt vách buồng cháy. Thông qua đó đã xây dựng và đánh giá được lượng cặn ban đầu (hệ số α) và tốc độ hình thành cặn (hệ số β). Đồng thời xây dựng thành công mô hình toán của quá trình hình thành cặn thể hiện qua các phương trình hồi qui: $\frac{M_R}{m_D} = \alpha N_D^\beta$ đối với mô hình TNCMH và $\frac{M'_R}{m_{ph}} = \alpha N_{ph}^\beta$ đối với mô hình TNCBC với R^2 tương ứng là 0,8775 và 0,7202 khi sử dụng nhiên liệu DO.

Hai phương trình trên có ý nghĩa vật lý tương tự và quan trọng nhất là có thể so sánh giá trị α và β thu được từ dữ liệu thử nghiệm trong TNCMH và TNCBC với mức chênh lệch về độ dốc lớn nhất tương ứng là 14% và 21%. Các bộ số α và β thu được đối với mỗi nghiên cứu ảnh hưởng là cơ sở khoa học rất có ý nghĩa để đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố như nhiệt độ bề mặt vách buồng cháy, thành phần nhiên liệu và lượng dầu bôi trơn trong nhiên liệu đến cơ chế hình thành và phát triển của cặn lắng.

Các đặc tính của sự phát triển cặn thu được trong nghiên cứu này cho thấy TNCMH có tiềm năng lớn trong nghiên cứu các loại cặn khác nhau của nhiều loại nhiên liệu, mô hình này có thể đánh giá được những khác biệt rất nhỏ trong xu hướng tạo cặn của các nhiên liệu.

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

4.1. Phương pháp và quy trình thử nghiệm tạo cặn lắng trên bề mặt vách buồng cháy

Sự hình thành và phát triển cặn lắng trên vách buồng cháy động cơ chủ yếu phụ thuộc vào các yếu tố như nhiệt độ vách buồng cháy, trạng thái tương tác của giọt nhiên liệu với vách buồng cháy và thành phần, tính chất của nhiên liệu và dầu bôi trơn. Các yếu tố này quyết định đến cơ chế hình thành của cặn lắng, cụ thể sẽ tác động đến khả năng bay hơi, thời gian tồn tại của các thành phần khó bay hơi, sự tạo lớp màng lỏng trên bề mặt vách, tác dụng cách nhiệt của lớp cặn lắng và cấu trúc, tính chất của lớp cặn. Do đó nghiên cứu thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của từng yếu tố đến cơ chế hình thành và phát triển cặn lắng trên vách buồng cháy thông qua mô hình TNCMH là rất cần thiết trước khi đi đến các kết luận về cơ chế hình thành cặn lắng của động cơ dựa trên các mô hình toán được xây dựng từ kết quả dữ liệu thực nghiệm.

4.1.1. Quy trình và điều kiện thử nghiệm

Các nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành trên mô hình TNCMH (Hình 4.1) với các điều kiện thử nghiệm trình bày trong Bảng 4.1. Quy trình thực nghiệm như đã trình bày trong mục 3.2.3.



Hình 4.1. Thiết bị trong quá trình thử nghiệm TNCMH

Bảng 4.1. Điều kiện thử nghiệm TNCMH

Nghiên cứu	Loại nhiên liệu	Thời gian va chạm của giọt với vách	Số lượng giọt nhiên liệu tương tác	Nhiệt độ bề mặt vách	Nhiệt độ MEP
		τ_{vc} (s)	N_D (giọt)	t_{bm} (°C)	(°C)
Ảnh hưởng của nhiệt độ vách buồng cháy	DDC	-	100	125 - 410	231
	DO	5	19000	270; 306 327; 352 367	357
Ảnh hưởng của thành phần nhiên liệu	DO	3 và 5	19000	306; 352	357
	B100	5 và 8	19000	352	361
	B50				380
	B20				362
	B5				357
Ảnh hưởng của lượng dầu bôi trơn	DO	8	19000	270	357
	DO+1%L				359
	DO+2%L				397

4.1.2. Đặc tính bay hơi của các nhiên liệu thử nghiệm

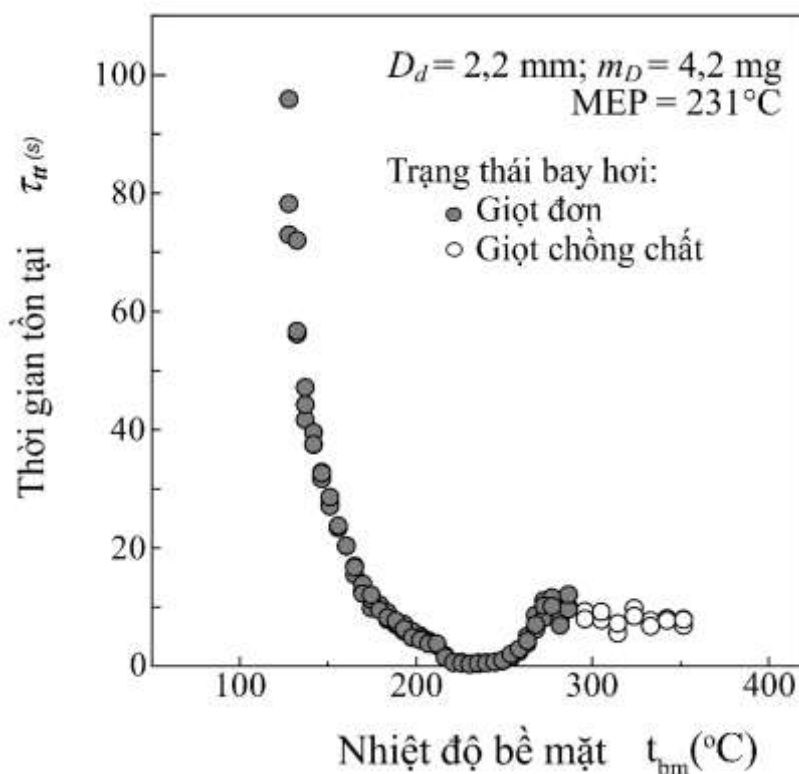
4.1.2.1. Đặc tính bay hơi của Dodecan và nhiên liệu diesel

Các đặc tính bay hơi của dodecane (DDC: $C_{12}H_{26}$) (kết quả phân tích trong Bảng PL3) và nhiên liệu diesel (DO: QCVN 1:2015/BKHCN) (kết quả phân tích trong PL1) được thể hiện trong Hình 4.2 và 4.3. Thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu, điểm tốc độ bay hơi tối đa và tình trạng bay hơi là ba thông số chính thu được từ kết quả thực nghiệm.

Hình 4.2 cho thấy quãng thời gian bay hơi của DDC (là thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu) giảm dần trong khi nhiệt độ bề mặt tăng. Thời gian tồn tại tối thiểu của 1 giọt DDC có thể quan sát được thuộc vùng nhiệt độ cao hơn nhiệt độ sôi của nhiên liệu ($BP = 214,5^\circ C$), nhiệt độ này được gọi là điểm tốc độ bay hơi tối đa (MEP). Điểm này cho thấy giới hạn khả năng bám dính của giọt nhiên liệu trên bề mặt vách trong quá trình bay hơi. Khi nhiệt độ vượt qua điểm này, giọt nhiên liệu bắt đầu tách ra khỏi bề mặt vách do sự hình thành của luồng hơi khi giọt nhiên liệu tương tác với bề mặt vách.

Một điểm đặc trưng khác là nhiệt độ Leidenfrost ở $t_{bm} = 287^\circ C$. Khi nhiệt độ bề mặt vách cao hơn điểm Leidenfrost, tình trạng bay hơi của giọt nhiên liệu đơn được thể

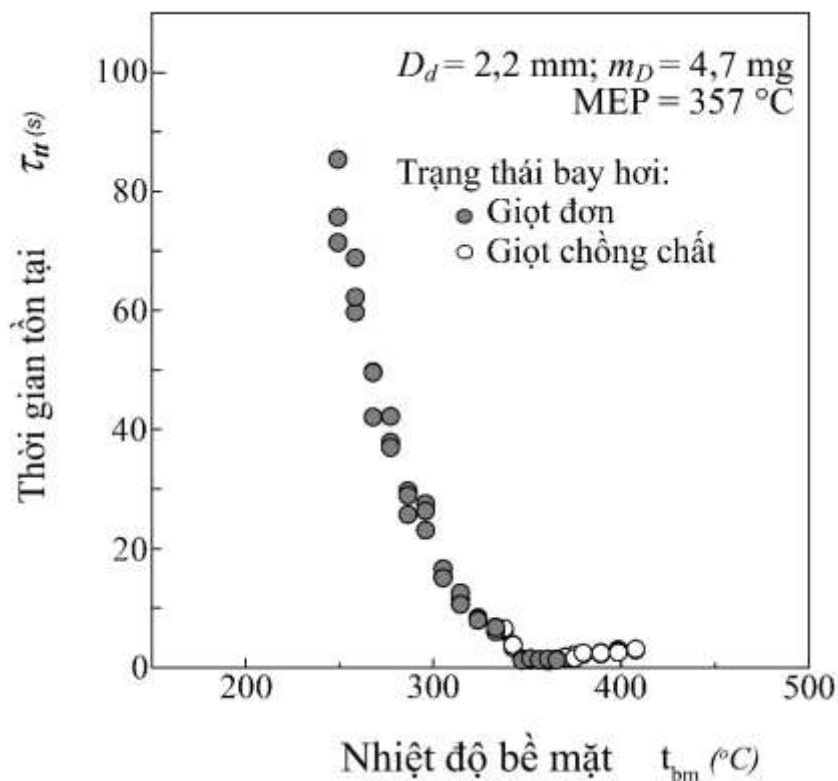
hiện qua kí hiệu chấm tròn màu trắng (Hình 4.2 và Hình 4.3). Kết quả thực nghiệm cho thấy không còn nhiên liệu DDC sót lại sau quá trình bay hơi.



Hình 4.2. Đặc tính bay hơi của dodecane

Các đặc tính bay hơi của nhiên liệu DO được thể hiện trong Hình 4.3. Thời gian bay hơi trước và tại vùng MEP tương tự với nhiên liệu DDC. Tuy nhiên, do các hydrocacbon đa thành phần có trong nhiên liệu nên quá trình bay hơi của nó có sự khác biệt so với loại nhiên liệu thuần nhất DDC. Nhiệt độ MEP ứng với $t_{bm} = 357^\circ\text{C}$ và cao hơn so với nhiệt độ điểm sôi cuối của DDC. Các điểm Leidenfrost cho DO không thể xác định do nhiên liệu đa thành phần có nhiệt độ sôi cao hơn nên thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu tiến xa về phía bên phải đồ thị. Khu vực MEP mở rộng có thời gian tồn tại giọt nhiên liệu ngắn. Kết quả thực nghiệm cho thấy, vào giai đoạn cuối của quá trình bay hơi, lớp cặn mỏng bám trên bề mặt vách được hình thành bởi các thành phần nhiên liệu khác nhau.

Trạng thái bề mặt ẩm hay khô có mối liên hệ với sự tương tác vật lý của giọt nhiên liệu với bề mặt vách. Cùng trạng thái của bề mặt, các đặc tính bay hơi của nhiên liệu là cơ sở quan trọng để xác lập điều kiện thử nghiệm tạo cặn lắng trên mô hình bề mặt vách buồng cháy như Bảng 4.1.

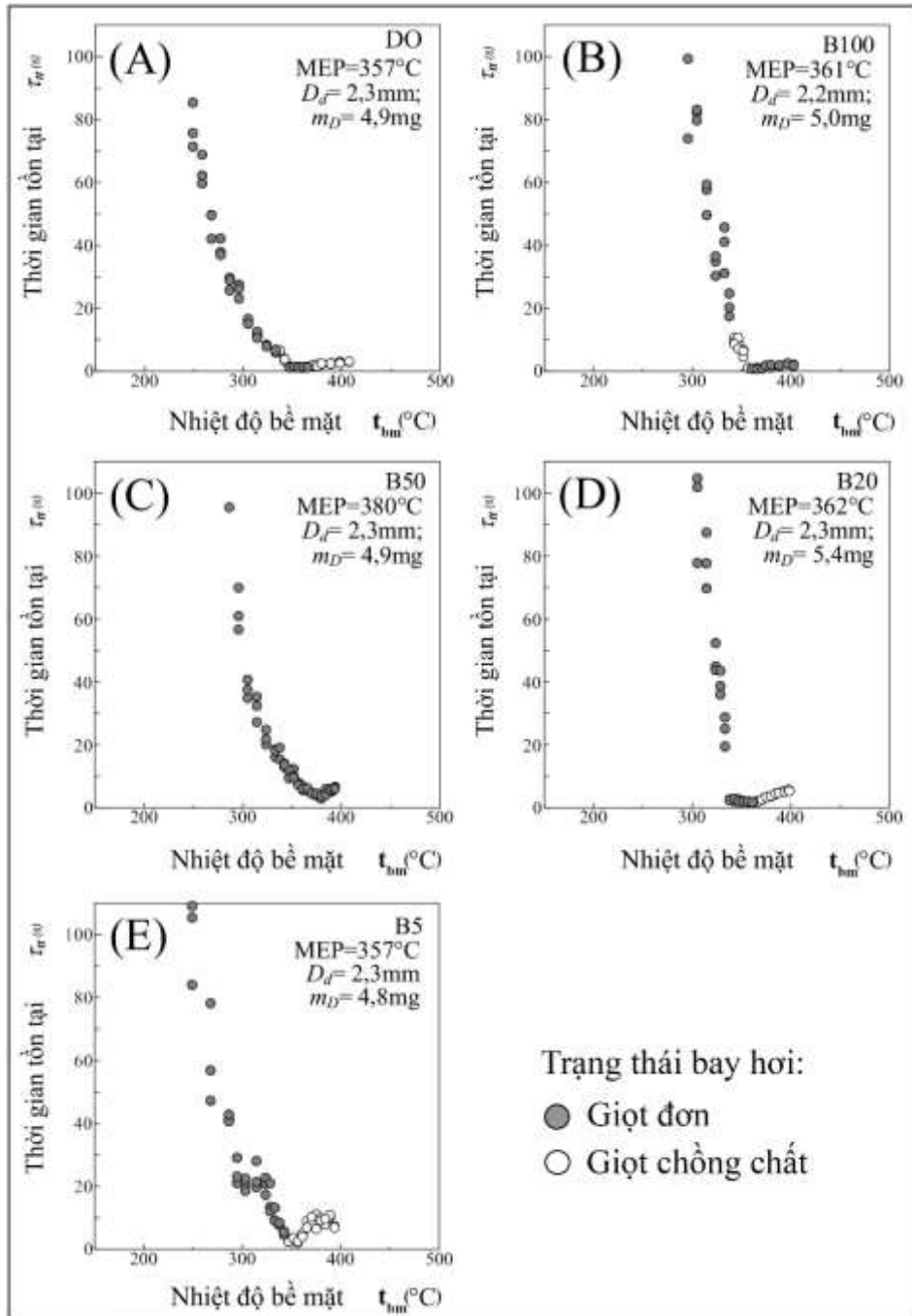


Hình 4.3. Đặc tính bay hơi nhiên liệu diesel DO

4.1.2.2. Đặc tính bay hơi của nhiên liệu diesel và diesel sinh học

Đặc điểm bay hơi trên bề mặt vách cho tất cả các loại nhiên liệu tham gia thử nghiệm đánh giá ảnh hưởng của thành phần nhiên liệu đến sự hình thành cặn được thể hiện trong Hình 4.4. Khoảng thời gian giọt nhiên liệu bay hơi, thời điểm đạt tốc độ bay hơi tối đa (MEP) và trạng thái bay hơi của các loại nhiên liệu là các yếu tố chính được tập trung mô tả trong TNBH.

Tốc độ bay hơi tối đa (MEP) liên quan đến nhiệt độ của vách mà giọt nhiên liệu tương tác với trong thời gian ngắn nhất. Biểu tượng của giọt đơn (chấm tròn màu đen) (Hình 4.4.B1) biểu diễn trạng thái của các giọt nhiên liệu trong quá trình bay hơi khi nhiệt độ bề mặt vách nhỏ hơn MEP, khi đó diễn ra sự sôi mạnh và làm cấu trúc giọt lỏng bị phá vỡ thành các hạt nhỏ cùng với lớp màng mỏng trong cơ chế sôi có nhân. Bên cạnh đó, các giọt kép hay giọt chòng chất (chấm tròn trắng) (Hình 4.4.B2) trong quá trình bay hơi khi nhiệt độ bề mặt vượt quá MEP, khi đó quá trình phá vỡ và xé nhỏ các hạt va chạm với nhau diễn ra trong suốt quá trình chuyển đổi từ chế độ sôi sang hiệu ứng Ladenfost.



Hình 4.4. Đặc tính bay hơi của DO, B100, B50, B20 và B5

Hình 4.4.C và E cho thấy thời gian tồn tại của B50 và B5 tương tự như DO khi nhiệt độ bề mặt vách nằm trước vùng MEP. Tuy nhiên, đối với B50 khi nhiệt độ bề mặt vách cao hơn thì thời gian tồn tại giọt nhiên liệu lâu hơn do gần với nhiệt độ MEP hơn các nhiên liệu còn lại. Như vậy, B50 và B5 bị ảnh hưởng bởi các thành phần của DO hơn so với nhiên liệu không pha trộn B100.

Hình 4.4.D, B20 có các đặc tính bay hơi tương tự như B100 khi xét ở vùng nhiệt độ bề mặt vách trước MEP. Xu hướng trong hình cho thấy độ dốc rất mạnh ở vùng trước MEP chứng tỏ các thành phần của B100 tác động mạnh đến thời gian tồn tại của các

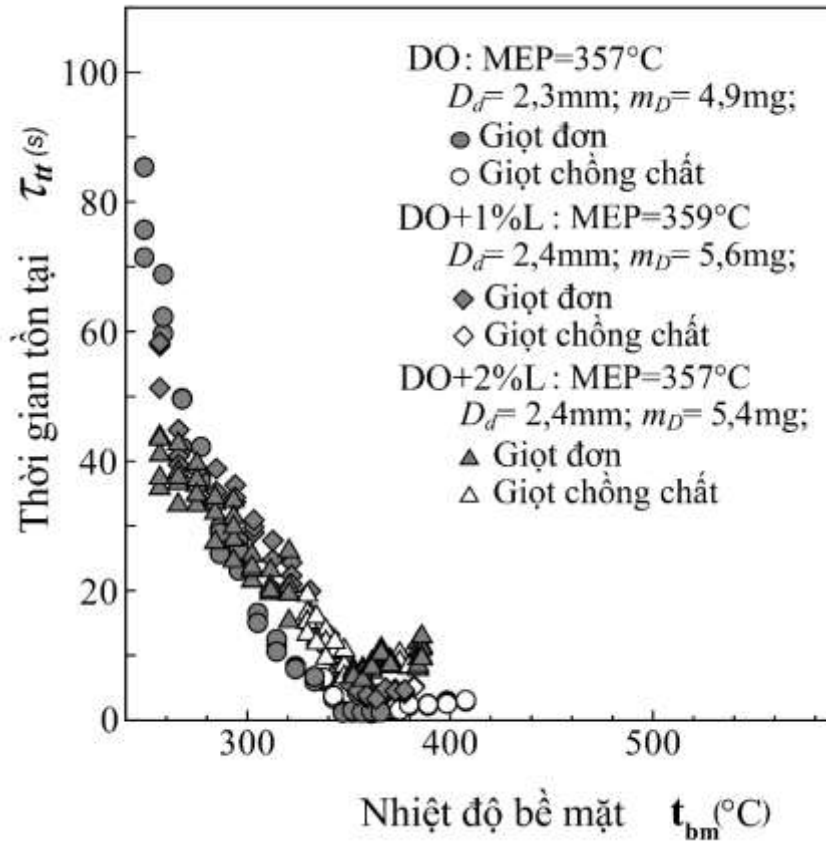
giọt B20 nhiều hơn các thành phần của DO. Thời gian bay hơi của B20 và B100 giảm nhanh hơn so với DO, B50 và B5 khi nhiệt độ bề mặt được tăng lên gần với MEP. Như vậy, đặc tính bay hơi của nhiên liệu B5, B20 và B50 khi xét ở nhiệt độ bề mặt vách thấp hơn nhiệt độ MEP mang cả đặc tính bay hơi của DO và B100.

Nhiệt độ MEP cho các loại nhiên liệu thử nghiệm và các điều kiện của thử nghiệm TNCMH được thể hiện trong Bảng 4.1. Nhiệt độ MEP cho DO là 357°C, cao hơn nhiệt độ điểm sôi cuối của DO (350°C). Với B100, MEP của nó là 361°C, cao hơn so với nhiệt độ T90 của B100. Với B50, được kỳ vọng có MEP nằm giữa giá trị MEP của B100 (361°C) và B20 (362°C). Tuy nhiên nhiệt độ MEP của B50 là cao nhất (380°C) với thời gian bay hơi của B50 cũng là lâu nhất. Nguyên nhân có thể một số tính chất của B50 đã thay đổi chút ít do quá trình tự oxi hóa ở điều kiện khí quyển trong quá trình lưu trữ, điều mà đã không được kiểm soát trong nghiên cứu này.

4.1.2.3. Đặc tính bay hơi của nhiên liệu có pha trộn dầu bôi trơn

Để đánh giá được sự khác biệt về đặc tính bay hơi của các nhiên liệu DO, DO+1% L và DO+2%L và làm cơ sở để giải thích các ảnh hưởng của thời gian tồn tại và bay hơi của các giọt nhiên liệu đến sự hình thành cặn, TNBH đã được tiến hành với các nhiên liệu đó. Hình 4.5 thể hiện các đặc tính bay hơi của DO, DO+1%L và DO+2%L.

Kết quả thực nghiệm cho thấy tất cả các loại nhiên liệu thử nghiệm có quãng thời gian tồn tại là như nhau khi nhiệt độ bề mặt vách nhỏ hơn $t_{bm} = 280^{\circ}\text{C}$. Tuy nhiên, khi nhiệt độ bề mặt vách tăng và lớn hơn $t_{bm} = 280^{\circ}\text{C}$, nhiệt độ thứ cấp thấp (chênh lệch nhiệt độ bề mặt vách và MEP), thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu DO+1%L và DO+2%L dài hơn giọt nhiên liệu DO.



Hình 4.5. Đặc tính bay hơi của DO, DO+1%L và DO+2%L

DO+2%L có thời gian tồn tại giọt nhiên liệu lâu nhất tại vùng nhiệt độ MEP, tiếp theo là DO+1%L và DO với thời gian bay hơi hoàn toàn lần lượt tại giây thứ 7, thứ 4 và thứ nhất. Điều này có thể là do sự hiện diện của dầu bôi trơn làm tăng mật độ và độ nhớt của DO+2%L và DO+1%L so với DO. Bên cạnh đó từ kết quả thực nghiệm này, các xu hướng tạo cặn ban đầu có thể được dự đoán cho các thử nghiệm tạo cặn lắng, DO+2%L được kỳ vọng sẽ thu được lượng cặn nhiều nhất trong thử nghiệm tạo cặn trên mô hình bề mặt vách, tiếp theo là DO+1%L và DO.

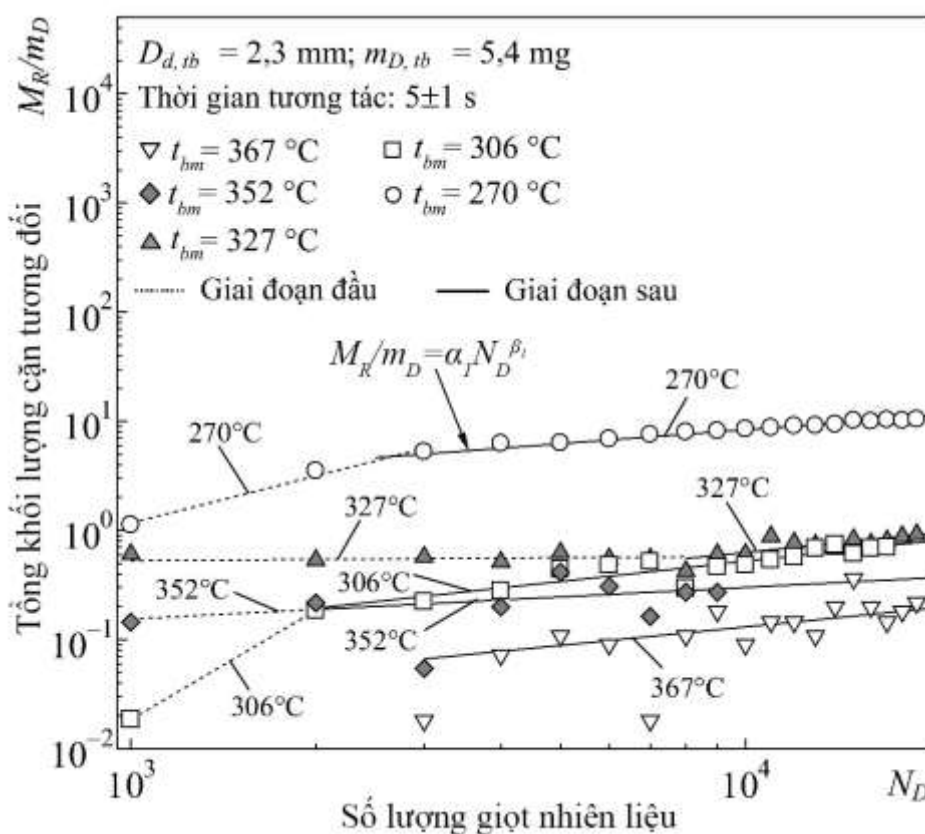
4.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ vách buồng cháy đến sự hình thành và phát triển cặn lắng

Mục tiêu chính của nghiên cứu thực nghiệm này là nghiên cứu tác động của nhiệt độ bề mặt vách buồng cháy đến sự hình thành cặn khi dùng nhiên liệu diesel thông qua mô hình TNCMH. Qua nghiên cứu này nhằm xác lập mối tương quan giữa lượng cặn lắng hình thành trên bề mặt vách khi các giọt nhiên liệu liên tục va chạm với bề mặt vách có nhiệt độ thay đổi (270°C, 306°C, 327°C, 352°C và 357°C). Nhiên liệu trong thử nghiệm này là dầu Dodecane (DDC) và dầu diesel (DO) theo TCVN 5689:2005, đặc tính của các nhiên liệu được trình bày trong các Bảng PL3 và Bảng PL1. Khoảng

thời gian va chạm của giọt nhiên liệu với bề mặt vách là 5 giây, tổng số lượng giọt nhiên liệu trong thử nghiệm ở một mức nhiệt là 19000 giọt. Cứ sau mỗi 1000 giọt lượng cặn hình thành sẽ được thu gom và cân đo, hình ảnh cặn được chụp lại; mẫu cặn được phân tích cấu trúc bằng kính hiển vi điện tử quét. Đồng thời nhiệt độ bề mặt cặn và bề mặt vách được ghi lại liên tục bằng nhiệt kế hồng ngoại và cặp nhiệt ngẫu để đánh giá tính chất của cặn. Ngoài ra, từ nghiên cứu này, các vùng nhiệt độ có sự hình thành cặn nhiều hay ít cũng được xác định. Điều này giúp làm rõ các biến động phức tạp trong quá trình tạo cặn lắng trong động cơ thực.

4.2.1. Khối lượng cặn lắng tích lũy

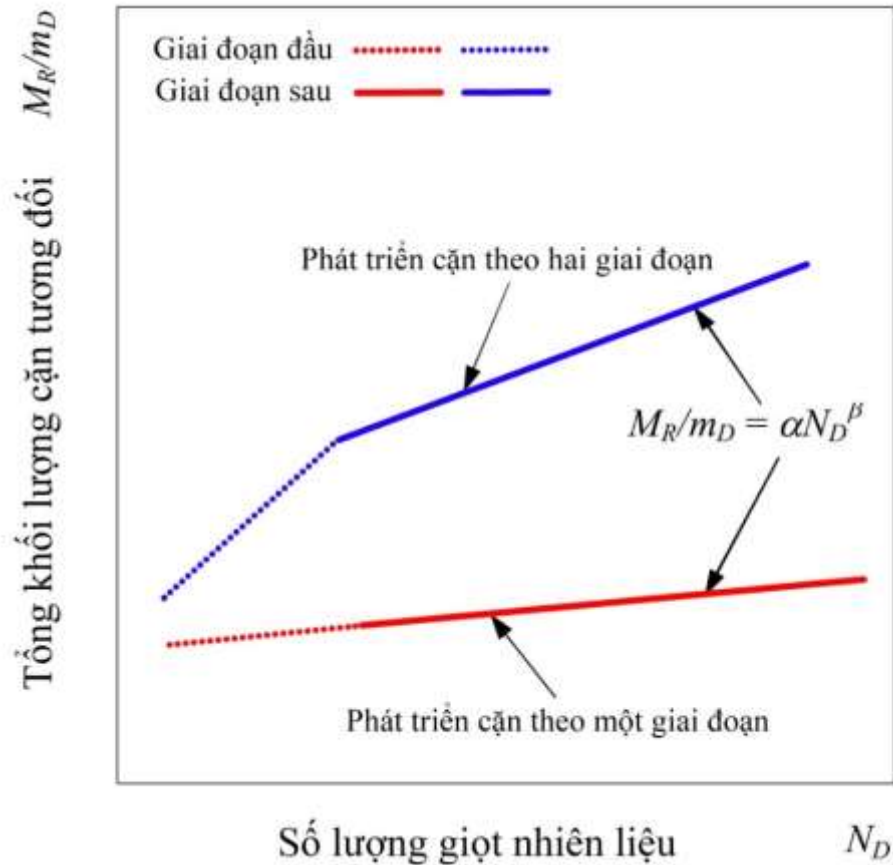
Hình 4.6, khi số giọt thấp hơn 1000 giọt, chưa có cơ sở để kết luận ở nhiệt độ bề mặt cao hơn thì lượng cặn hình thành ít hơn. Bên cạnh đó, khi số giọt nhỏ hơn 3000 giọt, không thu được dữ liệu về lượng cặn tạo ra ở mức nhiệt độ 367°C.



Hình 4.6. Phát triển cặn DO ở nhiệt độ bề mặt vách khác nhau

Khi tần suất tăng, nhiệt độ bề mặt cao hơn có xu hướng tạo cặn ít hơn so với bề mặt nhiệt độ thấp. Ở 19000 giọt, $t_{bm} = 270^\circ\text{C}$, lượng cặn tích lũy là $M_R = 54,8\text{mg}$, cao gấp 45 lần so với lượng cặn tích lũy ở $t_{bm} = 367^\circ\text{C}$ với $M_R = 1,2\text{mg}$. Ở 9000 giọt, $t_{bm} = 327^\circ\text{C}$ (thấp hơn 30°C so với MEP), $M_R = 3,3\text{mg}$. Khi $t_{bm} = 352^\circ\text{C}$ (thấp hơn 5°C so với nhiệt độ MEP), $M_R = 1,5\text{mg}$, giảm 55%. Khi $t_{bm} = 367^\circ\text{C}$ (cao hơn nhiệt độ MEP 10°C)

$M_R = 1,0\text{mg}$, ít hơn 70% so với 327°C . Ban đầu, khi số giọt nhiên liệu nhỏ hơn 1000 giọt, lượng cặn tích tụ nhỏ hơn lượng cặn ở các điều kiện tại 327°C và 352°C sẽ hình thành. Sau đó, với khi số lượng giọt tương tác lớn hơn 1000 giọt, nhiệt độ bề mặt ở 270°C cho lượng cặn lớn nhất và tiếp theo sau là lượng cặn ở nhiệt độ bề mặt ở 327°C , 352°C , 367°C và 306°C .



Hình 4.7. Các dạng phát triển của cặn

Từ Hình 4.6 và 4.7, cho thấy rằng có hai dạng phát triển của cặn lắng: dạng có 2 giai đoạn phát triển và dạng có 1 giai đoạn phát triển. Khi nhiệt độ bề mặt là 270°C , 306°C và 327°C (thấp hơn nhiệt độ MEP), quá trình phát triển cặn gồm hai giai đoạn là giai đoạn ban đầu (đường chấm) và giai đoạn sau (đường liền). Tuy nhiên, trong điều kiện 352°C và 367°C (rất gần nhiệt độ MEP), cặn chỉ phát triển theo 1 giai đoạn duy nhất.

Dạng phát triển một giai đoạn

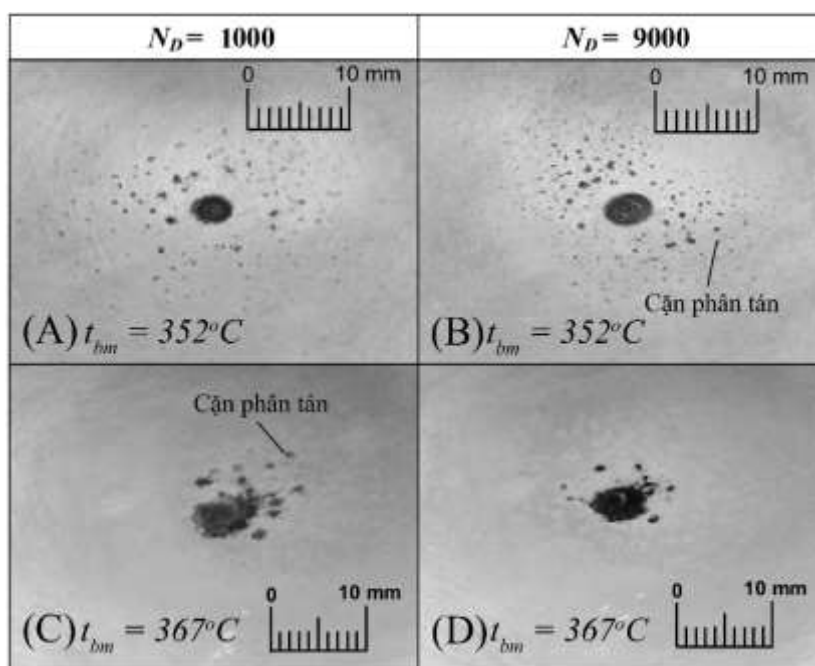
Tại các nhiệt độ bề mặt là 352°C và 367°C , dạng phát triển cặn một giai đoạn chiếm ưu thế tuyệt đối. Các yếu tố như: nhiệt độ thứ cấp (độ chênh nhiệt độ bề mặt vách và nhiệt độ MEP) nhỏ, sự tồn tại ngắn của giọt nhiên liệu (khoảng một giây) và điều

kiện không chòng chắt ($\tau_{tt} < \tau_{vc}$) đạt được ở giai đoạn ban đầu đã dẫn đến tình trạng cạn khô, khiến toàn bộ thành phần khó bay hơi còn lại trên bề mặt vách biến hoàn toàn thành cạn khô.

Dạng phát triển cạn theo hai giai đoạn

Khi nhiệt độ mặt vách thấp hơn nhiệt độ MEP (ở 270°C, 306°C và 327°C) các tương tác của giọt nhiên liệu với bề mặt vách đều nằm trong chế độ sôi truyền nhiệt có nhân do nhiệt độ làm lạnh lớn.

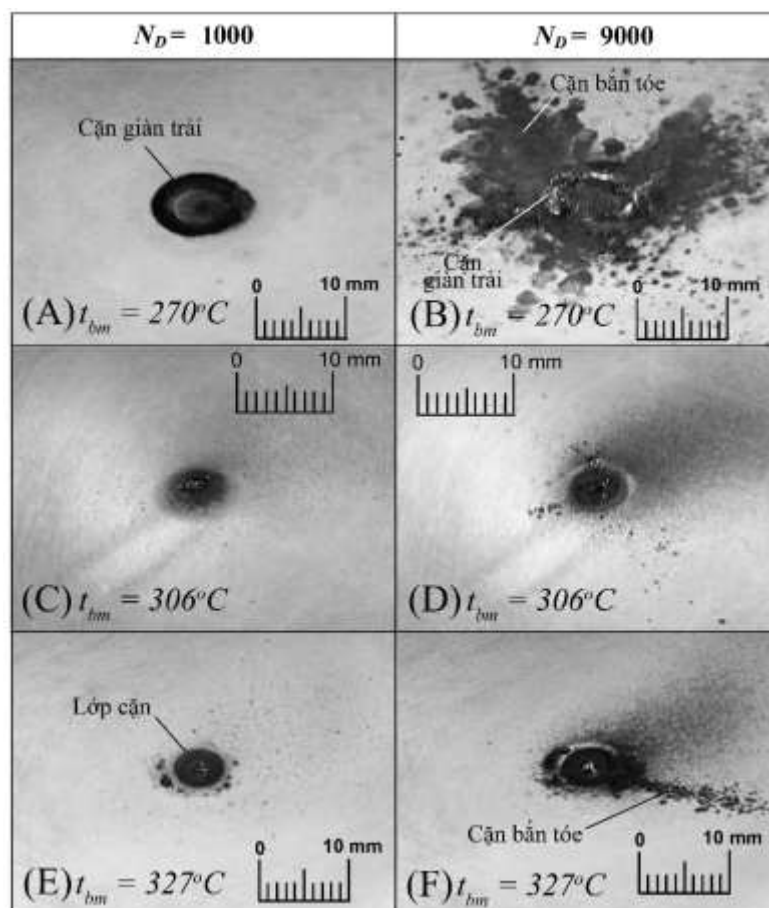
Từ Hình 4.6 cho thấy mặc dù lượng cạn tích tụ thu được ở 270°C là cao nhất nhưng tốc độ phát triển cạn ở giai đoạn sau thấp hơn so với mức nhiệt 306°C. Như vậy ở mức độ nhiệt độ thấp hơn (270°C) tốc độ hình thành các tiền tố cạn chậm mặc dù lượng cạn lắng hình thành lớn hơn do nhiên liệu không bay hơi trong giai đoạn ban đầu. Các giọt nhiên liệu tiếp theo liên tục va chạm với cạn đã hình thành, khi đó các tiền tố cạn lan rộng ra xung quanh điểm va chạm như Hình 4.9 (A và B). Sự hình thành lớp cạn tiếp theo sẽ chậm hơn do các mảng cạn sau khi va chạm sẽ bị phân tách nhỏ nên dễ bị oxy hóa hơn.



Hình 4.8. Cạn nhiên liệu diesel tại 1000 và 9000 giọt có dạng phát triển theo 1 giai đoạn

Khi nhiệt độ bề mặt ở 306°C và 327°C, đặc tính hình thành cạn tương tự nhau ở giai đoạn đầu (Hình 4.9.C và E). Ở giai đoạn sau nhiều nhiên liệu khó bay hơi không vỡ vụn được quan sát thấy ở mức 306°C (Hình 4.9.D) so với mức 327°C (Hình 4.9.F). Tuy nhiên tốc độ phát triển cạn ở giai đoạn sau của mức 327°C tăng nên trong khi của mức 306°C giảm xuống.

Thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu ở 327°C là khoảng 7 giây. Ở giai đoạn ban đầu, do nhiệt độ bề mặt cặn cao hơn, quãng thời gian này ngắn hơn so với khoảng thời gian sau đó. Tuy nhiên, trong giai đoạn đầu của quá trình lắng đọng, thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu dài hơn, không bị chông chất và điều kiện cặn khô nên tốc độ hình thành tiền tố cặn chậm. Sau khi đạt 9000 giọt, tình trạng chông chất và điều kiện bề mặt ẩm dẫn đến có nhiều nhiên liệu khó bay hơi bị vỡ vụn như trên Hình 4.9.F và nó làm cho tốc độ tạo cặn lớn hơn.



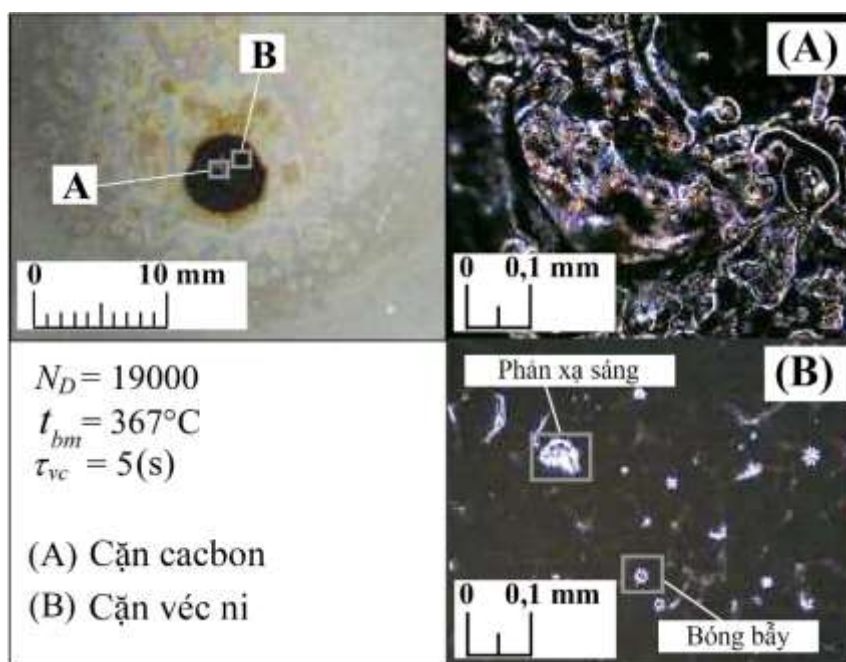
Hình 4.9. Cặn nhiên liệu diesel tại 1000 và 9000 giọt có dạng phát triển theo 2 giai đoạn

4.2.2. Cấu trúc của lớp cặn

Kết quả phân tích mẫu cặn bằng kính hiển vi điện tử cho thấy đặc điểm phân bố và cấu trúc bên trong của cặn lắng (Hình 4.10). Hình 4.10.A cho thấy cặn thu được có cấu trúc và hình dạng giống cacbon, nó được đặc trưng bởi màu đen tương tự như soot. Bên cạnh đó các sản phẩm của quá trình oxi hóa soot cũng được tìm thấy trong cặn, nó giống với soot.

Tuy nhiên, phần nhiên liệu khó bay hơi có chứa các chất không bị phân hủy và các hydrocarbon trong đó tham gia vào quá trình trùng hợp để hình thành các hợp chất

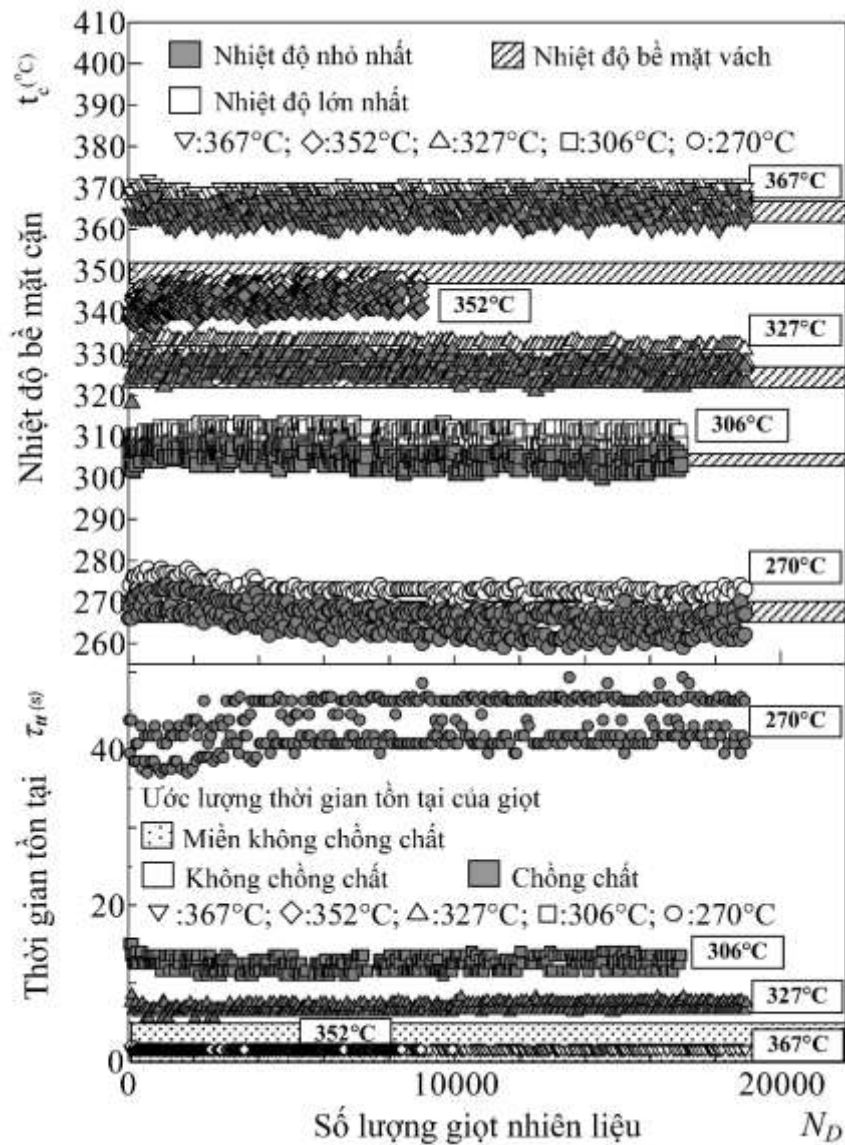
cao phân tử. Kết quả phân tích mẫu cặn cũng cho thấy có sự phản xạ ánh sáng trong Hình 4.10.B, điều này chứng tỏ trong cặn có chứa thành phần cặn giống vecni, trong đó bề mặt sáng bóng là hình ảnh của cặn polyme lỏng cao phân tử. Ngoài ra, bong bóng khí được thu trong hình ảnh phân tích đã cho thấy rằng cặn lỏng có bay hơi tại nhiệt độ cao.



Hình 4.10. Cấu trúc của cặn DO tại $t_{bm} = 367^{\circ}\text{C}$ với 19000 giọt

4.2.3. Nhiệt độ lớp cặn

Nhiệt độ bề mặt cặn và quãng thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu là hai yếu tố đóng vai trò rất quan trọng trong cơ chế hình thành cặn. Từ các dữ liệu thực nghiệm thu được, các biểu đồ về nhiệt độ cặn và thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu trong suốt quá trình thực nghiệm đã được lập ra trong Hình 4.11. Nhiệt độ bề mặt cặn (t_c) khác với nhiệt độ bề mặt vách (t_{bm}). Nhiệt độ tối thiểu ngay sau tương tác và tăng đến cực đại ngay trước lần tương tác tiếp theo. Quãng thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu trong mỗi lần tương tác được ước tính bằng nhiệt độ tối đa bề mặt cặn và quãng thời gian bay hơi.



Hình 4.11. Nhiệt độ bề mặt cặn và thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu

Tác dụng làm mát bằng nhiên liệu lỏng chiếm ưu thế ở giai đoạn đầu của quá trình lắng đọng, tạo cặn. Nó làm giảm nhiệt độ bề mặt của cặn. Các quá trình trùng hợp và oxi hóa diễn ra khi tần suất giọt nhiên liệu tăng lên. Trong quá trình oxi hóa, nhiệt được giải phóng dẫn đến nhiệt độ bề mặt cặn tăng lên. Sau khi cặn tích lũy, nhiệt độ bề mặt cặn giảm nhẹ do độ dẫn nhiệt của cặn thấp. Điều này được quan sát rõ ràng nhất ở giai đoạn sau của quá trình phát triển cặn khi thiết lập nhiệt độ ở 270°C. Nhiệt độ bề mặt cặn tối đa giảm ở giai đoạn sau của quá trình tạo cặn khi nhiệt độ bề mặt thấp hơn nhiệt độ MEP (270°C, 306°C và 327°C). Tuy nhiên, khi nhiệt độ bề mặt gần với nhiệt độ MEP (352°C và 367°C), nhiệt độ bề mặt cặn tối đa tăng do sự tỏa nhiệt từ các phản ứng oxi hóa.

Khi nhiệt độ bề mặt ở 270°C và 306°C, giọt nhiên liệu tồn tại lâu hơn khoảng thời gian va chạm. Do thời gian tồn tại của giọt dài, một số giọt nhiên liệu lỏng va chạm

trước đó vẫn ở thời điểm va chạm tiếp theo. Cứ như vậy sẽ hình thành điều kiện tương tác chồng chất và nó được duy trì trong suốt quá trình thử nghiệm. Tuy nhiên, khi nhiệt độ bề mặt đạt 327°C, quãng thời gian tồn tại ngắn lại gần bằng với thời gian tương tác. Do nhiệt độ bề mặt cận tối đa vượt quá mức nhiệt độ bề mặt vách, thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu giảm và trở nên ngắn hơn so với khoảng thời gian va chạm. Độ dày của lớp cận tăng lên ở giai đoạn sau (số giọt lớn hơn 10000 giọt), thời gian tồn tại giọt nhiên liệu cũng tăng lên và tình trạng chồng chất diễn ra đồng thời. Khi nhiệt độ bề mặt 352°C và 367°C, nhiệt độ bề mặt cận có xu hướng duy trì gần với nhiệt độ bề mặt vách, do đó thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu luôn ngắn hơn khoảng va chạm và tình trạng không chồng chất luôn được duy trì.

4.2.4. Hàm tỷ lệ tạo cận xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ vách buồng cháy

Kết quả phân tích dữ liệu và quy hoạch thực nghiệm bằng phương pháp hồi quy tuyến tính cho thấy khối lượng cận tương đối M_R/m_D tăng tuyến tính theo hàm logarit với số giọt nhiên liệu va chạm. Để mô tả quá trình phát triển cận của nhiên liệu trên bề mặt vách, mô hình hàm hồi quy phù hợp đã được lựa chọn tương tự công thức (3.4).

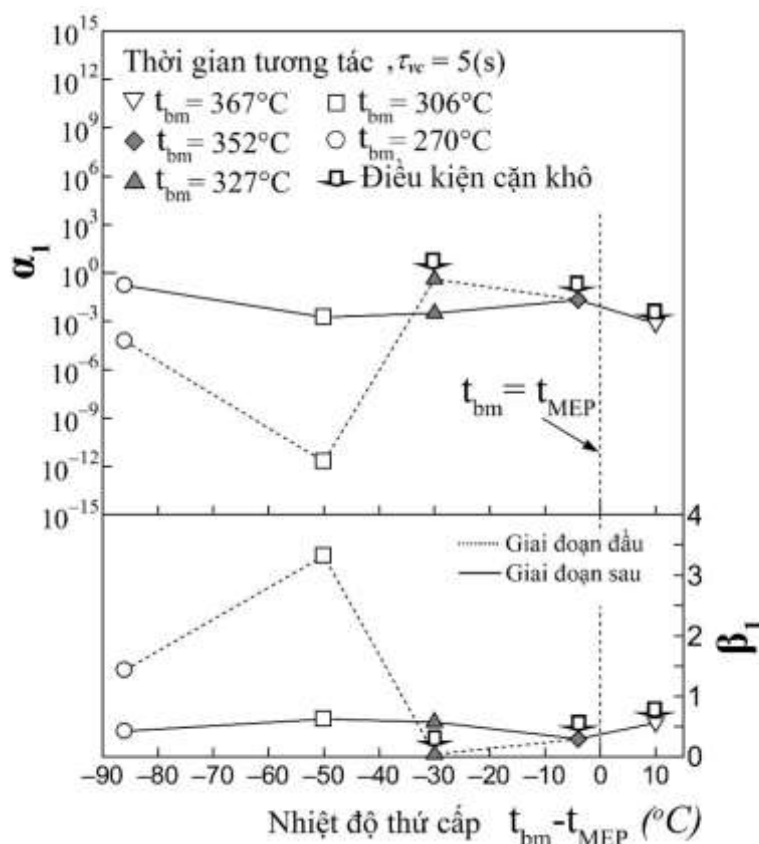
Các giá trị α_1 và β_1 cho từng giai đoạn phát triển cận được nêu trong Bảng 4.2. Các giá trị của α_1 và β_1 trong vùng màu xám của bảng cho thấy cận hình thành trong điều kiện không chồng chất và tình trạng bề mặt khô, với giá trị β_1 thấp ($\beta_1 < 0,60$) cho thấy sự phát triển cận chậm. Điều kiện không chồng chất tức là thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu ngắn hơn thời gian va chạm, còn điều kiện tạo cận khô nghĩa là nhiên liệu không bay hơi có thể biến đổi hoàn toàn thành cận khô.

Bảng 4.2. Hệ số α và β đối với nhiệt độ bề mặt vách khác nhau

Nhiệt độ bề mặt (°C)	α_{1bd}	β_{1bd}	α_{1s}	β_{1s}
$t_{bm} = 270$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	1,43	$1,7 \cdot 10^{-1}$	0,42
$t_{bm} = 306$	$2,0 \cdot 10^{-12}$	3,32	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,62
$t_{bm} = 327$	$4,1 \cdot 10^{-1}$	0,04	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,57
$t_{bm} = 352$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,29	$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,29
$t_{bm} = 367$	-	-	$7,5 \cdot 10^{-4}$	0,56
Điều kiện không chồng chất và khô				

Kết quả quy hoạch thực nghiệm cho thấy sự hình thành cận có mối tương quan chặt chẽ đến hệ số đánh giá sự phát triển cận β_1 , khi $\beta_1 < 0,7$ tốc độ hình thành cận chậm, trong khi đó sự hình thành cận nhanh khi $\beta_1 \geq 0,7$. Ở 270°C và 306°C, giá trị α_1 ở các giai đoạn ban đầu là rất nhỏ. Trên thực tế, lượng cận ở thời điểm ban đầu phụ thuộc vào trạng thái tương tác của giọt nhiên liệu với bề mặt vách. Tại cùng một nhiệt độ bề mặt, vị trí nào có diện tích tiếp xúc lớn giữa những giọt nhiên liệu và bề mặt vách sẽ có lượng cận lớn. Trạng thái tương tác của giọt nhiên liệu và tốc độ hình thành tiền tố cận

là các yếu tố chính làm cho hệ số α_1 rất nhỏ ở giai đoạn đầu. Đồng thời, nhiệt độ thấp khiến nhiều nhiên liệu bị lắng đọng lại nên tốc độ phát triển cặn β_1 cao ở giai đoạn đầu cao hơn.



Hình 4.12. Giá trị α và β tại những mức nhiệt độ thứ cấp khác nhau

Hình 4.12 cho thấy mối quan hệ tương quan của α_1 và β_1 với nhiệt độ thứ cấp. Ứng với mỗi cặp giá trị α_1 và β_1 sẽ xác định được xu hướng hình thành cặn lắng ở mỗi mức nhiệt bề mặt vách thông qua khối lượng cặn tương đối tích lũy trong TNCMH. Khi nhiệt độ bề mặt tăng lên, sự chênh lệch về giá trị α_1 và β_1 giữa giai đoạn đầu (đường nét đứt) và giai đoạn sau (đường nét liền) của quá trình phát triển cặn giảm. Khi nhiệt độ bề mặt là 327°C cho thấy một sự chuyển tiếp trong quá trình phát triển cặn. Phát triển cặn ở giai đoạn ban đầu tương tự như sự phát triển cặn ở nhiệt độ MEP với β_1 thấp. Tuy nhiên, ở giai đoạn sau, sự phát triển cặn thay đổi với β_1 lớn hơn. Sự phát triển của cặn ở nhiệt độ bề mặt 327°C giống với sự phát triển cặn ở giai đoạn sau với nhiệt độ bề mặt 306°C, với β_1 ở 306°C lớn hơn một chút so với ở mức nhiệt 327°C.

Ở 352°C và 367°C, cả hai điều kiện nhiệt độ có sự phát triển cặn thể hiện bởi một giá trị α_1 và β_1 duy nhất. Các giá trị α_1 và β_1 đó cho thấy cặn phát triển theo dạng 1 giai đoạn ở cả hai mức nhiệt độ bề mặt. Sự phát triển cặn chậm khi bề mặt gần với nhiệt độ MEP (352°C, 367°C và giai đoạn đầu của sự phát triển cặn ở nhiệt độ 327°C) do

điều kiện không chòng chát và bề mặt khô (được thể hiện bằng kí hiệu mũi tên như trong Hình 4.12).

Với số lượng giọt nhiên liệu tương tác cao hơn, tốc độ phát triển cặn β_1 chịu tác động của nhiệt độ bề mặt, khi nhiệt độ tăng lên thì tốc độ phát triển cặn giảm, do đó lượng cặn tích tụ nhỏ hơn. Ảnh hưởng của β_1 rõ ràng nhất ở nhiệt độ bề mặt 306°C và 327°C. Ở 2000 giọt, lượng cặn tích lũy ở 306°C là $M_R = 1,0\text{mg}$, ít hơn 66% so với 327°C mặc dù nhiệt độ bề mặt của 306°C thấp hơn. Tuy nhiên, ở giai đoạn sau của sự lắng đọng, do tốc độ phát triển cặn cao hơn ở 306°C ($\beta_1 = 0,62$) so với 327°C ($\beta_1 = 0,42$), trong khi số giọt tăng lên, sự khác biệt giữa lượng cặn tích lũy ở 306°C và 327°C cũng giảm. Ở 17000 giọt, số lượng cặn tích lũy ở 306°C là $M_R = 3,8\text{mg}$, ít hơn 14% so với cặn tích lũy ở 327°C. Khi số giọt rất lớn ($N_D \gg 19000$ giọt), ở 306°C lượng cặn được dự đoán là lớn hơn ở 327°C.

Tóm lại, thử nghiệm này tập trung vào đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ bề mặt vách đến sự hình thành và xu hướng phát triển của cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel thông qua mô hình thực nghiệm TNCMH. Trong đó nhiệt độ thứ cấp ($t_{bm} - t_{MEP}$) và trạng thái ướt/khô của bề mặt vách đối với sự tạo cặn của giọt nhiên liệu đã được nghiên cứu và đánh giá. Các kết quả chính của thử nghiệm là:

Nhiệt độ bề mặt vách trong mô hình thực nghiệm có ảnh hưởng lớn đến trạng thái tương tác của giọt nhiên liệu và bề mặt vách, thời gian bay hơi và trạng thái ướt/khô của bề mặt vách. Các tác động đó làm thay đổi tốc độ hình thành và phát triển của cặn lắng trên bề mặt vách.

Kết quả thực nghiệm cho thấy khối lượng cặn hình thành lớn hơn khi nhiệt độ bề mặt vách thấp hơn. Ở nhiệt độ 270°C khối lượng cặn tích lũy là lớn nhất, trong khi ở nhiệt độ 367°C lượng cặn thu được là nhỏ nhất.

Phân tích theo nhiệt độ bề mặt vách cho thấy có hai loại quá trình phát triển của cặn lắng: nếu nhiệt độ bề mặt vách thấp hơn nhiệt độ MEP thì quá trình phát triển cặn lắng theo 2 giai đoạn, trong khi nếu nhiệt độ đó cao hơn nhiệt độ MEP thì quá trình phát triển cặn lắng chỉ trải qua 1 giai đoạn.

Xu hướng hình thành cặn lắng trên bề mặt vách giảm khi nhiệt độ bề mặt vách càng gần nhiệt độ MEP, xu hướng này phù hợp với các kết quả đã công bố của các nghiên cứu [74][70].

4.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của thành phần nhiên liệu đến sự hình thành và phát triển cặn lắng

Mục tiêu của nghiên cứu là nghiên cứu quá trình hình thành cặn của nhiên liệu diesel, diesel sinh học và nhiên liệu pha trộn khi các giọt nhiên liệu đó tương tác với bề mặt vách của tấm nền hợp kim nhôm. Kết quả thu được từ các thử nghiệm sẽ được so sánh để đánh giá mức độ ảnh hưởng của thành phần nhiên liệu đến sự tạo và loại hình phát triển của cặn lắng trên bề mặt vách.

Các loại nhiên liệu thử nghiệm là nhiên liệu diesel (DO, Bảng PL1) nhiên liệu diesel sinh học B100 (Bảng PL4) chứa 100% metyl este dầu cọ (PME) và nhiên liệu pha trộn B100 (Bảng PL4) với DO với các tỷ lệ pha trộn khác nhau. Hỗn hợp nhiên liệu diesel sinh học được pha trộn nhiên liệu DO với 50%, 20% và 5% B100, được gọi là B50, B20 và B5 (Bảng PL5). Nhiệt độ bề mặt vách đã được thiết lập tại 306°C và 352°C với khoảng thời gian va chạm lần lượt là 3 giây, 5 giây và 8 giây; tổng số giọt nhiên liệu cho mỗi thử nghiệm là 19000 giọt.

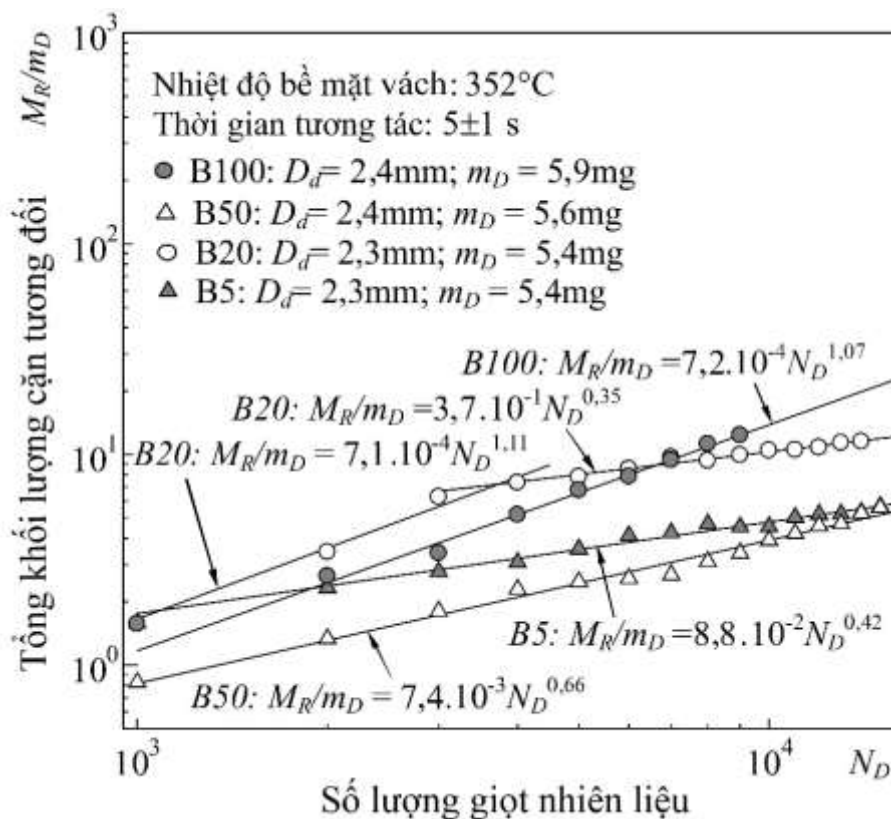
4.3.1. Khối lượng cặn tích lũy

4.3.1.1. Cặn lắng của B100, B50, B20 và B5

Hình 4.13 mô tả sự hình thành và phát triển cặn lắng của các nhiên liệu B100, B50, B20 và B5 khi thời gian tương tác là $\tau_{vc} = 5s$. Khối lượng cặn tích lũy của B100 là lớn nhất trong số các loại nhiên liệu thử nghiệm với số lượng cặn thu được sau 9000 giọt là $M_R = 73,3mg$, cao gấp 2 lần so với lượng cặn thu được từ nhiên liệu với tỷ lệ pha trộn thấp nhất (B5) là $M_R = 24,3mg$. Ở $t_{bm} = 352^\circ C$, đặc tính bay hơi của B100 khiến thời gian bay hơi trong giai đoạn đầu ($\tau_{tt} = 6s$) của nó dài hơn thời gian tương tác được thiết lập. Điều đó có nghĩa là trạng thái ướt của bề mặt vách được duy trì và gây ra sự tích tụ các chất tiền tố cặn có khối lượng phân tử cao trên bề mặt vách ở giai đoạn đầu của quá trình lắng đọng tạo cặn.

Kết quả trong Hình 4.13 cũng cho thấy cặn của B50 tích lũy ít hơn so với các nhiên liệu thử nghiệm khác mặc dù cùng duy trì trạng thái ướt của bề mặt vách trong giai đoạn đầu. Ở 9000 giọt, lượng cặn tích lũy cho B50 là $M_R = 18,9mg$, giá trị này là ít hơn 74% so với B100. Tuy nhiên xét trong thời gian dài, B50 tích lũy nhiều cặn hơn B20 và B5. Điều này đã được chứng minh bởi sự giảm khối lượng cặn khác nhau giữa B50 và B20, cũng như giữa B50 và B5. Ở 9000 giọt, sự khác biệt về cặn lên đến khoảng 64% và 22% khi ta so sánh B50 ($M_R = 18,9mg$) với B20 ($M_R = 53,1mg$) và B5 ($M_R = 24,3mg$). Tuy nhiên, khi số giọt tăng đến 14000 giọt, sự khác biệt trở nên nhỏ hơn và cặn thu được của B50 ($M_R = 29,2mg$) ít hơn 53% với so với B20 ($M_R = 61,7mg$) và nhiều hơn 2% so với B5 ($M_R = 28,5mg$). Tuy nhiên, do khối lượng một giọt nhiên liệu

của B5 thấp hơn so với B50 nên giá trị M_R/m_D cho B5 sẽ lớn hơn so với giá trị cho B50 nếu có cùng M_R . Lượng cặn tích lũy cho B50 sẽ vượt quá lượng cặn tích lũy của B20 và B5 khi số giọt tăng lên rất lớn ($N_D \gg 20000$ giọt) do tốc độ phát triển cặn của B50 lớn hơn B20.

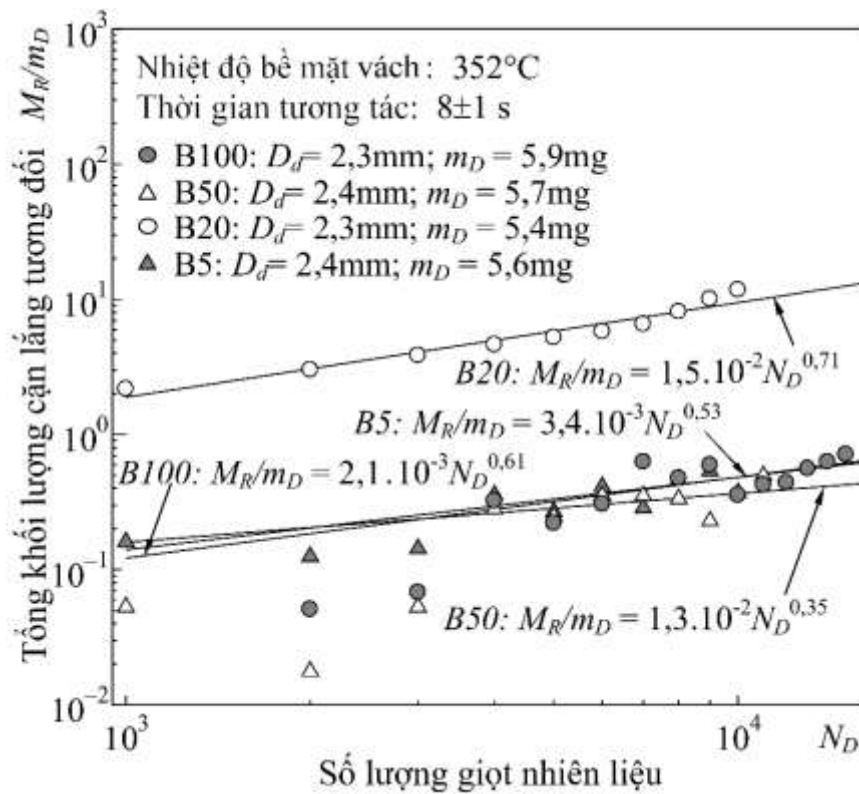


Hình 4.13. Phát triển cặn tại $\tau_{vc} = 5s$

Ở giai đoạn ban đầu, cặn B20 phát triển tương tự như B100, mặc dù số lượng cặn B20 tích tụ lớn hơn B100. Tuy nhiên, sau 4000 giọt, tốc độ phát triển cặn cho B20 là thấp hơn B100. Ở 9000 giọt, lượng cặn tích lũy cho B20 là $M_R = 53,1\text{mg}$, ít hơn so với lượng cặn thu được của B100 ($M_R = 73,3\text{mg}$) khoảng 28%. Khi xét đến thời gian bay hơi của B20, điều kiện khô rõ ràng được hình thành tại khu vực mà các chất tiền tố cặn có khối lượng phân tử lớn tích tụ trên bề mặt ở giai đoạn ban đầu. Tuy nhiên, tình trạng này đã không được duy trì trong giai đoạn sau của sự hình thành cặn. Ở giai đoạn sau của B20, điều kiện chùng chất và ẩm gây ra do giọt nhiên liệu vỡ vụn trong quá trình va chạm. Tốc độ phát triển cặn chậm ở giai đoạn này có thể do quá trình oxi hóa cặn vụn. Đối với B5, điều kiện khô được liên tục duy trì dẫn đến lượng cặn tích tụ ít hơn B20. B5 thu được lượng cặn tích tụ ít hơn 54% so với B20 ở 14000 giọt.

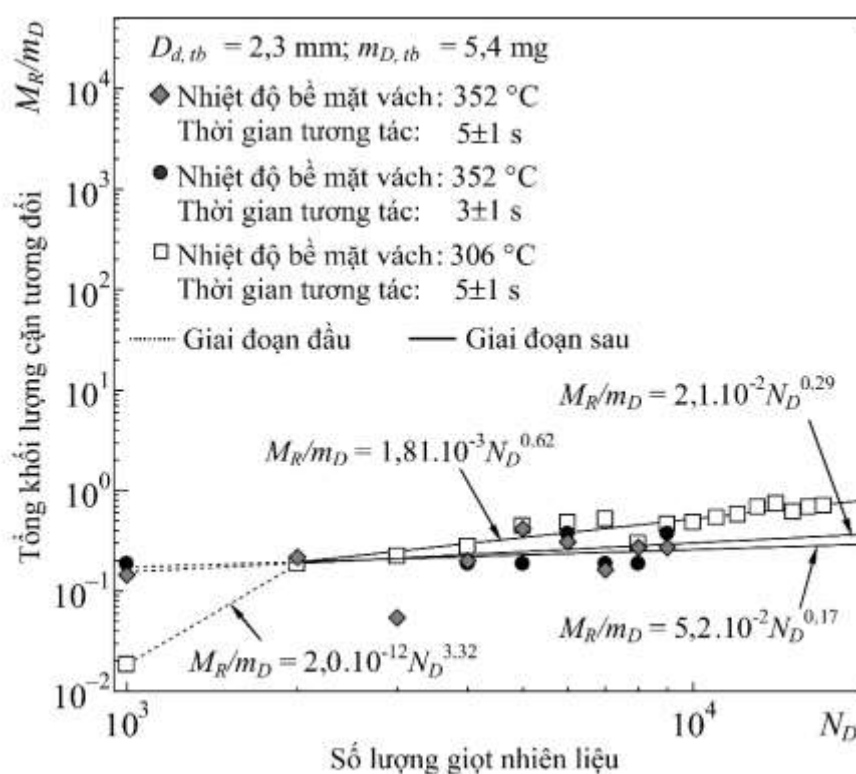
Hình 4.14 mô tả sự hình thành và phát triển cặn khi thời gian va chạm $\tau_{vc} = 8s$ cho thấy hầu hết các nhiên liệu thử nghiệm thu được lượng cặn tích lũy tương đối nhỏ trừ B20. Không có sự khác biệt rõ ràng giữa sự phát triển cặn của B100, B50 và B5.

Lượng cặn nhỏ hơn 5mg được tìm thấy ở thử nghiệm với tình trạng bề mặt khô đã được kỳ vọng sẽ chiếm ưu thế trong quá trình tạo cặn lắng. Đối với B20 lượng cặn tích lũy thu được tương đối lớn, ở 9000 giọt, lượng cặn tích lũy của B20 là $M_R = 54,6\text{mg}$, lớn hơn lượng cặn trung bình của B100, B50 và B5 ($M_R = 2,6\text{mg}$) khoảng 20 lần. Với thiết lập thời gian bay hơi ngắn hơn so với thời gian va chạm thì kết quả của B20 là rất bất ngờ. Từ kết quả B20, có thể thấy rằng sự hình thành cặn ở giai đoạn ban đầu là nguyên nhân chính dẫn đến kết quả này.



Hình 4.14. Phát triển cặn tại $\tau_{vc} = 8\text{s}$

4.3.2.2. Cạn lắng của nhiên liệu DO



Hình 4.15. Sự phát triển cạn DO ở nhiệt độ và khoảng thời gian va chạm khác nhau

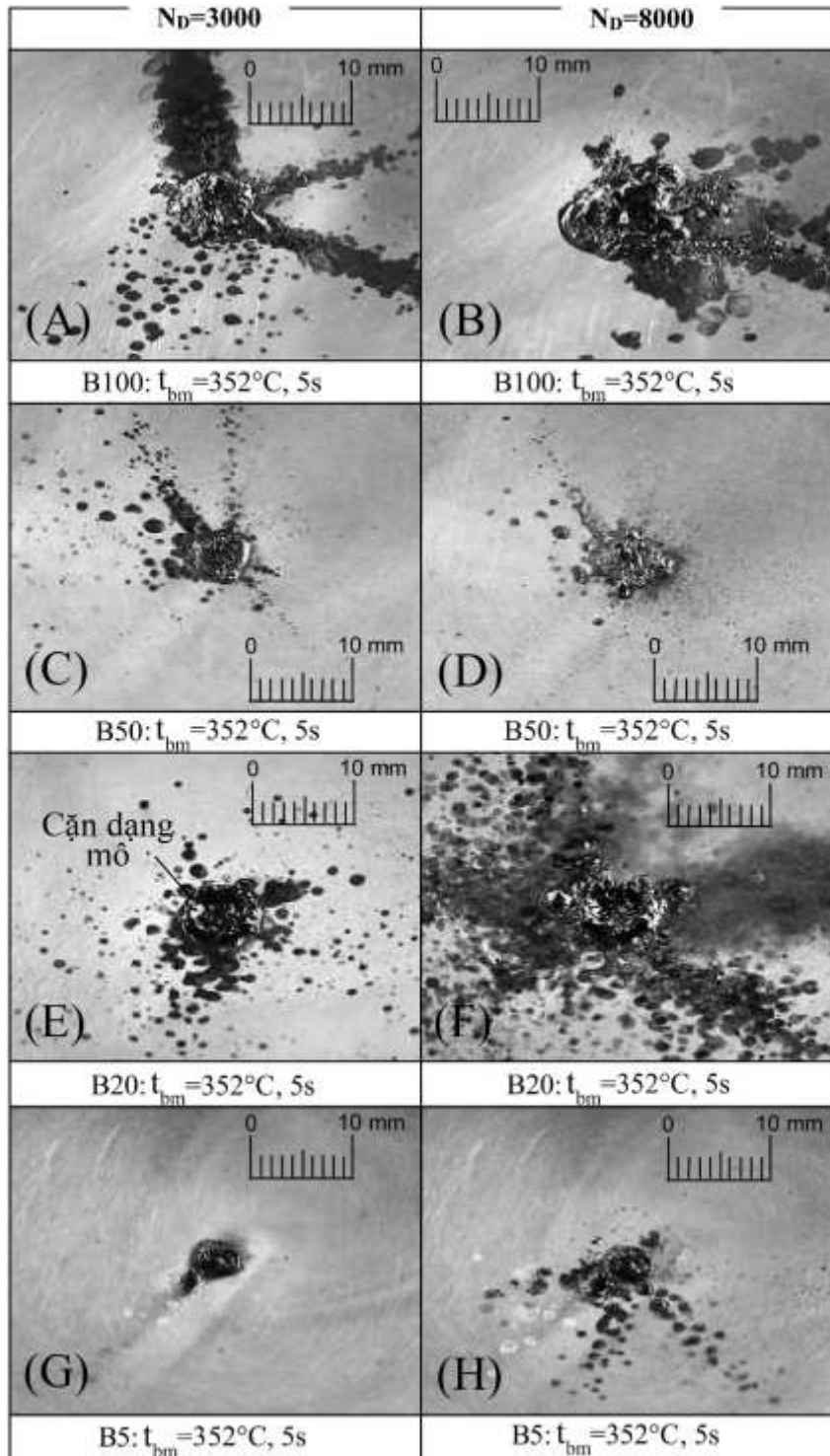
Các kết quả của cạn DO trong TNCMH khi nhiệt độ gần vùng MEP được thể hiện trong Hình 4.15. Ở 9000 giọt, lượng cạn tích lũy khi thời gian va chạm $\tau_{vc} = 3\text{s}$ là $M_R = 2,0\text{mg}$ tại $t_{bm} = 352^\circ\text{C}$ lớn hơn $0,5\text{mg}$ so với khi $\tau_{vc} = 5\text{s}$ ($M_R = 1,5\text{mg}$), có nghĩa là lượng cạn tăng hơn 33% khi khoảng thời gian va chạm rút ngắn còn 3 giây. Tuy nhiên, không có sự khác biệt rõ ràng giữa cạn phát triển với $\tau_{vc} = 3\text{s}$ và 5s tại $t_{bm} = 352^\circ\text{C}$. Trong các thử nghiệm, nhiệt độ của bề mặt vách dao động giữa 347°C và 352°C , nhưng biến động này không tác động đáng kể tới sự phát triển cạn vì quãng thời gian bay hơi gần như không đổi trong suốt thử nghiệm.

Tiếp theo, khi nhiệt độ bề mặt giảm xuống 306°C , thời gian va chạm ban đầu là 5s , nên duy trì trạng thái ướt trên bề mặt vách. Điều đó có nghĩa là nhiên liệu lỏng va chạm trước đó vẫn tồn tại khi va chạm tiếp theo xảy ra. Ở 9000 giọt, $\tau_{vc} = 5\text{s}$, lượng cạn tích lũy ở 306°C là $M_R = 2,5\text{mg}$, lớn hơn lượng cạn thu được ở 352°C là 1mg và tổng khối lượng cạn tích lũy thu được tại nhiệt độ bề mặt 306°C khi $\tau_{vc} = 3\text{s}$ nhiều hơn khoảng 66% cạn tích lũy khi $\tau_{vc} = 5\text{s}$ và $t_{bm} = 352^\circ\text{C}$. Điều này có nghĩa rằng lượng cạn tăng gấp đôi khi nhiệt độ bề mặt giảm đến 306°C và thời gian va chạm rút ngắn còn 3 giây. Sự phát triển cạn DO tại $t_{bm} = 306^\circ\text{C}$ với $\tau_{vc} = 5\text{s}$ nhanh hơn so với cạn tại $t_{bm} = 352^\circ\text{C}$ với $\tau_{vc} = 3\text{s}$ khi xét tới tốc độ phát triển của cạn (Hình 4.15).

4.3.2. Tính chất của lớp cặn

Từ các kết quả thực nghiệm cho thấy sự phát triển cặn của các loại nhiên liệu thử nghiệm chịu tác động của trạng thái ướt/khô ban đầu trên bề mặt vách và thành phần nhiên liệu, trong đó thành phần nhiên liệu đóng vai trò then chốt. Quá trình oxi hóa các thành phần nhiên liệu B100, B50, B20 và B5 là yếu tố thiết yếu trong việc tạo cặn. Nhiên liệu diesel sinh học có chứa một số tạp chất như glyxerin, mono- và di-glyxerat cũng như tri-glyxerat là các chất có thể trở thành tiền tố tạo cặn. Glyxerat bị oxi hóa luôn tồn tại trong nhiên liệu sinh học và sản sinh ra các hợp chất khác nhau của quá trình oxi hóa bao gồm các thành phần khó bay hơi và các hợp chất cao phân tử. Những hợp chất này có thể là tiền tố chính trong cặn của B100, B50, B20 và B5 như thể hiện trong Hình 4.16 và 4.17. Tuy nhiên, không chắc chắn rằng cặn sẽ tích lũy nhiều hơn nếu tăng thành phần nhiên liệu diesel sinh học trong nhiên liệu pha trộn. Đối với B50 $\tau_{vc} = 5s$ và B20 $\tau_{vc} = 8s$, không trường hợp nào cho thấy tác động rõ ràng về việc nhiên liệu diesel sinh học và trạng thái ướt/khô ban đầu của bề mặt vách sẽ tạo cặn nhiều hơn hoặc ít hơn.

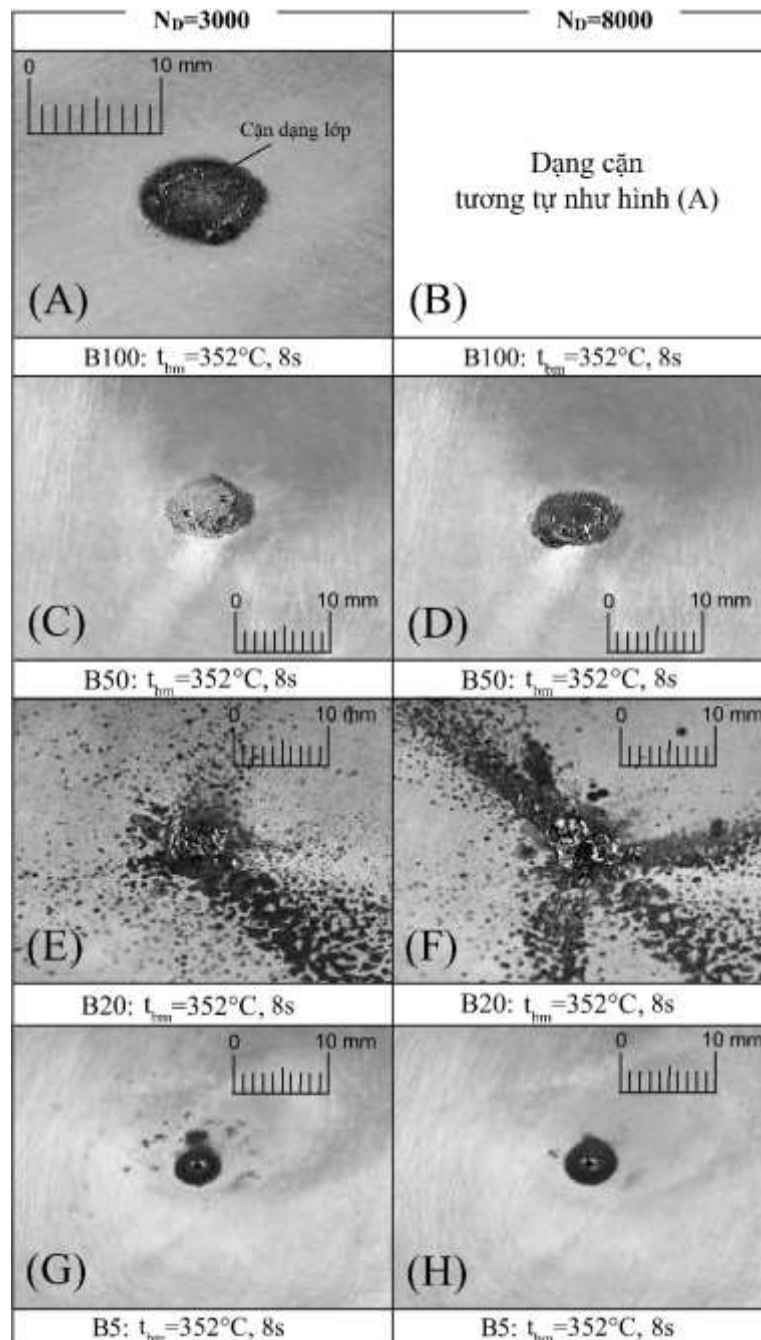
Cấu trúc của cặn cũng góp phần vào sự tạo cặn. Nó ảnh hưởng đến tính dẫn nhiệt và truyền nhiệt của cặn. Cặn có cấu trúc nhỏ gọn có thể có độ dẫn nhiệt cao hơn và khó tách hơn so với cấu trúc xốp. Tính chất nhiệt của cặn thay đổi nhiệt độ bề mặt cặn, tác động đến số lượng nhiên liệu khó bay hơi trong quá trình tạo cặn. Hơn nữa, việc phát triển cặn được kiểm soát bằng cấu trúc cặn, nó có thể làm thay đổi sự tạo cặn ở giai đoạn tiếp theo.



Hình 4.16. Cặn B100, B50, B20 và B5 tại 3000 và 8000 giọt với $\tau_{vc} = 5s$, $t_{bm}=325^\circ\text{C}$

Đặc tính của cặn được thể hiện trong Hình 4.16 ở 3000 giọt và 8000 giọt cho các nhiên liệu khác nhau khi $\tau_{vc} = 5s$. Nhìn chung, qua phân tích mẫu cặn, khi số lượng thành phần diesel sinh học ít hơn thì lượng cặn tích lũy sẽ giảm xuống.

Rõ ràng, những dấu vết mảnh vụn được quan sát thấy trong B100, B50, B20 và B5. Nó chỉ ra rằng có sự chông chát giữa quá trình bay hơi và quá trình va chạm do thời gian bay hơi mở rộng khi trạng thái ướt của bề mặt vách được duy trì.

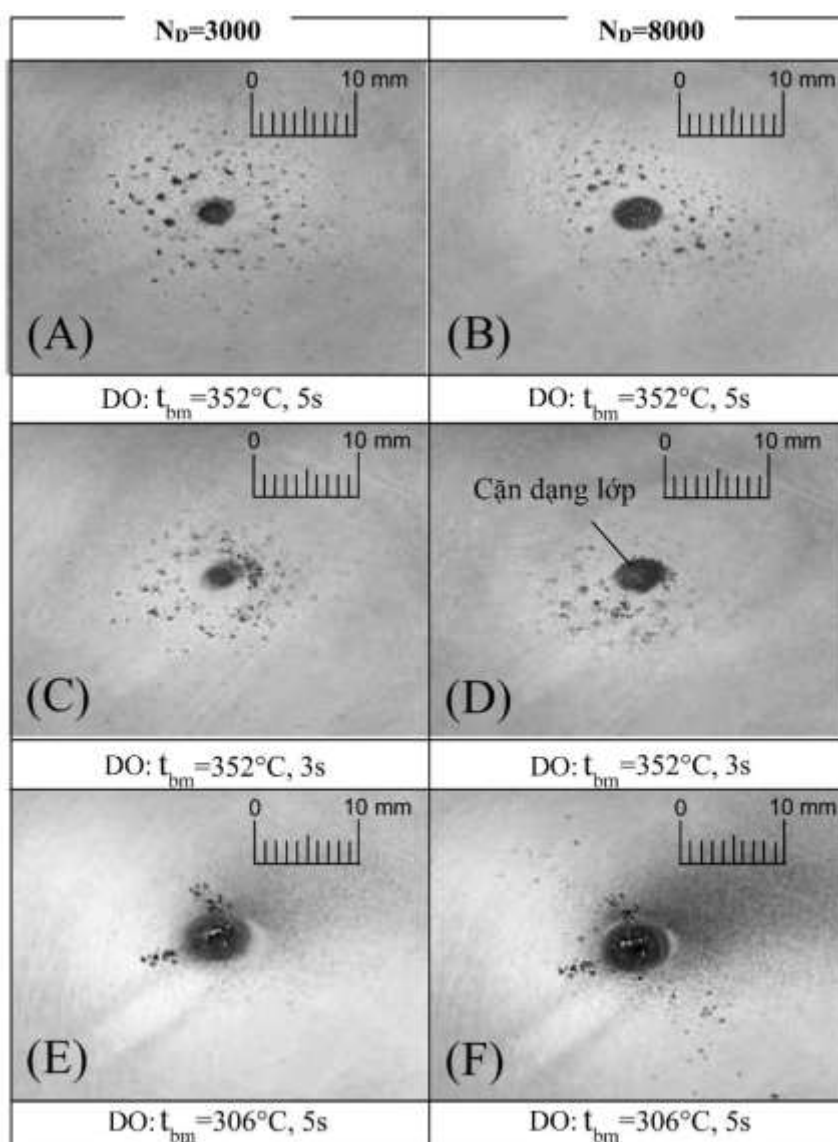


Hình 4.17. Cặn B100, B50, B20 và B5 tại 3000 và 8000 giọt với $\tau_{vc} = 8s$, $t_{bm}=352^{\circ}\text{C}$

Khi thời gian va chạm kéo dài từ $\tau_{vc} = 5s$ đến $\tau_{vc} = 8s$, các đặc tính của cặn thay đổi đáng kể như thể hiện trong Hình 4.17. Có hai loại cặn: loại cặn có hình dáng lớp hoặc mô với cấu trúc nhỏ gọn và xốp. Cặn tạo lớp xuất hiện ở các nhiên liệu thử nghiệm trừ B20. Sự khác biệt của lớp cặn là bán kính lớp cặn của chúng, nhiên liệu có ít diesel sinh học thì cặn có bán kính nhỏ hơn. Điều này có liên quan đến số lượng cặn tích lũy

ở giai đoạn đầu của sự tạo cặn. Cặn B5 khó tách ra hơn B100 và B50 vì cặn B5 có một lớp cặn đặc với tính dẫn nhiệt cao.

Hình ảnh lớp cặn DO trong Hình 4.18 có một cấu trúc rắn và khó tách hơn. Hơn nữa, cặn ít hơn do dư lượng cacbon và tạp chất nhỏ và không có thành phần glycerin. Nói cách khác các đặc tính của cặn B5 giải thích ở trên cũng tương tự như các đặc tính ban đầu của cặn DO thể hiện trong Hình 4.18.



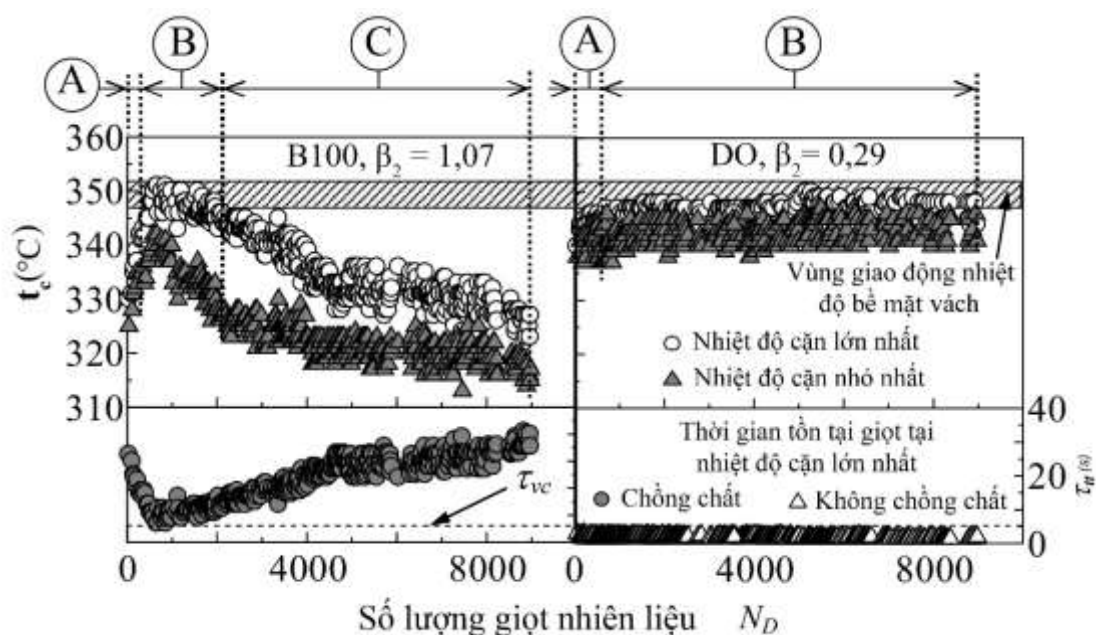
Hình 4.18. Cặn DO tại 3000 và 8000 giọt $\tau_{vc} = 5s$, $t_{bm}=306^\circ C$

4.3.3. Cơ chế hình thành cặn lắng

Nhiệt độ bề mặt cặn (t_c) và nhiệt độ bề mặt vách (t_{bm}) có độ chênh lệch nhất định. Trong nghiên cứu này, nhiệt độ bề mặt cặn tối thiểu được xét đến ngay khi giọt nhiên liệu xuất hiện và va chạm với bề mặt vách và tăng lên đến tối đa ngay trước khi va chạm tiếp theo diễn ra. Sự biến động của nhiệt độ bề mặt cặn được gây ra bởi tác động của hiệu ứng làm mát (A), quá trình oxi hóa bề mặt (B) và truyền nhiệt (C) trong quá trình

hình thành cặn. Sự chiếm ưu thế giữa chúng được biểu thị theo vùng A, B và C trong Hình 4.19. Trong suốt quá trình thử nghiệm thời gian bay hơi cũng được ước tính và được biểu diễn trong hình. Các kết quả thử nghiệm mô tả trong hình cho thấy sự phát triển cặn nhanh đối với B100 và phát triển chậm với DO.

Trong sự phát triển nhanh của cặn, nhiệt độ bề mặt cặn có xu hướng thấp hơn nhiệt độ bề mặt vách ở giai đoạn ban đầu của sự tạo cặn và thời gian bay hơi ban đầu của nó đảm bảo không xảy ra sự chông chất, điều này được thể hiện bởi các kết quả thu được trong Hình 4.19.



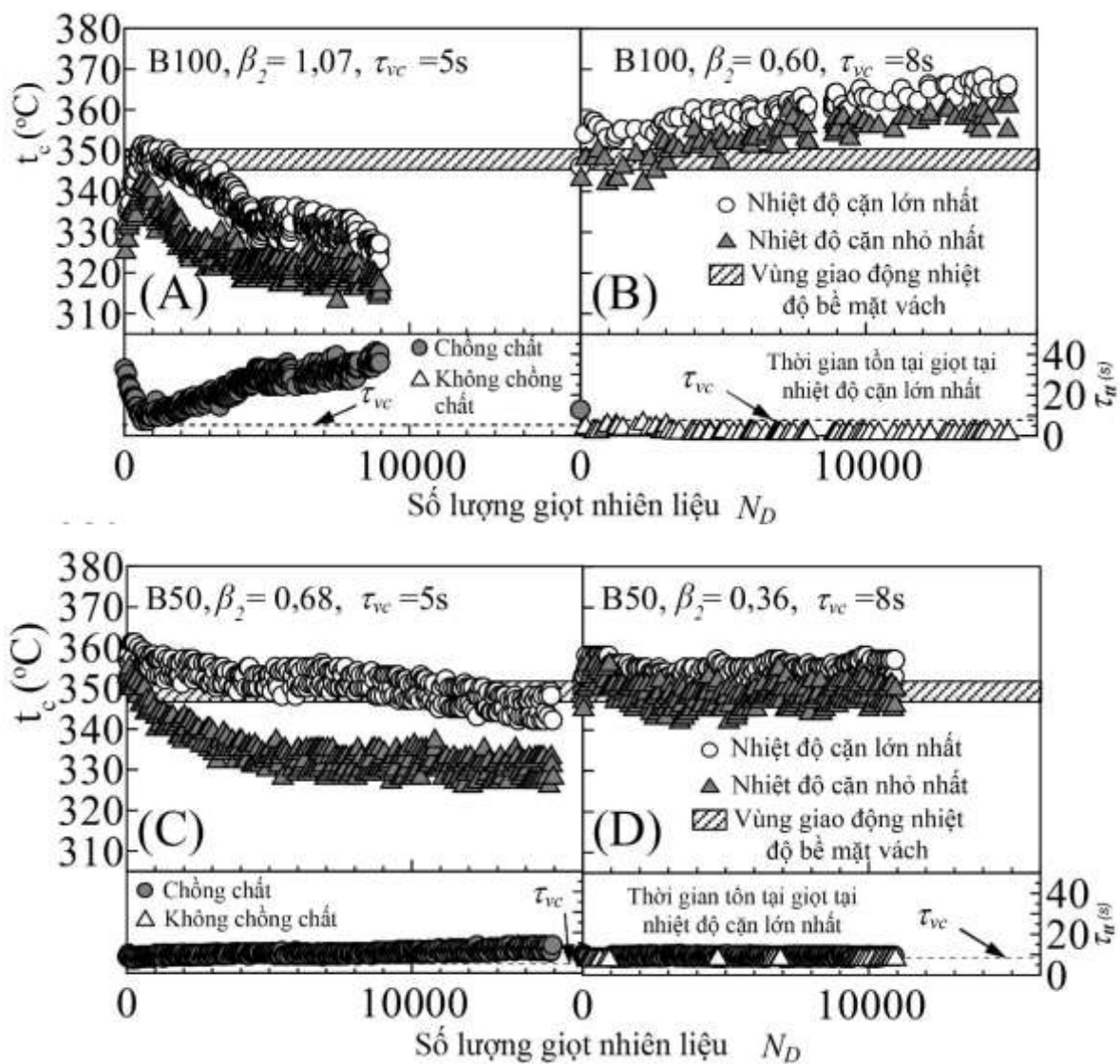
Hình 4.19. Nhiệt độ bề mặt cặn B100 và DO, thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu

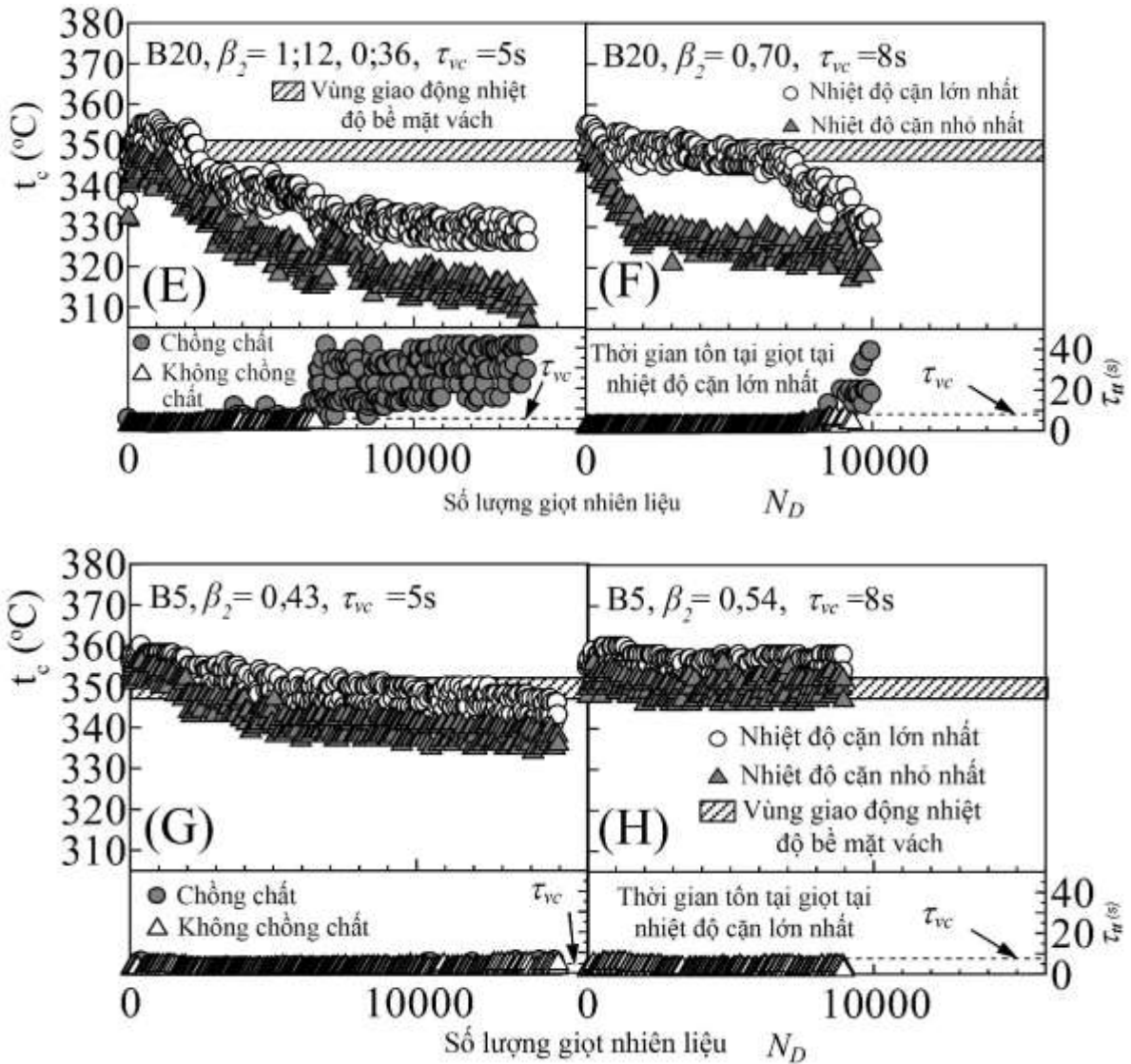
Đối với B100, hiệu ứng làm mát bằng nhiên liệu lỏng đã chiếm ưu thế ở đầu quá trình lắng đọng và giảm nhiệt độ bề mặt (B100-A). Sau đó, quá trình oxi hóa bề mặt diễn ra khi số giọt tăng (B100-B), nhiệt được tỏa ra và làm nhiệt độ bề mặt cặn tăng. Khi nhiều cặn tích lũy hơn (B100-C), nhiệt độ bề mặt cặn giảm do độ dẫn nhiệt của cặn thấp. Bên cạnh đó, độ dẫn nhiệt thấp có ảnh hưởng lớn hơn đến hiệu ứng oxi hóa. Khi thời gian bay hơi dài hơn thì tình trạng chông chất được quan sát thấy trong miền tạo cặn này.

Tuy nhiên, với DO, nhiệt độ bề mặt cặn chỉ giảm nhẹ (DO-A) và tăng trở lại (DO-B), nhiệt độ tối đa của nó nằm trong sự biến động nhiệt độ bề mặt vách. Điều kiện không chông chất được duy trì từ đầu đến cuối thử nghiệm tạo cặn. Do chỉ có ít lượng cặn tồn tại dưới dạng lớp, tác dụng làm mát ở giai đoạn đầu và quá trình oxi hóa bề mặt trong giai đoạn sau là những yếu tố chủ yếu tạo cặn. Khả năng dẫn nhiệt có ảnh hưởng rất nhỏ tới việc tạo cặn DO.

Trong khi điều kiện khô được duy trì, không có nhiên liệu dạng lỏng nào tích tụ trên bề mặt vào thời điểm khi nhiệt độ bề mặt cận tối đa được đo. Do đó, không có sự tác động của quá trình oxi hóa với nhiên liệu lỏng, nhưng quá trình oxi hóa của cặn có cacbon đã diễn ra ngay cả trong điều kiện khô.

Hình 4.20 cho thấy sự biến động nhiệt độ bề mặt cận và thời gian bay hơi ước tính của các nhiên liệu thử nghiệm. Nhiệt độ bề mặt cận và cấu trúc cặn có ảnh hưởng lớn đến sự bay hơi của các giọt nhiên liệu tương tác. Như thể hiện trong Hình 4.20.A và E, cả hai nhiệt độ tối đa và tối thiểu của bề mặt cận giảm xuống giá trị thấp hơn nhiệt độ bề mặt vách trong giai đoạn giữa và sau của quá trình tạo cặn.





Hình 4.20. Nhiệt độ bề mặt cận B100, B50, B20 và B5 với $\tau_{vc} = 5\text{s}$ và $\tau_{vc} = 8\text{s}$

Nhiệt độ bề mặt cận thấp hơn nhiệt độ bề mặt vách vì sự truyền nhiệt giảm đáng kể khi lượng cận lớn và tác dụng của nó lớn hơn nhiệt tỏa ra của sự oxy hóa chậm. Đối với B20 (Hình 4.20.E và F), mặc dù trong điều kiện không chồng chất ở giai đoạn đầu của sự tạo cận, cận vẫn phát triển nhanh chóng. Nguyên nhân có thể do tốc độ hình thành tiền tổ cận trong những điều kiện này lớn hơn so với tốc độ bay hơi. Nhiệt độ thấp hơn nhiều so với nhiệt độ bề mặt vách có thể tạo ra nhiều cận tích lũy. Nó dẫn đến sự kéo dài thời gian tồn tại và sự bay hơi trong điều kiện chồng chất của các giọt nhiên liệu ở giai đoạn giữa và sau quá trình tạo cận.

Khi $\tau_{vc} = 8\text{s}$, quá trình phát triển cận chậm, nhiệt độ bề mặt cận cao hơn nhiệt độ bề mặt vách khi số lượng giọt tăng lên. Điều này gây ra bởi quá trình oxy hóa cận chậm và cận có cấu trúc đặc. Sự gia tăng của nhiệt độ bề mặt cận dẫn đến khoảng thời gian

bay hơi ngắn và không duy trì điều kiện chồng chất như trong Hình 4.20.B, D và H, do đó ít cặn hình thành hơn.

Đối với B50 trong Hình 4.20.C và D, thời gian bay hơi giảm gần bằng với khoảng thời gian va chạm và gây ra hiện tượng biến động về tình trạng chồng chất. Tuy nhiên, trạng thái không chồng chất chiếm ưu thế hơn nên vẫn ít cặn hình thành hơn.

4.3.4. Hàm tỷ lệ tạo cặn xét đến ảnh hưởng của thành phần nhiên liệu

Các phương trình hồi quy với bộ số α_2 , β_2 và kết quả thực nghiệm mô tả trong các Hình 4.13, 4.14 và 4.15 khi xét tại các điều kiện thử nghiệm cùng với các loại nhiên liệu thử nghiệm khác nhau. Giá trị lớn hơn của hệ số α_2 chứng tỏ khối lượng cặn nhiều hơn được tạo ra trong giai đoạn đầu của thử nghiệm. Giá trị của α_2 bị ảnh hưởng nhiều bởi sự tương tác giọt với bề mặt vách và nhiệt độ tối đa của bề mặt vách. Nhiên liệu có khả năng hình thành cặn nhiều và thời gian tương tác của giọt nhiên liệu với bề mặt vách ngắn thì sẽ cho giá trị α_2 cao hơn. Hệ số β_2 đặc trưng cho tốc độ phát triển cặn lắng. Nếu $\beta_2 \geq 0,70$ thì cặn phát triển nhanh, nếu $\beta_2 < 0,70$ thì tốc độ phát triển cặn chậm.

Bảng 4.3 thể hiện giá trị của α_2 và β_2 thu được qua phân tích và tính toán hồi quy dữ liệu thực nghiệm của các loại nhiên liệu thử nghiệm. Không có giá trị ở dưới 1000 giọt do sự giới hạn về độ nhạy của thiết bị đo vi lượng.

Bảng 4.3. Giá trị α_2 và β_2

Nhiên liệu	Điều kiện thí nghiệm	N_D	α_2	β_2
B100	$\tau_{vc} = 5s, t_{bm} = 352^\circ C$	1000-9000	$7,1.10^{-4}$	1,07
	$\tau_{vc} = 8s, t_{bm} = 352^\circ C$	1000-15000	$2,0.10^{-3}$	0,60
B50	$\tau_{vc} = 5s, t_{bm} = 352^\circ C$	1000-15000	$7,5.10^{-3}$	0,68
	$\tau_{vc} = 8s, t_{bm} = 352^\circ C$	1000-11000	$1,3.10^{-2}$	0,36
B20	$\tau_{vc} = 5s, t_{bm} = 352^\circ C$	1000-4000	$7,2.10^{-4}$	1,12
		4000-14000	$3,8.10^{-1}$	0,36
	$\tau_{vc} = 8s, t_{bm} = 352^\circ C$	1000-10000	$1,5.10^{-2}$	0,70
B5	$\tau_{vc} = 5s, t_{bm} = 352^\circ C$	1000-15000	$8,7.10^{-2}$	0,43
	$\tau_{vc} = 8s, t_{bm} = 352^\circ C$	1000-9000	$3,5.10^{-3}$	0,54

Nhiên liệu	Điều kiện thí nghiệm	N_D	α_2	β_2
DO	$\tau_{vc} = 5s, t_{bm} = 352^\circ C$	1000-9000	$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,29
	$\tau_{vc} = 3s, t_{bm} = 352^\circ C$	1000-9000	$5,2 \cdot 10^{-2}$	0,17
	$\tau_{vc} = 5s, t_{bm} = 306^\circ C$	2000-17000	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,62

Ở giai đoạn ban đầu của sự hình thành cặn, với tỷ lệ pha trộn cao hơn có thể sẽ tạo ra nhiều cặn hơn. Tuy nhiên, ở giai đoạn sau, tỷ lệ pha trộn là một trong những yếu tố quyết định tốc độ phát triển cặn và tổng khối lượng cặn tích lũy. Từ những kết quả thu được ở trên, khi xét trong thời gian dài hay số giọt lớn, β_2 có vai trò quan trọng hơn và ảnh hưởng nhiều đến quá trình hình thành và phát triển cặn lắng nhiên liệu hơn so với α_2 . Trong động cơ thực, cặn lắng có thể bong ra khỏi bề mặt vách buồng cháy và lượng cặn mới sẽ một lần nữa phát triển. Điều quan trọng là phải có một giá trị α_2 và β_2 thấp ở giai đoạn đầu của sự tạo cặn. Tuy nhiên, đối với cặn khó bong ra trong quá trình hoạt động, hệ số β_2 đủ thấp sẽ ngăn chặn một lượng cặn lớn hình thành.

Tóm lại, các phân tích và đánh giá về sự hình thành và phát triển của cặn lắng của các nhiên liệu trong thử nghiệm TNCMH có thể rút ra một số kết luận sau:

Ở giai đoạn ban đầu của quá trình tạo cặn, nhiên liệu có tỉ lệ pha trộn diesel sinh học cao không chắc đã tạo ra nhiều cặn hơn. Lượng cặn tích lũy ở giai đoạn này chịu nhiều ảnh hưởng bởi cách thức tương tác của giọt nhiên liệu với bề mặt vách và trạng thái ướt/khô cũng như nhiệt độ của bề mặt vách. Đối với giai đoạn sau của quá trình tạo cặn, tỷ lệ pha trộn là một trong những yếu tố quyết định tốc độ phát triển cặn và tổng khối lượng cặn tích lũy.

Trạng thái ướt/khô trên bề mặt vách không phải là lý do chính cho sự phát triển nhanh của cặn nhưng có góp phần làm tăng lượng cặn tích lũy. Duy trì điều kiện khô sẽ làm giảm sự hình thành cặn trên bề mặt vách. TNCMH cho thấy hỗn hợp nhiên liệu diesel sinh học tạo cặn trên vách buồng cháy động cơ với trạng thái ướt trên bề mặt nhưng tốc độ phát triển cặn phụ thuộc vào tỷ lệ pha trộn.

Khi số giọt lớn, tỷ lệ pha trộn của nhiên liệu diesel sinh học lớn hơn sẽ tạo cặn với tốc độ cao hơn, điều này phù hợp với các kết quả nghiên cứu [40][70][103]. Trong động cơ thực, ngoài hiệu suất động cơ, tỷ lệ pha trộn nhiên liệu diesel sinh học nhiều hơn cũng sẽ gây ra các vấn đề như làm hư hại động cơ và tăng phát thải ra môi trường.

Như vậy, hỗn hợp nhiên liệu diesel sinh học tốt nhất là có tỷ lệ pha trộn thấp nhất. Trong nghiên cứu này, có lẽ B5 là tốt nhất vì cặn tích lũy ít dù cho số giọt lớn xét

trong cả TNCMH và động cơ thực. Do cặn tích lũy ít hơn, những vấn đề nêu trên có thể được giảm thiểu.

4.4. Nghiên cứu ảnh hưởng của lượng dầu bôi trơn trong buồng cháy đến sự hình thành và phát triển cặn lắng

Các nghiên cứu trên thế giới gần đây về cặn lắng trong buồng cháy đều đưa ra kết luận rằng dầu bôi trơn trong động cơ đặc biệt là dầu bôi trơn xilanh có tác động rất lớn đến sự hình thành và phát triển của cặn lắng buồng cháy [16, 23, 75]. Tuy nhiên các nghiên cứu trên thế giới hiện nay vẫn tập trung vào nghiên cứu trên động cơ thực, trong khi đó để nghiên cứu tác động của dầu bôi trơn đến sự hình thành và phát triển cặn lắng đòi hỏi thời gian thử nghiệm trực tiếp trên động cơ rất lớn (từ 500 giờ đến 1000 giờ hoạt động liên tục). Do đó để đơn giản và giảm chi phí, thời gian thực nghiệm trong nghiên cứu ảnh hưởng của dầu bôi trơn đến lượng cặn tích lũy và xu hướng phát triển của cặn lắng buồng cháy, sử dụng mô hình thực nghiệm TNCMH trong nghiên cứu vấn đề này là một hướng mới trong nghiên cứu. Đồng thời để đảm bảo tính khả thi của mô hình nghiên cứu thực nghiệm, dầu bôi trơn được pha trộn với nhiên liệu diesel theo các tỉ lệ khác nhau là DO+1%L và DO+2%L. Độ nhớt động học của hỗn hợp pha trộn được xác định theo công thức [8][103]:

$$v_{Tr\grave{o}n} = 79,62e^{-0,0346 X} \quad (4.1)$$

trong đó, $v_{Tr\grave{o}n}$ là độ nhớt động học của hỗn hợp DO, SAE 30 (Bảng PL3) và chất bôi trơn [mm^2/s], X là phần trăm của DO (Bảng PL1) trong hỗn hợp [%].

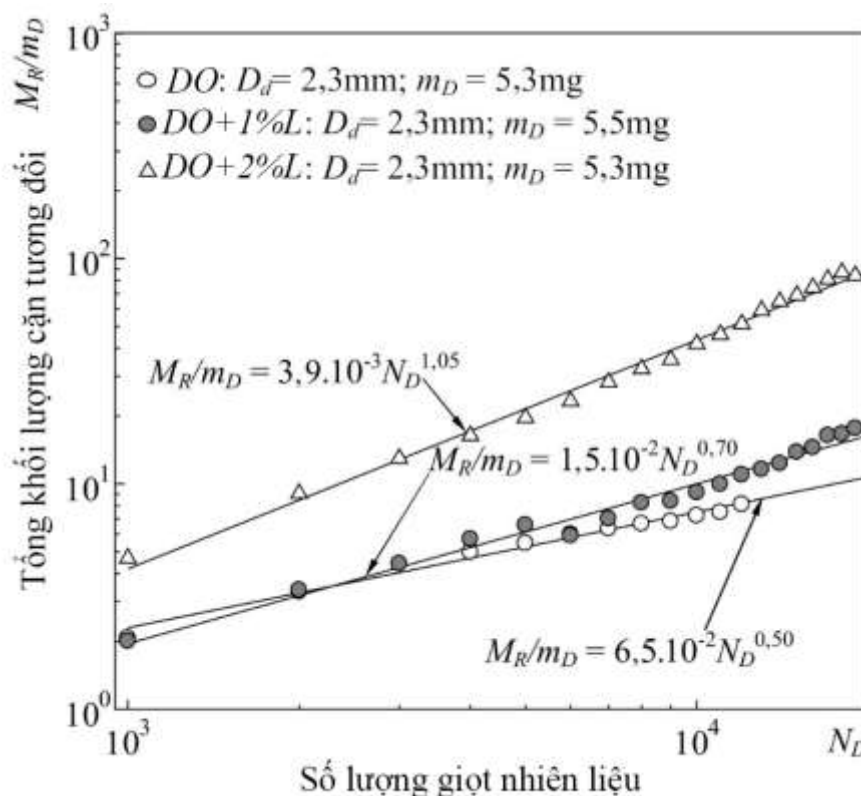
4.4.1. Khối lượng cặn tích lũy

Hình 4.21 mô tả các kết quả thực nghiệm trên mô hình TNCMH cho DO, DO+1% L và DO+2% L ở nhiệt độ bề mặt vách $t_{bm} = 270^\circ\text{C}$ với khoảng thời gian va chạm là 8 giây.

Kết quả cho thấy lượng cặn tương đối M_R/m_D cho tất cả các loại nhiên liệu thử nghiệm tăng tuyến tính với số lượng giọt nhiên liệu tương tác, đồng thời phụ thuộc vào tỉ lệ tăng lượng dầu bôi trơn hòa trộn với nhiên liệu DO.

Ở giai đoạn ban đầu ($N_D < 4000$ giọt), khối lượng cặn tích lũy của DO+1% L tương tự như của DO. Ở 1000 giọt, sự khác biệt giữa lượng cặn tích lũy cho DO+1% L ($M_R = 11,1\text{mg}$) và DO ($M_R = 10,9\text{mg}$) chỉ là 0,2 mg, lớn hơn xấp xỉ 2% hơn lượng cặn tích lũy khi dùng DO. Điều này được giải thích là trong giai đoạn đầu chiều dày lớp cặn rất mỏng nên nhiệt độ bề mặt cặn xấp xỉ nhiệt độ bề vách mặt kim loại nên tính cách nhiệt của cặn ảnh hưởng không lớn bằng ảnh hưởng của quá trình oxi hóa không hoàn

toàn. Tuy nhiên ở giai đoạn sau của quá trình tạo cặn lắng, khi số giọt tăng lên ($N_D > 4000$ giọt) thì khối lượng cặn tích lũy có xu hướng tăng rõ ràng.



Hình 4.21. Lượng cặn DO, DO+1%L, DO+2%L trong TNCMH

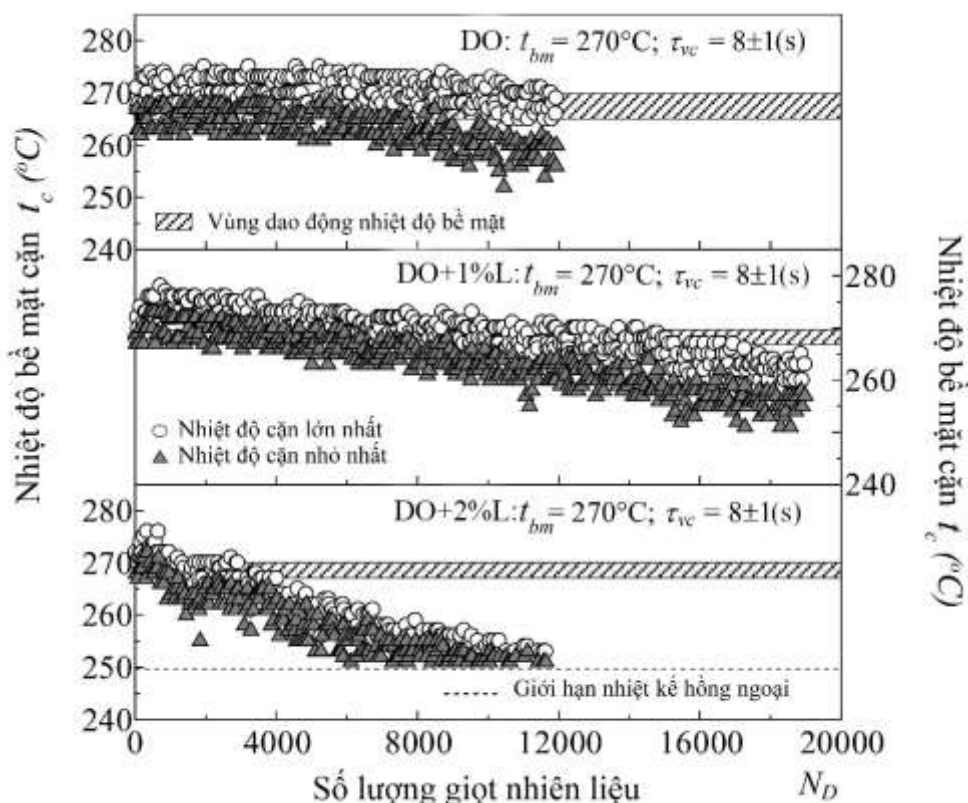
Ở 12000 giọt, lượng cặn tích lũy của DO+1% L là $M_R = 60,8\text{mg}$, nhiều hơn 40% so với DO ($M_R = 42,7\text{mg}$). Tiếp theo đó, ở giai đoạn sau 12000 giọt, lượng cặn thu được sau mỗi 1000 giọt của nhiên liệu DO+2%L là $M_R = 274,0\text{mg}$ nhiều hơn 4 lần so với lượng cặn của DO+1%L ($M_R = 60,8\text{mg}$). Như vậy khi số giọt nhiên liệu rất lớn ($N_D \gg 10000$ giọt), thì lượng cặn tích lũy của DO+1% tăng mạnh và nhanh hơn DO rất rõ ràng.

4.4.2. Nhiệt độ lớp cặn

Hình 4.23 thể hiện sự phân bố nhiệt độ bề mặt của cặn nhiên liệu DO, DO+1%L và DO+2%L trong thử nghiệm TNCMH. Giá trị nhiệt độ bề mặt cặn nhỏ nhất ở vào thời điểm khi giọt nhiên liệu vừa xuất hiện và nhiệt độ tăng dần ở những giọt nhiên liệu tiếp theo. Xu hướng này tiếp tục đến khoảng 275°C thì đạt giá trị cực đại, sau đó nhiệt độ bề mặt lớp cặn có xu hướng giảm xuống. Điều này có thể giải thích là do trong mô hình này sự truyền nhiệt chủ yếu dưới hai phương thức là đối lưu và dẫn nhiệt, ban đầu những giọt nhiên liệu sẽ nhận nhiệt từ bề mặt kim loại nên nhiệt độ cặn sẽ thấp hơn nhiệt độ bề mặt kim loại, tiếp theo cặn tạo lớp màng mỏng hạn chế tiếp xúc trực tiếp của không khí với bề mặt đốt nóng kết quả là làm tăng nhiệt độ bề mặt cặn, đến thời

điều nào đó chiều dày lớp cặn đủ lớn thì hạn chế sự dẫn nhiệt kết quả là xu hướng nhiệt độ giảm.

Kết quả thực nghiệm đã chỉ ra tác động khá mạnh của dầu bôi trơn đến nhiệt độ bề mặt cặn lắng, đối với nhiên liệu có pha trộn với dầu bôi trơn, khi số giọt nhiên liệu tăng lên thì nhiệt độ cặn lớn nhất và nhỏ nhất đều có xu hướng giảm mạnh theo độ tăng tỉ lệ hòa trộn. Với DO+1%L có nhiệt độ cặn lớn nhất giảm xuống khoảng 260°C và nhiệt độ nhỏ nhất của cặn chạm mức giới hạn của thiết bị đo nhiệt hồng ngoại là 250°C khi số giọt đạt đến 19000 giọt. Trong khi đó, DO+2%L cho thấy dải nhiệt độ bề mặt cặn lớn nhất có biên độ dao động thu hẹp và giá trị của cả nhiệt độ bề mặt cặn lớn nhất và nhỏ nhất đều giảm rất mạnh, ở 12000 giọt thì chúng đều giảm xuống mức tới hạn của thiết bị đo, điều này chứng tỏ cặn với thành phần dầu bôi trơn làm giảm khả năng truyền nhiệt của lớp cặn. Độ nhớt và chứa các chất khó bay hơi hơn đã làm cho nhiệt độ nhỏ nhất của lớp cặn giảm xuống, mặt khác lớp cặn tích lũy nhiều hơn khi có dầu bôi trơn đã làm bề dày lớp cặn tăng nhanh dẫn đến giảm hệ số truyền nhiệt của cặn và kết quả là nhiệt độ lớn nhất của cặn cũng giảm xuống so với bề mặt vách một cách đáng kể.

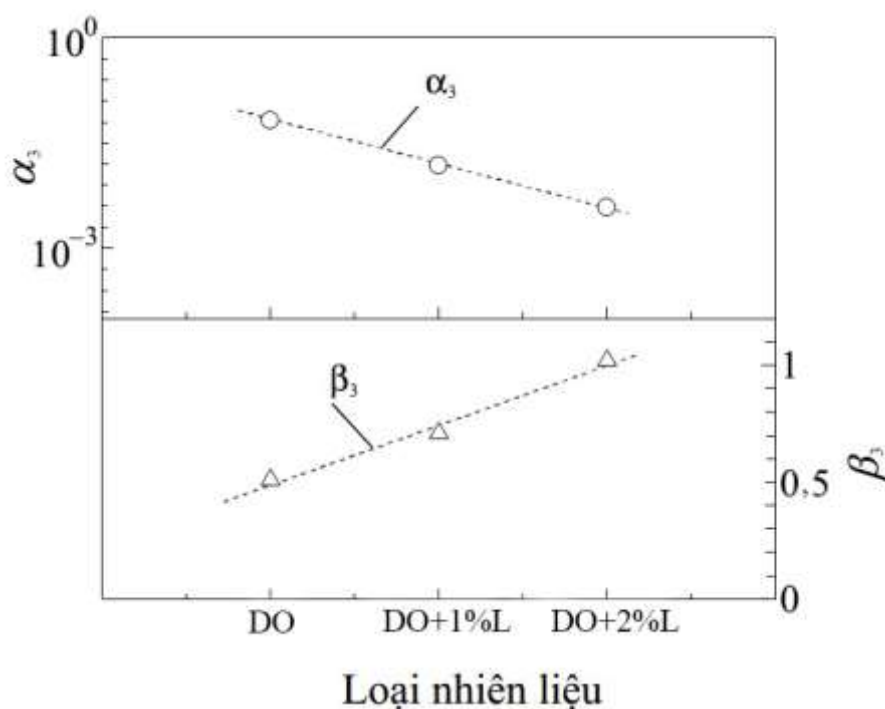


Hình 4.22. Nhiệt độ bề mặt cặn trong TNCMH

4.4.3. Hàm tỷ lệ tạo cặn xét đến ảnh hưởng của lượng dầu bôi trơn trong buồng cháy

Mối quan hệ, tương quan giữa số lượng giọt nhiên liệu và khối lượng cặn tương đối được mô tả bởi hàm hồi quy trong Hình 4.21 với các bộ hệ số thực nghiệm α_3 và β_3 tương ứng. Giá trị của α_3 trong phương trình phụ thuộc vào điều kiện ban đầu, còn giá trị của β_3 là gradient của M_R/m_D theo N_D và được tính toán theo kết quả thực nghiệm. Hàm hồi quy đó cho thấy xu hướng chung về sự hình thành và phát triển của cặn lắng nhiên liệu DO, DO+1%L và DO+2%L.

Kết quả hồi quy dữ liệu thực nghiệm cho thấy giá trị của β đối với DO+2%L là lớn nhất với $\beta_3 = 1,02$, tiếp theo là 0,71 và 0,51 với so với DO+1%L và DO tương ứng. Do đó, khi pha trộn nhiên liệu DO với dầu bôi trơn thì tốc độ phát triển cặn lắng nhanh hơn, tốc độ này tăng cùng với tỉ lệ hòa trộn.



Hình 4.23. So sánh giá trị của α_3 và β_3

Giá trị α_3 có xu hướng trái ngược hoàn toàn với β_3 (Hình 4.22), lượng cặn hình thành ban đầu của DO là lớn nhất ứng với giá trị α lớn nhất, tiếp theo đó là DO+1%L và DO+2%L. Như vậy nếu xét ở giai đoạn đầu thì lượng cặn sẽ ít hơn nếu tăng tỉ lệ pha trộn dầu bôi trơn. Tuy nhiên, khi số lượng giọt nhiên liệu tăng lên thì việc β_3 tăng khi tỉ lệ pha trộn dầu bôi trơn tăng sẽ là yếu tố quyết định tốc độ phát triển của cặn và tổng khối lượng cặn tích lũy sau thử nghiệm.

Như vậy, sự xuất hiện của dầu bôi trơn trong nhiên liệu sẽ làm gia tăng tốc độ phát triển cặn và tổng khối lượng cặn lắng tích lũy. Điều đó có nghĩa là dầu bôi trơn là

một yếu tố chính trong việc hình thành và gia tăng sự tích tụ cặn lắng trong buồng cháy động cơ.

Tóm lại, các phân tích và đánh giá kết quả thực nghiệm khi tiến hành thử nghiệm nhiên liệu DO pha trộn với dầu bôi trơn trong mô hình TNCMH ta rút ra một số kết luận sau:

Xu hướng hình thành và phát triển cặn lắng trong mô hình TNCMH được mô tả tương đối tốt qua mô hình hồi quy với hàm hồi quy:

$$\frac{M_R}{m_D} = \alpha_3 N_D^{\beta_3}$$

Các dữ liệu thực nghiệm cho thấy khi tỉ lệ pha trộn dầu bôi trơn tăng lên thì từ 0%L đến 2%L thì tốc độ phát triển cặn lắng và tổng khối lượng cặn tích lũy tăng đáng kể, kết quả thực nghiệm có sự tương đồng kết quả của các nghiên cứu [8][103].

Nhiệt độ cặn và thành phần cặn cho thấy các chất trong dầu bôi trơn có tác động đáng kể đến sự hình thành cặn lắng và tính chất (tính dẫn nhiệt kém hơn), cấu trúc (cấu trúc đặc hơn) của cặn lắng.

4.5. Kết luận chương

Các đặc tính bay hơi là cơ sở để có được các dữ liệu về trạng thái ướt/khô ban đầu, sự tương tác vật lý của giọt nhiên liệu với bề mặt vách và thời gian tồn tại ước tính của giọt nhiên liệu trong suốt quá trình tạo cặn. Đồng thời, nó có thể giải thích được các nguyên nhân của sự phát triển cặn, đặc tính của cặn, quãng biến động thời gian tồn tại giọt nhiên liệu và hiện tượng xung đột trong quá trình hình thành cặn. Do đó, đặc tính bay hơi của các loại nhiên liệu thu được trong nghiên cứu này có ý nghĩa quyết định trong việc giải thích các kết quả thu được từ TNCMH.

Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ, tình trạng ướt hay khô... của bề mặt vách đến sự tạo cặn trong nghiên cứu này cho thấy rằng nhiệt độ bề mặt vách có tác động rất lớn đến cơ chế hình thành cặn lắng của nhiên liệu. Nhiệt độ điểm có tốc độ hóa hơi cực đại MEP là nhiệt độ quan trọng nhất đối với sự phát triển của cặn lắng. Ở các điều kiện nhiệt độ thứ cấp khác nhau (so với nhiệt độ MEP) cho thấy có sự khác nhau về tương tác của giọt với bề mặt vách, thời gian bay hơi, trạng thái ướt/khô của bề mặt vách, do đó đặc tính phát triển cặn cũng khác nhau. Sự tạo cặn của nhiên liệu DO ở các nhiệt độ bề mặt khác nhau cho thấy có hai loại hình phát triển cặn: phát triển theo hai giai đoạn khi nhiệt độ bề mặt vách thấp hơn nhiệt độ MEP, phát triển theo một giai đoạn khi nhiệt độ bề mặt vách gần với nhiệt độ MEP. Nhiệt độ bề mặt vách nằm gần nhiệt độ MEP (tức nhiệt độ thứ cấp nhỏ) sẽ làm giảm sự hình thành cặn trên bề mặt vách, lượng cặn tích lũy ở nhiệt độ thứ cấp -5°C và $+10^{\circ}\text{C}$ giảm 55% và 70% so với lượng cặn tích

lũy ở nhiệt độ thứ cấp -30°C . Do đó, nhiệt độ bề mặt vách là một yếu tố quan trọng đối với sự hình thành và phát triển của cặn lắng trên bề mặt vách buồng cháy, việc kiểm soát nhiệt độ bề mặt vách buồng cháy có thể là một biện pháp hữu hiệu để giảm sự hình thành cặn trong động cơ.

Thời gian va chạm và nhiệt độ bề mặt vách xác định các điều kiện ban đầu như tình trạng ướt/khô của bề mặt, sự chống chất hay không chống chất. Khi điều kiện không chống chất và cặn khô sẽ làm lượng cặn tích lũy trong quá trình tạo cặn giảm xuống, nhưng điều kiện chống chất và cặn ẩm sẽ làm gia tăng lượng cặn tích tụ. Với thời gian va chạm ngắn ($\tau_{vc} = 5$ giây), nhiệt độ bề mặt gần bằng với nhiệt độ MEP ($t_{bm} = 352^{\circ}\text{C}$ tức thấp hơn 5°C so với nhiệt độ MEP) thường có cặn khô và không có tình trạng chống chất; khi nhiệt độ bề mặt thấp hơn nhiệt độ MEP ($t_{bm} = 270^{\circ}\text{C}$ tức thấp hơn 87°C so với nhiệt độ MEP) thì trạng thái chống chất và điều kiện cặn ẩm chiếm ưu thế. Tuy nhiên, tác động của các điều kiện cặn khô hay ẩm, chống chất hay không chống chất thể hiện rõ nhất ở giai đoạn sau của quá trình phát triển cặn. Ở giai đoạn sau, lượng cặn tích lũy khi nhiệt độ gần MEP đã giảm đến 97% so với lượng cặn tích lũy ở nhiệt độ bề mặt thấp hơn MEP. Như vậy để giảm lượng cặn hình thành trên bề mặt vách cần duy trì các điều kiện không chống chất và cặn khô.

Nghiên cứu đánh giá tác động của thành phần nhiên liệu đến xu hướng hình thành và phát triển cặn, thành phần cặn và sự biến động nhiệt độ bề mặt cặn được tiến hành trong TNCMH. Kết quả thực nghiệm cho thấy metyl este dầu cọ (B100) và hỗn hợp pha trộn của nó (B50, B20, B5) sẽ hình thành cặn lắng trong điều kiện bề mặt ẩm nhưng tốc độ phát triển cặn lắng còn phụ thuộc vào tỷ lệ pha trộn. Ở giai đoạn sau của quá trình phát triển cặn lắng, tỷ lệ pha trộn là một trong những yếu tố chính quyết định tốc độ phát triển và tổng lượng cặn tích lũy.

Dầu bôi trơn với thành phần phụ gia có tính chống oxi hóa, chất tẩy rửa và gốc dầu chứa nhiều hydrocacbon thơm đã cho thấy có tác động đáng kể đến sự gia tăng khả năng tạo cặn, tốc độ tạo cặn khi lẫn vào trong nhiên liệu của động cơ.

Sự biến động của nhiệt độ bề mặt cặn được gây ra bởi sự cạnh tranh giữa tác dụng làm mát, tác dụng oxi hóa bề mặt và hiệu ứng truyền nhiệt trong quá trình hình thành cặn. Nói chung cặn phát triển nhanh khi nhiệt độ bề mặt cặn thấp hơn nhiệt độ bề mặt vách ở giai đoạn ban đầu của quá trình tạo cặn và khoảng thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu trong giai đoạn đó dài hơn nên đã duy trì điều kiện chống chất của cặn. Tác dụng làm mát bằng nhiên liệu lỏng chiếm ưu thế ở giai đoạn đầu của quá trình hình thành cặn lắng và làm giảm nhiệt độ bề mặt. Tiếp theo, quá trình oxi hóa bề mặt diễn ra khi số giọt nhiên liệu tăng, nhiệt từ các phản ứng oxi hóa sau đó được giải phóng ra, dẫn đến sự gia tăng nhiệt độ bề mặt cặn. Sau khi lớp cặn tích lũy, nhiệt độ bề mặt cặn

giảm do ảnh hưởng của khả năng dẫn nhiệt thấp của cặn. Tuy nhiên mức độ ảnh hưởng của khả năng dẫn nhiệt thấp lớn hơn hiệu ứng oxi hóa nên miền nhiệt bề mặt cặn vẫn giảm. Cơ chế hình thành và phát triển cặn nói trên đặc trưng cho sự hình thành cặn lắng của nhiên liệu diesel sinh học (B100) và nhiên liệu có pha trộn dầu bôi trơn (DO+1%L, DO+2%L). Tuy nhiên, tốc độ phát triển cặn khá chậm khi điều kiện không chòng chát được duy trì suốt quá trình thử nghiệm và nhiệt độ bề mặt cặn thấp hơn 3-8% nhiệt độ bề mặt vách kim loại. Các hiệu ứng làm mát ở giai đoạn đầu và quá trình oxi hóa cặn trong giai đoạn sau dẫn tới sự phát triển cặn chậm, lớp cặn hình thành mỏng. Đặc trưng cho cơ chế này là sự tạo cặn của nhiên liệu diesel DO. Như vậy, cơ chế hình thành cặn lắng trong nghiên cứu này cũng phụ thuộc vào các hiện tượng cạnh tranh gồm tác dụng làm mát, tác dụng oxi hóa và tác dụng truyền nhiệt (dẫn nhiệt của cặn) trong quá trình lắng đọng cặn của nhiên liệu.

KẾT LUẬN

Thử nghiệm bay hơi (TNBH) các giọt nhiên liệu đơn liên tiếp được tiến hành trước mỗi thử nghiệm tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy (TNCMH), xác định thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu trong quá trình hóa hơi và hỗ trợ cho các nghiên cứu cơ bản về cơ chế hình thành cặn của nhiên liệu trong buồng cháy động cơ. Trong TNCMH, các giọt đơn va chạm với bề mặt vách, bay hơi, một số thành phần nhiên liệu bị oxi hóa và biến đổi thành cặn cacbon. Thử nghiệm nhằm có được bộ dữ liệu để đánh giá và xây dựng lên mô hình toán mô tả xu hướng hình thành và phát triển cặn trên bề mặt vách. Kết quả nghiên cứu này rút ra các kết luận chủ yếu sau:

1. Các thử nghiệm tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy (TNCMH) có đủ khả năng thu được kết quả tương tự trong thử nghiệm xác định lượng cặn buồng cháy động cơ (TNCBC). Các điều kiện thử nghiệm trên TNCMH tương tự như một số điều kiện ở động cơ diesel về trường nhiệt độ, độ ẩm, truyền nhiệt... Vì vậy, TNCMH được coi là mô hình tương đối đồng dạng trong nghiên cứu sự phát triển cặn trong động cơ thực.
2. Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm đã xây dựng được mô hình toán của quá trình hình thành cặn thể hiện qua các phương trình hồi qui dạng:

$$\frac{M_R}{m_D} = \alpha N_D^\beta.$$

Các bộ số α và β thu được đối với mỗi nghiên cứu ảnh hưởng là cơ sở khoa học rất có ý nghĩa để đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố đến cơ chế hình thành và phát triển của cặn lắng khi đốt cháy nhiên liệu diesel và diesel sinh học.

3. Sự kết hợp giữa đặc tính hình thành cặn lắng và các đặc tính bay hơi của nhiên liệu nhằm làm sáng tỏ các kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu này. Các đặc tính bay hơi là cơ sở để giải thích được các nguyên nhân của sự phát triển cặn, đặc tính của cặn, quãng biến động thời gian tồn tại giọt nhiên liệu và hiện tượng xung đột trong quá trình hình thành cặn.
4. Nhiệt độ bề mặt vách là yếu tố quan trọng đối với sự hình thành và phát triển của cặn lắng trên bề mặt vách buồng cháy, việc kiểm soát nhiệt độ bề mặt vách buồng cháy có thể là một biện pháp hữu hiệu để giảm sự hình thành cặn trong động cơ.
5. Thời gian va chạm và nhiệt độ bề mặt vách xác định các điều kiện ban đầu như trạng thái ướt/khô của bề mặt vách, sự chùng chất hay không chùng chất. Do đó, để giảm lượng cặn hình thành trên bề mặt vách cần duy trì các điều kiện không chùng chất và cặn khô.
6. Nhiên liệu sinh học (B100) và hỗn hợp pha trộn của nó (B50, B20, B5) hình thành cặn trong điều kiện bề mặt vách ẩm nhưng tốc độ phát triển cặn lắng còn phụ thuộc vào tỷ lệ pha trộn. Ở giai đoạn ban đầu của quá trình hình thành, không chắc rằng một tỷ lệ pha trộn cao hơn sẽ tạo ra nhiều cặn hơn. Tuy nhiên, ở giai đoạn sau, tỷ lệ pha trộn là

một trong những yếu tố chính ảnh hưởng đến tốc độ phát triển cặn và tổng lượng cặn tích lũy.

7. Dầu bôi trơn khi có mặt trong nhiên liệu đã làm tăng độ nhớt, giảm khả năng bay hơi, kéo dài thời gian tồn tại của giọt nhiên liệu và làm gia tăng lượng cặn lắng hình thành trên bề mặt vách. Do đó, khi tỉ lệ pha trộn của dầu bôi trơn càng cao thì xu hướng cặn hình thành, tốc độ phát triển của cặn cũng tăng lên.

8. Các cơ chế tạo cặn trong nghiên cứu này đã được mô tả theo sự biến động của nhiệt độ bề mặt cặn và những biến động của thời gian tồn tại giọt nhiên liệu trong quá trình tạo cặn. Sự biến động của nhiệt độ bề mặt cặn được gây ra bởi sự cạnh tranh giữa tác dụng làm mát, tác dụng oxi hóa bề mặt và hiệu ứng truyền nhiệt trong quá trình hình thành cặn.

HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Như đã đề cập trong kết luận thứ nhất, nếu điều kiện cho phép thì việc thiết lập mô hình thực nghiệm có kể đến các yếu tố nhiệt độ, áp suất khí thể, các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình cháy...thì kết quả thực nghiệm thu được sẽ có tính thuyết phục hơn với quá trình nghiên cứu sự hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ. Tuy nhiên với những kết quả của nghiên cứu này cho phép mở ra các hướng phát triển tiếp theo và nâng cấp mô hình thực nghiệm nhằm tiến tới đánh giá một cách toàn diện các yếu tố hình thành nên cặn lắng trong buồng cháy động cơ.

Ngoài ra với thành công ban đầu của nghiên cứu cơ bản về cơ chế hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ diesel sẽ là cơ sở lý thuyết ban đầu để xây dựng các giải pháp giảm thiểu cặn lắng trên động cơ diesel nói chung và động cơ diesel tàu thủy nói riêng bởi xu thế bắt buộc sử dụng nhiên liệu có hàm lượng lưu huỳnh thấp hoặc siêu thấp thì vấn đề hình thành cặn lắng trong buồng cháy động cơ, đặc biệt là tại đầu vòi phun là khá nghiêm trọng.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Phạm Văn Việt**, Lương Công Nhó, Trần Quang Vinh. “Cặn Lắng Trong Động Cơ Và Các Biện Pháp Phòng Ngừa”. *Tạp chí Khoa học & Công nghệ, Đại học Công nghiệp Hà Nội*, Số 27, ISSN 1859-3585, 2015.

2. **Pham Van Viet**, Hoang Anh Tuan, Luong Cong Nho, Tran Van Trung. Proceedings of the 2016 international conference: “The Effect Of Combustion Chamber Deposits On Heat Transfer And Combustion In A Small Marine Diesel Engines”, *Advanced Technology & Sustainable Development, Industrial University of Ho Chi Minh Publishing House*, ISBN 978-604-920-040-3, 2016.

3. **Phạm Văn Việt**, Lương Công Nhó, Nguyễn Lan Hương. “Nghiên Cứu Quá Trình Tạo Cặn Trong Buồng Cháy Động Cơ”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, NXB Hàng hải*, Số 50, ISSN 1859-316X, 2017.

4. **Phạm Văn Việt**, Lương Công Nhó, Trần Quang Vinh, Nguyễn Lan Hương. “Phân Tích Ảnh Hưởng Của Nhiệt Độ Đỉnh Piston Đến Sự Hình Thành Cặn Lắng Buồng Đốt Động Cơ Diesel”. *Hội nghị KHCN toàn quốc về Cơ khí – Động lực, Đại học Bách Khoa – Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh*, ISBN 978-604-73-5602-7, 2017.

5. **Pham VanViet**, Luong Cong Nho, Tran Quang Vinh, Nguyen Lan Huong, Tran The Nam. “Setting Up The Experimental Model To Investigate Deposit Fomation Of Diesel And Biodiesel Fuels On A Wall Surface”. *Journal of ASIA Maritime & Fisheries Universities Forum*, ISSN: 2508-5247, 2017.

6. **Pham Van Viet**, Luong Cong Nho, Tran Quang Vinh. “Analysing The Effect Of Lubricant Oil On Combustion Chamber Deposit Formation In Diesel Engines”. *Journal of Marine Science and Technology No. 53, ISSN 1859-316X, Marine Publishing House*, 2018.

7. **Phạm Văn Việt**, Hoàng Anh Tuấn, Lương Công Nhó, Trần Quang Vinh, Phạm Ngọc Tuyền. “Nghiên Cứu Sự Hình Thành Cặn Lắng Trong Buồng Cháy Và Sự Suy Thoái Của Dầu Bôi Trơn Trong Động Cơ Diesel Thủy Cỡ Nhỏ Sử Dụng Trực Tiếp Dầu Thực Vật”. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông Vận tải*, Số 26-2/2018, ISSN 1859-4263, 2018.

8. **Phạm Văn Việt**, Lương Công Nhó, Trần Quang Vinh, Phạm Ngọc Tuyền, Phan Trung Kiên. “Nghiên Cứu Ảnh Hưởng Của Dầu Bôi Trơn Đến Sự Hình Thành Cặn

Lắng Piston Trong Động Cơ Diesel Sử Dụng Nhiên Liệu Sinh Học”. *Hội nghị Khoa học và Công nghệ lần thứ IV, Đại học Giao thông vận tải TP. HCM*, 2018.

9. Anh Tuan Hoang, **Van Viet Pham**. “Impact of Jatropha Oil on Engine Performance, Emission Characteristics, Deposit Formation, and Lubricating Oil Degradation”. *Combustion Science and Technology*, <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1504292>, vol. 191, No. 3, pp. 504 - 519, 2019.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1] N. Cảnh, “Quy hoạch thực nghiệm,” *Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh*, 2004.
- [2] GS. TSKH. Phạm Văn Lang, *Quy hoạch và xử lý số liệu thực nghiệm*. Hà Nội, 2012.
- [3] N. N. Kiêng, “Thống kê học trong nghiên cứu khoa học–,” *Nhà xuất bản Giáo Dục*, 1996.
- [4] V. T. Nguyễn, *Phân tích số liệu và tạo biểu đồ bằng R*. NXB Khoa học và kỹ thuật, 2015.

Tiếng Anh

- [5] G. Shu, L. Dong, and X. Liang, “A review of experimental studies on deposits in the combustion chambers of internal combustion engines,” *Int. J. Engine Res.*, vol. 13, no. 4, pp. 357–369, 2012.
- [6] H. F. Shurvell, A. D. H. Clague, and M. C. Southby, “Method for the determination of the composition of diesel engine piston deposits by infrared spectroscopy,” *Appl. Spectrosc.*, vol. 51, no. 6, pp. 827–835, 1997.
- [7] O. Güralp *et al.*, “Characterizing the Effect of Combustion Chamber Deposits on a Gasoline HCCI Engine,” *SAE Tech. Pap. 2006-01-3277*, no. 724, 2006.
- [8] Z. Ye, Q. Meng, H. P. Mohamadian, J. T. Wang, L. Chen, and L. Zhu, “Investigation of deposit formation mechanisms for engine in-cylinder combustion and exhaust systems using quantitative analysis and sustainability study,” *Int. J. Thermophys.*, vol. 28, no. 3, pp. 1056–1066, 2007.
- [9] G. T. Kalghatgi, A. Sutkowski, S. Pace, H. Schwahn, and B. Nierhauve, “ASTM unwashed gum and the propensity of a fuel to form combustion chamber deposits,” *SAE Technical Paper*, 2000.
- [10] P. Singer and J. Rühle, “On the mechanism of deposit formation during thermal oxidation of mineral diesel and diesel/biodiesel blends under accelerated conditions,” *Fuel*, vol. 133, pp. 245–252, 2014.
- [11] J. Hoard and P. Moilanen, “Exhaust valve seat leakage,” *SAE Technical Paper*, 1997.
- [12] G. T. Kalghatgi and R. J. Price, “Combustion chamber deposit flaking,” *SAE Technical Paper*, 2000.
- [13] S. M. Muzikus, M. I. Fedorov, and E. I. Frolov, “Standard allowable limit for carbon-deposit formation in diesel engines,” *Chem. Technol. Fuels Oils*, vol. 11, no. 10, pp. 815–817, 1975.
- [14] C. J. O’Brien, “Formation mechanisms of combustion chamber deposits.” Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [15] P. Eilts, “Investigation on deposit formation during low load operation of high supercharged diesel engines,” in *Int. Symposium COMODIA*, 1990, vol. 90, pp. 517–522.
- [16] X. Sun, X. Liang, G. Shu, Y. Wang, Y. Wang, and H. Yu, “Effect of different

- combustion models and alternative fuels on two-stroke marine diesel engine performance,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 597–606, 2017.
- [17] G. Lepperhoff and M. Houben, “Mechanisms of deposit formation in internal combustion engines and heat exchangers,” *SAE Technical Paper*, 1993.
- [18] N. Fujii, H. Miyama, M. Koshi, and T. Asaba, “Kinetics of ammonia oxidation in shock waves,” in *Symposium (International) on Combustion*, 1981, vol. 18, no. 1, pp. 873–883.
- [19] L. R. Rudnick, *Lubricant additives: chemistry and applications*. CRC press, 2017.
- [20] M. Fukui, T. Sato, N. Fujita, and M. Kitano, “Examination of lubricant oil components affecting the formation of combustion chamber deposit in a two-stroke engine,” *JSAE Rev.*, vol. 22, no. 3, pp. 281–285, 2001.
- [21] M. Diaby, M. Sablier, A. Le Negrate, M. El Fassi, and J. Bocquet, “Understanding carbonaceous deposit formation resulting from engine oil degradation,” *Carbon N. Y.*, vol. 47, no. 2, pp. 355–366, 2009.
- [22] J. A. McGeehan and B. J. Fontana, “Effect of soot on piston deposits and crankcase oils-Infrared spectrometric technique for analyzing soot,” *SAE Technical Paper*, 1980.
- [23] D. W. Stanton, A. M. Lippert, R. D. Reitz, and C. Rutland, “Influence of spray-wall interaction and fuel films on cold starting in direct injection diesel engines,” *SAE Technical Paper*, 1998.
- [24] J. Ullmann, M. Geduldig, H. Stutzenberger, R. Caprotti, and G. Balfour, “Investigation into the formation and prevention of internal diesel injector deposits,” *SAE Technical Paper*, 2008.
- [25] Y. Ra, R. D. Reitz, M. W. Jarrett, and T. P. Shyu, “Effects of piston crevice flows and lubricant oil vaporization on diesel engine deposits,” *SAE Technical Paper*, 2006.
- [26] A. Leedham, R. Caprotti, O. Graupner, and T. Klaua, “Impact of fuel additives on diesel injector deposits,” *SAE Technical Paper*, 2004.
- [27] L. B. Ebert, *Chemistry of engine combustion deposits*. Springer, 1985.
- [28] G. H. Cloud and A. J. Blackwood, “The Influence of Diesel Fuel Properties on Engine Deposits and Wear,” *SAE Technical Paper*, 1943.
- [29] T. W. Zerda, X. Yuan, and S. M. Moore, “Effects of fuel additives on the microstructure of combustion engine deposits,” *Carbon N. Y.*, vol. 39, no. 10, pp. 1589–1597, 2001.
- [30] F. NAGAO, M. IKEGAMI, and A. TOKUNAGA, “Temperature Dependence of Carbon Deposit in a Diesel Combustion Chamber,” *Bull. JSME*, vol. 9, no. 35, pp. 573–579, 1966.
- [31] R. K. Jonkers, M. F. Bardon, and D. P. Gardiner, “Techniques for Predicting Combustion Chamber Deposits in a Direct Injection Diesel Engine,” *SAE Technical Paper*, 2002.
- [32] K. Nishiwaki and M. Hafnan, “The determination of thermal properties of engine combustion chamber deposits,” *SAE Technical Paper*, 2000.
- [33] S. I. Sevast’yanov, “High-temperature deposits on pistons of high-performance diesel engines,” *Chem. Technol. Fuels Oils*, vol. 9, no. 11, pp. 872–877, 1973.
- [34] H. Ishii, M. Emi, Y. Yamada, S. Kimura, K. Shimano, and Y. Enomoto, “Heat

- Loss to The Combustion Chamber Wall with Deposit Adhering to The Wall Surface in DI Diesel Engine First Report: Influence of Deposit on Instantaneous Heat Flux into the Piston Surfaces,” *SAE Technical Paper*, 2001.
- [35] M. Kinoshita, A. Saito, S. Matsushita, H. Shibata, and Y. Niwa, “Study of deposit formation mechanism on gasoline injection nozzle,” *JSAE Rev.*, vol. 19, no. 4, pp. 355–357, 1998.
- [36] J. B. Heywood, “Internal combustion engine fundamentals,” *McGraw-Hill Education*, 1988.
- [37] A. B. Hopwood, S. Chynoweth, and G. T. Kalghatgi, “A Technique to Measure Thermal Diffusivity and Thickness of Combustion Chamber Deposits In-Situ,” *SAE Technical Paper*, 1998.
- [38] K. Wannatong, N. Akarapanyavit, S. Siengsanorh, and S. Chanchaona, “Combustion and knock characteristics of natural gas diesel dual fuel engine,” *SAE Technical Paper*, 2007.
- [39] H. A. Haidar, “Combustion chamber deposit effects on hydrocarbon emissions from a spark-ignition engine.” Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [40] S. L. Bower, T. A. Litzinger, and V. Frottier, “The effect of fuel composition and engine deposits on emissions from a spark ignition engine,” *SAE Technical Paper*, 1993.
- [41] W. M. Studzinski *et al.*, “A computational and experimental study of combustion chamber deposit effects on NO_x emissions,” in *Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exposition*, 1993.
- [42] X. Zhang *et al.*, “Investigating the microstructures of piston carbon deposits in a large-scale marine diesel engine using synchrotron X-ray microtomography,” *Fuel*, vol. 142, pp. 173–179, 2015.
- [43] D. Caceres, J. R. Reisel, A. Sklyarov, and A. Poehlman, “Exhaust emission deterioration and combustion chamber deposit composition over the life cycle of small utility engines,” *J. Eng. Gas turbines power*, vol. 125, no. 1, pp. 358–364, 2003.
- [44] Ø. Buhaug, “Deposit formation on cylinder liner surface in medium-speed engines,” *Norwegian University of Science and Technology*, 2003.
- [45] M. Hutchings, D. Chasan, R. Burke, P. Odorisio, M. Rovani, and W. Wang, “Heavy duty diesel deposit control... prevention as a cure,” *SAE Technical Paper*, 1997.
- [46] P. Tarkowski, J. Sarzyński, P. Budzyński, R. Paluch, and M. Wiertel, “Influence of the kind of fuel oil on the deposit composition in the diesel engine combustion chamber,” *Fuel*, vol. 80, no. 10, pp. 1399–1403, 2001.
- [47] M. M. Elkotb, S. L. Aly, and H. A. Elsalawy, “Evaporation characteristics of fuel and multifuel droplets,” *Combust. Flame*, vol. 85, no. 3–4, pp. 300–308, 1991.
- [48] C. Morin, C. Chauveau, and I. Gökalp, “Droplet vaporisation characteristics of vegetable oil derived biofuels at high temperatures,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 21, no. 1–3, pp. 41–50, 2000.
- [49] W. L. H. Hallett, “A simple model for the vaporization of droplets with large numbers of components,” *Combust. Flame*, vol. 121, no. 1–2, pp. 334–344, 2000.
- [50] R. Kneer, M. Schneider, B. Noll, and S. Wittig, “Diffusion controlled evaporation

- of a multicomponent droplet: theoretical studies on the importance of variable liquid properties,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 36, no. 9, pp. 2403–2415, 1993.
- [51] M. Renksizbulut and M. Bussmann, “Multicomponent droplet evaporation at intermediate Reynolds numbers,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 36, no. 11, pp. 2827–2835, 1993.
- [52] W. Ranz, “Technical Report No. 3,” *Contract AT-(30-3)-28, Univ. Illinois*, 1951.
- [53] B. B. Langmuir I, “Mathematical investigation of water droplet trajectories,” *Gen. Electr. Res. Lab.*, vol. Report No., 1945.
- [54] D. T. Daly, S. A. Bannon, D. A. Fog, and S. M. Harold, “Mechanism of combustion chamber deposit formation,” SAE Technical Paper, 1994.
- [55] H. Kaufmann, T. Nussbaumer, L. Baxter, and N. Yang, “Deposit formation on a single cylinder during combustion of herbaceous biomass,” *Fuel*, vol. 79, no. 2, pp. 141–151, 2000.
- [56] D. E. Rosner, *Transport processes in chemically reacting flow systems*. Courier Corporation, 2012.
- [57] L. Talbot, R. K. Cheng, R. W. Schefer, and D. R. Willis, “Thermophoresis of particles in a heated boundary layer,” *J. Fluid Mech.*, vol. 101, no. 4, pp. 737–758, 1980.
- [58] K. Ko and M. Arai, “Diesel spray impinging on a flat wall, part I: Characteristics of adhered fuel film in an impingement diesel spray,” *At. Sprays*, vol. 12, no. 5&6, 2002.
- [59] J. Senda, M. Ohnishi, T. Takahashi, H. Fujimoto, A. Utsunomiya, and M. Wakatabe, “Measurement and modeling on wall wetted fuel film profile and mixture preparation in intake port of SI engine,” *SAE Technical Paper*, 1999.
- [60] R. L. Vander Wal, G. M. Berger, and S. D. Mozes, “Droplets splashing upon films of the same fluid of various depths,” *Exp. Fluids*, vol. 40, no. 1, pp. 33–52, 2006.
- [61] C. Tropea and M. Marengo, “The impact of drops on walls and films,” *Multiph. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 1, 1999.
- [62] A. L. Yarin and D. A. Weiss, “Impact of drops on solid surfaces: self-similar capillary waves, and splashing as a new type of kinematic discontinuity,” *J. Fluid Mech.*, vol. 283, pp. 141–173, 1995.
- [63] G. E. Cossali, A. Coghe, and M. Marengo, “The impact of a single drop on a wetted solid surface,” *Exp. Fluids*, vol. 22, no. 6, pp. 463–472, 1997.
- [64] C. Motzkus, F. Gensdarmes, and E. Géhin, “Study of the coalescence/splash threshold of droplet impact on liquid films and its relevance in assessing airborne particle release,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 362, no. 2, pp. 540–552, 2011.
- [65] R. Rioboo, C. Bauthier, J. Conti, M. Voue, and J. De Coninck, “Experimental investigation of splash and crown formation during single drop impact on wetted surfaces,” *Exp. Fluids*, vol. 35, no. 6, pp. 648–652, 2003.
- [66] Q. Huang and H. Zhang, “A study of different fluid droplets impacting on a liquid film,” *Pet. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 62–66, 2008.
- [67] C. Bai and A. D. Gosman, “Development of methodology for spray impingement simulation,” *SAE Trans.*, pp. 550–568, 1995.
- [68] M. Sommerfeld and N. Huber, “Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions,” *Int. J. Multiph. flow*, vol. 25, no. 6–7, pp. 1457–1489, 1999.

- [69] V. K. Dhir, “Nucleate and transition boiling heat transfer under pool and external flow conditions,” *Int. J. heat fluid flow*, vol. 12, no. 4, pp. 290–314, 1991.
- [70] M. Rein, “Interactions between drops and hot surfaces,” in *Drop-Surface Interactions*, Springer, 2002, pp. 185–217.
- [71] A. Faghri and Y. Zhang, *Transport phenomena in multiphase systems*. Elsevier, 2006.
- [72] J. R. Welty, C. E. Wicks, G. Rorrer, and R. E. Wilson, *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2009.
- [73] J. D. Naber and P. V Farrell, “Hydrodynamics of droplet impingement on a heated surface,” *SAE Trans.*, pp. 1346–1361, 1993.
- [74] L. H. J. Wachters and N. A. J. Westerling, “The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 21, no. 11, pp. 1047–1056, 1966.
- [75] J. D. Bernardin and I. Mudawar, “The Leidenfrost point: experimental study and assessment of existing models,” *J. Heat Transfer*, vol. 121, no. 4, pp. 894–903, 1999.
- [76] K. J. Baumeister and F. F. Simon, “Leidenfrost temperature—its correlation for liquid metals, cryogenics, hydrocarbons, and water,” *J. Heat Transfer*, vol. 95, no. 2, pp. 166–173, 1973.
- [77] B. S. Kang and D. H. Lee, “On the dynamic behavior of a liquid droplet impacting upon an inclined heated surface,” *Exp. Fluids*, vol. 29, no. 4, pp. 380–387, 2000.
- [78] G. S. Emmerson, “The effect of pressure and surface material on the Leidenfrost point of discrete drops of water,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 18, no. 3, pp. 381–386, 1975.
- [79] G. A. E. Godsave, “Studies of the combustion of drops in a fuel spray—the burning of single drops of fuel,” in *Symposium (International) on Combustion*, 1953, vol. 4, no. 1, pp. 818–830.
- [80] T. J. Schoenbaum, “Liability for damages in oil spill accidents: Evaluating the USA and international law regimes in the light of deepwater horizon,” *J. Environ. Law*, vol. 24, no. 3, pp. 395–416, 2012.
- [81] A. H. Lefebvre and V. G. McDonell, *Atomization and sprays*. CRC press, 2017.
- [82] B. Abramzon and W. A. Sirignano, “Droplet vaporization model for spray combustion calculations,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 32, no. 9, pp. 1605–1618, 1989.
- [83] X.-Q. Chen and J. C. F. Pereira, “Prediction of evaporating spray in anisotropically turbulent gas flow,” *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 27, no. 2, pp. 143–162, 1995.
- [84] C. Rodrigues, J. Barata, and A. Silva, “Influence of the energy dissipation in the spray impingement modeling,” in *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2012, p. 349.
- [85] S. S. Sazhin *et al.*, “A simplified model for bi-component droplet heating and evaporation,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, no. 21–22, pp. 4495–4505, 2010.
- [86] A. J. Petsi and V. N. Burganos, “Temperature distribution inside an evaporating two-dimensional droplet lying on curved or flat substrates,” *Phys. Rev. E*, vol. 84, no. 1, p. 11201, 2011.
- [87] C. Maqua, G. Castanet, and F. Lemoine, “Bicomponent droplets evaporation:

- Temperature measurements and modelling,” *Fuel*, vol. 87, no. 13–14, pp. 2932–2942, 2008.
- [88] H. Zhang, B. Bai, L. Liu, H. Sun, and J. Yan, “Droplet dispersion characteristics of the hollow cone sprays in crossflow,” *Exp. Therm. fluid Sci.*, vol. 45, pp. 25–33, 2013.
- [89] T. Long, M. Li, Y. Chen, and X. Zhu, “Study on Evaporation Characteristics of Bio-oil and its Compound Models,” *BioResources*, vol. 9, no. 3, pp. 4242–4252, 2014.
- [90] P. Bhattacharya, S. Ghosal, and S. K. Som, “Evaporation of multicomponent liquid fuel droplets,” *Int. J. energy Res.*, vol. 20, no. 5, pp. 385–398, 1996.
- [91] G. Strotos, M. Gavaises, A. Theodorakakos, and G. Bergeles, “Numerical investigation of the evaporation of two-component droplets,” *Fuel*, vol. 90, no. 4, pp. 1492–1507, 2011.
- [92] K. Saha, E. Abu-Ramadan, and X. Li, “Multicomponent evaporation model for pure and blended biodiesel droplets in high temperature convective environment,” *Appl. Energy*, vol. 93, pp. 71–79, 2012.
- [93] R. Banerjee, “Numerical investigation of evaporation of a single ethanol/isooctane droplet,” *Fuel*, vol. 107, pp. 724–739, 2013.
- [94] B. S. Gottfried, C. J. Lee, and K. J. Bell, “The Leidenfrost phenomenon: film boiling of liquid droplets on a flat plate,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 9, no. 11, pp. 1167–1188, 1966.
- [95] L. Delfau, P. Michaud, and A. Barassin, “Formation of small and large positive ions in rich and sooting low-pressure ethylene and acetylene premixed flames,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 5–6, pp. 165–177, 1979.
- [96] B. S. Haynes and H. G. Wagner, “Soot formation,” *Prog. energy Combust. Sci.*, vol. 7, no. 4, pp. 229–273, 1981.
- [97] I. M. Khan, G. Greeves, and D. M. Probert, “Prediction of soot and nitric oxide concentrations in diesel engine exhaust,” *Air Pollut. Control Transp. Engines C*, vol. 142, pp. 205–217, 1971.
- [98] M. A. Serageldin, “Soot formation in small flames,” SAE Technical Paper, 1981.
- [99] C. P. Fenimore and G. W. Jones, “Comparative yields of soot from premixed hydrocarbon flames,” *Combust. Flame*, vol. 12, no. 3, pp. 196–200, 1968.
- [100] W. H. Lipkea, J. H. Johnson, and C. T. Vuk, “The physical and chemical character of diesel particulate emissions-measurement techniques and fundamental considerations,” SAE Technical Paper, 1978.
- [101] C. L. Mantell, “Carbon and Graphite Handbook, Interscience.” Wiley, New York, 1988.
- [102] I. Glassman, “Sooting laminar diffusion flames: effect of dilution, additives, pressure, and microgravity,” in *Symposium (International) on Combustion*, 1998, vol. 27, no. 1, pp. 1589–1596.
- [103] T. R. Sem, “Effect of various lubricating oils on piston deposits in biodiesel fueled engines,” SAE Technical Paper, 2004.
- [104] J. B. Howard, B. L. Wersborg, and G. C. Williams, “Coagulation of carbon particles in premixed flames,” in *Faraday Symposia of the Chemical Society*, 1973, vol. 7, pp. 109–119.
- [105] S. J. Harris, R. J. Blint, and J. E. M. Goldsmith, “Concentration profiles in rich

- and sooting ethylene flames,” in *Symposium (International) on Combustion*, 1988, vol. 21, no. 1, pp. 1033–1045.
- [106] C. P. Fenimore and G. W. Jones, “Coagulation of soot to smoke in hydrocarbon flames,” *Combust. Flame*, vol. 13, no. 3, pp. 303–310, 1969.
- [107] N. Feng, X. Guo, S. Liang, Y. Zhu, and J. Liu, “Biosorption of heavy metals from aqueous solutions by chemically modified orange peel,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 185, no. 1, pp. 49–54, 2011.
- [108] V. V. Shahare, B. Kumar, and P. Singh, “Biofuels for Sustainable Development: A Global Perspective,” in *Green Technologies and Environmental Sustainability*, Springer, 2017, pp. 67–89.
- [109] M. Husnawan, H. H. Masjuki, T. M. I. Mahlia, and M. G. Saifullah, “Thermal analysis of cylinder head carbon deposits from single cylinder diesel engine fueled by palm oil–diesel fuel emulsions,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 2107–2113, 2009.
- [110] M. L. Maiello and M. D. Hoover, *Radioactive air sampling methods*. CRC press, 2010.
- [111] R. Pos, R. Cracknell, and L. Ganippa, “Transient characteristics of diesel sprays from a deposit rich injector,” *Fuel*, vol. 153, pp. 183–191, 2015.
- [112] T. W. Zerda, X. Yuan, S. M. Moore, and C. A. L. y Leon, “Surface area, pore size distribution and microstructure of combustion engine deposits,” *Carbon N. Y.*, vol. 37, no. 12, 1999.
- [113] P. P. M. B. M. Hilka and T. J. Poinso, “A numerical study of laminar flame wall interaction with detailed chemistry: wall temperature effects,” *Direct Numer. Simul. Turbul. React. Flows*, p. 81, 1996.
- [114] R. J. Kee, F. M. Rupley, and J. A. Miller, “The Chemkin thermodynamic data base,” *Reaction Design*, 2000.
- [115] C. Arcoumanis, H. Flora, M. Gavaises, and M. Badami, “Cavitation in real-size multi-hole diesel injector nozzles,” *SAE Trans.*, pp. 1485–1500, 2000.
- [116] A. Wierzba, “Deformation and breakup of liquid drops in a gas stream at nearly critical Weber numbers,” *Exp. Fluids*, vol. 9, no. 1–2, pp. 59–64, 1990.
- [117] T. Tran, H. J. J. Staat, A. Prosperetti, C. Sun, and D. Lohse, “Drop impact on superheated surfaces,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 108, no. 3, p. 36101, 2012.
- [118] W. S. Mathews, C. F. Lee, J. E. Peters. Experimental investigations of spray/wall impingement. *Atomization and Sprays*; vol. 13, p. 223-242, 2003.
- [119] L. Allocca L, "Wall-Impingement of a Spray from a Common Rail Injection System for Diesel Engines", *Conference on Thermo and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines*, pp. 67–76, 2002.
- [120] J. Senda, K. Yamada, H. Fujimoto, H. Miki, “The heat transfer characteristics of a small droplet impinging upon a hot surface”. *JSME International Journal Series II*; vol. 31, no. 1, pp.105-111, 1988.
- [121] S. Sikalo, M. Marengo, C. Tropea, E.N. Ganic, “Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 25, pp. 503-510, 2002
- [122] J. Senda, T. Kanda, M. Al-Roub, P.V. Farrel, T. Fukami, H. Fujimoto, “Modeling spray impingement considering fuel film formation on the wall”, *SAE Technical Paper*; No.970047, 2010.

- [123] T. Furuhashi, T. Ohmori, & M. Arai, "Evaporation Deposits of Diesel and Biodiesel Fuels on a Hot Surface". *SAE Technical Paper Series*. doi:10.4271/2011-01-1933, 2011.

PHỤ LỤC

Bảng PL 1. Kết quả phân tích nhiên liệu diesel (DO)

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Đo	Giới hạn	Phương pháp thử
1	Khối lượng riêng ở 15°C	Kg/m ³	823	820 - 860	ASTM D1298
2	Sức căng bề mặt ở 40°C	mN/m	25,4		ASTM D971
3	Hàm lượng lưu huỳnh	mg/kg	380	500, max	ASTM D 2622
4	Trị số xêtan		49	50, max	ASTM D 613
5	Nhiệt độ cất tại 90% thể tích thu hồi	°C	332	355, max	ASTM D 86
6	Điểm chớp cháy cốc kín	°C	60	55, min	ASTM D 93
7	Độ nhớt động học tại 40°C	mm ² /s	3,13	2,0-4,5	ASTM D 445
8	Điểm đông đặc	°C	+3	+6, max	ASTM D 97
9	Hàm lượng nước	mg/kg	50	200, max	ASTM D 6304
10	Hàm lượng chất thơm đa vòng (PAH)	% khối lượng	9	11, max	ASTM D 5186

Bảng PL 2. Kết quả phân tích của dầu bôi trơn SAE 30

TT	Tection Momograde	Phương pháp thử	Đơn vị	SAE 10W	SAE 30	SAE 40	SAE 50
1	Khối lượng riêng ở 15°C	ASTM 1298	Kg/ m ³	885	887	894	905
2	Điểm chớp cháy cốc hở	ASTM D92	°C	226	244	252	258
3	Độ nhớt động học ở 40°C	ASTM D445	cSt	43,8	98,6	155	201,6
4	Độ nhớt động học ở 100°C	ASTM D445	cSt	7,0	11,5	15,6	18,8
5	Chỉ số độ nhớt	ASTM D2270	-	116	107	102	102
6	Điểm rót chảy	ASTM D97	°C	-36	-24	-24	-24

TT	Tection Momograde	Phương pháp thử	Đơn vị	SAE 10W	SAE 30	SAE 40	SAE 50
7	Độ kiềm tổng (TBN)	ASTM D2896	mgKOH/g	7,1	7,1	7,1	7,1
8	Độ tro sun-phát	ASTM D874	% tl	0,9	0,9	0,9	0,9

Bảng PL 3. Kết quả phân tích của Dodecane

TT	Tính chất	Đơn vị	Dodecane
1	Công thức phân tử	-	C ₁₂ H ₂₆
2	Khối lượng riêng tại 15°C (ρ_{fuel})	kg/m ³	749
3	Độ nhớt động học tại 40°C	mm ² /s	< 7
4	Áp suất hóa hơi ở 20°C ở 48 °C	Pa	0,4 1,3
5	Nhiệt độ tự bốc cháy	°C	200
6	Điểm sôi cuối	°C	214,5
7	Điểm chớp cháy (phương pháp EN 2719)	°C	84
8	Điểm nóng chảy	°C	-9,6

Bảng PL 4. Tính chất lý hóa của nhiên liệu B100 (QCVN 1:2015/BKHCN)

	Chỉ tiêu	Phương pháp	Giới hạn	Đo	Đơn vị
1	Nhiệt độ chớp cháy cốc kín	ASTM D 93	130 min	198	°C
2	Hàm lượng nước	ASTM E203-01	450 max	432	ppm
3	Hàm lượng cặn cacbon (100% mẫu)	ASTM D 4530	0,05 max	0,042	% khối lượng
4	Hàm lượng tro sunphat	ASTM D 874	0,02 max	0,014	% khối lượng
5	Độ nhớt động học ở 40°C	ASTM D 445	1,9 – 6,0	28,6	cSt (mm ² /s)
6	Hàm lượng lưu huỳnh S500 Grade	ASTM D 5453	500 max	170	mg/kg
7	Ăn mòn mảnh đồng	ASTM D 130	No. 3 max	1	
8	Trị số axit	ASTM D 664	0,5 max	0,4	mgKOH/g

Chỉ tiêu		Phương pháp	Giới hạn	Đo	Đơn vị
9	Điểm mây	ASTM D 2500	Báo cáo	+4,5	⁰ C
10	Nhiệt độ cất, 90 % thể tích, T90 ATNBH	ASTM D 1160	360 max	357	⁰ C
11	Hàm lượng P	ASTM D 4951	10 max	4,3	mg/kg
12	Tổng hàm lượng Ca, Mg	EN 14538	5 max	3,2	mg/kg
13	Tổng hàm lượng Na, K	EN 14538	5 max		mg/kg
14	Độ ổn định oxy hóa	EN 14112	3 min	>24	giờ
15	Khối lượng riêng ở 40°C	ASTMD 1298	-	875	Kg/m ³
16	Sức căng bề mặt ở 40°C	ASTM D971	-	28,9	mN/m

Bảng PL 5. Kết quả phân tích nhiên liệu B5, B10, B20 và B50

TT	Tên chỉ tiêu	B5	B10	B20	B50	Phương pháp thử
1	Hàm lượng lưu huỳnh, mg/kg	313	315	312	310	ASTM D 2622
2	Trị số xêtan min	51	52	52,3	53,4	ASTM D 613
3	Nhiệt độ cất tại 90% thể tích thu hồi, °C	332	335	338	342	ASTM D 86
4	Điểm chớp cháy cốc kín, °C	62	64	67	69	ASTM D 93
5	Độ nhớt động học tại 40°C, mm ² /s	3,21	3,25	3,38	3,41	ASTM D 445
6	Điểm đông đặc, °C	+3	+3	+4	+4	ASTM D 97
7	Hàm lượng tro, % khối lượng	0,003	0,003	0,004	0,005	ASTM D 6304
8	Hàm lượng chất thơm đa vòng (PAH), % khối lượng	7	7,5	9	10	ASTM D 5186;
9	Hàm lượng metyl este axit béo (FAME), % thể tích	4,2	4,3	4,6	4,8	EN 14078
10	Độ ổn định oxy hóa, mg/100ml	17,31	18,24	77,27	26,25	ASTM D 7462; ASTM D 7545;
11	Khối lượng riêng ở 40°C	834	848	854	862	ASTMD 1298
12	Sức căng bề mặt ở 40°C	25,8	26,3	27,1	28,2	ASTM D971

Bảng PL 6. Tính toán We , v và L_h

TT	Nội dung	Kí hiệu	Đơn vị	Công thức	Kết quả
1	Khối lượng riêng của nhiên liệu	ρ_{nl}	kg/m ³	DO theo PL1	823
2	Sức căng bề mặt của nhiên liệu	σ	mN/m	DO theo PL1	25,4
3	Gia tốc trọng trường	g	m/s ²	Chỉ định	9,81
4	Đường kính trung bình của giọt nhiên liệu	D_d	m	Lựa chọn	0,0023
5	Số không thứ nguyên Weber	We		$We = \frac{\rho v^2 D_d}{\sigma}$	80 110 150
6	Vận tốc của giọt khi tương tác với bề mặt vách	v	m/s	$v = \sqrt{\frac{We\sigma}{\rho D_d}}$	1,03 1,21 1,42
7	Khoảng cách từ kim nhỏ đến bề mặt vách	L_h	m	$l = \frac{v^2}{2g}$	0,055 0,075 0,102

Bảng PL 7. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu DO và DO+1%L

STT	Nhiên liệu DO				DO+1%L	
	Giọt đơn		Giọt kép		Giọt đơn	
	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)
1	245	86,8	337	6,0	260	57,1
2	245	76,7	340	4,3	260	56,8
3	245	71,6	350	1,5	260	51,1
4	260	69,0	357	0,5	268	45,2
5	260	62,2	365	0,9	268	39,6
6	260	60,3	372	1,2	280	38,6
7	268	49,5	378	1,5	280	36,0
8	268	41,1	380	2,0	285	38,1
9	280	41,0	390	2,1	285	36,5
10	280	36,9	400	2,5	296	37,0
11	285	28,8	408	2,9	296	35,2
12	285	27,0	-	-	300	30,1
13	285	25,7	-	-	300	29,0
14	300	24,7	-	-	300	28,5
15	300	22,6	-	-	310	27,5
16	306	17,4	-	-	310	25,1
17	306	14,8	-	-	320	24,2
18	316	11,5	-	-	320	22,5
19	316	10,1	-	-	320	20,1
20	321	7,8	-	-	330	21,3
21	321	7,5	-	-	330	15,6
22	332	5,1	-	-	340	12,1
23	332	4,4	-	-	340	11,2
24	342	1,3	-	-	-	-
25	350	1,5	-	-	-	-
26	357	0,3	-	-	-	-
27	365	0,9	-	-	-	-
28	372	1,1	-	-	-	-

Bảng PL 8. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu DO+2%L

STT	Nhiên liệu DO+2%L			
	Giọt đơn		Giọt kép	
	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)
1	260	43,1	325	19,8
2	260	40,1	326	18,2
3	260	38,0	327	16,4
4	260	37,2	327	13,7
5	268	42,1	330	16,1
6	268	39,0	332	13,7
7	268	38,2	337	13,6
8	270	36,5	337	12,0
9	270	33,2	338	9,5
10	282	34,6	342	13,5
11	282	32,2	350	10,5
12	282	26,8	351	7,7
13	295	32,5	357	6,4
14	295	30,7	360	7,0
15	295	29,6	361	7,2
16	295	28,1	365	7,5
17	295	24,9	370	8,2
18	300	25,8	375	8,5
19	300	23,4	380	9,3
20	300	21,7	382	9,5
21	310	23,1	390	10,2
22	310	20,3	-	-
23	310	19,5	-	-
24	320	26,5	-	-
25	320	22,1	-	-
26	320	19,5	-	-
27	320	15,3	-	-
28	330	14,6	-	-
29	335	12,1	-	-
30	340	10,5	-	-
31	350	8,6	-	-
32	357	5,8	-	-
33	365	6,2	-	-
34	370	7,9	-	-
35	372	10,0	-	-
36	376	9,1	-	-
37	385	8,7	-	-
38	386	9,3	-	-
39	387	9,5	-	-

40	388	9,6	-	-
41	389	9,7	-	-
42	390	10,5	-	-
43	392	13,6	-	-

Bảng PL 9. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu Dodecan

STT	Nhiên liệu Dodecan			
	Giọt đơn		Giọt kép	
	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)
1	125	96	295	10,3
2	125	77	295	9,5
3	125	72	305	10,2
4	135	71	305	9,2
5	135	66	315	9,3
6	135	65	315	6,5
7	140	48	325	10,6
8	140	44	325	9,2
9	140	42	330	9,3
10	145	39	330	8,7
11	145	38	340	9,0
12	150	33	350	9,1
13	150	32	350	8,2
14	152	28	-	-
15	152	27	-	-
16	155	24	-	-
17	155	23	-	-
18	157	20	-	-
19	160	16	-	-
20	160	15	-	-
21	165	13	-	-
22	165	11	-	-
23	170	11	-	-
24	170	10	-	-
25	170	9	-	-
26	175	10	-	-
27	175	9	-	-
28	179	8	-	-
29	179	7	-	-
30	180	6	-	-
31	182	6	-	-
32	185	5	-	-
33	190	4	-	-
34	195	3	-	-

35	200	2	-	-
36	205	1,5	-	-
37	210	1	-	-
38	215	0,5	-	-
39	220	0,5	-	-
40	225	1	-	-
41	230	1,5	-	-
42	235	1,8	-	-
43	240	2	-	-
44	245	2,5	-	-
45	250	3	-	-
46	255	3,8	-	-
47	260	4,5	-	-
48	265	5,0	-	-
49	270	6,3	-	-
50	275	7,5	-	-
51	280	8,6	-	-
52	285	10,2	-	-
53	285	9,5	-	-
54	290	12	-	-
55	290	11	-	-

Bảng PL 10. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu B100

STT	Nhiên liệu B100			
	Giọt đơn		Giọt kép	
	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)
1	300	100	340	11,6
2	300	72	340	10,0
3	310	82	345	11,0
4	310	81	345	9,5
5	310	80	345	8,8
6	315	60	350	6,7
7	315	58	350	4,1
8	315	50	355	0,4
9	320	35	-	-
10	320	34	-	-
11	320	30	-	-
12	330	46	-	-
13	330	41	-	-
14	330	31	-	-
15	335	24	-	-
16	335	21	-	-

17	335	18	-	-
18	355	0,5	-	-
19	360	0,7	-	-
20	365	0,9	-	-
21	370	1,0	-	-
22	375	1,2	-	-
23	380	1,5	-	-
24	385	1,8	-	-
25	390	2,0	-	-
26	395	1,8	-	-
27	400	2,2	-	-
28	405	2,5	-	-
29	410	2,0	-	-

Bảng PL 11. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu B50

STT	Nhiên liệu B50			
	Giọt đơn		Giọt kép	
	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)
1	285	96	-	-
2	300	70	-	-
3	300	61	-	-
4	300	57	-	-
5	305	41	-	-
6	305	38	-	-
7	305	36	-	-
8	315	25	-	-
9	315	22	-	-
10	315	20	-	-
11	330	19	-	-
12	330	18	-	-
13	330	16	-	-
14	340	20	-	-
15	340	26	-	-
16	345	13	-	-
17	345	12	-	-
18	347	12	-	-
19	347	10	-	-
20	350	12	-	-
21	350	10	-	-
22	352	8	-	-
23	352	7	-	-
24	360	7	-	-

25	360	6	-	-
26	365	4	-	-
27	375	4	-	-
28	375	3	-	-
29	380	3	-	-
30	380	2	-	-
31	385	4	-	-
32	385	3	-	-
33	390	4	-	-
34	390	3,5	-	-
35	395	4	-	-
36	395	3,5	-	-
37	398	4,5	-	-
38	398	3,5	-	-

Bảng PL 12. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu B20

STT	Nhiên liệu B20			
	Giọt đơn		Giọt kép	
	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)
1	300	105	365	1
2	300	102	370	2
3	300	77	375	3
4	310	87	380	3,5
5	310	77	385	4
6	310	70	390	5
7	320	52	395	5,5
8	320	45	400	5
9	320	44	-	-
10	325	44	-	-
11	325	40	-	-
12	325	36	-	-
13	330	29	-	-
14	330	27	-	-
15	330	20	-	-
16	335	2	-	-
17	340	2,5	-	-
18	340	1,5	-	-
19	345	2	-	-
20	345	1,5	-	-
21	350	1	-	-
22	355	1	-	-
23	362	0,5	-	-
24	-	-	-	-

25	-	-	-	-
26	-	-	-	-
27	-	-	-	-
28	-	-	-	-
29	-	-	-	-

Bảng PL 13. Kết quả thử nghiệm bay hơi (TNBH) với nhiên liệu B5

STT	Nhiên liệu B5			
	Giọt đơn		Giọt kép	
	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)	Nhiệt độ bề mặt vách (°C)	Thời gian (s)
1	250	109,5	345	2
2	250	106	350	3
3	250	83	357	2
4	270	78	357	1
5	270	57	365	5
6	270	48	365	4
7	285	42	370	9
8	285	41	370	7
9	285	40	375	10
10	290	29	375	9
11	290	23	380	11
12	290	21	380	7
13	300	22	385	10
14	300	20	385	9
15	300	19	390	10
16	315	28	390	8
17	315	21	395	11
18	315	20	395	10
19	320	23	400	6
20	320	21	400	5,5
21	320	18	-	-
22	325	21	-	-
23	325	14	-	-
24	325	12	-	-
25	330	13	-	-
26	330	9	-	-
27	335	8	-	-
28	335	7,5	-	-
29	340	5	-	-
30	340	4,5	-	-

1. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên mô hình vách buồng cháy (TNCMH)

1.1. Thử nghiệm 1

- Điều kiện thử nghiệm:

Bảng PL 14. Điều kiện thử nghiệm với TNCMH của các nhiên liệu ở 1 mức nhiệt độ bề mặt vách

Loại nhiên liệu	Thời gian va chạm của giọt với	Nhiệt độ bề mặt vách
	τ_{vc} (s)	T_{bm} (°C)
DO	8	270
DO+1%L		
DO+2%L		

- Kết quả thử nghiệm:

Bảng PL 15. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên TNCMH của nhiên liệu DO

STT	Số giọt	Khối lượng của một giọt nhiên liệu đơn	Khối lượng tích lũy của giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng những giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách
	N_D	m_D [g]	M_d [g]	M_D [g]	M_R [g]
Nhiên liệu DO					
1	1000	0.0053	5.3	5.3	0.0121
2	2000	0.0053	5.3	10.6	0.0191
3	3000	0.0053	5.3	15.9	0.0250
4	4000	0.0053	5.3	21.2	0.0261
5	5000	0.0053	5.3	26.5	0.0283
6	6000	0.0053	5.3	31.8	0.0325
7	7000	0.0053	5.3	37.1	0.0331
8	8000	0.0053	5.3	42.4	0.0337
9	9000	0.0053	5.3	47.7	0.0348
10	10000	0.0053	5.3	53	0.0385
11	11000	0.0053	5.3	58.3	0.0382
12	12000	0.0053	5.3	63.6	0.0425
13	13000	0.0053	5.3	68.9	-
14	14000	0.0053	5.3	74.2	-
15	15000	0.0053	5.3	79.5	-
16	16000	0.0053	5.3	84.8	-
17	17000	0.0053	5.3	90.1	-
18	18000	0.0053	5.3	95.4	-
19	19000	0.0053	5.3	100.7	-
20	20000	0.0053	5.3	106	-

Bảng PL 16. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên TNCMH của nhiên liệu DO+1%L

STT	Số giọt	Khối lượng của một giọt nhiên liệu đơn	Khối lượng tích lũy của giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng những giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách
	N _D	m _D [g]	M _d [g]	M _D [g]	M _R [g]
Nhiên liệu DO+1%L					
1	1000	0.0053	5.3	5.3	0.0121
2	2000	0.0053	5.3	10.6	0.0195
3	3000	0.0053	5.3	15.9	0.0255
4	4000	0.0053	5.3	21.2	0.0322
5	5000	0.0053	5.3	26.5	0.0368
6	6000	0.0053	5.3	31.8	0.0329
7	7000	0.0053	5.3	37.1	0.0397
8	8000	0.0053	5.3	42.4	0.0461
9	9000	0.0053	5.3	47.7	0.0467
10	10000	0.0053	5.3	53	0.0509
11	11000	0.0053	5.3	58.3	0.0562
12	12000	0.0053	5.3	63.6	0.0595
13	13000	0.0053	5.3	68.9	0.0628
14	14000	0.0053	5.3	74.2	0.0675
15	15000	0.0053	5.3	79.5	0.0762
16	16000	0.0053	5.3	84.8	0.0787
17	17000	0.0053	5.3	90.1	0.0891
18	18000	0.0053	5.3	95.4	0.0901
19	19000	0.0053	5.3	100.7	0.0972
20	20000	0.0053	5.3	106	-

Bảng PL 17. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên TNCMH của nhiên liệu DO+2%L

STT	Số giọt	Khối lượng của một giọt nhiên liệu đơn	Khối lượng tích lũy của giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng những giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách
	N _D	m _D [g]	M _d [g]	M _D [g]	M _R [g]
Nhiên liệu DO+2%L					
1	1000	0.0055	5.5	5.5	0.0249
2	2000	0.0055	5.5	11	0.0475
3	3000	0.0055	5.5	16.5	0.0677
4	4000	0.0055	5.5	22	0.0861
5	5000	0.0055	5.5	27.5	0.1027
6	6000	0.0055	5.5	33	0.1204
7	7000	0.0055	5.5	38.5	0.1475
8	8000	0.0055	5.5	44	0.1683

STT	Số giọt	Khối lượng của một giọt nhiên liệu đơn	Khối lượng tích lũy của giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng những giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách
	N_D	m_D [g]	M_d [g]	M_D [g]	M_R [g]
9	9000	0.0055	5.5	49.5	0.1862
10	10000	0.0055	5.5	55	0.2187
11	11000	0.0055	5.5	60.5	0.2402
12	12000	0.0055	5.5	66	0.2677
13	13000	0.0055	5.5	71.5	0.3083
14	14000	0.0055	5.5	77	0.3368
15	15000	0.0055	5.5	82.5	0.3597
16	16000	0.0055	5.5	88	0.3888
17	17000	0.0055	5.5	93.5	0.4229
18	18000	0.0055	5.5	99	0.4525
19	19000	0.0055	5.5	104.5	0.4403
20	20000	0.0055	5.5	110	0.0249

1.2. Thử nghiệm 2

- Điều kiện thử nghiệm:

Bảng PL 18. Điều kiện thử nghiệm với TNCMH của nhiên liệu DO ở các mức nhiệt độ bề mặt vách

Loại nhiên liệu	Thời gian va chạm của giọt với	Nhiệt độ bề mặt vách	Khối lượng trung bình 1 giọt
	τ_{vc} (s)	T_{bm} (°C)	m_D, t_b (mg)
DO	5	270	5,4
		306	
		327	
		352	
		367	

- Kết quả thử nghiệm :

Bảng PL 19. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên TNCMH của nhiên liệu DO ở các mức nhiệt độ bề mặt vách khác nhau

STT	Số giọt	Tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách, M_R (g)				
		270°C	306°C	327°C	352°C	367°C
1	1000	0,006	0,0001	0,0028	0,0008	-
2	2000	0,018	0,0011	0,0029	0,001	-
3	3000	0,026	0,0014	0,003	0,0012	0,0001

4	4000	0,029	0,0016	0,0031	0,0005	0,00042
5	5000	0,033	0,0019	0,0031	0,0012	0,00054
6	6000	0,035	0,0022	0,0032	0,0018	0,00053
7	7000	0,038	0,0024	0,0031	0,0011	0,00012
8	8000	0,041	0,0025	0,0018	0,0015	0,0001
9	9000	0,042	0,0028	0,0033	0,0015	0,001
10	10000	0,044	0,0029	0,0021	0,0017	0,00075
11	11000	0,045	0,0031	0,0033	-	0,00072
12	12000	0,046	0,0033	0,0022	-	0,00078
13	13000	0,049	0,0034	0,0022	-	0,00082
14	14000	0,05	0,0036	0,0023	-	0,00079
15	15000	0,051	0,0038	0,0023	-	0,00089
16	16000	0,053	0,0039	0,0024	-	0,0013
17	17000	0,054	0,0041	0,0025	-	0,00095
18	18000	0,055	0,0042	0,0027	-	0,00099
19	19000	0,055	0,0044	0,0028	-	0,0012

1.3. Thử nghiệm 3

- Điều kiện thử nghiệm:

Bảng PL 20. Điều kiện thử nghiệm với TNCMH của nhiên liệu B100, B50, B20 và B5 ở 1 mức nhiệt độ bề mặt vách và 2 mức thời gian va chạm của giọt với vách

Loại nhiên liệu	Thời gian va chạm của giọt với	Nhiệt độ bề mặt vách	Khối lượng trung bình 1 giọt
	τ_{vc} (s)	T_{bm} (°C)	m_D, t_b (mg)
B100	5 và 8	352°C	5,9
B50	5 và 8	352°C	5,6 và 5,7
B20	5 và 8	352°C	5,4 và 5,4
B5	5 và 8	352°C	5,4 và 5,6

- Kết quả thử nghiệm:

Bảng PL 21. Kết quả thử nghiệm tạo cặn trên TNCMH của nhiên liệu B100, B50, B20 và B5

ST T	Số giọt	Tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách, M_R (g)							
	N_D	B100		B50		B20		B5	
		5s	8s	5s	8s	5s	8s	5s	8s

1	1000	0,008 2		0,00 5	0,0004	0,009	0,012	0,00 7	0,000 9
2	2000	0,014 8	0,000 5	0,00 8	0,0001	0,02	0,016 7	0,01 2	0,000 7
3	3000	0,021	0,000 7	0,01 1	0,0004	0,032	0,022	0,01 5	0,000 8
4	4000	0,03	0,001 8	0,01 2	0,0015	0,043	0,027	0,01 7	0,001 8
5	5000	0,038	0,001 9	0,01 5	0,0017	0,044	0,031	0,01 9	0,002
6	6000	0,047	0,002 1	0,01 6	0,0016	0,047	0,034	0,02 1	0,001 7
7	7000	0,055	0,002 5	0,01 8	0,0016	0,051	0,039	0,02 2	0,002 2
8	8000	0,063	0,002 6	0,01 8	0,0013	0,052	0,044	0,02 1	0,002 6
9	9000	0,071	0,003 1	0,02	0,0019	0,054	0,048	0,02 3	0,002 8
10	1000 0	-	0,002 4	0,02 2	0,0021	0,057	-	0,02 4	-
11	1100 0	-	0,002 8	0,02 3	0,0023	0,058	-	0,02 6	-
12	1200 0	-	0,002 2	0,02 5	-	0,061	-	0,02 7	-
13	1300 0	-	0,003 1	0,02 7	-	0,062	-	0,02 9	-
14	1400 0	-	0,003 5	0,02 8	-	0,065	-	0,03	-
15	1500 0	-	0,003 9	0,03 2	-	-	-	0,03 1	-

2. Nhiệt độ bề mặt cặn

2.1. Thử nghiệm 1:

- Điều kiện thử nghiệm:

Nhiên liệu: diesel DO, DO+1%L, DO+2%L

Nhiệt độ bề mặt vách: 270°C

Thời gian va chạm: 8s

Bảng PL 22. Nhiệt độ bề mặt cặn trong TNCMH của nhiên liệu DO, DO+1%L và DO+2%L

STT	Số gọt	Nhiệt độ bề mặt cặn (°C)					
		DO		DO+1%L		DO+2%L	
		min	max	min	max	min	max
1	200	262	268	267	270	267	270
2	400	262	268	268	270	267	271
3	600	261	267	267	269	266	269
4	800	262	267	266	269	263	267
5	1000	261	267	266	268	262	268
6	1200	260	268	265	269	262	267
7	1400	261	267	265	268	262	269
8	1600	261	267	266	269	261	267
9	1800	261	268	265	267	260	268
10	2000	260	267	265	269	255	266
11	2200	262	267	266	268	260	266
12	2400	261	266	264	269	259	265
13	2600	260	266	265	269	259	265
14	2800	261	265	265	268	257	264
15	3000	260	266	264	267	256	264
16	3200	260	266	264	266	259	265
17	3400	260	265	265	267	259	264
18	3600	261	266	265	267	260	264
19	3800	261	265	265	268	258	263
20	4000	260	264	266	268	256	263
21	4200	261	265	265	267	256	264
22	4400	261	266	265	268	255	263
23	4600	262	266	266	267	254	263
24	4800	260	265	264	269	255	262

25	5000	262	266	265	267	254	260
26	5200	262	265	266	268	255	260
27	5400	261	266	263	267	254	260
28	5600	261	266	265	267	255	260
29	5800	261	265	266	269	253	260
30	6000	260	266	264	267	250	259
31	6200	260	266	264	267	251	256
32	6400	261	265	263	268	252	257
33	6600	261	266	264	267	251	257
34	6800	260	266	264	268	251	256
35	7000	260	265	263	268	252	256
36	7200	260	266	263	267	251	255
37	7400	259	265	263	268	250	256
38	7600	259	265	263	267	251	255
39	7800	259	266	262	267	250	254
40	8000	259	266	261	267	251	253
41	8200	258	265	262	266	250	252
42	8400	257	266	261	267	251	253
43	8600	258	266	260	266	250	252
44	8800	257	265	261	267	250	252
45	9000	256	266	260	266	250	251
46	9200	255	266	261	266	251	253
47	9400	254	265	260	267	250	252
48	9600	255	265	262	266	250	251
49	9800	254	266	261	266	250	251
50	10000	250	266	260	267	251	252
51	10200	254	267	260	266	250	251
52	10400	255	265	258	265	250	252
53	10600	254	264	259	267	251	251
54	10800	256	266	257	266	251	252
55	11000	255	265	255	265	250	251
56	11200	254	265	259	266	251	251

57	11400	256	267	260	265	250	252
58	11600	255	266	259	265	250	251
59	11800	254	267	260	266	251	251
60	12000	255	267	260	267	250	251
61	12200	-	-	259	266	-	-
62	12400	-	-	259	267	-	-
63	12600	-	-	258	266	-	-
64	12800	-	-	259	265	-	-
65	13000	-	-	258	266	-	-
66	13200	-	-	258	266	-	-
67	13400	-	-	257	265	-	-
68	13600	-	-	256	266	-	-
69	13800	-	-	255	265	-	-
70	14000	-	-	255	263	-	-
71	14200	-	-	254	264	-	-
72	14400	-	-	256	263	-	-
73	14600	-	-	255	264	-	-
74	14800	-	-	254	263	-	-
75	15000	-	-	256	262	-	-
76	15200	-	-	253	263	-	-
77	15400	-	-	254	262	-	-
78	15600	-	-	254	263	-	-
79	15800	-	-	252	261	-	-
80	16000	-	-	250	261	-	-
81	16200	-	-	251	260	-	-
82	16400	-	-	255	261	-	-
83	16600	-	-	254	260	-	-
84	16800	-	-	255	261	-	-
85	17000			253	262		
86	17200			250	260		
87	17400			252	263		
88	17600			253	260		

89	17800			252	258		
90	18000			251	259		
91	18200			253	260		
92	18400			251	260		
93	18600			251	259		
94	18800			250	261		
95	19000			253	260		

CHI CỤC TIÊU CHUẨN ĐO LƯỜNG CHẤT LƯỢNG THÀNH PHỐ HẢI PHÒNG
TRUNG TÂM KỸ THUẬT TIÊU CHUẨN ĐO LƯỜNG CHẤT LƯỢNG HẢI PHÒNG
Địa chỉ : Số 240 Văn Cao - P. Đằng Giang - Q. Ngô Quyền - TP. Hải Phòng
Tel: (+84) 31 3553 999 - 31 3732 694 Fax: (+84) 31 3553 999

Số: 486.17/TN1-TTKTTĐC

Trang 1/4

KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

1. Chỉ tiêu thử nghiệm: Cặn lắng
2. Thiết bị đo: Mô hình thực nghiệm xác định sự hình thành cặn lắng trên bề mặt vách buồng cháy (TNCMH)
3. Cửa cơ sở: Phòng thí nghiệm máy diesel
Viện nghiên cứu Phát triển - Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam
4. Địa chỉ: 484 Lạch Tray, Q. Ngô Quyền, TP. Hải Phòng
5. Số lượng mẫu đo: 03 mẫu (DF, DF+1%L, DF+2%L)
6. Ký hiệu: 515-517/17/HS
7. Ngày thử nghiệm: 28/08/2017
8. Cán bộ thực hiện: Phạm Văn Thuận, Ngô Thu Trang, Đặng Ngọc Tôn Quyền

KẾT QUẢ

- Điều kiện thử nghiệm:

Loại nhiên liệu	Thời gian va chạm của giọt với vách	Nhiệt độ bề mặt vách
	τ_{imp} (s)	T_s (°C)
DF	8	270
DF+1%L		
DF+2%L		

1. Kết quả này chỉ có giá trị đối với mẫu thử do khách hàng đưa tới.
2. Không được trích, sao kết quả này nếu không được sự đồng ý của phòng thử nghiệm.
3. Tên mẫu và tên khách hàng được ghi theo yêu cầu của khách hàng.
(*): Chỉ tiêu đã được VILAS công nhận
(**): Chỉ tiêu được phân tích tại nhà thầu phụ

BM-KN-01-03

11-11-2012

- Kết quả thử nghiệm:
+ Nhiên liệu DF

STT	Số giọt	Khối lượng của một giọt nhiên liệu đơn	Khối lượng tích lũy của giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng những giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách
	N _D	m _D [g]	M _D [g]	M _D [g]	M _R [g]
Nhiên liệu DF					
1	1000	0.0053	5.3	5.3	0.0121
2	2000	0.0053	5.3	10.6	0.0191
3	3000	0.0053	5.3	15.9	0.0250
4	4000	0.0053	5.3	21.2	0.0261
5	5000	0.0053	5.3	26.5	0.0283
6	6000	0.0053	5.3	31.8	0.0325
7	7000	0.0053	5.3	37.1	0.0331
8	8000	0.0053	5.3	42.4	0.0337
9	9000	0.0053	5.3	47.7	0.0348
10	10000	0.0053	5.3	53	0.0385
11	11000	0.0053	5.3	58.3	0.0382
12	12000	0.0053	5.3	63.6	0.0425
13	13000	0.0053	5.3	68.9	-
14	14000	0.0053	5.3	74.2	-
15	15000	0.0053	5.3	79.5	-
16	16000	0.0053	5.3	84.8	-
17	17000	0.0053	5.3	90.1	-
18	18000	0.0053	5.3	95.4	-
19	19000	0.0053	5.3	100.7	-
20	20000	0.0053	5.3	106	-

1. Kết quả này chỉ có giá trị đối với mẫu thử do khách hàng đưa tới.
 2. Không được trích, sao kết quả này nếu không được sự đồng ý của phòng thử nghiệm.
 3. Tên mẫu và tên khách hàng được ghi theo yêu cầu của khách hàng.
- (*) : Chỉ tiêu đã được VILAS công nhận
(* *) : Chỉ tiêu được phân tích tại nhà thầu phụ

+ Nhiên liệu DF+1%L

STT	Số giọt	Khối lượng của một giọt nhiên liệu đơn	Khối lượng tích lũy của giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng những giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách
	N ₀	m ₀ [g]	M ₀ [g]	M ₀ [g]	M _k [g]
Nhiên liệu DF+1%L					
1	1000	0.0053	5.3	5.3	0.0121
2	2000	0.0053	5.3	10.6	0.0195
3	3000	0.0053	5.3	15.9	0.0255
4	4000	0.0053	5.3	21.2	0.0322
5	5000	0.0053	5.3	26.5	0.0368
6	6000	0.0053	5.3	31.8	0.0329
7	7000	0.0053	5.3	37.1	0.0397
8	8000	0.0053	5.3	42.4	0.0461
9	9000	0.0053	5.3	47.7	0.0467
10	10000	0.0053	5.3	53	0.0509
11	11000	0.0053	5.3	58.3	0.0562
12	12000	0.0053	5.3	63.6	0.0595
13	13000	0.0053	5.3	68.9	0.0628
14	14000	0.0053	5.3	74.2	0.0675
15	15000	0.0053	5.3	79.5	0.0762
16	16000	0.0053	5.3	84.8	0.0787
17	17000	0.0053	5.3	90.1	0.0891
18	18000	0.0053	5.3	95.4	0.0901
19	19000	0.0053	5.3	100.7	0.0972
20	20000	0.0053	5.3	106	-

- Kết quả này chỉ có giá trị đối với mẫu thử do khách hàng đưa tới.
 - Không được trích, sao kết quả này nếu không được sự đồng ý của phòng thử nghiệm.
 - Tên mẫu và tên khách hàng được ghi theo yêu cầu của khách hàng.
- (*) : Chỉ tiêu đã được VILAS công nhận
 (* *) : Chỉ tiêu được phân tích tại nhà thầu phụ

+ Nhiên liệu DF+2%L

STT	Số giọt	Khối lượng của một giọt nhiên liệu đơn	Khối lượng tích lũy của giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng những giọt nhiên liệu	Tổng khối lượng cặn trên bề mặt vách
	N _D	m _D [g]	M _D [g]	M _D [g]	M _R [g]
Nhiên liệu DF+2%L					
1	1000	0.0055	5.5	5.5	0.0249
2	2000	0.0055	5.5	11	0.0475
3	3000	0.0055	5.5	16.5	0.0677
4	4000	0.0055	5.5	22	0.0861
5	5000	0.0055	5.5	27.5	0.1027
6	6000	0.0055	5.5	33	0.1204
7	7000	0.0055	5.5	38.5	0.1475
8	8000	0.0055	5.5	44	0.1683
9	9000	0.0055	5.5	49.5	0.1862
10	10000	0.0055	5.5	55	0.2187
11	11000	0.0055	5.5	60.5	0.2402
12	12000	0.0055	5.5	66	0.2677
13	13000	0.0055	5.5	71.5	0.3083
14	14000	0.0055	5.5	77	0.3368
15	15000	0.0055	5.5	82.5	0.3597
16	16000	0.0055	5.5	88	0.3888
17	17000	0.0055	5.5	93.5	0.4229
18	18000	0.0055	5.5	99	0.4525
19	19000	0.0055	5.5	104.5	0.4403
20	20000	0.0055	5.5	110	0.0249

Hải Phòng, ngày 30 tháng 8 năm 2017

CÁN BỘ KIỂM NGHIỆM

PHỤ TRÁCH BỘ PHẬN KN

GIÁM ĐỐC



Ngô Thị Thu Trang



Đặng Ngọc Tôn Quyền



PHÓ GIÁM ĐỐC

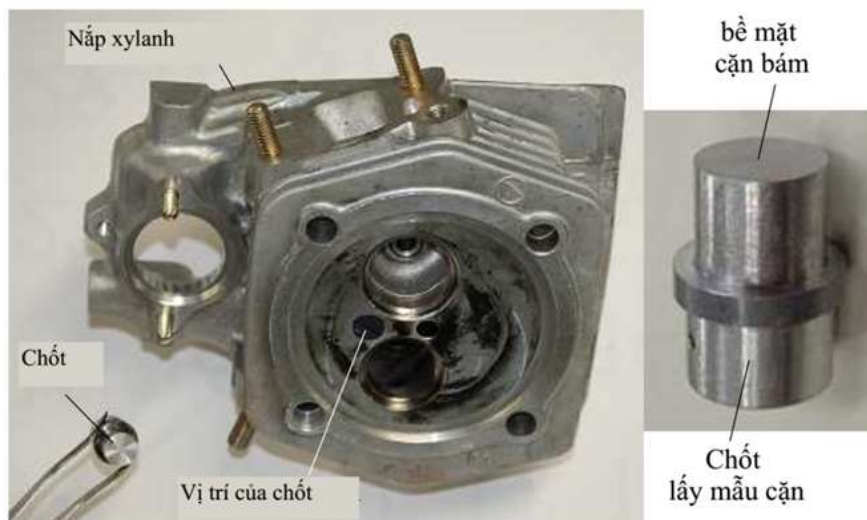


- Kết quả này chỉ có giá trị đối với mẫu thử do khách hàng đưa tới.
 - Không được trích, sao kết quả này nếu không được sự đồng ý của phòng thử nghiệm.
 - Tên mẫu và tên khách hàng được ghi theo yêu cầu của khách hàng.
- (*) : Chỉ tiêu đã được VILAS công nhận
 (**): Chỉ tiêu được phân tích tại nhà thầu phụ

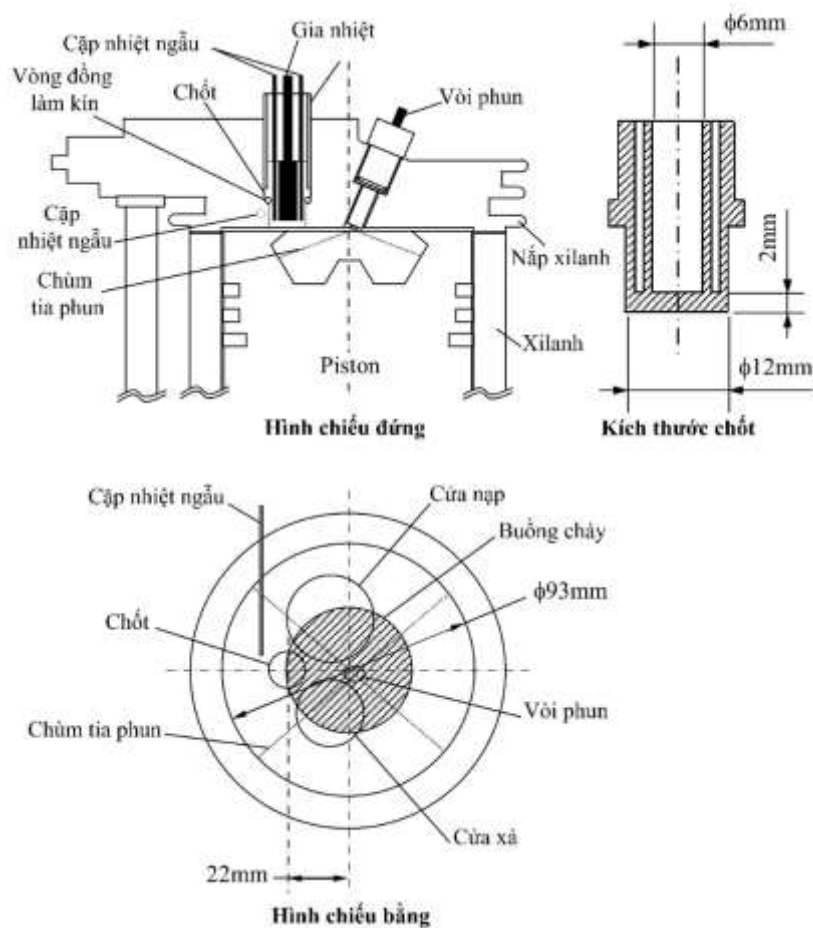
BM-KN-01-03

11-11-2012

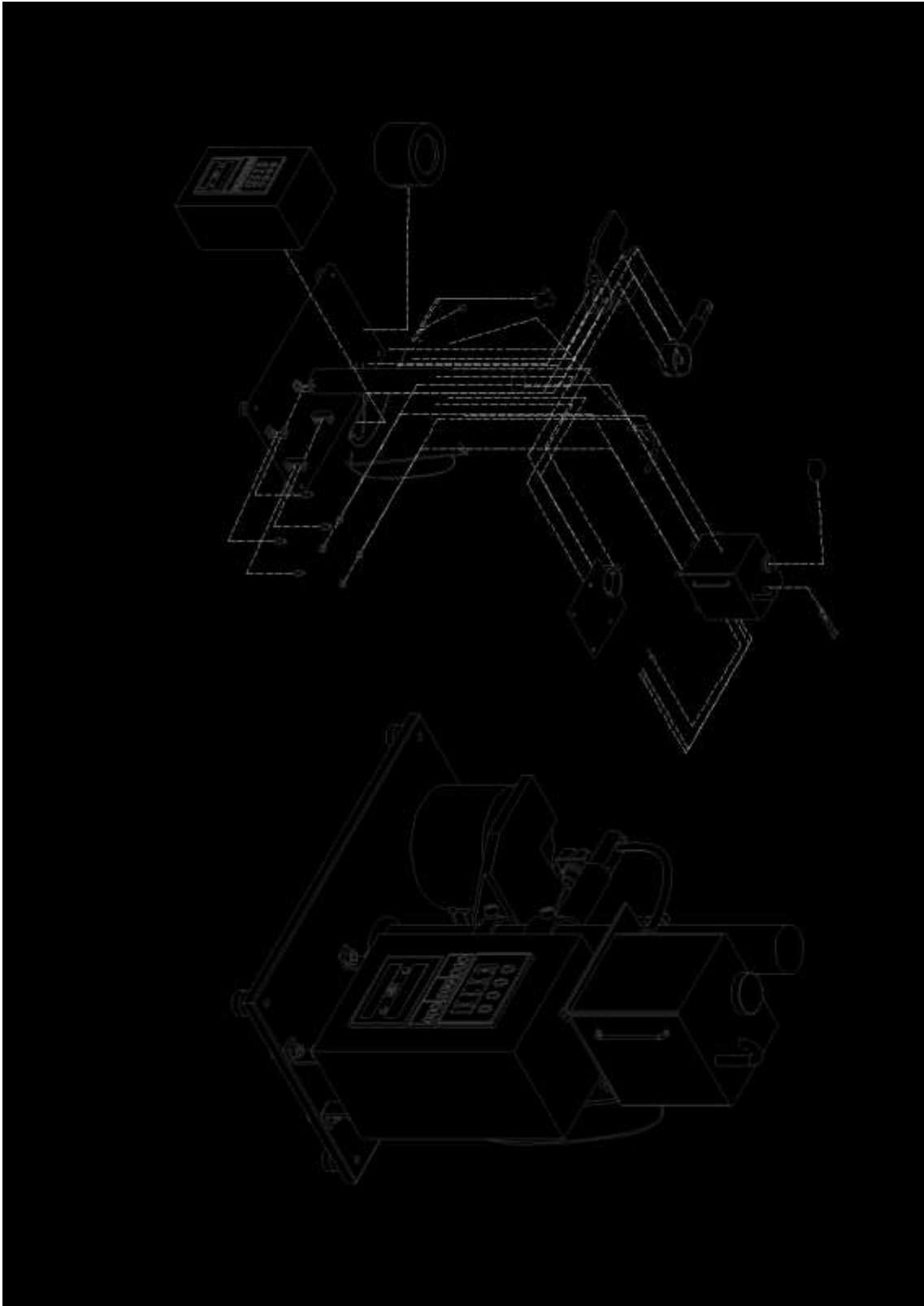
Hình PL 1. Kết quả thử nghiệm bằng mô hình TNCMH được xác nhận bởi chi cục tiêu chuẩn đo lường chất lượng Hải Phòng



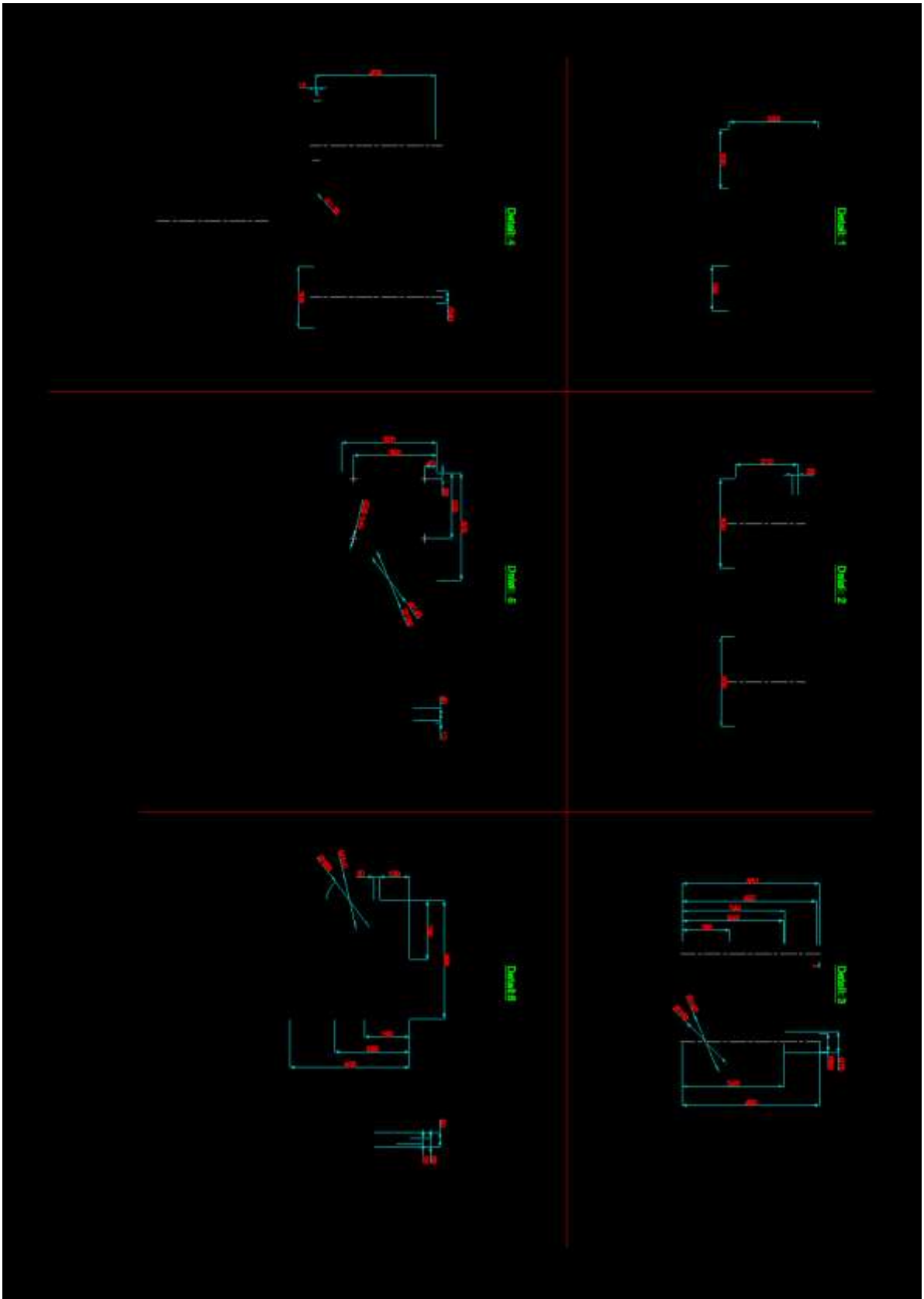
Hình PL 2. Hình dạng và vị trí của chốt trên nắp xi lanh



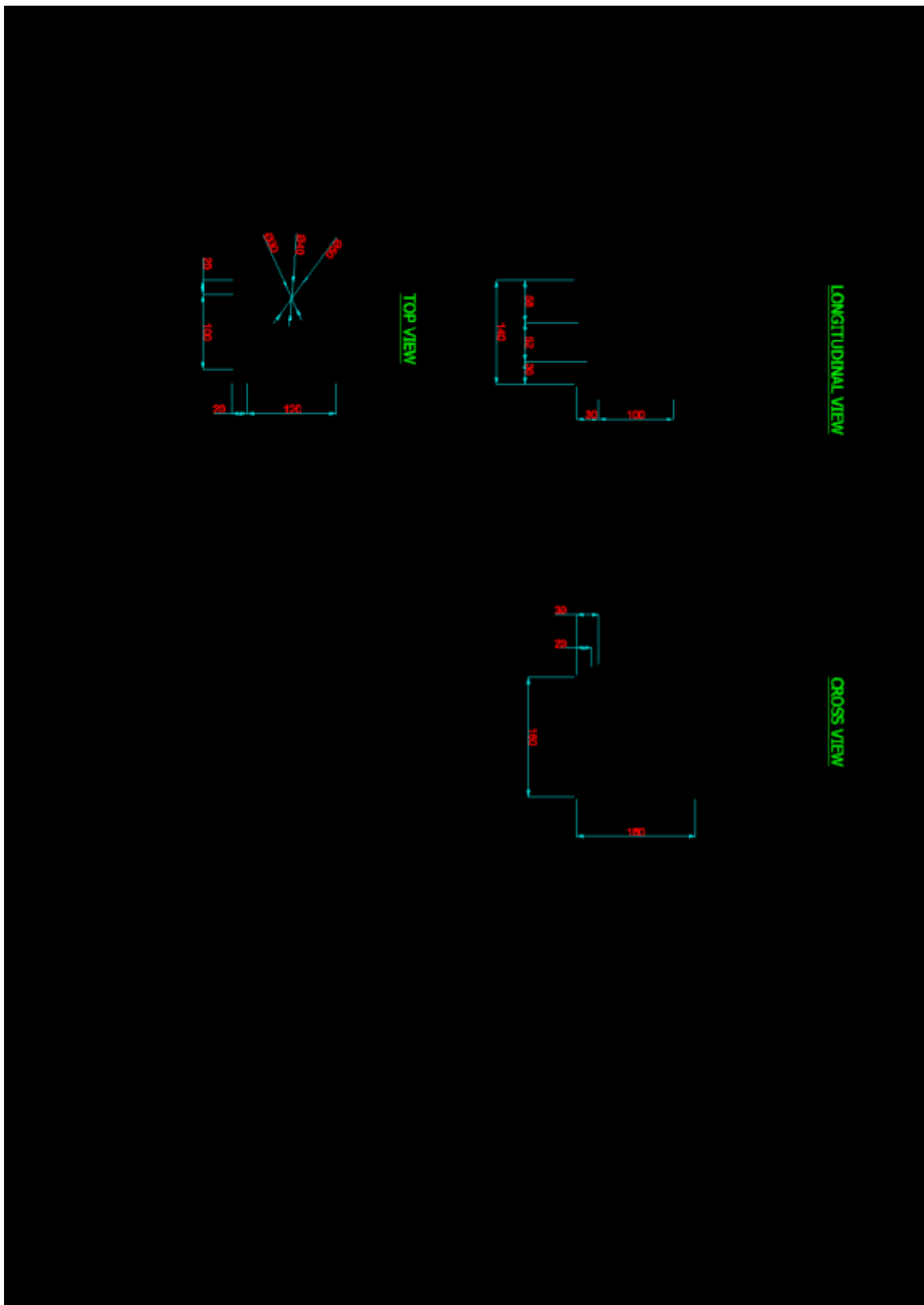
Hình PL 3. Kích thước và vị trí chốt trên động cơ DY41DS



Hình PL 4. Bản vẽ thiết kế mô hình thử nghiệm TNCMH



Hình PL 5. Bản vẽ các chi tiết trong mô hình thử nghiệm TNCMH



Hình PL 6. Bản vẽ thiết kế kết cấu chứa nhiên liệu của mô hình thử nghiệm TNCMH



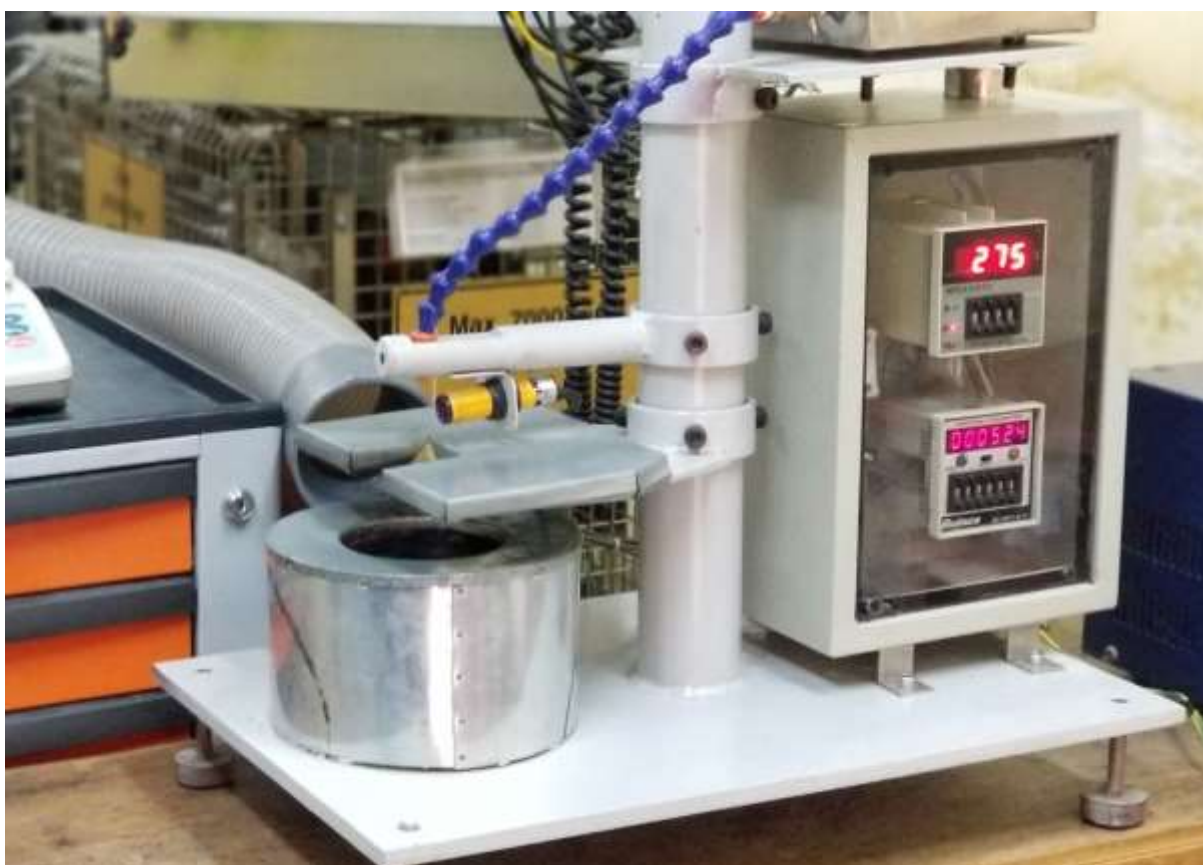
Hình PL 7. Hình ảnh mô hình TNCMH khi bắt đầu quá trình thử nghiệm



Hình PL 8. Hình ảnh mô hình TNCMH khi có cặn



Hình PL 9. Hình ảnh mô hình TNCMH khi có chặn



Hình PL 10. Hình ảnh toàn mô hình TNCMH



Hình PL 11. Hình ảnh trang thiết bị mô hình TNCMH



Hình PL 12. Hình ảnh trang thiết bị mô hình TNCMH



Hình PL 13. Hình ảnh tác giả thực hiện thử nghiệm



Hình PL 14. Hình ảnh tác giả thực hiện thử nghiệm tại phòng thí nghiệm



Hình PL 15. Hình ảnh các giảng viên và nhà khoa học Bộ môn Máy tàu thủy chứng kiến quá trình thử nghiệm TNCMH



Hình PL 16. Hình ảnh các sinh viên, giảng viên và nhà khoa học Bộ môn Máy tàu thủy chứng kiến quá trình thử nghiệm TNCMH