

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI**

**PHẠM VĂN TOẢN**

**SỬ DỤNG MÔ HÌNH HÓA NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH  
LÀM VIỆC VÀ PHÁT THẢI CỦA ĐỘNG CƠ CHẠY  
BẰNG NHIÊN LIỆU KHÍ GIÀU HYDRO**

**Chuyên ngành : KỸ THUẬT CƠ KHÍ ĐỘNG LỰC**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:  
TS. TRẦN QUANG VINH**

**HÀ NỘI- NĂM 2014**

## **LỜI CAM ĐOAN**

*Tôi xin cam đoan đây là đề tài nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu kết quả nêu trong luận văn là trung thực và chưa từng được ai công bố trong các công trình nào khác.*

*Hà Nội, ngày 13 tháng 05 năm 2014*

**Học viên**

**Phạm Văn Toàn**

## LỜI CẢM ƠN

Với tư cách là tác giả của bản luận văn này, tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến TS. Trần Quang Vinh, người thầy đã hướng dẫn tận tình, chu đáo và khoa học trong suốt thời gian tôi thực hiện luận văn.

Chân thành cảm ơn các thầy cô trong Bộ môn Động cơ đốt trong, Phòng thí nghiệm Động cơ đốt trong, Viện Cơ khí Động lực, Viện Đào tạo Sau đại học, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội tạo điều kiện về thời gian, vật chất lẫn tinh thần để tôi có thể hoàn thành luận văn đúng tiến độ và chất lượng.

Cuối cùng tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành tới gia đình và bạn bè, những người đã động viên và chia sẻ với tôi trong suốt thời gian tôi tham gia học tập và làm luận văn.

*Học viên*

**Phạm Văn Toàn**

## MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	i
LỜI CẢM ƠN.....	ii
MỤC LỤC .....	iii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT .....	vi
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU .....	vii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ.....	viii
LỜI NÓI ĐẦU.....	x
TỔNG QUAN VỀ ĐỀ TÀI NGHIÊN CỨU .....	xi
1. Lý do chọn đề tài .....	xi
2. Mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu của đề tài.....	xii
3. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn .....	xii
4. Các nội dung thực hiện của đề tài.....	xiii
5. Phương pháp nghiên cứu .....	xiii
<b>CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ NHIÊN LIỆU KHÍ GIÀU HYĐRÔ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Giới thiệu chung về nhiên liệu hydro .....	1
1.1.1. Tính chất hóa lý cơ bản của hydro .....	1
1.1.2. Các phương pháp sản xuất hydro.....	1
1.1.2.1. Điện phân nước.....	1
1.1.2.3. Sự khí hoá .....	2
1.2. Nhiên liệu khí hydro .....	2
1.3. Nghiên cứu sử dụng khí giàu hydro trên động cơ xăng.....	3
1.3.1. Tính chất của nhiên liệu xăng và hydro.....	3
1.3.2. Giới thiệu đặc điểm động cơ xăng.....	3
1.3.3. Nghiên cứu sử dụng khí giàu hydro trên động cơ xăng.....	4
1.4. Kết luận chương 1 .....	10
<b>CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP SẢN XUẤT KHÍ GIÀU HYĐRÔ ĐỂ CUNG CẤP CHO ĐỘNG CƠ .....</b>	<b>11</b>
2.1. Phương pháp chuyển đổi nước thành hỗn hợp khí giàu hydro .....	11
2.1.1. Cơ sở lý thuyết.....	11
2.1.1.1. Tỷ lệ hydro và oxy trong hỗn hợp khí .....	11

2.1.1.2. Thể tích khí thu được ở điều kiện tiêu chuẩn .....	11
2.1.1.3. Khối lượng riêng khí HHO .....	12
2.1.2. Quy trình và thiết bị .....	12
2.1.2.1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống thiết bị sản xuất khí HHO quy mô nhỏ .....	13
2.1.2.2. Các chi tiết chính trong thiết bị sản xuất khí HHO .....	13
2.1.3. Sản xuất khí HHO theo phương pháp điện phân nước .....	17
2.1.3.1. Nước dùng để sản xuất khí HHO .....	17
2.1.3.3. Điện áp nguồn .....	18
2.1.3.4. Kết quả sản xuất khí HHO từ nước .....	18
2.1.3.5. Tính toán chi phí và giá thành .....	18
2.2. Phương pháp tách một phần nhiên liệu nhờ xúc tác và nhiệt khí thải .....	19
2.2.1. Cơ chế phản ứng biến đổi nhiệt hóa của xăng .....	19
2.2.2. Nguyên lý làm việc của bộ xúc tác tách một phần nhiên liệu thành khí giàu hydro .....	22
2.3. Kết luận chương 2 .....	24
<b>CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG CUNG CẤP HỖN HỢP KHÍ GIÀU HYĐRÔ CHO ĐỘNG CƠ XĂNG .....</b>	<b>25</b>
3.1. Tổng quan về phần mềm AVL Boost .....	25
3.1.1. Giới thiệu chung về phần mềm .....	25
3.1.2. Tính năng chính của phần mềm AVL Boost .....	26
3.1.3. Tính năng áp dụng của phần mềm AVL Boost .....	26
3.1.4. Các phần tử chính khi xây dựng mô hình trong AVL Boost .....	27
3.1.4.1. Xylanh (cylinder) .....	27
3.1.4.2. Phần tử điều kiện biên (Boundaries Elements) .....	28
3.1.4.3. Phần tử bình ổn áp (Plenum) .....	28
3.1.4.4. Phần tử nạp (Charging Elements) .....	28
3.1.4.5. Phần tử ống (Pipes) .....	29
3.1.4.6. Các phần tử gắn thêm (Assembled Elements) .....	30
3.2. Cơ sở lý thuyết của phần mềm AVL Boost .....	30
3.2.1. Phương trình nhiệt động học thứ nhất .....	30
3.2.2. Mô hình cháy Fractal .....	31
3.2.3. Mô hình truyền nhiệt .....	32

3.2.4. Mô hình hình thành $NO_x$ .....	33
3.2.5. Mô hình hình thành $CO$ .....	34
3.2.6. Mô hình hình thành $HC$ .....	34
3.3. Quá trình mô phỏng trên phần mềm .....	35
3.3.1 Xây dựng mô hình mô phỏng .....	35
3.3.2. Chế độ mô phỏng .....	37
3.4. Quy trình thực nghiệm để tạo bộ thông số đầu vào cho mô hình .....	40
3.4.1. Thiết lập hệ thống thử nghiệm .....	40
3.4.2. Trang thiết bị thử nghiệm .....	41
3.4.2.1. Bình chứa khí $HHO$ .....	41
3.4.2.2. Van giảm áp .....	42
3.4.2.3. Van điện từ .....	42
3.4.2.4. Vòi phun $HHO$ .....	43
3.4.2.5. Bình ổn áp .....	43
3.4.2.6. Bộ điều khiển hệ thống cung cấp khí $HHO$ .....	44
3.4.2.7. Cảm biến tốc độ động cơ .....	45
3.4.2.8. Phanh thủy lực .....	45
3.4.2.9. Thiết bị đo lượng nhiên liệu tiêu thụ .....	46
3.4.3. Chế độ thử nghiệm .....	47
3.5. Kết quả mô phỏng .....	47
3.5.1. Hiệu suất nhiệt chỉ thị .....	47
3.5.2. Các thành phần phát thải .....	50
3.6. Kiểm chứng tính chính xác của mô hình bằng thực nghiệm .....	52
3.7. Kết luận chương 3 .....	56
<b>KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN .....</b>	<b>57</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>	<b>58</b>

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

<b>Ký hiệu</b>	<b>Diễn giải</b>
A/F	Tỷ lệ không khí/ nhiên liệu
AFE2P	Nhiên liệu thay thế, khí thải và ô nhiễm môi trường (Alternative Fuel, Emission & Enviroment)
BMEP	Áp suất có ích trung bình (Brake Mean Effective Pressure)
CEB	Thiết bị phân tích khí xả
CNG	Khí thiên nhiên nén (Compressed Natural Gas)
CO	Mônôxít cacbon
CO <sub>2</sub>	Cacbonic
ĐCĐT	Động cơ đốt trong
ĐCT	Điểm chết trên
$\varepsilon$	Tỷ số nén
ECE	Chu trình thử tiêu chuẩn châu Âu
ECU	Bộ điều khiển điện tử (Electronic Control Unit)
EHC	Bộ điều khiển khí HHO
EMS	Hệ thống quản lý điều khiển phương tiện sinh thái
GTVT	Giao thông vận tải
HC	Hyđrôcacbon
HHO	Hỗn hợp khí hydro + oxy
IMEP	Áp suất chỉ thị trung bình (Indicated Mean Effective Pressure)
$\lambda$	Hệ số dư lượng không khí
LPG	Khí hóa lỏng (Liquified Petroleum Gas)
MAP	Áp suất tuyệt đối đường nạp
NaOH	Nátri hyđrôxít
NO <sub>x</sub>	Các ôxít nito
PM	Chất thải dạng hạt (Particulate matter)
PTN	Phòng thí nghiệm
RON	Chỉ số Ôc tan nghiên cứu (Research Octane Number)
TCVN	Tiêu chuẩn Việt Nam
$\varphi$	Góc đánh lửa sớm

## DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. So sánh tính chất của nhiên liệu xăng và hydro .....	3
Bảng 3.1. Cơ chế phản ứng hình thành $\text{NO}_x$ . Hệ số tốc độ $k = AT^B \exp(-E/T)$ .....	33
Bảng 3.2. Thông số kỹ thuật của động cơ thử nghiệm .....	35
Bảng 3.3. Lượng nhiên liệu tiêu thụ (kg/h) tại các điểm thử nghiệm .....	38
Bảng 3.4. Hệ số dư lượng không khí $\lambda$ tại các điểm thử nghiệm .....	39
Bảng 3.5. Sự thay đổi của các thành phần phát thải, suất tiêu hao nhiên liệu và hiệu suất nhiệt chỉ thị khi giữ công suất động cơ không đổi .....	52



## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

Hình 1.1. Hiệu suất nhiệt động cơ khi hỗn hợp đậm .....	5
Hình 1.2. Hiệu suất nhiệt động cơ khi hỗn hợp nhạt .....	6
Hình 1.3. Sơ đồ dòng điện từ máy phát đến bình điện phân.....	7
Hình 1.4. Hiệu suất có ích và hiệu suất nhiệt của động cơ theo tốc độ động cơ .....	7
Hình 1.5. Hiệu suất nhiệt và áp suất có ích trung bình của động cơ theo $\lambda$ .....	8
Hình 1.6. Hiệu suất nhiệt chỉ thị của động cơ theo $\lambda$ .....	9
Hình 2.1. Sơ đồ nguyên lý sản xuất khí HHO .....	12
Hình 2.2. Sơ đồ nguyên lý sản xuất khí HHO .....	13
Hình 2.3. Sơ đồ nguyên lý bình điện phân nước .....	14
Hình 2.4. Kết cấu bình ngưng ngang .....	15
Hình 2.5. Bình ngưng hình trụ đứng.....	15
Hình 2.6. Máy hút chân không .....	16
Hình 2.7. Giá đỡ hệ thống thiết bị sản xuất khí HHO .....	16
Hình 2.8. Lắp đặt hệ thống sản xuất khí HHO .....	17
Hình 2.9. Thời gian sản xuất khí HHO theo hàm lượng NaOH .....	18
Hình 2.10. Sơ đồ nguyên lý làm việc của bộ xúc tác.....	23
Hình 3.1. Mô hình tính toán quá trình cháy trong động cơ đốt trong.....	31
Hình 3.2. Mô hình động cơ thử nghiệm trên AVL Boost.....	36
Hình 3.3. Giao diện chọn nhiên liệu chính cho động cơ.....	37
Hình 3.4. Thiết lập nhiên liệu khí HHO trên AVL Boost.....	37
Hình 3.5. Sơ đồ hệ thống thử nghiệm xác định bộ thông số đầu vào .....	41
Hình 3.6. Bình chứa khí HHO và đồng hồ đo áp suất .....	41
Hình 3.7. Hình ảnh thực tế và sơ đồ nguyên lý van giảm áp.....	42
Hình 3.8. Van điện từ.....	42
Hình 3.9. Sơ đồ kết cấu vòi phun HHO .....	43
Hình 3.10. Bình ổn áp.....	43
Hình 3.11. Hình ảnh thực tế của bộ điều khiển EHC .....	44
Hình 3.12. Nguyên lý làm việc và hình ảnh cảm biến tốc độ động cơ .....	45
Hình 3.13. Phanh thủy lực Didacta T101D .....	46

Hình 3.14. Sơ đồ nguyên lý và hình ảnh thực tế của AVL Fuel Balance 733S.....	46
Hình 3.15. Diễn biến áp suất và tốc độ tăng áp suất tại $\lambda = 1,4$ .....	48
Hình 3.16. Diễn biến nhiệt độ và tốc độ tỏa nhiệt tại $\lambda = 1,4$ .....	48
Hình 3.17. Hiệu suất nhiệt chỉ thị của động cơ tại các giá trị $\lambda$ và lưu lượng khí HHO.....	49
Hình 3.18. Công suất động cơ tại các giá trị $\lambda$ và lưu lượng khí HHO .....	50
Hình 3.19. Suất tiêu hao nhiên liệu tại các giá trị $\lambda$ và lưu lượng khí HHO.....	50
Hình 3.20. Phát thải $\text{NO}_x$ tại các giá trị $\lambda$ và lưu lượng khí HHO .....	51
Hình 3.21. Phát thải CO tại các giá trị $\lambda$ và lưu lượng khí HHO.....	51
Hình 3.22. Phát thải HC tại các giá trị $\lambda$ và lưu lượng khí HHO.....	52
Hình 3.23. Công suất động cơ theo mô phỏng và thực nghiệm tại 30% bướm ga .....	53
Hình 3.24. Suất tiêu hao nhiên liệu theo mô phỏng và thực nghiệm tại 30% bướm ga .....	53
Hình 3.25. Công suất động cơ theo mô phỏng và thực nghiệm tại 50% bướm ga .....	54
Hình 3.26. Suất tiêu hao nhiên liệu theo mô phỏng và thực nghiệm tại 50% bướm ga .....	54
Hình 3.27. Công suất động cơ theo mô phỏng và thực nghiệm tại 70% bướm ga .....	54
Hình 3.28. Suất tiêu hao nhiên liệu theo mô phỏng và thực nghiệm tại 70% bướm ga .....	55

## LỜI NÓI ĐẦU

Ngày nay, sự phát triển nhanh chóng của công nghiệp và phương tiện giao thông vận tải đã khiến cho nhu cầu năng lượng tăng cao. Trong khi đó nguồn nhiên liệu hoá thạch bao gồm xăng, dầu diesel, than đá, khí thiên nhiên... đang ngày càng cạn kiệt. Việc tìm kiếm và phát triển các loại nhiên liệu thay thế nhằm đáp ứng nhu cầu của người tiêu dùng và công nghiệp đang là một hướng đi được các nhà hoạch định chính sách cũng như các nhà khoa học quan tâm. Nhiên liệu hydro là nguồn nhiên liệu gần như vô tận và có nhiệt trị lớn, vì vậy hydro còn được gọi là nhiên liệu của thế kỷ XXI.

Hydro có thể được sử dụng trên động cơ đốt trong hoặc trên pin nhiên liệu để sản sinh điện năng. Tuy nhiên do công nghệ pin nhiên liệu vẫn còn mới, giá thành cao, vì vậy xu hướng phát triển động cơ sử dụng nhiên liệu hydro là một hướng đi phù hợp với tình hình hiện tại. Động cơ đốt trong có thể sử dụng hydro như nhiên liệu chính thay cho xăng hoặc có thể sử dụng như một phụ gia nhiên liệu cùng với xăng.

Hydro với tốc độ cháy gấp khoảng 5 lần so với xăng, giúp nâng cao tốc độ cháy của hỗn hợp khí hydro và hơi xăng, nhờ đó quá trình cháy diễn ra triệt hơn. Ngoài ra giới hạn cháy của nhiên liệu này cũng rộng hơn, vì vậy có thể giúp động cơ làm việc ở hỗn hợp nhạt, giúp nâng cao tính kinh tế động cơ. Với trị số ôc tan lớn, khi sử dụng hydro thay thế cho một phần nhiên liệu xăng, động cơ có thể nâng cao tỷ số nén để cải thiện hiệu suất nhiệt...

Với những ưu điểm như vậy, việc nghiên cứu sử dụng nhiên liệu hydro trên ĐCĐT là một hướng đi đúng và khả thi. Đề tài “***Sử dụng mô hình hóa nghiên cứu đặc tính làm việc và phát thải của động cơ chạy bằng nhiên liệu khí giàu hydro***” được thực hiện nhằm giảm bớt sự không ổn định của quá trình cháy nhiên liệu khí giàu hydro trên động cơ thực, đồng thời là cơ sở để thiết lập kế hoạch thực nghiệm trong các bước tiếp theo.

## TỔNG QUAN VỀ ĐỀ TÀI NGHIÊN CỨU

### *1. Lý do chọn đề tài*

Ngày nay, sự phát triển nhanh của nền kinh tế không những ảnh hưởng trực tiếp đến đời sống của mỗi con người mà còn có những tác động to lớn đến các vấn đề như môi trường, an ninh năng lượng... Cùng với đó là sự gia tăng mạnh mẽ cả về chủng loại và số lượng các phương tiện giao thông phục vụ nhu cầu giao thương của người dân. Như thế, một lượng lớn năng lượng đã tiêu thụ, chủ yếu vẫn từ nguồn năng lượng hóa thạch như than đá, khí thiên nhiên, xăng, dầu diesel... Hậu quả là đã có một lượng khí cacbonic ( $\text{CO}_2$ ) rất lớn phát thải ra ngoài môi trường, gây ra hiệu ứng nhà kính và hiện tượng nóng lên của trái đất. Đây là vấn đề được quan tâm hàng đầu ở mọi quốc gia trên thế giới hiện nay.

Tại Việt Nam, với hơn 37 triệu phương tiện cơ giới đang lưu hành (4/2013) tập trung chủ yếu tại các đô thị lớn, lượng phát thải độc hại từ các phương tiện này là nguyên nhân chính gây ô nhiễm môi trường cho các đô thị, khu dân cư. Hàm lượng các chất độc hại trong không khí từ khí thải phương tiện gây ra như chất thải dạng hạt (PM), ôxít nitơ ( $\text{NO}_x$ ), hydrocacbon (HC) và mônôxít cacbon (CO) đã vượt qua tiêu chuẩn cho phép. Đặc biệt, lượng phát thải CO từ xe máy chiếm 79% tổng phát thải CO do phương tiện giao thông gây ra. Chính vì vậy, giảm phát thải độc hại như CO, HC,  $\text{NO}_x$  và nâng cao tính kinh tế nhiên liệu cho loại phương tiện này là hết sức cấp bách nhằm tạo ra một môi trường không khí đô thị sạch hơn.

Như vậy, việc tìm kiếm các nguồn năng lượng thay thế nhằm giảm bớt sự lệ thuộc vào nguồn nhiên liệu hóa thạch đang ngày càng cạn kiệt, đồng thời giảm ô nhiễm môi trường là một hướng đi đúng trong lúc nhu cầu về năng lượng tăng lên.

Đã có nhiều nguồn năng lượng thay thế được nghiên cứu và ứng dụng bước đầu như nhiên liệu sinh học, năng lượng gió, năng lượng mặt trời, nhiên liệu hydro, năng lượng địa nhiệt... Trong số đó, nhiên liệu hydro đang được các nhà khoa học tập trung nghiên cứu khá nhiều nhờ nhiệt trị lớn, không chứa thành phần cacbon

nên sản vật cháy là hơi nước. Do trị số ốc tan của hydro lớn nên thường được sử dụng trên động cơ cháy cưỡng bức. Trên động cơ, hydro có thể được dùng làm nhiên liệu chính thay thế cho xăng hoặc sử dụng như một phụ gia nhiên liệu bằng cách cung cấp một lượng nhỏ hydro vào đường nạp động cơ.

Từ những phân tích trên, em đã chọn đề tài “***Sử dụng mô hình hóa nghiên cứu đặc tính làm việc và phát thải của động cơ chạy bằng nhiên liệu khí giàu hydro***”. Đề tài nghiên cứu và sử dụng mô hình hóa nhằm giảm bớt sự không ổn định của quá trình cháy nhiên liệu khí giàu hydro trên động cơ thực, đồng thời là cơ sở để thiết lập kế hoạch thực nghiệm. Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của nhiên liệu khí giàu hydro đến đặc tính làm việc và đặc tính phát thải của động cơ góp phần xác định vùng làm việc tối ưu khi động cơ chạy với nhiên liệu giàu hydro.

## ***2. Mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu của đề tài***

### ***❖ Mục tiêu nghiên cứu***

Nghiên cứu đặc tính công suất, tiêu hao nhiên liệu và phát thải của động cơ chạy với nhiên liệu khí giàu hydro bằng phương pháp mô phỏng.

### ***❖ Đối tượng và phạm vi nghiên cứu***

Động cơ xe máy với dung tích xylanh 97cm<sup>3</sup> sử dụng bộ chế hòa khí được chọn làm đối tượng nghiên cứu do đây là loại động cơ được sử dụng phổ biến nhất tại Việt Nam.

Các nội dung nghiên cứu của đề tài được thực hiện tại PTN Động cơ đốt trong, Viện Cơ khí động lực, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

## ***3. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn***

Đề tài đưa ra được phương án cung cấp khí giàu hydro phù hợp và khả thi nhất để nâng cao tính kinh tế và giảm thành phần phát thải của động cơ.

Giải pháp được áp dụng thí điểm trên động cơ với các đánh giá lý thuyết thông qua các mô hình mô phỏng trên máy tính trước khi triển khai trên động cơ thực. Đây là phương pháp tiếp cận với chi phí thấp, rút ngắn thời gian nghiên cứu.

Kết quả của đề tài có thể được sử dụng làm nguồn tham khảo thiết kế các nghiên cứu thực nghiệm trên lĩnh vực nhiên liệu giàu hydro trong tương lai.

#### ***4. Các nội dung thực hiện của đề tài***

- ❖ Tổng quan về nghiên cứu sử dụng khí hydro và hỗn hợp khí giàu hydro trên động cơ xăng.
- ❖ Phương pháp sản xuất khí giàu hydro để cấp cho động cơ
  - Phương pháp chuyển đổi nước thành hỗn hợp khí giàu hydro để cung cấp cho động cơ.
  - Phương pháp tách một phần nhiên liệu nhờ xúc tác và tận dụng nhiệt khí thải.
- ❖ Nghiên cứu mô phỏng cung cấp hỗn hợp khí giàu hydro vào đường nạp cho động cơ xăng.

#### ***5. Phương pháp nghiên cứu***

Để thực hiện các nội dung trên, đề tài đã sử dụng các phương pháp nghiên cứu sau:

- ❖ Nghiên cứu lý thuyết từ các kết quả đã công bố trên thế giới. Qua đó phân tích, đánh giá tính khả thi của việc cung cấp hỗn hợp khí giàu hydro cho động cơ xăng để giảm phát thải, nâng cao tính kinh tế nhiên liệu tiến hành ứng dụng trên động cơ xe máy đang lưu hành tại Việt Nam.
- ❖ Nghiên cứu mô phỏng bằng phần mềm AVL Boost trên máy tính để đánh giá và đưa ra dự báo khả năng áp dụng.

## **CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ NHIÊN LIỆU KHÍ GIÀU HYĐRÔ**

### **1.1. Giới thiệu chung về nhiên liệu hydro**

#### ***1.1.1. Tính chất hóa lý cơ bản của hydro***

Hydro là nguyên tố nhẹ nhất và tồn tại ở thể khí, với trọng lượng nguyên tử 1.00794 C, tồn tại chủ yếu dưới dạng hydro nguyên tử trong các tầng cao của khí quyển Trái đất. Công thức phân tử  $H_2$ , không màu, không mùi, dễ bắt cháy, nhiệt độ sôi 20,27 K (-252,87 °C) và nhiệt độ nóng chảy 14,02 K (-259,14 °C). Tinh thể hydro có cấu trúc lục phương. Hydro có hóa trị 1 và có thể phản ứng với hầu hết các nguyên tố hóa học khác.

Hydro có thể cháy trực tiếp trong động cơ đốt trong hoặc có thể sử dụng trong pin nhiên liệu (fuel cell) để sản xuất điện năng nhờ quá trình phản ứng giữa  $H_2$  và  $O_2$  (ngược lại với quá trình điện phân nước). Khi hydro cháy trong động cơ đốt trong thì sản vật cháy chủ yếu là hơi nước nên sử dụng hydro làm nhiên liệu cho các phương tiện giao thông vận tải là một trong những cách tốt nhất để giảm phát thải gây ô nhiễm môi trường.

#### ***1.1.2. Các phương pháp sản xuất hydro***

Có ba phương pháp thông dụng để sản xuất hydro là điện phân nước, các phản ứng hóa học và sự khí hóa. Sau đây sẽ trình bày sơ lược các phương pháp này.

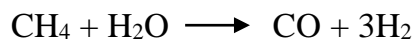
##### ***1.1.2.1. Điện phân nước***

Hydro chỉ chiếm 10% khối lượng nước và có thể tách ra sau khi điện phân. Tuy nhiên, để sản xuất đủ lượng hydro cần thiết thì cần một nguồn điện rất lớn. Hơn nữa, những vật liệu làm điện cực rất đắt làm giá thành sản xuất hydro tăng lên đáng kể. Giải pháp khắc phục là sử dụng những nguồn năng lượng khác để điện phân như dùng sức nước (thủy điện, thủy triều) hay sức gió, năng lượng mặt trời...

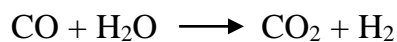
##### ***1.1.2.2. Từ các phản ứng hóa học***

Trong phương pháp này, nguyên liệu gốc là khí thiên nhiên, khí dầu mỏ, dầu mỏ hay khí sinh học. Chẳng hạn khi dùng khí thiên nhiên với 95% metan thì cơ chế phản ứng diễn ra như sau:

- Chuyển từ khí thiên nhiên sang khí đốt tổng hợp (syngas)



- Phản ứng CO khử nước thành hydro



#### *1.1.2.3. Sự khí hoá*

Quá trình khí hóa là quá trình chuyển đổi nhiên liệu (dầu nặng, than đá và nhiên liệu sinh khối) để tạo thành hydro bằng cách oxy hoá nhiên liệu. Những nhiên liệu này cần một lượng oxy đủ để hoàn thành quá trình cháy ngay dưới lòng đất để tạo ra khí CO và H<sub>2</sub>.

### **1.2. Nhiên liệu khí hydro**

Hydro dùng làm nhiên liệu có ưu điểm là cháy nhanh, trị số octan cao nên cho phép động cơ làm việc ở tỷ số nén lớn, nhờ đó mà dễ dàng tăng công suất động cơ. Giới hạn thành phần hỗn hợp rất loãng nên làm tăng tính kinh tế sử dụng động cơ. Hơn nữa, khí thải của động cơ chạy bằng nhiên liệu hydro rất sạch.

Tuy nhiên, nhiên liệu hydro có nhiệt trị trên một đơn vị thể tích nhỏ, vì vậy cần trang bị hệ thống chứa nhiên liệu với thể tích lớn, áp suất cao nhằm phương tiện có thể làm việc được trong một thời gian dài. Ngoài ra, việc sản xuất, vận chuyển và tồn trữ nhiên liệu hydro đủ để thay thế hoàn toàn xăng hoặc diesel khá khó khăn và tốn kém do nhiên liệu có tỷ trọng rất thấp.

Từ những đặc điểm trên, nhiều nhà nghiên cứu quan tâm đến việc sử dụng hydro như một thành phần phụ gia cho nhiên liệu xăng hoặc diesel. Theo đó, hydro chỉ được cấp một tỷ lệ nhất định vào trong động cơ để hòa trộn với nhiên liệu chính là xăng hoặc diesel. Nhờ đặc tính cháy nhanh, hydro sẽ giúp đốt cháy hỗn hợp nhiên



liệu chính tốt hơn nên giảm được thành phần độc hại khí thải, mở rộng giới hạn cháy và tăng tính chống kích nổ cho động cơ.

### **1.3. Nghiên cứu sử dụng khí giàu hydro trên động cơ xăng**

#### **1.3.1. Tính chất của nhiên liệu xăng và hydro**

Bảng 1.1 so sánh tính chất của hydro và xăng. Có thể thấy, nhiệt trị thấp trên một đơn vị khối lượng của hydro rất lớn, 120 MJ/kg, gấp 3 lần so với xăng. Ngoài ra, tốc độ cháy của hydro rất nhanh, khoảng 3,3 m/s, cao hơn xăng khoảng 8 lần. Với tốc độ cháy lớn, quá trình cháy diễn ra nhanh hơn, kiệt hơn, giúp cải thiện hiệu ứng cháy sát vách, giảm tổn thất nhiệt... Hydro có trị số ôc tan cao, khi sử dụng hỗn hợp xăng- khí hydro, có thể nâng cao tỷ số nén để cải thiện hiệu suất động cơ.

*Bảng 1.1. So sánh tính chất của nhiên liệu xăng và hydro*

<b>Tính chất</b>	<b>Xăng</b>	<b>Hydro</b>
Khối lượng phân tử(g/mol)	100÷105	2,02
Khối lượng riêng (g/l)	690÷790	0,09
Nhiệt trị thấp (MJ/kg)	44,5	120
Nhiệt ẩn hóa hơi (kJ/kg)	349	448
Áp suất bay hơi (kPa)	48÷103	-
Độ nhớt tại 20°C (cP)	0,37÷0,44	0,009
Tốc độ cháy (m/s)	0,41	3,24÷4,4
Tỷ lệ A/F chuẩn	14,6	34,3
Trị số Ôc tan nghiên cứu (-)	88÷97	130

#### **1.3.2. Giới thiệu đặc điểm động cơ xăng**

Động cơ xăng còn gọi là động cơ có cacburator, sử dụng nhiên liệu là xăng. Động cơ xăng bao gồm các cơ cấu và hệ thống chính sau:

Cơ cấu trục khuỷu thanh truyền pít tông có nhiệm vụ góp phần tạo nên buồng đốt và tiếp nhận áp lực khí do quá trình cháy tạo nên trong xi lanh, biến chuyển động tịnh tiến của pít tông thành chuyển động quay của trục khuỷu và ngược lại, biến chuyển động quay của trục khuỷu thành chuyển động tịnh tiến của pít tông để thực hiện các quá trình nạp, nén và xả.

Cơ cấu phân phối khí có nhiệm vụ điều khiển quá trình trao đổi khí của động cơ, cấp khí nạp và trong xi lanh và đẩy khí thải ra ngoài vào những thời điểm chính xác theo chu kỳ làm việc.

Hệ thống cung cấp nhiên liệu có nhiệm vụ hòa trộn nhiên liệu với không khí tạo thành hỗn hợp cháy.

Hệ thống bôi trơn đảm nhận việc cấp dầu bôi trơn đến tất cả các bề mặt làm việc của động cơ nhằm giảm ma sát, giảm mài mòn và thoát nhiệt cho các chi tiết làm việc.

Hệ thống làm mát có nhiệm vụ đảm bảo chế độ nhiệt tối ưu cho động cơ hoạt động, cân bằng chế độ nhiệt cho các chi tiết trong quá trình làm việc.

Hệ thống khởi động dùng để khởi động động cơ.

Nguyên lý làm việc của động cơ xăng:

Động cơ làm việc theo từng chu kỳ tuần hoàn, nối tiếp nhau trong xi lanh động cơ trong một khoảng chạy pít tông, gọi là kỳ. Toàn bộ các quá trình diễn ra trong xi lanh bao gồm: Nạp hỗn hợp nhiên liệu đã được hòa trộn với không khí ở trên đường ống nạp vào trong xi lanh, nén hỗn hợp khí trong xi lanh, đốt cháy hỗn hợp nhiên liệu và sinh công, đẩy khí đã cháy ra ngoài.

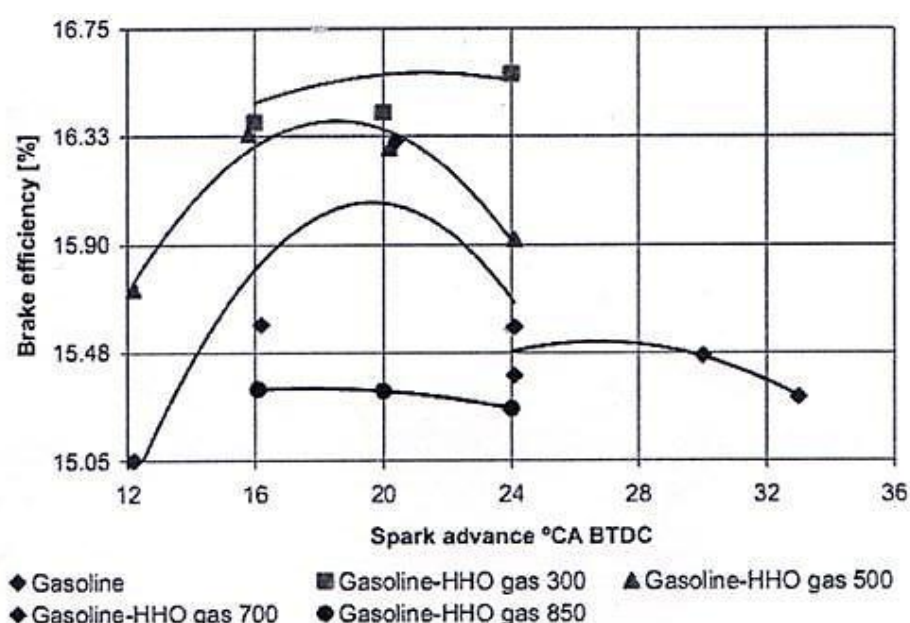
### *1.3.3. Nghiên cứu sử dụng khí giàu hydro trên động cơ xăng*

Khí giàu hydro là hỗn hợp khí gồm tối thiểu hai khí, trong đó có hydro. Các khí khác có thể là oxy (khí HHO, khí hydroxygen), CO và một số chất khác (khí đốt tổng hợp-syngas), khí thiên nhiên CNG (HCNG)... Trong nội dung của đề tài này

chỉ tập trung vào nghiên cứu khí giàu hydro tách từ nước (khí HHO) và khí giàu hydro tách từ nhiên liệu (syngas) trên động cơ xăng.

Khí HHO là hỗn hợp của hydro và oxy theo tỷ lệ 2:1 theo thể tích. Do hydro là thành phần chính của khí, nên HHO có các tính chất vật lý, hóa học tương tự với hydro. Vì thế, khí HHO cũng có thể được sử dụng trên động cơ đốt trong bằng cách bổ sung một lượng nhỏ vào đường nạp. Đã có nhiều nghiên cứu trên thế giới về việc sử dụng khí HHO trên động cơ xăng, các kết quả nghiên cứu đều cho biết, tính kinh tế của động cơ được cải thiện, giảm phát thải ô nhiễm môi trường [1-4].

R. Chiriac cùng cộng sự [1] đã tiến hành nghiên cứu ứng dụng khí giàu hydro (Hydrogen Rich Gas-HRG) trên động cơ 4 xylanh có dung tích 1,4 lít. Khí giàu hydro ở đây là sản phẩm của quá trình điện phân nước (khí HHO), được phun vào đường nạp ở tải nhỏ trong các trường hợp hỗn hợp đậm ( $\lambda=0,92\div0,94$ ) và hỗn hợp nhạt ( $\lambda=1,18\div1,20$ ), tốc độ động cơ giữ nguyên ở 1600 vòng/phút.

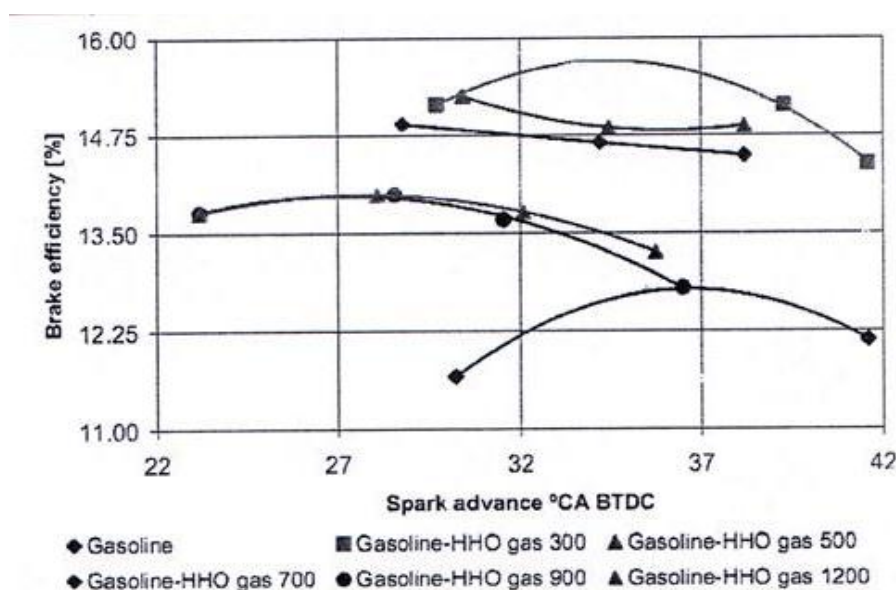


Hình 1.1. Hiệu suất nhiệt động cơ khi hỗn hợp đậm [1]

Kết quả nghiên cứu của nhóm này trên hình 1.1 cho thấy, hiệu suất nhiệt có ích của động cơ tăng khi bổ sung khí HHO với lưu lượng không quá lớn (dưới 850 lít/giờ). Hiệu suất nhiệt có ích của động cơ đạt cực đại khi lưu lượng của khí HHO

là 300 lít/giờ, cao hơn khoảng 7,4% so với động cơ nguyên bản. Phát thải CO và NO<sub>x</sub> thay đổi không đáng kể, trong khí CO<sub>2</sub> và HC giảm.

Khi làm việc ở chế độ hỗn hợp nhạt, ở tất cả các giá trị lưu lượng khí HHO khác nhau, hiệu suất có ích của động cơ đều tăng lên, đạt cực đại khi lưu lượng khí HHO bằng 300 lít/giờ, tăng khoảng 50%. Phát thải CO, CO<sub>2</sub> và HC giảm, tuy nhiên NO<sub>x</sub> lại tăng lên do quá trình cháy được cải thiện (hình 1.2).

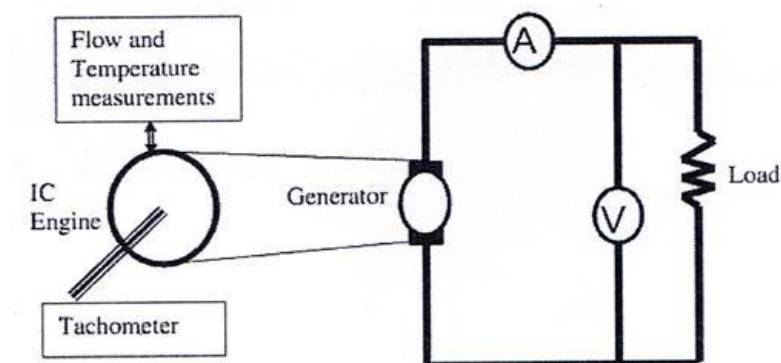


Hình 1.2. Hiệu suất nhiệt động cơ khi hỗn hợp nhạt [1]

Trong một nghiên cứu khác, T. D'Andrea cùng cộng sự [2] đã phát triển tiếp mô hình bổ sung khí hydro cho động cơ để tận dụng hỗn hợp khí với hai thành phần  $2H_2 + O_2$ . Kết quả là mô men động cơ tăng nhẹ, khoảng 1÷2 Nm; phát thải NO<sub>x</sub> tăng 500 ppm so với khi hoạt động ở chế độ lý tưởng do tốc độ cháy lớn, hàm lượng oxy trong khí nạp lớn.

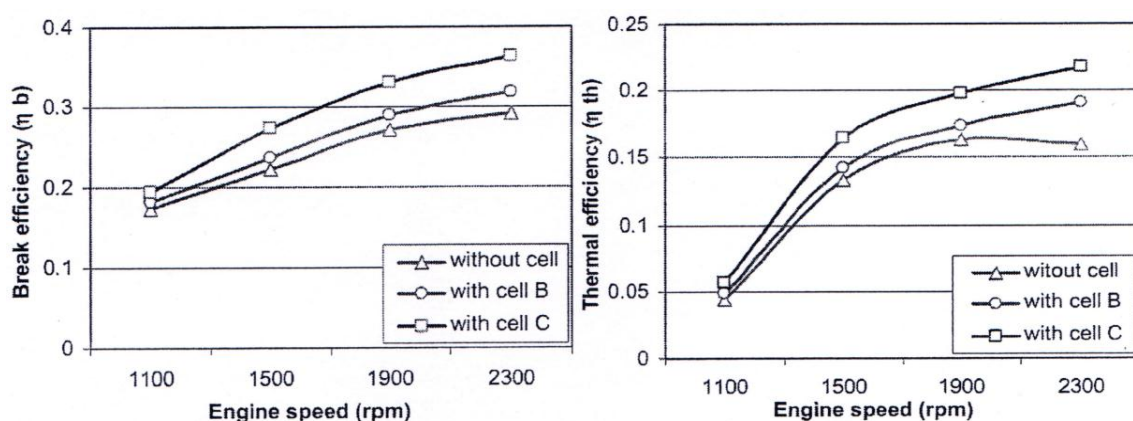
Trong công bố của mình, Ammar A.Al-Rousan [3] đã nghiên cứu thiết kế hệ thống sản xuất khí HHO lắp trên động cơ xăng một xylanh 197cc của Honda. Thử nghiệm được tiến hành với hai hệ thống sản xuất khí HHO (hai bình điện phân) khác nhau. Bình B (cell B) và bình C (cell C). Thực chất hai bình này khác nhau về diện tích giữa bề mặt lớp điện cực. Bình B có diện tích bề mặt lớp điện cực là 1m<sup>2</sup> làm bằng thép không gỉ (mã 316L) trong hộp làm bằng Plexiglas (là hợp chất

methacrylate metyn trong suốt, bền với thời tiết). Nước được sử dụng để điều chế HHO là nước cất, điện cực làm bằng  $\text{NaHCO}_3$ , thể tích của bình là 8 lít. Cực âm được làm bằng thép không gỉ mã 302 hoặc 304, trong khi cực dương làm bằng thép 316L. Bình C có diện tích bề mặt lớp điện cực chỉ bằng một nửa so với bình B, các đặc còn lại giống với bình B.



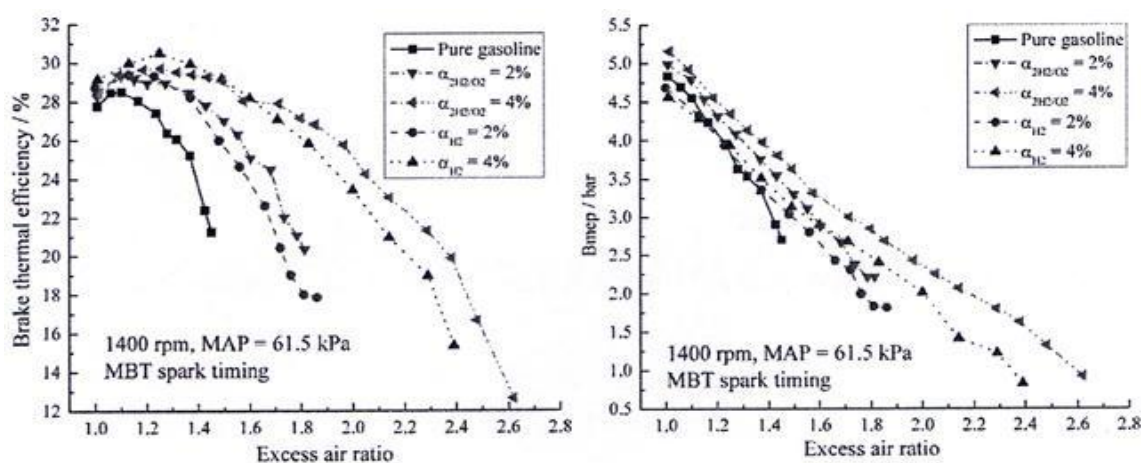
Hình 1.3. Sơ đồ dòng điện từ máy phát đến bình điện phân [3]

Hình 1.4 thể hiện hiệu suất có ích ( $\eta_b$ ) và hiệu suất nhiệt ( $\eta_{th}$ ) của động cơ khi sử dụng bình điện phân B và C so với khi sử dụng xăng. Khi bổ sung khí HHO vào đường nạp động cơ,  $\eta_b$  và  $\eta_{th}$  của động cơ tăng lên. Cụ thể, hiệu suất có ích của động cơ tăng 3% khi sử dụng bình B và 8% khi sử dụng bình C. Lượng tiêu hao nhiên liệu và suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ giảm khi có khí HHO bổ sung.



Hình 1.4. Hiệu suất có ích và hiệu suất nhiệt của động cơ theo tốc độ động cơ [3]

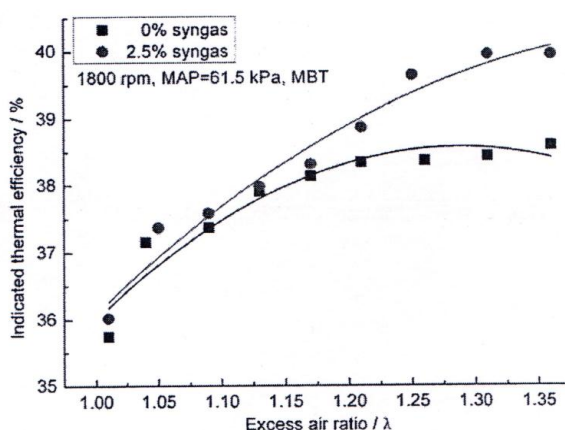
Ngoài ra, tác giả Changwei Ji cũng nghiên cứu ảnh hưởng của hỗn hợp hydro – oxy đến đặc tính động cơ đánh lửa. Hydro và oxy chỉ được hòa trộn với nhau trên đường nạp thông qua hệ thống cung cấp riêng biệt. Thử nghiệm tại tốc độ 1400 vòng/phút, áp suất đường nạp (MAP) được giữ ở giá trị 61,5 kPa, tỷ lệ khí phun vào chiếm 0%, 2% và 4% thể tích tổng lượng khí nạp. Tỷ lệ hydro và oxy theo thể tích được điều chỉnh ở mức 2:1. Hệ số dư lượng không khí giữ ở giá trị hòa khí chuẩn ( $\lambda=1$ ) bằng cách giảm lượng xăng phun vào đường nạp. Kết quả nghiên cứu thể hiện trên hình vẽ 1.5.



Hình 1.5. Hiệu suất nhiệt và áp suất có ích trung bình của động cơ theo  $\lambda$  [4]

Hiệu suất nhiệt và áp suất có ích trung bình của động cơ tăng khi bổ sung khí hydro và hỗn hợp hydro-oxy vào đường nạp. Với tỷ lệ phun 2% và 4% thể tích tổng lượng khí nạp, khi  $\lambda$  nhỏ và ở cùng một tỷ lệ, hiệu suất có ích của động cơ khi phun hỗn hợp hydro-oxy thấp hơn so với khi phun chỉ hydro. Tuy nhiên, khi  $\lambda$  tăng dần thì diễn biến xảy ra theo chiều ngược lại. Qua đó, tính kinh tế của động cơ khi phun hỗn hợp hydro-oxy vào đường nạp cao hơn so với động cơ sử dụng xăng và hỗn hợp xăng/khí hydro. Phát thải CO khi sử dụng hỗn hợp xăng hay hỗn hợp khí  $2H_2+O_2$  thấp hơn so với khi sử dụng xăng và hỗn hợp xăng/hydro nhờ lượng oxy có trong khí nạp mới. Cũng do oxy trong nhiên liệu, cùng với nhiệt độ cháy lớn làm lượng phát thải  $NO_x$  tăng [4].

Tác giả C. Ji cùng cộng sự [5] cũng đã phát triển hệ thống sản xuất khí tổng hợp từ quá trình xúc tác nhiên liệu ethanol. Đường thải của động cơ được lắp thêm bộ xúc tác với hai thành phần chính là đồng và niken. Hệ thống tận dụng nhiệt khí thải để thực hiện phản ứng tái cấu trúc trong bộ xúc tác. Khi được gia nhiệt, ethanol sẽ chuyển từ thể lỏng sang thể hơi, qua quá trình phản ứng với lớp bề mặt của xúc tác, tạo thành syngas để cung cấp cho đường nạp. Kết quả nghiên cứu cho trên hình 1.6.



Hình 1.6. Hiệu suất nhiệt chỉ thị của động cơ theo  $\lambda$  [5].

Khi bổ sung syngas vào đường nạp, hiệu suất nhiệt chỉ thị của động cơ tăng, đặc biệt là ở hỗn hợp nhạt do quá trình cháy diễn ra triệt để hơn. Phát thải HC thấp hơn động cơ nguyên bản khi  $\lambda < 1,21$  và cao hơn khi  $\lambda > 1,21$  do sự lan tràn màng lửa kém hơn, áp suất xy lanh giảm và tỷ lệ khí sót tăng. Ở mọi giá trị  $\lambda$ , CO của động cơ có sử dụng hỗn hợp xăng-syngas đều cao hơn động cơ nguyên bản do trong syngas có chứa CO. Phát thải  $\text{NO}_x$  cũng có chiều hướng tăng do quá trình cháy tốt hơn, nhiệt độ cháy cao.

#### **1.4. Kết luận chương 1**

Qua phân tích các giải pháp giúp nâng cao hiệu suất làm việc và giảm phát thải độc hại của động cơ, giải pháp sử dụng nhiên liệu khí giàu hydro là một hướng khả thi, giúp giảm tổng lượng phát thải khí nhà kính ra môi trường. Hydro hoàn toàn có thể là một nhiên liệu thay thế cho xăng và dầu diesel nhờ nhiệt trị cao, nguồn nhiên liệu không giới hạn...

Hầu hết các công trình nghiên cứu được công bố rộng rãi trên thế giới đều chứng minh rằng hiệu suất nhiệt của động cơ được cải thiện, hai thành phần phát thải chính CO và HC giảm mạnh, NO<sub>x</sub> tăng khi có khí giàu hydro bổ sung vào đường nạp. Kết quả này là cơ sở quan trọng trong việc nghiên cứu thực nghiệm đánh giá khả năng nâng cao hiệu suất và giảm phát thải cho động cơ máy bằng cách cung cấp hỗn hợp khí giàu hydro cho động cơ.



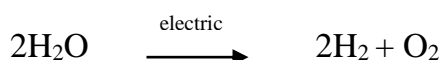
## CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP SẢN XUẤT KHÍ GIÀU HYĐRÔ ĐỂ CUNG CẤP CHO ĐỘNG CƠ

### 2.1. Phương pháp chuyển đổi nước thành hỗn hợp khí giàu hydro

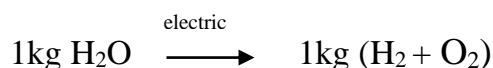
#### 2.1.1. Cơ sở lý thuyết

##### 2.1.1.1. Tỷ lệ hydro và oxy trong hỗn hợp khí

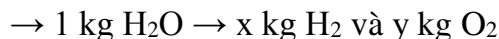
Nguyên lý điện phân nước được mô tả bằng phản ứng sau:



Theo định luật bảo toàn khối lượng, khi điện phân 1kg  $\text{H}_2\text{O}$  sẽ thu được 1 kg hỗn hợp  $\text{H}_2$  và  $\text{O}_2$ :



Mặt khác:



Ta có thể tính toán được:  $x = 2/18 = 0,111 \text{ (kg)}$  và  $y = 16/18 = 0,889 \text{ (kg)}$

Như vậy, khi điện phân 1 kg nước, sản phẩm tạo thành bao gồm 0,111 kg khí hydro và 0,889 kg khí oxy.

##### 2.1.1.2. Thể tích khí thu được ở điều kiện tiêu chuẩn

Ở điều kiện tiêu chuẩn (1 atm, 0°C), thể tích khí thoát ra từ quá trình điện phân 1 kg nước được tính toán như sau:

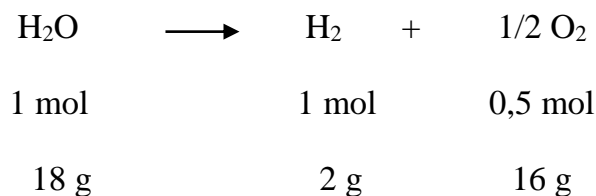
$$V_{\text{H}_2} = n_{\text{H}_2} \cdot 22,4 = \frac{111}{2} \cdot 22,4 = 1243,2 \text{ (lít)}$$

$$V_{\text{O}_2} = n_{\text{O}_2} \cdot 22,4 = \frac{889}{32} \cdot 22,4 = 622,3 \text{ (lít)}$$

Do đó, tổng thể tích khí thu được là:  $V_{\text{HHO}} = 1243,2 + 622,3 = 1865,5 \text{ (lít)}$ .

### 2.1.1.3. Khối lượng riêng khí HHO

Khi điện phân 1 mol nước (18 g H<sub>2</sub>O):



Phần trăm thể tích của hydro và oxy trong hỗn hợp khí:

$$\%H_2 = \frac{1}{1,5} \cdot 100\% = 66,67\%$$

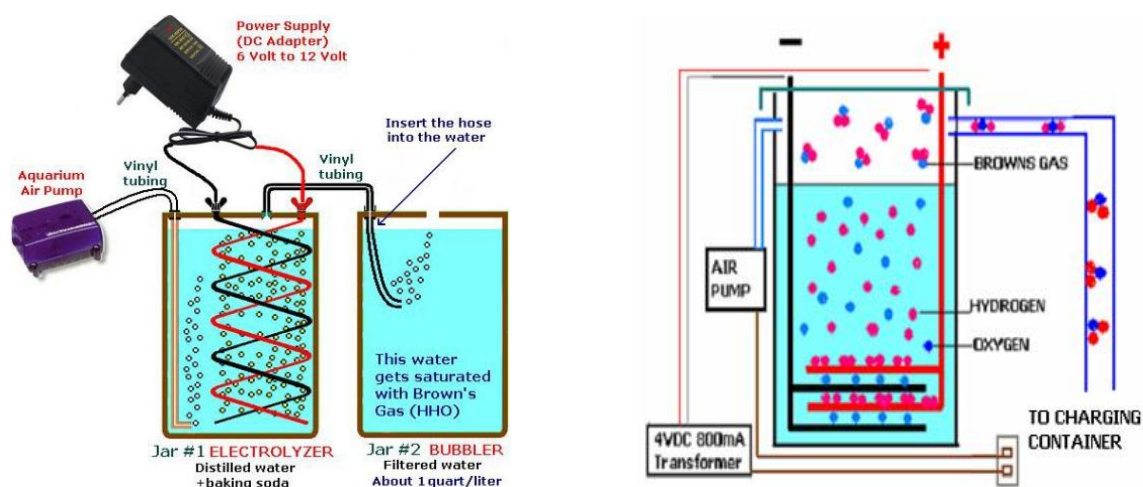
$$\%O_2 = \frac{0,5}{1,5} \cdot 100\% = 33,33\%$$

Khối lượng riêng của khí HHO tại điều kiện tiêu chuẩn:

$$\rho = \frac{66,67 \cdot 2 + 33,33 \cdot 32}{100} \cdot \frac{1}{22,4} = 0,54 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

### 2.1.2. Quy trình và thiết bị

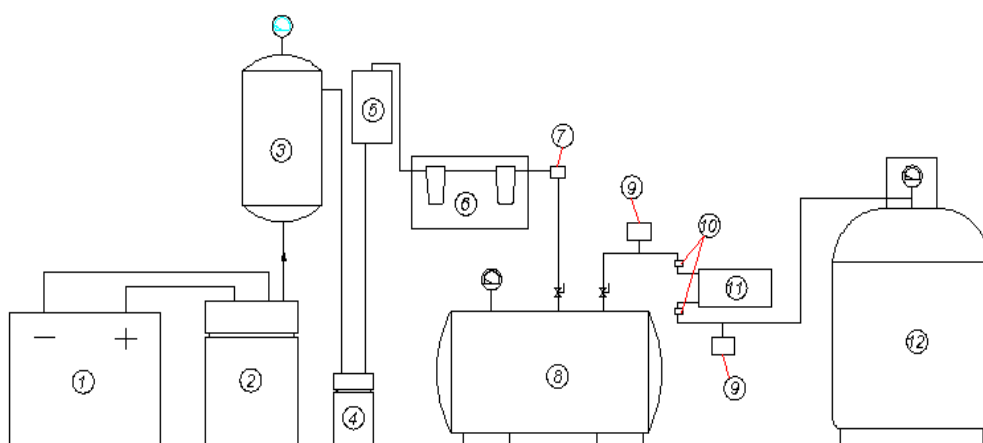
Quá trình điện phân nước thu khí HHO xảy ra dưới tác dụng của dòng điện một chiều. Phương pháp này sử dụng công nghệ đơn giản, dễ dàng và có kết cấu nhỏ gọn (hình 2.1) [6-7].



Hình 2.1. Sơ đồ nguyên lý sản xuất khí HHO [6, 7]

### 2.1.2.1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống thiết bị sản xuất khí HHO quy mô nhỏ

Sơ đồ hệ thống sản xuất khí HHO trên Hình 2.2. Khi đóng mạch để máy biến thế 1 hoặc bình ắc quy cấp điện cho bình điện phân (2), nước trong bình bay hơi do sự gia tăng nhiệt độ của các điện cực. Hơi nước và hỗn hợp khí  $H_2$ ,  $O_2$  đi theo đường ống đến bình ngưng tụ (3, 4, 5) và sau đó qua bộ lọc (6) để tách nước và hơi nước. Khí HHO tiếp tục vào bình chứa áp suất thấp (8). Khi bình chứa (8) đạt áp suất dư 0,5 at, role áp suất (9) điều khiển khởi động từ (10) đóng mạch, máy hút chân không (11) hút và nén khí HHO vào bình chứa áp suất cao (12).



Hình 2.2. Sơ đồ nguyên lý sản xuất khí HHO

1. Máy biến thế hoặc bình ắc quy; 2. Bình điện phân; 3, 4, 5. Bình ngưng tụ; 6. Bộ lọc tách nước; 7. Solenoid thường mở; 8. Bình chứa khí HHO áp suất thấp; 9. Role áp suất; 10. Van điện từ; 11. Máy hút chân không; 12. Bình chứa khí HHO áp suất cao

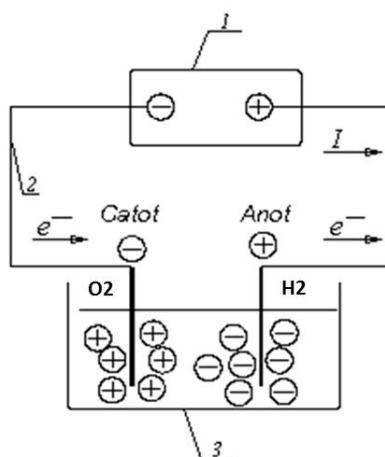
### 2.1.2.2. Các chi tiết chính trong thiết bị sản xuất khí HHO

#### a) Bình điện phân

Sơ đồ nguyên lý làm việc của bình điện phân thể hiện trên Hình 2.3. Nguồn điện một chiều nối với hai bản cực, thường làm từ kim loại trơ như bạch kim hoặc thép không gỉ, ngâm trong nước. Hyđrô sẽ xuất hiện ở cực âm (điện cực tích điện âm), ôxy sẽ xuất hiện ở cực dương (điện cực tích điện dương). Vì vậy, dòng điện đi

qua tách nước thành khí hydro và oxy. Quá trình gồm hai phản ứng xảy ra ở hai điện cực. Hydro sinh ra ở điện cực âm và oxy ở điện cực dương:

- Phản ứng trên catot:  $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$
- Phản ứng trên anot:  $2\text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^-$
- Tổng hợp:  $2\text{H}_2\text{O} + \text{điện năng} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$



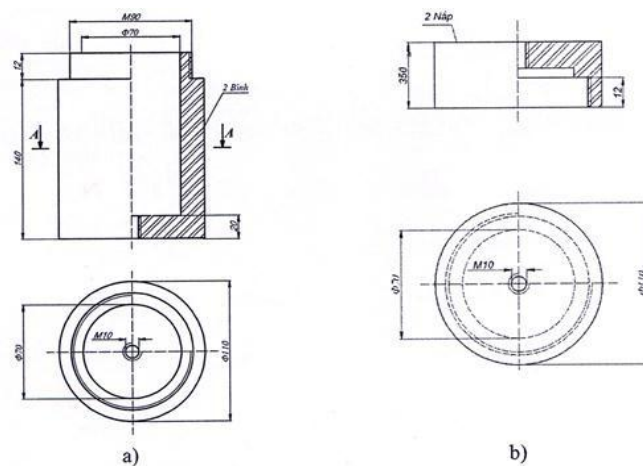
Hình 2.3. Sơ đồ nguyên lý bình điện phân nước

1- Nguồn điện một chiều (ắc quy); 2- Dây dẫn điện; 3- Bình điện phân

Cùng với điện áp nguồn, bình điện phân là một bộ phận quan trọng, quyết định sản lượng khí HHO của thiết bị. Nếu bình có lượng nước quá lớn, việc sản xuất khí HHO sẽ chậm và ngược lại.

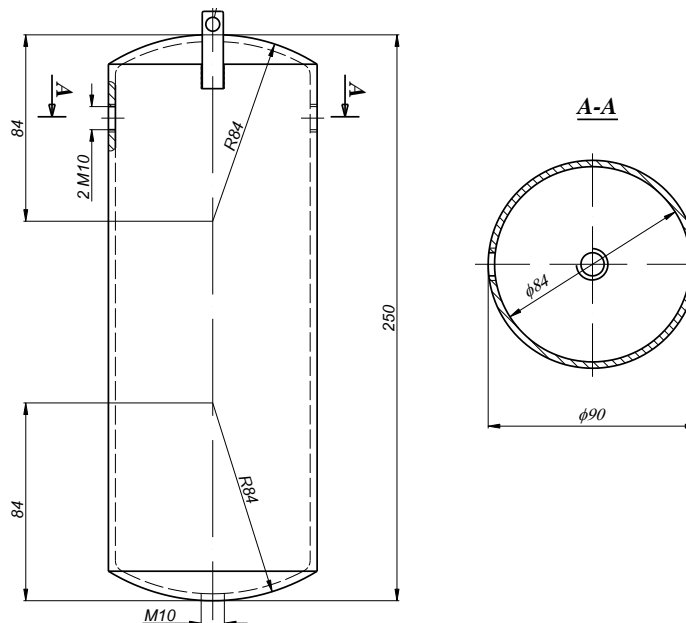
#### b) Bình ngưng

Hệ thống luôn có hơi nước trong đường ống nên phải có bình ngưng để tách nước. Với 3 bình ngưng tụ thì có thể bố trí 2 bình kiểu ngang và 1 bình kiểu đứng như thể hiện trên các Hình 2.4 và Hình 2.5.



Hình 2.4. Kết cấu bình ngưng ngang

a) Thân bình, b) nắp bình

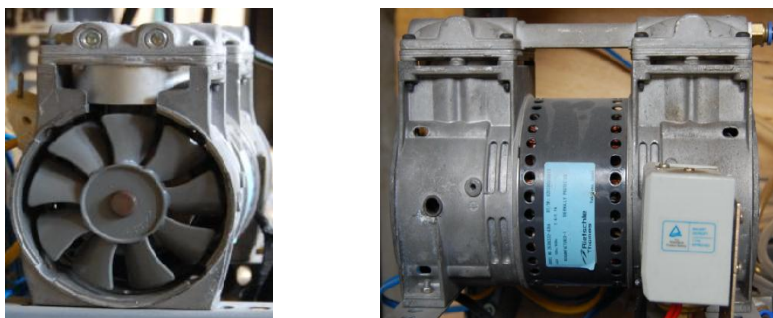


Hình 2.5. Bình ngưng hình trụ đứng

### c) Máy hút chân không

Máy hút chân không dùng để nén khí HHO. Dùng máy hút chân không kiểu piston, chuyển động tịnh tiến nhờ tay quay. Việc nạp khí và xả khí thực hiện thông qua sự đóng mở các van một chiều (Hình 2.6).

Khi piston đi xuống, thể tích phần không gian phía trên piston lớn dần, áp suất giảm làm van xả đóng, van nạp mở nên khí HHO được nạp vào phía trên piston.

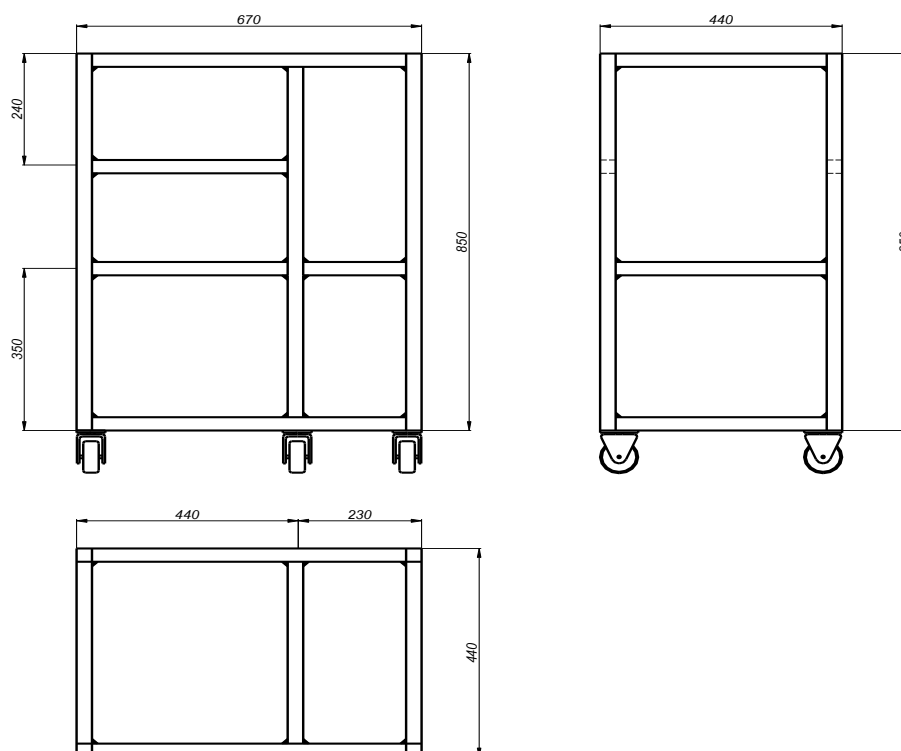


Hình 2.6. Máy hút chân không

Khi piston đi lên, thể tích không gian phía trên piston nhỏ dần, áp suất tăng dần làm van nạp đóng, van xả mở để khí HHO được nén đẩy vào bình chứa. Như vậy, máy hút chân không hoạt động để nén khí HHO.

d) Giá đỡ

Toàn bộ các chi tiết chính trong hệ thống gồm bình điện phân, bình ngưng, máy hút chân không, biến áp được đặt trên giá đỡ nhằm dễ dàng vận chuyển và thử nghiệm. Bản vẽ chi tiết giá đỡ thể hiện trên Hình 2.7.



Hình 2.7. Giá đỡ hệ thống thiết bị sản xuất khí HHO

### 2.1.2.3 Lắp đặt hệ thống sản xuất khí HHO

Hình 2.8 thể hiện hệ thống sản xuất khí HHO từ nước được phát triển từ sơ đồ nguyên lý trên Hình 2.2.



Hình 2.8. Lắp đặt hệ thống sản xuất khí HHO

### 2.1.3. Sản xuất khí HHO theo phương pháp điện phân nước

#### 2.1.3.1. Nước dùng để sản xuất khí HHO

Nước là nguyên liệu chính để sản xuất ra khí HHO, gồm các loại sau:

- *Nước cứng*: có chứa nhiều chất khoáng hòa tan như: canxi, magiê. Khi đun nóng nước cứng thì canxi cacbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) và magiê cacbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) sẽ kết tủa bám vào mặt trong thành bình và các bản cực của bình điện phân. Do vậy không thể dùng nước cứng để sản xuất khí HHO được.
- *Nước mềm*: nước đã loại bỏ thành phần các chất khoáng nêu trên bằng cách lọc thô (bằng máy móc) hoặc lọc tinh (bằng hóa chất).
- *Nước cất*: nước tinh khiết, nguyên chất, điều chế bằng cách chưng cất. Thành phần nước cất hoàn toàn không chứa các tạp chất hữu cơ hay vô cơ. Đây là loại nước được sử dụng để sản xuất khí HHO.

#### 2.1.3.2. Chất điện phân

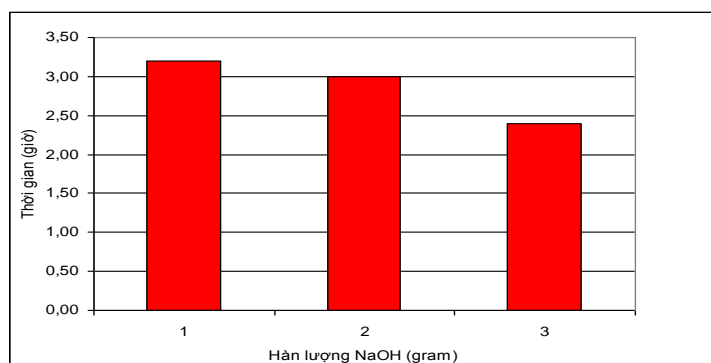
Một số chất điện phân như kali hydroxit (KOH), natri hydro (NaOH) được sử dụng để tăng hiệu quả sản xuất khí HHO vì các chất này phản ứng mãnh liệt với nước và giải phóng nhiệt lớn.

### 2.1.3.3. Điện áp nguồn

Nguồn cấp điện cho bình điện phân có thể là máy biến thế hoặc bình ắc qui. Điện áp sử dụng 12V hoặc 24V.

### 2.1.3.4. Kết quả sản xuất khí HHO từ nước

Hình 2.9 cho thấy thời gian sản xuất khí HHO khi lấy 4 g NaOH hòa trộn với 1 lít nước cất trong thời gian 3 giờ 20 phút thì đạt được áp suất trong bình là 3,5 at. Để đạt áp suất này có thể dùng 8 g NaOH trộn với 1 lít nước cất trong thời gian 3 giờ hoặc dùng 12 g NaOH trộn với 1 lít nước cất trong thời gian 2 giờ 40 phút.



Hình 2.9. Thời gian sản xuất khí HHO theo hàm lượng NaOH

Như vậy, càng tăng chất điện phân thì thời gian sản xuất khí HHO càng ngắn. Tuy nhiên, nếu sử dụng nhiều chất điện phân thì dòng điện sẽ tăng lên và dễ dẫn đến hỏng biến áp. Do đó, chọn lượng chất điện phân khoảng 8 g NaOH là phù hợp.

### 2.1.3.5. Tính toán chi phí và giá thành

Sử dụng bình LPG loại 12kg có dung tích 26,4 lít làm bình chứa khí HHO. Khí HHO được nén với áp suất dư là 3,5 bar. Gọi  $V_1$  là thể tích bình chứa ở áp suất sau nén  $p_2$  và  $V_2$  là thể tích khí nén quy đổi về áp suất ban đầu  $p_1$ , ta có thể tính thể tích khí HHO quy đổi tương đương như sau:

$$p_2 V_1 = p_1 V_2 \Rightarrow V_2 = V_1 \frac{p_2}{p_1}$$



Thay số:  $V_2 = 26,4 \frac{4,5}{1} = 118,8 \text{ (lít)}$

Nếu chưa tính giá thành đầu tư thiết bị ban đầu thì để sản xuất được 1865.5 lít HHO ở điều kiện tiêu chuẩn cần 1 kg nước cất với giá 5.000 đồng; điện năng tiêu thụ là 61 kW với giá 1184 đồng/kWh; lượng dung dịch điện phân là 8 g với giá 15.500 đồng/1 kg. Như vậy, tổng chi phí để sản xuất 1866 lít HHO là 77.348 đồng. Mỗi lít khí HHO có giá 41 đồng và do đó giá thành sản xuất một bình chứa 26,4 lít ở áp suất dư 3,5 bar là 4.871 đồng.

## **2.2. Phương pháp tách một phần nhiên liệu nhờ xúc tác và nhiệt khí thải**

### **2.2.1. Cơ chế phản ứng biến đổi nhiệt hóa của xăng**

Xăng là hỗn hợp của các hydrocacbon có số nguyên tử C trong phân tử từ 2 đến 8. Kết cấu phân tử có nhiều dạng, trong đó izooctan  $C_8H_{18}$  chiếm tỷ lệ cao nhất. Giả sử xăng chỉ gồm thành phần phân tử là  $C_8H_{18}$  thì thành phần khối lượng C trong xăng là 84-85,5% và tỷ lệ H là 14,5-16% [8]. Trong nội dung tính toán của đề tài này,  $C_8H_{18}$  được coi là công thức phân tử của xăng.

Nếu cấp hỗn hợp hydrocacbon, không khí và hơi nước với tỷ lệ thành phần thích hợp vào lò phản ứng xúc tác và duy trì nhiệt độ trên 400°C thì trong lò sẽ xảy ra phản ứng nhiệt hóa tạo ra sản phẩm là hydro ( $H_2$ ), cacbonic ( $CO_2$ ), ôxy ( $O_2$ ) và các chất tham gia phản ứng còn dư [9,10].

Quá trình biến đổi nhiệt hóa các loại hydrocacbon lỏng như xăng, dầu diesel để sản xuất hydro chưa được nghiên cứu chi tiết như các loại hydrocacbon nhẹ ở thể khí. Tuy nhiên, có thể tính toán động học quá trình tạo thành các sản phẩm trong lò phản ứng xúc tác dựa trên việc phân tích các phản ứng hóa học chung và một số dữ liệu về tốc độ phản ứng trong quá trình phản ứng biến đổi nhiệt hóa. Từ đó có thể xác định một cách định lượng các nhân tố ảnh hưởng và đưa ra tỷ lệ tối ưu các chất tham gia phản ứng để tạo ra hàm lượng  $H_2$  cao nhất.

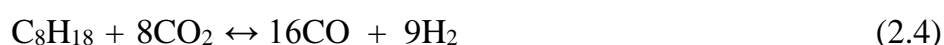
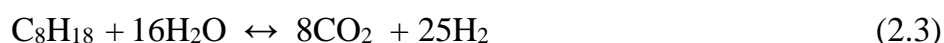
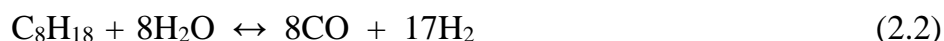
Các phản ứng hóa học xảy ra trong lò phản ứng xúc tác rất phức tạp nên không thể mô tả đầy đủ và chi tiết tất cả các phản ứng trung gian [9]. Để đơn giản hóa, chỉ

cần xét các phản ứng hóa học chính dựa trên các sản phẩm cuối cùng ở trạng thái cân bằng để mô tả quá trình. Sai số tính toán khi đó không lớn vì các phản ứng hóa học chính có tốc độ lớn hơn rất nhiều so với các phản ứng trung gian [11]. Các phản ứng này có thể là phản ứng tạo ra sản phẩm trung gian hoặc phản ứng tạo ra các sản phẩm cuối cùng.

Trong môi trường thiếu ôxy, nhiên liệu hydrocacbon có thể được ôxy hóa không hoàn toàn để trực tiếp tạo ra sản phẩm là CO và H<sub>2</sub>. Với xăng, phản ứng này được biểu diễn bởi phương trình sau:



Tuy nhiên, nhiều giả thiết khác cho rằng, trước tiên có một phần hydrocacbon sẽ cháy hoàn toàn tạo thành CO<sub>2</sub> và H<sub>2</sub>O, đồng thời giải phóng một lượng nhiệt lớn. Lượng nhiệt này lại thúc đẩy phản ứng nhiệt hóa giữa phần nhiên liệu chưa cháy với nước và cacbonic [8] cho sản phẩm là CO và H<sub>2</sub>. Một phần CO sau đó sẽ phản ứng với nước cho CO<sub>2</sub> và H<sub>2</sub>. Cơ chế phản ứng này có thể được biểu diễn qua các phương trình sau:



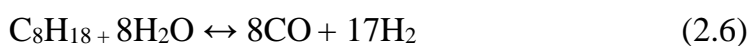
Tốc độ của các phản ứng trên phụ thuộc vào điều kiện nhiệt độ, môi trường xúc tác và thành phần của các chất tham gia phản ứng. Nếu cấp thêm nước và nhiệt vào lò phản ứng thì quá trình phản ứng nhiệt hóa của nhiên liệu với nước sẽ diễn ra mạnh hơn, nghĩa là tốc độ các phản ứng (2.2)-(2.5) tăng lên và ít phụ thuộc vào tốc độ phản ứng (2.1).

Khi làm việc ở chế độ toàn tải, nhiệt độ khí thải động cơ xăng ở gần cửa thải có thể đạt 600-700°C. Ở chế độ không tải nhanh, nhiệt độ khí thải cũng có thể đạt 400-

450°C [17, 18]. Do đó, nhiệt lượng của khí thải đủ để thực hiện biến đổi nhiệt hóa một lượng đáng kể nhiên liệu với nước mà không cần cấp thêm nhiệt từ ngoài.

Các thành phần chính trong khí thải động cơ gồm CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> và xăng chưa cháy. Nếu cho khí thải và nhiên liệu vào lò phản ứng xúc tác đặt gần cửa thải thì trong lò xảy ra các phản ứng biến đổi nhiệt hóa nhiên liệu, bao gồm phản ứng của nhiên liệu với ôxy, nước, cacbonic và phản ứng trung hòa CO của nước. Do lượng ôxy dư trong khí thải động cơ xăng rất nhỏ, dưới 0,5%, trong khi lượng hơi nước chiếm 13-16% và lượng khí cacbonic là 12-14% [17, 18] nên tốc độ phản ứng và lượng nhiên liệu tham gia phản ứng oxy hóa nhỏ hơn rất nhiều so với phản ứng biến đổi nhiệt hóa của nhiên liệu với nước và cacbonic. Ảnh hưởng của phản ứng ôxy hóa nhiên liệu đến hàm lượng hydro là không đáng kể nên có thể bỏ qua. Do vậy, phần nghiên cứu mô hình toán sau đây sẽ chỉ đề cập đến các phản ứng biến đổi nhiệt hóa của nhiên liệu với hơi nước và cacbonic.

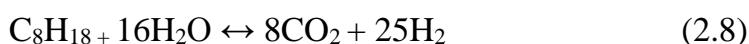
Cơ chế phản ứng xúc tác dùng để mô tả quá trình biến đổi nhiệt hóa của xăng trong điều kiện nhiệt độ và xúc tác thuận lợi được thể hiện như sau:



$$\Delta H_{(1)298} = 1310 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H_{(2)298} = -41 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H_{(3)298} = 933 \text{ kJ/mol}$$

Qua các phản ứng trên có thể thấy rằng đây là quá trình thu nhiệt mạnh, nghĩa là cần phải cung cấp một lượng nhiệt lớn (ít nhất 11.490 kJ/kg nhiên liệu, tương đương 25% nhiệt trị của xăng) để phản ứng xúc tác có thể thực hiện được. Nếu lượng nhiệt cần cấp này hoàn toàn được tận dụng từ nhiệt khí thải của động cơ (nghĩa là không tốn chi phí năng lượng đốt nóng bộ xúc tác) thì hiệu quả biến đổi nhiên liệu xăng thành hydro được xác định như sau:

$$\text{Hiệu quả biến đổi năng lượng} = \frac{(\text{Khối lượng H}_2 \text{ tạo ra}) * (\text{Nhiệt trị H}_2)}{(\text{Khối lượng xăng chuyển đổi}) * (\text{Nhiệt trị xăng})} \times 100\%$$

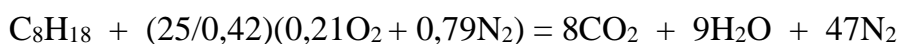
Theo các phản ứng trên thì 1 kg xăng có thể tạo ra tối đa 0,438 kg hydro, tức là hiệu quả biến đổi năng lượng thành hydro có thể đạt tối đa tới 119,5%, nghĩa là hiệu suất nhiệt của động cơ sẽ tăng lên nếu sử dụng hydro tạo ra từ bộ xúc tác tận dụng nhiệt khí thải.

Trong khi đó, trung bình năng lượng nhiệt khí thải của động cơ chiếm khoảng 25% tổng nhiệt lượng từ nhiên liệu cấp, nên nếu tận dụng được 20% lượng nhiệt này để đốt nóng bộ xúc tác thì, theo tính toán nhiệt phản ứng ở trên, năng lượng khí thải của động cơ ứng với 1 kg xăng mà động cơ tiêu thụ sẽ đủ để biến đổi 0,2 kg xăng trong bộ xúc tác thành hydro.

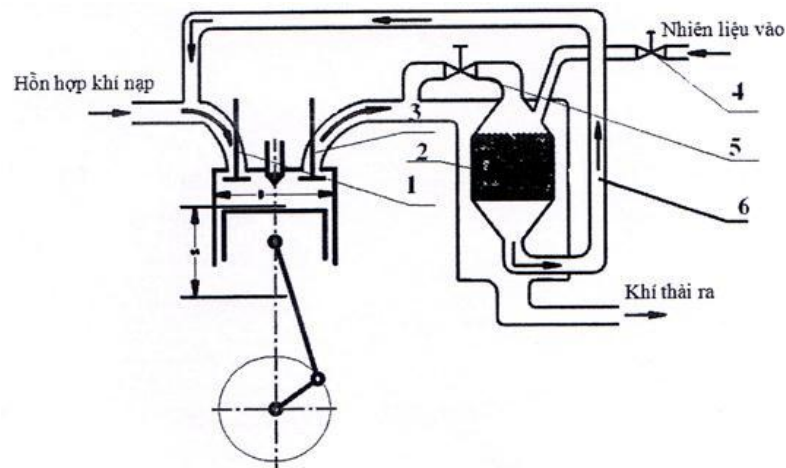
Chính vì vậy, sử dụng bộ xúc tác tận dụng nhiệt khí thải để phản ứng nhiệt hóa nhiên liệu xăng với hơi nước để tạo nhiên liệu giàu hydro cho động cơ có tính thực tiễn và kinh tế cao.

### ***2.2.2. Nguyên lý làm việc của bộ xúc tác tách một phần nhiên liệu thành khí giàu hydro***

Để cấp nước cho bộ xúc tác có thể dùng nước từ bên ngoài hoặc tận dụng hơi nước trong thành phần khí thải. Lượng hơi nước trong thành phần khí thải được tính toán như sau:



Theo phản ứng trên, cứ đốt cháy hoàn toàn 114 kg xăng sẽ tạo ra 162 kg hơi nước. Vì vậy, nếu đốt cháy 1 kg xăng, khí thải sẽ bao gồm 1,42 kg hơi nước, chiếm 13,8% khối lượng và 14,1 thể tích. Vậy để đảm bảo được tỷ lệ nước/nhiên liệu (W/L) xấp xỉ 3,2 thì cần điều chỉnh tỷ lệ luân hồi một cách phù hợp. Bộ luân hồi khí thải có nhiệm vụ đưa một lượng khí thải quay lại bộ xúc tác nhằm tận dụng hơi nước trong khí thải cho phản ứng nhiệt hóa và sấy nóng bộ xúc tác. Sơ đồ nguyên lý làm việc của bộ xúc tác cho trên Hình 2.10.



Hình 2.10. Sơ đồ nguyên lý làm việc của bộ xúc tác

1. Xupap nạp; 2. Thân bộ xúc tác; 3. Xupap thải; 4. Van điều chỉnh nhiên liệu; 5. Van điều chỉnh lượng nước; 6. Ống cấp khí giàu hydro vào đường nạp

Nhiên liệu được dẫn vào lò phản ứng xúc tác qua van điều tiết để có thể định lượng theo yêu cầu. Hơi nước được cấp vào từ bộ luân hồi với lưu lượng được điều chỉnh nhờ van 5. Nhiên liệu và nước vào bộ xúc tác được sấy nóng tạo điều kiện cho phản ứng xảy ra. Sản phẩm của lò phản ứng là hỗn hợp nhiên liệu giàu hydro sẽ được đưa qua ống dẫn 6 đi vào đường nạp động cơ.

### **2.3. Kết luận chương 2**

Cơ sở lý thuyết, tính toán hệ thống sản xuất khí giàu hydro từ quá trình điện phân nước, tách từ quá trình xúc tác một phần nhiên liệu đã được trình bày cụ thể. Kết quả của quá trình tính toán lý thuyết là cơ sở để tiến hành thiết kế nhằm đảm bảo được khả năng sản xuất khí giàu hydro.

Hệ thống sản xuất khí quy mô phòng thí nghiệm có kết cấu nhỏ gọn, đảm bảo được yêu cầu về tính linh hoạt, có thể áp dụng cho các nghiên cứu khác sau này. Bộ xúc tác tách hydro từ một phần nhiên liệu và hệ thống luân hồi khí thải kết cấu nhỏ gọn, hoàn toàn có thể lắp trực tiếp lên xe đang lưu hành mà không có ảnh hưởng kể đến khả năng làm việc của các chi tiết khác.

### **CHƯƠNG 3.   NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG CUNG CẤP HỖN HỢP KHÍ GIÀU HYDRÔ CHO ĐỘNG CƠ XĂNG**

#### **3.1. Tổng quan về phần mềm AVL Boost**

##### ***3.1.1. Giới thiệu chung về phần mềm***

Phần mềm AVL Boost bắt đầu được phát triển từ năm 1992, hiện đã phát triển thành phiên bản AVL-Boost 2011 với rất nhiều cải tiến so với ban đầu. AVL Boost bao gồm một bộ tiền xử lý hỗ trợ bộ xử lý dữ liệu đầu vào cho các chương trình tính toán chính tiếp theo. Kết quả tính toán được xử lý và hỗ trợ phân tích bởi một bộ hậu vi xử lý tương tác. Công cụ tiền xử lý trên AVL Workspace GUI (Graphical User Interface) đặc trưng bởi một mô hình sắp xếp và chỉ dẫn dữ liệu đầu vào. Mô hình tính toán của động cơ được thiết kế bằng cách lựa chọn các phần tử từ cây thư mục và kết nối chúng bằng các phần tử đường ống. Những động cơ kết cấu rất phức tạp cũng có thể được mô hình hóa một cách đơn giản.

Chương trình chính gồm các thuật toán mô phỏng được tối ưu hóa cho tất cả các phần tử. Dòng khí trong ống được coi như chuyển động theo một phương. Điều đó có nghĩa áp suất, nhiệt độ, tốc độ dòng khí thu được từ những phương trình khí động học là giá trị trung bình trên toàn bộ đường ống. Tổn thất dòng khí do hiệu ứng ba chiều, tại những vị trí cụ thể của động cơ được thể hiện bằng hệ số cản. Phần mềm còn có thể mô phỏng động học của xy lanh, quá trình quét khí của động cơ 2 kỳ cũng như mô phỏng chuyển động phức tạp của dòng khí trong các phần tử giảm thanh.

Công cụ hậu xử lý IMPRESS chart và PP3 cho phép phân tích và đưa ra kết quả mô phỏng theo nhiều dạng khác nhau. Tất cả các kết quả đều có thể được so sánh với các kết quả đo cũng như kết quả tính trước đó. Thêm nữa, phần mềm cho phép trình diễn kết quả dạng động, điều đó cho phép phát triển giải pháp tối ưu cho những vấn đề của người sử dụng.

### ***3.1.2. Tính năng chính của phần mềm AVL Boost***

Phần mềm AVL Boost bao gồm những tính năng cơ bản sau:

- Mô phỏng động cơ 2 kỳ, 4 kỳ, động cơ không tăng áp, động cơ tăng áp...
- Mô phỏng các chế độ làm việc, ổn định chế độ chuyển tiếp của động cơ.
- Tính toán thiết kế và tối ưu hóa quá trình làm việc của động cơ như quá trình cháy, quá trình trao đổi khí, quá trình phát thải độc hại...
- Có khả năng kết nối với các phần mềm khác (liên kết động) để mô phỏng các dữ liệu động.

### ***3.1.3. Tính năng áp dụng của phần mềm AVL Boost***

AVL Boost là một công cụ mô phỏng chu trình công tác và quá trình trao đổi khí của động cơ. Boost cho phép xây dựng mô hình đầy đủ toàn thể động cơ bằng cách lựa chọn các phần tử có trong hộp công cụ và nối chúng lại bằng các phần tử ống nối. Giữa các đường ống, người ta sử dụng các phương trình động lực học [12].

AVL Boost cho phép tính toán các chế độ tĩnh và động. Boost có thể dùng để tối ưu hóa ở chế độ tĩnh các hệ thống nạp và thải, đóng mở, xupáp, phối hợp các bộ phận tăng áp và ước lượng tính năng của các động cơ mới. Boost cũng là một công cụ lý tưởng cho việc tối ưu hóa các đặc trưng chuyển tiếp của động cơ ở thời kỳ đầu, khi động cơ chưa được chế tạo, nhưng có tính đến cả hệ truyền động của phương tiện. Ngoài ra Boost còn cho phép xây dựng mô hình điều khiển động cơ các chức năng quan trọng của hệ thống điều khiển động cơ mà không cần tới các phần mềm bên ngoài.

Các ứng dụng điển hình của phần mềm AVL Boost bao gồm:

- Xác định đặc tính mômen, tiêu hao nhiên liệu.
- Thiết kế đường nạp, thải.
- Tối ưu hóa thời điểm đóng mở xupáp.
- Phối hợp với cụm tăng áp, van xả.



- Phân tích về âm thanh (độ ồn trên đường nạp, thải).
- Phân tích quá trình cháy và hình thành khí thải.
- Luân hồi khí thải.
- Độ thích ứng của cụm tăng áp.

### **3.1.4. Các phần tử chính khi xây dựng mô hình trong AVL Boost**

#### **3.1.4.1. Xylanh (cylinder)**

Thể hiện thể tích công tác bên trong buồng cháy động cơ, cũng có thể được định nghĩa bằng hành trình dịch chuyển của piston. Có các mô hình cháy sau:

- Mô hình cháy đơn giản: Vibe, Double-Vibe, Point-by-point...
- Mô hình lý thuyết: mô hình cháy đẳng áp, đẳng tích.
- Mô hình buồng cháy phức tạp (Fractal).

Mô hình cháy một chiều trên động cơ xăng giả thiết quá trình trao đổi nhiệt xảy ra bên trong buồng cháy chịu ảnh hưởng bởi các yếu tố sau:

- Kích thước hình học buồng cháy.
- Vị trí đặt bugi.
- Thành phần hỗn hợp bên trong xylanh.
- Sự lưu động của dòng không khí và mức độ chảy rối.
- Sự truyền nhiệt bên trong xylanh.
- Đóng mở xupap.
- Quá trình trao đổi chất (hòa trộn lý tưởng, thải sạch,.v.v...)
- Vận động xoáy của dòng môi chất.
- Buồng cháy ngăn cách.
- Phun xăng trực tiếp.

Đối với chế độ chuyển tiếp thì nhiệt độ thành xylanh thay đổi và quá trình cháy phụ thuộc vào các chế độ làm việc.

#### *3.1.4.2. Phần tử điều kiện biên (Boundaries Elements)*

- Điều kiện biên xử lý khí thải (Aftertreatment Boundary)

Cung cấp các kết nối của mô hình xử lý khí thải tới người sử dụng. Có hai điều kiện xử lý khí thải (điều kiện đầu vào và điều kiện đầu ra) kết nối với một bộ chuyển đổi xúc tác hoặc với bộ lọc hạt diesel (DPF).

- Điều kiện biên bên trong (Internal Boundary)

Quy định điều kiện bên trong ống tại vị trí giới hạn của mô hình, tại đó trạng thái và thành phần khí có thể thay đổi theo thời gian. Phần tử được sử dụng để nghiên cứu, đo đạc và xác định các điều kiện bên trong đường ống dẫn tại mọi vị trí.

#### *3.1.4.3. Phần tử bình ổn áp (Plenum)*

Dùng thay thế cho các đoạn ống có trạng thái ổn định về áp suất, nhiệt độ, thành phần hỗn hợp. Phần tử bình ổn áp được định nghĩa bằng các đại lượng thể tích và diện tích bề mặt, trong đó thể tích của bình được xác định tương đối bằng hai lần thể tích công tác của các xylanh. Nghĩa là ở một thời điểm tức thời thì áp suất, nhiệt độ và thành phần hòa khí là như nhau trong toàn bộ thể tích của bình.

#### *3.1.4.4. Phần tử nạp (Charging Elements)*

- Tuabin tăng áp (Turbocharge)

Dùng cho mô hình động cơ có tuabin tăng áp. Có 2 mô hình tuabin tăng áp: (i) mô hình đơn giản chỉ yêu cầu cung cấp một số dữ liệu đầu vào như số kỳ động cơ, tỷ số tăng áp, máy nén, hiệu suất máy nén, hiệu suất tuabin và (ii) mô hình đầy đủ có bổ sung thêm các dữ liệu về mômen quán tính của máy nén và bánh tuabin.

- Máy nén khí (Turbo Compressor)

Dùng cho mô hình động cơ tăng áp cơ khí. Nếu tỷ số tăng áp và hiệu suất máy nén không đổi, có thể xác định được đường tốc độ hoặc một đồ thị chuẩn. Nếu một đường tốc độ chuẩn hoặc một dải làm việc của máy nén được xác định, thì tỷ số tăng áp và hiệu suất được xác định theo tỷ lệ khối lượng tức thời của dòng chảy và tốc độ của máy nén thực tế.

#### 3.1.4.5. Phần tử ống (Pipes)

Là phần tử quan trọng, kết nối các phần tử khác trong mô hình. Mô hình nhiệt động học của dòng khí trong các ống quyết định độ chính xác khi tính toán các chu trình làm việc của động cơ.

Dòng chảy trong ống có thể được mô tả bằng các phương bảo toàn khối lượng, mômen và năng lượng như sau:

Phương trình liên tục: 
$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} - \rho v \frac{1}{A} \frac{dA}{dx}$$

Phương trình bảo toàn động lượng: 
$$\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial x} - \rho v^2 \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{F_{fr}}{V}$$

Phương trình bảo toàn năng lượng: 
$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\partial[v(E + p)]}{\partial x} - v(E + p) \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} + \frac{q_w}{V}$$

Trong đó:

$\rho$  – mật độ khí;  $u$  – vận tốc dòng chảy;  $x$  – chiều dọc theo phương ống

$t$  – thời gian;  $p$  – áp suất tĩnh;  $F_{fr}$  – lực ma sát thành ống

$c_v$  – nhiệt dung riêng đẳng tích;  $q_w$  – lưu lượng nhiệt vách

$V$  – thể tích ( =  $A \cdot dx$  )

$E$  – nội năng của dòng khí 
$$E = \rho \cdot c_v \cdot T + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2$$

Tổn thất ma sát: 
$$\frac{F_{fr}}{V} = \frac{\lambda_{fr}}{2D} \rho v |v| \quad (\lambda_{fr} - \text{hệ số ma sát})$$

$$\text{Tổn thất nhiệt: } \frac{q_w}{W} = \frac{\lambda_{fr}}{2D} \rho |v| c_p (T_w - T) \quad (T_w - \text{nhiệt độ thành ống})$$

#### 3.1.4.6. Các phần tử gắn thêm (Assembled Elements)

- Bộ lọc khí thải (Catalyst)

Mô phỏng thiết bị xử lý khí thải, định nghĩa bằng các tham số hình học và hệ số cản dòng. Tuy nhiên, phần tử lọc khí xả chưa đề cập tới vấn đề xử lý khí thải.

- Bộ làm mát khí tăng áp (Air Cooler)

Dùng cho mô hình có làm mát khí tăng áp. Các dữ liệu nhập cho phần tử làm mát khí tăng áp về cơ bản là giống phần tử lọc khí.

### 3.2. Cơ sở lý thuyết của phần mềm AVL Boost

#### 3.2.1. Phương trình nhiệt động học thứ nhất

Quá trình cháy trong động cơ đốt trong là quá trình không thuận nghịch, biến hóa năng thành nhiệt năng. Để xác định trạng thái của môi chất tại từng thời điểm trong quá trình cần phải biết các phản ứng trung gian biến đổi hỗn hợp ban đầu thành sản phẩm cháy cuối cùng. Tuy nhiên, mối tương quan giữa trạng thái đầu và cuối của quá trình cháy có thể xác định nhờ định luật nhiệt động học thứ nhất.

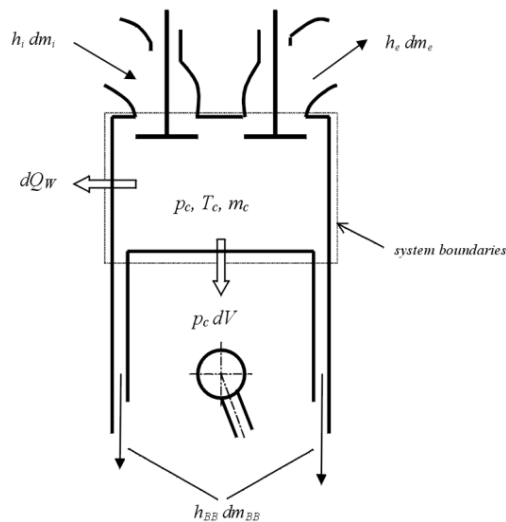
Phương trình nhiệt động học thứ nhất xét cho mô hình tính toán quá trình cháy trong động cơ đốt trong theo hình 3.1 được viết như sau:

$$\frac{d(m_{cyl} \cdot u)}{d\alpha} = -p_{cyl} \cdot \frac{dV}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_W}{d\alpha} - h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{d\alpha} \quad (3.1)$$

Trong đó

$$\begin{aligned} \frac{d(m_{cyl} \cdot u)}{d\alpha} & \quad - \text{Nội năng biến đổi bên trong xy lanh} \\ -p_{cyl} \cdot \frac{dV}{d\alpha} & \quad - \text{Công chu trình thực hiện} \\ \frac{dQ_F}{d\alpha} & \quad - \text{Nhiệt lượng cấp vào} \end{aligned}$$

$\sum \frac{dQ_w}{d\alpha}$	- Tổng thất nhiệt qua vách
$h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{d\alpha}$	- Tổng thất enthalpy lọt khí;
$m_{cyl}$	- Khối lượng môi chất bên trong xy lanh
$u$	- Nội năng;
$p_{cyl}$	- Áp suất bên trong xy lanh
$V$	- Thể tích xy lanh
$Q_F$	- Nhiệt lượng của nhiên liệu cung cấp
$\alpha$	- Góc quay trục khuỷu
$h_{BB}$	- Trị số enthalpy
$h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{d\alpha}$	- Biến thiên khối lượng dòng chảy



Hình 3.1. Mô hình tính toán quá trình cháy trong động cơ đốt trong

### 3.2.2. Mô hình cháy Fractal

Mô hình cháy Fractal dùng cho động cơ đánh lửa cưỡng bức, dự đoán tốc độ giải phóng nhiệt trong động cơ khí nạp đồng nhất. Các thông số quan trọng cần xét đến gồm có hình dạng buồng cháy, vị trí bugi và thời gian đánh lửa, thành phần khí nạp (khí sót, khí xả luân hồi và nhiên liệu), chuyển động nạp và mức độ xoáy lốc.

Tốc độ cháy tổng thể của mô hình Fractal được tính bằng giá trị trung bình tốc độ cháy rôi và cháy sát vách [13]:

$$\left(\frac{dm_b}{dt}\right)_{overall} = (1 - w_2)\left(\frac{dm_b}{dt}\right)_{fractals} + w_2 \left(\frac{dm_b}{dt}\right)_{wall-combustion} \quad (3.2)$$

Trong đó  $w_2$  là hệ số khối lượng, với:

$$\text{Tốc độ cháy rôi: } \left(\frac{dm_b}{dt}\right)_{fractals} = \rho_u A_s S_T = \rho_u \left(\frac{A_T}{A_L}\right) A_L S_L$$

$$\text{Tốc độ cháy sát vách: } \left(\frac{dm_b}{dt}\right)_{wall-combustion} = \frac{m - m_b}{\tau}$$

### 3.2.3 Mô hình truyền nhiệt

Quá trình truyền nhiệt từ buồng cháy qua thành vách xy lanh, piston, xéc măng, lót xy lanh...được tính theo phương trình truyền nhiệt cơ bản:

$$Q_{wi} = A_i \alpha_w (T_c - T_{wi}) \quad (3.3)$$

với  $Q_{wi}$  – nhiệt lượng truyền cho thành;  $A_i$  – diện tích truyền nhiệt

$\alpha_w$  – hệ số truyền nhiệt;  $T_c$  – nhiệt độ môi chất trong xy lanh;

$T_{wi}$  – nhiệt độ thành.

Hệ số truyền nhiệt  $\alpha_w$  có thể được tính theo một số mô hình khác nhau. Với mô hình Woschni 1978, hệ số truyền nhiệt có dạng sau [40]:

$$\left( \alpha_w = 130 \cdot D^{-0,2} \cdot p_c^{0,8} \cdot T_c^{-0,53} \cdot \left[ C_1 c_m + C_2 \cdot \frac{V_D \cdot T_{c,1}}{p_{c,1} V_{c,1}} (p_c - p_{c,0}) \right] \right)^{0,8} \quad (3.4)$$

$$C_1 = 2,28 + 0,308 \cdot c_u / c_m;$$

$$C_2 = 0,00324 \text{ với động cơ phun trực tiếp; } 0,00622 \text{ với động cơ phun gián tiếp}$$

$$D - \text{Đường kính xy lanh; } C_m - \text{Tốc độ trung bình của piston}$$

$$V_D - \text{Thể tích công tác của 1 xy lanh; } p_c - \text{Áp suất môi chất trong xy lanh}$$

$$p_{c,0} - \text{áp suất khí trời; } T_{c,1} - \text{Nhiệt độ môi chất tại thời điểm đóng xupap nạp}$$

$$p_{c,1} - \text{áp suất môi chất tại thời điểm đóng xupap nạp}$$

### 3.2.4. Mô hình hình thành $NO_x$

Mô hình hình thành phát thải  $NO_x$  trong động cơ xăng dựa trên mô hình động lực học phản ứng phát triển bởi Pattas và Hafner [14]. Các thông số nhập đầu vào gồm tốc độ động cơ, nhiên liệu, áp suất, nhiệt độ, hệ số dư lượng không khí  $\lambda$ , thể tích và khối lượng, thời gian cháy và số vùng cháy. Mô hình sử dụng 6 phản ứng của chuỗi Zeldovich mở rộng với hệ số tốc độ phản ứng cho trong bảng 3.1. Quá trình tính toán bắt đầu từ thời điểm xảy ra quá trình cháy.

Lượng  $N_2O$  sinh ra được tính đến theo biểu thức:

$$\frac{N_2O}{N_2\sqrt{O_2}} = 1,1802 \cdot 10^{-6} T_1^{0,6125} \exp\left[\frac{-18,71}{RT}\right] \quad (3.5)$$

Tốc độ hình thành NO được tính toán theo công thức sau:

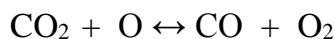
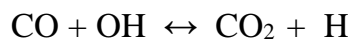
$$\frac{d[NO]}{dt} = 2(1 - \alpha^2) \left[ \frac{R_{1e}}{1 + \alpha K_2} + \frac{R_{4e}}{1 + K_4} \right] \cdot \frac{p}{RT} \quad (3.6)$$

Bảng 3.1. Cơ chế phản ứng hình thành  $NO_x$ . Hệ số tốc độ  $k = AT^B \exp(-E/T)$

Phản ứng	Phản ứng thuận			Phản ứng nghịch		
	A (cm <sup>3</sup> /mols)	B	E	A	B	E
		(-)	(kcal/mol K)	(cm <sup>3</sup> /mols)	(-)	(kcal/mol K)
$N_2 + O \leftrightarrow NO + N$	4.93 E13	0.0472	-75.59	1.6 E13	0	0
$O_2 + O \leftrightarrow NO + N$	1.48 E8	1.5	-5.68	1.25 E7	1612	-37.69
$OH + N \leftrightarrow NO + H$	4.22 E13	0	0	6.76 E14	-0.212	-49.34
$N_2O + O \leftrightarrow NO + NO$	4.58 E13	0	-24.1	7.39 E18	0.89	58.93
$O_2 + N_2 \leftrightarrow N_2O + O$	2.25 E10	0.825	-102.5	3.82 E13	0	-24.1
$OH + N_2 \leftrightarrow N_2O + H$	9.14 E7	1.148	-71.9	2.95 E13	0	-10.8

### 3.2.5. Mô hình hình thành CO

CO là sản phẩm cháy các hydrocacbon không hoàn toàn. Lượng phát thải CO có thể tính dựa trên hai phản ứng [15]:



Tốc độ phản ứng tạo thành CO được tính theo công thức:

$$\frac{d[\text{CO}]}{dt} = (R_1 + R_2) \left( 1 - \frac{[\text{CO}]}{[\text{CO}_e]} \right) \quad (3.7)$$

Trong đó  $[\text{CO}]_e$  là hàm lượng cân bằng của CO, các giá trị  $R_1$  và  $R_2$  là các hệ số được tính theo phương trình sau:

$$R_1 = k_1^+ [\text{CO}]_e [\text{OH}]_e = 6,76 \cdot 10^{10} \exp(T/1102) \quad (3.8)$$

$$R_2 = k_2^- [\text{CO}]_e [\text{O}_2]_e = 2,5 \cdot 10^{12} \exp(-24055/T) \quad (3.9)$$

### 3.2.6. Mô hình hình thành HC

Lượng phát thải HC ra ngoài chủ yếu gồm các hydrocacbon chưa cháy hết, có thể hình thành từ nhiều nguyên nhân và được xác định qua các yếu tố sau [16]:

- Tỷ lệ khí nạp lọt qua khe hở, không cháy được, màng lửa bị dập tắt.
- Hiệu ứng cháy sát vách.
- Hơi nhiên liệu cùng màng dầu bôi trơn bám lên mặt gương xy lanh trong kỳ nạp và kỳ nén.
- Hiện tượng cháy không hoàn toàn hoặc bỏ lửa khi chất lượng cháy kém.
- Hơi nhiên liệu trong đường ống xả.

Tốc độ hình thành HC được tính theo phương trình sau [15]:

$$\frac{d[\text{HC}]}{dt} = -c_{\text{HC}} A_{\text{HC}} e^{-E_{\text{HC}}/RT_{\text{gn}}} [\text{HC}] [\text{O}_2]^h \quad (3.10)$$



Trong đó  $A_{HC} = 7,7 \times 10^9 ((\text{m}^3/\text{mol})^{a+b-1}/\text{s})$ ;  $E_{HC} = 156222 (\text{J}/\text{mol})$

$R$  là hằng số chất khí có giá trị là  $8314 (\text{J}/\text{mol K})$

$T_{gas}$  là nhiệt độ trung bình trong lớp biên nhiệt có giá trị là  $(T_{gas} + T_{cyl.wall})/2$  với  $T_{gas}$  là nhiệt độ khí trong trong toàn bộ xy lanh

$T_{cyl.wall}$  là nhiệt độ của thành vách tại thời điểm đó;

$a$  và  $b$  là các số mũ và thường bằng 1.

$[HC]$  và  $[O_2]$  là mật độ của HC và  $O_2$  ( $\text{mol}/\text{m}^3$ ),  $c_{HC}$  là hằng số điều chỉnh tốc độ phản ứng tùy thuộc từng chế độ, từng loại động cơ.

### 3.3. Quá trình mô phỏng trên phần mềm

#### 3.3.1 Xây dựng mô hình mô phỏng

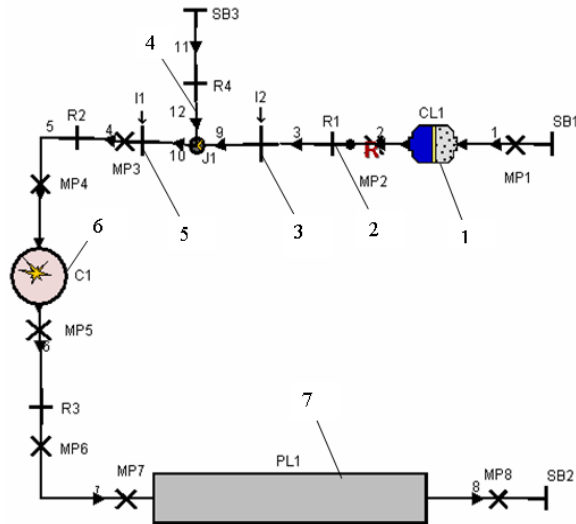
Động cơ mô phỏng là động cơ xe máy với dung tích xy lanh  $97 \text{ cm}^3$  có các thông số kỹ thuật trình bày trong bảng 3.2.

Bảng 3.2. Thông số kỹ thuật của động cơ thử nghiệm

Kiểu động cơ	Đánh lửa cưỡng bức
Số xy lanh	1
Đường kính xy lanh	50 mm
Hành trình piston	49,5 mm
Tỷ số nén	9:1
Dung tích xy lanh	$97 \text{ cm}^3$
Góc đánh lửa sớm	$15^\circ\text{TK}$ trước ĐCT

Mô hình động cơ xe máy trên phần mềm AVL Boost thể hiện trên hình 3.2. Không khí với điều kiện biên thứ nhất (SBI) được lọc bằng bầu lọc khí (CL1). Nhiên liệu chính (xăng) được cung cấp bởi bộ chế hòa khí (I1), khí giàu hydro được phun vào đường nạp thông qua vòi phun khí (I2). Hỗn hợp không khí/xăng/khí giàu hydro được hút vào trong xy lanh (C1) và thực hiện quá trình cháy. Sản phẩm của

quá trình cháy được thải ra ngoài môi trường (SB2) sau khi đi qua bình ổn áp (bộ tiêu âm – PL1).

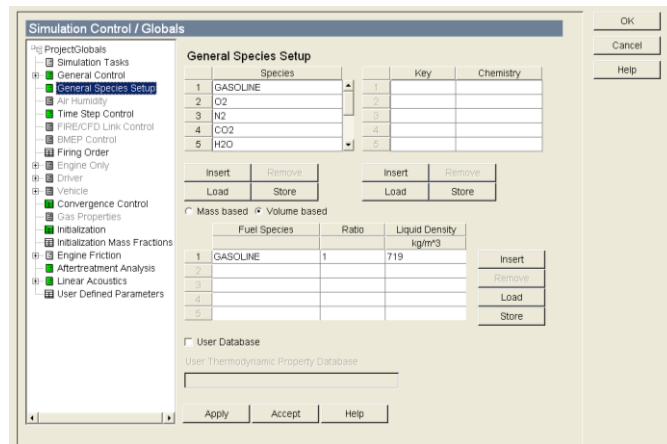


Hình 3.2. Mô hình động cơ thử nghiệm trên AVL Boost

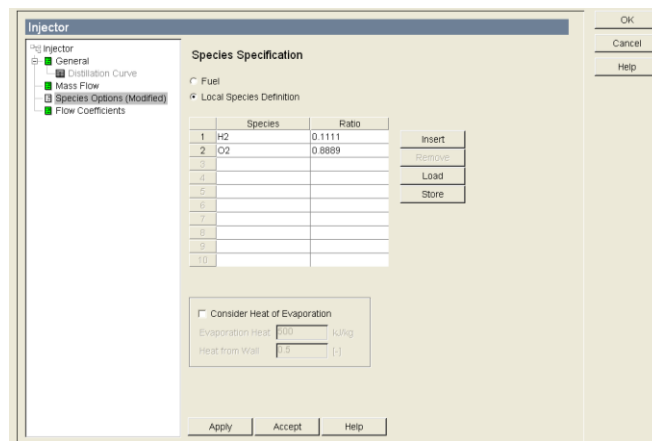
1. Lọc khí; 2. Phần tử cản dòng; 3. Bộ chế hòa khí; 4. Vòi phun khí giàu hydro; 5.

Xylanh động cơ; 6. Bình ổn áp (bình tiêu âm)

Do sản phẩm khí giàu hydro của quá trình tách một phần nhiên liệu thông qua bộ xúc tác lắp trên đường thải chưa tính toán được tỷ lệ các thành phần tại mỗi chế độ một cách cụ thể nên không thiết lập được hỗn hợp khí giàu hydro trong trường hợp này. Nội dung nghiên cứu mô phỏng trên phần mềm AVL Boost sẽ chỉ tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của khí HHO đến tính năng cũng như phát thải của động cơ tại các chế độ. Ban đầu thiết đặt General Species Transport được chọn để thiết lập danh sách các loại nhiên liệu bao gồm xăng (gasoline) và 6 thành phần khí khác bao gồm  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$  và  $H_2$ . Trong vòi phun nhiên liệu thể lỏng, nhiên liệu được chọn là xăng (hình 3.3), trong khi đó ở vòi phun khí, hai thành phần hydro và oxy được sử dụng với tỷ lệ tương ứng là 0.1111 và 0.8889 (hình 3.4).



Hình 3.3. Giao diện chọn nhiên liệu chính cho động cơ



Hình 3.4. Thiết lập nhiên liệu khí HHO trên AVL Boost

### 3.3.2. Chế độ mô phỏng

Giữ tốc độ động cơ không đổi tại 3000 vòng/phút, bướm ga mở hoàn toàn. Lưu lượng khí HHO cung cấp lần lượt là 2 lít/phút (ký hiệu: Xăng + 2 HHO), 4 lít/phút (Xăng + 4 HHO), 6 lít/phút (Xăng + 6 HHO). Phương trình tính hệ số dư lượng không khí  $\lambda$  khi sử dụng hỗn hợp xăng – khí HHO như sau:

$$\lambda = \frac{m_{kk}}{m_x \cdot (A/F)_x + m_{HHO} \cdot (A/F)_{HHO}} \quad (3.11)$$

trong đó:

- $m_{kk}$ ,  $m_x$ ,  $m_{HHO}$  lần lượt là lưu lượng khối lượng của không khí, xăng và khí HHO (g/s)

- $(A/F)_x$ ,  $(A/F)_{HHO}$  là lượng không khí lý thuyết để đốt cháy hết một kg xăng và khí HHO  $\{(A/F)_x=14,6; (A/F)_{HHO}=0\}$ .

Tại mỗi lưu lượng khí HHO, lượng xăng cung cấp được điều chỉnh giảm nhằm giữ  $\lambda$  không đổi. Do khí HHO chiếm chỗ trong đường nạp, vì vậy lượng khí nạp mới đi vào động cơ giảm ( $m_{kk}$  giảm), dẫn đến  $\lambda$  giảm khi bổ xung HHO nếu giữ nguyên lượng xăng cung cấp.

Quá trình mô phỏng tiến hành ở các giá trị tốc độ, vị trí bướm ga với lượng nhiên liệu thu được từ quá trình thử nghiệm thực tế như trong bảng 3.3. Giá trị hệ số dư lượng không khí  $\lambda$ , tốc độ động cơ được lấy từ kết quả thực nghiệm (bảng 3.4). Những thông số kết cấu như đường kính xylanh, hành trình piston, chiều dài thanh truyền, độ nâng cam nạp và cam thải, các thông số đường ống... được nhập theo các thông số của nhà sản xuất.

*Bảng 3.3. Lượng nhiên liệu tiêu thụ (kg/h) tại các điểm thử nghiệm*

Tốc độ động cơ (v/ph)	30% bướm ga	50% bướm ga	70% bướm ga
3200	0.55		
3600	0.56	0.74	
4000	0.58	0.83	
4400	0.61	0.88	
4800	0.65	0.93	
5200	0.67	0.98	
5600	0.69	1.05	1.11
6000		1.06	1.15
6400		1.09	1.19
6800		1.11	1.23
7200			1.28
7600			1.33

Bảng 3.4. Hệ số dư lượng không khí  $\lambda$  tại các điểm thử nghiệm

Tốc độ động cơ (v/ph)	30% bướm ga	50% bướm ga	70% bướm ga
3200	1.04		
3600	1.08	1.03	
4000	1.03	1.00	
4400	1.03	0.98	
4800	1.01	0.98	
5200	1.01	1.02	
5600	0.98	1.00	1.05
6000		1.02	1.06
6400		1.02	1.11
6800		1.04	1.10
7200			1.10
7600			1.07

Tính toán lưu lượng khối lượng HHO:

$$G = \omega \cdot \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_0 \gamma \left[ \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

trong đó:

$\omega$  – tiết diện miệng vòi phun,  $\omega = 4,909.10^{-6}$  (m<sup>2</sup>)

$g$  – gia tốc trọng trường,  $g = 9,81$  (m/s<sup>2</sup>)

$k$  – hằng số chất khí,  $k = 1,41$

$p$  – áp suất trong đường ống nạp,  $p = 95.000$  (N/m<sup>2</sup>)

$p_0$  – áp suất phun (N/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  – trọng lượng riêng của khí HHO,  $\gamma = 5,2554$  (N/m<sup>3</sup>)

Thay số ta được:

- Với áp suất phun 0,3 at

$$G_1 = 0,007674 \text{ (N/s)} \sim G_1 = 1,564.10^{-6} \text{ (kg/mỗi lần phun)}$$

- Với áp suất phun 0,5 at

$$G_2 = 0,008986 \text{ (N/s)} \sim G_2 = 1,832.10^{-6} \text{ (kg/mỗi lần phun)}$$

### **3.4. Quy trình thực nghiệm để tạo bộ thông số đầu vào cho mô hình**

Thông số đầu vào của mô hình cháy sử dụng trên phần mềm mô phỏng AVL Boost có ý nghĩa rất quan trọng, ảnh hưởng tới độ chính xác của kết quả mô phỏng. Vì vậy, cần phải thiết lập và xây dựng quy trình thử nghiệm để tạo bộ thông số đầu vào của động cơ sử dụng trên mô hình mô phỏng.\

Các thông số đầu vào bao gồm:

- Mô men động cơ
- Tốc độ động cơ
- Lưu lượng khí nạp
- Nhiệt độ khí nạp
- Áp suất phun khí HHO
- Lượng nhiên liệu HHO cung cấp
- Vị trí chân ga
- Thời gian phun và thời điểm phun nhiên liệu
- Tiết diện lưu thông của vòi phun nhiên liệu...

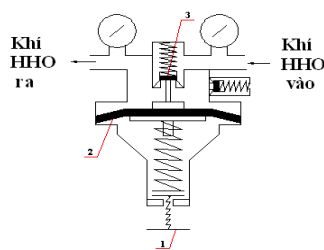
#### **3.4.1. Thiết lập hệ thống thử nghiệm**

Hình 3.5 thể hiện sơ đồ hệ thống thử nghiệm xác định bộ thông số đầu vào cho mô hình. Phanh thủy lực Didacta T101D được dùng để truyền tín hiệu mômen của động cơ về máy tính hiển thị. Lượng tiêu hao nhiên liệu được xác định thông qua thiết bị cân nhiên liệu AVL Fuel Balance 733S.



#### 3.4.2.2. Van giảm áp

Hình ảnh thực tế và sơ đồ nguyên lý của van giảm áp được trình bày trong hình 3.7. Áp suất khí HHO đi qua van giảm áp được quyết định qua độ mở của van tiết lưu, được điều chỉnh bởi tay vặn 1. Khi vặn tay vặn 1 theo chiều giảm áp, lò xo của tay vặn 1 kéo màng cao su 2 đi xuống, qua đó đóng kín dần cửa của van tiết lưu 3, khi đó áp suất khí HHO đi vào động cơ sẽ giảm và ngược lại.



Hình 3.7. Hình ảnh thực tế và sơ đồ nguyên lý van giảm áp

#### 3.4.2.3. Van điện từ

Van điện từ gồm 1 cuộn hút, một lõi sắt và một lò xo nén vào lõi sắt (hình 3.8). Khi không có dòng điều khiển thì lò xo ép vào lõi sắt, van ở trạng thái đóng. Khi có dòng điều khiển từ bộ EHC, cuộn hút được cấp nguồn 24V và sinh từ trường để hút lõi sắt, từ trường này đủ mạnh để thắng được lực nén của lò xo làm mở van, cho dòng khí HHO đi qua.



Hình 3.8. Van điện từ



#### 3.4.2.4. Vòi phun HHO

Sơ đồ kết cấu của vòi phun khí HHO được thể hiện trong hình 3.9. Khi chưa có dòng điện chạy qua cuộn dây của nam châm điện, lò xo ép kim phun xuống đế. Lúc này vòi phun ở trạng thái đóng kín.

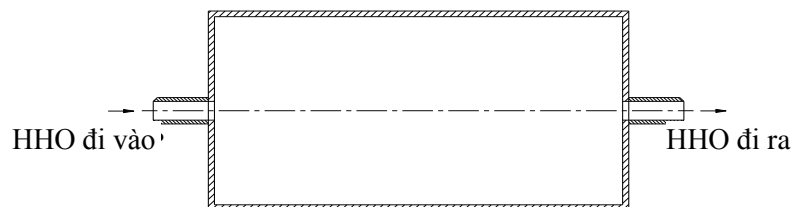


Hình 3.9. Sơ đồ kết cấu vòi phun HHO

Khi có dòng điện kích thích, nam châm điện sẽ hút lõi từ, kim phun nâng lên khoảng 0,1mm, nhiên liệu được phun ra nhờ sự chênh áp giữa 2 đầu. Lượng khí HHO phun ra hoàn toàn được quyết định bởi thời gian phun (độ rộng xung phun) để đảm bảo được chế độ làm việc của động cơ.

#### 3.4.2.5. Bình ổn áp

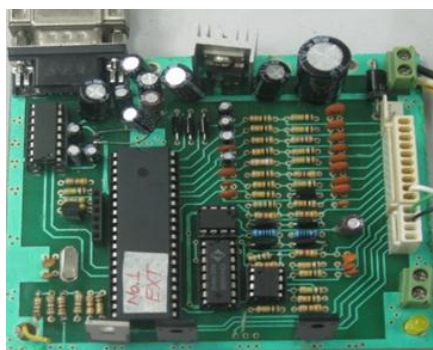
Nhằm tăng độ chính xác của cảm biến lưu lượng cũng như ổn định áp suất dòng hỗn hợp khí, phía trước vòi phun có lắp 1 bình ổn áp dạng trụ rỗng có kết cấu đơn giản như được thể hiện ở hình 3.10.



Hình 3.10. Bình ổn áp

#### 3.4.2.6. Bộ điều khiển hệ thống cung cấp khí HHO

Bộ điều khiển hệ thống cung cấp hỗn hợp khí cho động cơ gồm các khối: khối nguồn, khối ghi nhận tín hiệu từ cảm biến, khối vi xử lý, khối điều khiển cơ cấu chấp hành và khối kết nối máy tính. Khối tín hiệu từ cảm biến cho phép tính toán được lượng hỗn hợp khí theo các chế độ làm việc của động cơ. Sau khi vi xử lý tính toán lượng không khí cung cấp sẽ đưa ra tín hiệu xung để mở vòi phun. Lượng khí đi vào động cơ được xác định thông qua thời gian mở vòi phun, áp suất phun và tiết diện lưu thông của vòi phun. Trong quá trình nghiên cứu, việc thay đổi lượng không khí phun vào để tìm ra tỷ lệ tối ưu giữa lượng khí HHO cung cấp và xăng được thực hiện thông qua khối kết nối giữa máy tính và bộ điều khiển EHC.



Hình 3.11. Hình ảnh thực tế của bộ điều khiển EHC

Bộ EHC điều khiển hệ thống nhiên liệu khí HHO kết nối với máy tính hiển thị các thông số của các cảm biến trên máy tính, cũng như để điều chỉnh được lượng khí HHO vào trong động cơ... Việc truyền thông giữa máy tính và vi xử lý được thực hiện thông qua bộ truyền nhận nối tiếp UART RS-232.

Chương trình truyền thông giao tiếp giữa PC và vi xử lý được viết bằng Delphi với những nhiệm vụ chính sau:

- Nhận dữ liệu từ vi điều khiển để hiển thị các thông số làm việc của động cơ như tốc độ, lưu lượng, nhiệt độ, vị trí chân ga...
- Truyền dữ liệu từ máy tính xuống vi xử lý để đóng mở các van điện từ, thay đổi lượng nhiên liệu phun...

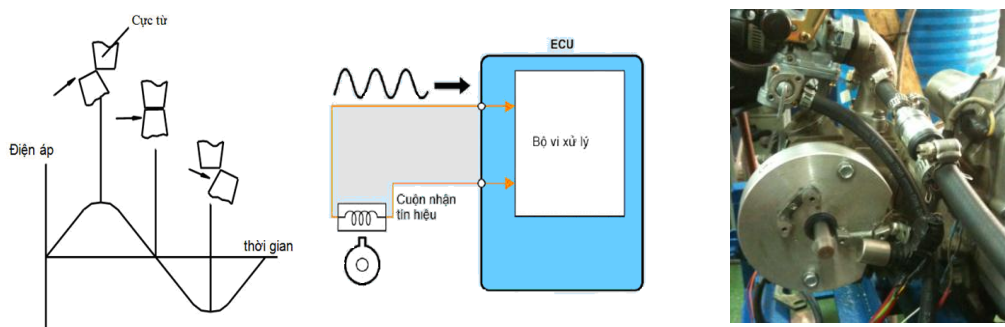
Giao diện điều khiển hệ thống cung cấp nhiên liệu khí HHO để hiển thị các thông số của các cảm biến và điều chỉnh lượng nhiên liệu phun, thay đổi thời điểm phun, bật tắt các công tắc,... trong quá trình thử nghiệm thì bộ điều khiển EHC phải được điều khiển từ máy tính.

#### 3.4.2.7. Cảm biến tốc độ động cơ

Tốc độ động cơ dùng để tính toán lượng nhiên liệu phun khí HHO vào đường ống nạp và xác định thời điểm phun. Nguyên lý làm việc của cảm biến tốc độ động cơ kiểu cảm ứng cho trên hình 3.12.

Trên trục quay của trục cam có gắn 1 vấu sắt còn cảm biến là một cuộn dây quấn trên một lõi nam châm. Khi trục quay, vấu cam chạy qua cảm biến làm thay đổi từ trường đi qua cuộn dây, làm xuất hiện trong cuộn dây một suất điện động có tần số thay đổi tỷ lệ với tốc độ quay.

Biên độ E của suất điện động trong cuộn dây phụ thuộc khoảng cách và tốc độ quay. Khoảng cách giữa cuộn dây với vấu sắt càng lớn thì biên độ của suất điện động càng nhỏ, thường không quá  $0,2 \div 0,4\text{mm}$ . Tốc độ quay tỷ lệ thuận với biên độ của suất điện động.



Hình 3.12. Nguyên lý làm việc và hình ảnh cảm biến tốc độ động cơ

#### 3.4.2.8. Phanh thủy lực

Phanh thủy lực (Didacta T101D) thuộc dạng phanh thủy lực kiểu chốt. Rôto gồm 7 cánh nối với trục khuỷu động cơ thông qua khớp nối, ly hợp... Stato gồm 13 cánh tĩnh được đúc liền với thân băng nhằm tạo ra các khoang chứa nước (hình

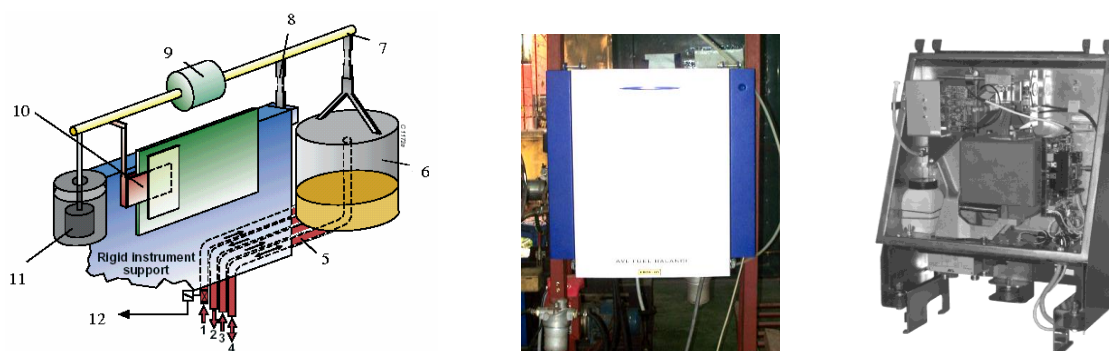
3.13). Mômen động cơ được đưa về máy tính hiển thị thông qua bộ chuyển đổi tín hiệu.



Hình 3.13. Phan thủy lực Didacta T101D

#### 3.4.2.9. Thiết bị đo lượng nhiên liệu tiêu thụ

Hệ thống AVL Fuel Balance 733S đo lượng nhiên liệu tiêu thụ của động cơ bằng cách cân lượng nhiên liệu trong bình chứa. Có thể đo liên tục lượng nhiên liệu trong một khoảng thời gian từ khi đầy bình đến khi nhiên liệu trong bình giảm tới mức 0 (hình 3.14). Sai số của thiết bị là 0,1%; dải đo từ 0 đến 150 kg/h.



Hình 3.14. Sơ đồ nguyên lý và hình ảnh thực tế của AVL Fuel Balance 733S

1. Nhiên liệu cấp vào thùng đo, 2. Nhiên liệu tới động cơ, 3. Nhiên liệu hồi từ động cơ, 4. ống thông hơi, 5. Các ống nối mềm, 6. Thùng đo, 7. Thanh cân, 8. Lò xo lá, 9. Cân bì, 10. Cảm biến lưu lượng, 11. Thiết bị giảm chấn, 12. Van điện từ đường nạp.

Ban đầu, nhiên liệu được cấp đầy vào thùng đo 6 thông qua đường cấp 1. Khi lượng nhiên liệu đã đầy thùng, lực tì lên cảm biến lưu lượng là lớn nhất, van điện từ 12 đóng lại ngăn dòng nhiên liệu vào thùng đo trong khi đường cấp vào động cơ

vẫn mở. Đồng thời với quá trình đó, bộ phận đếm thời gian hoạt động, từ đó tính ra lượng nhiên liệu tiêu thụ của động cơ.

### ***3.4.3. Chế độ thử nghiệm***

Hệ thống cung cấp khí HHO được điều khiển thông qua bộ điều khiển EHC và máy tính kết nối. Lưu lượng xăng cung cấp và hệ số dư lượng không khí giống với chế độ mô phỏng.

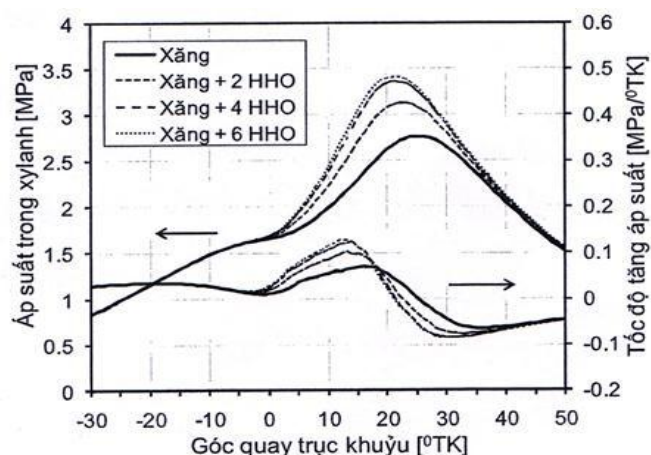
Khí HHO được phun vào đường nạp sau bộ chế hoà khí với áp suất phun là 0,3 at lúc bướm ga mở 30% và 50%, áp suất phun 0,5 at khi bướm ga mở 70%. Lưu lượng khí HHO cung cấp ứng với hai áp suất phun lần lượt là 1,564 và 1,832 mg cho mỗi lần phun.

## **3.5. Kết quả mô phỏng**

### ***3.5.1. Hiệu suất nhiệt chỉ thị***

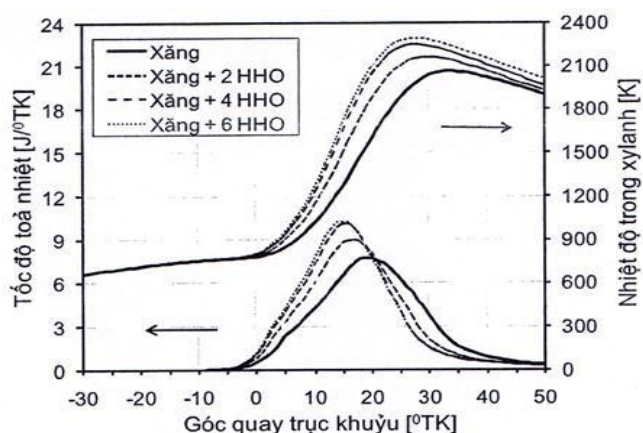
Hình 3.15 trình bày diễn biến áp suất và tốc độ tăng áp suất trong xy lanh động cơ tại trường hợp  $\lambda = 1,4$  ứng với ba giá trị lưu lượng khí HHO cung cấp. Do tốc độ cháy của hydro (thành phần chính của khí HHO) rất lớn, vì vậy quá trình cháy của hỗn hợp xăng - khí HHO diễn ra nhanh hơn. Thời gian cháy chính giảm khi tăng lưu lượng khí HHO cung cấp, với 18,31%, 29,17% và 29,29% so với động cơ nguyên bản.

Vì vậy, thời điểm đạt giá trị áp suất lớn nhất ( $p_{Zmax}$ ) sớm hơn, giá trị  $p_{Zmax}$  vì vậy cũng cao hơn so với động cơ sử dụng xăng. Do tốc độ cháy nhanh, vì vậy tốc độ tăng áp suất trong xy lanh lớn hơn, động cơ làm việc rung giật, có độ ồn lớn.



Hình 3.15. Diễn biến áp suất và tốc độ tăng áp suất tại  $\lambda = 1,4$

Hình 3.16 trình bày diễn biến của nhiệt độ và tốc độ tỏa nhiệt trong xy lanh tại hệ số dư lượng không khí  $\lambda = 1,4$  và ba mức lưu lượng khí HHO bổ sung. Do tốc độ cháy lớn, quá trình cháy diễn ra sớm hơn, quá trình tỏa nhiệt trong xy lanh diễn ra sớm và nhanh hơn, nên nhiệt độ trong buồng cháy càng tăng khi lưu lượng khí HHO cung cấp.



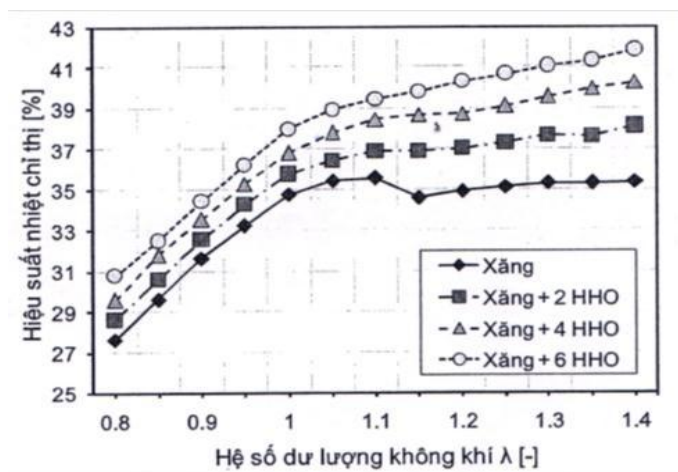
Hình 3.16. Diễn biến nhiệt độ và tốc độ tỏa nhiệt tại  $\lambda = 1,4$

Hình 3.17 trình bày hiệu suất nhiệt chỉ thị của động cơ xe máy trên phần mềm AVL Boost. Kết quả mô phỏng đã cho thấy, hiệu suất của động cơ cải thiện rõ rệt khi bổ sung khí HHO vào đường nạp do quá trình cháy diễn ra hoàn toàn hơn.

Có thể thấy, tại hỗn hợp nhạt, hiệu suất nhiệt tăng đáng kể so với động cơ nguyên bản. Cụ thể, tại  $\lambda = 1,4$ , hiệu suất nhiệt chỉ thị của động cơ tăng 7,78%, 13,86% và 18,38% khi bổ sung 2, 4 và 6 lít/ phút khí HHO. Nếu góc đánh lửa quá

sớm, với tốc độ cháy cao của hydro, áp suất tăng nhanh ngay trong kỳ nén, dẫn đến tăng công nén, làm giảm hiệu suất động cơ.

Do góc đánh lửa sớm nhỏ, nên hầu hết các quá trình cháy diễn ra ở sau điểm chết trên, giúp cải thiện công giãn nở, vì vậy trong trường hợp này, bổ sung khí HHO làm tăng hiệu suất động cơ.

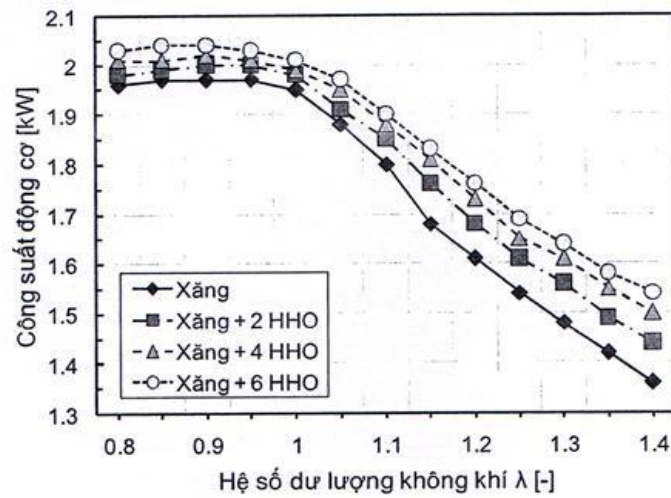


Hình 3.17. Hiệu suất nhiệt chỉ thị của động cơ tại các giá trị  $\lambda$  và lưu lượng khí HHO

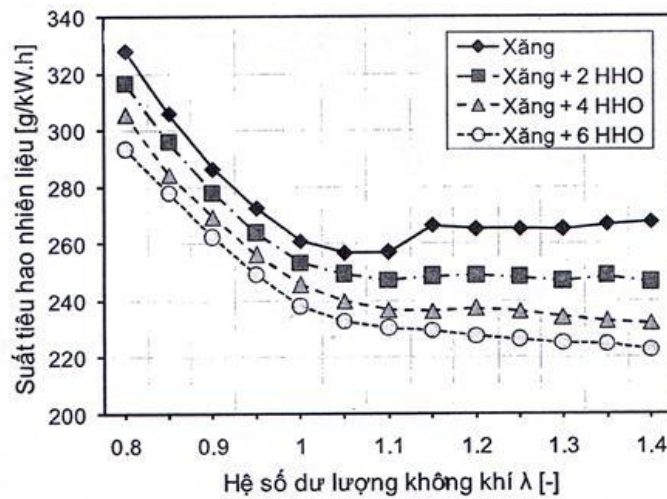
Công suất và suất tiêu hao nhiên liệu của động cơ theo  $\lambda$  và lưu lượng khí HHO được thể hiện trên hình 3.18 và hình 3.19. Do hiệu suất động cơ được cải thiện, vì vậy công suất động cơ tăng, suất tiêu hao nhiên liệu giảm, đặc biệt là tại hỗn hợp nhạt.

Cụ thể, tại trường hợp  $\lambda = 1,4$ , công suất động cơ tăng 5,88%, 10,29% và 13,24%; suất tiêu hao nhiên liệu giảm 7,94%, 13,33% và 16,89% khi bổ sung lần lượt 2, 4 và 6 lít khí HHO/phút.





Hình 3.18. Công suất động cơ tại các giá trị  $\lambda$  và lưu lượng khí HHO



Hình 3.19. Suất tiêu hao nhiên liệu tại các giá trị  $\lambda$  và lưu lượng khí HHO

### 3.5.2. Các thành phần phát thải

Sự thay đổi của ba thành phần phát thải chính bao gồm  $\text{NO}_x$ , CO và HC theo các giá trị của  $\lambda$  và các loại nhiên liệu sử dụng được trình bày trên hình 3.20÷3.22. Hình 3.20 thể hiện sự thay đổi của thành phần  $\text{NO}_x$  trong khí thải động cơ, có thể thấy  $\text{NO}_x$  có xu hướng tăng khi tăng tỷ lệ khí HHO trong hỗn hợp.

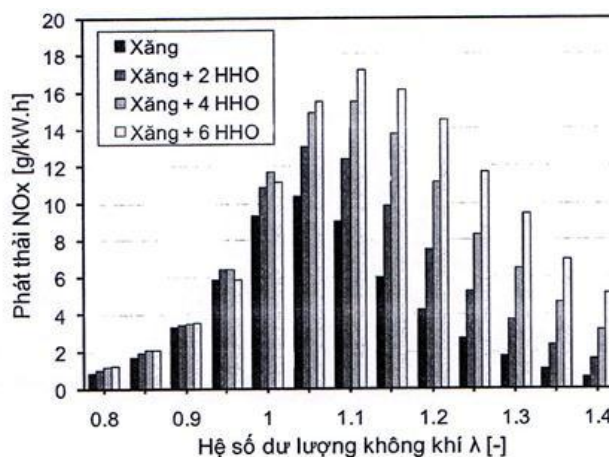
Điều này có thể được giải thích thông qua diễn biến nhiệt độ trong xy lanh (hình 3.16). Ta thấy, giá trị nhiệt độ lớn nhất ( $T_{Z_{\max}}$ ) tăng khi bổ sung khí HHO, trong khi đó  $\lambda$  không đổi, vì vậy phát thải  $\text{NO}_x$  tăng khi có khí HHO trong hỗn hợp môi chất.



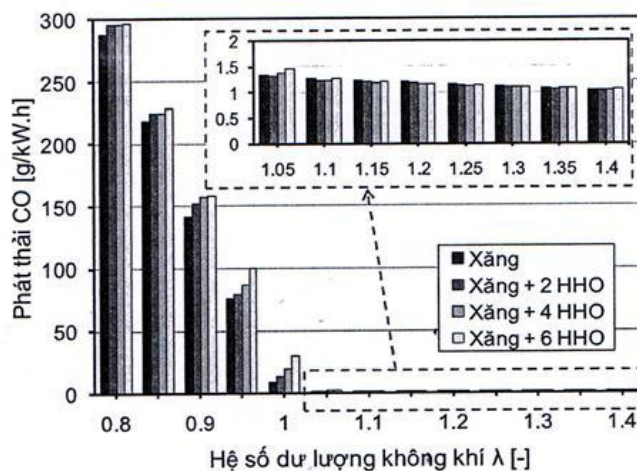
Tại  $\lambda=1,4$ ,  $\text{NO}_x$  tăng lần lượt 148%, 404% và 719% khi lưu lượng HHO cung cấp là 2, 4 và 6 lít/ phút.

Khi hỗn hợp đậm, phát thải CO tăng khi bổ sung HHO do quá trình cháy quá ngắn, và tỷ lệ ôxy trong hỗn hợp nhỏ, thời gian cháy giảm, khả năng thực hiện phản ứng ôxy hóa CO tạo thành  $\text{CO}_2$  và hơi nước kém.

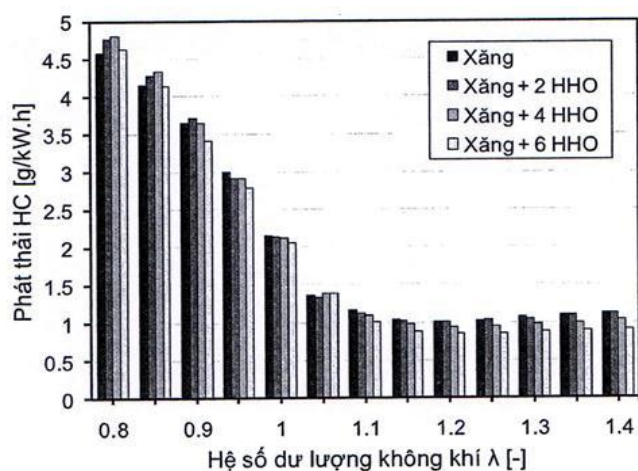
Tuy nhiên, tại hỗn hợp nhạt, tốc độ cháy giảm, hỗn hợp có đủ ôxy, vì vậy CO có chiều hướng giảm. Trung bình, khi  $\lambda < 1,2$ , CO tăng 4,6%, 11% và 23,5%; khi  $\lambda \geq 1,2$ , CO giảm 1,74%, 1,97% và 0,93% so với trường hợp sử dụng xăng ứng với ba lưu lượng khí HHO cung cấp. Trung bình HC giảm 0,51%, 3,49% và 10,06% lưu lượng khí HHO lần lượt là 2, 4 và 6 lít/phút.



Hình 3.20. Phát thải  $\text{NO}_x$  tại các giá trị  $\lambda$  và lưu lượng khí HHO



Hình 3.21. Phát thải CO tại các giá trị  $\lambda$  và lưu lượng khí HHO



Hình 3.22. Phát thải HC tại các giá trị  $\lambda$  và lưu lượng khí HHO

Nếu muốn giữ nguyên công suất động cơ khi khí HHO bổ sung, có thể điều chỉnh giảm lượng xăng cung cấp trên mỗi chu trình. Tiến hành mô phỏng động cơ khi có khí HHO bổ sung với lưu lượng 2, 4 và 6 lít/phút. Công suất giữ tại 1,97 kW, tốc độ động cơ 3000 vòng/phút.

Kết quả mô phỏng cho thấy, suất tiêu hao nhiên liệu giảm lần lượt 13%, 16% và 19%, sự thay đổi của hiệu suất nhiệt cũng như các thành phần phát thải được thể hiện trong bảng 3.5.

Bảng 3.5. Sự thay đổi của các thành phần phát thải, suất tiêu hao nhiên liệu và hiệu suất nhiệt chỉ thị khi giữ công suất động cơ không đổi

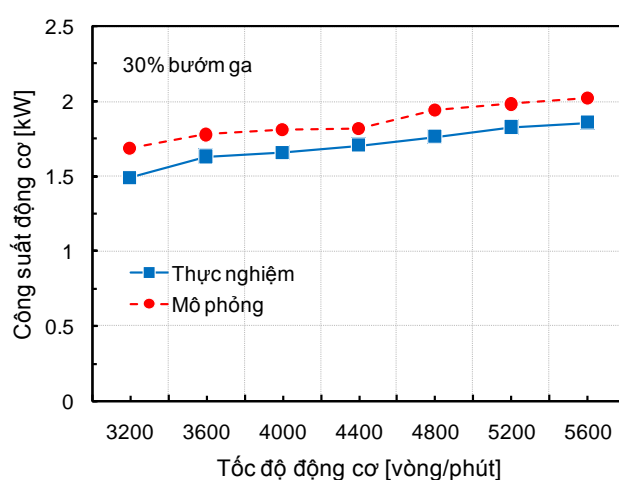
Lưu lượng HHO	NO <sub>x</sub>	CO	HC	Nhiên liệu	Hiệu suất
2 lít/phút	+277%	-95%	-43%	-13%	+14%
4 lít/phút	+322%	-99%	-49%	-16%	+18%
6 lít/phút	+372%	-99%	-57%	-19%	+23%

### 3.6. Kiểm chứng tính chính xác của mô hình bằng thực nghiệm

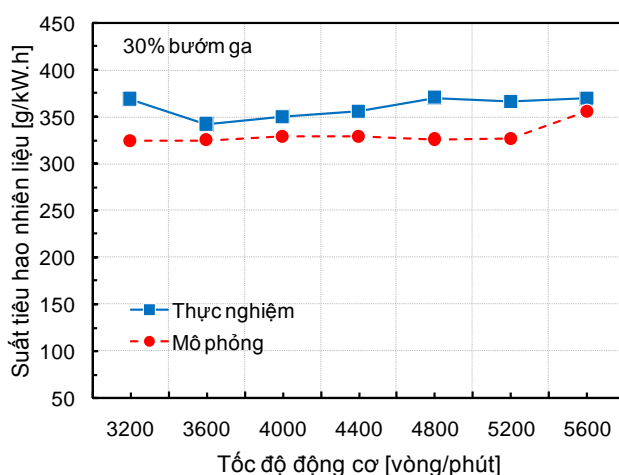
Các hình 3.23÷3.28 thể hiện giá trị công suất động cơ và suất tiêu hao nhiên liệu theo tốc độ động cơ theo kết quả mô phỏng và thực nghiệm tại 3 vị trí bướm ga: 20%, 50% và 70%. Kết quả cho thấy công suất động cơ theo mô phỏng cao hơn so với thực nghiệm, trong khi suất tiêu hao nhiên liệu thấp hơn. Theo mô phỏng, quá

trình cháy diễn ra hoàn toàn, vì vậy hiệu suất cháy cao hơn, dẫn đến công suất động cơ lớn hơn, suất tiêu hao nhiên liệu nhỏ hơn.

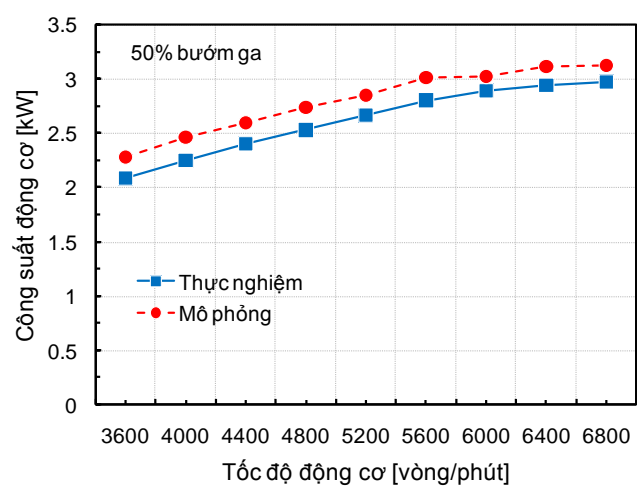
Có thể thấy sai lệch giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm lớn hơn so với sai lệch khi sử dụng xăng do trong phần mềm mô phỏng AVL Boost, khí HHO là hỗn hợp của  $H_2$  và  $O_2$  nguyên chất, không có các tạp chất như hơi nước, các gốc  $OH^-$  như trên thực tế. Vì vậy quá trình cháy khi bổ sung HHO diễn ra tốt hơn so với thực tế.



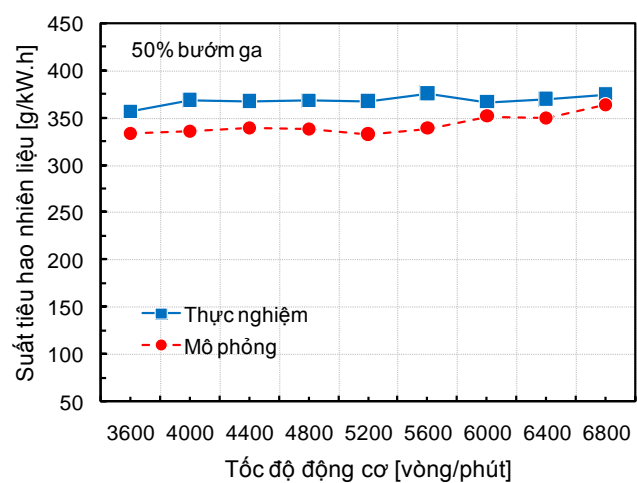
Hình 3.23. Công suất động cơ theo mô phỏng và thực nghiệm tại 30% bướm ga



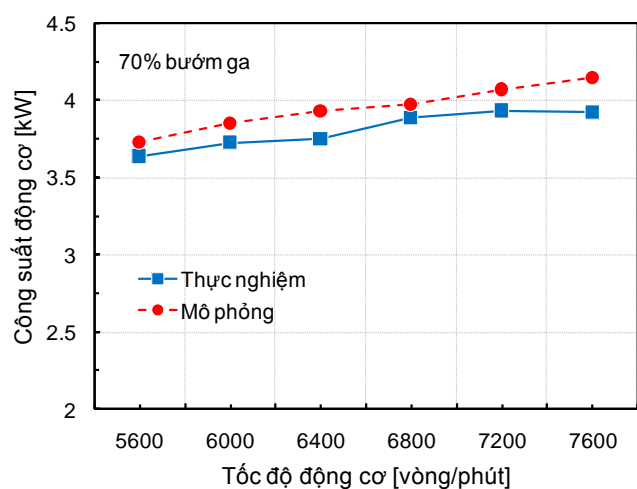
Hình 3.24. Suất tiêu hao nhiên liệu theo mô phỏng và thực nghiệm tại 30% bướm ga



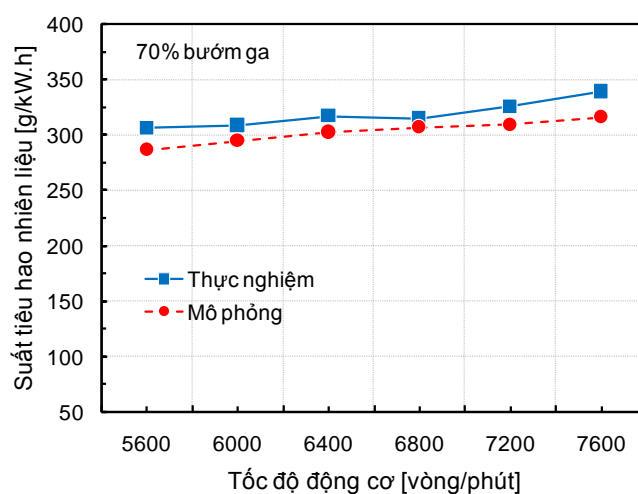
Hình 3.25. Công suất động cơ theo mô phỏng và thực nghiệm tại 50% bướm ga



Hình 3.26. Suất tiêu hao nhiên liệu theo mô phỏng và thực nghiệm tại 50% bướm ga



Hình 3.27. Công suất động cơ theo mô phỏng và thực nghiệm tại 70% bướm ga



Hình 3.28. Suất tiêu hao nhiên liệu theo mô phỏng và thực nghiệm tại 70% bướm ga

Trung bình trên toàn dải tốc độ thử nghiệm, khi bướm ga mở 30%, công suất động cơ giữa thực nghiệm và mô phỏng chênh lệch khoảng 9,33%, trong khi suất tiêu hao nhiên liệu là 8,2%. Tại vị trí bướm ga mở 50% và 70%, sự sai lệch của công suất theo kết quả mô phỏng và thực nghiệm là không đáng kể, chỉ khoảng 7,2% và 7,03%. Ở hai vị trí bướm ga này, suất tiêu hao nhiên liệu cũng không có nhiều sự khác biệt, giữa mô phỏng và thực nghiệm chênh lệch 3,65% và 4,98%.

### 3.7. Kết luận chương 3

AVL-Boost là một công cụ mô phỏng chu trình công tác và quá trình trao đổi khí của động cơ. Boost cho phép xây dựng mô hình đầy đủ của toàn thể động cơ bằng cách lựa chọn các phần tử có trong hộp công cụ và nối chúng lại bằng các phần tử ống nối. Giữa các đường ống, người ta sử dụng các phương trình động lực học.

Thông số đầu vào của mô hình mô phỏng, đặc biệt mô hình cháy trong động cơ đốt trong sử dụng trên phần mềm AVL-Boost là vô cùng quan trọng, ảnh hưởng tới độ chính xác của kết quả mô phỏng. Chuyên đề này đã trình bày việc xây dựng và đưa ra được quy trình thử nghiệm để tạo bộ thông số đầu vào cho động cơ sử dụng trên mô hình mô phỏng.

Kết quả so sánh giữa mô phỏng và thử nghiệm kiểm chứng có sự sai lệch nằm trong giới hạn cho phép, vì vậy mô hình có thể coi là tương đối chính xác. Cụ thể, khi sử dụng hỗn hợp xăng-khí HHO, độ sai lệch trở nên lớn hơn so với khi sử dụng xăng, do thành phần khí HHO trên mô phỏng là hỗn hợp khí lý tưởng của hai thành phần hydro và oxy, không bao gồm tạp chất khác như trên thực tế. Vì vậy quá trình cháy diễn ra tốt hơn. Khi bướm ga mở 30%, công suất và suất tiêu hao nhiên liệu giữa mô phỏng và thực nghiệm có độ sai lệch khoảng 9,33% và 8,2%. Trong khi ở các vị trí bướm ga 50% và 70%, độ chênh lệch này đã giảm xuống còn 7,2% và 7,03% đối với công suất, 3,65% và 4,98% đối với suất tiêu hao nhiên liệu.

Độ sai lệch trên là không đáng kể, vì vậy các kết quả của quá trình mô phỏng có thể được sử dụng như một tài liệu tham khảo để phục vụ cho quá trình nghiên cứu.

## **KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN**

### **Kết luận chung**

Trên cơ sở nghiên cứu và thực hiện đề tài sử dụng mô hình hóa nghiên cứu đặc tính làm việc và phát thải của động cơ chạy bằng nhiên liệu khí giàu hydro, có thể rút ra một số kết luận như sau.

- Việc sử dụng khí giàu hydro trên động cơ là một giải pháp khả thi để giảm phát thải ô nhiễm môi trường, nâng cao tính kinh tế nhiên liệu nhằm giảm gánh nặng đến nguồn nhiên liệu có nguồn gốc hoá thạch.
- Phân tích khả năng nâng cao hiệu suất, giảm phát thải độc hại gây ô nhiễm môi trường của động cơ khi sử dụng khí giàu hydro dựa trên các kinh nghiệm của các nước tiên tiến.
- Xây dựng thành công mô hình động cơ xe máy sử dụng hỗn hợp nhiên liệu xăng-HHO trên phần mềm AVL Boost để đánh giá khả năng nâng cao hiệu suất nhiệt cũng như giảm các thành phần phát thải độc hại. Kết quả mô phỏng được sử dụng làm cơ sở định hướng cho phần thực nghiệm về sau.

### **Hướng phát triển**

Kết quả nghiên cứu của đề tài đã đưa ra giải pháp cung cấp khí giàu hydro cho động cơ xăng nhằm nâng cao tính kinh tế nhiên liệu và giảm phát thải độc hại gây ô nhiễm môi trường tại Việt Nam. Tuy nhiên, đề tài mới chỉ dừng lại ở mức độ mô phỏng trong phòng thí nghiệm và đối tượng nghiên cứu chỉ dừng lại ở đối tượng động cơ xe máy. Nhằm đưa nghiên cứu này ứng dụng vào trong thực tiễn để giảm phát thải độc hại và cải thiện hiệu suất động cơ từ các phương tiện sử dụng động cơ đốt cháy cưỡng bức, cần thiết phải bổ sung các nghiên cứu sau:

- Thử nghiệm trên các loại động cơ đốt cháy cưỡng bức khác như động cơ ô tô, động cơ máy phát điện...
- Tối ưu kết cấu, kích thước của hệ thống điện phân sản xuất khí HHO nhằm đáp ứng được tính linh hoạt và có thể sử dụng trực tiếp ngay trên phương tiện.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Anh

- [1] Radu Chiriac, et al; “*Effects of Gasoline-Air enrichment with HRG gas on efficiency and emission of a SI engine*”; SAE Paper No.2006-01-3431.
- [2] T.D’ Adrea, et al; “*Investigating combustion enhancement and emission reduction with the addition of  $2H_2+O_2$  to a SI Engine*”; SAE Paper No.2003-32-0011.
- [3] Sa’ed A. Musmar, Ammar A. Al-Rousan, *Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines*, Fuel 90 (2011) 3066–3070.
- [4] Shoufeng Wang, et all., *Improving the performance of a gasoline engine with the addition of hydrôgeneoxygen mixtures*, Int.J. of Hydrôgen Energy, Vol.36, pp.1164-11173, 2011.
- [5] Xiaoxu Dai, et al., *Effect of syngas addition on performance of a spark-ignited gassoline engine at lean conditions*, Int.J. of Hydrôgen Energy, Vol. 37, pp. 14624-14631, 2012
- [6] <http://www.biznetmall.com/hydrôgenfuel/faq.html>
- [7] <http://www.watertogas.com/browns-gas-injector.html>
- [8] Hoang Dinh Long, Chan Siew Hwa. *Heat Transfer and Chemical Reactions in Exhaust System of a Cold-Start Engine*. International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 42, pp.4165-4183, 1999.
- [9] S. H. El-Emam and A. A. Desoky. *A study on the combustion of alternative fuels in spark-ignition engines*. International Journal of Hydrôgen Energy, Volume 10, Issues 7-8, Pages 497-504, 1985.
- [10] Ghazi A. Karim. *Hydrôgen as a spark ignition engine fuel*. International Journal of Hydrôgen Energy 28, pp. 569 – 577, 2003
- [11] Manuel Pacheco, Jorge Sira, John Kopasz. *Reaction kinetics and reactor modeling for fuel processing of liquid hydrôcarbons to produce hydrôgen: isooctane reforming*. Applied Catalysis A: General 250, pp. 161–175, 2003.
- [12] AVL–List GmbH. *BOOST v.2009 Users Guide*. Hans–List–Platz 1, A–8020 Graz, Austria, 2009
- [13] AVL–List GmbH. *BOOST v.2009 Theory*. Hans–List–Platz 1, A–8020 Graz, Austria, 2009.



- [14] Pattas K, Häfner G. *Stickoxidbildung bei der ottomotorischen Verbrennung*. MTZ Nr. 12, 397-404, 1973
- [15] Onorati A, Ferrari G, D'Errico G. *1D Unsteady Flows with Chemical Reactions in the Exhaust Duct-System of S.I. Engines: Predictions and Experiments*. SAE Paper No. 2001-01-0939
- [16] G. D'Errico, G. Ferrari, A. Onorati, T. Cerri. *Modeling the Pollutant Emissions from a S.I. Engine*. SAE paper 2002-01-0006

#### *Tiếng Việt*

- [17] Hoàng Đình Long. *Nghiên cứu đặc điểm phát thải của động cơ đốt trong dùng nhiên liệu khí thiên nhiên biến đổi phần tử bằng mô hình toán*. Tạp chí khoa học và Công nghệ số 40+41, Hà Nội 2003.
- [18] Nguyễn Thế Lương, Hoàng Đình Long. *Sử dụng bộ xúc tác nhiên liệu tận dụng nhiệt khí thải tạo nhiên liệu giàu khí hydro để giảm thành phần độc hại trong khí thải động cơ xăng*, Tuyển tập các bài báo khoa học tại hội nghị khoa học lần thứ 20 Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội 10/2006