

HỆ ĐỘNG LỰC KHÔNG PHỤ THUỘC KHÔNG KHÍ: PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ, KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG TẠI VIỆT NAM

AIR INDEPENDENT PROPULSIONS: ANALYSIS, EVALUATION, APPLICATION
POSSIBILITIES IN VIETNAM

TS. Nguyễn Thành Thu¹, PGS, TS. Nguyễn Hà Hiệp², TS. Nguyễn Công Đoàn^{1,*}

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

²Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

*Email: doannc@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày tổng quan về các loại hệ động lực (HDL) không phụ thuộc không khí trên phương tiện ngầm dưới nước hiện đại, bao gồm HDL động cơ nhiệt chu trình kín, HDL pin nhiên liệu. Trên cơ sở phân tích nguyên lý, điều kiện làm việc, phạm vi sử dụng các loại HDL đó, cũng như tổng hợp, so sánh, đánh giá các loại HDL đang được khai thác thực tế trên thế giới, trình độ công nghệ trong nước, tiến hành đánh giá về hiệu quả, lựa chọn loại HDL không phụ thuộc không khí và khả năng ứng dụng vào đội tàu trong nước.

Từ khóa: HDL; Động cơ nhiệt; Pin nhiên liệu; Không phụ thuộc không khí; Phương tiện ngầm.

ABSTRACT

This article provides an overview of the different types of air-independent propulsion (AIP) on modern submarines, including closed-cycle heat-engine AIP and fuel-cell AIP. Based on the analysis of the principles, operating conditions, the application field of AIPs of different types, as well as the synthesis and comparison of AIPs on operated submarines, the technological level of our country, to assess the effectiveness, the method of choosing the type of AIPs and application possibilities to the Vietnamese Navy.

Keywords: Power plant; Heat engine; Fuel cell; AIP; Underwater vehicle.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển kỹ thuật ngầm dưới nước phụ thuộc rất nhiều vào chất lượng của tổ hợp năng lượng trên phương tiện ngầm mà trọng tâm là hệ động lực (HDL). So với các loại HDL tàu mặt nước, số lượng các loại HDL ngầm khá ít ỏi, bao gồm 2 loại, đó là HDL hạt nhân và HDL phi hạt nhân. Loại thứ hai bao gồm 3 dạng, đó là HDL diesel-điện, HDL máy phát điện hóa và HDL động cơ nhiệt chu trình kín. Việc xuất hiện HDL hạt nhân vào những năm 1950 là một bước cách mạng [1]. Tuy nhiên, HDL phi hạt nhân vẫn chiếm số lượng lớn do chi phí đóng mới và khai thác rẻ hơn khoảng 10 lần HDL hạt nhân [2].

Đối với phương tiện ngầm lắp HDL diesel-điện truyền thống khi hoạt động cần phải nổi lên mặt biển hoặc theo chế độ ống thở để lấy không khí dự trữ và nạp điện cho tổ hợp ắc quy. Tỉ số giữa thời gian ống thở với tổng thời gian hoạt động ngầm dùng ắc quy được gọi là hệ số tồn thất bí mật, bằng 7,0 – 10% [2], [3]. Để giảm hệ số này, hiện nay, HDL phi hạt nhân đang phát triển theo hai hướng chính. Thứ nhất, hoàn thiện HDL diesel-điện truyền thống, trong đó sử dụng động cơ diesel cao tốc (1200 – 1800 vg/ph) cường hóa có công suất từ 700 – 1500 kW, làm việc ổn định khi có chân không trên đường nạp và đối áp trên đường thải [2]. Bên cạnh đó, cần nâng cao công suất và hiệu suất của các máy điện, hoàn thiện tổ hợp ắc quy axit chì truyền thống và chế tạo các loại ắc quy mới có độ tin cậy, năng lượng riêng cao (bạc-kẽm, natri sunfua, niken-cadmium, niken-kẽm, kim loại-không khí, lithium...) và trong tương lai sử dụng chất siêu dẫn nhiệt độ cao (năm 2030) [2]. Thứ hai, phát triển và hoàn thiện HDL không phụ thuộc không khí (Air independent propulsion – AIP). Các kết quả nghiên cứu về AIP đã cho phép lắp đặt chúng trên các tàu đóng mới cũng như cải hoán các tàu lắp HDL

diesel-điện truyền thống đang khai thác [1], [2], [4]. AIP sử dụng cho tàu có lượng giãn nước từ 1000 – 3000 tấn, khi lượng giãn nước lớn hơn, tối ưu hơn là sử dụng HDL hạt nhân [5].

HDL động cơ nhiệt bao gồm HDL diesel chu trình kín (closed cycle diesel – CCD), tuabin hơi chu trình kín (moduled energie sous marine autonome – MESMA), tuabin khí chu trình kín (closed cycle gas turbine – CCGT), động cơ đốt ngoài Stirling. HDL máy phát điện hóa là một tổ hợp gồm các cụm pin nhiên liệu, hệ thống nhiên liệu và chất ô xy hóa, hệ thống thải sản phẩm phản ứng, hệ thống kiểm soát nhiệt độ, hệ thống giám sát và tự động. Hiện nay, chủ yếu sử dụng loại pin nhiên liệu màng trao đổi proton nhiệt độ thấp LT-PEMFC.

Mục đích nghiên cứu là phân tích và đánh giá các loại AIP, các tiêu chí lựa chọn AIP, thực trạng và khuynh hướng phát triển công nghệ, từ đó đánh giá khả năng phát triển và ứng dụng AIP trong nước. Phương pháp nghiên cứu là nghiên cứu lý thuyết, trên cơ sở tổng hợp các dữ liệu, phân tích, đề xuất sơ đồ, lựa chọn loại AIP và định hướng thiết kế, chế tạo.

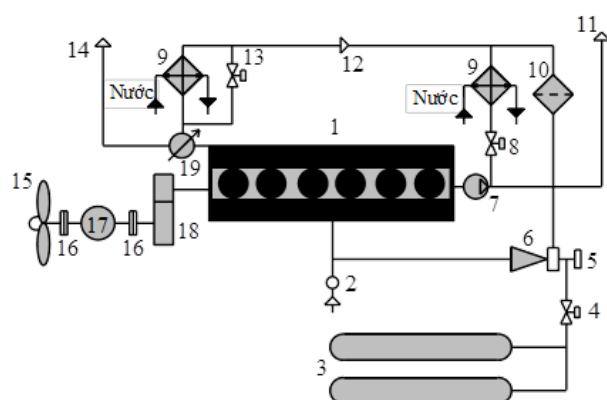
2. NỘI DUNG

2.1. HDL diesel chu trình kín

Trong HDL CCD, môi chất công tác cấp cho động cơ diesel có thể là hỗn hợp nitơ (khí trơ) với ô xy (đốt nhiên liệu) hoặc hỗn hợp CO₂ và ô xy (CO₂ được nén trong bình hoặc hấp thụ bằng dung dịch hoặc CO₂ theo dòng chân vệt). Các sơ đồ nguyên lý của loại HDL này đã được các tác giả bài báo này trình bày trong công bố trước đây [6]. Trên thực tế, HDL CCD đã được Đức lắp trên tàu ngầm thử nghiệm U-798 (Hình 1), lượng dự trữ ô xy thể khí 25 tấn (áp suất 40 MPa) và 40 tấn ô xy hóa lỏng [2]. Sau chiến tranh Thế giới II, Liên Xô đã đóng loạt tàu lắp

HĐL CCD (mẫu A615, 30 chiếc), trong đó CO₂ được hấp thụ bằng dung dịch [1], [7].

Ưu điểm về mặt công nghệ của HĐL CCD là sử dụng động cơ diesel thông thường nên có giá thành thấp và đơn giản trong đào tạo kíp tàu. Tuy nhiên, động cơ diesel có nhược điểm chính là có độ ồn cao khi làm việc.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý HĐL CCD "Kreislauf":
 1 - Động cơ diesel; 2 - Cấp không khí ở vị trí nổi;
 3 - Bình ô xy; 4 - Van giảm áp ô xy;
 5 - Van giảm áp cấp ô xy; 6 - Thiết bị trộn làm giàu ô xy; 7 - Máy nén khí thải; 8 - Bộ điều chỉnh áp suất khí làm việc theo chu trình kín;
 9 - Máy lạnh; 10 - Bầu lọc khí; 11 - Thải khí dư khi làm việc theo chu trình kín; 12 - Luân hồi khí thải; 13 - Van tiết lưu để điều chỉnh nhiệt độ khí;
 14 - Thải khí ở vị trí nổi; 15 - Chân vịt;
 16 - Khớp nối; 17 - Động cơ điện lái chân vịt hành trình tiết kiệm; 18 - Hộp giảm tốc;
 19 - Thiết bị chuyển khí thải sang chu trình kín.

2.2. HĐL Stirling

Nguyên lý làm việc, kết cấu, đặc tính của động cơ Stirling được mô tả rõ trong các tài liệu chuyên ngành [2], [4], [8], [9]. Năm 1982, hãng "Kokus Marine AB" (Thụy Điển) lần đầu tiên thử nghiệm HĐL Stirling đóng vai trò là HĐL phụ song hành với HĐL diesel-điện truyền thống. Động cơ Stirling có thể sử dụng các nguồn nhiệt khác nhau, trong đó gồm

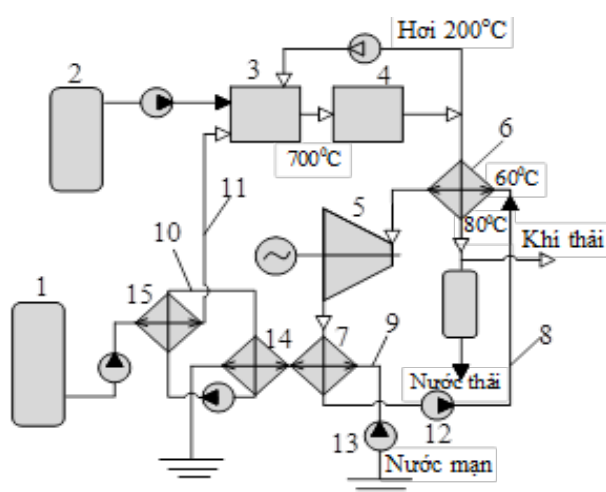
nguồn không liên quan đến cháy nhiên liệu. Khi sử dụng nhiên liệu thì yêu cầu thấp về chất lượng nhiên liệu lỏng (hàm lượng tro, chỉ số cetane hoặc octane). Do quá trình cháy liên tục và đều nên động cơ Stirling có mức ồn và rung thấp (thấp hơn từ 20 – 40 dB về độ ồn, 5 – 30 dB về rung), hiệu suất khá cao đặc biệt ở tải cục bộ, tăng tính kinh tế nhiên liệu đến 20% so với động cơ diesel [2]. Khi hoạt động động cơ Stirling tỏa nhiệt ít vào khoang động lực, mức độ độc hại của khí thải thấp (chủ yếu là CO₂ và hơi nước), mô men xoắn ít thay đổi (tỉ số giữa mô men tức thời và mô men trung bình trong một vòng quay trục khuỷu là 0,95 – 1,05, trong khi 0,9 – 3,7 đối với động cơ diesel), mức tiêu hao dầu bôi trơn thấp, áp suất khí thải cao nên cho phép thải sản vật cháy ra mạn ở độ sâu đến 200 m mà không cần sử dụng máy nén.

Nhược điểm chính của động cơ Stirling là giá thành cao, kết cấu phức tạp, công suất thấp (hiện nay, thường là loại 75 kW, một số ít đạt công suất 600 kW) làm cho việc ứng dụng HĐL Stirling còn khiêm tốn so với HĐL CCD. Ví dụ về HĐL Stirling là các dự án "Viking", A-17 "Vastergotlands", A-19 "Gotland" (Thụy Điển), "Collins" (Australia), Imp. Oyashio (Nhật Bản), Type 041 và 043 (Trung Quốc) [2], [10].

2.3. HĐL MESMA

MESMA được sử dụng trên tàu Agosta-90B và Scorpene của Pháp (Hình 2). Theo [11], [12], công suất của HĐL MESMA là 200 kW, trong đó sản sinh nhiệt năng bằng cách đốt cháy hỗn hợp khí etan và ô xy trong vòng sơ cấp của thiết bị trao đổi nhiệt (ô xy được bảo quản ở dạng lỏng, nhiệt độ thấp). Nhiệt lượng sinh ra được cấp cho nước trong vòng thứ cấp và tạo thành hơi có áp suất cao làm quay tuabin hơi dẫn động máy phát điện tốc độ cao. Sản vật cháy gồm hơi nước và khí thải được thải ra mạn tàu. Quá trình cháy diễn ra trong buồng

cháy dưới áp suất 6 MPa nên tàu có thể hoạt động ở độ sâu 600 m (sản vật cháy được thải ra mạn tàu không cần máy nén). Đây là ưu điểm nổi bật của HDL MESMA. Hiệu suất của HDL MESMA chỉ vào khoảng 20% do tổn thất năng lượng ở nhiều cấp (đốt cháy nhiên liệu, thu hơi quá nhiệt, sản sinh điện ba pha sau đó lại chuyển thành dòng một chiều) [12].



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý HDL MESMA:

- 1 - Bình ô xy nhiệt độ thấp; 2 - Bình etan;
- 3 - Buồng cháy; 4 - Thiết bị trao đổi nhiệt;
- 5 - Tua bin hơi dẫn động máy phát điện; 6 - Thiết bị sinh hơi; 7 - Thiết bị ngưng; 8 - Vòng tua bin hơi;
- 9 - Vòng nước mạn; 10 - Vòng trung gian;
- 11 - Ống cấp ô xy; 12 - Bơm nước ngọt;
- 13 - Bơm nước mạn; 14 - Thiết bị trao đổi nhiệt của vòng trung gian; 15 - Thiết bị hóa hơi ô xy.

Nhược điểm chính của HDL MESMA là kích thước lớn (so với HDL CCD và Stirling cùng công suất), tính kinh tế thấp (tiêu thụ nhiên liệu và ô xy lớn), nhiệt độ chớp cháy của etan thấp nên nguy cơ cháy nổ cao. Ưu điểm ít, nhược điểm nhiều nên HDL MESMA được sử dụng với quy mô khiêm tốn hơn so với HDL CCD và Stirling.

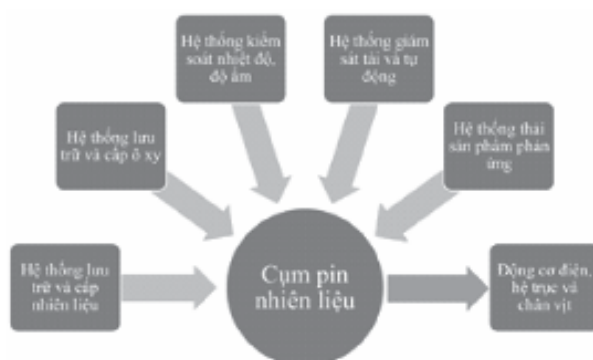
2.4. HDL pin nhiên liệu

Pin nhiên liệu là một hệ thống dùng để

chuyển đổi trực tiếp hóa năng thành điện năng bằng cách ô xy hóa nhiên liệu. Khác với pin điện chỉ sử dụng được một lần (pin hết điện khi các phản tử hoạt tính ngừng hoạt động), hoặc ắc-quy dùng được một số lần (sạc và giải phóng điện), pin nhiên liệu hoạt động liên tục nếu được cấp nhiên liệu và chất ô xy hóa.

Trên cơ sở phân tích các nghiên cứu trong và ngoài nước [2], [6], [14-20], chúng tôi đã tổng hợp các loại pin nhiên liệu ở dạng sơ đồ, được thể hiện trong công bố trước đây của nhóm tác giả [13]. Sơ đồ tổng quát HDL pin nhiên liệu được đề xuất như trên hình 3.

Việc thiết kế, chế tạo HDL pin nhiên liệu không chỉ là thiết kế chế tạo bản thân cụm pin nhiên liệu mà còn các hệ thống của nó để tạo thành máy phát điện hóa. Các nước đi tiên phong trong phát triển HDL pin nhiên liệu gồm có Thụy Điển, Mỹ, Nga, Đức, Tây Ban Nha, Anh, Canada, Ấn độ, Nhật Bản. Các dự án của các nước đã được trình bày cụ thể trong [13]. Các hãng đi đầu trong sản xuất pin nhiên liệu gồm Siemens, General Electric, Fuel Cell Energy, Ballard, Mitsubishi Heavy Industries; trong phát triển HDL pin nhiên liệu gồm có các hãng Lockheed, Perry Energy Systems, AIP Engineering, Rubin, IKL, HDW, FS, Ballard Power Systems; trong nước chưa có nghiên cứu về chế tạo HDL pin nhiên liệu.



Hình 3. Sơ đồ tổng quát HDL pin nhiên liệu.

2.5. So sánh và lựa chọn AIP

Các hãng sản xuất-xuất khẩu AIP hàng đầu gồm TNSW (Đức, dự án 212A, 212B, 214, 209mod, 209PN và Dolphin); DCNS (Pháp, dự án Agosta-90B, Scorpene và S-80A); Kockums (Thụy Điển, dự án A-17, A-19, A-26). Các nhà sản xuất phục vụ trong nước gồm Mitsubishi (Nhật Bản, dự án “Improved Oyashio”); Yuan (Trung Quốc, dự án 041); Rubin (Nga, dự án Amur 1650). Theo [9] tỉ trọng tàu lắp AIP chiếm khoảng 15% HĐL phi hạt nhân của thế giới. Bảng 1 là kết quả thống kê một số loại tàu lắp AIP điển hình, trong đó HĐL pin nhiên liệu được ký hiệu là FC. Qua đó cho thấy, vận tốc ngầm của các tàu dùng AIP khác nhau, gần bằng nhau, thời gian hoạt động của HĐL pin nhiên liệu vượt trội hơn các loại khác.

AIP có công suất 150 – 300 kW cho phép tàu chuyển động ở trạng thái ngầm với

vận tốc 3 – 4 hl/h, tầm hoạt động ngầm khoảng 1500 hl, thời gian ngầm khoảng 20 ngày đêm, chiếm gần 50% tổng thời gian hoạt động ngầm (khi sử dụng ắc quy và AIP) [9]. Giới hạn thời gian ngầm của AIP là do hạn chế dự trữ ô xy lỏng đối với tất cả các loại AIP. Đối với HĐL pin nhiên liệu còn bị giới hạn lượng hydro lưu trữ trong hợp chất liên kim loại.

Hiện nay, các tàu phi hạt nhân của nước ngoài sử dụng 3 loại AIP: pin nhiên liệu (Đức, Nga), Stirling (Thụy Điển, Nhật), MESMA (Pháp). Mỗi nước ưu tiên chọn hướng phát triển cho riêng mình căn cứ vào mức độ phát triển ngành chế tạo máy dân sự. Trên cơ sở phân tích các loại AIP, có thể tổng hợp các tiêu chí để so sánh, đánh giá các loại AIP như trong Bảng 2. Trong đó, do HĐL CCD sử dụng động cơ diesel truyền thống nên được chọn làm cơ sở để so sánh các loại AIP khác.

Bảng 1. Các thông số cơ bản của một số tàu lắp AIP trên thế giới

Loại, dự án tàu	Amur1650	209mod	209PN	212A 212B	«Dolphin» + (212A)	214	KSS-2 (214)	S-80A	«Agosta-90B	«Scorpene»	A-17	A-19	A-26	Improved «Oyashio»	Salvatore Pelosi
Nhà sản xuất	Rubin	IKL	IKL	HDW	IKL	IKL	IKL	DCNS	DCNS	DCNS	Kockums	Kockums	Kockums	Mitsubishi	-
Hải quân	Nga	Hy lập	Bồ Đào Nha	Đức, Italy	Israel	Hy lập	Hàn Quốc	Ấn độ, Tây Ban Nha, Chile	Pakistan	Brazil, Ấn độ	Thụy Điển, Singapore,	Thụy Điển	Thụy Điển	Nhật bản	Italy
Lượng giãn nước ngầm, T	2000	-	2020	1830	2000	1800	1860	2400	1980	1850	1600	1550	1860	4200	1631
Chiều dài, m	66,8	62,4	67,9	57,2	67,3	65	65	71	76,2	74,4	60,5	60,4	63	84	
Đường kính, m	7,1	6,2	6,5	7	6,8	6,6	6,3	7,3	6,8	6,2	6,1	6,2	6,4	9,1	
Độ sâu lặn, m	300	250	400	300	350	400	400	-	320	350	300	-	-	300	250
Kíp tàu, người	35	31	31	27	30	27	27	32+8	36	31	27	27	17-26	65	-
Loại AIP	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	MESMA	MESMA	Stirling	Stirling	Stirling	Stirling	CCD
Thành phần, công suất AIP, kW	-	2x BZM-120 (240)	2x BZM-120 (240)	9x BZM-34 (306)	2x BZM-120 (240)	2x BZM-120 (240)	9x BZM-34 (306)	-	(300)	1x 200	1x 200	2x Mk-3 (150)	2x V4-275R (150)	3x Mk-3 (200)	4x V4-275R (300)
Nhiên liệu	O ₂ , H ₂	H ₂ (IMC)	H ₂ (IMC)	H ₂ (IMC)	H ₂ (IMC)	H ₂ (IMC)	H ₂ (IMC)	Bioethanol (reforming)	Ethanol	Ethanol	DO	DO	DO	DO	DO
Thời gian hoạt động độc lập, ngày-đêm	45	50	50	45	30	45	45	-	50	50	-	-	-	-	45
Vận tốc ngầm toàn bộ, hl/h	21	21,5	21,5	20	20	20	20	20	20	20,5	20	20	20	20	-
Vận tốc ngầm dùng AIP, hl/h	3	-	-	3	3,5	4	-	4	4	4	-	5	4	-	4
Thời gian ngầm AIP, ngày-đêm	9	12	17	20	14	13	14	15	15	17	14	15	15	-	-
Tầm bơi ngầm dùng AIP, hl	650	-	-	1440	1176	1248	-	1440	1440	1632	-	1800	1440	-	-

Bảng 2. So sánh, đánh giá các loại AIP

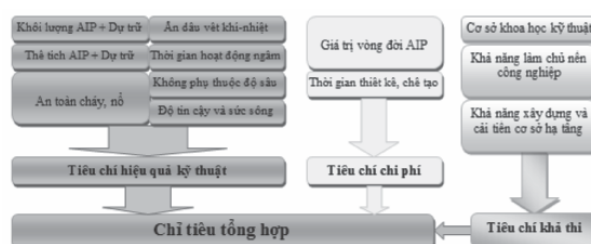
Thông số đánh giá	HDL			
	CCD	Stirling	MESMA	FC
Công suất riêng, kW/kg	Cơ sở	↓	↓	↑
Hiệu suất, %	~30	~30	~20	~70
Biến đổi năng lượng	Không trực tiếp	Không trực tiếp	Không trực tiếp	Trực tiếp
Nhiệt độ làm việc, °C	> 400	> 750	> 700	~80
Làm mát	Sinh hàn nước	Sinh hàn nước	Sinh hàn nước	Vòng kín
Tiêu thụ ô xy, kg/kW	0,75	1,0	1,1	0,4
Đặc tính khối lượng-kích thước	Cơ sở	↑	↑	↓
Thời gian hoạt động ngừng dùng	Cơ sở	↑	↑	↑
Mức độ trường vật lý tổng hợp	Trung bình	Trung bình	Trung bình	Thấp
Mức độ tiếng ồn	Cơ sở	↓	↓	↓
Mức độ tỏa nhiệt	Cơ sở	↓	↓	↓
An toàn cháy nổ	Cơ sở	=	↓	↓
Mức độ đơn giản và an toàn trong khai thác	Cơ sở	↓	↓	↓
Tuổi thọ và giá thành khai thác	Cơ sở	↓	↓	↑
Khả năng sử dụng cơ sở hạ tầng có sẵn trên bờ	Cơ sở	↓	↓	↓

Ghi chú: ký hiệu ↑ - tăng; ↓ - giảm; = - không thay đổi

Ta thấy, HDL Stirling, HDL MESMA và HDL pin nhiên liệu có ưu thế hơn HDL CCD về mức độ tiếng ồn và tỏa nhiệt. Xét về tổng thể mức độ trường vật lý tổng hợp của HDL pin nhiên liệu là thấp nhất giúp nâng cao tính bí mật [20]. Hiệu suất của HDL pin nhiên liệu lớn nhất, có thể đạt 70%, hơn gấp đôi HDL CCD. Khi lựa chọn loại AIP cần xét đến hiệu quả kinh tế – kỹ thuật, cũng như khả năng triển khai phương án lựa chọn trong điều kiện công nghiệp dân sinh và trình độ công nghiệp của đất nước. Các chỉ tiêu để lựa chọn AIP được tổng hợp thành sơ đồ cấu trúc như trên hình 4.

Theo phân tích, so sánh, đánh giá ở trên thì HDL pin nhiên liệu có chi phí sản xuất lớn, giá thành cao, nhưng các tiêu chí còn lại có ưu điểm vượt trội các loại AIP khác. Lựa chọn

HDL pin nhiên liệu cho phương tiện ngầm nói chung và tàu ngầm nói riêng là xu hướng tương lai.



Hình 4. Sơ đồ cấu trúc các chỉ tiêu để lựa chọn HDL không phụ thuộc không khí

3. KẾT LUẬN

Hiện nay, có bốn loại AIP được sử dụng, đó là HDL CCD, Stirling, MESMA và pin nhiên liệu. Trong đó, HDL pin nhiên liệu

được sử dụng phổ biến hơn cả. Sử dụng HDL pin nhiên liệu để nâng cao tính bí mật, kéo dài thời gian và tầm hoạt động ngầm cũng như tăng chiều sâu lặn của phương tiện ngầm là xu hướng tất yếu, cần được nghiên cứu phát triển. Trên thiết bị ngầm không người lái hoặc có người lái thường lắp HDL pin nhiên liệu loại LT-PEMFC.

Nghiên cứu đã tổng hợp các dữ liệu về các loại AIP và sơ đồ cấu trúc các chỉ tiêu để lựa chọn AIP. Đề xuất lựa chọn HDL pin nhiên liệu, sơ đồ HDL pin nhiên liệu, thực trạng công nghệ của nước ta, cũng như việc tiếp cận các loại vật liệu hoàn toàn cho phép thiết kế, chế tạo HDL pin nhiên liệu cho phương tiện ngầm.

Ngày nhận bài: **18/5/2026**

Ngày phản biện: **31/5/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Кормилицин Ю.Н., Хализев О.А., “Устройства подводных лодок”. Том II. СПб.: Элмор, 2009 - 280 с.
- [2]. Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В. А., “Корабельные воздухозависимые энергетические установки”. СПб.: Судостроение, 2006 - 424 с.
- [3]. Nguyen Ha, H. 2022, “Early-Stage Analysis of Air Independent Propulsion Based on Fuel Cells for Small Submarines”. *Advances in Military Technology* 17 (2): 457-69. <https://doi.org/10.3849/aimt.01744>.
- [4]. Kormilitsin Y.N., “Experience of Russia in the creation of submarines with AIP”. *Asian Defence Journal*, May, 1997.
- [5]. Kormilitsin Y.N., Khalizev O.A., “The theory of submarine design”. Great Britain. 2001 - 340p.
- [6]. Nguyễn Hà Hiệp, Nguyễn Hoàng Vũ, Phạm Văn Hà, “So sánh, đánh giá các hệ động lực tàu ngầm sử dụng động cơ nhiệt hoạt động trong điều kiện yếm khí”. Kỷ yếu Hội nghị KH&CN toàn quốc về cơ khí lần thứ IV, Tp. Hồ Chí Minh, 2015, Tập 1, tr. 537-544.
- [7]. Romanov E.A., Romanov A.D., “History of development of submarines with air independent power installations in Russia and the USSR”. *Последние тенденции в области науки и технологий управления* – 2013, Т. 1 – С. 171-181.
- [8]. Кириллов Н.Г., “Анаэробные установки на

основе двигателей Стирлинга - Перспективное направление и развития подводного кораблестроения в XXI в”. *Морской вестник*, 2008, №1(25) – С. 73-76.

- [9]. Замуков В. В., Сидоренко Д. В., “Выбор воздухозависимой энергоустановки неатомных подводных лодок”. *Судостроение*, 2012, №4 – С. 29-33.
- [10]. Carlo Kopp, “Air independent propulsion - now a necessity”. *Defence Today*, 12/2010.
- [11]. Романов А.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А., “Сравнительный обзор и оценка эффективности воздухозависимых энергетических установок различных конструкций”. *Современные проблемы науки и образования*. 2013, № 6 – С. 67.
- [12]. Сергеев Н., Яковлев И., Иванов С., “Воздухозависимые энергетические установки современных дизельных подводных лодок”. *Зарубежное военное обозрение*, 2004, №6 – С. 59- 63.
- [13]. Nguyễn Hà, H., Nguyễn Quốc, Q., & Phạm Văn, H. (2022), “Tổng quan về pin nhiên liệu và phân tích hệ động lực pin nhiên liệu không phụ thuộc không khí trên phương tiện ngầm”. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải*, Số Đặc biệt, 14-18. <https://jmst.vimaru.edu.vn/index.php/jmst/article/view/150>
- [14]. Nguyễn Thị Lê Hiền, “Pin nhiên liệu - nguồn năng lượng tương lai”. *Tạp chí Dầu khí*, 2019, Số 7, tr.57-67.
- [15]. Carrette, L., Friedrich, K. A., Stimming, U., “Fuel cells: Fundamentals and applications”. *Fuel Cells* 1 (2001) 5-39.
- [16]. US DoE, Fuel cell Handbook, EG & G Technical Services, Morgantown (2004).
- [17]. Bengt Sundén, “Hydrogen, Batteries and Fuel Cells”. Academic Press, 2019. ISBN 978-0-12-816950-6 <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01247-5>
- [18]. Winkler, W., “Applications – transportation, ships: Fuel cells”. Editor(s): Jürgen Garche, *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*: Elsevier (2009)338-358. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00340-3>
- [19]. Lee, J. C., Shay, T., “Analysis of fuel cell applied for submarine air independent propulsion (AIP) system”. *Journal of Marine Science and Technology* 26 (2018) 657-666. <https://jmstt.ntou.edu.tw/journal/vol26/iss5/5>
- [20]. Nguyễn Hà Hiệp, Nguyễn Quốc Quân, Nguyễn Lê Thanh, “Tính toán các đặc tính chiến-kỹ thuật chính của tàu ngầm lắp hệ động lực hỗn hợp diesel – ắc quy – pin nhiên liệu”. *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, ISSN 2615-9910, e-ISSN 2815-5505, Số 296 năm 2022, tr.481-489.