

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO BƠM HÚT KHÍ ĐỘC SỬ DỤNG CHO MÁY BẢO ĐỘC TỰ ĐỘNG RAID-M100 VÀ MÁY ĐO PHÓNG XẠ RAID-XP

DESIGN AND FABRICATION OF A TOXIC GAS SUCTION PUMP FOR RAID-M100 AUTOMATIC CHEMICAL AGENT DETECTORS AND RAID-XP RADIATION MEASUREMENT DEVICES

Mai Văn Đức*, Nguyễn Văn Tuyền, Vũ Văn Lễ
Nhà máy X61, Bình chủng Hóa học, Bộ Quốc phòng

*Email: mducmta@gmail.com

TÓM TẮT

Máy báo độc tự động RAID-M100 và máy đo phóng xạ RAID-XP yêu cầu dòng khí hút ổn định và liên tục để bảo đảm độ chính xác của buồng phân tích phổ linh động ion (IMS). Bài báo trình bày quá trình thiết kế và chế tạo bơm hút khí độc kích thước nhỏ, được phát triển nhằm đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật đặc thù của hai thiết bị trên. Bơm được thiết kế với kết cấu độ kín cao, lưu lượng nhỏ và áp suất hút ổn định, bảo đảm khả năng lấy mẫu khí tin cậy trong điều kiện làm việc liên tục. Nội dung nghiên cứu tập trung vào thiết kế kết cấu, lựa chọn vật liệu, công nghệ chế tạo và đánh giá các thông số làm việc thông qua thử nghiệm. Kết quả cho thấy bơm đạt lưu lượng ổn định, độ rò rỉ thấp và làm việc tin cậy trong dải điện áp và áp suất yêu cầu, đáp ứng đầy đủ điều kiện tích hợp vào thiết bị RAID-M100 và RAID-XP. Kết quả nghiên cứu góp phần chủ động nguồn linh kiện trong nước và nâng cao tính sẵn sàng kỹ thuật của các thiết bị chuyên dụng.

Từ khóa: Bơm hút khí độc; Thiết kế chế tạo; Phổ linh động ion (IMS); Hệ thống lấy mẫu khí; Bơm chân không mini.

ABSTRACT

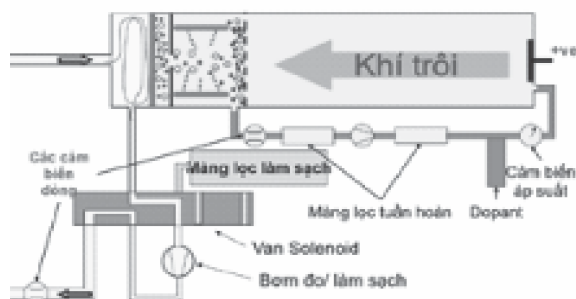
The RAID-M100 automatic chemical agent detector and the RAID-XP radiation measurement device require a stable and continuous gas flow to ensure the accuracy of the ion mobility spectrometry (IMS) analysis chamber. This paper presents the design and fabrication of a miniature toxic gas suction pump developed to meet the specific technical requirements of these two devices. The pump is designed with a high-sealing structure, low flow rate, and stable suction pressure, ensuring reliable gas sampling under continuous operating conditions. The study focuses on structural design, material selection, manufacturing processes, and performance evaluation through experimental testing. The results show that the pump achieves stable airflow, low leakage, and reliable operation within the required voltage and pressure ranges, fully satisfying the conditions for integration into the RAID-M100 and RAID-XP devices. The proposed solution contributes to domestic component localization and enhances the technical readiness of specialized detection equipment.

Keywords: Toxic gas suction pump; Design and fabrication; Ion mobility spectrometry (IMS); Gas sampling system; Miniature vacuum pump.



1. MỞ ĐẦU

Trong các hệ thống báo độc IMS như RAID-M100 và RAID-XP, bơm hút khí là bộ phận then chốt đưa mẫu khí vào buồng phân tích với lưu lượng ổn định, ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình ion hóa, thời gian trôi ion và độ chính xác phát hiện.



Hình 1. Sơ đồ dòng khí trong thiết bị RAID-M100/XP

Tuy nhiên, bơm của các thiết bị RAID hiện phụ thuộc hoàn toàn vào linh kiện nhập khẩu, giá thành cao và thiếu chủ động trong bảo đảm kỹ thuật, dẫn đến khó khăn trong sửa chữa, thời gian thay thế dài và không thể cải tiến do thiếu dữ liệu thiết kế. Vì vậy, việc nội địa hóa bơm là yêu cầu cấp thiết nhằm duy trì trang bị, giảm phụ thuộc nước ngoài, làm chủ công nghệ, tiết kiệm ngân sách và tạo nền tảng phát triển các hệ khí động trong tương lai.

1.1. Tính cấp thiết của đề tài

Nghiên cứu chế tạo bơm trong nước mang lại các lợi ích chính:

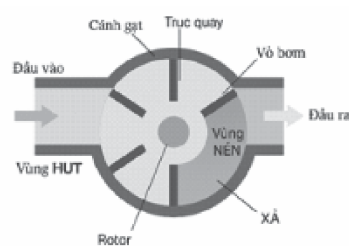
- Chủ động thay thế cho thiết bị RAID-M100/XP đang khai thác.
- Giảm phụ thuộc linh kiện nhập ngoại và nâng cao an ninh kỹ thuật.
- Xây dựng mô hình thiết kế – chế tạo – kiểm thử bơm mini dùng trong IMS.

• Hạ giá thành từ 2-5 lần so với bơm nhập khẩu.

• Tạo nền tảng để phát triển các dòng bơm và module khí động thế hệ mới.

1.2. Cơ sở thiết kế và phạm vi nghiên cứu

Đề tài tập trung vào bơm cánh gạt kích thước nhỏ, dùng động cơ DC tốc độ cao, tạo lưu lượng khoảng 1 L/phút theo yêu cầu IMS.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của bơm cánh gạt

Thiết kế dựa trên phân tích trường khí động, lựa chọn cấu hình rotor-vỏ-cánh tối ưu, đánh giá ứng suất và xác định dung sai tối hạn. Thân bơm sử dụng SUS304 để đảm bảo độ bền và chống ăn mòn; cánh gạt dùng PEEK có đặc tính nhẹ, bền và ma sát thấp.

1.3. Kết quả nghiên cứu – chế tạo mẫu thử

Nhóm nghiên cứu đã chế tạo 5 mẫu bơm để đánh giá độ ổn định của quy trình. Các mẫu đạt:

- Lưu lượng 0,6-1,0 L/phút tại 9 VDC (đúng yêu cầu $0,8 \pm 0,2$ L/phút).
- Áp suất hút -10 đến -15 kPa.
- Dòng tiêu thụ <300 mA, phù hợp nguồn RAID.
- Tốc độ động cơ 8.000-15.000 vòng/phút.
- Độ kín khí tốt, không rò khí.
- Hoạt động liên tục nhiều giờ không sụt lưu lượng hoặc tăng nhiệt bất thường.



Hình 3. Mẫu bơm hoàn chỉnh sau chế tạo

Kết quả cho thấy bơm nội địa hoàn toàn đáp ứng yêu cầu kỹ thuật – chiến thuật và có độ lặp lại cao giữa các mẫu.

2. NỘI DUNG – TÍNH TOÁN VÀ THIẾT KẾ BƠM HÚT KHÍ CÁNH GẠT

2.1. Cơ sở xuất phát và yêu cầu thiết kế

Từ khảo sát thiết bị và tài liệu kỹ thuật của nhà sản xuất, các yêu cầu ràng buộc được xác lập như sau:

(1) Lưu lượng khí danh định:

$$Q_{\text{yêu cầu}} = 0,8 \pm 0,2 \text{ L/phút}$$

Lưu lượng này không thể nhỏ hơn 0,6 L/phút vì buồng IMS sẽ thiếu khí mẫu, và không thể lớn hơn 1,0 L/phút vì áp suất – nhiệt độ trong buồng thay đổi đột ngột, gây nhiễu phép đo [1], [8].

(2) Giới hạn nguồn cấp điện của thiết bị:

$$U = 9 \text{ VDC}, I_{\text{max}} = 0,13 \text{ A}$$

Điều này có nghĩa:

- Bơm phải tiêu thụ cực thấp.
- Dòng khởi động không được vượt 0,13 A.

- Công suất tối đa chỉ ~2,7 W.

Đây là thách thức lớn đối với một bơm kích thước nhỏ, vì bơm cánh gạt thường có tổn thất ma sát cao [1], [3].

(3) Vận tốc quay mô-tơ:

Qua đo kiểm trực tiếp: $n = 10.000 \div 13.600$ vòng/phút.

Thông số này rất quan trọng, vì bơm thể tích phụ thuộc hoàn toàn vào tốc độ quay [1], [8].

(4) Không gian lắp đặt cực kỳ hạn chế:

Kích thước khoang máy chỉ cho phép: $D_c \leq 22 \text{ mm}$, $L = 6 \text{ mm}$.

Điều này khiến bài toán thiết kế trở nên khó hơn, vì phải tạo lưu lượng tương đối lớn trong một không gian rất nhỏ [3].

(5) Kích thước cố định của đường khí IMS:

$$d_h = d_x = 1,5 \text{ mm}$$

Lỗ hút/xả nhỏ $\rightarrow$ dễ tăng tổn thất $\rightarrow$ cần kiểm tra kỹ vận tốc dòng khí [4].

2.2. Tính toán thể tích dịch chuyển tối thiểu (Bước nền tảng của toàn bộ thiết kế)

Bơm cánh gạt là bơm thể tích, nghĩa là mỗi vòng rotor quét được một thể tích khí xác định. Do đó, muốn biết bơm phải lớn cỡ nào, trước hết cần tính thể tích khí tối thiểu cần tạo ra mỗi vòng.

* Công thức lưu lượng lý thuyết:

$$Q_{\text{th}} = V_D \cdot n \quad [1], [8]$$

Trong đó: V_D – Thể tích dịch chuyển mỗi vòng (L/vòng); n – Tốc độ quay (vòng/phút).

Đổi lưu lượng yêu cầu:
 $Q = 0,8/60 = 0,0133 \text{ L/s}$.

Tốc độ quay trung bình của mô-tơ: $n_{tb} = 200 \text{ vòng/s}$.

Suy ra thể tích yêu cầu mỗi vòng:

$$V_{\text{yêu cầu}} = \frac{0,0133}{200} = 6,65 \times 10^{-5} \text{ L/vòng} \quad [1] \quad (2)$$

Ý nghĩa:

(1) là “cột mốc bắt buộc”.

Nếu bơm tạo ra thể tích nhỏ hơn giá trị này thì lưu lượng của bơm không thể đạt 0,8 L/phút, dù tăng tốc hay giảm tải.

2.3. Lựa chọn thông số hình học – bước quyết định tạo nên bản vẽ

Dựa trên ràng buộc lắp đặt và kinh nghiệm thiết kế bơm mini, nhóm nghiên cứu chọn [1], [3] :

$D_c = 22\text{mm}$, đây là đường kính buồng bơm, tương ứng với không gian tối đa thiết bị cho phép.

$D_r = 15\text{mm}$, đây là đường kính rotor, đủ lớn để bố trí hai rãnh cánh.

$L = 6\text{mm}$, chiều dài buồng xác định trực tiếp thể tích dịch chuyển.

* Độ lệch tâm e – tham số nhạy nhất:

Độ lệch tâm tạo nên sự chênh lệch thể tích giữa các khoang, do đó ảnh hưởng cực lớn đến lưu lượng:

- e quá nhỏ dẫn đến lưu lượng thiếu.
- e quá lớn gây ra ma sát tăng mạnh dẫn tới dòng tiêu thụ cao vượt dòng cho phép nên máy báo lỗi không hoạt động.

Sau khảo sát: $e = 0,50\text{mm} \rightarrow$ là giá trị tối ưu cân bằng giữa lưu lượng và mô-men cản.

2.4. Tính toán thể tích dịch chuyển thực tế V_D

Theo lý thuyết bơm cánh gạt (ISO 5598):

$$V_D = \frac{\pi}{2} \cdot e \cdot L \cdot (D_c + D_r) \quad [1], [3], [10] \quad (3)$$

Chuyển các kích thước sang mét và thay vào:

$$V_D = 1,744 \times 10^{-4} \text{ L/vòng} \quad (4)$$

So sánh với yêu cầu:

$$\frac{V_D}{V_{\text{yêu cầu}}} = 2,62 \quad (5)$$

Kết quả này có ý nghĩa kỹ thuật quan trọng: Thể tích lý thuyết mà bơm cánh gạt tạo ra mỗi vòng cao hơn 2,62 lần so với yêu cầu tối thiểu.

Điều này rất quan trọng, vì trong bơm cánh gạt mini: rò khí qua khe vòng, rò khí qua khe đầu, rò khí qua rãnh cánh, rò khí qua lỗ hút/xả, khiến hiệu suất thể tích thực tế chỉ đạt 30-40%. Việc đảm bảo V_D lớn là chiến lược thiết kế để bù các tổn thất này.

2.5. Tính lưu lượng thực tế có xét rò khí

Lưu lượng thực tế:

$$Q_{\text{thực}} = \eta_v \cdot V_D \cdot n \quad [2], [3], [9] \quad (6)$$

Hiệu suất thể tích đặc trưng: $\eta_v = 0,35$ đến 0,40.

Thay số:

Với $\eta_v = 0,35$: $Q = 0,73 \text{ L/phút}$.

Với $\eta_v = 0,40$: $Q = 0,836 \text{ L/phút}$.

*Nhận xét: Từ kết quả trên có thể nhận thấy rằng lưu lượng thực tế của bơm, với hiệu

suất thể tích trong khoảng 0,35-0,40, đạt 0,73-0,83 L/phút. Điều này cho thấy thiết kế hình học được lựa chọn phù hợp với điều kiện làm việc thực tế, đồng thời đáp ứng đầy đủ dải lưu lượng $0,8 \pm 0,2$ L/phút theo yêu cầu của mô-đun IMS trong thiết bị RAID-M100/XP2.6. Tiếp theo là kiểm tra khả năng dòng khí qua lỗ hút/xả.

2.6. Kiểm tra khả năng dòng khí qua lỗ hút/xả

Đường kính lỗ hút/xả: $d = 1,5\text{mm}$.

Tiết diện: $A = 1,77 \times 10^{-6}\text{m}^2$ [4].

Tính vận tốc: $v = 7,51\text{m/s}$.

Kết quả tính toán cho thấy vận tốc dòng khí qua lỗ hút/xả $\varnothing 1,5\text{ mm}$ đạt xấp xỉ 7,5 m/s. Giá trị này hoàn toàn phù hợp với tiêu chuẩn lưu thông khí trong đường ống cỡ nhỏ, không gây nghẽn dòng, không tạo áp suất dư có hại và cho phép giữ nguyên kích thước lỗ theo thiết kế hệ thống IMS.

2.7. Tính mô-men cản và dòng tiêu thụ là yếu tố quyết định khả năng vận hành trong RAID-M100

Thử nghiệm cho thấy:

- Dòng hoạt động: 0,12 A.
- Tốc độ quay: 13.000 vòng/phút.
- Công suất tiêu thụ: 1,98 W.

Mô-men cản: $M = 1,45 \times 10^{-3}\text{N}\cdot\text{m}$ [5].

Phân tích mô-men tải cho thấy mô-men cản của bơm chỉ vào khoảng $1,45 \times 10^{-3}\text{N}\cdot\text{m}$, tương đương 29% mô-men danh định của mô-tơ đang sử dụng. Điều này hàm ý rằng ma sát bên trong buồng bơm ở mức thấp, đảm bảo dòng tiêu thụ chỉ 0,04-0,08 A, nằm dưới giới hạn 0,13 A của thiết bị RAID-M100. Như vậy, thiết kế không gây quá tải mô-tơ và bảo đảm

khả năng vận hành ổn định trong thời gian dài.

2.8. Từ tính toán đến hình thành bộ bản vẽ thiết kế

Dựa trên các kết quả tính toán đã trình bày, bộ bản vẽ thiết kế bơm được xây dựng theo quy trình chặt chẽ nhằm bảo đảm mọi thông số hình học và dung sai đều tuân thủ mô hình toán học. Mặt cắt buồng bơm được xác định từ các thông số chính: đường kính buồng 22 mm, rotor 15 mm và độ lệch tâm 0,50 mm, bảo đảm thể tích dịch chuyển phù hợp và đáp ứng không gian lắp đặt của RAID-M100/XP.

Rãnh cánh và cánh gạt được thiết kế với kích thước $2,2 \times 6\text{ mm}$ và khe hở 0,02-0,04 mm, vừa bảo đảm độ kín, vừa giảm ma sát. Vị trí lỗ hút và lỗ xả được xác định dựa trên mô phỏng biến thiên thể tích theo góc quay rotor; đường kính lỗ giữ nguyên 1,5 mm để phù hợp với hệ IMS.

Dung sai đồng tâm được khống chế $\leq 0,03\text{ mm}$ và độ nhám $Ra = 0,8-1,6\text{ }\mu\text{m}$ nhằm giảm rò khí và mài mòn. Bộ bản vẽ tổng thể được hoàn thiện bằng cách tích hợp toàn bộ thông số trên, bảo đảm tính chính xác, khả năng chế tạo và độ tin cậy khi vận hành.

2.9. Thử nghiệm

Năm mẫu bơm được chế tạo theo bản vẽ thiết kế và thử nghiệm tại điện áp 9 VDC. Các thông số đo gồm lưu lượng Q, tốc độ quay n, dòng I, áp suất hút và nhiệt độ. Yêu cầu đánh giá gồm:

- Lưu lượng: $0,8 \pm 0,2$ L/phút.
- Dòng: $< 130\text{ mA}$.
- Áp suất hút: 3-18 kPa.
- Nhiệt độ vỏ: $< 50^\circ\text{C}$ sau 60 phút.

Kết quả cho thấy cả 5 mẫu đều đạt yêu cầu về lưu lượng (0,78-0,84 L/phút), dòng tiêu thụ (40-60 mA), áp suất hút (khoảng 12,8-13,2

kPa) và nhiệt độ (37-40°C). Không xuất hiện hiện tượng rung, kẹt cánh hoặc giảm hiệu suất theo thời gian.

Kết luận thử nghiệm: Các mẫu bơm đáp ứng đầy đủ yêu cầu kỹ thuật của RAID-M100/XP, xác nhận tính đúng đắn của thiết kế và khả năng triển khai chế tạo loạt.

3. ĐÁNH GIÁ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sự phù hợp giữa mô hình tính toán và thực nghiệm

Lưu lượng thực đo sai lệch <7% so với lý thuyết, chứng tỏ mô hình tính toán và lựa chọn thông số (V_D , e, dung sai) là chính xác. Dòng tiêu thụ thấp hơn giới hạn cho phép, phù hợp với mô-men cản tính toán. Thiết kế đáp ứng ổn định nguồn 9 VDC của RAID.

3.2. Nguyên nhân sai lệch lý thuyết – thực nghiệm

Sai lệch nhỏ xuất phát từ:

- Rò khí qua khe hở dù nằm trong dung sai cho phép.
- Ma sát cánh gạt thay đổi theo thời gian chạy rà.
- Ảnh hưởng điều kiện môi trường.
- Sai số thiết bị đo lưu lượng.

Những sai lệch này đều nằm trong mức chấp nhận được của bơm cỡ nhỏ.

3.3. Ưu điểm của thiết kế

- Hiệu suất thể tích đạt yêu cầu trong kích thước rất nhỏ, nhờ lựa chọn hợp lý độ lệch tâm.
- Hoạt động ổn định với nguồn giới hạn 0 đến 9 V – 0,13 A.
- Dung sai và độ nhám tối ưu theo tiêu chuẩn ISO, nâng cao độ bền và độ tin cậy.
- Có thể thay thế hoàn toàn bơm nhập khẩu trong hệ RAID-M100/XP.

3.4. Hướng cải tiến trong tương lai

- Cải tiến vật liệu cánh gạt (PEEK-graphite, PEEK-CF) để giảm ma sát và tăng tuổi thọ.
- Nâng cấp công nghệ gia công (CNC 5 trục, superfinishing) nhằm giảm rò khí và nâng hiệu suất thêm 5-8%.
- Tối ưu hóa hình học bằng mô phỏng CFD để giảm tổn thất cục bộ và dao động áp suất.
- Phát triển cấu hình nhiều cánh nhằm tăng độ ổn định lưu lượng.
- Tích hợp cảm biến và điều khiển vòng kín để tạo bơm “thông minh” có khả năng tự hiệu chỉnh lưu lượng.❖

Ngày nhận bài: 15/12/2025

Ngày phản biện: 29/12/2025

Tài liệu tham khảo:

• Tài liệu trong nước:

- [1]. Nguyễn Văn Tuấn, “*Máy thủy lực và máy nén khí*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2010.
→ Dùng cho công thức (1), (2), (3) – Nền tảng về bơm thể tích và bơm cánh gạt.
- [2]. Mai Văn Tấn, “*Thủy lực – Khí nén*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2015.
→ Dùng cho công thức (6) – Hiệu suất thể tích, rò khí, phân tích tính toán.
- [3]. Nguyễn Hữu Lộc, “*Hệ thống truyền động thủy lực – khí nén*”. Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh, 2016.
→ Dùng cho công thức (3), (6) – Mô hình bơm cánh gạt mini.
- [4]. Lê Đình Tiến, “*Cơ học chất lỏng*”. NXB. Giáo dục, 2012.
→ Dùng cho công thức (7) – Vận tốc dòng qua tiết diện.
- [5]. Nguyễn Trọng Hiệp, “*Nguyên lý máy*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2009.
→ Dùng cho công thức (8) – Công suất – mô-men – tốc độ góc.

• Tài liệu Việt hóa/áp dụng tại Việt Nam:

- [6]. TCVN 2737:2010, “*Tiêu chuẩn cơ khí – Các yêu cầu chung về thiết kế chi tiết quay*”.
→ Dùng cho yêu cầu dung sai, độ nhám, khả năng chịu tải.