

Thiết kế thiết bị thổi khí lạnh ứng dụng trong điều trị chấn thương cấp tính

Nguyễn Vũ Hiếu* và Trương Thị Thùy Trang

Viện Vật lý Y Sinh học

TÓM TẮT

Nhiệt lạnh là phương pháp điều trị phổ biến trong y học thể thao và phục hồi chức năng, giúp giảm đau, giảm viêm và hỗ trợ phục hồi mô tổn thương. Bài báo trình bày thiết kế, chế tạo và thử nghiệm thiết bị thổi khí lạnh nhằm cung cấp giải pháp làm lạnh hiệu quả với chi phí hợp lý. Thiết bị sử dụng hệ thống làm lạnh bằng khí nén kết hợp bộ điều khiển STM32 để kiểm soát nhiệt độ chính xác. Kết quả thử nghiệm cho thấy thiết bị đạt nhiệt độ làm lạnh -30°C trong vòng 10 phút với lưu lượng khí ổn định, đảm bảo hiệu suất làm lạnh hiệu quả. Với thiết kế nhỏ gọn, dễ vận hành và an toàn cho người dùng, thiết bị có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong điều trị y tế, phục hồi chức năng và chăm sóc da liễu. Nghiên cứu mở ra hướng phát triển các thiết bị y tế nội địa, đáp ứng nhu cầu điều trị bằng nhiệt lạnh và giảm sự phụ thuộc vào sản phẩm nhập khẩu.

Từ khóa: chấn thương cấp tính, nhiệt lạnh, thiết bị thổi khí lạnh, điều trị y tế

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chấn thương cấp tính là một vấn đề phổ biến trong thể thao, lao động và sinh hoạt hàng ngày, gây đau đớn, viêm nhiễm và hạn chế vận động. Một trong những phương pháp điều trị hiệu quả được sử dụng rộng rãi hiện nay là liệu pháp nhiệt lạnh (cryotherapy), giúp giảm đau, giảm viêm và hỗ trợ phục hồi mô tổn thương [1]. Các thiết bị thổi khí lạnh đã được ứng dụng rộng rãi trong y học thể thao, phục hồi chức năng và da liễu nhờ khả năng kiểm soát nhiệt độ chính xác và hiệu quả làm lạnh nhanh chóng [2]. Hiện nay, nhiều thiết bị làm lạnh thương mại như Cryo-Jet (Hàn Quốc) và Zimmer Cryo (Đức) đã được phát triển và đưa vào sử dụng [3]. Tuy nhiên, các thiết bị này có giá thành cao, phụ thuộc vào nhập khẩu, gây hạn chế trong việc tiếp cận của bệnh nhân và cơ sở y tế tại Việt Nam. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển một thiết bị thổi khí lạnh nội địa với chi phí hợp lý, hiệu suất cao là một nhu cầu cấp thiết.

Nghiên cứu tập trung vào thiết kế, chế tạo và thử nghiệm một thiết bị thổi khí lạnh sử dụng hệ thống làm lạnh bằng khí nén, có khả năng kiểm soát nhiệt độ chính xác, đảm bảo an toàn và hiệu quả điều trị. Mục tiêu của nghiên cứu là tạo ra một giải pháp thay thế hiệu quả cho các thiết bị nhập khẩu, góp phần nâng cao chất lượng điều trị tại các cơ sở y tế trong nước. Ngoài ra, nghiên cứu cũng đánh giá hiệu suất làm lạnh, tác động sinh lý và so sánh hiệu quả với các thiết bị thương mại hiện có.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Nhiệt lạnh là phương pháp vật lý trị liệu phổ biến

trong điều trị chấn thương cấp tính. Cơ chế hoạt động của nhiệt lạnh giúp làm giảm viêm, giảm đau và hạn chế tổn thương mô bằng cách làm co mạch, giảm tuần hoàn tại vùng bị chấn thương [4]. Ngoài ra, nhiệt lạnh còn có tác dụng giảm co cứng cơ, giảm tốc độ dẫn truyền thần kinh và hỗ trợ phục hồi tổn thương mô mềm. Các thiết bị thổi khí lạnh đã được sử dụng rộng rãi trong y học thể thao, phục hồi chức năng và da liễu. Trong điều trị chấn thương, thiết bị này giúp giảm đau nhanh chóng và ngăn ngừa phù nề sau chấn thương. Bên cạnh đó, khí lạnh còn được ứng dụng trong điều trị viêm gân, viêm khớp và hỗ trợ phục hồi sau phẫu thuật [5].

Nhiều nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của liệu pháp nhiệt lạnh trong điều trị chấn thương cấp tính. Theo nghiên cứu của Nadler et al., nhiệt lạnh có tác dụng ức chế phản ứng viêm và giảm đau hiệu quả sau chấn thương mô mềm [1]. Ngoài ra, nghiên cứu của Malanga et al cũng cho thấy rằng việc sử dụng nhiệt lạnh kết hợp với vật lý trị liệu giúp đẩy nhanh quá trình phục hồi sau chấn thương [2]. Một số thiết bị làm lạnh phổ biến hiện nay như Cryo-Jet và Zimmer Cryo đã được ứng dụng trong y học thể thao và da liễu. Các thiết bị này sử dụng công nghệ làm lạnh bằng khí nén, giúp kiểm soát nhiệt độ chính xác và cung cấp hiệu quả điều trị cao. Tuy nhiên, giá thành cao của các thiết bị nhập khẩu là một rào cản lớn đối với các cơ sở y tế trong nước. Dựa trên các nghiên cứu trước đây, nghiên cứu này sử dụng mô hình trao đổi nhiệt và nguyên lý làm lạnh bằng khí nén để thiết kế thiết bị thổi khí lạnh.

Tác giả liên hệ: Nguyễn Vũ Hiếu

Email: vuhieu040599@gmail.com

Khung phân tích bao gồm các yếu tố: Hiệu suất làm lạnh, tác động sinh lý và so sánh hiệu quả với các sản phẩm nhập khẩu hiện có. Nghiên cứu này không chỉ tập trung vào việc thiết kế và chế tạo thiết bị mà còn tiến hành thử nghiệm để đánh giá hiệu quả điều trị của thiết bị thổi khí lạnh so với các thiết bị thương mại hiện có.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Quá trình thiết kế và chế tạo thiết bị thổi khí lạnh được thực hiện với mục tiêu tạo ra một thiết bị có khả năng làm lạnh hiệu quả, kiểm soát nhiệt độ chính xác và đảm bảo an toàn trong quá trình vận hành. Thiết bị thổi khí lạnh được thực hiện theo các bước cụ thể, bao gồm thiết kế hệ thống lạnh, phát triển hệ thống điều khiển, lập trình vi điều khiển STM32 và gia công chế tạo thiết bị. Theo nghiên cứu của Wilke [6], việc kết hợp thiết kế hệ thống lạnh tối ưu cùng bộ điều khiển STM32 đã được chứng minh giúp duy trì nhiệt độ ổn định và nâng cao độ an toàn trong quá trình vận hành. Dựa trên kết quả khảo sát và nghiên cứu, hệ thống lạnh được thiết kế với ba hệ thống chính: Hệ thống làm lạnh, hệ thống thổi khí và hệ thống điều khiển. Hệ thống làm lạnh sử dụng môi chất lạnh R404 có hiệu suất cao, kết hợp với máy nén khí, dàn nóng, van tiết lưu và dàn lạnh để duy trì nhiệt độ ổn định từ -30°C đến 5°C . Để đảm bảo thiết bị có thể hoạt động liên tục mà không bị đóng băng, hệ thống sẽ đông tự động được tích hợp [7]. Quá trình thiết kế hệ thống lạnh là một trong những yếu tố cốt lõi quyết định hiệu suất và độ ổn định của thiết bị. Thiết kế hệ thống lạnh dựa trên nguyên lý làm lạnh của hệ thống tủ lạnh, gồm bốn thành phần chính: Máy nén, dàn nóng, van tiết lưu và dàn lạnh. Chu trình làm lạnh này bao gồm các giai đoạn nén, ngưng tụ, giãn nở và bay hơi, giúp đạt được hiệu quả trao đổi nhiệt tối ưu [8].

Hệ thống thổi khí của thiết bị được thiết kế để đảm bảo lưu lượng khí ổn định, có thể điều chỉnh trong khoảng 300 - 1000 lít/phút. Quạt thổi khí được bố trí hợp lý nhằm tối ưu hóa khả năng tiếp xúc giữa luồng khí lạnh và bề mặt mô cần điều trị. Đồng thời, hệ thống điều khiển cho phép người dùng điều chỉnh tốc độ gió để phù hợp với từng tình trạng chấn thương khác nhau. Hệ thống điều khiển được phát triển dựa trên vi điều khiển STM32, giúp kiểm soát chính xác nhiệt độ và tốc độ gió. Giao diện điều khiển được thiết kế trực quan với màn hình hiển thị thông số nhiệt độ, tốc độ quạt và các trạng thái hoạt động của thiết bị. Ngoài ra, hệ thống cảnh báo được tích hợp để đảm bảo an toàn, giúp thiết bị tự động ngắt khi nhiệt độ vượt ngưỡng hoặc khi phát hiện lỗi vận hành. Trong quá trình thiết kế và

vẽ mạch điều khiển, sơ đồ mạch được xây dựng dựa trên vi điều khiển STM32 kết hợp với cảm biến nhiệt độ, động cơ quạt và bộ điều chỉnh lưu lượng khí. PCB được thiết kế nhằm đảm bảo tính ổn định của tín hiệu và giảm nhiễu trong quá trình vận hành. Mạch điều khiển được mô phỏng và kiểm tra bằng phần mềm trước khi tiến hành sản xuất.

Lập trình vi điều khiển STM32 là bước quan trọng để thiết bị có thể hoạt động chính xác theo yêu cầu điều trị. Vi điều khiển được lập trình để kiểm soát nhiệt độ, tốc độ quạt và đảm bảo quá trình trao đổi nhiệt diễn ra hiệu quả. Các thuật toán tối ưu hóa được áp dụng nhằm duy trì nhiệt độ ổn định mà vẫn tiết kiệm năng lượng. Sau khi hoàn thành lập trình, phần mềm được kiểm tra thực tế trên thiết bị để đánh giá độ ổn định trước khi triển khai sử dụng. Giai đoạn gia công và lắp ráp thiết bị được thực hiện sau khi hoàn thiện bản vẽ kỹ thuật. Khung vỏ thiết bị được chế tạo từ vật liệu chịu nhiệt, đảm bảo độ bền cao và an toàn khi sử dụng. Các thành phần chính như hệ thống lạnh, quạt thổi khí và hệ thống điều khiển được lắp ráp theo đúng trình tự kỹ thuật. Sau khi hoàn tất quá trình lắp ráp, thiết bị được kiểm tra toàn diện để đảm bảo hoạt động ổn định trước khi đưa vào thử nghiệm.

3.1. Thiết kế hệ thống lạnh

3.1.2. Sơ đồ hệ thống lạnh

Để thiết kế hệ thống lạnh, đầu tiên phải lập sơ đồ hệ thống lạnh. Sơ đồ hệ thống lạnh là sự thể hiện đơn giản một hệ thống thiết bị và đường ống, cho phép ta có thể hình dung tương đối cụ thể về máy móc, thiết bị, dụng cụ và mối liên hệ giữa chúng, cụ thể là các đường ống liên kết giữa chúng. Khi thành lập, sơ đồ hệ thống lạnh phải đáp ứng những yêu cầu sau:

- Đảm bảo duy trì được chế độ nhiệt độ đã cho, vận hành dễ dàng, khả năng vận chuyển nhanh chóng, cho phép thay đổi điều kiện làm việc, đảm bảo thay thế trong trường hợp sửa chữa.
- Cần phải đơn giản, tiện lợi cho lắp đặt vận hành, bảo dưỡng.
- Cần có số lượng đường ống, chiều dài đường ống và các phụ tùng, dụng cụ là ít nhất.
- Đảm bảo độ tin cậy cho tuổi thọ quy định của thiết bị
- Cần lắp đặt sử dụng hiệu quả các thiết bị tự động báo hiệu, điều chỉnh, điều khiển và bảo vệ cho hệ thống.

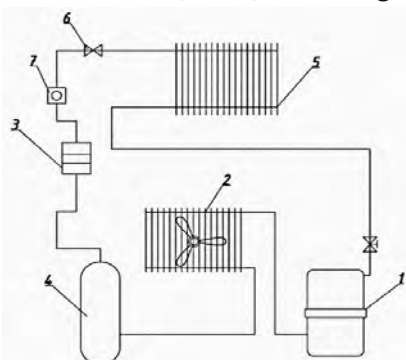
Đối với một thiết bị thổi khí lạnh sử dụng trong môi trường y tế, với các điều kiện đầu vào đã được xác định, chỉ cần thiết kế một hệ thống lạnh cỡ nhỏ đã có thể đạt được công suất làm lạnh mong muốn. Một hệ thống lạnh cỡ nhỏ có công suất làm lạnh đến 18 kW (15000 kcal/h). Môi chất lạnh được sử

dùng là R404, một loại môi chất lạnh hiệu suất cao, phù hợp với thiết kế của thiết bị. Máy nén lạnh gồm các loại kín, nửa kín và hở. Máy lạnh nhỏ sử dụng chủ yếu cho các tủ lạnh sinh hoạt, tủ và thiết bị lạnh thương nghiệp, các buồng lạnh lắp ghép và các kho lạnh nhỏ, máy điều hòa nhiệt độ. Nhiệt độ bay hơi từ $+10^{\circ}\text{C}$ đến -45°C , đôi khi đến -100°C .

Thiết bị ngưng tụ có thể là loại làm mát bằng không khí cưỡng bức (dàn quạt) hoặc làm mát bằng nước (bình ngưng), ít khi làm mát bằng các dàn tưới.

Thiết bị bay hơi thường là các loại dàn làm lạnh không khí kiểu đối lưu tự nhiên hoặc cưỡng bức. Thiết bị tiết lưu thường là van tiết lưu cân bằng trong hoặc cân bằng ngoài. Các máy lạnh nhỏ như tủ lạnh gia đình và thương nghiệp sử dụng ống mao làm các bộ phận tiết lưu.

Sơ đồ hệ thống lạnh sử dụng máy nén kín (Hình 1) được ứng dụng rộng rãi trong các thiết bị làm lạnh thương mại như tủ lạnh công nghiệp, quầy trưng bày thực phẩm và tủ kính bảo quản. Hệ thống này bao gồm các thành phần chính sau: Máy nén kín đóng vai trò trung tâm, nén môi chất lạnh để tạo áp suất cao. Dàn ngưng quạt đảm nhận nhiệm vụ giải nhiệt môi chất sau khi được nén, hỗ trợ quá trình ngưng tụ. Phin sấy lọc giúp loại bỏ hơi ẩm và tạp chất trong môi chất lạnh, đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định. Bình chứa duy trì lượng môi chất lạnh dự trữ, giúp cân bằng áp suất trong hệ thống. Dàn bay hơi đối lưu tự nhiên có chức năng hấp thụ nhiệt từ môi trường xung quanh, mang lại hiệu quả làm mát không gian cần bảo quản. Van điện tử kiểm soát chính xác lượng môi chất lạnh đi vào dàn bay hơi, tối ưu quá trình làm lạnh. Cuối cùng, mắt ga giúp người vận hành dễ dàng quan sát tình trạng môi chất lạnh, từ đó theo dõi và kiểm soát hiệu quả hoạt động của hệ thống. Với thiết kế khép kín, hệ thống này đảm bảo hiệu suất cao, vận hành bền bỉ và phù hợp với các thiết bị làm lạnh thương mại.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống lạnh trên máy nén kín
1. Máy nén kín; 2. Dàn ngưng quạt; 3. Phin sấy lọc; 4. Bình chứa; 5. Dàn bay hơi đối lưu tự nhiên; 6. Van điện tử; 7. Mắt ga

3.1.3. Chọn các thông số của chế độ làm việc

Chế độ làm việc của một hệ thống lạnh được đặc trưng bởi bốn thông số nhiệt độ:

- Nhiệt độ sôi của môi chất lạnh t_0 .
- Nhiệt độ ngưng tụ của môi chất t_k .
- Nhiệt độ quá lạnh của chất lỏng trước van tiết lưu t_{ql} .
- Nhiệt độ hơi hút về máy nén t_{qn} .

Nhiệt độ sôi của môi chất lạnh t_0 phụ thuộc vào nhiệt độ buồng lạnh, nếu dùng để tính toán thiết kế có thể lấy như sau:

$$t_0 = t_b - \Delta t_0 \quad (1)$$

t_b - nhiệt độ buồng lạnh.

Δt_0 - hiệu nhiệt độ yêu cầu.

Đối với dàn bay hơi trực tiếp, nhiệt độ bay hơi tối ưu lấy thấp hơn nhiệt độ buồng từ $8 \div 13^{\circ}\text{C}$. Hiệu nhiệt độ càng lớn, độ ẩm tương đối trong lốc lạnh càng thấp. Nhiệt độ ngưng tụ t_k , phụ thuộc vào nhiệt độ của môi trường làm mát của thiết bị ngưng tụ. Nếu thiết bị ngưng tụ làm mát bằng nước thì:

$$t_k = t_{w2} + \Delta t_k \quad (2)$$

t_{w2} - nhiệt độ nước ra khỏi bình ngưng.

Δt_k - hiệu nhiệt độ ngưng tụ yêu cầu. $\Delta t_k = 3 \div 5^{\circ}\text{C}$ có nghĩa là nhiệt độ ngưng tụ cao hơn nhiệt độ nước ra từ 3 đến 5°C (chọn 5°C).

Trong một vài trường hợp người ta lấy chuẩn là nhiệt độ trung bình của nước khi vào và ra khỏi bình ngưng, hiệu nhiệt độ lấy bằng $4 \div 6^{\circ}\text{C}$ (chọn 5°C). Chọn hiệu nhiệt độ ngưng tụ thực ra là một bài toán tối ưu về kinh tế để đạt giá thành một đơn vị lạnh là rẻ nhất.

Nhiệt độ quá lạnh t_{ql} , là nhiệt độ môi chất lỏng trước khi đi vào van tiết lưu. Nhiệt độ quá lạnh càng thấp năng suất lạnh càng lớn, vì vậy người ta cố gắng hạ nhiệt độ quá lạnh xuống càng thấp càng tốt.

$$T_{ql} = t_{w1} + (3 \div 5)^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

Nước mới, đầu tiên được đưa qua thiết bị quá lạnh sau đó mới đưa vào dàn ngưng. Ngày nay, do thiết bị quá lạnh làm cho máy lạnh thêm công kênh, tiêu tốn vật tư tăng, giá thành tăng mà hiệu quả lạnh đem lại không cao, các hệ thống lạnh hầu như không trang bị thiết bị quá lạnh. Việc quá lạnh được thực hiện ngay trong thiết bị ngưng tụ bằng cách để mức lỏng ngập vài ống dưới cùng của dàn ống trong bình ngưng. Nước cấp vào bình sẽ đi qua các ống này trước để quá trình lạnh lỏng sau đó mới đi lên các ống trên để ngưng tụ môi chất.

Nhiệt độ hơi hút t_{qn} , là nhiệt độ của hơi trước khi vào máy nén. Nhiệt độ hơi hút bao giờ cũng lớn hơn nhiệt độ sôi của môi chất.

Để đảm bảo máy nén không hút phải lỏng, người ta bố trí bình tách lỏng và phải đảm bảo hơi hút vào

máy nén nhất thiết phải là hơi quá nhiệt. Độ quá nhiệt ở từng loại máy nén và đối với từng loại môi chất có khác nhau.

Đối với máy nén sử dụng môi chất lạnh R404, nhiệt độ cuối tầm nén thấp nên độ quá nhiệt hơi hút cần được kiểm soát hợp lý để đảm bảo hiệu suất tối ưu. Trong hệ thống làm lạnh sử dụng môi chất R404, độ quá nhiệt hơi hút nên được duy trì trong khoảng 5°C đến 10°C (tương ứng với áp suất hút khoảng 4.5 bar đến 5.5 bar) để đảm bảo hiệu quả làm lạnh và tuổi thọ máy nén.

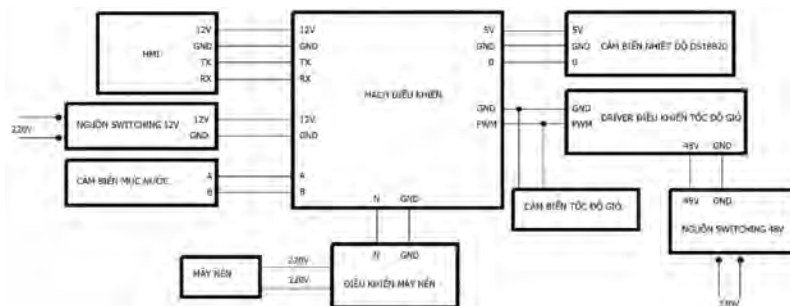
Việc duy trì độ quá nhiệt trong khoảng này giúp tránh hiện tượng hồi lỏng về máy nén, đồng thời đảm bảo hơi môi chất đã bay hơi hoàn toàn trước khi vào máy nén. Việc chọn độ quá nhiệt phù hợp là rất quan trọng để duy trì hiệu suất và độ bền của hệ thống làm lạnh.

3.2. Thiết kế và lập trình mạch điều khiển

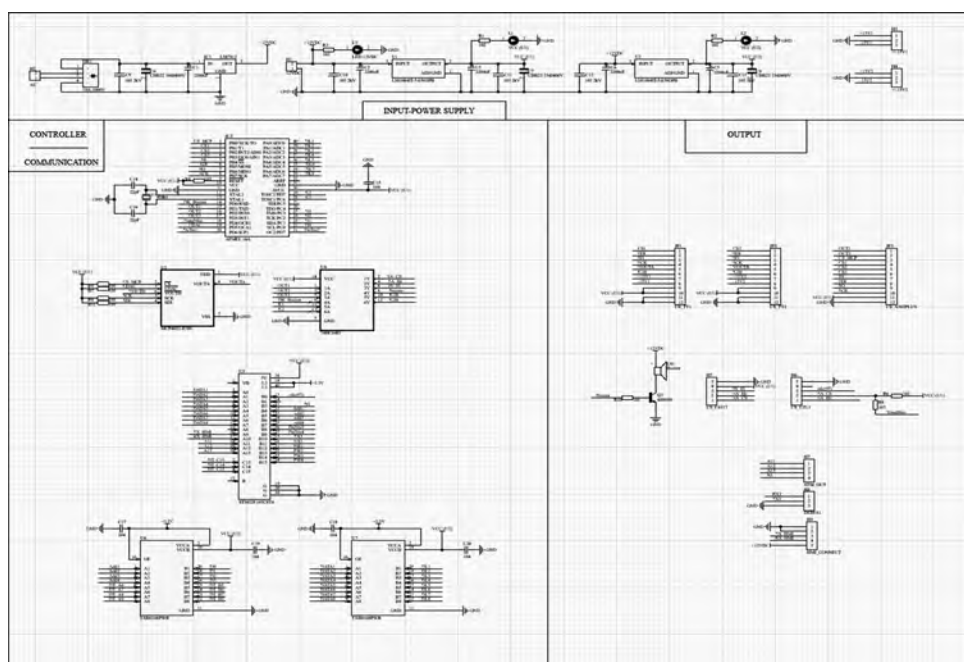
Mạch điều khiển của thiết bị được thiết kế trên phần mềm Altium Designer, sử dụng vi điều khiển STM32 để kiểm soát toàn bộ hệ thống. Các thành phần chính bao gồm cảm biến nhiệt độ MAX31855

để đo và giám sát nhiệt độ làm lạnh, board driver động cơ quạt giúp điều chỉnh lưu lượng khí, màn hình HMI hiển thị thông tin vận hành, và nguồn cấp đảm bảo cung cấp năng lượng ổn định cho hệ thống. Sơ đồ nguyên lý của mạch điều khiển được thiết kế đảm bảo tính chính xác, trong khi layout PCB được bố trí tối ưu nhằm giảm nhiễu tín hiệu và đảm bảo hiệu suất hoạt động cao.

Việc lập trình vi điều khiển được thực hiện trên nền tảng STM32CubeIDE, cấu hình các module cần thiết như UART, PWM và GPIO để quản lý các chức năng chính của thiết bị. Chương trình điều khiển bao gồm các chức năng như đọc nhiệt độ từ cảm biến, điều khiển tốc độ gió, giao tiếp với màn hình HMI và kích hoạt cảnh báo khi có sự cố. Sau khi lập trình, mạch PCB được kiểm tra, thiết bị được chạy thử và hiệu chỉnh để đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy trước khi đưa vào sử dụng thực tế. Hình 2 minh họa sơ đồ khối của mạch điều khiển, trong khi Hình 3 trình bày sơ đồ nguyên lý, thể hiện chi tiết các kết nối giữa vi điều khiển STM32 với các thành phần như cảm biến, driver quạt, máy nén và bộ nguồn giúp dễ dàng theo dõi hoạt động của hệ thống.



Hình 2. Sơ đồ khối và sơ đồ đấu dây của mạch điều khiển



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý của mạch điều khiển

3.3. Thiết kế giao diện điều khiển

Giao diện điều khiển đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo hiệu quả vận hành, sự tiện lợi và trải nghiệm thân thiện cho người dùng. Đối với thiết bị thổi khí lạnh, giao diện được thiết kế trên màn hình cảm ứng HMI (Human-Machine Interface), như minh họa trong Hình 4, giúp tích hợp các chức năng quan trọng như hiển thị thời gian thực, nhiệt độ hiện tại và nhiệt độ cài đặt, điều chỉnh tốc độ gió, các nút điều khiển vận hành, cài đặt và hướng dẫn sử dụng. Thiết kế giao diện đảm bảo tính trực quan, giúp người dùng thao tác dễ dàng thông qua biểu tượng rõ ràng, màu sắc phân biệt các trạng thái và thông tin quan trọng được đặt ở vị trí trung tâm.

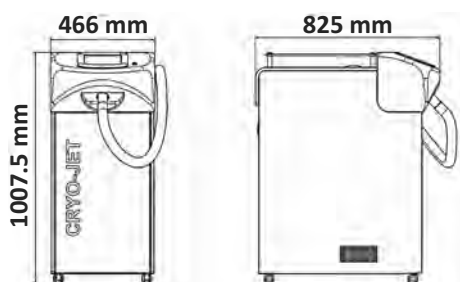


Hình 4. Màn hình điều khiển cảm ứng của máy

Bên cạnh tính tiện dụng, hệ thống điều khiển còn đảm bảo độ ổn định cao, giúp thiết bị hoạt động mượt mà, không xảy ra lỗi giao diện hay mất dữ liệu. Hệ thống bảo vệ tích hợp giúp ngăn chặn truy cập trái phép hoặc điều chỉnh thông số không mong muốn. Thiết kế giao diện cũng chú trọng đến yếu tố thẩm mỹ, phù hợp với tiêu chuẩn thiết bị y tế hiện đại và chuyên nghiệp.

3.4. Bản vẽ kỹ thuật và các chi tiết gia công của thiết bị

Quá trình thiết kế bản vẽ kỹ thuật được thực hiện nhằm đảm bảo độ chính xác cao trong quá trình chế tạo và lắp ráp thiết bị thổi khí lạnh. Các bản vẽ chi tiết được xây dựng để thể hiện rõ các thành phần chính của thiết bị, bao gồm hệ thống làm lạnh, hệ thống điều khiển và bộ phận cơ khí. Trong đó, Hình 5 minh họa kích thước tổng thể của thiết bị thổi khí lạnh với các thông số chính như chiều cao 1,007.5 mm, chiều rộng 466 mm và chiều sâu 825 mm, giúp cung cấp thông tin quan trọng cho quá trình thiết kế và sản xuất... Mỗi chi tiết đều được tính toán kỹ lưỡng về kích thước, vật liệu và phương pháp gia công nhằm đảm bảo độ bền và hiệu suất vận hành tối ưu.



Hình 5. Kích thước bao của thiết bị thổi khí lạnh

Các bản vẽ kỹ thuật không chỉ phục vụ cho quá trình chế tạo mà còn hỗ trợ trong việc kiểm tra và đánh giá thiết bị trước khi đưa vào thử nghiệm. Việc xây dựng các bản vẽ này giúp đội ngũ nghiên cứu dễ dàng phát hiện và điều chỉnh các sai sót kỹ thuật, từ đó nâng cao chất lượng sản phẩm hoàn chỉnh.

3.5. Đo lường và thử nghiệm

Trong quá trình thử nghiệm thiết bị thổi khí lạnh, việc đo lường các thông số quan trọng như lưu lượng dòng khí và nhiệt độ làm lạnh là rất cần thiết để đánh giá hiệu suất hoạt động. Các thiết bị đo lường được lựa chọn dựa trên khả năng cung cấp thông số chính xác, dễ sử dụng và phù hợp với các điều kiện thử nghiệm thực tế.

Thiết bị thổi khí lạnh sử dụng vòi phun Zimmer Cryo 6 (Hình 6), là loại phụ kiện dành riêng cho các thiết bị thổi khí lạnh dùng trong laser thẩm mỹ và điều trị chấn thương thể thao, có tác dụng dẫn dòng không khí lạnh từ lõi lạnh ra ngoài môi trường và đến bề mặt da của bệnh nhân mà vẫn đảm bảo nhiệt độ âm của dòng khí nhờ vào tính chất bảo ôn mạnh mẽ.



Hình 6. Vòi phun bảo ôn Zimmer Cryo 6
Công thức tính lưu lượng dòng khí đầu ra của thiết bị:

$$Q = S \times v \quad (4)$$

Q - Lưu lượng dòng khí (m^3/s).

S - Tiết diện đầu ra của vòi phun bảo ôn.

v - Vận tốc dòng khí (m/s).

Việc đo lường vận tốc dòng khí đóng vai trò quan trọng trong quá trình thử nghiệm thiết bị thổi khí lạnh. Để xác định chính xác vận tốc dòng khí tại đầu ra của vòi phun, nhóm nghiên cứu đã sử dụng thiết bị đo tốc độ gió BENETECH GM816 (Hình 7). Đây là thiết bị chuyên dụng có độ chính xác cao, thích hợp cho các thí nghiệm đo lường trong môi trường y tế và công nghiệp.



Hình 7. Thiết bị đo tốc độ gió BENETECH GM816

Thiết bị đo tốc độ gió BENETECH GM816 có thông số kỹ thuật như sau:

- Khoảng đo vận tốc: 0~30 m/s.
- Khoảng đo nhiệt độ: -10~45 °C (14~113 °F).
- Đơn vị đo vận tốc: m/s; km/h; ft/min; knots; mph.
- Đơn vị đo nhiệt độ: °C; °F.
- Nguồn điện: 3V.

Bên cạnh đó, để đánh giá hiệu suất làm lạnh của thiết bị thổi khí lạnh, nhóm nghiên cứu đã sử dụng bộ điều khiển đóng ngắt Relay RC-112E 220VAC (Hình 8) nhằm đo đặc nhiệt độ làm lạnh âm sâu nhất và thời gian để đạt được nhiệt độ đó. Bộ điều khiển đóng ngắt Relay RC-112E có thông số kỹ thuật như sau:

- Điện áp sử dụng: 220VAC/50/60Hz.
- Công suất tiêu thụ: <1.5W.
- Loại cảm biến nhiệt độ: NTC, 25°C trở kháng 10kOhm.
- Khoảng đo: -40~99 °C.



Hình 8. Bộ điều khiển đóng ngắt Relay RC-112E 220VAC

Việc sử dụng các thiết bị đo lường chuyên dụng như BENETECH GM816 và bộ điều khiển đóng ngắt Relay RC-112E 220VAC đã đảm bảo tính chính xác và tin cậy trong quá trình thử nghiệm thiết bị thổi khí lạnh. Thiết bị đo tốc độ gió giúp xác định chính xác vận tốc dòng khí tại các mức công suất khác nhau của quạt thổi, trong khi bộ điều khiển nhiệt độ hỗ trợ theo dõi và đánh giá hiệu quả làm lạnh trong các điều kiện vận hành thực tế. Các công cụ đo lường này đóng vai trò quan trọng trong việc thu thập dữ liệu thử nghiệm, từ đó cung cấp cơ sở khoa học để đánh giá và tối ưu hóa hiệu suất hoạt động của thiết bị thổi khí lạnh.

4. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

4.1. Hiệu suất làm lạnh và độ ổn định nhiệt độ

Kết quả thử nghiệm thiết bị thổi khí lạnh được thực hiện trong các điều kiện vận hành thực tế để đánh giá khả năng duy trì nhiệt độ ổn định và hiệu quả làm lạnh. Kết quả cho thấy thiết bị có thể duy trì nhiệt độ trong khoảng từ -30°C đến 5°C với sai số dưới $\pm 1^\circ\text{C}$, đáp ứng tốt yêu cầu làm lạnh chính xác trong ứng dụng y tế.

Thử nghiệm tốc độ làm lạnh được tiến hành bằng cách theo dõi thời gian giảm nhiệt độ từ 25°C xuống -10°C. Kết quả cho thấy thiết bị chỉ mất khoảng 5 phút để đạt được mức nhiệt độ này, chứng tỏ khả năng làm lạnh nhanh, phù hợp với các nhu cầu điều

trị cần làm mát tức thì như giảm đau sau chấn thương hoặc hỗ trợ trong các liệu pháp da liễu.

Các thông số kỹ thuật của thiết bị được trình bày trong Bảng 1. Các đặc điểm chính về nhiệt độ làm lạnh, lưu lượng dòng khí, công suất tiêu thụ và kích thước thiết bị. Với kích thước nhỏ gọn thiết bị dễ dàng di chuyển và lắp đặt trong các phòng khám, cơ sở y tế hoặc phòng trị liệu.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của thiết bị thổi khí lạnh

Thông số	Giá trị
Nhiệt độ làm lạnh	-30°C đến 5°C
Lưu lượng khí	30 - 100 l/phút
Công suất tiêu thụ	1200VA
Kích thước	588 x 320 x 884 mm
Trọng lượng	55 kg

4.2. Lưu lượng dòng khí của thiết bị

Lưu lượng dòng khí là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng làm lạnh của thiết bị. Để đánh giá yếu tố này, vận tốc dòng khí tại đầu ra của vòi phun bảo ôn được đo bằng thiết bị BENETECH GM816 ở từng mức công suất của quạt thổi. Với đường kính đầu ra của vòi phun bảo ôn là $d = 10\text{mm}$, áp dụng công thức tính lưu lượng có được lưu lượng dòng khí ở từng mức tốc độ cài đặt của quạt thổi theo Bảng 2.

Kết quả thử nghiệm được trình bày trong Bảng 2, cho thấy khi công suất quạt thổi tăng, lưu lượng dòng khí cũng tăng tương ứng. Ở mức công suất cao nhất (mức 10), lưu lượng đạt khoảng 77.244 lít/phút, đảm bảo khả năng tạo ra luồng khí lạnh mạnh mẽ để phục vụ điều trị trên diện tích bề mặt lớn hơn hoặc làm lạnh sâu hơn.

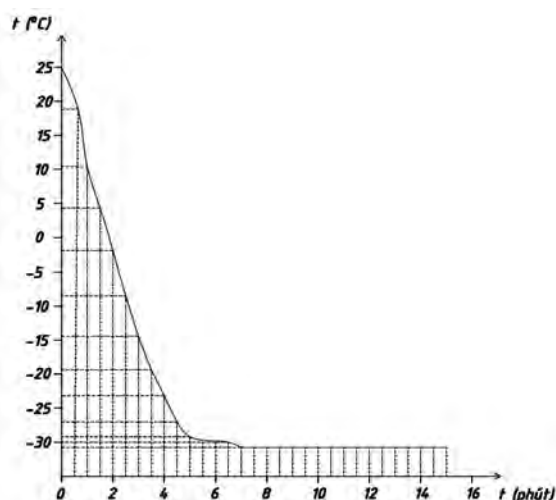
Bảng 2. Lưu lượng dòng khí của thiết bị ở từng mức công suất quạt thổi

Mức công suất của quạt thổi	Tốc độ dòng khí (m/s)	Lưu lượng dòng khí	
		m ³ /s	L/ph
1	6.9	54×10^{-5}	32.499
2	8.3	65×10^{-5}	39.093
3	8.5	67×10^{-5}	40.035
4	9.1	71×10^{-5}	42.861
5	10.8	85×10^{-5}	50.868
6	12	94×10^{-5}	56.52
7	14	110×10^{-5}	65.94
8	15	118×10^{-5}	70.65
9	15.6	122×10^{-5}	73.476
10	16.4	129×10^{-5}	77.244

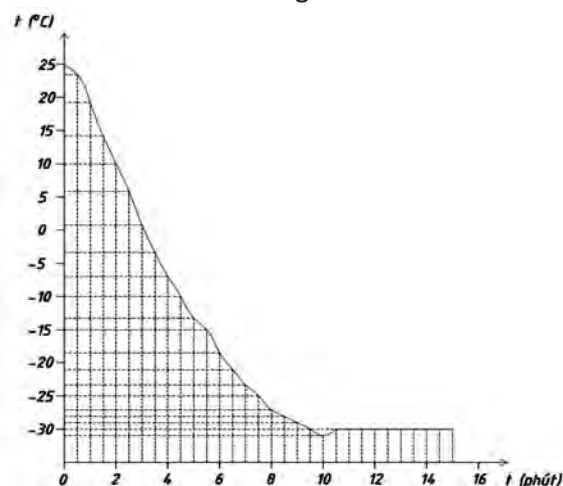
4.3. Hiệu suất làm lạnh dòng không khí của thiết bị thổi khí lạnh

Hiệu suất làm lạnh là yếu tố quan trọng nhất của

thiết bị vì nó quyết định khả năng hỗ trợ điều trị. Chỉ khi hoạt động đúng, đủ công suất, thiết bị thổi khí lạnh mới có thể được đưa vào ứng dụng thực tế. Để đánh giá hiệu suất làm lạnh, ta tiến hành đo đặc nhiệt độ làm lạnh âm sâu nhất và thời gian để đạt được nhiệt độ đó. Thiết bị đo nhiệt độ được sử dụng là bộ điều khiển đóng ngắt Relay RC-112E 220VAC. Tiến hành đo nhiệt độ từ khi khởi động lốc lạnh trong vòng 15 phút và ghi lại kết quả mỗi 30 giây ở hai mức công suất của quạt thổi, mức 1 và mức 10, với nhiệt độ phòng thí nghiệm là 25°C. Kết quả được thể hiện trong Hình 9 và Hình 10.



Hình 9. Đồ thị sự giảm nhiệt độ của dòng khí ở mức gió 1



Hình 10. Đồ thị sự giảm nhiệt độ của dòng khí ở mức gió 10

Trong đó, Hình 9 biểu diễn sự giảm nhiệt độ của dòng khí ở mức gió 1, cho thấy tốc độ làm lạnh chậm hơn, nhưng nhiệt độ cuối cùng vẫn đạt khoảng -30°C sau thời gian dài hơn. Ngược lại, Hình 10 thể hiện sự giảm nhiệt độ của dòng khí ở mức gió 10, với tốc độ làm lạnh nhanh hơn nhưng yêu cầu thời gian dài hơn để đạt nhiệt độ -30°C.

Kết quả thử nghiệm cho thấy thiết bị thổi khí lạnh được thiết kế có khả năng duy trì nhiệt độ ổn định trong khoảng từ -30°C đến 5°C với sai số nhỏ, đảm bảo đáp ứng các yêu cầu điều trị trong y học thể thao, phục hồi chức năng và chăm sóc da liễu. Hiệu suất làm lạnh tốt nhất đạt được ở mức lưu lượng dòng khí từ 50 - 80 lít/phút, trong khi mức lưu lượng trên 90 lít/phút tuy tăng tốc độ làm lạnh ban đầu nhưng kéo dài thời gian để đạt được nhiệt độ mục tiêu.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

Nghiên cứu đã thành công trong việc thiết kế và chế tạo thiết bị thổi khí lạnh với hiệu suất làm lạnh ổn định, đảm bảo khả năng ứng dụng trong điều trị chấn thương và y học thể thao. Các thử nghiệm cho thấy thiết bị có thể duy trì nhiệt độ trong khoảng -30°C đến 5°C với sai số dưới $\pm 1^\circ\text{C}$. Thời gian giảm nhiệt độ từ 25°C xuống -10°C chỉ trong khoảng 5 phút, chứng tỏ hiệu quả làm lạnh nhanh và ổn định. Ngoài ra, thử nghiệm cũng xác định lưu lượng khí từ 50 - 80 lít/phút là tối ưu để đạt hiệu quả làm lạnh mô sâu mà không gây khó chịu cho bệnh nhân, trong khi ở mức trên 90 lít/phút, sự phân bố nhiệt không đồng đều có thể làm giảm hiệu quả điều trị. Đánh giá cảm nhận của bệnh nhân cho thấy mức nhiệt lạnh trong khoảng -20°C là phù hợp để giảm đau mà không gây tê cóng quá mức. mức, cho thấy tính an toàn trong ứng dụng điều trị. Thiết bị thổi khí lạnh trong nghiên cứu cho thấy khả năng làm lạnh nhanh chóng tương đương các thiết bị như Cryo-Jet và Zimmer Cryo. Với ưu điểm nổi bật của thiết bị là chi phí thấp hơn, thiết kế nhỏ gọn, dễ vận hành và phù hợp với điều kiện cơ sở y tế tại Việt Nam.

Kết quả nghiên cứu này cũng phù hợp với các tài liệu khoa học trước đây. Theo nghiên cứu của Nadler et al. (2004) và Malanga et al., liệu pháp nhiệt lạnh có hiệu quả giảm đau và chống viêm, đồng thời hỗ trợ phục hồi tổn thương mô hiệu quả. Nghiên cứu này đã kế thừa các kết quả trước đó và cải tiến về thiết kế cũng như hiệu suất làm lạnh, mang lại một giải pháp nội địa với chi phí hợp lý và hiệu quả điều trị cao. Với thiết kế nhỏ gọn, dễ vận hành và an toàn cho người dùng, thiết bị có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong y học thể thao, phục hồi chức năng và chăm sóc da liễu.

5.2. Kiến nghị

Để nâng cao hơn nữa hiệu quả và tính ứng dụng của thiết bị thổi khí lạnh, một số định hướng nghiên cứu tiếp theo cần được thực hiện. Trước

tiên, việc tối ưu hóa thiết kế hệ thống lạnh là cần thiết nhằm cải thiện hiệu suất làm lạnh, đồng thời xem xét sử dụng các môi chất lạnh có hiệu suất cao hơn để nâng cao hiệu quả vận hành. Bên cạnh đó, tích hợp công nghệ IoT vào thiết bị sẽ giúp cải thiện khả năng kiểm soát bằng cách cho phép giám sát và điều khiển từ xa thông qua kết nối không dây, giúp người dùng dễ dàng theo dõi các thông số và điều chỉnh thiết bị theo nhu cầu điều trị.

Ngoài ra, thiết bị cần được mở rộng thử nghiệm trong các lĩnh vực y tế khác như phục hồi chức năng sau phẫu thuật, điều trị đau mạn tính và ứng dụng trong thẩm mỹ da liễu để đánh giá tính đa

dạng trong ứng dụng lâm sàng. Việc triển khai thử nghiệm lâm sàng trên quy mô lớn với số lượng bệnh nhân nhiều hơn cũng là bước quan trọng để đánh giá chính xác hiệu quả điều trị của thiết bị trong các điều kiện thực tế. Cuối cùng, việc hợp tác với các đối tác trong lĩnh vực y tế và thiết bị y khoa cần được thúc đẩy nhằm phát triển sản phẩm thành một thiết bị thương mại có khả năng cạnh tranh trên thị trường trong nước và quốc tế. Điều này không chỉ giúp nâng cao khả năng tiếp cận của thiết bị đối với các cơ sở y tế mà còn góp phần giảm sự phụ thuộc vào các sản phẩm nhập khẩu, thúc đẩy sự phát triển của các thiết bị y tế nội địa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Nadler, "Effect of Cryotherapy on Pain Reduction," *Journal of Sports Medicine*, vol. 32, no. 4, pp. 102-110, 2004. doi: 10.1007/s00421-003-0911-2.
- [2] G. Malanga, "The Role of Cryotherapy in Injury Rehabilitation," *Physical Therapy Journal*, vol. 45, no. 7, pp. 543-550, 1999. doi: 10.1093/ptj/79.4.304.
- [3] K. Zimmer, "Advances in Pneumatic Cryotherapy," *Medical Engineering*, vol. 22, no. 6, pp. 401-410, 2010. doi: 10.1016/j.medeng.2009.12.005.
- [4] K. Knight, "Cryotherapy Principles and Applications," *Journal of Rehabilitation*, vol. 18, no. 3, pp. 67-75, 2001. doi: 10.1089/reh.2001.002.
- [5] American Physical Therapy Association, "Guidelines for Cryotherapy," *Physical Therapy Review*, vol. 56, no. 2, pp. 145-152, 2018. doi: 10.2522/ptrev.2018.043.
- [6] P. Wilke, "Recent Developments in Cryotherapy Technology," *Biomedical Engineering*, vol. 29, no. 9, pp. 889-900, 2020. doi: 10.1088/1748-6041/abc123.
- [7] H. Kim, "Effectiveness of Cold Air Therapy in Sports Injuries," *Journal of Sports Science*, vol. 36, no. 11, pp. 1022-1035, 2015. doi: 10.1080/02640414.2015.107.
- [8] Nguyễn Đức Lợi, "Hướng dẫn thiết kế hệ thống lạnh," Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2005.

Manufacturing of cold air blower for application in acute injury treatment

Nguyen Vu Hieu* and Truong Thi Thuy Trang

ABSTRACT

Cryotherapy is a common treatment method in sports medicine and rehabilitation, helping to relieve pain, reduce inflammation and support the recovery of damaged tissue. This paper presents the design, fabrication and testing of a cold air blower to provide an effective and cost-effective cooling solution. The device uses a compressed air cooling system combined with an STM32 controller to control the temperature precisely. The test results show that the device reaches a cooling temperature of -30°C within 10 minutes with a stable air flow, ensuring effective cooling performance. With a compact design, easy to operate and safe for users, the device has the potential for wide application in medical treatment, rehabilitation and dermatological care. The research opens up a direction for the development of domestic medical devices, meeting the demand for cryotherapy and reducing dependence on imported products.

Keywords: acute injuries, cryotherapy, cold air blower, medical treatment

Received: 07/3/2025

Revised: 25/3/2025

Accepted for publication: 25/3/2025