

MÔ PHỎNG VÀ ĐIỀU KHIỂN LỒNG NUÔI DƯỠNG TRẺ SƠ SINH SỬ DỤNG SIMSCAPE

SIMULATION AND CONTROL OF NEONATAL INCUBATOR USING SIMSCAPE

Nguyễn Thu Hà^{1,*},
Đinh Thị Lan Anh¹, Nguyễn Đức Quang²

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.149>

TÓM TẮT

Lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh là thiết bị y tế quan trọng nhằm duy trì điều kiện nhiệt độ và độ ẩm phù hợp cho trẻ sơ sinh, đặc biệt là trẻ sinh non hoặc nhẹ cân. Nghiên cứu này trình bày việc xây dựng mô hình vật lý của hệ thống lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh trong môi trường Simscape của MATLAB/Simulink, bao gồm các phân hệ tuần hoàn không khí, gia nhiệt, tạo ẩm và buồng nuôi dưỡng. Mô hình được đóng gói dưới dạng khối Carestation Mask với các đầu vào và đầu ra cho phép điều khiển nhiệt độ và độ ẩm của hệ thống. Trên cơ sở dữ liệu nhận dạng mô hình, các bộ điều khiển PI và P được thiết kế và đánh giá thông qua nhiều trường hợp vận hành khác nhau như thay đổi giá trị đặt và tác động khi có trẻ sơ sinh. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống có khả năng duy trì ổn định nhiệt độ và độ ẩm với sai số xác lập nhỏ và đáp ứng phù hợp trong các điều kiện vận hành khác nhau, qua đó khẳng định tính hiệu quả của mô hình và các bộ điều khiển được đề xuất.

Từ khóa: Mô hình khí ẩm, lồng nuôi dưỡng trẻ, Simscape, điều khiển nhiệt độ và độ ẩm.

ABSTRACT

Neonatal incubators are essential medical devices designed to maintain appropriate temperature and humidity conditions for newborn infants, particularly premature or low-birth-weight babies. This study presents the development of a physical model of a neonatal incubator system in the Simscape environment of MATLAB/Simulink, including air circulation, heating, humidification, and incubation subsystems. The model is encapsulated within a Carestation Mask block with configurable inputs and outputs for temperature and humidity regulation. Based on the identified model data, PI and P controllers were designed and evaluated through various operating scenarios, such as setpoint changes and disturbances caused by infant presence. Simulation results demonstrate that the system is capable of maintaining stable temperature and humidity with small steady-state errors and satisfactory responses under different operating conditions, thereby confirming the effectiveness of the proposed model and controllers.

Keywords: Moist air modeling, neonatal care, Simscape, temperature and humidity control.

¹Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: ha.nguyenth3@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/3/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh (LNDTSS), hay lồng ấp, là thiết bị y tế thiết yếu giúp duy trì môi trường sống ổn định cho trẻ sơ sinh, đặc biệt là trẻ sinh non hoặc nhẹ cân. Với hệ thần kinh và cơ chế điều hòa thân nhiệt chưa hoàn thiện, trẻ cần một môi trường được kiểm soát nhiệt độ, độ

ẩm và đôi khi cả nồng độ oxy để phát triển khỏe mạnh và tránh các biến chứng nghiêm trọng. Theo Tổ chức Y tế Thế giới, LNDTSS đóng vai trò then chốt trong việc giảm tỷ lệ tử vong ở trẻ sinh non [1].

Nhiều nghiên cứu đã tập trung phát triển các phương pháp điều khiển nhiệt độ cho lồng ấp trẻ sơ sinh nhằm

nâng cao độ ổn định nhiệt và cải thiện hiệu quả chăm sóc. Một số công trình đã đề xuất hệ thống điều khiển nhiệt độ cải tiến với khả năng duy trì nhiệt độ chính xác và ổn định hơn trong môi trường lồng ấp [2]. Bên cạnh đó, bộ điều khiển PID số cũng được ứng dụng nhằm cải thiện đáp ứng nhiệt và giảm sai số điều khiển của hệ thống [3].

Ngoài các phương pháp điều khiển truyền thống, hiệu quả của cảm biến nhiệt độ khi kết hợp với bộ điều khiển tỉ lệ - vi phân (PD) cũng đã được phân tích để đánh giá khả năng nâng cao hiệu suất vận hành của lồng ấp [4]. Các nghiên cứu gần đây còn phát triển bộ điều khiển PD thích nghi sử dụng logic mờ nhằm tăng khả năng tự điều chỉnh của hệ thống trước những thay đổi của môi trường [5]. Đồng thời, công nghệ IoT và mạng cảm biến thông minh cũng được tích hợp vào hệ thống lồng ấp để hỗ trợ giám sát và điều khiển tự động các thông số vi khí hậu phù hợp với trạng thái của trẻ sơ sinh [6].

Tại Việt Nam, một số công trình đã xây dựng các bộ điều khiển nhiệt độ nhằm duy trì môi trường ổn định cho trẻ sơ sinh [7], trong khi các nghiên cứu khác phát triển giải pháp giám sát và điều khiển từ xa thông qua smartphone để hỗ trợ theo dõi và vận hành hệ thống [8]. Ngoài ra, bài toán điều khiển vi khí hậu bên trong lồng nuôi dưỡng, bao gồm nhiệt độ và độ ẩm, cũng đã được quan tâm nghiên cứu [9].

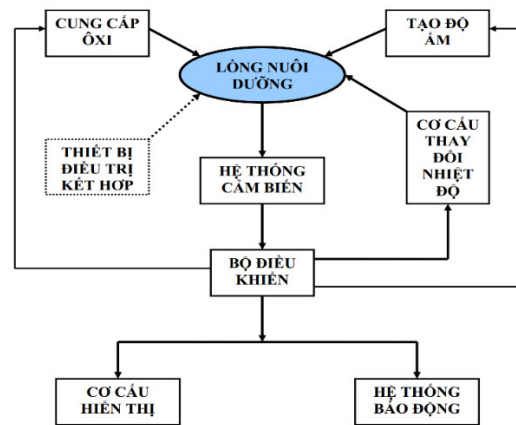
Khác với các nghiên cứu trước đây vốn chủ yếu tập trung vào điều khiển nhiệt độ hoặc xây dựng phần cứng giám sát, nghiên cứu này đề xuất một mô hình vật lý đa miền cho hệ thống lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh trong môi trường Simscape [10]. Mô hình không chỉ xét quá trình truyền nhiệt mà còn tích hợp đồng thời lưu thông khí, tạo ẩm và ảnh hưởng nhiệt - ẩm từ trẻ sơ sinh trong cùng một cấu trúc mô phỏng thống nhất. Toàn bộ hệ thống được đóng gói dưới dạng khối Carestation Model Mask nhằm hỗ trợ tái sử dụng và thuận tiện cho việc phát triển, kiểm thử các chiến lược điều khiển khác nhau, được trình bày trong Mục 2. Trên cơ sở mô hình đã xây dựng, bài báo tiến hành nhận dạng động học hệ thống và thiết kế các bộ điều khiển PI/P để đánh giá khả năng duy trì ổn định nhiệt độ và độ ẩm trong nhiều điều kiện vận hành khác nhau, nội dung được trình bày trong Mục 3. Các kết quả mô phỏng và phân tích được trình bày trong Mục 4. Điểm khác biệt chính của nghiên cứu là xây dựng được mô hình đa miền có xét đồng thời các quá trình nhiệt - ẩm - lưu thông khí và tải nhiệt từ trẻ sơ sinh trong cùng môi trường Simscape, phục vụ hiệu quả cho việc thiết kế và kiểm thử thuật toán điều khiển trước khi triển khai trên hệ thống thực tế.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

2.1. Nguyên lý hoạt động của lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh

Hệ thống lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh (LNDTSS) được thiết kế để tạo môi trường vi khí hậu ổn định, đáp ứng nhu cầu sinh lý của trẻ sơ sinh, đặc biệt là trẻ sinh non. Buồng ấp được chế tạo từ vật liệu thủy tinh hữu cơ trong suốt, không mùi, có khả năng cách nhiệt và chịu va đập tốt, đảm bảo môi trường kín và cách ly với không khí bên ngoài.

Hệ thống kiểm soát ba thông số chính: nhiệt độ (25 - 37°C, phổ biến 29 - 36°C), độ ẩm tương đối (40 - 85%), và nồng độ oxy, trong đó nhiệt độ là yếu tố ưu tiên với độ chính xác cao. Các thành phần chính bao gồm được mô tả trên hình 1.



Hình 1. Sơ đồ khối chung một lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh

Hệ thống tuần hoàn khí: Không khí được lọc qua màng vi sinh, lưu thông với lưu lượng ổn định khoảng 30 lít/phút nhờ quạt tích hợp, đảm bảo phân phối đều nhiệt và độ ẩm trong buồng ấp.

Điều khiển nhiệt độ: Phần tử gia nhiệt dạng sợi đốt, đặt dưới tấm nệm, được điều chỉnh công suất thông qua van bán dẫn dựa trên tín hiệu từ cảm biến nhiệt độ. Hệ thống hỗ trợ hai chế độ: điều khiển nhiệt độ không khí trong lồng hoặc giám sát thân nhiệt trẻ (36 - 39°C), với chế độ nhiệt độ không khí được sử dụng phổ biến hơn.

Điều khiển độ ẩm: Không khí nóng được dẫn qua buồng tạo ẩm chứa nước đun sôi, điều chỉnh độ ẩm thông qua thay đổi diện tích tiếp xúc khí khô và khí ẩm bằng van lưu lượng.

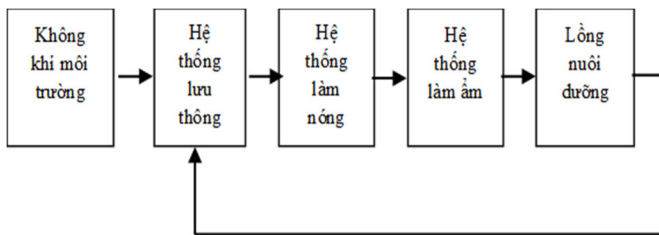
Điều khiển nồng độ oxy: Thực hiện thủ công thông qua van cơ học, dựa trên mối quan hệ giữa lưu lượng oxy và thể tích lồng.

Hệ thống cảnh báo: Tích hợp chức năng phát hiện và cảnh báo khi các thông số vượt ngưỡng an toàn (quá nhiệt, mất ẩm, thiếu oxy), đảm bảo xử lý kịp thời các sự cố.

Hệ thống LNDTSS đảm bảo điều kiện môi trường tối ưu, hỗ trợ ngăn ngừa mất nước qua da, khô da, và các nguy cơ sinh lý khác, từ đó nâng cao hiệu quả chăm sóc trẻ sơ sinh trong thực hành lâm sàng.

2.2. Xây dựng mô hình mô phỏng trong Simscape

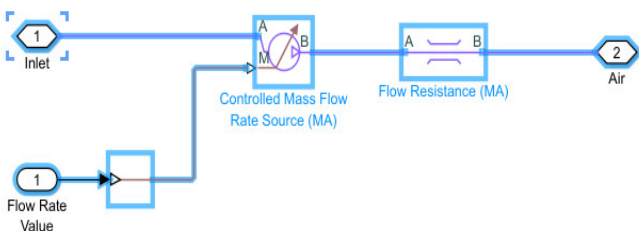
Mô hình lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh (LNDTSS) được xây dựng trong môi trường Simscape của MATLAB, sử dụng các khối mô phỏng quá trình vật lý như truyền nhiệt, độ ẩm, lưu thông khí và trao đổi nhiệt với môi trường. Việc mô hình hóa chi tiết giúp kiểm chứng thiết kế và hỗ trợ phát triển hệ thống điều khiển.



Hình 2. Sơ đồ khối đơn giản của lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh

Để đơn giản hóa, mô hình loại bỏ hệ thống cảnh báo, cung cấp oxy và cảm biến nhiệt độ da. Mô hình sau khi hoàn thiện được đóng gói dưới dạng một khối (mask) trong Simulink. Simscape Moist Air và Simscape Thermal là hai thư viện chính được sử dụng vì chúng cung cấp đầy đủ các phần tử cần thiết cho mô phỏng môi trường nhiệt ẩm. Sơ đồ khối đơn giản của LNDTSS được biểu diễn ở hình 2.

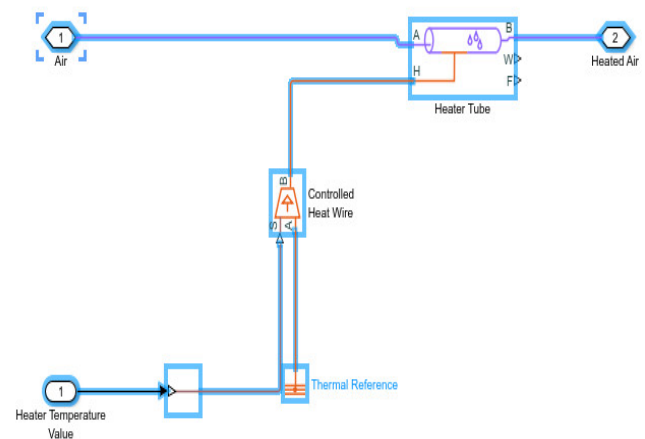
Hệ thống lưu thông không khí của lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh được trình bày trên hình 3. Không khí môi trường sau khi đi qua bộ lọc được duy trì ở lưu lượng gần như không đổi khoảng 30 lít/phút nhờ bơm khí tuần hoàn. Trong mô hình Simscape, hệ thống này được xây dựng bằng các khối Pump, Filter và Simulink-PS Converter. Khối Pump có chức năng duy trì lưu lượng ổn định bất chấp sự thay đổi áp suất trong hệ thống, trong khi khối Filter mô phỏng tổn thất áp suất thực tế do quá trình lọc không khí gây ra.



Hình 3. Mô hình hệ thống lưu thông không khí của LNDTSS trong Simscape

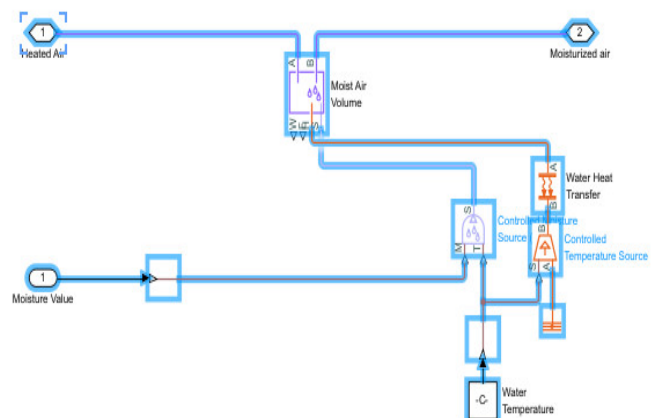
Hệ thống gia nhiệt không khí được mô tả trên hình 4. Không khí tuần hoàn được gia nhiệt thông qua phần tử điện trở nhiệt mô phỏng bằng khối Heater Wire đặt bên

trong ống dẫn Heater Tube. Công suất nhiệt cung cấp được điều chỉnh thông qua tín hiệu điều khiển đầu vào dưới dạng tín hiệu vật lý. Quá trình truyền nhiệt giữa sợi đốt và dòng khí phụ thuộc vào các tham số như chiều dài ống dẫn, độ dẫn nhiệt của vật liệu và hệ số trao đổi nhiệt đối lưu. Trong mô hình vật lý, không khí chuyển động bên trong đường ống tiếp xúc trực tiếp với phần tử gia nhiệt và nhận nhiệt thông qua cơ chế truyền nhiệt đối lưu. Cơ chế này được mô phỏng trong Simscape bằng các phần tử nhiệt và phần tử dòng khí tương ứng nhằm phản ánh đặc tính truyền nhiệt của hệ thống thực tế.



Hình 4. Mô hình hệ thống làm nóng không khí của LNDTSS trong Simscape

Hình 5 mô tả hệ thống tạo độ ẩm. Không khí sau khi gia nhiệt sẽ đi qua buồng tạo ẩm (Chamber) nối với Boiler. Độ ẩm cung cấp được điều chỉnh bằng tín hiệu điều khiển lưu lượng hơi nước, tương đương với việc điều khiển độ mở van. Nhiệt độ buồng ẩm chịu ảnh hưởng từ Boiler thông qua khâu truyền nhiệt. Các tham số như thể tích, tiết diện, nhiệt độ nước và độ ẩm được thiết lập trước mô phỏng.



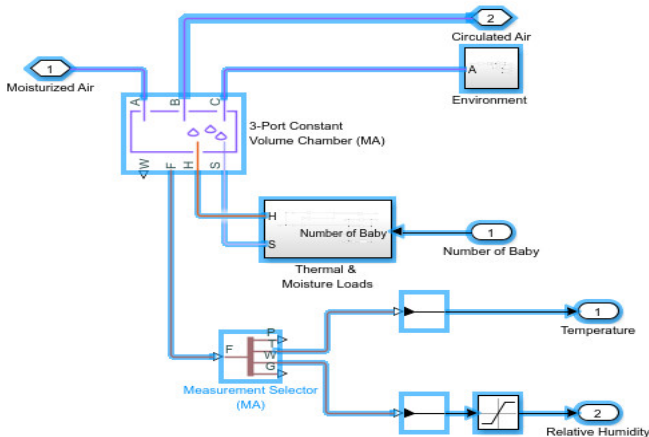
Hình 5. Mô hình hệ thống làm ẩm không khí của LNDTSS trong Simscape

Lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh (Incubator) được mô hình hóa như một không gian kín có xảy ra quá trình trao đổi

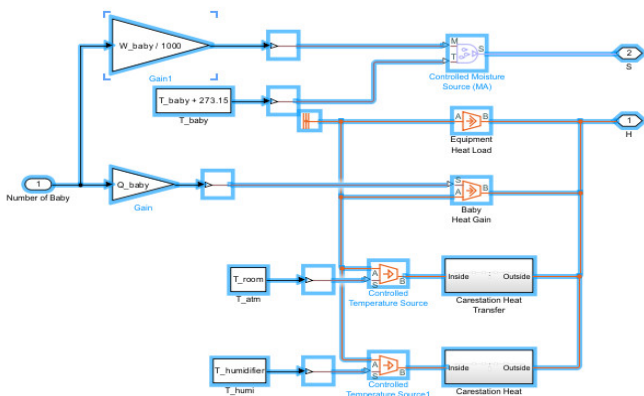
hiệt và trao đổi ẩm với môi trường xung quanh, đồng thời tích hợp các cảm biến đo nhiệt độ và độ ẩm phục vụ giám sát hệ thống. Mô hình xét đến các nguồn tác động chính bao gồm: tải nhiệt và tải ẩm do trẻ sơ sinh sinh ra, tổn thất nhiệt từ các thiết bị y tế, hiện tượng rò rỉ nhiệt - ẩm ra môi trường, cũng như ảnh hưởng của các điều kiện môi trường bên ngoài như nhiệt độ, áp suất và độ ẩm tương đối (hình 6).

Khối Thermal & Moisture Loads được sử dụng để mô phỏng các nguồn sinh nhiệt và sinh ẩm nội sinh trong lồng nuôi dưỡng, với giá trị phụ thuộc vào số lượng trẻ sơ sinh được thiết lập trong mô hình (hình 7). Quá trình rò rỉ nhiệt và ẩm ra môi trường được biểu diễn thông qua khối Leakage kết nối với khối Atmosphere, nơi thiết lập các điều kiện môi trường bên ngoài (hình 8).

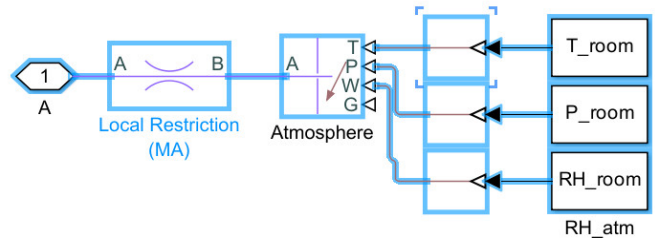
Quá trình trao đổi nhiệt và ẩm giữa môi trường bên trong lồng nuôi với môi trường xung quanh thông qua vỏ lồng và tấm nền được mô tả bằng các khối Atmosphere Heat Transfer và Water Heat Transfer. Các thông số vật lý như hệ số truyền nhiệt, diện tích trao đổi nhiệt, khối lượng và đặc tính vật liệu được cấu hình trước nhằm phản ánh gần đúng đặc tính thực tế của hệ thống.



Hình 6. Mô hình lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh trong Simscape



Hình 7. Thermal & Moisture Loads

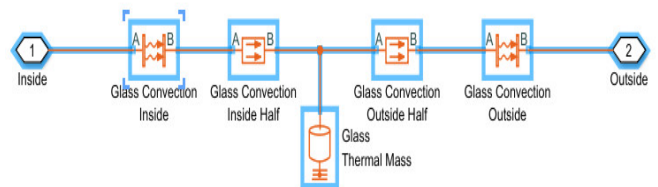


Hình 8. Environment Leakage

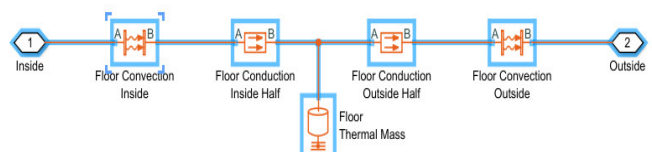
Các thông số liên quan đến độ ẩm hơi thở, nhiệt độ hơi thở và nhiệt lượng do trẻ sơ sinh sinh ra được đưa qua các khối khuếch đại nhằm thuận tiện cho quá trình hiệu chỉnh và mô phỏng. Các tín hiệu này sau đó được cấp vào các nguồn nhiệt và nguồn ẩm tương ứng như trình bày trên hình 9 và 10.

Các khối *Atmosphere Heat Transfer* và *Water Heat Transfer* được sử dụng để mô tả quá trình trao đổi nhiệt giữa môi trường bên trong lồng nuôi dưỡng và môi trường xung quanh thông qua cơ chế đối lưu của không khí ẩm. Nhiệt độ môi trường và nguồn hơi ẩm phía dưới lồng nuôi được biểu diễn bằng các nguồn nhiệt tương ứng và liên kết với các khối trao đổi nhiệt nói trên. Mô hình bên trong các khối này xác định chiều và mức độ truyền nhiệt giữa hệ thống và môi trường bên ngoài.

Các tham số vật lý như hệ số truyền nhiệt, hệ số đối lưu, đặc tính vật liệu của buồng nuôi dưỡng, cũng như kích thước và khối lượng của lồng kính và tấm nền được thiết lập trước khi tiến hành mô phỏng nhằm phản ánh gần đúng đặc tính của hệ thống thực tế.



Hình 9. Atmosphere Heat Transfer

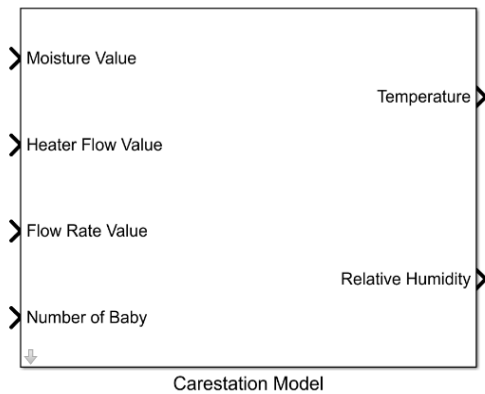


Hình 10. Water Heat Transfer

Toàn bộ mô hình được đóng gói trong Carestation Model Mask thể hiện trên hình 11.

Trong nghiên cứu này, môi trường bên ngoài lồng nuôi dưỡng được giả thiết ổn định với nhiệt độ môi trường 25°C và độ ẩm tương đối 60%, tương ứng với điều

kiện phòng điều hòa trong bệnh viện. Trẻ sơ sinh được mô hình hóa như một nguồn sinh nhiệt và sinh ẩm tập trung với công suất nhiệt và tốc độ thải ẩm không đổi trong quá trình mô phỏng. Các tham số lưu lượng khí, công suất gia nhiệt và đặc tính truyền nhiệt của thành lồng được lựa chọn dựa trên các thông số vận hành phổ biến của các hệ thống lồng nuôi dưỡng thương mại.



Hình 11. Carestation Model Mask

Mô hình hiện tại chủ yếu phục vụ mục đích nghiên cứu, đào tạo và phát triển thuật toán điều khiển trước khi triển khai trên thiết bị thực tế. Một số yếu tố như sự thay đổi thân nhiệt theo sinh lý trẻ, mở cửa lồng nuôi, nhiễu cảm biến và thay đổi điều kiện môi trường chưa được xét đến trong nghiên cứu này.

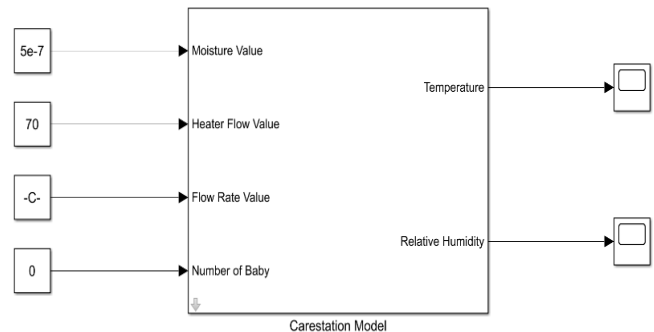
3. NHẬN DẠNG VÀ THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Trong thực tế, lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh (LNDTSS) được bật trước để đạt nhiệt độ và độ ẩm yêu cầu trước khi đặt trẻ vào. Do đó, quá trình nhận dạng hệ thống và thiết kế bộ điều khiển được tiến hành trong điều kiện không có trẻ. Bộ điều khiển sau đó được kiểm chứng bằng cách đặt giá trị "Number of Baby" thành 1 khi hệ thống ổn định, theo dõi sự biến đổi nhiệt độ và độ ẩm tương đối để đánh giá hiệu suất dựa trên tốc độ ổn định và biên độ biến thiên nằm trong giới hạn cho phép. Môi trường giả định không đổi, phù hợp với điều kiện phòng điều hòa thường dùng cho LNDTSS. Quá trình nhận dạng hệ thống được thực hiện để xác định hàm truyền đạt của nhiệt độ và độ ẩm trong lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh (LNDTSS). Các bước cụ thể bao gồm:

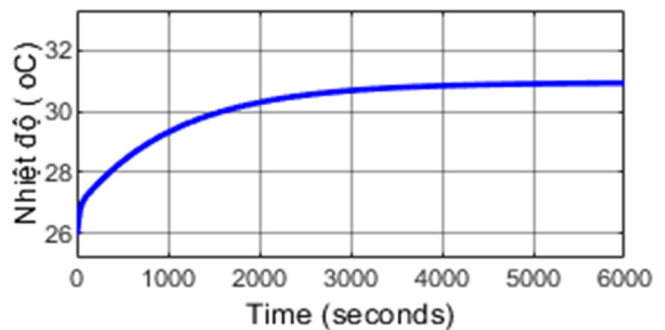
Bước 1. Thu thập dữ liệu mô phỏng

Mô hình Simscape được kích thích bằng đầu vào là tín hiệu bước (step input) cho lưu lượng nhiệt (Heater Flow Rate) và lưu lượng ẩm (Moisture Value), với giá trị lần lượt là 70 cho Heater Flow Rate và $5e^{-7}$ cho Moisture Value. Đáp ứng đầu ra tương ứng của hệ được thể hiện trên hình 13 và 14. Dữ liệu đầu ra gồm nhiệt độ và độ ẩm tương đối

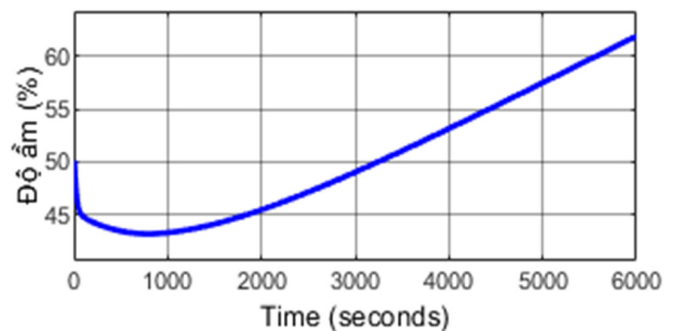
được ghi lại với tần số lấy mẫu 1Hz trong 10,000 giây. Sau khi thiết lập các tham số và giá trị cho mask, quá trình nhận dạng mô hình được tiến hành với tham số *Flow Rate Value* được đặt ở mức $0,5 \times 10^{-3}$.



Hình 12. Nhận dạng mô hình



Hình 13. Đáp ứng đầu ra nhiệt độ của mô hình Simscape



Hình 14. Đáp ứng đầu ra độ ẩm tương đối của mô hình Simscape

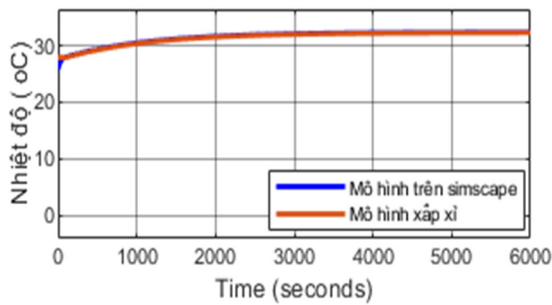
Từ đặc tính đáp ứng thu được, kênh nhiệt độ được xấp xỉ bởi mô hình quán tính bậc nhất có trễ, trong khi kênh độ ẩm được xấp xỉ bằng mô hình tích phân quán tính có trễ. Trên cơ sở phương pháp nhận dạng đáp ứng quá độ, các hàm truyền xấp xỉ của hệ được xác định như sau.

Hàm truyền xấp xỉ của kênh nhiệt độ được biểu diễn bởi:

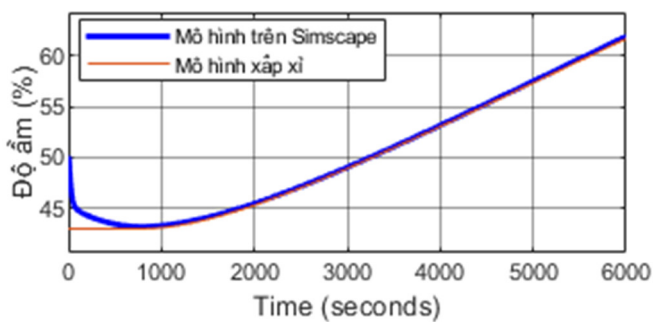
$$G_T = \frac{0,062714e^{-106s}}{1+1100s} \quad (1)$$

Trong khi đó, hàm truyền xấp xỉ của kênh độ ẩm tương đối được xác định như sau:

$$G_H = \frac{87,8e^{-775.469s}}{s(1+970s)} \quad (2)$$



Hình 15. So sánh đáp ứng nhiệt độ giữa mô hình Simscape và mô hình xấp xỉ



Hình 16. So sánh đáp ứng độ ẩm tương đối giữa mô hình Simscape và mô hình xấp xỉ

Kết quả so sánh cho thấy các mô hình hàm truyền xấp xỉ có khả năng phản ánh tương đối chính xác động học của hệ LNDTSS trong môi trường Simscape, do đó phù hợp cho mục đích thiết kế bộ điều khiển. Trong hình 15 và 16, đường màu xanh biểu diễn đáp ứng của mô hình Simscape, trong khi đường màu đỏ biểu diễn đáp ứng của mô hình hàm truyền xấp xỉ. Sai số trung bình bình phương (MSE) giữa đáp ứng mô hình Simscape và đáp ứng mô hình hàm truyền xấp xỉ là 0,15°C cho nhiệt độ và 1,2% cho độ ẩm, cho thấy độ chính xác chấp nhận được.

Bước 2. Thiết kế điều khiển

Trên cơ sở phương pháp Ziegler-Nichols, bộ điều khiển PI được thiết kế cho kênh nhiệt độ với các tham số $k_p = 25$, $k_i = 0,04009$.

Đối với kênh độ ẩm tương đối, bộ điều khiển P được áp dụng với hệ số khuếch đại $k_p = 1,085 \times 10^{-5}$ nhằm đảm bảo đáp ứng ổn định của hệ thống.

Đối với kênh độ ẩm tương đối, bộ điều khiển P được lựa chọn thay cho PI nhằm hạn chế hiện tượng dao động kéo dài do đặc tính tích phân và thời gian trễ lớn của hệ thống tạo ẩm. Trong giai đoạn nghiên cứu ban đầu, việc sử dụng bộ điều khiển P giúp hệ thống đạt đáp ứng ổn định với cấu trúc điều khiển đơn giản và dễ hiệu chỉnh.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

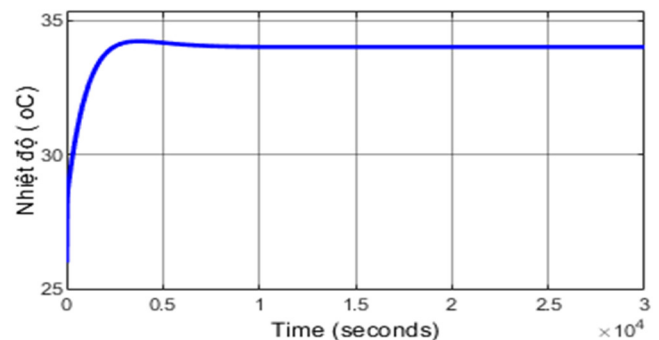
Quá trình mô phỏng được thực hiện trong môi trường MATLAB/Simulink sử dụng thư viện Simscape sau khi mô hình LNDTSS được xây dựng hoàn chỉnh. Mục tiêu mô phỏng nhằm kiểm chứng khả năng giữ ổn định nhiệt độ và độ ẩm bên trong lồng nuôi dưỡng trong các điều kiện vận hành khác nhau: không có tải (trẻ), có tải (trẻ), thay đổi giá trị đặt.

a) Mô hình không có trẻ sơ sinh ở trong lồng nuôi dưỡng

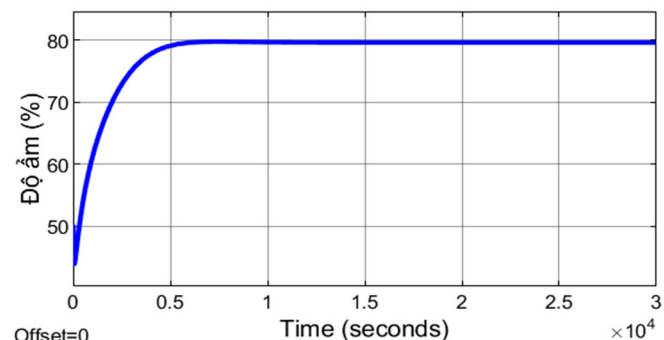
Khởi động hệ thống với giá trị đặt là $T_{sp} = 34^\circ\text{C}$ và $H_{sp} = 80\%$. Hệ thống được khởi tạo từ trạng thái ban đầu với nhiệt độ và độ ẩm môi trường trước khi tiến hành gia nhiệt và tạo ẩm đến giá trị đặt.

Kết quả mô phỏng không có trẻ cho thấy đáp ứng nhiệt độ trên hình 17 ổn định với thời gian xác lập khoảng 7500s, sai số tính bằng không. Độ quá điều chỉnh của nhiệt độ: khoảng 1°C , hệ thống nhanh chóng giảm dao động và ổn định.

Đáp ứng độ ẩm tương đối trên hình 18 tăng dần và đạt gần 80% với sai lệch tính khoảng 2 - 3% do bộ điều khiển P không loại bỏ sai lệch hoàn toàn.



Hình 17. Nhiệt độ trong LNDTSS khi không có trẻ

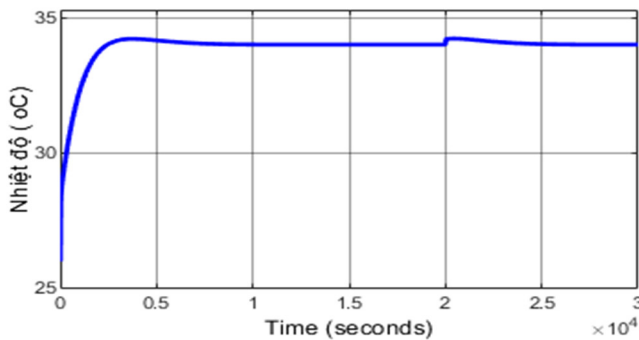


Hình 18. Độ ẩm tương đối trong LNDTSS khi không có trẻ

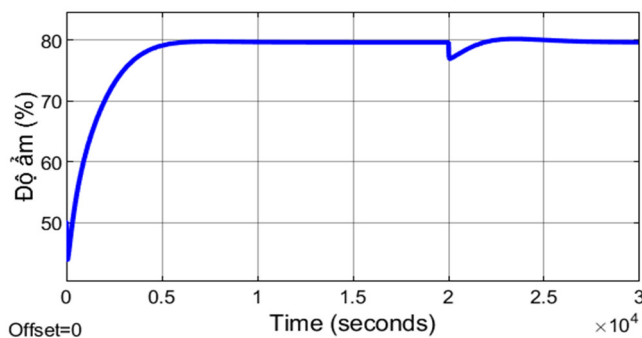
b) Mô hình có trẻ sơ sinh trong lồng nuôi dưỡng

Khi không khí trong lồng đã ổn định, ta đặt trẻ vào lồng nuôi dưỡng vào thời điểm 20000s. Giá trị đặt của

hiệt độ và độ ẩm vẫn là $T_{sp} = 34^{\circ}\text{C}$ và $H_{sp} = 80\%$. Ta có đáp ứng đầu ra của hệ thống như thể hiện trên hình 19 và 20.



Hình 19. Nhiệt độ trong LNDTSS khi đặt trẻ vào



Hình 20. Độ ẩm tương đối trong LNDTSS khi đặt trẻ vào

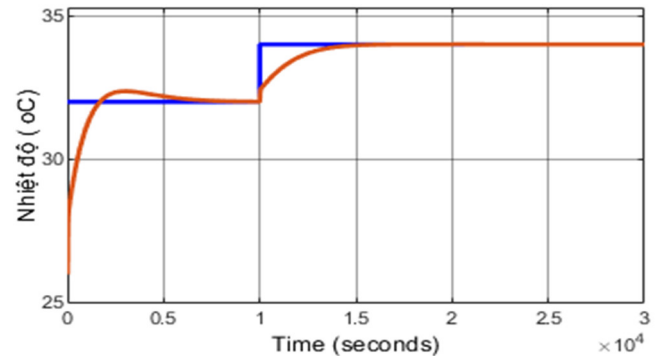
Khi trẻ được đặt vào lồng nuôi dưỡng, nhiệt độ và độ ẩm bên trong có xuất hiện sự biến đổi nhất định. Tuy nhiên, biên độ thay đổi của nhiệt độ trên hình 19 chỉ là chưa đến 1°C rồi phục hồi về 34°C . Đồng thời, hình 20 cho thấy độ ẩm giảm khoảng 3% do ảnh hưởng của hơi thở và quá trình trao đổi nhiệt của trẻ, sau đó cũng trở về giá trị đặt ban đầu. Kết quả này cho thấy quá trình nhận diện hệ thống và thiết kế bộ điều khiển trong trường hợp không có trẻ bên trong lồng nuôi dưỡng vẫn đảm bảo chất lượng điều khiển tốt và khả năng bù nhiễu hiệu quả.

c) Thay đổi giá trị đặt khi không có trẻ sơ sinh trong lồng nuôi dưỡng

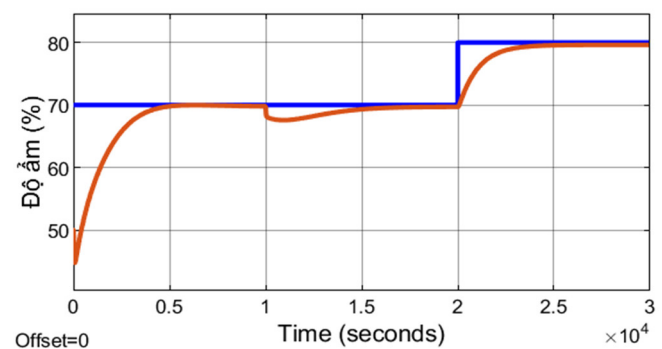
Hình 21 và 22 mô tả đáp ứng của hệ khi thay đổi giá trị đặt. Khi tăng nhiệt độ đặt từ 34°C lên 36°C , hệ đạt trạng thái ổn định mới sau khoảng 2.500s với sai lệch tĩnh bằng không, trong khi độ ẩm tương đối chỉ biến đổi nhẹ. Ngược lại, khi tăng độ ẩm đặt từ 70% lên 80%, hệ đạt giá trị mới sau khoảng 2.000s với sai số xác lập nhỏ hơn 2%, còn nhiệt độ gần như không thay đổi.

Kết quả mô phỏng cho thấy hai kênh nhiệt độ và độ ẩm không hoàn toàn độc lập mà tồn tại hiện tượng tương tác lẫn nhau. Trong đó, sự thay đổi nhiệt độ ảnh hưởng đáng kể đến độ ẩm tương đối do mối quan hệ giữa nhiệt

độ và khả năng chứa hơi nước của không khí, trong khi ảnh hưởng của thay đổi độ ẩm đến nhiệt độ là nhỏ hơn.

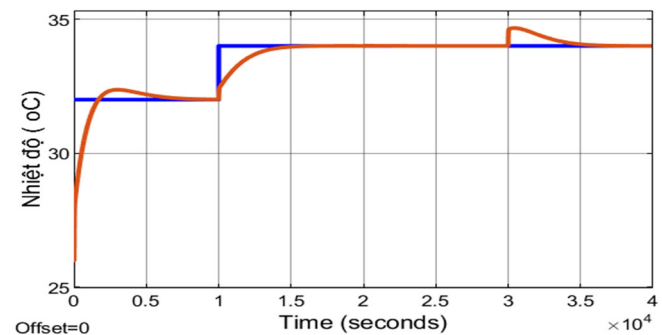


Hình 21. Nhiệt độ trong LNDTSS khi thay đổi giá trị đặt nhiệt độ

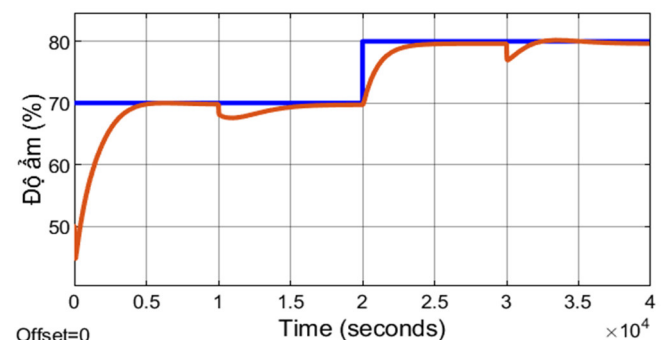


Hình 22. Độ ẩm tương đối trong LNDTSS khi thay đổi giá trị đặt nhiệt độ

d) Thay đổi giá trị đặt khi có trẻ sơ sinh trong lồng nuôi dưỡng



Hình 23. Nhiệt độ trong LNDTSS khi thay đổi giá trị đặt nhiệt độ



Hình 24. Độ ẩm trong LNDTSS khi thay đổi giá trị đặt nồng độ

Trong trường hợp này, trẻ sơ sinh được đưa vào lồng nuôi dưỡng tại thời điểm 3×10^4 s. Sau khi hệ ổn định, giá trị đặt nhiệt độ và độ ẩm được thay đổi để đánh giá khả năng thích nghi của hệ thống. Đáp ứng tương ứng của hệ thống được thể hiện trong hình 23 và 24.

Kết quả cho thấy nhiệt độ trong lồng nuôi dưỡng vẫn duy trì ổn định với độ quá điều chỉnh nhỏ và sai số xác lập thấp nhờ bộ điều khiển PI. Đồng thời, độ ẩm tương đối có thể bám theo giá trị đặt mới với thời gian xác lập phù hợp, tuy nhiên vẫn tồn tại sai lệch tĩnh nhỏ do sử dụng bộ điều khiển P và do mô hình chưa xét đầy đủ các yếu tố thực tế. Sai lệch này có thể được cải thiện trong các nghiên cứu tiếp theo bằng cách sử dụng bộ điều khiển PI hoặc PID cho kênh độ ẩm.

Những kết quả mô phỏng này cho thấy mô hình Simscape đã xây dựng có khả năng phản ánh hợp lý động học nhiệt - ẩm của hệ thống LNDTSS, đồng thời tạo cơ sở cho việc nghiên cứu và phát triển các chiến lược điều khiển nâng cao trong tương lai.

Các chỉ tiêu đánh giá chất lượng điều khiển của hệ thống được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Các chỉ tiêu đánh giá chất lượng điều khiển với các kịch bản khác nhau

Kịch bản mô phỏng	Đại lượng đánh giá	Giá trị đặt	Sai số xác lập	Thời gian xác lập	Độ quá điều chỉnh
Không có trẻ trong lồng nuôi dưỡng	Nhiệt độ	34°C	0°C	≈ 7500 s	$\approx 1^\circ\text{C}$ ($\approx 2,9\%$)
Không có trẻ trong lồng nuôi dưỡng	Độ ẩm tương đối	80%	$\approx 2 - 3\%$	≈ 8000 s	Không đáng kể
Đưa trẻ vào lồng tại $t = 20000$ s	Nhiệt độ	34°C	0°C	≈ 2000 s sau nhiễu	Không đáng kể
Đưa trẻ vào lồng tại $t = 20000$ s	Độ ẩm tương đối	80%	$\approx 2\%$	≈ 2500 s sau nhiễu	Không đáng kể
Thay đổi giá trị đặt nhiệt độ (34°C $\rightarrow$ 36°C)	Nhiệt độ	36°C	0°C	≈ 2500 s	$\approx 0,8^\circ\text{C}$ ($\approx 2,2\%$)
Thay đổi giá trị đặt nhiệt độ (34°C $\rightarrow$ 36°C)	Độ ẩm tương đối	80%	$< 2\%$	≈ 2000 s	Không đáng kể

Thay đổi giá trị đặt độ ẩm (70% $\rightarrow$ 80%)	Nhiệt độ	34°C	$< 0,2^\circ\text{C}$	—	Không đáng kể
Thay đổi giá trị đặt độ ẩm (70% $\rightarrow$ 80%)	Độ ẩm tương đối	80%	$\approx 1 - 2\%$	< 2000 s	Không đáng kể
Có trẻ và thay đổi giá trị đặt	Nhiệt độ	36°C	0°C	≈ 3000 s	$\approx 1^\circ\text{C}$
Có trẻ và thay đổi giá trị đặt	Độ ẩm tương đối	80%	$\approx 2\%$	≈ 2500 s	Không đáng kể

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình vật lý của hệ thống lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh (LNDTSS) bằng thư viện Simscape trong MATLAB/Simulink, mô phỏng toàn diện các quá trình truyền nhiệt, tạo ẩm, lưu thông khí và tương tác với trẻ và môi trường. Các bộ điều khiển PI (nhiệt độ) và P (độ ẩm) được áp dụng giúp duy trì điều kiện môi trường ổn định trong lồng.

Kết quả mô phỏng trên nhiều kịch bản khác nhau cho thấy hệ thống có khả năng phản ứng tốt, sai số nhỏ, phản ánh đúng đặc điểm động học thực tế như trễ, tích phân và tương tác phi tuyến. Mô hình có thể được sử dụng làm nền tảng cho nghiên cứu các thuật toán điều khiển nâng cao và kiểm thử thuật toán trước khi triển khai trên hệ thống thực tế.

Tuy nhiên, mô hình còn phụ thuộc vào tham số đặt trước và bộ điều khiển độ ẩm chưa triệt tiêu hoàn toàn sai số tĩnh. Hướng phát triển tiếp theo gồm nâng cấp điều khiển độ ẩm (PI/PID), tích hợp điều khiển nồng độ oxy và xây dựng mô hình thích nghi thực tế hơn, nhằm tăng độ tin cậy và hiệu quả trong chăm sóc lâm sàng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. World Health Organization, *Optimal feeding of low birth-weight infants in low- and middle-income countries*. Geneva, Switzerland: WHO, 2011.
- [2]. Tisa T.A., Z.A. Nisha, M.A. Kiber, "Design of an enhanced temperature control system for neonatal incubator," *Bangladesh Journal of Medical Physics*, 5(1), 53-61, 2012.
- [3]. Pinto J.A.D., E.Á. Córdova, C.B.C. Lévano, "Design and implementation of a digital PID temperature controller for neonatal incubator ESVIN," *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 5(3), 141-147, 2015.
- [4]. Kholiq A., Lamidi, "Analysis of temperature sensors with proportional and derivative controls applied to infant incubators," *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, 55, 216-225, 2022.

[5]. Kholiq A., Lamidi F. Amrinsani, T. Triwiyanto, H.A. Mahdy, R. Nazila, V. Abdullayev, "Development of adaptive PD control for infant incubator using fuzzy logic," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 5(3), 756-765, 2024.

[6]. Raju K.C.N., A. Sri Venkat, K.J.S. Syamala, P.N. Kiran, M.V.N.B.V.S. Sai, "Smart infant incubator monitoring and control system using IoT," *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 12(2), d786-d791, 2024.

[7]. Nguyễn Văn Quang, "Thiết kế hệ thống điều khiển nhiệt độ trong lồng ấp trẻ sơ sinh," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Thái Nguyên*, 146(10), 45-50, 2016.

[8]. Nguyễn Thu Hà, Đinh Thị Lan Anh, "Xây dựng hệ thống điều khiển và giám sát lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh bằng smartphone," *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, FEE, 23-29, 2019.

[9]. Nguyễn Thu Hà, "Hệ thống điều khiển vi khí hậu trong lồng nuôi dưỡng trẻ sơ sinh," *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, ACMEC, 150-157, 2017.

[10]. MathWorks, 2023. *Simscape Documentation*. Natick, MA, USA: The MathWorks, Inc.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Thu Ha¹, Dinh Thi Lan Anh¹, Nguyen Duc Quang²

¹School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

²School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam