

NGHIÊN CỨU CẢI TIẾN THIẾT KẾ SILO CHỨA NÔNG SẢN ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ BẢO QUẢN LẠNH

A STUDY ON IMPROVED DESIGN OF AGRICULTURAL STORAGE CONTAINERS FOR COLD STORAGE

Vũ Viết Toàn¹, Lê Thanh Sơn⁴, Phan Hoàng Long^{1, 2, 3}, Nguyễn Tấn Tiến^{1, 2, 3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Công ty Cổ phần Cơ khí Chế tạo máy Long An

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quá trình thiết kế và đánh giá silo chứa nông sản tích hợp hệ thống làm lạnh và giám sát từ xa. Trên cơ sở mô hình toán mô tả động học nhiệt bên trong thùng, bộ điều khiển PID được thiết kế để duy trì nhiệt độ tối ưu, đồng thời hệ thống cảm biến và giám sát IoT giúp kiểm soát vận hành hiệu quả. Kết quả mô phỏng và triển khai thực tế cho thấy tính khả thi và hiệu quả của giải pháp này.

Từ khóa: Bảo quản lạnh; Silo chứa nông sản; Giám sát từ xa.

ABSTRACT

The paper presents the design and evaluation of an agricultural storage container integrated with a cooling system and remote monitoring capabilities. Based on a mathematical model describing the thermal dynamics inside the container, a PID controller is designed to maintain optimal temperature, while a sensor network and IoT-based monitoring system enable efficient operational control. Simulation and practical implementation results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed solution.

Keywords: Cold storage; Agricultural storage container; Remote monitoring.



1. TỔNG QUAN

Việt Nam là quốc gia nông nghiệp với sản lượng lúa gạo lớn hàng đầu thế giới. Tuy nhiên, tổn thất sau thu hoạch vẫn còn cao, đặc biệt trong giai đoạn bảo quản. Nguyên nhân chủ yếu đến từ điều kiện bảo quản chưa tối ưu như độ ẩm cao, nhiệt độ không kiểm soát và sự xâm nhập của côn trùng, nấm mốc.

Trong số các phương pháp bảo quản hiện nay (bảo quản khô, thông thoáng, kín, hóa chất, lạnh), phương pháp bảo quản lạnh được đánh giá là hiệu quả nhất để duy trì chất lượng nông sản trong thời gian dài. Phương pháp này làm chậm quá trình sinh lý của hạt, hạn chế sự phát triển của vi sinh vật và côn trùng, đồng thời bảo toàn giá trị dinh dưỡng của nông sản. Tuy nhiên, nhược điểm là chi phí đầu tư cao và cần hệ thống điều khiển chính xác, ổn định.

Việc ứng dụng bảo quản lạnh còn gặp nhiều rào cản, đặc biệt là hệ thống silo chứa chưa được tối ưu để phù hợp với đặc tính nhiệt động học của khối hạt. Ngoài ra, hệ thống làm lạnh hiện tại chủ yếu dựa vào luồng khí lạnh trung tâm, dẫn đến phân bố nhiệt không đều, gây nên các điểm nóng (hot spots), ảnh hưởng đến chất lượng toàn khối.

Trong bối cảnh đó, bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu, thiết kế và đánh giá một mô hình silo chứa cải tiến, tích hợp: Hệ thống phân phối khí lạnh có kênh phụ để đảm bảo phân bố nhiệt đều; Bộ điều khiển PID ổn định nhiệt độ dựa trên mô hình toán học động học nhiệt; và Hệ thống giám sát từ xa tích hợp IoT cho phép theo dõi liên tục và điều chỉnh kịp thời.

Giải pháp đề xuất không chỉ cải thiện điều kiện bảo quản, mà còn hướng đến tối ưu

hóa vận hành và tiết kiệm năng lượng, góp phần xây dựng hệ thống bảo quản nông sản hiện đại, hiệu quả và bền vững hơn tại Việt Nam.

2. LÝ THUYẾT SILO CHỨA LẠNH

2.1. Thiết kế cơ học và cách nhiệt

Tải trọng thùng xác định theo lý thuyết silo Janssen: Áp suất đáy và bên.

$$p_{\text{đáy}} = \frac{s\gamma}{4K} \left(1 - e^{-\frac{4Kx}{s}} \right) \quad (1)$$

Với: $p_{\text{đáy}}$ – Áp lực lên đáy thùng, kPa; s – Chiều cao lớp hạt trong thùng, m; K – Hệ số áp lực ngang; γ – Khối lượng riêng của hạt, N/m³; x – Vị trí tính toán áp lực, m.

$$p_{\text{bên}} = 0.75p_{\text{đáy}} < p_{\text{đáy}} \quad (2)$$

Với: $p_{\text{bên}}$ – Áp lực lên vách thùng, kPa.

Lấy giá trị áp suất tại đáy, tiến hành lựa chọn bề dày thùng:

$$\sigma = \frac{[s]p_{\text{đáy}}a}{t_{\text{đáy}}} \rightarrow t_{\text{bên}} = \frac{[s]p_{\text{đáy}}a}{\sigma} \quad (3)$$

Với: σ – Ứng suất cho phép, MPa; $t_{\text{bên}}$ – Bề dày thiết kế, m; $[s]$ – Hệ số an toàn chung.

Bề dày thùng cần đảm bảo cả yêu cầu bền cơ học và hạn chế thất thoát nhiệt. Đối với yếu tố cách nhiệt, bề dày của silo chứa được xác định:

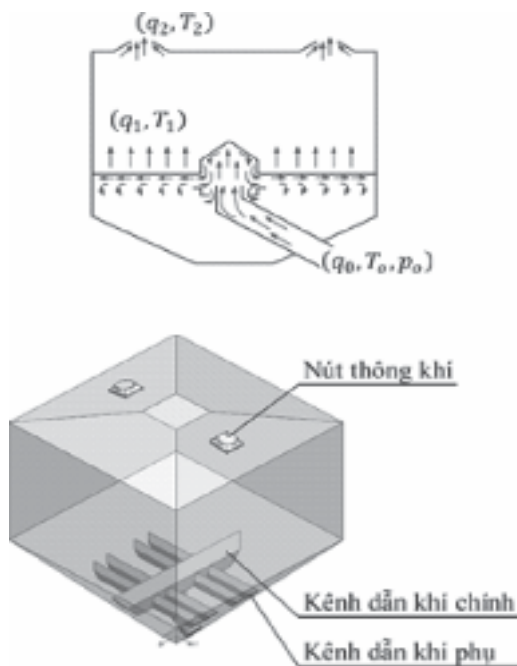
$$Q = \frac{A\Delta TK}{t_{\text{nhiệt}}} \rightarrow t_{\text{nhiệt}} = \frac{A\Delta TK}{Q} \quad (4)$$

Với: A – Diện tích bề mặt thùng, m²; ΔT – Chênh lệch nhiệt độ, °C; K – Hằng số dẫn nhiệt, W/m.K.

Bổ sung lớp cách nhiệt ngoài đảm bảo nhiệt độ bên trong ổn định.

2.2. Hệ thống dẫn khí lạnh

Silo chứa được thiết kế với hệ thống thông gió cưỡng bức, tích hợp tạo khí lạnh, dẫn qua các ống và kênh khí giúp phân phối đều không khí bên trong. Sơ đồ nguyên lý của silo chứa có hệ thống phân khối khí có kênh dẫn như sau:



Hình 1. Hệ thống phân phối khí

Các kênh dẫn khí giải quyết hai vấn đề:

1) Phân phối đồng đều luồng không khí:

Không khí lạnh được đưa vào silo chứa qua một kênh dẫn chính. Việc thêm các kênh phụ giúp chia nhỏ và hướng dòng không khí đến các vùng khác nhau của silo chứa, nhờ đó phân phối đồng đều luồng không khí giúp giảm thiểu các “điểm nóng” (hot spots) và “điểm lạnh” (cold spots), đảm bảo toàn bộ khối hạt

được làm mát đồng đều, từ đó hạn chế sự phát triển của vi sinh vật và côn trùng.

2) Giảm áp lực đối kháng:

Khi chỉ có một kênh dẫn chính, áp lực đối kháng (trở lực) trong khối hạt sẽ rất cao do không khí phải di chuyển qua một lượng lớn hạt. Các kênh dẫn phụ giúp giảm áp lực này bằng cách phân chia luồng không khí thành nhiều phần nhỏ hơn, mỗi phần di chuyển qua một phần của khối hạt với lực cản ít hơn. Việc này giúp giảm áp lực đối kháng giúp tăng hiệu quả của hệ thống làm mát, giảm công suất cần thiết của quạt và máy lạnh, từ đó tiết kiệm năng lượng và chi phí vận hành.

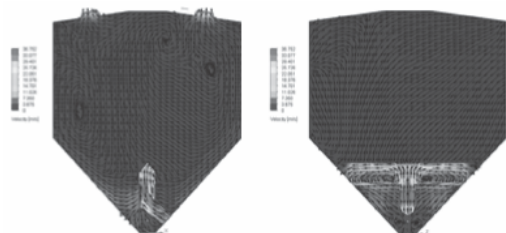
Chọn loại nguồn cấp khí lạnh dựa vào áp lực [2]:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{aV_{bm}^2}{\ln(1 + bV_m)} \quad (5)$$

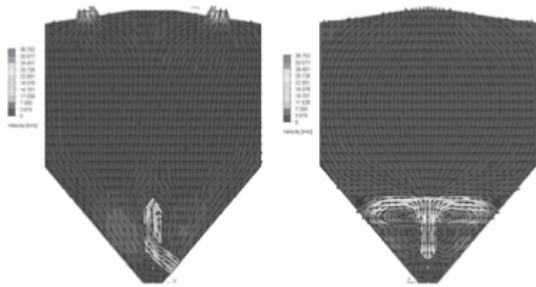
Với: ΔP – Áp suất tĩnh của khối hạt, Pa;
 h – Chiều cao khối hạt, m; V_{bm} – Lưu lượng không khí qua 1 m²; a, b – Chọn theo dạng hạt bảo quản.

3. MÔ PHỎNG THÔNG KHÍ CÓ KÊNH PHỤ

Mô phỏng được tiến hành để khảo sát các việc thông khí trong hai trường hợp không có và có kênh thông khí phụ đề xuất như trên với cùng một điều kiện biên cho kết quả như sau:



a. Chỉ có kênh dẫn khí chính



b. Có kênh dẫn khí phụ
Hình 2. Hệ thống phân phối khí

Kết quả mô phỏng CFD cho cả hai mô hình cho thấy ở mô hình có kênh dẫn phụ, luồng khí được phân bố đều hơn. Vận tốc trong kênh chính được chia đều vào các kênh nhỏ, giúp khí lưu thông đều và hướng từ dưới lên đến điểm thoát hơi phía trên. Ở mô hình chỉ có kênh dẫn khí chính, xuất hiện hiện tượng xoáy khí và áp lực trong ống chính tăng cao do vận tốc lớn hơn nhiều so với mô hình có kênh phụ. Hai mô hình, có/không có kênh phụ, chứng minh luồng khí trong mô hình có kênh phụ phân bố đều hơn, ít xoáy khí, hiệu quả làm lạnh cao hơn.

Do đó, việc thiết kế kênh phụ giúp phân phối đồng đều luồng khí, tránh “điểm nóng/lạnh” và giảm áp lực kháng, từ đó giảm công suất quạt.

4. ĐIỀU KHIỂN VÀ GIÁM SÁT

1) Bộ điều khiển

Mô hình cân bằng nhiệt giữa hạt và không khí được thiết lập trong từng thể tích kiểm soát. Ba quá trình truyền nhiệt chính được xem xét:

- Đối lưu giữa không khí và lớp hạt: Giúp duy trì nhiệt độ đồng đều trong khối hạt.
- Đối lưu giữa không khí và tường silo chứa: Ảnh hưởng đến hiệu quả làm mát bên trong thùng.

- Dẫn nhiệt qua tường silo chứa: Làm thay đổi nhiệt độ không khí bên trong do chênh lệch với môi trường ngoài.

Định luật thứ nhất của nhiệt động lực học được áp dụng để bảo toàn nội năng toàn hệ [4], [5]:

$$\Delta U = \Delta Q - W \quad (6)$$

Với: ΔU – Thay đổi nội năng của hệ;
 Q – Nhiệt lượng tham gia vào hệ; W – Công suất được tạo ra từ hệ.

Phương trình trạng thái của hệ được thiết lập ở dạng:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + Bu + DT_w + E \quad (7)$$

$$y = C \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

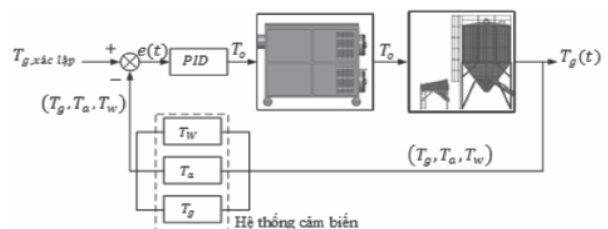
Với: $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{13} & a_{14} \end{bmatrix}$

$$a_{11} = \frac{-h_{ca,g}A_g}{m_g C_g} = a_{12}$$

$$a_{13} = \frac{-h_{ca,g}A_g}{\rho_a V_a C_a}$$

$$a_{14} = \frac{-q_o}{\rho_a V_a} - \frac{h_{ca,g}A_g}{\rho_a V_a C_a} - \frac{h_{ca,w}A_w}{\rho_a V_a C_a}$$

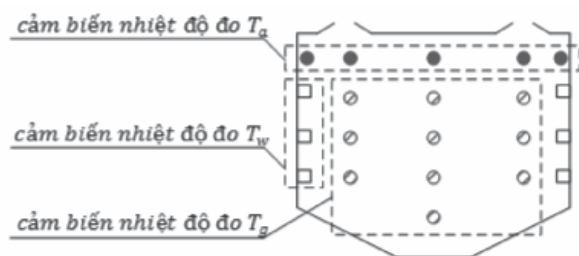
Trên cơ sở phương trình (6), sử dụng bộ điều khiển PID thông dụng, ta có sơ đồ khối điều khiển sau:



Hình 3. Hệ điều khiển nhiệt độ silo chứa

2) Bố trí cảm biến

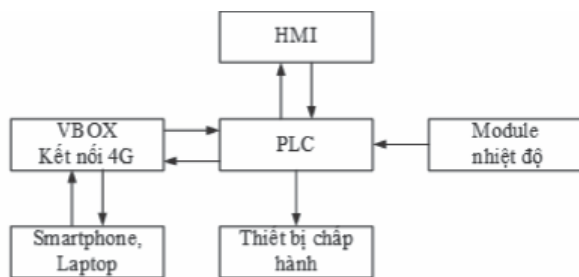
Cảm biến nhiệt độ được bố trí tại các vị trí: cửa vào/ra khí lạnh, các độ cao khác nhau trong thùng và gần tường, nhằm giám sát hiệu quả làm mát, phân bố nhiệt độ theo chiều cao và ảnh hưởng từ môi trường ngoài. Cảm biến có dải đo $0 \div 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, đảm bảo độ chính xác cao trong vùng làm việc $0 \div 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ của môi trường bảo quản.



Hình 4. Bố trí cảm biến

3) Giám sát

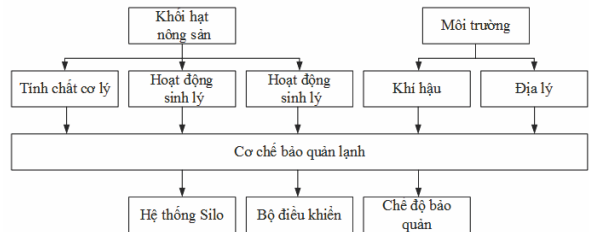
Hệ thống giám sát từ xa sử dụng thiết bị thông minh và kết nối 4G để theo dõi, lưu trữ và phân tích nhiệt độ, giúp quản lý linh hoạt và hiệu quả.



Hình 5. Sơ đồ khối hệ thống giám sát

Chất lượng bảo quản phụ thuộc vào nhiều yếu tố liên quan đến môi trường xung quanh và đặc tính của khối hạt. Trong đó, ẩm độ khối hạt, ẩm độ tương đối của không khí, nhiệt độ trong khối hạt và nhiệt độ môi trường, cùng kỹ thuật thông thoáng đóng vai trò quyết định trong việc tạo ra môi trường tiêu khí hậu

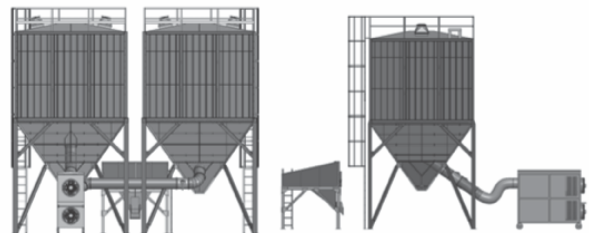
bên trong thùng bảo quản. Nghiên cứu mối quan hệ giữa môi trường bảo quản và đặc tính của nông sản là cơ sở để xác định công nghệ bảo quản, thiết bị và chế độ vận hành bảo quản tối ưu.



Hình 6. Đề xuất mô hình bảo quản có giám sát

5. KẾT QUẢ

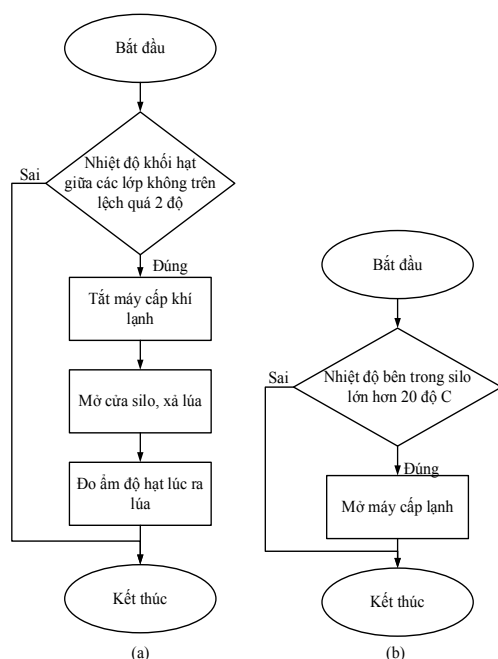
Đề xuất mô hình thiết kế silo chứa như sau:



Hình 7. Mô hình thiết kế

Để bảo quản hạt với mức hao hụt tối thiểu và duy trì chất lượng cũng như hiệu quả kinh tế, cần phải hiểu rõ các đặc tính của khối hạt và các quá trình diễn ra trong đó. Nghiên cứu này nhằm xác định những yếu tố đó, qua đó đưa ra các biện pháp bảo quản tốt nhất.





Hình 8. Lưu đồ giải thuật áp dụng cho lúa: a. Quy trình đo đặc kiểm tra mỗi 6 tháng; b. Quy trình nhắc lạnh khi vướng điều kiện nhiệt

Ở nhiệt độ $25 \div 35^\circ\text{C}$, hoạt động sống của hạt thường xuyên diễn ra, đồng thời thúc đẩy sự phát triển của côn trùng và nấm mốc. Bảo quản lạnh khối hạt ngăn chặn điều này dựa trên điều kiện nhiệt độ. Nếu nhiệt độ của lớp trên gần mặt thoáng lớn hơn nhiệt độ của lớp dưới 2°C , sẽ thực hiện làm lạnh. Nhiệt độ bảo quản trung bình của toàn khối hạt dự kiến duy trì trong khoảng $25 \div 35^\circ\text{C}$.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất và triển khai thành công mô hình silo chứa tích hợp hệ thống bảo quản lạnh và giám sát từ xa. Giải pháp mang lại hiệu quả trong kiểm soát nhiệt độ, tiết kiệm năng lượng và nâng cao chất lượng nông sản.

Định hướng tiếp theo: Tích hợp trí tuệ nhân tạo và học máy cho điều khiển tối ưu; và

Mở rộng áp dụng với các loại nông sản và môi trường khác nhau.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 08/7/2025

Ngày phản biện: 22/7/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. T. De Bruin, S. Navarro, P. Villers, and A. Wagh, "Worldwide use of hermetic storage for the preservation of agriculture product", 2012.
- [2]. M. Sperl, "Experiments on corn pressure in silo cells". Granul Matter, vol. 8, no. 2, pp. 59-65, May 2006, doi: 10.1007/s10035-005-0224-z.
- [3]. Z. Zhang, "A Review of Silo Temperature Field Studies". Adv Res, vol. 25, no. 1, pp. 26-35, Jan. 2024, doi: 10.9734/air/2024/v25i11015.
- [4]. F. Pfeiffer and H. Bremer, "The Art of Modeling Mechanical Systems", 2018. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/76>
- [5]. M. A. Daviess and T. L. Schmitz, "System Dynamics for Mechanical Engineers", 2021.