

## Đề xuất bộ điều khiển tối ưu phi tập trung cho các quá trình lên men chè đen

Đào Huy Du<sup>1</sup>, Phạm Thanh Bình<sup>2\*</sup>, Lại Khắc Lãi<sup>1</sup>, Tăng Cẩm Nhung<sup>1</sup>, Hồ Mậu Việt<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái nguyên, TP Thái Nguyên, Thái Nguyên, Việt Nam;

<sup>2</sup>Viện Khoa học kỹ thuật nông lâm nghiệp miền núi phía Bắc, Thị xã Phú Thọ, Tỉnh Phú Thọ, Việt Nam;

<sup>3</sup>Trường Đại học Công nghệ thông tin và truyền thông, Đại học Thái nguyên, TP Thái Nguyên, Thái Nguyên, Việt Nam.

\*Email: binh.nomafsi@gmail.com

Nhận bài: 20/11/2023; Hoàn thiện: 04/01/2024; Chấp nhận đăng: 05/01/2024; Xuất bản: 25/02/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.93.2024.30-37>

### TÓM TẮT

Hiện nay, chè đen vẫn giữ một vị thế quan trọng trong thị trường đồ uống toàn cầu và mang lại nhiều lợi ích cho sức khỏe và văn hóa. Do vậy, kiểm soát chất lượng chè đen là vấn đề cần được quan tâm. Trong bài báo này, tác giả đã đề xuất thuật toán điều khiển tối ưu phi tập trung cho hệ thống lên men chè đen, dựa trên việc điều chỉnh các tham số nhiệt độ và độ ẩm trong từng giai đoạn ảnh hưởng đến chất lượng chè đen. Quá trình thay đổi màu sắc của chè theo thời gian khi bị tác động bởi nhiệt độ và độ ẩm, màu sắc của chè đen được nhận dạng qua việc phân tích hình ảnh tại thời điểm đột ngột thay đổi màu sắc. Vấn đề điều tiết độ ẩm và nhiệt độ từ hệ thống cấp ẩm cần được điều tiết từ các van điện từ. Tác giả mô hình hóa mối quan hệ tương tác giữa các van điện từ dựa trên lý thuyết đồ thị, và thuật toán tối ưu lưu lượng hơi ẩm qua van điện từ. Kết quả đã đề xuất được một định lý và một thuật toán. Các kết quả đã được chứng minh đúng đắn bằng toán học và mô phỏng qua đó đảm bảo được yêu cầu điều khiển theo yêu cầu đảm bảo chất lượng của chè đen.

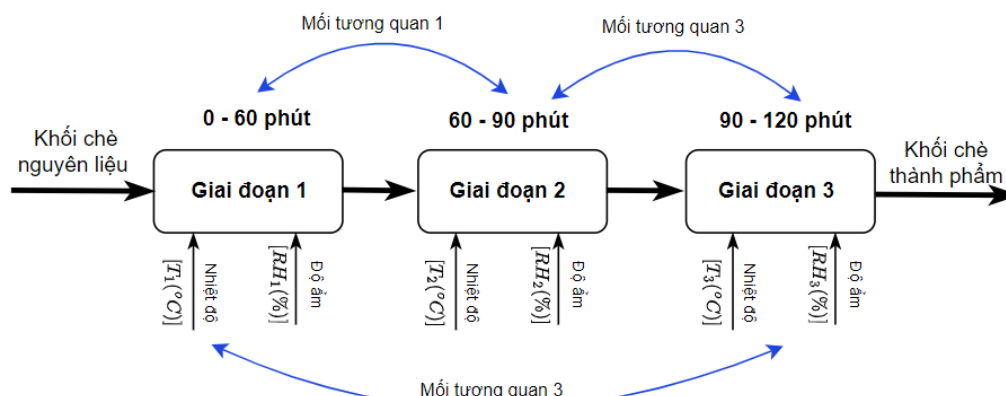
**Từ khóa:** Chè đen; Tối ưu; Nhiệt độ; Độ ẩm; Màu sắc; Phi tập trung.

### 1. MỞ ĐẦU

Vấn đề ổn định nhiệt độ và độ ẩm trong mỗi giai đoạn dựa trên cực tiểu hóa sai lệch màu sắc giữa ảnh mẫu và màu sắc của khối chè tại thời điểm nhận dạng hình ảnh [1] trong quá trình lên men chè đen là rất quan trọng và ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm chè đen. Nhiệt độ và độ ẩm [2] chè bán thành phần trong quá trình lên men có quan hệ chặt chẽ với nhau, chúng quyết định đến màu sắc và chất lượng của chè, việc điều chỉnh riêng nhiệt độ và độ ẩm là rất khó. Vì vậy, không chế độ ẩm theo màu sắc chè được lựa chọn. Các nghiên cứu dựa trên lý thuyết đồ thị, và thuật toán tối ưu lưu lượng hơi ẩm để điều khiển hệ thống [3-5]. Thực tế, hầu hết các hệ thống điều khiển đang có được chia ra thành 2 phần: Phần 1 là kiểm soát nhiệt độ và độ ẩm trong giai đoạn 1 và 2. Nó được thực hiện bằng cách điều khiển tốc độ của 02 động cơ không đồng bộ 3 pha cho hệ thống bù cấp ẩm và máy hút ẩm, từ đó thay đổi được lưu lượng hơi ẩm cấp cho mỗi quá trình lên men của chè đen tương ứng với giai đoạn 1 và 2. Phần 2 là kiểm soát thời gian của quá trình lên men trong giai đoạn 3 thông qua điều chỉnh tốc độ của băng tải vận chuyển khối chè trong quá trình lên men. Cả hai phần trên được điều khiển dựa trên sai lệch màu sắc khối chè giữa ảnh mẫu và ảnh chụp, từ đó tạo ra tín hiệu tham chiếu cho quá trình công nghệ thông qua luật suy luận mờ [6, 7]. Tuy nhiên, các nghiên cứu chưa chỉ ra rõ được mối quan hệ giữa sự thay đổi màu sắc và nhiệt độ, độ ẩm là như thế nào, và làm thế nào để thực hiện điều khiển hệ thống dựa trên mối quan hệ này. Do vậy, nghiên cứu này đưa ra bài toán thực hiện điều khiển hệ thống nhằm tối ưu hóa giữa màu sắc, nhiệt độ và độ ẩm để sản phẩm đảm bảo chất lượng.

### 2. BÀI TOÁN ĐẶT RA

Xuất phát từ dây chuyền lên men chè đen là một quá trình liên tục và các giai đoạn lên men liên quan mật thiết đến nhau cả về chất lượng cũng như nhiệt độ và độ ẩm của khối chè đen được trình bày như hình 1 cụ thể như sau:



Hình 1. Các giai đoạn lên men chè đen.

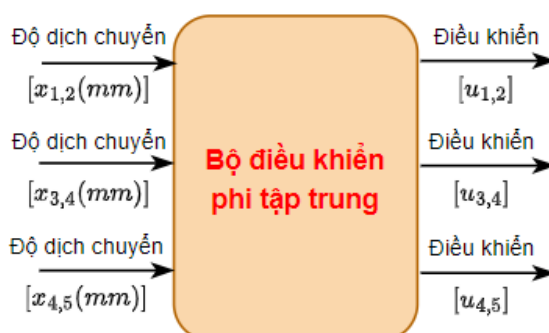
- Chất lượng (TF/TR) của khối chè lên men trong quá trình 1 là nguyên liệu đầu vào cho quá trình 2 và nó cũng ảnh hưởng gián tiếp đến chất lượng (TF/TR) của quá trình 3 và từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến chè thành phẩm.

- Tương tự, chất lượng (TF/TR) của quá trình 2 là đầu vào cho quá trình 3 và nó cũng ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng chè thành phẩm [8].

- Ngoài ra, việc điều khiển nhiệt độ, độ ẩm của khối chè trong từng giai đoạn chỉ được thực hiện thông qua 2 động cơ không đồng bộ. Tức là, chỉ thực hiện điều chỉnh nhiệt độ và độ ẩm của buồng cấp ẩm đầu vào tổng. Điều đó cũng có nghĩa là nếu ta đang điều chỉnh chất lượng (TF/TR) của giai đoạn 1, thì chất lượng ở giai đoạn 2 và 3 sẽ không điều chỉnh được và tương tự với các giai đoạn khác. Điều này dẫn đến việc tối ưu chất lượng của chè thành phẩm cần được cải thiện hơn.

- Các luật điều khiển cho dây chuyền lên men chè tự động đều dựa vào sai lệch giữa ảnh mẫu và ảnh nhận dạng sau 5 phút. Vì vậy, tại một thời điểm ta sẽ thu được 3 sai lệch và từ đó cần phải có một luật điều khiển phối hợp giữa 03 sai lệch này để làm tín hiệu tham chiếu cho 02 động cơ không đồng bộ. Như vậy, việc điều chỉnh độc lập các giai đoạn giúp cho việc thực thi dễ dàng nhưng chất lượng (TF/TR) sẽ không được tối ưu.

Cấu trúc của hệ thống điều khiển đề xuất được trình bày như hình 2.



Hình 2. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển ổn định tốc độ băng tải.

Để tối ưu chất lượng chè (TF/TR) ở từng giai đoạn, tác giả đề xuất tối ưu lưu lượng hơi ẩm cho từng giai đoạn. Tiếp sau đây, tác giả đề xuất một số vấn đề cần giải quyết như sau:

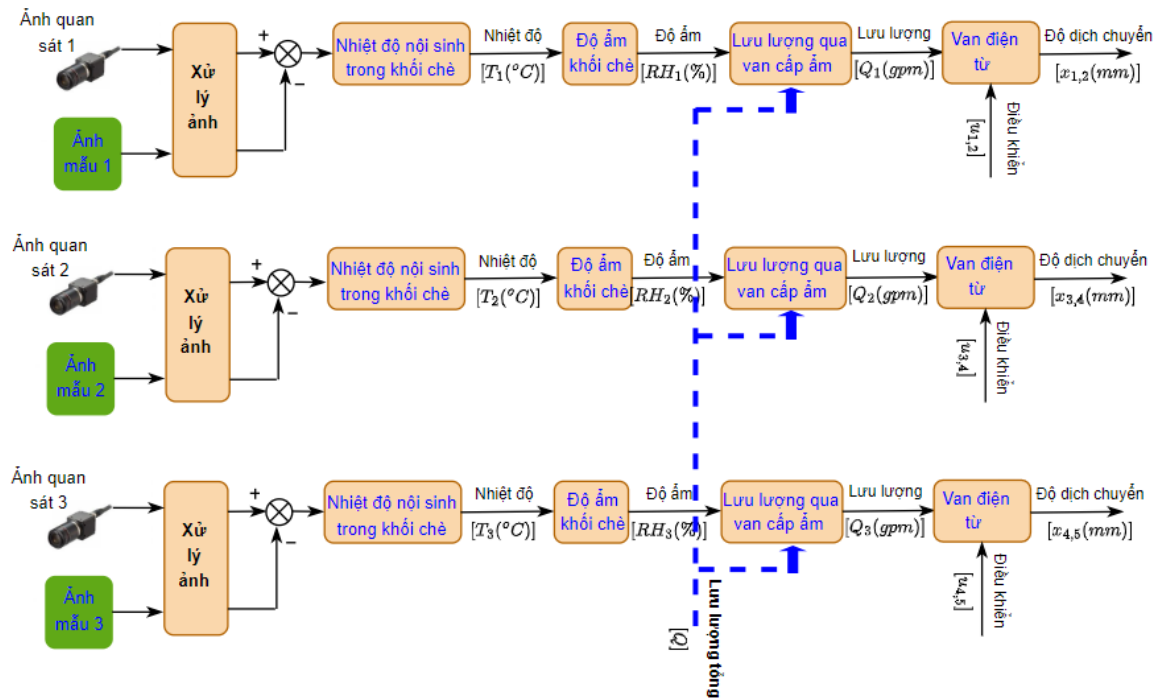
- Mô hình hóa hệ thống van điện từ và mô hình sự tác động qua lại giữa các van.
- Thiết kế thuật toán điều khiển tối ưu lưu lượng cho hệ thống van có xét đến cả chất lượng chè trong từng giai đoạn và chất lượng chè thành phẩm đầu ra.

- Tính chọn các tham số cho bộ điều khiển tối ưu.

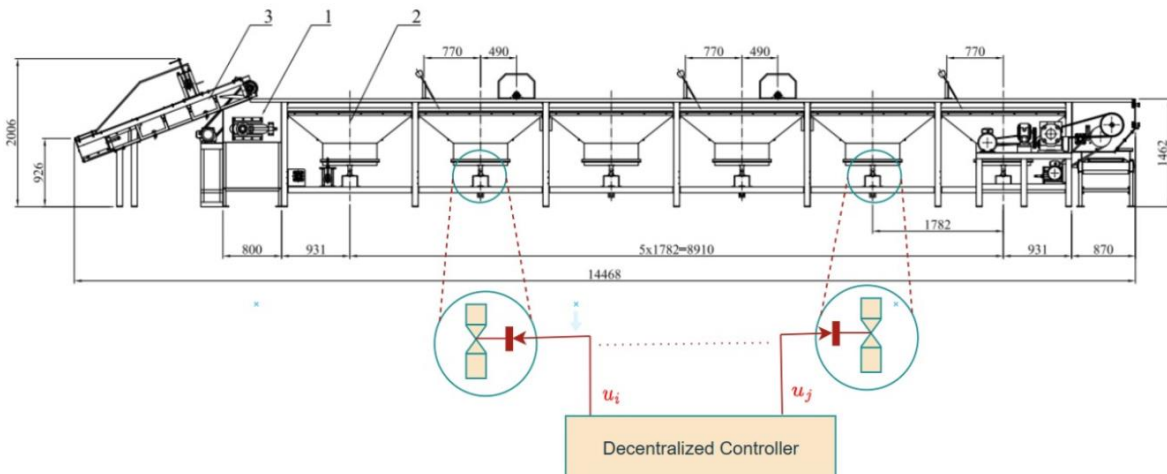
### 3. ĐỀ XUẤT HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN VÀ THUẬT TOÁN TỐI ƯU TRONG QUÁ TRÌNH LÊN MEN CHÈ ĐEN

#### 3.1. Đề xuất hệ thống điều khiển tối ưu phi tập trung

Tác giả đề xuất giải pháp để cải thiện cho dây chuyền sản xuất chè đen tự động được trình như hình 3 và hình 4.



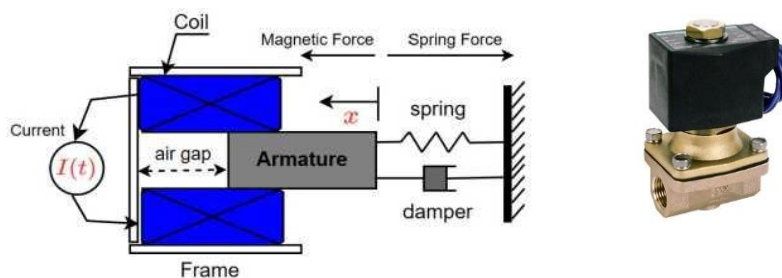
Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển ổn định tốc độ.



Hình 4. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển ổn định tốc độ bằng tải.

a) Mô hình hóa van điện từ

Mô hình của van điện từ  $i$  có thể được mô hình như hệ thống giảm chấn và lò xo được minh họa như hình 5.



Hình 5. Minh họa van điện từ với lò xo và hệ giảm chấn.

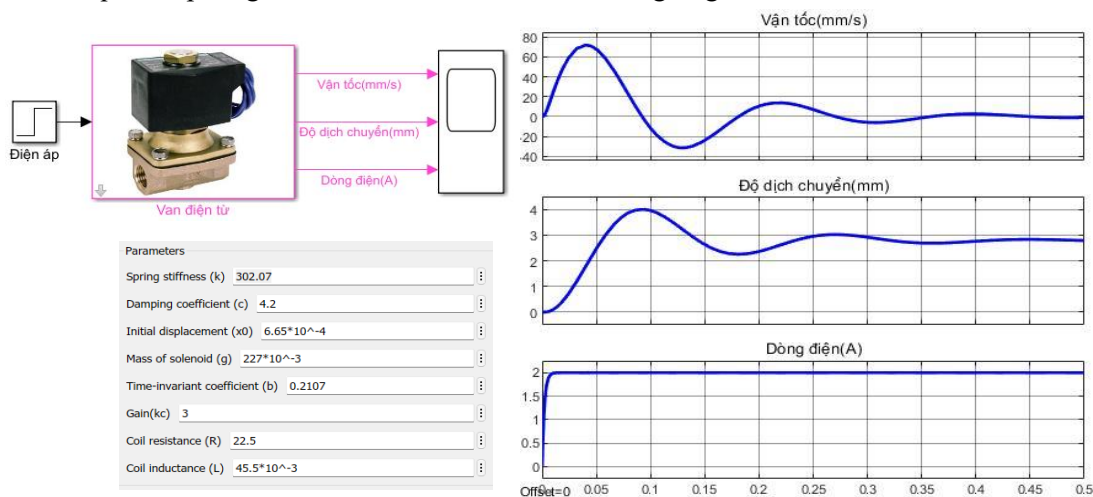
Mô hình toán học của hệ thống van điện từ có dạng như sau

$$m \frac{d}{dt} \left( \frac{dx_i}{dt} \right) + c \frac{dx_i}{dt} + kx_i = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A I_i^2}{2(d+x_{i0}-x_i)^2} \quad (1)$$

Trong đó:

- $x_i$  là độ dịch chuyển của phần ứng của van điện từ thứ  $i$ ;
- $\mu_0$  hệ số từ thẩm;
- $A$  là diện tích mặt cắt ngang của lõi;
- $N$  là số vòng của dây cuộn;
- $\mu_r$  là độ từ thẩm tương đối của vật liệu điện môi giữa cuộn dây và phần ứng;
- $x_{i0}$  là khe hở không khí ban đầu giữa phần ứng và mặt trong của khung dây;
- $d$  là khe hở ban đầu liên quan đến hình dáng của van điện từ, nhỏ hơn nhiều so với khe hở không khí ban đầu  $x_{i0}$ ;
- $I_i$  là dòng điện chạy trong cuộn dây của van điện từ  $i$ .

Kết quả mô phỏng van điện từ với các tham số tương ứng được thể hiện như hình 6.

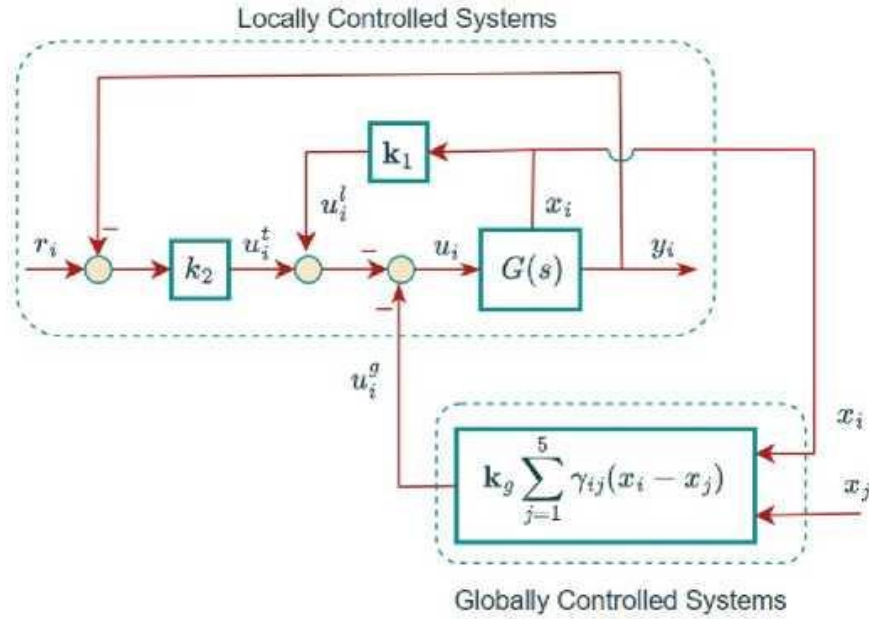


Hình 6. Mô hình và tham số của van điện từ.

b) Cấu trúc điều khiển tối ưu cho van điện từ

Như trình bày trên, dây truyền lên men chè đen (hình 4) bao gồm có 05 máng cấp ẩm mỗi máng có 01 van điện từ. Để tối ưu hóa lưu lượng hơi ẩm, tác giả đề xuất luật điều khiển cho từng van điện từ  $i = 1, \dots, 5$  được thể hiện như hình 4 và hình 7. Bao gồm các thành phần như sau:

- Thành phần điều khiển bám lưu lượng hơi ẩm đặt;
- Thành phần tối ưu lưu lượng van thứ  $i$  liên quan đến giai đoạn lên men tại van cấp ẩm  $i$ ;
- Thành phần tối ưu có xét đến ảnh hưởng lưu lượng của các van cấp liền kề của các giai đoạn lên men.



**Hình 7.** Cấu trúc điều khiển tối ưu cho van điện tử.

Theo đó, luật điều khiển cho van điện tử cấp âm thứ  $i$  được mô tả như sau

$$\begin{aligned} u_i &= u_i^l + u_i^t + u_i^g \\ &= \mathbf{k}_1 x_i + k_2 e_i + \mathbf{k}_g \sum_{j=1}^5 \Gamma_{ij} x_j \\ \dot{e}_i &= r_i - y_i = r_i - \mathbf{c}^T x_i \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó,

- $u_i^l$  là tín hiệu điều khiển tối ưu lưu lượng của van điện tử  $i$ ;
- $u_i^t$  là tín hiệu điều khiển theo sai lệch bám;
- $u_i^g$  là tín hiệu điều khiển tối ưu có xét đến ảnh hưởng của các van điện tử lân cận với hệ số dương  $\Gamma_{ij} > 0$ .

c) Thiết kế bộ điều khiển tối ưu phi tập trung

Trước khi thiết kế và tìm bộ điều khiển tối ưu phi tập trung cho hệ thống van điện tử như đã trình bày, tác giả nhắc lại cách xác định bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống tuyến tính tổng quát như sau:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (3)$$

bài toán lúc này tìm tín hiệu điều khiển  $u = -\mathbf{K}\mathbf{x}$  sao cho tối thiểu hoá phiếm hàm mục tiêu

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q}\mathbf{x} + u^T R u] dt \rightarrow \min \quad (4)$$

với  $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T, \mathbf{a}^T \mathbf{Q} \mathbf{a} \geq 0, \forall \mathbf{a}$ , và  $R = R^T, \mathbf{a}^T R \mathbf{a} \geq 0, \forall \mathbf{a}$

Lời giải của bài toán trên được xuất phát từ lý thuyết điều khiển tối ưu do Anderson và Moore [9]. Theo đó, bộ điều khiển tối ưu được gọi là bộ điều khiển LQR với giả thiết là cặp ma trận  $(\mathbf{A}, \mathbf{B})$  là điều khiển được, và nó tính toán như sau:

$$u = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x} \quad (5)$$

với with  $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  là nghiệm duy nhất xác định dương của phương trình Riccati sau:

$$\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \mathbf{0} \quad (6)$$

Tiếp theo, bài toán công nghệ được phát biểu lại như sau: Cho phương trình tổng quát mô tả cho hệ thống van điện tử của dây truyền lên men chèn đen như sau:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= (\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{A})\mathbf{x} + (\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{B})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= (\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{c}^T)\mathbf{x}\end{aligned}\quad (7)$$

với  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_5]^T$ ,  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_5]^T$ ,  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_5]^T \in \mathbb{R}^5$ . Luật điều khiển phi tập trung cho hệ thống van điện từ của dây chuyền lên men chè đen được mô tả như sau:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{k}_1)\mathbf{x} + (\mathbf{I}_5 \otimes k_2)\mathbf{e} + (\mathbf{\Gamma} \otimes \mathbf{k}_g)\mathbf{x} = \bar{\mathbf{u}} + (\mathbf{I}_5 \otimes k_2)\mathbf{e} \quad (8)$$

với  $\mathbf{e} = [e_1, e_2, \dots, e_5]^T \in \mathbb{R}^5$  và  $\mathbf{\Gamma} = [\Gamma_{ij}]$ . Xác định các tham số  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_g$  và  $\mathbf{\Gamma}$  sao cho tối ưu hoá phiếm hàm mục tiêu  $\mathcal{J}$  của cả hệ thống:

$$\begin{aligned}\mathcal{J} &= \int_0^\infty \mathbf{x}^T \left[ \frac{1}{k_q} (\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{Q}_l) + \frac{1}{k_q^2} (\mathbf{\Gamma} \otimes \mathbf{Q}_g) \right] \mathbf{x} dt \\ &+ \int_0^\infty \bar{\mathbf{u}}^T [(\mathbf{I}_5 \otimes R_l^{-1}) + (\mathbf{\Gamma} \otimes R_g^{-1})] \bar{\mathbf{u}} dt \rightarrow \min\end{aligned}\quad (9)$$

Lời giải của bài toán trên tương tự như lời giải của bài toán LQR, tuy nhiên, thay vì tìm bộ điều khiển tối ưu với hệ số  $\mathbf{K}$ , bài toán tối ưu đặt ra tìm  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_g$  và  $\mathbf{\Gamma}$  sao cho chúng chỉ phụ thuộc vào các thông số của hệ thống  $\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{A}, \mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{B}, \mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{c}^T$  và tối ưu hoá được phiếm hàm mục tiêu  $\mathcal{J}$ .

Giả thiết sau đây được đưa ra để đảm bảo lời giải cho bài toán.

**Giả thiết A1.** Cặp ma trận  $(\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{A}, \mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{B})$  là điều khiển được.

**Giả thiết A2.** Cặp ma trận  $([\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{Q}_l + \mathbf{\Gamma} \otimes \mathbf{Q}_g]^{-\frac{1}{2}}, \mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{B})$  là quan sát được

Tiếp theo, tham số của bộ điều khiển sẽ được xác định theo như định lý sau đây.

**Định lý 1.** Cho hệ thống van điện từ thỏa mãn giả thiết A1 với mọi  $i = 1, \dots, 5$ . Nếu ma trận  $\mathbf{Q}$  và  $R^{-1}$  được chọn sao cho:

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{k_q} (\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{Q}_l) + \frac{1}{k_q^2} (\mathbf{\Gamma} \otimes \mathbf{Q}_g) \quad (10)$$

$$\mathbf{R}^{-1} = (\mathbf{I}_5 \otimes R_l) + (\mathbf{\Gamma} \otimes R_g) \quad (11)$$

Thì bộ điều khiển tối ưu phi tập trung LQR được xác định như sau:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{k}_1) + (\mathbf{\Gamma} \otimes \mathbf{k}_g)$$

với  $\mathbf{k}_1 = -R_l \mathbf{B}^T \mathbf{P}$ ,  $\mathbf{k}_g = -R_g \mathbf{B}^T \mathbf{P}$ .

Từ đó, thuật toán sau đây sẽ trình bày cách thực hiện bộ điều khiển tối ưu phi tập trung cho hệ thống cấp ẩm của dây chuyền lên men chè đen.

### Thuật toán 1. Điều khiển phi tập trung LQR

1: **procedure** Tính toán hệ số của bộ điều khiển

2: Lựa chọn ma trận  $\mathbf{Q}_l \in \mathbb{R}^5$ ,  $\mathbf{Q}_l \geq 0$  và  $R_l \in \mathbb{R}^5$ ,  $R_l \geq 0$

3: Tính toán ma trận xác định dương  $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^5$ ,  $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T$  là nghiệm duy nhất của phương trình Riccati

$$\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \frac{1}{k_q} \mathbf{Q}_l - \mathbf{P} \mathbf{B} R_l \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \mathbf{0} \quad (12)$$

4: Lựa chọn ma trận bán xác định dương  $\mathbf{\Gamma} \in \mathbb{R}^5$

5: Lựa chọn  $R_g > 0$  và chọn

$$\mathbf{Q}_g = \mathbf{P} \mathbf{B} R_g \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (13)$$

trong đó,  $\mathbf{P}$  là nghiệm của phương trình

$$\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q}_l - \mathbf{P} \mathbf{B} R_l \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \mathbf{0} \quad (14)$$

6: Tính toán bộ điều khiển phản hồi

$$\mathbf{u}_f = (\mathbf{\Gamma} \otimes \mathbf{k}_g)\mathbf{x}, \mathbf{k}_g = -R_g \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (15)$$

$$\mathbf{u}_r = (\mathbf{I}_5 \otimes \mathbf{k}_1)\mathbf{x}, \mathbf{k}_1 = -R_l \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (16)$$

7: Tính toán bộ điều khiển bám

$$\mathbf{u}_t = (\mathbf{I}_5 \otimes k_2)\mathbf{e} \quad (17)$$

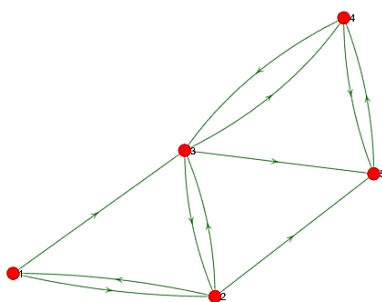
trong đó,  $\mathcal{A}_a + \mathcal{B}_a\mathcal{K}_a$  là ma trận Hurwitz. Sau đó, bộ điều tối ưu được tính toán bởi công thức sau

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_f + \mathbf{u}_r + \mathbf{u}_t$$

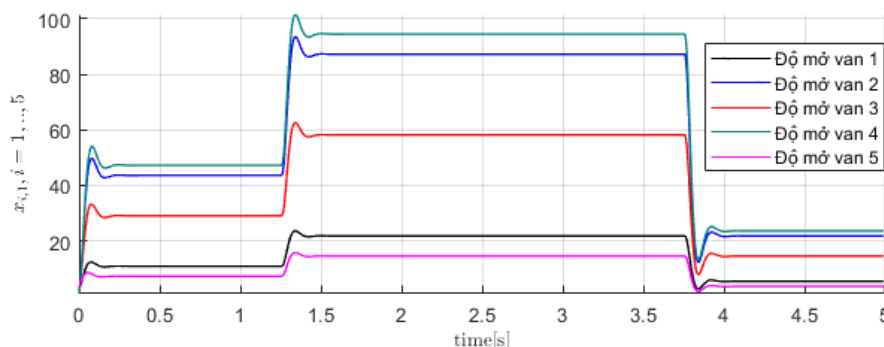
### 8: end procedure

d) Mô phỏng đánh giá kết quả

Để kiểm chứng thuật toán đã đề xuất, tác giả tiến hành mô phỏng kiểm chứng. Sử dụng thuật toán 1, để xác định các tham số  $\mathbf{k}_g, \mathbf{k}_1$ , và  $k_2$  ta có kết quả mô phỏng như sau:



Hình 8. Mô phỏng sự trao đổi kết nối tín hiệu giữa các van điện tử.



Hình 9. Độ mở của các van phù hợp yêu cầu công nghệ.

Giả thiết rằng sau khi sử dụng công nghệ nhận màu sắc khô chèn, độ ẩm cần cung cấp cho từng giai đoạn đã được xác định, từ đó thông qua phương trình  $\mathbf{q}_i = k_q\mathbf{x}_i$ , với  $\mathbf{q}_i = \left[ q_i, \frac{dq_i}{dt} \right]$  và  $\mathbf{x}_i = \left[ x_i, \frac{dx_i}{dt} \right]$  là độ dịch chuyển và tốc độ dịch chuyển va điện tử tính theo phần trăm.

Thông số của van điện tử Pontic F421 được xác định như sau: điện áp cung cấp là 15 V, điện trở của van điện tử là  $22.5 \Omega$ . Hệ số độ cứng của lò xo  $k = 302.07 \text{ Nm}^{-1}$ , hệ số damping  $c = 12.2 \text{ kgs}^{-1}$ , và khối lượng của van là  $m = 227 \text{ (g)}$ , và  $\beta = 0.2107, k_c = 3$ . Tần số làm việc của van là 16.4 Hz.

Kết quả mô phỏng thuật toán đề xuất cho thấy, thông qua bộ điều khiển tối ưu tập trung các van điện tử sẽ phối hợp cùng điều khiển với các độ mở van khác nhau từ 0 đến 100% (hình 9) có thiết lập trên để sao cho hệ thống đạt được chất lượng tối ưu. Từ kết quả mô phỏng hình 9 cho thấy, các van có độ mở khác nhau theo đúng chu trình cấp ẩm và điều khiển nhiệt độ theo chu trình công nghệ, điều này là đảm bảo chỉ tiêu chất lượng của chè đen thông qua tín hiệu hiệu điều khiển được phân tích từ quá trình nhận dạng ảnh màu sắc trong quá trình lên men. Như vậy, thuật toán mới đề xuất hoàn toàn đúng đắn và phù hợp với đối tượng điều khiển là quá trình lên men chè đen.

#### 4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, tác giả đã đề xuất bộ điều khiển tối ưu phi tập trung cho hệ thống lên men chè đen, xuất phát từ việc mô hình hóa mối quan hệ tương tác giữa các van điện từ dựa trên lý thuyết đồ thị, và thuật toán tối ưu lưu lượng hơi ẩm qua van điện từ. Kết quả được thể hiện trong định lý 1 và một thuật toán được đề xuất. Cuối cùng, để minh họa cho thuật toán tác giả đã xét hệ thống 05 van điện từ có mối quan hệ tương quan với nhau, bằng cách sử dụng thuật toán đề xuất chất lượng của hệ thống đã đạt được như yêu cầu bài toán đặt ra.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Akuli, A.; Pal, A.; Dey, T.; Bej, G.; Santra, A.; Majumdar, S.; Bhattacharyya, N. "Assessment of Black Tea Using Low-Level Image Feature Extraction Technique". Proc. Glob. AI Congr. 2019/2020, Springer, 453–467.
- [2]. S. Tharaga, B. J. Watawana, W. K. I. L. Wanniarachchi, K.W.S.N.K. and D.D.C.W. "Significance of Physical Parameters to Optimize the Bed Tea Leaves' Temperature During Fermentation Stage of Black Tea Manufacturing Process". 2018 IEEE Int. Conf. Inf. Autom. Sustain, Colombo, S, 1–5, (2018).
- [3]. Mesbahi, Mehran and Magnus Egerstedt. "Graph theoretic methods in multi-agent networks". Princeton Univ Pr, p. 403. isbn: 9780691140612, (2010). doi: 10.1073/pnas.0703993104.
- [4]. Olfati-Saber, Reza, J Alex Fax, and Richard M Murray. "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems". In: Proceedings of the IEEE 95.1, pp. 215-233. issn: 00189219, (2007). doi: 10.1109/JPROC.2006.887293. arXiv: 1009. 6050.
- [5]. Zhongkui Li et al. "Consensus of Multiagent Systems and Synchronization of Complex Networks: A Unified Viewpoint". In: IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 57.1, pp. 213-224. issn: 1549-8328, (2010). doi: 10.1109/TCSI.2009.2023937.
- [6]. Zhong, Y.h.; Zhang, S.; He, R.; Zhang, J.; Zhou, Z.; Cheng, X.; Huang, G..Z. "A Convolutional Neural Network Based Auto Features Extraction Method for Tea Classification with Electronic Tongue". Appl. Sci. 9, 2518, (2019).
- [7]. X. Zhou, Z.T. and F.Q. "Identification of Black Tea Fermentation Degree Based on Convolutional Neural Network". 2018 Int. Conf. Intell. Auton. Syst, Singapore, 5–8, (2018).
- [8]. Yang, Z., Tang, J., Xue, L., & Peng, Y. "Study on High Efficiency Black Tea Fermentation Control System Based on Multiple Regression". 2021 2nd Int. Conf. Artif. Intell. Inf. Syst, Article No, (pp. 1-5), (2021).
- [9]. D. O. Anderson and J. B. Moore. "Optimal Control: Linear, Quadratic Methods". Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, (1990).

#### ABSTRACT

##### **Proposing an optimal control system specifically focused on the black tea fermentation process**

*Currently, black tea maintains a significant position in the global beverage market and brings numerous health and cultural benefits. Therefore, quality control of black tea is a matter of concern. In this article, we proposes an optimal control system focused on the black tea fermentation process, based on adjusting temperature and humidity parameters at each stage affecting the quality of black tea. The color change process of tea over time when influenced by temperature and humidity is identified through image analysis at the moment of sudden color change. Regulating humidity and temperature from the humidification system needs to be controlled by electromagnetic valves. The author models the interaction relationship between electromagnetic valves based on graph theory, and an optimal algorithm for steam flow through electromagnetic valves. The proposed results include a theorem and an algorithm, which have been mathematically proven and simulated to ensure control requirements for the quality assurance of black tea.*

**Keywords:** Black tea; Optimization; Temperature; Humidity; Color; Decentralized.