

THIẾT KẾ HỆ THỐNG BƠM LẤY MẪU NƯỚC THẢI THÔNG MINH

DESIGN OF SMART WASTEWATER SAMPLING PUMP SYSTEM

Võ Minh Tiến, Phạm Huy Hoàng*

Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh

*Email tác giả liên hệ: hoangph@huit.edu.vn

TÓM TẮT

Phân tích nước thải để giám sát dịch tễ học (Wastewater-Based Epidemiology – WBE) đã chứng minh tính hiệu quả trong việc phát hiện sớm các nguy cơ sức khỏe cộng đồng như bệnh truyền nhiễm hoặc chất gây nghiện. Tuy nhiên, tại Việt Nam, điều kiện cơ sở hạ tầng nước thải chưa hoàn chỉnh đặt ra nhu cầu phát triển các giải pháp lấy mẫu phù hợp. Bài báo này trình bày thiết kế một hệ thống bơm lấy mẫu nước thải thông minh có khả năng hoạt động tự động, chịu điều kiện môi trường khắc nghiệt, chi phí thấp và có khả năng mở rộng. Hệ thống sử dụng vi điều khiển ESP32, bơm màng DC, cảm biến nhiệt độ và lưu lượng, cùng thuật toán điều khiển PID. Kết quả mô phỏng và thử nghiệm thực tế chứng minh hiệu quả và độ tin cậy của giải pháp.

Từ khoá: Nước thải; Bơm; Lấy mẫu; Điều khiển.

ABSTRACT

Wastewater-Based Epidemiology (WBE) has proven to be an effective tool for the early detection of public health threats, such as infectious diseases or illicit drug use. To perform this, the incomplete wastewater infrastructure in Vietnam necessitates the development of suitable sampling pumping solutions. This paper presents the design of a smart wastewater sampling pump system that is capable of automated operation, can withstand harsh environmental conditions, is low-cost, and scalable. The sampling pumping system utilizes an ESP32 microcontroller, a DC diaphragm pump, temperature and flow sensors, and is controlled by a PID control algorithm. Simulation and real-world testing results demonstrate the effectiveness and reliability of this solution.

Keywords: Wastewater; Pump; Sampling; Control.



1. GIỚI THIỆU

Phương pháp WBE đã được chứng minh là công cụ hiệu quả trong việc giám sát dịch bệnh (SARS-CoV-2, poliovirus, v.v.) và hành vi sử dụng chất gây nghiện trong cộng đồng [1-3]. Tuy nhiên, để đảm bảo tính đại diện của mẫu, quá trình lấy mẫu phải đáp ứng được các tiêu chí: liên tục, chính xác, thích nghi với điều kiện dòng chảy và môi trường khắc nghiệt.

Ở Việt Nam, nơi có nhiều kênh mương hở và hệ thống xử lý nước thải chưa đồng bộ, việc lấy mẫu theo cách thủ công là phổ biến nhưng không hiệu quả. Do đó, cần một hệ thống bơm lấy mẫu có tính tự động, độ tin cậy cao, giá thành thấp, dễ triển khai đại trà.

2. CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ CÁC NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN

Các hệ thống lấy mẫu tiêu chuẩn quốc tế như ISCO 6712 hoặc HACH AS950 được thiết kế cho hạ tầng kín, giá thành cao (trên 3000 USD), và yêu cầu điều kiện nguồn ổn định. Trong khi đó, các nghiên cứu trong nước mới chỉ dừng lại ở cấp độ phòng thí nghiệm hoặc thử nghiệm hạn chế.

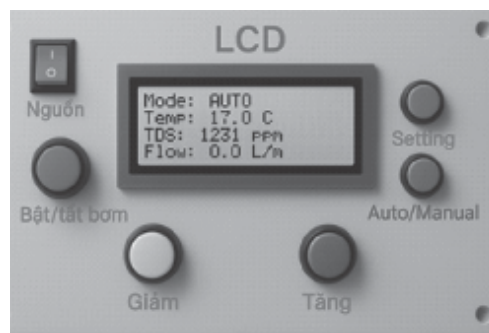
Bài báo này kế thừa những nguyên lý cơ học cam-phẳng vi mô, kỹ thuật điều khiển actuator piezo, đồng thời tích hợp khả năng hoạt động độc lập thông qua các công nghệ nhúng hiện đại như ESP32, cảm biến DS18B20, module bơm màng.

3. THIẾT KẾ VÀ TÍNH TOÁN HỆ THỐNG

3.1. Cấu hình phần cứng

Thành phần	Mô tả
Bộ xử lý chính	ESP32
Cảm biến nhiệt độ	DS18B20

Bơm màng DC	12V, 50ml/min
Pin nguồn	Acquy 9Ah
Lọc cơ học đầu hút	Inox 300 mesh
Flow sensor (tùy chọn)	YF-S201 (1-300 ml/min)



Hình 3.1. Giao diện điều khiển hệ thống bơm lấy mẫu nước thải thông minh

3.2. Tính toán chu kỳ lấy mẫu

- Yêu cầu lấy mẫu: $V_{\text{ngày}} = 3000\text{ml}$ trong 24 giờ.

- Chọn chu kỳ lấy mẫu mỗi 20 phút $\rightarrow n = 72$ lần/ngày.

- Dung tích mỗi mẫu:

$$V_m = \frac{3000\text{ml}}{72} \approx 41.67\text{ml}$$

- Thời gian bơm mỗi lần, nếu $Q = 50\text{ ml/min} = 0.83\text{ ml/s}$:

$$t = \frac{V_m}{Q} = \frac{41.67}{0.83} \approx 50.2\text{s}$$

3.3. Tính công suất tiêu thụ

- Bơm: $P = U \cdot I = 12\text{ V} \cdot 0.5\text{ A} = 6\text{ W}$.

- Tổng thời gian hoạt động mỗi ngày: $T = 72 \cdot 50.2 \approx 3614.4\text{ s}$.

- Năng lượng:

$$E = P \cdot \frac{T}{3600} = 6 \cdot \frac{3614.4}{3600} = 6.024 Wh$$

- Dung lượng pin: $E_{pin} = 12V \cdot 9 Ah = 108 Wh \gg E$.

- Đảm bảo 24-48 giờ hoạt động liên tục.

4. ĐIỀU KHIỂN THÔNG MINH VỚI PID

4.1 Mô hình điều khiển PID

Để ổn định lưu lượng trong điều kiện môi trường thay đổi, tín hiệu điều khiển được tính theo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Với: $e(t) = Q_{ref} - Q_{actual}(t)$

- Q_{actual} đo bằng cảm biến lưu lượng.

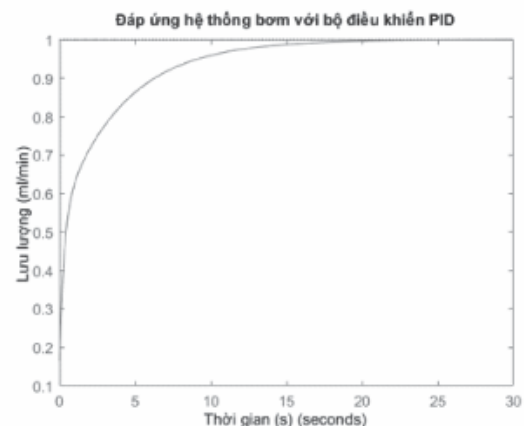
- $u(t)$ được chuyển thành mức PWM (0-255) điều khiển bơm.

Cấu trúc điều khiển vòng kín của hệ thống bơm, trong đó tín hiệu đặt (Q_{ref}) được so sánh với tín hiệu phản hồi từ cảm biến lưu lượng. Sai lệch được đưa vào bộ điều khiển PID để tính toán tín hiệu điều khiển cho bơm. Khối Pump System được mô tả bằng hàm truyền $\frac{1}{0.5s+1}$, thể hiện động học bậc nhất của hệ thống. Cảm biến lưu lượng được mô hình hóa với hệ số khuếch đại 1.



Hình 4.1. Mô hình điều khiển PID cho hệ thống bơm

Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống đạt giá trị lưu lượng mong muốn (1 ml/min) sau khoảng 15 giây, với độ quá điều chỉnh gần như bằng 0 và thời gian quá độ ngắn. Điều này chứng tỏ bộ điều khiển PID đã được điều chỉnh hiệu quả, đảm bảo lưu lượng ổn định ngay cả khi có thay đổi ban đầu hoặc nhiễu nhỏ.



Hình 4.2. Đáp ứng lưu lượng của hệ thống bơm với bộ điều khiển PID

4.2. Cài đặt hệ số

Hệ số	Giá trị
K_p	1.2
K_i	0.5
K_d	0.1

- Hệ thống tự động điều chỉnh dòng bơm phù hợp với lưu lượng đầu vào.

5. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

- Vị trí thử nghiệm: Mương nước thải.
- Điều kiện: Dòng chảy 0.5 m/s, độ sâu

1.2 m.

- Kết quả:

- Hoạt động liên tục 24 giờ.
- Mẫu thu được đạt đủ thể tích (3L/ )

ngày), không nhiễm bẩn tạp chất lớn.

- Ghi nhận nhiệt độ môi trường 27-34°C.
- Sai số lưu lượng dưới 3%.



Hình 5.1. Nguyên mẫu thiết bị lấy mẫu nước thải trong nghiên cứu

6. KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Bài báo đã trình bày thiết kế, phân tích và đánh giá một hệ thống bơm lấy mẫu nước thải thông minh, hoạt động ổn định trong môi trường thực tế tại Việt Nam. So với các hệ thống thương mại hiện tại, giải pháp này có chi

phí thấp (< 2 triệu VND), dễ triển khai, và có khả năng mở rộng.

Hệ thống này sẽ được phát triển trong tương lai nhằm nâng cao khả năng làm việc tự động và đưa ra kết luận nhanh và chính xác nhờ thực hiện tích hợp truyền dữ liệu Wi-Fi hoặc GSM về máy chủ trung tâm và sử dụng AI (TinyML) để đánh giá chất lượng mẫu tại chỗ.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công Thương thành phố Hồ Chí Minh theo Hợp đồng số 95/HĐ-DCT ký ngày 17 tháng 01 năm 2025.❖

Ngày nhận bài: **18/8/2025**

Ngày phản biện: **27/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. WHO, “*Status of Wastewater-based Epidemiology for COVID-19 Monitoring*”, 2020.
- [2]. Thomas, K. V. et al., “*Monitoring Illicit Drug Use Using Wastewater Analysis*”, 2012.
- [3]. Gerrity, D. et al., “*Early Detection of SARS-CoV-2 in Wastewater*”, 2020.
- [4]. T.A. Larsen et al., “*Sampling Technologies for WBE*”, 2016.