

COMPARISON OF GA-PID AND FUZZY-PID CONTROLLERS APPLIED TO LIQUID LEVEL STABILITY CONTROL SYSTEM

Le Minh Thanh^{1*}, Nguyen Tan No¹, Luong Hoai Thuong¹, Le Tien Dat², Nguyen Chi Ngon³

¹Vinh Long University of Technology and Education, ²University of Cuu Long, ³Can Tho University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 28/4/2025 Revised: 17/10/2025 Published: 20/10/2025	In industries such as papermaking, energy, chemicals, water treatment or oil refining, the adjustment and maintenance of stable water levels and water flow require very high precision. Only when the above factors are ensured, the production process can achieve optimal efficiency. Therefore, the challenge is to control the water flow accurately to maintain the stability of the liquid level. This paper proposes two controllers GA-PID and FUZZY-PID, which are used to test real-time control on water tank systems and stabilize liquid flow, comparing with actual application requirements. The GA-PID and FUZZY-PID algorithms are designed to control the stable liquid level, combining the advantages of the Fuzzy and PID algorithms, at the same time, compared with genetic algorithms, to analyze and evaluate the quality indicators of the two controllers. The simulation results on MATLAB/Simulink and the experiment of the two proposed controllers on Arduino Mega microcontroller to stabilize the liquid level with a rise time of about 48s and an error of only 0.2s are suitable for small, flexible, economical applications, and can be easily customized and applied in water treatment systems or paper production in small and medium factories.
KEYWORDS	
PID	
FUZZY-PID	
GA-PID	
Discrete control	
Water level control	

SO SÁNH BỘ ĐIỀU KHIỂN GA-PID VÀ FUZZY-PID ÁP DỤNG CHO HỆ THỐNG ỔN ĐỊNH MỨC CHẤT LỎNG

Lê Minh Thành^{1*}, Nguyễn Tấn Nô¹, Lương Hoài Thương¹, Lê Tiến Đạt², Nguyễn Chí Ngôn³

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long, ²Trường Đại học Cửu Long, ³Đại học Cần Thơ

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 28/4/2025 Ngày hoàn thiện: 17/10/2025 Ngày đăng: 20/10/2025	Trong các ngành như sản xuất giấy, năng lượng, hóa chất, xử lý nước hay lọc dầu, việc điều chỉnh và duy trì ổn định mực nước cũng như lưu lượng nước đòi hỏi độ chính xác rất cao. Chỉ khi đảm bảo được các yếu tố trên, quy trình sản xuất mới đạt hiệu quả tối ưu. Do đó, thách thức đặt ra là phải kiểm soát lưu lượng nước một cách chính xác nhằm duy trì sự ổn định của mức chất lỏng. Bài báo này đề xuất hai bộ điều khiển GA-PID và FUZZY-PID, được sử dụng để thử nghiệm điều khiển thời gian thực trên hệ thống bồn chứa nước và ổn định lưu lượng chất lỏng, so sánh với các yêu cầu ứng dụng thực tế. Các thuật toán GA-PID và FUZZY-PID được thiết kế để điều khiển ổn định mức chất lỏng, kết hợp các ưu điểm của thuật toán Fuzzy và PID; đồng thời, so sánh với các thuật toán di truyền, để phân tích và đánh giá các chỉ tiêu chất lượng của hai bộ điều khiển. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink và thực nghiệm hai bộ điều khiển đề xuất trên vi điều khiển Arduino Mega để ổn định mức chất lỏng với thời gian tăng khoảng 48 giây và sai số chỉ 0,2 giây phù hợp cho các ứng dụng nhỏ, linh hoạt, tiết kiệm, có thể tùy chỉnh áp dụng dễ dàng trong các hệ thống xử lý nước hay sản xuất giấy trong các nhà máy vừa và nhỏ.
TỪ KHÓA	
PID	
FUZZY-PID	
GA-PID	
Điều khiển rời rạc	
Điều khiển mức	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12688>

* Corresponding author. Email: thanhlm@vlute.edu.vn

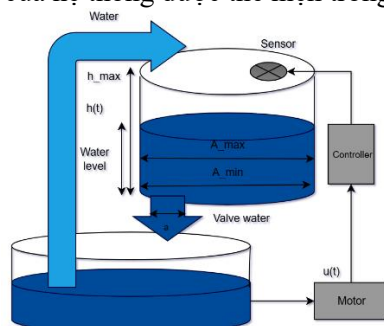
1. Giới thiệu

Hiện nay, công nghiệp hóa, hiện đại hóa ngày càng phát triển, sự tích hợp của khoa học kỹ thuật, trong đó kỹ thuật điều khiển tự động cũng đã góp phần lớn tạo điều kiện nâng cao hiệu quả sản xuất [1]. Trong các ngành công nghiệp sản xuất như hóa chất, nước đóng chai, xử lý nước thải, vấn đề cần điều khiển dòng chảy và mức chất lỏng cần đáp ứng độ chính xác cao để đảm bảo quá trình sản xuất không bị gián đoạn, tăng tuổi thọ thiết bị. Đồng thời, người vận hành không phải trực tiếp kiểm tra các bồn chứa hoặc đóng mở liên tục các van nước, vấn đề được xả hoặc tràn bồn chứa hoàn toàn được phục hồi cho dù đầu ra thay đổi [2]. Hai mục tiêu chính của bài báo này: một là, thiết kế các bộ điều khiển tối ưu mức chất lỏng và hai là, thực nghiệm điều khiển thời gian thực trên mô hình hệ thống vòng kín. Hiện nay, có nhiều phương pháp thiết kế điều khiển khác nhau đáp ứng các yêu cầu cụ thể, trong đó PID có thể là một lựa chọn cho bộ điều khiển ổn định mức chất lỏng, bởi vì chi phí thiết kế và thử nghiệm tương đối ít tốn kém [3] - [5]. Tuy nhiên, khi các thông số phản hồi của cả hệ thống được thay đổi, chúng sẽ làm thay đổi các hoạt động của cả hệ thống kín, mà khi đó bộ điều khiển PID không còn khả năng điều khiển tốt nữa. Vì vậy, bài báo đã đề xuất phương pháp tự điều chỉnh cho bộ điều khiển PID sử dụng thuật toán mờ [6] - [8] và giải thuật di truyền [9] - [11], để có kết quả tốt hơn áp dụng cho hệ thống điều khiển vòng kín. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết điều khiển sử dụng MATLAB/Simulink và thực nghiệm trên mô hình hệ ổn định mức chất lỏng mà nhóm đã nghiên cứu thực hiện [12] - [14]. Kết quả thực nghiệm trên mô hình cho thời gian tăng khoảng 48 giây và độ vọt lố chỉ 3,14%. Giải pháp đề xuất có tính ổn định, đáp ứng nhanh trong quá trình điều khiển và có tiềm năng ứng dụng trong các ngành công nghiệp.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình hệ thống ổn định mức

Bản vẽ hệ thống ổn định mức chất lỏng được thể hiện trên Hình 1 và mô hình thực nghiệm thực tế của hệ thống được thể hiện trong Hình 2.



Hình 1. Bản vẽ của hệ thống [3]



Hình 2. Mô hình thực nghiệm của hệ thống [3]

Trong mô hình này gồm có các thông số cơ bản sau: $u(t)$: điện áp điều khiển máy bơm, $h(t)$: độ cao mực chất lỏng trong bồn, $A(h)$: tiết diện ngang của bồn, a : tiết diện van xả (cm^2).

2.2. Xây dựng phương trình toán cho hệ thống

Để xây dựng phương trình toán của hệ thống, nhóm tác giả sử dụng các khối MATLAB_FCN, tham khảo trong tài liệu [14], các phương trình của hệ thống được thành lập (1) – (6) và chú thích trong Bảng 1.

$$+ \text{Mức nước đi vào bồn được tính bằng công thức: } Q_{in} = k * u(t) \quad (1)$$

$$+ \text{Mức nước ra của bồn được tính như sau: } Q_{out} = C_d * a * \sqrt{2 * g * h(t)} \quad (2)$$

$$+ \text{Tốc độ dòng chảy qua bình được tính: } Q_{in} - Q_{out} = k * u(t) - C_d * a * \sqrt{2 * g * h(t)} \quad (3)$$

$$+ \text{Theo định luật bảo toàn thể tích, ta có: } dV / dt = Q_{in} - Q_{out} \quad (4)$$

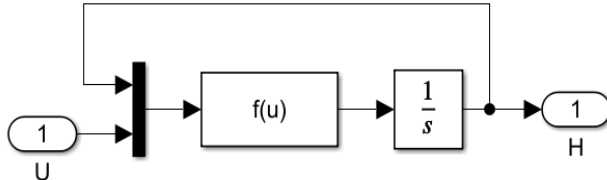
+ Sự thay đổi của chiều cao mực nước trong bồn số 1 được tính bằng công thức:

$$dh/dt = 1/A(h) * (k * u(t) - C_d * a * \sqrt{2 * g * h(t)}) \quad (5)$$

+ Với $A(h)$ là tiết diện ngang của bồn như:

$$A(h) = A_{min} + \frac{A_{max} - A_{min}}{h_{max}} * h \quad (6)$$

Từ các phương trình (1) đến (6), tác giả xây dựng mô hình toán của hệ ổn định mức chất lỏng trên MATLAB/Simulink được trình bày trong Hình 3 và kết cấu cơ khí mô hình thực nghiệm trong Hình 4.



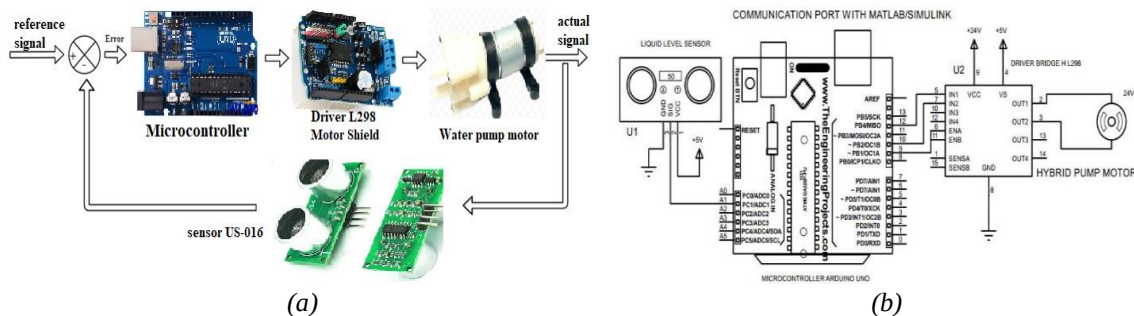
Hình 3. Mô hình toán của hệ thống ổn định mức chất lỏng trong MATLAB/Simulink



Hình 4. Kết cấu cơ khí mô hình thực nghiệm được nhóm tác giả chế tạo [3]

2.3. Thực nghiệm điều khiển thời gian thực

Mô hình thực nghiệm thời gian thực và sơ đồ nối dây của mạch điều khiển trình bày như Hình 5.



Hình 5. (a) Mô hình thực nghiệm điều khiển thời gian thực; (b) Sơ đồ nối dây mạch điều khiển

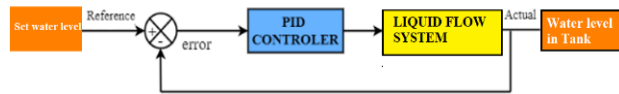
Từ mô hình thực nghiệm điều khiển thời gian thực, ta phân tích được nguyên lý hoạt động ổn định mức chất lỏng. Mức nước trong bồn được đặt trước bởi tín hiệu từ khối reference signal trên Simulink. Lúc này động cơ DC bơm nước từ dưới bể lên, để cung cấp nước vào bồn chứa. Cảm biến sẽ đọc được mức nước thực tế từ khối actual signal, đưa về bộ tổng để so sánh với mức nước đặt trước và đưa ra tín hiệu sai số error đến bộ điều khiển số MicroController. Trong MicroController sẽ được nạp bộ điều khiển đã thiết kế tối ưu, kết hợp truyền thông với máy tính thông qua giao thức UART Communication. Ngõ ra của MicroController là dạng xung PWM, đưa vào Driver L298. Ngõ ra của Driver L298 là điện áp U_{DC} điều khiển động cơ bơm, tốc độ và chiều quay của động cơ phụ thuộc vào độ rộng xung ngõ ra của MicroController. Mức nước thực tế actual signal được trả ngược về bộ tổng, để cho ra sai số lỗi error giữa tín hiệu tham chiếu và tín hiệu thực tế. Sau đó, đưa vào bộ điều khiển thông qua cảm biến sensor US-016, trả ngược về bộ điều khiển xây dựng trên MATLAB/Simulink, thông qua giao thức UART Communication. Khi ta xả van nước để sử dụng, thì mức nước trong bồn sẽ giảm. Lúc này, bộ điều khiển tối ưu được thiết kế trên MATLAB/Simulink sẽ cung cấp thời gian thực tín hiệu điều khiển xuống MicroController tăng độ rộng xung PWM điều khiển tăng tốc động cơ bơm, để điều khiển ổn định mức nước trong bồn được trình bày ở mô hình thực nghiệm trong Hình 5.

2.4. Bộ điều khiển PID

Thuật toán điều khiển vi tích phân tỷ lệ PID được áp dụng cho bộ điều khiển được xác định bởi [15] và được trình bày công thức (7). Nhiệm vụ của người thiết kế bộ điều khiển PID là chọn

lựa bộ ba giá trị $\{K_p, K_d, K_i\}$ thỏa mãn các yêu cầu điều khiển được trình bày trong sơ đồ điều khiển Hình 6.

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_I \int e(t) dt \quad (7)$$



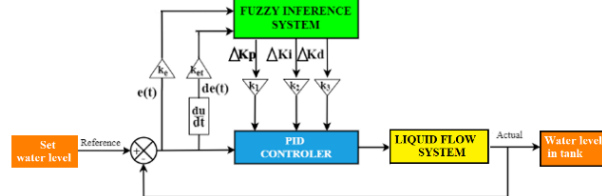
Hình 6. Sơ đồ điều khiển dùng thuật toán PID

Đối với phương pháp Z-N và phương pháp auto-tuning [16], [17] thì bộ thông số thuật toán điều khiển PID trong (7) được tác giả chọn những thông số trong bài báo của Nguyễn Văn Đông Hải và cộng sự [14]. Việc kiểm soát mực nước hệ bồn đơn dùng bộ điều khiển PID trên cùng mô hình tham khảo trong [14], để điều khiển ổn định mức nước và so sánh các kết quả đạt được của bộ điều khiển PID với các thuật toán GA-PID và FUZZY-PID.

2.5. Xây dựng bộ điều khiển FUZZY-PID

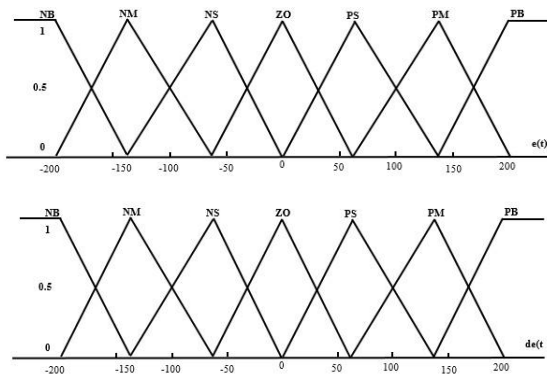
Điều khiển PID tự điều chỉnh mờ dựa trên điều khiển PID kinh điển và sử dụng các quy tắc suy luận mờ để làm cho các tham số PID tự chỉnh định dựa trên sai lệch $e(t)$ và đạo hàm $de(t)$. Mục tiêu là tìm ra các giá trị K_p, K_d, K_i tối ưu thỏa mãn mô hình toán của bộ điều khiển PID (7). Hình 7 minh họa nguyên tắc này và các thông số được tính theo công thức (8).

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \cdot k_1 \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \cdot k_2 \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \cdot k_3 \end{cases} \quad (8)$$

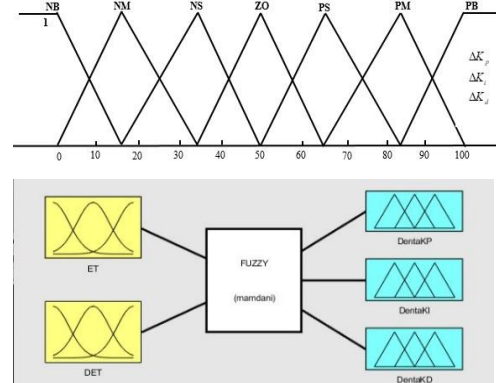


Hình 7. Mô hình bộ điều khiển dùng thuật toán FUZZY-PID

Các tham số chỉnh định cho PID tương ứng với đầu ra của hệ thống điều khiển mờ $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ đồng thời $K_{e0}, K_{e1}, k_1, k_2, k_3$ là các hệ số tiền xử lý và hậu xử lý cho bộ điều khiển FUZZY-PID để thuận tiện cho việc thiết kế và chỉnh định. Ngõ ra của bộ điều khiển PID cũng chính là ngõ ra của bộ điều khiển FUZZY-PID. Các tham số cuối cùng của FUZZY-PID được tính theo công thức (8) dựa vào các tài liệu [18], [19]. Trong đó, các thông số K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} là các giá trị ban đầu của bộ PID, $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ là các giá trị đầu ra của bộ điều khiển FUZZY, các giá trị K_p, K_i, K_d là các tham số chỉnh định mong muốn cuối cùng. Các hàm liên thuộc, các khoảng giá trị của biến vật lý và biến ngôn ngữ được nhóm tác giả thiết kế dựa trên kinh nghiệm chỉnh định trong [20]. Hình 8 trình bày các tập mờ sai số và đạo hàm của sai số, nhóm tác giả sử dụng mô hình Mamdani để xây dựng cấu trúc của bộ điều khiển mờ được trình bày trong Hình 9.



Hình 8. Tập mờ cho biến vào $e(t)$ và $De(t)$

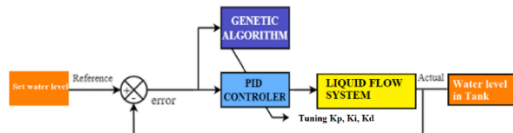


Hình 9. Ngõ ra các hệ số $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ và cấu trúc bộ điều khiển

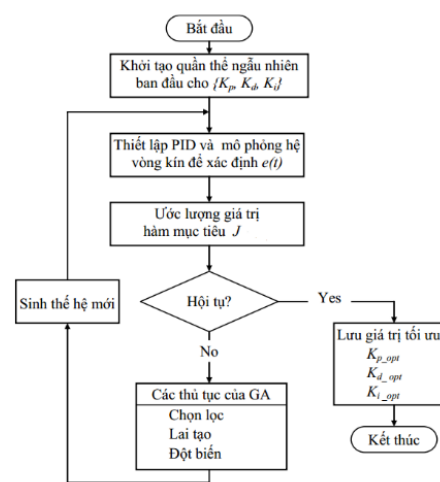
Nguyên tắc chung để tìm ra các giá trị K_p, K_i, K_d là bắt đầu với các giá trị K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} theo [14], sau đó dựa vào đáp ứng và thay đổi dần. Ảnh hưởng của các tham số PID tác động lên chất lượng điều khiển [21] là cơ sở để xây dựng luật mờ.

2.6. Xây dựng bộ điều khiển tự điều chỉnh GA-PID

Áp dụng giải thuật Z-N để xác định ba thông số của bộ điều khiển PID, đây là cơ sở để giới hạn không gian tìm kiếm của giải thuật GA. Giải thuật GA chọn lọc ba thông số $\{K_p, K_d, K_i\}$ tối ưu cho bộ điều khiển PID, thỏa mãn hàm mục tiêu IAE. Phần mềm MATLAB được trình bày chi tiết trong các tài liệu [22], [23] hỗ trợ xây dựng giải thuật GA. Trong bài báo này, giải thuật GA được sử dụng như một công cụ để giải bài toán tối ưu, nhằm tìm được các giá trị $\{K_{p_opt}, K_{d_opt}, K_{i_opt}\}$ thỏa mãn hàm mục tiêu của giải thuật GA trong (9) và (10) với không gian tìm kiếm được giới hạn bởi (11), mô hình điều khiển GA-PID trong Hình 10 và lưu đồ giải thuật di truyền được trình bày trong Hình 11.



Hình 10. Mô hình bộ điều khiển GA-PID



Hình 11. Lưu đồ tiến trình giải thuật di truyền để xác định thông số bộ điều khiển PID [24]

Tích phân giá trị tuyệt đối sai số của hệ thống được trình bày trong công thức (9) [25]:

$$IAE : J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (9)$$

Hàm mục tiêu J của giải thuật di truyền được trình bày trong công thức (10), áp dụng để tìm kiếm các giá trị $\{K_{p_opt}, K_{d_opt}, K_{i_opt}\}$ tối ưu của bộ điều khiển PID tham khảo trong [26], [27]:

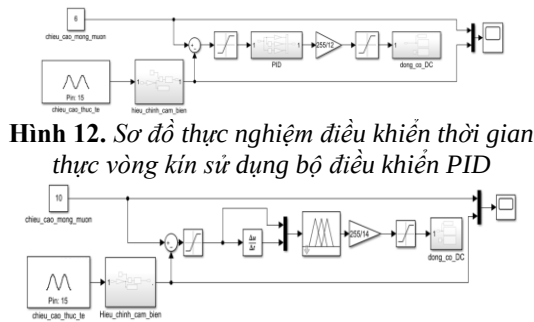
$$Fitness = \min \{J\} \quad (10)$$

Các hệ số α và β được chọn sao cho không gian tìm kiếm đủ rộng để chứa giá trị tối ưu [28]. Đồng thời các thông số tối ưu $\{K_{p_opt}, K_{d_opt}, K_{i_opt}\}$ phải nằm quanh các thông số $\{K_{p_Z-N}, K_{d_Z-N}, K_{i_Z-N}\}$ từ giải thuật Z-N, trình bày trong công thức (11):

$$\begin{aligned} \alpha K_{p_Z-N} &\leq K_{p_opt} \leq \beta K_{p_Z-N} \\ \alpha K_{d_Z-N} &\leq K_{d_opt} \leq \beta K_{d_Z-N} \\ \alpha K_{i_Z-N} &\leq K_{i_opt} \leq \beta K_{i_Z-N} \end{aligned} \quad (11)$$

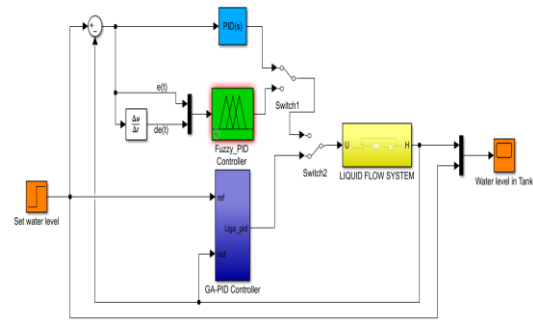
3. Kết quả và thảo luận

Hình 12 và Hình 13 mô tả bộ điều khiển PID và FUZZY-PID được xây dựng để thực nghiệm trên MATLAB/Simulink. Hình 14 trình bày ba bộ điều khiển: một là bộ PID với các thông số tham khảo trong [14], hai là bộ điều khiển FUZZY-PID và ba là bộ GA-PID, được so sánh đánh giá chất lượng trên cùng một mô hình.



Hình 12. Sơ đồ thực nghiệm điều khiển thời gian thực vòng kín sử dụng bộ điều khiển PID

Hình 13. Sơ đồ thực nghiệm điều khiển thời gian thực vòng kín sử dụng bộ điều khiển FUZZY-PID



Hình 14. Bộ điều khiển GA-PID và FUZZY-PID xây dựng trong MATLAB/Simulink

3.1. Đối tượng điều khiển và các tham số của hệ thống

Đối tượng điều khiển hệ thống mức chất lỏng với các thông số được trình bày trong Bảng 1 và các tham số của giải thuật GA được chọn lựa như Bảng 2.

Bảng 1. Các thông số của hệ thống ổn định mức chất lỏng

Ký hiệu	Thông số	Đơn vị	Ý nghĩa
H_{max}	16,5	(cm)	độ cao cực đại
A_{max}	153,9	(cm ²)	tiết diện ngang cực đại
A_{min}	118,8	(cm ²)	tiết diện ngang cực tiểu
a	0,126	(cm ²)	tiết diện van xả
k	300	(cm ³ /s/V)	hệ số tỉ lệ với công suất máy bơm
g	981	(cm/s ²)	gia tốc trọng trường

Bảng 2. Các tham số GA

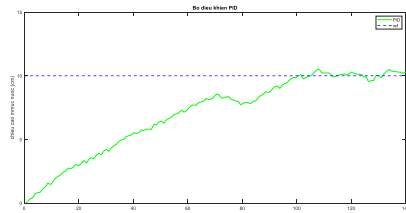
Số cá thể	40
Nhiệm sắc thể	9
Số gen	10
Đột biến	0,001-0,01
Lai ghép	0,1
Số thế hệ tối đa	100
α	0,02
β	50

Các tham số của bộ PID được chọn theo các thông số tham khảo từ [14], bộ điều khiển FUZZY-PID và GA-PID được xây dựng để so sánh đánh giá chất lượng của ba bộ điều khiển trên cùng một mô hình.

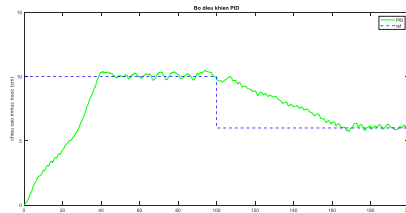
Các tham số của giải thuật FUZZY-PID được chọn lựa thông qua mô phỏng và thực nghiệm như sau: $K_e = 29$, $K_{et} = 1$, $k_1 = 1$, $k_2 = 50$, $k_3 = 1$, $K_{p0} = 1$, $K_{i0} = 0,15$, $K_{d0} = 0,8$. Nhóm tác giả đã thực nghiệm trên ba bộ điều khiển để đánh giá tính ổn định của cả hệ thống vòng kín.

3.2. Kết quả thực nghiệm và thảo luận

Thực nghiệm 1: điều khiển thời gian thực sử dụng bộ điều khiển PID với mực chất lỏng tham chiếu là 10 cm cho kết quả như Hình 15 và khi giảm xuống 6 cm cho kết quả như Hình 16.



Hình 15. Kết quả thực nghiệm bộ PID trên mô hình với mực chất lỏng tham chiếu là 10 cm



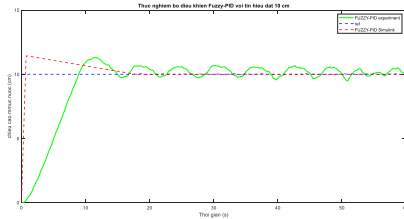
Hình 16. Kết quả thực nghiệm bộ PID trên mô hình với tín hiệu giảm từ 10 cm xuống 6 cm

Thực nghiệm 2: điều khiển ổn định mức sử dụng bộ điều khiển FUZZY-PID với tín hiệu đặt là 10 cm được trình bày như Hình 17 và khi giảm xuống 6 cm cho kết quả như Hình 18.

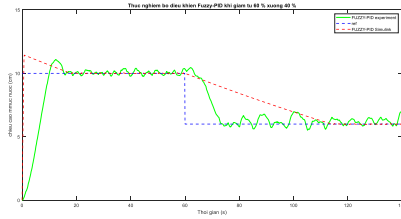
Thực nghiệm 3: điều khiển ổn định mức sử dụng bộ điều khiển GA-PID với tín hiệu đặt là 10 cm được trình bày như Hình 19 và khi giảm xuống 6 cm cho kết quả như Hình 20.

Sau khi tiến hành cải tiến bộ điều khiển PID sử dụng giải thuật GA và thuật toán FUZZY, các tín hiệu vào và ra của hệ thống được vẽ trên cùng đồ thị, để so sánh trực quan kết quả các bộ điều

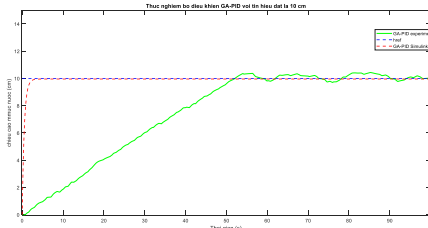
hiển. Đồng thời, kết quả vọt lố của hệ thống sau khi thực nghiệm được trình bày như Hình 21 và Hình 22.



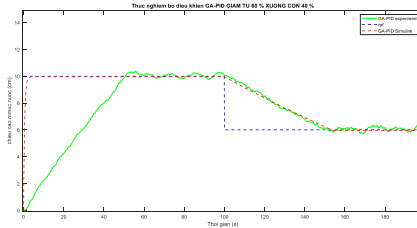
Hình 17. Kết quả thực nghiệm bộ FUZZY-PID trên mô hình với tín hiệu đặt là 10 cm



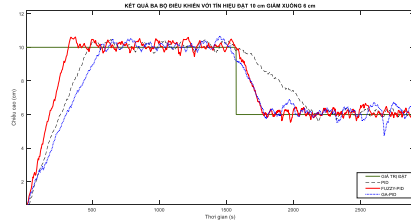
Hình 18. Kết quả thực nghiệm bộ FUZZY-PID với tín hiệu đáp ứng của hệ thống 10 cm giảm xuống 6 cm



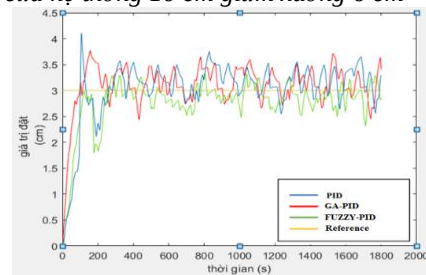
Hình 19. Kết quả thực nghiệm bộ GA-PID trên mô hình với tín hiệu đặt là 10 cm



Hình 20. Kết quả thực nghiệm bộ GA-PID với tín hiệu của hệ thống 10 cm giảm xuống 6 cm



Hình 21. Kết quả của các bộ điều khiển



Hình 22. Độ vọt lố của các bộ điều khiển

Các chỉ tiêu chất lượng của hệ thống được trình bày ở Bảng 3.

Bảng 3. So sánh các chỉ tiêu chất lượng của hệ thống ở mức đặt là 6 cm

Chỉ tiêu chất lượng	Thời gian tăng (s)	Thời gian xác lập (s)	Sai số xác lập (cm)
PID	55	100	0,5
FUZZY-PID	45	70	0,2
GA-PID	50	50	0,3

Thông qua kết quả cho thấy bộ điều khiển PID có độ vọt lố cao, thời gian đáp ứng chậm. Còn bộ điều khiển FUZZY-PID và GA-PID cho độ vọt lố tốt hơn, thời gian đáp ứng của hệ thống nhanh hơn, sai số ngõ ra thấp phù hợp để điều khiển các hệ thống ổn định chất lỏng ứng dụng trong các nhà máy vừa và nhỏ.

4. Kết luận

Bộ điều khiển tự chỉnh định FUZZY-PID và GA-PID được thiết kế trong bài báo để điều khiển ổn định mức chất lỏng. Kết quả mô phỏng cho thấy các tiêu chuẩn chất lượng của hệ thống được cải thiện và đạt giá trị tốt hơn so với bộ điều khiển PID truyền thống. Hai bộ điều khiển được thiết kế có tính ổn định, đáp ứng nhanh, độ quá điều chỉnh không đáng kể và có sai số xác lập nhỏ trong quá trình điều khiển ổn định mức chất lỏng trong hệ thống vòng kín. Đồng thời, bộ điều khiển được nhóm tác giả áp dụng trên mô hình thực nghiệm điều khiển ổn định mức chất lỏng thật do nhóm chế tạo. Quá trình thực nghiệm trên mô hình được trình bày trong phần phụ lục bài báo, kết quả cho thấy Arduino vẫn là giải pháp lý tưởng cho các ứng dụng nhỏ, linh hoạt,

tiết kiệm và có thể tùy chỉnh dễ dàng trong công nghiệp. Trong tương lai, nhóm sẽ tiếp tục thực nghiệm điều khiển hệ thống ổn định mức chất lỏng sử dụng mạng nơ-ron mờ hồi quy kết hợp giao tiếp IOT để điều khiển và giám sát hệ thống vòng kín hiệu quả hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] P. K. Juneja, S. K. Sunori, A. Sharma, A. Sharma, H. Pathak, V. Joshi, and P. Bhasin, "A Review on Control System Applications in Industrial Processes," *IOP Confer. Series: Materials Science and Eng.*, vol. 1022, 2021, Art. no. 012010.
- [2] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 115, no. 2B, pp. 220-222, 1993.
- [3] F. Long, Y. Yao, Y. Zhou, and J. He, "Simulation Analysis of Three-Tank Water Tank Level Control System Based on Improved PSO-Fuzzy PID," *2024 5th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT), Nanjing, China*, 2024, pp. 1833-1837.
- [4] B. N. Getu and H. A. Attia, "Automatic Water Level Sensor and Controller System," *International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications*, vol. 119, pp. 1-10, 2016.
- [5] L. Chen, C. Wang, Y. Yu, and Y. Zhao, "The research on boiler drum water level control system based on self-adaptive fuzzy-PID," *Chinese Control and Decision Conference*, 2010, pp. 82-84.
- [6] Z. Muhammad, S. H. A. Dziauddin, S. A. Hamid, and N. A. M. Leh, "Water Level Control in Boiler System Using Self-tuning Fuzzy PID Controller," *2023 IEEE 13th International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), Penang, Malaysia*, vol. 9, pp. 232-237, 2023.
- [7] M. A. -M. Mohammad, A. Al-Mbaideen, A. I. Al-Odienat, K. M. Alawasa, and S. F. Al-Gharaibeh, "An Optimal Nonlinear Type-2 Fuzzy FOPID Control Design Based on Integral Performance Criteria Using FSM," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 53439 -53467, 2023.
- [8] W. A. Shutnan *et al.*, "Modeling and Control of a 3DOF Robot Manipulator Using Artificial Fuzzy-Immune FOPID Controller," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 153074-153088, 2024.
- [9] S. Wang, H. Liang, Y. Xia, and G. Wang, "Leveling Strategy of Active Hydraulic Suspension System Based on GA-PID Controllers," *2022 IEEE 2nd International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA), Dalian, China*, 2022, pp. 1043-1048.
- [10] G. L. Hailu and T. T. Yetayew, "A Comparative Evaluation of GA and PSO Tuned PID Controllers for the Quadruple Tank System," *2024 International Conference on Information and Communication Technology for Development for Africa (ICT4DA), Bahir Dar, Ethiopia*, 2024, pp. 7-12.
- [11] N. W. Madebo, "Enhancing Intelligent Control Strategies for UAVs: A Comparative Analysis of Fuzzy Logic, Fuzzy PID, and GA-Optimized Fuzzy PID Controllers," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 48-63, 2025.
- [12] C. Illes, G. N. Popa, and I. Filip, "Water Level Control System Using PLC and Wireless Sensors," *International Conference on Computational Cybernetics*, 2013, pp. 195-199.
- [13] E. Susanto and A. S. Wibowo, "Design and Implementation of Water Level Control Using Gain Scheduling PID Back Calculation Integrator Anti Windup," *International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications*, 2016, pp. 101-104.
- [14] M. T. Vo, P. L. Nguyen, and V. D. H. Nguyen, "Single water level control using discrete PID controller," *Dong Thap University Journal of Science*, no. 40, pp. 77-82, 2019.
- [15] M. A. Johnson and M. H. Moradi, "Chapter 8," in *PID Control - New Identification and Design Methods*, Springer-Verlag London Limited, 2005, pp. 297-337.
- [16] A. Leva, C. Cox, and A. Ruano, "Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization," *IFAC. Professional Brief*, 2002, pp. 92-98.
- [17] K. J. Åström and T. Hägglund, *Automatic Tuning of PID Controllers*, Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, 1998, pp. 72-78.
- [18] F. C. Liu, L. H. Liang, and J. J. Gao, "Fuzzy PID Control of Space Manipulator for Both Ground Alignment and Space Applications," *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 11, pp. 353-360, 2014.
- [19] D. Acharya and D. K. Das, "Human Conception Optimizer-Based Optimal Type-2 Fuzzy PID Controller Design for Artificial Respiratory System," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems*, vol. 54, no. 9, pp. 5388-5399, Sept. 2024.

- [20]M. Namazov, "DC motor position control using fuzzy proportional-derivative controllers with different defuzzification methods," *An Official Journal of Turkish Fuzzy Systems Association*, vol. 1, no.1, pp. 36-54, 2010.
- [21]R. Tipsuwanpom, T. Runghimmawan, S. Intajag, and V. Krongratana, "Fuzzy logic PID controller based on FPGA for process control," *2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Ajaccio, France*, vol. 2, pp. 1495-1500, 2004.
- [22]C. N. Nguyen, "PID Controller Optimization using Genetic Algorithm," *Can Tho University Journal of Science*, vol. 9, pp. 241-248, 2008.
- [23]L. A. Yusuf and N. Magaji, "GA-PID controller for position control of inverted pendulum," *2014 IEEE 6th International Conference on Adaptive Science & Technology, Ota, Nigeria*, vol. 2, pp. 1-5, 2014.
- [24]R. Sharma, K. P. S. Rana, and V. Kumar, "Statistical analysis of GA based PID controller optimization for robotic manipulator," *2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT)*, Ghaziabad, India, February 7 – 8, 2014, pp. 713-718.
- [25]D. C. Meena and A. Devanshu, "Genetic algorithm tuned PID controller for process control," *2017 International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, Coimbatore, India, 2017, pp. 1-6.
- [26]E. Flores-Morán, W. Yáñez-Pazmiño and J. Barzola-Monteses, "Genetic algorithm and fuzzy self-tuning PID for DC motor position controllers," *2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Szilvasvarad, Hungary, 2018, pp. 162-168.
- [27]A. Alouache and Q. Wu, "Genetic Algorithms for Trajectory Tracking of Mobile Robot Based on PID Controller," *2018 IEEE 14th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, Cluj-Napoca, Romania, 2018, pp. 237-241.
- [28]T. Ahmmed, I. Akhter, S. M. R. Karim, and F. A. S. Ahamed, "Genetic Algorithm Based PID Parameter Optimization," *American Journal of Intelligent Systems*, vol. 10, pp. 8-13, 2020.
- [29]J. G. Guarnizo and J. Avendano, "Liquid level system as a pedagogical tool to teach fuzzy control," *2017 International Conference on Electronics, Communications and Computers*, Mexico, 2017, pp.1-5.

Phụ lục – Clip minh họa

<https://www.youtube.com/watch?v=XAKupl6yXP8>