ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

BÁO CÁO TỔNG KẾT

ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG

XÂY DỰNG MÔ HÌNH GIÁM SÁT THÔNG SỐ RÒ RỈ CỦA HỆ THỐNG NƯỚC NGOÀI TRỜI PHỤC VỤ GIẢNG DẠY VÀ ĐÀO TẠO STEM

Mã số: T2025-06-01

Chủ nhiệm đề tài: TS. Phạm Thanh Phong
Đơn vị: Khoa Điện – Điện tử
Chương trình đào tạo: Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

Đà Nẵng, 10/2026

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

BÁO CÁO TỔNG KẾT

ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG

XÂY DỰNG MÔ HÌNH GIÁM SÁT THÔNG SỐ RÒ RỈ CỦA HỆ THỐNG NƯỚC NGOÀI TRỜI PHỤC VỤ GIẢNG DẠY VÀ ĐÀO TẠO STEM

Mã số: T2025-06-01

Xác nhận của cơ quan chủ trì đề tài

KT. HIỆU TRƯỞNG

PHÓ HIỆU TRƯỞNG

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG

PGS. TS. Võ Trung Hùng

Chủ nhiệm đề tài

TS. Phạm Thanh Phong

DANH SÁCH THÀNH VIÊN THAM GIA NGHIÊN CỨU

STT	Họ và tên	Đơn vị công tác và lĩnh vực chuyên môn
1.	**ThS. Võ Khánh Thoại**	Khoa Điện – Điện tử Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng Chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa
2.	**ThS. Dương Quang Thiện**	Khoa Điện – Điện tử Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng Chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa

MỤC LỤC

MỤC LỤC 4
DANH MỤC HÌNH ẢNH i
DANH MỤC BẢNG BIỂU ii
DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT iv
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ ĐỀ TÀI 1
1.1. Tính cấp thiết 1
1.2. Tổng quan tình hình nghiên cứu 1
1.2.1. Ngoài nước 1
1.2.2. Trong nước 2
1.3. Mục tiêu đề tài 5
1.4. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu 5
1.5. Các tiếp cận, phương pháp nghiên cứu 6
1.5.1. Cách tiếp cận 6
1.5.2. Phương pháp nghiên cứu 6
1.6. Kết luận chương 1 6
CHƯƠNG 2: XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHẦN CỨNG, TRUYỀN THÔNG 4G VÀ HỆ THỐNG SCADA 7
2.1 Yêu cầu và kiến trúc tổng thể 7
2.1.1. Mục tiêu và yêu cầu thiết kế 7
2.1.2. Kiến trúc tổng thể của hệ thống 8
2.1.3. Quy ước các đại lượng đo 8
2.1.4. Nguyên lý hoạt động 9
2.1.5. Khả năng phục vụ đào tạo và mở rộng 10
2.2. Thiết kế hệ thống đường ống và trạm bơm 10
2.2.1. Cấu trúc tuyến ống tuần hoàn 10
2.2.2. Bố trí các vị trí tạo rò rỉ thực nghiệm 11
2.2.3. Yêu cầu thi công cơ khí và an toàn thủy lực 11
2.3. Lựa chọn cảm biến và thiết bị điều khiển 11
2.3.1. Nguyên tắc và tiêu chí lựa chọn thiết bị 11
2.3.2. Lựa chọn cảm biến áp suất 14
2.3.3. Lựa chọn cảm biến lưu lượng 15

2.3.4. Lựa chọn PLC Siemens S7-1200 16
2.3.5. Lựa chọn vi điều khiển ESP32 18
2.3.6. Lựa chọn module truyền thông 4G A7680C 19
2.3.7. Lựa chọn máy tính nhúng Raspberry Pi 4 20
2.3.8. Lựa chọn nguồn, module analog và thiết bị bảo vệ 21
2.3.9. Tổng hợp thiết bị được lựa chọn 21
2.4. Thiết kế thu thập và chuẩn hóa dữ liệu 22
2.4.1. Chuỗi đo và giao tiếp phần cứng 22
2.4.2. Lấy mẫu, lọc và cờ chất lượng 23
2.5. Thiết kế truyền thông 4G 23
2.5.1. Lựa chọn phương án truyền thông 23
2.5.2. Cấu trúc truyền thông TCP/IP 23
2.5.3. Phần mềm nút hiện trường 24
2.5.4. Tiếp nhận dữ liệu tại PLC trung tâm và độ tin cậy 25
2.6. Thiết kế hệ thống SCADA 25
2.6.1. Kiến trúc và chức năng 25
2.6.2. Quy ước tag 26
2.6.3. Giao diện, xu hướng và cảnh báo 26
2.6.4. Lưu trữ và truy xuất dữ liệu 26
2.7. Tích hợp, vận hành và khai thác mô hình 27
2.7.1. Quy trình tích hợp 27
2.7.2. Quy trình vận hành 27
2.7.3. Yêu cầu an toàn 27
2.7.4. Khai thác trong đào tạo STEM 28
2.8. Kết luận chương 2 28
CHƯƠNG 3: MÔ HÌNH TOÁN HỌC VÀ THUẬT TOÁN CHẨN ĐOÁN RÒ RỈ 29
3.1. Cơ sở mô hình hóa và quy ước ký hiệu 29
3.1.1. Các giả thiết mô hình 29
3.1.2. Phương trình động lượng và liên tục 30
3.2. Mô hình hệ thống ở trạng thái bình thường 30
3.2.1. Điều kiện biên và biến trạng thái 30

3.2.2. Dạng trạng thái 31
3.2.3. Xây dựng mô hình trên MATLAB/Simulink 31
3.3. Xác định tham số bằng Parameter Estimation 32
3.3.1. Thu thập và tổ chức dữ liệu 32
3.3.2. Khởi tạo tham số và tạo timeseries 33
3.3.3. Các bước sử dụng Parameter Estimation 34
3.4. Mô hình hệ thống khi xảy ra rò rỉ 35
3.4.1. Quan hệ lưu lượng rò 35
3.4.2. Mô hình ba trạng thái 36
3.4.3. Mô hình trạng thái mở rộng 36
3.5. Biểu diễn mô hình dưới dạng LPV 37
3.5.1. Lựa chọn biến lập lịch 37
3.5.2. Ma trận LPV 37
3.6. Thiết kế bộ quan sát trạng thái bền vững 39
3.6.1. Cấu trúc bộ quan sát 39
3.6.2. Phương trình sai số và điều kiện LMI 39
3.6.3. Giải LMI tại các đỉnh đa diện 39
3.6.4. Nội suy ma trận khuếch đại trong miền đa diện 40
3.6.5. Xây dựng bộ quan sát trên MATLAB/Simulink 41
3.7. Thuật toán chẩn đoán và quy trình thực hiện 41
3.8. Kết luận chương 3 42
CHƯƠNG 4: THỰC NGHIỆM, ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHỤC VỤ GIẢNG DẠY STEM 43
4.1. Bố trí thực nghiệm đánh giá mô hình 43
4.1.1. Cấu trúc chương trình thực nghiệm 43
4.1.2. Dữ liệu nhận dạng và tham số mô hình 43
4.1.3. Kịch bản thực nghiệm rò rỉ 44
4.2. Kết quả vận hành hệ thống thu thập và giám sát 44
4.3. Kết quả chẩn đoán vị trí rò rỉ 45
4.3.1. Kết quả từng kịch bản 45
4.3.2. Tính các chỉ tiêu sai số 46
4.4. Phân tích và thảo luận 46

4.4.1. Khả năng chẩn đoán trong vùng giữa tuyến 46
4.4.2. Giới hạn tại vùng biên..... 47
4.4.3. Những yếu tố ảnh hưởng đến sai số..... 47
4.5. Đánh giá mức độ đáp ứng yêu cầu xây dựng mô hình 48
4.6. Đánh giá khả năng khai thác mô hình trong giảng dạy STEM..... 48
4.7. Hệ thống bài giảng và bài thực hành STEM xây dựng từ mô hình 50
4.7.1. Nguyên tắc chuyển kết quả nghiên cứu thành học liệu STEM... 50
4.7.2. Danh mục 04 bài giảng 51
4.7.3. Danh mục 04 bài thực hành 51
4.7.4. Cấu trúc và minh chứng của bộ học liệu riêng 52
4.8. Đánh giá khả năng áp dụng và chuyển giao 53
4.8.1. Khả năng tổ chức giảng dạy..... 53
4.8.2. Đánh giá và giới hạn 53
4.8.3. Phương thức chuyển giao 54
4.9. Kết luận chương 4 54
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ..... 56
TÀI LIỆU THAM KHẢO..... 57
PHỤ LỤC
Thuyết minh đề tài khoa học và công nghệ cấp trường năm 2025
Giấy xác nhận phối hợp thực hiện và sử dụng sản phẩm sau khi hoàn thành đề tài cấp trường
Hợp đồng triển khai thực hiện đề tài
Bảng Mục lục minh chứng sản phẩm
Bộ minh chứng sản phẩm

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 2.1. Sơ đồ tuyến ống thực nghiệm và các vị trí tạo rò rỉ..... 8
Hình 2.2. Quy ước H_1, H_3, Q_1 và Q_2 trên tuyến ống 9
Hình 2.3. Cảm biến áp suất MBS3000 14
Hình 2.4. Cảm biến lưu lượng SAGINOMIYA PLK-1522PE..... 15
Hình 2.5. PLC Siemens S7-1200 17
Hình 2.6. Module ESP32 18
Hình 2.7. Module SIM 4G A7680C..... 19
Hình 2.8. Máy tính nhúng Raspberry Pi 4 20
Hình 2.9. Cấu trúc hệ thống SCADA giám sát đường ống..... 25
Hình 3.1. Mô tả tuyến ống ở trạng thái không rò rỉ..... 30
Hình 3.2. Mô hình đường ống bình thường trên MATLAB/Simulink 32
Hình 3.3. Các mảng dữ liệu đư c đưa vào MATLAB Workspace 33
Hình 3.4. Giao diện theo dõi quá trình Parameter Estimation..... 35
Hình 3.5. Kết quả xem trước sau quá trình ước lượng 35
Hình 3.6. Mô tả tuyến ống khi xảy ra rò rỉ 36
Hình 3.7. Mô hình LPV của hệ thống trên MATLAB/Simulink 38
Hình 3.8. Khối subsystem của mô hình đường ống..... 38
Hình 3.9. Minh họa phương pháp đa diện dùng cho biến lập lịch..... 40
Hình 3.10. Chương trình thực nghiệm bộ quan sát trên Simulink..... 41
Hình 4.1. Chương trình thực nghiệm bộ quan sát trên MATLAB/Simulink43
Hình 4.2. Sai số vị trí trong các kịch bản thực nghiệm..... 45

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1. Các yêu cầu chính của mô hình 7
Bảng 2.2. Phân tầng kiến trúc hệ thống 8
Bảng 2.3. Ý nghĩa và đơn vị của các đại lượng đo 9
Bảng 2.4. Tiêu chí lựa chọn thiết bị 12
Bảng 2.5. Thông số cảm biến áp suất 14
Bảng 2.6. Thông số cảm biến lưu lượng 16
Bảng 2.7. So sánh các phương án PLC 17
Bảng 2.8. So sánh nền tảng vi điều khiển 18
Bảng 2.9. Thông số module 4G 19
Bảng 2.10. So sánh máy tính nhúng 20
Bảng 2.11. Danh mục thiết bị chính của hệ thống 21
Bảng 2.12. Phân bổ tín hiệu dự kiến 22
Bảng 2.13. So sánh Wi-Fi, LoRa và 4G 23
Bảng 2.14. Các trường trong bản tin 24
Bảng 2.15. Trạng thái phần mềm nút 4G 24
Bảng 2.16. Nhóm tag SCADA 26
Bảng 2.17. Nhóm dữ liệu cần lưu 26
Bảng 2.18. Trình tự tích hợp và kiểm thử 27
Bảng 3.1. Ký hiệu sử dụng trong mô hình 29
Bảng 3.2. Phân loại tín hiệu trong mô hình bình thường 31
Bảng 3.3. Trình tự nhận dạng tham số 34
Bảng 3.4. Thuật toán giải LMI tại các đỉnh 40
Bảng 3.5. Quy trình chẩn đoán vị trí rò rỉ 41
Bảng 4.1. Các kịch bản thực nghiệm 44
Bảng 4.2. Kết quả thực nghiệm chẩn đoán vị trí rò rỉ 45
Bảng 4.3. Tổng hợp chỉ tiêu sai số 46
Bảng 4.4. Đánh giá kết quả theo mục tiêu 48
Bảng 4.5. Đánh giá khả năng khai thác mô hình trong giảng dạy STEM 49
Bảng 4.6. Thành tố STEM được khai thác từ mô hình 50

Bảng 4.7. Danh mục và đầu ra của 04 bài giảng 51
Bảng 4.8. Danh mục và sản phẩm của 04 bài thực hành 51
Bảng 4.9. Thành phần bộ học liệu STEM chuyển giao 52
Bảng 4.10. Rubric tổng hợp đề xuất cho hoạt động STEM.....53

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Chú thích
4G	Mạng thông tin di động thế hệ thứ tư
H_2	Chuẩn hiệu năng H_2
IoT	Internet of Things - Internet vạn vật
LMI	Linear Matrix Inequality - Bất đẳng thức ma trận tuyến tính
LPV	Linear Parameter-Varying - Hệ tuyến tính có tham số biến thiên
MAE	Mean Absolute Error – Sai số tuyệt đối trung bình
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport - Giao thức truyền dữ liệu nhẹ, thường dùng trong IoT
NRMSE	Normalized Root Mean Squared Error – Sai số bình phương trung bình chuẩn hóa
PLC	Programmable Logic Controller - Bộ điều khiển logic khả trình
RMSE	Root Mean Square Error – Căn sai số bình phương trung bình
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition - Điều khiển giám sát và thu thập dữ liệu
STEM	Thuật ngữ viết tắt của các từ khoa học (Science), công nghệ (Technology), kĩ thuật (Engineering) và toán học (Mathematics)
TCP/IP	Bộ giao thức truyền thông mạng TCP/IP
UART	Giao tiếp nối tiếp không đồng bộ

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐH SƯ PHẠM KỸ THUẬT

CỘNG HOÀ XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

1. Thông tin chung:

- Mã số: T2025-06-01
- Tên đề tài: Xây dựng mô hình giám sát thông số rò rỉ của hệ thống nước ngoài trời phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM.
- Chủ nhiệm: TS. Phạm Thanh Phong
- Thành viên tham gia: ThS. Võ Khánh Thoại, ThS. Dương Quang Thiện
- Cơ quan chủ trì: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật
- Thời gian thực hiện: 10/2025 - 9/2026

2. Mục tiêu:

- Xây dựng mô hình chẩn đoán hệ thống đường ống nước mới sử dụng công nghệ truyền thông 4G để truyền dữ liệu của các cảm biến gắn ở hai đầu đường ống về trung tâm giám sát, với đư ng ống đặt ngoài trời.
- Xây dựng giao diện giám sát với chạy trên máy tính trung tâm đặt trong nhà xưởng, phục vụ việc giám sát hệ thống đư ng ống ngoài trời.
- Xây dựng bài giảng định hướng đào tạo STEM để phục vụ cho sinh viên.

3. Tính mới và sáng tạo:

Đề tài tích hợp mô hình đường ống nước ngoài trời, cảm biến lưu lượng và áp suất, truyền thông không dây 4G, mô hình toán học dựa trên động lực học chất lỏng và bộ quan sát trạng thái bền vững H_2 trong cùng một hệ thống giám sát. Kết quả được định hướng đồng thời cho nghiên cứu chẩn đoán rò rỉ và đào tạo STEM, giúp sinh viên tiếp cận một bài toán liên ngành gồm cảm biến, truyền thông, lập trình, mô hình hóa và kỹ thuật điều khiển.

4. Tóm tắt kết quả nghiên cứu:

Đề tài xây dựng mô hình giám sát hệ thống đường ống nước ngoài trời với các cảm biến đo lưu lượng và áp suất bố trí ở hai đầu đường ống. Dữ liệu cảm biến được thu thập và truyền về trung tâm giám sát thông qua mạng truyền thông không dây 4G. Trên cơ sở lý

thuyết động lực học chất lỏng, mô hình toán học của hệ thống đường ống được xây dựng làm cơ sở cho thiết kế bộ quan sát trạng thái bền vững H_2 nhằm ước lượng vị trí rò rỉ. Đồng thời, đề tài xây dựng giao diện giám sát trên máy tính trung tâm và hệ thống tài liệu phục vụ đào tạo STEM gồm 04 bài giảng và 04 bài thực hành về mô hình hóa, mô phỏng, chẩn đoán rò rỉ và xây dựng giao diện giám sát.

5. Sản phẩm:

5.1. Sản phẩm khoa học

Các sản phẩm khoa học đáp ứng theo yêu cầu theo đăng ký trong thuyết minh

[1] Hệ thống các bài giảng và bài thực hành theo định hướng đào tạo STEM phục vụ cho việc hướng dẫn sinh viên.

- 04 bài giảng gồm:
  - Bài giảng 1: Tổng quan hệ thống đường ống nước và các phương pháp chẩn đoán rò rỉ.
  - Bài giảng 2: Xây dựng mô hình toán học cho một đoạn đường ống nước có một đầu vào và một đầu ra.
  - Bài giảng 3: Xây dựng bộ quan sát trạng thái nhằm chẩn đoán vị trí điểm rò rỉ trong đường ống nước.
  - Bài giảng 4: Phương pháp mô phỏng hệ thống đường ống trên Matlab/Simulink.
- 04 bài thực hành gồm:
  - Bài thực hành 1: Lập trình mô phỏng hệ thống đường ống nước trên Matlab/Simulink.
  - Bài thực hành 2: Lập trình mô phỏng bộ quan sát trạng thái chẩn đoán rò rỉ cho hệ thống đường ống trên Matlab/Simulink.
  - Bài thực hành 3: Lập trình thực nghiệm bằng Matlab/Simulink cho máy tính nhúng để chẩn đoán rò rỉ.
  - Bài thực hành 4: Xây dựng giao diện giám sát.

5.2. Sản phẩm ứng dụng

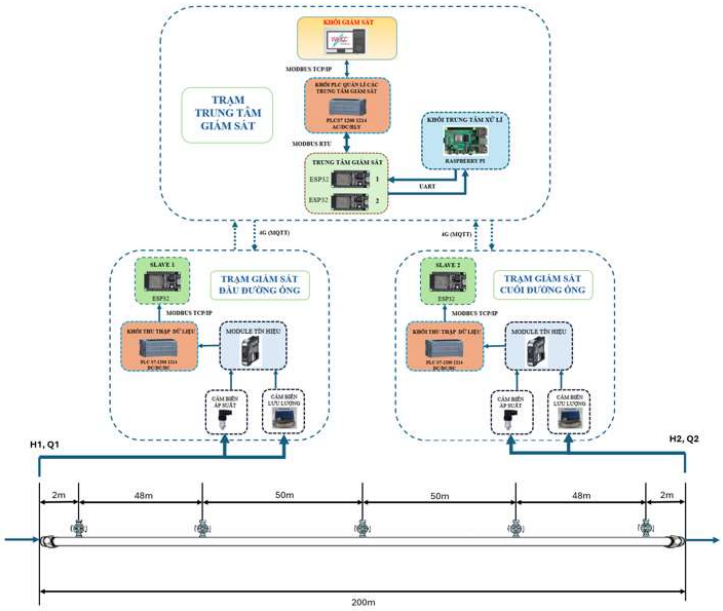
Các sản phẩm đáp ứng theo yêu cầu theo đăng ký trong thuyết minh

[1] Mô hình hệ thống với đường ống đặt ngoài trời có các cảm biến gắn ở hai đầu đư ng ống và trung tâm giám sát đặt trong nhà xưởng. Áp dụng mạng truyền thông không dây 4G trong việc truyền tải dữ liệu.

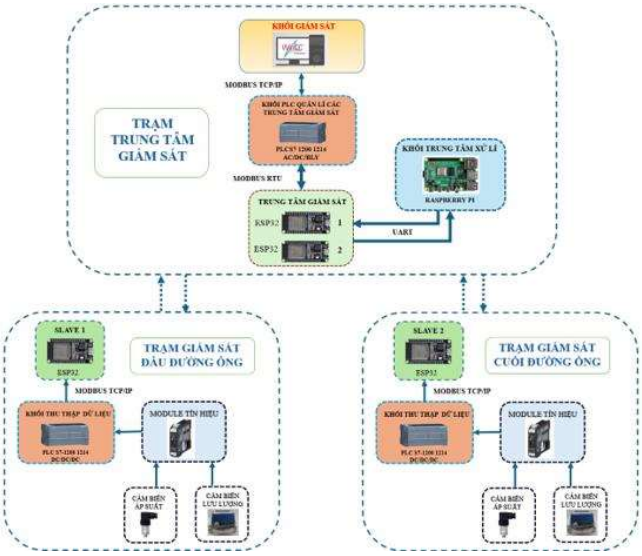
6. Hiệu quả, phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu và khả năng áp dụng:

- Hiệu quả đối với giáo dục và đào tạo:
  - Sản phẩm của đề tài có thể được dùng là nguồn tài liệu tham khảo để phục vụ đào tạo.
  - Nâng cao chất lượng giảng dạy và đào tạo theo định hướng STEM.
- Hiệu quả đối với kinh tế - xã hội:
  - Giải pháp chẩn đoán vị trí rò rỉ trong đường ống nước có thể được các đơn vị cấp nước, phòng thí nghiệm ứng dụng nhằm giám sát, quản lý hệ thống cấp nước đô thị và phát hiện sớm sự cố rò rỉ.
- Phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu:
  - Sản phẩm đề tài được chuyển giao trực tiếp cho bộ môn Tự động hóa thuộc khoa Điện – Điện tử, trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật để phục vụ nghiên cứu và đào tạo.

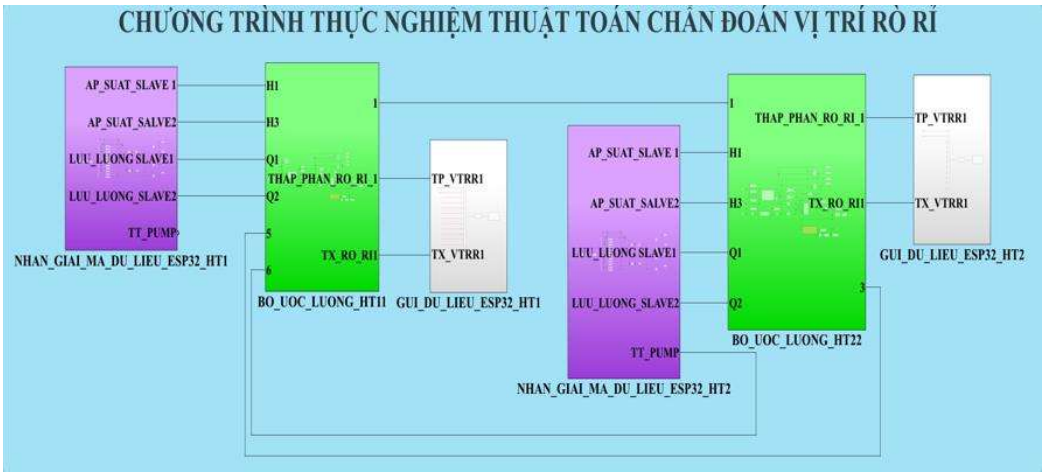
7. Hình ảnh, sơ đồ minh họa chính



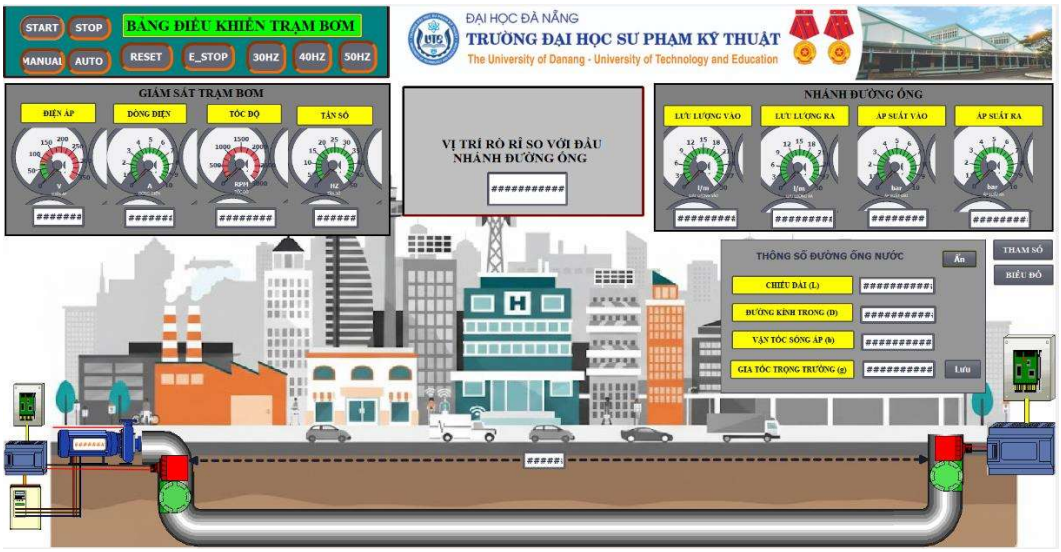
Hình 1. Sơ đồ tổng thể mô hình giám sát hệ thống đường ống nước ngoài trời.



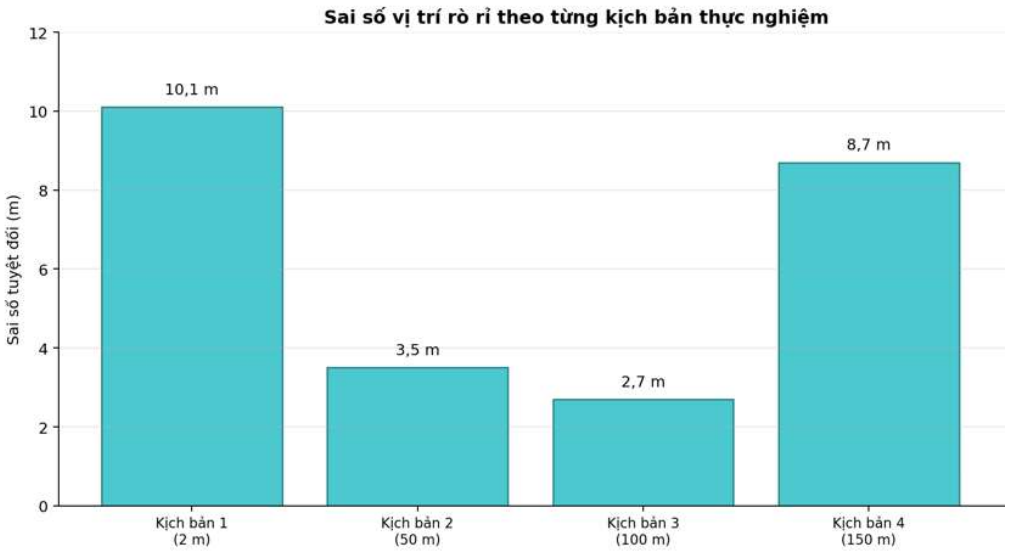
Hình 2. Cấu trúc hệ thống SCADA giám sát đư ng ống



Hình 3. Chương trình thực nghiệm trên Simulink



Hình 4. Giao diện giám sát SCADA của hệ thống.



Hình 5. Biểu đồ sai số của các kịch bản thực nghiệm

Ngày 06 tháng 10 năm 2026

TRƯỞNG KHOA | **Chủ nhiệm đề tài**

(ký, họ và tên)

TS. Trần Hoàng Vũ | **TS. Phạm Thanh Phong**

XÁC NHẬN CỦA TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

KT. HIỆU TRƯỞNG

PHÓ HIỆU TRƯỞNG

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG

PGS. TS. Võ Trung Hùng

Mẫu 4. Thông tin kết quả nghiên cứu bằng tiếng Anh

INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

1. General information:

Project title: Development of a Monitoring Model for Leakage Parameters in an Outdoor Water Pipeline System for STEM Education and Training

Code number: T2025-06-01

Coordinator: Dr. Phạm Thanh Phong

Implementing institution: The University of Danang - University of Technology and Education

Duration: from October 2025 to September 2026

2. Objective(s):

- Develop a diagnostic model for an outdoor water pipeline system using 4G communication to transmit data from sensors installed at both ends of the pipeline to a monitoring center.
- Develop a monitoring interface running on a central computer located inside the laboratory/workshop for monitoring the outdoor pipeline system.
- Develop STEM-oriented teaching materials for students.

3. Creativeness and innovativeness:

The project integrates an outdoor water-pipeline testbed, flow and pressure sensors, 4G wireless communication, a fluid-dynamics-based mathematical model, and a robust H_2 state observer within a unified monitoring system. The outcomes are intended for both leak-diagnosis research and STEM education, enabling students to engage with an interdisciplinary problem involving sensing, communications, programming, modeling, and control engineering.

4. Research results:

The project develops a monitoring model for an outdoor water pipeline system with flow and pressure sensors installed at both ends of the pipeline. Sensor data are acquired and transmitted to the monitoring center via a 4G wireless communication network. Based on

fluid-dynamics theory, a mathematical model of the pipeline system is established as the basis for designing a robust H_2 state observer to estimate the leak location. In parallel, the project develops a monitoring interface for the central computer and a set of STEM-oriented educational materials comprising 04 lectures and 04 laboratory exercises on modeling, simulation, leak diagnosis, and monitoring-interface development.

5. Products:

5.1. Scientific outputs

The scientific outputs satisfy the requirements registered in the approved project proposal:

[1] A set of STEM-oriented lectures and laboratory exercises for student instruction.

- 04 lectures:

- Lecture 1: Overview of water pipeline systems and leak-diagnosis methods.
- Lecture 2: Development of a mathematical model for a water-pipeline segment with one inlet and one outlet.
- Lecture 3: Design of a state observer for leak localization in a water pipeline.
- Lecture 4: Methods for simulating water pipeline systems in MATLAB/Simulink.

- 04 laboratory exercises:

- Laboratory exercise 1: Programming and simulation of a water pipeline system in MATLAB/Simulink.
- Laboratory exercise 2: Programming and simulation of a state observer for leak diagnosis in a water pipeline system using MATLAB/Simulink.
- Laboratory exercise 3: Experimental programming and implementation in MATLAB/Simulink on an embedded computing platform for leak diagnosis.
- Laboratory exercise 4: Development of a monitoring interface.

5.2. Application product

The application product satisfies the requirements registered in the approved project proposal:

[1] An outdoor water-pipeline system model with sensors installed at both ends of the pipeline and a monitoring center located inside the laboratory/workshop. A 4G wireless communication network is employed for data transmission.

6. Effects, transfer alternatives of research results and applicability:

- Educational and training effectiveness:

- The project outputs can be used as reference materials for teaching and training.
- The project contributes to improving the quality of STEM-oriented teaching and training.

- Socio-economic effectiveness:

- The proposed method for leak localization in water pipelines can be applied by water utilities and laboratories to monitor and manage urban water-supply systems and to enable early detection of leakage incidents.

- Method of research-result transfer:

- The project outputs will be transferred directly to the Department of Automation, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, The University of Danang - University of Technology and Education, for research and training purposes.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ ĐỀ TÀI

Chương 1 trình bày tính cấp thiết, tổng quan nghiên cứu, mục tiêu, đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu. Đồng thời làm rõ nhu cầu xây dựng mô hình giám sát rò rỉ hệ thống nước ngoài trời ứng dụng truyền thông 4G, SCADA và các thuật toán chẩn đoán phục vụ giảng dạy, nghiên cứu và đào tạo STEM trong lĩnh vực Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa.

1.1. Tính cấp thiết

Giải pháp sử dụng đường ống dẫn nước rất phổ biến và đóng vai trò quan trọng trong phục vụ đời sống dân. Theo báo cáo của tổ chức quốc tế về nguồn nước IWSA thì tỷ lệ thất thoát nước trong phạm vi toàn thế giới dao động trong khoảng từ 10% đến 55%. Tại Việt Nam, theo báo cáo thường niên của Công ty Cổ phần Cấp nước Đà Nẵng (DAWACO), trong năm 2023, công ty đã phát hiện, sửa chữa 9118 điểm ống bể, cải tạo, thay thế 3411 km đường ống cũ, kém chất lượng. Tỷ lệ thất thoát nước tính dồn năm 2023 là 14,75%. Trong khi đó, ở Hà Nội thống kê tỷ lệ thất thoát nước năm 2023 là 18% và tại thành phố Hồ Chí Minh là 14,09%. Tỷ lệ này đồng nghĩa với việc hàng trăm triệu mét khối nước sạch bị lãng phí, gây tổn thất lớn về tài nguyên, chi phí vận hành, ước tính lên đến hàng trăm tỷ đồng mỗi năm.

Việc phát hiện rò rỉ trong đường ống rất quan trọng nhằm tiết kiệm nguồn tài nguyên nước và bảo vệ môi trường. Để chẩn đoán được rò rỉ cần tích hợp nhiều công nghệ và sử dụng nhiều mảng kiến thức khác nhau, chẳn hạn như: kỹ thuật cảm biến, mạng truyền thông không dây, lập trình nhúng, lập trình PLC và các kiến thức về vật lý liên quan đến động lực học chất lỏng.

Ngoài ra, việc có một mô hình hệ thống thực tế thực hiện việc giảng dạy tích hợp liên học phần, giảng dạy và đào tạo STEM tạo hứng thú trong việc áp dụng các kiến thức khoa học cơ bản vào giải quyết các bài toán thực tế trong đời sống là một trong những định hướng phát triển của nhà trường. Do vậy, cần xây dựng một mô hình có thể tích hợp nhiều kiến thức từ nhiều học phần, tích hợp nhiều công nghệ khác nhau trong ngành Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và tự động hóa là rất cần thiết. Vì những lý do trên, trong phạm vi đề xuất này sẽ đề xuất đề tài "Xây dựng mô hình giám sát thông số rò rỉ của hệ thống nước ngoài trời phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM".

1.2. Tổng quan tình hình nghiên cứu

1.2.1. Ngoài nước

Nước sạch có vai trò quan trọng trong đời sống con người. Trên thế giới, các thành phố lớn đã xây dựng các mạng lưới đường ống để cung cấp nước cho người dân. Để đảm bảo hiệu quả vận hành và kịp thời phát hiện sự cố, các hệ thống giám sát, quản lý và vận hành mạng lưới nước đã được triển khai. Tuy nhiên, đường ống bị rò rỉ do tuổi thọ, áp lực nước hoặc tác động môi trường, vì vậy nhiều nghiên cứu đã phát triển các phương pháp chẩn đoán vị trí rò rỉ trong hệ thống đường ống nhằm giảm thiểu thất thoát nước và đảm bảo an toàn cấp nước.

Về phương pháp chẩn đoán vị trí rò rỉ, các nghiên cứu trên thế giới được chia thành ba hướng chính. Hướng thứ nhất, phát triển các bộ lọc Kalman, bộ quan sát trạng thái sử dụng mô hình toán học để ước lượng rò rỉ trong đường ống, đây là hướng tiếp cận có khả năng xử lý tín hiệu đo từ cảm biến, ước lượng trạng thái hệ thống và đảm bảo độ chính xác trong các điều kiện vận hành. Hướng thứ hai, tập trung vào xây dựng cơ sở phương pháp luận và kỹ thuật điều khiển, trong đó có mô hình hóa dòng chảy, thiết kế các giải pháp điều khiển tối ưu và điều khiển hệ LPV nhằm tăng tính ổn định và khả năng thích nghi của hệ thống. Hướng thứ ba, các tiếp cận thực nghiệm kết hợp với công nghệ mới như phương pháp phân tích âm thanh, phương pháp học máy và trí tuệ nhân tạo để dự báo và chẩn đoán sự cố. [1]–[4]

Bên cạnh các phương pháp chẩn đoán rò rỉ, các nghiên cứu còn tập trung vào việc tích hợp công nghệ IoT vào hệ thống giám sát và điều khiển đường ống nước. Việc sử dụng cảm biến lưu lượng kết hợp IoT cho phép theo dõi liên tục, truyền dữ liệu về trung tâm và phát hiện kịp thời các bất thường trong quá trình vận hành. Ngoài ra, các hệ thống cảm biến còn được phát triển nhằm không chỉ phát hiện rò rỉ mà còn giám sát chất lượng nước, áp suất và lưu lượng. Từ đó có thể thấy công nghệ IoT được sử dụng trong quản lý, giảm thiểu thất thoát và tối ưu vận hành hệ thống cấp nước.

Các nghiên cứu quốc tế đã hình thành một nền tảng lý thuyết và thực nghiệm toàn diện, từ mô hình hóa, phát triển thuật toán đến ứng dụng công nghệ mới. Đây là cơ sở khoa học quan trọng cho xây dựng mô hình điều khiển và giám sát hệ thống nước phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM, giúp người học tiếp cận gần hơn với các xu hướng nghiên cứu hiện đại.

1.2.2. Trong nước

Tại Việt Nam, quản lý rò rỉ đường ống nước gắn liền với yêu cầu bảo đảm cấp nước liên tục, giảm thất thoát và nâng cao hiệu quả vận hành mạng lưới. Các trường hợp triển

khai tại doanh nghiệp cấp nước cho thấy xu hướng kết hợp đo lường tại hiện trường, truyền dữ liệu từ xa, hệ thống điều khiển giám sát và thu thập dữ liệu (SCADA), hệ thống thông tin địa lý và các công cụ phân tích. Song song với hoạt động ứng dụng, các nghiên cứu tại cơ sở đào tạo đã tiếp cận bài toán mô hình hóa, ước lượng trạng thái và chẩn đoán rò rỉ trên mô hình đường ống. Hai hướng phát triển này tạo cơ sở thực tiễn và khoa học cho việc xây dựng mô hình giám sát thông số rò rỉ phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM.

Tại Thành phố Hồ Chí Minh, Tổng Công ty Cấp nước Sài Gòn (SAWACO) triển khai SCADA, GIS và mô hình thủy lực để hỗ trợ quản lý hệ thống từ sản xuất đến phân phối. Theo thông tin công bố tháng 6/2025, Trung tâm vận hành hệ thống cấp nước (SWOC) giai đoạn 1 và Trung tâm dữ liệu đã được đưa vào sử dụng, tăng khả năng giám sát tập trung và hỗ trợ phát hiện sự cố rò rỉ, thất thoát nước [31]. Trường hợp này cho thấy SCADA là một thành phần của hệ thống quản lý vận hành có tích hợp dữ liệu và phân tích, thay vì chỉ là giao diện hiển thị thông số đo.

Ở cấp đơn vị quản lý mạng lưới, Công ty Cổ phần Cấp nước Phú Hòa Tân xây dựng Trung tâm vận hành mạng lưới cấp nước PWNOC trong năm 2024. Trung tâm tập trung dữ liệu lưu lượng, áp lực, sự cố và trạng thái van; hỗ trợ vận hành, điều khiển từ xa các thiết bị thông minh. Các phân hệ kết hợp GIS quản lý tài sản, quản lý sự cố và SCADA quản lý dữ liệu thiết bị phục vụ giảm thất thoát [32]. Cách tổ chức này giúp liên kết thông số vận hành với vị trí, đặc điểm hạ tầng và lịch sử sự cố, tạo cơ sở để lựa chọn khu vực cần kiểm tra.

Tại Đà Nẵng, DAWACO công bố sáng kiến "Ứng dụng các thiết bị IoT trong công tác chống thất thoát" vào tháng 3/2024. Giải pháp sử dụng thiết bị kết nối Wi-Fi và LoRa, kết hợp phương pháp kiểm tra tại hiện trường để hỗ trợ khoanh vùng, kiểm tra và xử lý rò rỉ cơ học. Thông tin từ thiết bị có thể được chia sẻ lên web và điện thoại; sáng kiến đã được triển khai ở một số khu vực thí điểm [33]. Đây là ví dụ cụ thể về ứng dụng IoT phù hợp với nhu cầu kiểm tra lưu lượng và trao đổi dữ liệu tại địa phương. Tuy nhiên, thông tin công bố chưa cung cấp chỉ tiêu sai số định vị, tỷ lệ phát hiện hoặc tỷ lệ cảnh báo nhầm để đánh giá định lượng hiệu quả chẩn đoán.

Các trường hợp trên cho thấy SCADA, GIS và IoT có vai trò bổ trợ nhau. SCADA phục vụ thu thập, giám sát và điều khiển; GIS gắn dữ liệu với hạ tầng theo không gian; IoT mở rộng khả năng kết nối và chia sẻ thông tin từ hiện trường. Mức độ tự động hóa

chẩn đoán còn phụ thuộc vào cấu hình đo, chất lượng dữ liệu và thuật toán được tích hợp. Vì vậy, khi đánh giá một hệ thống cần phân biệt khả năng theo dõi thông số, cảnh báo bất thường, khoanh vùng nghi ngờ và ước lượng vị trí rò rỉ trên tuyến ống.

Trong thực tiễn quản lý mạng lưới của SAWACO, công tác chống thất thoát kết hợp dò tìm bằng thiết bị nghe, thiết bị dò siêu âm, khoanh vùng, kiểm soát áp lực và cải tạo đường ống. Dữ liệu lưu lượng, áp lực được giám sát cùng các công cụ SCADA, GIS để hỗ trợ nhận biết khu vực bất thường và tổ chức xử lý tại hiện trường [34]. Điều này cho thấy đo lường từ xa và kiểm tra trực tiếp là các bước có thể bổ trợ trong quy trình phát hiện, xác minh và khắc phục rò rỉ.

Xét về nguyên lý, các phương pháp khảo sát bằng mắt thường và âm học có những điều kiện áp dụng khác nhau. Quan sát trực tiếp thuận lợi với đoạn ống lộ thiên hoặc khi có dấu hiệu rò trên bề mặt, nhưng khó nhận biết các điểm rò bị che khuất. Phương pháp âm học khai thác tín hiệu âm thanh hoặc dao động do dòng nước thoát qua điểm rò; khả năng phát hiện phụ thuộc vật liệu đường ống, khoảng cách đo, nhiễu môi trường và kinh nghiệm người vận hành. Do đó, việc lựa chọn phương pháp cần gắn với đặc điểm tuyến ống và điều kiện khảo sát, không thể chỉ dựa vào ưu điểm của thiết bị.

Đối với phương pháp cân bằng lưu lượng, chênh lệch giữa lượng nước đi vào và đi ra cung cấp thông tin để đánh giá tổn thất trong phạm vi khảo sát. Tuy nhiên, khi áp dụng phải xét các nhánh tiêu thụ, sự thay đổi lượng nước tích trữ và sai số đo. Trên tuyến thực nghiệm không có nhánh lấy nước trung gian, ở trạng thái xác lập, chênh lệch lưu lượng hai đầu có thể được sử dụng để đánh giá lưu lượng rò. Việc xác định vị trí rò cần thêm quan hệ thủy lực hoặc mô hình chẩn đoán phù hợp. Vì thế, tỷ lệ thất thoát, thất thu của doanh nghiệp cấp nước không thể được đồng nhất trực tiếp với tỷ lệ rò rỉ vật lý trên tuyến ống thí nghiệm.

Tại Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng, hướng nghiên cứu chẩn đoán rò rỉ đã được tiếp cận qua các đồ án tốt nghiệp và đề tài sinh viên nghiên cứu khoa học [27]–[30]. Đồ án năm 2022 của N. V. Khương và M. H. Q. Thông tập trung vào thiết kế, chẩn đoán vị trí rò rỉ trên mô hình đường ống nước thực bằng thuật toán ước lượng bền vững cho hệ tuyến tính có tham số biến thiên (LPV) [27]. Đồ án năm 2024 của Đ. A. Văn và V. Q. Trường hướng đến phát triển hệ thống SCADA giám sát vị trí rò rỉ [28]. Tiếp đó, đồ án năm 2025 của P. V. Phúc và P. Đ. Nam đề cập giải pháp chẩn đoán lỗi cho hệ động lực học, áp dụng vào hệ thống đường ống nước [29].

Bên cạnh đó, đề tài sinh viên nghiên cứu khoa học năm 2024 của Đoàn Anh Văn và cộng sự đặt ra bài toán chẩn đoán đa vị trí rò rỉ và điều chỉnh áp suất đầu ra thông qua mạng 4G [30]. Về định hướng, các công trình này liên kết ba nội dung: mô hình hóa và ước lượng, xây dựng hệ thống giám sát, và truyền dữ liệu phục vụ vận hành. Đây là cơ sở để tiếp tục phát triển mô hình thực nghiệm tích hợp và học liệu chuyên ngành. Việc đánh giá mức độ kế thừa thuật toán, cấu hình thiết bị và độ chính xác cần căn cứ vào nội dung, dữ liệu kiểm chứng của từng công trình.

Từ các trường hợp khảo sát, có thể nhận thấy nhu cầu kết nối kinh nghiệm vận hành thực tế với hoạt động nghiên cứu và đào tạo. Một mô hình phục vụ giảng dạy cần cho phép chủ động tạo tình huống rò, thu thập dữ liệu áp suất – lưu lượng, quan sát quá trình truyền dữ liệu và đối chiếu vị trí ước lượng với vị trí thực. Trên cơ sở đó, đề tài "Xây dựng mô hình giám sát thông số rò rỉ của hệ thống nước ngoài trời phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM" tập trung tích hợp tuyến ống thực nghiệm, cảm biến, truyền thông 4G, SCADA và bộ quan sát trạng thái. Hướng tiếp cận này tạo điều kiện để người học thực hành toàn bộ quá trình từ hiện tượng thủy lực, đo lường, lập trình và mô hình hóa đến đánh giá kết quả chẩn đoán, đồng thời làm cơ sở xác định khoảng trống nghiên cứu ở mục tiếp theo.

1.3. Mục tiêu đề tài

Xây dựng mô hình chẩn đoán hệ thống đư ng ống nước mới sử dụng công nghệ truyền thông 4G để truyền dữ liệu của các cảm biến gắn ở hai đầu đường ống về trung tâm giám sát, với đường ống đặt ngoài trời.

Xây dựng giao diện giám sát với chạy trên máy tính trung tâm đặt trong nhà xưởng, phục vụ việc giám sát hệ thống đường ống ngoài trời.

Xây dựng bài giảng định hướng đào tạo STEM để phục vụ cho sinh viên.

1.4. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu

a. Đối tượng nghiên cứu

- Hệ thống đường ống nước sử dụng công nghệ truyền thông 4G để truyền dữ liệu.
- Bộ quan sát trạng thái để ước lượng đư c vị trí rỏ rỉ trên đường ống.

b. Phạm vi nghiên cứu

Đề tài giới hạn phạm vi nghiên cứu ở việc xây dựng mô hình toán học cho hệ thống đường ống nước dựa trên các kiến thức về động lực học chất lỏng, và thiết kế bộ quan sát trạng thái bền vững nhằm ước lượng vị trí rò rỉ trên đường ống.

1.5. Các tiếp cận, phương pháp nghiên cứu

1.5.1. Cách tiếp cận

- Điều tra, khảo sát các kết quả nghiên cứu trong các tài liệu liên quan cùng lĩnh vực.
- Xây dựng hệ thống đường ống nước thực tế, với các cảm biến gắn ở hai đầu đường ống và các trạm bơm cung cấp nước cho đường ống. Dữ liệu từ đường ống được truyền về trung tâm giám sát thông qua mạng không dây 4G.
- Từ các kiến thức vật lý về động lực học chất lỏng, xây dựng mô hình toán học cho hệ thống đường ống nước.
- Thiết kế bộ quan sát trạng thái dựa trên mô hình toán học và dữ liệu thu thập từ đường ống để ước lượng vị trí rò rỉ.

1.5.2. Phương pháp nghiên cứu

Khảo sát tài liệu liên quan đến việc xác định vị trí rò rỉ cho hệ thống đường ống nước. Xây dựng hệ thống đường ống nước thực tế, với các cảm biến gắn ở hai đầu đường ống và các trạm bơm cung cấp nước cho đư ng ống. Dữ liệu từ đường ống được truyền về trung tâm giám sát thông qua mạng không dây 4G. Xây dựng mô hình toán học của hệ thống dựa vào lý thuyết động lực học chất lỏng trong đường ống. Thiết kế bộ quan sát trạng thái bền vững H_2 để ước lượng vị trí rò rỉ.

1.6. Kết luận chương 1

Những nội dung trình bày trong Chương 1 là cơ sở để triển khai các nội dung nghiên cứu ở các chương tiếp theo, bao gồm thiết kế mô hình hệ thống, xây dựng mô hình toán học, phát triển thuật toán chẩn đoán rò rỉ và đánh giá kết quả thực nghiệm.

Trên cơ sở đó, đề tài lựa chọn giải pháp tích hợp đường ống thực nghiệm ngoài trời, cảm biến áp suất–lưu lượng, truyền thông 4G, SCADA và thuật toán chẩn đoán. Mô hình được định hướng sử dụng trong giảng dạy chuyên ngành, hoạt động STEM, nghiên cứu khoa học sinh viên và đồ án tốt nghiệp.

CHƯƠNG 2: XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHẦN CỨNG, TRUYỀN THÔNG 4G VÀ HỆ THỐNG SCADA

Chương 2 trình bày cơ sở thiết kế và phương án xây dựng mô hình giám sát thông số rò rỉ của hệ thống nước ngoài trời phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM. Nội dung bao gồm thiết kế mô hình phần cứng, lựa chọn thiết bị, xây dựng hệ thống truyền thông 4G, giao diện giám sát SCADA và tích hợp toàn bộ hệ thống. Kết quả của chương là cơ sở để xây dựng mô hình toán học, thiết kế thuật toán chẩn đoán rò rỉ và triển khai các bài giảng, bài thực hành STEM.

2.1 Yêu cầu và kiến trúc tổng thể

2.1.1. Mục tiêu và yêu cầu thiết kế

Mục tiêu của mô hình là tái hiện một tuyến ống cấp nước ngoài trời ở quy mô thực nghiệm, có khả năng tạo dòng tuần hoàn, thay đổi điểm làm việc và chủ động tạo rò rỉ tại các vị trí đã biết. Hệ thống phải đo được cột áp suất và lưu lượng ở hai đầu tuyến, truyền dữ liệu về trung tâm qua mạng 4G, giám sát trên SCADA và cung cấp đầu vào cho mô hình toán học cùng bộ quan sát trạng thái.

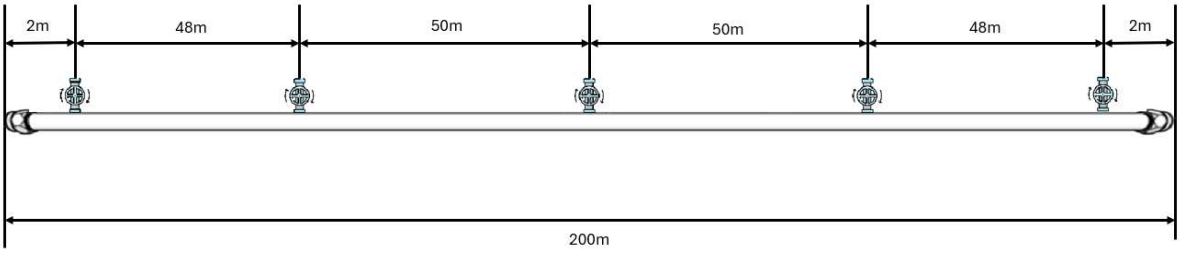
Yêu cầu thiết kế đư c chia thành nhóm quá trình, đo lường, điều khiển, truyền thông, giám sát, an toàn và đào tạo. Mỗi nhóm đư c gắn với tiêu chí kiểm tra để phục vụ thiết kế chi tiết và nghiệm thu hệ thống.

Bảng 2.1. Các yêu cầu chính của mô hình

Nhóm yêu cầu	Nội dung
Quá trình thủy lực	Tạo dòng chảy ổn định, điều chỉnh đư c bơm–van và tạo điểm rò rỉ có kiểm soát
Đo lường	Đo áp suất và lưu lượng ở đầu và cuối đư ng ống, có thống nhất đơn vị
Điều khiển	Điều khiển bơm, liên tục và bảo vệ cục bộ bằng PLC
Truyền thông	Truyền dữ liệu 4G, TCP/IP, có timeout và tự kết nối lại
Giám sát	SCADA hiển thị, lưu dữ liệu và cảnh báo
Chẩn đoán	Tính residual, ước lượng vị trí và độ tin cậy
Đào tạo	Cấu trúc mở, trực quan và khai thác đư c trong nhiều học phần

2.1.2. Kiến trúc tổng thể của hệ thống

Kiến trúc hệ thống gồm bốn lớp. Lớp quá trình: bồn, bơm, đư ng ống, van, điểm rò rỉ và cảm biến. Lớp thu thập–điều khiển: PLC, ESP32, module analog và nguồn. Lớp truyền thông sử dụng UART, module 4G và TCP/IP. Lớp giám sát–phân tích gồm PLC trung tâm, cơ sở dữ liệu, SCADA và MATLAB/Simulink. Cấu trúc phân lớp hỗ trợ kiểm tra độc lập từng khối và xác định phạm vi sự cố khi vận hành.



Hình 2.1. Sơ đồ tuyến ống thực nghiệm và các vị trí tạo rò rỉ

Bảng 2.2. Phân tầng kiến trúc hệ thống

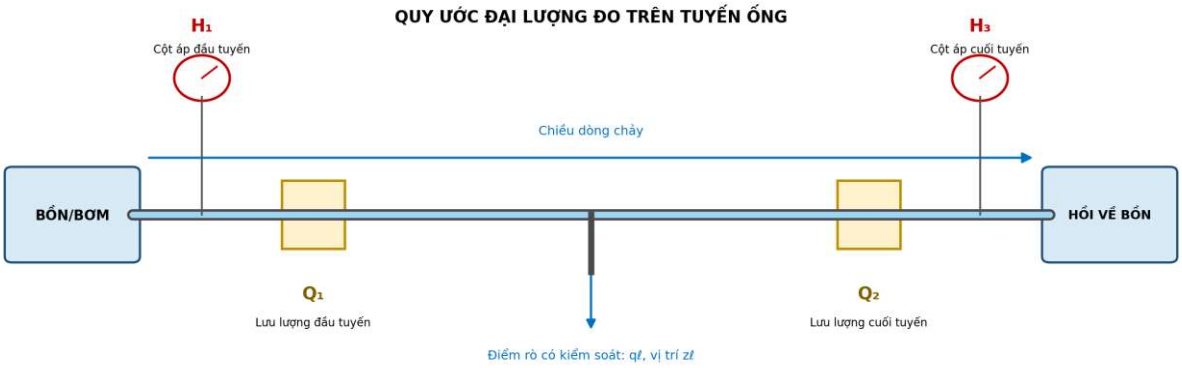
Lớp	Thành phần chính	Chức năng
Quá trình	Bồn, bơm, đư ng ống, van, điểm rò rỉ và cảm biến	Tạo hiện tượng vật lý và cung cấp tín hiệu đo
Thu thập–điều khiển	PLC, ESP32, module analog và nguồn	Đọc tín hiệu, scale, điều khiển và liên động
Truyền thông	UART, module 4G và TCP/IP	Truyền dữ liệu và quản lý trạng thái kết nối
Giám sát–phân tích	PLC trung tâm, cơ sở dữ liệu, SCADA và MATLAB/Simulink	Hiển thị, lưu trữ, cảnh báo và chẩn đoán

Luồng dữ liệu được tổ chức theo chiều:

Từ cảm biến → PLC/ESP32 → module 4G → PLC trung tâm → Raspberry Pi (thuật toán) → PLC trung tâm → SCADA. Luồng điều khiển an toàn được đặt tại PLC, không phụ thuộc mạng di động hoặc thuật toán. Nguyên tắc này bảo đảm bơm có thể dừng khi cạn nước, quá áp hoặc có lệnh dừng khẩn cấp ngay cả khi Raspberry Pi hoặc mạng 4G bị gián đoạn.

2.1.3. Quy ước các đại lượng đo

Ta sẽ quy ước như hình 2.2, H_1 và H_3 là cột áp suất tại đầu và cuối tuyến; Q_1 và Q_2 là lưu lượng tại đầu và cuối tuyến. Hai cột áp suất biên được xem là đầu vào $u=[H_1,H_3]^T$, trong khi hai lưu lượng đo là đầu ra $y=[Q_1,Q_2]^T$ của mô hình chẩn đoán. Việc thống nhất ký hiệu và đơn vị ngay từ tầng đo lường giúp tránh sai lệch khi kết nối SCADA với MATLAB/Simulink.



Hình 2.2. Quy ước H_1, H_3, Q_1 và Q_2 trên tuyến ống

Bảng 2.3. Ý nghĩa và đơn vị của các đại lượng đo

Ký hiệu	Ý nghĩa	Vị trí đo	Đơn vị
H_1	Cột áp suất đầu tuyến	Cảm biến áp suất đầu tuyến	mH_2O; SCADA có thể hiển thị bar
H_3	Cột áp suất cuối tuyến	Cảm biến áp suất cuối tuyến	mH_2O; SCADA có thể hiển thị bar
Q_1	Lưu lượng đi vào tuyến	Cảm biến lưu lượng đầu tuyến	m^3/s; SCADA có thể hiển thị L/min
Q_2	Lưu lượng ra khỏi tuyến	Cảm biến lưu lượng cuối tuyến	m^3/s; SCADA có thể hiển thị L/min

Cột áp suất đầy đủ được biểu diễn $H=z+p/(\rho g)$. Khi các cảm biến cùng cao độ và chỉ xét cột áp suất, có thể dùng gần đúng $H=p/(\rho g)$. Với nước ở điều kiện thông thường, 1 bar xấp xỉ 10,197 mH_2O; 1 L/min bằng $1{,}6667\times10^{-5}$ m^3/s. Các phép chuyển đổi được thực hiện trước khi dữ liệu đi vào mô hình.

2.1.4. Nguyên lý hoạt động

Khi khởi động, PLC trạm bơm kiểm tra mức nước, nguồn cấp, trạng thái van và các điều kiện bảo vệ trước khi cho phép bơm hoạt động. ESP32 khởi tạo cảm biến, module

4G và kết nối TCP tới PLC trung tâm. Trong trạng thái bình thường, bốn tín hiệu H_1, H_3, Q_1 và Q_2 được kiểm tra, đóng gói, truyền về trung tâm và hiển thị trên SCADA và lưu vào cơ sở dữ liệu.

Khi mở một nhánh tạo rò rỉ, cân bằng lưu lượng và phân bố áp suất thay đổi. Bộ quan sát sử dụng các tín hiệu đo để tính residual, vị trí rò rỉ ước lượng $\hat{z}\ell$ và hệ số rò rỉ $\lambda\hat{}$. Cảnh báo chỉ được xác nhận khi residual vượt ngưỡng trong khoảng thời gian quy định, dữ liệu đo hợp lệ và mô hình làm việc trong miền thiết kế. Nếu mất cảm biến, mất kết nối hoặc dữ liệu ngoài miền được phân loại là "không đủ dữ liệu"

2.1.5. Khả năng phục vụ đào tạo và mở rộng

Mô hình tích hợp các thành phần STEM: cơ sở động lực học chất lỏng; công nghệ cảm biến, PLC, 4G và SCADA; quy trình thiết kế, lắp đặt và kiểm thử hệ thống; mô hình trạng thái và phương pháp đánh giá sai số. Các nội dung này được khai thác trong bộ học liệu độc lập và được đánh giá về khả năng áp dụng tại mục 4.7.

Cấu trúc phần cứng và phần mềm cho phép bổ sung nút cảm biến, kết hợp LoRa–4G, tích hợp cảm biến rung hoặc âm thanh, mở rộng sang đường ống nhiều nhánh và thử nghiệm các thuật toán Kalman, học máy hoặc trí tuệ nhân tạo. Nhờ đó, mô hình có thể tiếp tục phục vụ đồ án và nghiên cứu sau khi đề tài kết thúc.

2.2. Thiết kế hệ thống đường ống và trạm bơm

Hệ thống được bố trí theo vòng tuần hoàn kín để tiết kiệm nước và thuận lợi cho thực nghiệm lặp lại. Bơm tạo chênh áp đưa nước qua tuyến ống; các van điều tiết thiết lập điểm làm việc; các nhánh xả có kiểm soát mô phỏng vị trí rò rỉ. Cảm biến được bố trí ở đầu và cuối tuyến để đo H_1, H_3, Q_1 và Q_2. Khi có rò rỉ, cân bằng lưu lượng thay đổi và hình thành thông tin đủ để thuật toán ước lượng trạng thái bên trong.

2.2.1. Cấu trúc tuyến ống tuần hoàn

Mô hình sử dụng một bồn chứa chung và bơm tuần hoàn. Nước được bơm qua tuyến ống thực nghiệm rồi hồi về bồn, nhờ đó tiết kiệm nước và thuận lợi lặp lại kịch bản. Tuyến ống có đoạn thẳng cho cảm biến, van cách ly, van điều tiết và nhánh xả. Giá đỡ phải hạn chế võng và rung; điểm lấy áp suất không đặt tại vùng xoáy mạnh hoặc nơi tích khí.

Chiều dài L, đường kính trong D, cao độ, số lượng co–van và vị trí cảm biến được ghi trong bản vẽ hoàn công. Đây là dữ liệu đầu vào cho tính tổn thất, xác định tham số

mô hình và quy đổi vị trí rò rỉ. Nếu thay đổi cấu hình cơ khí, nhóm nghiên cứu phải cập nhật đồng thời bản vẽ, metadata và mô hình MATLAB/Simulink.

2.2.2. Bố trí các vị trí tạo rò rỉ thực nghiệm

Các vị trí rò đư c tạo bằng nhánh chữ T kết hợp van khóa và đầu xả có kích thước xác định. Mỗi vị trí được đánh mã, đo khoảng cách từ gốc tọa độ và thể hiện trên sơ đồ. Khi chưa thực nghiệm, van phải đóng kín để bảo đảm không có rò nền. Khi mở van, nước xả đư c thu hồi về bồn hoặc dẫn tới khu vực an toàn. Có thể sử dụng nhiều đầu xả để thay đổi mức độ rò, nhưng từng cấu hình phải có mã riêng và không thay đổi trong một lần chạy.

Việc bố trí điểm rò cần bao phủ vùng gần đầu, giữa và gần cuối tuyến nhằm đánh giá độ nhạy của thuật toán theo vị trí. Tuy nhiên, cần tránh đặt quá sát cảm biến hoặc tại nơi dòng chảy xoáy mạnh, vì kết quả có thể phản ánh hiện tượng cục bộ thay vì đặc tính toàn tuyến. Vị trí thật $z\ell$ là dữ liệu tham chiếu bắt buộc trong metadata của mỗi thí nghiệm.

2.2.3. Yêu cầu thi công cơ khí và an toàn thủy lực

Mối nối đư c thử kín trước khi cấp điện. Cảm biến lắp qua đầu nối phù hợp, có van cách ly và không chịu tải từ đư ng ống. Đường hút bơm ngắn, kín khí, bảo đảm mức nước tối thiểu. Van rò được đánh nhãn và chỉ vận hành theo kịch bản. Mọi nước xả phải được thu hồi; khu vực quanh tủ điện luôn khô.

Áp suất thử và áp suất vận hành không vượt giá trị nhỏ nhất trong giới hạn của ống, phụ kiện và cảm biến. Bảo vệ cạn nước, quá tải và dừng khẩn cấp được thực hiện độc lập tại hiện trường. Các yêu cầu chi tiết được đưa vào checklist trước–sau mỗi phiên.

2.3. Lựa chọn cảm biến và thiết bị điều khiển

2.3.1. Nguyên tắc và tiêu chí lựa chọn thiết bị

Thiết bị đư c lựa chọn trên cơ sở phù hợp với dải thủy lực của mô hình, điều kiện ngoài trời, chuẩn tín hiệu công nghiệp, khả năng tích hợp 4G–SCADA, tính sẵn có và giá trị đào tạo. Quá trình lựa chọn gồm xác định yêu cầu, khảo sát phương án, so sánh theo tiêu chí, chọn thiết bị và kiểm tra tương thích toàn hệ thống. Không lựa chọn riêng từng thiết bị chỉ vì giá thành hoặc thông số cao, bởi sự không tương thích nguồn, tín hiệu và giao thức có thể làm tăng chi phí tích hợp.

Bảng 2.4. Kết quả khảo sát và so sánh các phương án thiết bị

Thiết bị	Phương án	Đặc tính kỹ thuật	Điều kiện ngoài trời	Khả năng tích hợp	Tính sẵn có	Đánh giá
Cảm biến áp suất	4–20 mA	Tín hiệu ổn định, chống nhiễu tốt và phù hợp truyền xa.	Phù hợp khi sử dụng loại có cấp bảo vệ IP65–IP67.	Kết nối trực tiếp với ngõ vào analog của PLC.	Phổ biến trong công nghiệp.	Ưu tiên lựa chọn.
	0–10 V	Độ chính xác tốt nhưng nhạy với nhiễu và suy hao tín hiệu.	Phù hợp hơn với khoảng cách truyền ngắn.	Dễ kết nối với PLC và bộ ADC.	Khá phổ biến.	Phù hợp cho quy mô nhỏ.
Cảm biến lưu lượng	Điện từ	Độ chính xác cao, không có bộ phận chuyển động và tổn thất áp suất nhỏ.	Các phiên bản IP67–IP68 phù hợp môi trường ngoài trời.	Hỗ trợ 4–20 mA, xung và Modbus.	Phổ biến trong hệ thống cấp nước.	Ưu tiên lựa chọn.
	Turbine	Kết cấu đơn giản, giá thành thấp và tín hiệu xung dễ xử lý.	Bộ phận cơ khí dễ bị ảnh hưởng bởi cặn và mài mòn.	Dễ kết nối với PLC hoặc vi điều khiển.	Phổ biến, chi phí thấp.	Phù hợp khi ưu tiên chi phí.
PLC	Siemens S7-1200	Hỗ trợ I/O mở rộng, analog và truyền thông Ethernet.	Có độ tin cậy công nghiệp cao khi đặt trong tủ bảo vệ.	Hỗ trợ Modbus RTU/TCP, HMI và SCADA.	Rất phổ biến.	Ưu tiên làm bộ điều khiển trung tâm.
	Delta DVP	Đáp ứng tốt các chức năng điều khiển cơ bản và có chi phí thấp.	Phù hợp khi lắp trong tủ điện bảo vệ.	Hỗ trợ tốt Modbus RTU.	Phổ biến tại Việt Nam.	Phù hợp khi ưu tiên kinh tế.

Vi điều khiển	ESP32	Tích hợp Wi-Fi, Bluetooth và có khả năng xử lý dữ liệu tốt.	Cần hộp bảo vệ và nguồn ổn định khi lắp ngoài trời.	Hỗ trợ UART, SPI, I2C và RS-485 qua module.	Rất phổ biến.	Phù hợp cho nút IoT và thu thập dữ liệu.
	STM32	Khả năng xử lý thời gian thực và ngoại vi tốt.	Cần thiết kế bo mạch và vỏ bảo vệ phù hợp.	Hỗ trợ UART, SPI, I2C, CAN và Ethernet tùy dòng.	Khá phổ biến.	Phù hợp với ứng dụng xử lý chuyên sâu.
Chuẩn truyền thông	RS-485 /Modbus RTU	Truyền xa, chống nhiễu tốt và hỗ trợ nhiều thiết bị.	Phù hợp với mạng cảm biến phân tán ngoài trời.	Tương thích rộng với PLC và cảm biến công nghiệp.	Rất phổ biến, chi phí thấp.	Ưu tiên cho tầng thiết bị hiện trường.
	Ethernet/ Modbus TCP	Tốc độ cao và thuận lợi cho truyền dữ liệu mạng.	Cần cáp, đầu nối và chống sét phù hợp.	Tích hợp tốt với PLC, HMI và máy tính.	Phổ biến.	Phù hợp cho tầng giám sát.
Máy tính nhúng	Raspberry Pi	Khả năng xử lý tốt, hỗ trợ Linux, Ethernet và USB.	Cần tủ hoặc hộp bảo vệ khi sử dụng ngoài trời.	Dễ kết nối PLC qua Modbus TCP, MQTT.	Phổ biến.	Phù hợp làm gateway và xử lý dữ liệu.
	Máy tính nhúng công nghiệp	Độ ổn định cao, hỗ trợ vận hành liên tục và nhiều cổng truyền thông.	Dải nhiệt rộng, chống rung tốt và phù hợp môi trường công nghiệp.	Tích hợp tốt với PLC và hệ thống SCADA.	Giá cao hơn.	Ưu tiên khi yêu cầu độ tin cậy cao.

Kết quả khảo sát cho thấy các phương án được lựa chọn cần đồng thời đáp ứng yêu cầu kỹ thuật, điều kiện làm việc ngoài trời, khả năng tích hợp với hệ thống điều khiển – giám sát và tính sẵn có. Cảm biến sử dụng chuẩn dòng 4–20 mA được ưu tiên cho các tín hiệu đo tại hiện trường nhờ khả năng chống nhiễu và truyền xa tốt. PLC công nghiệp được sử dụng cho chức năng điều khiển trung tâm, trong khi vi điều khiển và máy tính nhúng đảm nhiệm thu thập, truyền nhận và xử lý dữ liệu. Việc lựa chọn cuối cùng còn được kiểm tra về nguồn cấp, mức logic và giao thức trước khi tích hợp toàn hệ thống.

2.3.2. Lựa chọn cảm biến áp suất

Áp suất là đại lượng đầu vào quan trọng của mô hình thủy lực và bộ quan sát. Cảm biến phải có dải đo bao phủ áp suất làm việc nhưng không quá rộng, có tín hiệu chống nhiễu khi truyền xa, chịu được môi trường và môi chất nước. So với tín hiệu điện áp 0–5 V hoặc 0–10 V, chuẩn dòng 4–20 mA ít nhạy với sụt áp đường dây, cho phép phát hiện đứt dây và phù hợp module analog công nghiệp. Vì vậy đề tài ưu tiên cảm biến áp suất dùng chuẩn 4–20 mA.



Hình 2.3. Cảm biến áp suất MBS3000

Danfoss MBS 3000 được lựa chọn vì có kết cấu công nghiệp, tín hiệu 4–20 mA, nguồn cấp phù hợp tủ 24 VDC, cấp bảo vệ IP65 và thời gian đáp ứng nhỏ hơn nhiều so với động học của mô hình. Dải 0–10 bar tạo dự phòng an toàn, tuy nhiên độ phân giải sử dụng phụ thuộc áp suất thực tế; do đó cần kiểm tra để bảo đảm mô hình không chỉ vận hành ở phần quá nhỏ của dải. Khi áp suất thực tế thấp, phiên bản có dải hẹp hơn sẽ cho độ phân giải tốt hơn.

Bảng 2.5. Thông số cảm biến áp suất

Thông số	Giá trị

Hãng/model	Danfoss MBS 3000, 060G1123
Dải đo	0–10 bar
Nguồn	10–30 VDC
Đầu ra	4–20 mA
Độ chính xác	Điển hình 0,5%; tối đa 1% theo tài liệu nguồn
Nhiệt độ môi trường	−40 đến 85 °C
Cấp bảo vệ	IP65
Thời gian đáp ứng	Khoảng 4 ms

Cảm biến được lắp tại đầu và cuối tuyến qua đầu nối phù hợp, có van cách ly để tháo bảo trì. Điểm lấy áp suất tránh vùng xoáy, bọt khí và tải cơ học. Sau lắp đặt, tiến hành hiệu chuẩn điểm không và nhiều điểm áp suất, xác định hệ số gain–offset riêng cho từng cảm biến. Giá trị dòng dưới ngưỡng hợp lệ được gắn cờ đứt dây, không quy đổi thành áp suất bình thường.

2.3.3. Lựa chọn cảm biến lưu lượng

Lưu lượng Q_1 và Q_2 vừa phục vụ cân bằng dòng, vừa là đầu ra đo của bộ quan sát. Cảm biến phải phù hợp đư ng kính ống, dải lưu lượng, áp suất và nhiệt độ của mô hình; tổn thất áp qua cảm biến không đư c làm thay đổi đáng kể điểm làm việc. Tín hiệu 4–20 mA được ưu tiên để đồng nhất với cảm biến áp suất và module analog. Thiết bị phải lắp đúng chiều, có đoạn ống thẳng và hạn chế bọt khí.



Hình 2.4. Cảm biến lưu lượng SAGINOMIYA PLK-1522PE

SAGINOMIYA PLK-1522PE được lựa chọn vì dải 0–50 L/min phù hợp mô hình, sử dụng nguồn 24 VDC và đầu ra 4–20 mA. Cấu trúc dòng xoáy không có bộ phận chuyển động giúp giảm mài mòn và thuận lợi cho thí nghiệm lặp lại. Tuy nhiên, độ chính xác thực tế phụ thuộc bố trí lắp đặt và trạng thái dòng; do đó phải tuân thủ chiều dòng, đoạn ống thẳng và thực hiện hiệu chuẩn sau lắp.

Bảng 2.6. Thông số cảm biến lưu lượng

Thông số	Giá trị theo tài liệu nguồn
Model	SAGINOMIYA PLK-1522PE
Nguyên lý	Dòng xoáy, không có bộ phận chuyển động
Dải đo	0–50 L/min
Nguồn cấp	24 VDC
Tín hiệu đầu ra	4–20 mA
Áp suất hoạt động tối đa	2,94 MPa
Nhiệt độ chất lỏng	−30 đến 120 °C
Nhiệt độ môi trường	−20 đến 60 °C
Sai số cho phép trong tài liệu nguồn	±10%

Hai cảm biến lưu lượng phải được kiểm tra đồng thời ở trạng thái không rò rỉ. Nếu $Q_1 - Q_2$ có độ lệch hệ thống, cần hiệu chỉnh trước khi thiết kế ngưỡng residual. Không dùng cách ép hai giá trị bằng nhau bằng phần mềm vì sẽ che giấu sai số cảm biến. Hệ số hiệu chuẩn và độ không đảm bảo đo được lưu cùng metadata của từng phiên.

2.3.4. Lựa chọn PLC Siemens S7-1200

PLC tại trạm bơm phải thực hiện điều khiển bơm, liên động an toàn, đọc trạng thái thiết bị và kết nối SCADA. Các phương án Siemens S7-1200, Mitsubishi FX5U và Omron CP1H đều đáp ứng tự động hóa quy mô nhỏ–trung bình. Việc lựa chọn dựa trên khả năng xử lý, mở rộng I/O, giao thức, phần mềm và mức độ phù hợp với thiết bị đào tạo hiện có.



Hình 2.5. PLC Siemens S7-1200

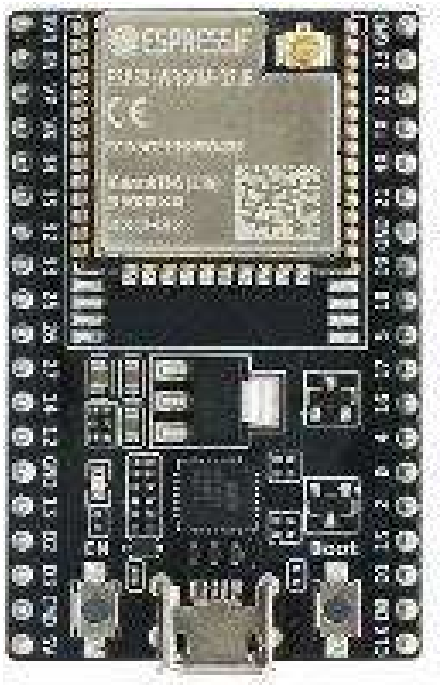
Đề tài lựa chọn Siemens S7-1200, cụ thể CPU 1214C DC/DC/DC. So với Mitsubishi FX5U và Omron CP1H, Siemens S7-1200 có lợi thế về PROFINET/Ethernet, khả năng mở rộng module analog và truyền thông, làm việc ổn định trong tủ điện và thuận lợi tích hợp WinCC/TIA Portal. Nền tảng này cũng phù hợp chương trình đào tạo PLC–SCADA của ngành.

Bảng 2.7. So sánh các phương án PLC

Tiêu chí	Siemens CPU 1214C	Mitsubishi FX5U	Omron CP1H
Tốc độ xử lý tham khảo	Khoảng 0,08 µs/lệnh cơ bản	Khoảng 0,065 µs	Khoảng 0,1 µs
Truyền thông	PROFINET/Ethernet; mở rộng Modbus, serial	Ethernet, serial, CC-Link	Ethernet/serial tùy cấu hình
Mở rộng	Nhiều module I/O, analog, truyền thông	Tốt	Tốt
Phần mềm	TIA Portal	GX Works3	CX-Programmer
Giá trị đào tạo	Phổ biến trong hệ Siemens và SCADA	Phù hợp hệ Mitsubishi	Phù hợp hệ Omron

CPU điều khiển bơm và các liên động cục bộ. Để nhận cảm biến 4–20 mA cần lựa chọn module analog phù hợp hoặc bộ chuyển đổi dòng–áp có cách ly; số kênh tối thiểu bằng tổng cảm biến áp suất và lưu lượng. PLC không phụ thuộc mạng 4G để dừng bơm khi cạn nước, quá áp hoặc có lệnh dừng khẩn cấp.

2.3.5. Lựa chọn vi điều khiển ESP32



Hình 2.6. Module ESP32

ESP32 đư c xem xét cùng các nền tảng vi điều khiển phổ biến như Arduino và STM32. Arduino thuận lợi cho người mới nhưng tài nguyên và giao tiếp mạng hạn chế; STM32 có hiệu năng thời gian thực tốt nhưng quá trình phát triển phức tạp hơn. ESP32 có bộ xử lý 32 bit, nhiều UART/SPI/I2C, tài nguyên đủ cho state machine 4G, giá thành hợp lý và cộng đồng hỗ trợ lớn, phù hợp nút thu thập dữ liệu và đào tạo IoT.

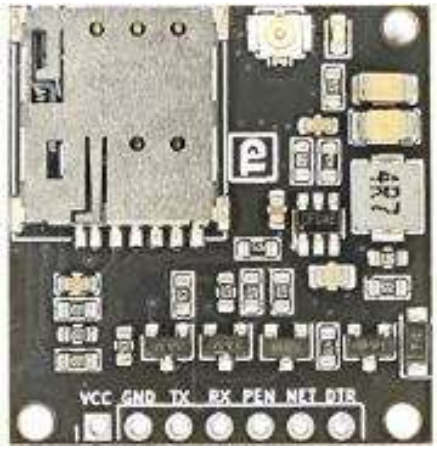
Bảng 2.8. So sánh nền tảng vi điều khiển

Tiêu chí	ESP32	Arduino thông dụng	STM32 thông dụng
Hiệu năng	32 bit, đến 240 MHz theo tài liệu nguồn	Phù hợp tác vụ cơ bản	Cao, nhiều dòng lựa chọn
Kết nối tích hợp	Wi-Fi, Bluetooth, UART/SPI/I²C	Thường cần module ngoài	Tùy dòng, thường cần module ngoài

Phát triển	Arduino IDE/ESP-IDF	Đơn giản	Cần cấu hình chuyên sâu hơn
Phù hợp đề tài	Tốt cho cảm biến và 4G	Hạn chế khi mở rộng	Tốt nhưng phức tạp hơn

Trong mô hình, ESP32 nhận dữ liệu đã đư c chuyển đổi hoặc giao tiếp với module đo, quản lý UART tới A7680C, đóng gói bản tin, giám sát timeout và bộ đệm. GPIO 3,3 V không chịu được 5 V nên mọi giao tiếp phải kiểm tra mức logic; nguồn cấp cần đủ dòng và lọc tốt vì module 4G tạo xung dòng khi phát. Watchdog và máy trạng thái được dùng để tránh treo chương trình.

2.3.6. Lựa chọn module truyền thông 4G A7680C



Hình 2.7. Module SIM 4G A7680C

Module 4G phải hỗ trợ mạng di động đang khai thác, giao tiếp UART với ESP32, cung cấp TCP/IP và có lệnh AT đủ cho tự kết nối lại. A7680C được chọn vì hỗ trợ 4G LTE Cat.1, tích hợp các giao thức TCP/UDP/MQTT/HTTP và phù hợp truyền dữ liệu cảm biến tốc độ thấp–trung bình. So với module chỉ hỗ trợ 2G, A7680C có tính duy trì tốt hơn khi hạ tầng 2G đư c thu hẹp; so với router 4G hoàn chỉnh, module cho phép sinh viên trực tiếp nghiên cứu lệnh AT và quản lý phiên kết nối.

Bảng 2.9. Thông số module 4G

Thông số	Giá trị theo tài liệu nguồn
Model board	FS-MCore-A7680C
Loại mạng	4G LTE Cat.1
Điện áp cấp cho board	5–16 VDC

Giao tiếp điều khiển	UART mức logic 3,3 V
Giao thức	TCP, UDP, MQTT, HTTP
Tốc độ danh định được nêu	Đến khoảng 10 Mbit/s tùy mạng
Chân chức năng chính	VIN, GND, TX, RX, PEN, STA, DTR

Khi thiết kế cần phân biệt điện áp cấp cho board và mức logic UART. Nguồn phải đáp ứng dòng đỉnh của modem, dây nguồn ngắn, có tụ lọc và nối đất chung đúng cách. Anten đặt tránh tủ kim loại và nguồn nhiễu. Firmware ghi trạng thái đăng ký mạng, chất lượng sóng, sequence và nguyên nhân reconnect để phục vụ đánh giá độ tin cậy.

2.3.7. Lựa chọn máy tính nhúng Raspberry Pi 4



Hình 2.8. Máy tính nhúng Raspberry Pi 4

Máy tính nhúng trung tâm phải đủ khả năng chạy dịch vụ tiếp nhận TCP, lưu dữ liệu, giao tiếp SCADA và triển khai thuật toán MATLAB/Simulink hoặc mã sinh tự động. Các phương án Raspberry Pi 4, Jetson Nano và BeagleBone Black đư c xem xét. Jetson Nano có GPU phù hợp AI nhưng tiêu thụ nguồn và chi phí cao hơn cho nhu cầu hiện tại; BeagleBone có khả năng I/O thời gian thực tốt nhưng tài nguyên và cộng đồng ứng dụng phổ thông hạn chế hơn. Raspberry Pi 4 cân bằng hiệu năng, kết nối và khả năng đào tạo.

Bảng 2.10. So sánh máy tính nhúng

Thông số	Raspberry Pi 4	Jetson Nano	BeagleBone Black
CPU	Quad-core Cortex-A72, 1,5 GHz	Quad-core Cortex-A57, 1,43 GHz	Cortex-A8, 1 GHz
RAM	2/4/8 GB LPDDR4 tùy bản	Tùy phiên bản	512 MB DDR3

Kết nối	Gigabit Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, USB	Ethernet, USB, HDMI/DP	Ethernet, USB, HDMI
GPIO	40 chân	40 chân	65 chân
Nguồn	USB-C 5 V/3 A	5 V, yêu cầu tùy chế độ	5 VDC
Hệ điều hành	Raspberry Pi OS/Ubuntu	JetPack/Ubuntu	Debian và hệ khác

Raspberry Pi 4 đư c lựa chọn làm bộ xử lý trung tâm nhờ CPU bốn lõi, RAM đủ cho dịch vụ dữ liệu, Ethernet/Wi-Fi tích hợp, nhiều cổng USB và hỗ trợ triển khai MATLAB/Simulink. Thiết bị có cộng đồng lớn, thuận lợi triển khai Python, cơ sở dữ liệu và kết nối MATLAB/Simulink. Tuy nhiên Raspberry Pi không phải PLC an toàn; nguồn 5 V/3 A phải ổn định, thẻ nhớ cần quản lý ghi dữ liệu và nên có cơ chế tắt đúng quy trình.

2.3.8. Lựa chọn nguồn, module analog và thiết bị bảo vệ

Nguồn 24 VDC cấp PLC và cảm biến; bộ chuyển đổi 24–5 V cấp module 4G và máy tính nhúng theo công suất thực tế; ESP32 sử dụng mức logic 3,3 V. Nguồn được chọn theo tổng dòng cộng dự phòng, có cầu chì hoặc aptomat nhánh. Không dùng chân điều khiển để cấp trực tiếp modem.

Module analog phải nhận tối thiểu bốn kênh 4–20 mA, có độ phân giải và cách ly phù hợp. Tủ điện gồm bảo vệ quá tải bơm, dừng khẩn cấp, nối đất, terminal đánh số và đầu cáp kín nước. Dây động lực đi riêng dây analog/UART để giảm nhiễu.

2.3.9. Tổng hợp thiết bị được lựa chọn

Bảng 2.11. Danh mục thiết bị chính của hệ thống

STT	Thiết bị được lựa chọn	Số lượng dự kiến	Chức năng chính	Lý do lựa chọn
1	Danfoss MBS 3000	02	Đo áp suất đầu–cuối	4–20 mA, IP65, phù hợp môi trường
2	SAGINOMIYA PLK-1522PE	02	Đo lưu lượng đầu–cuối	0–50 L/min, 24 VDC, 4–20 mA

3	ESP32	Theo số nút	Thu thập và giao tiếp 4G	Nhiều UART, đủ tài nguyên, dễ đào tạo
4	Siemens CPU 1214C DC/DC/DC	03	Điều khiển bơm và liên động	Ethernet/PROFINET, mở rộng, TIA Portal
5	Module A7680C	Theo số nút 4G	Truyền dữ liệu diện rộng	LTE Cat.1, UART, TCP/IP
6	Raspberry Pi 4	01	Máy chủ/thuật toán trung tâm	Linux, Ethernet, hiệu năng phù hợp
7	Module analog 4–20 mA	Theo cấu hình	Tiếp nhận tín hiệu cảm biến	Đồng nhất chuẩn công nghiệp
8	Nguồn 24 VDC và bộ 5 VDC	Theo tải	Cấp nguồn hệ thống	Phân tách nguồn, có dự phòng

Số lượng trong bảng là cấu hình dự kiến theo hai đầu tuyến và phải được đối chiếu khi hoàn thiện bản vẽ I/O. Trước nghiệm thu, nhóm nghiên cứu cần bổ sung mã đặt hàng, số seri, dải đo thực tế, hệ số hiệu chuẩn và ảnh thiết bị đã lắp. Các thông số chỉ mang tính khảo sát không được dùng thay cho hồ sơ thiết bị thực tế.

2.4. Thiết kế thu thập và chuẩn hóa dữ liệu

2.4.1. Chuỗi đo và giao tiếp phần cứng

Chuỗi đo gồm đại lượng vật lý → cảm biến → tín hiệu 4–20 mA → module analog → PLC/ESP32 → bản tin số. Mỗi kênh có tên, đơn vị, dải, hệ số scale, cờ chất lượng và chu kỳ lấy mẫu. Nếu PLC đọc analog và ESP32 nhận dữ liệu từ PLC, giao thức nội bộ phải được quy định; nếu ESP32 đọc qua module riêng, cần đồng bộ thời gian giữa các nút.

Bảng 2.12. Phân bổ tín hiệu dự kiến

Tag	Đại lượng	Kiểu	Nguồn
PT_IN	H_1 hoặc p_1	Real	Cảm biến áp suất đầu
PT_OUT	H_3 hoặc p_3	Real	Cảm biến áp suất cuối

FT_IN	Q_1	Real	Cảm biến lưu lượng đầu
FT_OUT	Q_2	Real	Cảm biến lưu lượng cuối
PUMP_RUN	Trạng thái bơm	Bool	PLC
NET_OK	Trạng thái 4G	Bool	ESP32/module
LEAK_POS	Vị trí ước lượng	Real	Thuật toán

2.4.2. Lấy mẫu, lọc và cờ chất lượng

Chu kỳ lấy mẫu đư c lựa chọn nhỏ hơn hằng số thời gian đặc trưng của quá trình thủy lực và phù hợp với thời gian đáp ứng của cảm biến, năng lực xử lý và băng thông 4G. Nút hiện trường lấy mẫu ở chu kỳ cơ sở, thực hiện lọc cửa sổ ngắn và truyền dữ liệu theo chu kỳ quy định. Dữ liệu trước lọc được lưu để đánh giá ảnh hưởng của thuật toán xử lý tín hiệu.

Cờ chất lượng gồm hợp lệ, ngoài dải, đứt dây, dữ liệu cũ, mất gói và ngoài miền mô hình. Khi chất lượng không đạt, SCADA đổi trạng thái và thuật toán không sử dụng mẫu như dữ liệu bình thường. Timestamp và sequence dùng để đồng bộ H_1, H_3, Q_1, Q_2.

2.5. Thiết kế truyền thông 4G

2.5.1. Lựa chọn phương án truyền thông

Bảng 2.13. So sánh Wi-Fi, LoRa và 4G

Tiêu chí	Wi-Fi	LoRa	4G
Vùng phủ	Phụ thuộc access point	Xa, tốc độ thấp	Theo vùng phủ nhà mạng
Hạ tầng	Cần mạng cục bộ	Cần gateway	Dùng hạ tầng di động
Băng thông	Cao	Thấp	Đủ lớn
Độ trễ	Thấp	Trung bình	Biến thiên
Phù hợp đề tài	Hạn chế ngoài trời xa	Phù hợp nút công suất thấp	Phù hợp trạm phân tán ngoài trời

4G được chọn làm kênh chính vì mô hình ngoài trời và trung tâm có thể cách xa. LoRa là phương án mở rộng khi nhiều nút dọc tuyến cần gom về một gateway. 4G chỉ dùng giám sát và chẩn đoán, không dùng làm vòng an toàn nhanh.

2.5.2. Cấu trúc truyền thông TCP/IP

TCP bảo đảm luồng byte theo thứ tự nhưng không giữ ranh giới bản tin. Vì vậy bản tin phải có ký tự kết thúc hoặc trường chiều dài. Cấu trúc đề xuất gồm version, device_id, sequence, device_time, H_1, H_3, Q_1, Q_2, status, quality và checksum nếu cần.

Bảng 2.14. Các trường trong bản tin

Trường	Ý nghĩa
version	Phiên bản cấu trúc
device_id	Mã nút
sequence	Phát hiện mất hoặc lặp gói
device_time	Thời điểm lấy mẫu
H1,H3,Q1,Q2	Giá trị đã quy đổi
status	Bơm, van, nguồn, mạng
quality	Chất lượng từng kênh
checksum	Kiểm tra khung ở tầng ứng dụng

PLC trung tâm lưu cả thời gian thiết bị và thời gian nhận. Dữ liệu gửi bù sau mất mạng giữ thời gian đo gốc và cờ lịch sử, tránh SCADA coi là giá trị hiện tại.

2.5.3. Phần mềm nút hiện trường

Phần mềm ESP32 tổ chức theo máy trạng thái: khởi tạo → kiểm tra cảm biến → đăng ký mạng → mở TCP → truyền → giám sát timeout → phục hồi. Mỗi trạng thái có thời gian chờ và mã lỗi. Watchdog khởi động lại khi chương trình không đáp ứng; reconnect dùng backoff để tránh truy cập mạng liên tục.

Bảng 2.15. Trạng thái phần mềm nút 4G

Trạng thái	Nhiệm vụ	Điều kiện chuyển
INIT	Khởi tạo UART, cảm biến, bộ đệm	Tài nguyên sẵn sàng
REGISTER	Đăng ký mạng, APN	Mạng hợp lệ
CONNECT	Mở socket TCP	Kết nối thành công
RUN	Đọc, đóng gói và gửi	Timeout/lỗi hoặc tiếp tục
RECOVER	Đóng socket, ghi lỗi, chờ	Thử kết nối lại

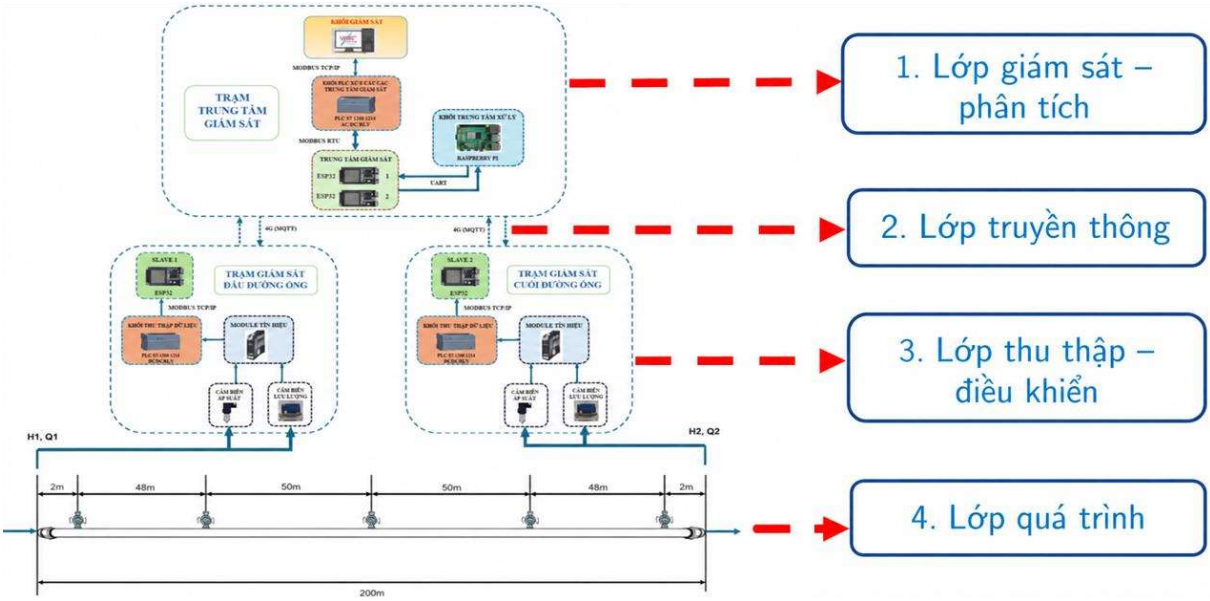
2.5.4. Tiếp nhận dữ liệu tại PLC trung tâm và độ tin cậy

Khối tiếp nhận dữ liệu phải xử lý luồng TCP, tách nhiều bản tin trong một lần nhận và giữ phần bản tin chưa đủ. Mỗi gói được kiểm tra số trường, kiểu, dải, sequence và cờ chất lượng. Một nút gửi sai không đư c làm dừng các nút khác. Dữ liệu hợp lệ đư c lưu; lỗi được ghi nhật ký.

Heartbeat xác định thiết bị còn hoạt động. Khi mất mạng, nút lưu bộ đệm giới hạn; khi phục hồi, dữ liệu được gửi theo chính sách. Các phép thử gồm dừng đầu nhận, sai APN, mất sóng, gói thiếu, gói trùng và reset thiết bị. Chỉ tiêu sau này gồm tỷ lệ gói hợp lệ, độ trễ, số reconnect và thời gian phục hồi.

2.6. Thiết kế hệ thống SCADA

2.6.1. Kiến trúc và chức năng



Hình 2.9. Cấu trúc hệ thống SCADA giám sát đường ống

Kiến trúc hệ thống được tổ chức thành bốn lớp gồm lớp quá trình, lớp thu thập – điều khiển, lớp truyền thông và lớp giám sát – phân tích. Dữ liệu được truyền từ cảm biến tại hiện trường qua lớp thu thập và truyền thông đến hệ thống giám sát; kết quả xử lý và trạng thái chẩn đoán được phản hồi lên SCADA. Cấu trúc phân lớp giúp tách biệt chức năng điều khiển an toàn tại hiện trường với chức năng giám sát và chẩn đoán ở cấp trên.

SCADA nhận dữ liệu từ máy chủ/cơ sở dữ liệu, hiển thị trạng thái và kết quả thuật toán. Chức năng gồm sơ đồ công nghệ, giá trị tức thời, xu hướng, lịch sử, alarm, trạng thái 4G và vị trí rò ước lượng. Giao diện phải phân biệt dữ liệu đo với dữ liệu ước lượng và thể hiện rõ khi dữ liệu không hợp lệ.

2.6.2. Quy ước tag

Bảng 2.16. Nhóm tag SCADA

Nhóm	Ví dụ	Mục đích
Đo lường	PT_IN, PT_OUT, FT_IN, FT_OUT	Áp suất và lưu lượng
Thiết bị	PUMP_RUN, VALVE_STATE	Trạng thái chấp hành
Mạng	NET_OK, RSSI, LAST_PACKET	Kết nối 4G
Chẩn đoán	LEAK_ALM, LEAK_POS, RESIDUAL	Kết quả thuật toán
Chất lượng	Q_PT_IN, Q_FT_OUT	Cờ dữ liệu

Mỗi tag có đơn vị, dải, nguồn, chu kỳ cập nhật và cờ chất lượng. Tên tag đư c chuẩn hóa để liên kết PLC, Raspberry Pi và SCADA. Khi mất dữ liệu, giá trị cũ chỉ được giữ kèm trạng thái stale; không được coi là mẫu hiện thời.

2.6.3. Giao diện, xu hướng và cảnh báo

Màn hình tổng quan hiển thị tuyến ống, bơm, van, H_1, H_3, Q_1, Q_2 và trạng thái kết nối. Màn hình xu hướng so sánh H_1–H_3 và Q_1–Q_2 theo cùng thời gian. Màn hình chẩn đoán hiển thị residual, $\hat{z}\ell$, $\chi\ell$, độ tin cậy và cờ ngoài miền. Màn hình bảo trì hiển thị gói cuối, sequence và mã lỗi.

Cảnh báo được chia thành quá trình, thiết bị, truyền thông và chẩn đoán. Logic sử dụng on-delay, off-delay và hysteresis để hạn chế dao động. Xác nhận alarm không đồng nghĩa sự cố đã hết. Nhật ký lưu thời gian bắt đầu, xác nhận, kết thúc và ghi chú.

2.6.4. Lưu trữ và truy xuất dữ liệu

Bảng 2.17. Nhóm dữ liệu cần lưu

Nhóm	Trường chính	Ứng dụng
Đo thô	time, device, H, Q, quality	Nhận dạng và truy vết
Trạng thái	pump, valve, network	Phân đoạn kịch bản
Sự kiện	start, end, priority, ack	Vận hành và đánh giá

Cấu hình	firmware, calibration, sampling	Tái lập thí nghiệm
Ước lượng	$\hat{z}$, $\hat{\lambda}$, residual, confidence	Đánh giá thuật toán

Mỗi phiên có run_id và metadata: vị trí rò thật, điểm bơm, cấu hình van, phiên bản phần mềm và hệ số hiệu chuẩn. Dữ liệu gốc được khóa; bản làm sạch có nhật ký biến đổi. Sinh viên làm việc trên bản sao để bảo toàn tính toàn vẹn.

2.7. Tích hợp, vận hành và khai thác mô hình

2.7.1. Quy trình tích hợp

Bảng 2.18. Trình tự tích hợp và kiểm thử

Giai đoạn	Nội dung	Minh chứng
Cơ khí	Lắp ống, van, điểm rò, thử kín	Bản vẽ hoàn công và biên bản kín
Điện	Nguồn, tủ, terminal, I/O	Sơ đồ và bảng đo nguồn
Đo lường	Scale, hiệu chuẩn, cờ lỗi	Bảng hiệu chuẩn
4G	UART, APN, TCP, reconnect	Log truyền thông
SCADA	Tag, màn hình, lịch sử, alarm	Ảnh và tệp lịch sử
Thuật toán	SIL/PIL và chạy online	Dữ liệu và báo cáo chỉ tiêu

Tích hợp theo từng tầng giúp cô lập lỗi. Không chạy thuật toán chẩn đoán trước khi dữ liệu đo và timestamp được xác nhận. Mỗi thay đổi phần cứng hoặc firmware phải gắn phiên bản và thực hiện lại các phép thử liên quan.

2.7.2. Quy trình vận hành

- Kiểm tra bồn, đường ống, van, nguồn, nối đất và khu vực thao tác.
- Khởi động PLC và SCADA; sau đó khởi động thuật toán trên Raspberry Pi, cấp nguồn ESP32 và thiết lập kết nối 4G.
- Chạy trạng thái bình thường để xác nhận H_1, H_3, Q_1, Q_2 và kết nối.
- Tạo rò theo kịch bản; ghi run_id, thời điểm, vị trí và cấu hình.
- Đóng rò, dừng bơm, lưu dữ liệu, sao lưu và ghi nhật ký.

2.7.3. Yêu cầu an toàn

Không chạy bơm khi thiếu nước, không mở tủ khi có nước và không thay đấu nối khi chưa cắt nguồn. Dừng khẩn cấp và bảo vệ quá tải hoạt động cục bộ. Thiết bị ngoài trời

có hộp bảo vệ, cáp kín nước và tách động lực–tín hiệu. Người học chỉ tạo rò rỉ khi giảng viên cho phép và nước xả đã đư c dẫn an toàn.

2.7.4. Khai thác trong đào tạo STEM

Mô hình liên kết kiến thức động lực học chất lỏng, cảm biến, PLC, 4G, SCADA, thiết kế hệ thống và mô hình hóa toán học. Bốn nhóm hoạt động được xây dựng gồm khảo sát cảm biến–thủy lực, lập trình nút 4G, thiết kế giao diện SCADA, nhận dạng tham số và chẩn đoán rò rỉ. Cấu trúc bộ học liệu và khả năng áp dụng đư c trình bày tại mục 4.7.

Sản phẩm học tập gồm sơ đồ hệ thống, chương trình điều khiển, dữ liệu gốc, đồ thị, bảng tính sai số, nhật ký thực hiện và đề xuất cải tiến. Dữ liệu mô phỏng hoặc dữ liệu phát lại được ghi rõ nguồn để phân biệt với dữ liệu thu trực tuyến từ mô hình.

2.8. Kết luận chương 2

Chương 2 đã xác lập cấu hình kỹ thuật của mô hình phần cứng, truyền thông 4G và SCADA. Hệ thống được tổ chức theo bốn lớp, gồm quá trình, thu thập–điều khiển, truyền thông và giám sát–phân tích. Các thiết bị đư c lựa chọn theo dải đo, chuẩn tín hiệu, điều kiện ngoài trời, khả năng tích hợp và yêu cầu đào tạo. Quy trình quy đổi tín hiệu 4–20 mA, cấu trúc bản tin TCP/IP, hệ thống thẻ SCADA, lưu trữ và cảnh báo được thống nhất làm cơ sở triển khai thực nghiệm.

CHƯƠNG 3: MÔ HÌNH TOÁN HỌC VÀ THUẬT TOÁN CHẨN ĐOÁN RÒ RỈ

Chương 3 trình bày quá trình xây dựng mô hình toán học của tuyến ống ở trạng thái bình thường và khi xảy ra rò rỉ; nhận dạng tham số từ dữ liệu thực nghiệm; biểu diễn hệ dưới dạng LPV; thiết kế bộ quan sát trạng thái bằng điều kiện bất đẳng thức ma trận tuyến tính (LMI); và nội suy ma trận khuếch đại trong miền đa diện. Hệ ký hiệu được thống nhất để phân biệt cột áp đầu tuyến, cột áp tại điểm rò và cột áp cuối tuyến.

Trong toàn bộ báo cáo, H_1 ký hiệu cột áp đầu tuyến, H_2 là cột áp tại điểm rò và H_3 là cột áp cuối tuyến. Hai lưu lượng đo ở đầu và cuối tuyến lần lượt đư c ký hiệu Q_1 và Q_2. Quy ước này được sử dụng thống nhất trong mô hình, chương trình mô phỏng, cơ sở dữ liệu và giao diện SCADA.

3.1. Cơ sở mô hình hóa và quy ước ký hiệu

3.1.1. Các giả thiết mô hình

Mô hình được xây dựng từ phương trình động lượng và phương trình liên tục của dòng chất lỏng một chiều trong ống. Nước đư c xem có tính chất gần không đổi trong miền vận hành; ống có tiết diện A và đư ng kính D không đổi; tổn thất đư c gom vào hệ số μ; tốc độ truyền sóng áp lực là b. Mô hình tập trung được suy ra bằng cách xấp xỉ đạo hàm theo không gian trên từng đoạn ống.

Các giả thiết phù hợp với mục tiêu thiết kế bộ quan sát thời gian thực nhưng có giới hạn khi xảy ra búa nước, thay đổi van quá nhanh, nhiều điểm rò đồng thời hoặc đặc tính ống thay đổi lớn. Các điều kiện này được kiểm soát trong kịch bản thực nghiệm và ghi rõ khi đánh giá kết quả.

Bảng 3.1. Ký hiệu sử dụng trong mô hình

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
Q(z,t)	Lưu lượng tại vị trí z và thời điểm t	m^3/s
H(z,t)	Cột áp	m
L	Chiều dài tuyến ống	m
A	Diện tích tiết diện	m^2
g	Gia tốc trọng trường	m/s^2
b	Tốc độ truyền sóng áp lực	m/s

μ	Hệ số tổn thất hiệu dụng	Theo mô hình
zℓ	Vị trí rò tính từ đầu tuyến	m
λℓ	Hệ số rò	m^(5/2)/s

3.1.2. Phương trình động lượng và liên tục

Phương trình động lượng của dòng chảy một chiều trong ống được biểu diễn như sau:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}(z, t) + gA\frac{\partial H}{\partial z}(z, t) + \mu Q(z, t)|Q(z, t)| = 0 \quad (3.1)$$

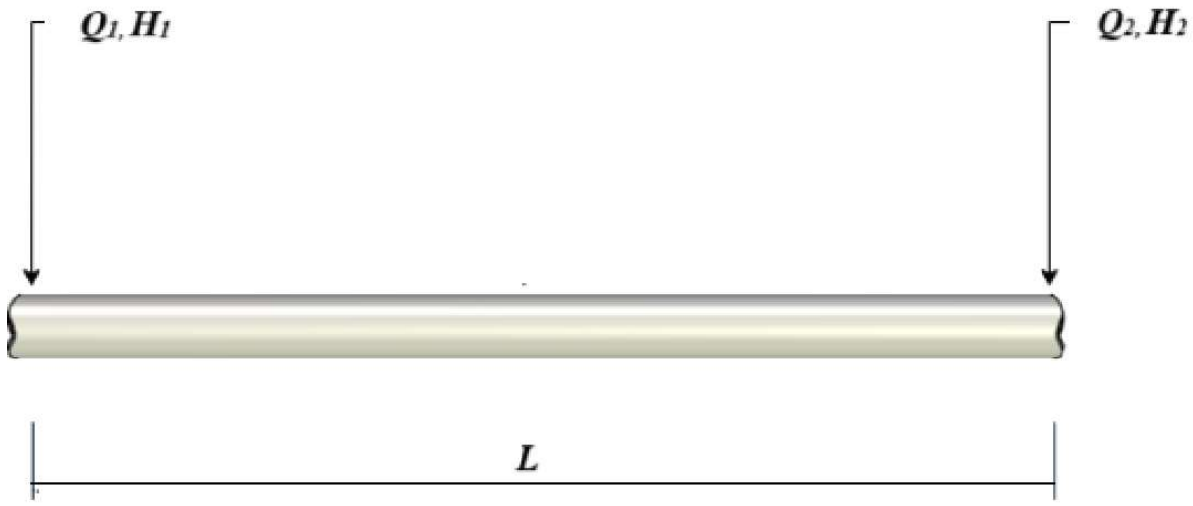
Phương trình liên tục được viết:

$$b^2\frac{\partial Q}{\partial z}(z, t) + gA\frac{\partial H}{\partial t}(z, t) = 0 \quad (3.2)$$

Hai phương trình trên là cơ sở để thiết lập mô hình ở trạng thái bình thường và trạng thái có rò rỉ. Thành phần tổn thất ma sát được biểu diễn dưới dạng μQ|Q| trong phương trình trạng thái. Công thức Darcy–Weisbach tại Chương 2 được sử dụng cho tính toán lựa chọn bơm và không thay thế mô hình động lực học này.

3.2. Mô hình hệ thống ở trạng thái bình thường

3.2.1. Điều kiện biên và biến trạng thái



Hình 3.1. Mô tả tuyến ống ở trạng thái không rò rỉ

Ở trạng thái bình thường, đặt $Q_1(t)=Q(0,t)$, $H_1(t)=H(0,t)$, $Q_2(t)=Q(L,t)$ và $H_3(t)=H(L,t)$. Các đại lượng H_1, H_3, Q_1 và Q_2 tương ứng với bốn kênh đo của hệ thống thực nghiệm.

Xấp xỉ đạo hàm không gian trên chiều dài L, từ phương trình động lượng và liên tục thu được:

$$\begin{cases} \dot{Q}_1 = -\mu Q_1^{\,2} + \frac{gA}{L}(H_1 - H_3) \\ \dot{H}_3 = \frac{b^2}{gA\,L}(Q_1 - Q_2) \end{cases} \tag{3.3}$$

Đặt $a_1=gA$ và $a_2=b^2/(gA)$, hệ đư c viết:

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{Q}_1 = -\mu Q_1^{\,2} + \frac{a_1}{L}(H_1 - H_3) \\ \dot{H}_3 = \frac{a_2}{L}(Q_1 - Q_2) \end{cases} \tag{3.4}$$

Chọn trạng thái $x=[Q_1,H_3]^T$ và đầu vào $u=[H_1,Q_2]^T$. Với cấu trúc này, H_1 và Q_2 là tín hiệu kích thích mô hình; Q_1 và H_3 là đầu ra dùng để xây dựng hàm mục tiêu khi nhận dạng các tham số a_1, a_2 và μ.

3.2.2. Dạng trạng thái

Hệ phi tuyến có thể biểu diễn:

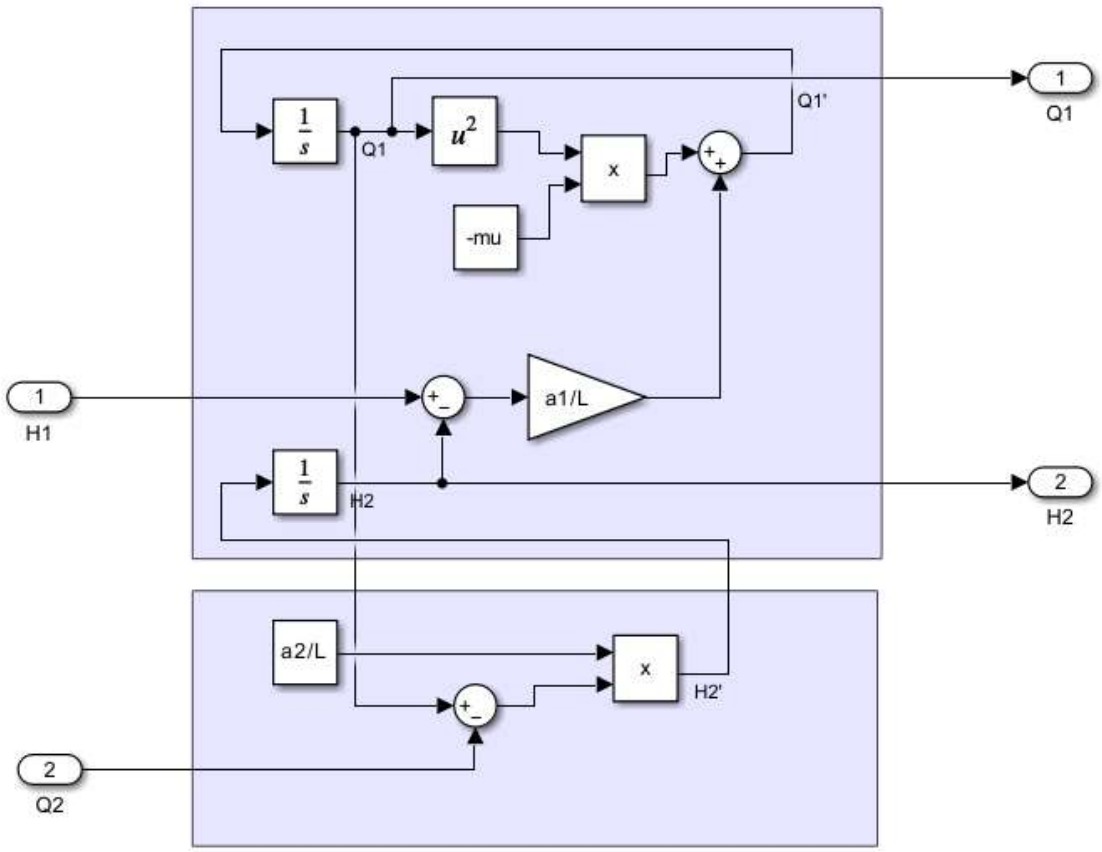
$$\dot{x} = f(x,u) \tag{3.5}$$

với f đư c xác định trực tiếp từ hệ (3.4). Trong triển khai Simulink, dạng phương trình vi phân đư c dùng trực tiếp vì thuận lợi hơn so với cố định một ma trận tại một điểm làm việc.

Bảng 3.2. Phân loại tín hiệu trong mô hình bình thường

Nhóm	**Tín hiệu**	**Nguồn**
Đầu vào	H_1, Q_2	Cảm biến áp suất đầu và lưu lượng cuối
Đầu ra so sánh	Q_1, H_3	Cảm biến lưu lượng đầu và áp suất cuối
Tham số cần ước lượng	a_1, a_2, μ	Parameter Estimation
Thông số hình học	L	Bản vẽ/đo thực tế

3.2.3. Xây dựng mô hình trên MATLAB/Simulink



Hình 3.2. Mô hình đường ống bình thường trên MATLAB/Simulink

Mô hình Simulink đư c xây dựng từ các khối tính $\dot{Q}_1$ và $\dot{H}_3$, sau đó tích phân để thu Q_1 và H_3. Các tín hiệu H_1, Q_2 được đưa vào từ timeseries hoặc dữ liệu thời gian thực. Tham số a_1, a_2, μ và L được khai báo trong workspace để Parameter Estimation có thể cập nhật trong quá trình tối ưu.

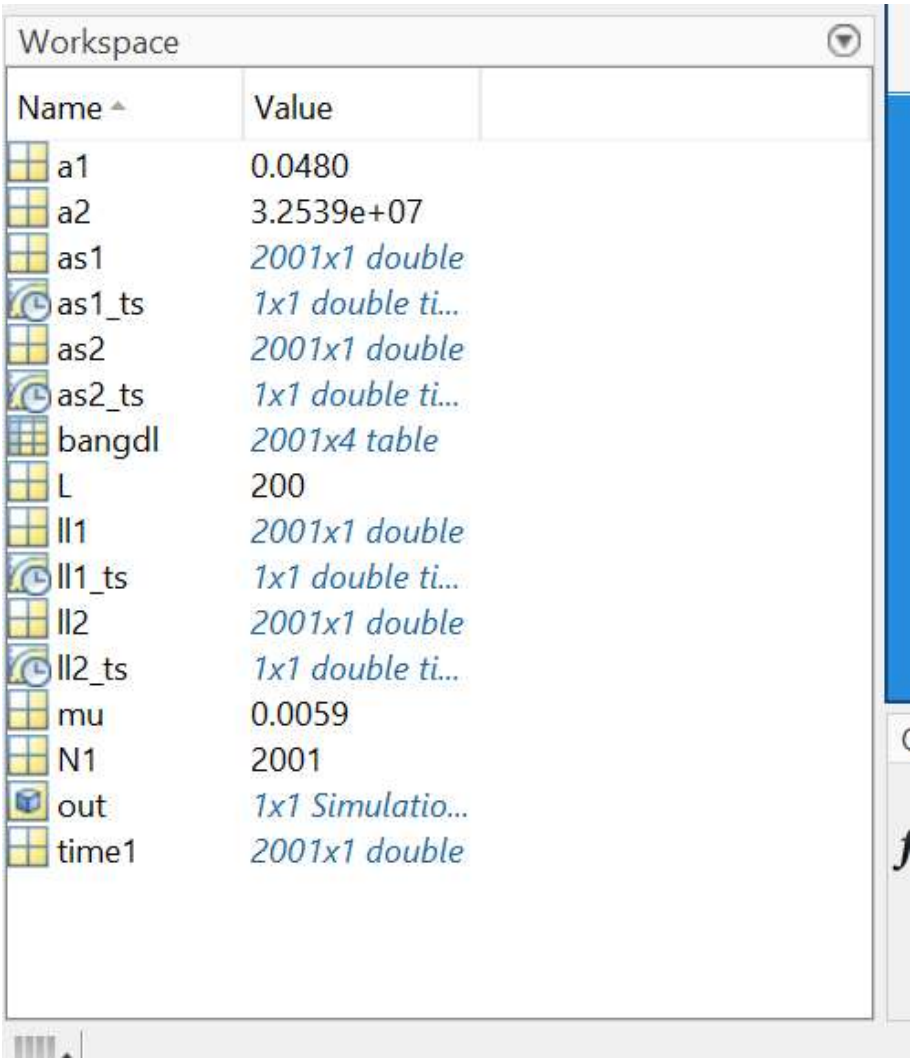
Trước khi nhận dạng, cần kiểm tra đúng đơn vị: áp suất được chuyển thành mét cột nước, lưu lượng về m^3/s và thời gian theo giây. Điều kiện đầu của Q_1, H_3 đư c lấy tại mẫu đầu của khoảng dữ liệu ổn định nhằm hạn chế sai số quá độ.

3.3. Xác định tham số bằng Parameter Estimation

3.3.1. Thu thập và tổ chức dữ liệu

Dữ liệu nhận dạng gồm 2.000 mẫu ở trạng thái không rò rỉ, thu với chu kỳ 1 s. Bốn kênh dữ liệu gồm cột áp suất đầu tuyến, cột áp suất cuối tuyến, lưu lượng đầu tuyến và lưu lượng cuối tuyến. Các mẫu mất kết nối hoặc không đạt cờ chất lượng được loại khỏi tập nhận dạng.

Quy ước biến dữ liệu: as1 tương ứng áp suất đầu H_1; as2 tương ứng áp suất cuối H_3; ll1 tương ứng Q_1; ll2 tương ứng Q_2. Tệp dữ liệu phải có dấu thời gian hoặc chu kỳ lấy mẫu rõ ràng, loại bỏ mẫu mất kết nối và lưu cờ chất lượng.



Hình 3.3. Các mảng dữ liệu đư c đưa vào MATLAB Workspace

3.3.2. Khởi tạo tham số và tạo timeseries

Chương trình khởi tạo dữ liệu và tham số được tổ chức với đường dẫn tương đối và biến chu kỳ lấy mẫu nhằm bảo đảm khả năng tái lập:

```
%% Tham so khoi tao
a1 = 0.04802;
a2 = 32538525.61;
mu = 0.0059266;
L  = 200;
Ts = 1;
bangdl = readtable("dulieu_trangthai_binhthuong.xlsx");
```

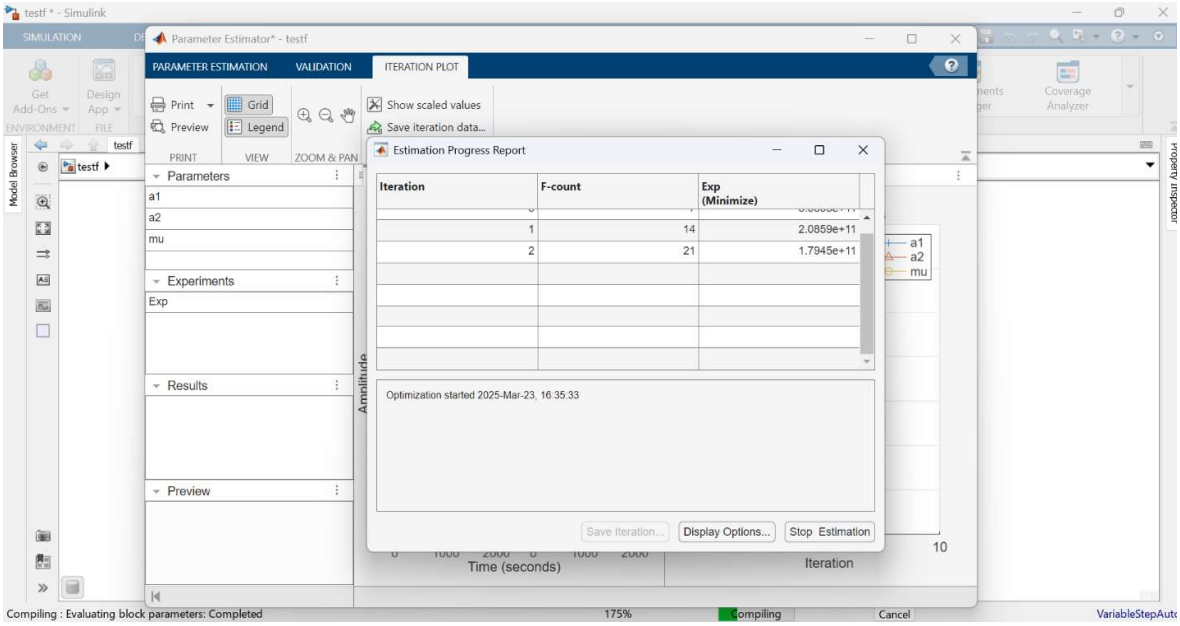
```
as1 = bangdl.as1;  as2 = bangdl.as2;
ll1 = bangdl.ll1;  ll2 = bangdl.ll2;
N = height(bangdl);
time = (0:Ts:(N-1)*Ts)';
as1_ts = timeseries(as1,time);
as2_ts = timeseries(as2,time);
ll1_ts = timeseries(ll1,time);
ll2_ts = timeseries(ll2,time);
```

Các giá trị ban đầu được lựa chọn trong miền vật lý của hệ thống và chỉ dùng để khởi tạo bài toán tối ưu. Quá trình nhận dạng được thực hiện với cận trên, cận dưới của từng tham số và nhiều bộ giá trị khởi tạo để kiểm tra tính ổn định của thực nghiệm.

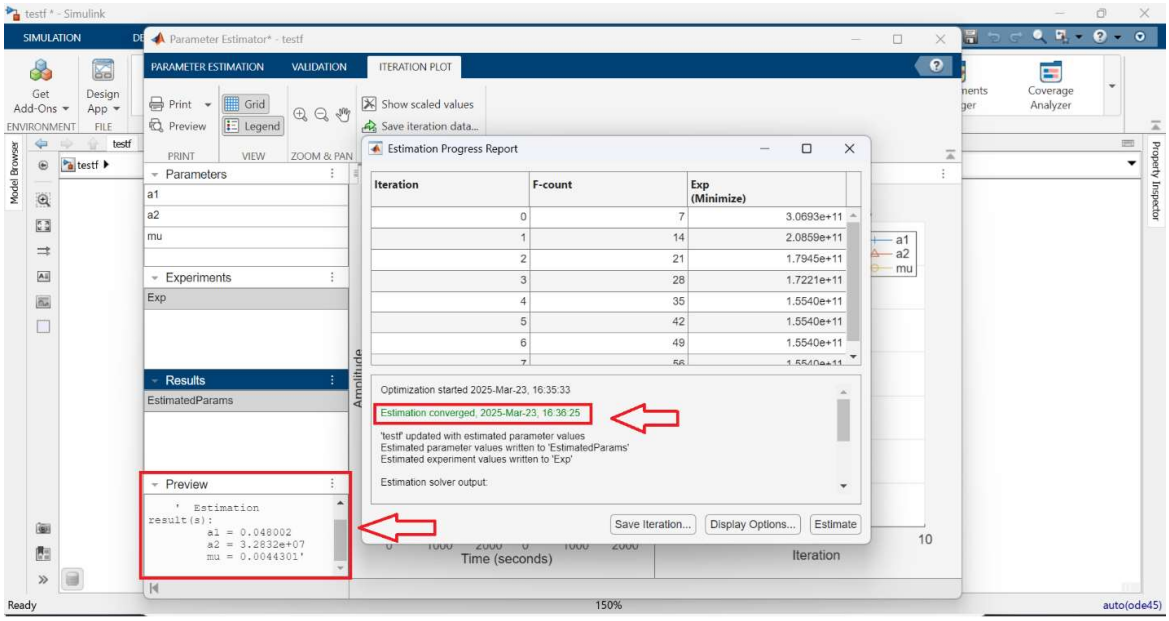
3.3.3. Các bước sử dụng Parameter Estimation

Bảng 3.3. Trình tự nhận dạng tham số

Bước	Thao tác
1	Mở mô hình Simulink trạng thái bình thường
2	Khởi động ứng dụng Parameter Estimation
3	Tạo Experiment và gán H_1,Q_2 làm input; Q_1,H_3 làm output
4	Dùng Plot/Simulate để kiểm tra ánh xạ dữ liệu
5	Chọn Select Parameters: a_1, a_2, μ
6	Đặt giá trị đầu, cận dưới–trên và cập nhật mô hình
7	Chọn Estimate và theo dõi hàm mục tiêu
8	Kiểm tra Preview, residual và lưu bộ tham số



Hình 3.4. Giao diện theo dõi quá trình Parameter Estimation



Hình 3.5. Kết quả xem trước sau quá trình ước lượng

Kết quả nhận dạng từ 2.000 mẫu thu trên mô hình cho a_1=0,048002; a_2=3,2832×10^7 và μ=0,0044301. Bộ tham số này được cập nhật vào mô hình rò rỉ và bộ quan sát để thực hiện các kịch bản đánh giá ở Chương 4.

3.4. Mô hình hệ thống khi xảy ra rò rỉ

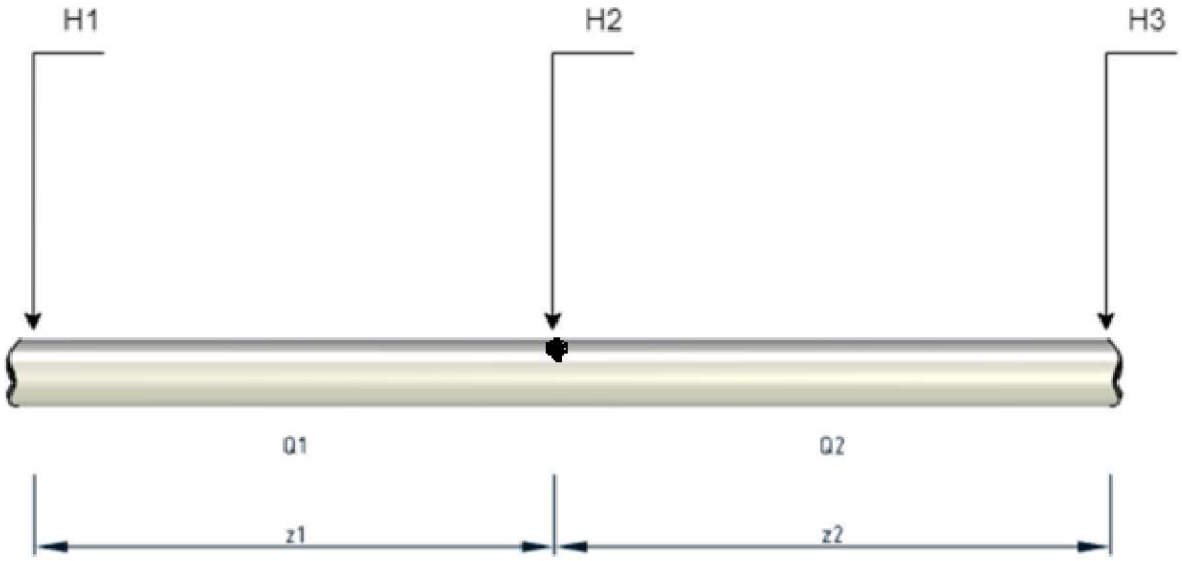
3.4.1. Quan hệ lưu lượng rò

Khi xuất hiện một điểm rò, tuyến ống được chia thành hai đoạn dài zℓ và L−zℓ. Lưu lượng rò rỉ qua lỗ đư c mô tả theo công thức:

$$Q_l = \lambda l \sqrt{H_l} \qquad (3.6)$$

Trong đó:

- Q_l là lưu lượng rò rỉ (m^3/s).
- H_l là cột áp tại điểm rò rỉ (m).
- λl là hệ số rò rỉ.



Hình 3.6. Mô tả tuyến ống khi xảy ra rò rỉ

3.4.2. Mô hình ba trạng thái

Xác định trạng thái hệ thống $x = [x_1\ x_2\ x_3]^T = [Q_1\ H_2\ Q_2]^T$, đầu vào $u = [H_1\ H_3]^T$ và đầu ra đo lường $y = [Q_1\ Q_2]^T$.

Ta có mô hình toán học của hệ thống được thể hiện qua các phương trình sau:

$$\dot{x}_1 = -\mu x_1^2 + \frac{a_1}{z_1}(u_1 - x_2) \tag{3.7}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{a_2}{z_1}(x_1 - x_3) \tag{3.8}$$

$$\dot{x}_3 = -\mu x_3^2 + \frac{a_1}{z_2}(x_2 - u_2) \tag{3.9}$$

$$y = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_3 \end{pmatrix} \tag{3.10}$$

Phương trình thứ hai thể hiện bảo toàn lưu lượng tại điểm rò rỉ: lưu lượng vào đoạn ống bằng tổng lưu lượng tiếp tục qua đoạn sau và lưu lượng thoát qua lỗ rò. Hệ ba trạng thái là cơ sở để mở rộng trạng thái và thiết kế bộ quan sát.

3.4.3. Mô hình trạng thái mở rộng

Chọn trạng thái mở rộng của hệ thống $x = [x_1\ x_2\ x_3\ x_4\ x_5]^T = [Q_1\ H_2\ Q_2\ z_\ell\ \lambda_\ell]^T$, đầu vào $u = [H_1\ H_3]^T$ và đầu ra đo lường $y = [Q_1\ Q_2]^T$.

Từ công thức tại mục (3.4.2) và các trạng thái mới, ta có các phương trình sau:

$$\dot{x}_1 = -\mu x_1^2 + \frac{a_1}{x_4}(u_1 - x_2) \tag{3.11}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{a_2}{x_4}(x_1 - x_3 - x_5\sqrt{x_2}) \quad (3.12)$$

$$\dot{x}_3 = -\mu x_3^2 + \frac{a_1}{L-x_4}(x_2 - u_2) \quad (3.13)$$

$$\dot{x}_4 = 0 \quad (3.14)$$

$$\dot{x}_5 = 0 \quad (3.15)$$

$$y = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Hệ phương trình trên được sử dụng để xây dựng mô hình LPV và bộ quan sát. Miền xác định của mô hình thỏa $0<x_4<L$ và $x_2>0$; trong triển khai số, vị trí ước lượng đư c giới hạn cách hai đầu tuyến một khoảng tối thiểu.

3.5. Biểu diễn mô hình dưới dạng LPV

3.5.1. Lựa chọn biến lập lịch

Các hệ số phụ thuộc trạng thái được gom thành năm biến lập lịch. Để phương trình LPV tái tạo chính xác hệ phi tuyến, chọn:

$$\rho_1 = -\mu x_1 \quad (3.17)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{x_4} \quad (3.18)$$

$$\rho_3 = -\frac{\sqrt{x_2}}{x_4} \quad (3.19)$$

$$\rho_4 = \frac{a_1}{L-x_4} \quad (3.20)$$

$$\rho_5 = -\mu x_3 \quad (3.21)$$

Biến lập lịch $\rho_3 = -\frac{\sqrt{x_2}}{x_4}$ được xác định trực tiếp từ thành phần rò trong phương trình $\dot{x}_2$. Mỗi ρ_i đư c giới hạn bởi giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của miền vận hành; x_4 không được phép tiến sát 0 hoặc L để tránh kỳ dị của mô hình.

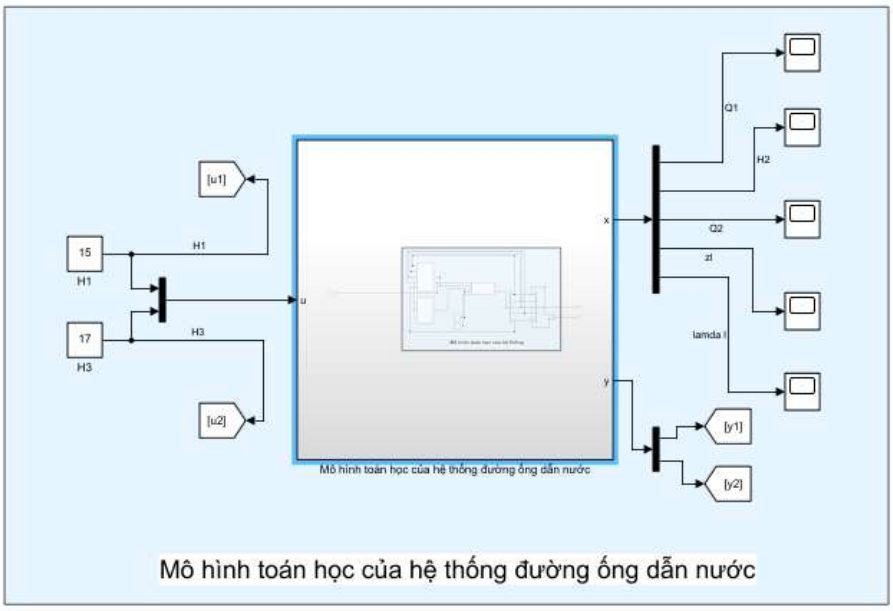
3.5.2. Ma trận LPV

Mô hình đư c viết $\dot{x} = A(\rho)x + B(\rho)u$, $y = Cx$, với:

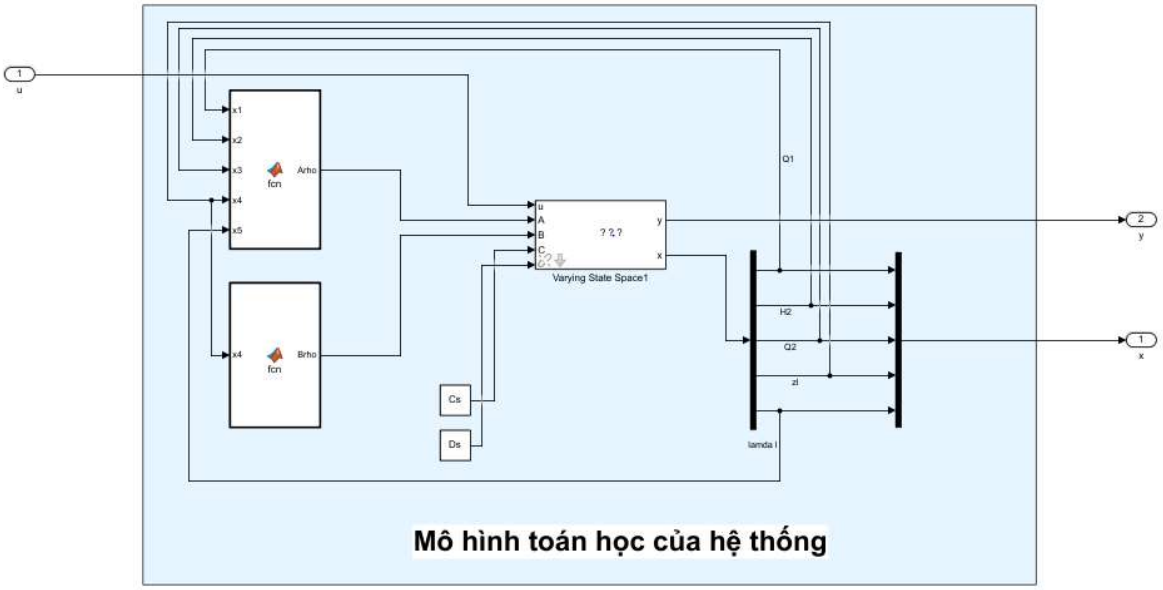
$$\text{Với } A(\rho) = \begin{bmatrix} \rho_1 & -\frac{1}{2}a_1\rho_2 & 0 & -\frac{1}{2}a_1\rho_3^2 & 0 \\ a_2\rho_2 & 0 & -a_2\rho_2 & 0 & a_2\rho_3 \\ 0 & \rho_4 & \rho_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B(\rho) = \begin{bmatrix} a_1\rho_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\rho_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Thay các biến ρ_i vào ba hàng đầu của ma trận A(ρ) thu lại đúng hệ phi tuyến ở mục 3.4.3. Phép đối chiếu này được thực hiện trước khi khai báo ma trận trong khối Varying State Space để kiểm soát dấu đại số và thành phần căn bậc hai.



Hình 3.7. Mô hình LPV của hệ thống trên MATLAB/Simulink



Hình 3.8. Khối subsystem của mô hình đường ống

3.6. Thiết kế bộ quan sát trạng thái bền vững

3.6.1. Cấu trúc bộ quan sát

Bộ quan sát Luenberger mở rộng theo LPV có dạng:

$$\dot{\hat{x}} = A(\rho)\hat{x} + B(\rho)u + L(\rho)(y - C\hat{x}) \quad (3.22)$$

Trạng thái ước lượng $\hat{x}=[\hat{Q}_1,\hat{H}_2,\hat{Q}_2,\hat{z}_\ell,\hat{\lambda}]^T$. H_1,H_3,Q_1,Q_2 là tín hiệu đã biết từ cảm biến; mục tiêu là xác định $L(\rho)$ để sai số $e=x-\hat{x}$ hội tụ và lấy $\hat{z}_\ell$ làm vị trí rò ước lượng.

3.6.2. Phương trình sai số và điều kiện LMI

Đặt $e = x - \hat{x}$. Khi cùng sử dụng ρ, động học sai số là:

$$\dot{e} = (A(\rho) - L(\rho)C)e \quad (3.23)$$

Chọn hàm Lyapunov $V = e^T P e$, $P=P^T>0$. Yêu cầu tốc độ suy giảm $\alpha>0$ được bảo đảm nếu:

$$[A(\rho)-L(\rho)C]^T P + P[A(\rho)-L(\rho)C] + 2\alpha P < 0 \quad (3.24)$$

Đặt $Y(\rho)=-PL(\rho)$, ta thu được LMI tuyến tính theo P và Y:

$$A(\rho)^T P + PA(\rho) + C^T Y(\rho)^T + Y(\rho)C + 2\alpha P < 0 \quad (3.25)$$

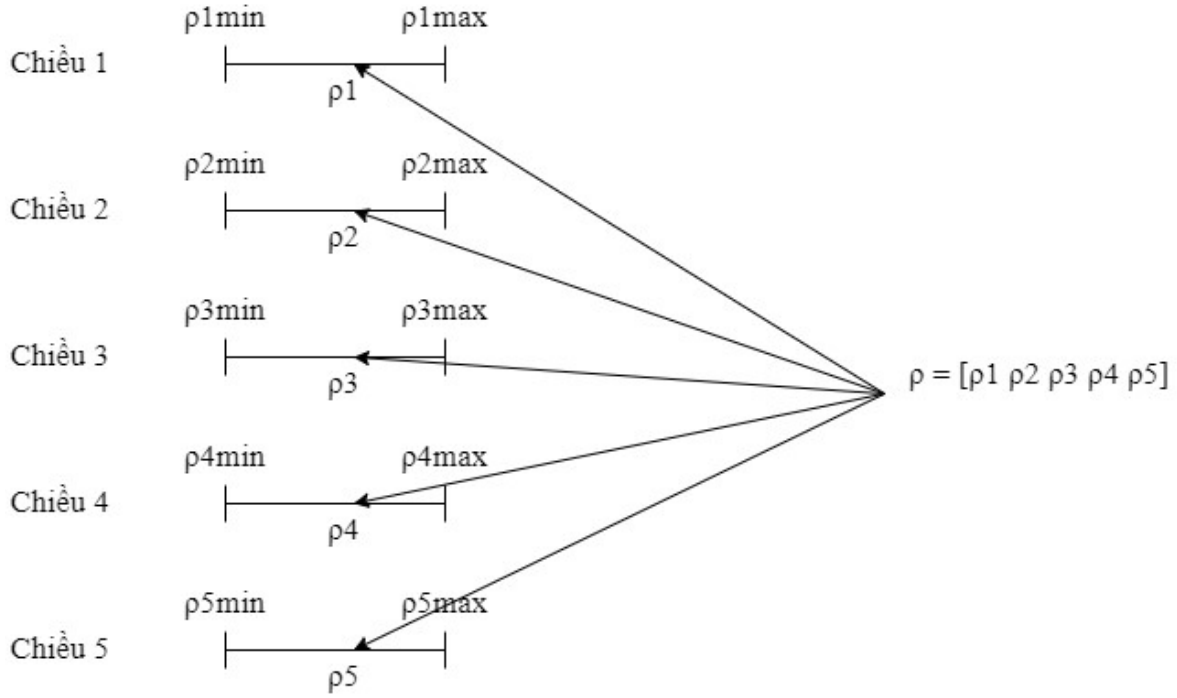
Sau khi giải LMI, ma trận khuếch đại được xác định theo $L(\rho)=-P^{-1}Y(\rho)$, phù hợp với phép đặt $Y(\rho)=-PL(\rho)$.

3.6.3. Giải LMI tại các đỉnh đa diện

Với năm biến lập lịch, miền hộp có tối đa $2^5=32$ đỉnh. Tại mỗi đỉnh i, A_i là ma trận hằng. Tìm $P>0$ và Y_i sao cho:

$$A_i^T P + PA_i + C^T Y_i^T + Y_i C + 2\alpha P < 0, \qquad i=1,\ldots,32.$$

Sau đó, $L_i=-P^{-1}Y_i$. Một ma trận P chung được sử dụng tại tất cả các đỉnh để bảo đảm ổn định bậc hai trong miền đa diện. Khi bài toán không khả thi, các yếu tố đư c kiểm tra gồm tính quan sát, đơn vị của biến, miền biến lập lịch, dấu của ma trận và giá trị α.



Hình 3.9. Minh họa phương pháp đa diện dùng cho biến lập lịch

Bảng 3.4. Thuật toán giải LMI tại các đỉnh

Bước	**Nội dung**
1	Xác định ρ_min, ρ_max và tạo 32 đỉnh
2	Tính A_i, B_i tại từng đỉnh
3	Khai báo $P=P^T>0$ và Y_i
4	Áp đặt LMI cho đồng thời 32 đỉnh
5	Giải bài toán khả thi/tối ưu
6	Tính $L_i=-P^{-1}Y_i$ và lưu ma trận

3.6.4. Nội suy ma trận khuếch đại trong miền đa diện

Ma trận khuếch đại tại một điểm làm việc được xác định bằng nội suy đa tuyến tính theo trọng số lồi. Với đỉnh i và biến lập lịch thứ n, trọng số thành phần được tính như sau:

$$\omega_{i,n}(\rho_n) = (\rho_n,max-\rho_n)/(\rho_n,max-\rho_n,min), \text{ nếu đỉnh i dùng } \rho_n,min,$$

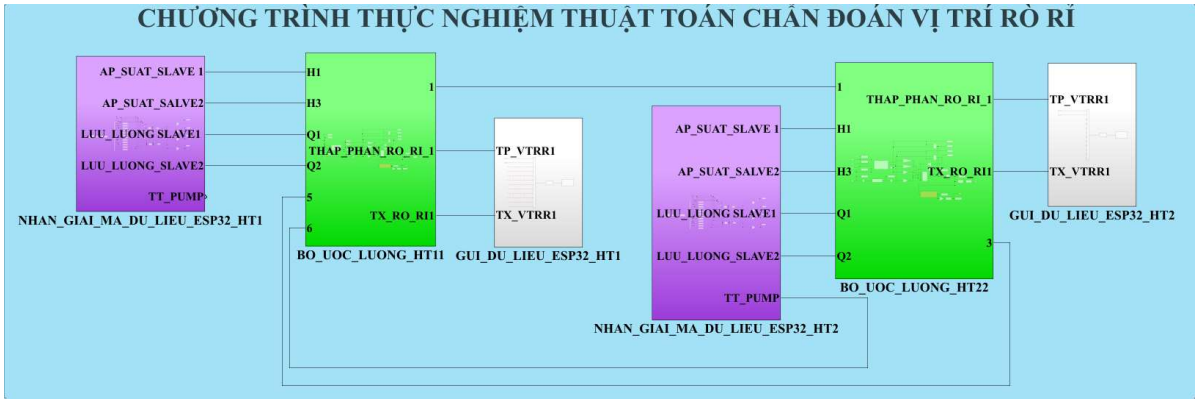
$$\omega_{i,n}(\rho_n) = (\rho_n-\rho_n,min)/(\rho_n,max-\rho_n,min), \text{ nếu đỉnh i dùng } \rho_n,max.$$

Trọng số của đỉnh $\alpha_i(\rho)=\prod_{n=1}^{5}\omega_{i,n}(\rho_n)$, thỏa $\alpha_i\geq 0$ và $\Sigma_i\alpha_i=1$. Ma trận khuếch đại tại thời điểm tính toán được xác định bởi:

$$L(\rho) = \sum_{i=1}^{32} \left(L_i \prod_{n=1}^{5} \left(1 - \frac{|\rho_n - \rho_n \text{đỉnh}_i|}{\rho_n \max - \rho_n \min} \right) \right) \quad (3.26)$$

Công thức nội suy thỏa đúng giá trị ma trận khuếch đại tại các đỉnh và bảo đảm tổng trọng số bằng một. Trước khi nội suy, các biến lập lịch đư c kiểm tra miền; khi xảy ra bão hòa, thuật toán phát cờ ngoài miền và kết quả ước lượng không đư c sử dụng để xác nhận cảnh báo.

3.6.5. Xây dựng bộ quan sát trên MATLAB/Simulink



Hình 3.10. Chương trình thực nghiệm bộ quan sát trên Simulink

Chương trình gồm khối tiếp nhận–giải mã H_1, H_3, Q_1, Q_2; khối tính biến lập lịch; khối nội suy $L(\rho)$; mô hình bộ quan sát; và khối xuất kết quả. Thuật toán được triển khai trên Raspberry Pi 4 với cấu hình bộ giải và chu kỳ nhận dữ liệu phù hợp giao tiếp TCP của hệ thống. [8]

Chu kỳ tính được giữ cố định và nhỏ hơn hằng số thời gian của bộ quan sát. Giá trị ban đầu của $\hat{Q}_1$ và $\hat{Q}_2$ được lấy từ cảm biến, $\hat{H}_2$ được đặt theo giá trị trung gian giữa H_1 và H_3, $\hat{z}\ell$ tại giữa tuyến và $\chi\ell$ là một số dương nhỏ. Trong thời gian khởi tạo, hệ thống chưa phát cảnh báo. Mẫu NaN, mất gói hoặc ngoài miền biến lập lịch được xử lý trước bước cập nhật trạng thái.

3.7. Thuật toán chẩn đoán và quy trình thực hiện

Bảng 3.5. Quy trình chẩn đoán vị trí rò rỉ

Bước	Nội dung
1	Đọc H_1,H_3,Q_1,Q_2; kiểm tra đơn vị, timestamp và chất lượng
2	Cập nhật trạng thái bộ quan sát và tính ρ
3	Nội suy $L(\rho)$ từ 32 gain tại đỉnh
4	Tính residual $r=y-C\hat{x}$

5	Lấy $\hat{z}\ell=\hat{x}_4$ và $\lambda\ell=\hat{x}_5$
6	Kiểm tra hội tụ, miền và điều kiện cảnh báo
7	Gửi vị trí, residual, độ tin cậy lên SCADA

Residual khác không do nhiễu đo và sai lệch mô hình. Ngưỡng cảnh báo đư c xác định từ dữ liệu trạng thái bình thường tại các điểm làm việc. Cảnh báo rò rỉ đư c xác nhận khi residual vượt ngưỡng trong thời gian quy định, $\hat{z}\ell$ thuộc miền chẩn đoán và dữ liệu đo đạt cờ chất lượng. Trường hợp mất dữ liệu được phân loại là "không xác định".

Các chỉ tiêu đánh giá gồm sai số tuyệt đối $|\hat{z}\ell-z\ell|$, sai số tuyệt đối trung bình (MAE), căn sai số bình phương trung bình (RMSE), độ chệch, thời gian phát hiện, tỷ lệ phát hiện và tỷ lệ cảnh báo giả. Kết quả thực nghiệm đư c trình bày tại Chương 4.

3.8. Kết luận chương 3

Chương 3 đã thiết lập mô hình động lực học của tuyến ống từ phương trình động lượng và liên tục. Mô hình trạng thái bình thường được sử dụng để nhận dạng a_1, a_2 và μ; mô hình có rò được mở rộng với trạng thái $[Q_1,H_2,Q_2,z\ell,\lambda\ell]^T$ và biểu diễn dưới dạng LPV với năm biến lập lịch. Bộ quan sát đư c thiết kế bằng LMI tại 32 đỉnh của miền đa diện và nội suy ma trận khuếch đại theo trọng số lồi.

Các ký hiệu và công thức được kiểm tra thống nhất với hệ phương trình trạng thái, làm cơ sở cho thực nghiệm và đánh giá ở Chương 4.

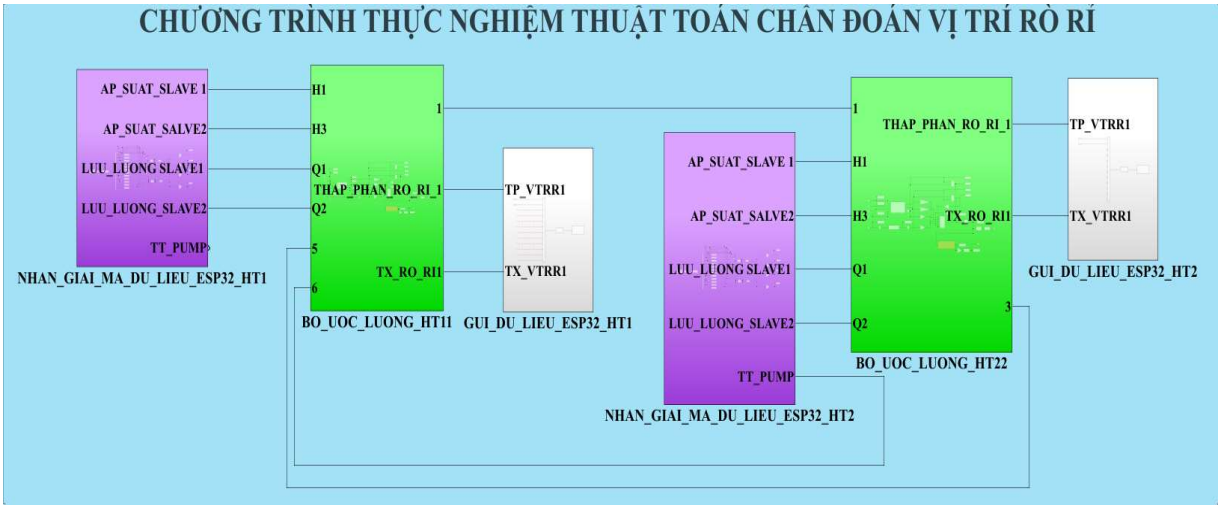
CHƯƠNG 4: THỰC NGHIỆM, ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHỤC VỤ GIẢNG DẠY STEM

Chương 4 trình bày quá trình thực nghiệm và đánh giá kết quả của mô hình giám sát thông số rò rỉ hệ thống nước ngoài trời, đồng thời làm rõ khả năng sử dụng mô hình như một phương tiện giảng dạy và thực hành STEM. Phần đánh giá kỹ thuật sử dụng dữ liệu thực nghiệm, kết quả nhận dạng và sai số chẩn đoán; phần đánh giá giáo dục xem xét mức độ trực quan, khả năng thao tác, tính liên ngành, khả năng tái sử dụng dữ liệu và mức độ hoàn thiện của 04 bài giảng, 04 bài thực hành.

4.1. Bố trí thực nghiệm đánh giá mô hình

4.1.1. Cấu trúc chương trình thực nghiệm

Các giá trị H_1, H_3, Q_1 và Q_2 sau khi scale và kiểm tra được đưa vào bộ quan sát. Khối tính biến lập lịch xác định ρ, khối nội suy tính L(ρ), sau đó bộ quan sát cập nhật $\hat{x}=[\hat{Q}_1,\hat{H}_2,\hat{Q}_2,\hat{z}\ell,\hat{\chi}\ ]^T$. Vị trí $\hat{z}\ell$ đư c gửi lên giao diện giám sát cùng tín hiệu đo và trạng thái cảnh báo.



Hình 4.1. Chương trình thực nghiệm bộ quan sát trên MATLAB/Simulink

Chương trình thực nghiệm được tổ chức thành các khối nhận dữ liệu, giải mã, chuyển đổi đơn vị, bộ ước lượng và hiển thị. Cấu trúc này cho phép kiểm tra riêng từng tầng trước khi chạy tổng thể. Dữ liệu thực đư c lưu để phát lại offline khi cần đối chiếu kết quả online.

4.1.2. Dữ liệu nhận dạng và tham số mô hình

Ở trạng thái bình thường, đề tài thu 2000 mẫu với chu kỳ 1 s. Dữ liệu H_1, H_3, Q_1 và Q_2 đư c dùng cho Parameter Estimation. Kết quả thu được:

$a_1 = 0{,}048002$; $a_2 = 3{,}2832\times10^{7}$; $\mu = 0{,}0044301$.

Các tham số được cập nhật vào mô hình rò và bộ quan sát. Việc sử dụng dữ liệu của chính hệ thống giúp mô hình phản ánh tổng hợp đặc tính đường ống, phụ kiện, cảm biến và điều kiện lắp đặt.

4.1.3. Kịch bản thực nghiệm rò rỉ

Năm vị trí rò được lựa chọn trên tuyến dài 200 m, gồm 2 m, 50 m, 100 m, 150 m và 198 m. Các điểm 2 m và 198 m đại diện vùng sát biên; 50 m, 100 m và 150 m đại diện vùng trong của tuyến. Ở mỗi kịch bản, vị trí thật được dùng làm giá trị chuẩn để so sánh $\hat{z}\ell$.

Mỗi kịch bản được thực hiện lặp lại khoảng 10 lần trong cùng cấu hình đầu xả, điều kiện vận hành và chu kỳ lấy mẫu. Việc thực hiện lặp nhằm kiểm tra tính ổn định, khả năng tái lập của quá trình thu thập dữ liệu và thuật toán chẩn đoán, đồng thời hạn chế ảnh hưởng của các biến động ngẫu nhiên trong quá trình thực nghiệm. Qua các lần thử, xu hướng hội tụ và mức sai số của thuật toán tại từng vị trí rò được theo dõi để đánh giá tính nhất quán của kết quả.

Bảng 4.1. Các kịch bản thực nghiệm

Kịch bản	Vị trí rò thực tế (m)	Vùng khảo sát
1	2	Gần đầu tuyến
2	50	Một phần tư tuyến
3	100	Giữa tuyến
4	150	Ba phần tư tuyến
5	198	Gần cuối tuyến

4.2. Kết quả vận hành hệ thống thu thập và giám sát

Các tín hiệu từ cảm biến áp suất và lưu lượng được thu thập tại các trạm đo, xử lý bởi PLC/ESP32 và truyền về PLC trung tâm thông qua mạng truyền thông 4G. Dữ liệu được cập nhật liên tục trên giao diện SCADA, cho phép theo dõi các thông số vận hành, trạng thái hệ thống và vị trí rò rỉ theo thời gian thực.

Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, quá trình thu thập, truyền nhận và hiển thị dữ liệu được thực hiện liên tục, đáp ứng yêu cầu giám sát và lưu trữ dữ liệu phục vụ chẩn đoán rò rỉ. Việc tích hợp giữa mô hình phần cứng, hệ thống truyền thông 4G, PLC trung tâm và phần mềm SCADA đảm bảo cung cấp đầy đủ dữ liệu đầu vào cho thuật toán chẩn đoán và các bài thực hành STEM.

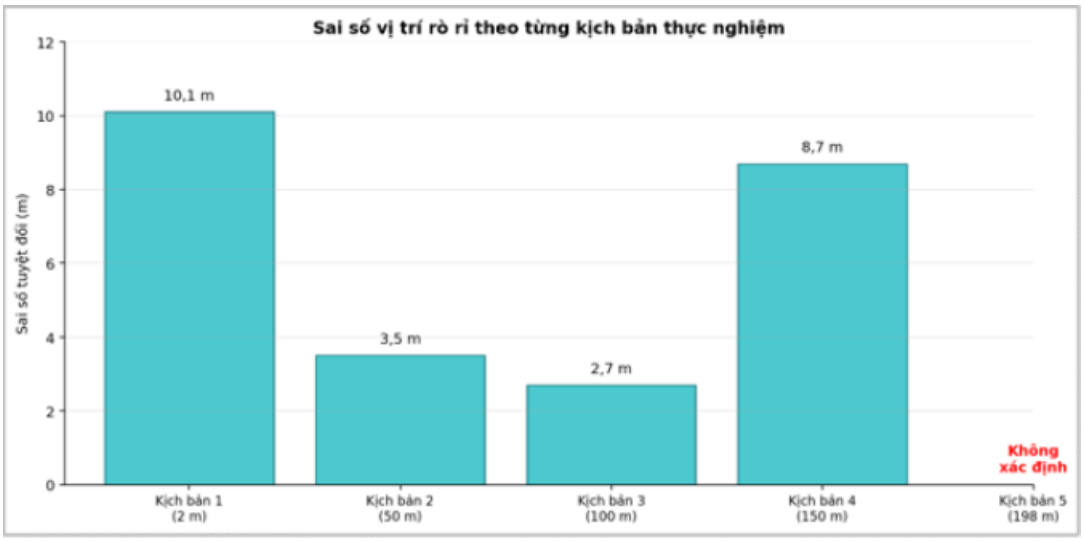
4.3. Kết quả chẩn đoán vị trí rò rỉ

4.3.1. Kết quả từng kịch bản

Các kịch bản được thực hiện lặp lại nhiều lần để kiểm tra tính ổn định của thuật toán. Do mục tiêu của phần này là đánh giá khả năng xác định vị trí rò tại các vùng khác nhau trên tuyến ống, Bảng 4.2 trình bày kết quả đại diện cho từng kịch bản sau quá trình thử lặp. Các giá trị này phản ánh xu hướng kết quả quan sát được trong quá trình thực nghiệm và được sử dụng để phân tích đặc tính sai số của thuật toán theo vị trí rò.

Bảng 4.2. Kết quả thực nghiệm chẩn đoán vị trí rò rỉ

Kịch bản	Vị trí thật (m)	Vị trí ước lượng (m)	Sai số tuyệt đối (m)
1	2	12,1	10,1
2	50	53,5	3,5
3	100	97,3	2,7
4	150	158,7	8,7
5	198	Không xác định (>200)	Không xác định



Hình 4.2. Sai số vị trí trong các kịch bản thực nghiệm

Bộ quan sát xác định được vị trí trong bốn kịch bản đầu. Sai số nhỏ nhất là 2,7 m tại vị trí 100 m; sai số lớn nhất là 10,1 m tại vị trí 2 m. Kịch bản 5 tại vị trí 198 m cho kết quả ước lượng ngoài phạm vi tuyến ống (>200 m), đư c phân loại là “Không xác định”;

trường hợp này không đư c xem là sai số bằng 0 và không được sử dụng khi tính các chỉ tiêu MAE, RMSE, NRMSE và bias.

4.3.2. Tính các chỉ tiêu sai số

Với bốn kịch bản xác định được, đặt e_i=ẑ_i−z_i. Các sai số có dấu lần lượt là 10,1 m; 3,5 m; −2,7 m và 8,7 m. Các chỉ tiêu MAE, RMSE, NRMSE và bias dưới đây đư c sử dụng để mô tả mức sai lệch của thuật toán theo các vị trí thử nghiệm. Các chỉ tiêu này được tính trên tập kết quả đại diện của các kịch bản và không nhằm thay thế cho phân tích thống kê độ phân tán giữa toàn bộ các lần thử lặp:

$$\text{MAE} = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4}|e_i| = 6{,}25\ m \quad (4.1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} e_i^2} \approx 7{,}02\ \text{m} \quad (4.2)$$

$$\text{Bias} = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} e_i = +4{,}9 \quad m \quad (4.3)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{Nm}\sum_{t=1}^{N}\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{r_j(t)}{s_j}\right)^2} \quad (4.4)$$

Giá trị bias dương cho thấy xu hướng ước lượng lệch về phía cuối tuyến trong tập bốn kịch bản xác định đư c.

Bảng 4.3. Tổng hợp chỉ tiêu sai số

Chỉ tiêu	Giá trị	Phạm vi tính
Số kịch bản xác định được	4/5	Năm vị trí thử
MAE	6,25 m	Bốn kịch bản có kết quả
RMSE	≈7,02 m	Bốn kịch bản có kết quả
NRMSE	3,51%	Bốn kịch bản có kết quả
Bias	+4,90 m	Quy ước e=ẑ−z
Sai số nhỏ nhất	2,7 m	Kịch bản 100 m
Sai số lớn nhất	10,1 m	Kịch bản 2 m

4.4. Phân tích và thảo luận

4.4.1. Khả năng chẩn đoán trong vùng giữa tuyến

Tại 50 m và 100 m, sai số lần lượt là 3,5 m và 2,7 m, nhỏ hơn các điểm gần biên. Kết quả cho thấy bộ quan sát hội tụ tốt hơn khi điểm rò rỉ nằm trong vùng mà hai đoạn ống đều có chiều dài đủ lớn. Các biến $1/z\ell$ và $1/(L-z\ell)$ khi đó không quá lớn, giúp mô hình LPV và phép nội suy gain làm việc trong miền thuận lợi.

Tại 150 m, sai số tăng lên 8,7 m nhưng vị trí vẫn đư c xác định. Sai số có thể liên quan đến độ nhạy khác nhau giữa hai đoạn, sai số tham số, nhiễu cảm biến và giới hạn miền biến lập lịch.

4.4.2. Giới hạn tại vùng biên

Kịch bản 2 m có sai số 10,1 m và kịch bản 198 m không xác định được. Trong mô hình, các hệ số $1/z\ell$ và $1/(L-z\ell)$ tăng mạnh khi vị trí tiến sát hai đầu. Điều này làm mô hình nhạy với nhiễu và sai số tham số, đồng thời có thể đưa biến lập lịch ra khỏi miền đa diện đã thiết kế.

Kết quả 198 m cho thấy giới hạn thực tế của cấu trúc cảm biến chỉ đặt tại hai đầu và bộ quan sát hiện tại. Khi vận hành, miền chẩn đoán tin cậy đư c quy định bởi $z_min \le z\ell \le L - z_min$. Thuật toán phát cờ ngoài miền và không hiển thị vị trí cụ thể khi điều kiện hội tụ không được bảo đảm.

4.4.3. Những yếu tố ảnh hưởng đến sai số

- Độ chính xác, offset và độ trễ của hai cảm biến lưu lượng.
- Sai số chuyển đổi áp suất sang cột áp và khác biệt cao độ lắp đặt.
- Tham số a_1, a_2, μ được nhận dạng trong một miền vận hành hữu hạn.
- Nhiễu truyền thông, mất mẫu và sai lệch timestamp.
- Giả thiết một điểm rò, $z\ell$ và $\lambda\ell$ không đổi trong một phiên.
- Giới hạn của nội suy gain gần biên đa diện.
- Mỗi kịch bản đã được thực hiện lặp lại khoảng 10 lần nhằm kiểm tra tính ổn định và khả năng tái lập của thuật toán. Tuy nhiên, số vị trí rò khảo sát hiện mới gồm năm vị trí trên một tuyến ống 200 m; do đó các chỉ tiêu MAE, RMSE, NRMSE và bias vẫn chỉ phản ánh miền thử nghiệm hiện tại và chưa đại diện đầy đủ cho toàn bộ các điều kiện vận hành và vị trí rò có thể xảy ra.

Các yếu tố trên cần được kiểm tra bằng hiệu chuẩn, thí nghiệm lặp, mở rộng dữ liệu nhận dạng và lưu đầy đủ cờ chất lượng. Ngưỡng cảnh báo chỉ đư c hiệu chỉnh sau khi đánh giá sai lệch mô hình và nhiễu đo, tránh sử dụng ngưỡng để bù cho sai số hệ thống.

4.5. Đánh giá mức độ đáp ứng yêu cầu xây dựng mô hình

Bảng 4.4. Đánh giá kết quả theo mục tiêu

Mục tiêu	Kết quả đạt được	Đánh giá
Xây dựng mô hình đường ống và cảm biến	Hệ thống cung cấp H_1,H_3,Q_1,Q_2 và tạo đư c các vị trí rò	Đạt
Truyền dữ liệu và SCADA	Dữ liệu đư c truyền, lưu và hiển thị phục vụ thực nghiệm	Đạt về chức năng
Xây dựng mô hình toán học	Nhận dạng được a_1,a_2,μ từ 2000 mẫu	Đạt
Chẩn đoán vị trí rò	Xác định 4/5 vị trí thử; tính đư c MAE, RMSE, bias	Đạt trong miền thử, còn giới hạn biên
Phục vụ đào tạo STEM	Hoàn thiện mô hình, dữ liệu, 04 bài giảng, 04 bài thực hành, phiếu nhiệm vụ và rubric	Đạt về sản phẩm; chưa đánh giá định lượng hiệu quả người học

Kết quả cho thấy đề tài đã hoàn thành chuỗi phần cứng–truyền thông–giám sát–mô hình–chẩn đoán. Điểm cần tiếp tục cải thiện là độ chính xác gần đầu và cuối tuyến, số lượng kịch bản, số lần lặp và chỉ tiêu định lượng của mạng 4G.

4.6. Đánh giá khả năng khai thác mô hình trong giảng dạy STEM

Mô hình cung cấp chuỗi hiện tượng – đo lường – dữ liệu – mô hình hóa – chẩn đoán phù hợp để tổ chức dạy học STEM. Bộ dữ liệu 2000 mẫu trạng thái bình thường và năm kịch bản rò cho phép người học nhận dạng tham số, xây dựng mô hình LPV, thiết kế bộ quan sát, tính sai số và đối chiếu kết quả mô phỏng với thực nghiệm. Các điểm rò chủ động giúp giảng viên tạo tình huống có kiểm soát, trong khi SCADA giúp quan sát đồng thời trạng thái vật lý và dữ liệu số.

Kịch bản 198 m không xác định đư c không bị loại khỏi học liệu mà đư c dùng như một trường hợp phản biện để người học nhận biết giới hạn vùng biên, phân biệt "không xác định" với "không rò rỉ" và đề xuất cải tiến. Giá trị của mô hình trong giảng dạy vì

vậy không chỉ nằm ở kết quả chẩn đoán đúng, mà còn ở khả năng tạo ra dữ liệu không lý tưởng để rèn luyện tư duy kiểm chứng và ra quyết định kỹ thuật.

Bảng 4.5. Đánh giá khả năng khai thác mô hình trong giảng dạy STEM

Tiêu chí đánh giá	Minh chứng từ mô hình và học liệu	Mức đánh giá
Tính trực quan	Các đại lượng H1, H3, Q1, Q2, trạng thái bơm, vị trí rò và cảnh báo được hiển thị trên SCADA	Đáp ứng
Khả năng tạo tình huống	Có các van rò chủ động, năm vị trí/kịch bản thử và dữ liệu bình thường để so sánh	Đáp ứng trong phạm vi mô hình
Tính liên ngành STEM	Kết nối thủy lực, cảm biến, PLC–4G–SCADA, MATLAB/Simulink, mô hình LPV và đánh giá sai số	Đáp ứng
Khả năng thực hành và lặp lại	Có dữ liệu lưu, mô hình mô phỏng, bảng tham số và quy trình chạy lại kịch bản	Đáp ứng; cần quản lý phiên bản dữ liệu
An toàn và phân hóa người học	Có liên động PLC, yêu cầu an toàn điện–nước và nhiệm vụ khác nhau cho sinh viên/học sinh	Đáp ứng khi có giảng viên giám sát
Mức độ hoàn thiện học liệu	Có 04 bài giảng, 04 bài thực hành, phiếu nhiệm vụ và rubric	Đáp ứng sản phẩm thuyết minh
Hiệu quả sư phạm định lượng	Chưa có dữ liệu khảo sát trước–sau hoặc đối chứng trên người học	Chưa đủ dữ liệu để kết luận

Từ kết quả đánh giá trên, các mục tiếp theo cụ thể hóa cách sử dụng mô hình trong giảng dạy STEM. Nội dung 4 yêu cầu xây dựng hệ thống bài thí nghiệm phục vụ sinh viên và học sinh; danh mục sản phẩm gồm 04 bài giảng và 04 bài thực hành. Các bài học đư c tổ chức theo tiến trình từ nhận biết hệ thống, mô hình toán, bộ quan sát, mô phỏng, triển khai trên máy tính nhúng đến giao diện giám sát.

Các bài học sử dụng trực tiếp mô hình phần cứng, dữ liệu thực nghiệm, mô hình LPV, thuật toán chẩn đoán và hệ thống SCADA đã được trình bày trong các mục trước. Cách tổ chức này bảo đảm tính liên kết giữa kết quả nghiên cứu và sản phẩm đào tạo, đồng

thời tạo ra bộ học liệu có thể chuyển giao cho Bộ môn Tự động hóa, Khoa Điện – Điện tử để phục vụ giảng dạy, nghiên cứu khoa học sinh viên và hoạt động trải nghiệm STEM.

4.7. Hệ thống bài giảng và bài thực hành STEM xây dựng từ mô hình

Sản phẩm đào tạo của đề tài gồm 04 bài giảng và 04 bài thực hành theo định hướng STEM. Trong báo cáo tổng kết, phần này chỉ trình bày nguyên tắc xây dựng, danh mục nội dung, mối liên hệ với mô hình và minh chứng sản phẩm. Giáo án chi tiết, tiến trình từng hoạt động, câu hỏi, phiếu học tập, mã chương trình và rubric đầy đủ được đóng thành bộ học liệu riêng để chuyển giao.

4.7.1. Nguyên tắc chuyển kết quả nghiên cứu thành học liệu STEM

Học liệu được hình thành trực tiếp từ chuỗi kết quả của đề tài: hiện tượng thủy lực và rò rỉ tạo nội dung khoa học; cảm biến, PLC, truyền thông 4G, máy tính nhúng và SCADA tạo nội dung công nghệ; quá trình tích hợp, kiểm thử và cải tiến tạo nội dung kỹ thuật; mô hình trạng thái, LPV, bộ quan sát và các chỉ tiêu sai số tạo nội dung toán học. Mỗi bài học phải sử dụng ít nhất một thành phần vật lý hoặc dữ liệu thật của mô hình và tạo ra một sản phẩm có thể kiểm chứng.

Bảng 4.6. Thành tố STEM được khai thác từ mô hình

Thành tố	Nội dung từ đề tài	Biểu hiện trong hoạt động học
Science – Khoa học	Áp suất, lưu lượng, cân bằng khối lượng, tổn thất và hiện tượng rò rỉ	Quan sát, nêu giả thuyết và giải thích đáp ứng của hệ thống
Technology – Công nghệ	Cảm biến, PLC, 4G, máy tính nhúng, MATLAB/Simulink và SCADA	Thu thập, truyền, xử lý, lưu trữ và trực quan hóa dữ liệu
Engineering – Kỹ thuật	Thiết kế chuỗi đo – truyền – xử lý – cảnh báo và tích hợp phần cứng/phần mềm	Đề xuất phương án, triển khai, kiểm thử, phát hiện lỗi và cải tiến
Mathematics – Toán học	Mô hình trạng thái, LPV, bộ quan sát, MAE, RMSE và sai số vị trí	Mô hình hóa, mô phỏng, tính toán và giải thích kết quả

Đối tượng chính là sinh viên ngành Công nghệ kỹ thuật điều khiển và tự động hóa và các ngành gần. Với học sinh phổ thông, học liệu được giản lược ở mức quan sát hiện tượng, đo lường, đọc dữ liệu và đề xuất giải pháp; các phần thiết kế bộ quan sát, LMI

và mô hình LPV sử dụng dưới dạng mô-đun có sẵn. Mọi thao tác trên bơm, tủ điện và van rò rỉ phải có giảng viên hoặc kỹ thuật viên giám sát.

4.7.2. Danh mục 04 bài giảng

Nội dung được sắp xếp từ nhận biết bài toán đến mô hình hóa, chẩn đoán và mô phỏng, tạo kiến thức nền cho chuỗi thực hành.

Bảng 4.7. Danh mục và đầu ra của 04 bài giảng

Mã	Tên bài giảng	Trọng tâm	Đầu ra học tập
BG 1	Tổng quan hệ thống đư ng ống nước và các phương pháp chẩn đoán rò rỉ	Cấu trúc mô hình, đại lượng H1, H3, Q1, Q2; phân biệt phát hiện, định vị và ước lượng rò	Sơ đồ chức năng và bảng so sánh phương pháp
BG 2	Xây dựng mô hình toán học cho một đoạn đư ng ống nước có một đầu vào và một đầu ra	Biên hệ, biến trạng thái, cân bằng vật chất, giả thiết và tham số mô hình	Mô hình toán, bảng biến – đơn vị và sơ đồ khối
BG 3	Xây dựng bộ quan sát trạng thái nhằm chẩn đoán vị trí điểm rò rỉ trong đường ống nước	Sai số ước lượng, phần dư, mô hình LPV và logic phát hiện – định vị	Sơ đồ bộ quan sát và lưu đồ chẩn đoán
BG 4	Phương pháp mô phỏng hệ thống đường ống trên MATLAB/Simulink	Chuyển phương trình thành mô hình, xây dựng kịch bản và đánh giá sai số	Kế hoạch mô phỏng và bộ tiêu chí kiểm chứng

Mỗi bài giảng trong bộ học liệu riêng gồm mục tiêu, kiến thức nền, tình huống mở đầu, nhiệm vụ STEM, câu hỏi đánh giá và tài liệu sử dụng.

4.7.3. Danh mục 04 bài thực hành

Các bài thực hành sử dụng mô hình, dữ liệu và phần mềm của đề tài theo mức độ tăng dần: mô phỏng đối tượng, mô phỏng bộ quan sát, triển khai thuật toán trên máy tính nhúng và xây dựng giao diện giám sát.

Bảng 4.8. Danh mục và sản phẩm của 04 bài thực hành

Mã	Tên bài thực hành	Nguồn lực sử dụng	Sản phẩm bắt buộc
TH 1	Lập trình mô phỏng hệ thống đường ống nước trên MATLAB/Simulink	Mô hình toán, bảng tham số và dữ liệu tham chiếu	Mô hình chạy được, dữ liệu và báo cáo kiểm chứng
TH 2	Lập trình mô phỏng bộ quan sát trạng thái chẩn đoán rò rỉ trên MATLAB/Simulink	Mô hình TH1, ma trận quan sát và các kịch bản rò	Phần dư, kết quả phát hiện và bảng sai số vị trí
TH 3	Lập trình thực nghiệm bằng MATLAB/Simulink cho máy tính nhúng để chẩn đoán rò rỉ	PLC, 4G, máy tính nhúng và dữ liệu thời gian thực	Chương trình triển khai, bảng ánh xạ I/O và nhật ký thử nghiệm
TH 4	Xây dựng giao diện giám sát	Dữ liệu đo, kết quả chẩn đoán và hệ thống SCADA	Giao diện tổng quan, trend, cảnh báo và lưu lịch sử

Hướng dẫn chi tiết trong bộ thực hành riêng quy định điều kiện chuẩn bị, trình tự thao tác, yêu cầu an toàn điện – nước, cấu trúc dữ liệu, nội dung báo cáo và lỗi thường gặp.

4.7.4. Cấu trúc và minh chứng của bộ học liệu riêng

Bảng 4.9. Thành phần bộ học liệu STEM chuyển giao

Thành phần	Nội dung	Vai trò trong nghiệm thu
Bộ 04 bài giảng	Đề cương/slide, mục tiêu, nội dung, nhiệm vụ và câu hỏi đánh giá	Minh chứng sản phẩm bài giảng theo thuyết minh
Bộ 04 bài thực hành	Hướng dẫn chuẩn bị, thao tác, an toàn, dữ liệu và sản phẩm nộp	Minh chứng sản phẩm thực hành theo thuyết minh

Thành phần	Nội dung	Vai trò trong nghiệm thu
Tệp kỹ thuật	Tham số, mô hình MATLAB/Simulink, chương trình máy tính nhúng và cấu hình SCADA	Cho phép tổ chức lại và kiểm tra kết quả
Dữ liệu	Dữ liệu bình thường, năm kịch bản rò và thông tin mô tả kịch bản	Dùng cho mô phỏng, phân tích sai số và phản biện
Công cụ đánh giá	Phiếu nhiệm vụ, mẫu báo cáo, kiểm tra an toàn và rubric	Chuẩn hóa đánh giá sản phẩm người học
Hướng dẫn giảng viên	Lộ trình tổ chức, phương án phân hóa và xử lý tình huống	Hỗ trợ chuyển giao và tái sử dụng

Như vậy, báo cáo tổng kết cung cấp bằng chứng về logic xây dựng và mức độ hoàn thiện sản phẩm; bộ học liệu riêng cung cấp toàn bộ nội dung để triển khai giảng dạy.

4.8. Đánh giá khả năng áp dụng và chuyển giao

4.8.1. Khả năng tổ chức giảng dạy

Mô hình có thể được khai thác ở ba cấp độ. Cấp độ thứ nhất là quan sát hiện tượng và dữ liệu, phù hợp với hoạt động trải nghiệm hoặc nội dung nhập môn. Cấp độ thứ hai là mô phỏng, lập trình và tích hợp PLC – 4G – SCADA, phù hợp với các học phần chuyên ngành. Cấp độ thứ ba là phân tích mô hình LPV, thiết kế bộ quan sát và đánh giá sai số, phù hợp với học phần điều khiển hiện đại, đồ án và nghiên cứu khoa học sinh viên.

Chuỗi bài học có thể tích hợp vào các học phần Mô hình hóa và mô phỏng, Đo lường – cảm biến, PLC và SCADA, Hệ thống nhúng và Điều khiển nâng cao. Giảng viên lựa chọn một hoặc nhiều bài tùy chuẩn đầu ra, thời lượng và mức độ sẵn sàng của thiết bị; không bắt buộc triển khai toàn bộ tám bài trong cùng một học phần.

4.8.2. Đánh giá và giới hạn

Bảng 4.10. Rubric tổng hợp đề xuất cho hoạt động STEM

Tiêu chí	Tỷ trọng đề xuất	Minh chứng đánh giá
Hiểu vấn đề và kiến thức STEM	20%	Giải thích hiện tượng, biến đo, mô hình và giới hạn
Mô hình, lập trình và thuật toán	25%	Tệp mô phỏng/chương trình chạy được và có kiểm chứng
Thực nghiệm và quản lý dữ liệu	25%	Kịch bản, dữ liệu gốc, metadata, chỉ số và nhật ký
Giải pháp kỹ thuật và cải tiến	20%	So sánh phương án, xử lý lỗi và kết quả thử lại
An toàn, hợp tác và trình bày	10%	Phiếu an toàn, phân công, báo cáo và vấn đáp

Mức độ áp dụng hiện được xác nhận bằng sự phù hợp giữa chức năng mô hình, dữ liệu thực nghiệm, danh mục học liệu và yêu cầu thuyết minh. Đề tài chưa có dữ liệu khảo sát trước – sau, nhóm đối chứng hoặc thống kê trên người học; vì vậy báo cáo không đưa ra tỷ lệ cải thiện kiến thức, kỹ năng hay hứng thú học tập. Khi triển khai chính thức, cần bổ sung bài kiểm tra trước – sau, rubric sản phẩm, phản hồi người học và nhật ký vận hành để đánh giá hiệu quả giáo dục định lượng.

4.8.3. Phương thức chuyển giao

Mô hình, bộ dữ liệu và bộ học liệu STEM được định hướng chuyển giao cho Bộ môn Tự động hóa, Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng. Khi bàn giao cần kèm danh mục tệp, phiên bản phần mềm, bảng tham số, cấu hình thiết bị, hướng dẫn an toàn và biên bản kiểm tra khả năng mở/chạy của các tệp. Việc cập nhật thiết bị hoặc phần mềm về sau phải đư c ghi trong lịch sử phiên bản để bảo đảm tính truy xuất.

4.9. Kết luận chương 4

Chương 4 đã thực nghiệm và đánh giá kết quả xây dựng mô hình giám sát thông số rò rỉ phục vụ giảng dạy STEM. Về kỹ thuật, mô hình thực hiện đư c chuỗi đo – truyền 4G – SCADA – mô hình hóa – chẩn đoán; từ 2000 mẫu trạng thái bình thường, đề tài nhận dạng được tham số mô hình và kiểm tra bộ quan sát tại năm vị trí rò trên tuyến 200 m. Bốn vị trí được xác định với MAE 6,25 m, RMSE xấp xỉ 7,02 m và bias +4,90 m;

trường hợp 198 m chỉ ra giới hạn vùng biên. Về đào tạo, mô hình cung cấp tình huống rò có kiểm soát, dữ liệu có thể phát lại và nội dung tích hợp đầy đủ các thành tố STEM. Đề tài đã hoàn thiện 04 bài giảng, 04 bài thực hành và các tài liệu hỗ trợ dưới dạng bộ học liệu riêng. Báo cáo tổng kết chỉ trình bày cấu trúc, mối liên hệ và minh chứng sản phẩm, mà không lặp lại toàn bộ giáo án. Kết quả cho phép khẳng định giá trị áp dụng thực tế và tính liên ngành STEM của mô hình.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Đề tài đã xây dựng mô hình giám sát rò rỉ đường ống nước ngoài trời tích hợp cảm biến áp suất–lưu lượng, truyền thông 4G, SCADA, mô hình LPV và bộ quan sát trạng thái bền vững. Hệ thống hình thành chuỗi thực nghiệm từ đo lường tại hiện trường, truyền và lưu trữ dữ liệu đến ước lượng vị trí rò rỉ tại trung tâm.

Từ 2.000 mẫu ở trạng thái không rò, đề tài nhận dạng được bộ tham số của mô hình và tổ chức năm kịch bản rò trên tuyến dài 200 m. Bộ quan sát xác định đư c bốn vị trí, với MAE 6,25 m và RMSE 7,02 m đối với các kịch bản có kết quả hợp lệ; trường hợp gần cuối tuyến cho thấy giới hạn của miền chẩn đoán hiện tại. Mô hình và bộ học liệu kèm theo có thể sử dụng trong giảng dạy PLC, SCADA, IoT, MATLAB/Simulink, điều khiển hiện đại, nghiên cứu khoa học sinh viên và đồ án tốt nghiệp.

- Mở rộng mô hình sang nhiều nhánh ống và nhiều điểm rò đồng thời.
- Bổ sung cảm biến rung, âm thanh hoặc chất lượng nước để tăng khả năng phân biệt sự cố.
- Triển khai bảo mật đường truyền, xác thực thiết bị và lưu trữ dữ liệu dài hạn.
- Xây dựng bộ dữ liệu chuẩn và so sánh các thuật toán quan sát bền vững, Kalman, học máy.
- Đánh giá hiệu quả giáo dục bằng rubric, khảo sát trước–sau và sản phẩm học tập.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Billmann, L., & Isermann, R. (1987). Leak detection methods for pipelines. Automatica, 23(3), 381–385.

[2] Isermann, R. (2005). Model-based fault-detection and diagnosis—status and applications. Annual Reviews in Control, 29(1), 71–85.

[3] Razvarz, S., Jafari, R., & Gegov, A. (2020). Flow Modelling and Control in Pipeline Systems. Springer.

[4] Pham, T.-P. et al. (2022). LPV observer for leakage detection of the pipeline system. ATiGB, 216–220.

[5] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., & Balakrishnan, V. (1994). Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. SIAM.

[6] Apkarian, P., Gahinet, P., & Becker, G. (1995). Self-scheduled H∞ control of linear parameter-varying systems: a design example. Automatica, 31(9), 1251–1261.

[7] Delgado-Aguiñaga, J. A. et al. (2021). Leak diagnosis in pipelines based on a Kalman filter for LPV systems. Control Engineering Practice, 115, 104888.

[8] MathWorks. Simulink, Simulink Control Design and Simulink Support Package for Raspberry Pi Hardware Documentation.

[9] Siemens. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller System Manual.

[10] SIMCom. A7680 Series Hardware Design and AT Command Manual.

[11] Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet.

[12] Danfoss. MBS 3000 Pressure Transmitter Technical Documentation.

[13] Torres, L., Jiménez-Cabas, J., González, O., Molina, L., & López-Estrada, F.-R. (2019). Kalman filters for leak diagnosis in pipelines: Brief history and future research. Mathematics, 7(9), 1–18.

[14] Santos-Ruiz, I., Bermúdez, J. R., López-Estrada, F. R., Puig, V., Torres, L., & Delgado-Aguiñaga, J. A. (2019). Online leak diagnosis in pipelines using an EKF-based and steady-state mixed approach. Sensors, 19(13), 1–18.

[15] Delgado-Aguiñaga, J. A., Puig, V., & Becerra-López, F. I. (2016). Multi-leak diagnosis in pipelines based on Extended Kalman Filter. Control Engineering Practice, 49, 139–148.

[16] Besançon, G., Begovich, O., & Carvajal, J. E. (2007). Direct observer design for leak detection and estimation in pipelines. European Control Conference (ECC), 380–385. IEEE.

[17] Liang, W., Hu, J., & Xu, P. (2013). Gas pipeline leakage detection based on acoustic technology. Engineering Failure Analysis, 31, 1–7.

[18] Qu, Z., Feng, H., & Zeng, Z. (2010). A SVM-based pipeline leakage detection and pre-warning system. Measurement, 43(4), 513–519.

[19] Al-Mutiry, M., AlShahrani, A., & Al-Asmari, M. (2020). Water pipeline monitoring system using flow sensor based on the Internet of Things. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 11(9), 498–503.

[20] Darshan, S., & Anandakumar, K. R. (2015). Detection of water pipeline leakage and monitoring system using smart sensor with IoT. International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS), 1–4. IEEE.

[21] Saginomiya. PLK-1522PE Technical Data.

[22] Siemens. SIMATIC WinCC Documentation.

[23] Raspberry Pi Ltd. Raspberry Pi 4 Model B Product Brief.

[24] MathWorks. MATLAB Documentation.

[25] MathWorks. Simulink Documentation.

[26] MathWorks. Simulink Design Optimization – Parameter Estimation Documentation.

[27] Khương, N. V., & Thông, M. H. Q. (2022). Nghiên cứu thiết kế và chẩn đoán vị trí rò rỉ của mô hình hệ thống đường ống dẫn nước thực: Áp dụng thuật toán ước lượng bền vững LPV. Đồ án tốt nghiệp, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng. Người hướng dẫn: TS. Phạm Thanh Phong.

[28] Văn, Đ. A., & Trường, V. Q. (2024). Nghiên cứu phát triển hệ thống SCADA giám sát vị trí rò rỉ trong hệ thống đường ống dẫn chất lỏng. Đồ án tốt nghiệp, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng. Người hướng dẫn: TS. Phạm Thanh Phong.

[29] Phúc, P. V., & Nam, P. Đ. (2025). Xây dựng giải pháp chẩn đoán lỗi cho các hệ thống động lực học: Áp dụng vào hệ thống đư ng ống nước. Đồ án tốt nghiệp, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng. Người hướng dẫn: TS. Phạm Thanh Phong.

[30] Đoàn Anh Văn, Nguyễn Tấn Quý, Nguyễn Quang Vinh, Dương Thị Thanh Hà, Phạm Thanh Vỹ. (2024). Nghiên cứu thuật toán chẩn đoán đa vị trí rò rỉ trong đường ống nước và điều chỉnh áp suất đầu ra thông qua mạng 4G, Đề tài Sinh viên Nghiên cứu khoa học, Đại học Đà Nẵng.

[31] SAWACO (2025). Chuẩn hóa quy trình cấp nước.

[32] Công ty Cổ phần Cấp nước Phú Hòa Tân (2024). Ứng dụng công nghệ để nâng cao hiệu quả vận hành mạng lưới cấp nước.

[33] DAWACO (2024). Sáng kiến ứng dụng khoa học công nghệ trong công tác phòng chống thất thoát.

[34] Xí nghiệp Truyền dẫn nước sạch – SAWACO (không ghi năm). Cấp nước an toàn, bài về công tác chống thất thoát nước.

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

THUYẾT MINH

ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG

NĂM 2025

XÂY DỰNG MÔ HÌNH GIÁM SÁT THÔNG SỐ RÒ RỈ CỦA HỆ THỐNG NƯỚC NGOÀI TRỜI PHỤC VỤ GIẢNG DẠY VÀ ĐÀO TẠO STEM

Mã số: T2025-06-01

Chủ nhiệm đề tài : **TS. Phạm Thanh Phong**
Đơn vị : **Khoa Điện – Điện tử**
Chương trình đào tạo : **Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa**

Đà Nẵng, 9/2025

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

THUYẾT MINH

ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG

NĂM 2025

XÂY DỰNG MÔ HÌNH GIÁM SÁT THÔNG SỐ RÒ RỈ CỦA HỆ THỐNG NƯỚC NGOÀI TRỜI PHỤC VỤ GIẢNG DẠY VÀ ĐÀO TẠO STEM

Mã số: T2025-06-01

Chủ nhiệm đề tài : TS. Phạm Thanh Phong
Đơn vị : Khoa Điện – Điện tử
Chương trình đào tạo : Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

Đà Nẵng, 9/2025

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

THUYẾT MINH ĐỀ TÀI
KHOA HỌC & CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG NĂM 2025

1. TÊN ĐỀ TÀI **XÂY DỰNG MÔ HÌNH GIÁM SÁT THÔNG SỐ RÒ RỈ CỦA HỆ THỐNG NƯỚC NGOÀI TRỜI PHỤC VỤ GIẢNG DẠY VÀ ĐÀO TẠO STEM**	**2. MÃ SỐ:** **T2025-06-01**

3. LĨNH VỰC NGHIÊN CỨU

Tự nhiên	☐	Kỹ thuật	☒	Môi trường	☐
Kinh tế; XH-NV	☐	Nông Lâm	☐	ATLĐ	☐
Giáo dục	☐	Y Dược	☐	Sở hữu trí tuệ	☐

4. LOẠI HÌNH NGHIÊN CỨU

Cơ bản	Ứng dụng	Triển Khai
☐	☒	☐

5. THỜI GIAN THỰC HIỆN: 12 tháng (Từ tháng 10 năm 2025 đến tháng 09 năm 2026)

6. CƠ QUAN CHỦ TRÌ ĐỀ TÀI

Tên cơ quan: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật
Điện thoại: 0236.3822571
E-mail: dhspktdn@ute.udn.vn
Địa chỉ: 48 Cao Thắng, Phường Hải Châu, TP. Đà Nẵng
Họ và tên thủ trưởng cơ quan chủ trì: PGS.TS. Nguyễn Lê Hùng

7. CHỦ NHIỆM ĐỀ TÀI

Họ và tên: Phạm Thanh Phong — Học vị: Tiến sĩ
Chức danh khoa học: Giảng viên chính — Năm sinh: 1986
Địa chỉ cơ quan: 48 Cao Thắng, Phường Hải Châu, TP. Đà Nẵng — Địa chỉ nhà riêng:
Điện thoại cơ quan: 0236.3822571 — Điện thoại nhà riêng:
Di động: 0397870063 — Fax:
E-mail: ptphong@ute.udn.vn

8. NHỮNG THÀNH VIÊN THAM GIA NGHIÊN CỨU ĐỀ TÀI

TT	Họ và tên	Đơn vị công tác và lĩnh vực chuyên môn	Nội dung nghiên cứu cụ thể được giao	Chữ ký
1.	TS. Phạm Thanh Phong	Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật; Chuyên ngành: Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa	- Chủ nhiệm đề tài thực hiện việc: + Xây dựng thuyết minh + Xây dựng báo cáo tổng kết, nghiệm thu đề tài - Thành viên chính thực hiện nội dung 1,2, 3, 4 tại Mục 15.1;	

2.	ThS. Võ Khánh Thoại	Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật; Chuyên ngành: Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa	- Thư ký khoa học thực hiện việc: + Xây dựng thuyết minh + Xây dựng báo cáo tổng kết, nghiệm thu đề tài - Thành viên thực hiện các nội dung 1, 2, 3, 4 tại Mục 15.1;	
3.	ThS. Dương Quang Thiện	Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật; Chuyên ngành: Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa	- Thành viên thực hiện nội dung 1 tại Mục 15.1. - Kỹ thuật viên thực hiện các nội dung 2, 3, 4 tại Mục 15.1;	

9. ĐƠN VỊ PHỐI HỢP CHÍNH

Tên đơn vị trong và ngoài nước	Nội dung phối hợp nghiên cứu	Họ và tên người đại diện đơn vị

10. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU THUỘC LĨNH VỰC CỦA ĐỀ TÀI Ở TRONG VÀ NGOÀI NƯỚC

10.1. Ngoài nước

Nước sạch có vai trò quan trọng trong đời sống con người. Trên thế giới, các thành phố lớn đã xây dựng các mạng lưới đường ống để cung cấp nước cho người dân. Để đảm bảo hiệu quả vận hành và kịp thời phát hiện sự cố, các hệ thống giám sát, quản lý và vận hành mạng lưới nước đã được triển khai. Tuy nhiên, đường ống bị rò rỉ do tuổi thọ, áp lực nước hoặc tác động môi trường, vì vậy nhiều nghiên cứu đã phát triển các phương pháp chẩn đoán vị trí rò rỉ trong hệ thống đường ống nhằm giảm thiểu thất thoát nước và đảm bảo an toàn cấp nước.

Về phương pháp chẩn đoán vị trí rò rỉ, các nghiên cứu trên thế giới được chia thành ba hướng chính. Hướng thứ nhất, phát triển các bộ lọc Kalman, bộ quan sát trạng thái sử dụng mô hình toán học để ước lượng rò rỉ trong đường ống [1–4], [6–8], đây là hướng tiếp cận có khả năng xử lý tín hiệu đo từ cảm biến, ước lượng trạng thái hệ thống và đảm bảo độ chính xác trong các điều kiện vận hành. Hướng thứ hai, tập trung vào xây dựng cơ sở phương pháp luận và kỹ thuật điều khiển, trong đó có mô hình hóa dòng chảy, thiết kế các giải pháp điều khiển tối ưu và điều khiển hệ LPV nhằm tăng tính ổn định và khả năng thích nghi của hệ thống [5], [9–10]. Hướng thứ ba, các tiếp cận thực nghiệm kết hợp với công nghệ mới như phương pháp phân tích âm thanh [11], phương pháp học máy và trí tuệ nhân tạo để dự báo và chẩn đoán sự cố [12].

Bên cạnh các phương pháp chẩn đoán rò rỉ, các nghiên cứu còn tập trung vào việc tích hợp công nghệ IoT vào hệ thống giám sát và điều khiển đường ống nước. Việc sử dụng cảm biến lưu lượng kết hợp IoT cho phép theo dõi liên tục, truyền dữ liệu về trung tâm và phát hiện kịp thời các bất thường trong quá trình vận hành [13]. Ngoài ra, các hệ thống cảm biến còn được phát triển nhằm không chỉ phát hiện rò rỉ mà còn giám sát chất lượng nước, áp suất và lưu lượng [14]. Từ đó có thể thấy công nghệ IoT được sử dụng trong quản lý, giảm thiểu thất thoát và tối ưu vận hành hệ thống cấp nước.

Các nghiên cứu quốc tế đã hình thành một nền tảng lý thuyết và thực nghiệm toàn diện, từ mô hình hóa, phát triển thuật toán đến ứng dụng công nghệ mới. Đây là cơ sở khoa học quan trọng cho xây dựng mô hình điều khiển và giám sát hệ thống nước phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM, giúp người học tiếp cận gần hơn với các xu hướng nghiên cứu hiện đại.

[1] Delgado-Aguiñaga, J. A., Besançon, G., Begovich, O., & Carvajal, J. E. (2007). Direct observer design for leak detection and estimation in pipelines. European Control Conference (ECC), 2007, 380–385. IEEE.

[2] Torres, L., Jiménez-Cabas, J., González, O., Molina, L., & López-Estrada, F.-R. (2019). Kalman filters for leak diagnosis in pipelines: Brief history and future research. Mathematics, 7(9), 1–18.

[3] Delgado-Aguiñaga, J. A., Puig, V., & Becerra-López, F. I. (2021). Leak diagnosis in pipelines based on a Kalman filter for linear parameter varying systems. Control Engineering Practice, 115, 104888.

[4] Santos-Ruiz, I., Bermúdez, J. R., López-Estrada, F. R., Puig, V., Torres, L., & Delgado-Aguiñaga, J. A. (2019). Online leak diagnosis in pipelines using an EKF-based and steady-state mixed approach. Sensors, 19(13), 1–18.

[5] Razvarz, S., Jafari, R., & Gegov, A. (2020). Flow modelling and control in pipeline systems: A formal systematic approach. Springer.

[6] Delgado-Aguiñaga, J. A., Puig, V., & Becerra-López, F. I. (2016). Multi-leak diagnosis in pipelines based on Extended Kalman Filter. Control Engineering Practice, 49, 139–148.

[7] Besançon, G., et al. (2007). Direct observer design for leak detection and estimation in pipelines. European Control Conference (ECC), 2007, 380–385. IEEE.

[8] Delgado-Aguiñaga, J. A., Puig, V., & Becerra-López, F. I. (2021). Leak diagnosis in pipelines based on a Kalman filter for linear parameter varying systems. Control Engineering Practice, 115, 104888.

[9] Billmann, L., & Isermann, R. (1987). Leak detection methods for pipelines. Automatica, 23(3), 381–385.

[10] Apkarian, P., Gahinet, P., & Becker, G. (1995). Self-scheduled H∞ control of linear parameter-varying systems: A design example. Automatica, 31(9), 1251–1261.

[11] Liang, W., et al. (2013). Gas pipeline leakage detection based on acoustic technology. Engineering Failure Analysis, 31, 1–7.

[12] Qu, Z., et al. (2010). A SVM-based pipeline leakage detection and pre-warning system. Measurement, 43(4), 513–519.

[13] Al-Mutiry, M., AlShahrani, A., & Al-Asmari, M. (2020). Water pipeline monitoring system using flow sensor based on the Internet of Things. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 11(9), 498–503.

[14] Darshan, S., & Anandakumar, K. R. (2015). Detection of water pipeline leakage and monitoring system using smart sensor with IoT. International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS), 1–4. IEEE.

10.2. Trong nước

Ở Việt Nam, việc đảm bảo nguồn nước sạch là yêu cầu thiết yếu cho sinh hoạt và sản xuất. Hệ thống cấp nước tại các đô thị lớn đang được hiện đại hóa với cảm biến và công nghệ IoT để giám sát và vận hành. Rò rỉ đường ống vẫn là vấn đề thường gặp, do đó các giải pháp phát hiện và định vị rò rỉ đang được chú trọng nghiên cứu nhằm giảm thất thoát và duy trì chất lượng nước.

Các nghiên cứu về chẩn đoán rò rỉ trong hệ thống đường ống nước đã được thực hiện, sử dụng bộ quan sát LPV để ước lượng vị trí rò rỉ và cải thiện độ chính xác trong việc phát hiện và định vị rò rỉ trong mạng lưới phân phối [8]. Các giải pháp này góp phần giảm thất thoát nước và nâng cao hiệu quả quản lý, đồng thời hỗ trợ tối ưu hóa vận hành mạng lưới cấp nước.

Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu đã xây dựng mô hình SCADA cho hệ thống cấp nước từ khâu công trình thu, trạm bơm đến mạng lưới phân phối [2] và đề xuất các giải pháp kết hợp SCADA và IoT để giám sát, điều khiển và vận hành mạng lưới [3]. Hệ thống quan trắc tự động cũng đã được triển khai để giám sát nước thải công nghiệp [4] và môi trường nuôi trồng thủy sản, hỗ trợ cảnh báo kịp thời [5]. Nhiều công ty cấp nước lớn tại Việt Nam đã triển khai SCADA và IoT để giám sát và điều khiển trạm bơm, bể chứa và mạng lưới phân phối. Hệ thống này cho phép thu thập dữ liệu áp lực, lưu lượng, chất lượng nước và trạng thái thiết bị theo thời gian thực, hỗ trợ phát hiện rò rỉ, cảnh báo sự cố và tối ưu hóa vận hành. Tuy nhiên, việc triển khai đồng bộ vẫn còn hạn chế do chi phí đầu tư cao và nhu cầu nhân lực vận hành chuyên môn [6–8].

[1] Pham, T.-P., Hoang, D., Nguyen, T. H., Nguyen, V. N., Do Hoang Ngan, M., & Khuong Nguyen, V. (2022). LPV observer for leakage detection of the pipeline system. 2022 7th National Scientific Conference on Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB), Da Nang, Vietnam, 216–220.

[2] Ngô, T. H. (2018). Ứng dụng SCADA trong hệ thống cấp nước (Luận văn thạc sĩ). Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

[3] Lý, T. T. H. (2019). Thiết kế hệ thống SCADA – IoT cho hệ thống cung cấp nước sạch tại Xí nghiệp Nước sạch Tích Lương. Đại học Thái Nguyên.

[4] Phan, V. H., & cộng sự. (2023). Hệ thống giám sát chất lượng nguồn nước xả thải công nghiệp theo thời gian thực sử dụng IoT và điện toán đám mây. Tạp chí Khoa học & Công nghệ, 21(3), 45–52.
[5] Nguyễn, V. T., & cộng sự. (2021). Thiết kế hệ thống giám sát và cảnh báo tự động các thông số môi trường trong ao nuôi tôm. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam, 9(1), 63–70.
[6] Tổng công ty Cấp nước Sài Gòn. (2021). Báo cáo thường niên về quản lý và giám sát hệ thống cấp nước TP.HCM.
[7] Công ty Cổ phần Nước sạch Hà Nội. (2020). Báo cáo hoạt động SCADA và IoT trong vận hành mạng lưới cấp nước Hà Nội.
[8] Công ty Cấp nước Đà Nẵng. (2021). Báo cáo hoạt động SCADA và giám sát mạng lưới cấp nước tại Đà Nẵng.

10.3. Danh mục các công trình đã công bố thuộc lĩnh vực của đề tài của chủ nhiệm và những thành viên tham gia nghiên cứu

a) Chủ nhiệm đề tài:

[1] Pham, T. P. (2024). Generalized H_2 observer for road profile estimation in the automotive suspension system. Heliyon, 10(21).
[2] Tran, G. Q. B., Pham, T. P., & Sename, O. (2024). Fault Estimation Observers for the Vehicle Suspension with a Varying Chassis Mass. IFAC-PapersOnLine, 58(4), 138–143.
[3] Tran, G. Q. B., Pham, T. P., Sename, O., & Gáspár, P. (2023). Design of an LMI-based polytopic LQR cruise controller for an autonomous vehicle towards riding comfort. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 51(1), 1–7.
[4] Dũng, H., Phong, P. T., Vân, P. T. T., Dưởng, P. D., & Thiện, D. Q. (2022). Bộ quan sát trạng thái bền vững H∞ cho hệ thống phi tuyến Lipschitz với thông số thay đổi: Phương pháp chia lưới. Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, 26–32.
[5] T. -P. Pham, D. Hoang, T. Hoa Nguyen, V. N. Nguyen, M. Do Hoang Ngan, & V. Khuong Nguyen. (2022). LPV observer for leakage detection of the pipeline system. 2022 7th National Scientific Conference on Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB), Da Nang, Vietnam, 216–220.

b) Thành viên đề tài:

[1] Thoai, V. K., Phong, P. T., & Mai, N. H. (2025, July). Design of an H∞ Observer for NLPV Systems Using Input-Output Data from a Fuzzy-Sliding Mode-SAT Controller for Robotic Manipulators. 2025 10th International Conference on Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB), 434–439. IEEE.
[2] Thoai, V. K., Phong, P. T., Hieu, N. T., & Van Lac, N. (2025, July). Modeling, Simulation, and Robust Control of An Inverted Pendulum System using LQR, H_2 and H∞ Controllers. 2025 10th International Conference on Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB), 445–449. IEEE.
[3] Pham, T. P., Nguyen, D. Q., Vo, K. T., & Hoang, D. (2022, November). PLC-based PID control system design for an air levitation system. 2022 7th National Scientific Conference on Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB), 83–87. IEEE.
[4] Dũng, H., Phong, P. T., Vân, P. T. T., Dưởng, P. D., & Thiện, D. Q. (2022). Bộ quan sát trạng thái bền vững H∞ cho hệ thống phi tuyến Lipschitz với thông số thay đổi: Phương pháp chia lưới. Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, 26–32.

11. TÍNH CẤP THIẾT CỦA ĐỀ TÀI

Giải pháp sử dụng đường ống dẫn nước rất phổ biến và đóng vai trò quan trọng trong phục vụ đời sống dân. Việc phát hiện ra như rò rỉ trong đường ống rất quan trọng nhằm tiết kiệm nguồn tài nguyên nước và bảo vệ môi trường. Để chẩn đoán được rò rỉ cần tích hợp nhiều công nghệ và sử dụng nhiều mảng kiến thức khác nhau, chẳn hạn như: kỹ thuật cảm biến, mạng truyền thông không dây, lập trình nhúng, lập trình PLC và các kiến thức về vật lý liên quan đến động lực học chất lỏng.

Ngoài ra, việc có một mô hình hệ thống thực tế thực hiện việc giảng dạy tích hợp liên học phần, giảng dạy và đào tạo STEM tạo hứng thú trong việc áp dụng các kiến thức khoa học cơ bản vào giải quyết các bài toán thực tế trong đời sống là một trong những định hướng phát triển của nhà trường. Do vậy, cần xây dựng một mô hình có thể tích hợp nhiều kiến thức từ nhiều học phần, tích hợp nhiều công nghệ khác nhau trong ngành Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và tự động hóa là rất cần thiết. Vì những lý do trên, trong phạm vi đề xuất này sẽ đề xuất đề tài "Xây dựng mô hình giám sát thông số rò rỉ của hệ thống nước ngoài trời phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM".

12. MỤC TIÊU ĐỀ TÀI

- Xây dựng mô hình chẩn đoán hệ thống đường ống nước mới sử dụng công nghệ truyền thông 4G để truyền dữ liệu của các cảm biến gắn ở hai đầu đường ống về trung tâm giám sát, với đường ống đặt ngoài trời.
- Xây dựng giao diện giám sát với chạy trên máy tính trung tâm đặt trong nhà xưởng, phục vụ việc giám sát hệ thống đường ống ngoài trời.
- Xây dựng bài giảng định hướng đào tạo STEM để phục vụ cho sinh viên.

13. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI NGHIÊN CỨU

13.1. Đối tượng nghiên cứu

- Hệ thống đường ống nước sử dụng công nghệ truyền thông 4G để truyền dữ liệu.
- Bộ quan sát trạng thái để ước lượng được vị trí rỏ rỉ trên đường ống.

13.2. Phạm vi nghiên cứu

Đề tài giới hạn phạm vi nghiên cứu ở việc xây dựng mô hình toán học cho hệ thống đường ống nước dựa trên các kiến thức về động lực học chất lỏng, và thiết kế bộ quan sát trạng thái bền vững nhằm ước lượng vị trí rò rỉ trên đường ống.

14. CÁCH TIẾP CẬN, PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

14.1. Cách tiếp cận

- Điều tra, khảo sát các kết quả nghiên cứu trong các tài liệu liên quan cùng lĩnh vực.

- Xây dựng hệ thống đường ống nước thực tế, với các cảm biến gắn ở hai đầu đường ống và các trạm bơm cung cấp nước cho đường ống. Dữ liệu từ đường ống được truyền về trung tâm giám sát thông qua mạng không dây 4G.

- Từ các kiến thức vật lý về động lực học chất lỏng, xây dựng mô hình toán học cho hệ thống đường ống nước.

- Thiết kế bộ quan sát trạng thái dựa trên mô hình toán học và dữ liệu thu thập từ đường ống để ước lượng vị trí rò rỉ.

14.2. Phương pháp nghiên cứu

Khảo sát tài liệu liên quan đến việc xác định vị trí rò rỉ cho hệ thống đường ống nước. Xây dựng hệ thống đường ống nước thực tế, với các cảm biến gắn ở hai đầu đường ống và các trạm bơm cung cấp nước cho đường ống. Dữ liệu từ đường ống được truyền về trung tâm giám sát thông qua mạng không dây 4G. Xây dựng mô hình toán học của hệ thống dựa vào lý thuyết động lực học chất lỏng trong đường ống. Thiết kế bộ quan sát trạng thái bền vững H_2 để ước lượng vị trí rò rỉ.

15. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU VÀ KẾ HOẠCH NGHIÊN CỨU

15.1. Nội dung nghiên cứu

Nội dung 1: Tổng quan về hệ thống đường ống nước và các phương pháp chẩn đoán rò rỉ trong hệ thống đường ống nước.

- Khảo sát cấu trúc đường ống và phân tích số liệu tỷ lệ rò rỉ trong hệ thống đường ống nước.
- Khảo sát, phân tích và đánh giá các phương pháp chẩn đoán rò rỉ trong hệ thống đường ống nước.

Nội dung 2: Xây dựng mô hình giám sát hệ thống đường ống nước thực tế

- Thiết kế mô hình hệ thống đường ống nước với các cảm biến gắn ở hai đầu đường ống và các trạm bơm cung cấp nước cho đường ống.
- Thiết kế mô đun thu thập dữ liệu từ đường ống và truyền về trung tâm giám sát thông qua mạng truyền thông không dây 4G.
- Thiết kế khối trung tâm giám sát gồm mô đun nhận dữ liệu từ đường ống và xử lý thuật toán.

Nội dung 3: Xây dựng thuật toán chẩn đoán vị trí rò rỉ trong hệ thống đường ống nước.

- Xây dựng mô hình toán học cho hệ thống dựa vào lý thuyết động lực học chất lỏng trong đường ống.
- Thiết kế thuật toán bộ quan sát theo phương pháp bền vững H_2 để ước lượng vị trí rò rỉ trong đường ống.

Nội dung 4: Xây dựng hệ thống các bài giảng và bài thực hành theo định hướng đào tạo STEM phục vụ cho việc hướng dẫn sinh viên.

- Bài giảng:
  - Bài giảng 1: Tổng quan hệ thống đường ống nước và các phương pháp chẩn đoán rò rỉ.
    Đối tượng: Sinh viên.
    Yêu cầu và kết quả đầu ra: Kết quả đầu ra là 01 bài giảng giới thiệu được cho người học tổng quan về đường ống nước và các phương pháp để chẩn đoán rò rỉ.

- Bài giảng 2: Xây dựng mô hình toán học cho một đoạn đường ống nước có một đầu vào và một đầu ra.
  Đối tượng: Sinh viên.
  Yêu cầu và kết quả đầu ra: Kết quả đầu ra là 01 bài giảng giới thiệu được cho người học cách xây dựng mô hình toán học cho một đoạn đường ống nước có một đầu vào và một đầu ra.
- Bài giảng 3: Xây dựng bộ quan sát trạng thái nhằm chẩn đoán vị trí điểm rò rỉ trong đường ống nước.
  Đối tượng: Sinh viên.
  Yêu cầu và kết quả đầu ra: Kết quả đầu ra là 01 bài giảng giới thiệu được cho người học cách xây dựng bộ quan sát trạng thái nhằm chẩn đoán vị trí điểm rò rỉ trong đường ống nước.
- Bài giảng 4: Phương pháp mô phỏng hệ thống đường ống trên Matlab/Simulink.
  Đối tượng: Sinh viên.
  Yêu cầu và kết quả đầu ra: Kết quả đầu ra là 01 bài giảng giới thiệu được cho người học phương pháp mô phỏng hệ thống đường ống trên Matlab/Simulink.

- Bài thực hành:
  - Bài thực hành 1: Lập trình mô phỏng hệ thống đường ống nước trên Matlab/Simulink.
    Đối tượng: Sinh viên.
    Yêu cầu và kết quả đầu ra: 01 bài thực hành có đầy đủ hình ảnh và các bước thực hiện để lập trình mô phỏng hệ thống đường ống nước trên Matlab/Simulink.
  - Bài thực hành 2: Lập trình mô phỏng bộ quan sát trạng thái chẩn đoán rò rỉ cho hệ thống đường ống trên Matlab/Simulink.
    Đối tượng: Sinh viên.
    Yêu cầu và kết quả đầu ra: 01 bài thực hành có đầy đủ hình ảnh và các bước thực hiện để lập trình mô phỏng bộ quan sát trạng thái chẩn đoán rò rỉ cho hệ thống đường ống trên Matlab/Simulink.
  - Bài thực hành 3: Lập trình thực nghiệm bằng Matlab/Simulink cho máy tính nhúng để chẩn đoán rò rỉ.
    Đối tượng: Sinh viên.
    Yêu cầu và kết quả đầu ra: 01 bài thực hành có đầy đủ hình ảnh và các bước thực hiện để lập trình thực nghiệm bằng Matlab/Simulink cho máy tính nhúng để chẩn đoán rò rỉ.
  - Bài thực hành 4: Xây dựng giao diện giám sát.
    Đối tượng: Sinh viên.
    Yêu cầu và kết quả đầu ra: 01 bài thực hành có đầy đủ hình ảnh và các bước thực hiện để xây dựng giao diện giám sát.

15.2. Kế hoạch nghiên cứu

STT	Nội dung công việc	Sản phẩm	Thời gian (tháng/năm bắt đầu - tháng/năm kết thúc)	Người thực hiện *(ghi cụ thể họ và tên)*
1.	**Nội dung 1**: Tổng quan về hệ thống đường ống nước và các phương pháp chẩn	01 báo cáo tổng hợp	10/2025 – 12/2025	TVC: TS. Phạm Thanh Phong TV: ThS. Võ Khánh Thoại TV: ThS. Dương Quang Thiện

	đoán rò rỉ trong hệ thống đường ống nước.			
2.	**Nội dung 2**: Xây dựng mô hình giám sát hệ thống đường ống nước thực tế	01 mô hình hệ thống	12/2025 – 03/2026	TVC: TS. Phạm Thanh Phong TV: ThS. Võ Khánh Thoại KTV: ThS. Dương Quang Thiện
3.	**Nội dung 3**: Xây dựng thuật toán chẩn đoán vị trí rò rỉ trong hệ thống đường ống nước	01 thuật toán chẩn đoán vị trí rò rỉ	03/2026 – 06/2026	TVC: TS. Phạm Thanh Phong TV: ThS. Võ Khánh Thoại KTV: ThS. Dương Quang Thiện
4.	**Nội dung 4**: Xây dựng hệ thống các bài giảng và bài thực hành theo định hướng đào tạo STEM phục vụ cho việc hướng dẫn sinh viên.	04 bài giảng và 04 bài thực hành	6/2026 – 9/2026	TVC: TS. Phạm Thanh Phong TV: ThS. Võ Khánh Thoại KTV: ThS. Dương Quang Thiện
5.	Hoàn thiện báo cáo tổng kết đề tài	Báo cáo tổng kết	8/2026 – 9/2026	TVC: TS. Phạm Thanh Phong TV: ThS. Võ Khánh Thoại

16. SẢN PHẨM

Tên sản phẩm, số lượng và yêu cầu khoa học đối với sản phẩm

TT	Tên sản phẩm	Số lượng	Yêu cầu khoa học
1.	Mô hình hệ thống với đường ống đặt ngoài trời có các cảm biến gắn ở hai đầu đường ống và trung tâm giám sát đặt trong nhà xưởng. Áp dụng mạng truyền thông không dây 4G trong việc truyền tải dữ liệu	01	Hệ thống đường ống có cảm biến đo lưu lượng và áp suất, truyền dữ liệu cảm biến về trung tâm giám sát thông qua mạng truyền thông không dây 4G.
2.	Hệ thống các bài giảng và bài thực hành theo định hướng đào tạo STEM phục vụ cho việc hướng dẫn sinh viên		
	Bài giảng	04	• Bài giảng 1: Tổng quan hệ thống đường ống nước và các phương pháp chẩn đoán rò rỉ. • Bài giảng 2: Xây dựng mô hình toán học cho một đoạn đường ống nước có một đầu vào và một đầu ra. • Bài giảng 3: Xây dựng bộ quan sát trạng thái nhằm chẩn đoán vị trí điểm rò rỉ trong đường ống nước. • Bài giảng 4: Phương pháp mô phỏng hệ thống đường ống trên Matlab/Simulink.

	Bài thực hành	04	• Bài thực hành 1: Lập trình mô phỏng hệ thống đường ống nước trên Matlab/Simulink. • Bài thực hành 2: Lập trình mô phỏng bộ quan sát trạng thái chẩn đoán rò rỉ cho hệ thống đường ống trên Matlab/Simulink. • Bài thực hành 3: Lập trình thực nghiệm bằng Matlab/Simulink cho máy tính nhúng để chẩn đoán rò rỉ. • Bài thực hành 4: Xây dựng giao diện giám sát.

17. HIỆU QUẢ (giáo dục và đào tạo, kinh tế - xã hội)

Đối với giáo dục và đào tạo:

- Sản phẩm của đề tài có thể được dùng là nguồn tài liệu tham khảo để phục vụ đào tạo.
- Nâng cao chất lượng giảng dạy và đào tạo theo định hướng STEM.

Đối với kinh tế - xã hội:

- Giải pháp chẩn đoán vị trí rò rỉ trong đường ống nước có thể được các đơn vị cấp nước, phòng thí nghiệm ứng dụng nhằm giám sát, quản lý hệ thống cấp nước đô thị và phát hiện sớm sự cố rò rỉ.

18. PHƯƠNG THỨC CHUYỂN GIAO KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ ĐỊA CHỈ ỨNG DỤNG

- Phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu:
  Sản phẩm đề tài được chuyển giao trực tiếp cho bộ môn Tự động hóa thuộc khoa Điện – Điện tử, trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật để phục vụ nghiên cứu và đào tạo.

- Địa chỉ ứng dụng và đơn vị ứng dụng:
  Đơn vị ứng dụng: Bộ môn Tự động hóa, khoa Điện-Điện tử, trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng.
  Địa chỉ: 48 Cao Thắng, phường Hải Châu, thành phố Đà Nẵng.

19. KINH PHÍ THỰC HIỆN ĐỀ TÀI VÀ NGUỒN KINH PHÍ

Tổng kinh phí: 30.000.000 đồng
Bằng chữ: Ba mươi triệu đồng
Trong đó:
- Từ nguồn Quỹ KHCN: 30 triệu đồng - Từ các nguồn kinh phí khác:

Dự trù kinh phí theo các mục chi *(phù hợp với nội dung nghiên cứu)*:

Stt	Khoản chi, nội dung chi	Tổng kinh phí (ĐVT: VNĐ)	Nguồn kinh phí		Ghi chú
			Kinh phí từ Quỹ KHCN (ĐVT: VNĐ)	Các nguồn khác	
1	Chi tiền công lao động trực tiếp	**24.864.000**	**24.864.000**	**0**	
2	Chi mua vật tư, nguyên vật liệu	**3.036.000**	**3.036.000**	**0**	
3	Chi sửa chữa, mua sắm tài sản cố định	**0**	**0**	**0**	
4	Chị hội thảo khoa học, công tác phí	**0**	**0**	**0**	
5	Chi trả dịch vụ thuê ngoài phục vụ nghiên cứu	**0**	**0**	**0**	
6	Chi điều tra, khảo sát thu thập số liệu	**0**	**0**	**0**	
7	Văn phòng phẩm, thông tin liên lạc, in ấn	**600.000**	**600.000**	**0**	
8	Chi Hội đồng tự đánh giá	**0**	**0**	**0**	
9	Quản lý chung nhiệm vụ KHCN	**1.500.000**	**1.500.000**	**0**	
10	Chi khác liên quan	**0**	**0**	**0**	
	TỔNG CỘNG	**30.000.000**	**30.000.000**	**0**	

Ngày 28 tháng 11 năm 2025
TM. HỘI ĐỒNG KHOA
(ký, họ và tên)

Trần Hoàng Vũ

Ngày 28 tháng 11 năm 2025
Chủ nhiệm đề tài
(ký tên)

TS. Phạm Thanh Phong

Đà Nẵng, ngày 28 tháng 11 năm 2025
Cơ quan Chủ trì duyệt
KT. HIỆU TRƯỞNG
PHÓ HIỆU TRƯỞNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

PGS. TS. Võ Trung Hùng

GIẢI TRÌNH CHI TIẾT CÁC MỤC CHI

Mục 1a: Bản tính thù lao lao động phân theo kế hoạch nghiên cứu

Định mức thù lao tháng của chủ nhiệm (DMCN) **4.000.000** đồng

Số TT	Nội dung công việc	Chức danh khoa học	Hệ số lao động khoa học	Số người trong nhóm chức danh	Định mức thù lao tháng của chủ nhiệm (DM_{CN}) (ĐVT: VNĐ)	Số ngày công (ĐVT: ngày)	Tổng số tháng quy đổi của chức danh/nhóm chức danh (ĐVT: tháng)	Tổng thù lao thực hiện nhiệm vụ (ĐVT: VNĐ)
(1)	*(2)*	*(2.1)*	*(3)*	*(4)*	*(5)*	*(6)*	*(7)=6/22 ngày*	*8=3x5x7*
I	**Xây dựng thuyết minh nhiệm vụ**		Nội dung công việc này do chủ nhiệm và thư ký khoa học của nhiệm vụ thực hiện đã được tính trong thù lao của chủ nhiệm và thư ký khoa học, không tính thù lao riêng.					
II	**Nội dung nghiên cứu**						**8,15**	**24.864.000**
1	***Nội dung 1: Tổng quan về hệ thống đường ống nước và các phương pháp chẩn đoán rò rỉ trong hệ thống đường ống nước.***					22	***1,00***	2.400.000
-	***Thù lao 01 thành viên chính***		***0,8***	***1***	***4.000.000***	***11***	***0,50***	***1.600.000***
	Phạm Thanh Phong	Thành viên chính	0,8	1	4.000.000	11	0,50	1.600.000
-	***Thù lao nhóm 01 thành viên***		***0,4***	***1***	***4.000.000***	***11***	***0,50***	***800.000***
	Võ Khánh Thoại	Thành viên	0,4	1	4.000.000	5,5	0,25	400.000

	Dương Quang Thiện	Thành viên	0,4	1	4.000.000	5,5	0,25	400.000
2	***Nội dung 2: Xây dựng mô hình hệ thống đường ống nước thực tế.***					22	***1,00***	***2.200.000***
-	***Thù lao 01 thành viên chính***		***0,8***	***1***	***4.000.000***	***11***	***0,50***	***1.600.000***
	Phạm Thanh Phong	Thành viên chính	0,8	1	4.000.000	11	0,50	1.600.000
-	***Thù lao nhóm 01 thành viên***		***0,4***	***1***	***4.000.000***	***5,5***	***0,25***	***400.000***
	Võ Khánh Thoại	Thành viên	0,4	1	4.000.000	5,5	0,25	400.000
-	***Thù lao nhóm 01 kỹ thuật viên, nhân viên hỗ trợ***		***0,2***	***1***	***4.000.000***	***5,5***	***0,25***	***200.000***
	Dương Quang Thiện	Kỹ thuật viên	0,2	1	4.000.000	5,5	0,25	200.000
3	***Nội dung 3: Xây dựng thuật toán chẩn đoán vị trí rò rỉ trong hệ thống đường ống nước***					30	***1,35***	***3.640.000***
-	***Thù lao 01 thành viên chính***		***0,8***	***1***	***4.000.000***	***22***	***1,00***	***3.200.000***
	Phạm Thanh Phong	Thành viên chính	0,8	1	4.000.000	22	1,00	3.200.000
-	***Thù lao nhóm 01 thành viên***		***0,4***	***1***	***4.000.000***	***4,4***	***0,20***	***320.000***
	Võ Khánh Thoại	Thành viên	0,4	1	4.000.000	4,4	0,20	320.000
-	***Thù lao nhóm 01 kỹ thuật viên, nhân viên hỗ trợ***		***0,2***	***1***	***4.000.000***	***3,3***	***0,15***	***120.000***
	Dương Quang Thiện	Kỹ thuật viên	0,2	1	4.000.000	3,3	0,15	120.000

4	***Nội dung 4: Xây dựng các hệ thống bài thí nghiệm theo định hướng đào tạo STEM phục vụ cho việc hướng dẫn sinh viên và học sinh.***					32	***1,44***	***4.144.000***
-	***Thù lao 01 thành viên chính***		***0,8***	***1***	***4.000.000***	***26,4***	***1,20***	***3.840.000***
	Phạm Thanh Phong	Thành viên chính	0,8	1	4.000.000	26,4	1,20	3.840.000
-	***Thù lao nhóm 01 thành viên***		***0,4***	***1***	***4.000.000***	***3,1***	***0,14***	***224.000***
	Võ Khánh Thoại	Thành viên	0,4	1	4.000.000	3,1	0,14	224.000
-	***Thù lao nhóm 01 kỹ thuật viên, nhân viên hỗ trợ***		***0,2***	***1***	***4.000.000***	***2,2***	***0,10***	***80.000***
	Dương Quang Thiện	Kỹ thuật viên	0,2	1	4.000.000	2,2	0,10	80.000
5	**Thù lao của chủ nhiệm nhiệm vụ:**		**1**	**1**	**4.000.000**		**2,40**	**9.600.000**
	(TL_{CN} = 1,0 x DM_{CN} x 20% x T)						*(=20% x 12 tháng)*	
6	**Thù lao của thư ký khoa học:**		**0,3**	**1**	**4.000.000**		**2,40**	**2.880.000**
	(TL_{TK} = 0,3 x DM_{CN} x 20% x T)						*(=20% x 12 tháng)*	
III	**Xây dựng báo cáo tổng kết**		Nội dung công việc này do chủ nhiệm và thư ký khoa học của nhiệm vụ thực hiện, đã được tính trong thù lao của chủ nhiệm và thư ký khoa học, không tính thù lao riêng.					
	TỔNG CỘNG							**24.864.000**

Mục 1b: Bản tính thù lao lao động phân theo tên thành viên tham gia nghiên cứu

STT	Họ và tên	Chức danh	Hệ số	Số ngày *(nếu có)*	Tổng số tháng quy đổi của chức danh (ĐVT: tháng)	Định mức thù lao tháng của chủ nhiệm (ĐMCN) (ĐVT: VNĐ)	Thành tiền (ĐVT: VNĐ)	Tổng cộng (ĐVT: VNĐ)
-1	*-2*	*-3*	*-4*	*-5*	*-6*	*-7*	*-8*	*-9*
1	Phạm Thanh Phong	Chủ nhiệm	1		2,40	4.000.000	9.600.000	**19.840.000**
		Thành viên chính	0,8		3,20	4.000.000	10.240.000	
2	Võ Khánh Thoại	Thành viên	0,4		0,84	4.000.000	1.344.000	**4.224.000**
		Thư ký khoa học	0,3		2,40	4.000.000	2.880.000	
3	Dương Quang Thiện	Thành viên	0,4		0,25	4.000.000	400.000	**800.000**
		Kỹ thuật viên	0,2		0,50	4.000.000	400.000	
	Tổng						**24.864.000**	**24.864.000**

Mục 2. Chi mua vật tư, nguyên, nhiên, vật liệu: Lập theo nội dung nghiên cứu, công việc thực hiện, kết quả, sản phẩm. (Kèm 3 báo giá nếu mục chi này quá 20 triệu đồng)

Số TT	Khoản chi, nội dung chi	Đơn vị tính	Số lượng	Đơn giá *(đồng)*	Tổng kinh phí *(đồng)*	Nguồn kinh phí	
						Kinh phí từ Trường	Nguồn khác
-1	*-2*	*-3*	*-4*	*-5*	*-6*	*-7*	*-8*
1	**Nguyên, vật liệu**						
1.1	Thiết bị thu thập dữ liệu IoT về lưu lượng, áp suất	Bộ	2	135.000	270.000	270.000	0
1.2	Thiết bị hỗ trợ truyền thông 4G/Lora	Bộ	2	80.000	160.000	160.000	0
1.3	SIM DATA	Cái	6	35.000	210.000	210.000	0
1.4	Gói cước SIM DATA	Cái	6	60.000	360.000	360.000	0
1.5	Thiết bị nhận dữ liệu	Bộ	2	150.000	300.000	300.000	0
1.6	Thiết bị xử lý tại biên	Bộ	1	180.000	180.000	180.000	0
1.7	Cảm biến đo lưu lượng	Cái	4	214.000	856.000	856.000	0
1.8	Cảm biến đo áp suất	Cái	4	150.000	600.000	600.000	0
1.9	Phụ kiện dây điện, băng dính điện, ốc vít, …	Bộ	1	100.000	100.000	100.000	0
2	**Dụng cụ, phụ tùng, vật rẻ tiền mau hỏng**				0	0	0
3	**Năng lượng, nhiên liệu**				0	0	0
	Tổng cộng				**3.036.000**	**3.036.000**	**0**

Mục 3	**Chi sửa chữa, mua sắm tài sản cố định:**	Không
Mục 4	**Chi hội thảo khoa học, công tác phí:**	Không
Mục 5	**Chi trả dịch vụ thuê ngoài phục vụ hoạt động nghiên cứu:**	Không
Mục 6	**Chi điều tra, khảo sát thu thập số liệu:**	Không

Mục 7. Chi văn phòng phẩm, thông tin liên lạc, in ấn: (Không quá 2% tổng kinh phí đề tài)

TT	Nội dung chi	Đơn vị tính	Số lượng	Đơn giá	Tổng kinh phí	Nguồn kinh phí (đồng)	
						Kinh phí từ Trường	Nguồn khác
-1	-2	-3	-4	-5	(6) =(4)x(5)	-7	-8
	Chi văn phòng phẩm (chi tiết)						
1	Mực in	Hộp	1	200.000	200.000	200.000	*0*
2	Phô tô, in ấn, đóng tập	Bộ	6	50.000	300.000	300.000	*0*
3	Văn phòng phẩm (bút, kẹp, giấy)	Bộ	1	100.000	100.000	100.000	*0*
	Tổng cộng				**600.000**	**600.000**	***0***

Mục 8 **Chi họp hội đồng đánh giá, nghiệm thu cấp cơ sở:** Không

Mục 9 **Chi quản lý chung:** 1.500.000 đồng

Mục 10 **Chi khác:** Không

Đà Nẵng, ngày 28 tháng 11 năm 2025

Chủ nhiệm đề tài
(ký, ghi họ và tên)

TS. Phạm Thanh Phong

Cơ quan chủ trì
KT. HIỆU TRƯỞNG
PHÓ HIỆU TRƯỞNG

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG

PGS. TS. Võ Trung Hùng

Mẫu BM.02-QT.01-KHCN

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

GIẤY XÁC NHẬN PHỐI HỢP THỰC HIỆN VÀ SỬ DỤNG SẢN PHẨM SAU KHI HOÀN THÀNH ĐỀ TÀI CẤP TRƯỜNG

Kính gửi: Khoa Điện – Điện tử
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng.

1. Tên đề tài:
Thiết kế mô hình điều khiển và giám sát hệ thống nước ngoài trời phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM

2. Chủ nhiệm đề tài (*Họ và tên, học vị*):
Họ và tên: Phạm Thanh Phong
Học vị: Tiến sĩ

3. Đơn vị phối hợp thực hiện và sử dụng sản phẩm đề tài sau khi hoàn thành:
Tên đơn vị: Bộ môn Tự động hóa, Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng
Địa chỉ: 48 Cao Thắng, phường Hải Châu, thành phố Đà Nẵng
Điện thoại: 0236.3822571

a. Nội dung công việc phối hợp tham gia trong đề tài:

Nội dung 2: Xây dựng mô hình hệ thống đường ống nước thực tế, mô hình đường ống được xây dựng và đặt tại Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng.

b. Cam kết sử dụng sản phẩm đề tài sau khi hoàn thành:

Khi đề tài được duyệt thực hiện, chúng tôi cam kết sẽ phối hợp với chủ nhiệm đề tài để thực hiện đề tài và sẽ tiếp nhận, sử dụng sản phẩm của đề tài sau khi hoàn thành.

Đà Nẵng, ngày 18 tháng 9 năm 2025

CHỦ NHIỆM ĐỀ TÀI	**ĐƠN VỊ PHỐI HỢP THỰC HIỆN VÀ SỬ DỤNG SẢN PHẨM ĐỀ TÀI**
Phạm Thanh Phong	Phạm Duy Dưỡng

THỦ TRƯỞNG ĐƠN VỊ
(ký và ghi rõ họ và tên)

Trần Hoàng Việt

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Ngày 28 tháng 11 năm 2025

HỢP ĐỒNG TRIỂN KHAI THỰC HIỆN
ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG

Số: 01./HĐ-KHCNCS-2025

- Căn cứ Bộ luật dân sự ngày 24 tháng 11 năm 2015;
- Căn cứ Luật khoa học công nghệ và Đổi mới sáng tạo ngày 27 tháng 6 năm 2025;
- Căn cứ Quyết định số 1749/QĐ-TTg ngày 08 tháng 11 năm 2017 của Thủ tướng Chính phủ về việc thành lập Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật (ĐHSPKT) thuộc Đại học Đà Nẵng;
- Căn cứ Thông tư số 03/2023/TT-BTC ngày 10 tháng 01 năm 2023 của Bộ trưởng Bộ Tài chính về việc quy định lập dự toán, quản lý sử dụng và quyết toán kinh phí ngân sách nhà nước thực hiện nhiệm vụ khoa học và công nghệ;
- Căn cứ Thông tư 02/2023/TT-BKHCN ngày 08 tháng 5 năm 2023 của Bộ Khoa học Công nghệ Hướng dẫn một số nội dung chuyên môn phục vụ công tác xây dựng dự toán thực hiện nhiệm vụ khoa học và công nghệ có sử dụng ngân sách nhà nước;
- Căn cứ Quyết định số 216/QĐ-ĐHSPKT ngày 09 tháng 3 năm 2018 của Hiệu trưởng Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật về việc ban hành Quy định về quản lý đề tài khoa học và công nghệ cấp cơ sở do Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật quản lý;
- Căn cứ Quyết định số 859/QĐ-ĐHSPKT ngày 03 tháng 09 năm 2025 của Hiệu trưởng Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật về việc phê duyệt danh mục đề tài khoa học và công nghệ cấp cơ sở (cấp Trường) năm 2025;
- Căn cứ Quyết định số 1142/QĐ-ĐHSPKT ngày 27 tháng 11 năm 2025 của Hiệu trưởng Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật về việc phê duyệt kinh phí và giao nhiệm vụ thực hiện đề tài khoa học và công nghệ (KH&CN) cấp Trường năm 2025;

Sau khi xem xét mục tiêu, nội dung nghiên cứu và sản phẩm khoa học của đề tài KH&CN (sau đây gọi tắt là "*đề tài*"):

"Xây dựng mô hình giám sát thông số rò rỉ của hệ thống nước ngoài trời phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM"

Mã số: T2025-06-01.

1. Bên A: **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật**
Đại diện: **Ông Nguyễn Lê Hùng** Chức vụ: Hiệu trưởng
Địa chỉ: 48 Cao Thắng, Quận Hải Châu, Thành phố Đà Nẵng
Điện thoại: 0236.3822571 Fax: 0236.3894884
Số tài khoản: 3716.1.1055693.00000 tại Kho bạc Nhà nước Đà Nẵng

2. Bên B: **Ông (Bà): TS. Phạm Thanh Phong** là Chủ nhiệm đề tài
- Số CCCD: 052086008949 ngày cấp: 25/02/2022 nơi cấp: Cục cảnh sát Quản lý Hành chính về Trật tự Xã hội, Bộ Công an.
- Số Tài khoản: 5610490406 tại ngân hàng BIDV Đà Nẵng
- Mã số thuế: 8103950600

- Mã số thuế: 8103950600
- Đơn vị: Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng.
- Điện thoại: 0397870063 Email: ptphong@ute.udn.vn

Và các thành viên tham gia thực hiện đề tài theo thuyết minh được duyệt gồm (nếu có):

2.1. Bên B: Ông (Bà) ThS. Võ Khánh Thoại là Thành viên,
- Số CCCD: 049082022534 ngày cấp: 12/22/2021 nơi cấp: Cục cảnh sát Quản lý Hành chính về Trật tự Xã hội, Bộ Công an.
- Số Tài khoản: 56110000547001 tại BIDV CN Đà Nẵng
- Mã số thuế: 0400881232
- Đơn vị: Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng
- Điện thoại: 0905261135 Email: vkthoai@ute.udn.vn

2.2. Bên B: Ông (Bà) ThS. Dương Quang Thiện là Thành viên
- Số CCCD: 048088000608 ngày cấp: 17/4/2021 nơi cấp: Cục cảnh sát Quản lý Hành chính về Trật tự Xã hội, Bộ Công an.
- Số Tài khoản: 5601691959 tại ngân hàng BIDV Đà Nẵng
- Mã số thuế: 8122146850
- Đơn vị: Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng
- Điện thoại: 0935000483 Email: dqthien@ute.udn.vn

Cùng thỏa thuận và thống nhất ký kết Hợp đồng thực hiện đề tài KH&CN cấp Trường (sau đây gọi tắt là Hợp đồng) với các điều khoản sau:

Điều 1. Đối tượng Hợp đồng

1. Bên A đặt hàng và Bên B nhận đặt hàng thực hiện đề tài KH&CN cấp trường (sau đây gọi là đề tài) theo các nội dung trong Thuyết minh đề tài đã được phê duyệt (sau đây gọi tắt là Thuyết minh).

2. Thuyết minh là bộ phận không tách rời của Hợp đồng.

3. Nội dung Thuyết minh có thể được điều chỉnh bằng văn bản của cơ quan có thẩm quyền trên cơ sở sự thống nhất của hai Bên.

Điều 2. Thời gian thực hiện Hợp đồng

1. Thời gian thực hiện đề tài là 12 tháng, từ tháng 10 năm 2025 đến tháng 9 năm 2026.

2. Thời gian thực hiện hợp đồng có thể được điều chỉnh theo thời gian thực hiện đề tài bằng quyết định của cơ quan có thẩm quyền.

Điều 3. Kinh phí đề tài:

1. Kinh phí thực hiện:

Tổng cộng: 30.000.000 đồng

- Kinh phí từ nguồn KHCN tại Trường: 30.000.000 đồng
  + Kinh phí khoán: 30.000.000 đồng
  + Kinh phí không giao khoán: 0 đồng
- Kinh phí từ các nguồn khác: 0 đồng

2. Tạm ứng và thanh quyết toán kinh phí

- Tạm ứng đợt 1: Ngay sau khi ký kết hợp đồng, bên A sẽ tạm ứng cho bên B tối đa 50% giá trị hợp đồng khi có yêu cầu tạm ứng của bên B.

- Tạm ứng đợt 2: Bên A cấp tạm ứng tối đa 40% tổng giá trị còn lại của hợp đồng khi có đề nghị của bên B và sau khi bên B phải hoàn thành hồ sơ thanh toán tối thiểu bằng 50% mức kinh phí đã tạm ứng các đợt trước đó trên cơ sở đề tài được đánh giá hoàn thành tiến độ thực hiện đợt 1. Bên A thực hiện thanh toán cho bên B theo đúng quy định hiện hành, đồng thời thu hồi cho đến hết số tiền đã tạm ứng. Số tiền tạm ứng đợt 1 chưa được thu hồi thì sẽ được thu hồi trong lần thanh toán cuối cùng.

- Thanh toán đợt cuối: Sau khi đề tài được nghiệm thu chính thức, bên B phải hoàn thành và nộp hồ sơ thanh quyết toán kinh phí tất cả các nguồn kể từ ngày kết thúc nhiệm vụ theo quyết định phê duyệt nhiệm vụ và hợp đồng đã ký kết và trong phạm vi niên độ tài chính. Bên A thanh toán hết giá trị còn lại của hợp đồng từ nguồn do bên A quản lý theo đúng quy định hiện hành.

- Tùy theo kết quả thực hiện hợp đồng mà bên B chịu những xử lý tài chính trong quy định tại điều 6 hợp đồng này.

Điều 4. Quyền và nghĩa vụ của các bên

1. Quyền và nghĩa vụ của Bên A

a) Cung cấp các thông tin cần thiết cho việc triển khai, thực hiện Hợp đồng;

b) Bố trí cho Bên B số kinh phí từ Trường ĐHSPKT, ĐHĐN quy định tại Điều 3 Hợp đồng này theo tiến độ kế hoạch, tương ứng với các nội dung nghiên cứu được phê duyệt;

c) Tổ chức phê duyệt kế hoạch đấu thầu, mua sắm máy móc, thiết bị, nguyên vật liệu và dịch vụ của đề tài bằng kinh phí do Bên A cấp (nếu có) theo quy định;

d) Trước mỗi đợt cấp kinh phí, trên cơ sở báo cáo tình hình thực hiện đề tài của Bên B, Bên A căn cứ vào sản phẩm, khối lượng công việc đã hoàn thành theo Thuyết minh để cấp tiếp kinh phí thực hiện Hợp đồng. Bên A có quyền thay đổi tiến độ cấp hoặc ngừng cấp kinh phí nếu Bên B không hoàn thành công việc đúng tiến độ, đúng nội dung công việc được giao;

đ) Kiểm tra đột xuất để đánh giá tình hình Bên B thực hiện đề tài theo Thuyết minh. Trường ĐHSPKT, ĐHĐN thực hiện kiểm tra định kỳ đánh giá tình hình thực hiện đề tài theo quy định hiện hành về quản lý đề tài khoa học và công nghệ cấp Trường;

e) Kịp thời xem xét, giải quyết theo thẩm quyền hoặc trình cấp có thẩm quyền giải quyết kiến nghị, đề xuất của Bên B về điều chỉnh nội dung chuyên môn, kinh phí và các vấn đề phát sinh khác trong quá trình thực hiện đề tài;

g) Tổ chức đánh giá, nghiệm thu kết quả thực hiện đề tài của Bên B theo các yêu cầu, chỉ tiêu trong Thuyết minh;

h) Có trách nhiệm cùng Bên B tiến hành thanh lý Hợp đồng theo quy định hiện hành;

i) Phối hợp cùng Bên B xử lý tài sản được mua sắm bằng ngân sách Trường ĐHSPKT, ĐHĐN hoặc được tạo ra từ kết quả nghiên cứu của đề tài sử dụng ngân sách Trường ĐHSPKT, ĐHĐN (nếu có) theo quy định của pháp luật;

k) Tiếp nhận kết quả thực hiện đề tài, bàn giao kết quả thực hiện đề tài cho tổ chức đề xuất đặt hàng hoặc tổ chức triển khai ứng dụng sau khi được nghiệm thu;

l) Có trách nhiệm hướng dẫn việc trả thù lao cho tác giả nếu có lợi nhuận thu được từ việc ứng dụng kết quả của đề tài và thông báo cho tác giả việc bàn giao kết quả thực hiện đề tài (nếu có);

m) Ủy quyền cho Bên B tiến hành đăng ký bảo hộ quyền sở hữu trí tuệ đối với kết quả thực hiện đề tài (nếu có) theo quy định hiện hành;

n) Thực hiện các quyền và nghĩa vụ khác theo quy định của Luật KH&CN và các văn bản liên quan.

2. Quyền và nghĩa vụ của Bên B

a) Tổ chức triển khai đầy đủ các nội dung nghiên cứu của đề tài đáp ứng các yêu cầu chất lượng, tiến độ và chỉ tiêu theo Thuyết minh;

b) Cam kết thực hiện và bàn giao sản phẩm cuối cùng đáp ứng đầy đủ các tiêu chí đã được phê duyệt;

c) Được quyền tự chủ, tự quyết định việc sử dụng phần kinh phí để thực hiện đề tài theo dự toán kinh phí đề tài, được quyền ký kết hợp đồng thuê khoán chuyên môn với các thành viên tham gia thực hiện; và các hợp đồng khác gồm: mua vật tư, nguyên, nhiên, vật liệu, sửa chữa, mua sắm tài sản cố định, dịch vụ thuê ngoài phục vụ nghiên cứu, văn phòng phẩm, thông tin liên lạc, in ấn có giá trị dưới 20 triệu đồng;

d) Yêu cầu Bên A cung cấp thông tin cần thiết để triển khai thực hiện Hợp đồng;

đ) Kiến nghị, đề xuất điều chỉnh các nội dung chuyên môn, kinh phí và thời hạn thực hiện Hợp đồng khi cần thiết;

e) Yêu cầu Bên A cấp đủ kinh phí theo đúng tiến độ quy định trong Hợp đồng khi hoàn thành đầy đủ nội dung công việc theo tiến độ cam kết. Đảm bảo huy động đủ nguồn kinh phí khác theo cam kết. Sử dụng kinh phí đúng mục đích, đúng chế độ hiện hành và có hiệu quả;

g) Đối với các hợp đồng khác được quy định tại điểm c, khoản 2, Điều 4 hợp đồng này có giá trị từ 20 triệu trở lên: Chủ nhiệm đề tài xây dựng kế hoạch mua sắm để gửi Bên A phê duyệt và thực hiện mua sắm theo quy định của pháp luật;

h) Chấp hành các quy định pháp luật trong quá trình thực hiện Hợp đồng. Tạo điều kiện thuận lợi và cung cấp đầy đủ thông tin cho các cơ quan quản lý trong việc giám sát, kiểm tra, thanh tra đối với đề tài theo quy định của pháp luật;

i) Thực hiện việc tự đánh giá, nghiệm thu cấp cơ sở theo quy định hiện hành khi kết thúc đề tài. Sau khi đánh giá, nghiệm thu cấp cơ sở hoàn chỉnh lại hồ sơ theo kết luận của Hội đồng đánh giá cấp cơ sở, Bên B có trách nhiệm chuyển cho Bên A các hồ sơ để Bên A tiến hành việc đánh giá, nghiệm thu theo quy định;

k) Có trách nhiệm quản lý tài sản được mua sắm bằng ngân sách của Trường ĐHSPKT, ĐHĐN hoặc được tạo ra từ kết quả nghiên cứu của đề tài sử dụng ngân sách Trường ĐHSPKT, ĐHĐN (nếu có). Chủ nhiệm đề tài có trách nhiệm bàn giao tài sản được mua sắm bằng ngân sách Trường ĐHSPKT, ĐHĐN hoặc được tạo ra từ kết quả nghiên cứu của đề tài cho cơ quan chủ quản đề tài để quản lý và sử dụng.

l) Có trách nhiệm cùng Bên A tiến hành thanh lý Hợp đồng theo quy định;

m) Thực hiện việc đăng ký bảo hộ quyền sở hữu trí tuệ theo ủy quyền của Bên A đối với kết quả nghiên cứu (nếu có);

n) Chủ nhiệm đề tài giao nộp kết quả thực hiện đề tài cho bộ phận lưu giữ thông tin của cơ quan chủ quản đề tài. Cơ quan chủ quản đề tài xác nhận việc giao nộp kết quả thực hiện đề tài cho chủ nhiệm đề tài.

o) Các sản phẩm khoa học công bố được tính khi có lời ghi nhận Trường ĐHSPKT, ĐHĐN, cụ thể như sau:

+ Đối với bài báo khoa học viết bằng tiếng Anh: "This research is funded by The University of Danang – University of Technology and Education under project number **T2025-06-01";**

+ Đối với bài báo khoa học viết bằng tiếng Việt: "Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số **T2025-06-01**";

Đối với sản phẩm khoa học có lời ghi nhận Trường ĐHSPKT, ĐHĐN và các nguồn kinh phí trong nước khác, Trường ĐHSPKT, ĐHĐN sẽ tính mức độ hoàn thành của sản phẩm đó như sau: Phần công trình được tính cho sản phẩm đề tài này được chia theo tỷ lệ đóng góp của mỗi nguồn kinh phí thực hiện. Trong trường hợp không xác định được cụ thể tỷ lệ đóng góp của mỗi nguồn kinh phí thì phần công trình được tính cho sản phẩm đề tài này sẽ bằng một (01) chia cho số nguồn kinh phí trong nước. Tổng số phần các công trình được tính phải đáp ứng yêu cầu về số lượng theo thuyết minh đề tài đã phê duyệt.

Thời gian thực hiện sản phẩm của đề tài phải được triển khai trong khoảng thời gian thực hiện đề tài.

p) Chủ nhiệm đề tài cùng với các cá nhân trực tiếp sáng tạo ra kết quả nghiên cứu khoa học và phát triển công nghệ được đứng tên tác giả trong đề tài và hưởng quyền tác giả bao gồm cả các lợi ích thu được (nếu có) từ việc khai thác thương mại các kết quả thực hiện đề tài theo quy định pháp luật và các thỏa thuận khác (nếu có);

q) Có trách nhiệm trực tiếp hoặc tham gia triển khai ứng dụng kết quả nghiên cứu khoa học và phát triển công nghệ theo yêu cầu của Bên A hoặc tổ chức, cá nhân được Bên A giao quyền sở hữu, sử dụng kết quả thực hiện đề tài;

r) Thực hiện bảo mật các kết quả thực hiện đề tài theo quy định về bảo vệ bí mật của nhà nước;

s) Thực hiện các quyền và nghĩa vụ khác theo quy định Luật KH&CN và các văn bản liên quan.

Điều 5. Chấm dứt Hợp đồng

Hợp đồng này chấm dứt trong các trường hợp sau:

1. Đề tài đã kết thúc và được nghiệm thu.

2. Bên B bị chấm dứt hợp đồng thực hiện đề tài khi có đề nghị thanh lý Hợp đồng của Hội đồng thanh lý đề tài cấp Trường.

Điều 6. Xử lý tài chính khi chấm dứt Hợp đồng

1. Đối với đề tài đã kết thúc và được nghiệm thu:

a) Đề tài đã kết thúc và đánh giá nghiệm thu từ mức "Đạt" trở lên thì Bên A thanh toán đầy đủ kinh phí cho Bên B theo quy định tại Hợp đồng này.

b) Đề tài đã kết thúc, nhưng nghiệm thu mức "không đạt" thì Bên A xem xét, quyết toán kinh phí cho Bên B trên cơ sở kết luận của Hội đồng đánh giá về nguyên nhân, trách nhiệm và những nội dung công việc mà Bên B đã thực hiện có sản phẩm thực tế được đánh giá.

Bên B có trách nhiệm hoàn trả toàn bộ số kinh phí ngân sách nhà nước đã cấp nhưng chưa sử dụng. Đối với khoản kinh phí đã sử dụng được áp dụng xử lý đối với trường hợp đề tài không hoàn thành được quy định tại Điều 16 Thông tư liên tịch số 27/2015/TTLT-BKHCN-BTC ngày 30/12/2015 của Bộ Khoa học và Công nghệ - Bộ Tài chính quy định khoán chi thực hiện nhiệm vụ khoa học và công nghệ sử dụng ngân sách Nhà nước.

2. Đối với đề tài chấm dứt khi có căn cứ khẳng định không còn nhu cầu thực hiện:

a) Trường hợp Đề tài chấm dứt khi có căn cứ khẳng định không còn nhu cầu thực hiện thì hai bên cùng nhau xác định khối lượng công việc Bên B đã thực hiện để làm căn cứ thanh toán số kinh phí Bên B đã sử dụng nhằm thực hiện đề tài và thu hồi số kinh phí còn lại đã cấp cho Bên B.

b) Trường hợp hai bên thỏa thuận ký Hợp đồng mới để thay thế và kết quả nghiên cứu của Hợp đồng cũ là một bộ phận cấu thành kết quả nghiên cứu của Hợp đồng mới thì số kinh phí đã cấp cho Hợp đồng cũ được tính vào kinh phí cấp cho Hợp đồng mới và được tiếp tục thực hiện với Hợp đồng mới.

3. Đối với Đề tài bị đình chỉ theo quyết định của cơ quan có thẩm quyền hoặc Hợp đồng bị chấm dứt do Bên B không nộp hồ sơ để đánh giá, nghiệm thu Đề tài theo quy định pháp luật thì Bên A sẽ tiến hành thủ tục thanh lý đề tài theo quy định.

4. Đối với Đề tài không hoàn thành do lỗi của Bên A dẫn đến việc chấm dứt Hợp đồng thì Bên B không phải bồi hoàn số kinh phí đã sử dụng để thực hiện Đề tài, nhưng vẫn phải thực hiện việc quyết toán kinh phí theo quy định của pháp luật.

Điều 7. Gia hạn đề tài

Trong trường hợp Chủ nhiệm chưa hoàn thành các nội dung nghiên cứu và có đề xuất xin gia hạn thời gian thực hiện, Hợp đồng tự động gia hạn thêm tối đa 6 tháng theo quy định trên cơ sở báo cáo định kỳ tình hình thực hiện đề tài và kết luận của đơn vị chủ trì.

Điều 8. Xử lý tài sản khi chấm dứt Hợp đồng

1. Khi chấm dứt Hợp đồng, việc xử lý tài sản được mua sắm hoặc được hình thành bằng ngân sách Trường ĐHSPKT, ĐHĐN cấp cho đề tài được thực hiện theo quy định pháp luật.

2. Các sản phẩm vật chất của Đề tài sử dụng ngân sách Trường ĐHSPKT, ĐHĐN: nguồn thu khi các sản phẩm này được tiêu thụ trên thị trường sau khi trừ các khoản chi phí cần thiết, hợp lệ, được phân chia theo quy định pháp luật.

Điều 9. Điều khoản chung

1. Trong quá trình thực hiện Hợp đồng, nếu một trong hai bên có yêu cầu sửa đổi, bổ sung nội dung hoặc có căn cứ để chấm dứt thực hiện Hợp đồng thì phải thông báo cho bên kia ít nhất là 15 ngày làm việc trước khi tiến hành sửa đổi, bổ sung hoặc chấm dứt thực hiện Hợp đồng, xác định trách nhiệm của mỗi bên và hình thức xử lý. Các sửa đổi, bổ sung (nếu có) phải lập thành văn bản có đầy đủ chữ ký của các bên và được coi là bộ phận của Hợp đồng và là căn cứ để nghiệm thu kết quả của đề tài.

2. Khi một trong hai bên gặp phải trường hợp bất khả kháng dẫn đến việc không thể hoặc chậm thực hiện nghĩa vụ đã thỏa thuận trong Hợp đồng thì có trách nhiệm thông báo cho Bên kia trong 10 ngày làm việc kể từ ngày xảy ra sự kiện bất khả kháng. Hai bên có trách nhiệm phối hợp xác định nguyên nhân và báo cáo cơ quan quản lý nhà nước có thẩm quyền để giải quyết theo quy định của pháp luật.

3. Hai bên cam kết thực hiện đúng các quy định của Hợp đồng và có trách nhiệm hợp tác giải quyết các vướng mắc phát sinh trong quá trình thực hiện. Bên vi phạm các cam kết trong Hợp đồng phải chịu trách nhiệm theo quy định pháp luật.

4. Mọi tranh chấp phát sinh trong quá trình thực hiện Hợp đồng do các bên thương lượng hòa giải để giải quyết. Trường hợp không hoà giải được thì một trong hai bên có quyền đưa tranh chấp ra để giải quyết theo quy định của pháp luật.

5. Hợp đồng tự động thanh lý khi hai bên hoàn thành nghĩa vụ theo hợp đồng đã được ký kết. Trong trường hợp thanh lý đề tài (nếu có), bên B hoàn trả số tiền đã được Hội đồng thanh lý đề tài kết luận trong nội dung của Biên bản họp hội đồng thanh lý đề tài. Bên B thực hiện việc hoàn trả bằng hình thức chuyển khoản vào tài khoản sau đây của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật trong thời hạn 30 ngày kể từ ngày họp hội đồng thanh lý đề tài, chi tiết thông tin như sau:

- Tên tài khoản: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật.
- Số tài khoản: 56110001076650 tại Ngân hàng BIDV chi nhánh Đà Nẵng.

Điều 10. Hiệu lực của Hợp đồng

Hợp đồng này có hiệu lực từ ngày ký. Hợp đồng này được lập thành 06 bản (01 bản gốc và 05 bản chính) và có giá trị như nhau, Bên A giữ 02 bản, Bên B giữ 04 bản có giá trị pháp lý như nhau.

BÊN A **CƠ QUAN CHỦ QUẢN**	**BÊN B** **CHỦ NHIỆM ĐỀ TÀI**
BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG	
Nguyễn Lê Hùng	**TS. Phạm Thanh Phong**

MỤC LỤC MINH CHỨNG SẢN PHẨM CỦA ĐỀ TÀI

Họ và tên chủ nhiệm đề tài: Phạm Thanh Phong
Mã số đề tài: T2025-06-01

STT	Tên minh chứng	Ghi chú
1	**Mô hình hệ thống với đường ống đặt ngoài trời có các cảm biến gắn ở hai đầu đường ống và trung tâm giám sát đặt trong nhà xưởng. Áp dụng mạng truyền thông không dây 4G trong việc truyền tải dữ liệu.**	
2	**Hệ thống các bài giảng theo định hướng đào tạo STEM phục vụ cho việc hướng dẫn sinh viên**	
	☒ Bài giảng 1: Tổng quan hệ thống đường ống nước và các phương pháp chẩn đoán rò rỉ. ☒ Bài giảng 2: Xây dựng mô hình toán học cho một đoạn đường ống nước có một đầu vào và một đầu ra. ☒ Bài giảng 3: Xây dựng bộ quan sát trạng thái nhằm chẩn đoán vị trí điểm rò rỉ trong đường ống nước. ☒ Bài giảng 4: Phương pháp mô phỏng hệ thống đường ống trên Matlab/Simulink.	
3	**Hệ thống các bài thực hành theo định hướng đào tạo STEM phục vụ cho việc hướng dẫn sinh viên**	
	☒ Bài thực hành 1: Lập trình mô phỏng hệ thống đường ống nước trên Matlab/Simulink. ☒ Bài thực hành 2: Lập trình mô phỏng bộ quan sát trạng thái chẩn đoán rò rỉ cho hệ thống đường ống trên Matlab/Simulink. ☒ Bài thực hành 3: Lập trình thực nghiệm bằng Matlab/Simulink cho máy tính nhúng để chẩn đoán rò rỉ. ☒ Bài thực hành 4: Xây dựng giao diện giám sát.	

Minh chứng 01:

MÔ HÌNH HỆ THỐNG VỚI ĐƯỜNG ỐNG ĐẶT NGOÀI TRỜI CÓ CÁC CẢM BIẾN GẮN Ở HAI ĐẦU ĐƯỜNG ỐNG VÀ TRUNG TÂM GIÁM SÁT ĐẶT TRONG NHÀ XƯỞNG. ÁP DỤNG MẠNG TRUYỀN THÔNG KHÔNG DÂY 4G TRONG VIỆC TRUYỀN TẢI DỮ LIỆU

Đà Nẵng – 9/2026

MỤC LỤC

1. Mục đích và yêu cầu cấu trúc hệ thống 2

2. Mô hình thực nghiệm và tuyến đường ống 2

3. Trạm bơm và thiết bị tại hiện trường.....4

4. Khối thu thập dữ liệu tại trạm bơm 5

5. Trung tâm điều khiển.....6

6. Khối xử lý trung tâm 8

7. Kết nối truyền thông từ trạm bơm đến trung tâm.....9

8. Luồng dữ liệu và nguyên lý hoạt động.....10

9. Giao diện giám sát và điều khiển 10

10. Cấu trúc kết nối tổng thể 11

11. Phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM 11

12. Đánh giá cấu trúc hệ thống.....11

13. Kết luận.....11

1. Mục đích và yêu cầu cấu trúc hệ thống

Mô hình được xây dựng để mô phỏng một hệ thống nước ngoài trời có khả năng đo lường, thu thập, truyền và xử lý các thông số phục vụ giám sát rò rỉ. Nội dung cấu trúc được trình bày theo đúng hướng công nghệ từ đối tượng thực nghiệm tại trạm bơm đến trung tâm điều khiển và giám sát.

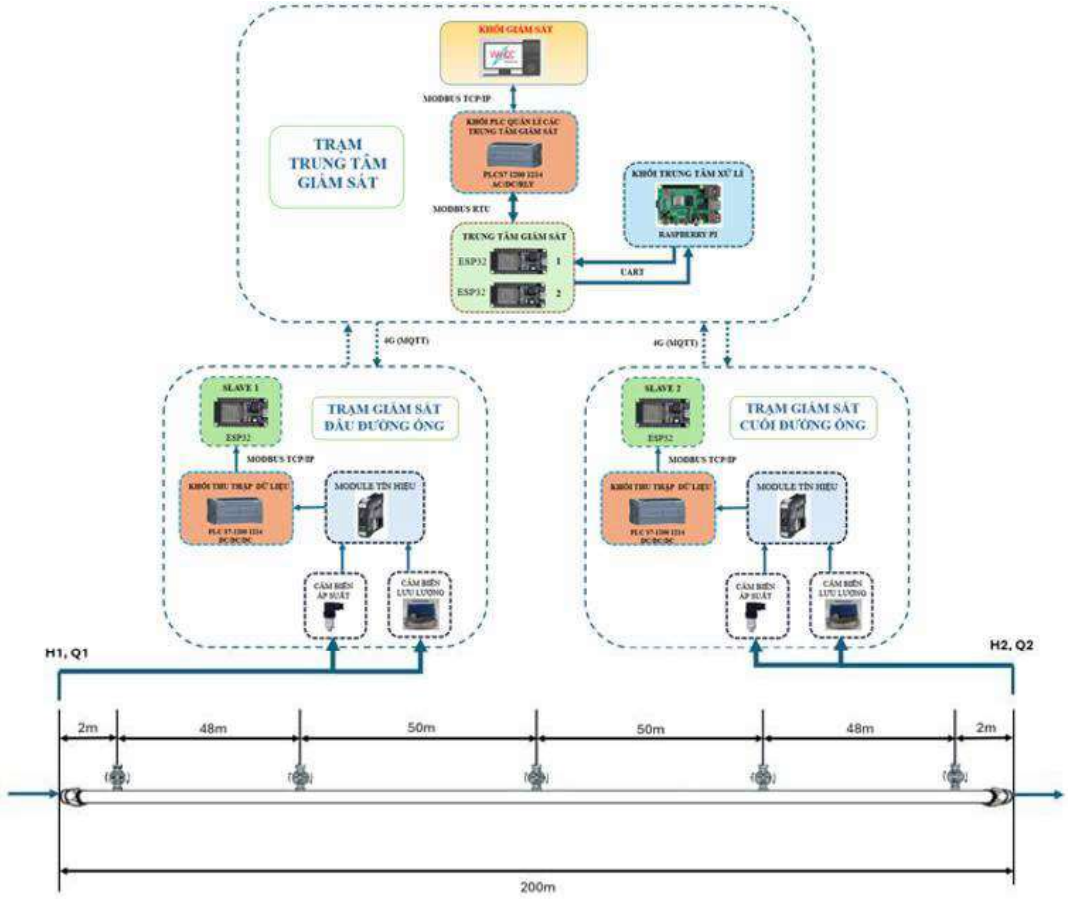
- Tạo dòng nước và duy trì chế độ vận hành trên tuyến ống.
- Đo các thông số cần thiết tại các vị trí khảo sát.
- Thu thập và truyền dữ liệu từ trạm bơm về trung tâm.
- Điều khiển thiết bị và xử lý dữ liệu tại trung tâm.
- Hiển thị trạng thái và thông số trên giao diện giám sát.

2. Mô hình thực nghiệm và tuyến đường ống



Hình 1. Mô hình thực nghiệm hệ thống nước ngoài trời và tuyến đường ống.

Mô hình thực nghiệm được bố trí ngoài trời, gồm tuyến ống, các vị trí đo, nguồn nước và các cụm thiết bị phục vụ tạo dòng chảy. Đây là đối tượng vật lý để người học quan sát và thực hiện các bài thực hành.

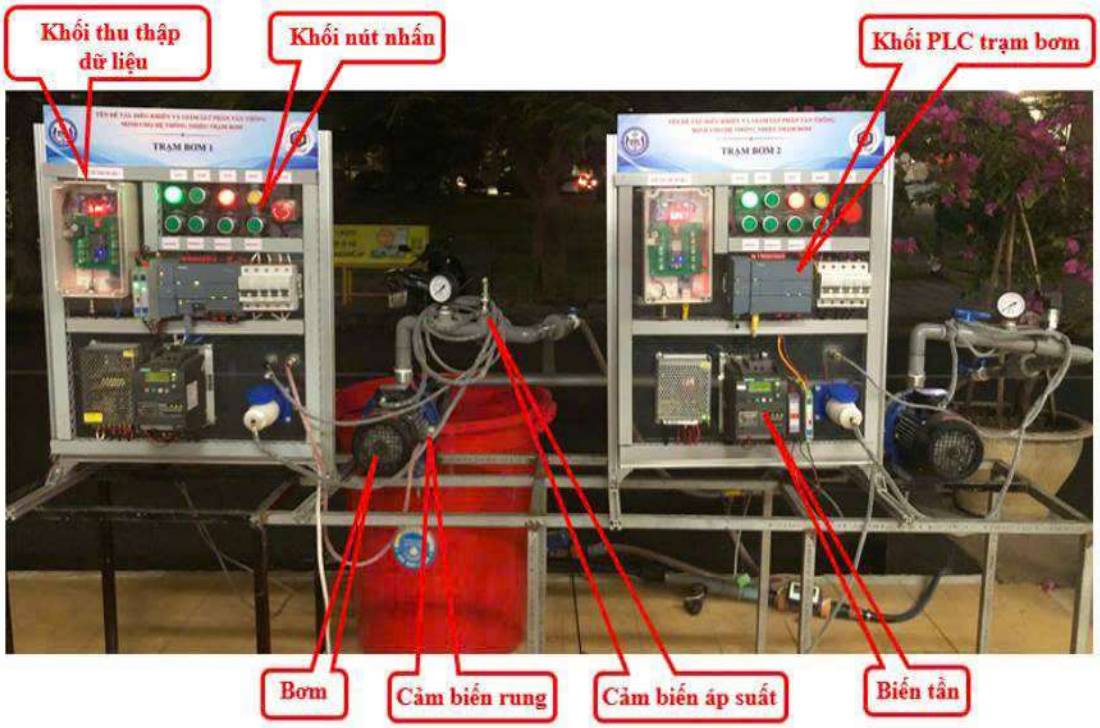


Hình 2. Sơ đồ tổng thể tuyến ống 200 m và các trạm giám sát.

Tuyến ống có chiều dài 200 m, các vị trí đo được bố trí dọc tuyến. Hai phía của hệ thống được ký hiệu H1, Q1 và H2, Q2 để theo dõi sự thay đổi của áp suất và lưu lượng.

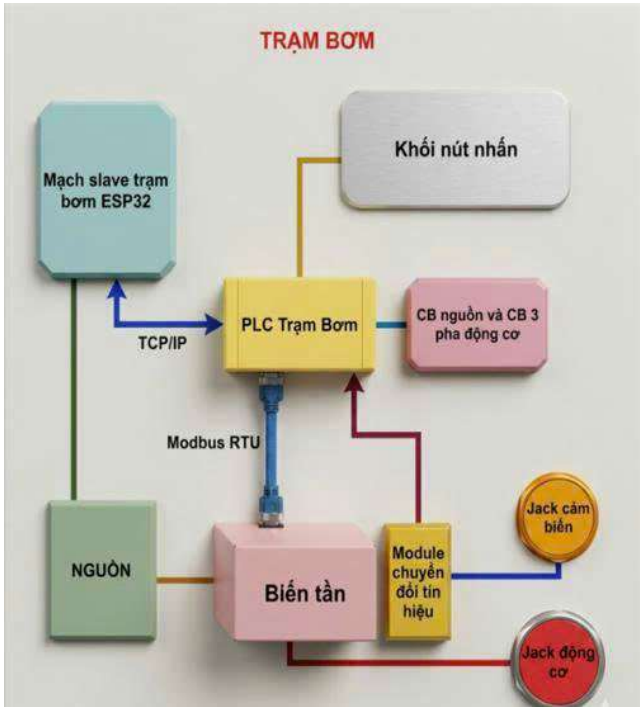
$$\mathbf{L = 2 + 48 + 50 + 50 + 48 + 2 = 200\ m}$$

3. Trạm bơm và thiết bị tại hiện trường



Hình 3. Hình ảnh thực tế hai trạm bơm và các thiết bị tại hiện trường.

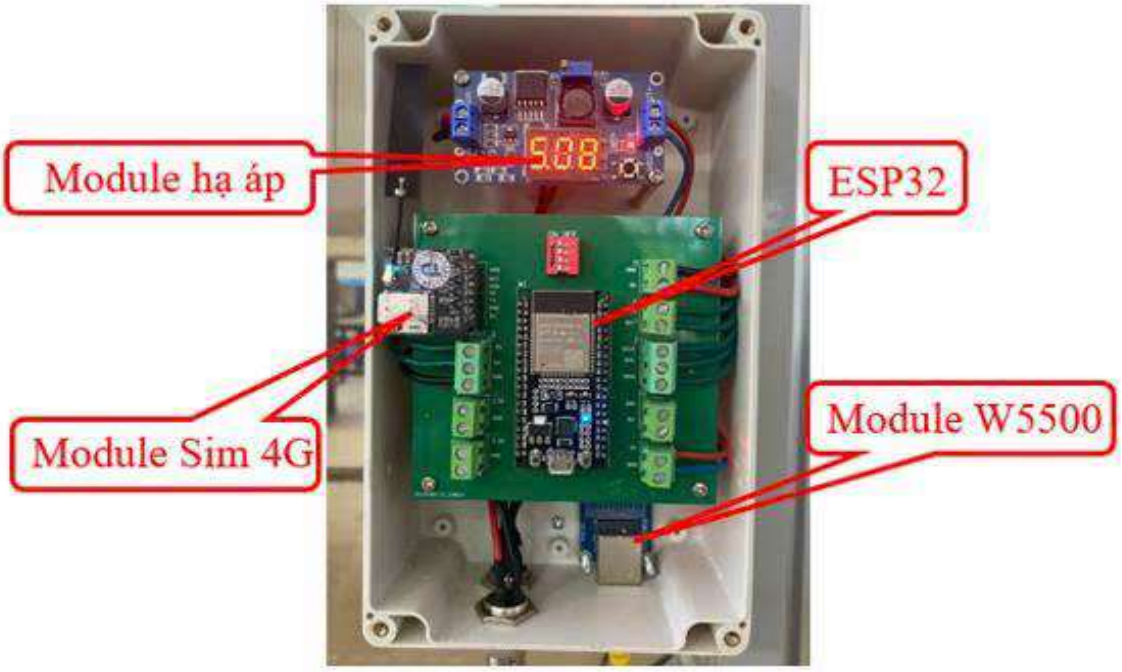
Hai trạm bơm được bố trí tại các đầu của tuyến, thực hiện tạo và duy trì dòng nước. Mỗi trạm có tủ điều khiển, PLC, biến tần, động cơ bơm, nút nhấn và các thiết bị đo.



Hình 4. Sơ đồ cấu trúc phần cứng tại một trạm bơm.

Tại trạm, PLC nhận tín hiệu từ nút nhấn và các thiết bị đo, đồng thời điều khiển biến tần và động cơ. Khối thu thập dữ liệu kết nối với PLC để đưa thông tin vận hành lên hệ thống trung tâm.

4. Khối thu thập dữ liệu tại trạm bơm



Hình 5. Khối thu thập dữ liệu sử dụng ESP32, module 4G và W5500.

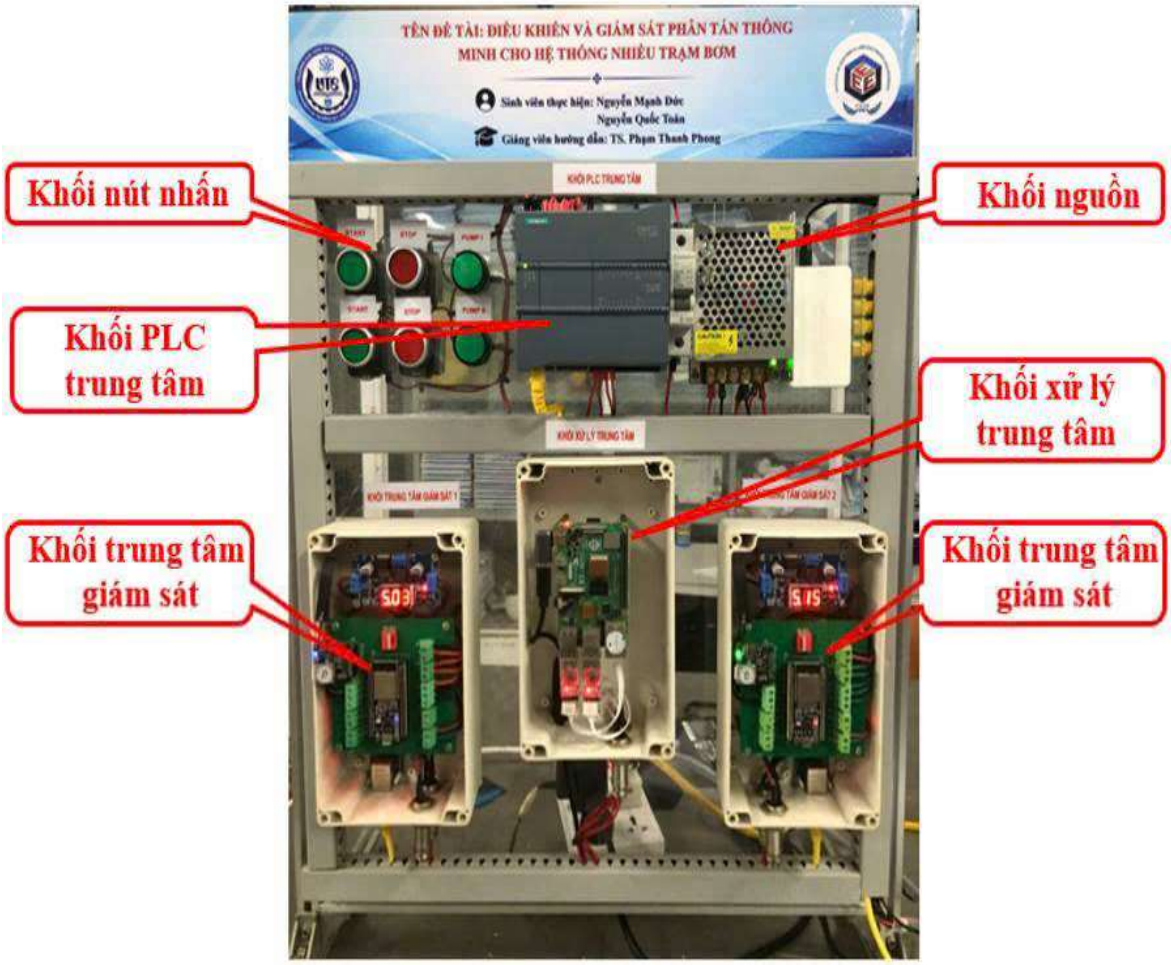
ESP32 thực hiện thu thập và xử lý sơ bộ dữ liệu. W5500 hỗ trợ giao tiếp Ethernet, còn module 4G cung cấp kênh truyền dữ liệu qua mạng di động. Khối này là điểm nối giữa thiết bị tại trạm và hệ thống trung tâm.

Các tín hiệu đo được đưa vào khối thu thập theo cấu hình của mô hình. Dữ liệu sau khi đóng gói được truyền về trung tâm để xử lý và hiển thị.

Thông số	Vị trí theo dõi	Khối tiếp nhận	Mục đích
Áp suất (H)	Các điểm đo H1, H2	PLC/ESP32	Theo dõi biến thiên áp suất trên tuyến
Lưu lượng (Q)	Các điểm đo Q1, Q2	PLC/ESP32	So sánh lưu lượng giữa các vị trí
Trạng thái bơm	Hai trạm bơm	PLC	Theo dõi và điều khiển chế độ vận hành

Dữ liệu vận hành	Các khối tại hiện trường	ESP32/Raspberry Pi	Thu thập, truyền, xử lý và lưu trữ

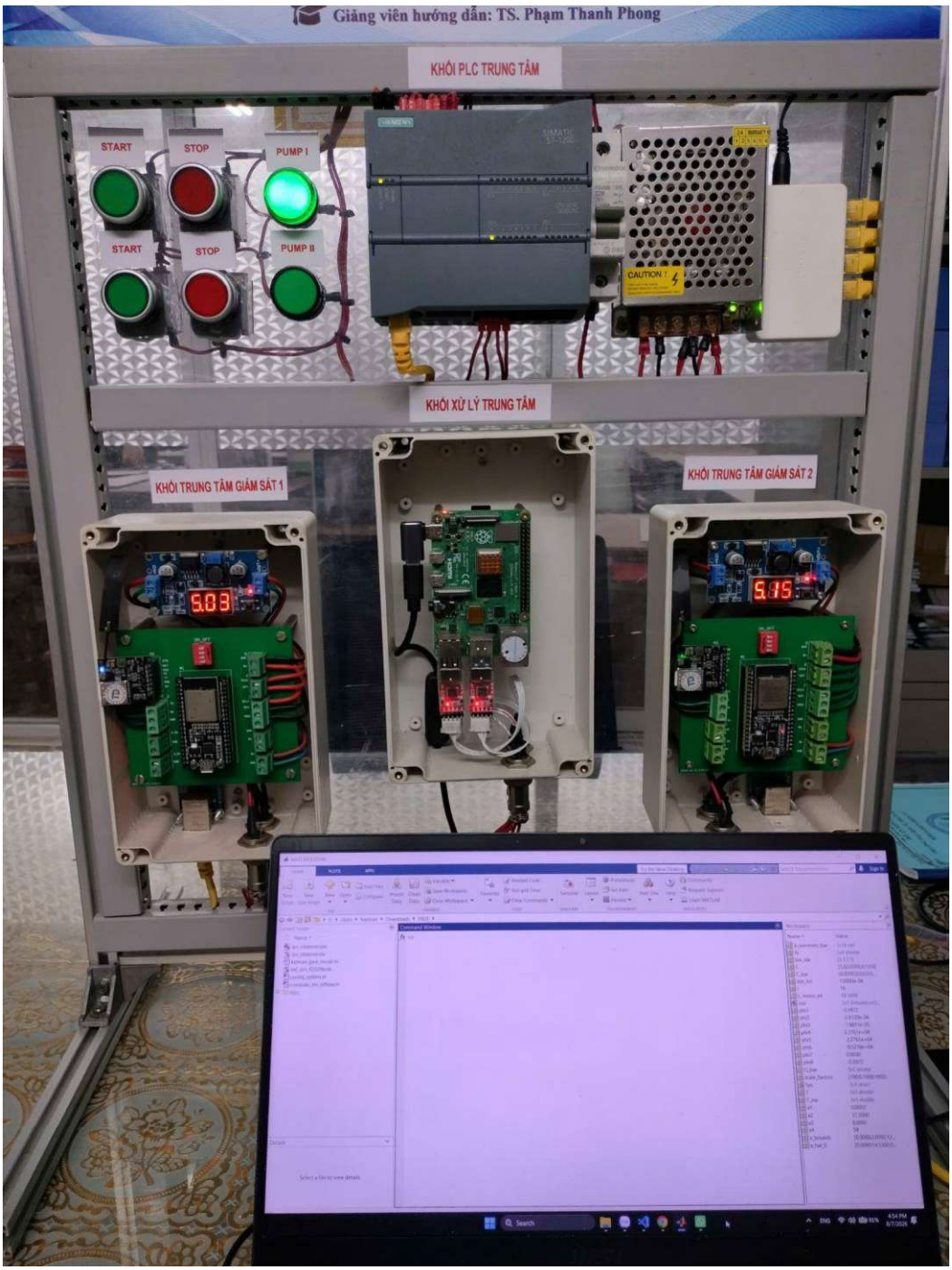
5. Trung tâm điều khiển



Hình 6. Tủ điều khiển trung tâm và các khối chức năng.

Trung tâm điều khiển tập trung nguồn cấp, PLC trung tâm, khối xử lý và các khối giám sát. Tủ được bố trí theo từng nhóm chức năng nhằm thuận lợi cho đấu nối, kiểm tra và vận hành.

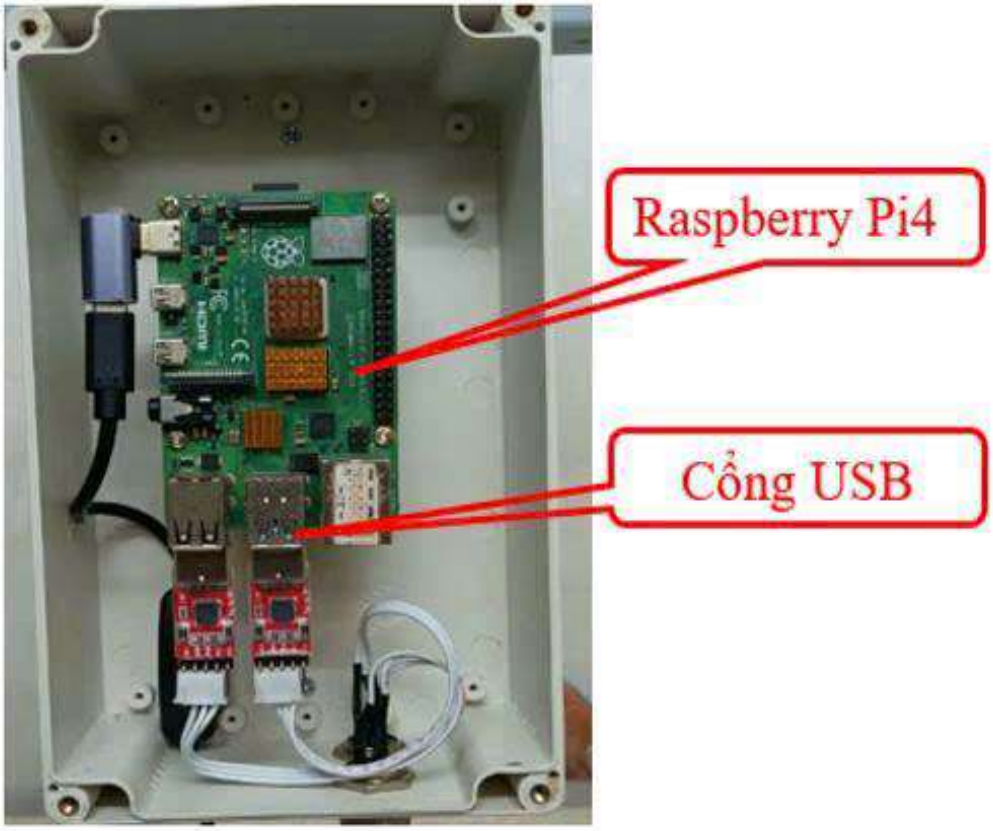
PLC trung tâm giữ vai trò điều khiển và phối hợp trạng thái của hệ thống; Raspberry Pi đảm nhiệm các tác vụ xử lý và lưu trữ dữ liệu ở cấp trung tâm. SCADA là lớp giao diện phục vụ quan sát, vận hành và thực hành.



Hình 7. Hình ảnh thực tế tủ PLC trung tâm và các khối xử lý, giám sát.

PLC Siemens S7-1200 thực hiện chức năng điều khiển và trao đổi dữ liệu với các khối giám sát. Từ trung tâm, người vận hành có thể nhận trạng thái của các trạm và đưa lệnh điều khiển phù hợp.

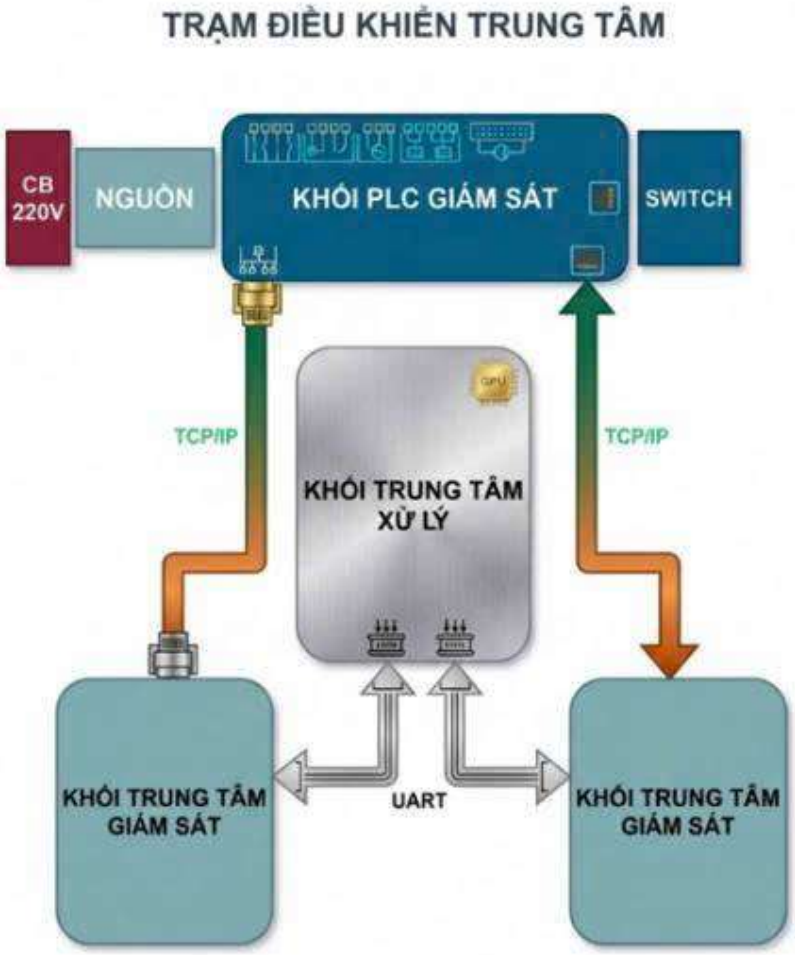
6. Khối xử lý trung tâm



Hình 8. Raspberry Pi 4 sử dụng trong khối xử lý trung tâm.

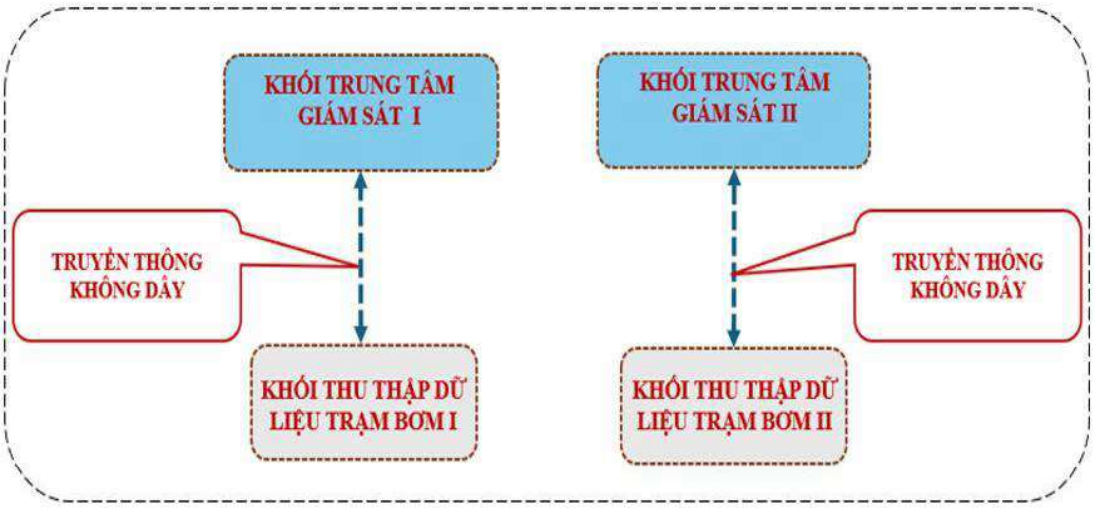
Raspberry Pi 4 đảm nhiệm các tác vụ xử lý dữ liệu ở cấp trung tâm. Thiết bị có thể tiếp nhận dữ liệu từ các khối giám sát, thực hiện xử lý, lưu trữ hoặc cung cấp dữ liệu cho các chức năng phân tích.

7. Kết nối truyền thông từ trạm bơm đến trung tâm



Hình 9. Sơ đồ kết nối giữa PLC trung tâm, khối xử lý và các khối giám sát.

Các khối giám sát trao đổi dữ liệu với PLC trung tâm và khối xử lý. TCP/IP được sử dụng cho các kết nối mạng, trong khi UART phục vụ trao đổi dữ liệu giữa các khối xử lý theo cấu trúc của mô hình.



Hình 10. Sơ đồ truyền thông không dây giữa khối giám sát và khối thu thập.

Tại các trạm ngoài trời, dữ liệu được truyền từ khối thu thập đến khối giám sát thông qua kênh truyền không dây. Cấu trúc này phù hợp với các điểm đo phân tán và giảm nhu cầu triển khai đường dây tín hiệu dài.

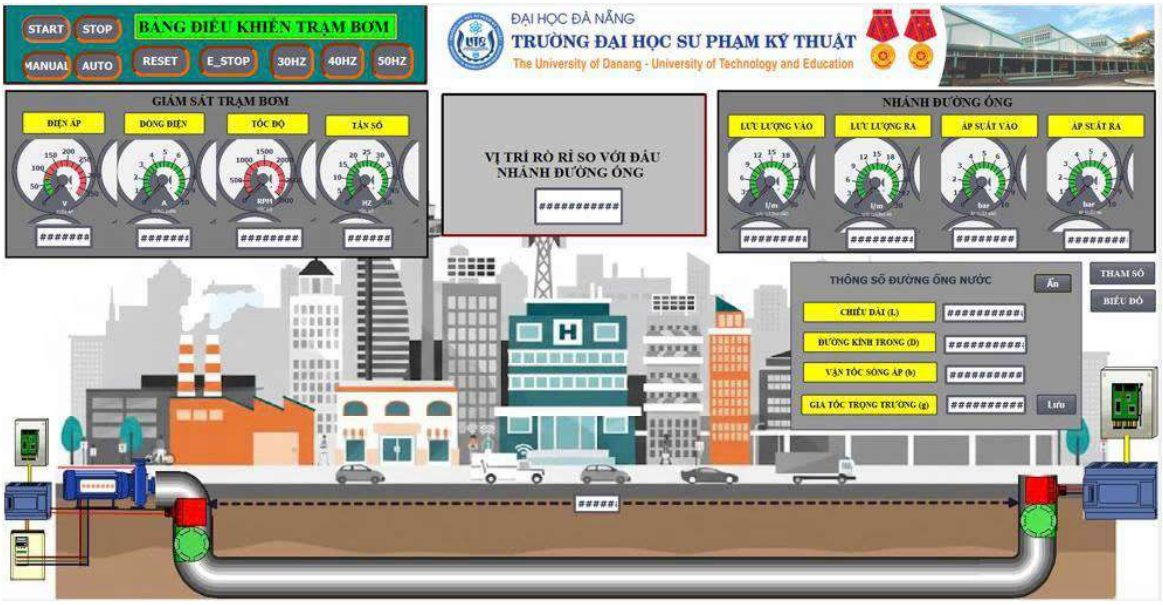
8. Luồng dữ liệu và nguyên lý hoạt động

Khi hệ thống vận hành, bơm tạo dòng nước qua tuyến ống. Cảm biến thu nhận các thông số cần giám sát và đưa tín hiệu về PLC hoặc khối thu thập ESP32. Dữ liệu được xử lý sơ bộ, đóng gói và truyền về trung tâm.

Tại trung tâm, PLC thực hiện điều khiển và phối hợp trạng thái thiết bị; Raspberry Pi tiếp nhận dữ liệu để xử lý hoặc lưu trữ. Kết quả được đưa lên giao diện giám sát. Khi điều kiện vận hành thay đổi hoặc xuất hiện rò rỉ, sự thay đổi của áp suất và lưu lượng giữa các vị trí đo được dùng để đánh giá trạng thái tuyến.

Cảm biến → PLC/ESP32 → Truyền thông → Trung tâm xử lý → SCADA

9. Giao diện giám sát và điều khiển



Hình 11. Giao diện giám sát và điều khiển hệ thống.

Giao diện giám sát tập trung các chức năng điều khiển bơm, lựa chọn chế độ vận hành và theo dõi các thông số của hệ thống. Người vận hành có thể quan sát trạng thái thiết bị và các đại lượng trên tuyến từ một giao diện thống nhất.

Giao diện là lớp cuối của chuỗi dữ liệu, giúp chuyển các thông tin kỹ thuật thành dạng trực quan để phục vụ vận hành, thí nghiệm và đào tạo.

10. Cấu trúc kết nối tổng thể

Sơ đồ tổng thể thể hiện quan hệ giữa hai trạm bơm, các khối thu thập dữ liệu, khối giám sát, PLC trung tâm và khối xử lý. Đây là cấu trúc tích hợp cuối cùng của hệ thống.

Theo chiều truyền dữ liệu, cấu trúc được mô tả: trạm bơm → PLC/khối thu thập → truyền thông → khối giám sát → PLC trung tâm/khối xử lý → giao diện SCADA.

11. Phục vụ giảng dạy và đào tạo STEM

Cấu trúc trên cho phép xây dựng các bài thực hành liên kết giữa thiết bị vật lý và công nghệ số.

- Đo áp suất, lưu lượng và kiểm tra tín hiệu cảm biến.
- Lập trình PLC và điều khiển bơm – biến tần.
- Lập trình ESP32 và thu thập dữ liệu.
- Thực hành TCP/IP, UART, Modbus RTU và truyền dữ liệu 4G.
- Xử lý dữ liệu trên Raspberry Pi.
- Thiết kế và vận hành giao diện SCADA.
- Tạo điều kiện bất thường trên tuyến và phân tích dữ liệu.

12. Đánh giá cấu trúc hệ thống

Cấu trúc được tổ chức theo một chuỗi thống nhất từ hiện trường đến trung tâm: trạm bơm và tuyến ống → cảm biến → PLC/ESP32 → truyền thông → PLC trung tâm và Raspberry Pi → SCADA. Cách sắp xếp này giúp người đọc theo dõi rõ đường đi của dữ liệu và chức năng của từng khối.

Các hình ảnh chỉ được sử dụng tại những mục có nội dung tương ứng. Những nội dung không có ảnh riêng phù hợp được trình bày bằng mô tả kỹ thuật, không sử dụng ảnh khác chức năng để thay thế.

13. Kết luận

Mô hình có cấu trúc phân cấp, trong đó trạm bơm và tuyến ống là đối tượng thực nghiệm; khối thu thập thực hiện nhận dữ liệu tại hiện trường; PLC đảm nhiệm điều khiển; các kênh truyền thông đưa dữ liệu về trung tâm; Raspberry Pi hỗ trợ xử lý; SCADA thực hiện giám sát và điều khiển.

Cấu trúc này phù hợp với mục tiêu xây dựng mô hình giám sát thông số rò rỉ của hệ thống nước ngoài trời, đồng thời tạo nền tảng cho các nội dung thực hành và đào tạo STEM trong lĩnh vực tự động hóa.

Minh chứng 02:

HỆ THỐNG CÁC BÀI GIẢNG THEO ĐỊNH HƯỚNG ĐÀO TẠO STEM PHỤC VỤ CHO VIỆC HƯỚNG DẪN SINH VIÊN

BÀI GIẢNG 1

TỔNG QUAN HỆ THỐNG ĐƯỜNG ỐNG NƯỚC VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP CHẨN ĐOÁN RÒ RỈ.

Đà Nẵng – 9/2026

MỤC LỤC

THÔNG TIN BÀI GIẢNG....3
VỊ TRÍ CỦA BG1 TRONG CHUỖI BÀI GIẢNG....3
MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA....5
PHẦN A — HIỆN TƯỢNG, CƠ SỞ THUỶ LỰC VÀ GIỚI HẠN PHÁT HIỆN....7
1. Vấn đề rò rỉ trong hệ thống đường ống nước....7
1.1. Ba nhiệm vụ khác nhau, đừng gộp làm một....7
2. Các đại lượng đặc trưng của tuyến ống....7
3. Cơ sở thuỷ lực tối thiểu....9
3.1. Cân bằng khối lượng....9
3.2. Phương trình lỗ rò....9
3.3. Tổn thất ma sát dọc tuyến....9
4. Ngân sách sai số và ngưỡng phát hiện....10
4.1. Sai số của phép đo chênh lệch....10
4.2. Kết quả tính cho mô hình T2025-06-01....11
4.3. Ba nguồn sai số khác thường bị bỏ quên....12
4.4. Đồng bộ thời gian giữa hai trạm đo....12
5. Kiểm chứng bậc độ lớn — một thói quen bắt buộc....13
5.1. Suy ngược thông số hình học....14
5.2. Đối chiếu hệ số ma sát....14
PHẦN B — KIẾN TRÚC HỆ THỐNG VÀ LỰA CHỌN PHƯƠNG PHÁP....16
6. Phân loại các phương pháp chẩn đoán....16
6.1. Cách chọn nhóm phương pháp....17
7. Cấu trúc hệ thống giám sát đường ống....17
7.1. Nguyên tắc phân tách chức năng....18
7.2. Đặc tả giao diện giữa các khối....19
8. Điều kiện lắp đặt ngoài trời và an toàn....20
9. Biểu hiện của rò rỉ trên dữ liệu....21
9.1. Vì sao không dùng một ngưỡng cố định....22
9.2. Ba trạng thái đầu ra phải phân biệt....22
10. Hệ thống SCADA và quản lý dữ liệu....22
11. Nghiên cứu trường hợp T2025-06-01....23
11.1. Vì sao phải ghi sai số có dấu....24
11.2. Vì sao vùng biên khó và vì sao 198 m ngoài miền....24
12. Lỗi thường gặp khi thiết kế hệ giám sát....25
13. Hoạt động STEM trên lớp....26

13.1. Phản biện chéo.....27
14. Câu hỏi ôn tập và bài tập.....27
14.1. Câu hỏi kiểm tra nhanh trong giờ.....27
14.2. Bài tập.....27
15. Đánh giá sản phẩm học tập.....28
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....30

THÔNG TIN BÀI GIẢNG

Mục	Nội dung
Đối tượng	Sinh viên ngành Công nghệ kỹ thuật điều khiển và tự động hoá và các ngành gần
Thời lượng đề xuất	06 tiết, chia hai phần: • Phần A (03 tiết): hiện tượng, cơ sở thuỷ lực tối thiểu và giới hạn phát hiện • Phần B (03 tiết): kiến trúc hệ thống, phân loại phương pháp và hoạt động STEM
Kiến thức tiên quyết	Đo lường và cảm biến; điều khiển cơ bản; đọc sơ đồ công nghệ. Không yêu cầu kiến thức về không gian trạng thái
Sản phẩm học tập	Sơ đồ chức năng hệ thống; bảng ngân sách sai số có số liệu; bảng so sánh phương pháp chẩn đoán; đề xuất giải pháp giám sát kèm biện luận
Phương pháp	Thuyết trình có minh hoạ, tính toán bậc độ lớn tại lớp, phân tích tình huống, làm việc nhóm và trình bày kỹ thuật
Vị trí trong chuỗi	Bài mở đầu. Cung cấp ngôn ngữ và bối cảnh cho BG2, BG3 và BG4 — xem Bảng 2

Bảng 1. Điều kiện tiên quyết và sản phẩm của bài giảng.

VỊ TRÍ CỦA BG1 TRONG CHUỖI BÀI GIẢNG

BG1 là bài mở đầu, nên nhiệm vụ chính của nó là thiết lập ngôn ngữ chung: ký hiệu, đơn vị, cách gọi tên ba nhiệm vụ chẩn đoán và cách phân biệt trạng thái đầu ra. Nếu ba thứ này không được chốt ngay từ BG1, các bài sau sẽ phải định nghĩa lại và sinh viên sẽ mang lẫn quy ước giữa các bài.

Bài	Câu hỏi trung tâm	BG1 chuẩn bị gì
BG1	Hiện tượng rò là gì, đo được gì, và phương pháp nào phù hợp?	—

Bài	Câu hỏi trung tâm	BG1 chuẩn bị gì
BG2	Mô hình thuỷ lực của tuyến ống được xây dựng thế nào?	Ký hiệu H_1, H_2, H_3, Q_1, Q_2, $z\ell$, $\lambda\ell$ và phương trình lỗ rò (Mục 3)
BG3	Thiết kế bộ quan sát ra sao và điều kiện gì bảo đảm hội tụ?	Khái niệm phần dư, miền làm việc, ba trạng thái đầu ra (Mục 5, 9)
BG4	Dựng và chạy mô hình trên MATLAB/Simulink thế nào?	Bộ kịch bản năm vị trí, chỉ tiêu sai số có dấu (Mục 9)

Bảng 2. Bản đồ chuỗi bài giảng của đề tài T2025-06-01.

MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA

Sau bài học, sinh viên giải thích được các đại lượng thuỷ lực dùng trong giám sát đường ống; phân biệt được phát hiện rò, định vị rò và ước lượng mức độ rò; mô tả được kiến trúc đo – truyền – xử lý – giám sát của mô hình T2025-06-01; và lựa chọn được nhóm phương pháp chẩn đoán phù hợp với một yêu cầu kỹ thuật cụ thể.

Chuẩn đầu ra	Phát biểu	Mức Bloom
CLO1	Nhận dạng đúng H_1, H_3, Q_1, Q_2 và giải thích được sự thay đổi của chúng khi xuất hiện rò	Hiểu
CLO2	Tính được ngưỡng phát hiện và kích thước rò nhỏ nhất phát hiện được từ cấp chính xác cảm biến	Vận dụng
CLO3	Phân loại được năm nhóm phương pháp chẩn đoán và nêu được ưu, nhược điểm của từng nhóm	Hiểu
CLO4	Vẽ được luồng tín hiệu từ cảm biến đến PLC trung tâm, Raspberry Pi và SCADA, kèm đặc tả giao diện	Vận dụng
CLO5	Đề xuất được phương án giám sát có căn cứ về cảm biến, truyền thông, thuật toán và an toàn	Đánh giá

Bảng 3. Chuẩn đầu ra của bài giảng.

CLO	Mục nội dung	Hoạt động học	Công cụ đánh giá	Tỷ trọng
CLO1	1, 2, 3	Đọc sơ đồ, lập bảng biến và đơn vị	Chấm bảng biến và giải thích hiện tượng	15%
CLO2	4, 5	Tính ngân sách sai số tại lớp	Bảng tính ngưỡng kèm biện luận	25%
CLO3	6	So sánh nhóm phương pháp theo tiêu chí	Bảng so sánh có lập luận	20%

CLO	Mục nội dung	Hoạt động học	Công cụ đánh giá	Tỷ trọng
CLO4	7, 8, 11	Vẽ sơ đồ chức năng và bảng đặc tả giao diện	Sơ đồ và bảng tag	25%
CLO5	10, 12, 13	Đề xuất phương án và phản biện chéo	Báo cáo nhóm và phần trả lời phản biện	15%

Bảng 4. Ma trận chuẩn đầu ra – nội dung – hoạt động – đánh giá.

PHẦN A — HIỆN TƯỢNG, CƠ SỞ THUỶ LỰC VÀ GIỚI HẠN PHÁT HIỆN

1. Vấn đề rò rỉ trong hệ thống đường ống nước

Rò rỉ làm thay đổi cân bằng lưu lượng và phân bố cột áp trên tuyến ống. Trong mạng cấp nước thực tế, sự cố có thể xuất phát từ lão hoá vật liệu, mối nối, tải trọng bên ngoài, biến động áp lực hoặc sai sót thi công. Mức độ ảnh hưởng phụ thuộc vị trí, kích thước lỗ rò, áp suất tại điểm rò và điều kiện vận hành.

1.1. Ba nhiệm vụ khác nhau, đừng gộp làm một

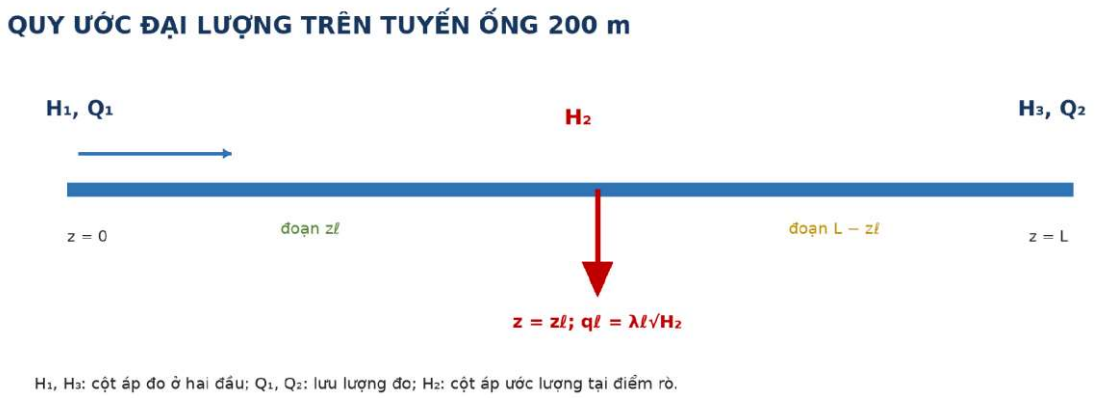
Đây là phân biệt quan trọng nhất của cả bài, và là thứ sinh viên hay nhầm nhất. Ba nhiệm vụ dưới đây có yêu cầu về tín hiệu, về mô hình và về độ chính xác hoàn toàn khác nhau.

Nhiệm vụ	Câu hỏi trả lời	Yêu cầu tối thiểu	Trong mô hình T2025-06-01
Phát hiện (detection)	Có bất thường hay không?	Hai kênh lưu lượng và một mức nền thống kê	Chênh lệch $Q_1 - Q_2$ so với ngưỡng (Mục 4)
Định vị (localisation)	Bất thường xảy ra ở đâu?	Thêm mô hình thuỷ lực, hoặc cảm biến dọc tuyến, hoặc tín hiệu quá độ	Bộ quan sát LPV ước lượng $\hat{z}\ell$ (BG3)
Ước lượng mức độ (quantification)	Thất thoát bao nhiêu?	Thêm mô hình lỗ rò và ước lượng hệ số $\lambda\ell$	Trạng thái $\chi\ell$ của bộ quan sát (BG3)

Bảng 5. Ba nhiệm vụ chẩn đoán và yêu cầu tương ứng.

Một hệ thống chỉ so sánh $Q_1 - Q_2$ hỗ trợ được nhiệm vụ thứ nhất nhưng về nguyên tắc không thể làm nhiệm vụ thứ hai: chênh lệch lưu lượng là một con số duy nhất, và một con số không chứa đủ thông tin để xác định vị trí trên một đoạn liên tục. Muốn định vị, phải đưa thêm thông tin vào — bằng mô hình, bằng cảm biến bổ sung, hoặc bằng cách khai thác động học quá độ.

2. Các đại lượng đặc trưng của tuyến ống



Hình 1. Quy ước đại lượng trên tuyến ống có một điểm rò.

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị SI	Nguồn	Dải điển hình
H_1	Cột áp đầu tuyến	m	Quy đổi từ cảm biến áp suất đầu	25 – 35
H_2	Cột áp tại điểm rò	m	Trạng thái ước lượng — không đo được	10 – 30
H_3	Cột áp cuối tuyến	m	Quy đổi từ cảm biến áp suất cuối	8 – 16
Q_1	Lưu lượng đầu tuyến	m^3/s	Cảm biến lưu lượng đầu	0,010 – 0,030
Q_2	Lưu lượng cuối tuyến	m^3/s	Cảm biến lưu lượng cuối	0,010 – 0,030
$z\ell$	Khoảng cách từ đầu tuyến đến điểm rò	m	Giá trị cần chẩn đoán	$0 < z\ell < L$
$\lambda\ell$	Hệ số lưu lượng của lỗ rò	$m^{5/2}/s$	Giá trị cần ước lượng	≥ 0
L	Chiều dài tuyến	m	Thông số hình học	200
D	Đường kính trong	m	Thông số hình học	≈ 0,079 (DN80)

Bảng 6. Biến, đơn vị, nguồn và dải giá trị. Hai cột cuối được bổ sung so với bản trước.

Ở trạng thái xác lập và không rò, Q_1 và Q_2 gần nhau sau khi đã xét sai số cảm biến và lượng nước tích lũy trong ống. Khi mở nhánh rò, hiệu $Q_1 - Q_2$ tăng và cột áp thay đổi theo vị trí. Hai tín hiệu lưu lượng cho thông tin về mức mất cân bằng; hai tín hiệu áp suất cho thông tin về phân bố năng lượng trên tuyến. Chữ "gần nhau" trong câu đầu đoạn này là chỗ Mục 4 sẽ định lượng.

3. Cơ sở thuỷ lực tối thiểu

3.1. Cân bằng khối lượng

Với chất lỏng không nén được, hiệu lưu lượng vào và ra bằng lưu lượng rò cộng với tốc độ thay đổi thể tích nước tích lũy trong đoạn ống:

$$Q_1 - Q_2 = q_\ell + \frac{dV}{dt} \tag{1.1}$$

Số hạng dV/dt thường bị bỏ qua, và bỏ qua được ở trạng thái xác lập. Nhưng chính nó giải thích vì sao ngay khi không có rò, chênh lệch $Q_1 - Q_2$ vẫn khác không trong quá trình quá độ — khi bơm khởi động, khi van đóng mở, khi áp suất đang thay đổi. Mục 4.3 sẽ cho thấy đây là nguồn cảnh báo giả lớn nhất.

3.2. Phương trình lỗ rò

Lưu lượng qua một lỗ trên thành ống tuân theo phương trình Torricelli có hiệu chỉnh, với Cd là hệ số lưu lượng của lỗ (khoảng 0,6 – 0,65 cho lỗ tròn mép sắc) và $A\ell$ là diện tích lỗ:

$$q_\ell = C_d\, A_\ell \sqrt{2gH_2} \;=\; \lambda_\ell \sqrt{H_2}\,, \qquad \lambda_\ell = C_d A_\ell \sqrt{2g} \tag{1.2}$$

Đây chính là nguồn gốc của công thức trên Hình 1, và cũng cho ngay đơn vị của $\lambda\ell$: vì $q\ell$ tính bằng m^3/s và $\sqrt{H_2}$ bằng $m^{1/2}$, nên $\lambda\ell$ có đơn vị $m^{5/2}/s$. Hai hệ quả cần nhấn mạnh với sinh viên:

- $\lambda\ell$ gộp cả kích thước lỗ lẫn hệ số lưu lượng, nên biết $\lambda\ell$ chưa suy ra ngay được đường kính lỗ nếu không giả định Cd. Ngược lại, giả định Cd = 0,62 cho phép quy đổi $\lambda\ell$ thành đường kính tương đương — cách quy đổi này được dùng ở Mục 4.
- Lưu lượng rò tỉ lệ với căn bậc hai của cột áp, không tỉ lệ tuyến tính. Vì vậy hạ áp lực vận hành là một biện pháp giảm thất thoát thực sự có hiệu lực, và đây là nội dung đáng nêu khi thảo luận giải pháp ở Mục 12.

3.3. Tổn thất ma sát dọc tuyến

Tổn thất cột áp do ma sát trên đoạn ống thẳng tính theo công thức Darcy–Weisbach:

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g}, \qquad v = \frac{Q}{A}, \qquad \mathrm{Re} = \frac{vD}{\nu} \tag{1.3}$$

Công thức này cần cho BG1 vì hai lý do. Thứ nhất, nó cho biết chênh lệch $H_1 - H_3$ ở trạng thái không rò phải bằng bao nhiêu, tức là mức nền để so sánh. Thứ hai, nó cho phép kiểm tra bậc độ lớn của bộ tham số nhận dạng ở BG4 — nội dung của Mục 5.

Q (L/min)	v (m/s)	Re	f (Blasius)	h_f trên 200 m (m)
60	0,20	$1,6\times10^4$	0,0280	0,15
120	0,41	$3,2\times10^4$	0,0236	0,51
300	1,02	$8,1\times10^4$	0,0188	2,52
600	2,04	$1,6\times10^5$	0,0158	8,47
1200	4,08	$3,2\times10^5$	0,0133	28,49

Bảng 7. Tổn thất ma sát tính cho ống DN80, L = 200 m, nước ở 20 °C.

Bảng này là công cụ chẩn đoán rất nhanh khi lắp đặt: đo $H_1 - H_3$ ở trạng thái không rò rồi đối chiếu. Nếu số đo lệch xa cột cuối cùng, hoặc cảm biến sai, hoặc lưu lượng thực khác giả định, hoặc trong tuyến có vật cản. Phát hiện điều đó lúc lắp đặt rẻ hơn nhiều so với phát hiện sau khi đã chạy thuật toán vài tuần.

4. Ngân sách sai số và ngưỡng phát hiện

Trước khi xác định ngưỡng, cần khảo sát sai lệch cảm biến, nhiễu đo và biến thiên tự nhiên của quá trình.”

4.1. Sai số của phép đo chênh lệch

Hai cảm biến lưu lượng độc lập, cùng cấp chính xác α, đo quanh điểm làm việc Q_0. Sai số của mỗi kênh là $\sigma_Q \approx \alpha Q_0$. Sai số của hiệu hai kênh cộng theo phương căn bậc hai của tổng bình phương:

$$\sigma_{\Delta Q} = \sqrt{\sigma_{Q_1}^2 + \sigma_{Q_2}^2} = \sqrt{2}\,\sigma_Q \quad \text{(hai kenh doc lap, cung cap chinh xac)} \tag{1.4}$$

Điểm phải nhấn mạnh: phép trừ hai số đo KHÔNG làm sai số triệt tiêu, mà làm sai số tăng lên √2 lần. Đây là trực giác ngược mà sinh viên thường sai. Đặt ngưỡng theo quy tắc ba độ lệch chuẩn:

$$\Delta Q_{th} = \kappa\,\sigma_{\Delta Q} = 3\sqrt{2}\,\alpha\,Q_0 \tag{1.5}$$

Quy đổi ngưỡng lưu lượng thành đường kính lỗ rò tương đương bằng cách kết hợp với (1.2):

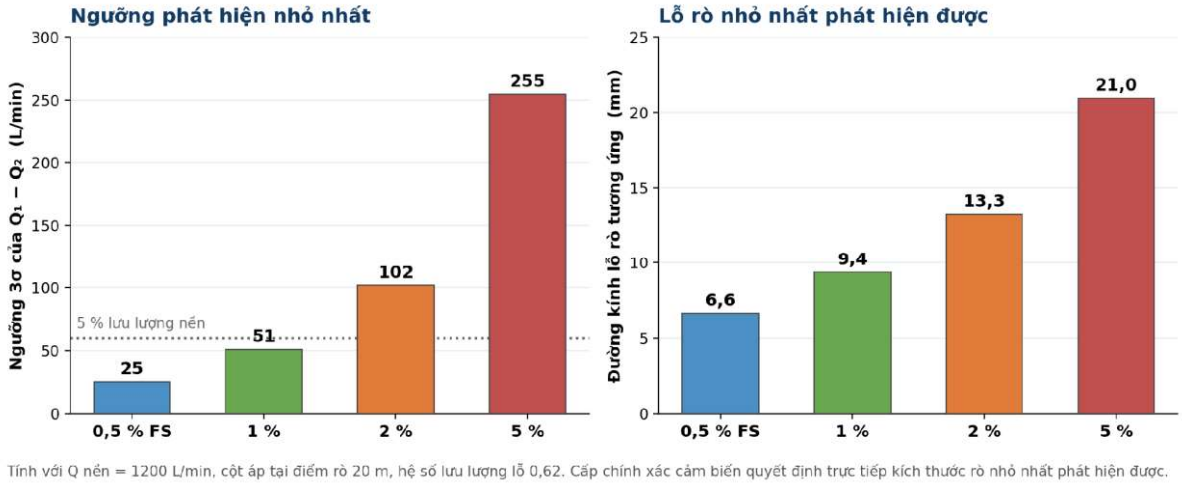
$$d_{\min} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\Delta Q_{th}}{C_d \sqrt{2gH_2}}} \tag{1.6}$$

4.2. Kết quả tính cho mô hình T2025-06-01

Với lưu lượng nền Q_0 = 1200 L/min, cột áp tại điểm rò 20 m và Cd = 0,62:

Cấp chính xác cảm biến	σ_Q (L/min)	σ_ΔQ (L/min)	Ngưỡng 3σ (L/min)	Tỷ lệ so Q_0	Đường kính lỗ (mm)
0,5 % (cấp cao, điện từ)	6,0	8,5	25,5	2,1 %	6,6
1 % (điện từ phổ thông)	12,0	17,0	50,9	4,2 %	9,4
2 % (tua-bin, siêu âm kẹp)	24,0	33,9	101,8	8,5 %	13,3
5 % (cảm biến giá rẻ)	60,0	84,9	254,6	21,2 %	21,0

Bảng 8. Ngân sách sai số và ngưỡng phát hiện theo cấp chính xác cảm biến.



Hình 2. Cấp chính xác cảm biến quyết định trực tiếp kích thước rò nhỏ nhất phát hiện được.

Kết luận rút ra từ Bảng 8 rất mạnh và cần nói thẳng với sinh viên: với cảm biến 2 %, hệ thống chỉ phát hiện được rò tương đương lỗ đường kính 13 mm trở lên. Một lỗ 5 mm nằm hoàn toàn dưới nhiễu đo và sẽ không bao giờ được phát hiện bằng cân bằng

lưu lượng, dù thuật toán tinh vi đến đâu. Không có thuật toán nào bù được thông tin mà cảm biến không cung cấp.

Hệ quả thực tiễn: khi thiết kế hệ giám sát, câu hỏi "muốn phát hiện rò nhỏ đến mức nào" phải được đặt TRƯỚC câu hỏi "dùng thuật toán gì". Nếu yêu cầu là phát hiện rò 5 mm, phải hoặc nâng cấp cảm biến, hoặc chuyển sang nhóm phương pháp âm học vốn nhạy với rò nhỏ, hoặc chấp nhận thời gian tích luỹ dài để giảm nhiễu ngẫu nhiên bằng trung bình hoá.

4.3. Ba nguồn sai số khác thường bị bỏ quên

Cấp chính xác cảm biến mới là một phần của ngân sách. Ba nguồn dưới đây trong nhiều trường hợp còn lớn hơn.

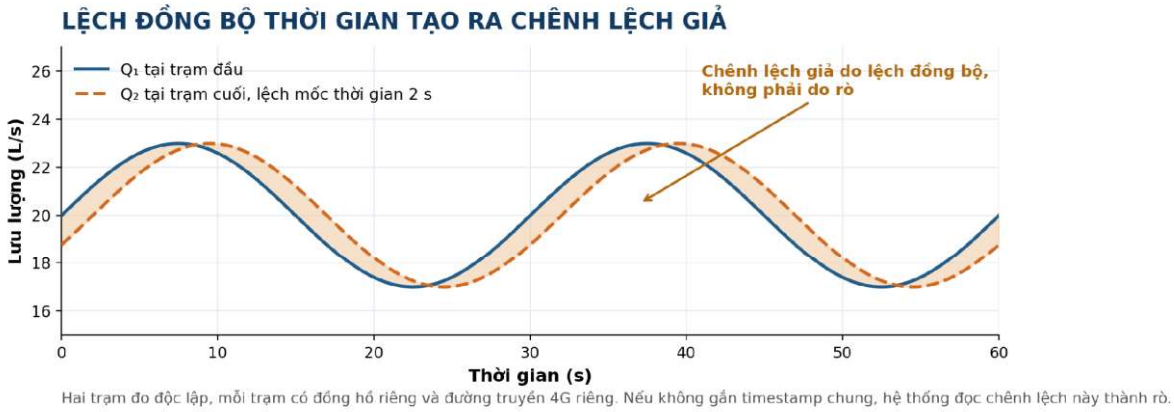
Nguồn	Cơ chế	Cách xử lý
Nước tích luỹ trong ống	Số hạng dV/dt trong (1.1): khi áp suất tăng, nước bị nén và ống giãn, $Q_1 > Q_2$ dù không rò	Chỉ đánh giá ngưỡng ở trạng thái tựa dừng; khoá cảnh báo trong quá độ bơm và van
Lệch đồng bộ thời gian	Hai trạm đo có đồng hồ riêng và đường truyền riêng — xem Mục 4.4	Gắn timestamp chung; đồng bộ NTP hoặc dùng mốc thời gian của trạm trung tâm
Trôi điểm không của cảm biến	Sai lệch hệ thống tích luỹ theo thời gian và nhiệt độ, không giảm được bằng trung bình hoá	Hiệu chuẩn định kỳ; theo dõi mức nền $Q_1 - Q_2$ ở trạng thái không rò như một chỉ số sức khoẻ

Bảng 9. Các nguồn sai số ngoài cấp chính xác cảm biến.

4.4. Đồng bộ thời gian giữa hai trạm đo

Đây là vấn đề kỹ thuật lớn nhất mà bản trước không hề nhắc tới, dù kiến trúc hệ thống đã dùng hai trạm độc lập truyền qua 4G. Hai trạm đo ở hai đầu tuyến 200 m, mỗi trạm có bộ xử lý riêng, đồng hồ riêng và đường truyền 4G riêng với độ trễ biến thiên. Nếu hai mẫu Q_1 và Q_2 được ghép thành một cặp mà không thực sự cùng thời điểm, hiệu của chúng chứa một thành phần giả:

$$\varepsilon_{sync} = \left| \frac{dQ}{dt} \right| \cdot \Delta t_{sync} \tag{1.7}$$



Hình 3. Lệch mốc thời gian giữa hai trạm tạo ra chênh lệch giả không phân biệt được với rò.

Tình huống	Tốc độ biến thiên của Q	Lệch 1 s	Lệch 2 s
Vận hành ổn định, dao động chậm	3,8 L/min mỗi giây	3,8 L/min	7,5 L/min
Van điều tiết thay đổi	≈ 40 L/min mỗi giây	40 L/min	80 L/min
Bơm khởi động (0 → 1200 L/min trong 3 s)	400 L/min mỗi giây	400 L/min	800 L/min

Bảng 10. Chênh lệch giả sinh ra do lệch đồng bộ, đối chiếu với ngưỡng ở Bảng 8.

Đọc Bảng 10 cùng Bảng 8: ở trạng thái ổn định, lệch 1 s tạo chênh lệch giả 3,8 L/min, nhỏ hơn ngưỡng 25,5 L/min của cảm biến tốt nhất — chấp nhận được. Nhưng khi bơm khởi động, lệch 1 s tạo chênh lệch giả 400 L/min, tức gấp mười sáu lần ngưỡng. Hệ thống sẽ báo rò rất lớn mỗi lần bơm khởi động. Đây chính là lý do kỹ thuật của quy tắc "khoá cảnh báo trong giai đoạn quá độ", và bây giờ quy tắc đó có con số kèm theo chứ không còn là lời dặn suông.

Yêu cầu tối thiểu cho hệ thống: mỗi bản tin phải mang timestamp gán tại trạm đo (không phải tại trung tâm), kèm sequence number; trung tâm ghép cặp theo timestamp chứ không theo thứ tự bản tin đến; và mẫu nào không tìm được cặp trong cửa sổ dung sai thì bị loại kèm cờ, không được ghép bừa.

5. Kiểm chứng bậc độ lớn — một thói quen bắt buộc

Mục này là mới và mang tính phương pháp. Nội dung: trước khi tin bất kỳ con số nào do thuật toán trả về, phải kiểm tra nó có hợp lý về mặt vật lý không. Bài tập dưới đây dùng chính bộ tham số nhận dạng của đề tài ở BG4, và cho một kết quả đáng lưu ý.

5.1. Suy ngược thông số hình học

Hệ số quán tính trong mô hình động của BG4 có dạng $a_1 = gA$. Từ giá trị nhận dạng $a_1 = 0{,}048002$ m³/s² suy ra tiết diện $A = 4{,}893\times10^{-3}$ m², tức đường kính $D \approx 78{,}9$ mm. Con số này khớp với ống DN80, nên phần này của mô hình nhất quán với cấu hình thí nghiệm. Đây là cách kiểm chứng rẻ nhất và nên làm đầu tiên.

5.2. Đối chiếu hệ số ma sát

Ở trạng thái xác lập, phương trình động lượng của BG4 cho quan hệ giữa hệ số ma sát gộp μ và tổn thất cột áp:

$$\mu = \frac{a_1\, h_f}{L\, Q^2} \qquad \text{(suy tu trang thai xac lap)} \tag{1.8}$$

Thay tổn thất Darcy–Weisbach ở Bảng 7 vào (1.8) được giá trị μ mà vật lý dự đoán, rồi so với giá trị nhận dạng:

Q (L/min)	h_f theo (1.3) (m)	μ suy ra theo (1.8) (m⁻³)	μ nhận dạng ở BG4 (m⁻³)
60	0,15	36,2	0,0044
120	0,51	30,4	0,0044
300	2,52	24,2	0,0044
600	8,47	20,3	0,0044
1200	28,49	17,1	0,0044

Bảng 11. Đối chiếu hệ số ma sát vật lý với giá trị nhận dạng.

Chênh lệch khoảng bốn nghìn lần, và không phải một chênh lệch nhỏ có thể quy cho sai số thí nghiệm. Ba khả năng cần kiểm tra, theo thứ tự dễ kiểm tra trước:

1. Đơn vị của lưu lượng khi nhận dạng: nếu dữ liệu vào bộ ước lượng còn ở L/min mà mô hình giả định m³/s, hệ số ma sát sẽ lệch đúng theo bình phương của hệ số quy đổi.
2. Định nghĩa số hạng ma sát: một số tài liệu viết số hạng này là $\mu Q|Q|$ còn số khác viết $(\mu/L)\cdot Q|Q|$ hoặc chuẩn hoá theo tiết diện. Khác nhau về quy ước làm khác nhau về bậc của μ.

3. Điểm làm việc thật: nếu lưu lượng vận hành thực nhỏ hơn nhiều so với 1200 L/min thì cả hai cột đều thay đổi, nhưng theo Bảng 11 chiều thay đổi của μ vật lý là tăng chứ không giảm, nên khả năng này không giải thích được chênh lệch.

Bài giảng không kết luận khả năng nào đúng, vì việc đó cần đối chiếu với dữ liệu gốc của đề tài. Điều bài giảng khẳng định là: một mô hình cho tổn thất ma sát 7 mm trên 200 m ống ở vận tốc 4 m/s là không tin được, và phải truy nguyên trước khi dùng kết quả định vị. Đây chính là bài tập số 5 ở Mục 13.

Thói quen cần hình thành: mọi tham số nhận dạng phải được quy về một đại lượng có thể so với thực tế — đường kính, vận tốc truyền sóng, tổn thất áp — trước khi đưa vào báo cáo. Đồ thị khớp đẹp không thay thế được kiểm chứng vật lý.

PHẦN B — KIẾN TRÚC HỆ THỐNG VÀ LỰA CHỌN PHƯƠNG PHÁP

6. Phân loại các phương pháp chẩn đoán



Hình 4. Năm nhóm phương pháp chẩn đoán rò rỉ.

Việc tách "cân bằng và ngưỡng" khỏi "dựa trên mô hình" là có căn cứ, không phải chia cho đủ số: nhóm thứ nhất không cần mô hình thuỷ lực nào, chỉ cần thống kê nền, nên triển khai được ngay nhưng không định vị được; nhóm thứ hai cần mô hình và nhờ đó định vị được. Đó là khác biệt về bản chất chứ không phải về mức độ.

Nhóm phương pháp	Tín hiệu / thiết bị	Ưu điểm	Hạn chế	Định vị?
Kiểm tra trực tiếp	Quan sát, camera, thiết bị khảo sát	Dễ giải thích; xác nhận được hiện trường	Tốn thời gian; khó áp dụng liên tục trên tuyến dài	Có, rất chính xác
Âm học và rung	Micro, cảm biến rung, tương quan tín hiệu	Nhạy với rò nhỏ, vượt giới hạn ở Bảng 8	Phụ thuộc nhiễu nền, vật liệu ống và vị trí cảm biến	Có, nếu đủ số cảm biến
Cân bằng và ngưỡng	Lưu lượng, áp suất, thống kê nền	Cấu trúc đơn giản; triển khai nhanh	Không định vị được; nhạy với thay đổi điểm làm việc	Không

Nhóm phương pháp	Tín hiệu / thiết bị	Ưu điểm	Hạn chế	Định vị?
Dựa trên mô hình	Mô hình thuỷ lực, Kalman, bộ quan sát	Ước lượng được trạng thái và vị trí; giải thích được kết quả	Phụ thuộc tham số, miền vận hành và chất lượng cảm biến	Có
Dựa trên dữ liệu	Dữ liệu lịch sử, SVM, học máy	Mô tả được quan hệ phức tạp không mô hình hoá được	Cần dữ liệu gắn nhãn; khó suy rộng ngoài tập huấn luyện	Có, nếu nhãn có vị trí

Bảng 12. So sánh năm nhóm phương pháp. Cột cuối được thêm để trả lời trực tiếp câu hỏi ở Bảng 5.

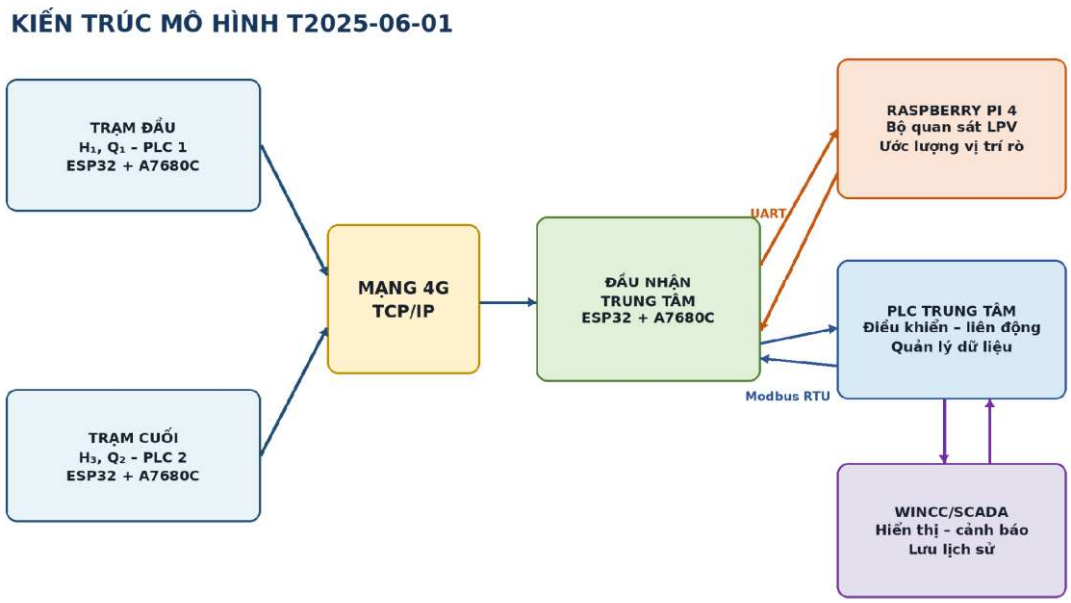
6.1. Cách chọn nhóm phương pháp

Việc chọn không nên bắt đầu từ thuật toán mà từ ba câu hỏi về yêu cầu. Thứ tự này là nội dung cần dạy, vì sinh viên thường làm ngược lại.

1. Cần phát hiện rò nhỏ đến đâu? Tra Bảng 8. Nếu yêu cầu nằm dưới giới hạn của cảm biến hiện có, nhóm cân bằng và nhóm mô hình đều không đáp ứng được, phải chuyển sang nhóm âm học.
2. Có cần biết vị trí không, và sai số bao nhiêu mét là chấp nhận được? Tra cột cuối Bảng 12. Nếu chỉ cần biết "có rò trên tuyến" thì nhóm cân bằng là đủ và rẻ hơn nhiều.
3. Có sẵn mô hình thuỷ lực đáng tin và dữ liệu gắn nhãn không? Nhóm mô hình cần cái thứ nhất, nhóm dữ liệu cần cái thứ hai. Thiếu cả hai thì hai nhóm này đều không khả thi bất kể ngân sách.

Mô hình T2025-06-01 dùng đồng thời nhóm thứ ba để phát hiện và nhóm thứ tư để định vị. Hai nhóm bổ sung nhau: chênh lệch lưu lượng cho tín hiệu cảnh báo sớm và đơn giản, bộ quan sát cho vị trí. Nếu bộ quan sát mất hiệu lực do dữ liệu ra ngoài miền, nhóm thứ ba vẫn hoạt động và vẫn báo được có bất thường.

7. Cấu trúc hệ thống giám sát đường ống



Hình 5. Kiến trúc đo, truyền dữ liệu, xử lý thuật toán và SCADA của mô hình.

Mô hình dùng hai trạm đo đặt tại đầu và cuối tuyến. PLC hiện trường nhận tín hiệu 4–20 mA, thực hiện quy đổi thang đo và chuyển dữ liệu cho ESP32. Mô-đun A7680C tạo kết nối 4G đến đầu nhận trung tâm. Tại trung tâm, Raspberry Pi chạy thuật toán ước lượng, còn PLC trung tâm thực hiện điều khiển, liên động và quản lý dữ liệu hiển thị trên WinCC/SCADA.

7.1. Nguyên tắc phân tách chức năng

Việc phân tách này có ý nghĩa an toàn và cần được giải thích rõ, vì đây là nội dung sinh viên sẽ mang theo sang mọi hệ thống công nghiệp khác. Nguyên tắc: chức năng an toàn phải nằm trên đường tín hiệu ngắn nhất, tin cậy nhất và không phụ thuộc thành phần dễ hỏng.

Thiết bị	Chức năng	Được phép làm gì	Không được làm gì
PLC hiện trường	Thu thập, quy đổi thang đo, gắn timestamp và cờ chất lượng	Dừng bơm tại chỗ khi mất tín hiệu cảm biến	Chạy thuật toán ước lượng
ESP32 + A7680C	Đóng gói và truyền dữ liệu qua 4G	Đệm dữ liệu khi mất sóng và gửi lại kèm timestamp gốc	Sửa hoặc nội suy dữ liệu để lấp khoảng trống

Thiết bị	Chức năng	Được phép làm gì	Không được làm gì
Raspberry Pi	Chạy bộ quan sát, tính phần dư và $\hat{z}\ell$	Xuất kết quả kèm cờ hợp lệ	Ra lệnh trực tiếp cho cơ cấu chấp hành
PLC trung tâm	Điều khiển, permissive, interlock, quản lý dữ liệu	Dừng bơm theo liên động nội bộ	Phụ thuộc kết quả từ Raspberry Pi để thực hiện liên động
WinCC/SCADA	Hiển thị, cảnh báo, lưu lịch sử	Đọc dữ liệu và kết quả chẩn đoán qua PLC	Là đường đi của tín hiệu an toàn

Bảng 13. Phân công chức năng và ranh giới trách nhiệm. Hai cột cuối được thêm so với bản trước.

Hệ quả cụ thể: mất kết nối 4G hoặc lỗi thuật toán không làm mất liên động dừng bơm của PLC. Kết quả ước lượng chỉ được hiển thị khi dữ liệu có cờ chất lượng hợp lệ và vị trí nằm trong miền làm việc. Câu hỏi kiểm tra nhanh cho sinh viên: nếu Raspberry Pi treo, hệ thống còn an toàn không? Câu trả lời phải là có, và phải chỉ ra được đường tín hiệu nào bảo đảm điều đó.

7.2. Đặc tả giao diện giữa các khối

Liên kết	Vật lý / giao thức	Chu kỳ	Nội dung tối thiểu
Cảm biến → PLC hiện trường	4–20 mA, hai dây	Liên tục (tương tự)	Bốn kênh: hai áp suất, hai lưu lượng
PLC hiện trường → ESP32	UART hoặc Modbus RTU	1 s	Giá trị đã quy đổi SI, timestamp, sequence, cờ chất lượng từng kênh
ESP32 → trung tâm	4G, TCP/IP	1 s, có đệm khi mất sóng	Khung tin có mã trạm, timestamp gốc, sequence, dữ liệu, tổng kiểm tra

Liên kết	Vật lý / giao thức	Chu kỳ	Nội dung tối thiểu
Đầu nhận → Raspberry Pi	UART	1 s	Cặp mẫu đã ghép theo timestamp, kèm cờ ghép hợp lệ
Raspberry Pi → PLC trung tâm	Modbus RTU	1 s	Phần dư, $\hat{z}\ell$, $\chi\ell$, cờ trạng thái ba giá trị (Mục 9.2)
PLC trung tâm → SCADA	Ethernet, S7	Theo chu kỳ quét	Toàn bộ tag ở Bảng 15

Bảng 14. Đặc tả giao diện tối thiểu giữa các khối chức năng.

Ba quy tắc đi kèm bảng. Thứ nhất, mọi quy đổi đơn vị thực hiện một lần duy nhất, tại PLC hiện trường, và dữ liệu đi tiếp luôn ở đơn vị SI. Thứ hai, timestamp được gán tại nơi phát sinh dữ liệu, không phải tại nơi nhận. Thứ ba, khung tin nào không qua được tổng kiểm tra thì bị loại kèm ghi nhận, không được sửa.

8. Điều kiện lắp đặt ngoài trời và an toàn

Hạng mục	Yêu cầu tối thiểu	Lý do
Cấp bảo vệ vỏ tủ	IP65 trở lên cho tủ ngoài trời; IP67 cho hộp nối gần mặt đất	Mưa tạt, nước đọng, phun rửa
Nhiệt độ làm việc	Kiểm tra dải nhiệt của cảm biến và ESP32 ở nhiệt độ trong tủ, không phải nhiệt độ môi trường	Tủ kín phơi nắng có thể nóng hơn không khí 15 – 20 °C
Chống sét và quá áp	Thiết bị cắt sét lan truyền trên nguồn và trên đường tín hiệu vào tủ	Tuyến ống dài với cáp chạy dọc là ăng-ten thu sét cảm ứng
Nối đất	Nối đất riêng cho vỏ tủ; màn chắn cáp tín hiệu nối đất một đầu	Nối hai đầu tạo vòng lặp đất gây nhiễu tín hiệu 4–20 mA

Hạng mục	Yêu cầu tối thiểu	Lý do
Nguồn điện	Nguồn dự phòng cho trạm đo đủ để đóng gói và gửi nốt dữ liệu đệm khi mất điện	Mất điện đột ngột làm mất dữ liệu chưa gửi và tạo khoảng trống
An toàn điện cho người học	Phần sinh viên thao tác dùng điện áp cực thấp an toàn; phần lưới điện có che chắn và khoá	Môi trường ẩm ướt làm tăng rủi ro điện giật
An toàn thuỷ lực	Van xả áp, giới hạn áp suất thử, quy trình xả áp trước khi tháo lắp	Tháo mối nối khi còn áp gây bắn nước áp lực cao
Bảo mật kết nối 4G	Xác thực thiết bị, mã hoá kênh truyền, không mở cổng điều khiển ra Internet	Kênh 4G là kênh công cộng; chỉ truyền dữ liệu đo, không truyền lệnh điều khiển

Bảng 15. Yêu cầu lắp đặt ngoài trời và an toàn.

Dòng cuối bảng liên hệ trực tiếp với nguyên tắc ở Mục 7.1: vì kênh 4G không được dùng cho lệnh điều khiển, nên ngay cả khi kênh này bị xâm nhập, kẻ tấn công cũng không điều khiển được bơm. Đó là một quyết định kiến trúc, không phải một biện pháp bổ sung.

9. Biểu hiện của rò rỉ trên dữ liệu

- Chênh lệch $Q_1 - Q_2$ tăng vượt mức nền, so với ngưỡng tính theo (1.5) chứ không phải một hằng số đặt sẵn.
- H_1 và H_3 thay đổi theo điểm làm việc của bơm, van và theo vị trí rò; riêng $H_1 - H_3$ có thể đối chiếu với Bảng 7.
- Phần dư của mô hình tăng khi tín hiệu đo không còn phù hợp với trạng thái bình thường.
- Kết quả định vị có độ nhạy thấp hơn ở vùng sát đầu hoặc cuối tuyến — xem Mục 10.2.
- Mất dữ liệu truyền thông tạo biểu hiện giống bất thường nếu không dùng cờ chất lượng và timestamp.
- Lệch đồng bộ giữa hai trạm tạo chênh lệch giả, đặc biệt trong quá độ bơm — xem Bảng 10.

9.1. Vì sao không dùng một ngưỡng cố định

Ngưỡng theo (1.5) tỉ lệ với lưu lượng nền Q_0. Một ngưỡng đặt lúc lưu lượng thấp sẽ báo giả liên tục khi lưu lượng cao; một ngưỡng đặt lúc lưu lượng cao sẽ bỏ sót rò khi lưu lượng thấp. Cách xử lý là tính ngưỡng động theo điểm làm việc hiện tại, hoặc chia dải vận hành thành vài vùng và đặt một ngưỡng cho mỗi vùng.

9.2. Ba trạng thái đầu ra phải phân biệt

Đây là quy ước quan trọng nhất mà BG1 chuyển giao cho BG3 và BG4. Gộp ba trạng thái này là nguồn hiểu nhầm nguy hiểm nhất trong vận hành.

Trạng thái	Nghĩa	Hệ thống đã làm gì	Người vận hành nên làm gì
Không rò	Đã đánh giá và kết luận không có rò	Dữ liệu hợp lệ, phần dư dưới ngưỡng	Không cần hành động
Không xác định	Không đủ căn cứ để kết luận	Dữ liệu thiếu, ngoài miền, hoặc đang quá độ	Kiểm tra nguồn dữ liệu, không suy ra là an toàn
Rò tại $\hat{z}\ell$	Đã kết luận có rò kèm vị trí ước lượng	Phần dư trên ngưỡng đủ lâu, dữ liệu hợp lệ	Kiểm tra hiện trường quanh $\hat{z}\ell$

Bảng 16. Ba trạng thái đầu ra của hệ chẩn đoán.

Trong giao diện và trong giao thức, “không xác định” phải là một mã trạng thái riêng, không được biểu diễn bằng một giá trị số nằm trong dải hợp lệ. Một hệ thống báo vị trí 0 m khi mất dữ liệu là hệ thống đang trộn trạng thái thứ hai vào trạng thái thứ nhất, và người vận hành sẽ hiểu nhầm là an toàn.

10. Hệ thống SCADA và quản lý dữ liệu

SCADA không chỉ hiển thị giá trị tức thời. Một giao diện phục vụ chẩn đoán cần thể hiện đồng thời sơ đồ công nghệ, đồ thị theo thời gian của H_1–H_3 và Q_1–Q_2, trạng thái bơm, trạng thái kết nối 4G, phần dư, vị trí ước lượng và cờ chất lượng. Dữ liệu lịch sử được tổ chức theo mã phiên thử, thời gian, vị trí rò chuẩn, cấu hình van và phiên bản chương trình.

Nhóm tag	Ví dụ	Mục đích
Đo lường	H1, H3, Q1, Q2	Theo dõi trạng thái thuỷ lực
Thiết bị	PUMP_RUN, VALVE_STATE	Xác định điều kiện vận hành
Truyền thông	NET_OK, SEQUENCE, LAST_PACKET, TIME_SKEW	Phát hiện mất kết nối, dữ liệu cũ và lệch đồng bộ
Chẩn đoán	RESIDUAL, LEAK_POS, LEAK_ALM, LEAK_STATE	Hiển thị kết quả thuật toán và trạng thái ba giá trị
Chất lượng	Q_H1, Q_Q2, MODEL_DOMAIN, WARMUP_LOCK	Loại mẫu không hợp lệ và khoá cảnh báo trong quá độ
Ngưỡng	THRESH_DQ, Q_BASE	Ngưỡng động theo điểm làm việc (Mục 9.1)

Bảng 17. Bảng tag tối thiểu. Bốn tag được thêm so với bản trước: TIME_SKEW, LEAK_STATE, WARMUP_LOCK và cặp ngưỡng động.

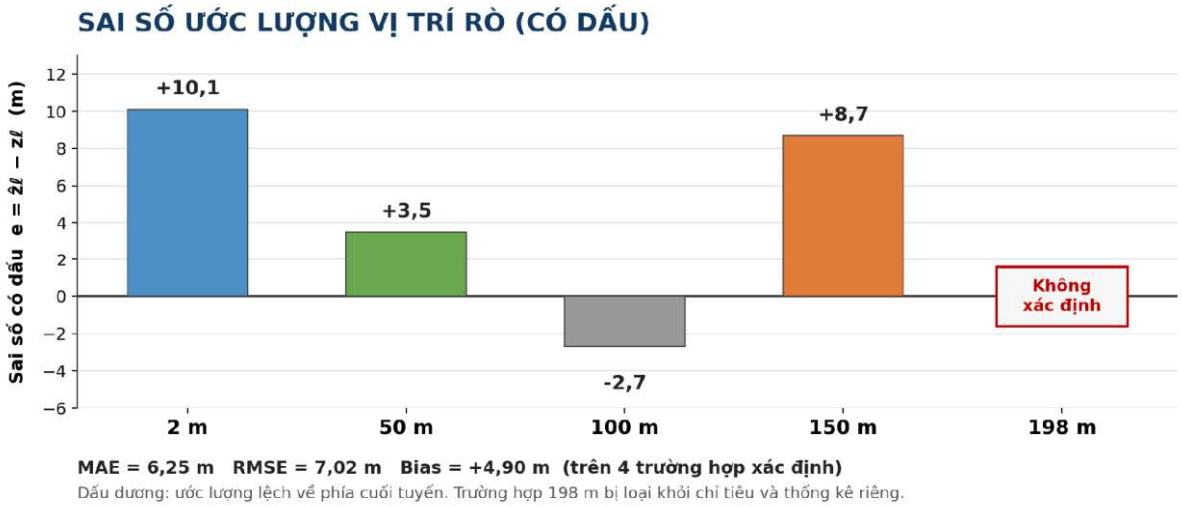
11. Nghiên cứu trường hợp T2025-06-01

Tuyến ống HDPE dài 200 m có năm vị trí thử tại 2 m, 50 m, 100 m, 150 m và 198 m. Hai cảm biến áp suất và hai cảm biến lưu lượng cung cấp H_1, H_3, Q_1 và Q_2. Bộ quan sát xác định được bốn vị trí; trường hợp 198 m nằm ngoài miền xác định.

Vị trí thật (m)	Vị trí ước lượng (m)	Sai số có dấu (m)	Kết luận
2	12,1	+10,1	Xác định được; sai số lớn nhất, vùng sát biên
50	53,5	+3,5	Xác định được
100	97,3	−2,7	Xác định được; sai số nhỏ nhất

Vị trí thật (m)	Vị trí ước lượng (m)	Sai số có dấu (m)	Kết luận
150	158,7	+8,7	Xác định được; độ nhạy giảm
198	—	—	Không xác định; ngoài miền làm việc

Bảng 18. Kết quả năm kịch bản định vị. Cột sai số được đổi sang có dấu.



Hình 6. Sai số ước lượng vị trí rò, biểu diễn có dấu.

11.1. Vì sao phải ghi sai số có dấu

Khi ba chỉ tiêu MAE = 6,25 m, RMSE = 7,02 m và Bias = +4,90 m không kiểm tra lại được từ bảng, vì Bias chỉ tính được khi sai số mang dấu. Thực tế sai số tại 100 m mang dấu âm. Với bốn trường hợp xác định:

$$e_i = \hat{z}_{\ell,i} - z_{\ell,i}, \qquad \mathrm{MAE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|e_i|, \qquad \mathrm{Bias} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} e_i \tag{1.9}$$

Bias dương và có độ lớn đáng kể so với MAE cho biết bộ quan sát lệch có hệ thống về phía cuối tuyến. Đây là thông tin chẩn đoán về mô hình chứ không phải nhiễu ngẫu nhiên, và là một hướng cải tiến cụ thể. Nếu chỉ ghi trị tuyệt đối thì thông tin này bị mất hoàn toàn.

11.2. Vì sao vùng biên khó và vì sao 198 m ngoài miền

Mô hình động của tuyến ống chứa các hệ số tỉ lệ với $1/z\ell$ và $1/(L - z\ell)$. Khi điểm rò tiến sát một đầu, một trong hai mẫu số trở nên rất nhỏ, hệ số tương ứng tăng nhanh

và mô hình nhạy hơn hẳn với nhiễu đo. Vì vậy miền làm việc phải loại trừ hai vùng sát biên:

$$z_{\min} \le \hat{z}_\ell \le L - z_{\min}, \qquad z_{\min} = 5 \text{ m} \;\; \text{cho } L = 200 \text{ m} \tag{1.10}$$

Với z_min = 5 m, vị trí 198 m nằm ngoài miền và kết quả tại đó bị phân loại "không xác định" theo Bảng 16. Vị trí 2 m cũng nằm ngoài khoảng này về mặt hình học, nhưng ở kịch bản đó bộ quan sát vẫn hội tụ về một giá trị trong miền nên kết quả được giữ lại — kèm ghi nhận rằng đây là trường hợp có sai số lớn nhất. Đây là chi tiết cần trình bày rõ, vì bản trước xếp hai trường hợp 2 m và 198 m vào cùng một nhóm mô tả trong khi chúng khác nhau về kết luận.

Giá trị 198 m không được quy về 0 m, không được thay bằng giá trị hợp lệ gần nhất và không được loại bỏ im lặng. Nó được thống kê riêng theo tỷ lệ, ở đây là một trong năm trường hợp.

12. Lỗi thường gặp khi thiết kế hệ giám sát

Bảng này là mới. Mỗi dòng là một sai lầm quan sát được trong các đồ án sinh viên, kèm cách nhận ra sớm.

Biểu hiện	Nguyên nhân thường gặp	Cách kiểm tra
Chọn thuật toán trước, chọn cảm biến sau	Không đặt yêu cầu về rò nhỏ nhất cần phát hiện	Tra Bảng 8 trước khi chốt phương án
Hệ báo rò mỗi lần bơm khởi động	Không khóa cảnh báo trong quá độ; lệch đồng bộ hai trạm	Đối chiếu Bảng 10 với ngưỡng ở Bảng 8
Ngưỡng lúc báo giả liên tục, lúc bỏ sót	Dùng một hằng số cho mọi điểm làm việc	Tính ngưỡng động theo (1.5) — Mục 9.1
Ghép nhầm cặp Q_1 và Q_2	Ghép theo thứ tự bản tin đến thay vì theo timestamp	Kiểm tra tag TIME_SKEW; ghép theo timestamp gốc
Kết quả 0 m khi mất dữ liệu	Trộn "không xác định" vào "không rò"	Dùng mã trạng thái riêng — Bảng 16

Biểu hiện	Nguyên nhân thường gặp	Cách kiểm tra
Sai đơn vị làm sai bậc kết quả	Quy đổi ở nhiều nơi hoặc quên quy đổi	Quy đổi một lần tại PLC hiện trường — Mục 7.2
Tham số mô hình khớp đẹp nhưng vô lý	Không kiểm chứng bậc độ lớn	Suy ngược D, c và h_f — Mục 5
Nhiễu tín hiệu 4–20 mA ngoài trời	Màn chắn cáp nối đất hai đầu tạo vòng lặp đất	Nối đất màn chắn một đầu — Bảng 15
Mất dữ liệu mỗi khi mất sóng 4G	ESP32 không đệm dữ liệu	Kiểm tra cơ chế đệm và gửi lại kèm timestamp gốc

Bảng 19. Lỗi thường gặp và cách kiểm tra.

13. Hoạt động STEM trên lớp

Tình huống: một tuyến ống ngoài trời cần được giám sát từ phòng điều khiển. Nhóm sinh viên đề xuất kiến trúc hệ thống có khả năng phát hiện rò, định vị rò và lưu dữ liệu để phân tích. Nhiệm vụ được sắp theo thứ tự bắt buộc, và thứ tự này chính là nội dung cần dạy.

1. Phát biểu yêu cầu trước: cần phát hiện rò nhỏ đến mức nào, có cần định vị không, sai số bao nhiêu mét là chấp nhận được.
2. Từ yêu cầu đó, tra Bảng 8 để chọn cấp chính xác cảm biến. Nếu yêu cầu vượt khả năng của nhóm cân bằng lưu lượng, phải nói rõ và chuyển hướng phương pháp.
3. Xác định các đại lượng cần đo và vị trí đặt cảm biến.
4. Chọn phương thức truyền dữ liệu, giải thích lý do, và lập bảng đặc tả giao diện theo mẫu Bảng 14.
5. Phân công chức năng cho PLC hiện trường, Raspberry Pi, PLC trung tâm và SCADA; chỉ rõ đường tín hiệu an toàn.
6. So sánh hai nhóm phương pháp và chọn nhóm cho tuyến ống 200 m, có biện luận theo ba câu hỏi ở Mục 6.1.
7. Vẽ sơ đồ chức năng và liệt kê các trạng thái lỗi cần quản lý, gồm cả ba trạng thái đầu ra ở Bảng 16.
8. Lập danh mục an toàn cho lắp đặt ngoài trời theo Bảng 15.

13.1. Phản biện chéo

Nhóm khác thực hiện phản biện. Để việc phản biện có mục tiêu thay vì nhận xét chung chung, mỗi nhóm phản biện phải trả lời ba câu hỏi bắt buộc:

1. Hệ thống mà nhóm bạn đề xuất phát hiện được rò nhỏ đến bao nhiêu milimét? Chỉ ra con số và cách tính.
2. Điều gì xảy ra với hệ thống đó khi bơm khởi động? Chỉ ra cơ chế ngăn cảnh báo giả.
3. Nếu Raspberry Pi treo hoặc mất sóng 4G, hệ thống còn an toàn không? Chỉ ra đường tín hiệu bảo đảm điều đó.

Biến thể nâng cao: giảng viên phát cho mỗi nhóm một yêu cầu khác nhau về rò nhỏ nhất cần phát hiện — 5 mm, 10 mm, 20 mm. Nhóm nhận yêu cầu 5 mm sẽ phát hiện ra rằng cân bằng lưu lượng không đáp ứng được ở bất kỳ cấp cảm biến nào trong Bảng 8, và buộc phải chuyển hướng. Đây là bài học có giá trị nhất của cả buổi.

14. Câu hỏi ôn tập và bài tập

14.1. Câu hỏi kiểm tra nhanh trong giờ

Sau mục	Câu hỏi
Mục 1	Vì sao chênh lệch $Q_1 - Q_2$ về nguyên tắc không thể định vị được điểm rò?
Mục 3	Đơn vị của $\lambda\ell$ là gì? Suy ra từ công thức nào?
Mục 4	Trừ hai số đo thì sai số giảm hay tăng? Tăng bao nhiêu lần?
Mục 4	Với cảm biến 2 %, lỗ rò 5 mm có phát hiện được không? Vì sao?
Mục 5	Nêu một cách kiểm tra nhanh xem bộ tham số nhận dạng có hợp lý về vật lý không.
Mục 7	Nếu Raspberry Pi treo, bơm còn dừng được khi có sự cố không? Đường tín hiệu nào bảo đảm?
Mục 9	Phân biệt "không rò" với "không xác định". Hậu quả nếu gộp hai trạng thái này?

Bảng 20. Câu hỏi kiểm tra nhanh theo mục.

14.2. Bài tập

1. Phân biệt phát hiện rò, định vị rò và ước lượng mức độ rò. Với mỗi nhiệm vụ, nêu tín hiệu tối thiểu cần có.
2. Giải thích vì sao $Q_1 - Q_2$ không đủ để định vị trong mọi trường hợp. Lập luận theo lượng thông tin chứ không theo độ chính xác.
3. Một hệ dùng cảm biến lưu lượng cấp 1 % tại điểm làm việc 600 L/min. Tính ngưỡng phát hiện 3σ và đường kính lỗ rò nhỏ nhất phát hiện được với cột áp tại điểm rò 15 m.
4. Với hệ ở bài 3, nếu hai trạm lệch đồng bộ 1,5 s và lưu lượng đang biến thiên 20 L/min mỗi giây, chênh lệch giả bằng bao nhiêu? So với ngưỡng vừa tính và kết luận.
5. Từ Bảng 11, nêu ba khả năng giải thích chênh lệch giữa μ vật lý và μ nhận dạng, và đề xuất cách kiểm tra từng khả năng.
6. Tính tổn thất ma sát trên tuyến 200 m ống DN80 ở lưu lượng 400 L/min, và cho biết cảm biến áp suất cần độ phân giải bao nhiêu để đo được nó.
7. Nêu vai trò của timestamp, sequence number và cờ chất lượng. Với mỗi thứ, nêu một tình huống hỏng nếu thiếu nó.
8. So sánh phương pháp âm học với phương pháp dựa trên mô hình theo năm tiêu chí ở Hình 4.
9. Giải thích vì sao liên động an toàn không được đặt trên mạng 4G. Nêu hai hệ quả nếu vi phạm nguyên tắc này.
10. Từ Bảng 18, kiểm tra lại ba con số MAE, RMSE và Bias. Giải thích ý nghĩa của việc Bias mang dấu dương.
11. Nhận xét ảnh hưởng của vị trí rò đến sai số định vị, và giải thích bằng cấu trúc của mô hình.
12. Thiết kế bảng tag tối thiểu cho một màn hình giám sát đường ống, bảo đảm phân biệt được ba trạng thái ở Bảng 16.
13. Lập danh mục kiểm tra khi nghiệm thu lắp đặt ngoài trời, dựa trên Bảng 15.

15. Đánh giá sản phẩm học tập

Rubric dưới đây thay cho bảng tỷ trọng đơn thuần ở bản trước, để việc chấm nhất quán giữa các giảng viên và để sinh viên biết trước đích cần đạt.

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Sơ đồ vật lý và tín hiệu	Thiếu đơn vị hoặc sai ký hiệu; không thể hiện điểm rò	Thể hiện đúng H_1, H_3, Q_1, Q_2, vị trí rò và luồng dữ liệu	Thêm bảng biến có đơn vị và dải giá trị, đối chiếu được với Bảng 6	20%
Ngân sách sai số và ngưỡng	Không tính ngưỡng, hoặc dùng một hằng số không có căn cứ	Tính được ngưỡng 3σ và rò nhỏ nhất phát hiện được	Thêm phân tích lệch đồng bộ và trôi điểm không; ngưỡng động theo điểm làm việc	25%
Lựa chọn phương pháp	Chọn thuật toán trước khi phát biểu yêu cầu	Có tiêu chí so sánh và lập luận kỹ thuật	Đi từ yêu cầu về rò nhỏ nhất và độ chính xác định vị, có biện luận đánh đổi	20%
Kiến trúc điều khiển và giám sát	Đặt chức năng an toàn trên đường truyền 4G	Phân công đúng PLC, Raspberry Pi, 4G và SCADA	Thêm bảng đặc tả giao diện có chu kỳ và nội dung khung tin	20%
Quản lý lỗi và an toàn	Không phân biệt “không xác định” với “không rò”	Có cờ chất lượng, xử lý mất mạng và liên động	Thêm danh mục an toàn lắp đặt ngoài trời và bảo mật kênh truyền	15%

Bảng 21. Rubric đánh giá.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Torres, L. và cộng sự (2019). Kalman filters for leak diagnosis in pipelines: brief history and future research. Mathematics, 7(9), 852. (Dẫn ở Mục 6, nhóm phương pháp dựa trên mô hình)

[2] Billmann, L., Isermann, R. (1987). Leak detection methods for pipelines. Automatica, 23(3), 381–385. (Dẫn ở Mục 4 và Mục 6, cân bằng lưu lượng và ngưỡng thống kê)

[3] Al-Mutiry, M. và cộng sự (2020). Water pipeline monitoring system using flow sensor based on IoT. IJACSA, 11(9), 498–503. (Dẫn ở Mục 7, kiến trúc đo và truyền dữ liệu)

[4] Siemens. SIMATIC S7-1200 System Manual. (Dẫn ở Mục 7.1 và Mục 7.2)

[5] SIMCom. A7680C Series Hardware Design and AT Command Manual. (Dẫn ở Mục 7.2, giao diện truyền 4G)

[6] White, F. M. (2016). Fluid Mechanics, 8th ed. New York: McGraw-Hill. (Dẫn ở Mục 3, phương trình lỗ rò và tổn thất Darcy–Weisbach)

[7] IEC 60529. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). (Dẫn ở Mục 8, cấp bảo vệ vỏ tủ)

[8] Tài liệu bài giảng BG3 và BG4 cùng đề tài T2025-06-01. (Nguồn của bộ tham số a_1, a_2, μ ở Mục 5 và của bộ kịch bản ở Mục 11)

BÀI GIẢNG 2

XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC CHO MỘT ĐOẠN ĐƯỜNG ỐNG NƯỚC CÓ MỘT ĐẦU VÀO VÀ MỘT ĐẦU RA

Đà Nẵng – 9/2026

MỤC LỤC

THÔNG TIN BÀI GIẢNG....3
Vị trí của bg2 trong chuỗi bài giảng....3
Ghi chú về thời lượng....4
MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA....5
PHẦN A — GIẢ THIẾT VÀ XÂY DỰNG MÔ HÌNH....7
1. Xác định biên hệ và giả thiết mô hình....7
2. Phương trình cơ sở của dòng trong ống....8
3. Kiểm tra thứ nguyên....8
4. Mô hình tập trung ở trạng thái không rò....9
4.1. Vì sao viết Q|Q| chứ không viết Q^2....9
5. Mô hình một điểm rò....9
5.1. Hai bổ sung bắt buộc so với bản trước....10
5.2. Miền hợp lệ và điểm kỳ dị....11
PHẦN B — THÔNG SỐ, KIỂM CHỨNG VÀ NHẬN DẠNG....12
6. Thông số hình học và điểm làm việc....12
6.1. Vận tốc truyền sóng — đại lượng bị bỏ quên....12
7. Kiểm chứng nhất quán tham số....13
7.1. Ba đường kiểm chứng....13
7.2. Áp dụng cho bộ tham số hiện có....13
7.3. Đọc kết quả....14
7.4. Các khả năng cần truy nguyên....15
7.5. Hệ quả với chu kỳ lấy mẫu....15
8. Chuyển đổi tín hiệu đo....16
9. Nhận dạng tham số từ dữ liệu thực....17
9.1. Quy trình....17
9.2. Chuẩn hoá thang tham số....18

9.3. Kiểm tra khả nhận dạng trước khi tối ưu....18
9.4. Tách tập dữ liệu....19
9.5. Kết quả nhận dạng của đề tài....19
10. Kiểm chứng và giới hạn....20
11. Lỗi thường gặp và cách kiểm tra....20
12. Giới hạn của mô hình....21
13. Hoạt động STEM....22
13.1. Bài tập cài lỗi có chủ đích....22
14. Câu hỏi và bài tập....23
14.1. Câu hỏi kiểm tra nhanh trong giờ....23
14.2. Bài tập....23
15. Đánh giá....24
TÀI LIỆU THAM KHẢO....26

THÔNG TIN BÀI GIẢNG

Mục	Nội dung
Đối tượng	Sinh viên đã học phương trình vi phân, điều khiển tự động và thuỷ lực cơ bản
Thời lượng đề xuất	06 tiết, chia hai phần: • Phần A (03 tiết): giả thiết, phương trình cơ sở, mô hình không rò và mô hình có rò • Phần B (03 tiết): thông số hình học, kiểm chứng nhất quán, nhận dạng tham số
Đầu vào bài học	Sơ đồ tuyến ống, tín hiệu H_1, H_3, Q_1, Q_2, thông số hình học và dữ liệu đo
Sản phẩm học tập	Mô hình toán đầy đủ; bảng biến – đơn vị đã kiểm tra thứ nguyên; bảng kiểm chứng nhất quán tham số; kế hoạch nhận dạng có cận và tách tập
Vị trí trong chuỗi	Bài thứ hai. Nhận ngôn ngữ từ BG1; cung cấp mô hình cho BG3 và BG4 — xem Bảng 2

Bảng 1. Điều kiện tiên quyết và sản phẩm của bài giảng.

Vị trí của bg2 trong chuỗi bài giảng

BG2 là bài duy nhất trong chuỗi có nhiệm vụ nối vật lý với toán học. Mọi con số mà BG3 và BG4 sử dụng đều sinh ra ở đây. Vì vậy một sai sót trong BG2 không dừng lại ở BG2: nó lan sang bộ quan sát, sang mô phỏng và sang kết quả định vị, ở đó nó rất khó truy nguyên vì đã bị che dưới nhiều lớp tính toán.

Bài	Nhận từ BG2	Trả lại cho BG2
BG1	Ký hiệu, ba nhiệm vụ chẩn đoán, ba trạng thái đầu ra	Phương trình lỗ rò và ngân sách sai số đo
BG3	Ma trận $A(\rho)$, $B(\rho)$, C và miền biến lập lịch	Yêu cầu về tính quan sát được của mô hình
BG4	Bộ tham số a_1, a_2, μ và cấu hình mô phỏng	Kết quả nhận dạng và phần dư để kiểm chứng lại

Bảng 2. Quan hệ hai chiều giữa BG2 và các bài còn lại.

Ghi chú về thời lượng

Thời lượng thực hiện dự kiến là 06 tiết, bao gồm phần mô phỏng, kiểm tra thứ nguyên và kiểm chứng tính nhất quán của bộ tham số. Trong đó, nội dung kiểm chứng tham số được giữ lại nhằm giúp người học nhận diện, phân tích và xử lý các vấn đề có thể phát sinh trong quá trình xây dựng và mô phỏng mô hình.

MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA

Bài giảng hướng dẫn chuyển đổi tượng đường ống từ mô tả vật lý sang mô hình trạng thái dùng cho mô phỏng và thiết kế bộ quan sát. Trọng tâm là quy ước biên hệ, thống nhất đơn vị, xây dựng mô hình không rò và mô hình có một điểm rò, sau đó xác định các tham số chưa biết từ dữ liệu thực.

Chuẩn đầu ra	Phát biểu	Mức Bloom
CLO1	Thiết lập được phương trình động lượng và liên tục ở mức mô hình tập trung, kèm kiểm tra thứ nguyên	Vận dụng
CLO2	Xây dựng được mô hình không rò và mô hình một điểm rò với đúng biến trạng thái và đủ số hạng	Vận dụng
CLO3	Chuyển đổi đúng đơn vị và lập được bảng dữ liệu dùng cho nhận dạng	Vận dụng
CLO4	Kiểm chứng được tính nhất quán giữa tham số nhận dạng và thông số hình học, vật liệu	Đánh giá
CLO5	Giải thích được ý nghĩa, phương pháp xác định và giới hạn của a_1, a_2, μ	Hiểu

Bảng 3. Chuẩn đầu ra của bài giảng.

CLO	Mục nội dung	Hoạt động học	Công cụ đánh giá	Tỷ trọng
CLO1	2, 3	Suy dẫn phương trình, kiểm tra thứ nguyên từng số hạng	Bài suy dẫn có bảng thứ nguyên	20%
CLO2	4, 5	Viết mô hình năm trạng thái, kiểm tra trường hợp giới hạn	Chấm phương trình và phép thử $\lambda\ell = 0$	25%
CLO3	6, 7	Lập bảng quy đổi và bảng dữ liệu	Bảng biến – đơn vị – nguồn	15%

CLO	Mục nội dung	Hoạt động học	Công cụ đánh giá	Tỷ trọng
CLO4	8	Suy ngược D, b, h_f từ tham số	Bảng kiểm chứng nhất quán kèm kết luận	25%
CLO5	9, 10, 12	Chạy nhận dạng, phân tích giới hạn	Kế hoạch nhận dạng và biện luận giới hạn	15%

Bảng 4. Ma trận chuẩn đầu ra – nội dung – hoạt động – đánh giá.

PHẦN A — GIẢ THIẾT VÀ XÂY DỰNG MÔ HÌNH

1. Xác định biên hệ và giả thiết mô hình



Hình 1. Biên hệ và quy ước biến trên tuyến ống có một điểm rò.

Mọi mô hình đều là một tập giả thiết được viết lại dưới dạng phương trình. Liệt kê giả thiết ra thành danh sách không phải thủ tục hình thức: nó cho biết mô hình sẽ hỏng ở đâu, và đó chính là nội dung của Mục 12.

Giả thiết	Phát biểu	Hỏng khi nào
Dòng một chiều	Dòng chảy mô tả theo một chiều dọc trục ống	Gần chỗ rẽ nhánh, van, chỗ mở rộng đột ngột
Tiết diện không đổi	Tiết diện và đường kính không đổi trên mỗi đoạn	Ống có đoạn thu hẹp hoặc bị bám cặn
Chất lỏng không nén	Khối lượng riêng gần như không đổi trong miền vận hành	Có khí lẫn trong nước; áp suất dao động rất lớn
Ma sát gộp	Toàn bộ tổn thất quy về một hệ số μ duy nhất	Tổn thất cục bộ tại phụ kiện chiếm tỷ trọng lớn
Một điểm rò	Trong một phiên thử chỉ xét một điểm rò; $z\ell$ và $\lambda\ell$ không đổi	Có nhiều điểm rò; lỗ rò mở rộng theo thời gian
Biên hệ	Đầu tuyến $z = 0$, cuối tuyến $z = L$; H_1, H_3, Q_1, Q_2 là tín hiệu đo	Cảm biến đặt lệch khỏi hai đầu thật của đoạn mô hình

Bảng 5. Giả thiết mô hình và điều kiện hỏng. Cột cuối được thêm so với bản trước.

Các giả thiết trên tạo ra mô hình có số trạng thái nhỏ, phù hợp với nhận dạng và thiết kế bộ quan sát. Mô hình không nhằm thay thế mô phỏng thuỷ lực phân bố có độ phân giải cao; độ chính xác chỉ được kết luận trong miền dữ liệu đã khảo sát.

2. Phương trình cơ sở của dòng trong ống

Với H(z,t) là cột áp và Q(z,t) là lưu lượng, một dạng thường dùng của phương trình động lượng và phương trình liên tục là:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}(z,t) + gA\frac{\partial H}{\partial z}(z,t) + \mu\, Q(z,t)\,|Q(z,t)| = 0 \tag{2.1}$$

$$b^2\frac{\partial Q}{\partial z}(z,t) + gA\frac{\partial H}{\partial t}(z,t) = 0 \tag{2.2}$$

Trong đó A là tiết diện, D là đường kính trong, f là hệ số ma sát Darcy, b là vận tốc truyền sóng và g là gia tốc trọng trường. Khi xấp xỉ đạo hàm không gian trên một đoạn ống, các hệ số vật lý được gom lại thành ba hệ số của mô hình:

$$\mu = \frac{f}{2DA}, \qquad a_1 = gA, \qquad a_2 = \frac{b^2}{gA}, \qquad b = \sqrt{a_1 a_2} \tag{2.3}$$

Ba định nghĩa này là mới so với bản trước. Bản trước chỉ nêu μ = f/(2DA) mà không nói a_1 và a_2 bằng gì, nên sinh viên không có cách nào đối chiếu giá trị nhận dạng với vật lý. Hai quan hệ $a_1 = gA$ và $a_2 = b^2/(gA)$ suy trực tiếp từ (2.1) và (2.2) khi thay đạo hàm không gian bằng sai phân trên đoạn, và chúng là toàn bộ cơ sở của Mục 7.

Đặc biệt lưu ý quan hệ thứ tư: tích $a_1a_2 = b^2$. Đây là một ràng buộc rất mạnh, vì b không phải con số tuỳ ý mà bị vật liệu ống quy định. Một cặp (a_1, a_2) cho b nằm ngoài dải hợp lý của vật liệu là dấu hiệu chắc chắn có sai sót, bất kể mô hình khớp dữ liệu đến đâu.

3. Kiểm tra thứ nguyên

Xác định rõ đơn vị tính cho các tham số a_1, a_2, μ và λ_l, tạo cơ sở cho việc kiểm tra thứ nguyên trong các công thức và hỗ trợ sinh viên chủ động kiểm soát chính xác kết quả.

$$[a_1] = \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}^2}, \qquad [a_2] = \frac{1}{\mathrm{m}}, \qquad [\mu] = \frac{1}{\mathrm{m}^3}, \qquad [\lambda_\ell] = \frac{\mathrm{m}^{5/2}}{\mathrm{s}} \tag{2.4}$$

Cách suy: $a_1 = gA$ cho $[m/s^2][m^2] = m^3/s^2$; $a_2 = b^2/(gA)$ cho $[m^2/s^2]/[m^3/s^2] = m^{-1}$; μ = f/(2DA) cho $1/([m][m^2]) = m^{-3}$. Đơn vị của λℓ suy từ $q\ell = \lambda\ell\sqrt{H_2}$, vì qℓ tính bằng m^3/s và $\sqrt{H_2}$ bằng $m^{1/2}$.

Kiểm tra thứ nguyên từng số hạng của (2.1) như sau, và đây là bài tập bắt buộc ở Mục 14:

Số hạng	Thay đơn vị	Kết quả
$\partial Q/\partial t$	$(m^3/s)/s$	m^3/s^2
$gA\cdot\partial H/\partial z$	$(m^3/s^2)\cdot(m/m)$	m^3/s^2
$\mu\cdot Q\|Q\|$	$(m^{-3})\cdot(m^3/s)^2$	m^3/s^2

Bảng 6. Kiểm tra thứ nguyên của phương trình động lượng.

Ba số hạng cùng thứ nguyên m^3/s^2, nên (2.1) nhất quán. Quy tắc rút ra: sai thứ nguyên luôn biểu hiện thành sai bậc độ lớn, không phải sai vài phần trăm. Vì vậy khi đáp ứng mô hình lệch hàng nghìn lần so với dữ liệu, việc cần làm đầu tiên là kiểm tra đơn vị chứ không phải chỉnh tham số.

4. Mô hình tập trung ở trạng thái không rò

Với tuyến ống không rò, chọn trạng thái $x = [Q_1, H_3]^T$ và đầu vào $u = [H_1, Q_2]^T$. Mô hình hai trạng thái:

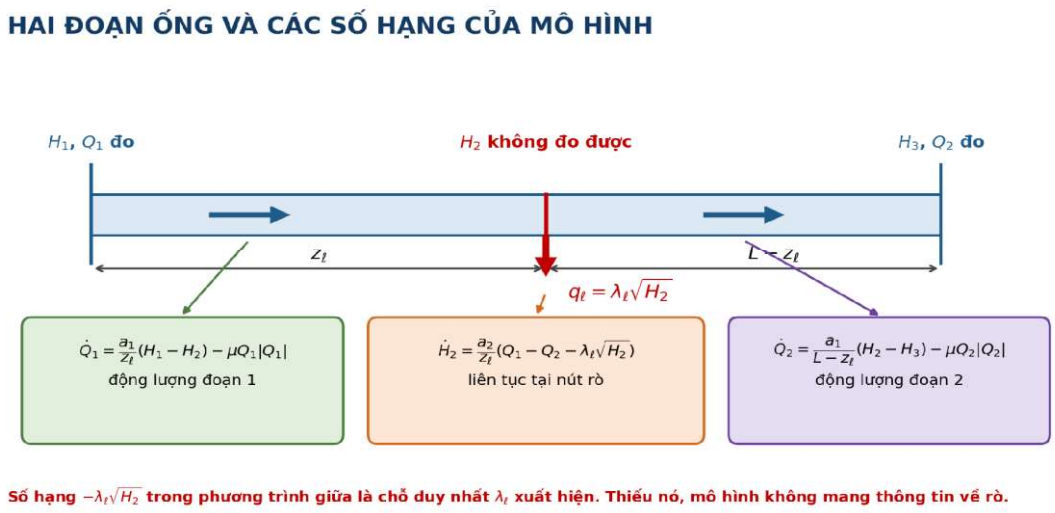
$$\dot{Q}_1 = \frac{a_1}{L}(H_1 - H_3) - \mu Q_1|Q_1|, \qquad \dot{H}_3 = \frac{a_2}{L}(Q_1 - Q_2) \tag{2.5}$$

Phương trình thứ nhất biểu diễn cân bằng động lượng; phương trình thứ hai biểu diễn cân bằng khối lượng.

4.1. Vì sao viết Q|Q| chứ không viết Q^2

Lý do vật lý: lực cản ma sát luôn ngược chiều dòng chảy. Với $Q < 0$, số hạng $-\mu Q^2$ vẫn mang dấu âm nên lực cản tác dụng cùng chiều dòng, làm hệ mất ổn định. Dạng $-\mu Q|Q|$ đổi dấu theo Q nên đúng trong cả hai chiều. Nếu chấp nhận giả thiết dòng một chiều thì hai dạng cho cùng kết quả, nhưng giả thiết đó phải được phát biểu ra chứ không ngầm định — và nó đã được đưa vào Bảng 5.

5. Mô hình một điểm rò



Hình 2. Hai đoạn ống, ba phương trình và vị trí của số hạng rò.

Khi có rò tại z = zℓ, tuyến ống chia thành hai đoạn nối với nhau tại một nút. Cột áp tại nút là H_2. Lưu lượng rò mô tả theo quan hệ lỗ thoát, với Cd là hệ số lưu lượng và Aℓ là diện tích lỗ:

$$q_\ell = \lambda_\ell \sqrt{H_2}, \qquad \lambda_\ell = C_d A_\ell \sqrt{2g} \tag{2.6}$$

Bản trước viết công thức này là Qℓ = λℓ√Hℓ, trong đó ký hiệu Hℓ không được định nghĩa ở bất kỳ đâu trong bài. Đại lượng đúng là H_2, tức cột áp tại nút rò, và cách viết đã được thống nhất.

Chọn trạng thái mở rộng $x = [Q_1, H_2, Q_2, z_\ell, \lambda_\ell]^T$, đầu vào $u = [H_1, H_3]^T$ và đầu ra đo $y = [Q_1, Q_2]^T$. Hệ phương trình đầy đủ gồm năm phương trình:

$$\dot{Q}_1 = \frac{a_1}{z_\ell}(H_1 - H_2) - \mu Q_1|Q_1| \tag{2.7}$$

$$\dot{H}_2 = \frac{a_2}{z_\ell}\left(Q_1 - Q_2 - \lambda_\ell \sqrt{H_2}\right) \tag{2.8}$$

$$\dot{Q}_2 = \frac{a_1}{L - z_\ell}(H_2 - H_3) - \mu Q_2|Q_2| \tag{2.9}$$

$$\dot{z}_\ell = 0, \qquad \dot{\lambda}_\ell = 0 \tag{2.10}$$

5.1. Hai bổ sung bắt buộc so với bản trước

Thứ nhất và quan trọng nhất: phương trình liên tục (2.8) phải chứa số hạng $-\lambda_\ell\sqrt{H_2}$. Bản trước viết $\dot{H}_2 = (a_2/z_\ell)(Q_1 - Q_2)$, tức thiếu hẳn số hạng này. Hậu quả không nhỏ: nếu thiếu nó thì λℓ không xuất hiện ở bất kỳ phương trình nào, mô hình hoàn toàn không mang thông tin về rò, và bài toán ước lượng λℓ trở nên vô nghĩa. Đây là chỗ duy nhất trong toàn mô hình mà λℓ xuất hiện, và cũng là chỗ mà bộ quan sát của BG3 lấy thông tin để định vị.

Có thể kiểm tra nhanh bằng phép thử trường hợp giới hạn: đặt $\lambda\ell = 0$ vào (2.7) – (2.9) và ghép hai đoạn lại, kết quả phải trở về đúng mô hình không rò (2.5). Với dạng thiếu số hạng của bản trước, phép thử này không phân biệt được $\lambda\ell = 0$ với $\lambda\ell \neq 0$ — dấu hiệu rõ ràng rằng phương trình bị thiếu.

Thứ hai: phải viết ra (2.10). Bản trước khai báo véc-tơ trạng thái có năm thành phần nhưng chỉ cho ba phương trình. Hai trạng thái $z\ell$ và $\lambda\ell$ là trạng thái tăng cường, được gán đạo hàm bằng không theo giả thiết "trong một phiên thử vị trí và kích thước lỗ rò không đổi". Nhờ cách này, bài toán định vị rò trở thành bài toán ước lượng trạng thái, và đó chính là ý tưởng nền của BG3.

5.2. Miền hợp lệ và điểm kỳ dị

Hai mẫu số $z\ell$ và $L - z\ell$ giải thích vì sao độ nhạy tăng vọt khi điểm rò tiến sát đầu hoặc cuối tuyến, và vì sao miền tính toán phải loại trừ hai vùng biên:

$$z_{\min} \le z_\ell \le L - z_{\min}, \qquad H_2 \ge 0, \qquad \lambda_\ell \ge 0 \tag{2.11}$$

Chọn z_min = 5 m cho tuyến 200 m. Ba ràng buộc trong (2.11) phải được kiểm tra trước mỗi lần tính, và mẫu nào vi phạm thì kết quả bị gắn cờ "không xác định" theo quy ước ba trạng thái đã thống nhất ở BG1. Trong cài đặt, giá trị phải được chặn TRƯỚC khi chia và trước khi lấy căn, không xử lý NaN sau khi đã chia.

PHẦN B — THÔNG SỐ, KIỂM CHỨNG VÀ NHẬN DẠNG

6. Thông số hình học và điểm làm việc

Tuyến ống HDPE có đường kính ngoài 25 mm và chiều dày thành 2,3 mm. Đường kính trong, tiết diện, vận tốc và số Reynolds tính như sau:

$$D = D_o - 2e, \qquad A = \frac{\pi D^2}{4}, \qquad v = \frac{Q}{A}, \qquad \mathrm{Re} = \frac{vD}{\nu} \tag{2.12}$$

Đại lượng	Công thức	Giá trị
Đường kính trong D	$D_o - 2e = 0{,}025 - 2\times0{,}0023$	0,0204 m
Tiết diện A	$\pi D^2/4$	$3{,}269\times10^{-4}$ m²
Lưu lượng làm việc Q	12 L/min	$2{,}00\times10^{-4}$ m³/s
Vận tốc trung bình v	Q/A	0,612 m/s
Số Reynolds Re	vD/ν, $\nu = 10^{-6}$ m²/s	$1{,}25\times10^{4}$ (chảy rối)
Tổn thất h_f (f ≈ 0,03)	$f\cdot(L/D)\cdot v^2/(2g)$	5,6 m

Bảng 7. Thông số hình học và điểm làm việc của tuyến ống.

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} \tag{2.13}$$

Giá trị h_f ≈ 5,6 m khớp với con số 5,5 m ghi ở bản trước và chỉ dùng để kiểm tra bậc độ lớn. Nhưng Mục 7 sẽ cho thấy chính con số này là một trong hai đường kiểm chứng độc lập phát hiện ra vấn đề của bộ tham số hiện có, nên nó có vai trò lớn hơn nhiều so với "kiểm tra sơ bộ".

6.1. Vận tốc truyền sóng — đại lượng bị bỏ quên

Vận tốc truyền sóng trong ống đàn hồi tính theo công thức Korteweg, với K là mô đun đàn hồi thể tích của nước và E là mô đun đàn hồi của vật liệu ống:

$$b = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{K}{E}\cdot\frac{D}{e}}} \tag{2.14}$$

Cấu hình	E (GPa)	D/e	b tính được (m/s)

Nước tự do (không có ống)	—	—	1483
HDPE 25×2,3 (tuyến của đề tài)	0,8	8,9	294
Ống thép DN80, thành 3 mm	200	26,3	1306

Bảng 8. Vận tốc truyền sóng theo vật liệu ống.

Điểm cần nhấn mạnh: ống nhựa làm vận tốc sóng giảm khoảng năm lần so với nước tự do, vì thành ống giãn ra hấp thụ phần lớn xung áp. Đây là đặc trưng vật liệu rất mạnh và rất khó nhầm, nên b là một chỉ số kiểm chứng lý tưởng.

7. Kiểm chứng nhất quán tham số

Nội dung: ba hệ số a_1, a_2, μ không phải ba con số tự do. Chúng bị ràng buộc bởi hình học và vật liệu qua (2.3), nên có thể suy ngược ra đường kính, vận tốc sóng và tổn thất áp — rồi đối chiếu với thực tế. Bài kiểm tra này tốn vài phút và bắt được những lỗi mà đồ thị khớp đẹp không bao giờ để lộ.

7.1. Ba đường kiểm chứng

1. Từ $a_1 = gA$ suy ra tiết diện và đường kính trong. So với thông số ống đã lắp.
2. Từ $b = \sqrt{(a_1 a_2)}$ suy ra vận tốc truyền sóng. So với dải của vật liệu ống ở Bảng 8.
3. Từ μ và (2.13) suy ra tổn thất ở điểm làm việc. So với h_f tính độc lập ở Bảng 7.

Quan hệ dùng để so là:

$$\mu = \frac{a_1 \, h_f}{L \, Q^2} \qquad \text{(suy tu trang thai xac lap)} \tag{2.15}$$

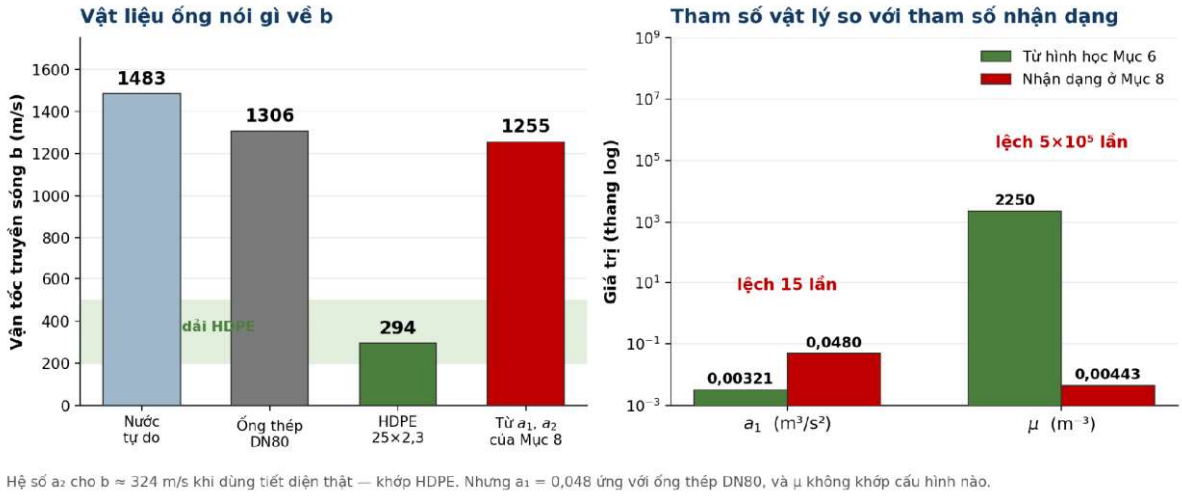
7.2. Áp dụng cho bộ tham số hiện có

Bộ tham số nhận dạng ở Mục 9 là $a_1 = 0{,}048002$; $a_2 = 3{,}2832\times10^{7}$; $\mu = 0{,}0044301$. Thông số hình học ở Bảng 7 là D = 0,0204 m và $A = 3{,}269\times10^{-4}$ m². Kết quả đối chiếu:

Đại lượng kiểm chứng	Từ hình học Bảng 7	Từ tham số Mục 9	Kết luận
Hệ số $a_1 = gA$	$3{,}206\times10^{-3}$ m³/s²	$4{,}800\times10^{-2}$ m³/s²	Lệch 15 lần

Đại lượng kiểm chứng	Từ hình học Bảng 7	Từ tham số Mục 9	Kết luận
Đường kính suy từ a_1	20,4 mm (đã biết)	78,9 mm	Không phải ống của đề tài
Vận tốc sóng $b = \sqrt{(a_1 a_2)}$	324 m/s (dùng a_1 vật lý)	1255 m/s	Giá trị 1255 m/s ứng với ống kim loại, không phải HDPE
Hệ số $\mu = f/(2DA)$	2250 m^{-3} ($f = 0{,}03$)	$4{,}43\times10^{-3}$ m^{-3}	Lệch khoảng 5×10^5 lần
Tổn thất ở Q = 12 L/min	5,6 m	$7{,}4\times10^{-4}$ m	Mô hình dự đoán tổn thất 0,7 mm trên 200 m

Bảng 9. Kiểm chứng nhất quán giữa tham số nhận dạng và thông số vật lý.



Hình 3. Vận tốc truyền sóng theo vật liệu và so sánh tham số vật lý với tham số nhận dạng.

7.3. Đọc kết quả

Ba nhận xét, xếp theo mức độ chắc chắn.

Thứ nhất, hệ số a_2 nhất quán. Khi dùng tiết diện thật, $b = \sqrt{(a_2 \cdot gA)} = 324$ m/s, nằm gọn trong dải HDPE và rất gần giá trị lý thuyết 294 m/s ở Bảng 8. Đây là bằng chứng ủng hộ mạnh cho việc a_2 đúng và cho việc tiết diện thật là $3{,}269\times10^{-4}$ m^2.

Thứ hai, hệ số a_1 và thông số hình học không thể cùng đúng. Nếu $a_1 = 0{,}048002$ thì đường kính phải là 78,9 mm và b = 1255 m/s — vận tốc của ống kim loại. Nhưng ống

của đề tài là HDPE, và với HDPE thì b không thể vượt 500 m/s bất kể đường kính, vì b bị chi phối chủ yếu bởi mô đun đàn hồi vật liệu. Nói cách khác, kết luận "a_1 có vấn đề" không phụ thuộc vào tranh cãi về đường kính.

Thứ ba, hệ số μ không khớp với bất kỳ cấu hình nào. Với ống 20,4 mm thì μ vật lý ≈ 2250 m^{-3}; với ống 79 mm thì μ ≈ 38,7 m^{-3}. Giá trị nhận dạng 0,0044 cách cả hai nhiều bậc độ lớn. Đáng chú ý là con số 2250 được xác nhận bằng hai đường độc lập: công thức μ = f/(2DA) ở (2.3), và tổn thất h_f = 5,6 m tính riêng ở Bảng 7 rồi thay vào (2.15). Hai đường cho cùng kết quả nên bản thân giá trị vật lý là đáng tin.

7.4. Các khả năng cần truy nguyên

Bài giảng không kết luận nguyên nhân, vì việc đó cần đối chiếu dữ liệu gốc và mã nhận dạng. Bốn khả năng cần kiểm tra, theo thứ tự dễ kiểm tra trước:

1. Đơn vị lưu lượng khi đưa vào bộ ước lượng: nếu dữ liệu còn ở L/min mà mô hình giả định m^3/s, hệ số ma sát lệch theo bình phương hệ số quy đổi. Kiểm tra bằng cách in ra giá trị Q ngay trước khi vào khối mô hình.
2. Quy ước viết số hạng ma sát: một số tài liệu viết μQ|Q|, số khác viết (μ/L)·Q|Q| hoặc chuẩn hoá theo tiết diện. Khác quy ước làm khác bậc của μ. Kiểm tra bằng cách đối chiếu mã Simulink với (2.7).
3. Giá trị khởi tạo được lấy từ đâu: bộ khởi tạo a_1 = 0,04802 và μ = 0,0059266 rất gần kết quả cuối, cho thấy quá trình tối ưu gần như không dịch chuyển a_1. Nếu giá trị khởi tạo đã sai thì kết quả thừa hưởng sai sót đó — xem Mục 9.3 về khả nhận dạng.
4. Tuyến ống dùng để lấy dữ liệu có đúng là tuyến HDPE 25×2,3 hay không. Nếu dữ liệu nhận dạng đến từ một cấu hình khác thì Bảng 7 và Mục 9 đang mô tả hai hệ khác nhau, và điều đó phải được ghi rõ.

Điều bài giảng khẳng định là: một mô hình dự đoán tổn thất 0,7 mm trên 200 m ống ở vận tốc 0,6 m/s không thể đúng, và bộ tham số phải được truy nguyên trước khi dùng cho định vị rò ở BG3 và BG4. Đây là bài tập bắt buộc ở Mục 14.

7.5. Hệ quả với chu kỳ lấy mẫu

Kết luận về a_1 kéo theo một hệ quả cần đính chính. Tần số dao động riêng của tuyến ống tính theo:

$$\omega_n = \frac{b}{L}, \qquad f_n = \frac{b}{2\pi L}, \qquad T_s < \frac{1}{2 f_n} \tag{2.16}$$

Giá trị b dùng	f_n (Hz)	Chu kỳ lấy mẫu tối đa	Ts = 1 s có đạt?
324 m/s (từ a_2 và tiết diện thật)	0,258	1,94 s	Đạt, biên độ an toàn khoảng hai lần
1255 m/s (từ a_1 và a_2 như hiện có)	0,999	0,50 s	Không đạt

Bảng 10. Chu kỳ lấy mẫu cần thiết theo vận tốc truyền sóng.

Với tuyến HDPE thật, chu kỳ Ts = 1 s của tập dữ liệu nhận dạng là đủ theo định lý lấy mẫu, tuy biên độ an toàn không lớn. Kết luận này chỉ thành lập khi dùng b = 324 m/s; nếu ai đó tính f_n từ cặp (a_1, a_2) hiện có thì sẽ kết luận ngược lại là Ts = 1 s không đủ. Đây là một ví dụ tốt cho sinh viên thấy một sai sót ở tham số lan sang kết luận về thiết kế hệ đo như thế nào.

8. Chuyển đổi tín hiệu đo

Với cảm biến có dải Xmin – Xmax và dòng ra I tính bằng mA, phép quy đổi tuyến tính là:

$$X = X_{\min} + \frac{I-4}{20-4}(X_{\max} - X_{\min}) \tag{2.17}$$

Áp suất được chuyển sang cột áp theo công thức thuỷ tĩnh:

$$H = Z_e + \frac{p}{\rho g} \qquad (Z_e:\ \text{cao do hinh hoc,\ khong phai toa do doc ong } z) \tag{2.18}$$

Trong (2.18), ký hiệu cao độ hình học được đổi thành Z_e thay vì z như bản trước. Lý do: chữ z đã được dùng cho toạ độ dọc trục ống trong (2.1), (2.2) và cho vị trí rò $z\ell$. Dùng cùng một chữ cho hai đại lượng khác nhau trong cùng một bài là nguồn nhầm lẫn không cần thiết, nhất là khi sinh viên phải chuyển giữa Mục 2 và mục này.

Đại lượng	Chuyển đổi	Ghi chú
1 bar	10^5 Pa	—
Áp suất sang cột áp	H = Z_e + p/(ρg)	Nước 20 °C: 1 bar ≈ 10,197 m cột nước
1 L/min	$1{,}6667\times10^{-5}$ m³/s	Quy đổi một lần, tại PLC hiện trường

Đại lượng	Chuyển đổi	Ghi chú
Chu kỳ lấy mẫu	Ts = 1 s trong tập dữ liệu nhận dạng	Đủ theo Bảng 10 với b = 324 m/s
Dấu thập phân	Văn bản dùng dấu phẩy, MATLAB dùng dấu chấm	Nguồn lỗi khi chép số qua lại

Bảng 11. Bảng quy đổi đơn vị. Hai dòng cuối được thêm so với bản trước.

Ba quy tắc đi kèm. Thứ nhất, quy đổi thực hiện một lần duy nhất tại nơi phát sinh dữ liệu, và mọi khâu sau đó làm việc với đơn vị SI. Thứ hai, giá trị thô và giá trị sau quy đổi được lưu song song để truy vết. Thứ ba, sau khi quy đổi phải đối chiếu dải giá trị với Bảng 7 — giá trị nằm ngoài dải là dấu hiệu sai đơn vị chứ không phải nhiễu.

9. Nhận dạng tham số từ dữ liệu thực



Hình 4. Quy trình xây dựng và nhận dạng mô hình.

9.1. Quy trình

1. Thu dữ liệu ở trạng thái không rò, trong miền vận hành ổn định, có ít nhất một đoạn quá độ.
2. Kiểm tra timestamp, sequence number, cờ chất lượng và đơn vị theo Bảng 11.
3. Tạo các tín hiệu H_1, H_3, Q_1, Q_2 ở Ts = 1 s; tách tập theo Mục 9.4.
4. Khai báo a_1, a_2, μ, cận và điều kiện đầu tập trung một chỗ, không rải trong các khối Simulink.
5. Chuẩn hoá thang tham số theo Mục 9.2 trước khi chạy tối ưu.
6. Chọn hàm mục tiêu từ sai lệch chuẩn hoá giữa đầu ra mô hình và dữ liệu đo.
7. Tối ưu có cận, thử ít nhất năm bộ giá trị khởi tạo khác nhau, kiểm tra phần dư.
8. Chạy kiểm chứng nhất quán theo Mục 7 TRƯỚC khi báo cáo kết quả.

9.2. Chuẩn hoá thang tham số

Mục này là mới và giải quyết một trở ngại thực tế. Bộ tham số cần ước lượng có $a_2 \approx 3{,}3\times10^{7}$ đứng cạnh μ ở bậc 10^{-3} — chênh khoảng mười bậc độ lớn. Đưa thẳng vào bộ tối ưu, ma trận Jacobi có số điều kiện rất xấu: thuật toán chỉ "nhìn thấy" a_2 và coi các tham số còn lại gần như hằng số. Hiện tượng này thường bị hiểu nhầm thành "dữ liệu kém".

Cách xử lý là tối ưu trên biến logarit, vừa đưa ba tham số về cùng thang vừa tự động bảo đảm chúng dương:

$$\theta = [\ln a_1,\ \ln a_2,\ \ln \mu]^{\mathrm{T}} \tag{2.19}$$

Hai kênh đầu ra cũng chênh thang, nên hàm phần dư phải chuẩn hoá theo độ lệch chuẩn từng kênh; nếu không, kênh cột áp sẽ lấn át hoàn toàn kênh lưu lượng:

$$r(\theta) = \left[\frac{\hat{Q}_1(\theta) - Q_1}{\sigma_{Q_1}};\ \frac{\hat{H}_3(\theta) - H_3}{\sigma_{H_3}}\right], \qquad \theta^{\star} = \arg\min_{\theta} \|r(\theta)\|_2^2 \tag{2.20}$$

Nếu dùng giao diện Parameter Estimator, khai báo trường Scale của mỗi tham số bằng chính giá trị khởi tạo của nó cho kết quả tương đương.

9.3. Kiểm tra khả nhận dạng trước khi tối ưu

Trước khi chạy tối ưu, phải trả lời: với tập dữ liệu đang có, tham số nào thực sự nhận dạng được. Cách làm: nhiễu từng tham số ±1 %, chạy mô phỏng, lấy sai phân trung tâm để lập ma trận độ nhạy chuẩn hoá theo độ lệch chuẩn của kênh đo. Đọc kết quả theo hai chỉ số.

- Cột nào của ma trận độ nhạy có biên độ nhỏ hơn hẳn các cột khác thì tham số tương ứng gần như không ảnh hưởng đến đầu ra. Tham số đó không nhận dạng được và nên cố định bằng giá trị thiết kế thay vì để bộ tối ưu tự do.
- Số điều kiện lớn của tích ma trận độ nhạy với chính nó báo hiệu hai tham số bù trừ nhau. Khi đó bài toán có vô số nghiệm gần bằng nhau và giá trị tìm được không mang ý nghĩa vật lý.

Kiểm tra này giải thích một quan sát ở Bảng 12: sau nhận dạng, a_1 chỉ đổi 0,004 % còn μ đổi 25 %. Mức thay đổi gần bằng không của a_1 cho thấy dữ liệu hầu như không xác định được nó — giá trị cuối cùng chủ yếu do giá trị khởi tạo quyết định. Nếu giá trị khởi tạo sai thì kết quả thừa hưởng sai sót, và đây là một trong bốn khả năng đã nêu ở Mục 7.4.

Đề nghị cho bản kế tiếp của đề tài: cố định $a_1 = gA$ theo hình học đo được và a_2 theo vận tốc sóng của vật liệu, chỉ nhận dạng μ từ dữ liệu. Cách này ít bậc tự do hơn nhưng cho tham số có ý nghĩa vật lý, và tránh được đúng loại sai sót mà Mục 7 phát hiện.

9.4. Tách tập dữ liệu

Tập dữ liệu của đề tài gồm 2.000 mẫu ở Ts = 1 s, tương đương khoảng 33 phút. Quy ước chia:

Tập	Tỷ lệ	Số mẫu	Dùng để	Ràng buộc
Huấn luyện	60 %	≈ 1200	Chạy tối ưu tìm tham số	Phải chứa ít nhất một đoạn quá độ
Kiểm chứng	20 %	≈ 400	Chọn giữa các nghiệm cục bộ	Không tham gia hàm mục tiêu
Kiểm tra cuối	20 %	≈ 400	Báo cáo độ phù hợp và phần dư	Chỉ dùng một lần, sau khi đã chốt tham số

Bảng 12. Phân chia dữ liệu cho nhận dạng.

Chia theo đoạn thời gian liên tục, không chia ngẫu nhiên theo mẫu. Chia ngẫu nhiên làm rò rỉ thông tin giữa các tập vì các mẫu liền kề gần như giống nhau.

9.5. Kết quả nhận dạng của đề tài

Tham số	Giá trị khởi tạo	Giá trị nhận dạng	Thay đổi tương đối	Nhận xét
a_1	0,04802	0,048002	−0,004 %	Gần như không đổi: dữ liệu không xác định được a_1
a_2	$3{,}253853\times10^{7}$	$3{,}2832\times10^{7}$	+0,90 %	Thay đổi nhỏ; giá trị này nhất quán với vật liệu (Mục 7.3)
μ	0,0059266	0,0044301	−25,25 %	Thay đổi đáng kể; nhưng không nhất quán với vật lý (Bảng 9)

Bảng 13. Kết quả nhận dạng và mức thay đổi. Hai cột cuối được thêm so với bản trước.

Cột "Thay đổi tương đối" là bổ sung có ý nghĩa: nó cho thấy ngay rằng chỉ có μ được dữ liệu thực sự tác động, còn a_1 và a_2 về cơ bản giữ nguyên giá trị khởi tạo. Trình bày cả ba tham số như thể cả ba đều đã được nhận dạng là một cách báo cáo gây hiểu nhầm.

10. Kiểm chứng và giới hạn

1. So sánh Q_1 và H_3 mô phỏng với tín hiệu đo trên cùng trục thời gian, dùng tập kiểm tra cuối.
2. Kiểm tra phần dư có trung bình gần 0 và không có xu hướng theo thời gian. Nếu phần dư còn xu hướng rõ rệt thì lỗi nằm ở cấu trúc mô hình, không ở tham số; tăng thêm vòng lặp tối ưu không giải quyết được.
3. Chạy kiểm chứng nhất quán theo Mục 7: suy ngược D, b và h_f, đối chiếu với Bảng 7 và Bảng 8.
4. Thử trường hợp giới hạn: đặt $\lambda\ell = 0$ vào mô hình rò và xác nhận nó trở về mô hình không rò.
5. Không suy rộng tham số ra ngoài miền lưu lượng và áp suất đã khảo sát.
6. Ghi phiên bản dữ liệu, mô hình và bộ tham số trong báo cáo, kèm phiên bản MATLAB.

Thứ tự trên là có chủ đích. Bước 3 được đặt trước bước 5 vì một bộ tham số không qua được kiểm chứng nhất quán thì không cần bàn đến miền suy rộng — nó chưa dùng được ngay trong miền đã khảo sát.

11. Lỗi thường gặp và cách kiểm tra

Biểu hiện	Nguyên nhân thường gặp	Cách kiểm tra
Mô hình rò không phản ứng với $\lambda\ell$	Thiếu số hạng $-\lambda\ell\sqrt{H_2}$ trong phương trình $\dot{H}_2$	Đặt $\lambda\ell = 0$ và $\lambda\ell \neq 0$, so đáp ứng — Mục 5.1
Mô hình mất ổn định khi dòng đảo chiều	Viết μQ^2 thay vì $\mu Q\|Q\|$	Cho Q đổi dấu và kiểm tra dấu của lực cản — Mục 4.1
Đáp ứng sai bậc độ lớn	Sai đơn vị L/min ↔ m^3/s hoặc bar ↔ m	Đối chiếu dải giá trị với Bảng 7 — Mục 8

Biểu hiện	Nguyên nhân thường gặp	Cách kiểm tra
NaN hoặc Inf khi zℓ gần biên	Không chặn giá trị trước khi chia và lấy căn	Áp dụng (2.11) trước mỗi lần tính — Mục 5.2
Tối ưu chỉ đổi một tham số	Chênh lệch thang tham số mười bậc	Tối ưu trên biến logarit — Mục 9.2
Tham số hội tụ nhưng vô nghĩa vật lý	Không kiểm chứng nhất quán	Suy ngược D, b, h_f — Mục 7
Độ phù hợp cao nhưng dự báo kém	Đánh giá trên chính tập huấn luyện	Tách tập theo Bảng 12
Nhầm cao độ với toạ độ dọc ống	Dùng chung ký hiệu z cho hai đại lượng	Dùng Z_e cho cao độ — (2.18)
Mô hình không rò và mô hình rò lệch nhau	Hai mô hình có quy ước đầu vào khác nhau	Mô hình không rò: u = [H_1, Q_2]; mô hình rò: u = [H_1, H_3]

Bảng 14. Lỗi thường gặp. Toàn bộ bảng này là mới.

12. Giới hạn của mô hình

Mô hình tập trung năm trạng thái là một xấp xỉ, và biết nó xấp xỉ ở đâu quan trọng không kém việc biết nó cho kết quả gì.

- Mô hình gộp toàn bộ động học phân bố của một đoạn ống vào một trạng thái, nên chỉ mô tả được mode dao động cơ bản. Các mode bậc cao và hiện tượng sóng phản xạ nhiều lần không được tái tạo.
- Giả thiết một điểm rò làm mô hình không dùng được khi có nhiều điểm rò đồng thời. Khi đó bộ quan sát sẽ hội tụ về một vị trí "trung bình" không tương ứng với điểm rò nào.
- Hệ số ma sát gộp μ giả định tổn thất tỉ lệ Q|Q|. Ở chế độ chảy tầng, tổn thất tỉ lệ tuyến tính với Q, nên mô hình sai ở lưu lượng rất thấp. Với Re ≈ $1{,}25\times10^4$ tại điểm làm việc thì giả thiết chảy rối là hợp lý, nhưng biên dưới của miền vận hành cần được kiểm tra.

- Hai trạng thái tăng cường có đạo hàm bằng không chỉ đúng khi lỗ rò không thay đổi trong phiên thử. Với rò do nứt lan dần, giả thiết này hỏng và $\lambda\ell$ phải được mô hình hoá là biến thiên chậm.
- Tham số chỉ có ý nghĩa trong miền dữ liệu đã khảo sát. Vì tập nhận dạng của đề tài chỉ dài khoảng 33 phút ở một điểm làm việc, miền hợp lệ hẹp hơn nhiều so với dải vận hành thực tế.

13. Hoạt động STEM

Mỗi nhóm nhận sơ đồ tuyến ống, thông số hình học và bảng tín hiệu. Nhiệm vụ được sắp theo thứ tự bắt buộc.

1. Lập bảng biến – đơn vị và kiểm tra thứ nguyên của cả hai phương trình cơ sở theo mẫu Bảng 6.
2. Thiết lập mô hình không rò, ghi rõ trạng thái và đầu vào.
3. Mở rộng sang mô hình một điểm rò, đủ năm phương trình. Xác nhận bằng phép thử $\lambda\ell = 0$.
4. Từ thông số hình học và vật liệu, tính trước $a_1 = gA$, b theo (2.14) và $\mu = f/(2DA)$. Đây là giá trị dự kiến, dùng làm mốc đối chiếu.
5. Đề xuất kế hoạch nhận dạng có cận, có chuẩn hoá thang và có tách tập.
6. Sau khi có kết quả, chạy kiểm chứng nhất quán theo Mục 7 và so với mốc ở bước 4.

13.1. Bài tập cài lỗi có chủ đích

Yêu cầu nhóm "kiểm tra ít nhất một lỗi đơn vị và giải thích ảnh hưởng". Làm rõ cách tổ chức hoạt động này để nó thực sự diễn ra được. Giảng viên phát cho mỗi nhóm một tệp dữ liệu đã bị sửa ngầm một chỗ, mỗi nhóm một lỗi khác nhau:

Lỗi được cài	Biểu hiện nhóm sẽ thấy	Công cụ phát hiện
Lưu lượng để nguyên ở L/min	Đáp ứng sai bậc; μ nhận dạng lệch khoảng 3×10^9 lần	Đối chiếu dải giá trị với Bảng 7
Áp suất để nguyên ở bar	Cột áp chỉ khoảng 2 – 3 thay vì 20 – 30	Đối chiếu dải giá trị với Bảng 7

Lỗi được cài	Biểu hiện nhóm sẽ thấy	Công cụ phát hiện
Đường kính ngoài dùng làm đường kính trong	A lớn hơn 50 %; a_1 và μ lệch tương ứng	Suy ngược D từ a_1 — Mục 7.1
Bỏ số hạng $-\lambda\ell\sqrt{H_2}$ trong $\dot{H}_2$	Mô hình rò cho cùng kết quả với mọi $\lambda\ell$	Phép thử $\lambda\ell = 0$ — Mục 5.1
Viết μQ^2 thay vì $\mu Q\|Q\|$	Mô hình phân kỳ khi cho dòng đảo chiều	Cho Q đổi dấu — Mục 4.1

Bảng 15. Bộ lỗi cài sẵn cho hoạt động nhóm.

Nhóm phải nêu được ba điều: lỗi là gì, phát hiện bằng công cụ nào, và nếu không phát hiện thì hậu quả lan tới đâu trong chuỗi BG2 → BG3 → BG4. Câu hỏi thứ ba là quan trọng nhất, vì nó cho sinh viên thấy chi phí thật của một sai sót ở khâu mô hình hoá.

14. Câu hỏi và bài tập

14.1. Câu hỏi kiểm tra nhanh trong giờ

Sau mục	Câu hỏi
Mục 2	Từ (2.1) và (2.2), a_1 và a_2 bằng gì theo đại lượng vật lý? Tích a_1a_2 bằng gì?
Mục 3	Đơn vị của μ là gì? Suy ra bằng cách nào?
Mục 4	Vì sao viết $Q\|Q\|$ chứ không viết Q^2? Điều gì xảy ra khi $Q < 0$?
Mục 5	Trong năm phương trình của mô hình rò, $\lambda\ell$ xuất hiện ở đâu? Nếu thiếu thì sao?
Mục 6	Vì sao vận tốc truyền sóng trong ống HDPE nhỏ hơn nhiều so với trong nước tự do?
Mục 7	Nếu $a_1 = 0{,}048$ thì đường kính ống phải là bao nhiêu? Con số đó có khớp ống của đề tài không?
Mục 9	Vì sao a_1 hầu như không đổi sau nhận dạng? Điều đó nói gì về dữ liệu?

Bảng 16. Câu hỏi kiểm tra nhanh theo mục.

14.2. Bài tập

1. Từ phương trình liên tục, giải thích dấu của $Q_1 - Q_2$ trong phương trình $\dot{H}_3$ của mô hình không rò.
2. Vì sao H_2 không phải tín hiệu đo trong cấu hình hai cảm biến áp suất? Nếu lắp thêm một cảm biến giữa tuyến thì bài toán thay đổi thế nào?
3. Chứng minh rằng khi $\lambda\ell = 0$, hệ (2.7) – (2.9) trở về mô hình không rò (2.5). Chỉ rõ cách ghép hai đoạn.
4. Kiểm tra thứ nguyên của phương trình liên tục (2.2) theo mẫu Bảng 6.
5. Tính D, A và v khi Q = 10 L/min. Số Reynolds bằng bao nhiêu, chế độ chảy là gì?
6. Giải thích vì sao $z\ell = 0$ hoặc $z\ell = L$ gây kỳ dị, và vì sao chọn z_min = 5 m chứ không phải 0,1 m.
7. Từ bộ tham số ở Bảng 13, suy ngược đường kính ống và vận tốc truyền sóng. Đối chiếu với Bảng 7 và Bảng 8 rồi kết luận.
8. Dùng (2.14), tính vận tốc truyền sóng cho ống HDPE 25×2,3 và cho ống thép cùng đường kính. Giải thích chênh lệch.
9. Từ h_f ở Bảng 7 và quan hệ (2.15), tính μ vật lý. So với giá trị ở Bảng 13 và nêu ba khả năng giải thích.
10. Nêu ba kiểm tra bắt buộc trước khi chạy Parameter Estimation, và giải thích hậu quả nếu bỏ qua từng kiểm tra.
11. Giải thích vì sao phải tối ưu trên biến logarit khi a_2 và μ chênh nhau mười bậc độ lớn.
12. Đề xuất một phép kiểm chứng chéo cho bộ tham số nhận dạng, khác với ba phép đã nêu ở Mục 7.1.
13. Với b = 324 m/s và L = 200 m, tính tần số dao động riêng và chu kỳ lấy mẫu tối đa cho phép. Ts = 1 s có đạt không?

15. Đánh giá

Rubric dưới đây thay cho bảng tỷ trọng đơn thuần ở bản trước, để việc chấm nhất quán giữa các giảng viên và để sinh viên biết trước đích cần đạt.

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Quy ước biến, đơn vị và biên hệ	Thiếu đơn vị của a_1, a_2, μ, $\lambda\ell$; dùng chung ký hiệu cho hai đại lượng	Bảng biến đầy đủ đơn vị, biên hệ rõ ràng	Thêm kiểm tra thứ nguyên từng số hạng và bảng điều kiện hỏng của giả thiết	20%
Phương trình không rò và có rò	Thiếu số hạng rò hoặc thiếu phương trình trạng thái tăng cường	Đủ năm phương trình, đúng dấu, có miền hợp lệ	Thêm phép thử trường hợp giới hạn $\lambda\ell = 0$ và biện luận điểm kỳ dị	25%
Kiểm chứng nhất quán tham số	Không kiểm chứng, chấp nhận tham số vì đồ thị khớp	Suy ngược được đường kính và vận tốc sóng, có đối chiếu	Thêm đường kiểm chứng thứ ba qua tổn thất áp và biện luận nguyên nhân sai lệch	25%
Kế hoạch nhận dạng	Không có cận, không tách tập, không xử lý chênh thang	Có cận, có tách tập kiểm chứng, có chuẩn hoá thang	Thêm phân tích khả nhận dạng và đề xuất cố định tham số không nhận dạng được	20%
Giải thích giới hạn mô hình	Không nêu giới hạn, hoặc nêu chung chung	Nêu được các giả thiết và miền hợp lệ	Chỉ rõ giả thiết nào hỏng trong tình huống nào và hậu quả cụ thể	10%

Bảng 17. Rubric đánh giá.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Razvarz, S., Jafari, R., Gegov, A. (2021). Flow Modelling and Control in Pipeline Systems: A Formal Systematic Approach. Studies in Systems, Decision and Control, vol. 321. Cham: Springer. (Dẫn ở Mục 2 và Mục 5)

[2] Delgado-Aguiñaga, J. A. và cộng sự (2016). Multi-leak diagnosis in pipelines based on Extended Kalman Filter. Control Engineering Practice, 49, 139–148. (Dẫn ở Mục 5 và Mục 12; xin lưu ý mục [2] của bản trước ghi năm 1997 cho hội nghị ECC — thông tin này cần được đối chiếu lại)

[3] MathWorks. Simulink Design Optimization — Parameter Estimation Documentation. (Dẫn ở Mục 9)

[4] Danfoss. MBS 3000 Pressure Transmitter Data Sheet. (Dẫn ở Mục 8, quy đổi tín hiệu 4–20 mA)

[5] Saginomiya. PLK-1522PE Technical Data. (Dẫn ở Mục 8)

[6] Wylie, E. B., Streeter, V. L. (1993). Fluid Transients in Systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. (Dẫn ở Mục 6.1, công thức Korteweg về vận tốc truyền sóng)

[7] White, F. M. (2016). Fluid Mechanics, 8th ed. New York: McGraw-Hill. (Dẫn ở Mục 6, tổn thất Darcy–Weisbach và phương trình lỗ thoát)

[8] Tài liệu bài giảng BG1, BG3 và BG4 cùng đề tài T2025-06-01. (BG1 cung cấp ký hiệu và quy ước trạng thái đầu ra; BG3 và BG4 sử dụng mô hình và bộ tham số của bài này)

BÀI GIẢNG 3

XÂY DỰNG BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI NHẰM CHẨN ĐOÁN VỊ TRÍ ĐIỂM RÒ RỈ TRONG ĐƯỜNG ỐNG NƯỚC

Đà Nẵng – 9/2026

MỤC LỤC

THÔNG TIN BÀI GIẢNG....3
Quan hệ với BG4....3
Ghi chú về thời lượng....3
MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA....5
PHẦN A — MÔ HÌNH LPV VÀ ĐIỀU KIỆN TỔNG HỢP....7
1. Bài toán quan sát trạng thái....7
2. Biểu diễn mô hình dưới dạng LPV....8
2.1. Một quan sát nên ghi nhận ngay....9
3. Kiểm tra tính quan sát được và tính phát hiện được....9
3.1. Kết quả kiểm tra....9
3.2. Vậy vì sao trong thực nghiệm $\hat{z}\ell$ vẫn hội tụ....10
3.3. Cách xử lý được đề nghị....10
4. Miền biến lập lịch và mô hình đa diện....12
4.1. Năm biến lập lịch nhưng chỉ bốn biến độc lập....12
4.2. Một cạm bẫy phải cảnh báo....12
4.3. Cách giảm bảo thủ đúng đắn....13
5. Cấu trúc bộ quan sát và động học sai số....14
6. Điều kiện LMI ổn định bậc hai....14
6.1. Về quy ước dấu — điểm phải sửa của bản trước....14
6.2. Vì sao dùng một P chung....15
7. Cận đảm bảo H_2 — phần mở rộng tùy chọn....15
7.1. Điểm phải sửa: ràng buộc vết chứ không phải ràng buộc ma trận....16
8. Điều kiện số và vô thứ nguyên hoá....16
PHẦN B — NỘI SUY, THIẾT KẾ SỐ VÀ CHẨN ĐOÁN....18
9. Nội suy gain trong miền đa diện....18
10. Ví dụ thiết kế bằng số....18
11. Rời rạc hoá và thực thi ở chu kỳ Ts....19
12. Tổ chức thuật toán chẩn đoán....20
13. Ngưỡng phần dư và thời gian giữ....21
14. Khởi tạo và xử lý dữ liệu không hợp lệ....22
15. Chỉ tiêu đánh giá....22
15.1. Chỉ tiêu phát hiện....24
16. Phân tích vùng biên....24
17. Lỗi thường gặp và cách kiểm tra....25
18. Hoạt động STEM....26

19. Câu hỏi và bài tập 27
19.1. Câu hỏi kiểm tra nhanh trong giờ 27
19.2. Bài tập 27
20. Đánh giá 28
PHỤ LỤC — MÃ NGUỒN KIỂM TRA VÀ TỔNG HỢP 30
A1. Kiểm tra tính quan sát được — chạy trước mọi việc khác 30
A2. Giải LMI với quy ước Y = PL (YALMIP) 31
A3. Phương án không cần bộ giải LMI — đặt cực tại từng đỉnh 32
TÀI LIỆU THAM KHẢO 33

THÔNG TIN BÀI GIẢNG

Mục	Nội dung
Đối tượng	Sinh viên đã học không gian trạng thái, ổn định Lyapunov và mô hình LPV cơ bản
Thời lượng đề xuất	08 tiết, chia hai phần độc lập: • Phần A (04 tiết): mô hình LPV, tính quan sát được và điều kiện tổng hợp • Phần B (04 tiết): nội suy, thiết kế bằng số, chẩn đoán và đánh giá
Đầu vào	Mô hình một điểm rò và miền vận hành (Bảng 3), bộ tham số a_1, a_2, μ đã nhận dạng ở BG4
Phần mềm	MATLAB R2021b trở lên. Giải LMI bằng YALMIP + SeDuMi/SDPT3, hoặc Robust Control Toolbox
Phương án khi thiếu bản quyền	Toàn bộ Phần B thực hiện được bằng đặt cực tại từng đỉnh (hàm place) — xem Mục 10 và Phụ lục A3
Sản phẩm học tập	Bảng kiểm tra tính quan sát được; tập đỉnh đa diện; bộ gain L_i kèm P chung; lưu đồ chẩn đoán có ngưỡng và thời gian giữ; bảng đánh giá sai số

Bảng 1. Điều kiện tiên quyết và sản phẩm của bài giảng.

Quan hệ với BG4

BG3 và BG4 dùng chung một mô hình, một bộ tham số và một bộ dữ liệu, nhưng trả lời hai câu hỏi khác nhau. BG3 trả lời "thiết kế bộ quan sát như thế nào và điều kiện gì bảo đảm nó hội tụ"; BG4 trả lời "dựng và chạy nó trên MATLAB/Simulink như thế nào". Hai bài phải thống nhất ký hiệu, thứ tự trạng thái và quy ước dấu, nếu không sinh viên sẽ mang một quy ước của bài này sang bài kia và nhận kết quả sai mà không biết nguyên nhân. Bản hiệu chỉnh này thống nhất toàn bộ ký hiệu với bản hiệu chỉnh của BG4.

Ghi chú về thời lượng

Nội dung được cấu trúc thành hai phần giảng dạy độc lập nhằm khắc phục sự quá tải về mặt thời lượng. Trong đó, Phần A tập trung giúp sinh viên xác định khả năng

giải được của bài toán LMI, tạo nền tảng vững chắc trước khi đi sâu vào suy dẫn kỹ thuật và triển khai thuật toán ở Phần B.

MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA

Bài giảng trình bày cách chuyển mô hình phi tuyến có một điểm rò sang dạng LPV, tổng hợp bộ quan sát tại các đỉnh của miền đa diện và tổ chức thuật toán chẩn đoán. Bản hiệu chỉnh bổ sung một bước mà bản trước bỏ qua và nó quyết định toàn bộ phần còn lại: kiểm tra xem bài toán tổng hợp có nghiệm hay không, trước khi viết ra điều kiện LMI.

Toàn bài dùng một quy ước duy nhất $Y = PL$ và $L = P^{-1}Y$. Mọi công thức đều được viết lại theo quy ước này. Sinh viên phải phân biệt được kết quả ổn định bậc hai bằng LMI với một bài toán tối ưu hiệu năng H_2 hoặc $H\infty$.

Chuẩn đầu ra	Phát biểu	Mức Bloom
CLO1	Thiết lập đúng x, u, y và véc-tơ biến lập lịch; viết được A(ρ), B(ρ), C tường minh và kiểm tra bằng phép thế	Vận dụng
CLO2	Kiểm tra được tính quan sát được và phát hiện được của cặp (A(ρ), C), và giải thích được hệ quả với bài toán LMI	Phân tích
CLO3	Suy ra được phương trình sai số và điều kiện LMI ổn định bậc hai theo một quy ước dấu nhất quán	Phân tích
CLO4	Tính được trọng số nội suy và gain L(ρ) từ tập đỉnh; đánh giá được mức bảo thủ của đa diện	Vận dụng
CLO5	Xây dựng được logic chẩn đoán có ngưỡng, thời gian giữ, cờ chất lượng và xử lý trường hợp ngoài miền	Đánh giá

Bảng 2. Chuẩn đầu ra của bài giảng.

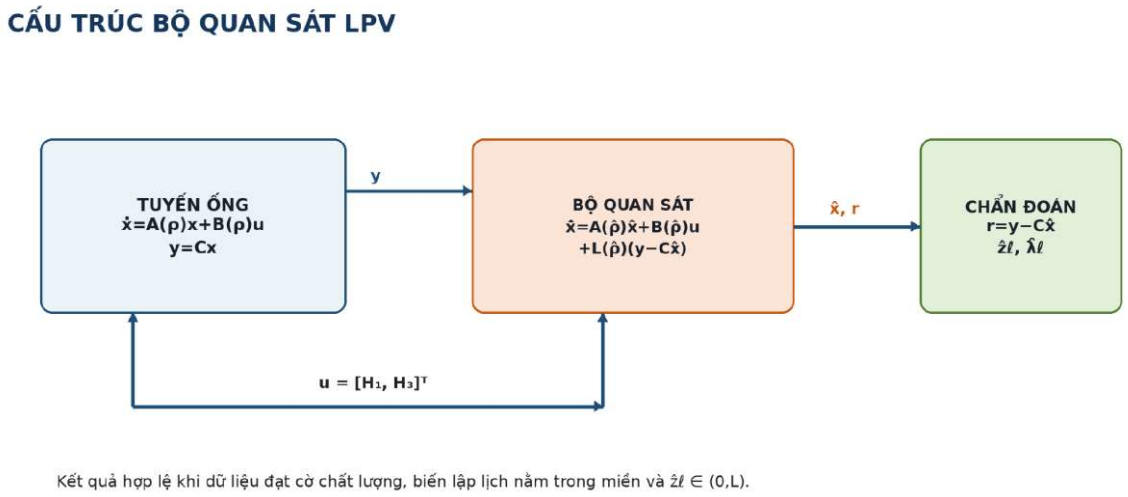
CLO	Mục nội dung	Hoạt động học	Công cụ đánh giá	Tỷ trọng
CLO1	1, 2	Lập bảng biến, viết ma trận, kiểm tra bằng phép thế	Chấm ma trận và phép thế	20%

CLO	Mục nội dung	Hoạt động học	Công cụ đánh giá	Tỷ trọng
CLO2	3	Chạy kiểm tra hạng và PBH tại các đỉnh	Bảng kết quả hạng kèm biện luận	20%
CLO3	5, 6, 7	Suy dẫn LMI, đối chiếu dấu	Bài suy dẫn có ghi rõ quy ước Y	25%
CLO4	4, 9, 10	Sinh đỉnh, tính trọng số, đặt cực hoặc giải LMI	Bộ gain kèm kiểm tra trị riêng	20%
CLO5	12, 13, 15	Thiết kế ngưỡng và lưu đồ chẩn đoán	Lưu đồ và bảng chỉ tiêu phát hiện	15%

Bảng 3. Ma trận chuẩn đầu ra – nội dung – hoạt động – đánh giá.

PHẦN A — MÔ HÌNH LPV VÀ ĐIỀU KIỆN TỔNG HỢP

1. Bài toán quan sát trạng thái



Hình 1. Cấu trúc tổng quát của bộ quan sát và khối chẩn đoán.

Cấu hình cảm biến chỉ đo H_1, H_3, Q_1 và Q_2. Cột áp tại điểm rò H_2, vị trí rò $z\ell$ và hệ số lỗ rò $\lambda\ell$ không đo trực tiếp. Bộ quan sát dùng mô hình cùng các tín hiệu đo để tái tạo ba đại lượng này. Đây là lý do tồn tại của cả bài giảng: nếu $z\ell$ đo được thì không cần bộ quan sát nào cả.

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị SI	Đo được?
H_1	Cột áp đầu tuyến	m	Có
H_2	Cột áp tại điểm rò	m	Không
H_3	Cột áp cuối tuyến	m	Có
Q_1	Lưu lượng đầu tuyến	m^3/s	Có
Q_2	Lưu lượng cuối tuyến	m^3/s	Có
$z\ell$	Vị trí rò tính từ đầu tuyến	m	Không — đại lượng cần chẩn đoán
$\lambda\ell$	Hệ số lưu lượng của lỗ rò	$m^{5/2}/s$	Không
a_1	Hệ số quán tính, $a_1 = gA$	m^3/s^2	0,048002 (BG4)
a_2	Hệ số đàn hồi, $a_2 = c^2/(gA)$	m^{-1}	$3{,}2832\times10^7$ (BG4)
μ	Hệ số ma sát gộp	m^{-3}	0,0044301 (BG4)

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị SI	Đo được?
L	Chiều dài tuyến	m	200

Bảng 4. Biến, đơn vị và khả năng đo. Bảng này là mới; bản trước không nêu đơn vị nào.

Thành phần	Biểu thức
Trạng thái	$x = [Q_1, H_2, Q_2, z\ell, \lambda\ell]^T$
Đầu vào	$u = [H_1, H_3]^T$
Đầu ra đo	$y = [Q_1, Q_2]^T = Cx$
Đại lượng cần chẩn đoán	$\hat{z}\ell$ và $\lambda\ell$
Phần dư	$r = y - C\hat{x}$

Bảng 5. Cấu trúc bài toán quan sát.

2. Biểu diễn mô hình dưới dạng LPV

Các hệ số phi tuyến được gom vào năm biến lập lịch. So với bản trước, thành phần thứ nhất và thứ năm được viết là $-\mu|Q|$ thay vì $-\mu Q$, để tích $\rho_1 Q_1$ tái tạo đúng số hạng ma sát $-\mu Q_1|Q_1|$ của mô hình gốc thay vì $-\mu Q_1^2$. Dạng bình phương làm mất dấu và mô hình sẽ sai khi dòng đảo chiều.

$$\rho = \left[-\mu|Q_1|,\ \frac{1}{z_\ell},\ -\frac{\sqrt{H_2}}{z_\ell},\ \frac{a_1}{L - z_\ell},\ -\mu|Q_2|\right]^{\mathrm{T}} \tag{3.1}$$

$$\dot{x} = A(\rho)\,x + B(\rho)\,u, \qquad y = Cx, \qquad x = [Q_1, H_2, Q_2, z_\ell, \lambda_\ell]^{\mathrm{T}} \tag{3.2}$$

Cần lưu ý một quy ước không đối xứng và rất dễ nhầm: ρ_4 đã bao gồm hệ số a_1 bên trong, còn ρ_2 và ρ_3 thì không. Ai lập ma trận $A(\rho)$ mà nhân thêm a_1 vào ρ_4 sẽ được một mô hình sai lệch đúng bằng một lần a_1, và sai số này không lộ ra trên đồ thị.

A(ρ)	Q₁	H₂	Q₂	zℓ	λℓ
$\dot{Q}_1$	ρ_1	$-a_1\rho_2$	0	0	0
$\dot{H}_2$	$a_2\rho_2$	0	$-a_2\rho_2$	0	$a_2\rho_3$
$\dot{Q}_2$	0	ρ_4	ρ_5	0	0
$\dot{z}\ell$	0	0	0	0	0
$\dot{\lambda}\ell$	0	0	0	0	0

Bảng 6. Ma trận A(ρ). Hàng là đạo hàm trạng thái, cột là trạng thái.

B(ρ)	H_1	H_3		C	Q_1 H_2 Q_2 $z\ell$ $\lambda\ell$
$\dot{Q}_1$	$a_1\rho_2$	0		$y_1 = Q_1$	1 0 0 0 0
$\dot{H}_2$	0	0		$y_2 = Q_2$	0 0 1 0 0
$\dot{Q}_2$	0	$-\rho_4$			
$\dot{z\ell}$	0	0			
$\dot{\lambda\ell}$	0	0			

Bảng 7. Ma trận B(ρ) và ma trận đầu ra C.

Thay định nghĩa (3.1) vào ba hàng đầu phải thu lại đúng hệ phi tuyến. Đây là bước kiểm tra dấu bắt buộc trước khi tổng hợp bộ quan sát, và là bài tập số 2 ở Mục 19.

2.1. Một quan sát nên ghi nhận ngay

Nhìn Bảng 6 theo cột: cột thứ tư, ứng với trạng thái $z\ell$, toàn số 0. Nhìn Bảng 7: cột thứ tư của C cũng toàn số 0. Nói cách khác, trong biểu diễn LPV này vị trí rò không tác động lên bất kỳ đạo hàm trạng thái nào và cũng không xuất hiện ở đầu ra. Nó chỉ ảnh hưởng gián tiếp qua các biến lập lịch ρ_2, ρ_3 và ρ_4. Mục 3 sẽ cho thấy nhận xét tưởng như vô hại này quyết định toàn bộ bài toán tổng hợp.

3. Kiểm tra tính quan sát được và tính phát hiện được

Trước khi viết ra bất kỳ điều kiện LMI nào, phải trả lời câu hỏi: bài toán tìm L để $A - LC$ ổn định có nghiệm hay không.

3.1. Kết quả kiểm tra

Với A(ρ) và C ở Bảng 6 và Bảng 7, và với miền vận hành ở Bảng 9, kết quả kiểm tra tại toàn bộ các đỉnh như sau:

Phép kiểm tra	Kết quả	Kết luận
Hạng ma trận quan sát $O = [C; CA; \ldots; CA^4]$	4 tại mọi đỉnh ($n = 5$)	Hệ không quan sát được hoàn toàn
Cột thứ tư của O	Bằng 0 tuyệt đối	Trạng thái không quan sát được là $z\ell$
Kiểm tra PBH tại $\lambda = 0$	$\text{rank}([A - 0\cdot I\ ;\ C]) = 4 < 5$	Mode không quan sát được nằm tại gốc

Phép kiểm tra	Kết quả	Kết luận
Tính phát hiện được (detectability)	Không thỏa mãn	Mode không quan sát được không ổn định tiệm cận
σ_1/σ_4 của ma trận quan sát	$\approx 2{,}4\times10^{10}$	Ngay phần quan sát được cũng điều kiện rất xấu

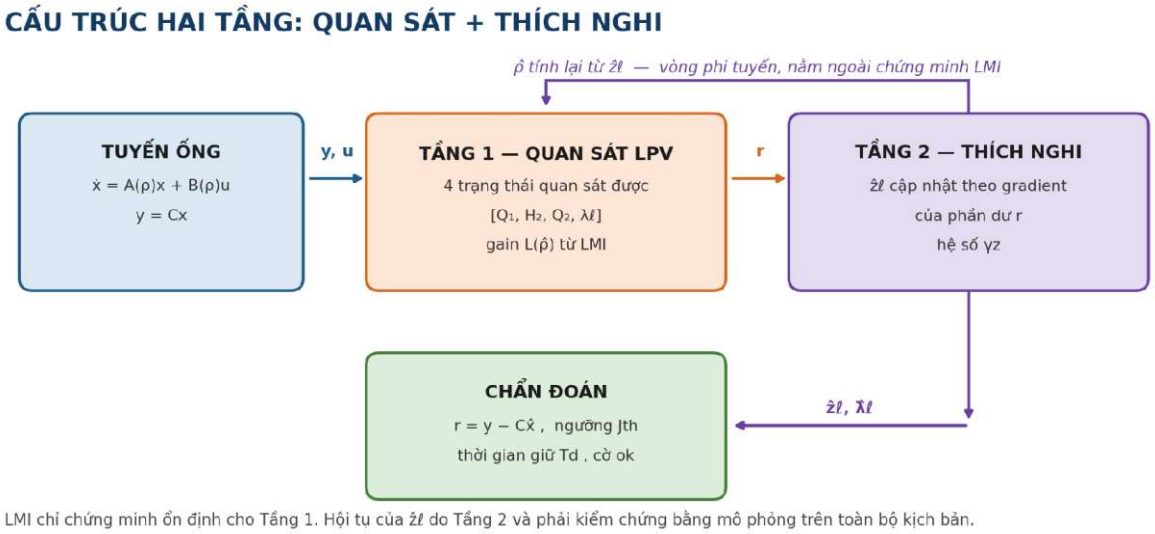
Bảng 8. Kết quả kiểm tra tính quan sát được của mô hình LPV.

$$\operatorname{rank}\left[A(\rho)^{\mathrm{T}} \;\; C^{\mathrm{T}}\right]_{\lambda=0}^{\mathrm{T}} = 4 < 5 \quad \Rightarrow \quad (A(\rho), C) \text{ khong phat hien duoc} \tag{3.3}$$

Hệ quả trực tiếp và không thể tránh: vì tồn tại một mode không quan sát được nằm tại gốc, mọi ma trận A − LC đều giữ nguyên trị riêng bằng 0 với bất kỳ L nào. Điều kiện Lyapunov ở Mục 6 đòi hỏi A − LC ổn định tiệm cận với tốc độ suy giảm $\alpha > 0$, nên bài toán LMI năm trạng thái vô nghiệm tại mọi đỉnh. Đây không phải lỗi của bộ giải, không phải vấn đề dung sai, và không sửa được bằng cách nới miền hay đổi α.

3.2. Vậy vì sao trong thực nghiệm $\hat{z}\ell$ vẫn hội tụ

Vì cơ chế thật không phải cơ chế tuyến tính. Biến lập lịch ước lượng $\hat{\rho}$ được tính từ chính $\hat{x}$, trong đó có $\hat{z}\ell$. Khi $\hat{z}\ell$ sai, $\hat{\rho}$ sai, và mô hình bên trong bộ quan sát lệch khỏi đối tượng. Sai lệch đó xuất hiện trong động học sai số dưới dạng một số hạng bất tương xứng và làm phần dư tăng lên. Chính phần dư này, chứ không phải số hạng $L(y - C\hat{x})$, là thứ đẩy $\hat{z}\ell$ về giá trị đúng.



Hình 2. Cấu trúc hai tầng: bộ quan sát LPV cho hệ con quan sát được và luật thích nghi cho vị trí rò.

3.3. Cách xử lý được đề nghị

1. Tách $z\ell$ ra khỏi véc-tơ trạng thái của bài toán LMI. Hệ con còn lại gồm bốn trạng thái $[Q_1, H_2, Q_2, \lambda\ell]$ với C rút gọn tương ứng. Hệ con này quan sát được: hạng ma trận quan sát bằng 4 tại mọi đỉnh đã kiểm tra.
2. Thiết kế L cho hệ con bốn trạng thái theo Mục 6, hoặc bằng đặt cực theo Mục 10.
3. Cập nhật $\hat{z}\ell$ bằng một luật thích nghi lấy phần dư làm tín hiệu dẫn, chẳng hạn dạng gradient:

$$\dot{\hat{z}}_\ell = -\gamma_z \frac{\partial J}{\partial \hat{z}_\ell}, \qquad J = \frac{1}{2} r^{\mathrm{T}} W r, \qquad \gamma_z > 0 \tag{3.4}$$

4. Phát biểu rõ trong báo cáo rằng chứng minh LMI chỉ bảo đảm ổn định cho hệ con, còn hội tụ của $\hat{z}\ell$ phụ thuộc điều kiện kích thích bền và phải được kiểm chứng bằng mô phỏng trên toàn bộ bộ kịch bản.

Cách trình bày này không làm bài giảng yếu đi. Ngược lại, nó cho sinh viên thấy đúng ranh giới giữa cái chứng minh được và cái phải kiểm chứng bằng thực nghiệm — điều mà một bài giảng về chẩn đoán nhất thiết phải dạy.

4. Miền biến lập lịch và mô hình đa diện

Mỗi ρ_n được chặn bởi giá trị nhỏ nhất và lớn nhất suy từ miền vận hành. Năm biến sinh ra tối đa $2^5 = 32$ đỉnh; tại mỗi đỉnh $A(\rho)$ trở thành ma trận hằng A_i. Miền vị trí phải loại trừ vùng sát 0 và sát L để các hệ số $1/z\ell$ và $a_1/(L - z\ell)$ không tăng vô hạn.

Biến vật lý	Miền vận hành	Biến lập lịch sinh ra	Khoảng giá trị
Q_1	0,010 – 0,030 m³/s	$\rho_1 = -\mu\|Q_1\|$	$-1{,}33\times10^{-4}$ … $-4{,}43\times10^{-5}$
Q_2	0,010 – 0,030 m³/s	$\rho_5 = -\mu\|Q_2\|$	$-1{,}33\times10^{-4}$ … $-4{,}43\times10^{-5}$
H_2	10 – 30 m	$\rho_3 = -\sqrt{H_2}/z\ell$	phụ thuộc cả $z\ell$
$z\ell$	5 – 195 m	$\rho_2 = 1/z\ell$	$5{,}13\times10^{-3}$ … 0,200
$z\ell$	(cùng biến trên)	$\rho_4 = a_1/(L - z\ell)$	$2{,}46\times10^{-4}$ … $9{,}60\times10^{-3}$

Bảng 9. Miền vận hành và miền biến lập lịch tương ứng.

4.1. Năm biến lập lịch nhưng chỉ bốn biến độc lập

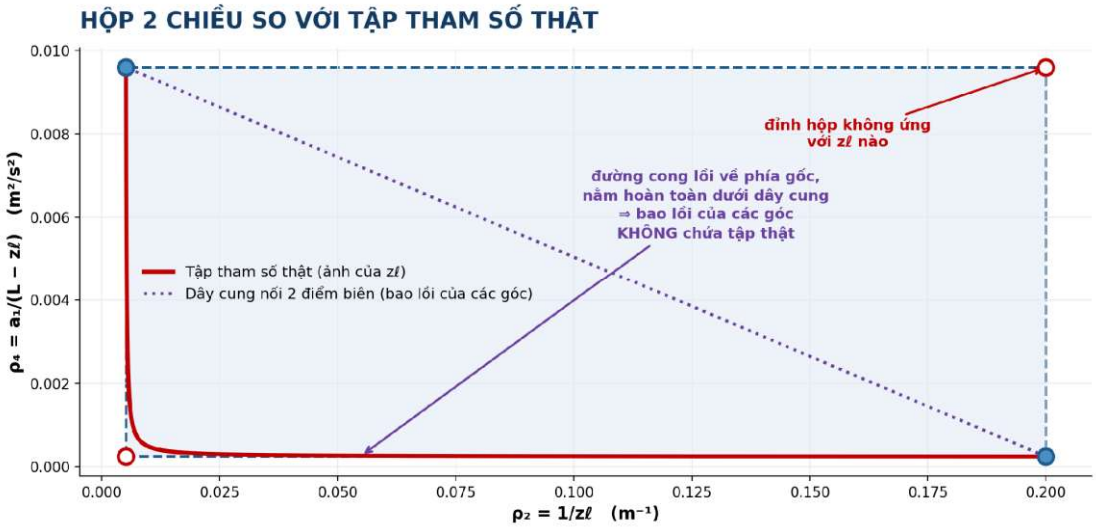
Bảng 9 để lộ một điểm mà bản trước không nêu: ρ_2, ρ_3 và ρ_4 đều sinh từ cùng một biến vật lý $z\ell$. Toàn bộ năm biến lập lịch chỉ được sinh từ bốn đại lượng độc lập là Q_1, Q_2, H_2 và $z\ell$. Tập tham số thật vì vậy là một mặt bốn chiều nằm bên trong hộp năm chiều.

$$\rho_2 = \frac{1}{z_\ell} \quad \text{va} \quad \rho_4 = \frac{a_1}{L - z_\ell} \quad \text{cung sinh tu } z_\ell$$

Hệ quả: nhiều đỉnh của hộp không ứng với bất kỳ trạng thái vật lý nào. Kiểm tra bằng số trên lưới miền vận hành cho thấy chỉ khoảng một phần ba số đỉnh là thực sự đạt tới được; phần còn lại vẫn bị đưa vào bài toán LMI dưới dạng ràng buộc, làm nghiệm bảo thủ hơn mức cần thiết và trong nhiều trường hợp là nguyên nhân khiến bài toán vô nghiệm.

4.2. Một cạm bẫy phải cảnh báo

Phản xạ tự nhiên khi biết điều trên là thay hộp bằng bao lồi của ảnh các góc miền vật lý — lấy 16 góc của hộp bốn chiều, tính ρ tại mỗi góc, rồi dùng 16 điểm đó làm đỉnh đa diện. Cách này SAI, và sai nghiêm trọng vì nó tạo ra một đa diện không phủ hết tập tham số.



Hình 3. Chiếu lên mặt phẳng (ρ_2, ρ_4): tập tham số thật là một đường cong lồi nằm hoàn toàn dưới dây cung nối hai điểm biên.

Lý do nằm ở Hình 3. Vì $1/z\ell$ và $a_1/(L - z\ell)$ đều là hàm lồi của $z\ell$, ảnh của đoạn [5 m, 195 m] là một đường cong lồi về phía gốc chứ không phải một đoạn thẳng. Bao lồi của hai điểm biên là dây cung, và đường cong nằm hoàn toàn bên dưới dây cung. Kiểm tra bằng số với 400 điểm vật lý lấy ngẫu nhiên: không một điểm nào nằm trong bao lồi của 16 điểm góc. Một bộ gain thiết kế trên đa diện đó không có bảo đảm gì cho phần lớn miền vận hành thật.

Ghi nhớ chung: ảnh của một hộp qua ánh xạ phi tuyến không bằng bao lồi của ảnh các góc. Hộp bao ngoài luôn hợp lệ; bao lồi của ảnh các góc thì không.

4.3. Cách giảm bảo thủ đúng đắn

Giữ hộp bao ngoài — vì nó chắc chắn chứa tập tham số — nhưng thu nhỏ hộp bằng cách chia miền $z\ell$ thành các đoạn con và thiết kế một bộ gain riêng cho mỗi đoạn. Hiệu quả rất rõ:

Cách chia miền $z\ell$	Khoảng của ρ_2	Tỷ số $\rho_2^{max}/\rho_2^{min}$
Một miền duy nhất 5 – 195 m	$5{,}13\times10^{-3}$ … 0,200	39,0
Vùng 1: 5 – 20 m	0,050 … 0,200	4,0
Vùng 2: 20 – 60 m	0,0167 … 0,050	3,0
Vùng 3: 60 – 195 m	$5{,}13\times10^{-3}$ … 0,0167	3,3

Bảng 10. Chia vùng theo vị trí rò làm giảm mạnh độ rộng miền tham số.

Chi phí là phải giải ba bài toán LMI thay vì một, và phải xử lý chuyển vùng khi $\hat{z}\ell$ đi qua ranh giới. Đổi lại, mỗi bài toán dễ có nghiệm hơn nhiều và gain thu được ít bảo thủ hơn hẳn. Đây là bài tập nhóm được đề nghị ở Mục 18.

5. Cấu trúc bộ quan sát và động học sai số

Bộ quan sát có dạng chuẩn Luenberger với ma trận phụ thuộc biến lập lịch ước lượng. Ba dấu mũ trong công thức dưới đây không phải chi tiết trình bày mà là nội dung: $\hat{\rho}$ tính từ $\hat{x}$ chứ không từ x, vì x không đo được.

$$\dot{\hat{x}} = A(\hat{\rho})\,\hat{x} + B(\hat{\rho})\,u + L(\hat{\rho})(y - C\hat{x}), \qquad r = y - C\hat{x} \tag{3.5}$$

Đặt $e = x - \hat{x}$. Khai triển đầy đủ, không giả thiết gì thêm, động học sai số là:

$$\dot{e} = (A(\rho) - L(\hat{\rho})C)e + \; d(\rho, \hat{\rho}), \qquad d = [A(\rho) - A(\hat{\rho})]\,\hat{x} + [B(\rho) - B(\hat{\rho})]\,u \tag{3.6}$$

Với ρ xem như tín hiệu ngoại sinh đã biết, (3.6) rút về dạng danh định dùng cho phần tổng hợp:

$$\dot{e} = (A(\rho) - L(\rho)C)e \tag{3.7}$$

Đây là bước xấp xỉ, và phải gọi đúng tên là xấp xỉ. Điều kiện LMI ở Mục 6 bảo đảm ổn định cho (3.7); tác động của $d(\rho, \dot{\rho})$ được xử lý ở tầng thích nghi và kiểm chứng bằng mô phỏng.

6. Điều kiện LMI ổn định bậc hai

Chọn hàm Lyapunov toàn phương với một ma trận P chung cho toàn miền, và yêu cầu tốc độ suy giảm $\alpha > 0$:

$$V = e^{\mathrm{T}} P e, \qquad P = P^{\mathrm{T}} \succ 0, \qquad \dot{V} \leq -2\alpha V \tag{3.8}$$

Viết ra tường minh tại mỗi đỉnh của đa diện:

$$(A_i - L_i C)^{\mathrm{T}} P + P(A_i - L_i C) + 2\alpha P \prec 0, \qquad i = 1, \ldots, N_v \tag{3.9}$$

Bất đẳng thức (3.9) phi tuyến theo cặp biến (P, L) vì chứa tích PL. Phép đổi biến chuẩn khử tích này. Bài giảng dùng MỘT quy ước duy nhất:

$$Y_i = PL_i \implies A_i^{\mathrm{T}} P + P A_i - C^{\mathrm{T}} Y_i^{\mathrm{T}} - Y_i C + 2\alpha P \prec 0, \qquad L_i = P^{-1} Y_i \tag{3.10}$$

6.1. Về quy ước dấu — điểm phải sửa của bản trước

Vị trí trong bản trước	Quy ước ngụ ý	Dấu của số hạng chứa Y
Phần Mục tiêu và chuẩn đầu ra	$Y = PL$, $L = P^{-1}Y$	Phải là dấu trừ

Vị trí trong bản trước	Quy ước ngụ ý	Dấu của số hạng chứa Y
Văn bản Mục 5 và công thức (3.5), (3.6)	$Y = -PL$, $L = -P^{-1}Y$	Dấu cộng
Công thức (3.7) về cận H_2	$Y = +PL$	Dấu trừ

Bảng 11. Ba quy ước mâu thuẫn trong bản trước.

Cả hai quy ước đều đúng về mặt toán học nếu dùng nhất quán. Vấn đề là dùng lẫn: sinh viên giải LMI theo (3.5) rồi khôi phục gain theo (3.7), hoặc ngược lại, sẽ nhận một L sai dấu. Bộ quan sát khi đó phân kỳ, và triệu chứng — phần dư tăng theo hàm mũ ngay từ mẫu đầu — rất dễ bị quy nhầm cho điều kiện đầu hoặc cho dữ liệu.

Quy tắc kiểm tra một dòng: sau khi tính L_i, luôn kiểm tra trị riêng của $A_i - L_iC$ phải nằm bên trái đường thẳng $\mathrm{Re}(s) = -\alpha$. Nếu chúng nằm bên phải, gần như chắc chắn đã sai dấu.

Một lỗi in cũng cần sửa: công thức (3.5) của bản trước viết $A(\rho)P + PA(\rho)$ mà thiếu chuyển vị ở số hạng đầu. Dạng đúng luôn là $A(\rho)^{\mathrm{T}}P + PA(\rho)$, như (3.10) ở trên.

6.2. Vì sao dùng một P chung

Một P chung cho tất cả các đỉnh chính là định nghĩa của ổn định bậc hai: nó bảo đảm ổn định với mọi quỹ đạo biến thiên của ρ, kể cả biến thiên nhanh tùy ý. Đây là điều kiện đủ và có phần bảo thủ. Nếu biết ρ biến thiên chậm, có thể dùng hàm Lyapunov phụ thuộc tham số để giảm bảo thủ, nhưng khi đó phải chặn thêm tốc độ biến thiên của ρ [1].

Quy mô bài toán, để sinh viên hình dung trước khi bấm nút giải: với hệ con bốn trạng thái và Nv đỉnh, P đối xứng 4×4 cho 10 biến, mỗi Y_i cỡ 4×2 cho 8 biến, tổng cộng $10 + 8\mathrm{Nv}$ biến quyết định và Nv bất đẳng thức ma trận cỡ 4. Với Nv = 16 là 138 biến — hoàn toàn trong tầm của SeDuMi trên máy tính cá nhân.

7. Cận đảm bảo H_2 — phần mở rộng tùy chọn

Điều kiện dưới đây không tính chuẩn H_2 của hệ; nó cho một cận trên đảm bảo cho toàn bộ đa diện, vì vẫn dùng chung một P.

Xét $\dot{e} = (A_i - L_iC)e + Ew$ và $z = Cz \cdot e$, trong tọa độ đã chuẩn hóa chọn E = I và Cz = I. Nếu chọn trọng số khác thì phải lưu ma trận trọng số và quy tắc chuẩn hóa kèm kết quả.

$$A_i^{\mathrm{T}}P + PA_i - C^{\mathrm{T}}Y_i^{\mathrm{T}} - Y_iC + C_z^{\mathrm{T}}C_z + 2\alpha P \prec 0, \qquad \mathrm{trace}(E^{\mathrm{T}}PE) < \eta \tag{3.11}$$

$$\gamma_2^2 \le \eta \qquad (\text{chi dung voi rang buoc vet}) \tag{3.12}$$

7.1. Điểm phải sửa: ràng buộc vết chứ không phải ràng buộc ma trận

Bản trước viết ràng buộc dưới dạng $E^{T}PE \preccurlyeq \eta I$ rồi kết luận $\gamma_2 \le \sqrt{\eta}$. Hai điều này không khớp nhau. Cận H_2 chuẩn dùng ràng buộc vết: nếu $\mathrm{trace}(E^{T}PE) < \eta$ thì $\|G\|_2^2 < \eta$. Ràng buộc ma trận $E^{T}PE \preccurlyeq \eta I$ chỉ chặn giá trị riêng lớn nhất, tức $\lambda_{\max}(P) \le \eta$; khi $E = I_5$ nó cho $\mathrm{trace}(P) \le 5\eta$, nghĩa là $\gamma_2 \le \sqrt{(5\eta)}$ chứ không phải $\sqrt{\eta}$. Kết luận của bản trước lạc quan hơn thực tế một hệ số $\sqrt{5} \approx 2{,}24$.

Ngoài ra, việc gộp số hạng $2\alpha P$ vào cùng một bất đẳng thức với $Cz^{T}Cz$ là hợp lệ nhưng làm đổi ý nghĩa: η khi đó là cận trên cho hệ đã dịch phổ đi α, không phải cho hệ gốc. Nếu báo cáo con số η thì phải nói rõ nó ứng với α nào.

8. Điều kiện số và vô thứ nguyên hoá

Mục này là mới. Bộ tham số của tuyến ống có $a_2 \approx 3{,}3\times10^{7}$ đứng cạnh $\mu \approx 4{,}4\times10^{-3}$, chênh nhau khoảng mười bậc độ lớn. Hệ quả là ma trận quan sát có tỷ số giá trị kỳ dị $\sigma_1/\sigma_4 \approx 2{,}4\times10^{10}$. Bộ giải LMI làm việc với ma trận điều kiện xấu như vậy sẽ báo nghiệm nằm sát biên dung sai, và kết quả không đáng tin dù không có thông báo lỗi.

Cách xử lý là vô thứ nguyên hoá cả biến trạng thái lẫn thời gian. Thang thời gian tự nhiên của tuyến ống là thời gian sóng đi hết tuyến:

$$\tilde{x} = D^{-1}x, \quad \tilde{t} = t/T_0, \quad T_0 = \frac{L}{c} = \frac{L}{\sqrt{a_1 a_2}}, \quad \tilde{A} = T_0 D^{-1} A D \tag{3.13}$$

Với bộ tham số của đề tài, $c = \sqrt{(a_1 a_2)} \approx 1255$ m/s và $T_0 = L/c \approx 0{,}159$ s. Chọn $D = \mathrm{diag}(Q_0, H_0, Q_0, z_0, \lambda_0)$ với $Q_0 = 0{,}02$ m³/s, $H_0 = 20$ m, $z_0 = 100$ m, $\lambda_0 = 1{,}5\times10^{-4}$. Kết quả kiểm tra:

Đại lượng	Trước vô thứ nguyên hoá	Sau vô thứ nguyên hoá
σ_1/σ_4 của ma trận quan sát (xấu nhất trên các đỉnh)	$2{,}4\times10^{10}$	$2{,}2\times10^{8}$
Bậc độ lớn của phần tử A	10^{-4} … 10^{6}	10^{-3} … 10^{0}
Đơn vị của α	1/s	không thứ nguyên (nhân T_0 để đổi)

Bảng 12. Hiệu quả của vô thứ nguyên hoá.

Cải thiện hai bậc độ lớn, và điều kiện số còn lại là bản chất chứ không phải do chọn đơn vị. Đây cũng chính là hiện tượng đã gặp ở BG4 dưới dạng chênh lệch thang tham

số khi chạy tối ưu: cùng một nguyên nhân vật lý, hai biểu hiện khác nhau. Mọi con số P, L_i và η phải được báo cáo kèm ghi chú đang ở hệ toạ độ nào; đổi nhầm hệ toạ độ khi đưa gain vào Simulink là lỗi rất khó truy.

PHẦN B — NỘI SUY, THIẾT KẾ SỐ VÀ CHẨN ĐOÁN

9. Nội suy gain trong miền đa diện

Với mỗi biến lập lịch ρ_n, trọng số tại cận dưới và cận trên được tính tuyến tính:

$$\omega_n^{\min} = \frac{\rho_n^{\max} - \rho_n}{\rho_n^{\max} - \rho_n^{\min}}, \qquad \omega_n^{\max} = \frac{\rho_n - \rho_n^{\min}}{\rho_n^{\max} - \rho_n^{\min}} \tag{3.14}$$

Trọng số của một đỉnh là tích của năm trọng số thành phần, mỗi thành phần lấy theo cận mà đỉnh đó chiếm:

$$\alpha_i(\rho) = \prod_{n=1}^{5} \omega_n^{(i_n)}, \qquad \alpha_i \geq 0, \qquad \sum_{i=1}^{N_v} \alpha_i = 1 \tag{3.15}$$

$$L(\rho) = \sum_{i=1}^{N_v} \alpha_i(\rho)\, L_i \tag{3.16}$$

Hai điều kiện $\alpha_i \geq 0$ và $\Sigma\alpha_i = 1$ không phải quy ước hình thức: chúng là điều kiện để ρ thực sự nằm trong hộp. Nếu một trọng số ra số âm thì ρ đã ra ngoài miền, và kết quả tại thời điểm đó phải bị gắn cờ loại bỏ chứ không được ngoại suy. Đây là chỗ nối trực tiếp với logic cờ ở Mục 12.

Lưu ý thứ tự: khi cài đặt, thứ tự liệt kê đỉnh trong vòng lặp tính α_i phải trùng đúng thứ tự đã dùng khi giải LMI để sinh L_i. Đảo thứ tự đỉnh là một lỗi im lặng — gain vẫn có giá trị hợp lý, hệ vẫn chạy, nhưng ước lượng sai một cách khó lý giải.

10. Ví dụ thiết kế bằng số

Ví dụ dưới đây dùng phương án đặt cực, chạy được không cần bộ giải LMI, và đóng vai trò kết quả tham chiếu.

Hạng mục	Giá trị
Hệ dùng để thiết kế	Hệ con bốn trạng thái [Q_1, H_2, Q_2, $\lambda\ell$] theo Mục 3.3
C rút gọn	[1 0 0 0; 0 0 1 0]
Miền vận hành	$Q_1, Q_2 \in [0{,}010; 0{,}030]$; $H_2 \in [10; 30]$; $z\ell \in [5; 195]$
Số đỉnh	16 (bốn biến vật lý độc lập)
Cực mong muốn	$-0{,}5; -0{,}6; -0{,}7 \pm 2j$
Tốc độ suy giảm đạt được	$\alpha = 0{,}500$ 1/s tại cả 16 đỉnh

Hạng mục	Giá trị
Hạng ma trận quan sát	4 tại cả 16 đỉnh — hệ con quan sát được

Bảng 13. Cấu hình của ví dụ thiết kế.

Gain thu được tại đỉnh danh định ($Q_1 = Q_2 = 0{,}02$ m³/s, $H_2 = 20$ m, $z\ell = 100$ m), trong hệ toạ độ đã chuẩn hoá bằng $D = \mathrm{diag}(0{,}01;\ 10;\ 0{,}01;\ 10^{-4})$:

Hàng của L	Cột 1 (từ phần dư Q_1)	Cột 2 (từ phần dư Q_2)
Q_1	$+1{,}250\times10^{2}$	$-6{,}500\times10^{1}$
H_2	$+3{,}229\times10^{4}$	$-3{,}229\times10^{4}$
Q_2	$-6{,}500\times10^{1}$	$+1{,}250\times10^{2}$
$\lambda\ell$	$+1{,}593\times10^{1}$	$-1{,}593\times10^{1}$

Bảng 14. Gain L tại đỉnh danh định (hệ toạ độ chuẩn hoá).

Ba điều đáng đọc ra từ Bảng 14. Thứ nhất, cấu trúc đối xứng giữa hai hàng Q_1 và Q_2 phản ánh tính đối xứng của tuyến ống tại điểm giữa — nếu bảng của sinh viên không đối xứng ở đỉnh giữa tuyến thì gần như chắc chắn có lỗi ánh xạ kênh. Thứ hai, hai hàng H_2 và $\lambda\ell$ có dạng $[+k, -k]$: cả hai trạng thái không đo được này chỉ được hiệu chỉnh bởi hiệu của hai phần dư, tức bởi chênh lệch lưu lượng giữa hai đầu tuyến. Đó chính là dấu hiệu vật lý của rò rỉ. Thứ ba, biên độ hàng H_2 lớn hơn các hàng khác ba bậc — hệ quả trực tiếp của $a_2 \approx 3{,}3\times10^{7}$ và là lý do phải vô thứ nguyên hoá theo Mục 8.

Kiểm tra bắt buộc sau khi có mỗi L_i: tính trị riêng của $A_i - L_iC$ và xác nhận toàn bộ phần thực nhỏ hơn $-\alpha$. Với ví dụ trên, trị riêng tại đỉnh danh định là $-0{,}5$; $-0{,}6$ và $-0{,}7 \pm 2j$, đúng như đặt.

11. Rời rạc hoá và thực thi ở chu kỳ Ts

Toàn bộ thiết kế ở Phần A diễn ra trong miền liên tục, nhưng thuật toán chẩn đoán ở Mục 12 chạy ở $T_s = 1$ s. Hai điều đó chỉ tương thích khi αT_s đủ nhỏ.

$$A_d(\rho) = e^{A(\rho)T_s}, \qquad L_d(\rho) = (I - e^{-\Lambda T_s}) \ \text{ voi } \ \alpha T_s \ll 1 \tag{3.17}$$

Với $\alpha = 0{,}5$ 1/s và $T_s = 1$ s thì $\alpha T_s = 0{,}5$. Con số này không nhỏ, và bộ quan sát rời rạc hoá thô theo Euler sẽ có sai lệch đáng kể so với thiết kế liên tục. Ba hệ quả cần nói rõ với sinh viên:

- Rời rạc hoá phải dùng phép biến đổi chính xác (hàm c2d với phương pháp zoh) chứ không dùng Euler tiến. Euler tiến với $\alpha T_s = 0{,}5$ có thể làm mất ổn định các mode nhanh.
- Chu kỳ $T_s = 1$ s cũng bằng đúng chu kỳ dao động riêng của tuyến ống (tần số riêng $c/L \approx 6{,}28$ rad/s, tức khoảng 1 Hz — xem BG4). Động học nhanh vì vậy không quan sát được ở tốc độ lấy mẫu này, và α không nên đặt lớn hơn khoảng 0,5 1/s vì đằng nào cũng không thực hiện được.
- Nếu muốn α lớn hơn, phải tăng tốc độ lấy mẫu chứ không phải tăng gain. Tăng gain ở $T_s = 1$ s chỉ khuếch đại nhiễu đo.

Cách làm sạch sẽ nhất là thiết kế trực tiếp trên miền rời rạc: rời rạc hoá A_i và B ở T_s trước, rồi viết LMI dạng rời rạc với điều kiện $A_d^{T} P A_d - P \prec 0$ có hệ số suy giảm. Bài giảng giữ dạng liên tục vì nó dễ suy dẫn hơn, nhưng phải nói rõ đây là lựa chọn sư phạm chứ không phải lựa chọn kỹ thuật tốt nhất.

12. Tổ chức thuật toán chẩn đoán

1. Nhận H_1, H_3, Q_1, Q_2; kiểm tra timestamp, sequence number và cờ chất lượng từ trạm đo.
2. Chuyển đổi đơn vị về SI; loại mẫu NaN hoặc nằm ngoài dải cảm biến, gắn cờ thay vì xoá.
3. Khởi tạo $\hat{x}$ theo Bảng 15; tính $\hat{\rho}$ từ trạng thái ước lượng.
4. Kiểm tra $\hat{\rho}$ thuộc miền đa diện: tính trọng số α_i và xác nhận $\alpha_i \geq 0$, $\Sigma\alpha_i = 1$. Nếu vi phạm, gắn cờ ngoài miền và bỏ qua bước cập nhật vị trí.
5. Nội suy $L(\hat{\rho})$ theo (3.16) với đúng thứ tự đỉnh đã dùng khi tổng hợp.
6. Cập nhật bộ quan sát tầng 1 theo chu kỳ $T_s = 1$ s, dùng ma trận đã rời rạc hoá theo Mục 11.
7. Tính phần dư r; cập nhật $\hat{z}_\ell$ và χ_ℓ bằng luật thích nghi (3.4).
8. So chỉ số phần dư với ngưỡng Jth; đếm thời gian giữ liên tục trên ngưỡng.
9. Xác nhận cảnh báo khi và chỉ khi: phần dư trên ngưỡng đủ thời gian giữ Td, dữ liệu còn cờ hợp lệ, và $\hat{z}_\ell$ nằm trong miền.
10. Gửi $\hat{z}_\ell$ cùng cờ trạng thái về PLC trung tâm. Trạng thái "không xác định" phải là một mã riêng, không phải một giá trị số trong dải hợp lệ.

So với bản trước, hai bước được thêm vào là bước kiểm tra trọng số ở mục 4 và bước đếm thời gian giữ ở mục 8. Cả hai đều nhằm một mục đích: không để một mẫu đơn lẻ tạo ra một cảnh báo.

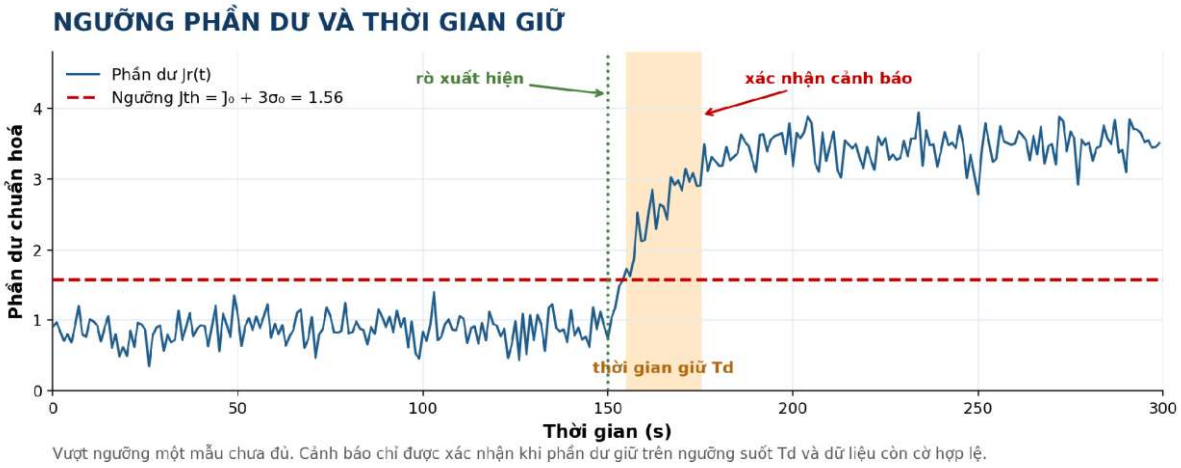
13. Ngưỡng phần dư và thời gian giữ

Với một bài giảng về chẩn đoán, đây là phần trung tâm chứ không phải chi tiết cài đặt.

$$J_r = \|r\|_{RMS,\,W}, \qquad J_{th} = \bar{J}_0 + \kappa\,\sigma_0, \qquad \kappa = 3 \tag{3.18}$$

Quy trình đặt ngưỡng gồm ba bước, tất cả đều thực hiện trên dữ liệu kịch bản không rò:

1. Chạy bộ quan sát trên đoạn dữ liệu không rò đã xác nhận. Ghi lại chỉ số phần dư Jr theo thời gian.
2. Tính trung bình $\bar{J}_0$ và độ lệch chuẩn σ_0 của Jr trên đoạn đó, sau khi đã bỏ giai đoạn quá độ khởi tạo.
3. Đặt $J_{th} = \bar{J}_0 + \kappa\sigma_0$ với $\kappa = 3$ cho khởi điểm. Tăng κ nếu tỷ lệ cảnh báo giả cao; giảm κ nếu bỏ sót rò nhỏ.



Hình 4. Ngưỡng phần dư, thời gian giữ và thời điểm xác nhận cảnh báo.

Thời gian giữ Td là tham số đánh đổi trực tiếp giữa hai chỉ tiêu: Td lớn làm giảm cảnh báo giả nhưng làm tăng thời gian phát hiện. Cách chọn có căn cứ là chạy quét Td trên bộ kịch bản và lập bảng đánh đổi:

Thời gian giữ Td	Thời gian phát hiện trung bình	Tỷ lệ cảnh báo giả	Nhận xét
5 s	Ngắn nhất	Cao nhất	Nhiễu đo đủ để kích hoạt
20 s	Trung bình	Thấp	Điểm làm việc đề nghị
60 s	Dài	Rất thấp	Bỏ sót rò nhỏ và rò tăng chậm

Bảng 15. Mẫu bảng đánh đổi để chọn thời gian giữ. Sinh viên điền số của nhóm mình.

Một điểm rất dễ bị bỏ qua: ngưỡng phải được đặt lại nếu điểm vận hành thay đổi đáng kể, vì $\bar{J}_0$ phụ thuộc lưu lượng nền. Một ngưỡng cố định đặt lúc lưu lượng thấp sẽ báo giả liên tục khi lưu lượng cao.

14. Khởi tạo và xử lý dữ liệu không hợp lệ

Thành phần	Giá trị / chiến lược khởi tạo	Lý do
$\hat{Q}_1$, $\hat{Q}_2$	Lấy từ mẫu đo hợp lệ đầu tiên	Hai đại lượng này đo được, không có lý do đoán
$\hat{H}_2$	Trung bình của H_1 và H_3 tại mẫu đầu	Giá trị nằm giữa, tránh lệch về một phía tuyến
$\hat{z}_\ell$	L/2 = 100 m	Khởi tạo tại một đầu tuyến làm bộ quan sát bắt đầu ngay sát biên miền hợp lệ
χ_ℓ	Số dương nhỏ, ví dụ 10^{-6}	Khởi tạo bằng 0 làm ρ_3 mất tác dụng ở bước đầu
Trong quá độ khởi tạo	Khoá xác nhận cảnh báo trong tWarmup ≈ 30 s	Phần dư lớn do sai lệch điều kiện đầu, không do rò
Mất dữ liệu hoặc ngoài miền	Giữ trạng thái có kiểm soát, xuất cờ "không xác định"	Không được thay bằng giá trị 0 hoặc giá trị cuối cùng

Bảng 16. Khởi tạo và xử lý dữ liệu không hợp lệ.

15. Chỉ tiêu đánh giá

Sai số vị trí được định nghĩa CÓ DẤU, quy ước dương khi ước lượng lệch về phía cuối tuyến:

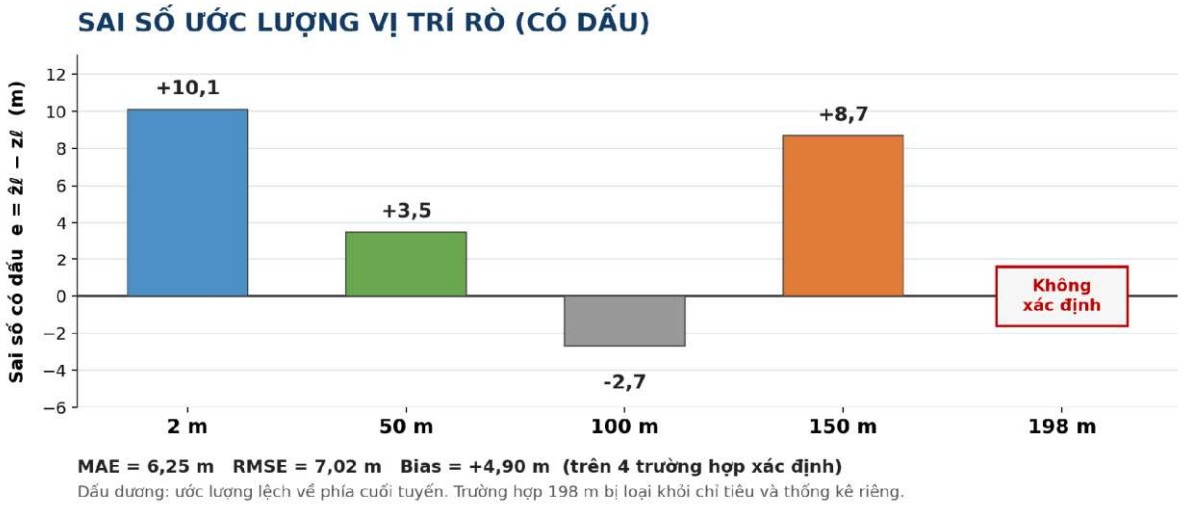
$$e_i = \hat{z}_{\ell,i} - z_{\ell,i} \tag{3.19}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|e_i|, \qquad \mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}e_i^2}, \qquad \mathrm{Bias} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}e_i \tag{3.20}$$

Ba chỉ tiêu trả lời ba câu hỏi khác nhau. MAE cho độ lớn sai số trung bình. RMSE nhạy với trường hợp xấu nhất, nên RMSE lớn hơn MAE nhiều là dấu hiệu có điểm bất thường. Bias cho biết sai số có lệch một chiều hay không, và chỉ tính được nếu sai số mang dấu.

Kịch bản	zℓ thật (m)	ẑℓ ước lượng (m)	Sai số e_i (m)	Cờ hợp lệ
Rò 2 m	2	12,1	+10,1	Hợp lệ
Rò 50 m	50	53,5	+3,5	Hợp lệ
Rò 100 m	100	97,3	−2,7	Hợp lệ
Rò 150 m	150	158,7	+8,7	Hợp lệ
Rò 198 m	198	—	—	Ngoài miền

Bảng 17. Bảng đối chiếu vị trí rò. Bảng này là mới; nếu không có nó thì Bias không tái tính được.



Hình 5. Sai số ước lượng vị trí rò, biểu diễn có dấu.

Chỉ tiêu	Giá trị	Ghi chú
Số trường hợp xác định	4/5	Trường hợp 198 m bị loại, thống kê riêng
MAE	6,25 m	Trung bình trị tuyệt đối của bốn sai số
RMSE	7,02 m	Lớn hơn MAE do hai trường hợp biên
Bias	+4,90 m	Lệch có hệ thống về phía cuối tuyến
Sai số nhỏ nhất	−2,7 m tại 100 m	Điểm giữa tuyến, điều kiện thuận lợi nhất
Sai số lớn nhất	+10,1 m tại 2 m	Vùng sát biên, mẫu số $z\ell$ nhỏ

Bảng 18. Chỉ tiêu sai số vị trí trên bộ dữ liệu hiện có.

Hình vẽ trước biểu diễn trị tuyệt đối nên con số Bias = +4,90 m không tái tính được từ hình; thực tế sai số tại 100 m mang dấu âm. Thứ hai, Bias dương đáng kể so với MAE là một thông tin chẩn đoán về mô hình chứ không phải nhiễu ngẫu nhiên — nó cho biết bộ quan sát lệch có hệ thống về phía cuối tuyến, và đó là hướng cải tiến tiếp theo.

15.1. Chỉ tiêu phát hiện

Sai số vị trí chưa phải toàn bộ. Một đánh giá đầy đủ cho hệ chẩn đoán phải có thêm ba chỉ tiêu dưới đây, mà bản trước chỉ nhắc tên chứ không định nghĩa và không có số liệu.

Chỉ tiêu	Định nghĩa	Cách đo
Thời gian phát hiện	Từ lúc rò xuất hiện đến lúc cảnh báo được xác nhận	Chạy kịch bản có mốc thời gian rò đã biết
Tỷ lệ phát hiện	Số kịch bản có rò được phát hiện / tổng số kịch bản có rò	Cần ít nhất 10 kịch bản để con số có nghĩa
Tỷ lệ cảnh báo giả	Số lần cảnh báo trong dữ liệu không rò / tổng thời gian	Tính trên đoạn không rò dài, đơn vị lần/giờ

Bảng 19. Định nghĩa các chỉ tiêu phát hiện. Bảng để sinh viên điền số liệu của nhóm.

16. Phân tích vùng biên

Tại 2 m và 198 m, một trong hai mẫu số $z\ell$ hoặc $L - z\ell$ trở nên rất nhỏ, nên ρ_2 hoặc ρ_4 rất lớn. Mô hình vì vậy nhạy hơn hẳn với nhiễu đo và với sai số tham số. Ba hệ quả cụ thể:

- Độ nhạy của phần dư theo $z\ell$ giảm mạnh ở gần biên, nên cùng một mức nhiễu gây sai số vị trí lớn hơn. Đó là lý do trường hợp 2 m cho sai số lớn nhất trong bộ kịch bản.
- Miền đa diện rộng ra rất nhanh khi z_min giảm: hạ z_min từ 5 m xuống 1 m làm ρ_2^{max} tăng năm lần, kéo theo bài toán LMI bảo thủ hơn nhiều trên toàn miền chứ không chỉ ở vùng biên.
- Trường hợp 198 m cho kết quả nằm ngoài tuyến và được phân loại "không xác định". Giá trị này không được đưa vào MAE và RMSE, và tuyệt đối không được quy về 0 m.

Cần phân biệt rõ ba trạng thái đầu ra, vì gộp chúng lại là nguồn hiểu nhầm nguy hiểm nhất trong vận hành: "không rò" nghĩa là hệ thống đã đánh giá và kết luận không có rò; "không xác định" nghĩa là hệ thống không đủ căn cứ để kết luận; "rò tại $\hat{z}\ell$" nghĩa là đã kết luận có rò kèm vị trí. Một hệ báo 0 m khi mất dữ liệu là hệ đang trộn trạng thái thứ hai vào trạng thái thứ nhất.

17. Lỗi thường gặp và cách kiểm tra

Biểu hiện	Nguyên nhân thường gặp	Cách kiểm tra
Bộ giải LMI báo vô nghiệm ngay từ đầu	Dùng đủ 5 trạng thái, trong đó $z\ell$ không phát hiện được	Kiểm tra hạng ma trận quan sát (Mục 3); tách $z\ell$ ra khỏi bài toán
Phần dư tăng theo hàm mũ ngay từ mẫu đầu	Sai dấu khi khôi phục L từ Y	Kiểm tra trị riêng của $A_i - L_iC$ (Mục 6.1)
Nghiệm LMI nằm sát biên dung sai	Ma trận điều kiện xấu do $a_2 \approx 3\times10^7$	Vô thứ nguyên hoá theo Mục 8 rồi giải lại
Trọng số α_i ra số âm	$\hat{\rho}$ đã ra ngoài hộp	Gắn cờ ngoài miền, không ngoại suy gain

Biểu hiện	Nguyên nhân thường gặp	Cách kiểm tra
Ước lượng sai một cách khó lý giải	Thứ tự đỉnh khi nội suy khác thứ tự khi tổng hợp	Đối chiếu bảng chỉ số đỉnh giữa hai bước
Gain thiết kế đúng nhưng chạy thực thì phân kỳ	Rời rạc hoá bằng Euler với $\alpha T_s = 0{,}5$	Dùng c2d với zoh (Mục 11)
Cảnh báo giả liên tục khi lưu lượng cao	Ngưỡng đặt ở điểm vận hành lưu lượng thấp	Đặt lại Jth theo điểm vận hành (Mục 13)
Bộ quan sát hội tụ ở giữa tuyến nhưng không ở biên	Miền đa diện quá rộng nên gain quá bảo thủ	Chia vùng $z\ell$ theo Bảng 10
Kết quả 0 m khi mất dữ liệu	Trộn "không xác định" vào "không rò"	Dùng mã trạng thái riêng (Mục 16)
Mô hình rò và mô hình nền cho kết quả lệch	Hai mô hình dùng quy ước đầu vào khác nhau	BG3 dùng $u = [H_1, H_3]$; mô hình nền của BG4 dùng $u = [H_1, Q_2]$

Bảng 20. Lỗi thường gặp. Toàn bộ bảng này là mới.

18. Hoạt động STEM

Nhóm sinh viên nhận mô hình trạng thái và miền của các biến lập lịch. Nhiệm vụ gồm bốn phần, xếp theo thứ tự bắt buộc phải làm:

1. Kiểm tra tính quan sát được trước tiên. Chạy đoạn mã ở Phụ lục A1, lập bảng hạng tại các đỉnh và kết luận bài toán LMI năm trạng thái có nghiệm hay không.
2. Xác định tập đỉnh của đa diện, chỉ ra những đỉnh không ứng với trạng thái vật lý nào và ước lượng tỷ lệ của chúng.
3. Viết điều kiện LMI theo một quy ước dấu do nhóm tự chọn, ghi rõ quy ước đó ở đầu bài, rồi tính gain bằng đặt cực hoặc bằng bộ giải LMI.
4. Xây dựng lưu đồ xử lý dữ liệu ngoài miền và thiết kế ngưỡng theo Mục 13.

Phần trình bày phải chỉ ra khác biệt giữa chứng minh ổn định và tối ưu một chuẩn hiệu năng, và phải nói rõ điều gì trong thiết kế của nhóm là được chứng minh, điều gì chỉ được kiểm chứng bằng mô phỏng.

Biến thể phản biện: nhóm khác nhận bài của nhóm này với một dấu bị đổi ngầm trong phép đặt Y. Nhóm phản biện phải phát hiện ra bằng kiểm tra trị riêng chứ không bằng đọc lại phép suy dẫn. Đây là cách hiệu quả nhất để sinh viên nhớ quy tắc kiểm tra ở Mục 6.1.

19. Câu hỏi và bài tập

19.1. Câu hỏi kiểm tra nhanh trong giờ

Sau mục	Câu hỏi
Mục 2	Nhìn Bảng 6, cột nào toàn số 0? Điều đó nói gì về trạng thái tương ứng?
Mục 3	Vì sao một mode không quan sát được nằm tại gốc lại làm bài toán LMI vô nghiệm, trong khi mode không quan sát được nằm bên trái thì không?
Mục 4	Ảnh của một hộp qua ánh xạ phi tuyến có bằng bao lồi của ảnh các góc không? Cho một phản ví dụ trong bài.
Mục 6	Với quy ước Y = PL, dấu của số hạng chứa Y trong LMI là gì? Kiểm tra bằng cách khai triển.
Mục 8	Vì sao hàng H_2 của ma trận L lớn hơn các hàng khác ba bậc độ lớn?
Mục 13	Tăng thời gian giữ Td thì chỉ tiêu nào tốt lên và chỉ tiêu nào xấu đi?

Bảng 21. Câu hỏi kiểm tra nhanh theo mục.

19.2. Bài tập

1. Tại sao $z\ell$ và $\lambda\ell$ được đưa vào véc-tơ trạng thái với đạo hàm bằng 0? Nêu giả thiết vật lý tương ứng và cho biết giả thiết đó hỏng khi nào.
2. Kiểm tra bằng phép thế rằng A(ρ) và B(ρ) ở Bảng 6 và Bảng 7 tái tạo đúng hệ phi tuyến ba phương trình thuỷ lực.
3. Tính hạng ma trận quan sát của cặp (A(ρ), C) tại năm đỉnh bất kỳ. Xác định trạng thái nào không quan sát được và giải thích bằng cấu trúc của A.

4. Suy ra LMI (3.10) từ hàm Lyapunov (3.8) với phép đặt $Y = PL$. Sau đó làm lại với $Y = -PL$ và so sánh hai kết quả.
5. Vì sao dùng một ma trận P chung tại tất cả các đỉnh? Nêu một trường hợp mà giả thiết này quá bảo thủ.
6. Viết công thức trọng số nội suy cho một hệ chỉ có hai biến lập lịch và vẽ bốn đỉnh tương ứng.
7. Chứng minh rằng nếu một trọng số α_i ra số âm thì ρ nằm ngoài hộp. Vì sao không được ngoại suy trong trường hợp đó?
8. Với bộ tham số của đề tài, tính $T_0 = L/c$ và cho biết αT_s bằng bao nhiêu khi $\alpha = 0{,}5$ 1/s và $T_s = 1$ s. Kết luận gì về phép rời rạc hoá?
9. Phân biệt ba trạng thái đầu ra "không rò", "không xác định" và "rò tại $\hat{z}\ell$". Nêu hậu quả kỹ thuật nếu hệ thực trộn hai trạng thái đầu.
10. Từ Bảng 17, kiểm tra lại ba con số MAE, RMSE và Bias. Giải thích ý nghĩa của việc Bias mang dấu dương.
11. Đề xuất cách cải thiện độ nhạy tại vùng sát biên. Đánh giá chi phí của đề xuất đó theo số bài toán LMI phải giải.

20. Đánh giá

Rubric dưới đây thay cho bảng tỷ trọng đơn thuần ở bản trước, để việc chấm nhất quán giữa các giảng viên và để sinh viên biết trước đích cần đạt.

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Mô hình LPV và biến lập lịch	Sai dấu hoặc sai vị trí phần tử trong $A(\rho)$	Viết đúng $A(\rho)$, $B(\rho)$, C và kiểm tra bằng phép thế	Thêm bảng biến, đơn vị và nhận xét về cấu trúc cột của A	20%
Tính quan sát được	Không kiểm tra, giải LMI rồi bế tắc	Kiểm tra hạng và kết luận đúng trạng thái nào không quan sát được	Thêm biện luận về cơ chế hai tầng và đề xuất cách tách bài toán	20%

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Suy luận LMI và dấu của gain	Dùng lẫn hai quy ước Y trong cùng một bài	Một quy ước nhất quán, có kiểm tra trị riêng	Thêm phân tích quy mô bài toán và điều kiện số	25%
Nội suy đa diện	Không kiểm tra $\Sigma\alpha = 1$ và $\alpha \geq 0$	Nội suy đúng, có kiểm tra trọng số và thứ tự đỉnh	Thêm đánh giá độ bảo thủ và đề xuất chia vùng	20%
Lưu đồ chẩn đoán và xử lý dữ liệu lỗi	Không phân biệt “không xác định” với “không rò”	Có ngưỡng, thời gian giữ và cờ hợp lệ	Thêm bảng đánh đổi Td và chỉ tiêu phát hiện	15%

Bảng 22. Rubric đánh giá.

PHỤ LỤC — MÃ NGUỒN KIỂM TRA VÀ TỔNG HỢP

A1. Kiểm tra tính quan sát được — chạy trước mọi việc khác

```
function tbl = check_observability(cfg, p)
%CHECK_OBSERVABILITY Kiem tra hang ma tran quan sat tai cac dinh da
dien.
%   Chay ham nay TRUOC khi viet bat ky dieu kien LMI nao (Muc 3).

C  = [1 0 0 0 0;
      0 0 1 0 0];

Q1r = [0.010 0.030];  Q2r = [0.010 0.030];
H2r = [10 30];        zr  = [cfg.zmin, cfg.L-cfg.zmin];

k = 0;  tbl = table();
for q1 = Q1r, for h2 = H2r, for q2 = Q2r, for z = zr
    k = k + 1;
    A = lpv_A(q1, h2, q2, z, p, cfg);
    O = obsv(A, C);
    s = svd(O);
    tbl.dinh(k,1)  = k;
    tbl.z(k,1)     = z;
    tbl.hang(k,1)  = rank(O, 1e-12*max(s));
    tbl.cond4(k,1) = s(1)/s(4);      % dieu kien so cua phan quan sat duoc
end, end, end, end

fprintf('Hang lon nhat: %d / %d trang thai\n', max(tbl.hang), 5);
if max(tbl.hang) < 5
    warning(['He KHONG quan sat duoc hoan toan. ' ...
             'Kiem tra cot nao cua ma tran quan sat bang 0.']);
end
end
```

```
function A = lpv_A(Q1, H2, Q2, z, p, cfg)
rho = [ -p.mu*abs(Q1);
         1/z;
        -sqrt(max(H2,0))/z;
         p.a1/(cfg.L - z);
        -p.mu*abs(Q2) ];
A = zeros(5);
A(1,1) = rho(1);        A(1,2) = -p.a1*rho(2);
A(2,1) = p.a2*rho(2);   A(2,3) = -p.a2*rho(2);   A(2,5) = p.a2*rho(3);
A(3,2) = rho(4);        A(3,3) = rho(5);
end
```

A2. Giải LMI với quy ước Y = PL (YALMIP)

```
function [P, Lset, diag] = solve_lmi(Aset, C, alpha)
%SOLVE_LMI Tim P chung va cac gain Li theo quy uoc Y = P*L (Muc 6).
%   Aset : cell array cac ma tran A tai dinh (he con da rut gon)
%   Tra ve Li = P\Yi  -- KHONG co dau tru.

n  = size(Aset{1},1);
ny = size(C,1);
Nv = numel(Aset);

P = sdpvar(n, n, 'symmetric');
Y = cell(Nv,1);
Con = [P >= 1e-6*eye(n)];

for i = 1:Nv
    Y{i} = sdpvar(n, ny, 'full');
    Mi = Aset{i}'*P + P*Aset{i} - C'*Y{i}' - Y{i}*C + 2*alpha*P;
    Con = [Con, Mi <= -1e-8*eye(n)];
end

opt  = sdpsettings('solver','sedumi','verbose',1);
```

```
diag = optimize(Con, [], opt);


P = value(P);
Lset = cell(Nv,1);
for i = 1:Nv
   Lset{i} = P \ value(Y{i});          % L = P^-1 Y
   ev = eig(Aset{i} - Lset{i}*C);       % KIEM TRA BAT BUOC
   assert(all(real(ev) < -alpha + 1e-9), ...
         'Dinh %d: tri rieng khong dat toc do suy giam alpha', i);
end
end
```

A3. Phương án không cần bộ giải LMI — đặt cực tại từng đỉnh

```
function Lset = place_vertices(Aset, C, poles)
%PLACE_VERTICES Dat cuc tai tung dinh khi khong co ban quyen LMI (Muc
10).
%   Khong bao dam on dinh toan mien ve mat ly thuyet.
%   Bat buoc phai kiem chung bang mo phong tren toan bo kich ban.


Nv = numel(Aset);
Lset = cell(Nv,1);
for i = 1:Nv
   Lset{i} = place(Aset{i}', C', poles)';
   ev = eig(Aset{i} - Lset{i}*C);
   fprintf('Dinh %2d: alpha dat duoc = %.3f 1/s\n', i, -max(real(ev)));
end
end
```

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Apkarian, P., Gahinet, P., Becker, G. (1995). Self-scheduled H∞ control of linear parameter-varying systems: a design example. Automatica, 31(9), 1251–1261. (Dẫn ở Mục 6.2, về hàm Lyapunov phụ thuộc tham số)

[2] Delgado-Aguiñaga, J. A. và cộng sự (2021). Leak diagnosis in pipelines based on a Kalman filter for linear parameter varying systems. Control Engineering Practice, 115, 104888. (Dẫn ở Mục 3.2 và Mục 13)

[3] Phạm, T.-P. và cộng sự (2022). LPV observer for leakage detection of the pipeline system. Hội nghị ATiGB, tr. 216–220. (Dẫn ở Mục 2 và Mục 15)

[4] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V. (1994). Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. SIAM Studies in Applied Mathematics, vol. 15. Philadelphia, PA: SIAM. (Dẫn ở Mục 6 và Mục 7)

[5] Löfberg, J. (2004). YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB. IEEE CACSD Conference. (Dẫn ở Phụ lục A2)

[6] Tài liệu bài giảng BG4 — Phương pháp mô phỏng hệ thống đường ống trên MATLAB/Simulink, cùng đề tài T2025-06-01. (Nguồn của bộ tham số a_1, a_2, μ và của bộ kịch bản mô phỏng)

BÀI GIẢNG 4

PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG HỆ THỐNG ĐƯỜNG ỐNG TRÊN MATLAB/SIMULINK

Đà Nẵng – 9/2026

MỤC LỤC

THÔNG TIN BÀI GIẢNG....3
MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA....4
PHẦN A — MÔ HÌNH NỀN VÀ NHẬN DẠNG THAM SỐ....6
1. Kiến trúc chương trình và quản lý phiên bản....6
1.1. Chọn nơi lưu tham số....7
1.2. Dấu phiên bản của một kết quả....7
2. Bảng biến, đơn vị và kiểm tra thứ nguyên....8
2.1. Cách kiểm tra thứ nguyên một phương trình....8
3. Chuẩn bị dữ liệu trong MATLAB....9
3.1. Dữ liệu thay thế khi không có phần cứng....10
4. Mô hình không rò trên Simulink....10
4.1. Bảng ánh xạ vào–ra....10
4.2. Cấu hình bộ giải....11
4.3. Quy tắc dựng khối....12
5. Phân tích độ nhạy và khả nhận dạng....12
5.1. Ma trận độ nhạy chuẩn hóa....12
5.2. Chu kỳ lấy mẫu và giới hạn của tập dữ liệu hiện có....13
6. Nhận dạng tham số....14
6.1. Vấn đề chênh lệch thang tham số....14
6.2. Tách tập huấn luyện và tập kiểm chứng....14
6.3. Quy trình thực hiện....15
7. Kiểm chứng vật lý bộ tham số....16
PHẦN B — MÔ HÌNH RÒ, BỘ QUAN SÁT VÀ ĐÁNH GIÁ....18
8. Mô hình có rò và biểu diễn LPV....18
8.1. Biến lập lịch....18
8.2. Ma trận A(ρ), B(ρ), C tường minh....18
8.3. Miền hợp lệ và mã có chặn....19
9. Nội suy đa diện và độ lợi bộ quan sát....20
10. Mô phỏng bộ quan sát....21
11. Thiết kế kịch bản mô phỏng....22
12. Đánh giá kết quả mô phỏng....23

13. Kết nối dữ liệu thời gian thực 24
14. Lỗi thường gặp và cách kiểm tra 25
15. Bộ tiêu chí kiểm chứng mô hình 26
16. Hoạt động STEM 28
17. Câu hỏi kiểm tra nhanh và bài tập 28
17.1. Câu hỏi kiểm tra nhanh trong giờ 28
17.2. Bài tập 29
18. Đánh giá 29
PHỤ LỤC — MÃ NGUỒN KÈM THEO 31
A1. scripts/init.m 31
A2. scripts/gen_synthetic_data.m 32
A3. scripts/leak_lpv_fcn.m 33
A4. scripts/estimate_params.m 33
A5. scripts/run_case.m 34
TÀI LIỆU THAM KHẢO 36

THÔNG TIN BÀI GIẢNG

Mục	Nội dung
Đối tượng	Sinh viên đã học MATLAB/Simulink, mô hình không gian trạng thái và cơ sở thủy lực đường ống có áp
Thời lượng đề xuất	08 tiết, chia hai phần độc lập: • Phần A (04 tiết): mô hình nền và nhận dạng tham số • Phần B (04 tiết): mô hình rò, bộ quan sát và đánh giá
Phần mềm và phiên bản	MATLAB R2021b trở lên; Simulink. Ghi rõ phiên bản trong nhật ký phiên chạy vì kết quả tối ưu phụ thuộc phiên bản bộ giải
Toolbox bắt buộc	Simulink Design Optimization (Parameter Estimator); Control System Toolbox (khối Varying State Space / LPV System)
Toolbox khuyến nghị	Optimization Toolbox (lsqnonlin); Robust Control Toolbox (giải LMI thiết kế L(ρ))
Phương án khi thiếu bản quyền	Toàn bộ phần nhận dạng có thể thực hiện bằng script lsqnonlin hoặc fminsearch — xem Phụ lục A4. Phần LPV có thể thay khối Varying State Space bằng MATLAB Function — xem Phụ lục A3
Dữ liệu	Bộ đo thực của đề tài. Nếu lớp không có phần cứng, dùng gen_synthetic_data.m (Phụ lục A2) để sinh dữ liệu tương đương, có nhiễu và có chèn rò tại vị trí cho trước
Sản phẩm học tập	Một MATLAB Project chạy lại được từ đầu; mô hình Simulink không rò và có rò; bộ kịch bản; báo cáo kiểm chứng kèm chỉ tiêu sai số

Bảng 1. Điều kiện tiên quyết và sản phẩm của bài giảng.

MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA

Bài giảng trình bày cách tổ chức một chương trình mô phỏng đi từ dữ liệu đo đến mô hình không rò, nhận dạng tham số, mô hình có rò và bộ quan sát. Trọng tâm là cấu trúc mô hình, quản lý dữ liệu và kiểm chứng. Điểm khác biệt so với một tài liệu hướng dẫn thao tác là ở chỗ mọi con số đưa ra trong bài đều phải tái tính được từ dữ liệu và mã nguồn đi kèm; sinh viên được yêu cầu kiểm tra lại thay vì chấp nhận.

Chuẩn đầu ra	Phát biểu	Mức Bloom
CLO1	Tổ chức được workspace, dữ liệu và tham số theo cấu trúc cho phép chạy lại và cho cùng kết quả	Vận dụng
CLO2	Xây dựng được sơ đồ khối mô hình không rò và mô hình có rò đúng phương trình, đúng đơn vị và đúng thứ tự kênh	Vận dụng
CLO3	Thiết kế được quy trình nhận dạng tham số có xử lý chênh lệch thang và có tách tập kiểm chứng; thiết kế được bộ kịch bản mô phỏng	Phân tích
CLO4	Lập và áp dụng được tiêu chí kiểm chứng mô hình, phân biệt được kết quả hợp lệ với trường hợp ngoài miền	Đánh giá

Bảng 2. Chuẩn đầu ra của bài giảng.

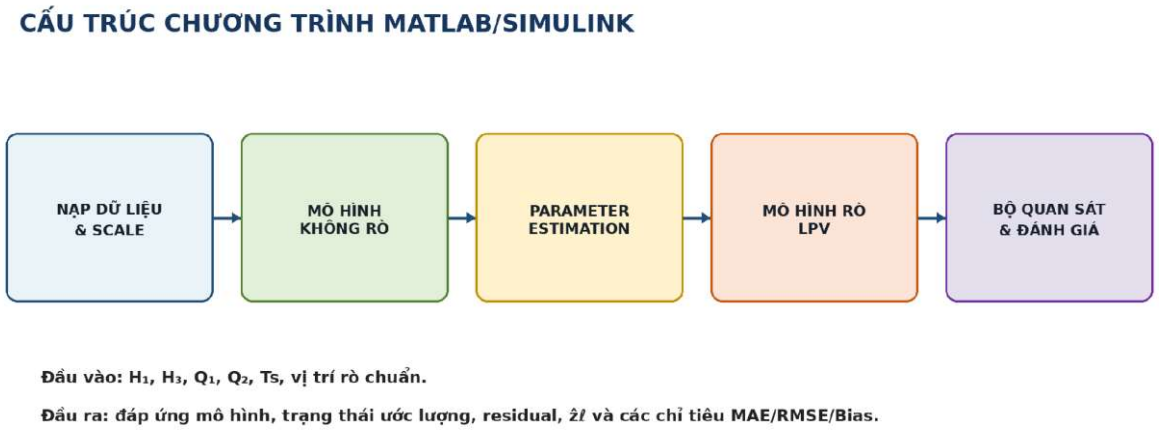
CLO	Mục nội dung	Hoạt động học	Công cụ đánh giá	Tỷ trọng
CLO1	1, 3	Dựng MATLAB Project, nạp và kiểm tra dữ liệu	Kiểm tra cấu trúc thư mục và chạy lại từ init.m	20%
CLO2	2, 4, 8	Dựng mô hình Simulink, kiểm tra thứ nguyên	Chấm mô hình theo phương trình và bảng biến	30%

CLO	Mục nội dung	Hoạt động học	Công cụ đánh giá	Tỷ trọng
CLO3	5, 6, 11	Chạy nhận dạng, thiết kế kịch bản	Báo cáo quy trình nhận dạng và bộ kịch bản	20%
CLO4	7, 12, 14, 15	Đối chiếu kết quả, xử lý trường hợp ngoài miền	Bảng tiêu chí kiểm chứng đã điền và biện luận	20%
Chung	Toàn bài	Trình bày và phản biện chéo	Chất lượng trình bày kỹ thuật	10%

Bảng 3. Ma trận chuẩn đầu ra – nội dung – hoạt động – đánh giá.

PHẦN A — MÔ HÌNH NỀN VÀ NHẬN DẠNG THAM SỐ

1. Kiến trúc chương trình và quản lý phiên bản



Hình 1. Các khối chức năng của chương trình MATLAB/Simulink.

Một chương trình mô phỏng có khả năng tái lập phải tách bạch bốn thứ: dữ liệu gốc, tệp khởi tạo, mô hình và kết quả từng phiên. Nguyên tắc chi phối là tham số không được nhập rải rác trong các block mà phải khai báo tập trung một chỗ. Khi một hệ số xuất hiện ở hai nơi, sớm muộn hai nơi đó sẽ lệch nhau.

Thư mục / tệp	Nội dung
data/raw/	Dữ liệu gốc H_1, H_3, Q_1, Q_2 kèm metadata. Chỉ đọc, không bao giờ ghi đè
data/processed/	Dữ liệu sau quy đổi đơn vị, đồng bộ thời gian và gắn cờ chất lượng
config/pipeline.sldd	Simulink Data Dictionary chứa toàn bộ tham số và kiểu dữ liệu tín hiệu
model/noleak.slx	Mô hình hai trạng thái, dùng cho nhận dạng tham số
model/leak_lpv.slx	Mô hình rò năm trạng thái và bộ quan sát
scripts/init.m	Khai báo Ts, tham số, cận, điều kiện đầu và đường dẫn (Phụ lục A1)
scripts/gen_synthetic_data.m	Sinh dữ liệu thay thế khi không có phần cứng (Phụ lục A2)

Thư mục / tệp	Nội dung
scripts/estimate_params.m	Nhận dạng a_1, a_2, μ trên thang logarit (Phụ lục A4)
scripts/run_case.m	Chọn kịch bản, chạy mô phỏng, ghi kết quả kèm dấu phiên bản (Phụ lục A5)
tests/	Kiểm tra tự động: thứ nguyên, dải giá trị, tính tái lập
results/	Đồ thị, bảng sai số và nhật ký phiên bản

Bảng 4. Cấu trúc thư mục đề xuất.

1.1. Chọn nơi lưu tham số

Ba cách lưu tham số dưới đây không tương đương nhau về độ bền. Bài giảng dùng cách thứ ba.

Cách lưu	Ưu điểm	Rủi ro
Base workspace	Nhanh khi thử nghiệm	Mất khi clear; hai sinh viên chạy ra hai kết quả mà không biết vì sao
Model Workspace	Đi kèm tệp .slx	Không chia sẻ được giữa mô hình không rò và mô hình rò
Data Dictionary (.sldd)	Dùng chung nhiều mô hình, so sánh được bằng công cụ, theo dõi được thay đổi	Cần làm quen thao tác ban đầu

Bảng 5. So sánh ba cách quản lý tham số.

1.2. Dấu phiên bản của một kết quả

Mỗi tệp kết quả phải trả lời được câu hỏi: kết quả này sinh ra từ dữ liệu nào, bộ tham số nào, phiên bản MATLAB nào. Quy ước tối thiểu gồm ba trường ghi vào tên tệp và vào cấu trúc meta bên trong tệp .mat:

```
meta.data_id   = 'raw_2026-03-12';       % ma bo du lieu goc
meta.param_id  = 'p_est_v3';             % ma bo tham so
meta.matlab    = version('-release');    % vi du '2023b'
meta.stamp     = datestr(now,'yyyymmdd_HHMMSS');
```

Một kết quả không mang đủ ba trường trên coi như không dùng được cho báo cáo, vì không ai kiểm tra lại được.

2. Bảng biến, đơn vị và kiểm tra thứ nguyên

Mục này là mới so với bản trước. Lý do: bộ tiêu chí kiểm chứng ở Mục 15 yêu cầu "đối chiếu bảng biến", nhưng bản trước không có bảng biến nào. Ngoài ra, sai đơn vị là nguyên nhân số một của các đáp ứng sai bậc lớn khi sinh viên dựng mô hình lần đầu.

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị SI	Dải điển hình
H_1	Cột áp đầu tuyến (đo)	m	25 – 35
H_2	Cột áp tại điểm rò (không đo được)	m	10 – 30
H_3	Cột áp cuối tuyến (đo)	m	8 – 16
Q_1	Lưu lượng đầu tuyến (đo)	m^3/s	0,01 – 0,03
Q_2	Lưu lượng cuối tuyến (đo)	m^3/s	0,01 – 0,03
L	Chiều dài tuyến	m	200
$z\ell$	Vị trí rò tính từ đầu tuyến	m	$0 < z\ell < L$
$\lambda\ell$	Hệ số lưu lượng của lỗ rò	$m^{5/2}/s$	≥ 0
a_1	Hệ số quán tính, $a_1 = gA$	m^3/s^2	$\approx 0{,}048$
a_2	Hệ số đàn hồi, $a_2 = c^2/(gA)$	m^{-1}	$\approx 3{,}3\times10^7$
μ	Hệ số ma sát gộp	m^{-3}	$\approx 4\times10^{-3}$
Ts	Chu kỳ lấy mẫu	s	xem Mục 5.2

Bảng 6. Bảng biến, đơn vị và dải giá trị.

2.1. Cách kiểm tra thứ nguyên một phương trình

Quy tắc: thay đơn vị vào từng số hạng, hai vế phải cho cùng kết quả. Áp dụng cho phương trình động lượng ở Mục 4:

$$[\dot{Q}_1] = \frac{\mathrm{m}^3/\mathrm{s}^2}{\mathrm{m}} \cdot \mathrm{m} = \mathrm{m}^3/\mathrm{s}^2 \quad \Rightarrow \quad [a_1] = \mathrm{m}^3/\mathrm{s}^2,\ [a_2] = \mathrm{m}^{-1},\ [\mu] = \mathrm{m}^{-3}$$

Hệ quả thực dụng: nếu sinh viên nhập a_2 theo đơn vị nào khác m^{-1}, đáp ứng sẽ sai hàng nghìn lần chứ không sai vài phần trăm. Sai đơn vị luôn biểu hiện thành sai bậc, và đó là dấu hiệu để phân biệt với sai mô hình.

- Lưu lượng ghi bằng L/min phải chia cho 60 000 trước khi vào mô hình.
- Áp suất ghi bằng bar phải nhân 10,197 để ra cột áp mét (nước ở 20 °C).
- Không đặt hệ số quy đổi bên trong subsystem. Toàn bộ quy đổi thực hiện một lần ở bước tiền xử lý, và tệp processed ghi rõ đã quy đổi.

Chú ý về dấu thập phân: văn bản tiếng Việt dùng dấu phẩy (0,048) còn MATLAB dùng dấu chấm (0.048). Khi chép số từ tài liệu vào mã nguồn phải đổi, và ngược lại khi chép kết quả vào báo cáo.

3. Chuẩn bị dữ liệu trong MATLAB

Các tín hiệu được chuyển về đơn vị SI trước khi tạo đối tượng thời gian. Bài giảng dùng timetable thay cho timeseries vì timetable xử lý thời gian không đều và mất mẫu tốt hơn, đồng thời là dạng MathWorks khuyến nghị cho dữ liệu đo hiện nay.

```
run(fullfile('scripts','init.m'));          % nap cfg, p0, lb, ub

raw = readtable(fullfile(cfg.paths.raw,'log_2026_03_12.csv'));

% Quy doi ve SI mot lan duy nhat, tai buoc nay
Q1 = raw.Q1_Lmin / 60000;                   % L/min -> m^3/s
Q2 = raw.Q2_Lmin / 60000;
H1 = raw.P1_bar * 10.197;                   % bar   -> m cot nuoc
H3 = raw.P3_bar * 10.197;

t  = raw.timestamp;                 % datetime, khong phai chi so mau
TT = timetable(t, H1, H3, Q1, Q2);
TT = retime(TT, 'regular', 'linear', 'TimeStep', seconds(cfg.Ts));
```

Trước khi chạy mô phỏng, dữ liệu phải qua danh mục kiểm tra sau. Mỗi mục kiểm tra sinh ra một cờ chất lượng đi kèm mẫu, không phải một quyết định xóa mẫu.

Kiểm tra	Cách phát hiện	Xử lý
Độ dài bốn kênh	height(TT) sau khi ghép	Ghép theo timestamp, không theo chỉ số mẫu
Giá trị NaN	any(ismissing(TT))	Gắn cờ quality = 0; không nội suy quá 3 mẫu liên tiếp

Kiểm tra	Cách phát hiện	Xử lý
Thời gian không tăng	any(diff(TT.t) <= 0)	Sắp xếp lại và ghi nhận số bản tin trùng
Điểm nhảy do mất kết nối	diff vượt ngưỡng vật lý	Gắn cờ, không làm trơn để che
Dải giá trị	so với cột "Dải điển hình" Bảng 6	Ngoài dải là dấu hiệu sai đơn vị, không phải nhiễu
Mất bản tin	sequence number không liên tục	Giữ khoảng trống thật, không lấp bằng 0

Bảng 7. Danh mục kiểm tra chất lượng dữ liệu.

Nguyên tắc xuyên suốt: tệp processed không bao giờ ghi đè tệp raw, và mọi phép làm sạch phải để lại dấu vết dưới dạng cờ. Một dữ liệu đã bị làm trơn mà không ghi lại là một dữ liệu không kiểm chứng được.

3.1. Dữ liệu thay thế khi không có phần cứng

Nếu lớp học không tiếp cận được hệ thống thực, chạy gen_synthetic_data.m (Phụ lục A2). Hàm này tích phân chính phương trình của mô hình, thêm nhiễu đo và cho phép chỉ định vị trí rò. Toàn bộ kịch bản ở Mục 11 tái lập được bằng dữ liệu này, và vì biết trước $z\ell$ thật nên sinh viên tự chấm được sai số của mình. Hạt giống ngẫu nhiên được cố định trong hàm để hai lần chạy cho cùng kết quả.

4. Mô hình không rò trên Simulink

Mô hình nền gồm hai trạng thái: lưu lượng đầu tuyến và cột áp cuối tuyến. Đầu vào là H_1 và Q_2; đầu ra mô phỏng là Q_1 và H_3, đem so với dữ liệu đo.

$$\dot{Q}_1 = \frac{a_1}{L}\,(H_1 - H_3) - \mu\, Q_1 |Q_1| \tag{4.1a}$$

$$\dot{H}_3 = \frac{a_2}{L}\,(Q_1 - Q_2) \tag{4.1b}$$

Số hạng ma sát được viết là $\mu Q_1|Q_1|$. Lý do: bình phương làm mất dấu, nên khi dòng đảo chiều lực cản sẽ tác dụng sai hướng và mô hình mất ổn định. Dạng $Q|Q|$ giữ đúng dấu trong cả hai chiều. Nếu giả thiết dòng một chiều được chấp nhận thì hai dạng cho cùng kết quả.

4.1. Bảng ánh xạ vào–ra

Bảng này được Mục 14 tham chiếu khi truy lỗi sai thứ tự kênh. Nó phải được điền trước khi dựng khối, không phải sau.

Cổng	Tín hiệu	Nguồn	Đơn vị	Vai trò
In 1	H1	TT.H1 (đo)	m	Đầu vào
In 2	Q2	TT.Q2 (đo)	m³/s	Đầu vào
Out 1	Q1_sim	Integrator 1	m³/s	So với TT.Q1
Out 2	H3_sim	Integrator 2	m	So với TT.H3
State 1	Q1	—	m³/s	Điều kiện đầu từ mẫu đầu đoạn ổn định
State 2	H3	—	m	Điều kiện đầu từ mẫu đầu đoạn ổn định

Bảng 8. Ánh xạ cổng – tín hiệu – đơn vị của mô hình không rò.

4.2. Cấu hình bộ giải

Đây là nội dung bản trước bỏ sót, và nó gây sai số lớn hơn cả sai đơn vị. Hệ (4.1) có tần số dao động riêng tính được từ chính hai hệ số:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_1}{L}\cdot\frac{a_2}{L}} = \frac{c}{L}, \qquad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{c}{2\pi L} \tag{4.2}$$

Thay $a_1 = 0{,}048$, $a_2 = 3{,}28\times10^7$, $L = 200$ m được $\omega_n \approx 6{,}28$ rad/s, tức $f_n \approx 1{,}0$ Hz. Hệ dao động với chu kỳ khoảng một giây. Hai hệ quả trực tiếp:

- Bước thời gian cực đại của bộ giải phải nhỏ hơn nhiều so với 1 s. Đặt Max step size = 0,01 s. Để mặc định auto, bộ giải sẽ tự chọn bước lớn và làm mất dao động, cho ra một đáp ứng trơn nhưng sai.
- Hệ có hai thang thời gian rất khác nhau (quán tính nhanh, ma sát chậm) nên thuộc loại cứng. Dùng ode23tb hoặc ode15s; ode45 sẽ chạy rất lâu hoặc không hội tụ.

Thiết lập	Giá trị đề xuất	Lý do
Solver type	Variable-step	Đáp ứng có cả đoạn nhanh và đoạn chậm

Thiết lập	Giá trị đề xuất	Lý do
Solver	ode23tb (hoặc ode15s)	Hệ cứng do chênh lệch thang thời gian
Max step size	0,01 s	Nhỏ hơn 1/100 chu kỳ dao động riêng
Relative tolerance	1e-6	Mặc định 1e-3 quá thô cho biên độ dao động nhỏ
Zero-crossing detection	Bật	Số hạng |Q| có điểm gãy tại Q = 0
Algebraic loop	Phải không có	Nếu báo vòng lặp đại số là dấu hiệu nối sai nhánh hồi tiếp

Bảng 9. Cấu hình bộ giải cho mô hình đường ống.

4.3. Quy tắc dựng khối

- Đặt tên tín hiệu trùng với tên cột dữ liệu. Tên khác nhau giữa mô hình và dữ liệu là nguồn lỗi ánh xạ kênh.
- Khai báo đơn vị trong Signal Properties để Simulink tự phát hiện nối nhầm.
- Dùng Simulation Data Inspector để so sánh đo và mô phỏng; Scope chỉ dùng để nhìn nhanh.
- Không đặt gain ẩn bên trong nhiều subsystem. Mọi hệ số lấy từ Data Dictionary.
- Số hạng |Q| dùng khối Abs, không dùng sign(Q)*Q^2 vì cách sau tạo thêm điểm gián đoạn.

5. Phân tích độ nhạy và khả nhận dạng

Mục này là mới. Trước khi chạy tối ưu, phải trả lời câu hỏi: với tập dữ liệu đang có, tham số nào thực sự nhận dạng được. Bỏ qua bước này là nguyên nhân của những bộ tham số "hội tụ đẹp" nhưng vô nghĩa.

5.1. Ma trận độ nhạy chuẩn hóa

Độ nhạy phải được chuẩn hóa, vì a_2 lớn hơn μ khoảng mười bậc nên so sánh đạo hàm thô là vô nghĩa.

$$S_{ij} = \frac{p_j}{\sigma_{y_i}} \cdot \frac{\partial y_i}{\partial p_j}\bigg|_{p=p_0}, \qquad \kappa = \mathrm{cond}(S^{\mathrm{T}}S) \tag{4.3}$$

Trong đó p_j là tham số thứ j, σ_{yi} là độ lệch chuẩn của kênh đo thứ i. Cách làm: nhiễu từng tham số ±1 %, chạy mô phỏng, lấy sai phân trung tâm. Đọc kết quả theo hai chỉ số:

- Cột nào của S có biên độ nhỏ hơn hẳn các cột khác thì tham số tương ứng gần như không ảnh hưởng đến đầu ra — không nhận dạng được, nên cố định nó bằng giá trị thiết kế.
- Số điều kiện κ của S^TS lớn (thực tế lấy mốc trên 10^4) báo hiệu hai tham số bù trừ lẫn nhau. Khi đó bài toán có vô số nghiệm gần bằng nhau và giá trị tìm được không có ý nghĩa vật lý.

5.2. Chu kỳ lấy mẫu và giới hạn của tập dữ liệu hiện có

Kết quả ở Mục 4.2 cho $f_n \approx 1{,}0$ Hz. Tập nhận dạng của đề tài lấy mẫu ở Ts = 1 s, tức tần số lấy mẫu 1 Hz. Theo định lý lấy mẫu, tần số này bằng đúng tần số dao động riêng và thấp hơn hai lần mức tối thiểu cần thiết. Nói cách khác, tập dữ liệu hiện có không chứa thông tin về động học nhanh của tuyến ống.

Đây là một giới hạn thật, phải nói rõ với sinh viên thay vì che đi:

- Với Ts = 1 s, cái nhận dạng được chỉ là quan hệ tựa dừng giữa cột áp và lưu lượng. Hệ số ma sát μ vẫn nhận dạng được vì nó chi phối trạng thái xác lập.
- Hệ số quán tính a_1 và hệ số đàn hồi a_2 chi phối động học nhanh nên gần như không quan sát được. Điều này giải thích kết quả ở Bảng 11: sau nhận dạng a_1 chỉ đổi 0,004 % còn μ đổi 25 %.
- Muốn nhận dạng thực sự a_1 và a_2 thì phải lấy mẫu ở $Ts \leq 0{,}05$ s, tức tối thiểu 20 Hz, trên một đoạn dữ liệu ngắn có kích thích quá độ (đóng nhanh một van).

Cách xử lý được đề nghị cho bài giảng: giữ a_1 và a_2 ở giá trị tính từ thông số hình học và vận tốc truyền sóng (Mục 7), chỉ nhận dạng μ từ dữ liệu 1 Hz. Nếu vẫn muốn nhận dạng cả ba, phải ghi rõ trong báo cáo rằng a_1 và a_2 không được xác định bởi dữ liệu mà bởi giá trị khởi tạo.

6. Nhận dạng tham số



Hình 2. Luồng nhận dạng tham số từ dữ liệu thực.

6.1. Vấn đề chênh lệch thang tham số

Bộ tham số cần ước lượng có $a_2 \approx 3{,}3\times10^{7}$ trong khi $\mu \approx 5{,}9\times10^{-3}$. Hai đại lượng chênh nhau mười bậc độ lớn. Nếu đưa thẳng vào bộ tối ưu, ma trận Jacobi có số điều kiện rất xấu: thuật toán chỉ "nhìn thấy" a_2 và coi μ như hằng số. Đây là lỗi sinh viên gặp trong năm phút đầu tiên và thường bị hiểu nhầm thành "dữ liệu kém".

Cách xử lý: tối ưu trên biến logarit. Cách này vừa đưa ba tham số về cùng thang, vừa tự động bảo đảm chúng dương.

$$\theta = [\ln a_1,\ \ln a_2,\ \ln \mu]^{\mathrm{T}} \tag{4.4}$$

Nếu dùng giao diện Parameter Estimator, khai báo trường Scale của mỗi tham số bằng chính giá trị khởi tạo của nó, kết quả tương đương. Ngoài ra hai kênh đầu ra cũng chênh thang (Q tính bằng 10^{-2} m³/s, H tính bằng 10^{1} m) nên hàm phần dư phải chuẩn hóa theo độ lệch chuẩn từng kênh, nếu không kênh cột áp sẽ lấn át hoàn toàn kênh lưu lượng:

$$r(\theta) = [\frac{\hat{Q}_1(\theta) - Q_1}{\sigma_{Q_1}};\ \frac{\hat{H}_3(\theta) - H_3}{\sigma_{H_3}}], \qquad \theta^{\star} = \arg\min_{\theta} \|r(\theta)\|_2^2 \tag{4.5}$$

6.2. Tách tập huấn luyện và tập kiểm chứng

Bản trước ước lượng và đánh giá trên cùng một tập dữ liệu. Khi đó mọi chỉ tiêu ở Mục 15 đều mất ý nghĩa, vì mô hình đương nhiên khớp với dữ liệu đã dùng để khớp nó. Quy ước của bài giảng:

Tập	Tỷ lệ	Dùng để	Ràng buộc
Huấn luyện	≈ 60 %	Chạy tối ưu tìm a_1, a_2, μ	Phải chứa ít nhất một đoạn quá độ
Kiểm chứng	≈ 20 %	Chọn giữa các bộ nghiệm cục bộ	Không tham gia hàm mục tiêu
Kiểm tra cuối	≈ 20 %	Báo cáo độ phù hợp và phần dư	Chỉ chạm vào một lần, sau khi đã chốt tham số

Bảng 10. Phân chia dữ liệu cho nhận dạng.

Chia theo đoạn thời gian liên tục, không chia ngẫu nhiên theo mẫu. Chia ngẫu nhiên làm rò rỉ thông tin giữa các tập vì các mẫu liền kề gần như giống nhau.

6.3. Quy trình thực hiện

1. Mở Parameter Estimator và chọn mô hình không rò (hoặc chạy estimate_params.m ở Phụ lục A4).
2. Nhập tập huấn luyện: H_1 và Q_2 làm input; Q_1 và H_3 làm measured output.
3. Chọn tham số cần ước lượng, khai báo cận theo Bảng 6 và đặt Scale bằng giá trị khởi tạo.
4. Gán điều kiện đầu từ mẫu đầu tiên của đoạn ổn định, không lấy từ mẫu đầu tiên của tệp.
5. Chạy tối ưu từ ít nhất năm bộ giá trị khởi tạo khác nhau, sinh bằng cách nhân/chia giá trị nền cho 2 và 5.
6. So sánh độ phù hợp trên tập kiểm chứng, không trên tập huấn luyện.
7. Kiểm tra phần dư: nếu phần dư còn xu hướng rõ rệt thì lỗi nằm ở cấu trúc mô hình, không ở tham số. Tăng thêm vòng lặp tối ưu không giải quyết được.
8. Lưu bộ tham số kèm mã dữ liệu và phiên bản MATLAB theo Mục 1.2.

Tham số	Khởi tạo	Kết quả nhận dạng	Thay đổi tương đối	Nhận xét
a_1	0,04802	0,048002	−0,004 %	Gần như không đổi: không nhận dạng được ở Ts = 1 s

Tham số	Khởi tạo	Kết quả nhận dạng	Thay đổi tương đối	Nhận xét
a_2	$3{,}253853\times10^{7}$	$3{,}2832\times10^{7}$	+0,90 %	Thay đổi nhỏ, nằm trong sai số của giá trị khởi tạo
μ	0,0059266	0,0044301	−25,25 %	Thay đổi đáng kể: đây là tham số dữ liệu thực sự xác định

Bảng 11. Kết quả nhận dạng và mức thay đổi so với giá trị khởi tạo.

Cột "Thay đổi tương đối" là cột được thêm vào so với bản trước, và nó chính là kết luận của Mục 5: chỉ có μ được dữ liệu xác định. Trình bày đầy đủ ba tham số như thể cả ba đều đã nhận dạng được là một cách báo cáo gây hiểu nhầm.

7. Kiểm chứng vật lý bộ tham số

Mục này là mới, và là bài kiểm tra rẻ nhất mà hiệu quả nhất trong toàn bài. Ý tưởng: hai hệ số a_1 và a_2 không phải là số vô danh, chúng có nghĩa vật lý. Từ chúng suy ngược ra đường kính ống và vận tốc truyền sóng, rồi so với thực tế.

$$a_1 = gA \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4a_1}{\pi g}}, \qquad a_2 = \frac{c^2}{gA} = \frac{c^2}{a_1} \Rightarrow c = \sqrt{a_1 a_2} \tag{4.6}$$

Thay bộ tham số của đề tài:

Đại lượng suy ra	Từ giá trị khởi tạo	Từ kết quả nhận dạng	Đối chiếu thực tế
Tiết diện A	$4{,}895\times10^{-3}$ m²	$4{,}893\times10^{-3}$ m²	—
Đường kính D	78,94 mm	78,93 mm	Phù hợp ống DN80
Vận tốc sóng c	1250 m/s	1255 m/s	Nằm trong dải 1000 – 1400 m/s của nước trong ống cứng

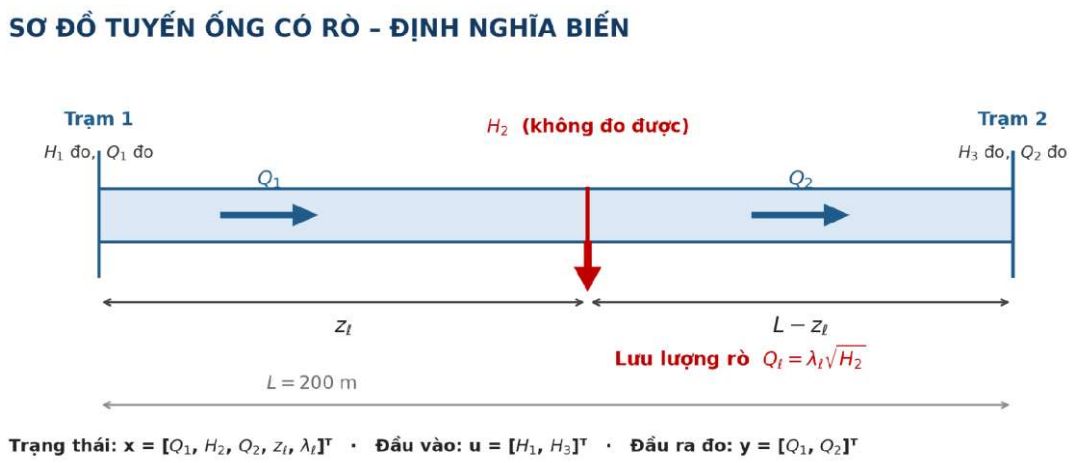
Bảng 12. Kiểm chứng vật lý bộ tham số nhận dạng.

Kết luận rút ra: bộ tham số có ý nghĩa vật lý và nhất quán với cấu hình thí nghiệm. Đồng thời, con số c = 1250 m/s tròn trịa ở cột giữa cho thấy giá trị khởi tạo được đặt từ giả thiết thiết kế chứ không từ dữ liệu — một chi tiết củng cố kết luận của Mục 5.2.

Đây là bài tập bắt buộc: sinh viên phải tự tính lại hai con số D và c từ bộ tham số của mình. Nếu ra đường kính 8 mm hoặc vận tốc sóng 50 m/s thì mô hình sai, dù đồ thị có khớp đến đâu.

PHẦN B — MÔ HÌNH RÒ, BỘ QUAN SÁT VÀ ĐÁNH GIÁ

8. Mô hình có rò và biểu diễn LPV



Hình 3. Sơ đồ tuyến ống có rò và định nghĩa biến.

Điểm rò chia tuyến thành hai đoạn có chiều dài $z\ell$ và $L - z\ell$. Cột áp tại điểm rò là H_2, đại lượng không đo được — đây chính là lý do phải dùng bộ quan sát. Vị trí rò $z\ell$ và hệ số lỗ rò $\lambda\ell$ được đưa vào làm trạng thái tăng cường với đạo hàm bằng không, nhờ đó bài toán định vị rò trở thành bài toán ước lượng trạng thái.

$$\dot{Q}_1 = \frac{a_1}{z_\ell}(H_1 - H_2) - \mu Q_1|Q_1| \tag{4.7}$$

$$\dot{H}_2 = \frac{a_2}{z_\ell}(Q_1 - Q_2 - \lambda_\ell\sqrt{H_2}) \tag{4.8}$$

$$\dot{Q}_2 = \frac{a_1}{L - z_\ell}(H_2 - H_3) - \mu Q_2|Q_2| \tag{4.9}$$

$$\dot{z}_\ell = 0, \qquad \dot{\lambda}_\ell = 0 \tag{4.10}$$

Lưu ý một điểm dễ nhầm: mô hình không rò ở Mục 4 nhận đầu vào là H_1 và Q_2, còn mô hình có rò nhận đầu vào là H_1 và H_3. Hai mô hình có quy ước vào–ra khác nhau và không thể dùng chung khối nạp dữ liệu. Phải lập bảng ánh xạ riêng cho từng mô hình.

8.1. Biến lập lịch

Hệ (4.7)–(4.10) phi tuyến. Biểu diễn LPV đưa nó về dạng tuyến tính có tham số biến thiên bằng cách gom các số hạng phi tuyến vào một véc-tơ biến lập lịch ρ:

$$\rho = [-\mu|Q_1|,\ \frac{1}{z_\ell},\ -\frac{\sqrt{H_2}}{z_\ell},\ \frac{a_1}{L - z_\ell},\ -\mu|Q_2|]^{\mathrm{T}} \tag{4.11}$$

$$\dot{x} = A(\rho)x + B(\rho)u, \qquad y = Cx \tag{4.12}$$

8.2. Ma trận A(ρ), B(ρ), C tường minh

Ba ma trận dưới đây được viết đầy đủ theo thứ tự trạng thái $x = [Q_1, H_2, Q_2, z\ell, \lambda\ell]^T$, đầu vào $u = [H_1, H_3]^T$ và đầu ra $y = [Q_1, Q_2]^T$.

A(ρ)	Q_1	H_2	Q_2	$z\ell$	$\lambda\ell$
$\dot{Q}_1$	ρ_1	$-a_1\rho_2$	0	0	0
$\dot{H}_2$	$a_2\rho_2$	0	$-a_2\rho_2$	0	$a_2\rho_3$
$\dot{Q}_2$	0	ρ_4	ρ_5	0	0
$\dot{z\ell}$	0	0	0	0	0
$\dot{\lambda\ell}$	0	0	0	0	0

Bảng 13. Ma trận A(ρ). Hàng là đạo hàm trạng thái, cột là trạng thái.

B(ρ)	H_1	H_3		C	Q_1 H_2 Q_2 $z\ell$ $\lambda\ell$
$\dot{Q}_1$	$a_1\rho_2$	0		$y_1 = Q_1$	1 0 0 0 0
$\dot{H}_2$	0	0		$y_2 = Q_2$	0 0 1 0 0
$\dot{Q}_2$	0	$-\rho_4$			
$\dot{z\ell}$	0	0			
$\dot{\lambda\ell}$	0	0			

Bảng 14. Ma trận B(ρ) và ma trận đầu ra C.

Kiểm tra nhanh tính đúng đắn: nhân hàng đầu của A và B với véc-tơ trạng thái và đầu vào phải ra đúng (4.7). Đây là bài kiểm tra cấu trúc bắt buộc ở Mục 15.

8.3. Miền hợp lệ và mã có chặn

Miền hợp lệ được phát biểu trước:

$$z_{\min} \le \hat{z}_\ell \le L - z_{\min}, \qquad H_2 \ge 0, \qquad \hat{\lambda}_\ell \ge 0 \tag{4.13}$$

Chọn z_min = 5 m cho tuyến 200 m. Con số này không tùy tiện: nó đúng bằng vùng mà độ nhạy của phần dư theo $z\ell$ suy giảm mạnh, và cũng chính là vùng gây ra sai số lớn nhất trong Bảng 16. Hàm tính ρ và ma trận LPV được viết như sau:

```
function [A,B,C,rho,ok] = leak_lpv_fcn(x, p, cfg)
%LEAK_LPV_FCN Ma tran LPV cua mo hinh ro nam trang thai.
%   x = [Q1; H2; Q2; z; lambda],  u = [H1; H3],  y = [Q1; Q2]


z = x(4);  H2 = x(2);
```

```
zlo = cfg.zmin;  zhi = cfg.L - cfg.zmin;

% Co hop le: bao ra ngoai de khoi danh gia loai ket qua nay
ok = (z > zlo) && (z < zhi) && (H2 >= 0) && (x(5) >= 0);

% Chan gia tri TRUOC khi chia va truoc khi lay can
z   = min(max(z, zlo), zhi);
H2c = max(H2, 0);

rho = [ -p.mu*abs(x(1)) ;        % rho1
         1/z            ;       % rho2
        -sqrt(H2c)/z    ;       % rho3
         p.a1/(cfg.L - z);       % rho4  (da chua a1)
        -p.mu*abs(x(3)) ];       % rho5

A = zeros(5);
A(1,1) = rho(1);        A(1,2) = -p.a1*rho(2);
A(2,1) = p.a2*rho(2);   A(2,3) = -p.a2*rho(2);   A(2,5) = p.a2*rho(3);
A(3,2) = rho(4);        A(3,3) = rho(5);

B = zeros(5,2);
B(1,1) =  p.a1*rho(2);
B(3,2) = -rho(4);

C = [1 0 0 0 0;
     0 0 1 0 0];
end
```

Ba nguyên tắc rút ra từ đoạn mã trên và cần nhấn mạnh khi giảng: chặn giá trị trước khi chia chứ không xử lý NaN sau khi đã chia; cờ ok được tính từ giá trị gốc chứ không từ giá trị đã chặn; cờ ok phải được truyền ra ngoài đến khối đánh giá, vì kết quả tính từ giá trị đã chặn vẫn là một con số nhưng không còn ý nghĩa.

9. Nội suy đa diện và độ lợi bộ quan sát

Ý tưởng: mỗi thành phần ρ_k biến thiên trong một khoảng đã biết, nên véc-tơ ρ nằm trong một hộp có $2^5 = 32$ đỉnh ν_k. Ma trận A(ρ) phụ thuộc affine vào ρ nên viết được thành tổ hợp lồi của các ma trận tại đỉnh:

$$A(\rho) = \sum_{k=1}^{2^5} \alpha_k(\rho)\, A(\nu_k), \qquad \sum_k \alpha_k = 1, \;\; \alpha_k \geq 0 \tag{4.14}$$

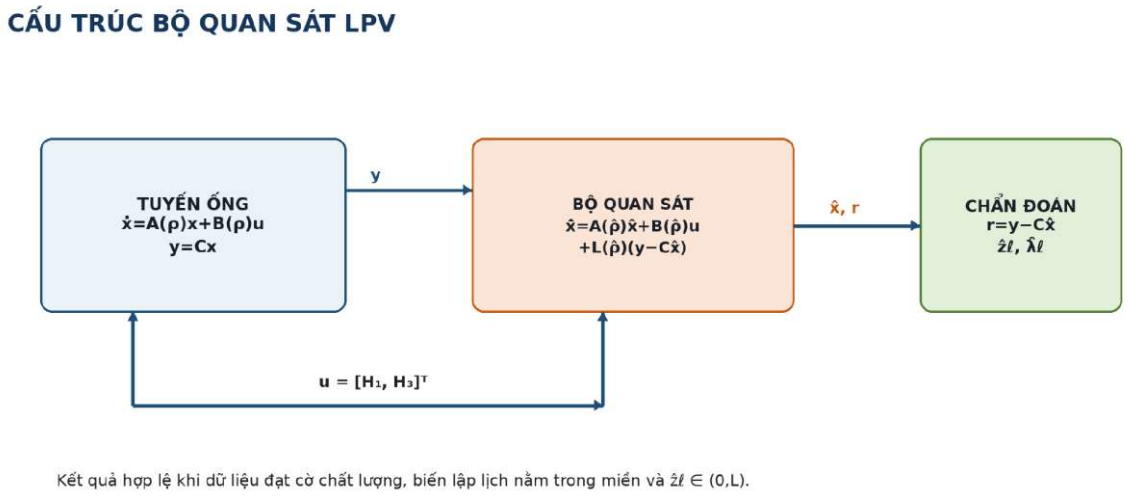
Trọng số α_k tính bằng tích các hệ số nội suy tuyến tính trên từng chiều. Hai điều kiện $\Sigma\alpha = 1$ và $\alpha \geq 0$ chính là điều kiện để ρ thực sự nằm trong hộp; nếu chúng bị vi phạm thì ρ đã ra ngoài miền và kết quả phải bị loại.

Độ lợi bộ quan sát tìm bằng cách giải một hệ bất đẳng thức ma trận tuyến tính tại toàn bộ 32 đỉnh với chung một ma trận Lyapunov P, theo khuôn khổ trình bày trong [6]:

$$(A(\nu_k) - L_k C)^{\mathrm{T}} P + P(A(\nu_k) - L_k C) \prec 0, \qquad P = P^{\mathrm{T}} \succ 0 \tag{4.15}$$

Nếu không có bản quyền công cụ giải LMI, dùng phương án thay thế: đặt cực bằng place tại từng đỉnh rồi nội suy L_k theo cùng bộ trọng số α_k. Cách này không bảo đảm ổn định toàn miền về mặt lý thuyết, nên khi dùng phải kiểm tra ổn định bằng mô phỏng trên toàn bộ kịch bản và ghi rõ hạn chế trong báo cáo.

10. Mô phỏng bộ quan sát



Hình 4. Kết nối đối tượng, bộ quan sát và khối chẩn đoán.

$$\dot{\hat{x}} = A(\hat{\rho})\hat{x} + B(\hat{\rho})u + L(\hat{\rho})(y - C\hat{x}), \qquad r = y - C\hat{x} \tag{4.16}$$

Bộ quan sát nhận u, y và độ lợi L(ρ̂) tính từ biến lập lịch ước lượng. Ba điểm cần xử lý đúng khi mô phỏng:

- Khởi tạo: gán Q_1 và Q_2 từ tín hiệu đo tại thời điểm đầu; gán H_2 bằng trung bình của H_1 và H_3; gán $z\ell$ bằng L/2 và $\lambda\ell$ bằng 0. Khởi tạo $z\ell$ tại một đầu tuyến làm bộ quan sát bắt đầu ngay sát biên miền hợp lệ.
- Quá độ khởi tạo: khóa tín hiệu cảnh báo trong khoảng cfg.tWarmup đầu tiên. Trong giai đoạn này phần dư lớn do sai lệch điều kiện đầu, không phải do rò.
- Ghi kết quả: mỗi phiên lưu $\hat{x}$, phần dư r, $\hat{\rho}$, cờ ok và thời gian mô phỏng. Thiếu cờ ok thì không phân biệt được kết quả hợp lệ với kết quả đã bị chặn giá trị.

11. Thiết kế kịch bản mô phỏng

Kịch bản	Mục đích	Thông số cần lưu	Kết quả mong đợi
Không rò	Kiểm tra mô hình nền và mức phần dư cơ sở	Điểm bơm, trạng thái van, tham số, sai lệch đo–mô phỏng	$\lambda\ell \approx 0$, không phát cảnh báo
Rò 50 m	Kiểm tra vùng trong miền, phía đầu tuyến	$z\ell$ thật, $\hat{z}\ell$, thời gian hội tụ	Sai số vài mét, cờ hợp lệ
Rò 100 m	Điểm giữa tuyến, điều kiện thuận lợi nhất	$z\ell$ thật, $\hat{z}\ell$, phần dư	Sai số nhỏ nhất trong tập
Rò 150 m	Kiểm tra độ nhạy phía cuối tuyến	$\hat{z}\ell$, phần dư, miền ρ	Sai số tăng so với điểm giữa
Rò 2 m	Vùng sát biên nhưng còn trong miền	$\hat{z}\ell$, khoảng cách tới z_min	Còn xác định, sai số lớn nhất
Rò 198 m	Vùng ngoài miền hợp lệ	Cờ ok, giá trị ρ tại thời điểm vi phạm	Trả về "không xác định", không trả về số
Mất mẫu	Kiểm tra tiền xử lý và logic cờ	Sequence, timestamp, cờ chất lượng	Trạng thái "không xác định", tuyệt đối không phải 0 m

Kịch bản	Mục đích	Thông số cần lưu	Kết quả mong đợi
Sai đơn vị cố ý	Kiểm tra khả năng tự phát hiện của nhóm	Bậc độ lớn của đáp ứng	Nhóm phát hiện được qua Bảng 6

Bảng 15. Bộ kịch bản mô phỏng. Hai dòng cuối được thêm so với bản trước.

12. Đánh giá kết quả mô phỏng

Sai số được định nghĩa có dấu, quy ước dương khi ước lượng lệch về phía cuối tuyến:

$$e_i = \hat{z}_{\ell,i} - z_{\ell,i} \tag{4.17}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|e_i| \tag{4.18}$$

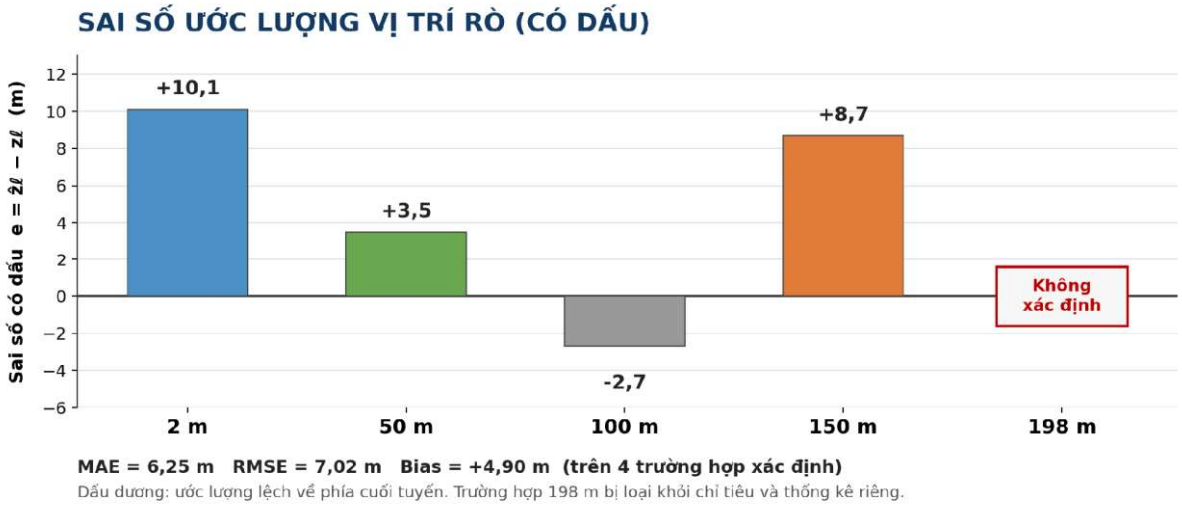
$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}e_i^{2}} \tag{4.19}$$

$$\mathrm{Bias} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}e_i \tag{4.20}$$

Ba chỉ tiêu này trả lời ba câu hỏi khác nhau và không thay thế được cho nhau. MAE cho biết độ lớn sai số trung bình. RMSE nhạy với trường hợp xấu nhất, nên RMSE lớn hơn MAE nhiều là dấu hiệu có điểm bất thường. Bias cho biết sai số có lệch một chiều hay không — và chỉ tính được nếu sai số được ghi kèm dấu.

Kịch bản	zℓ thật (m)	ẑℓ ước lượng (m)	Sai số e_i (m)	Cờ hợp lệ
Rò 2 m	2	12,1	+10,1	Hợp lệ
Rò 50 m	50	53,5	+3,5	Hợp lệ
Rò 100 m	100	97,3	−2,7	Hợp lệ
Rò 150 m	150	158,7	+8,7	Hợp lệ
Rò 198 m	198	—	—	Ngoài miền

Bảng 16. Bảng đối chiếu vị trí rò. Bảng này là mới; nếu không có nó thì Bias không tái tính được.



Hình 5. Sai số ước lượng vị trí rò, biểu diễn có dấu.

Với bốn trường hợp xác định: MAE = 6,25 m, RMSE = 7,02 m, Bias = +4,90 m. Bias dương đáng kể so với MAE cho thấy bộ quan sát có xu hướng ước lượng vị trí rò lệch về phía cuối tuyến — đây là thông tin chẩn đoán về mô hình, không phải nhiễu ngẫu nhiên, và là hướng cải tiến tiếp theo. Ở bản trước, hình vẽ chỉ biểu diễn trị tuyệt đối nên nhận xét này không rút ra được và con số Bias không kiểm chứng được.

Quy tắc bắt buộc khi báo cáo: chỉ đưa vào MAE, RMSE và Bias những kịch bản có cờ hợp lệ. Trường hợp ngoài miền được thống kê riêng theo tỷ lệ (ở đây là 1/5 trường hợp), tuyệt đối không quy về giá trị 0 và không loại bỏ im lặng. Một hệ thống báo "không xác định" trung thực thì tin được; một hệ thống báo 0 m khi mất dữ liệu thì không.

13. Kết nối dữ liệu thời gian thực

Trong cấu hình thực nghiệm, dữ liệu từ hai trạm được ghép tại đầu nhận trung tâm rồi chuyển đến máy tính nhúng Raspberry Pi [5]. Chương trình tính toán chạy theo chu kỳ Ts = 1 s, xuất $\hat{z}\ell$ cùng cờ trạng thái về PLC trung tâm.

Yêu cầu nhất quán giữa mô phỏng và triển khai gồm bốn điểm, và cả bốn đều phải kiểm tra bằng một trường hợp thử chạy song song trên hai môi trường:

Hạng mục	Phải trùng nhau giữa mô phỏng và triển khai
Thứ tự kênh	Ánh xạ H_1, H_3, Q_1, Q_2 theo đúng Bảng 8
Đơn vị	Toàn bộ ở SI ngay tại biên nhận dữ liệu
Chu kỳ	Ts = 1 s ở cả hai phía; chênh lệch chu kỳ làm sai hằng số thời gian

Hạng mục	Phải trùng nhau giữa mô phỏng và triển khai
Ngữ nghĩa cờ	Giá trị "không xác định" phải là một mã riêng, không phải một con số trong dải hợp lệ

Bảng 17. Yêu cầu nhất quán giữa mô phỏng và hệ thực.

Về mặt triển khai, nếu dùng Simulink Support Package for Raspberry Pi thì có thể chạy chế độ External Mode để đối chiếu trực tiếp tín hiệu mô phỏng với tín hiệu chạy trên thiết bị. Đây là cách hiệu quả nhất để phát hiện lệch thứ tự kênh.

14. Lỗi thường gặp và cách kiểm tra

Biểu hiện	Nguyên nhân thường gặp	Cách kiểm tra
Đáp ứng sai bậc lớn	Sai đơn vị L/min ↔ m^3/s hoặc bar ↔ m	Đối chiếu dải giá trị với Bảng 6 trước khi vào mô hình
Đáp ứng trơn, mất dao động	Bước thời gian bộ giải quá lớn	Đặt Max step size = 0,01 s (Bảng 9) và chạy lại
Mô phỏng chạy rất chậm	Dùng ode45 cho hệ cứng	Chuyển sang ode23tb hoặc ode15s
Tối ưu chỉ đổi một tham số	Chênh lệch thang tham số mười bậc	Tối ưu trên biến logarit hoặc đặt Scale (Mục 6.1)
Độ phù hợp cao nhưng dự báo kém	Đánh giá trên chính tập huấn luyện	Tách tập kiểm chứng theo Bảng 10
Tham số hội tụ về cận	Cận đặt quá hẹp, hoặc tham số không khả nhận dạng	Xem ma trận độ nhạy (Mục 5.1) trước khi nới cận
Mô hình không hội tụ	Điều kiện đầu hoặc tham số ngoài miền	So sánh giá trị đầu với đoạn ổn định; đặt cận theo Bảng 6
NaN hoặc Inf trong ρ	$z\ell$ tiến về 0 hoặc $H_2 < 0$	Chặn giá trị trước khi chia và trước khi lấy căn (Mục 8.3)

Biểu hiện	Nguyên nhân thường gặp	Cách kiểm tra
Kết quả nhảy bậc khi zℓ gần biên	Giá trị bị chặn nhưng cờ ok không được truyền ra	Kiểm tra đường đi của cờ đến khối đánh giá
Gain nội suy bất thường	Thứ tự đỉnh sai hoặc trọng số sai	Kiểm tra $\Sigma\alpha = 1$ và $\alpha \geq 0$ (Mục 9)
Mô hình rò và không rò cho kết quả lệch	Hai mô hình dùng quy ước đầu vào khác nhau	Đối chiếu bảng ánh xạ riêng của từng mô hình (Mục 8)
Sai thứ tự kênh	Ánh xạ H_1, H_3, Q_1, Q_2 không thống nhất	Dùng Bảng 8 và thử từng kênh một
Kết quả 0 m khi mất dữ liệu	Logic quy đổi "không xác định" thành 0	Dùng mã trạng thái riêng, kiểm tra bằng kịch bản mất mẫu
Suy ra đường kính vô lý	Sai đơn vị hoặc sai cấu trúc phương trình	Kiểm chứng vật lý theo Mục 7

Bảng 18. Lỗi thường gặp. Bảy dòng được thêm so với bản trước.

15. Bộ tiêu chí kiểm chứng mô hình

Mỗi tiêu chí dưới đây trỏ tới một mục cụ thể trong bài, để không còn tham chiếu treo như bản trước.

Tiêu chí	Cách kiểm tra	Kết quả chấp nhận
Đơn vị	Đối chiếu Bảng 6 và kiểm tra thứ nguyên (Mục 2.1)	Mọi tín hiệu ở SI khi vào mô hình
Ánh xạ kênh	Đối chiếu Bảng 8, thử từng kênh	Không có cổng nào nối nhầm
Cấu hình bộ giải	Đối chiếu Bảng 9, chạy lại với bước nhỏ hơn hai lần	Kết quả không đổi quá 1 %
Cấu trúc	Nhân tay A(ρ), B(ρ) với x, u (Bảng 13, 14)	Ra đúng (4.7)–(4.9), đúng dấu và đúng mẫu số

Tiêu chí	Cách kiểm tra	Kết quả chấp nhận
Khả nhận dạng	Ma trận độ nhạy chuẩn hóa (Mục 5.1)	Mọi tham số được báo cáo đều có độ nhạy đáng kể
Tính tái lập	Chạy lại từ init.m trên máy khác	Cùng dữ liệu và phiên bản cho cùng kết quả
Độ phù hợp mô hình nền	Đồ thị đo–mô phỏng và phần dư trên tập kiểm tra cuối	Phần dư không còn xu hướng rõ rệt
Ý nghĩa vật lý	Suy ngược D và c từ a_1, a_2 (Mục 7)	Nằm trong dải hợp lý của cấu hình thực
Miền LPV	Ghi nhật ký min/max của ρ và cờ ok	Không dùng kết quả khi ρ ngoài miền
Chẩn đoán	So $\hat{z}\ell$ với $z\ell$ thật theo Bảng 16	Tính được sai số có dấu và trạng thái hợp lệ
Dữ liệu lỗi	Chèn mất mẫu và NaN	Hệ thống xuất “không xác định”, không xuất 0 m

Bảng 19. Bộ tiêu chí kiểm chứng.

16. Hoạt động STEM

Nhóm sinh viên thiết kế kế hoạch mô phỏng cho một vị trí rò tự chọn. Kế hoạch gồm sơ đồ khối, bảng ánh xạ vào–ra, bảng biến và đơn vị, tham số và cận, điều kiện đầu, kịch bản lỗi, sản phẩm lưu và chỉ tiêu kiểm chứng.

Nhóm khác thực hiện phản biện. Để việc phản biện có mục tiêu rõ ràng thay vì nhận xét chung chung, mỗi nhóm phản biện nhận một danh mục ba câu hỏi bắt buộc phải trả lời:

1. Chỉ ra một đại lượng trong kế hoạch mà thứ nguyên hai vế không khớp, hoặc chứng minh cả bảng đều khớp.
2. Chỉ ra một giả thiết được dùng nhưng chưa phát biểu (ví dụ: dòng một chiều, ống cứng tuyệt đối, nhiệt độ không đổi).
3. Chỉ ra kết quả nào trong báo cáo sẽ đổi nếu chạy lại trên máy khác, và vì sao.

Biến thể nâng cao: giảng viên cố ý sửa một hệ số quy đổi trong tệp dữ liệu phát cho nhóm và không báo trước. Nhóm nào phát hiện được bằng bảng dải giá trị sẽ hiểu vì sao Mục 2 tồn tại.

17. Câu hỏi kiểm tra nhanh và bài tập

17.1. Câu hỏi kiểm tra nhanh trong giờ

Mỗi câu gắn với một mục, dùng ngay sau khi giảng xong mục đó, trả lời trong hai phút.

Sau mục	Câu hỏi
Mục 1	Vì sao tệp raw không bao giờ được ghi đè? Nêu một tình huống hỏng nếu vi phạm.
Mục 2	Đơn vị của a_2 là gì? Nếu ai đó nhập a_2 theo m thay vì m^{-1}, đáp ứng sai bao nhiêu lần?
Mục 4	Vì sao viết $\mu Q\|Q\|$ chứ không viết μQ^2?
Mục 5	Với Ts = 1 s, tham số nào trong ba tham số thực sự được dữ liệu xác định? Vì sao?
Mục 6	Nếu bỏ bước chuẩn hóa thang, bộ tối ưu sẽ bỏ qua tham số nào trước tiên?
Mục 8	Dự đoán điều gì xảy ra với ρ_2 khi $z\ell$ tiến về 0, trước khi chạy mã.

Sau mục	Câu hỏi
Mục 12	Vì sao MAE và Bias có thể rất khác nhau? Cho một bộ bốn số minh họa.

Bảng 20. Câu hỏi kiểm tra nhanh theo mục.

17.2. Bài tập

1. Giải thích vì sao cần tách dữ liệu raw và processed, minh họa bằng một tình huống cụ thể.
2. Vẽ sơ đồ Simulink cho hai phương trình (4.1a) và (4.1b), có ghi đơn vị trên từng đường tín hiệu.
3. Lập danh sách tham số, cận và giá trị Scale dùng cho Parameter Estimation. Giải thích cách chọn cận.
4. Tính ma trận độ nhạy chuẩn hóa cho ba tham số trên tập dữ liệu của nhóm và kết luận tham số nào nên cố định.
5. Từ bộ tham số nhận dạng của nhóm, suy ngược đường kính ống và vận tốc truyền sóng. Kết quả có hợp lý không?
6. Viết hàm kiểm tra tránh NaN khi tính ρ_2 và ρ_3, kèm ba trường hợp thử: $z\ell = 0$, $z\ell = L$, $H_2 < 0$.
7. Nhân tay hàng thứ hai của $A(\rho)$ với véc-tơ trạng thái và chứng minh kết quả trùng với (4.8).
8. Thiết kế một kịch bản mất bản tin và mô tả kết quả mong đợi ở từng khối trên đường tín hiệu.
9. Giải thích vì sao 198 m không được gán thành 0 m. Nêu hậu quả kỹ thuật nếu hệ thực làm như vậy.
10. Từ Bảng 16, kiểm tra lại ba con số MAE, RMSE và Bias. Giải thích ý nghĩa của việc Bias mang dấu dương.
11. Xây dựng mẫu báo cáo kết quả gồm đồ thị, bảng chỉ tiêu, cờ hợp lệ và dấu phiên bản tệp.

18. Đánh giá

Rubric dưới đây thay cho bảng tỷ trọng đơn thuần ở bản trước. Mỗi tiêu chí có ba mức để việc chấm nhất quán giữa các giảng viên và để sinh viên biết trước đích cần đạt.

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Cấu trúc dữ liệu và tính tái lập	Tham số rải rác, không chạy lại được	Có init.m, chạy lại được trên cùng máy	Dùng Project và Data Dictionary, chạy lại được trên máy khác, kết quả mang dấu phiên bản	20%
Mô hình Simulink đúng phương trình	Sai đơn vị hoặc sai thứ tự kênh	Đúng phương trình, đúng đơn vị, có bảng ánh xạ	Thêm cấu hình bộ giải hợp lý và kiểm chứng thứ nguyên bằng văn bản	30%
Kế hoạch nhận dạng và kịch bản	Chạy tối ưu không xử lý chênh thang; không tách tập	Có chuẩn hóa thang và tách tập kiểm chứng	Thêm phân tích độ nhạy và biện luận tham số nào không khả nhận dạng	20%
Kiểm chứng và xử lý lỗi	Báo cáo số liệu không phân biệt hợp lệ và ngoài miền	Có cờ hợp lệ, loại đúng trường hợp ngoài miền	Thêm kiểm chứng vật lý và biện luận dấu của Bias	20%
Trình bày kỹ thuật	Thiếu đơn vị, thiếu chú thích hình, số liệu không truy nguyên được	Đầy đủ đơn vị và chú thích	Mọi con số trong báo cáo đều chỉ được về dữ liệu và mã sinh ra nó	10%

Bảng 21. Rubric đánh giá.

PHỤ LỤC — MÃ NGUỒN KÈM THEO

Bốn tệp dưới đây đủ để chạy toàn bộ Phần A mà không cần phần cứng. Mã được viết không dấu tiếng Việt trong chú thích để tránh lỗi bảng mã khi mở trên máy khác.

A1. scripts/init.m

```
%% init.m - Khai bao tham so, can va duong dan cho bai giang BG4
clear; clc;
here = fileparts(mfilename('fullpath'));
root = fileparts(here);
addpath(genpath(fullfile(root,'scripts')));

cfg.Ts      = 1;        % s   - chu ky tap nhan dang hien co
cfg.TsFast  = 0.02;     % s   - chu ky can thiet de nhan dang a1, a2 (Muc 5.2)
cfg.L       = 200;      % m   - chieu dai tuyen
cfg.g       = 9.81;     % m/s^2
cfg.zmin    = 5;        % m   - bien mien hop le cua z_leak
cfg.tWarmup = 30;       % s   - khoa canh bao trong qua do khoi tao

% Bo tham so nen (gia tri khoi tao, dat tu thiet ke: D = 79 mm, c = 1250 m/s)
p0.a1 = 0.04802;        % m^3/s^2 = g*A
p0.a2 = 3.253852561e7;  % 1/m     = c^2/(g*A)
p0.mu = 0.0059266;      % 1/m^3

% Can tren/duoi cho Parameter Estimation
lb.a1 = 0.5*p0.a1;   ub.a1 = 2*p0.a1;
lb.a2 = 0.5*p0.a2;   ub.a2 = 2*p0.a2;
lb.mu = 0.1*p0.mu;   ub.mu = 10*p0.mu;

cfg.paths.raw       = fullfile(root,'data','raw');
cfg.paths.processed = fullfile(root,'data','processed');
cfg.paths.results   = fullfile(root,'results');

cfg.version.data   = 'raw_2026-03-12';
```

```
cfg.version.params = 'p_est_v3';
cfg.version.matlab = version('-release');
cfg.version.stamp  = datestr(now,'yyyymmdd_HHMMSS');
```

A2. scripts/gen_synthetic_data.m

```
function data = gen_synthetic_data(cfg, p, zleak, lambda, tEnd)
%GEN_SYNTHETIC_DATA Sinh du lieu thay the khi khong co phan cung.
%   zleak = NaN  -> kich ban khong ro (mo hinh hai trang thai)
%   zleak = so   -> kich ban co ro    (mo hinh ba trang thai thuy luc)
if nargin < 5, tEnd = 600; end

H1 = @(t) 30 + 0.5*sin(2*pi*t/180);          % m, cot ap dau tuyen
H3 = @(t) 12 + 0.3*sin(2*pi*t/240);          % m, cot ap cuoi tuyen
Q2d= @(t) 0.020 + 0.003*sin(2*pi*t/300);     % m^3/s, nhu cau cuoi tuyen

tf = (0:cfg.TsFast:tEnd)';                   % luoi min de khong mat dong hoc
opt= odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-10);

if isnan(zleak)
    % x = [Q1; H3sim], u = [H1; Q2]  -- quy uoc cua Muc 4
    f  = @(t,x)[ (p.a1/cfg.L)*(H1(t)-x(2)) - p.mu*x(1)*abs(x(1));
                 (p.a2/cfg.L)*(x(1)-Q2d(t)) ];
    x0 = [0.020; 12];
    [~,X] = ode15s(f, tf, x0, opt);
    Q1f = X(:,1);  H3f = X(:,2);  Q2f = Q2d(tf);
else
    % x = [Q1; H2; Q2], u = [H1; H3]  -- quy uoc cua Muc 8
    f  = @(t,x)[ (p.a1/zleak)*(H1(t)-x(2))       - p.mu*x(1)*abs(x(1));
                 (p.a2/zleak)*(x(1)-x(3)-lambda*sqrt(max(x(2),0)));
                 (p.a1/(cfg.L-zleak))*(x(2)-H3(t))- p.mu*x(3)*abs(x(3)) ];
    x0 = [0.020; 0.5*(H1(0)+H3(0)); 0.020];
    [~,X] = ode15s(f, tf, x0, opt);
    Q1f = X(:,1);  H3f = H3(tf);  Q2f = X(:,3);
```

```
end

% Ha mau ve Ts va them nhieu do
k  = round(cfg.Ts/cfg.TsFast);
idx= 1:k:numel(tf);
t  = tf(idx);

rng(20260312);                          % co dinh de tai lap
sQ = 2e-4;  sH = 0.02;                    % do lech chuan nhieu do
data.t  = t;
data.H1 = H1(t) + sH*randn(size(t));
data.H3 = H3f(idx) + sH*randn(size(t));
data.Q1 = Q1f(idx) + sQ*randn(size(t));
data.Q2 = Q2f(idx) + sQ*randn(size(t));
data.quality = ones(size(t));
data.meta = struct('zleak',zleak,'lambda',lambda,'Ts',cfg.Ts, ...
                   'TsFast',cfg.TsFast,'seed',20260312,'params',p);
end
```

A3. scripts/leak_lpv_fcn.m

Xem đoạn mã đầy đủ ở Mục 8.3. Khi dùng trong Simulink, đặt hàm này trong khối MATLAB Function và xuất thêm cổng cờ ok ra ngoài để khối đánh giá nhận được.

A4. scripts/estimate_params.m

```
function [pHat, info] = estimate_params(dTrain, p0, lb, ub, cfg)
%ESTIMATE_PARAMS Nhan dang a1, a2, mu tren thang logarit.
%   Toi uu tren log(p) de ba tham so ve cung thang va luon duong.

theta0 = log([p0.a1; p0.a2; p0.mu]);
lbT    = log([lb.a1; lb.a2; lb.mu]);
ubT    = log([ub.a1; ub.a2; ub.mu]);

opt = optimoptions('lsqnonlin', ...
      'Display','iter', ...
```

```
        'FiniteDifferenceType','central', ...   % sai phan trung tam
        'FiniteDifferenceStepSize',1e-4, ...
        'MaxFunctionEvaluations',2000);

[thetaHat, resnorm, res, flag] = ...
    lsqnonlin(@(th) residual(th, dTrain, cfg), theta0, lbT, ubT, opt);

pv   = exp(thetaHat);
pHat = struct('a1',pv(1), 'a2',pv(2), 'mu',pv(3));
info = struct('resnorm',resnorm, 'residual',res, 'exitflag',flag, ...
              'theta',thetaHat);
end

function r = residual(theta, dd, cfg)
p = struct('a1',exp(theta(1)), 'a2',exp(theta(2)), 'mu',exp(theta(3)));
[Q1s, H3s] = sim_noleak(p, dd, cfg);        % chay mo hinh (4.1a)-(4.1b)

% Chuan hoa tung kenh theo do lech chuan, neu khong kenh cot ap se lan at
r = [ (Q1s - dd.Q1)/std(dd.Q1);
      (H3s - dd.H3)/std(dd.H3) ];
end
```

A5. scripts/run_case.m

```
function res = run_case(caseName, p, cfg)
%RUN_CASE Chay mot kich ban va ghi ket qua kem dau phien ban.

switch caseName
    case 'noleak',  z = NaN;  lam = 0;
    case 'leak50',  z = 50;   lam = 1.5e-4;
    case 'leak100', z = 100;  lam = 1.5e-4;
    case 'leak150', z = 150;  lam = 1.5e-4;
    case 'leak2',   z = 2;    lam = 1.5e-4;
    case 'leak198', z = 198;  lam = 1.5e-4;
```

```
   otherwise, error('Kich ban khong hop le: %s', caseName);
end

data = gen_synthetic_data(cfg, p, z, lam);
out  = sim('model/leak_lpv.slx', 'StopTime', num2str(data.t(end)));

res.zhat  = out.zhat.Data(end);
res.ok    = all(out.okFlag.Data(out.tout > cfg.tWarmup));
res.err   = res.ok * (res.zhat - z);        % sai so CO DAU (4.17)
if ~res.ok, res.zhat = NaN; res.err = NaN; end   % khong quy ve 0

res.case  = caseName;
res.ztrue = z;
res.meta  = cfg.version;

fn = sprintf('%s_%s_%s.mat', caseName, cfg.version.params, cfg.version.stamp);
save(fullfile(cfg.paths.results, fn), 'res', 'data');
end
```

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] MathWorks. Simulink Documentation — Choose a Solver. Natick, MA. Truy cập tháng 3/2026. (Dẫn ở Mục 4.2)

[2] MathWorks. Simulink Design Optimization — Estimate Model Parameter Values Documentation. Natick, MA. Truy cập tháng 3/2026. (Dẫn ở Mục 6)

[3] Razvarz, S., Jafari, R., Gegov, A. (2021). Flow Modelling and Control in Pipeline Systems: A Formal Systematic Approach. Studies in Systems, Decision and Control, vol. 321. Cham: Springer. (Dẫn ở Mục 4 và Mục 8)

[4] Phạm, T.-P. và cộng sự (2022). LPV observer for leakage detection of the pipeline system. Hội nghị ATiGB, tr. 216–220. (Dẫn ở Mục 8 và Mục 9)

[5] Raspberry Pi Ltd. Raspberry Pi 4 Model B Product Brief. (Dẫn ở Mục 13)

[6] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V. (1994). Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. SIAM Studies in Applied Mathematics, vol. 15. Philadelphia, PA: SIAM. (Dẫn ở Mục 9, điều kiện (4.15))

MINH CHỨNG 03:
HỆ THỐNG CÁC BÀI THỰC HÀNH THEO ĐỊNH HƯỚNG ĐÀO TẠO STEM PHỤC VỤ CHO VIỆC HƯỚNG DẪN SINH VIÊN

BÀI THỰC HÀNH 1
LẬP TRÌNH MÔ PHỎNG HỆ THỐNG ĐƯỜNG ỐNG NƯỚC TRÊN MATLAB/SIMULINK

Đà Nẵng – 9/2026

MỤC LỤC

CĂN CỨ XÂY DỰNG BÀI THỰC HÀNH 3
Nguyên tắc biên soạn 3
Những thay đổi chính so với bản trước 3
THÔNG TIN BÀI THỰC HÀNH 5
MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA 5
THÔNG TIN NHÓM THỰC HÀNH 6
1. Cơ sở mô hình 7
2. Thành phần và phần mềm 8
3. Yêu cầu an toàn và điều kiện thực hiện 8
4. Phân bổ thời gian 9
5. Quy ước đặt tên 10
6. Bảng ánh xạ kênh — điền trước khi chạy 11
7. Quy trình thực hành theo từng bước 12
7.1. Bước 1 — Tạo dự án và tệp khởi tạo (20 phút) 12
7.2. Bước 2 — Nạp và kiểm tra dữ liệu (25 phút) 14
7.3. Bước 3 — Tạo mô hình và các cổng vào–ra (20 phút) 15
7.4. Bước 4 — Lập trình phương trình trạng thái (35 phút) 15
7.5. Bước 5 — Nối dữ liệu vào và cấu hình solver (25 phút) 16
7.6. Bước 6 — Chạy kịch bản cơ sở (20 phút) 18
7.7. Bước 7 — Chạy bốn kịch bản kiểm chứng (35 phút) 18
7.8. Bước 8 — Kiểm chứng bậc độ lớn (25 phút) 19
7.9. Bước 9 — Lưu mô hình và minh chứng (25 phút) 20
8. Phiếu kết quả 22
8.1. Kịch bản cơ sở 22
8.2. Bốn kịch bản kiểm chứng 22
8.3. Kiểm chứng bậc độ lớn 23
9. Lỗi thường gặp và cách xử lý 23
10. Yêu cầu báo cáo sau thực hành 24
11. Tiêu chí đánh giá 25
PHỤ LỤC A — MÃ NGUỒN 27
A1. src/init_pipeline.m 27

A2. src/load_data.m 28
A3. src/gen_data.m — dùng khi không có tệp dữ liệu 29
A4. src/run_case.m 30
A5. Kiểm chứng bậc độ lớn (Bước 8) 31
TÀI LIỆU THAM KHẢO 32

CĂN CỨ XÂY DỰNG BÀI THỰC HÀNH

Nội dung đối chiếu	Theo thuyết minh T2025-06-01
Vị trí trong thuyết minh	Mục 15.1 – Nội dung 4; Mục 16 – Sản phẩm bài thực hành
Tên sản phẩm đăng ký	Bài thực hành 1: Lập trình mô phỏng hệ thống đường ống nước trên MATLAB/Simulink
Đối tượng	Sinh viên ngành Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hoá
Yêu cầu đầu ra	01 bài thực hành có đầy đủ hình ảnh và các bước thực hiện để lập trình mô phỏng hệ thống đường ống nước trên MATLAB/Simulink
Bài giảng liên quan	BG2 (mô hình toán học) và BG4 (mô phỏng trên MATLAB/Simulink)

Bảng 1. Đối chiếu với thuyết minh đề tài.

Nguyên tắc biên soạn

Ảnh minh hoạ được trích từ tài liệu nguồn của đề tài và đặt ngay tại bước thao tác tương ứng. Ảnh chụp màn hình phần mềm dùng để hướng dẫn thao tác; ảnh kết quả nghiệm thu phải được chụp lại từ phiên thực hành thực tế, kèm ngày thực hiện, mã nhóm và mã phiên thí nghiệm.

Bản hiệu chỉnh bổ sung một nguyên tắc thứ hai, xuất phát từ vấn đề đã phát hiện ở bản trước: mọi tên tệp, tên biến và tên khối xuất hiện trong phần hướng dẫn phải trùng với tên trong ảnh minh chứng. Nếu ảnh cũ dùng tên khác thì hoặc chụp lại ảnh, hoặc ghi rõ trong chú thích rằng đây là ảnh của một phiên bản trước và nêu tên tương ứng. Sinh viên gõ theo hướng dẫn rồi so với ảnh, nên chênh lệch tên gây bối rối và mất thời gian.

Những thay đổi chính so với bản trước

Nội dung	Bản trước	Bản hiệu chỉnh
Thời lượng	04 tiết cho 8 bước, không phân bổ	06 tiết, có phân bổ và mốc kiểm tra giữa giờ (Mục 4)

Nội dung	Bản trước	Bản hiệu chỉnh
Mã nguồn	5 dòng khai báo cfg	Bộ mã đầy đủ chạy được ở Phụ lục A
Tên tệp và biến	Hướng dẫn dùng cfg.a1, Pipeline_Normal.slx; ảnh dùng a1, testf	Thống nhất một quy ước, có bảng đối chiếu (Mục 5)
Ánh xạ kênh	Không có bảng	Bảng ánh xạ bắt buộc điền trước khi chạy (Mục 6)
Cấu hình solver	"fixed-step hoặc variable-step theo yêu cầu môn học"	Giá trị cụ thể kèm lý do (Bước 5)
Số hạng ma sát	$-\mu Q_1^2$ và ghi chú "cho phép dòng ngược"	$-\mu Q_1\|Q_1\|$, có giải thích (Bước 4)
Điểm kiểm tra	Mô tả định tính	Tiêu chí đạt định lượng cho từng bước
Phiếu kết quả	Bảng trống không có cột số liệu	Có cột giá trị xác lập và thời gian xác lập
Kiểm chứng bậc độ lớn	Không có	Bước 7 mới, nối với BG2
Rubric	Chỉ có tỷ trọng	Ba mức Chưa đạt / Đạt / Tốt

Bảng 2. Tóm tắt thay đổi.

THÔNG TIN BÀI THỰC HÀNH

Thông tin	Nội dung
Tên bài	Bài thực hành 1: Lập trình mô phỏng hệ thống đường ống nước trên MATLAB/Simulink
Thời lượng	06 tiết (270 phút); tổ chức theo nhóm 3–5 sinh viên
Kiến thức tiên quyết	Đã học BG2 về mô hình toán học đường ống; biết MATLAB cơ bản, Simulink, đối tượng timeseries và đơn vị SI
Sản phẩm nộp	init_pipeline.m; load_data.m; run_case.m; mô hình Pipeline_Normal.slx; đồ thị Q_1 và H_3 của bốn kịch bản; bảng ánh xạ kênh; bảng cấu hình solver; README.md; báo cáo kết quả từng bước
Dữ liệu dùng chung	Ts = 1 s, 2001 mẫu; dữ liệu gắn timestamp, sequence và cờ chất lượng
Phương án khi thiếu dữ liệu	Dùng gen_data.m ở Phụ lục A2 để sinh dữ liệu tổng hợp; toàn bộ bài vẫn thực hiện được

Bảng 3. Thông tin chung.

MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA

Sau khi hoàn thành bài thực hành, sinh viên phải thực hiện được các yêu cầu sau.

Chuẩn đầu ra	Biểu hiện cần đạt	Bước
CLO1	Thiết lập đúng biến H_1, H_3, Q_1, Q_2, a_1, a_2, μ và L theo quy ước của đề tài, kèm đơn vị	B1, B2
CLO2	Lập trình được mô hình trạng thái đường ống không rò trên MATLAB/Simulink	B3, B4
CLO3	Cấu hình được solver, thời gian lấy mẫu, điều kiện đầu và hệ thống ghi dữ liệu, có nêu lý do chọn	B5
CLO4	Chạy tối thiểu bốn kịch bản và giải thích được đáp ứng Q_1, H_3 bằng lập luận vật lý	B6, B7

Chuẩn đầu ra	Biểu hiện cần đạt	Bước
CLO5	Kiểm chứng được bậc độ lớn của kết quả so với thông số hình học	B8
CLO6	Tổ chức tệp và minh chứng để một nhóm khác chạy lại được kết quả	B9

Bảng 4. Chuẩn đầu ra và bước tương ứng.

THÔNG TIN NHÓM THỰC HÀNH

Mục	Nội dung ghi nhận
Lớp / Nhóm	
Ngày thực hiện	Ngày ...../...../20..... Ca thực hành: .....
Mã phiên thí nghiệm	
Thành viên	1. ..... 2. ..... 3. ..... 4. ..... 5. .....
Phân công	Vận hành: ..... Dữ liệu: ..... Mô hình / Báo cáo: .....
Phiên bản MATLAB	R20..... Toolbox có sẵn: .....

Bảng 5. Thông tin nhóm — điền trước khi bắt đầu.

1. Cơ sở mô hình

Bài thực hành dùng mô hình tập trung của đoạn đường ống dài L đã xây dựng ở BG2. Ký hiệu thống nhất: H_1 là cột áp đầu tuyến, H_3 là cột áp cuối tuyến, Q_1 là lưu lượng đầu tuyến, Q_2 là lưu lượng cuối tuyến. Trạng thái là $x = [Q_1, H_3]^T$ và đầu vào là $u = [H_1, Q_2]^T$.

> **Về ký hiệu H_2 và H_3**
>
> Bản trước viết "trong bộ học liệu ký hiệu H_2 (vị trí rò ở các bài sau) được đổi từ thành H_3". Câu này tối nghĩa và trên thực tế các ảnh minh chứng vẫn ghi cổng ra là H2.
>
> Quy ước thống nhất của toàn bộ học liệu: H_2 luôn là cột áp tại điểm rò và chỉ xuất hiện trong mô hình có rò; H_3 là cột áp cuối tuyến. Bài thực hành 1 làm việc với mô hình KHÔNG RÒ nên không có H_2. Cổng ra thứ hai phải đặt tên H3.
>
> Nếu ảnh cũ trong tài liệu này ghi H2, hiểu là H_3 theo quy ước trên. Khi chụp lại minh chứng, phải đổi tên cổng thành H3.

Hai phương trình của mô hình không rò:

$$\dot{Q}_1 = (a_1/L)\cdot(H_1 - H_3) - \mu\cdot Q_1\cdot|Q_1| \qquad (1)$$

$$\dot{H}_3 = (a_2/L)\cdot(Q_1 - Q_2) \qquad (2)$$

Bản trước gộp hai phương trình thành một dòng đánh số (1) nhưng nhiều chỗ trong bài lại tham chiếu "(1)–(2)". Bản hiệu chỉnh tách rõ thành hai phương trình.

Tham số	Giá trị khởi tạo	Đơn vị	Ghi chú
a_1	0,04802	m^3/s^2	$a_1 = gA$; xem cảnh báo ở Bước 8
a_2	$3{,}253852561\times10^7$	m^{-1}	$a_2 = b^2/(gA)$
μ	0,0059266	m^{-3}	$\mu = f/(2DA)$
L	200	m	Chiều dài tuyến
Ts	1	s	Thay theo dữ liệu thực tế nếu khác
$Q_1(0)$	lấy từ mẫu đo đầu tiên	m^3/s	Không đặt bằng 0
$H_3(0)$	lấy từ mẫu đo đầu tiên	m	Không đặt bằng 0

Bảng 6. Tham số và điều kiện đầu. Cột đơn vị và hai dòng cuối được thêm so với bản trước.

2. Thành phần và phần mềm

TT	Thành phần	Yêu cầu
1	MATLAB / Simulink	R2021b trở lên, có Simulink. Simulink Design Optimization chỉ cần nếu thực hiện nhận dạng ở bài sau
2	Tệp dữ liệu	H_1, H_3, Q_1, Q_2; timestamp; đơn vị SI; không chứa NaN chưa xử lý
3	Tệp khởi tạo	Không dùng đường dẫn tuyệt đối; khai báo toàn bộ tham số trong một tệp
4	Thư mục nộp bài	src/, model/, data/raw/, data/processed/, results/, README.md

Bảng 7. Thành phần cần chuẩn bị.

3. Yêu cầu an toàn và điều kiện thực hiện

Bắt buộc

Sinh viên chỉ được khởi động bơm, thay đổi trạng thái van hoặc tạo rò rỉ sau khi giảng viên xác nhận điều kiện an toàn.

Bài thực hành 1 thực hiện hoàn toàn trên máy tính. Không điều khiển bơm hoặc van thật trong bài này.

Vì bài 1 không thao tác trên hệ thực, danh mục kiểm tra được tách thành hai phần. Phần A áp dụng cho bài này; phần B chỉ áp dụng khi lớp có tham quan hoặc lấy dữ liệu trực tiếp tại hệ thống.

Phần A — bắt buộc cho bài 1 (trên máy tính)	Đạt	Ghi chú
Thư mục dự án đã tạo đúng cấu trúc	☐	
Tệp dữ liệu gốc đã đặt chế độ chỉ đọc	☐	
MATLAB mở được và Simulink khởi động bình thường	☐	
Đã đọc trước phương trình (1) và (2)	☐	
Đã điền Bảng 5 thông tin nhóm	☐	

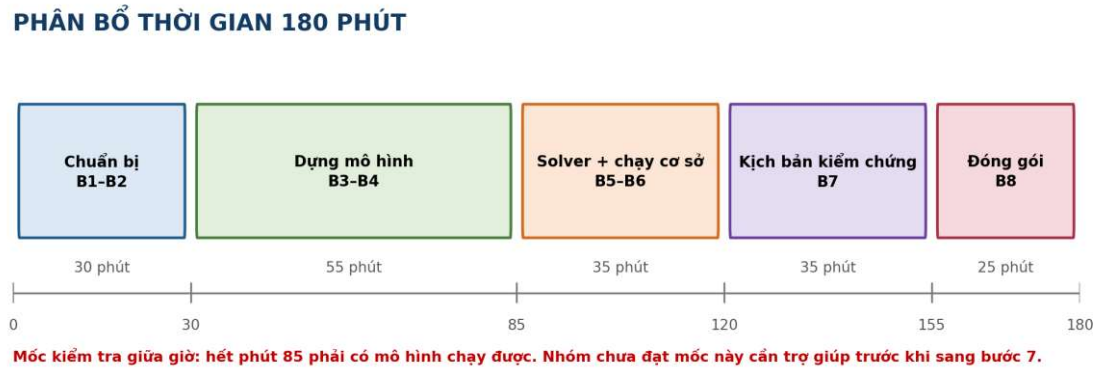
Bảng 8A. Kiểm tra trước khi thực hành — bài 1.

Phần B — chỉ khi tiếp cận hệ thống thực	Đạt	Ghi chú
Nguồn điện, nối đất và nút dừng khẩn cấp	☐	
Đường ống, khớp nối, van và vị trí xả	☐	
Nguồn 24 VDC, cảm biến và tín hiệu 4–20 mA	☐	
Kết nối PLC, Raspberry Pi, 4G và SCADA	☐	
Đã xả áp trước khi tháo lắp bất kỳ mối nối nào	☐	

Bảng 8B. Kiểm tra khi tiếp cận hệ thống thực.

Việc tách hai bảng là thay đổi so với bản trước. Bản trước bắt sinh viên đánh dấu năm mục về bơm, cảm biến và 4G cho một bài chỉ chạy trên máy tính; điều đó làm danh mục an toàn trở thành thủ tục hình thức, và thói quen đánh dấu cho có sẽ theo sinh viên sang những bài thực sự có rủi ro.

4. Phân bổ thời gian



Hình 1. Phân bổ 270 phút cho chín bước thực hành.

Bản trước bố trí 180 phút cho tám bước mà không phân bổ chi tiết. Trên thực tế, riêng việc dựng đúng sơ đồ khối ở bước 4 đã chiếm gần một giờ với nhóm chưa quen Simulink. Bản hiệu chỉnh tăng lên 270 phút, thêm một bước kiểm chứng bậc độ lớn, và đặt một mốc kiểm tra giữa giờ.

Mốc kiểm tra giữa giờ

Hết phút 130, mỗi nhóm phải chạy được kịch bản cơ sở và cho ra hai đồ thị Q_1 và H_3 hữu hạn.

> Nhóm chưa đạt mốc này cần được trợ giúp ngay, không nên để tự xoay sở đến hết buổi. Kinh nghiệm cho thấy nguyên nhân thường chỉ là một lỗi ánh xạ cổng hoặc một lỗi đơn vị, mất vài phút để sửa nếu được chỉ ra.

5. Quy ước đặt tên

Mục này là mới và giải quyết một vấn đề cụ thể của bản trước: phần hướng dẫn và phần ảnh minh chứng dùng hai bộ tên khác nhau. Sinh viên gõ theo hướng dẫn rồi nhìn ảnh sẽ không tìm thấy thứ mình vừa tạo.

Đối tượng	Tên trong ảnh minh chứng cũ	Tên quy ước dùng trong bài này
Tệp mô hình	testf.slx	Pipeline_Normal.slx
Subsystem	Subsystem	PipelineDynamics
Cổng ra thứ hai	H2	H3
Cột áp đầu tuyến (dữ liệu)	as1_ts	H1_ts
Cột áp cuối tuyến (dữ liệu)	as2_ts	H3_ts
Lưu lượng đầu tuyến (dữ liệu)	ll1_ts	Q1_ts
Lưu lượng cuối tuyến (dữ liệu)	ll2_ts	Q2_ts
Bảng dữ liệu thô	bangdl	raw_table
Tham số	a1, a2, mu, L rời rạc trong base workspace	cfg.a1, cfg.a2, cfg.mu, cfg.L trong một struct

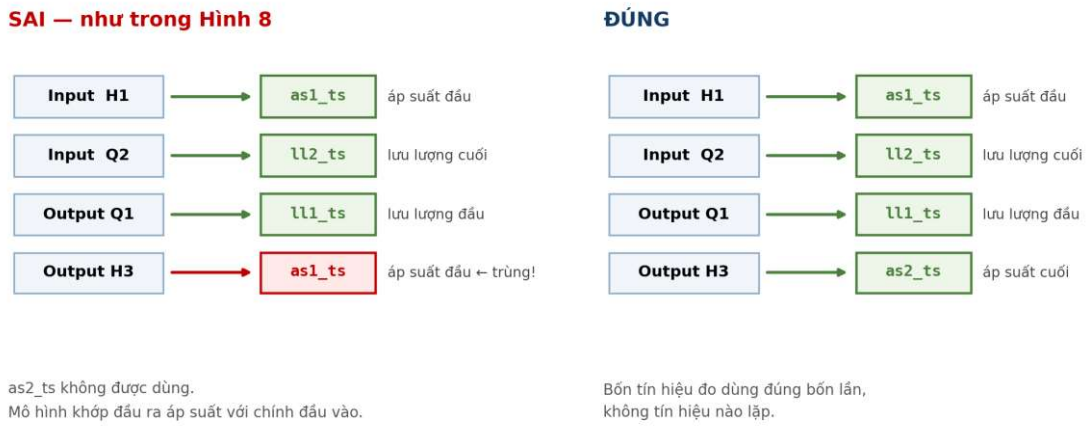
Bảng 9. Đối chiếu tên cũ và tên quy ước.

Hai lý do chọn bộ tên bên phải. Thứ nhất, tên tín hiệu trùng với ký hiệu trong phương trình nên đọc mã là đọc được phương trình. Thứ hai, gom tham số vào một struct cfg giúp truyền cả bộ tham số qua hàm bằng một đối số, và khi gọi clear thì mất hoặc còn cả cụm chứ không mất lẻ tẻ.

Nếu nhóm dùng lại mô hình cũ, phải đổi tên trước khi nộp và ghi việc đổi tên vào README.

6. Bảng ánh xạ kênh — điền trước khi chạy

Mục này là mới và là bổ sung quan trọng nhất của bản hiệu chỉnh. Sai ánh xạ kênh là lỗi khó phát hiện nhất trong toàn bài: mô hình vẫn chạy, đồ thị vẫn ra, nhưng kết quả không có ý nghĩa. Cách phòng duy nhất hiệu quả là lập bảng ánh xạ trước khi nối dây, rồi đối chiếu sau khi nối.



Hình 2. Ánh xạ kênh sai và đúng. Bên trái là tình huống quan sát được trong ảnh minh chứng của bản trước.

Quan sát cần kiểm tra lại

Trong cửa sổ Parameter Estimator của bản trước (nay là Hình 10), tín hiệu as1_ts xuất hiện hai lần: một lần làm Input cho cổng H1, một lần làm Measured Data cho cổng ra thứ hai. Tín hiệu as2_ts không được dùng ở đâu.

Nếu đúng như vậy thì mô hình đang được yêu cầu khớp cột áp đầu ra với chính cột áp đầu vào, tức bắt buộc $H_1 - H_3$ tiến về 0. Ở trạng thái xác lập, điều đó ép số hạng ma sát $\mu Q|Q|$ về gần 0, và bộ tối ưu sẽ đẩy μ xuống một giá trị rất nhỏ.

Đây là một cách giải thích nhất quán cho việc μ nhận dạng nhỏ hơn giá trị vật lý nhiều bậc độ lớn, như đã nêu ở BG2. Đề nghị kiểm tra lại cấu hình thí nghiệm và chạy lại nhận dạng với as2_ts ở vị trí Measured Data.

Bảng dưới đây là sản phẩm bắt buộc, điền trước Bước 5 và nộp kèm báo cáo.

Cổng trên mô hình	Tín hiệu dữ liệu	Đơn vị	Vai trò	Đã kiểm tra
In 1 — H1	H1_ts	m	Đầu vào	☐

Cổng trên mô hình	Tín hiệu dữ liệu	Đơn vị	Vai trò	Đã kiểm tra
In 2 — Q2	Q2_ts	m^3/s	Đầu vào	☐
Out 1 — Q1	so với Q1_ts	m^3/s	Đầu ra mô phỏng	☐
Out 2 — H3	so với H3_ts	m	Đầu ra mô phỏng	☐
State 1 — Q1	điều kiện đầu từ Q1_ts(1)	m^3/s	Trạng thái	☐
State 2 — H3	điều kiện đầu từ H3_ts(1)	m	Trạng thái	☐

Bảng 10. Bảng ánh xạ kênh — sản phẩm bắt buộc.

Quy tắc kiểm tra một dòng

Bốn tín hiệu đo phải xuất hiện đúng bốn lần trong bảng, mỗi tín hiệu một lần. Nếu một tín hiệu xuất hiện hai lần, hoặc một tín hiệu không xuất hiện lần nào, thì ánh xạ sai.

7. Quy trình thực hành theo từng bước

Chín bước dưới đây thay cho tám bước của bản trước. Bước 8 về kiểm chứng bậc độ lớn là bước mới. Mỗi bước có một tiêu chí đạt định lượng, thay cho mô tả định tính của bản trước — sinh viên phải trả lời được "đạt hay chưa" chứ không phải "có vẻ ổn".

7.1. Bước 1 — Tạo dự án và tệp khởi tạo (20 phút)

Mục đích: Tạo môi trường chạy có thể tái lập trên máy khác.

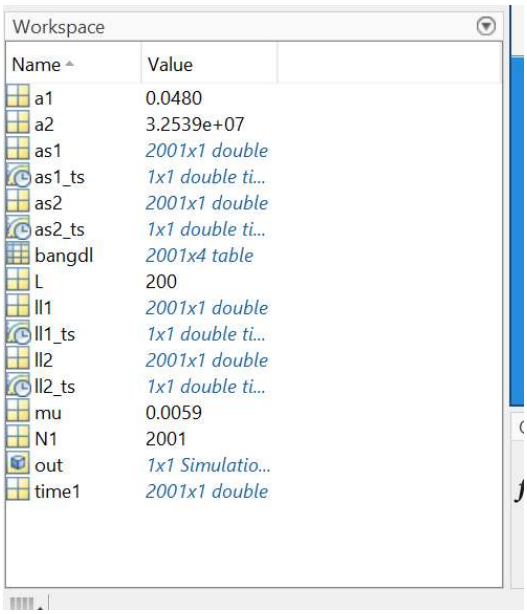
- Tạo cấu trúc thư mục: src/, model/, data/raw/, data/processed/, results/.
- Tạo tệp src/init_pipeline.m theo Phụ lục A1, khai báo toàn bộ tham số trong struct cfg.
- Đặt thư mục hiện hành tại gốc dự án. Chạy clear; clc; close all trước khi chạy init.
- Không dùng đường dẫn tuyệt đối. Dùng fileparts(mfilename('fullpath')) để lấy đường dẫn tương đối.

```
%% src/init_pipeline.m  (trich - ban day du o Phu luc A1)
```

```
clear; clc; close all;
here = fileparts(mfilename('fullpath'));
root = fileparts(here);

cfg.L   = 200;              % m
cfg.Ts  = 1;                % s
cfg.a1  = 0.04802;          % m^3/s^2
cfg.a2  = 3.253852561e7;    % 1/m
cfg.mu  = 0.0059266;        % 1/m^3
cfg.Tend = 2000;            % s, thoi gian mo phong

cfg.paths.raw       = fullfile(root,'data','raw');
cfg.paths.processed = fullfile(root,'data','processed');
cfg.paths.results   = fullfile(root,'results');
cfg.version.matlab  = version('-release');
cfg.version.stamp   = datestr(now,'yyyymmdd_HHMMSS');
```



Hình 3. Các biến và tham số trong MATLAB Workspace sau khi chạy tệp khởi tạo.

Tiêu chí đạt của bước

Gõ cfg trong Command Window hiển thị đủ sáu trường L, Ts, a1, a2, mu, Tend.

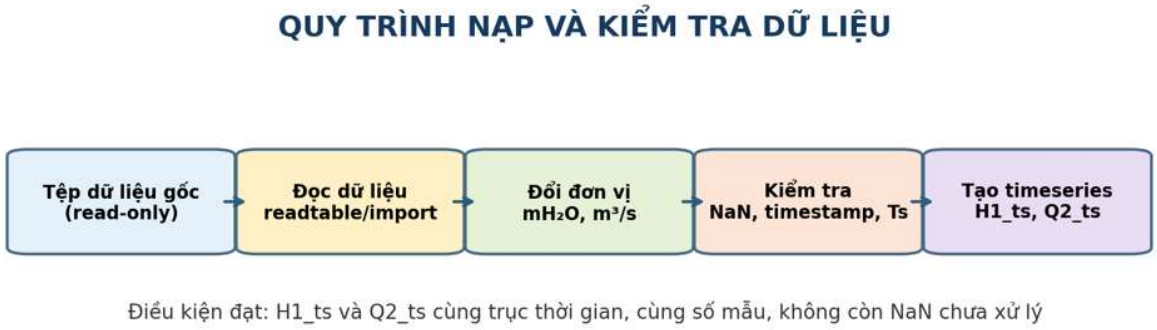
Lệnh which init_pipeline trả về đường dẫn nằm trong thư mục dự án, không phải thư mục khác.

Trong toàn bộ tệp không có ký tự ổ đĩa (C:\ hoặc D:\).

7.2. Bước 2 — Nạp và kiểm tra dữ liệu (25 phút)

Mục đích: Bảo đảm tín hiệu vào đúng tên, đúng đơn vị và đúng trục thời gian.

- Đọc tệp dữ liệu gốc ở chế độ chỉ đọc. Không bao giờ ghi đè tệp trong data/raw/.
- Quy đổi áp suất sang cột áp và lưu lượng sang m^3/s một lần duy nhất, tại bước này.
- Kiểm tra số mẫu, NaN, timestamp tăng dần và chu kỳ đều.
- Tạo bốn đối tượng H1_ts, H3_ts, Q1_ts, Q2_ts. Không nội suy qua khoảng mất mẫu dài hơn ba mẫu.



Hình 4. Quy trình nạp và kiểm tra dữ liệu trước khi tạo timeseries.

Sau khi nạp, đối chiếu dải giá trị với bảng dưới đây. Giá trị nằm ngoài dải gần như luôn là dấu hiệu sai đơn vị chứ không phải nhiễu, vì sai đơn vị làm sai bậc độ lớn còn nhiễu thì không.

Tín hiệu	Đơn vị	Dải hợp lý	Nếu ngoài dải thì nghi ngờ
H1_ts	m	25 – 35	Còn ở bar hoặc Pa
H3_ts	m	8 – 16	Còn ở bar hoặc Pa
Q1_ts	m^3/s	1×10^{-4} – 5×10^{-4}	Còn ở L/min
Q2_ts	m^3/s	1×10^{-4} – 5×10^{-4}	Còn ở L/min

Bảng 11. Dải giá trị dùng để kiểm tra đơn vị. Bảng này là mới.

Tiêu chí đạt của bước

Bốn tín hiệu có cùng số mẫu; chạy isequal của bốn trục thời gian trả về true.

Lệnh sum(isnan(...)) trên cả bốn tín hiệu trả về 0.

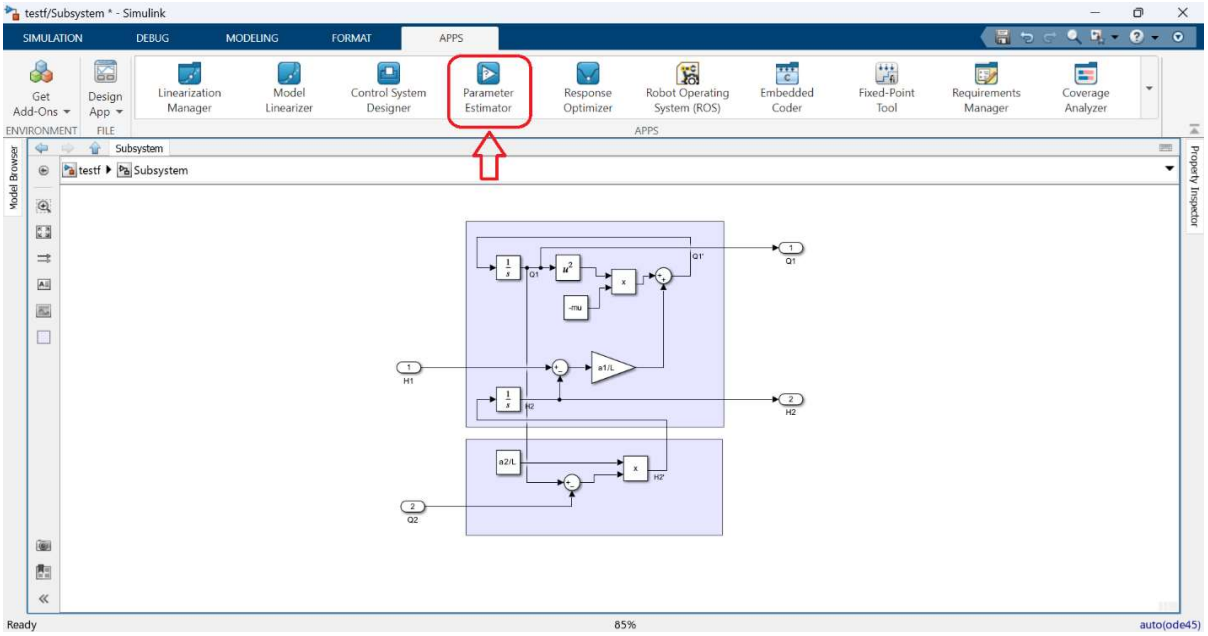
Cả bốn giá trị trung bình nằm trong dải ở Bảng 11.

Chênh lệch trung bình H1 − H3 là số dương. Nếu âm thì hai kênh áp suất đã bị hoán đổi.

7.3. Bước 3 — Tạo mô hình và các cổng vào–ra (20 phút)

Mục đích: Thiết lập đúng cấu trúc mô hình đường ống không rò.

- Tạo model model/Pipeline_Normal.slx.
- Tạo hai Inport đặt tên H1 và Q2; hai Outport đặt tên Q1 và H3.
- Tạo một subsystem tên PipelineDynamics và đưa toàn bộ phương trình vào trong đó.
- Ghi đơn vị vào Signal Properties của từng đường tín hiệu, không chỉ ghi trong tên.
- Điền Bảng 10 ánh xạ kênh ngay sau khi tạo xong cổng.



Hình 5. Cửa sổ mô hình mở trong Simulink.

Tiêu chí đạt của bước

Mô hình có đúng hai Inport và hai Outport, tên đúng theo Bảng 9.

Bảng 10 đã điền đủ sáu dòng và bốn tín hiệu đo xuất hiện đúng bốn lần.

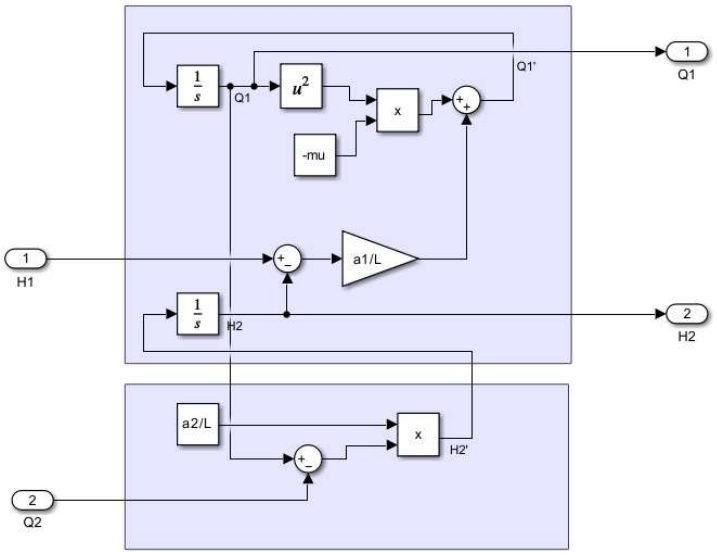
Thứ tự cổng được ghi vào README.md.

7.4. Bước 4 — Lập trình phương trình trạng thái (35 phút)

Mục đích: Chuyển phương trình (1) và (2) thành sơ đồ khối.

- Dùng khối Integrator cho Q_1 và cho H_3, mỗi trạng thái một khối.

- Tạo nhánh ma sát $-\mu \cdot Q_1 \cdot |Q_1|$ bằng khối Abs nhân với Q_1, rồi nhân hằng số $-\mu$.
- Tạo nhánh $(a_1/L) \cdot (H_1 - H_3)$ và cộng vào $\dot{Q}_1$.
- Tạo nhánh $(a_2/L) \cdot (Q_1 - Q_2)$ đưa vào $\dot{H}_3$.
- Khai báo điều kiện đầu $Q_1(0)$ và $H_3(0)$ lấy từ mẫu đo đầu tiên, không đặt bằng 0.



Hình 6. Các khối tính toán phương trình trạng thái.

Tiêu chí đạt của bước

Chạy Update Diagram không báo lỗi kích thước.

Thử dấu: tăng H_1 thêm 1 m, giữ nguyên các đại lượng khác, Q_1 phải tăng. Nếu giảm thì đã sai dấu của hiệu $H_1 - H_3$.

Thử dấu thứ hai: tăng Q_2, H_3 phải giảm.

Đặt Q_1 âm trong một lần chạy thử, mô hình không được phân kỳ.

7.5. Bước 5 — Nối dữ liệu vào và cấu hình solver (25 phút)

Mục đích: Thiết lập thời gian tính phù hợp với động học của tuyến ống.

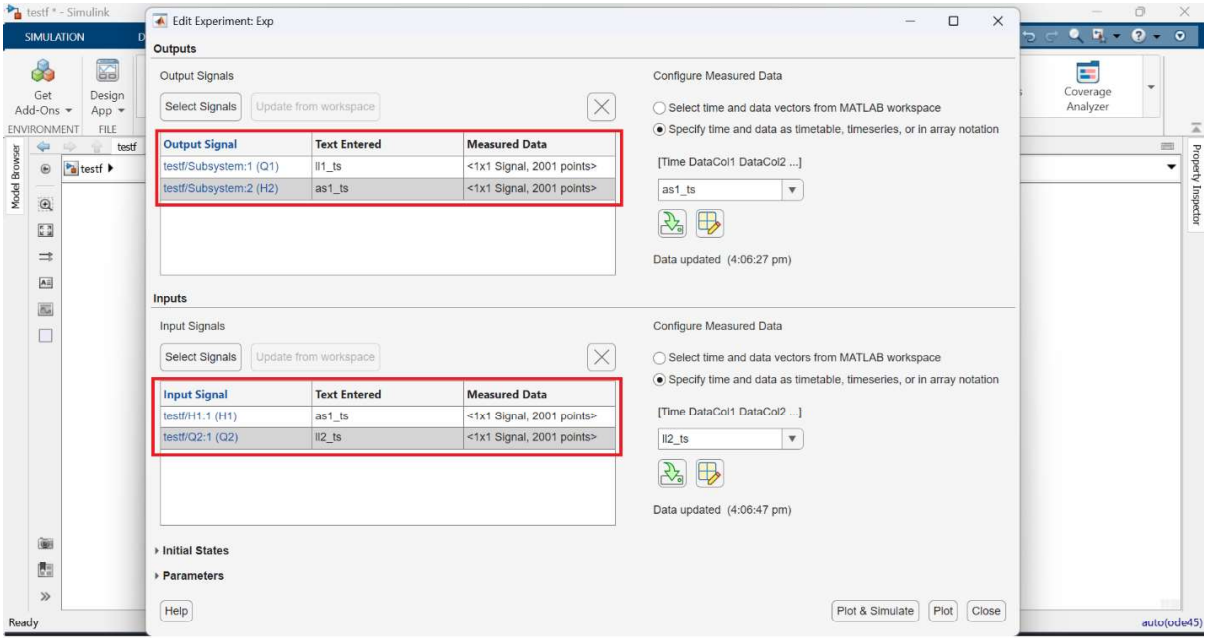
- Dùng khối From Workspace cho H1_ts và Q2_ts, theo đúng Bảng 10.
- Đặt Stop Time bằng thời gian cuối của dữ liệu.
- Cấu hình logging cho Q1_sim và H3_sim, xuất ra Simulation Data Inspector.

Thiết lập	Giá trị	Lý do
Solver type	Variable-step	Đáp ứng có cả đoạn nhanh và đoạn chậm
Solver	ode23tb (hoặc ode15s)	Hệ cứng do chênh lệch thang thời gian giữa quán tính và ma sát

Thiết lập	Giá trị	Lý do
Max step size	0,05 s	Nhỏ hơn nhiều so với chu kỳ dao động riêng ≈ 3,9 s
Relative tolerance	1e-6	Mặc định 1e-3 quá thô cho biên độ dao động nhỏ
Zero-crossing detection	Bật	Số hạng |Q| có điểm gãy tại Q = 0
Algebraic loop	Phải không có	Nếu báo vòng lặp đại số là dấu hiệu nối sai nhánh hồi tiếp

Bảng 12. Cấu hình solver.

Con số 3,9 s ở dòng thứ ba suy từ vận tốc truyền sóng của tuyến HDPE: chu kỳ dao động riêng bằng $2\pi L/b$ với $b \approx 324$ m/s và $L = 200$ m. Nếu nhóm dùng giá trị b khác thì phải tính lại và ghi vào README.



Hình 7. Cửa sổ khai báo tín hiệu vào và ra.

Tiêu chí đạt của bước

Không có cảnh báo sample time trong Diagnostic Viewer.

Chạy lại với Max step size giảm một nửa, kết quả không đổi quá 1 phần trăm. Nếu đổi nhiều hơn thì bước thời gian còn quá lớn.

Số mẫu đầu ra tương thích với Ts đã khai báo.

7.6. Bước 6 — Chạy kịch bản cơ sở (20 phút)

Mục đích: Xác nhận mô hình vận hành ổn định trước khi thay đổi tham số.

- Chạy một kịch bản với H_1 và Q_2 giữ hằng số.
- Vẽ Q_1 và H_3 theo thời gian, có nhãn trục và đơn vị đầy đủ.
- Kiểm tra trạng thái hữu hạn, không NaN hoặc Inf, không tăng vô hạn.
- Lưu hình PNG và tệp MAT vào results/base_case/.

Tiêu chí đạt của bước

Cả hai tín hiệu hội tụ về giá trị xác lập trong vòng 300 s.

Giá trị xác lập của Q_1 nằm trong dải ở Bảng 11.

Chênh lệch $H_1 - H_3$ ở xác lập là số dương và có bậc độ lớn hợp lý — xem Bước 8.

Hai đồ thị có đủ nhãn trục, đơn vị, chú giải và tên kịch bản.

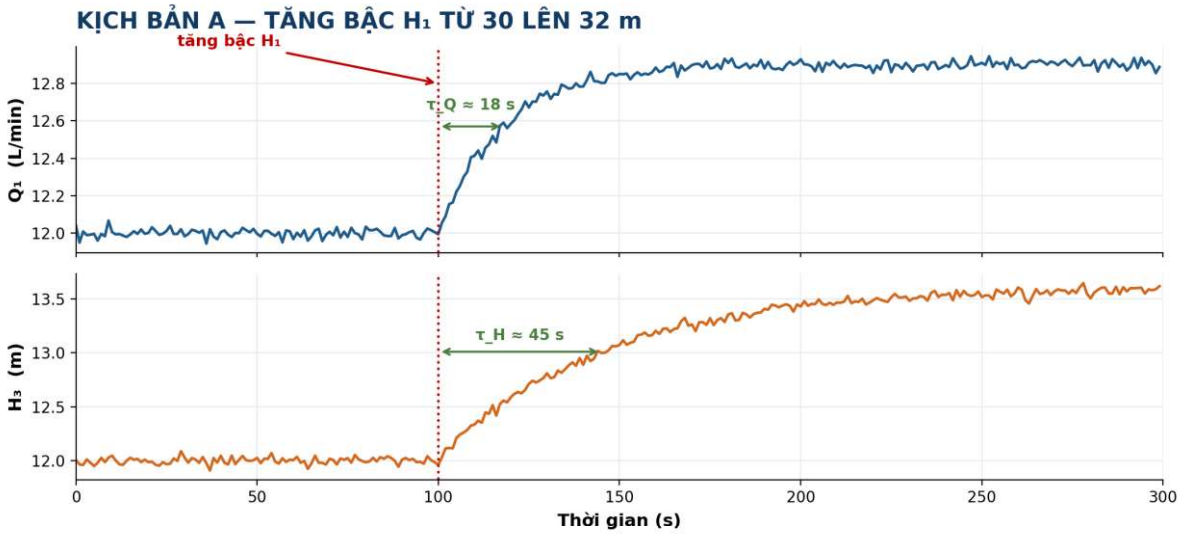
7.7. Bước 7 — Chạy bốn kịch bản kiểm chứng (35 phút)

Mục đích: Đánh giá tính hợp lý của đáp ứng theo lập luận vật lý.

Kịch bản	Thay đổi	Dự đoán trước khi chạy	Vì sao
A	Tăng bậc H_1 thêm 2 m	Q_1 tăng, H_3 tăng chậm hơn	Chênh áp lớn hơn đẩy lưu lượng tăng
B	Tăng Q_2 trong dải vận hành	H_3 giảm, Q_1 tăng theo sau	Lấy ra nhiều hơn làm áp cuối tuyến giảm
C	Thay đổi μ ±10 %	Q_1 xác lập đổi ngược chiều với μ	Ma sát lớn hơn thì lưu lượng nhỏ hơn
D	Đảo chiều: đặt $H_1 < H_3$	Q_1 tiến về giá trị âm và ổn định	Kiểm tra dạng $Q\|Q\|$ ở Bước 4

Bảng 13. Bốn kịch bản kiểm chứng. Kịch bản D được thêm so với bản trước.

Quy tắc quan trọng về thứ tự: mỗi nhóm phải viết dự đoán vào cột thứ ba TRƯỚC khi chạy, rồi mới chạy và so. Dự đoán sai không bị trừ điểm; không viết dự đoán mới bị trừ. Mục đích là buộc sinh viên suy luận từ phương trình thay vì chỉ quan sát đồ thị rồi mô tả lại.



Hình 8. Dạng đáp ứng mẫu của kịch bản A, dùng để đối chiếu về mặt định tính.

Tiêu chí đạt của bước

Bốn kịch bản đều chạy xong và lưu kết quả riêng từng thư mục.

Chiều biến thiên thực tế trùng với dự đoán ở cả bốn kịch bản, hoặc nhóm giải thích được vì sao lệch.

Kịch bản D không phân kỳ. Nếu phân kỳ thì nhánh ma sát vẫn đang dùng Q^2 — quay lại Bước 4.

Mọi tham số thay đổi đều được ghi trong cấu hình kịch bản, không sửa trực tiếp trong khối.

7.8. Bước 8 — Kiểm chứng bậc độ lớn (25 phút)

Mục đích: Xác nhận kết quả mô phỏng có ý nghĩa vật lý, không chỉ có dạng đồ thị đẹp.

Bước này là mới. Nội dung nối trực tiếp với Mục 7 của BG2: ba hệ số a_1, a_2, μ không phải ba con số tự do mà bị ràng buộc bởi hình học và vật liệu ống. Từ chúng suy ngược ra đường kính, vận tốc sóng và tổn thất áp, rồi đối chiếu với thực tế.

Đại lượng suy ngược	Công thức	Giá trị nhóm tính được	Đối chiếu
Tiết diện A	$A = a_1/g$		Ống HDPE 25×2,3: $A = 3{,}27\times10^{-4}$ m²

Đại lượng suy ngược	Công thức	Giá trị nhóm tính được	Đối chiếu
Đường kính trong D	$D = \sqrt{(4A/\pi)}$		Ống của đề tài: 20,4 mm
Vận tốc sóng b	$b = \sqrt{(a_1 a_2)}$		Dải HDPE: 200 – 500 m/s
Tổn thất ở xác lập	$\Delta H = \mu Q^2 L/a_1$		Darcy–Weisbach ở 12 L/min: ≈ 5,6 m

Bảng 14. Bảng kiểm chứng bậc độ lớn — sản phẩm bắt buộc.

Kết quả nhóm sẽ gặp và cách xử lý

Với bộ tham số khởi tạo ở Bảng 6, nhóm sẽ tính ra D ≈ 79 mm và b ≈ 1255 m/s. Cả hai đều không khớp với ống HDPE 20,4 mm của đề tài: đường kính lệch gần bốn lần, và vận tốc 1255 m/s là của ống kim loại chứ không phải ống nhựa.

Đây không phải lỗi của nhóm. Đây là một sai lệch đã biết của bộ tham số hiện có, được nêu ở Mục 7 của BG2 và đang chờ truy nguyên.

Yêu cầu với nhóm: ghi nhận đúng con số tính được, nêu rõ nó không khớp, và đề xuất ít nhất một cách kiểm tra nguyên nhân. Nhóm nào ghi "kết quả phù hợp" cho bảng này sẽ bị trừ điểm ở tiêu chí kiểm chứng, vì điều đó cho thấy nhóm không thực sự tính.

Tiêu chí đạt của bước

Bảng 14 điền đủ bốn dòng bằng số liệu nhóm tự tính.

Nhóm nêu được ít nhất một chênh lệch và mức độ chênh lệch tính bằng số lần.

Nhóm đề xuất được ít nhất một cách kiểm tra nguyên nhân.

7.9. Bước 9 — Lưu mô hình và minh chứng (25 phút)

Mục đích: Hoàn thiện sản phẩm để một nhóm khác chạy lại được.

- Đóng MATLAB, mở lại phiên mới, chạy init_pipeline.m rồi run_case.m và xác nhận ra đúng kết quả cũ.
- Lưu model, mã nguồn, dữ liệu đã xử lý, đồ thị và README.md.
- Chụp ảnh toàn bộ model và cửa sổ Simulation Data Inspector.
- Nén thư mục theo tên TH1_NhomXX_YYYYMMDD.zip.

Tệp README.md phải trả lời được sáu câu hỏi sau. Đây là mẫu bắt buộc, thay cho yêu cầu chung chung "có README" của bản trước.

```
# TH1 - Nhom XX - YYYYMMDD

## 1. Chay lai the nao
  Mo MATLAB, cd vao thu muc goc, chay:
     run('src/init_pipeline.m');  run('src/run_case.m');

## 2. Du lieu dung
  Tep: data/raw/...          Ma phien: ...
  So mau: 2001               Ts = 1 s

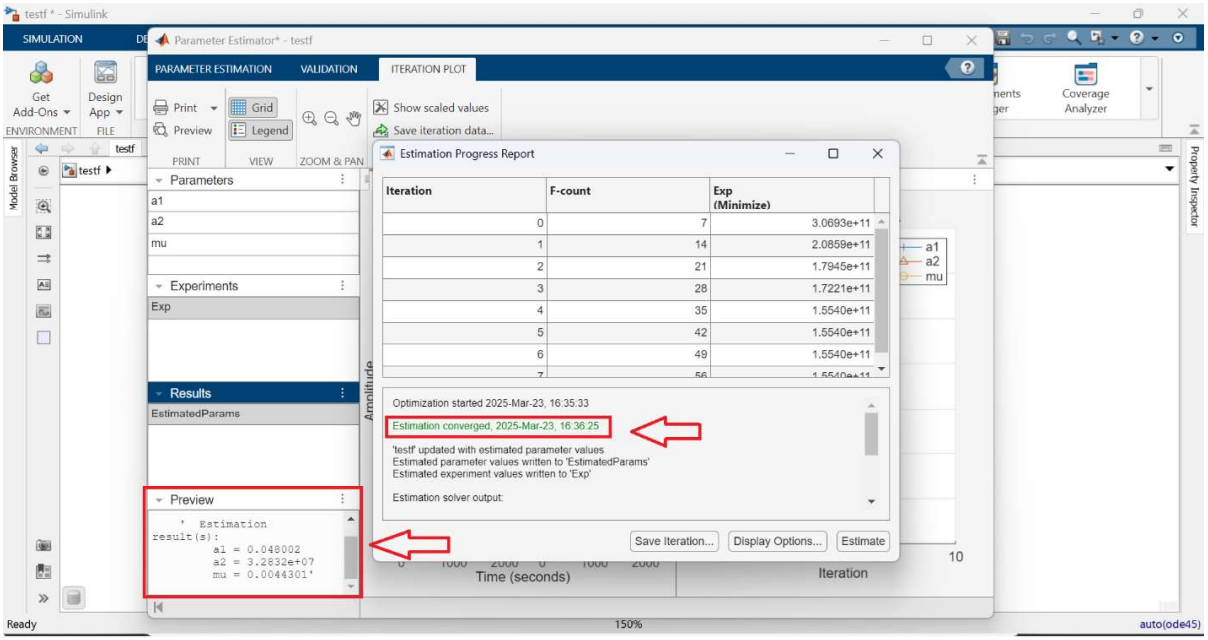
## 3. Bo tham so
  a1 = ...   a2 = ...   mu = ...   L = 200
  Nguon: gia tri khoi tao theo Bang 6 / nhom tu nhan dang

## 4. Cau hinh solver
  Solver: ode23tb    Max step: 0.05 s    RelTol: 1e-6

## 5. Anh xa kenh
  H1 <- H1_ts    Q2 <- Q2_ts    Q1 -> so voi Q1_ts    H3 -> so voi H3_ts

## 6. Ket qua kiem chung bac do lon (Bang 14)
  D suy nguoc = ... mm     b suy nguoc = ... m/s
  Nhan xet: ...

## Phien ban MATLAB: R20...
```



Hình 9. Cửa sổ Parameter Estimator sau khi hội tụ, dùng ở bài thực hành tiếp theo về nhận dạng tham số.

Tiêu chí đạt của bước

Chạy lại từ phiên MATLAB mới cho đúng kết quả cũ, không phải sửa đường dẫn nào.

README.md trả lời đủ sáu mục theo mẫu.

Một nhóm khác mở thư mục và chạy được trong vòng 5 phút.

8. Phiếu kết quả

Phiếu này được điền trong giờ và nộp kèm báo cáo. So với bản trước, phiếu bổ sung các cột số liệu định lượng — bản trước chỉ có cột nhận xét, nên không so sánh được giữa các nhóm và không chấm được khách quan.

8.1. Kịch bản cơ sở

Đại lượng	Giá trị xác lập	Thời gian xác lập (s)	Đơn vị
Q_1			m^3/s
H_3			m
$H_1 - H_3$ ở xác lập		—	m

Bảng 15. Kết quả kịch bản cơ sở.

8.2. Bốn kịch bản kiểm chứng

Kịch bản	Thay đổi cụ thể	Dự đoán (viết TRƯỚC khi chạy)	Q_1 xác lập	H_3 xác lập	Khớp dự đoán?
A — tăng H_1					☐ Có ☐ Không
B — tăng Q_2					☐ Có ☐ Không
C — đổi μ ±10 %					☐ Có ☐ Không
D — đảo chiều					☐ Có ☐ Không

Bảng 16. Kết quả bốn kịch bản kiểm chứng.

Nếu cột cuối đánh dấu "Không", nhóm phải viết giải thích ở phần báo cáo. Một dự đoán sai được giải thích đúng có giá trị hơn một dự đoán đúng không có lập luận.

8.3. Kiểm chứng bậc độ lớn

Điền Bảng 14 ở Bước 8 và ghi kết luận vào đây:

Câu hỏi	Trả lời của nhóm
Đường kính suy ngược từ a_1 bằng bao nhiêu?	
Có khớp với ống 20,4 mm của đề tài không? Lệch mấy lần?	
Vận tốc sóng suy ngược bằng bao nhiêu? Có nằm trong dải HDPE không?	
Nhóm đề xuất cách nào để kiểm tra nguyên nhân?	

Bảng 17. Kết luận kiểm chứng bậc độ lớn.

9. Lỗi thường gặp và cách xử lý

Hiện tượng	Nguyên nhân cần kiểm tra	Cách xử lý
NaN hoặc Inf	Dữ liệu đầu vào, phép chia, điều kiện đầu	Dừng mô phỏng, tìm mẫu gây lỗi; không ép về 0
Đáp ứng ngược chiều	Sai dấu của $H_1 - H_3$ hoặc $Q_1 - Q_2$	Đối chiếu lại (1) và (2); dùng phép thử dấu ở Bước 4
Sai kích thước tín hiệu	timeseries, cổng hoặc véc-tơ không đồng nhất	Kiểm tra dimension từng cổng bằng Update Diagram
Không tái lập được	Đường dẫn tuyệt đối hoặc biến còn sót trong Workspace	Chạy từ phiên mới và dùng init_pipeline.m
Đáp ứng sai bậc độ lớn	Sai đơn vị L/min ↔ m^3/s hoặc bar ↔ m	Đối chiếu dải giá trị với Bảng 11
Đáp ứng trơn, mất dao động	Max step size để mặc định auto	Đặt Max step size = 0,05 s theo Bảng 12
Mô phỏng chạy rất chậm	Dùng ode45 cho hệ cứng	Chuyển sang ode23tb hoặc ode15s
Mô hình phân kỳ ở kịch bản D	Nhánh ma sát vẫn dùng Q^2 thay vì $Q\|Q\|$	Thay khối u^2 bằng Abs và Product — Bước 4
Chênh lệch $H_1 - H_3$ bằng 0 hoặc âm	Hai kênh áp suất bị hoán đổi hoặc dùng trùng một tín hiệu	Kiểm tra Bảng 10; bốn tín hiệu phải xuất hiện đúng bốn lần
Kết quả khác nhau giữa hai lần chạy	Biến còn trong Workspace từ lần trước	Luôn chạy clear trước init_pipeline.m
Không tìm thấy khối trong ảnh hướng dẫn	Tên trong ảnh cũ khác tên quy ước	Đối chiếu Bảng 9

Bảng 18. Lỗi thường gặp. Bảy dòng cuối được thêm so với bản trước.

10. Yêu cầu báo cáo sau thực hành

- Trang đầu: tên bài, nhóm, thành viên, ngày thực hiện, mã phiên và phân công nhiệm vụ.
- Mục tiêu, sơ đồ thực hiện và toàn bộ thông số cấu hình đã dùng, gồm cả cấu hình solver.
- Bảng ánh xạ kênh đã điền (Bảng 10).
- Bảng số liệu gốc, mô tả bước tiền xử lý và liên kết tới tệp dữ liệu điện tử.
- Kết quả dưới dạng bảng và đồ thị có đơn vị, chú thích và nhận xét định lượng.
- Ảnh mô hình Simulink và ảnh kết quả của từng kịch bản, chụp từ phiên thực hành thật.
- Bảng kiểm chứng bậc độ lớn đã điền (Bảng 14) kèm kết luận.
- Bảng phân tích chiều biến thiên và giới hạn của mô hình tập trung.
- Kết luận: mức độ đạt mục tiêu, hạn chế gặp phải và đề xuất cải tiến.

11. Tiêu chí đánh giá

Rubric ba mức dưới đây thay cho bảng tỷ trọng đơn thuần của bản trước, để việc chấm nhất quán giữa các giảng viên và để nhóm biết trước đích cần đạt.

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Cấu trúc và sản phẩm	Thiếu tệp hoặc sai tên theo Bảng 9	Đủ tệp, đúng tên, đúng cấu trúc thư mục	Thêm README đủ sáu mục và ghi rõ mọi thay đổi so với hướng dẫn	15%
Mô hình và phương trình	Sai dấu, sai cổng, hoặc dùng Q^2 ở nhánh ma sát	Đúng cổng, đúng dấu, dùng $Q\|Q\|$, có điều kiện đầu từ dữ liệu	Thêm Bảng 10 ánh xạ kênh đã kiểm tra và ghi đơn vị vào Signal Properties	25%
Cấu hình solver	Để mặc định auto, không nêu lý do	Đặt đúng theo Bảng 12	Thêm kiểm tra hội tụ bằng cách giảm bước một nửa và so kết quả	15%

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Kịch bản và lập luận	Chạy kịch bản nhưng chỉ mô tả lại đồ thị	Đủ bốn kịch bản, có dự đoán viết trước và có nhận xét	Giải thích được cả trường hợp lệch dự đoán bằng lập luận từ phương trình	25%
Kiểm chứng và tái lập	Ghi "kết quả phù hợp" cho Bảng 14 mà không tính	Điền đủ Bảng 14, nêu được chênh lệch	Thêm đề xuất truy nguyên và xác nhận chạy lại được từ phiên mới	20%

Bảng 19. Rubric đánh giá.

PHỤ LỤC A — MÃ NGUỒN

Bốn tệp dưới đây đủ để chạy toàn bộ bài thực hành. Chú thích viết không dấu tiếng Việt để tránh lỗi bảng mã khi mở trên máy khác. Bản trước chỉ có năm dòng khai báo, không đủ để nhóm bắt đầu.

A1. src/init_pipeline.m

```
%% init_pipeline.m - Khai bao tham so va duong dan cho TH1
clear; clc; close all;

here = fileparts(mfilename('fullpath'));
root = fileparts(here);
addpath(genpath(fullfile(root,'src')));

% --- Tham so mo hinh (Bang 6) ---
cfg.L    = 200;             % m
cfg.Ts   = 1;               % s
cfg.a1   = 0.04802;         % m^3/s^2 = g*A
cfg.a2   = 3.253852561e7;   % 1/m     = b^2/(g*A)
cfg.mu   = 0.0059266;       % 1/m^3   = f/(2*D*A)
cfg.Tend = 2000;            % s

% --- Cau hinh solver (Bang 12) ---
cfg.solver   = 'ode23tb';
cfg.maxStep  = 0.05;        % s
cfg.relTol   = 1e-6;

% --- Duong dan ---
cfg.paths.raw       = fullfile(root,'data','raw');
cfg.paths.processed = fullfile(root,'data','processed');
cfg.paths.results   = fullfile(root,'results');
for f = fieldnames(cfg.paths)'
    if ~exist(cfg.paths.(f{1}),'dir'), mkdir(cfg.paths.(f{1})); end
```

```
end

% --- Dau phien ban ---
cfg.version.matlab = version('-release');
cfg.version.stamp  = datestr(now,'yyyymmdd_HHMMSS');

assignin('base','cfg',cfg);
fprintf('init_pipeline: OK. MATLAB %s\n', cfg.version.matlab);
```

A2. src/load_data.m

```
function S = load_data(cfg, fname)
%LOAD_DATA Nap du lieu, quy doi don vi mot lan va kiem tra chat luong.
%   Tra ve struct S chua bon timeseries: H1_ts, H3_ts, Q1_ts, Q2_ts

T = readtable(fullfile(cfg.paths.raw, fname));

% --- Quy doi ve SI MOT LAN duy nhat tai day (Bang 11) ---
H1 = T.P1_bar * 10.197;      % bar   -> m cot nuoc
H3 = T.P3_bar * 10.197;
Q1 = T.Q1_Lmin / 60000;      % L/min -> m^3/s
Q2 = T.Q2_Lmin / 60000;

t = (0:height(T)-1)' * cfg.Ts;

% --- Kiem tra chat luong ---
assert(~any(isnan([H1;H3;Q1;Q2])), 'Con NaN chua xu ly');
assert(mean(H1) > mean(H3), ...
       'H1 trung binh khong lon hon H3: kiem tra hoan doi kenh ap suat');
chk = @(x,lo,hi,nm) assert(mean(x)>lo && mean(x)<hi, ...
       '%s ngoai dai hop ly - nghi ngo sai don vi', nm);
chk(H1, 20, 40, 'H1');  chk(H3,  5, 20, 'H3');
```

```
chk(Q1, 5e-5, 1e-3, 'Q1');  chk(Q2, 5e-5, 1e-3, 'Q2');

S.H1_ts = timeseries(H1, t, 'Name','H1_ts');
S.H3_ts = timeseries(H3, t, 'Name','H3_ts');
S.Q1_ts = timeseries(Q1, t, 'Name','Q1_ts');
S.Q2_ts = timeseries(Q2, t, 'Name','Q2_ts');
S.N     = numel(t);

fprintf('load_data: %d mau, Ts = %g s\n', S.N, cfg.Ts);
end
```

A3. src/gen_data.m — dùng khi không có tệp dữ liệu

```
function S = gen_data(cfg, N)
%GEN_DATA Sinh du lieu tong hop de chay bai khi khong co du lieu thuc.
if nargin < 2, N = 2001; end
rng(20260315);                    % co dinh de tai lap

t  = (0:N-1)' * cfg.Ts;
H1 = 30 + 0.5*sin(2*pi*t/600);       % m
Q2 = 2.0e-4 + 3e-5*sin(2*pi*t/900);  % m^3/s

% Tich phan mo hinh (1)-(2) de sinh Q1 va H3
f = @(tt,x) [ (cfg.a1/cfg.L)*(interp1(t,H1,tt) - x(2)) ...
              - cfg.mu*x(1)*abs(x(1));
            (cfg.a2/cfg.L)*(x(1) - interp1(t,Q2,tt)) ];
opt   = odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-12);
[~,X] = ode15s(f, t, [2.0e-4; 12], opt);

Q1 = X(:,1) + 2e-6*randn(N,1);       % them nhieu do
H3 = X(:,2) + 0.02*randn(N,1);
```

```
S.H1_ts = timeseries(H1, t, 'Name','H1_ts');
S.H3_ts = timeseries(H3, t, 'Name','H3_ts');
S.Q1_ts = timeseries(Q1, t, 'Name','Q1_ts');
S.Q2_ts = timeseries(Q2, t, 'Name','Q2_ts');
S.N     = N;
end
```

A4. src/run_case.m

```
function res = run_case(cfg, S, caseName)
%RUN_CASE Chay mot kich ban va luu ket qua kem dau phien ban.

H1 = S.H1_ts;  Q2 = S.Q2_ts;  mu = cfg.mu;
switch caseName
    case 'base'                          % kich ban co so
    case 'A',  H1.Data = H1.Data + 2*(H1.Time>=500);   % tang bac H1
    case 'B',  Q2.Data = Q2.Data .* (1 + 0.2*(Q2.Time>=500));
    case 'C',  mu = 1.10*cfg.mu;                % doi mu +10%
    case 'D',  H1.Data = H1.Data - 20;          % dao chieu dong
    otherwise, error('Kich ban khong hop le: %s', caseName);
end

assignin('base','H1_ts',H1);  assignin('base','Q2_ts',Q2);
assignin('base','a1',cfg.a1); assignin('base','a2',cfg.a2);
assignin('base','mu',mu);     assignin('base','L', cfg.L);

out = sim('model/Pipeline_Normal.slx', ...
      'Solver',       cfg.solver, ...
      'MaxStep',      num2str(cfg.maxStep), ...
      'RelTol',       num2str(cfg.relTol), ...
      'StopTime',     num2str(H1.Time(end)));
```

```
res.case  = caseName;
res.t     = out.tout;
res.Q1    = out.Q1_sim.Data;
res.H3    = out.H3_sim.Data;
res.Q1_ss = mean(res.Q1(end-50:end));          % gia tri xac lap
res.H3_ss = mean(res.H3(end-50:end));
res.mu    = mu;
res.meta  = cfg.version;

outdir = fullfile(cfg.paths.results, caseName);
if ~exist(outdir,'dir'), mkdir(outdir); end
save(fullfile(outdir, sprintf('%s_%s.mat', caseName, cfg.version.stamp)), 'res');

fprintf('%s: Q1_ss = %.4e m^3/s, H3_ss = %.3f m\n', ...
        caseName, res.Q1_ss, res.H3_ss);
end
```

A5. Kiểm chứng bậc độ lớn (Bước 8)

```
%% check_scale.m - Suy nguoc thong so vat ly tu bo tham so
g = 9.81;
A = cfg.a1/g;                    % tiet dien suy tu a1 = g*A
D = sqrt(4*A/pi);                % duong kinh trong
b = sqrt(cfg.a1*cfg.a2);         % van toc truyen song
Q = 2.0e-4;                      % m^3/s tai diem lam viec
dH= cfg.mu*Q^2*cfg.L/cfg.a1;     % ton that o trang thai xac lap

fprintf('A  = %.3e m^2   (ong HDPE 25x2,3: 3,269e-04)\n', A);
fprintf('D  = %6.1f mm   (ong cua de tai: 20,4 mm)\n', D*1000);
fprintf('b  = %6.0f m/s  (dai HDPE: 200 - 500)\n', b);
fprintf('dH = %8.4f m    (Darcy-Weisbach: ~5,6 m)\n', dH);
```

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] MathWorks. Simulink Documentation — Choose a Solver. Natick, MA. (Dẫn ở Bước 5, Bảng 12)

[2] MathWorks. Simulink Design Optimization — Parameter Estimation Documentation. Natick, MA. (Dẫn ở Hình 7 và Hình 9)

[3] MathWorks. Simulink Documentation — Working with Time Series. (Dẫn ở Bước 2)

[4] Tài liệu bài giảng BG2 — Xây dựng mô hình toán học cho một đoạn đường ống nước, đề tài T2025-06-01. (Nguồn của phương trình (1), (2) và của phần kiểm chứng bậc độ lớn ở Bước 8)

[5] Tài liệu bài giảng BG4 — Phương pháp mô phỏng hệ thống đường ống trên MATLAB/Simulink, đề tài T2025-06-01. (Nguồn của cấu hình solver và cấu trúc thư mục dự án)

BÀI THỰC HÀNH 2
LẬP TRÌNH MÔ PHỎNG BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI CHẨN ĐOÁN RÒ RỈ CHO HỆ THỐNG ĐƯỜNG ỐNG TRÊN MATLAB/SIMULINK

Đà Nẵng – 9/2026

MỤC LỤC

CĂN CỨ XÂY DỰNG BÀI THỰC HÀNH 3
Nguyên tắc biên soạn 3
Những thay đổi chính so với bản trước 3
THÔNG TIN BÀI THỰC HÀNH 5
MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA 5
THÔNG TIN NHÓM THỰC HÀNH 6
1. Cơ sở bộ quan sát 7
1.1. Năm biến lập lịch 7
1.2. Quy ước dấu trong bài toán LMI 7
1.3. Ràng buộc H_2 8
2. Thành phần và dữ liệu 8
3. Yêu cầu an toàn và điều kiện thực hiện 9
4. Chuẩn bị trước thực hành 10
5. Phân bổ thời gian 10
6. Ma trận sản phẩm trung gian 10
7. Quy trình thực hành theo từng bước 12
7.1. Bước 1 — Xây dựng mô hình đối tượng có rò (25 phút) 12
7.2. Bước 2 — Lập trình ma trận LPV (20 phút) 13
7.3. Bước 3 — Kiểm tra tính quan sát được (30 phút) 14
7.4. Bước 4 — Xác định miền và tập đỉnh (30 phút) 15
7.5. Bước 5 — Giải LMI bộ quan sát (55 phút) 16
7.6. Bước 6 — Lập trình nội suy gain (30 phút) 18
7.7. Bước 7 — Dựng bộ quan sát trên Simulink (25 phút) 19
7.8. Bước 8 — Xây dựng logic chẩn đoán (25 phút) 19
7.9. Bước 9 — Chạy kịch bản và đánh giá (30 phút) 20
8. Phiếu kết quả 22
8.1. Kiểm tra tính quan sát được 22
8.2. Kết quả giải LMI 22
8.3. Kết quả các kịch bản 22
9. Lỗi thường gặp và cách xử lý 23
10. Yêu cầu báo cáo sau thực hành 24

11. Tiêu chí đánh giá 25
PHỤ LỤC A — MÃ NGUỒN 26
A1. src/check_observability.m — chạy trước mọi việc khác 26
A2. src/gen_leak_data.m — dùng khi không có dữ liệu thực 27
A3. src/solve_observer.m — giải LMI với quy ước Y = PL 28
A4. src/place_vertices.m — phương án không cần bộ giải LMI 29
A5. src/gain_interp.m — nội suy gain theo mã đỉnh 30
TÀI LIỆU THAM KHẢO 32

CĂN CỨ XÂY DỰNG BÀI THỰC HÀNH

Nội dung đối chiếu	Theo thuyết minh T2025-06-01
Vị trí trong thuyết minh	Mục 15.1 – Nội dung 4; Mục 16 – Sản phẩm bài thực hành
Tên sản phẩm đăng ký	Bài thực hành 2: Lập trình mô phỏng bộ quan sát trạng thái chẩn đoán rò rỉ cho hệ thống đường ống trên MATLAB/Simulink
Đối tượng	Sinh viên ngành Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hoá
Yêu cầu đầu ra	01 bài thực hành có đầy đủ hình ảnh và các bước thực hiện để lập trình mô phỏng bộ quan sát trạng thái chẩn đoán rò rỉ trên MATLAB/Simulink
Bài giảng liên quan	BG3 (thiết kế bộ quan sát) và BG4 (mô phỏng trên MATLAB/Simulink)
Bài thực hành trước	TH1 — mô hình đường ống không rò đã nghiệm thu

Bảng 1. Đối chiếu với thuyết minh đề tài.

Nguyên tắc biên soạn

Ảnh minh hoạ được trích từ tài liệu nguồn của đề tài và đặt ngay tại bước thao tác tương ứng. Ảnh chụp màn hình phần mềm dùng để hướng dẫn thao tác; ảnh kết quả nghiệm thu phải được chụp lại từ phiên thực hành thực tế, kèm ngày thực hiện, mã nhóm và mã phiên thí nghiệm.

Những thay đổi chính so với bản trước

Nội dung	Bản trước	Bản hiệu chỉnh
Thời lượng	04 tiết cho 8 bước, gồm cả giải LMI 32 đỉnh	06 tiết, 9 bước, có phân bổ và mốc bắt buộc (Mục 5)
Tính quan sát được	Không kiểm tra; bảng lỗi chỉ nhắc tên	Bước 3 mới, bắt buộc làm trước khi giải LMI
Ràng buộc H_2	Văn bản ghi $E^TPE \leq \eta I$, mã ghi trace — mâu thuẫn	Thống nhất dùng ràng buộc vết (Mục 2.3)

Nội dung	Bản trước	Bản hiệu chỉnh
Biến Zi	Xuất hiện ở Mục 5 và Bước 4 nhưng không định nghĩa	Đã loại bỏ
Tham chiếu công thức	Bước 4 ghi “các LMI (4)–(5)”, nhưng (4) là định nghĩa ρ	Đánh số lại và sửa tham chiếu
Số hạng ma sát	$\rho_1 = -\mu x_1$	$\rho_1 = -\mu\lvert x_1\rvert$ để đúng dấu khi dòng đảo chiều
Ảnh minh chứng	Hai ảnh là mô hình truyền thông nối tiếp, không liên quan	Loại bỏ, thay bằng ảnh mô hình LPV và hình vẽ mới
Trình bày sai số	Biểu đồ theo phần trăm chiều dài tuyến	Theo mét, có dấu (Mục 9 và Hình 7)
Miền đa diện	32 đỉnh, không nêu độ bảo thủ	Nêu rõ chỉ 12 đỉnh đạt tới được (Bước 4)
Mã nguồn	10 dòng YALMIP	Bộ mã đầy đủ ở Phụ lục A
Tiêu chí từng bước	Mô tả định tính	Tiêu chí đạt định lượng
Rubric	Chỉ có tỷ trọng	Ba mức Chưa đạt / Đạt / Tốt

Bảng 2. Tóm tắt thay đổi.

THÔNG TIN BÀI THỰC HÀNH

Thông tin	Nội dung
Tên bài	Bài thực hành 2: Lập trình mô phỏng bộ quan sát trạng thái chẩn đoán rò rỉ cho hệ thống đường ống trên MATLAB/Simulink
Thời lượng	06 tiết (270 phút); tổ chức theo nhóm 3–5 sinh viên
Kiến thức tiên quyết	Hoàn thành TH1; đã học BG3 về bộ quan sát LPV; biết mô hình trạng thái, ổn định Lyapunov và khái niệm bất đẳng thức ma trận tuyến tính
Phần mềm	MATLAB R2021b trở lên. Giải LMI bằng YALMIP kèm SeDuMi hoặc SDPT3; hoặc Robust Control Toolbox. Phương án không cần bản quyền LMI: đặt cực tại từng đỉnh (Phụ lục A4)
Sản phẩm nộp	LeakPlant.slx; bảng kiểm tra hạng ma trận quan sát; define_lpv_domain.m; solve_observer.m; bộ gain L_i kèm P chung; Observer_LPV.slx; bảng $\hat{z}\ell$, phần dư, cờ chất lượng và chỉ tiêu sai số theo mét
Dữ liệu dùng chung	Ts = 1 s; dữ liệu gắn timestamp, sequence và cờ chất lượng; có z_true và thời điểm mở rò
Phương án khi thiếu dữ liệu	Dùng gen_leak_data.m ở Phụ lục A2 để sinh dữ liệu tổng hợp có vị trí rò biết trước

Bảng 3. Thông tin chung.

MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA

Sau khi hoàn thành bài thực hành, sinh viên phải thực hiện được các yêu cầu sau. So với bản trước, một chuẩn đầu ra mới được bổ sung về kiểm tra tính quan sát được — đây là bước quyết định toàn bộ phần còn lại của bài, và bản trước không có.

Chuẩn đầu ra	Biểu hiện cần đạt	Bước
CLO1	Xây dựng được mô hình đường ống có rò với trạng thái tăng cường $z\ell$ và $\lambda\ell$, đủ số hạng rò	B1, B2
CLO2	Kiểm tra được tính quan sát được và kết luận bài toán LMI giải cho bao nhiêu trạng thái	B3
CLO3	Tạo được miền đa diện từ các biến lập lịch và đánh giá được độ bảo thủ của tập đỉnh	B4
CLO4	Giải được LMI bộ quan sát theo một quy ước dấu nhất quán và kiểm chứng bằng trị riêng	B5
CLO5	Lập trình nội suy gain và mô phỏng bộ quan sát trên Simulink	B6, B7
CLO6	Đánh giá được vị trí rò, phần dư, cờ chất lượng và các chỉ tiêu sai số tính bằng mét	B8, B9

Bảng 4. Chuẩn đầu ra và bước tương ứng.

THÔNG TIN NHÓM THỰC HÀNH

Mục	Nội dung ghi nhận
Lớp / Nhóm	
Ngày thực hiện	Ngày ...../...../20..... Ca thực hành: .....
Mã phiên thí nghiệm	
Thành viên	1. ..... 2. ..... 3. ..... 4. ..... 5. .....
Phân công	Mô hình: ..... LMI: ..... Đánh giá / Báo cáo: .....
Phiên bản phần mềm	MATLAB R20..... Bộ giải LMI: ..... Phiên bản: .....

Bảng 5. Thông tin nhóm — điền trước khi bắt đầu.

1. Cơ sở bộ quan sát

Bài thực hành mở rộng mô hình không rò của TH1 thành mô hình có một điểm rò, rồi thiết kế bộ quan sát để ước lượng vị trí rò từ bốn tín hiệu đo. Trạng thái tăng cường và lưu lượng rò:

$$x = [Q_1,\ H_2,\ Q_2,\ z_\ell,\ \lambda_\ell]^{\mathrm{T}}, \qquad q_\ell = \lambda_\ell \sqrt{H_2} \tag{1}$$

Mô hình đối tượng và bộ quan sát dạng Luenberger có ma trận phụ thuộc biến lập lịch ước lượng:

$$\dot{x} = A(\rho)x + B(\rho)u + Ew, \qquad y = Cx + D_w w \tag{2}$$

$$\dot{\hat{x}} = A(\hat{\rho})\hat{x} + B(\hat{\rho})u + L(\hat{\rho})(y - C\hat{x}), \qquad r = y - C\hat{x} \tag{3}$$

Ba dấu mũ trong (3) không phải chi tiết trình bày mà là nội dung: $\hat{\rho}$ tính từ $\hat{x}$ chứ không từ x, vì x không đo được. Chính sai lệch giữa ρ và $\hat{\rho}$ mới mang thông tin về vị trí rò.

1.1. Năm biến lập lịch

$$\rho = \left[-\mu|Q_1|,\ \frac{1}{z_\ell},\ -\frac{\sqrt{H_2}}{z_\ell},\ \frac{a_1}{L - z_\ell},\ -\mu|Q_2| \right]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

So với bản trước, thành phần thứ nhất và thứ năm được viết là $-\mu|Q|$ thay vì $-\mu Q$, để tích $\rho_1 Q_1$ tái tạo đúng số hạng ma sát $-\mu Q_1|Q_1|$ của mô hình gốc thay vì $-\mu Q_1^2$. Dạng bình phương làm mất dấu và mô hình sai khi dòng đảo chiều — điều này đã được sửa ở TH1 và phải giữ nhất quán.

Lưu ý quy ước không đối xứng và rất dễ nhầm: ρ_4 đã bao gồm hệ số a_1 bên trong, còn ρ_2 và ρ_3 thì không. Ai lập ma trận A(ρ) mà nhân thêm a_1 vào ρ_4 sẽ được mô hình sai lệch đúng bằng một lần a_1, và sai số này không lộ ra trên đồ thị.

Miền hợp lệ phải được kiểm tra trước mỗi lần tính:

$$z_{\min} \le z_\ell \le L - z_{\min}, \qquad H_2 \ge 0, \qquad \lambda_\ell \ge 0 \tag{5}$$

Bản trước viết "phải loại $x_4=0$, $x_4=L$ và $x_2<0$". Điều kiện đó chưa đủ: chỉ loại đúng hai điểm biên thì các giá trị $z\ell$ = 0,01 m vẫn được chấp nhận và làm ρ_2 = 100. Phải loại cả một dải sát biên, với z_min = 5 m cho tuyến 200 m.

1.2. Quy ước dấu trong bài toán LMI

> **Quy ước thống nhất toàn hồ sơ**
>
> Y = PL và L = P^{-1}Y. Do đó các số hạng chứa Y trong LMI mang dấu trừ.

Không dùng đồng thời dấu cộng trong LMI và công thức $L = P^{-1}Y$. Sai dấu làm bộ quan sát phân kỳ ngay từ mẫu đầu, và triệu chứng rất dễ bị quy nhầm cho điều kiện đầu hoặc cho dữ liệu.

Quy tắc kiểm tra một dòng: sau khi tính L_i, luôn kiểm tra trị riêng của $A_i - L_iC$ phải nằm bên trái đường thẳng $\mathrm{Re}(s) = -\alpha$. Nếu nằm bên phải, gần như chắc chắn đã sai dấu.

$$Y_i = PL_i \quad \Longrightarrow \quad A_i^{\mathrm{T}}P + PA_i - C^{\mathrm{T}}Y_i^{\mathrm{T}} - Y_iC + C_z^{\mathrm{T}}C_z + 2\alpha P \prec 0 \tag{6}$$

$$L_i = P^{-1}Y_i, \qquad P = P^{\mathrm{T}} \succ 0, \qquad \alpha > 0 \tag{7}$$

1.3. Ràng buộc H_2

Ràng buộc là $E^{\mathrm{T}}PE \le \eta$ rồi kết luận $\gamma_2 \le \sqrt{\eta}$, nhưng đoạn mã ở Bước 4 lại dùng $\mathrm{trace}(E^{\mathrm{T}}PE)$. Hai cách này không tương đương và tài liệu tự mâu thuẫn.

$$\mathrm{trace}(E^{\mathrm{T}}PE) < \eta \quad \Longrightarrow \quad \|G\|_2^2 < \eta \tag{8}$$

Cận H_2 chuẩn dùng ràng buộc vết: nếu $\mathrm{trace}(E^{\mathrm{T}}PE) < \eta$ thì bình phương chuẩn H_2 nhỏ hơn η. Ràng buộc ma trận $E^{\mathrm{T}}PE \preccurlyeq \eta I$ chỉ chặn giá trị riêng lớn nhất, tức $\lambda_{\max}(P) \le \eta$; khi $E = I_5$ nó cho $\mathrm{trace}(P) \le 5\eta$, nghĩa là $\gamma_2 \le \sqrt{(5\eta)}$ chứ không phải $\sqrt{\eta}$ — lạc quan hơn thực tế một hệ số $\sqrt{5} \approx 2{,}24$. Bản hiệu chỉnh dùng ràng buộc vết, khớp với đoạn mã.

Cũng cần gọi đúng tên kết quả: điều kiện trên không tính chuẩn H_2 của hệ mà cho một cận trên đảm bảo cho toàn bộ đa diện, vì dùng chung một ma trận P. Ngoài ra việc gộp số hạng $2\alpha P$ vào cùng bất đẳng thức với $C_z^{\mathrm{T}}C_z$ là hợp lệ nhưng làm η trở thành cận cho hệ đã dịch phổ đi α; khi báo cáo η phải nói rõ nó ứng với α nào.

Cấu hình chuẩn của bài: $\dot{e} = (A_i - L_iC)e + Ew$ và $z = Cz \cdot e$. Sau khi chuẩn hoá trạng thái, chọn $E = I$, $Cz = I$ và $Dw = 0$. Nếu nhóm thay đổi trọng số thì phải lưu E, Cz, ma trận chuẩn hoá và giải lại toàn bộ các đỉnh.

2. Thành phần và dữ liệu

Thành phần	Yêu cầu
MATLAB / Simulink	R2021b trở lên. Có công cụ giải LMI; lưu rõ tên bộ giải và phiên bản trong README
Mô hình TH1	Đã nghiệm thu, đúng đơn vị, dùng dạng Q|Q| ở nhánh ma sát
Ma trận trọng số H_2	E, Dw, Cz được định nghĩa tường minh kèm giải thích quy tắc chuẩn hoá

Thành phần	Yêu cầu
Dữ liệu kịch bản	Có z_true, thời điểm mở rò, H_1, H_3, Q_1, Q_2 và cờ chất lượng
Phương án dự phòng	Nếu không có bộ giải LMI: đặt cực tại từng đỉnh bằng hàm place — Phụ lục A4

Bảng 6. Thành phần cần chuẩn bị.

3. Yêu cầu an toàn và điều kiện thực hiện

Bắt buộc

Sinh viên chỉ được khởi động bơm, thay đổi trạng thái van hoặc tạo rò rỉ sau khi giảng viên xác nhận điều kiện an toàn.

Không chạy kết quả bộ quan sát trên thiết bị thật trong bài này.

Không công bố giá trị γ hoặc η nếu chưa lưu nghiệm, E, Dw, Cz và quy tắc chuẩn hoá.

Không gán vị trí rò bằng 0 khi thuật toán không xác định. Dùng trạng thái UNKNOWN như một mã riêng.

Vì bài 2 thực hiện hoàn toàn trên máy tính, danh mục kiểm tra được tách thành hai phần như đã làm ở TH1. Bản trước bắt sinh viên đánh dấu năm mục về bơm, cảm biến và 4G cho một bài không chạm vào hệ thực; điều đó biến danh mục an toàn thành thủ tục hình thức.

Phần A — bắt buộc cho bài 2 (trên máy tính)	Đạt	Ghi chú
Đã sao chép mô hình TH1 sang dự án mới, không sửa bản đã nghiệm thu	☐	
Bộ giải LMI đã cài và chạy được ví dụ mẫu	☐	
Có ít nhất bốn kịch bản rò với z_true đã biết	☐	
Đã điền Bảng 5 thông tin nhóm	☐	
Đã đọc trước công thức (1) đến (8)	☐	

Bảng 7A. Kiểm tra trước khi thực hành — bài 2.

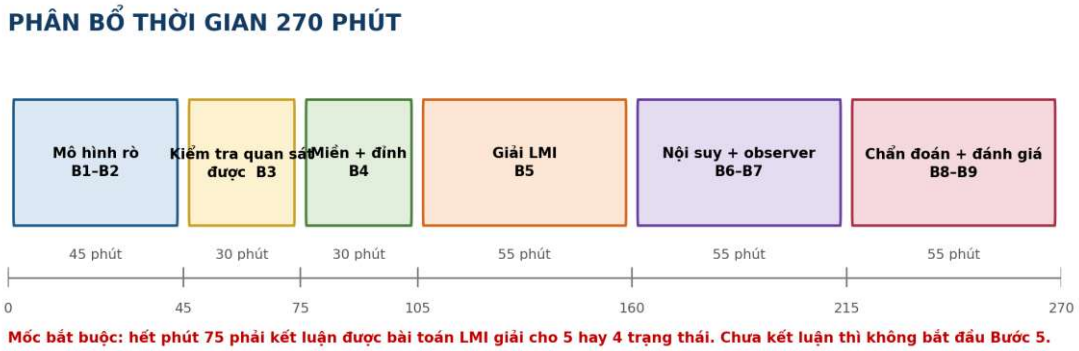
Phần B — chỉ khi tiếp cận hệ thống thực	Đạt	Ghi chú
Nguồn điện, nối đất và nút dừng khẩn cấp	☐	
Đường ống, khớp nối, van và vị trí xả	☐	
Nguồn 24 VDC, cảm biến và tín hiệu 4–20 mA	☐	
Kết nối PLC, Raspberry Pi, 4G và SCADA	☐	
Đã xả áp trước khi tháo lắp bất kỳ mối nối nào	☐	

Bảng 7B. Kiểm tra khi tiếp cận hệ thống thực.

4. Chuẩn bị trước thực hành

- Sao chép mô hình TH1 thành dự án mới; không sửa bản đã nghiệm thu.
- Tạo các tệp check_observability.m, define_lpv_domain.m và solve_observer.m theo Phụ lục A.
- Chuẩn bị ít nhất ba kịch bản rò giữa tuyến và một kịch bản vùng biên.
- Lập bảng kiểm tra thứ tự trạng thái, ngõ vào và ngõ ra — thứ tự sai là lỗi im lặng khó truy nhất trong bài này.

5. Phân bổ thời gian



Hình 1. Phân bổ 270 phút cho chín bước thực hành.

Mốc bắt buộc ở phút 75

Hết phút 75, mỗi nhóm phải kết luận được: bài toán LMI sẽ giải cho năm trạng thái hay cho bốn trạng thái.

Chưa có kết luận này thì không nên bắt đầu Bước 5. Lý do được trình bày ở Bước 3: nếu giải cho năm trạng thái, bộ giải sẽ báo infeasible tại mọi đỉnh và nhóm mất phần còn lại của buổi để tìm nguyên nhân không tồn tại.

6. Ma trận sản phẩm trung gian

Bảng dưới đây quy định điều kiện chuyển bước. So với bản trước, biến Zi đã được loại bỏ vì nó không được định nghĩa ở bất kỳ đâu trong tài liệu và không xuất hiện trong mã nguồn.

Bước	Tệp / biến phải có	Điều kiện chuyển bước
1–2	LeakPlant.slx; hàm tạo A(ρ), B(ρ), C	Thế ngược ρ khôi phục đúng phương trình phi tuyến
3	obs_rank_table.mat	Có kết luận rõ ràng: LMI giải cho 5 hay 4 trạng thái
4	rho_min, rho_max, vertices	Đủ số đỉnh, không trùng, có mã đỉnh và thứ tự bit
5	P, Yi, eta, Li	Bộ giải báo khả thi; P xác định dương; trị riêng $A_i - L_iC$ đạt tốc độ α
6–7	gain_interp.m; Observer_LPV.slx	$\Sigma\alpha_i = 1$ và $\alpha_i \geq 0$ tại 100 điểm thử; không có điểm ngoài miền bị bỏ qua
8–9	metrics.csv; plots/	Đủ kịch bản; chỉ tiêu tính bằng mét, có dấu; có tỷ lệ hợp lệ

Bảng 8. Ma trận sản phẩm trung gian.

7. Quy trình thực hành theo từng bước

Chín bước dưới đây thay cho tám bước của bản trước. Bước 3 về kiểm tra tính quan sát được là bước mới và là bước quyết định toàn bộ phần còn lại. Mỗi bước có tiêu chí đạt định lượng thay cho mô tả định tính.

7.1. Bước 1 — Xây dựng mô hình đối tượng có rò (25 phút)

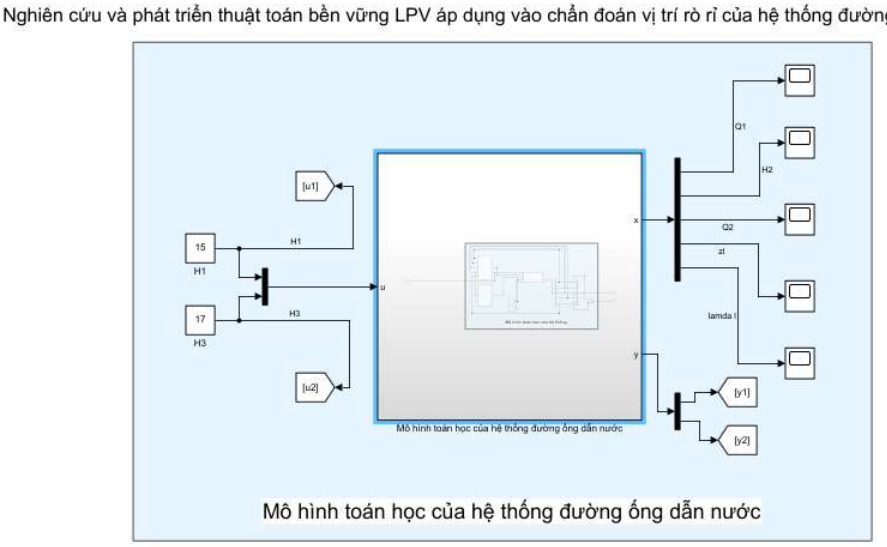
Mục đích: Bổ sung trạng thái và lưu lượng rò vào mô hình của TH1.

- Mở rộng trạng thái thành $x = [Q_1, H_2, Q_2, z\ell, \lambda\ell]^T$; đầu vào $u = [H_1, H_3]^T$; đầu ra đo $y = [Q_1, Q_2]^T$.
- Chia tuyến thành hai đoạn có chiều dài $z\ell$ và $L - z\ell$.
- Bổ sung số hạng $-\lambda\ell\sqrt{H_2}$ vào phương trình liên tục tại nút rò.
- Đặt $\dot{z}\ell = 0$ và $\dot{\lambda}\ell = 0$ cho một kịch bản tĩnh.
- Gắn khối Assertion cho $z_min \le z\ell \le L - z_min$ và $H_2 \ge 0$.

Điểm dễ sai nhất của bước này

Số hạng $-\lambda\ell\sqrt{H_2}$ trong phương trình $\dot{H}_2$ là chỗ DUY NHẤT mà $\lambda\ell$ xuất hiện trong toàn mô hình. Thiếu nó, mô hình không mang thông tin về rò và bài toán ước lượng $\lambda\ell$ trở nên vô nghĩa.

Cách kiểm tra: đặt $\lambda\ell = 0$ rồi đặt $\lambda\ell \neq 0$ và so hai đáp ứng. Nếu hai đáp ứng giống nhau thì số hạng rò đang bị thiếu.



Hình 2. Mô hình đối tượng có nhánh mô phỏng rò rỉ. Lưu ý trong ảnh này $H_1 = 15$ và $H_3 = 17$, tức áp đầu tuyến thấp hơn áp cuối tuyến — cấu hình dòng chảy ngược, chỉ dùng để thử dấu. Với kịch bản vận hành bình thường phải đặt $H_1 > H_3$ theo dải ở TH1.

Tiêu chí đạt của bước

Mô hình chạy cho trạng thái hữu hạn, không NaN hoặc Inf.

Với $\lambda\ell = 0$ thì lưu lượng rò bằng 0 và mô hình trở về đúng mô hình không rò của TH1.

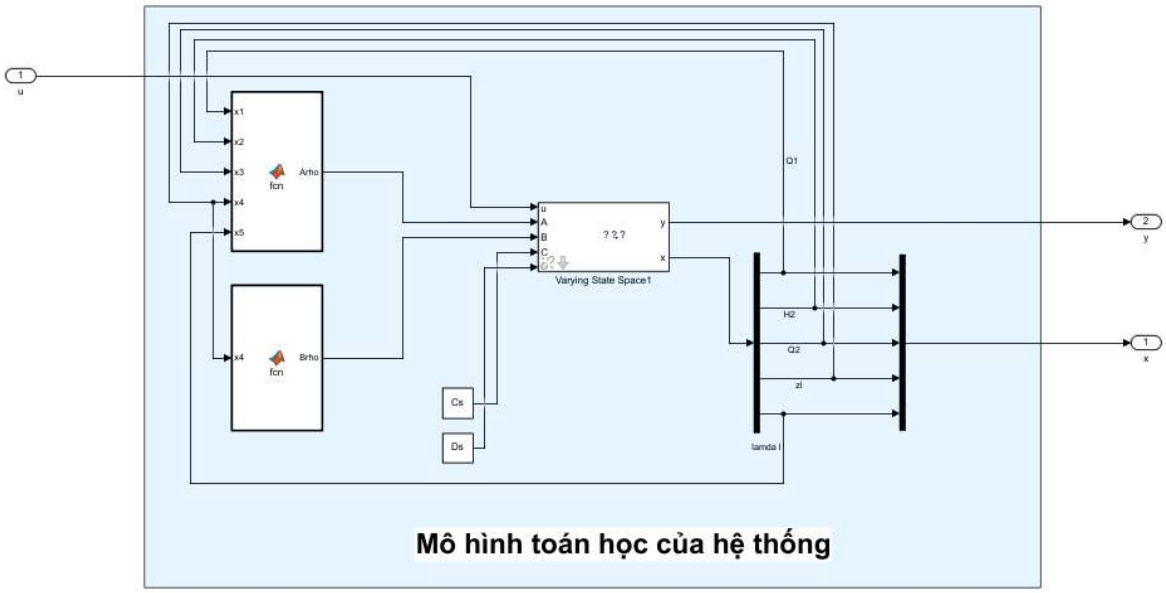
Tăng $\lambda\ell$ thì lưu lượng rò tăng và hiệu $Q_1 - Q_2$ tăng theo.

Khối Assertion không kích hoạt trong suốt thời gian mô phỏng.

7.2. Bước 2 — Lập trình ma trận LPV (20 phút)

Mục đích: Chuyển mô hình phi tuyến sang dạng $A(\rho)x + B(\rho)u$.

- Viết hàm tính năm biến ρ từ trạng thái hiện tại theo (4), có chặn giá trị trước khi chia và trước khi lấy căn.
- Viết hàm tạo $A(\rho)$, $B(\rho)$ và C với thứ tự trạng thái cố định, ghi thứ tự đó vào README.
- Thế ngược ρ vào ma trận và so đạo hàm với mô hình phi tuyến ở Bước 1.
- Tạo kiểm thử cho ba trường hợp biên: $H_2 < 0$, $z\ell$ gần 0 và $z\ell$ gần L.



Hình 3. Khối Varying State Space với ma trận A và B sinh từ hai hàm MATLAB Function theo biến lập lịch.

Tiêu chí đạt của bước

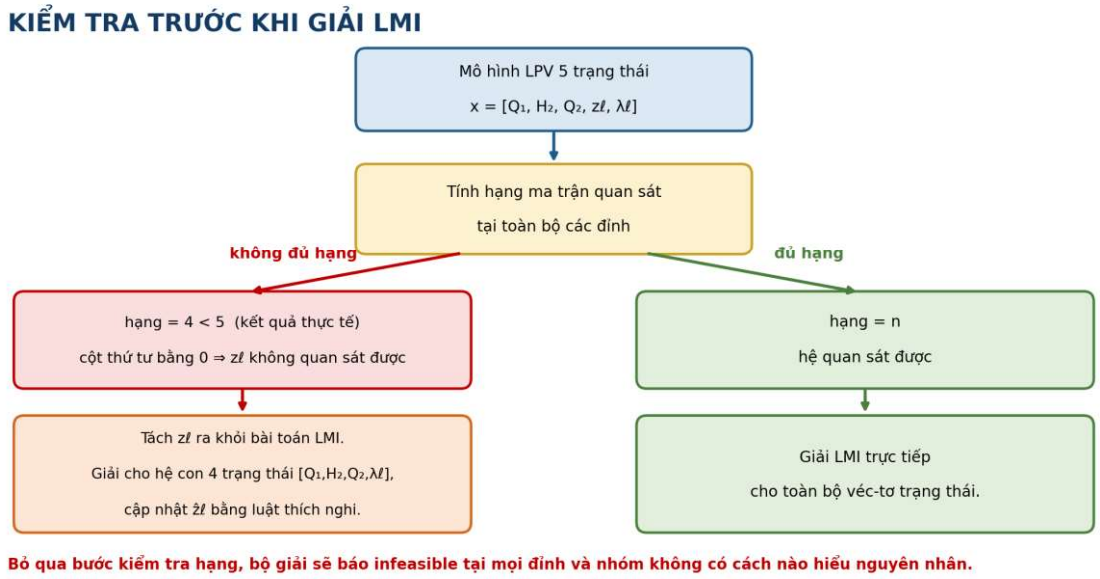
Sai khác giữa đạo hàm tính từ mô hình phi tuyến và từ dạng $A(\rho)x + B(\rho)u$ nhỏ hơn 10^{-8} theo chuẩn tương đối.

Ba trường hợp biên đều trả về giá trị hữu hạn và bật cờ ngoài miền, không trả về NaN.

7.3. Bước 3 — Kiểm tra tính quan sát được (30 phút)

Mục đích: Trả lời câu hỏi bài toán LMI có nghiệm hay không, TRƯỚC khi viết bất kỳ điều kiện LMI nào.

Bước này là mới và là bổ sung quan trọng nhất của bản hiệu chỉnh. Bản trước cho sinh viên đi thẳng từ mô hình LPV sang giải LMI năm trạng thái. Bảng lỗi có nhắc "hệ không quan sát" như một nguyên nhân có thể, nhưng không hướng dẫn cách kiểm tra, nên trên thực tế nhóm sẽ nhận thông báo infeasible mà không có cách nào hiểu tại sao.



Hình 4. Lưu đồ quyết định trước khi giải LMI.

Chạy check_observability.m ở Phụ lục A1 và điền bảng dưới đây.

Phép kiểm tra	Kết quả nhóm tính được	Kết quả tham chiếu
Hạng ma trận quan sát tại các đỉnh		4 tại mọi đỉnh (n = 5)
Cột thứ tư của ma trận quan sát		Bằng 0 tuyệt đối
Hạng PBH tại $\lambda = 0$		$4 < 5$

Phép kiểm tra	Kết quả nhóm tính được	Kết quả tham chiếu
Kết luận về tính phát hiện được		Không thoả mãn
Hạng của hệ con bốn trạng thái		4 — hệ con quan sát được

Bảng 9. Kiểm tra tính quan sát được — sản phẩm bắt buộc.

$$\operatorname{rank}\mathcal{O} = 4 < 5 \;\text{ tai moi dinh} \quad \Rightarrow \quad z_\ell \text{ khong quan sat duoc} \tag{9}$$

Kết quả nhóm sẽ gặp và cách xử lý

Nhìn ma trận A(ρ) theo cột: cột ứng với trạng thái zℓ toàn số 0, và cột tương ứng của C cũng vậy. Vị trí rò không tác động lên bất kỳ đạo hàm trạng thái nào và cũng không xuất hiện ở đầu ra; nó chỉ ảnh hưởng gián tiếp qua các biến lập lịch.

Hệ quả không tránh được: tồn tại một mode không quan sát được nằm tại gốc, nên mọi ma trận A − LC đều giữ nguyên trị riêng bằng 0 với bất kỳ L nào. Điều kiện Lyapunov với tốc độ suy giảm α > 0 vì vậy vô nghiệm tại mọi đỉnh. Đây không phải lỗi của bộ giải và không sửa được bằng cách nới miền hay đổi α.

Cách xử lý: tách zℓ ra khỏi bài toán LMI. Hệ con bốn trạng thái [Q_1, H_2, Q_2, λ_ℓ] quan sát được, thiết kế L cho hệ con này. Vị trí rò được cập nhật bằng một luật thích nghi lấy phần dư làm tín hiệu dẫn — xem Bước 7.

$$x_r = [Q_1,\ H_2,\ Q_2,\ \lambda_\ell]^{\mathrm{T}}, \qquad C_r = [1\,0\,0\,0;\ 0\,0\,1\,0] \tag{10}$$

Ghi nhận trong báo cáo: chứng minh LMI chỉ bảo đảm ổn định cho hệ con; hội tụ của $\hat{z}_\ell$ phụ thuộc điều kiện kích thích bền và phải được kiểm chứng bằng mô phỏng trên toàn bộ bộ kịch bản. Đây là ranh giới giữa cái chứng minh được và cái phải kiểm chứng bằng thực nghiệm, và nó là bài học chính của bài thực hành này.

Tiêu chí đạt của bước

Bảng 9 điền đủ năm dòng bằng số liệu nhóm tự chạy.

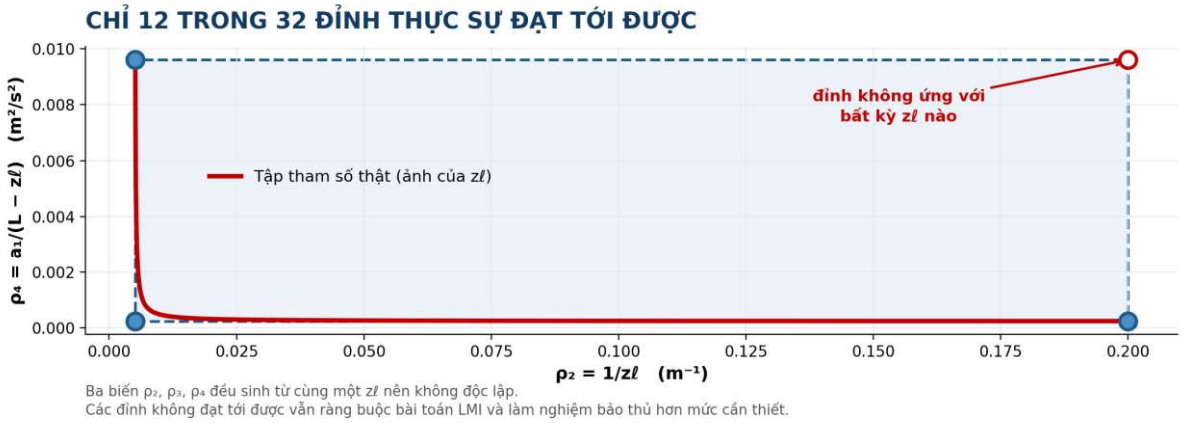
Nhóm kết luận rõ ràng bài toán LMI sẽ giải cho bốn trạng thái, kèm lý do.

Nhóm nêu được cơ chế thay thế để ước lượng zℓ.

7.4. Bước 4 — Xác định miền và tập đỉnh (30 phút)

Mục đích: Xây dựng miền đa diện của các biến lập lịch.

- Tính min và max từ dữ liệu thiết kế và từ dải vận hành, không lấy trực tiếp min/max của một phiên đo ngắn.
- Tạo tổ hợp min/max của các biến lập lịch; lưu vertices kèm mã đỉnh và thứ tự bit.
- Kiểm tra mỗi đỉnh nằm đúng giới hạn và không có đỉnh trùng.
- Đánh giá tỷ lệ đỉnh thực sự đạt tới được.



Hình 5. Chiếu lên mặt phẳng (ρ_2, ρ_4): nhiều đỉnh của hộp không ứng với bất kỳ vị trí rò nào.

Cách chia miền zℓ	Khoảng của ρ_2 (m^{-1})	Tỷ số $\rho_2^{max}/\rho_2^{min}$
Một miền duy nhất 5 – 195 m	$5{,}13\times10^{-3}$ … 0,200	39,0
Vùng 1: 5 – 20 m	0,050 … 0,200	4,0
Vùng 2: 20 – 60 m	0,0167 … 0,050	3,0
Vùng 3: 60 – 195 m	$5{,}13\times10^{-3}$ … 0,0167	3,3

Bảng 10. Chia vùng theo vị trí rò làm giảm mạnh độ rộng miền tham số.

Tiêu chí đạt của bước

Danh sách đỉnh đầy đủ, mỗi hàng có mã đỉnh và các giá trị ρ.

Không có đỉnh trùng; mọi đỉnh nằm trong giới hạn đã khai báo.

Nhóm nêu được tỷ lệ đỉnh đạt tới được và nhận xét về độ bảo thủ.

7.5. Bước 5 — Giải LMI bộ quan sát (55 phút)

Mục đích: Tính ma trận Lyapunov chung P và bộ gain tại các đỉnh.

- Khai báo P đối xứng chung và Y_i cho từng đỉnh. Không khai báo biến nào khác — bản trước có nhắc biến Z_i nhưng nó không được định nghĩa và không xuất hiện trong mã.
- Thêm ràng buộc $P \succ \varepsilon I$ và các bất đẳng thức (6) tại từng đỉnh.
- Chọn α và mục tiêu cực tiểu η theo (8); ghi rõ E, Dw và Cz.
- Giải bài toán; lưu trạng thái bộ giải, nghiệm và trị riêng nhỏ nhất của P.
- Tính $L_i = P^{-1}Y_i$ và lưu theo đúng thứ tự đỉnh đã dùng ở Bước 4.

```
%% Quy uoc dung trong bai: Y = P*L   (Phu luc A3 co ban day du)
n  = 4;                    % he con 4 trang thai theo Buoc 3
ny = 2;
P  = sdpvar(n, n, 'symmetric');
F  = [P >= 1e-6*eye(n)];
Y  = cell(Nv,1);

for i = 1:Nv
   Y{i} = sdpvar(n, ny, 'full');
   M = A{i}'*P + P*A{i} - C'*Y{i}' - Y{i}*C + Cz'*Cz + 2*alpha*P;
   F = [F, M <= -1e-8*eye(n)];
end

eta = trace(E'*P*E);         % rang buoc VET, khong phai E'*P*E <= eta*I
diagn = optimize(F, eta, sdpsettings('solver','sedumi','verbose',1));

Pv = value(P);
for i = 1:Nv
   L{i} = Pv \ value(Y{i});          % L = P^-1 Y, KHONG co dau tru
   ev   = eig(A{i} - L{i}*C);        % KIEM TRA BAT BUOC
   assert(all(real(ev) < -alpha + 1e-9), ...
          'Dinh %d: tri rieng khong dat toc do suy giam alpha', i);
end
```

Quy mô bài toán để nhóm hình dung trước khi bấm nút giải: với hệ con bốn trạng thái và 16 đỉnh, P đối xứng cho 10 biến, mỗi Y_i cỡ 4×2 cho 8 biến, tổng cộng 138 biến

quyết định. Nếu giải cho năm trạng thái với 32 đỉnh thì con số là 335 biến — và theo Bước 3 thì bài toán đó vô nghiệm.

Tiêu chí đạt của bước

Bộ giải báo khả thi; giá trị info trả về không có cảnh báo về độ chính xác.

P xác định dương: trị riêng nhỏ nhất lớn hơn 0 với biên rõ ràng.

Với mọi đỉnh, trị riêng của $A_i - L_iC$ có phần thực nhỏ hơn $-\alpha$.

Nhóm ghi lại tên bộ giải, phiên bản, giá trị α và η vào README.

7.6. Bước 6 — Lập trình nội suy gain (30 phút)

Mục đích: Tính L(ρ) liên tục trong miền đa diện.

$$\omega_n^{\min} = \frac{\rho_n^{\max} - \rho_n}{\rho_n^{\max} - \rho_n^{\min}}, \qquad \omega_n^{\max} = \frac{\rho_n - \rho_n^{\min}}{\rho_n^{\max} - \rho_n^{\min}} \tag{11}$$

$$\alpha_i(\rho) = \prod_{n=1}^{5} \omega_n^{(i_n)}, \qquad \alpha_i \geq 0, \qquad \sum_{i=1}^{N_v} \alpha_i = 1, \qquad L(\rho) = \sum_{i=1}^{N_v} \alpha_i(\rho) L_i \tag{12}$$

- Tính trọng số cận dưới và cận trên cho từng ρ_n theo (11).
- Tính α_i bằng tích các trọng số thành phần tương ứng đỉnh i.
- Kiểm tra $\alpha_i \geq 0$ và tổng $\alpha_i = 1$ tại ít nhất 100 điểm ngẫu nhiên trong miền.
- Nếu ρ ra ngoài miền, đặt cờ OUT_OF_DOMAIN; không âm thầm kẹp giá trị.

Hai điều kiện $\alpha_i \geq 0$ và $\Sigma\alpha_i = 1$ không phải quy ước hình thức: chúng chính là điều kiện để ρ thực sự nằm trong hộp. Nếu một trọng số ra số âm thì ρ đã ra ngoài miền và kết quả tại thời điểm đó phải bị gắn cờ loại bỏ chứ không được ngoại suy.

Lỗi im lặng cần đề phòng

Thứ tự liệt kê đỉnh trong vòng lặp tính α_i phải trùng đúng thứ tự đã dùng khi giải LMI để sinh L_i. Đảo thứ tự đỉnh là một lỗi im lặng: gain vẫn có giá trị hợp lý, hệ vẫn chạy, nhưng ước lượng sai một cách khó lý giải.

Cách phòng: lưu mã đỉnh dưới dạng chuỗi bit cùng với L_i, rồi khi nội suy thì tra theo mã chứ không theo chỉ số.

Tiêu chí đạt của bước

Trong 100 điểm ngẫu nhiên trong miền, $|\Sigma\alpha_i - 1|$ nhỏ hơn 10^{-8}.

Không có trọng số âm vượt quá dung sai số.

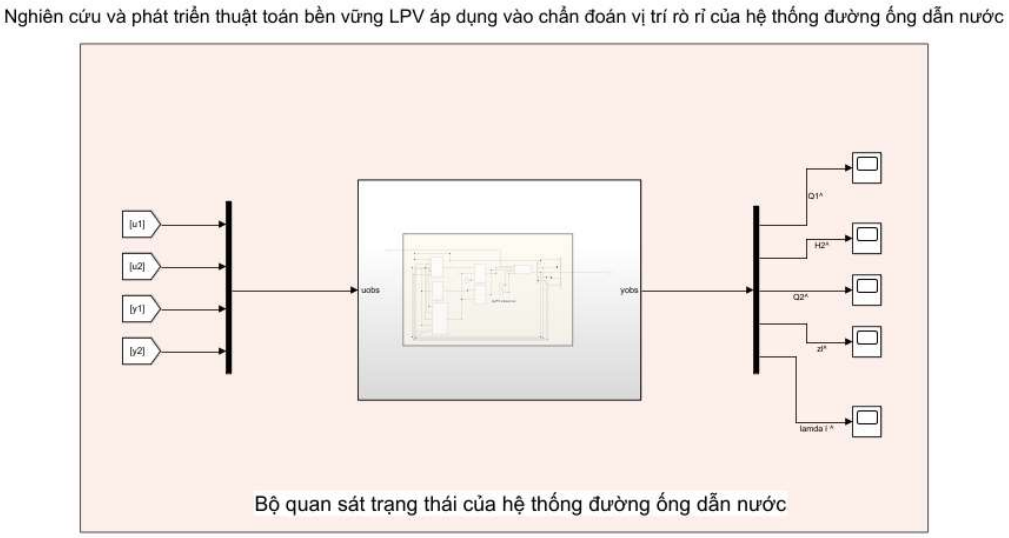
Với điểm cố ý đặt ngoài miền, hàm trả về cờ OUT_OF_DOMAIN thay vì một giá trị gain.

7.7. Bước 7 — Dựng bộ quan sát trên Simulink (25 phút)

Mục đích: Ghép đối tượng, bộ quan sát và khối tính phần dư.

- Tạo subsystem Observer_LPV.
- Dùng cùng u, y và biến lập lịch đã kiểm tra ở Bước 2.
- Tạo tín hiệu đổi mới $y - C\hat{x}$ và nhánh $L(\rho)(y - C\hat{x})$.
- Thêm luật thích nghi cập nhật $\hat{z}_\ell$ theo phần dư, theo (13).
- Ghi lại x, $\hat{x}$, phần dư, ρ, α_i và cờ chất lượng.
- Đặt điều kiện đầu $\hat{x}$ khác x để kiểm tra hội tụ. Khởi tạo $\hat{z}_\ell$ tại L/2, không tại một đầu tuyến.

$$\dot{\hat{z}}_\ell = -\gamma_z \frac{\partial J}{\partial \hat{z}_\ell}, \qquad J = \frac{1}{2} r^{\mathrm{T}} W r, \qquad \gamma_z > 0 \tag{13}$$



Hình 6. Cấu trúc bộ quan sát được ghép nối trong mô hình Simulink.

Tiêu chí đạt của bước

Khi không rò và dữ liệu hợp lệ, sai số trạng thái giảm đơn điệu về gần 0.

Không có vòng lặp đại số chưa xử lý.

Với $\hat{z}_\ell$ khởi tạo lệch 30 m so với giá trị thật, $\hat{z}_\ell$ hội tụ về lân cận giá trị thật trong thời gian mô phỏng.

Cờ chất lượng được truyền ra đến khối đánh giá, không chỉ dùng nội bộ.

7.8. Bước 8 — Xây dựng logic chẩn đoán (25 phút)

Mục đích: Chuyển trạng thái ước lượng thành kết quả có kèm chất lượng.

$$J_r = \|r\|_{RMS}, \qquad J_{th} = \bar{J}_0 + \kappa\sigma_0, \qquad \kappa = 3 \tag{14}$$

- Lấy $\hat{z}\ell$ và $\hat{\chi}\ell$ từ véc-tơ trạng thái ước lượng.
- Đặt ngưỡng phần dư theo (14): $\theta = \mu_0 + k\cdot\sigma_0$. Dùng σ_0 và hệ số k do nhóm tự xác định, , ngưỡng được xác định tạm thời từ tập dữ liệu không rò cung cấp kèm bài thực hành. Giá trị ngưỡng này sẽ được kiểm chứng và hiệu chỉnh bằng dữ liệu cảm biến thật trong TH3..
- Chỉ công bố LEAK khi phần dư vượt ngưỡng liên tục đủ thời gian giữ.
- Đặt UNKNOWN khi mất dữ liệu, ngoài miền, đang trong quá độ khởi tạo, hoặc $\hat{z}\ell$ nằm ngoài miền hợp lệ.
- Ghi thời điểm phát hiện và tính độ trễ chẩn đoán.

Ba trạng thái đầu ra phải phân biệt rõ và không được gộp: NO_LEAK nghĩa là đã đánh giá và kết luận không có rò; UNKNOWN nghĩa là không đủ căn cứ để kết luận; LEAK nghĩa là đã kết luận có rò kèm vị trí. Trong giao thức, UNKNOWN phải là một mã riêng, không được biểu diễn bằng một giá trị số nằm trong dải hợp lệ.

Tiêu chí đạt của bước

Kết quả có đủ bốn trường: state, zhat, residual, quality.

Ngưỡng được tính từ dữ liệu không rò của chính nhóm, không lấy số cho sẵn.

Thử chèn một đoạn mất dữ liệu: hệ phải xuất UNKNOWN chứ không xuất 0 m.

7.9. Bước 9 — Chạy kịch bản và đánh giá (30 phút)

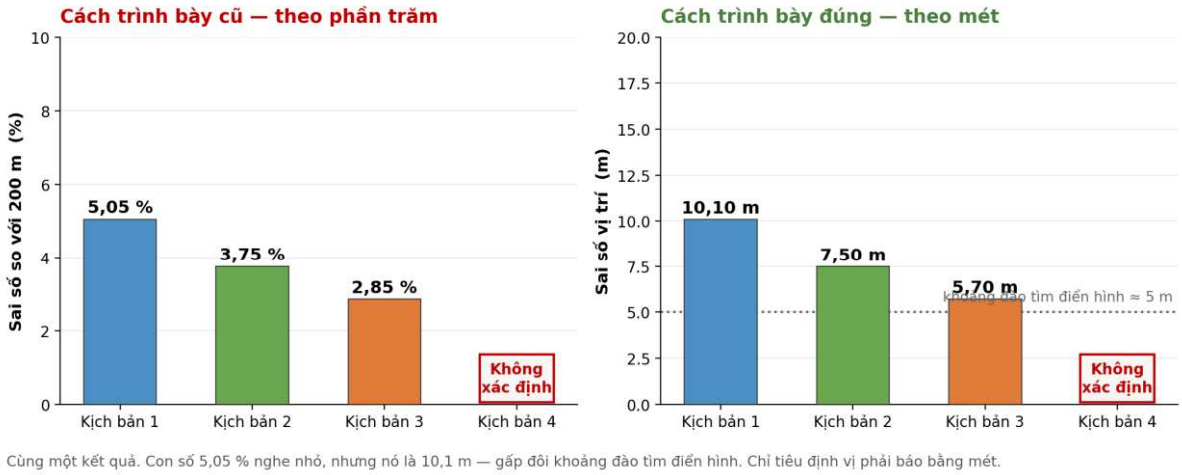
Mục đích: Đánh giá độ chính xác và giới hạn của bộ quan sát.

- Chạy tối thiểu bốn kịch bản: $z\ell$ = 50, 100, 150 m và một kịch bản vùng biên.
- Tính sai số có dấu và ba chỉ tiêu trên các kịch bản hợp lệ.
- Vẽ z_true và $\hat{z}\ell$, phần dư và cờ chất lượng theo thời gian.
- Ghi UNKNOWN cho kịch bản không xác định; không đưa vào chỉ tiêu nhưng phải báo tỷ lệ hợp lệ.

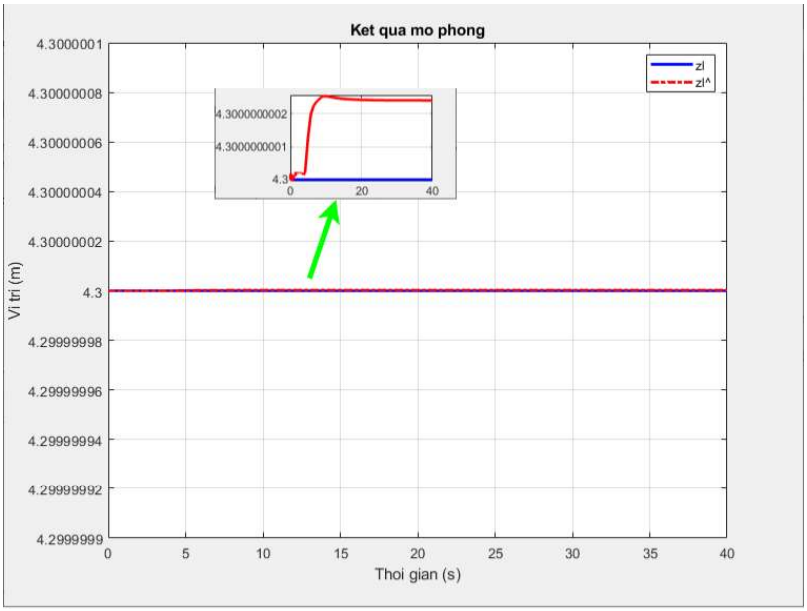
$$e_i = \hat{z}_{\ell,i} - z_{\ell,i} \tag{15}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|e_i|, \qquad \mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}e_i^{\,2}}, \qquad \mathrm{Bias} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}e_i \tag{16}$$

$$T_{det} = t_{alarm} - t_{leak}, \qquad \text{ty le hop le} = \frac{N_{valid}}{N_{total}} \tag{17}$$



Hình 7. Cùng một kết quả trình bày theo hai cách. Cột phải là cách bắt buộc dùng.



Hình 8. Đồ thị so sánh $z\ell$ thật và $\hat{z}\ell$ ước lượng của một kịch bản. Lưu ý trục tung của đồ thị này trải trên khoảng 10^{-8} m, nên nó cho thấy bộ quan sát giữ nguyên giá trị khởi tạo chứ không cho thấy quá trình hội tụ. Khi chụp minh chứng, phải khởi tạo $\hat{z}\ell$ lệch rõ so với giá trị thật và để trục tung ở thang mét.

Tiêu chí đạt của bước

Bảng kết quả tách rõ kịch bản hợp lệ và kịch bản UNKNOWN.

Chỉ tiêu tính bằng mét, có dấu, và ghi rõ tập mẫu dùng để tính.

Có báo tỷ lệ hợp lệ dưới dạng phân số, ví dụ 3/4.

Đồ thị $\hat{z}\ell$ có trục tung ở thang mét và cho thấy được quá trình hội tụ.

8. Phiếu kết quả

Phiếu này được điền trong giờ và nộp kèm báo cáo. So với bản trước, phiếu bổ sung cột sai số có dấu, cột thời gian phát hiện và dòng tổng hợp chỉ tiêu — bản trước không có chỗ ghi ba chỉ tiêu mà chính bài yêu cầu tính.

8.1. Kiểm tra tính quan sát được

Nội dung	Kết luận của nhóm
Hạng ma trận quan sát lớn nhất trên các đỉnh	
Trạng thái nào không quan sát được	
Bài toán LMI sẽ giải cho mấy trạng thái	
Cơ chế nào dùng để ước lượng zℓ	

Bảng 11. Kết luận Bước 3.

8.2. Kết quả giải LMI

Hạng mục	Giá trị
Số đỉnh dùng để thiết kế	
Tốc độ suy giảm α đặt ra (1/s)	
Giá trị η đạt được	
Trị riêng nhỏ nhất của P	
Phần thực lớn nhất của trị riêng $A_i - L_iC$ trên mọi đỉnh	
Bộ giải và phiên bản	

Bảng 12. Kết quả Bước 5.

8.3. Kết quả các kịch bản

Kịch bản	z thật (m)	$\hat{z}\ell$ (m)	Sai số có dấu (m)	Phần dư cực đại	Thời gian phát hiện (s)	Cờ chất lượng
1	50					
2	100					

Kịch bản	z thật (m)	ẑℓ (m)	Sai số có dấu (m)	Phần dư cực đại	Thời gian phát hiện (s)	Cờ chất lượng
3	150					
4 — vùng biên						

Bảng 13. Kết quả bốn kịch bản. Sai số ghi CÓ DẤU, đơn vị mét.

Chỉ tiêu	Giá trị	Tập mẫu dùng để tính
Số kịch bản hợp lệ / tổng số		
MAE (m)		
RMSE (m)		
Bias (m)		
Nhận xét về dấu của Bias		

Bảng 14. Tổng hợp chỉ tiêu. Chỉ tính trên kịch bản có cờ hợp lệ.

Nếu Bias dương hoặc âm với độ lớn đáng kể so với MAE, đó là thông tin chẩn đoán về mô hình chứ không phải nhiễu ngẫu nhiên: bộ quan sát đang lệch có hệ thống về một phía tuyến. Nhóm phải nêu nhận xét này chứ không chỉ điền số.

9. Lỗi thường gặp và cách xử lý

Hiện tượng	Nguyên nhân cần kiểm tra	Cách xử lý
Bộ giải LMI báo vô nghiệm ngay từ đầu	Dùng đủ 5 trạng thái, trong đó zℓ không phát hiện được	Kiểm tra hạng ma trận quan sát; tách zℓ — Bước 3
Phần dư tăng theo hàm mũ ngay từ mẫu đầu	Sai dấu khi khôi phục L từ Y	Kiểm tra trị riêng của $A_i - L_iC$ — Mục 1.2

Hiện tượng	Nguyên nhân cần kiểm tra	Cách xử lý
Nghiệm LMI nằm sát biên dung sai	Ma trận điều kiện xấu do a_2 lớn	Chuẩn hoá trạng thái trước khi lập LMI
Trọng số α_i ra số âm	ρ đã ra ngoài hộp	Gắn cờ OUT_OF_DOMAIN, không ngoại suy gain
Gain nhảy bậc khi ρ thay đổi trơn	Thứ tự đỉnh khi nội suy khác thứ tự khi tổng hợp	Tra theo mã đỉnh chứ không theo chỉ số — Bước 6
$\hat{z}\ell$ nằm ngoài tuyến	Ngoài miền hoặc dữ liệu lỗi	Đặt UNKNOWN; kiểm tra cờ chất lượng
Mô hình rò không phản ứng với $\lambda\ell$	Thiếu số hạng $-\lambda\ell\sqrt{H_2}$ trong phương trình $\dot{H}_2$	Đặt $\lambda\ell = 0$ và $\lambda\ell \neq 0$ rồi so đáp ứng — Bước 1
Mô hình phân kỳ khi $H_1 < H_3$	Biến lập lịch dùng $-\mu Q$ thay vì $-\mu\|Q\|$	Sửa theo (4) — Mục 1.1
Kết quả tốt bất thường	Dùng cùng dữ liệu để thiết kế và kiểm chứng	Tách tập kiểm chứng độc lập
Đồ thị $\hat{z}\ell$ không cho thấy hội tụ	Khởi tạo $\hat{z}\ell$ đúng bằng giá trị thật	Khởi tạo lệch ít nhất 30 m — Bước 7
Kết quả 0 m khi mất dữ liệu	Trộn UNKNOWN vào NO_LEAK	Dùng mã trạng thái riêng — Bước 8

Bảng 15. Lỗi thường gặp. Bảy dòng cuối được thêm so với bản trước.

10. Yêu cầu báo cáo sau thực hành

- Trang đầu: tên bài, nhóm, thành viên, ngày thực hiện, mã phiên và phân công nhiệm vụ.
- Mục tiêu, sơ đồ thực hiện và toàn bộ thông số cấu hình đã dùng.
- Bảng kiểm tra tính quan sát được đã điền (Bảng 11) kèm kết luận.
- Tệp giải LMI, bảng nghiệm và bằng chứng kiểm tra dấu bằng trị riêng.
- Bảng số liệu gốc, mô tả tiền xử lý và liên kết tới tệp dữ liệu điện tử.
- Ảnh mô hình bộ quan sát, đồ thị từng kịch bản, bảng chỉ tiêu và tỷ lệ hợp lệ.

- Kết quả trình bày theo mét và có dấu; không dùng phần trăm chiều dài tuyến.
- Kết luận: mức độ đạt mục tiêu, hạn chế và đề xuất cải tiến, trong đó nói rõ điều gì được chứng minh bằng LMI và điều gì chỉ được kiểm chứng bằng mô phỏng.

11. Tiêu chí đánh giá

Rubric ba mức thay cho bảng tỷ trọng đơn thuần của bản trước.

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Mô hình rò và biểu diễn LPV	Thiếu số hạng rò, hoặc dùng $-\mu Q$ thay vì $-\mu\|Q\|$	Đủ năm phương trình, đúng dấu, có miền hợp lệ	Thêm phép thử $\lambda\ell = 0$ và kiểm tra ba trường hợp biên	20%
Kiểm tra tính quan sát được	Không kiểm tra, giải LMI rồi bế tắc	Điền đủ Bảng 11, kết luận đúng số trạng thái	Thêm biện luận về cơ chế hai tầng và cách ước lượng $z\ell$	20%
Miền đa diện và LMI	Dùng lẫn quy ước dấu; không kiểm tra trị riêng	Một quy ước nhất quán, LMI khả thi, có kiểm tra trị riêng	Thêm đánh giá độ bảo thủ của tập đỉnh và đề xuất chia vùng	25%
Bộ quan sát và logic chẩn đoán	Không phân biệt UNKNOWN với NO_LEAK	Có ngưỡng, thời gian giữ và cờ chất lượng	Thêm ngưỡng tính từ dữ liệu của nhóm và thử kịch bản mất dữ liệu	20%
Đánh giá và tái lập	Báo sai số theo phần trăm, không có dấu	Đủ kịch bản, chỉ tiêu tính bằng mét có dấu, có tỷ lệ hợp lệ	Thêm nhận xét về dấu của Bias và xác nhận chạy lại được từ phiên mới	15%

Bảng 16. Rubric đánh giá.

PHỤ LỤC A — MÃ NGUỒN

Bốn tệp dưới đây đủ để chạy toàn bộ bài thực hành. Chú thích viết không dấu tiếng Việt để tránh lỗi bảng mã khi mở trên máy khác. Bản trước chỉ có mười dòng YALMIP, không đủ để nhóm bắt đầu.

A1. src/check_observability.m — chạy trước mọi việc khác

```
function tbl = check_observability(cfg, p)
%CHECK_OBSERVABILITY Kiem tra hang ma tran quan sat tai cac dinh (Buoc 3).
%   Chay ham nay TRUOC khi viet bat ky dieu kien LMI nao.

C = [1 0 0 0 0;
     0 0 1 0 0];

Q1r = [0.010 0.030];   Q2r = [0.010 0.030];
H2r = [10 30];         zr  = [cfg.zmin, cfg.L-cfg.zmin];

k = 0;  tbl = table();
for q1 = Q1r, for h2 = H2r, for q2 = Q2r, for z = zr
    k = k + 1;
    A = lpv_A(q1, h2, q2, z, p, cfg);
    O = obsv(A, C);
    s = svd(O);
    tbl.dinh(k,1) = k;
    tbl.z(k,1)    = z;
    tbl.hang(k,1) = rank(O, 1e-12*max(s));
end, end, end, end

fprintf('Hang lon nhat: %d / 5 trang thai\n', max(tbl.hang));
if max(tbl.hang) < 5
    warning(['He KHONG quan sat duoc hoan toan. ' ...
             'Kiem tra cot nao cua ma tran quan sat bang 0, ' ...
```

```
        'roi tach trang thai do ra khoi bai toan LMI.']);
end
save(fullfile(cfg.paths.results,'obs_rank_table.mat'),'tbl');
end

function A = lpv_A(Q1, H2, Q2, z, p, cfg)
rho = [ -p.mu*abs(Q1);          % rho1 - dung tri tuyet doi
         1/z;                   % rho2
        -sqrt(max(H2,0))/z;     % rho3
         p.a1/(cfg.L - z);      % rho4 - DA chua a1
        -p.mu*abs(Q2) ];        % rho5
A = zeros(5);
A(1,1) = rho(1);        A(1,2) = -p.a1*rho(2);
A(2,1) = p.a2*rho(2);   A(2,3) = -p.a2*rho(2);   A(2,5) = p.a2*rho(3);
A(3,2) = rho(4);        A(3,3) = rho(5);
end
```

A2. src/gen_leak_data.m — dùng khi không có dữ liệu thực

```
function S = gen_leak_data(cfg, p, zleak, lambda, tEnd)
%GEN_LEAK_DATA Sinh du lieu co ro tai vi tri biet truoc.
if nargin < 5, tEnd = 600; end
rng(20260401);                      % co dinh de tai lap

H1f = @(t) 30 + 0.5*sin(2*pi*t/180);
H3f = @(t) 12 + 0.3*sin(2*pi*t/240);

tf = (0:cfg.TsFast:tEnd)';
f  = @(t,x)[ (p.a1/zleak)*(H1f(t)-x(2))        - p.mu*x(1)*abs(x(1));
             (p.a2/zleak)*(x(1)-x(3)-lambda*sqrt(max(x(2),0)));
             (p.a1/(cfg.L-zleak))*(x(2)-H3f(t))- p.mu*x(3)*abs(x(3)) ];
x0 = [2.0e-4; 0.5*(H1f(0)+H3f(0)); 2.0e-4];
```

```
[~,X] = ode15s(f, tf, x0, odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-12));

k   = round(cfg.Ts/cfg.TsFast);
idx = 1:k:numel(tf);
t   = tf(idx);

S.t  = t;
S.H1 = H1f(t)     + 0.02*randn(size(t));
S.H3 = H3f(t)     + 0.02*randn(size(t));
S.Q1 = X(idx,1)   + 2e-6*randn(size(t));
S.Q2 = X(idx,3)   + 2e-6*randn(size(t));
S.quality = ones(size(t));
S.meta = struct('zleak',zleak,'lambda',lambda,'Ts',cfg.Ts,'seed',20260401);
end
```

A3. src/solve_observer.m — giải LMI với quy ước Y = PL

```
function [P, Lset, info] = solve_observer(Aset, C, alpha, E, Cz)
%SOLVE_OBSERVER Tim P chung va cac gain Li theo quy uoc Y = P*L.
%   Aset : cell array cac ma tran A tai dinh (he con da rut gon theo Buoc 3)
%   Tra ve Li = P\Yi  -- KHONG co dau tru.

n  = size(Aset{1},1);
ny = size(C,1);
Nv = numel(Aset);

P = sdpvar(n, n, 'symmetric');
Y = cell(Nv,1);
F = [P >= 1e-6*eye(n)];

for i = 1:Nv
   Y{i} = sdpvar(n, ny, 'full');
```

```
    M = Aset{i}'*P + P*Aset{i} - C'*Y{i}' - Y{i}*C ...
        + Cz'*Cz + 2*alpha*P;
    F = [F, M <= -1e-8*eye(n)];
end

eta  = trace(E'*P*E);           % RANG BUOC VET (Muc 1.3)
info = optimize(F, eta, sdpsettings('solver','sedumi','verbose',1));

P = value(P);
Lset = cell(Nv,1);
for i = 1:Nv
    Lset{i} = P \ value(Y{i});
    ev = eig(Aset{i} - Lset{i}*C);
    assert(all(real(ev) < -alpha + 1e-9), ...
          'Dinh %d: tri rieng khong dat toc do suy giam alpha', i);
end
fprintf('eta = %.4e ; lambda_min(P) = %.4e\n', value(eta), min(eig(P)));
end
```

A4. src/place_vertices.m — phương án không cần bộ giải LMI

```
function Lset = place_vertices(Aset, C, poles)
%PLACE_VERTICES Dat cuc tai tung dinh khi khong co ban quyen LMI.
%   Khong bao dam on dinh toan mien ve mat ly thuyet.
%   Bat buoc kiem chung bang mo phong tren toan bo kich ban va
%   ghi ro han che nay trong bao cao.

Nv = numel(Aset);
Lset = cell(Nv,1);
for i = 1:Nv
    Lset{i} = place(Aset{i}', C', poles)';
    ev = eig(Aset{i} - Lset{i}*C);
```

```
    fprintf('Dinh %2d: alpha dat duoc = %.3f 1/s\n', i, -max(real(ev)));
end
end
```

A5. src/gain_interp.m — nội suy gain theo mã đỉnh

```
function [Lrho, alph, ok] = gain_interp(rho, rmin, rmax, Lset, codes)
%GAIN_INTERP Noi suy gain trong mien da dien (Buoc 6).
%   codes : ma tran Nv x nrho gom cac bit 0/1, cung thu tu voi Lset

nr = numel(rho);
ok = all(rho >= rmin - 1e-12) && all(rho <= rmax + 1e-12);
if ~ok
    Lrho = []; alph = []; return;            % OUT_OF_DOMAIN
end

w = zeros(nr,2);
for n = 1:nr
    den    = rmax(n) - rmin(n);
    w(n,1) = (rmax(n) - rho(n)) / den;       % trong so can duoi
    w(n,2) = (rho(n) - rmin(n)) / den;       % trong so can tren
end

Nv   = numel(Lset);
alph = ones(Nv,1);
for i = 1:Nv
    for n = 1:nr
        alph(i) = alph(i) * w(n, codes(i,n)+1);
    end
end
assert(abs(sum(alph)-1) < 1e-8, 'Tong trong so khac 1');
```

```
Lrho = zeros(size(Lset{1}));
for i = 1:Nv
    Lrho = Lrho + alph(i)*Lset{i};
end
end
```

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V. (1994). Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. SIAM Studies in Applied Mathematics, vol. 15. Philadelphia, PA: SIAM. (Dẫn ở Mục 1.2 và Bước 5)

[2] Apkarian, P., Gahinet, P., Becker, G. (1995). Self-scheduled H∞ control of linear parameter-varying systems: a design example. Automatica, 31(9), 1251–1261. (Dẫn ở Bước 4 và Bước 6, về nội suy đa diện)

[3] Löfberg, J. (2004). YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB. IEEE CACSD Conference. (Dẫn ở Phụ lục A3)

[4] MathWorks. Simulink Documentation — Varying State Space Block. Natick, MA. (Dẫn ở Bước 2)

[5] Tài liệu bài giảng BG3 — Xây dựng bộ quan sát trạng thái nhằm chẩn đoán vị trí điểm rò rỉ, đề tài T2025-06-01. (Nguồn của điều kiện LMI, phân tích tính quan sát được và cấu trúc hai tầng)

[6] Tài liệu bài giảng Bài giảng 4 và Bài thực hành 1 cùng đề tài. (Nguồn của mô hình nền, bộ tham số và cấu hình mô phỏng)

BÀI THỰC HÀNH 3
LẬP TRÌNH THỰC NGHIỆM BẰNG MATLAB/SIMULINK CHO MÁY TÍNH NHÚNG ĐỂ CHẨN ĐOÁN RÒ RỈ

.

Đà Nẵng – 9/2026

MỤC LỤC

CĂN CỨ XÂY DỰNG BÀI THỰC HÀNH 3
Vị trí của TH3 trong chuỗi 3
Nguyên tắc biên soạn 3
Những thay đổi chính so với bản trước 3
THÔNG TIN BÀI THỰC HÀNH 5
MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA 5
THÔNG TIN NHÓM THỰC HÀNH 6
1. Kiến trúc thực nghiệm 7
1.1. Vai trò của từng thiết bị 7
2. Thiết bị và phần mềm 8
3. Yêu cầu an toàn và điều kiện thực hiện 8
3.1. Quy trình hai giai đoạn 9
4. Chuẩn bị trước thực hành 10
4.1. Chuẩn bị ở nhà — 90 phút, hoàn thành trước buổi học 10
5. Phân bổ thời gian 11
6. Bảng ánh xạ dữ liệu 12
6.1. Cấu hình bus 12
6.2. Đóng gói số thực qua thanh ghi 16 bit 13
6.3. Bảng thanh ghi chi tiết 14
7. Ngân sách thời gian của chu kỳ 15
8. Quy trình thực hành theo từng bước 16
8.1. Bước 1 — Chuẩn hoá model cho sinh mã (25 phút) 16
8.2. Bước 2 — Cấu hình Raspberry Pi (25 phút) 17
8.3. Bước 3 — Thiết lập kênh Modbus RTU (25 phút) 18
8.4. Bước 4 — Ánh xạ dữ liệu vào thuật toán (15 phút) 19
8.5. Bước 5 — Self-test và heartbeat (20 phút) 20
8.6. Bước 6 — Build chương trình (40 phút) 20
8.7. Bước 7 — Deploy và Start (50 phút) 21
8.8. Bước 8 — Chạy phát lại và đối chiếu (45 phút) 22
8.9. Bước 9 — Kịch bản trên mô hình thật (25 phút) 23
9.1. Giai đoạn 1 — phát lại 24
9.2. Giai đoạn 2 — mô hình thật 24
10. Minh chứng ảnh bắt buộc 25
11. Lỗi thường gặp và cách xử lý 25
12. Yêu cầu báo cáo sau thực hành 27

13. Tiêu chí đánh giá 27
PHỤ LỤC A — MẪU BẢN GIAO KÈO GIAO TIẾP.....29
TÀI LIỆU THAM KHẢO 31

CĂN CỨ XÂY DỰNG BÀI THỰC HÀNH

Nội dung đối chiếu	Theo thuyết minh T2025-06-01
Vị trí trong thuyết minh	Mục 15.1 – Nội dung 4; Mục 16 – Sản phẩm bài thực hành
Tên sản phẩm đăng ký	Bài thực hành 3: Lập trình thực nghiệm bằng MATLAB/Simulink cho máy tính nhúng để chẩn đoán rò rỉ
Đối tượng	Sinh viên ngành Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hoá
Yêu cầu đầu ra	01 bài thực hành có đầy đủ hình ảnh và các bước thực hiện để lập trình thực nghiệm bằng MATLAB/Simulink cho máy tính nhúng nhằm chẩn đoán rò rỉ
Bài giảng liên quan	BG3 (bộ quan sát) và BG4 (mô phỏng)
Bài thực hành trước	TH2 — bộ quan sát đã kiểm chứng offline

Bảng 1. Đối chiếu với thuyết minh đề tài.

Vị trí của TH3 trong chuỗi

Đây là bài duy nhất trong chuỗi bốn bài thực hành có tiếp xúc với hệ thống thật. TH1 và TH2 chạy hoàn toàn trên máy tính; TH3 đưa thuật toán lên phần cứng, nối với PLC và cuối cùng chạy trên mô hình nước. Vì vậy phần an toàn và phần kiểm soát rủi ro của bài này phải khác hẳn hai bài trước, chứ không dùng chung một danh mục kiểm tra.

Nguyên tắc biên soạn

Ảnh minh hoạ được trích từ tài liệu nguồn của đề tài và đặt ngay tại bước thao tác tương ứng. Ảnh chụp màn hình phần mềm dùng để hướng dẫn thao tác; ảnh kết quả nghiệm thu phải được chụp lại từ phiên thực hành thực tế, kèm ngày thực hiện, mã nhóm và mã phiên thí nghiệm.

Những thay đổi chính so với bản trước

Nội dung	Bản trước	Bản hiệu chỉnh
Giao thức truyền thông	TCP/IP hoặc Modbus TCP; cấu hình IP tĩnh, ping	RS-485 / Modbus RTU theo module CM 1241 thực tế (Mục 1)
Bảng ánh xạ dữ liệu	Tag trừu tượng kiểu float32	Bảng thanh ghi Modbus thật: slave 1 và 2, 40001 và 40022 (Mục 6)
Đóng gói số thực	Không đề cập	Mục 6.2 mới về cách trải giá trị thực trên thanh ghi 16 bit
Ngân sách thời gian	Không có	Mục 7 mới: tính thời gian quét Modbus theo tốc độ truyền
Thời lượng	04 tiết cho 8 bước	90 phút chuẩn bị ở nhà và 180 phút tại lớp; cấu hình giao thức và ánh xạ làm trước, giờ học tập trung deploy/gỡ lỗi/kiểm chứng dữ liệu
An toàn	Danh mục giống TH1 và TH2	Quy trình hai giai đoạn replay và live, có phân công quyền thao tác (Mục 4)
Ảnh minh chứng	Ba ảnh cuối là ảnh của TH1, không liên quan	Loại bỏ; thay bằng ảnh phần cứng thật và hình vẽ mới
Tiêu chí từng bước	Mô tả định tính	Tiêu chí đạt định lượng
Phiếu kết quả	Cột tiêu chí để trống	Có giá trị ngưỡng cụ thể cho từng chỉ tiêu
Rubric	Chỉ có tỷ trọng	Bổ sung tiêu chí đánh giá nhiễu, sản phẩm MATLAB và ngưỡng $k \cdot \sigma_0$ tự xác định

Bảng 2. Tóm tắt thay đổi.

THÔNG TIN BÀI THỰC HÀNH

Thông tin	Nội dung
Tên bài	Bài thực hành 3: Lập trình thực nghiệm bằng MATLAB/Simulink cho máy tính nhúng để chẩn đoán rò rỉ
Thời lượng	Chuẩn bị ở nhà 90 phút; thực hiện tại lớp 180 phút; nhóm 3–5 sinh viên.
Kiến thức tiên quyết	Hoàn thành TH2; biết Modbus RTU và truyền thông nối tiếp; biết mô hình fixed-step và thao tác cơ bản trên Raspberry Pi
Sản phẩm nộp	Phiếu chuẩn bị; dữ liệu thô cảm biến; script MATLAB; đồ thị phổ nhiễu; bảng ngưỡng tự xác định; Observer_Embedded.slx; build log; ảnh Deploy và Start; log heartbeat; bảng đối chiếu dòng dữ liệu cảm biến đến thuật toán; biên bản chạy kịch bản.
Dữ liệu dùng chung	Ts = 1 s; dữ liệu gắn timestamp, sequence và cờ chất lượng
Chế độ thực hiện	Trước lớp: cấu hình giao tiếp, ánh xạ dữ liệu và đánh giá nhiễu cảm biến. Tại lớp: deploy mã nhúng, gỡ lỗi phần cứng và kiểm chứng dữ liệu từ cảm biến đến thuật toán; chỉ chạy mô hình nước thật khi được giảng viên xác nhận an toàn.

Bảng 3. Thông tin chung.

MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA

Sau khi hoàn thành bài thực hành, sinh viên phải thực hiện được các yêu cầu sau. So với bản trước, một chuẩn đầu ra mới được bổ sung về ngân sách thời gian thực — đây là ràng buộc quyết định việc thuật toán có chạy được trên phần cứng hay không.

Chuẩn đầu ra	Biểu hiện cần đạt	Bước
CLO1	Chuẩn hoá được model bộ quan sát để chạy fixed-step và sinh mã cho máy tính nhúng	B1
CLO2	Chuẩn bị cấu hình Modbus, mô tả bản tin TCP/IP và RS-485, lập bảng ánh xạ; tại lớp gỡ lỗi và xác nhận kết nối.	B2, B3
CLO3	Lập được ngân sách thời gian và chứng minh chu kỳ tính nằm trong hạn định	B3, B8

Chuẩn đầu ra	Biểu hiện cần đạt	Bước
CLO4	Build, deploy và khởi động chương trình từ MATLAB/Simulink	B6, B7
CLO5	Kiểm tra được heartbeat, timeout, cờ chất lượng và trạng thái an toàn khi mất kết nối	B5, B8
CLO6	Đánh giá nhiễu cảm biến, tự xác định ngưỡng $k \cdot \sigma_0$ và kiểm chứng dòng dữ liệu từ cảm biến đến thuật toán.	B8, B9

Bảng 4. Chuẩn đầu ra và bước tương ứng.

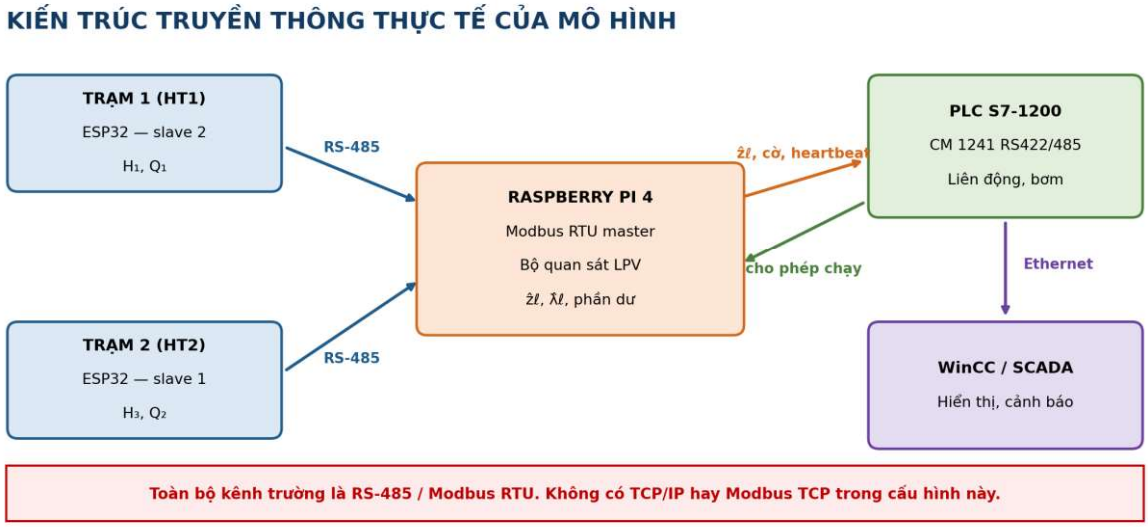
THÔNG TIN NHÓM THỰC HÀNH

Mục	Nội dung ghi nhận
Lớp / Nhóm	
Ngày thực hiện	Ngày ...../...../20..... Ca thực hành: .....
Mã phiên thí nghiệm	
Thành viên	1. ..... 2. ..... 3. ..... 4. ..... 5. .....
Phân công	Vận hành tủ: ..... Truyền thông: ..... Thuật toán / Báo cáo: .....
Người được phép thao tác bơm	Chỉ giảng viên hoặc người được giảng viên chỉ định: .....
Phiên bản phần mềm	MATLAB R20..... TIA Portal V..... Hệ điều hành Pi: .....

Bảng 5. Thông tin nhóm — điền trước khi bắt đầu.

1. Kiến trúc thực nghiệm

Trong kiến trúc của đề tài, PLC trung tâm thực hiện điều khiển, liên động, quản lý trạng thái và cung cấp dữ liệu cho SCADA. Raspberry Pi chạy thuật toán chẩn đoán rò rỉ và trả về vị trí ước lượng cùng các cờ trạng thái. Nguyên tắc chi phối toàn bài: việc mất Raspberry Pi không được làm mất chức năng bảo vệ của PLC.



Hình 1. Kiến trúc truyền thông theo phần cứng đã lắp đặt.

1.1. Vai trò của từng thiết bị

Thiết bị	Vai trò trên bus	Chức năng	Không được làm gì
ESP32 tại trạm đo	Slave	Đọc cảm biến, quy đổi đơn vị, gắn sequence và cờ chất lượng	Không tự quyết định trạng thái rò
Raspberry Pi 4	Master trên kênh trạm đo	Chạy bộ quan sát, tính $\hat{z}\ell$, $\lambda\ell$ và phần dư	Không ra lệnh trực tiếp cho bơm hoặc van
PLC S7-1200	Master trên kênh của nó	Điều khiển, liên động, giám sát heartbeat của Pi	Không phụ thuộc kết quả của Pi để thực hiện liên động
WinCC / SCADA	—	Hiển thị, cảnh báo, lưu lịch sử	Không nằm trên đường tín hiệu an toàn

Bảng 6. Phân công vai trò. Hai cột cuối được thêm so với bản trước.

Câu hỏi kiểm tra nhanh cho nhóm: nếu Raspberry Pi treo giữa chừng, bơm còn dừng được khi có sự cố không, và đường tín hiệu nào bảo đảm điều đó? Câu trả lời phải là có, và nhóm phải chỉ ra được đường tín hiệu cụ thể trên sơ đồ.

2. Thiết bị và phần mềm

TT	Thành phần	Yêu cầu
1	Raspberry Pi 4	Nguồn riêng ổn định, hệ điều hành và tài khoản truy cập; cổng nối tiếp hoặc bộ chuyển USB sang RS-485
2	PLC Siemens S7-1200	CPU 1214C kèm module CM 1241 RS422/485; chương trình liên động và khối dữ liệu Modbus Master
3	Hai trạm đo ESP32	Đã nạp chương trình Modbus slave, địa chỉ slave đã đặt và ghi lại
4	MATLAB / Simulink	Support Package cho Raspberry Pi đúng phiên bản; trình biên dịch hoạt động
5	Bus RS-485	Dây xoắn đôi có màn chắn, điện trở đầu cuối 120 Ω ở hai đầu bus, nối đất màn chắn một đầu
6	Mô hình TH2	Fixed-step, không còn khối không hỗ trợ sinh mã
7	Tệp dữ liệu phát lại	Chứa cả đoạn dữ liệu tốt, đoạn mất mẫu và đoạn ngoài miền

Bảng 7. Thiết bị và phần mềm. Ba dòng được thêm so với bản trước.

Dòng thứ năm là bổ sung thường bị bỏ qua nhưng gây lỗi khó truy nhất: bus RS-485 thiếu điện trở đầu cuối hoặc nối đất màn chắn hai đầu sẽ hoạt động chập chờn, lúc được lúc không, và triệu chứng rất dễ bị quy nhầm cho phần mềm.

3. Yêu cầu an toàn và điều kiện thực hiện

Bắt buộc

Sinh viên chỉ được khởi động bơm, thay đổi trạng thái van hoặc tạo rò rỉ sau khi giảng viên xác nhận điều kiện an toàn. Người được phép thao tác phải được ghi tên vào Bảng 5.

Sinh viên không điều khiển trực tiếp bơm từ Raspberry Pi trong bất kỳ tình huống nào.

Phải thử thuật toán bằng dữ liệu phát lại và đạt toàn bộ tiêu chí trước khi nối với mô hình nước thật.
Khi mất heartbeat, PLC phải gắn cờ INVALID hoặc STALE và không dùng kết quả mới của Pi.
Không cấp nguồn Raspberry Pi từ chân I/O của PLC.

3.1. Quy trình hai giai đoạn

	Giai đoạn 1 — phát lại	Giai đoạn 2 — mô hình nước thật
Nguồn dữ liệu	Tệp dữ liệu đã ghi từ trước	Cảm biến trên tuyến ống
Bơm	Không chạy	Chạy, do người được chỉ định thao tác
Van tạo rò	Không mở	Mở có kiểm soát, theo lệnh giảng viên
Điều kiện bắt đầu	Build thành công, target chạy ổn định	Toàn bộ tiêu chí giai đoạn 1 đã đạt và có chữ ký xác nhận
Người có mặt	Nhóm thực hành	Nhóm thực hành và giảng viên
Khi có bất thường	Dừng chương trình trên Pi	Bấm nút dừng khẩn trên tủ trước, xử lý phần mềm sau

Bảng 8. Hai giai đoạn thực nghiệm.

Phần A — trước khi bắt đầu (mọi giai đoạn)	Đạt	Ghi chú
Đã điền Bảng 5, có tên người được phép thao tác bơm	☐	
Mô hình TH2 đã nghiệm thu, chạy fixed-step	☐	
Bus RS-485: điện trở đầu cuối, màn chắn nối đất một đầu	☐	
Raspberry Pi có nguồn riêng, không lấy từ I/O của PLC	☐	

Phần A — trước khi bắt đầu (mọi giai đoạn)	Đạt	Ghi chú
Đã có tệp dữ liệu phát lại gồm đủ ba loại đoạn	☐	

Bảng 9A. Kiểm tra trước khi thực hành.

Phần B — trước khi chuyển sang giai đoạn 2	Đạt	Ghi chú
Nguồn điện, nối đất và nút dừng khẩn cấp đã thử hoạt động	☐	
Đường ống, khớp nối, van và vị trí xả đã kiểm tra	☐	
Nguồn 24 VDC, cảm biến và tín hiệu 4–20 mA bình thường	☐	
Đã xả áp trước mọi thao tác tháo lắp	☐	
Toàn bộ tiêu chí giai đoạn 1 đã đạt	☐	
Giảng viên đã xác nhận cho phép chạy	☐	Chữ ký: .....

Bảng 9B. Cổng kiểm soát trước khi chạy trên hệ thật.

4. Chuẩn bị trước thực hành

- Sao lưu mô hình bộ quan sát đã kiểm chứng offline ở TH2; không sửa trực tiếp bản đã nghiệm thu.
- Hoàn tất phiếu chuẩn bị ở nhà theo Mục 4.1, gồm cấu hình Modbus trong Simulink, cấu trúc bản tin TCP/IP và RS-485, bảng ánh xạ thanh ghi và kết quả xác định ngưỡng nhiễu.
- Xác nhận với giảng viên: tốc độ truyền, parity, số bit dừng, địa chỉ slave của từng trạm.
- Chuẩn bị tệp phát lại chứa đoạn dữ liệu tốt, đoạn mất mẫu và đoạn ngoài miền.
- Chuẩn bị sẵn một đồng hồ đo hoặc bộ phân tích bus để soi khung tin khi cần truy lỗi.

4.1. Chuẩn bị ở nhà — 90 phút, hoàn thành trước buổi học

1) Cấu hình trước các khối Modbus trong Simulink theo mô hình và cấu hình bus của học phần; lưu ảnh cấu hình, kiểm tra cổng, địa chỉ slave, vùng đọc/ghi, timeout và số lần thử lại.

2) Vẽ hoặc mô tả cấu trúc bản tin TCP/IP và RS-485/Modbus RTU đang dùng: lớp giao thức, định dạng khung, trường dữ liệu, địa chỉ thiết bị, kiểm tra lỗi và cách phát hiện timeout. Phân biệt TCP/IP dùng cho kết nối target/triển khai với RS-485 dùng cho bus cảm biến.

3) Hoàn thiện bảng ánh xạ địa chỉ thanh ghi, chiều truyền, tên tín hiệu, kiểu dữ liệu, thứ tự word/byte nếu áp dụng, đơn vị, hệ số quy đổi, cờ chất lượng và điều kiện hợp lệ. Đối chiếu với chương trình ESP32 và PLC.

4) Chuẩn bị phép đo nhiễu: ở trạng thái xác lập, không rò, ghi dữ liệu thô cảm biến lưu lượng tối thiểu 5 phút hoặc 300 mẫu (lấy điều kiện dài hơn); không lọc hoặc làm tròn dữ liệu gốc. Ghi tốc độ lấy mẫu, đơn vị, trạng thái van/bơm và mã phiên.

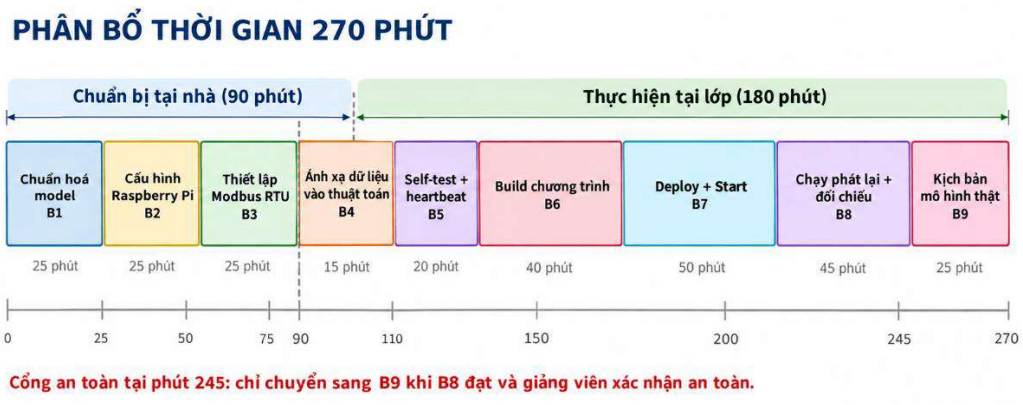
5) Tự viết script MATLAB để tính trung bình, độ lệch chuẩn nhiễu nền σ_0, vẽ chuỗi dữ liệu và phổ nhiễu bằng FFT hoặc mật độ phổ công suất. So sánh độ lệch chuẩn đo được với sai số/độ chính xác nhà sản xuất, nêu rõ hai đại lượng có định nghĩa và điều kiện đo tương thích hay không.

6) Tự chọn hệ số k và tính ngưỡng $\theta = \mu_0 + k \cdot \sigma_0$ (hoặc ngưỡng hai phía phù hợp với dấu phần dư); giải thích đánh đổi giữa báo giả và bỏ sót. Ghi σ_0, k, θ, đơn vị, dữ liệu và lý do chọn k vào bảng ngưỡng; ngưỡng xác định từ cảm biến thật trong TH3 được dùng để đối chiếu và hiệu chỉnh ngưỡng tạm thời đã sử dụng trong TH2.

7) Nộp trước khi vào lớp phiếu chuẩn bị có sơ đồ bản tin, cấu hình Modbus, bảng ánh xạ, dữ liệu thô, script MATLAB, đồ thị phổ nhiễu, so sánh thông số nhà sản xuất và bảng ngưỡng tự xác định. Giảng viên kiểm tra phiếu trước khi nhóm vào phần triển khai. Phân bổ ngoài giờ: 90 phút — cấu hình và giao thức 25 phút; ánh xạ thanh ghi 20 phút; thu và phân tích nhiễu 35 phút; hoàn thiện, nộp phiếu 10 phút.

5. Phân bổ thời gian

Phần chuẩn bị ở nhà: 90 phút trước buổi học. Phần thực hiện tại lớp: 180 phút trong buổi học, chia thành năm phần dưới đây. Phiếu chuẩn bị phải được nộp và kiểm tra trước khi bắt đầu tính giờ trên lớp.



Hình 2. Phân bổ 270 phút cho chín bước.

Cổng bắt buộc ở phút 245

Chỉ nhóm đã chạy đạt toàn bộ kịch bản phát lại mới được xin phép chuyển sang mô hình nước thật.

Nhóm chưa đạt vẫn hoàn thành được bài với kết quả giai đoạn 1, và điều đó được ghi nhận đầy đủ trong rubric. Không nhóm nào bị ép chạy trên hệ thật khi phần mềm chưa ổn định.

6. Bảng ánh xạ dữ liệu

	Static			
	ID1	Struct	0.0	
	MB_ADDR_HT2	UInt	0.0	1
	DATA_ADDR1_HT2	UDInt	2.0	40001
	DATA_ADDR2_HT2	UDInt	6.0	40022
	DATA_LEN1_HT2	UInt	10.0	21
	DATA_LEN2_HT2	UInt	12.0	3
	MODE_0_READ_HT2	USInt	14.0	0
	MODE_1_WRITE_HT2	USInt	15.0	1
	ID2	Struct	16.0	
	MB_ADDR_HT1	UInt	16.0	2
	DATA_ADDR1_HT1	UDInt	18.0	40001
	DATA_ADDR2_HT1	UDInt	22.0	40022
	DATA_LEN1_HT1	UInt	26.0	21
	DATA_LEN2_HT1	UInt	28.0	3
	MODE_0_READ_HT1	USInt	30.0	0
	MODE_1_WRITE_HT1	USInt	31.0	1
	MB_MASTER	Struct	32.0	

Hình 3. Khối dữ liệu cấu hình Modbus Master trong TIA Portal: hai slave với địa chỉ 1 và 2, vùng đọc bắt đầu tại 40001 dài 21 thanh ghi, vùng ghi bắt đầu tại 40022 dài 3 thanh ghi.

6.1. Cấu hình bus

Tham số	Giá trị của mô hình	Ghi vào bản giao kèo
Chuẩn vật lý	RS-485 hai dây	☐
Giao thức	Modbus RTU	☐

Tham số	Giá trị của mô hình	Ghi vào bản giao kèo
Địa chỉ slave — trạm HT2	1	☐
Địa chỉ slave — trạm HT1	2	☐
Vùng đọc	Holding register từ 40001, dài 21	☐
Vùng ghi	Holding register từ 40022, dài 3	☐
Tốc độ truyền	Nhóm điền: ..... baud	☐
Parity và bit dừng	Nhóm điền:	☐
Timeout đáp ứng	Nhóm điền: ..... ms	☐

Bảng 10. Cấu hình bus — phải thống nhất trước khi lập trình.

6.2. Đóng gói số thực qua thanh ghi 16 bit

Mục này là mới và giải quyết một vấn đề mà bản trước bỏ trống hoàn toàn. Thanh ghi Modbus rộng 16 bit, trong khi cột áp và lưu lượng là số thực. Không có quy ước rõ ràng thì hai bên đọc ra hai giá trị khác nhau, và lỗi này rất khó phát hiện vì con số vẫn nằm trong dải hợp lý.



Hình 4. Hai cách đóng gói số thực và điều phải thống nhất cho mỗi cách.

Mô hình Simulink của đề tài dùng cách thứ nhất: trong sơ đồ có các khối mang tên THAP_PHAN_LL và THAP_PHAN_AS, tức phần thập phân của lưu lượng và của áp

suất được truyền riêng. Nhóm phải xác nhận hệ số nhân đang dùng và ghi vào bản giao kèo.

6.3. Bảng thanh ghi chi tiết

Bảng dưới đây là sản phẩm bắt buộc. Nhóm điền chỉ số thanh ghi thực tế sau khi đối chiếu với chương trình ESP32 và chương trình PLC.

Thanh ghi	Chiều	Nội dung	Kiểu / cách đóng gói	Điều kiện hợp lệ
40001	Trạm → Pi	H (phần nguyên)	uint16, đơn vị m	Trong dải ở TH1
40002	Trạm → Pi	H (phần thập phân)	uint16, ×100	0 – 99
40003	Trạm → Pi	Q (phần nguyên)	uint16	Trong dải ở TH1
40004	Trạm → Pi	Q (phần thập phân)	uint16, ×100	0 – 99
…	Trạm → Pi	Nhóm điền phần còn lại của 21 thanh ghi		
4001x	Trạm → Pi	sequence	uint16, tăng, có xử lý tràn	Tăng đều
4001y	Trạm → Pi	cờ chất lượng	uint16, bitfield	Giải mã theo quy ước
40022	Pi → Trạm/PLC	$\hat{z}\ell$ (phần nguyên)	uint16, đơn vị m	$0 \le \hat{z}\ell \le L$
40023	Pi → Trạm/PLC	$\hat{z}\ell$ (phần thập phân)	uint16, ×100	0 – 99
40024	Pi → Trạm/PLC	Trạng thái và heartbeat	uint16, bitfield	Heartbeat tăng đều

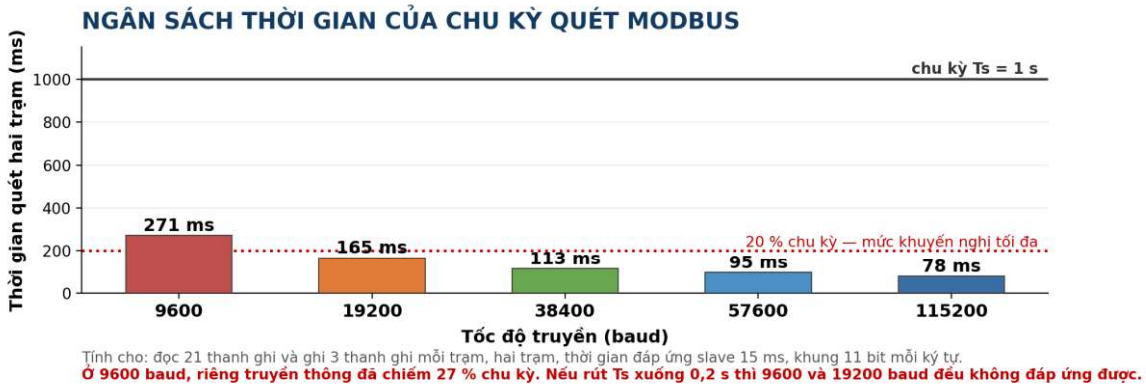
Bảng 11. Bảng thanh ghi — nhóm hoàn thiện và ký xác nhận.

Ba trạng thái đầu ra phải phân biệt

> NO_LEAK nghĩa là đã đánh giá và kết luận không có rò. UNKNOWN nghĩa là không đủ căn cứ để kết luận. LEAK nghĩa là đã kết luận có rò kèm vị trí. UNKNOWN phải là một mã riêng trong thanh ghi trạng thái, không được biểu diễn bằng $\hat{z}\ell = 0$. Một hệ thống báo vị trí 0 m khi mất dữ liệu là hệ thống đang trộn UNKNOWN vào NO_LEAK, và người vận hành sẽ hiểu nhầm là an toàn.

7. Ngân sách thời gian của chu kỳ

Thuật toán chạy ở Ts = 1 s, nhưng trong mỗi chu kỳ phải hoàn thành cả việc quét Modbus lẫn việc tính toán. Nếu tổng thời gian vượt quá chu kỳ, chương trình sẽ trượt deadline và kết quả mất ý nghĩa thời gian thực. Đây là ràng buộc phải kiểm tra trước khi build, không phải sau khi chạy.



Hình 5. Thời gian quét Modbus theo tốc độ truyền, tính cho hai trạm.

Thành phần thời gian	Cách xác định	Giá trị nhóm đo được
Quét Modbus hai trạm	Tính theo Hình 5 rồi đo lại bằng bộ đếm	
Thời gian tính bộ quan sát	Đo bằng khối profiling trong Simulink	
Ghi log và truyền kết quả	Đo phần còn lại của chu kỳ	
Tổng	Cộng ba dòng trên	

Thành phần thời gian	Cách xác định	Giá trị nhóm đo được
Tỷ lệ so với Ts = 1 s	Tổng chia cho 1000 ms	

Bảng 12. Ngân sách thời gian — sản phẩm bắt buộc.

Ngưỡng chấp nhận đề nghị: tổng thời gian không vượt 50 phần trăm chu kỳ, để còn dự phòng cho trường hợp phải truyền lại khung tin lỗi. Nếu vượt, hướng xử lý theo thứ tự: nâng tốc độ truyền, giảm số thanh ghi truyền mỗi chu kỳ, rồi mới đến tối ưu thuật toán.

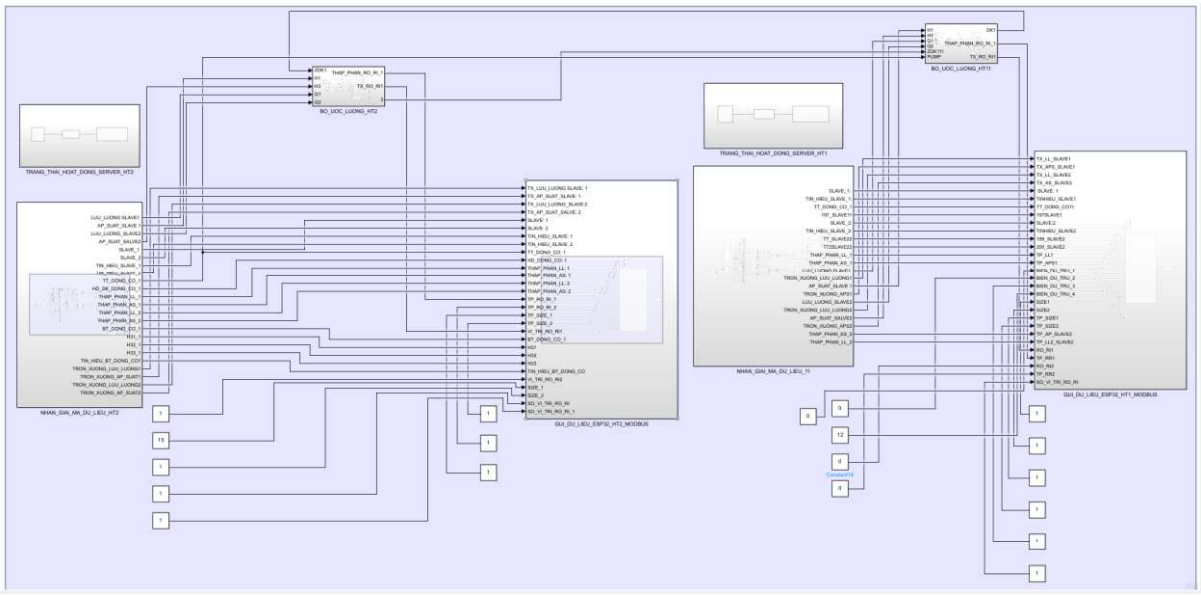
8. Quy trình thực hành theo từng bước

Bước 9 về chạy kịch bản trên hệ thật được tách riêng, vì nó có điều kiện tiên quyết và quy trình an toàn khác hẳn tám bước còn lại. Mỗi bước có tiêu chí đạt định lượng, trong đó, gồm có 4 bước đầu được thực hiện tại nhà và 5 bước tiếp theo được thực hành tại lớp.

8.1. Bước 1 — Chuẩn hoá model cho sinh mã (25 phút)

Mục đích: Loại các thành phần không phù hợp với triển khai nhúng.

- Tạo bản sao mô hình TH2 với tên Observer_Embedded.slx; giữ nguyên bản gốc.
- Chuyển sang solver fixed-step discrete và đặt bước bằng Ts của dữ liệu.
- Thay khối To Workspace bằng cơ chế ghi log hỗ trợ sinh mã.
- Đặt kích thước cố định cho mọi tín hiệu; loại kích thước biến thiên không cần thiết.
- Chạy Model Advisor với bộ kiểm tra dành cho sinh mã.



Hình 6. Mô hình triển khai của đề tài, gồm các khối nhận và giải mã dữ liệu, bộ ước lượng và khối gửi dữ liệu Modbus cho hai trạm.

Điểm cần lưu ý khi chuyển sang fixed-step

Bộ quan sát ở TH2 được thiết kế trong miền liên tục. Khi rời rạc hoá, phải dùng phép biến đổi chính xác chứ không dùng Euler tiến, vì với α khoảng 0,5 trên giây và Ts = 1 s thì tích αTs = 0,5 không nhỏ.

Cách kiểm tra: chạy cả bản liên tục và bản rời rạc trên cùng một đoạn dữ liệu, so đáp ứng. Nếu lệch quá dung sai đã chọn thì phải giảm Ts hoặc thiết kế lại trực tiếp trên miền rời rạc.

Tiêu chí đạt của bước

Model Advisor không còn lỗi thuộc nhóm sinh mã.

Chạy fixed-step trên đoạn dữ liệu chuẩn cho kết quả lệch không quá 1 phần trăm so với bản offline của TH2.

Không còn khối nào có kích thước tín hiệu biến thiên.

8.2. Bước 2 — Cấu hình Raspberry Pi (25 phút)

Mục đích: Thiết lập target và kiểm tra kết nối với máy tính phát triển.

- Cài Support Package cho Raspberry Pi đúng phiên bản MATLAB đang dùng.
- Đăng ký thông tin truy cập theo hướng dẫn phòng thí nghiệm.
- Kiểm tra kết nối từ MATLAB và xác nhận phiên bản hệ điều hành.
- Đồng bộ thời gian hệ thống để log của Pi và của PLC đối chiếu được.
- Kiểm tra cổng nối tiếp dùng cho RS-485 đã được hệ điều hành nhận diện.



Hình 7. Máy tính nhúng Raspberry Pi 4 dùng làm nền tảng chạy thuật toán.

Lưu ý về đồng bộ thời gian: nếu phòng thí nghiệm không có máy chủ thời gian nội bộ, nhóm phải ghi lại độ lệch giữa đồng hồ của Pi và của PLC ở đầu buổi và cuối buổi. Không có con số này thì việc đối chiếu log ở Bước 8 sẽ không kết luận được gì.

Tiêu chí đạt của bước

MATLAB nhận diện được target và đọc được thông tin phần cứng.

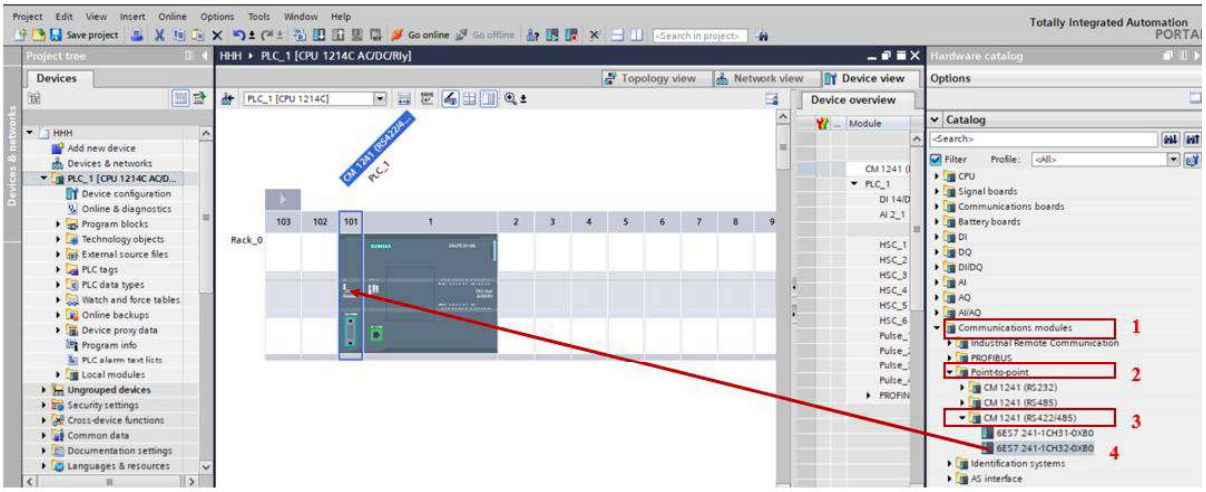
Cổng nối tiếp cho RS-485 xuất hiện trong danh sách thiết bị của hệ điều hành.

Độ lệch thời gian giữa Pi và PLC đã được đo và ghi lại, không vượt quá một chu kỳ Ts.

8.3. Bước 3 — Thiết lập kênh Modbus RTU (25 phút)

Mục đích: Tạo giao tiếp hai chiều theo bảng thanh ghi ở Mục 6.

- Cấu hình cổng nối tiếp: tốc độ truyền, parity, số bit dữ liệu và bit dừng theo Bảng 10.
- Đặt địa chỉ slave cho từng trạm và xác nhận không trùng nhau trên cùng bus.
- Khai báo vùng đọc và vùng ghi đúng địa chỉ và độ dài ở Bảng 11.
- Đặt timeout đáp ứng và số lần thử lại; ghi cả hai vào bản giao kèo.
- Thực hiện thử vòng lặp: ghi một giá trị đã biết rồi đọc lại, kiểm tra từng trường.



Hình 8. Thêm module truyền thông CM 1241 RS422/485 vào cấu hình phần cứng trong TIA Portal.

Bản giao kèo giao tiếp là một tài liệu ngắn, do nhóm phụ trách PLC và nhóm phụ trách Raspberry Pi cùng ký. Nó phải trả lời được: tốc độ truyền và định dạng khung, địa chỉ slave, địa chỉ và độ dài vùng đọc và vùng ghi, cách đóng gói số thực, hệ số nhân, thứ tự word nếu dùng float32, cách mã hoá cờ chất lượng và cờ trạng thái, timeout và số lần thử lại.

Tiêu chí đạt của bước

Thử vòng lặp thành công: giá trị ghi ra và đọc về khớp nhau ở từng thanh ghi.

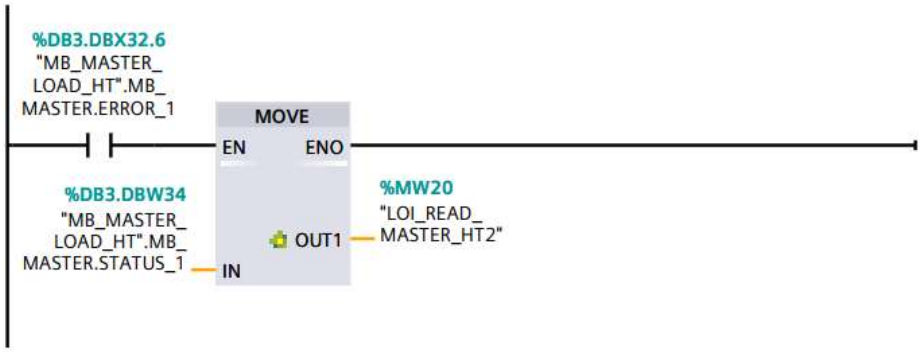
Bản giao kèo giao tiếp đã được cả hai nhóm ký.

Rút một dây bus và cắm lại: hệ thống báo lỗi truyền thông rồi tự phục hồi, không treo.

8.4. Bước 4 — Ánh xạ dữ liệu vào thuật toán (15 phút)

Mục đích: Nối dữ liệu truyền thông với bộ quan sát mà vẫn bảo toàn thông tin chất lượng.

- Chỉ cập nhật H_1, H_3, Q_1, Q_2 khi gói mới hợp lệ và sequence tăng đúng.
- Lưu mẫu trước và tính tuổi dữ liệu; không coi dữ liệu cũ là mẫu hiện tại.
- Khi cờ chất lượng không tốt, giữ bộ quan sát ở trạng thái quy định hoặc đặt UNKNOWN.
- Ghép hai thanh ghi thành giá trị thực theo đúng quy ước ở Mục 6.2.
- Đưa $\hat{z}\ell$, $\lambda\ell$, phần dư và cờ trạng thái ra vùng ghi.



Hình 9. Đoạn chương trình PLC chuyển mã trạng thái Modbus Master sang vùng nhớ để giám sát.

Tiêu chí đạt của bước

Chạy phát lại đoạn có mất mẫu: bộ quan sát không sinh ra một vị trí rò mới.

Tuổi dữ liệu tăng đúng khi ngừng cấp gói và trở về 0 khi có gói mới.

Giá trị ghép từ hai thanh ghi khớp với giá trị gốc đến hai chữ số thập phân.

8.5. Bước 5 — Self-test và heartbeat (20 phút)

Mục đích: Cho PLC biết thuật toán có sẵn sàng hay không.

- Khi khởi động, đặt cờ sẵn sàng bằng FALSE.
- Tự kiểm tra: bộ gain đã nạp, miền biến lập lịch hợp lệ, kích thước ma trận đúng, kênh truyền hoạt động.
- Chỉ sau khi tự kiểm tra thành công mới đặt cờ sẵn sàng bằng TRUE.
- Tăng heartbeat theo chu kỳ; PLC giám sát timeout một cách độc lập.
- Quy định rõ PLC làm gì khi mất heartbeat: gắn cờ INVALID và giữ nguyên liên động của chính nó.

Tiêu chí đạt của bước

Rút cáp bus hoặc dừng chương trình: PLC phát hiện mất heartbeat trong vòng ba chu kỳ và gắn kết quả INVALID.

Trong lúc mất heartbeat, chức năng dừng bơm của PLC vẫn hoạt động bình thường.

Cắm lại cáp: hệ thống tự chạy self-test và trở về trạng thái sẵn sàng, không cần khởi động lại thủ công.

8.6. Bước 6 — Build chương trình (40 phút)

Mục đích: Biên dịch mô hình cho phần cứng đích.

- Chọn Hardware Board đúng loại Raspberry Pi đang dùng.
- Cấu hình thư mục build, trình biên dịch và chế độ triển khai.

- Build mô hình và lưu toàn bộ build log, kể cả các cảnh báo.
- Nếu gặp khối không hỗ trợ sinh mã, thay bằng khối tương đương có hỗ trợ; không bỏ qua cảnh báo về kích thước tín hiệu.

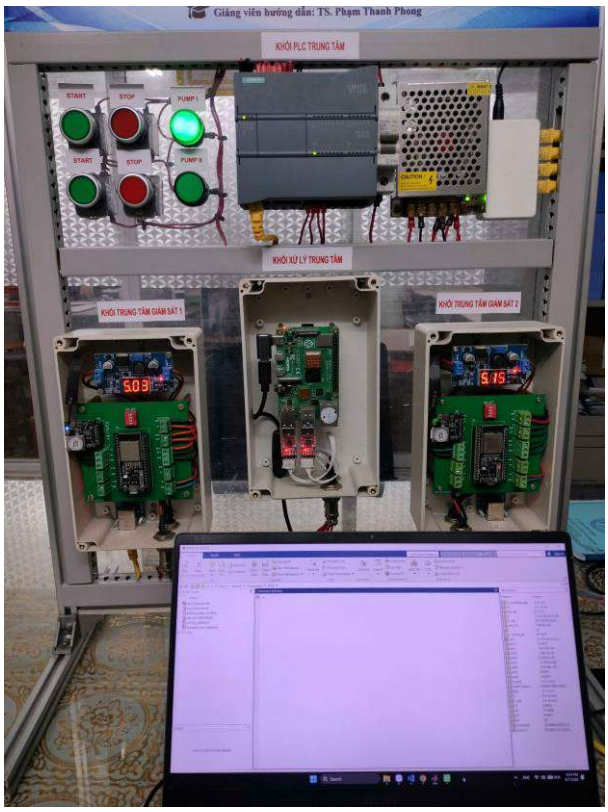
Cảnh báo về kích thước tín hiệu là loại dễ bị bỏ qua nhất và cũng gây hậu quả nặng nhất: mô hình vẫn build được, chương trình vẫn chạy, nhưng một mảng bị cắt hoặc bị đệm thêm phần tử và kết quả sai một cách khó lý giải. Mỗi cảnh báo còn lại phải được giải thích trong biên bản.

> **Tiêu chí đạt của bước**
> Build hoàn tất, không lỗi.
> Mọi cảnh báo còn lại được liệt kê và giải thích trong biên bản, không có cảnh báo nào về kích thước tín hiệu.
> Build log được lưu kèm sản phẩm nộp.

8.7. Bước 7 — Deploy và Start (50 phút)

Mục đích: Chạy thuật toán trên máy tính nhúng, ở chế độ phát lại, gỡ lỗi kết nối phần cứng.

- Xác nhận mô hình nước đang ở trạng thái an toàn: bơm không chạy, van tạo rò đóng.
- Thực hiện Deploy và Start.
- Theo dõi tải bộ xử lý, bộ nhớ, chu kỳ tính và heartbeat trong ít nhất 60 giây.
- Xác nhận PLC nhận được cờ sẵn sàng và các trường dữ liệu đúng kiểu.
- Đo và điền Bảng 12 ngân sách thời gian.
- Kiểm tra theo lớp từ target/TCP-IP đến cổng nối tiếp, dây RS-485, địa chỉ slave và cấu hình Modbus. Dùng công cụ chẩn đoán để tìm timeout, sai địa chỉ, sai parity, đảo A/B hoặc sai đầu cuối; chỉ thay đổi một tham số mỗi lần và cập nhật phiếu giao tiếp



Hình 10. Tủ thực nghiệm với PLC S7-1200, Raspberry Pi trong hộp bảo vệ và hai khối trạm giám sát, kèm máy tính chạy MATLAB.

Tiêu chí đạt của bước

Chương trình chạy liên tục 60 giây không khởi động lại.

Chu kỳ tính lớn nhất không vượt 50 phần trăm chu kỳ Ts.

Bảng 12 đã điền đủ và tổng thời gian nằm trong hạn định.

PLC hiển thị đúng cờ sẵn sàng, heartbeat tăng đều.

8.8. Bước 8 — Chạy phát lại và đối chiếu (45 phút)

Mục đích: Đánh giá sai khác giữa kết quả nhúng và kết quả offline.

- Phát lại cùng một bộ dữ liệu cho mô hình offline và cho Raspberry Pi.
- So sánh $\hat{z}\ell$, phần dư và cờ chất lượng theo timestamp hoặc theo sequence, không theo thứ tự mẫu.
- Tính sai khác cực đại, sai số quân phương và tỷ lệ trượt deadline hoặc mất gói.
- Chạy riêng ba đoạn: dữ liệu tốt, dữ liệu mất mẫu, dữ liệu ngoài miền.
- Ghi lại số lần hệ thống xuất UNKNOWN và kiểm tra xem có đúng thời điểm hay không.

Điểm dễ nhầm khi đối chiếu

Phải ghép cặp theo timestamp hoặc sequence chứ không theo chỉ số mẫu. Nếu chương trình nhúng bỏ lỡ một chu kỳ, hai chuỗi sẽ lệch nhau một mẫu và toàn bộ phần so sánh phía sau trở nên vô nghĩa, trong khi đồ thị nhìn vẫn có vẻ hợp lý.
Sai số phải báo bằng mét và có dấu, thống nhất với quy ước ở TH2. Không dùng phần trăm chiều dài tuyến.

Tiêu chí đạt của bước

Sai số quân phương giữa nhúng và offline nhỏ hơn 0,5 m trên đoạn dữ liệu tốt.
Tỷ lệ trượt deadline bằng 0 trong toàn bộ phiên chạy.
Với đoạn mất mẫu và đoạn ngoài miền, hệ thống xuất UNKNOWN đúng thời điểm và không xuất giá trị 0 m.

8.9. Bước 9 — Kịch bản trên mô hình thật (25 phút)

Mục đích: Xác nhận thuật toán hoạt động trên hệ thống thực.

Điều kiện tiên quyết

Chỉ thực hiện bước này khi toàn bộ tiêu chí của Bước 8 đã đạt và Bảng 9B đã có chữ ký xác nhận của giảng viên.
Nhóm chưa đạt vẫn hoàn thành bài với kết quả giai đoạn phát lại; điều đó được ghi nhận đầy đủ trong rubric.

- Giảng viên hoặc người được chỉ định khởi động bơm; sinh viên quan sát và ghi số liệu.
- Chạy ít nhất 5 phút ở trạng thái không rò để xác lập mức nền của phần dư.
- Mở van tạo rò có kiểm soát tại một vị trí đã biết; ghi thời điểm mở.
- Ghi lại thời điểm hệ thống công bố LEAK và vị trí ước lượng.
- Đóng van, xác nhận hệ thống trở về trạng thái không rò.
- Chụp ảnh target đang chạy, màn hình giám sát PLC và biểu đồ trên SCADA.

Tiêu chí đạt của bước

Hệ thống phát hiện được rò và công bố LEAK trong thời gian đã đặt ra.
Sai số vị trí được ghi bằng mét, có dấu, kèm vị trí thật.
Đóng van xong, hệ thống trở về NO_LEAK, không kẹt ở trạng thái cảnh báo.
Có đủ ba ảnh thực nghiệm và biên bản ghi thời điểm từng thao tác.

9. Phiếu kết quả

Phiếu này được điền trong giờ và nộp kèm báo cáo. So với bản trước, cột tiêu chí đã có giá trị ngưỡng cụ thể thay vì để trống — bản trước yêu cầu nhóm tự đặt tiêu chí, nên không so sánh được giữa các nhóm và không chấm được khách quan.

9.1. Giai đoạn 1 — phát lại

Chỉ tiêu	Giá trị đo được	Ngưỡng đạt	Đạt / Không
Chu kỳ tính trung bình (ms)		≤ 300	☐
Chu kỳ tính lớn nhất (ms)		≤ 500	☐
Thời gian quét Modbus hai trạm (ms)		≤ 200	☐
Tỷ lệ trượt deadline		0 %	☐
Tỷ lệ mất gói		≤ 1 %	☐
Thời gian phát hiện mất heartbeat (s)		≤ 3 chu kỳ	☐
Sai số quân phương $\hat{z}\ell$ nhúng so với offline (m)		≤ 0,5	☐
Số lần xuất UNKNOWN đúng thời điểm		Bằng số đoạn lỗi đã chèn	☐

Bảng 13. Kết quả giai đoạn phát lại.

9.2. Giai đoạn 2 — mô hình thật

Nội dung	Ghi nhận
Thời điểm khởi động bơm	
Mức nền của phần dư ở trạng thái không rò	
Vị trí rò thật (m)	
Thời điểm mở van tạo rò	

Nội dung	Ghi nhận
Thời điểm hệ thống công bố LEAK	
Thời gian phát hiện (s)	
Vị trí ước lượng $\hat{z}\ell$ (m)	
Sai số có dấu (m)	
Hệ thống trở về NO_LEAK sau khi đóng van	☐ Có ☐ Không
Người thao tác bơm và van	

Bảng 14. Biên bản chạy trên mô hình thật. Bảng này là mới.

Nếu nhóm không thực hiện được giai đoạn 2, ghi rõ lý do vào bảng và bỏ trống phần còn lại. Việc dừng ở giai đoạn 1 vì phần mềm chưa ổn định là một kết luận kỹ thuật hợp lệ, không phải một thất bại.

10. Minh chứng ảnh bắt buộc

- Ảnh Raspberry Pi, dây bus RS-485 và nguồn trong cấu hình thực tế của nhóm.
- Ảnh cửa sổ cấu hình Hardware Board trong Simulink.
- Ảnh Build thành công và ảnh Deploy và Start.
- Ảnh màn hình giám sát PLC có heartbeat, cờ sẵn sàng, $\hat{z}\ell$ và cờ chất lượng.
- Ảnh biểu đồ SCADA của một phiên thực nghiệm, kèm mã phiên và thời gian.

Không được thay thế

Các sơ đồ và hình vẽ trong tài liệu này không thay thế năm ảnh thực nghiệm trên. Nếu mô hình chưa hoàn thành, giữ khung minh chứng ở trạng thái CHƯA BỔ SUNG; không dùng ảnh giả lập hoặc ảnh của bài khác để tuyên bố đã triển khai.

Bản trước vi phạm chính nguyên tắc này: ba hình cuối của tài liệu là ảnh chụp cửa sổ Parameter Estimator và mô hình của Bài thực hành 1, không phải ảnh build hay deploy. Bản hiệu chỉnh đã loại bỏ chúng và để trống chỗ chờ ảnh thật.

11. Lỗi thường gặp và cách xử lý

Hiện tượng	Nguyên nhân cần kiểm tra	Cách xử lý
Không kết nối được target	Địa chỉ, cáp, tài khoản, dịch vụ trên Pi	Kiểm tra từng lớp một; không đổi nhiều cấu hình cùng lúc
Build thiếu tệp tiêu đề	Support package hoặc bộ công cụ biên dịch	Cài đúng phiên bản; xoá sạch thư mục build rồi làm lại
Không đọc được thanh ghi nào	Sai địa chỉ slave, sai tốc độ truyền hoặc sai parity	Đối chiếu Bảng 10; thử lần lượt từng slave
Đọc được nhưng giá trị vô lý	Sai quy ước đóng gói hoặc sai hệ số nhân	Đối chiếu Mục 6.2 và bản giao kèo
Giá trị đúng bậc nhưng đảo lộn	Sai thứ tự word khi dùng float32	Đổi thứ tự word rồi thử lại; ghi vào bản giao kèo
Bus chập chờn, lúc được lúc không	Thiếu điện trở đầu cuối, hoặc màn chắn nối đất hai đầu	Lắp 120 Ω ở hai đầu bus; nối đất màn chắn một đầu
Mất kết nối sau một gói	Timeout quá ngắn, hoặc không đóng phiên đúng cách	Dùng máy trạng thái kết nối lại và ghi log lỗi
Raspberry Pi treo	Trượt deadline, thiếu bộ nhớ, ghi log quá nhiều	Giảm log, đo lại thời gian tính, điền Bảng 12
Chu kỳ tính vượt hạn định	Tốc độ truyền thấp so với số thanh ghi	Nâng tốc độ truyền trước, giảm số thanh ghi sau
PLC dùng dữ liệu cũ	Không kiểm tra heartbeat hoặc tuổi dữ liệu	Gắn cờ STALE và chặn công bố kết quả
Kết quả nhúng lệch offline một mẫu	Ghép cặp theo chỉ số thay vì theo sequence	Ghép theo timestamp hoặc sequence — Mục 8.4

Hiện tượng	Nguyên nhân cần kiểm tra	Cách xử lý
Hệ thống báo 0 m khi mất dữ liệu	Trộn UNKNOWN vào NO_LEAK	Dùng mã trạng thái riêng — Mục 6.3

Bảng 15. Lỗi thường gặp. Bảy dòng được thêm so với bản trước.

12. Yêu cầu báo cáo sau thực hành

Sản phẩm chuẩn bị bắt buộc: tệp dữ liệu thô cảm biến, script MATLAB, đồ thị phổ nhiễu, thống kê μ_0 và σ_0, so sánh độ lệch chuẩn với thông số nhà sản xuất, bảng ngưỡng tự xác định (k, θ), phiếu giao thức và ánh xạ đã được kiểm tra.

- Trang đầu: tên bài, nhóm, thành viên, ngày thực hiện, mã phiên và phân công nhiệm vụ.
- Mục tiêu, sơ đồ thực hiện và toàn bộ thông số cấu hình đã dùng.
- Bản giao kèo giao tiếp đã ký và bảng thanh ghi đã hoàn thiện (Bảng 10 và Bảng 11).
- Bảng ngân sách thời gian đã điền (Bảng 12) kèm nhận xét về biên độ an toàn.
- Build log, cấu hình target và danh sách cảnh báo còn lại kèm giải thích.
- So sánh định lượng giữa nhúng và offline, tính bằng mét và có dấu.
- Kết quả thử nghiệm mất heartbeat và mất dữ liệu.
- Biên bản chạy trên mô hình thật (Bảng 14), nếu có thực hiện.
- Năm ảnh thực nghiệm bắt buộc.
- Kết luận: mức độ đạt mục tiêu, hạn chế và đề xuất cải tiến.

13. Tiêu chí đánh giá

Rubric ba mức thay cho bảng tỷ trọng đơn thuần của bản trước.

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Chuẩn hoá model và sinh mã	Còn khối không hỗ trợ; bỏ qua cảnh báo kích thước	Fixed-step, kích thước cố định, build sạch	Thêm kiểm chứng bản rời rạc so với bản liên tục	15%

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Kênh truyền và bảng thanh ghi	Dùng sai giao thức; không có bản giao kèo	Modbus RTU chạy đúng, có bản giao kèo đã ký	Thêm quy ước đóng gói số thực và thử vòng lặp từng trường	20%
Ngân sách thời gian	Không đo, không biết chu kỳ tính là bao nhiêu	Điền đủ Bảng 12, tổng nằm trong hạn định	Thêm phân tích biên độ an toàn và hướng xử lý nếu rút Ts	10%
Triển khai và vận hành	Chương trình không chạy ổn định hoặc không có heartbeat	Chạy liên tục, heartbeat đúng, thử mất kết nối đạt	Thêm tự phục hồi sau khi cắm lại bus, không cần khởi động lại	20%
Đối chiếu và hồ sơ	Thiếu ảnh thực nghiệm hoặc dùng ảnh của bài khác	Đủ năm ảnh, có so sánh định lượng theo mét	Thêm biên bản chạy trên mô hình thật và phân tích trường hợp UNKNOWN	15%
Đánh giá nhiễu và ngưỡng tự xác định	Không có dữ liệu thô/script; dùng ngưỡng cho sẵn hoặc không giải thích kết quả	Đủ dữ liệu thô, script tính μ_0 và σ_0, đồ thị phổ, so sánh thông số nhà sản xuất; tự chọn k và tính $\theta = \mu_0 + k \cdot \sigma_0$ có giải thích	Phân tích ảnh hưởng lựa chọn k, kiểm tra ngưỡng trên dữ liệu độc lập và tái sử dụng nhất quán ngưỡng trong TH2	20%

Bảng 16. Rubric đánh giá.

Ghi chú về cách chấm: nhóm dừng ở giai đoạn phát lại vì lý do kỹ thuật đã ghi nhận đầy đủ vẫn có thể đạt mức Đạt ở mọi tiêu chí. Mức Tốt ở tiêu chí cuối cùng mới đòi hỏi có kết quả trên mô hình thật.

PHỤ LỤC A — MẪU BẢN GIAO KÈO GIAO TIẾP

Bản giao kèo là tài liệu một trang do nhóm phụ trách PLC và nhóm phụ trách Raspberry Pi cùng ký trước khi lập trình. Thiếu nó, hai bên sẽ viết chương trình theo hai giả định khác nhau và chỉ phát hiện khi ghép, lúc đó rất tốn thời gian sửa.

```
BAN GIAO KEO GIAO TIEP - TH3 - Nhom XX - YYYYMMDD

1. KENH VAT LY
   Chuan:          RS-485 hai day
   Toc do:         ..... baud
   Parity:         .....     Bit du lieu: 8    Bit dung: .....
   Dien tro dau cuoi: 120 Ohm hai dau     Man chan noi dat: mot dau

2. DIA CHI SLAVE
   Tram HT1 (H1, Q1):  slave .....
   Tram HT2 (H3, Q2):  slave .....

3. VUNG DU LIEU
   Doc:  holding register tu ..... , dai ..... thanh ghi
   Ghi:  holding register tu ..... , dai ..... thanh ghi

4. DONG GOI SO THUC          (chon MOT cach, danh dau X)
   [ ] Cach A - tach phan nguyen va phan thap phan
       He so nhan phan thap phan: .....
       Cach bieu dien so am:      .....
   [ ] Cach B - float32 tren hai thanh ghi lien tiep
       Thu tu word:  [ ] cao truoc   [ ] thap truoc

5. MA TRANG THAI (thanh ghi .....)
   bit 0 : algorithm_ready
   bit 1 : LEAK
   bit 2 : UNKNOWN          <- KHONG duoc bieu dien bang zhat = 0
```

bit 3 : OUT_OF_DOMAIN

bit 4..15 : heartbeat (dem tang, xu ly tran)

6. THOI GIAN

Timeout dap ung: ..... ms

So lan thu lai: .....

Chu ky quet: ..... ms

7. XAC NHAN

Nhom PLC: ..... Ngay: .....

Nhom Pi: ..... Ngay: .....

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Raspberry Pi Ltd. Raspberry Pi 4 Model B Product Brief. (Dẫn ở Mục 2 và Bước 2)

[2] MathWorks. Simulink Support Package for Raspberry Pi Hardware Documentation. (Dẫn ở Mục 4.1 và Mục 8.2)

[3] Siemens. SIMATIC S7-1200 System Manual. (Dẫn ở Mục 1 và Bước 3)

[4] Siemens. SIMATIC S7-1200 Point-to-Point Communication, CM 1241 Module Manual. (Dẫn ở Mục 4.1 về cấu hình RS-485)

[5] Modbus Organization. Modbus over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02. (Dẫn ở Mục 6 và Mục 7)

[6] MathWorks. Simulink Coder — Optimizing Generated Code for Real-Time Execution. (Dẫn ở Mục 8.2)

[7] Tài liệu Bài thực hành 2 và Bài giảng BG3 cùng đề tài T2025-06-01. (Nguồn của mô hình bộ quan sát và quy ước ba trạng thái đầu ra)

BÀI THỰC HÀNH 4
XÂY DỰNG GIAO DIỆN GIÁM SÁT

Đà Nẵng – 9/2026

MỤC LỤC

CĂN CỨ XÂY DỰNG BÀI THỰC HÀNH 3
Vị trí của TH4 trong chuỗi 3
Nguyên tắc biên soạn 3
Những thay đổi chính so với bản trước 3
THÔNG TIN BÀI THỰC HÀNH 5
MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA 5
THÔNG TIN NHÓM THỰC HÀNH 6
1. Kiến trúc giao diện 8
2. Thiết bị và phần mềm 8
3. Yêu cầu an toàn và điều kiện thực hiện 9
4. Phân bổ thời gian 10
5. Danh sách tag và quy ước 11
5.1. Danh sách tag tối thiểu 11
5.2. Quy ước đơn vị — điểm phải thống nhất 12
5.3. Phân quyền người dùng 12
6. Ba trạng thái đầu ra và cách hiển thị 13
6.1. Phân tích màn hình hiện có của đề tài 13
7. Bố cục màn hình tổng quan 15
7.1. Vì sao cần vùng trạng thái hệ thống 15
7.2. Quy ước màu 16
8. Quy trình thực hành theo từng bước 17
8.1. Bước 1 — Tạo project và kết nối PLC (20 phút) 17
8.2. Bước 2 — Tạo danh sách tag (25 phút) 17
8.3. Bước 3 — Thiết kế màn hình tổng quan (45 phút) 18
8.4. Bước 4 — Tạo điều khiển và phản hồi (30 phút) 19
8.5. Bước 5 — Tạo trend và lưu trữ (40 phút) 20
8.6. Bước 6 — Cấu hình cảnh báo và xác nhận (30 phút) 21
8.7. Bước 7 — Tạo màn hình chẩn đoán (25 phút) 22
8.8. Bước 8 — Kiểm thử (55 phút) 23
9. Biên bản kiểm thử 24
10. Ảnh minh chứng bắt buộc 26

11. Lỗi thường gặp và cách xử lý 26
12. Yêu cầu báo cáo sau thực hành 27
13. Tiêu chí đánh giá 28
TÀI LIỆU THAM KHẢO 29

CĂN CỨ XÂY DỰNG BÀI THỰC HÀNH

Nội dung đối chiếu	Theo thuyết minh T2025-06-01
Vị trí trong thuyết minh	Mục 15.1 – Nội dung 4; Mục 16 – Sản phẩm bài thực hành
Tên sản phẩm đăng ký	Bài thực hành 4: Xây dựng giao diện giám sát
Đối tượng	Sinh viên ngành Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hoá
Yêu cầu đầu ra	01 bài thực hành có đầy đủ hình ảnh và các bước thực hiện để xây dựng giao diện giám sát
Bài giảng liên quan	BG1 (kiến trúc hệ thống và ba trạng thái đầu ra)
Bài thực hành trước	TH3 — thuật toán đã chạy trên máy tính nhúng và trả kết quả về PLC

Bảng 1. Đối chiếu với thuyết minh đề tài.

Vị trí của TH4 trong chuỗi

Đây là bài cuối của chuỗi bốn bài thực hành. Ba bài trước xây dựng mô hình, bộ quan sát và chương trình nhúng; TH4 làm phần mà người vận hành thực sự nhìn thấy. Vì vậy bài này là nơi mọi quy ước đã thống nhất trong cả chuỗi phải hiện ra thành hình ảnh cụ thể — đặc biệt là quy ước ba trạng thái đầu ra đã nêu từ BG1 và được nhắc lại ở TH2 và TH3.

Giao diện là lớp cuối cùng có thể ngăn một hiểu nhầm nguy hiểm, và cũng là lớp duy nhất có thể tạo ra hiểu nhầm đó nếu làm sai. Một thuật toán đúng nhưng hiển thị sai vẫn dẫn người vận hành đến quyết định sai.

Nguyên tắc biên soạn

Ảnh minh hoạ được trích từ tài liệu nguồn của đề tài và đặt ngay tại bước thao tác tương ứng. Ảnh chụp màn hình phần mềm dùng để hướng dẫn thao tác; ảnh kết quả nghiệm thu phải được chụp lại từ phiên thực hành thực tế, kèm ngày thực hiện, mã nhóm và mã phiên thí nghiệm.

Những thay đổi chính so với bản trước

Nội dung	Bản trước	Bản hiệu chỉnh
Hiển thị khi không xác định	Nêu nguyên tắc nhưng màn hình thật hiện 0,00 m	Mục 6 mới: quy tắc hiển thị ba trạng thái, kèm phân tích màn hình hiện có
Vùng trạng thái hệ thống	Nhắc trong Bước 3 nhưng màn hình thật không có	Bố cục năm vùng bắt buộc, có vùng trạng thái riêng (Mục 7)
Đơn vị hiển thị	Bảng tag ghi m và m^3/s; màn hình thật dùng bar và L/min	Mục 5.2 mới: quy ước đơn vị hiển thị và chỗ quy đổi duy nhất
Quy ước màu	"Dùng màu nhất quán", không có bảng	Bảng màu cụ thể cho từng trạng thái (Mục 7.2)
Phân quyền	Nhắc "theo quyền người dùng", không có bảng	Bảng phân quyền ba mức (Mục 5.3)
Thời lượng	04 tiết cho 8 bước gồm cả FAT 5 kịch bản	06 tiết, có phân bổ và mốc bắt buộc (Mục 4)
Biên bản FAT	Bảng trống, không có kết quả mong đợi	Có kết quả mong đợi cụ thể cho từng kịch bản (Mục 10)
Ảnh minh chứng	Ba ảnh thuộc đồ án khác, không ghi chú	Ghi rõ nguồn từng ảnh; ảnh nào của đề tài, ảnh nào là ví dụ
Tài liệu tham khảo	Mục [1] về điều khiển H∞ LPV, không liên quan	Thay bằng tài liệu về thiết kế giao diện và cảnh báo
Rubric	Chỉ có tỷ trọng	Ba mức Chưa đạt / Đạt / Tốt

Bảng 2. Tóm tắt thay đổi.

THÔNG TIN BÀI THỰC HÀNH

Thông tin	Nội dung
Tên bài	Bài thực hành 4: Xây dựng giao diện giám sát
Thời lượng	06 tiết (270 phút); tổ chức theo nhóm 3–5 sinh viên
Kiến thức tiên quyết	Biết PLC S7-1200, khái niệm tag, trend và alarm trong SCADA; đã hoàn thành TH3 và hiểu kiến trúc PLC – Raspberry Pi
Phần mềm	WinCC RT Advanced trong TIA Portal, hoặc phần mềm SCADA tương đương do phòng thí nghiệm chỉ định
Sản phẩm nộp	Project SCADA; danh sách tag xuất ra bảng; bốn màn hình Tổng quan, Trend, Cảnh báo, Chẩn đoán; bảng quy ước màu và đơn vị; biên bản kiểm thử; năm ảnh chụp thực tế
Dữ liệu dùng chung	Ts = 1 s; dữ liệu gắn timestamp, sequence và cờ chất lượng
Chế độ thực hiện	Giai đoạn 1 kiểm thử bằng tag mô phỏng hoặc dữ liệu phát lại; giai đoạn 2 chạy với hệ thật, chỉ khi có xác nhận của giảng viên

Bảng 3. Thông tin chung.

MỤC TIÊU VÀ CHUẨN ĐẦU RA

Sau khi hoàn thành bài thực hành, sinh viên phải thực hiện được các yêu cầu sau. So với bản trước, một chuẩn đầu ra mới được bổ sung về hiển thị trạng thái không xác định — đây là điểm mà giao diện hiện có của đề tài chưa đạt và là bài học trung tâm của bài này.

Chuẩn đầu ra	Biểu hiện cần đạt	Bước
CLO1	Xây dựng được danh sách tag đúng nguồn, đơn vị, chu kỳ và cờ chất lượng	B1, B2
CLO2	Thiết kế được màn hình tổng quan có đủ năm vùng bắt buộc	B3

Chuẩn đầu ra	Biểu hiện cần đạt	Bước
CLO3	Tạo được lệnh điều khiển theo nguyên tắc PLC xác nhận, có phản hồi lý do từ chối	B4
CLO4	Cấu hình được trend, lưu trữ, cảnh báo và cơ chế xác nhận cảnh báo	B5, B6
CLO5	Hiển thị đúng ba trạng thái NO_LEAK, UNKNOWN và LEAK; không hiển thị số 0 thay cho trạng thái không xác định	B7
CLO6	Thực hiện kiểm thử theo năm kịch bản và lập được biên bản có kết quả mong đợi	B8

Bảng 4. Chuẩn đầu ra và bước tương ứng.

THÔNG TIN NHÓM THỰC HÀNH

Mục	Nội dung ghi nhận
Lớp / Nhóm	
Ngày thực hiện	Ngày ...../...../20..... Ca thực hành: .....
Mã phiên thí nghiệm	
Thành viên	1. ..... 2. ..... 3. ..... 4. ..... 5. .....
Phân công	Tag và kết nối: ..... Màn hình: ..... Kiểm thử / Báo cáo: .....
Người được phép thao tác bơm	Chỉ giảng viên hoặc người được chỉ định: .....
Phiên bản phần mềm	TIA Portal V..... WinCC ..... PLC firmware: .....

Bảng 5. Thông tin nhóm — điền trước khi bắt đầu.

1. Kiến trúc giao diện



Hình 1. Tủ điều khiển với PLC, Raspberry Pi và hai khối trạm giám sát, cùng tuyến ống ngoài trời của mô hình.

SCADA không lấy quyền điều khiển hay liên động khỏi PLC. Mọi lệnh từ giao diện đều là yêu cầu; PLC kiểm tra điều kiện cho phép và liên động rồi mới quyết định thực hiện. Kết quả chẩn đoán do Raspberry Pi tính được ghi về PLC, sau đó SCADA đọc qua PLC cùng với cờ chất lượng và heartbeat.

Hệ quả của nguyên tắc này với người thiết kế giao diện: nút Start trên màn hình không được nối thẳng tới ngõ ra vật lý. Nó chỉ ghi vào một thanh ghi lệnh, và giao diện phải hiển thị được cả hai trường hợp PLC chấp nhận và PLC từ chối, kèm lý do từ chối.

2. Thiết bị và phần mềm

Thành phần	Vai trò	Không được làm gì
PLC S7-1200	Nguồn tag, điều khiển, liên động, cảnh báo cơ sở	Không nhận lệnh trực tiếp ghi vào ngõ ra từ SCADA
Raspberry Pi	Tính $\hat{z}\ell$, $\chi\ell$, phần dư và cờ chất lượng; trả về PLC	Không ra lệnh cho cơ cấu chấp hành
WinCC / SCADA	Hiển thị, trend, cảnh báo, lưu trữ và báo cáo	Không nằm trên đường tín hiệu an toàn
Kênh dữ liệu	Truyền dữ liệu hiện trường và trung tâm	Không truyền lệnh điều khiển qua kênh công cộng

Thành phần	Vai trò	Không được làm gì
Tệp kiểm thử	Giá trị chuẩn và kịch bản lỗi để kiểm thử	—

Bảng 6. Vai trò và ranh giới trách nhiệm. Cột cuối được thêm so với bản trước.

3. Yêu cầu an toàn và điều kiện thực hiện

Bắt buộc

Sinh viên chỉ được khởi động bơm, thay đổi trạng thái van hoặc tạo rò rỉ sau khi giảng viên xác nhận điều kiện an toàn. Người được phép thao tác phải ghi tên vào Bảng 5.

Nút Start và Stop trên SCADA chỉ là yêu cầu; PLC quyết định có thực hiện hay không.

Không vô hiệu hoá liên động để giao diện hiển thị đẹp hơn hoặc để kịch bản chạy trơn.

Cảnh báo an toàn phải có mức ưu tiên, thời điểm và cơ chế xác nhận; không tự xoá lịch sử cảnh báo.

Không hiển thị giá trị $\hat{z}\ell$ mới khi cờ chất lượng là INVALID hoặc STALE.

Bài này chỉ chạm vào hệ thật ở phần kiểm thử cuối. Danh mục kiểm tra vì vậy được tách hai phần như đã làm ở TH3, thay cho một danh mục chung của bản trước.

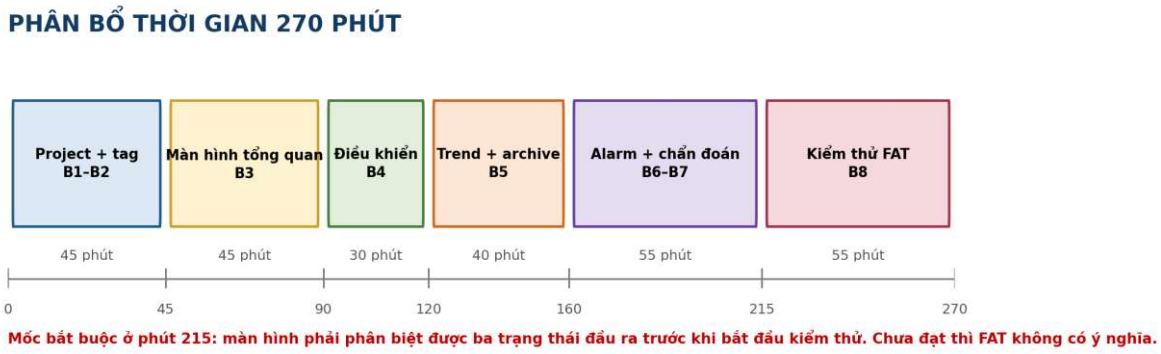
Phần A — trước khi bắt đầu thiết kế giao diện	Đạt	Ghi chú
Đã điền Bảng 5, có tên người được phép thao tác bơm	☐	
Chương trình PLC đã có đủ các tag ở Bảng 7	☐	
Kết quả TH3 đã ghi được về PLC, có heartbeat và cờ chất lượng	☐	
Có tệp kiểm thử hoặc tag mô phỏng cho năm kịch bản	☐	
Đã thống nhất độ phân giải màn hình và ngôn ngữ giao diện	☐	

Bảng 7A. Kiểm tra trước khi thực hành.

Phần B — trước khi kiểm thử với hệ thật	Đạt	Ghi chú
Nguồn điện, nối đất và nút dừng khẩn cấp đã thử hoạt động	☐	
Đường ống, khớp nối, van và vị trí xả đã kiểm tra	☐	
Nguồn 24 VDC, cảm biến và tín hiệu 4–20 mA bình thường	☐	
Giao diện đã phân biệt được ba trạng thái đầu ra	☐	
Giảng viên đã xác nhận cho phép chạy bơm	☐	Chữ ký: .....

Bảng 7B. Cổng kiểm soát trước khi kiểm thử với hệ thật.

4. Phân bổ thời gian



Hình 2. Phân bổ 270 phút cho tám bước.

Mốc bắt buộc ở phút 215

Trước khi bắt đầu kiểm thử, giao diện phải phân biệt được ba trạng thái NO_LEAK, UNKNOWN và LEAK.

Nếu chưa đạt, việc chạy kiểm thử không có ý nghĩa: hai trong năm kịch bản là mất kết nối và mất Raspberry Pi, và cả hai đều kết thúc ở trạng thái UNKNOWN. Giao diện không phân biệt được thì không quan sát được kết quả.

5. Danh sách tag và quy ước

5.1. Danh sách tag tối thiểu

Nhóm	Tag	Đơn vị hiển thị	Nguồn	Chu kỳ / điều kiện
Đo lường	H1, H3	bar (xem 5.2)	PLC	Theo Ts; kèm cờ chất lượng
Đo lường	Q1, Q2	L/min (xem 5.2)	PLC	Theo Ts; kèm cờ chất lượng
Đo lường	dQ = Q1 − Q2	L/min	Tính trên SCADA hoặc PLC	Hiện kèm ngưỡng hiện hành
Thiết bị	Pump_Run, Valve_State	—	PLC	Theo chu kỳ quét PLC
Truyền thông	Link_Online, Data_Age	—; ms	PLC	Cảnh báo khi quá thời hạn
Thuật toán	zhat, lambda_hat, residual	m; —; —	Pi qua PLC	Chỉ hiện khi trạng thái là LEAK
Chất lượng	Diag_State, Diag_Quality	enum	Pi qua PLC	Ba trạng thái theo Mục 6
Chất lượng	Pi_Heartbeat, Algorithm_Ready	đếm; —	Pi qua PLC	Luôn hiển thị
Ngưỡng	Thresh_dQ, Q_Base	L/min	PLC	Ngưỡng động theo điểm làm việc
Lệnh	Start_Cmd, Stop_Cmd, Reset_Cmd	—	SCADA ghi về PLC	PLC xác nhận, có mã lý do từ chối

Nhóm	Tag	Đơn vị hiển thị	Nguồn	Chu kỳ / điều kiện
Phản hồi	Cmd_Accepted, Reject_Code	—; enum	PLC	Hiện ngay sau mỗi lệnh

Bảng 8. Danh sách tag. Bốn dòng cuối và dòng dQ được thêm so với bản trước.

5.2. Quy ước đơn vị — điểm phải thống nhất

Mâu thuẫn cần giải quyết ngay từ đầu buổi

Bảng tag của bản trước ghi đơn vị là mét và mét khối trên giây. Màn hình giám sát thực tế của đề tài lại hiển thị áp suất bằng bar và lưu lượng bằng L/min.

Cả hai đều dùng được, nhưng phải chọn một và ghi rõ. Hiển thị theo đơn vị kỹ thuật quen thuộc với người vận hành là hợp lý; điều bắt buộc là việc quy đổi chỉ được thực hiện ở MỘT nơi duy nhất.

Quy đổi hai lần — một lần ở PLC và một lần ở SCADA — là lỗi kinh điển, cho ra giá trị sai đúng bằng bình phương hệ số quy đổi, và rất khó phát hiện vì con số vẫn nằm trong dải trông hợp lý.

Đại lượng	Đơn vị nội bộ (PLC và thuật toán)	Đơn vị hiển thị	Hệ số quy đổi	Nơi quy đổi
Cột áp H_1, H_3	m	bar	1 bar = 10,197 m	Chỉ ở SCADA
Lưu lượng Q_1, Q_2	m^3/s	L/min	1 m^3/s = 60 000 L/min	Chỉ ở SCADA
Vị trí rò $\hat{z}\ell$	m	m	—	Không quy đổi
Phần dư	không thứ nguyên	không thứ nguyên	—	Không quy đổi

Bảng 9. Quy ước đơn vị. Bảng này là mới.

Mỗi giá trị số trên màn hình phải có đơn vị ghi ngay bên cạnh. Đây không phải yêu cầu thẩm mỹ: một con số không có đơn vị buộc người vận hành phải nhớ, và trí nhớ là thứ hỏng đầu tiên khi có sự cố.

5.3. Phân quyền người dùng

Mức	Ai	Được làm	Không được làm
Quan sát	Sinh viên đang học	Xem mọi màn hình, xem lịch sử	Không bấm lệnh, không xác nhận cảnh báo
Vận hành	Người được giảng viên chỉ định	Bấm Start, Stop, Reset; xác nhận cảnh báo	Không sửa ngưỡng, không sửa cấu hình tag
Kỹ thuật	Giảng viên	Sửa ngưỡng, cấu hình tag, cấu hình cảnh báo	Không vô hiệu hoá liên động của PLC

Bảng 10. Phân quyền ba mức. Bảng này là mới.

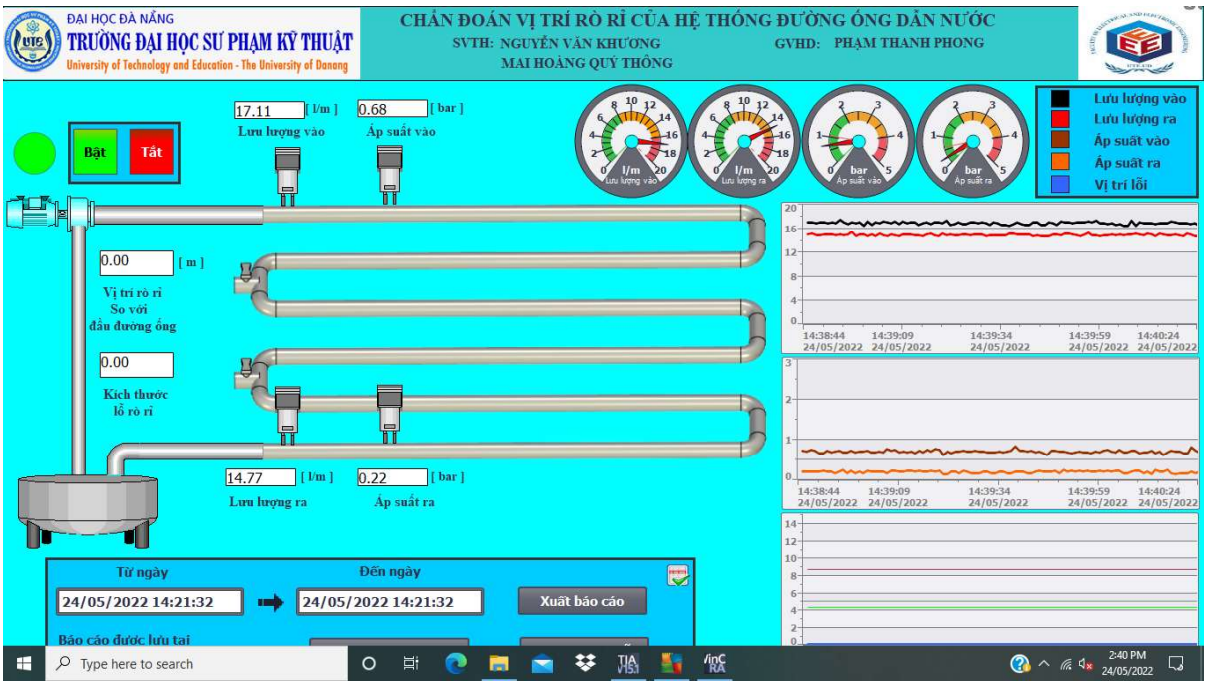
6. Ba trạng thái đầu ra và cách hiển thị

Mục này là mới và là nội dung trung tâm của bản hiệu chỉnh. Quy ước ba trạng thái đã được thống nhất từ BG1 và nhắc lại ở TH2 và TH3. TH4 là nơi nó phải hiện ra thành hình ảnh mà người vận hành nhìn thấy.



Hình 3. Ba trạng thái và cách hiển thị bắt buộc tương ứng.

6.1. Phân tích màn hình hiện có của đề tài



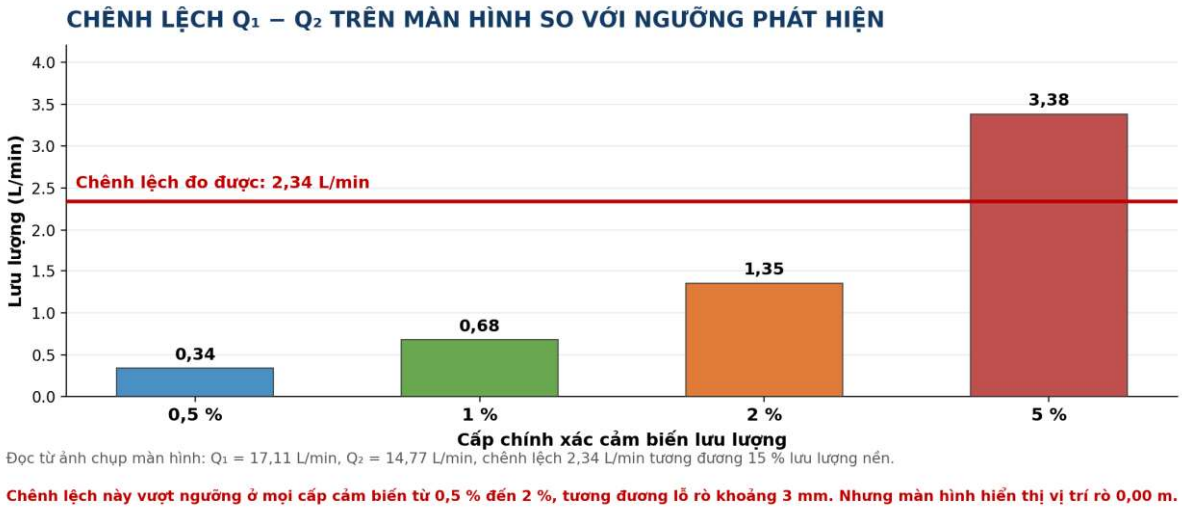
Hình 4. Màn hình giám sát của đề tài đang chạy. Ảnh chụp ngày 24/05/2022 với dữ liệu thật.

Điểm phải sửa quan trọng nhất của giao diện hiện có

Trên ảnh, lưu lượng vào là 17,11 L/min và lưu lượng ra là 14,77 L/min, chênh lệch 2,34 L/min, tức khoảng 15 phần trăm lưu lượng nền. Trong khi đó ô "Vị trí rò rỉ" hiển thị 0,00 m và ô "Kích thước lỗ rò rỉ" hiển thị 0,00.

Người vận hành nhìn hai ô này sẽ đọc số 0 như một kết luận: không có rò, hoặc rò ở ngay đầu tuyến. Thực tế nhiều khả năng là thuật toán chưa kết luận được và giao diện đang hiển thị giá trị khởi tạo.

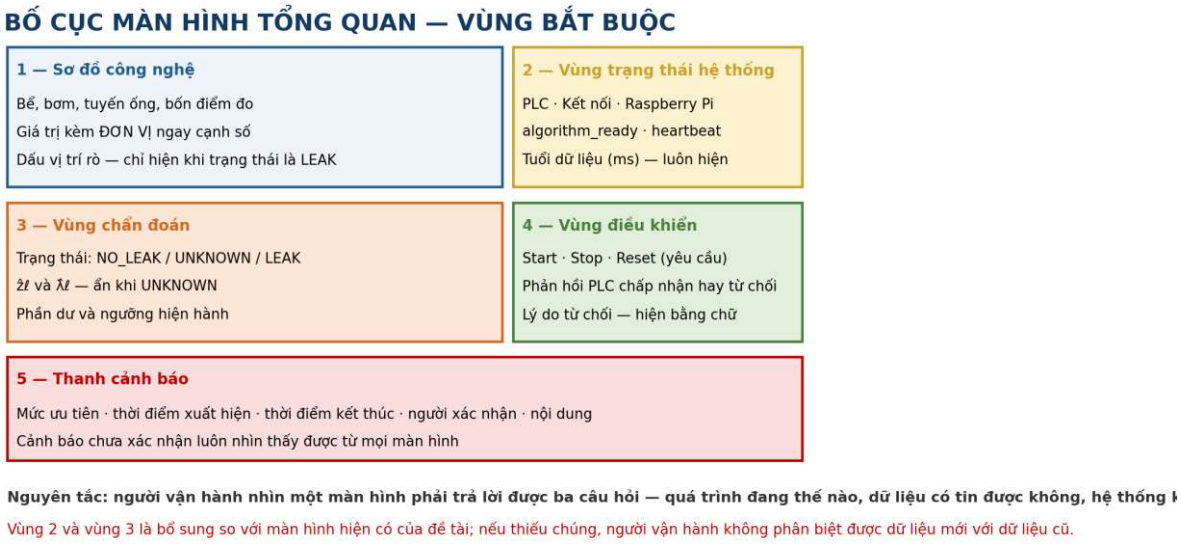
Yêu cầu với nhóm: ô vị trí rò phải để trống hoặc hiện chữ "Không xác định" khi trạng thái không phải LEAK. Không bao giờ hiện số 0.



Hình 5. Đối chiếu chênh lệch lưu lượng đọc được với ngưỡng phát hiện tính theo phương pháp ở BG1.

Bài tập bắt buộc cho nhóm: đọc lại Hình 4, tính chênh lệch lưu lượng, tra ngưỡng theo cấp cảm biến đang dùng, rồi trả lời hai câu hỏi. Thứ nhất, chênh lệch đó có vượt ngưỡng không. Thứ hai, nếu vượt thì giao diện đáng lẽ phải hiển thị trạng thái nào. Đây là bài tập nối trực tiếp bốn bài giảng với sản phẩm cuối cùng.

7. Bố cục màn hình tổng quan



Hình 6. Năm vùng bắt buộc của màn hình tổng quan.

7.1. Vì sao cần vùng trạng thái hệ thống

Vùng thứ hai trong Hình 6 là bổ sung so với màn hình hiện có, và nó trả lời một câu hỏi mà người vận hành luôn cần: dữ liệu đang nhìn có tin được không. Không có vùng này, một màn hình đóng băng vì mất kết nối trông giống hệt một màn hình đang hiển thị dữ liệu ổn định.

Ba thông tin tối thiểu phải luôn nhìn thấy: trạng thái kết nối tới PLC, trạng thái của Raspberry Pi kèm heartbeat, và tuổi của mẫu dữ liệu gần nhất tính bằng mili giây. Tuổi dữ liệu là chỉ số hữu ích nhất trong ba thứ, vì nó phát hiện được cả trường hợp kết nối vẫn còn nhưng dữ liệu ngừng cập nhật.

7.2. Quy ước màu

Bản trước chỉ nói "dùng màu nhất quán" mà không cho bảng, nên mỗi nhóm dùng một kiểu và không so sánh được. Bảng dưới đây là quy ước tối thiểu.

Trạng thái	Màu	Áp dụng cho	Ghi chú
Đang chạy, bình thường	Xanh lá	Bơm chạy, kết nối tốt, dữ liệu hợp lệ	Không dùng xanh lá cho bất kỳ trạng thái lỗi nào
Dừng, không hoạt động	Xám	Bơm dừng, van đóng	Phân biệt rõ với màu nền
Cảnh báo, cần chú ý	Vàng hoặc cam	Dữ liệu cũ, ngoài miền, UNKNOWN	Kèm chữ, không chỉ dùng màu
Lỗi, nguy hiểm	Đỏ	Mất kết nối, cảnh báo chưa xác nhận, LEAK	Kèm chữ và biểu tượng
Không có dữ liệu	Gạch chéo hoặc để trống	Ô giá trị khi UNKNOWN	Tuyệt đối không hiện số 0

Bảng 11. Quy ước màu. Bảng này là mới.

Nguyên tắc đi kèm: màu không bao giờ là kênh thông tin duy nhất. Mỗi trạng thái phải kèm chữ hoặc biểu tượng, vì một phần người dùng không phân biệt được màu.

8. Quy trình thực hành theo từng bước

Tám bước dưới đây giữ nguyên cấu trúc của bản trước nhưng bổ sung tiêu chí đạt định lượng cho từng bước, thay cho mô tả định tính.

8.1. Bước 1 — Tạo project và kết nối PLC (20 phút)

Mục đích: Thiết lập kênh dữ liệu duy nhất cho SCADA.

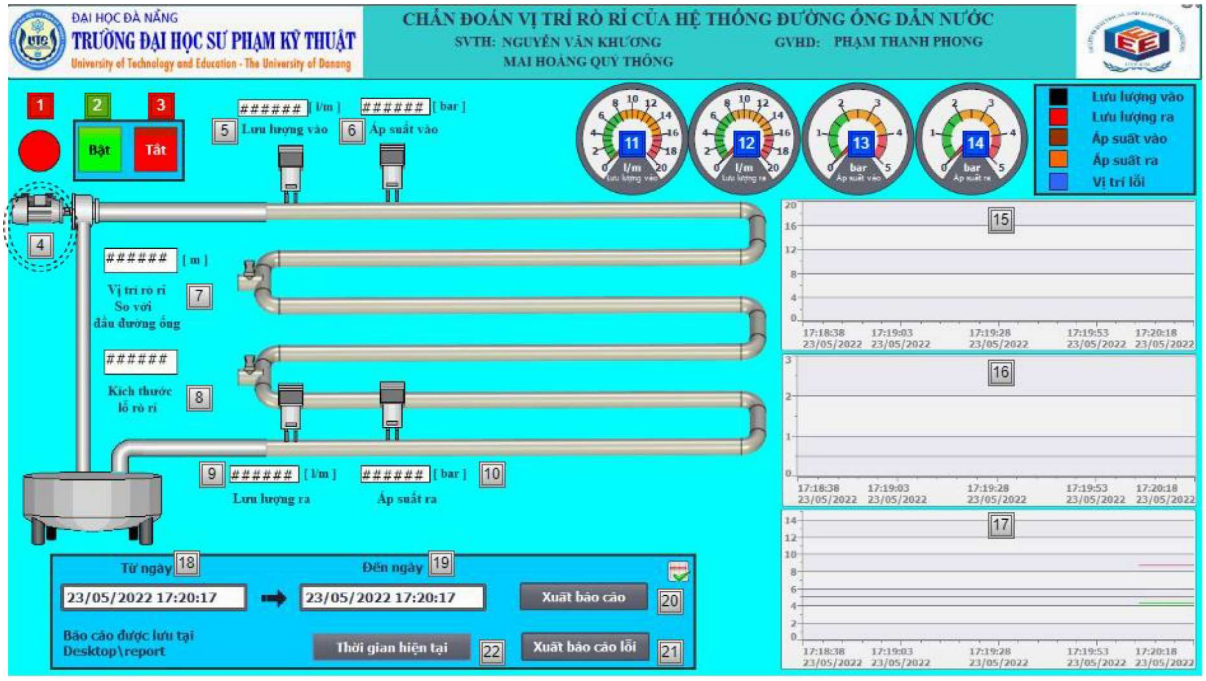
- Tạo project theo độ phân giải màn hình của phòng thí nghiệm.
- Tạo kết nối tới PLC S7-1200 bằng địa chỉ đã xác nhận với giảng viên.
- Kiểm tra trực tuyến bằng một tag thử không ảnh hưởng đến điều khiển.
- Lưu phiên bản project trước khi bắt đầu tạo giao diện.

> **Tiêu chí đạt của bước**
>
> Tag thử thay đổi đúng theo giá trị trong PLC, độ trễ không quá một chu kỳ Ts.
>
> Rút cáp mạng: trạng thái kết nối chuyển sang lỗi trong vòng 5 giây.
>
> Cắm lại: kết nối tự phục hồi, không cần khởi động lại runtime.

8.2. Bước 2 — Tạo danh sách tag (25 phút)

Mục đích: Chuẩn hoá tên và thuộc tính của toàn bộ tag.

- Nhập từng tag theo Bảng 8, giữ đúng tên để đối chiếu được với chương trình PLC.
- Khai báo kiểu dữ liệu, địa chỉ, quyền đọc và ghi, đơn vị và chu kỳ cập nhật.
- Tạo đủ các tag trạng thái và chất lượng, không chỉ tạo tag giá trị số.
- Khoá quyền ghi cho tag đo lường và tag kết quả thuật toán.
- Xuất danh sách tag ra bảng để đưa vào hồ sơ nghiệm thu.



Hình 7. Màn hình giám sát của đề tài ở dạng thiết kế, với các ô giá trị được đánh số để đối chiếu với danh sách tag.

Điểm dễ bỏ sót

Tag trạng thái và tag chất lượng thường bị quên vì chúng không hiện thành con số đẹp trên màn hình. Nhưng chính chúng quyết định giao diện có phân biệt được ba trạng thái hay không.

Quy tắc kiểm tra: với mỗi giá trị số hiển thị trên màn hình, phải trả lời được câu hỏi "làm sao biết giá trị này còn mới". Nếu không trả lời được thì thiếu tag chất lượng hoặc thiếu tag tuổi dữ liệu.

Tiêu chí đạt của bước

Không có tag trùng địa chỉ ngoài chủ ý.

Mọi tag đo lường và tag kết quả đều ở chế độ chỉ đọc từ phía SCADA.

Danh sách tag đã xuất ra bảng, có đủ cột tên, địa chỉ, kiểu, đơn vị và chu kỳ.

Với mỗi giá trị số dự định hiển thị, đã có tag chất lượng hoặc tag tuổi dữ liệu tương ứng.

8.3. Bước 3 — Thiết kế màn hình tổng quan (45 phút)

Mục đích: Hiển thị quá trình và trạng thái chính trên một màn hình.

- Vẽ bể, bơm, tuyến ống và bốn điểm đo theo bố cục ở Hình 6.
- Đặt đủ năm vùng bắt buộc, trong đó vùng trạng thái hệ thống luôn nhìn thấy được.
- Áp dụng quy ước màu ở Bảng 11; mỗi màu kèm chữ hoặc biểu tượng.

- Ghi đơn vị ngay cạnh mỗi giá trị số, theo Bảng 9.
- Hiển thị chênh lệch $Q_1 - Q_2$ kèm ngưỡng hiện hành, không chỉ hiển thị hai lưu lượng riêng lẻ.

Yêu cầu cuối cùng là bổ sung so với bản trước và có lý do thực tế: người vận hành nhìn hai số 17,11 và 14,77 sẽ không tự trừ nhẩm và cũng không nhớ ngưỡng là bao nhiêu. Hiển thị sẵn hiệu số cùng ngưỡng biến việc phát hiện bất thường thành một thao tác nhìn, thay vì một phép tính.

Tiêu chí đạt của bước

Nhìn một màn hình xác định được: quá trình đang thế nào, dữ liệu có tin được không, hệ thống kết luận gì.

Đủ năm vùng ở Hình 6; vùng trạng thái hệ thống hiện tuổi dữ liệu bằng mili giây.

Mọi giá trị số đều có đơn vị bên cạnh.

Chụp màn hình ở chế độ đen trắng vẫn đọc được mọi trạng thái.

8.4. Bước 4 — Tạo điều khiển và phản hồi (30 phút)

Mục đích: Tạo lệnh Start, Stop và Reset theo đúng nguyên tắc PLC xác nhận.

- Tạo ba nút theo phân quyền ở Bảng 10.
- Mỗi lệnh chỉ ghi vào thanh ghi lệnh; không ghi trực tiếp vào ngõ ra vật lý.
- Hiển thị trạng thái phản hồi: lệnh đã được chấp nhận hay bị từ chối.
- Khi bị từ chối, hiển thị lý do bằng chữ, không chỉ bằng một mã số.
- Tạo hộp xác nhận cho các thao tác có nguy cơ.

Mã lý do	Nội dung hiển thị	Khi nào xuất hiện
0	Lệnh được chấp nhận	Mọi điều kiện đều đạt
1	Liên động chưa cho phép	Điều kiện an toàn của PLC chưa thoả
2	Đang ở chế độ tại chỗ	Công tắc chọn chế độ không ở vị trí từ xa
3	Thiếu quyền thao tác	Người dùng ở mức Quan sát
4	Đang có cảnh báo chưa xác nhận	Có cảnh báo mức cao chưa được xác nhận

Bảng 12. Mã lý do từ chối lệnh. Bảng này là mới; nhóm bổ sung cho phù hợp chương trình PLC của mình.

Tiêu chí đạt của bước

Khi liên động không đạt, bấm Start không làm bơm chạy và giao diện hiện lý do bằng chữ trong vòng 2 giây.

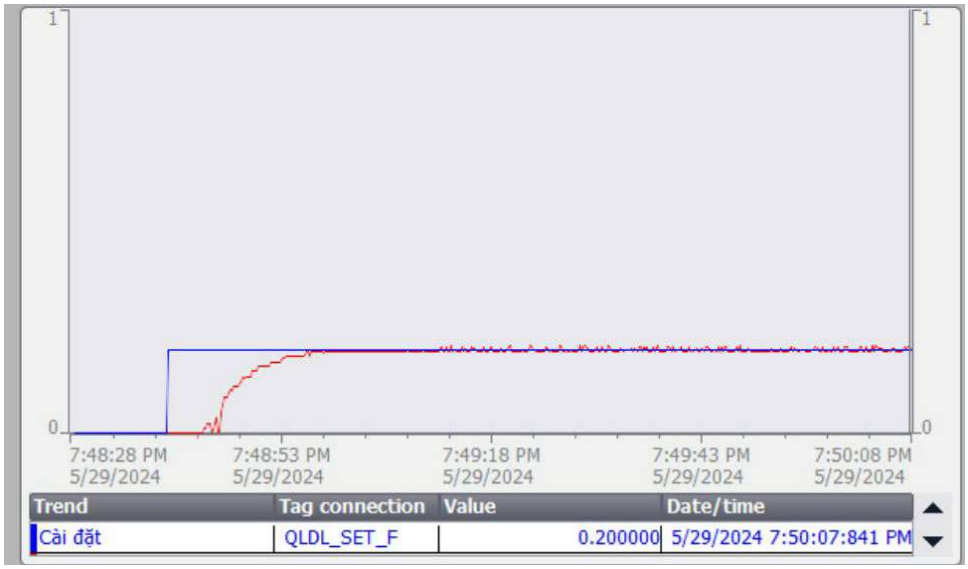
Người dùng ở mức Quan sát không bấm được nút lệnh.

Không có đối tượng nào trên màn hình ghi trực tiếp vào vùng ngõ ra của PLC.

8.5. Bước 5 — Tạo trend và lưu trữ (40 phút)

Mục đích: Theo dõi và truy xuất được dữ liệu vận hành cùng kết quả chẩn đoán.

- Tạo trend thời gian thực cho H_1, H_3, Q_1 và Q_2 trên màn hình tổng quan.
- Tạo trend riêng cho $\hat{z}\ell$ và phần dư trên màn hình chẩn đoán.
- Cấu hình lưu trữ gồm thời điểm tại thiết bị, thời điểm nhận, sequence và cờ chất lượng.
- Thử truy vấn một khoảng thời gian và xuất ra tệp.



Hình 8. Cửa sổ trend với bảng giá trị và thời điểm ở phía dưới. Ảnh trích từ một đồ án khác của khoa, dùng làm ví dụ về cách bố trí trend; đây không phải màn hình của đề tài này.

Bốn trường bắt buộc khi lưu trữ

Chỉ lưu giá trị và thời điểm là chưa đủ. Bản ghi phải có cả bốn trường: giá trị, thời điểm gán tại thiết bị đo, thời điểm SCADA nhận được, và cờ chất lượng.

Thiếu thời điểm gán tại thiết bị, không phân biệt được dữ liệu đến muộn với dữ liệu mới. Thiếu cờ chất lượng, một mẫu bị đánh dấu không hợp lệ vẫn được đọc lại như mẫu bình thường khi phân tích sau này.

Tiêu chí đạt của bước

Tệp xuất giữ đúng thời điểm, đơn vị và cờ chất lượng.

Mẫu có cờ chất lượng không hợp lệ được đánh dấu rõ trong tệp xuất, không bị trộn lẫn với mẫu bình thường.

Truy vấn một khoảng 10 phút trả về đúng số mẫu tương ứng với chu kỳ Ts.

8.6. Bước 6 — Cấu hình cảnh báo và xác nhận (30 phút)

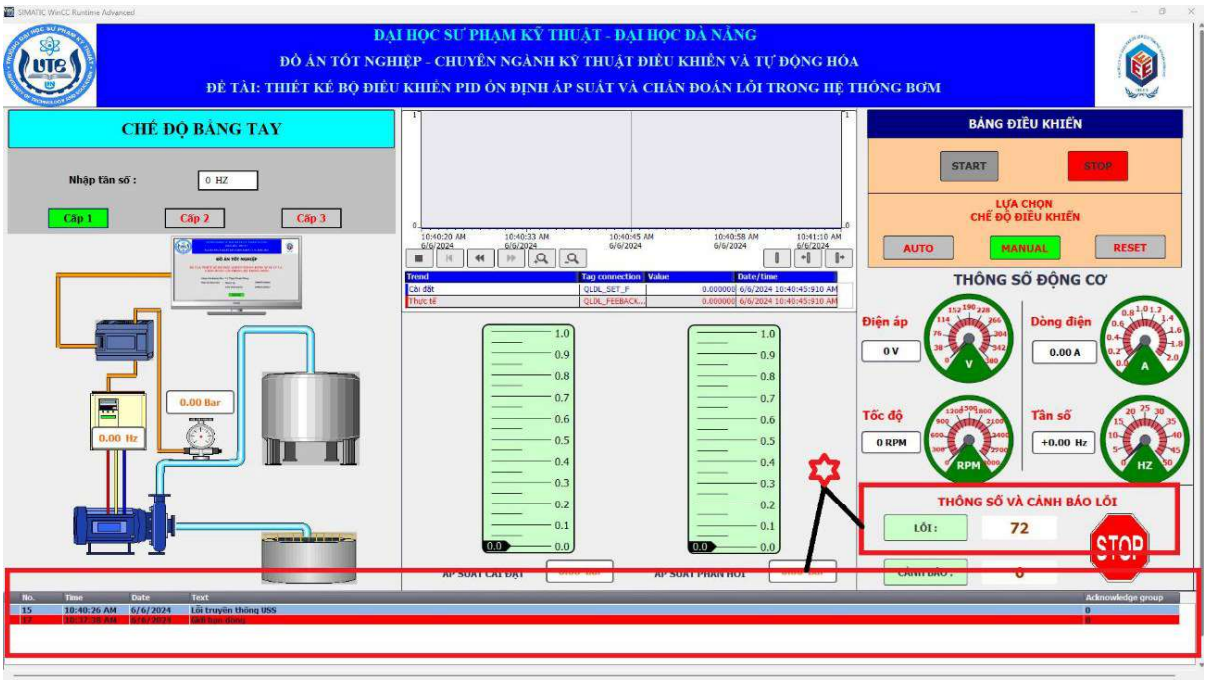
Mục đích: Phân biệt cảnh báo an toàn, cảnh báo truyền thông và cảnh báo chẩn đoán.

- Tạo các cảnh báo theo Bảng 13.
- Khai báo mức ưu tiên, điều kiện xuất hiện và kết thúc, vùng chết và thời gian trễ.
- Tạo cửa sổ cảnh báo hiện thời và cửa sổ lịch sử.
- Kiểm tra việc xác nhận cảnh báo không làm mất điều kiện lỗi.

Cảnh báo	Nhóm	Mức ưu tiên	Điều kiện xuất hiện
Quá áp	An toàn	Cao	H_1 vượt giới hạn thiết kế
Cạn bể	An toàn	Cao	Mức bể dưới ngưỡng, có trễ để tránh nhấp nháy
Mất kết nối hiện trường	Truyền thông	Cao	Không nhận gói quá thời hạn đã đặt
Mất heartbeat Raspberry Pi	Truyền thông	Trung bình	Heartbeat không tăng quá ba chu kỳ
Dữ liệu cũ	Truyền thông	Trung bình	Tuổi dữ liệu vượt ngưỡng
Chênh lệch lưu lượng vượt ngưỡng	Chẩn đoán	Trung bình	dQ vượt ngưỡng đủ thời gian giữ
Rò được xác nhận	Chẩn đoán	Cao	Trạng thái chuyển sang LEAK
Kết quả không xác định kéo dài	Chẩn đoán	Thấp	Trạng thái UNKNOWN quá thời gian đặt trước

Bảng 13. Danh mục cảnh báo. Ba dòng cuối được thêm so với bản trước.

Dòng cuối cùng đáng chú ý: trạng thái UNKNOWN kéo dài cũng là một bất thường cần báo. Một hệ thống ở trạng thái không xác định suốt nhiều giờ mà không ai biết thì về mặt vận hành không khác gì một hệ thống đã hỏng.



Hình 9. Ví dụ về bố trí thanh cảnh báo phía dưới màn hình và vùng thông số bên phải. Ảnh trích từ một đồ án khác của khoa về điều khiển áp suất bơm; đây không phải màn hình của đề tài này, và được đưa vào chỉ để tham khảo cách bố trí.

Tiêu chí đạt của bước

Mỗi cảnh báo có thời điểm xuất hiện, thời điểm kết thúc, người xác nhận và nội dung bằng chữ.

Xác nhận một cảnh báo không làm cảnh báo biến mất khi điều kiện lỗi vẫn còn.

Không có cảnh báo nào nhấp nháy liên tục khi giá trị dao động quanh ngưỡng.

Cảnh báo chưa xác nhận nhìn thấy được từ mọi màn hình.

8.7. Bước 7 — Tạo màn hình chẩn đoán (25 phút)

Mục đích: Hiển thị kết quả thuật toán đúng phạm vi kết luận của nó.

- Hiển thị trạng thái, $\hat{\ell}$, $\chi\ell$, phần dư, cờ chất lượng và cờ sẵn sàng của thuật toán.
- Vẽ dấu vị trí $\hat{\ell}$ trên tuyến từ 0 đến L, chỉ khi trạng thái là LEAK.
- Khi trạng thái là UNKNOWN, ẩn dấu vị trí và hiện chữ “Không xác định”.
- Luôn hiển thị tuổi dữ liệu và thời điểm của kết quả gần nhất.

Quy tắc không được vi phạm

Ô hiển thị vị trí rò chỉ có ba khả năng: một giá trị kèm đơn vị mét khi trạng thái là LEAK, chữ "Không rò" khi trạng thái là NO_LEAK, hoặc chữ "Không xác định" khi trạng thái là UNKNOWN.

Không có khả năng thứ tư. Đặc biệt, ô này không bao giờ hiển thị số 0 như giá trị mặc định.

Khi mất kết nối, giá trị cuối cùng phải được đánh dấu là cũ kèm tuổi dữ liệu, hoặc bị ẩn hẳn. Giữ nguyên con số cũ mà không đánh dấu là cách gây hiểu nhầm nguy hiểm nhất mà một giao diện có thể tạo ra.

Tiêu chí đạt của bước

Ngắt Raspberry Pi: giao diện chuyển sang UNKNOWN trong vòng ba chu kỳ, dấu vị trí biến mất.

Ô vị trí rò không bao giờ hiện số 0 trong bất kỳ tình huống nào.

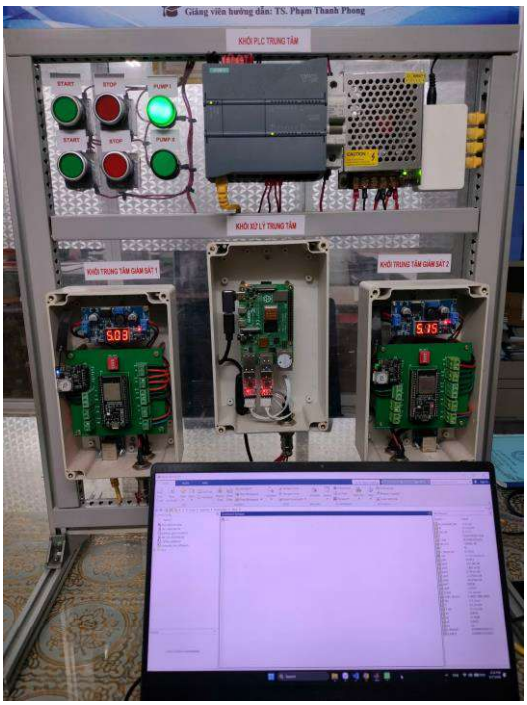
Tuổi dữ liệu hiển thị đúng và tăng khi ngừng nhận dữ liệu.

Khôi phục kết nối: giao diện trở lại trạng thái bình thường mà không cần thao tác thủ công.

8.8. Bước 8 — Kiểm thử (55 phút)

Mục đích: Đánh giá chức năng giao diện trước khi đưa vào sử dụng trong đào tạo.

Năm kịch bản dưới đây phải thực hiện đủ. Ba kịch bản đầu chạy được với tag mô phỏng; hai kịch bản cuối cần hệ thật hoặc dữ liệu phát lại từ TH3.



Hình 10. Bố trí tủ thực nghiệm và máy tính giám sát khi thực hiện kiểm thử.

Tiêu chí đạt của bước

Đủ năm kịch bản, mỗi kịch bản có kết quả mong đợi ghi trước khi chạy.

Mọi kịch bản kết thúc ở trạng thái Đạt, hoặc có ghi nhận rõ lý do chưa đạt.

Có ảnh chụp màn hình cho từng kịch bản, kèm thời điểm.

Biên bản có chữ ký của nhóm.

9. Biên bản kiểm thử

So với bản trước, biên bản đã có sẵn cột kết quả mong đợi cho từng kịch bản. Bản trước để trống cả cột này, nên mỗi nhóm tự đặt tiêu chí và kết quả không so sánh được giữa các nhóm.

Kịch bản	Thao tác	Kết quả mong đợi	Kết quả thực tế	Đạt
1 — Bình thường	Chạy với dữ liệu hợp lệ, không rò	Trạng thái NO_LEAK; ô vị trí hiện chữ “Không rò”; không có cảnh báo; tuổi dữ liệu dưới một chu kỳ		☐

Kịch bản	Thao tác	Kết quả mong đợi	Kết quả thực tế	Đạt
2 — Có rò	Mở van tạo rò có kiểm soát, hoặc phát lại dữ liệu có rò	Chuyển sang LEAK sau thời gian giữ; dấu vị trí xuất hiện trên tuyến; có cảnh báo mức cao		☐
3 — Mất kết nối hiện trường	Rút cáp hoặc ngắt kênh truyền	Cảnh báo mất kết nối trong 5 giây; trạng thái chuyển UNKNOWN; dấu vị trí biến mất; tuổi dữ liệu tăng		☐
4 — Mất Raspberry Pi	Dừng chương trình trên Pi hoặc ngắt heartbeat	Cảnh báo mất heartbeat trong ba chu kỳ; trạng thái UNKNOWN; giá trị cũ được đánh dấu là cũ, không giữ nguyên như mới		☐
5 — Liên động chặn lệnh	Tạo điều kiện liên động không đạt rồi bấm Start	Bơm không chạy; giao diện hiện lý do từ chối bằng chữ trong 2 giây; không có thay đổi nào ở ngõ ra		☐

Bảng 14. Biên bản kiểm thử. Cột kết quả mong đợi được thêm so với bản trước.

Nội dung	Ghi nhận
Số kịch bản đạt trên tổng số	..... / 5
Kịch bản chưa đạt và lý do	
Thời gian thực hiện kiểm thử	Từ ..... đến .....
Người thực hiện	

Nội dung	Ghi nhận
Chữ ký nhóm	

Bảng 15. Tổng hợp kiểm thử.

10. Ảnh minh chứng bắt buộc

- Ảnh cấu hình kết nối và danh sách tag đã xuất ra bảng.
- Ảnh màn hình tổng quan đang nhận dữ liệu thật, thấy rõ đủ năm vùng.
- Ảnh trend và cửa sổ truy xuất lịch sử.
- Ảnh cửa sổ cảnh báo của kịch bản mất kết nối hoặc mất Raspberry Pi.
- Ảnh màn hình chẩn đoán ở hai trạng thái: một lần bình thường và một lần không xác định.

Yêu cầu nghiệm thu

Các sơ đồ và hình vẽ trong tài liệu này không thay thế năm ảnh chụp thực tế nêu trên. Mỗi ảnh phải ghi ngày, mã phiên và người thực hiện.

Ảnh thứ năm là quan trọng nhất và cũng là ảnh dễ bị bỏ qua nhất, vì phải cố ý tạo ra tình huống lỗi mới chụp được. Không có ảnh này thì không có bằng chứng rằng giao diện phân biệt được trạng thái không xác định.

Nếu hệ thống chưa hoàn thành, giữ khung minh chứng ở trạng thái CHƯA BỔ SUNG; không dùng ảnh của đề tài khác để tuyên bố đã hoàn thành.

11. Lỗi thường gặp và cách xử lý

Hiện tượng	Nguyên nhân cần kiểm tra	Cách xử lý
Giá trị trên màn hình không đổi	Sai kết nối, sai địa chỉ hoặc sai chu kỳ cập nhật	Kiểm tra tag thử và bảng theo dõi trong PLC
Giá trị sai đơn vị	Quy đổi hai lần, ở cả PLC và SCADA	Chỉ quy đổi một nơi theo Bảng 9; ghi rõ nơi đó
Giá trị đúng bậc nhưng sai vài lần	Nhầm hệ số bar sang mét hoặc L/min sang m^3/s	Đối chiếu Bảng 9 và kiểm tra dải giá trị

Hiện tượng	Nguyên nhân cần kiểm tra	Cách xử lý
Cảnh báo nhấp nháy liên tục	Thiếu vùng chết hoặc thiếu thời gian trễ	Bổ sung điều kiện xuất hiện và kết thúc riêng biệt
Giữ nguyên vị trí cũ khi mất dữ liệu	Không xử lý cờ chất lượng và tuổi dữ liệu	Chuyển sang UNKNOWN và ẩn dấu vị trí — Bước 7
Ô vị trí hiện 0,00 m khi chưa kết luận	Dùng giá trị khởi tạo làm giá trị hiển thị	Tách trạng thái khỏi giá trị; ô để trống khi không phải LEAK — Mục 6
Nút Start bỏ qua liên động	Ghi thẳng vào ngõ ra thay vì thanh ghi lệnh	Chuyển thành lệnh và để PLC xác nhận — Bước 4
Không biết dữ liệu còn mới hay không	Thiếu vùng trạng thái hệ thống	Bổ sung vùng 2 ở Hình 6, hiện tuổi dữ liệu
Ảnh chụp đen trắng mất thông tin	Dùng màu làm kênh thông tin duy nhất	Mỗi trạng thái kèm chữ hoặc biểu tượng — Mục 7.2
Người quan sát bấm được lệnh	Chưa phân quyền	Áp dụng Bảng 10
Tệp xuất không phân biệt mẫu lỗi	Không lưu cờ chất lượng	Bổ sung bốn trường bắt buộc — Bước 5

Bảng 16. Lỗi thường gặp. Sáu dòng được thêm so với bản trước.

12. Yêu cầu báo cáo sau thực hành

- Trang đầu: tên bài, nhóm, thành viên, ngày thực hiện, mã phiên và phân công nhiệm vụ.
- Mục tiêu, sơ đồ thực hiện và toàn bộ thông số cấu hình đã dùng.
- Danh sách tag xuất từ project, kèm bảng quy ước đơn vị và bảng quy ước màu của nhóm.
- Ảnh bốn màn hình đã xây dựng.
- Biên bản kiểm thử đầy đủ năm kịch bản (Bảng 14 và Bảng 15).
- Phân tích cách giao diện phản ứng khi mất kết nối, mất Raspberry Pi và khi cờ chất lượng không hợp lệ.

- Bài tập đối chiếu ở Mục 6.1: tính chênh lệch lưu lượng, tra ngưỡng, kết luận giao diện đáng lẽ phải hiển thị trạng thái nào.
- Năm ảnh minh chứng bắt buộc.
- Kết luận: mức độ đạt mục tiêu, hạn chế và đề xuất cải tiến.

13. Tiêu chí đánh giá

Rubric ba mức thay cho bảng tỷ trọng đơn thuần của bản trước.

Tiêu chí	Chưa đạt (0 – 49 %)	Đạt (50 – 79 %)	Tốt (80 – 100 %)	Tỷ trọng
Kết nối và danh sách tag	Thiếu tag trạng thái và tag chất lượng	Đủ tag theo Bảng 8, đúng kiểu và quyền truy cập	Thêm bảng quy ước đơn vị và xác định rõ nơi quy đổi duy nhất	20%
Màn hình tổng quan	Thiếu vùng trạng thái hệ thống; giá trị không có đơn vị	Đủ năm vùng, có quy ước màu, có đơn vị	Thêm hiển thị chênh lệch lưu lượng kèm ngưỡng; đọc được ở chế độ đen trắng	20%
Trend, lưu trữ và cảnh báo	Cảnh báo nhấp nháy; tệp xuất không có cờ chất lượng	Trend và lưu trữ hoạt động, cảnh báo có mức và xác nhận	Thêm cảnh báo cho trạng thái không xác định kéo dài	20%
Hiển thị ba trạng thái	Hiện số 0 khi chưa kết luận được	Phân biệt đủ ba trạng thái; ẩn dấu vị trí khi không xác định	Thêm tuổi dữ liệu và đánh dấu giá trị cũ khi mất kết nối	25%
Kiểm thử và hồ sơ	Thiếu ảnh, hoặc dùng ảnh của đề tài khác	Đủ năm kịch bản và năm ảnh, biên bản có chữ ký	Thêm phân tích ở Mục 6.1 và đề xuất cải tiến giao diện hiện có	15%

Bảng 17. Rubric đánh giá.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Siemens. SIMATIC S7-1200 System Manual. (Dẫn ở Mục 1 và Bước 1)

[2] Siemens. SIMATIC WinCC Runtime Advanced — System Manual. (Dẫn ở toàn bộ Mục 8)

[3] ISA. ANSI/ISA-101.01 — Human Machine Interfaces for Process Automation Systems. (Dẫn ở Mục 7, bố cục màn hình và quy ước màu)

[4] ISA. ANSI/ISA-18.2 — Management of Alarm Systems for the Process Industries. (Dẫn ở Bước 6, phân mức và quản lý cảnh báo)

[5] Lý, T. T. H. (2019). Thiết kế hệ thống SCADA – IoT cho hệ thống cung cấp nước sạch tại Xí nghiệp Nước sạch Tích Lương. Luận văn thạc sĩ, Đại học Thái Nguyên. (Dẫn ở Mục 1, ví dụ về hệ giám sát cấp nước)

[6] Tài liệu bài giảng BG1 và Bài thực hành 3 cùng đề tài T2025-06-01. (Nguồn của quy ước ba trạng thái đầu ra và của ngân sách sai số dùng ở Mục 6.1)