

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan rằng: Đồ án tốt nghiệp với đề tài “Thiết kế hệ thống IoT giám sát và tính toán thông số tháp giải nhiệt” là kết quả nghiên cứu và thiết kế do chính tôi thực hiện, dưới sự hướng dẫn khoa học của thầy Đỗ Mạnh Hùng.

Các số liệu, kết quả tính toán, bản vẽ thiết kế và phân tích kỹ thuật trong đồ án được trình bày trung thực, phản ánh đúng quá trình thực hiện. Những nội dung không do tôi trực tiếp tạo ra đều đã được trích dẫn và ghi rõ nguồn theo đúng quy định.

Tôi hoàn toàn chịu trách nhiệm về tính chính xác, trung thực và khách quan của toàn bộ nội dung trong đồ án này.

Sinh viên thực hiện
(Ký và ghi rõ họ tên)

LỜI CẢM ƠN

Em xin gửi lời cảm ơn chân thành và kính trọng tới thầy Đỗ Mạnh Hùng — người đã đồng hành, định hướng và động viên em trong suốt quá trình thực hiện đồ án tốt nghiệp cũng như những bước đầu làm quen với nghiên cứu. Nhờ sự hướng dẫn sát sao của thầy, em không chỉ vượt qua các vướng mắc kỹ thuật mà còn mở rộng tư duy, tiếp cận có hệ thống các vấn đề về IoT và ứng dụng trong các hệ thống năng lượng công nghiệp.

Những góp ý thẳng thắn, tỉ mỉ và tinh thần làm việc nghiêm túc của thầy giúp em rèn luyện phương pháp nghiên cứu, nâng cao năng lực tự học và giữ vững nhiệt huyết theo đuổi đê tài. Em đặc biệt trân trọng sự tận tâm của thầy khi luôn sẵn sàng lắng nghe, giải đáp và chia sẻ kinh nghiệm quý báu, qua đó định hình rõ ràng mục tiêu, phạm vi và cách tiếp cận của đồ án.

Em cũng xin chân thành cảm ơn Phòng thí nghiệm Nghiên cứu Nghiên liệu và Năng lượng sạch (FCE Lab) – Trường Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội – đã hỗ trợ cơ sở vật chất và môi trường làm việc thuận lợi để em triển khai thí nghiệm và thu thập dữ liệu cho đê tài. Sự hỗ trợ kịp thời và điều kiện nghiên cứu do phòng thí nghiệm tạo ra là tiền đề quan trọng giúp em hoàn thành đồ án này.

TÓM TẮT NỘI DUNG

Trong bối cảnh chuyển đổi số và mục tiêu phát triển bền vững của ngành năng lượng, nhu cầu giám sát-tối ưu hóa hệ thống giải nhiệt bằng công nghệ Internet vạn vật - IoT trở nên cấp thiết. Các nhà máy điện, trung tâm dữ liệu và cơ sở công nghiệp chịu áp lực tiết kiệm năng lượng và giảm phát thải; chi phí làm mát có thể chiếm 30–50% chi phí vận hành hằng ngày. Dù tháp giải nhiệt là tải quan trọng, nhiều hệ thống vẫn vận hành theo kinh nghiệm và các tham số cố định, thiếu giám sát thông minh, dẫn tới lãng phí năng lượng và tăng chi phí bảo trì. Các giải pháp giám sát truyền thống lại đắt đỏ và đòi hỏi chuyên môn cao, vượt quá khả năng của doanh nghiệp vừa và nhỏ—nhóm chiếm tỷ trọng lớn nhưng hạn chế nguồn lực. Trước thực trạng này, đồ án đề xuất một hệ thống giám sát thông minh cho tháp giải nhiệt dựa trên IoT, với mục tiêu tính toán theo thời gian thực hiệu suất và công suất giải nhiệt. Hệ thống theo dõi liên tục các thông số thiết yếu (nhiệt độ, độ ẩm không khí; nhiệt độ nước vào/ra; lưu lượng tuần hoàn) để suy ra năng lực làm mát và các chỉ số hiệu quả, hướng tới một giải pháp chi phí hợp lý nhờ vi điều khiển và cảm biến chính xác, dễ triển khai trong thực tế. Phạm vi nghiên cứu gồm hai phần: (i) thiết kế và triển khai kiến trúc IoT thời gian thực có khả năng thu thập dữ liệu liên tục, xử lý-tính toán tại chỗ các chỉ số như công suất giải nhiệt, hiệu suất làm mát và KPI vận hành; (ii) chế tạo mô hình tháp giải nhiệt mini để tích hợp, kiểm chứng và quan sát sự suy giảm công suất/hiệu suất theo thời gian, đồng thời khảo sát ảnh hưởng của điều kiện môi trường (nhiệt độ, độ ẩm) nhằm tạo dữ liệu thực nghiệm phục vụ phát triển thuật toán. Đóng góp kỳ vọng gồm: xây dựng nền tảng giám sát IoT tối ưu chi phí dựa trên công nghệ mã nguồn mở (ESP32, InfluxDB, Grafana); phát triển thuật toán tính toán thời gian thực chuyên biệt cho tháp giải nhiệt; thiết kế mô hình tháp mini đa cảm biến có khả năng mô phỏng chân thực; đề xuất phương pháp đánh giá hiệu suất dựa trên dữ liệu thời gian thực; và xây dựng cơ sở dữ liệu thực nghiệm trong khí hậu nhiệt đới—có ý nghĩa cho ứng dụng tại Việt Nam và Đông Nam Á, góp phần giảm tiêu thụ năng lượng và chi phí vận hành.

LỜI NÓI ĐẦU

Trong thời đại của cuộc cách mạng công nghiệp 4.0, việc ứng dụng công nghệ số vào các hệ thống truyền thống không chỉ là xu hướng tất yếu mà còn là yêu cầu cấp thiết để nâng cao hiệu quả và tính bền vững. Với tư cách là một sinh viên ngành Kỹ thuật Nhiệt tại Đại học Bách khoa Hà Nội, em nhận thức sâu sắc về vai trò của kỹ sư trong việc chuyển đổi số và hiện đại hóa các hệ thống công nghiệp, đặc biệt là trong bối cảnh Việt Nam đang tăng cường phát triển công nghiệp và hướng tới các mục tiêu phát triển bền vững.

Tháp giải nhiệt, với vai trò thiết yếu trong hầu hết các quy trình công nghiệp từ nhà máy điện đến trung tâm dữ liệu, đại diện cho một lĩnh vực ứng dụng điển hình của công nghệ giám sát thông minh. Tuy nhiên, thực tế cho thấy hầu hết các hệ thống này tại Việt Nam vẫn được vận hành theo các phương pháp truyền thống, thiếu khả năng tối ưu hóa và dự báo, dẫn đến lãng phí năng lượng và chi phí vận hành cao.

Xuất phát từ mong muốn đóng góp vào việc giải quyết những thách thức thực tiễn này, đồ án "Thiết kế hệ thống IoT giám sát và tính toán thông số tháp giải nhiệt" được hình thành với tầm nhìn phát triển một giải pháp công nghệ phù hợp với điều kiện kinh tế - kỹ thuật của Việt Nam. Đây không chỉ là cơ hội để ứng dụng kiến thức lý thuyết vào thực tiễn mà còn là bước đệm quan trọng trong hành trình nghiên cứu và phát triển công nghệ của em.

Đồ án tập trung vào phát triển hệ thống giám sát IoT cho tháp giải nhiệt với chi phí tối ưu, đồng thời xây dựng cơ sở dữ liệu thực nghiệm phục vụ nghiên cứu và cải tiến sau này. Giải pháp dựa trên công nghệ mã nguồn mở, hướng đến tính ứng dụng cao cho cộng đồng nghiên cứu và doanh nghiệp trong nước.

Quá trình thực hiện đồ án không chỉ là hành trình khám phá và ứng dụng kiến thức mà còn là trải nghiệm quý báu giúp em hiểu sâu hơn về thực tiễn kỹ thuật và phát triển tư duy sáng tạo trong việc giải quyết các vấn đề công nghệ. Đồng thời, đây cũng là cơ hội để em đóng góp một phần nhỏ vào sự nghiệp phát triển công nghệ của đất nước trong bối cảnh chuyển đổi số quốc gia.

Đồ án được thực hiện dưới sự hướng dẫn khoa học của TS. Đỗ Mạnh Hùng và nhận được sự hỗ trợ về cơ sở vật chất từ Phòng thí nghiệm Nghiên cứu Nghiên cứu và Năng lượng sạch (FCE Lab), Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội. Em xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến sự định hướng khoa học chính xác, các điều kiện nghiên cứu thuận lợi và những đóng góp quý báu từ các thầy cô và các bạn

sinh viên tại phòng thí nghiệm, những người đã tận tâm hướng dẫn và hỗ trợ em trong suốt quá trình thực hiện đề tài.

Thông qua đồ án này, em hy vọng đóng góp một phần nhỏ vào sự nghiệp ứng dụng công nghệ cao phục vụ phát triển kinh tế - xã hội của đất nước, đồng thời tạo tiền đề cho các nghiên cứu sâu hơn về ứng dụng IoT trong lĩnh vực năng lượng và môi trường. Mặc dù đã nỗ lực hết mình trong quá trình nghiên cứu, do hạn chế về thời gian, kinh nghiệm và điều kiện thực nghiệm, đồ án không tránh khỏi những thiếu sót nhất định. Em mong nhận được những ý kiến đóng góp, phê bình xây dựng từ hội đồng đánh giá và các chuyên gia để hoàn thiện hơn nữa nội dung nghiên cứu và định hướng phát triển trong tương lai.

MỤC LỤC

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN	1
1.1 Tổng quan ngành năng lượng và công nghệ năng lượng	1
1.1.1 Bối cảnh phát triển ngành năng lượng toàn cầu	1
1.1.2 Chuyển đổi số và cách mạng công nghiệp 4.0	4
1.1.3 Tác động kinh tế và hiệu quả vận hành của IoT	6
1.2 Công nghệ IoT và ứng dụng trong hệ thống giải nhiệt.....	8
1.2.1 Phân tích nhu cầu giải nhiệt trong công nghiệp	9
1.2.2 Cách mạng hóa hệ thống quản lý năng lượng thông minh.....	12
1.2.3 Sự phát triển của các hệ thống điều khiển và giám sát công nghiệp .	13
1.3 Định hướng và mục tiêu ứng dụng của đề tài	15
1.3.1 Xác định bài toán thực tiễn cần giải quyết.....	15
1.3.2 Cơ hội phát triển và tiềm năng ứng dụng IoT	18
1.3.3 Mục tiêu, phạm vi và đóng góp dự kiến của đề tài	19
CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT	21
2.1 Cơ sở lý thuyết về tháp giải nhiệt.....	21
2.1.1 Nguyên lý truyền nhiệt và truyền khói	21
2.1.2 Nhiệt độ bầu ướt	22
2.1.3 Công suất làm mát và hiệu suất của tháp giải nhiệt.....	23
2.2 Phân tích nhu cầu giám sát hệ thống tháp giải nhiệt	23
2.2.1 Các thông số cần giám sát.....	23
2.2.2 Tầm quan trọng của việc giám sát liên tục	24
2.2.3 Yêu cầu đối với hệ thống giám sát.....	25
2.2.4 Tiêu chí lựa chọn công nghệ và thiết bị	26

2.3 Phân loại và đặc điểm tháp giải nhiệt.....	27
2.3.1 Phân loại theo hướng dòng khí	27
2.3.2 Phân loại theo kiểu tiếp xúc nước-không khí.....	30
2.3.3 Phân loại theo vật liệu đệm	31
2.4 Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất tháp giải nhiệt	31
2.4.1 Yếu tố khí tượng.....	31
2.4.2 Yếu tố thiết kế.....	32
2.4.3 Yếu tố vận hành	33
2.5 Phương pháp đánh giá hiệu suất tháp giải nhiệt.....	34
2.5.1 Các chỉ số hiệu suất quan trọng	34
2.5.2 Phương pháp đo đặc và thử nghiệm.....	35
2.5.3 Phân tích dữ liệu và đánh giá kết quả	36
2.6 Ứng dụng IoT trong giám sát tháp giải nhiệt	37
2.6.1 Xu hướng số hóa trong công nghiệp	37
2.7 Thực trạng và công nghệ hiện tại trong giám sát tháp giải nhiệt.....	38
2.7.1 Phân tích thực trạng giám sát hiện tại	38
2.7.2 Công nghệ cảm biến và vi điều khiển	38
2.7.3 Giao thức truyền thông và quản lý dữ liệu.....	39
2.7.4 Xu hướng phát triển và định hướng tương lai	39
CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ XÂY DỰNG HỆ THỐNG	41
3.1 Đối tượng nghiên cứu và yêu cầu thiết kế	41
3.1.1 Đối tượng nghiên cứu	41
3.1.2 Yêu cầu chức năng của hệ thống	42
3.1.3 Yêu cầu kỹ thuật và vận hành	42
3.2 Thiết kế và xây dựng hệ thống giám sát	43
3.2.1 Kiến trúc tổng thể hệ thống	43

3.2.2 Nguyên lý hoạt động của hệ thống	44
3.3 Lựa chọn phần cứng.....	44
3.3.1 Vi điều khiển ESP32	45
3.3.2 Cảm biến nhiệt độ DS18B20.....	45
3.3.3 Cảm biến độ ẩm và nhiệt độ DHT22	46
3.3.4 Cảm biến lưu lượng nước YF-S201	47
3.3.5 Lưu ý lắp đặt và bảo vệ thiết bị.....	47
3.3.6 Thảo luận lựa chọn thiết bị.....	48
3.4 Thiết kế kiến trúc phần mềm.....	49
3.4.1 Phần mềm nhúng trên ESP32	49
3.4.2 Giao thức truyền thông MQTT	50
3.4.3 Hệ thống backend xử lý dữ liệu	51
3.4.4 Cơ sở dữ liệu InfluxDB	52
3.4.5 Trực quan hóa dữ liệu với Grafana	53
3.5 Triển khai và tích hợp hệ thống	54
3.5.1 Luồng hoạt động tổng thể	54
3.5.2 Thiết kế tích hợp phần cứng	56
3.6 Tổng kết chương	62
CHƯƠNG 4. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ	64
4.1 Kết quả thực nghiệm và đánh giá hiệu năng hệ thống	64
4.2 Thiết lập thí nghiệm.....	64
4.2.1 Môi trường thí nghiệm.....	64
4.2.2 Cấu hình hệ thống đo lường và lắp đặt cảm biến	65
4.2.3 Thông số vận hành	66
4.3 Kết quả thu thập dữ liệu	68
4.3.1 Dữ liệu nhiệt độ và lưu lượng	68

4.3.2 Dữ liệu điều kiện môi trường.....	71
4.4 Phân tích biểu đồ suy giảm hiệu suất và ứng dụng trong chiến lược bảo trì.	72
4.4.1 Đặc điểm xu hướng suy giảm hiệu suất	73
4.4.2 Ý nghĩa của việc giám sát liên tục trong phát hiện xu hướng	73
4.4.3 Xây dựng chiến lược bảo trì dựa trên dữ liệu thực tế	74
4.4.4 Hiệu quả kinh tế của chiến lược bảo trì dự phòng	75
4.4.5 Phân tích xu hướng suy giảm hiệu suất.....	75
4.5 Đánh giá hiệu năng hệ thống giám sát.....	76
4.5.1 Độ tin cậy thu thập dữ liệu	76
4.5.2 Độ chính xác và ổn định cảm biến	78
4.5.3 Hiệu suất truyền thông và xử lý dữ liệu	78
4.6 Phân tích so sánh với các phương pháp truyền thống	79
4.6.1 So sánh với phương pháp giám sát thủ công.....	79
4.7 Đánh giá khả năng mở rộng và ứng dụng thực tế.....	79
4.7.1 Khả năng mở rộng hệ thống	79
4.7.2 Ứng dụng thực tế trong môi trường công nghiệp.....	79
4.8 Đánh giá hiệu quả kinh tế của hệ thống.....	80
4.8.1 Ứng dụng và lợi ích kinh tế	80
4.8.2 Phân tích hiệu quả và lợi ích kinh tế	80
4.8.3 So sánh hiệu quả kinh tế với các phương pháp truyền thống	81
4.9 Thảo luận và đánh giá tổng thể.....	81
4.9.1 Ưu điểm và hiệu quả đạt được	81
4.9.2 Hạn chế và thách thức.....	82
4.10 Tổng kết chương	82
CHƯƠNG 5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN	84
5.1 Kết luận	84

5.2 Hạn chế và hướng phát triển	84
5.2.1 Những hạn chế của nghiên cứu	84
5.2.2 Hướng phát triển công nghệ	84
5.2.3 Triển vọng ứng dụng và thương mại hóa.....	85
5.3 Đánh giá tổng thể về mô hình	85
5.4 Tổng kết.....	86
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	91
PHỤ LỤC.....	93
A. MÃ NGUỒN VÀ TÀI LIỆU KỸ THUẬT	93
A.1 Chi tiết triển khai phần mềm hệ thống	93
A.1.1 Firmware ESP32 - Hệ thống cảm biến chính.....	93
A.1.2 Backend Python - Xử lý dữ liệu và lưu trữ	99
A.1.3 Đặc tả kỹ thuật hệ thống	102
A.1.4 Giao thức truyền thông	103
A.1.5 Kiểm thử và validation hệ thống	104
B. THÔNG SỐ THIẾT KẾ MÔ HÌNH	105
B.1 Tổng quan thiết kế mô hình tháp giải nhiệt	105
B.2 Thông số kỹ thuật chính.....	105
B.2.1 Thông số hình học tháp giải nhiệt	105
B.2.2 Hệ thống đệm làm mát.....	106
B.3 Hệ thống tuần hoàn nước	107
B.3.1 Bơm tuần hoàn chính	107
B.3.2 Hệ thống phân phối nước	108
B.3.3 Hệ thống điều chỉnh công suất bơm.....	108
B.4 Hệ thống thông gió.....	109
B.4.1 Quạt hút khí chính	109

B.4.2 Hệ thống điều chỉnh lưu lượng khí	109
B.5 Thông số vận hành thiết kế.....	109
B.5.1 Điều kiện vận hành danh định.....	110
B.5.2 Thông số hiệu suất dự kiến.....	110
B.6 Hệ thống gia nhiệt.....	110
B.6.1 Bộ gia nhiệt điện trở	110
B.7 Hệ thống cảm biến và đo lường	111
B.7.1 Sơ đồ bố trí cảm biến.....	111
B.7.2 Đặc tính kỹ thuật cảm biến	111
B.8 Vật liệu và cấu trúc xây dựng.....	112
B.8.1 Danh mục vật liệu chính.....	112
B.9 Đánh giá kinh tế.....	112
B.9.1 Chi phí đầu tư ban đầu	112
B.9.2 Chi phí vận hành ước tính.....	113

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1 Trung tâm dữ liệu hiện đại với hệ thống làm mát và cơ sở hạ tầng tiêu thụ năng lượng lớn	2
Hình 1.2 Các công nghệ số chủ chốt (màu đậm) trong chuyển đổi số ngành năng lượng [16]	4
Hình 1.3 Số lượng thiết bị IoT lắp đặt trên toàn cầu từ 2015-2025 (đơn vị: tỉ) [19]	7
Hình 1.4 Kiến trúc hệ thống giám sát IoT cho công nghiệp	8
Hình 1.5 Giản đồ của một hệ thống nước làm mát [31]	10
Hình 1.6 Tháp giải nhiệt ướt (trái) và tháp giải nhiệt khô (phải) [39] . .	12
Hình 1.7 Hệ thống tháp giải nhiệt cho các trung tâm dữ liệu	16
Hình 1.8 Bám bẩn do cáu cặn trong tháp giải nhiệt	17
Hình 2.1 Tháp giải nhiệt đối lưu cuồng bức [31]	27
Hình 2.2 Một số kiểu tháp giải nhiệt đối lưu hút : Tháp giải nhiệt đối lưu ngược dòng (trên) và tháp giải nhiệt đối lưu dòng ngang (dưới) [31]	28
Hình 2.3 Hai dạng cấu hình chủ yếu của tháp giải nhiệt đối lưu tự nhiên: (trái) tháp dòng ngang, trong đó không khí lưu thông theo phương ngang so với dòng nước rồi; và (phải) tháp dòng ngược, trong đó không khí lưu thông theo phương ngược chiều với dòng nước [31]	29
Hình 3.1 Mô hình tháp giải nhiệt mini. (1- động cơ quạt; 2- cánh quạt hút; 3- vòi phun nước; 4- ống dẫn nước vào; 5- tấm phân phối nước; 6-thân tháp; 7- trụ đỡ thân tháp; 8- đáy tháp; 9- rơ le mức nước; 10- động cơ bơm; 11- van xả đáy; 12- tải nhiệt)	41
Hình 3.2 Sơ đồ kiến trúc tổng thể hệ thống	43
Hình 3.3 Vi điều khiển ESP32-WROOM-32 [57]	45
Hình 3.4 Cảm biến nhiệt độ DS18B20 [55]	46
Hình 3.5 Cảm biến nhiệt độ/độ ẩm DHT22 [56]	46
Hình 3.6 Cảm biến lưu lượng nước YF-S201 [59]	47
Hình 3.7 Sơ đồ cấu hình cảm biến và vi điều khiển vào mô hình thực tế	49
Hình 3.8 Cấu trúc phần mềm nhúng ESP32 với khai báo thư viện và cấu hình hệ thống	50
Hình 3.9 Kiến trúc giao thức MQTT trong hệ thống giám sát	51
Hình 3.10 Kiến trúc hệ thống backend với các thành phần xử lý	52

Hình 3.11	Kiến trúc lưu trữ dữ liệu time-series với InfluxDB	53
Hình 3.12	Dashboard Grafana hiển thị dữ liệu giám sát tháp giải nhiệt . .	54
Hình 3.13	Lưu đồ thuật toán xử lý dữ liệu và truyền thông của ESP32 trong hệ thống giám sát tháp giải nhiệt	55
Hình 4.1	Phòng thí nghiệm Nghiên cứu Nhiên liệu và Năng lượng sạch - FCE Lab, Đại học Bách khoa Hà Nội	65
Hình 4.2	Hoàn thành cấu hình và lắp đặt cảm biến cho hệ thống, mô hình đã hoạt động và gửi dữ liệu vận hành về máy chủ.	66
Hình 4.3	Biểu đồ nhiệt độ nước vào/ra theo thời gian	68
Hình 4.4	Biểu đồ hiệu suất làm mát theo thời gian	72
Hình B.1	Bản vẽ thiết kế mô hình (trái) và mô hình thực tế đã lắp đặt cảm biến (phải)	105
Hình B.2	Mặt cắt của mô hình tháp giải nhiệt	106
Hình B.3	Đệm làm mát kiểu tổ ong	107

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 4.1	Thông kê thông số vận hành theo khung giờ trong ngày	69
Bảng 4.2	Xu hướng biến đổi hiệu suất theo ngày	69
Bảng 4.3	Điều kiện môi trường theo khung giờ	71
Bảng 4.4	Chiến lược bảo trì theo mức độ suy giảm hiệu suất	74
Bảng 4.5	Phân tích độ tin cậy thu thập dữ liệu	77
Bảng 4.6	Hiệu suất hệ thống ESP32	77
Bảng A.1	Thông số kỹ thuật hệ thống giám sát	102
Bảng A.2	Bảng kết nối GPIO ESP32 với cảm biến	103
Bảng A.3	Kết quả kiểm thử hệ thống	104
Bảng B.1	Thông số hình học mô hình tháp giải nhiệt	106
Bảng B.2	Thông số hệ thống đệm làm mát	107
Bảng B.3	Thông số bơm tuần hoàn	108
Bảng B.4	Thông số hệ thống phân phối nước	108
Bảng B.5	Hệ thống điều chỉnh công suất bơm	108
Bảng B.6	Thông số quạt hút khí	109
Bảng B.7	Hệ thống điều chỉnh lưu lượng khí	109
Bảng B.8	Điều kiện vận hành thiết kế	110
Bảng B.9	Thông số hiệu suất thiết kế	110
Bảng B.10	Thông số bộ gia nhiệt	111
Bảng B.11	Vị trí và thông số cảm biến	111
Bảng B.12	Thông số kỹ thuật cảm biến sử dụng	112
Bảng B.13	Vật liệu sử dụng trong mô hình	112
Bảng B.14	Chi phí xây dựng mô hình	113
Bảng B.15	Chi phí vận hành ước tính hàng năm	113

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

1.1 Tổng quan ngành năng lượng và công nghệ năng lượng

1.1.1 Bối cảnh phát triển ngành năng lượng toàn cầu

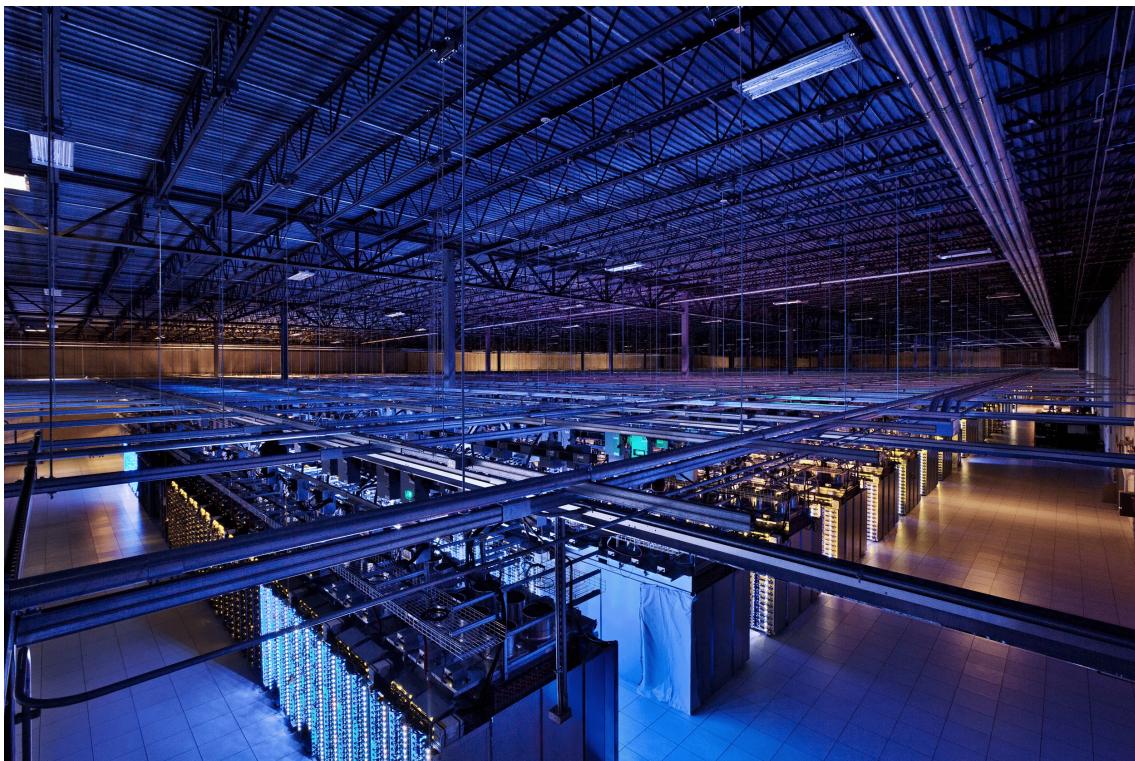
Ngành năng lượng đóng vai trò nền tảng trong sự phát triển kinh tế - xã hội của mọi quốc gia, trực tiếp ảnh hưởng đến GDP, chất lượng cuộc sống và khả năng cạnh tranh quốc gia. Theo báo cáo của Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA), nhu cầu năng lượng toàn cầu dự kiến tăng 50% vào năm 2050, chủ yếu do sự phát triển kinh tế và gia tăng dân số tại các nước đang phát triển [1].

Trong bối cảnh toàn cầu hóa và phát triển bền vững, ngành năng lượng đang trải qua những biến đổi căn bản về cả quy mô lẫn cấu trúc. Tốc độ đô thị hóa nhanh chóng đã làm gia tăng đáng kể nhu cầu năng lượng trong các khu vực công nghiệp, thương mại và dân dụng. Đặc biệt, sự bùng nổ của các ngành công nghệ cao như trí tuệ nhân tạo, điện toán đám mây và blockchain đã tạo ra những áp lực mới về tiêu thụ điện năng [2]. Các trung tâm dữ liệu hiện đại có thể tiêu thụ lượng điện tương đương với một thành phố nhỏ, trong khi các trang trại khai thác tiền mã hóa¹ có thể sử dụng nhiều điện hơn cả một quốc gia.

Sự phụ thuộc ngày càng tăng vào năng lượng trong mọi khía cạnh của đời sống hiện đại đã biến an ninh năng lượng thành một yếu tố quyết định sự thịnh vượng và ổn định xã hội. Các cuộc khủng hoảng năng lượng gần đây đã cho thấy tác động sâu rộng của việc gián đoạn cung cấp năng lượng đối với nền kinh tế toàn cầu. Giá cả năng lượng không chỉ ảnh hưởng trực tiếp đến chi phí sản xuất mà còn tác động đến lạm phát, tăng trưởng kinh tế và chính sách tiền tệ của các quốc gia.

Các hệ thống năng lượng hiện đại đang đối mặt với những thách thức thực tiễn cần giải pháp kỹ thuật cụ thể. Về mặt tài nguyên, sự cạn kiệt dần các nguồn năng lượng hóa thạch đang trở thành vấn đề cấp bách. Theo các ước tính hiện tại [3], dự trữ dầu mỏ trên thế giới chỉ còn khoảng 50 năm, khí đốt tự nhiên 52 năm và than đá 139 năm với mức tiêu thụ hiện tại. Đồng thời, sự phân bố không đều về tài nguyên năng lượng trên thế giới đã tạo ra sự phụ thuộc lẫn nhau giữa các quốc gia, dẫn đến những bất ổn địa chính trị nghiêm trọng. Chi phí khai thác cũng ngày càng tăng cao do phải tiếp cận các nguồn tài nguyên ở những vị trí khó khăn hơn, trong khi sự biến động về giá cả năng lượng liên tục ảnh hưởng đến an ninh năng lượng của từng quốc gia.

¹Tiền mã hóa (cryptocurrency) là loại tiền kỹ thuật số sử dụng công nghệ mã hóa và blockchain để xác thực giao dịch, phổ biến nhất là Bitcoin, Ethereum. Việc khai thác (mining) tiền mã hóa đòi hỏi khôi lƣợng tính toán khổng lồ, tiêu thụ năng lượng điện rất lớn.



Hình 1.1: Trung tâm dữ liệu hiện đại với hệ thống làm mát và cơ sở hạ tầng tiêu thụ năng lượng lớn

Thách thức về môi trường không kém phần nghiêm trọng khi ngành năng lượng đóng góp tới 75% tổng lượng khí thải nhà kính toàn cầu [4], góp phần chính vào hiện tượng biến đổi khí hậu. Tổ chức Y tế Thế giới (WHO) ước tính có đến 7 triệu người chết mỗi năm do ô nhiễm không khí [5], chủ yếu từ việc đốt nhiên liệu hóa thạch. Việc khai thác, vận chuyển và sử dụng năng lượng hóa thạch cũng gây tổn hại nghiêm trọng đến hệ sinh thái, trong khi áp lực từ các cam kết quốc tế như Thỏa thuận Paris về giảm phát thải carbon ngày càng gia tăng [6].

Từ góc độ công nghệ, nhiều quốc gia vẫn đang sử dụng hạ tầng năng lượng lạc hậu với công nghệ cũ và hiệu suất thấp. Các hệ thống năng lượng thường hoạt động độc lập, thiếu sự tích hợp thông minh và khả năng tối ưu hóa tổng thể. Việc dự báo và quản lý nhu cầu năng lượng vẫn còn nhiều khó khăn, đặc biệt là trong bối cảnh thiếu các giải pháp lưu trữ năng lượng hiệu quả cho các nguồn tái tạo có tính biến động cao.

Các công nghệ mới đang tạo ra cơ hội để giải quyết những thách thức vận hành thực tiễn trong ngành năng lượng. Chuyển đổi sang năng lượng tái tạo đang diễn ra với tốc độ chưa từng có. Năng lượng tái tạo đã trở thành nguồn năng lượng có chi phí thấp nhất tại nhiều khu vực trên thế giới [7], tạo động lực mạnh mẽ cho việc đầu tư và phát triển. Công suất lắp đặt năng lượng mặt trời tăng trung bình 20% mỗi năm, trong khi năng lượng gió trên biển cũng phát triển vượt bậc với chi phí

giảm 60% trong thập kỷ qua [8]. Một số quốc gia tiên phong như Đan Mạch đã đạt được mốc 80% điện năng từ các nguồn tái tạo, chứng minh tính khả thi của việc chuyển đổi năng lượng toàn diện.

Đồng thời, công nghệ lưu trữ năng lượng cũng có những bước tiến đáng kể. Giá pin lithium-ion đã giảm tới 90% từ năm 2010 [9], làm cho việc lưu trữ năng lượng quy mô lớn trở nên khả thi về mặt kinh tế. Công nghệ lưu trữ bằng hydro xanh đang được phát triển mạnh mẽ như một giải pháp lưu trữ dài hạn, trong khi các hệ thống lưu trữ năng lượng cơ học như PHES (Pumped Hydro Energy Storage) [10] và CAES (Compressed Air Energy Storage) [11] cũng được mở rộng quy mô. Theo báo cáo của IEA [12], các hệ thống lưu trữ cơ học này đang đóng góp đáng kể vào việc ổn định lưới điện và tích hợp năng lượng tái tạo. Sự phát triển của lưới điện thông minh đã cho phép quản lý năng lượng phân tán một cách hiệu quả, tạo điều kiện thuận lợi cho việc tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo.

Xu hướng phi tập trung hóa trong sản xuất năng lượng đang mang lại những cơ hội mới cho sự phát triển bền vững [13]. Các hệ thống năng lượng phân tán như điện mặt trời mái nhà, tuabin gió nhỏ và hệ thống lưu trữ pin đang trở thành phổ biến, cho phép người tiêu dùng vừa là người sử dụng vừa là người sản xuất năng lượng. Mô hình prosumer (producer-consumer) này [14] không chỉ giảm áp lực lên hệ thống điện trung tâm mà còn tăng cường khả năng phục hồi của lưới điện trước các sự cố và thiên tai. Theo nghiên cứu của Zhang và cộng sự [15], các hệ thống năng lượng phân tán có thể cải thiện hiệu quả tổng thể của lưới điện lên tới 15-25% so với các hệ thống tập trung truyền thống.

Đầu tư vào nghiên cứu và phát triển công nghệ năng lượng sạch đang đạt mức kỷ lục, với hơn 1.8 nghìn tỷ USD được đầu tư toàn cầu trong năm 2023 [7]. Các công nghệ đột phá như pin nhiên liệu hydro², năng lượng địa nhiệt nâng cao (EGS)³ và tổng hợp hạt nhân⁴ đang từng bước chuyển từ phòng thí nghiệm sang ứng dụng thương mại. Đặc biệt, sự tiến bộ trong công nghệ vật liệu và nanô-công nghệ⁵ đang mở ra những khả năng mới cho việc nâng cao hiệu suất và giảm chi phí của các thiết bị năng lượng tái tạo.

²Pin nhiên liệu hydro chuyển hóa năng lượng hóa học của hydro thành điện năng thông qua phản ứng điện hóa.

³EGS (Enhanced Geothermal System) là công nghệ khai thác nhiệt từ các tầng đá sâu không có nước tự nhiên bằng cách bơm nước vào tạo dòng nhiệt.

⁴Tổng hợp hạt nhân (nuclear fusion) là quá trình kết hợp các hạt nhân nhẹ thành hạt nhân nặng hơn, giải phóng năng lượng lớn, mô phỏng phản ứng trong lõi Mặt Trời.

⁵Nanô-công nghệ ứng dụng vật liệu ở kích thước nanomet để cải thiện tính chất và hiệu suất thiết bị năng lượng.



Hình 1.2: Các công nghệ số chủ chốt (màu đậm) trong chuyển đổi số ngành năng lượng [16]

1.1.2 Chuyển đổi số và cách mạng công nghiệp 4.0

Cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 đang thúc đẩy chuyển đổi số toàn diện trong ngành năng lượng, đánh dấu bước chuyển từ các hệ thống truyền thống sang môi trường số hóa tích hợp. Các công nghệ nền tảng như Internet of Things (IoT), trí tuệ nhân tạo (AI), phân tích dữ liệu lớn (Big Data Analytics) và điện toán đám mây (Cloud Computing) không chỉ cải thiện hiệu quả vận hành mà còn tạo ra những mô hình kinh doanh hoàn toàn mới, thay đổi căn bản cách thức các doanh nghiệp năng lượng tương tác với khách hàng và quản lý tài sản.

Chuyển đổi số trong ngành năng lượng không chỉ là một xu hướng mà đã trở thành yếu tố sống còn để duy trì khả năng cạnh tranh trong thị trường toàn cầu. Các doanh nghiệp năng lượng truyền thống đang phải tái cấu trúc mô hình hoạt động để tích hợp các công nghệ số vào mọi khâu từ thăm dò, khai thác, sản xuất đến phân phối và bán lẻ. Sự xuất hiện của các nền tảng số đã làm thay đổi cách thức giao dịch năng lượng, từ các thị trường giao ngay truyền thống sang các sàn giao dịch điện tử với khả năng thực hiện hàng triệu giao dịch mỗi giây.

Trí tuệ nhân tạo và máy học đang cách mạng hóa cách thức dự báo và quản lý trong ngành năng lượng [17]. Các thuật toán AI tiên tiến có thể phân tích hàng petabyte dữ liệu để dự báo chính xác nhu cầu năng lượng với độ sai lệch dưới 1%, tối ưu hóa việc vận hành nhà máy điện và quản lý lưới điện thông minh. Công nghệ machine learning được ứng dụng để dự đoán thời tiết, tối ưu hóa sản lượng từ các trang trại năng lượng tái tạo và thậm chí phát hiện sớm các sự cố tiềm ẩn trong hệ thống truyền tải điện.

Blockchain⁶ và các công nghệ sổ cái phân tán đang mở ra kỷ nguyên mới cho giao dịch năng lượng ngang hàng [18]. Các smart contract⁷ cho phép tự động hóa hoàn toàn việc mua bán năng lượng giữa các hộ gia đình có hệ thống điện mặt trời với nhau, loại bỏ nhu cầu trung gian và giảm chi phí giao dịch. Các đồng tiền số carbon credit đang được phát triển để tạo ra thị trường toàn cầu minh bạch và hiệu quả cho việc giao dịch quyền phát thải.

Nhu cầu thực tiễn từ doanh nghiệp tạo ra động lực mạnh mẽ cho việc ứng dụng công nghệ IoT trong quản lý năng lượng. Áp lực về hiệu quả kinh tế là động lực chính khi cạnh tranh trong thị trường năng lượng đã được tự do hóa ngày càng gay gắt. Các doanh nghiệp phải đổi mới với nhu cầu cấp thiết về giảm chi phí vận hành và bảo trì để duy trì khả năng cạnh tranh. Việc tối ưu hóa sử dụng tài sản và gia tăng tuổi thọ thiết bị trở thành yếu tố then chốt trong chiến lược kinh doanh. Đồng thời, yêu cầu minh bạch hóa thông tin cho các bên liên quan, bao gồm nhà đầu tư, cơ quan quản lý và khách hàng, cũng thúc đẩy việc ứng dụng các công nghệ số để cung cấp dữ liệu chính xác và kịp thời.

Yêu cầu về độ tin cậy và an toàn ngày càng trở nên nghiêm ngặt trong bối cảnh nhu cầu cung cấp năng lượng liên tục và ổn định. Các hệ thống năng lượng hiện đại đòi hỏi khả năng phòng ngừa và giảm thiểu rủi ro sự cố một cách chủ động thông qua các công nghệ giám sát tiên tiến. Việc tuân thủ các quy định an toàn nghiêm ngặt từ các cơ quan quản lý cũng đòi hỏi hệ thống giám sát và báo cáo tự động. Đặc biệt, trong thời đại số hóa, việc bảo vệ hạ tầng quan trọng khỏi các mối đe dọa an ninh mạng trở thành ưu tiên hàng đầu.

Sự thay đổi trong kỳ vọng của khách hàng cũng tạo ra động lực lớn cho chuyển đổi số. Khách hàng hiện đại mong muốn có nhiều lựa chọn và khả năng kiểm soát tốt hơn đối với việc sử dụng năng lượng của mình. Họ yêu cầu các dịch vụ được cá nhân hóa và khả năng tương tác số thuận tiện. Tính minh bạch trong giá cả và sự linh hoạt trong thanh toán cũng trở thành tiêu chí quan trọng. Đặc biệt, sự quan tâm ngày càng tăng đến tác động môi trường của việc tiêu thụ năng lượng đã thúc đẩy nhu cầu về các giải pháp thông minh và bền vững.

Internet of Things (IoT) trong ngành năng lượng đại diện cho một hệ sinh thái kỹ thuật số phức tạp bao gồm mạng lưới các cảm biến, thiết bị đo lường và hệ thống điều khiển thông minh được kết nối và tương tác thông qua giao thức Internet. Theo dự báo của các tổ chức nghiên cứu hàng đầu, đến năm 2025 sẽ có hơn 75 tỷ thiết bị

⁶Blockchain là công nghệ chuỗi khối, một dạng cơ sở dữ liệu phân tán lưu trữ thông tin trong các khối được liên kết với nhau bằng mã hóa, đảm bảo tính minh bạch và không thể thay đổi.

⁷Smart contract (hợp đồng thông minh) là chương trình máy tính tự động thực thi các điều khoản hợp đồng khi các điều kiện được đáp ứng, thường được triển khai trên nền tảng blockchain.

IoT được triển khai trên toàn cầu [19], trong đó ngành năng lượng chiếm tỷ trọng đáng kể với các ứng dụng từ giám sát thiết bị đến quản lý lưới điện thông minh. Việc ứng dụng IoT trong năng lượng tạo ra những khả năng vận hành vượt trội thông qua giám sát thiết bị thời gian thực với hàng triệu cảm biến phân bố khắp hệ thống, từ tuabin gió và tấm pin mặt trời đến máy biến áp và đường dây truyền tải. Quản lý lưới điện thông minh được hiện thực hóa thông qua các đồng hồ thông minh (smart meters) có khả năng đo lường và điều khiển dòng điện hai chiều, cho phép tích hợp hiệu quả các nguồn năng lượng phân tán. Bảo trì dự đoán trở thành khả thi và hiệu quả nhờ việc ứng dụng các thuật toán phân tích dữ liệu từ cảm biến để dự đoán chính xác thời điểm và nhu cầu bảo trì, trong khi tối ưu hóa năng lượng được thực hiện thông qua việc điều chỉnh tự động các thông số vận hành dựa trên phân tích dữ liệu thời gian thực.

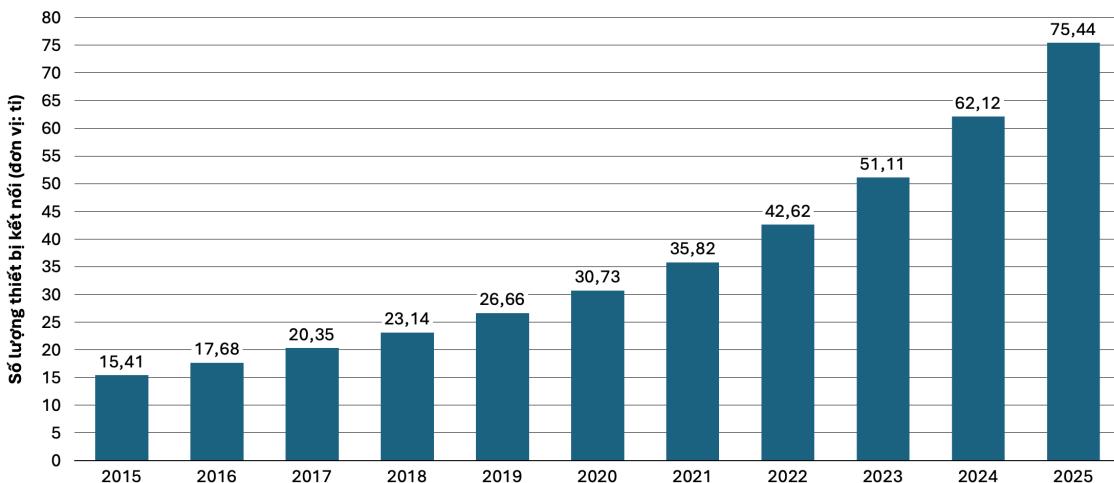
Trí tuệ nhân tạo (AI) và Machine Learning đang cách mạng hóa cách thức vận hành và quản lý hệ thống năng lượng một cách toàn diện. Trong lĩnh vực dự báo nhu cầu, các thuật toán ML có thể dự báo chính xác nhu cầu điện với sai số dưới 2%, giúp tối ưu hóa việc điều phối nguồn. AI cũng được ứng dụng để điều khiển hàng nghìn nhà máy điện nhằm tối ưu chi phí và giảm phát thải một cách đồng bộ. Công nghệ computer vision đã chứng minh hiệu quả trong việc phát hiện lỗi trên đường dây truyền tải, trong khi AI còn có khả năng thực hiện giao dịch tự động trên thị trường điện để tối ưu hóa lợi nhuận.

Big Data Analytics đóng vai trò quan trọng trong việc xử lý khối lượng dữ liệu khổng lồ mà ngành năng lượng tạo ra. Một nhà máy điện hiện đại có thể tạo ra đến 1TB dữ liệu mỗi ngày, đòi hỏi các công cụ phân tích tiên tiến. Việc phân tích hiệu suất được thực hiện thông qua xử lý dữ liệu từ hàng nghìn điểm đo để tối ưu hiệu suất vận hành. Phân khúc khách hàng dựa trên phân tích hành vi tiêu thụ giúp cung cấp dịch vụ phù hợp và cá nhân hóa. Quản lý rủi ro được cải thiện thông qua phân tích dữ liệu lịch sử để đánh giá và dự báo các rủi ro tiềm ẩn. Cuối cùng, dự báo thị trường dựa trên phân tích xu hướng giúp các doanh nghiệp đưa ra quyết định đầu tư thông minh và kịp thời.

1.1.3 Tác động kinh tế và hiệu quả vận hành của IoT

Ứng dụng IoT trong giám sát hệ thống năng lượng mang lại lợi ích kinh tế đo lường được cho doanh nghiệp. Về mặt tiết kiệm chi phí, McKinsey ước tính rằng chuyển đổi số có thể tiết kiệm tới 80 tỷ USD mỗi năm cho ngành năng lượng toàn cầu thông qua việc tối ưu hóa vận hành và giảm lãng phí [20]. Tự động hóa các quy trình vận hành có thể giảm 10-20% chi phí vận hành nhờ việc loại bỏ các hoạt động thủ công và tăng cường hiệu quả. Đặc biệt, việc ứng dụng bảo trì dự đoán đã

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

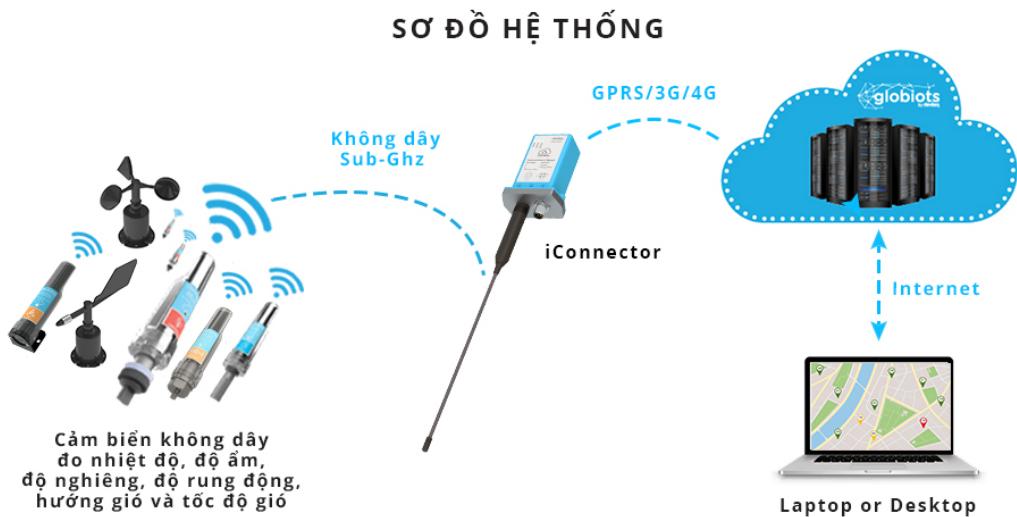


Hình 1.3: Số lượng thiết bị IoT lắp đặt trên toàn cầu từ 2015-2025 (đơn vị: tỉ) [19]

chứng minh khả năng giảm tới 25% chi phí bảo trì bằng cách ngăn ngừa hỏng hóc và tối ưu hóa lịch bảo trì. Hơn nữa, các hệ thống tối ưu hóa thông minh có thể tăng 5-10% hiệu suất thiết bị thông qua việc điều chỉnh tham số vận hành một cách liên tục và chính xác.

Chuyển đổi số đã và đang tạo ra các giá trị mới cho ngành năng lượng, góp phần thúc đẩy sự phát triển của các dịch vụ năng lượng hiện đại. Một trong những xu hướng nổi bật là sự xuất hiện của các mô hình dịch vụ năng lượng cho phép khách hàng sử dụng năng lượng linh hoạt mà không cần đầu tư lớn vào hạ tầng. Các mô hình kinh doanh dựa trên nền tảng số và hệ sinh thái số giúp kết nối nhiều chủ thể trong chuỗi giá trị năng lượng, từ nhà sản xuất, nhà cung cấp đến người tiêu dùng, qua đó tăng cường hợp tác và tối ưu hóa việc sử dụng tài nguyên. Việc khai thác dữ liệu vận hành và tiêu thụ năng lượng thông qua các công cụ phân tích chuyên sâu đã trở thành nguồn giá trị quan trọng, hỗ trợ ra quyết định và nâng cao hiệu quả kinh doanh. Bên cạnh đó, sự phát triển của các thị trường năng lượng ngang hàng cho phép các cá nhân và tổ chức thực hiện giao dịch năng lượng trực tiếp, góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế và thúc đẩy sử dụng năng lượng tái tạo.

Giám sát IoT giúp nâng cao độ tin cậy và an toàn trong vận hành hệ thống năng lượng [21], [22]. Tối ưu hóa hệ thống được thực hiện một cách toàn diện thông qua các công nghệ thông minh [21]. Lưới điện thông minh đã chứng minh khả năng giảm 20% tổn thất truyền tải nhờ việc giám sát và điều khiển chính xác dòng điện [23]. Việc ứng dụng AI trong tối ưu hóa lịch vận hành nhà máy điện đã giúp tiết kiệm 15% nhiên liệu thông qua việc điều phối tối ưu các đơn vị phát điện [17], [22]. Hệ thống quản lý năng lượng tòa nhà thông minh có thể giảm tới 30% tiêu thụ điện bằng cách tự động điều chỉnh các thiết bị theo nhu cầu thực tế [24], [25].



Hình 1.4: Kiến trúc hệ thống giám sát IoT cho công nghiệp

Đặc biệt quan trọng, việc tích hợp năng lượng tái tạo vào lưới điện đã trở nên hiệu quả hơn 40% nhờ các hệ thống dự báo và quản lý thông minh [13], [15].

Độ tin cậy của hệ thống năng lượng cũng được nâng cao đáng kể. Thời gian ngừng cung cấp điện đã giảm 50% nhờ các hệ thống giám sát và cảnh báo sớm [21], [22]. Khả năng phát hiện và khắc phục sự cố được cải thiện nhanh hơn 60% thông qua việc ứng dụng các thuật toán thông minh và tự động hóa quy trình xử lý [17], [23]. Chất lượng điện năng được cải thiện đáng kể nhờ các hệ thống điều khiển tiên tiến có khả năng duy trì các thông số trong phạm vi cho phép [26]. Cuối cùng, khả năng phục hồi sau thiên tai và các sự cố lớn cũng được tăng cường thông qua việc xây dựng các hệ thống dự phòng thông minh và khả năng tái cấu hình tự động [2], [27].

1.2 Công nghệ IoT và ứng dụng trong hệ thống giải nhiệt

IoT đang được ứng dụng rộng rãi trong giám sát và tối ưu hóa hệ thống giải nhiệt công nghiệp, mang lại hiệu quả kinh tế cao và cải thiện độ tin cậy vận hành. Việc ứng dụng công nghệ IoT không chỉ giúp giảm chi phí vận hành mà còn nâng cao chất lượng dịch vụ và giảm tác động môi trường.

Hệ thống giải nhiệt thông minh sử dụng IoT có khả năng giám sát liên tục các thông số vận hành như nhiệt độ, áp suất, lưu lượng và hiệu suất làm mát. Dữ liệu thời gian thực được thu thập và phân tích để tối ưu hóa hoạt động, dự đoán nhu cầu bảo trì và cảnh báo sớm các sự cố tiềm ẩn.

Sự kết hợp giữa IoT và điện toán biên (edge computing) đang tạo ra những đột phá quan trọng trong quản lý năng lượng [28]. Thay vì phải gửi tất cả dữ liệu về trung tâm xử lý, các thiết bị IoT hiện đại có thể thực hiện xử lý và ra quyết định

ngay tại chỗ, giảm độ trễ từ hàng giây xuống còn mili giây. Điều này đặc biệt quan trọng trong các ứng dụng giải nhiệt công nghiệp, nơi mà việc phản ứng nhanh có thể ngăn ngừa thiệt hại hàng triệu USD.

Công nghệ song sinh số (digital twin) đang trở thành công cụ không thể thiếu trong thiết kế và vận hành hệ thống năng lượng [27]. Bằng cách tạo ra một bản sao ảo của hệ thống thực, các kỹ sư có thể mô phỏng và kiểm tra hàng nghìn kịch bản vận hành khác nhau mà không cần can thiệp vào hệ thống thật. Digital twin cho phép tối ưu hóa hiệu suất, dự đoán tuổi thọ thiết bị và thậm chí thiết kế lại hệ thống để đạt hiệu quả tối đa.

Xu hướng tích hợp đa nền tảng đang mở ra những khả năng mới cho việc quản lý năng lượng tổng thể [29]. Các hệ thống IoT hiện đại không chỉ giám sát một thiết bị đơn lẻ mà có thể tích hợp dữ liệu từ hàng trăm nguồn khác nhau để tạo ra cái nhìn tổng thể về hiệu suất toàn hệ thống. Điều này cho phép phát hiện những mối tương quan phức tạp mà trước đây không thể nhận biết được.

1.2.1 Phân tích nhu cầu giải nhiệt trong công nghiệp

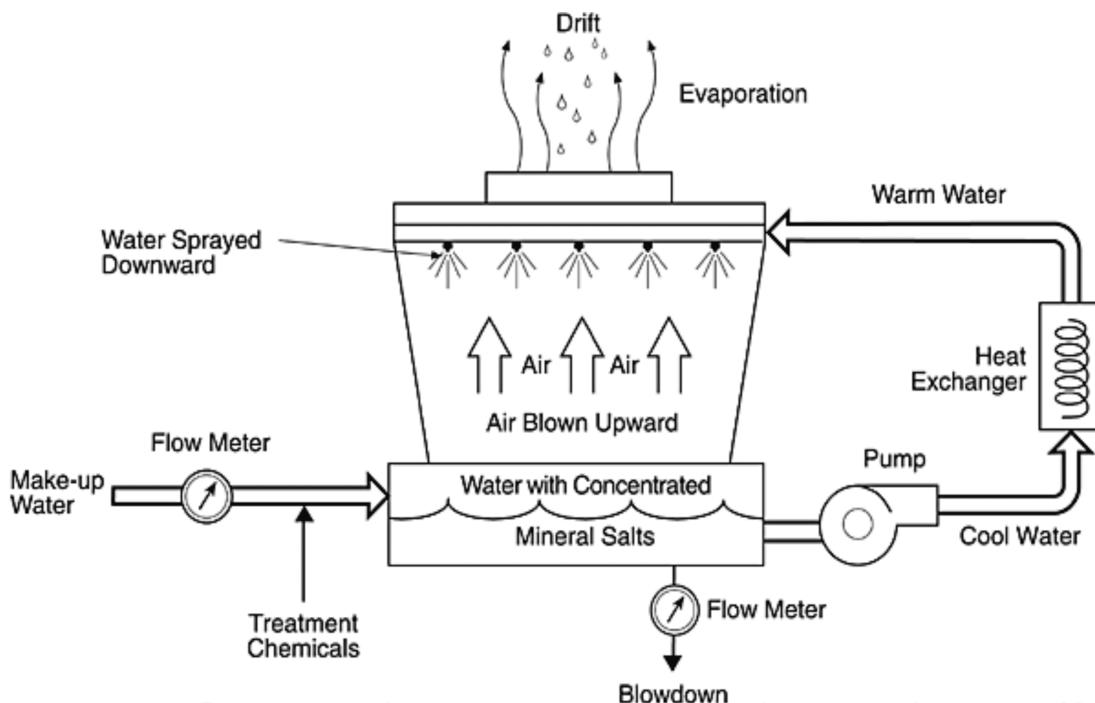
Trong các hệ thống năng lượng hiện đại, giải nhiệt là một trong những yếu tố cốt lõi đảm bảo sự ổn định, an toàn và hiệu quả hoạt động. Chi phí năng lượng dành cho làm mát thường chiếm 30-50% tổng chi phí vận hành tại nhiều cơ sở công nghiệp.

Hệ thống giải nhiệt được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực của ngành năng lượng, mỗi ứng dụng có những yêu cầu kỹ thuật riêng biệt. Nhà máy điện và trung tâm dữ liệu là hai ứng dụng chính có nhu cầu giải nhiệt lớn nhất. Trong các nhà máy nhiệt điện, hệ thống làm mát đóng vai trò then chốt trong việc duy trì hiệu suất và độ tin cậy của toàn bộ chu trình nhiệt. Bình ngưng có nhiệm vụ ngưng tụ hơi nước sau khi đi qua tuabin để tạo chân không cần thiết cho chu trình Rankine. Hệ thống giải nhiệt máy phát được thiết kế đặc biệt cho các máy phát điện công suất lớn, sử dụng hệ thống làm mát bằng khí hydro hoặc nước để duy trì nhiệt độ hoạt động tối ưu.

Trung tâm dữ liệu tiêu thụ 1-3% tổng điện năng toàn cầu [30], trong đó 30-50% là cho làm mát. Hệ thống làm mát máy chủ trong trung tâm dữ liệu hiện đại đòi hỏi các giải pháp đa dạng từ hệ thống điều hòa không khí với các phòng lạnh cho đến giải nhiệt chất lỏng cho các cụm máy chủ mật độ cao. Mật độ nhiệt của các tủ rack tăng nhanh chóng từ mức 5kW/rack lên tới 50kW/rack, làm gia tăng áp lực lên hệ thống làm mát.

Trong ngành công nghiệp sản xuất, hệ thống giải nhiệt cũng đóng vai trò quan

trọng. Ngành thép yêu cầu làm mát lò cao và lò điện để duy trì nhiệt độ vận hành tối ưu, thấp giải nhiệt cho các hệ thống tẩy luyện để kiểm soát tốc độ làm nguội đạt tính chất cơ học mong muốn. Ngành hóa chất cũng cần hệ thống giải nhiệt nhằm mục đích kiểm soát động học phản ứng, cột chưng cất ngưng tụ cho quá trình tách chất. Ngành dầu khí với quy mô lớn đặt ra những thách thức đặc biệt cho hệ thống giải nhiệt từ hệ thống làm mát tinh chế đến hệ thống hoá lỏng khí tự nhiên (sản xuất LNG).



Hình 1.5: Giải đồ của một hệ thống nước làm mát [31]

Tháp giải nhiệt đóng vai trò trung tâm trong chu trình nhiệt công nghiệp [32] với nhiều ưu điểm vượt trội. Tháp giải nhiệt có hiệu quả cao với hệ số COP (Coefficient of Performance) có thể đạt 20-40, vượt xa các phương pháp làm mát khác. Chi phí vận hành thấp do cơ cấu đơn giản và dễ bảo trì, chỉ chủ yếu tiêu thụ điện cho quạt và bơm. Khả năng xử lý nhiệt lượng rất lớn từ quy mô MW đến GW giúp đáp ứng nhu cầu của các nhà máy điện và cơ sở công nghiệp lớn. Tuổi thọ cao từ 20 đến 30 năm nếu được vận hành và bảo dưỡng đúng quy trình.

Phân loại tháp giải nhiệt được thực hiện dựa trên nhiều tiêu chí kỹ thuật khác nhau, phản ánh sự đa dạng về thiết kế và nguyên lý vận hành của thiết bị [33]. Một trong những tiêu chí phổ biến là phương thức tạo luồng không khí lưu thông qua tháp (phương pháp thông gió). Theo tiêu chí này, tháp giải nhiệt được chia thành loại thông gió tự nhiên và thông gió cơ học [33].

Tháp giải nhiệt đối lưu tự nhiên (thường có kết cấu dạng hyperboloid) hoạt động

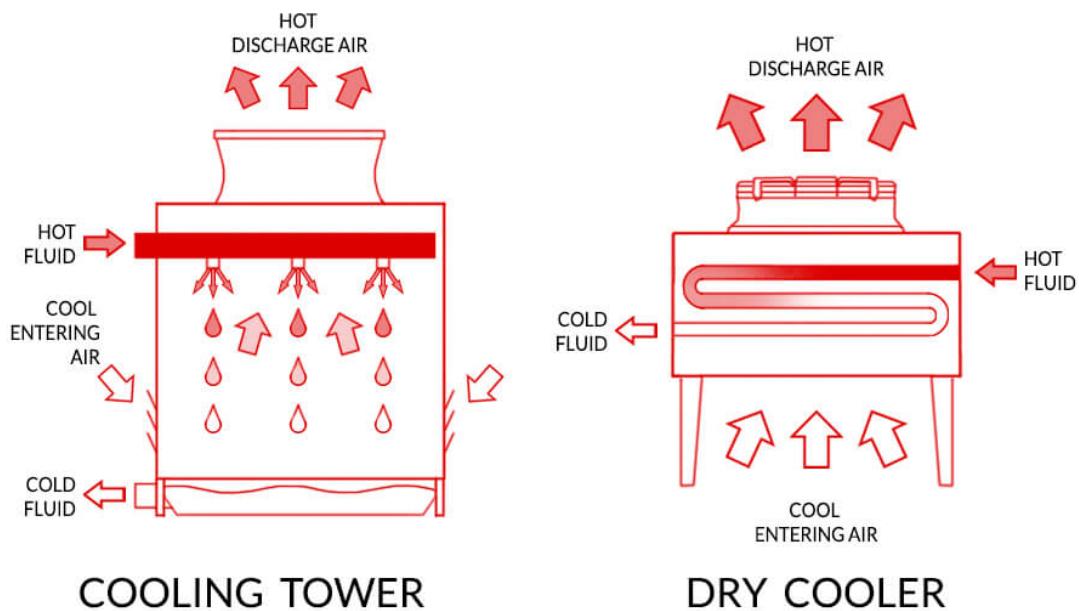
dựa trên hiệu ứng lực đẩy nổi: sự chênh lệch nhiệt độ giữa không khí nóng bên trong tháp và không khí mát bên ngoài tạo ra dòng đối lưu đi từ đáy lên đỉnh tháp mà không cần quạt [34]. Loại tháp này thường có kích thước rất lớn nhằm tăng cường hiệu ứng ống khói và thường được ứng dụng trong các nhà máy điện hoặc cơ sở công nghiệp quy mô lớn. Ngược lại, tháp giải nhiệt đối lưu cơ học sử dụng các quạt công suất cao để hút hoặc đẩy không khí qua tháp, tạo ra dòng lưu thông cưỡng bức [35]. Cơ chế này giúp tăng diện tích và thời gian tiếp xúc giữa không khí với nước, nâng cao hiệu quả trao đổi nhiệt.

Bên cạnh phương thức thông gió, một tiêu chí phân loại quan trọng khác là cơ chế trao đổi nhiệt giữa nước và không khí [36]. Theo đó, có hai loại chính: tháp giải nhiệt ướt (wet cooling tower) và tháp giải nhiệt khô (dry cooling tower). Tháp giải nhiệt ướt làm mát bằng quá trình bay hơi nước: nước nóng được phun thành tia hoặc màng chảy qua khói đậm, tiếp xúc trực tiếp với không khí; một phần nước bay hơi, mang theo nhiệt ẩn, phần còn lại được làm mát thông qua truyền nhiệt ẩn và truyền nhiệt hiện [36]. Nhờ vậy, nhiệt độ nước có thể giảm xuống gần nhiệt độ bầu ướt của không khí môi trường. Ngược lại, tháp giải nhiệt khô truyền nhiệt chủ yếu bằng nhiệt hiện qua bề mặt trao đổi nhiệt kín, không có sự bay hơi trực tiếp, nên nhiệt độ nước sau làm mát không thể thấp hơn nhiệt độ bầu khô [36].

Các nghiên cứu cho thấy, hệ thống giải nhiệt ướt có thể giảm tới khoảng 58% mức tiêu thụ điện năng so với hệ thống làm mát khô tương đương [37]. Tuy nhiên, tháp ướt yêu cầu cấp nước bổ sung thường xuyên và cần xử lý nước để tránh cáu cặn, ăn mòn. Tháp khô gần như không tiêu tốn nước và ít cần bảo trì liên quan đến nguồn nước, nhưng hiệu suất làm mát thấp hơn và tiêu tốn điện năng nhiều hơn do giới hạn nhiệt độ làm mát [38]. Vì vậy, lựa chọn giữa tháp ướt và tháp khô cần cân nhắc dựa trên yêu cầu hiệu suất, nguồn nước sẵn có, chi phí vận hành và tác động môi trường.

Các ứng dụng giải nhiệt trong ngành năng lượng đang ngày càng đa dạng và phức tạp. Trong lĩnh vực năng lượng hạt nhân, hệ thống làm mát không chỉ đảm bảo hiệu suất vận hành mà còn đóng vai trò quan trọng trong an toàn hạt nhân. Các lò phản ứng thế hệ mới đang áp dụng công nghệ làm mát thụ động, sử dụng các nguyên lý vật lý tự nhiên để duy trì nhiệt độ an toàn ngay cả khi mất điện hoàn toàn.

Trong ngành năng lượng tái tạo, yêu cầu làm mát cũng đặt ra những thách thức riêng. Các trang trại điện mặt trời quy mô lớn cần hệ thống làm mát cho các biến tần (inverter) và hệ thống lưu trữ năng lượng. Nhiệt độ hoạt động của pin mặt trời ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất, với mỗi độ C tăng lên có thể làm giảm 0.4-0.5%



Hình 1.6: Tháp giải nhiệt ướt (trái) và tháp giải nhiệt khô (phải) [39]

công suất đầu ra. Do đó, các hệ thống làm mát tiên tiến như cooling fins thông minh và hệ thống tuần hoàn chất lỏng đang được nghiên cứu và triển khai rộng rãi.

Xu hướng thu nhỏ hoá trong công nghệ đang đặt ra những yêu cầu mới cho giải pháp làm mát. Các chip xử lý hiện đại có thể tạo ra mật độ nhiệt lên tới 1000W/cm^2 , vượt xa khả năng của các phương pháp làm mát truyền thống. Điều này đã thúc đẩy việc phát triển các công nghệ làm mát cách mạng như làm mát chip vi kẽm, làm mát bán dẫn và vật liệu biến đổi pha.

1.2.2 Cách mạng hóa hệ thống quản lý năng lượng thông minh

Sự tích hợp sâu sắc giữa IoT và trí tuệ nhân tạo đang tạo ra cuộc cách mạng trong quản lý hệ thống giải nhiệt công nghiệp, mang lại hiệu quả vận hành vượt trội so với các phương pháp truyền thống dựa trên kinh nghiệm và điều khiển thủ công. Hệ thống giám sát thời gian thực hiện đại tạo nên nền tảng công nghệ cho quản lý giải nhiệt thông minh, trong đó mạng lưới cảm biến được triển khai dày đặc với hàng nghìn điểm đo nhiệt độ, áp suất, lưu lượng và các thông số vật lý khác được phân bố khắp toàn bộ hệ thống. Công nghệ xử lý biên (edge computing) cho phép thực hiện phân tích dữ liệu và ra quyết định điều khiển theo thời gian thực ngay tại điểm thu thập dữ liệu, giảm thiểu độ trễ và nâng cao khả năng phản ứng của hệ thống. Đặc biệt, mô hình song sinh số (digital twins) cung cấp khả năng mô phỏng và dự báo chính xác hành vi của hệ thống thực tế, hỗ trợ tối ưu hóa chủ động và triển khai chiến lược bảo trì dự đoán hiệu quả.

Lợi ích kinh tế từ việc áp dụng hệ thống làm mát thông minh thể hiện rõ nét qua

khả năng tiết kiệm năng lượng đáng kể, với mức giảm tiêu thụ điện từ 20-40% so với các hệ thống truyền thống nhờ vào việc tối ưu hóa tự động các thông số vận hành theo điều kiện thực tế. Độ tin cậy vận hành được nâng cao một cách đáng kể thông qua việc triển khai bảo trì dự đoán dựa trên phân tích dữ liệu cảm biến, giúp giảm 30-50% thời gian ngừng hoạt động không kế hoạch và tối ưu hóa chu kỳ bảo trì. Tác động môi trường tích cực được thể hiện thông qua việc giảm dấu chân carbon từ tiết kiệm năng lượng và tối ưu hóa sử dụng tài nguyên nước trong quá trình vận hành hệ thống giải nhiệt.

Việc phát triển các công nghệ giải nhiệt thông minh, kết hợp IoT và AI, không chỉ cải thiện hiệu quả vận hành mà còn đóng góp quan trọng vào mục tiêu phát triển bền vững và trung hoà carbon của ngành năng lượng [40].

Xu hướng tương lai của công nghệ giải nhiệt thông minh sẽ tập trung vào ba hướng chính: tự động hóa hoàn toàn, tích hợp đa hệ thống và bền vững môi trường. Hệ thống làm mát tự trị sử dụng AI sẽ có khả năng tự điều chỉnh, tự chẩn đoán và thậm chí tự sửa chữa mà không cần can thiệp của con người. Các thuật toán học tăng cường (reinforcement learning) sẽ cho phép hệ thống học hỏi từ kinh nghiệm và liên tục cải thiện hiệu suất theo thời gian.

Công nghệ làm mát bằng nano chất lỏng (nanofluids) đang mở ra những khả năng mới cho việc nâng cao hiệu quả truyền nhiệt [41]. Bằng cách thêm các hạt nano kim loại hoặc carbon vào chất lỏng làm mát, có thể tăng hệ số dẫn nhiệt lên 20-40% so với chất lỏng truyền thống. Điều này đặc biệt hữu ích trong các ứng dụng yêu cầu mật độ nhiệt cao như làm mát CPU và GPU thế hệ mới.

Hệ thống làm mát thích ứng (adaptive cooling) sử dụng vật liệu thông minh có khả năng thay đổi tính chất vật lý theo nhiệt độ đang được nghiên cứu tích cực [42]. Các vật liệu này có thể tự động điều chỉnh khả năng dẫn nhiệt hoặc thay đổi hình dạng để tối ưu hóa luồng khí, tạo ra hệ thống làm mát "sống" có thể phản ứng tự động với các thay đổi về tải nhiệt.

Xu hướng tích hợp với hệ thống quản lý năng lượng tòa nhà (Building Energy Management System - BEMS) đang trở thành tiêu chuẩn mới. Hệ thống làm mát không còn hoạt động độc lập mà được tích hợp chặt chẽ với hệ thống chiếu sáng, thông gió và các thiết bị khác để tối ưu hóa tổng thể tiêu thụ năng lượng của toàn bộ tòa nhà hoặc khu vực công nghiệp.

1.2.3 Sự phát triển của các hệ thống điều khiển và giám sát công nghiệp

Lịch sử phát triển của các hệ thống điều khiển và giám sát công nghiệp từ xa bắt đầu từ những năm 1990 với sự ra đời của hệ thống SCADA (Supervisory Control

and Data Acquisition). Hệ thống SCADA được thiết kế như một giải pháp tập trung để điều khiển và giám sát các thiết bị công nghiệp phân tán trên diện rộng, cho phép các nhà vận hành theo dõi và điều khiển các quá trình sản xuất từ một trung tâm điều hành duy nhất [43].

Kiến trúc mạng của hệ thống SCADA truyền thông dựa trên mạng LAN (Local Area Network) để kết nối các thành phần với nhau, bao gồm các trạm điều khiển trung tâm, các bộ điều khiển logic khả trình (PLC), và các thiết bị đầu cuối từ xa (RTU - Remote Terminal Unit). Cấu trúc này cho phép thu thập dữ liệu từ hàng trăm điểm đo khác nhau và thực hiện điều khiển tự động dựa trên các logic được lập trình sẵn. Sự phát triển của công nghệ mạng Internet đã mở rộng khả năng của SCADA, với các nhà sản xuất PLC hàng đầu như Siemens, Allen-Bradley đã tích hợp các Web Server chuyên dụng cho phép truy cập và điều khiển hệ thống thông qua giao thức Internet Protocol.

Việc ứng dụng SCADA trong ngành công nghiệp đã mang lại những lợi ích kinh tế đáng kể và cải thiện hiệu quả vận hành toàn diện. Nâng cao năng suất sản xuất được thực hiện thông qua việc tự động hóa các quy trình và giảm thiểu thời gian chết máy do can thiệp thủ công. Chất lượng sản phẩm được cải thiện nhờ khả năng duy trì các thông số kỹ thuật ổn định và giảm biến động trong quá trình sản xuất. Chi phí vận hành và bảo trì được tối ưu hóa thông qua việc giám sát liên tục tình trạng thiết bị và thực hiện bảo trì dự đoán. Đặc biệt, việc giảm nhu cầu nhân lực trực tiếp tại hiện trường đã góp phần giảm đáng kể chi phí nhân công và nâng cao an toàn lao động trong môi trường công nghiệp nguy hiểm.

Tuy nhiên, các hệ thống SCADA truyền thông cũng bộc lộ những hạn chế nghiêm trọng trong bối cảnh công nghệ hiện đại. Tính linh hoạt trong lập trình và tùy chỉnh bị giới hạn bởi các giao diện mặc định và ngôn ngữ lập trình độc quyền của từng nhà sản xuất, tạo ra sự phụ thuộc công nghệ và hạn chế khả năng tích hợp với các hệ thống khác. Khả năng mở rộng và nâng cấp thường đòi hỏi chi phí cao và phức tạp về mặt kỹ thuật do cấu trúc khép kín của hệ thống. Giao diện người dùng thường cứng nhắc và không thể tùy chỉnh theo nhu cầu cụ thể của từng ứng dụng, làm giảm hiệu quả sử dụng và trải nghiệm người dùng.

Nhận thức về những hạn chế này đã thúc đẩy nhu cầu phát triển các giải pháp công nghệ mới có thể kế thừa những ưu điểm của SCADA trong khi khắc phục các nhược điểm cố hữu. Điều này dẫn đến sự ra đời của các nền tảng mở và linh hoạt hơn, cho phép lập trình tự do và thiết kế giao diện theo yêu cầu cụ thể mà không bị ràng buộc bởi các giới hạn của nhà sản xuất. Xu hướng này đã mở đường cho sự phát triển của công nghệ IoT hiện đại, với các vi điều khiển mã nguồn mở như

ESP32, Arduino cung cấp khả năng lập trình linh hoạt và tích hợp đa dạng các giao thức truyền thông.

Sự chuyển đổi từ SCADA truyền thống sang các giải pháp IoT hiện đại không chỉ mang tính cách mạng về công nghệ mà còn thay đổi căn bản mô hình kinh doanh và vận hành trong ngành công nghiệp [44]. Các hệ thống IoT hiện đại cung cấp khả năng tùy chỉnh cao, chi phí triển khai thấp hơn và khả năng tích hợp mượt mà với các công nghệ đám mây và phân tích dữ liệu lớn, tạo ra những cơ hội mới cho việc tối ưu hóa hiệu suất và phát triển các mô hình kinh doanh sáng tạo.

1.3 Định hướng và mục tiêu ứng dụng của đề tài

1.3.1 Xác định bài toán thực tiễn cần giải quyết

Trong bối cảnh chuyển đổi số và phát triển bền vững của ngành năng lượng, việc ứng dụng công nghệ IoT để giám sát và tối ưu hóa các hệ thống giải nhiệt trở nên vô cùng cấp thiết [45]. Các nhà máy điện, trung tâm dữ liệu và cơ sở công nghiệp hiện đang chịu áp lực ngày càng lớn về việc tiết kiệm năng lượng và giảm phát thải, không chỉ từ các quy định pháp luật mà còn từ các cam kết về phát triển bền vững của chính doanh nghiệp.

Tại Việt Nam, nhu cầu về các giải pháp giám sát và tối ưu hóa hệ thống giải nhiệt đang tăng mạnh do sự phát triển của các khu công nghiệp, trung tâm dữ liệu và nhà máy điện [45]. Theo báo cáo của Viện Năng lượng Việt Nam, ngành công nghiệp tiêu thụ khoảng 45% tổng điện năng quốc gia, trong đó hệ thống làm mát chiếm tỷ trọng đáng kể. Đặc biệt, với khí hậu nhiệt đới nóng ẩm, chi phí làm mát tại Việt Nam thường cao hơn 20-30% so với các quốc gia ôn đới.

Sự phát triển mạnh mẽ của ngành công nghệ thông tin tại Việt Nam, với việc các tập đoàn lớn như Google, Microsoft, Amazon đầu tư xây dựng trung tâm dữ liệu [46], [47], đã tạo ra nhu cầu cấp thiết về các giải pháp làm mát hiệu quả và thông minh. Các trung tâm dữ liệu này không chỉ cần đảm bảo hiệu suất cao mà còn phải tuân thủ các tiêu chuẩn quốc tế nghiêm ngặt về hiệu quả năng lượng (PUE - Power Usage Effectiveness).

Chi phí năng lượng dành cho làm mát đã chiếm tới 30-50% tổng chi phí vận hành hàng ngày tại nhiều cơ sở, tạo ra áp lực kinh tế đáng kể cho các doanh nghiệp. Thấp giải nhiệt, mặc dù là thiết bị quan trọng và chiếm phần lớn năng lượng tiêu thụ, nhưng thường thiếu các hệ thống giám sát thông minh và tối ưu hóa tự động. Việc vận hành không tối ưu, dựa trên kinh nghiệm và các tham số cố định, thường dẫn đến việc lãng phí năng lượng đáng kể và tăng không cần thiết chi phí bảo trì do thiếu thông tin về tình trạng thực tế của hệ thống.



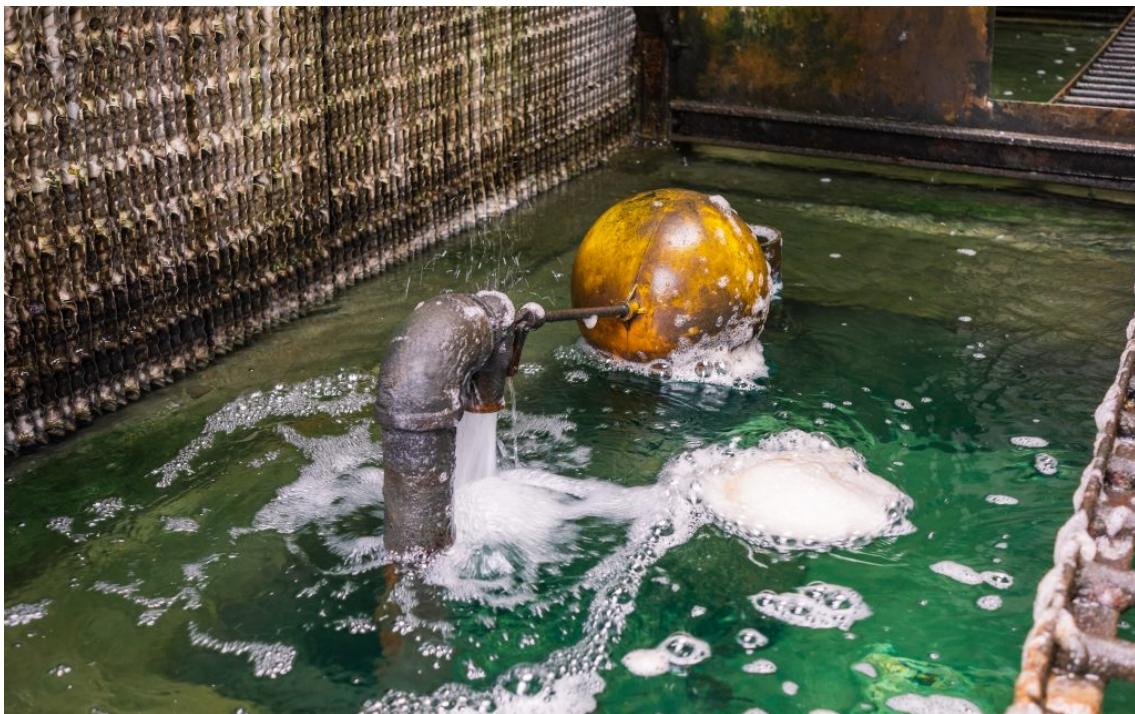
Hình 1.7: Hệ thống tháp giải nhiệt cho các trung tâm dữ liệu

a, Các hạn chế nghiêm trọng do thiếu hệ thống giám sát

Việc thiếu hệ thống giám sát tự động trong vận hành tháp giải nhiệt dẫn đến nhiều hậu quả nghiêm trọng về mặt kinh tế và kỹ thuật. Đầu tiên, vấn đề bảo trì thiếu khoa học là một trong những hạn chế lớn nhất. Khi không có dữ liệu thời gian thực về tình trạng thiết bị, các nhà vận hành thường áp dụng bảo trì theo lịch cố định hoặc bảo trì khắc phục sau khi sự cố đã xảy ra. Điều này dẫn đến việc thay thế linh kiện còn tốt một cách không cần thiết, hoặc ngược lại, để thiết bị hoạt động quá giới hạn an toàn gây hỏng hóc nghiêm trọng. Theo nghiên cứu của McKinsey, bảo trì dự đoán có thể giảm tới 30-50% chi phí bảo trì so với bảo trì theo lịch trình [20].

Ảnh hưởng của yếu tố thời tiết là một thách thức lớn khác khi thiếu hệ thống giám sát tự động. Nhiệt độ và độ ẩm môi trường thay đổi liên tục trong ngày và theo mùa, trực tiếp ảnh hưởng đến hiệu suất làm mát của tháp. Trong điều kiện nhiệt độ cao và độ ẩm thấp, tháp giải nhiệt có thể hoạt động hiệu quả hơn, nhưng ngược lại trong điều kiện nóng ẩm, hiệu suất giảm đáng kể. Khi không có hệ thống điều chỉnh tự động, vận hành viên thường không kịp thời thay đổi các tham số vận hành như tốc độ quạt, lưu lượng nước tuần hoàn, dẫn đến việc tiêu thụ năng lượng không tối ưu. Nghiên cứu cho thấy sự thay đổi 5°C nhiệt độ môi trường có thể làm thay đổi hiệu suất tháp giải nhiệt lên tới 15-20%.

Hiện tượng bám bẩn và tắc nghẽn là một vấn đề quan trọng khác thường bị bỏ qua khi thiếu giám sát liên tục. Cặn bẩn, tảo và các chất lỏng đọng tích tụ dần trên bề mặt đệm làm mát, ống dẫn nước và cánh quạt. Quá trình này diễn ra từ từ và không dễ quan sát bằng mắt thường, nhưng có tác động nghiêm trọng đến hiệu



Hình 1.8: Bám bẩn do cáu cặn trong tháp giải nhiệt

suất. Lớp cặn bẩn dày chỉ 1mm có thể giảm 10-15% khả năng truyền nhiệt. Khi không có hệ thống giám sát áp suất, nhiệt độ và lưu lượng, việc phát hiện sự suy giảm hiệu suất này thường muộn màng, khi thiệt hại đã trở nên đáng kể.

Vận hành không tối ưu theo điều kiện tải là hạn chế khác của việc thiếu tự động hóa. Trong thực tế, nhu cầu làm mát thay đổi liên tục theo chu kỳ sản xuất, thời gian trong ngày và điều kiện vận hành của nhà máy. Tuy nhiên, nhiều tháp giải nhiệt được vận hành ở mức công suất cố định, thường là công suất thiết kế tối đa để đảm bảo an toàn. Điều này dẫn đến việc lãng phí năng lượng nghiêm trọng trong những thời điểm nhu cầu làm mát thấp. Ví dụ, trong ca đêm hoặc cuối tuần khi sản xuất giảm, việc duy trì tháp giải nhiệt ở công suất cao là hoàn toàn không cần thiết nhưng vẫn tiêu tốn điện năng đáng kể cho quạt và bơm nước.

Thiếu dữ liệu để phân tích và cải tiến là một hạn chế dài hạn không kém quan trọng. Khi không có hệ thống thu thập dữ liệu liên tục, các kỹ sư vận hành không thể phân tích xu hướng hiệu suất, xác định các pattern vận hành tối ưu, hay đánh giá hiệu quả của các biện pháp cải tiến. Điều này dẫn đến việc các quyết định vận hành thường dựa trên kinh nghiệm chủ quan thay vì dữ liệu khách quan, hạn chế khả năng cải thiện liên tục hiệu suất hệ thống.

Cuối cùng, rủi ro sự cố và downtime không được kiểm soát là hệ quả nghiêm trọng nhất của việc thiếu giám sát. Khi các thông số vận hành như nhiệt độ, áp suất, độ rung không được theo dõi liên tục, các dấu hiệu báo trước sự cố thường bị bỏ

qua. Điều này có thể dẫn đến những sự cố nghiêm trọng như cháy motor quạt, vỡ ống dẫn nước, hoặc hư hỏng đệm làm mát, gây ngừng sản xuất và tổn thất kinh tế lớn. Trong ngành công nghiệp, mỗi giờ ngừng sản xuất có thể gây thiệt hại hàng nghìn đến hàng triệu USD tùy theo quy mô và tính chất sản xuất.

Các hệ thống giám sát tháp giải nhiệt truyền thống thường có giá thành rất đắt đỏ và đòi hỏi kiến thức chuyên sâu để cài đặt và vận hành, không phù hợp với nguồn lực của nhiều doanh nghiệp. Hiện tại vẫn thiếu các giải pháp IoT tối ưu chi phí dành riêng cho các doanh nghiệp vừa và nhỏ, những đối tượng chiếm phần lớn thị trường nhưng lại có nguồn lực đầu tư hạn chế.

1.3.2 Cơ hội phát triển và tiềm năng ứng dụng IoT

Sự phát triển vượt bậc của công nghệ cảm biến trong thập kỷ qua đã tạo ra cơ hội độc đáo cho việc xây dựng các hệ thống giám sát thông minh với chi phí hợp lý. Cảm biến IoT hiện đại không chỉ ngày càng có giá thành rẻ hơn (giảm hơn 80% trong 10 năm qua) mà còn có độ chính xác cao hơn và tiết kiệm năng lượng đáng kể.

Các vi điều khiển hiện đại như ESP32 đã cung cấp khả năng xử lý mạnh mẽ tương đương với các máy tính nhỏ nhưng với giá thành chỉ vài USD, cho phép thực hiện các tính toán phức tạp trực tiếp tại thiết bị. Công nghệ kết nối không dây như WiFi đã trở nên phổ biến và ổn định, cho phép triển khai các hệ thống IoT một cách linh hoạt và không cần hạ tầng cáp mạng phức tạp.

Xu hướng mã nguồn mở và bình dân hóa của công nghệ đã tạo ra cơ hội đặc biệt cho việc phát triển các giải pháp IoT dễ tiếp cận. Các platform IoT mã nguồn mở như Arduino, và các framework như InfluxDB, Grafana đang phát triển mạnh mẽ với sự đóng góp từ hàng triệu developer trên toàn thế giới. Chi phí triển khai các giải pháp IoT dựa trên mã nguồn mở đã giảm đáng kể, đôi khi chỉ bằng 5-10% so với các giải pháp thương mại tương đương.

Sự hội tụ của các công nghệ mới như 5G, WiFi 6, và LoRaWAN đã tạo ra cơ hội đặc biệt cho việc triển khai các hệ thống IoT quy mô lớn với độ tin cậy cao. Mạng 5G với độ trễ thấp (sub-millisecond) và khả năng kết nối hàng triệu thiết bị trên km² đặc biệt phù hợp cho các ứng dụng giám sát thời gian thực trong môi trường công nghiệp khắc nghiệt.

Việt Nam đang trong giai đoạn chuyển đổi số mạnh mẽ với sự hỗ trợ của chính phủ thông qua chiến lược quốc gia về chuyển đổi số đến 2030 [48]. Điều này tạo ra môi trường thuận lợi cho việc phát triển và ứng dụng các giải pháp IoT trong ngành năng lượng. Các ưu đãi về thuế, hỗ trợ nghiên cứu phát triển và các chương trình

đối tác công tư đang tạo điều kiện cho sự phát triển của ngành công nghệ IoT trong nước.

Xu hướng phát triển bền vững và ESG (Environmental, Social, and Governance - Môi trường, Xã hội và Quản trị) ngày càng được các doanh nghiệp chú trọng [49], tạo động lực mạnh mẽ cho việc đầu tư vào các công nghệ giúp giảm tiêu thụ năng lượng và phát thải carbon. Các tập đoàn đa quốc gia hoạt động tại Việt Nam thường có các mục tiêu trung hòa carbon rất tham vọng, đòi hỏi việc áp dụng các công nghệ tiên tiến để tối ưu hóa hiệu suất năng lượng.

1.3.3 Mục tiêu, phạm vi và đóng góp dự kiến của đề tài

Đồ án này hướng tới việc phát triển một hệ thống giám sát thông minh cho tháp giải nhiệt ứng dụng công nghệ IoT hiện đại, với mục tiêu chính là xây dựng nền tảng công nghệ có khả năng tính toán và đánh giá hiệu suất cũng như công suất tháp giải nhiệt trong thời gian thực. Hệ thống được thiết kế để giám sát liên tục và tự động các thông số vận hành quan trọng bao gồm nhiệt độ và độ ẩm không khí môi trường, nhiệt độ nước đầu vào và đầu ra của tháp, cùng với lưu lượng nước tuần hoàn trong hệ thống nhằm tính toán chính xác hiệu suất làm mát và công suất giải nhiệt theo các phương pháp kỹ thuật tiêu chuẩn. Định hướng nghiên cứu tập trung vào việc phát triển giải pháp IoT có tính khả thi cao về mặt kinh tế, sử dụng vi điều khiển mã nguồn mở kết hợp với hệ thống cảm biến chính xác cao để tạo ra một nền tảng giám sát toàn diện nhưng vẫn đảm bảo tối ưu chi phí triển khai cho các ứng dụng thực tế trong môi trường công nghiệp.

Phạm vi nghiên cứu của đồ án bao gồm hai thành phần chính. Thứ nhất là thiết kế và triển khai hệ thống giám sát IoT thời gian thực với khả năng thu thập dữ liệu liên tục và tính toán tự động hiệu suất làm mát, công suất giải nhiệt cũng như các chỉ số hiệu quả khác theo thời gian thực. Thứ hai là chế tạo một mô hình tháp giải nhiệt mini để ứng dụng và kiểm chứng hệ thống giám sát IoT trong điều kiện thực tế, đồng thời mô phỏng và quan sát sự suy giảm công suất giải nhiệt cũng như hiệu suất làm mát theo thời gian. Mô hình này cũng cho phép nghiên cứu ảnh hưởng của các điều kiện môi trường như nhiệt độ và độ ẩm đến hiệu suất tháp giải nhiệt, từ đó tạo dữ liệu thực nghiệm để phát triển và tối ưu hóa các thuật toán tính toán.

Mô hình tháp giải nhiệt mini sẽ được thiết kế với các thành phần cơ bản của một tháp giải nhiệt thực tế bao gồm hệ thống phân phối nước, đệm làm mát, quạt thông gió và bể chứa nước, cho phép mô phỏng chân thực quá trình truyền nhiệt và truyền chất. Hệ thống sẽ tích hợp các thuật toán tính toán để đánh giá hiệu suất, bao gồm tính toán nhiệt độ bầu ướt, xác định chênh lệch nhiệt độ tiếp cận của tháp giải nhiệt, tính toán công suất giải nhiệt dựa trên lưu lượng và độ chênh nhiệt độ

nước, đánh giá hiệu suất làm mát cũng như phân tích xu hướng suy giảm hiệu suất theo thời gian và điều kiện vận hành.

Đồ án dự kiến mang lại những đóng góp quan trọng về mặt kỹ thuật thông qua việc xây dựng platform giám sát IoT tổng thể sử dụng các công nghệ mã nguồn mở như ESP32, InfluxDB và Grafana, tạo ra giải pháp tối ưu chi phí có thể áp dụng rộng rãi. Việc ứng dụng và phát triển các thuật toán tính toán thời gian thực chuyên biệt cho tháp giải nhiệt, thiết kế mô hình tháp mini với khả năng mô phỏng chân thực và tích hợp hệ thống cảm biến đa thông số sẽ góp phần nâng cao hiểu biết về hiệu suất tháp giải nhiệt.

Về mặt nghiên cứu khoa học, đồ án sẽ tiến hành nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của các điều kiện môi trường đến hiệu suất tháp giải nhiệt, phân tích và mô hình hóa sự suy giảm hiệu suất theo thời gian trong điều kiện vận hành thực tế. Đồng thời, đồ án sẽ phát triển phương pháp đánh giá hiệu suất dựa trên dữ liệu thời gian thực từ IoT và xây dựng cơ sở dữ liệu thực nghiệm về hiệu suất tháp giải nhiệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới, điều này có giá trị đặc biệt quan trọng cho các ứng dụng tại Việt Nam và khu vực Đông Nam Á.

Về mặt ứng dụng thực tiễn, đồ án hướng tới tạo ra giải pháp giám sát tháp giải nhiệt với chi phí đầu tư thấp, phù hợp cho các doanh nghiệp vừa và nhỏ, cung cấp công cụ đánh giá hiệu suất thời gian thực giúp tối ưu hóa vận hành và tiết kiệm năng lượng. Hệ thống cảnh báo sớm cho việc bảo trì và khắc phục sự cố tháp giải nhiệt sẽ được phát triển, tạo nền tảng cho việc nghiên cứu và phát triển các hệ thống giải nhiệt thông minh trong tương lai.

Về mặt tác động dự kiến, đồ án sẽ cung cấp một mô hình nghiên cứu hoàn chỉnh về tháp giải nhiệt, từ thiết kế phần cứng, phát triển phần mềm đến thu thập và phân tích dữ liệu thực nghiệm. Hệ thống cho phép nghiên cứu chi tiết các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất làm mát và phát triển các chiến lược tối ưu hóa. Đồ án tạo ra một giải pháp có thể nhân rộng cho các cơ sở công nghiệp, trung tâm dữ liệu và nhà máy điện, với khả năng tiết kiệm 10-20% năng lượng tiêu thụ cho làm mát và giảm đáng kể chi phí bảo trì thông qua việc phát hiện sớm các vấn đề hiệu suất. Đồ án có tính ứng dụng cao và phù hợp với xu hướng chuyển đổi số trong ngành năng lượng, góp phần nâng cao hiệu quả năng lượng và bảo vệ môi trường, đồng thời tạo ra giải pháp tối ưu chi phí cho các doanh nghiệp Việt Nam trong bối cảnh phát triển bền vững.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1 Cơ sở lý thuyết về tháp giải nhiệt

2.1.1 Nguyên lý truyền nhiệt và truyền khói

Hoạt động của tháp giải nhiệt dựa trên nguyên lý kết hợp giữa truyền nhiệt và truyền khói, trong đó quá trình làm mát nước được thực hiện thông qua hai cơ chế chính: truyền nhiệt hiện và truyền nhiệt ẩn [32].

Truyền nhiệt hiện xảy ra do sự chênh lệch nhiệt độ giữa nước nóng và không khí lạnh. Khi nước có nhiệt độ cao hơn không khí tiếp xúc trực tiếp, nhiệt lượng được truyền từ nước sang không khí theo định luật Fourier về dẫn nhiệt. Quá trình này tuân theo phương trình:

$$Q_{\text{hiện}} = h_c \cdot A \cdot (T_{\text{nước}} - T_{\text{không khí}}) \quad (2.1)$$

Trong đó:

- h_c : hệ số truyền nhiệt đối lưu ($W/m^2 \cdot K$)
- A : diện tích tiếp xúc (m^2)
- $(T_{\text{nước}} - T_{\text{không khí}})$: chênh lệch nhiệt độ (K hoặc $^\circ C$)

Truyền nhiệt ẩn là cơ chế quan trọng hơn, xảy ra khi một phần nước bay hơi vào không khí. Quá trình bay hơi đòi hỏi năng lượng (nhiệt ẩn hóa hơi), năng lượng này được lấy từ khói nước còn lại, làm giảm nhiệt độ của nó. Truyền khói nước từ pha lỏng sang pha khí được mô tả bởi:

$$\dot{m}_{\text{bay hơi}} = h_m \cdot A \cdot (W_{\text{bão hòa}} - W_{\text{không khí}}) \quad (2.2)$$

Trong đó:

- h_m : hệ số truyền khói ($kg/(m^2 \cdot s)$)
- $W_{\text{bão hòa}}$: độ ẩm tuyệt đối của không khí bão hòa tại nhiệt độ nước ($kg_{\text{hơi}}/kg_{\text{không khí}}$)
- $W_{\text{không khí}}$: độ ẩm tuyệt đối của không khí xung quanh ($kg_{\text{hơi}}/kg_{\text{không khí}}$)

Sự kết hợp của hai cơ chế này tạo nên hiệu quả làm mát vượt trội của tháp giải nhiệt. Khác với các hệ thống trao đổi nhiệt thông thường chỉ dựa vào truyền nhiệt hiện, tháp giải nhiệt có thể đạt được nhiệt độ nước ra thấp hơn nhiệt độ không khí xung quanh nhờ vào quá trình bay hơi. Giới hạn lý thuyết thấp nhất mà nhiệt độ nước có thể đạt được chính là nhiệt độ bầu ướt của không khí, một thông số quan

trọng sẽ được phân tích chi tiết trong phần tiếp theo.

2.1.2 Nhiệt độ bầu ướt

Nhiệt độ bầu ướt (T_w) là thông số nhiệt động học cơ bản, được định nghĩa là nhiệt độ thấp nhất mà một khối không khí có thể đạt được thông qua quá trình bay hơi đoạn nhiệt tại áp suất không đổi. Về mặt vật lý, đây chính là nhiệt độ mà nhiệt kế có bầu được bọc bằng vải ướt đo được khi không khí lưu thông qua với tốc độ đủ lớn để loại bỏ ảnh hưởng của bức xạ và dẫn nhiệt.

Đối với tháp giải nhiệt, nhiệt độ bầu ướt đóng vai trò là giới hạn nhiệt động học tuyệt đối của quá trình làm mát. Theo nguyên lý cân bằng nhiệt và khói, nhiệt độ nước ra khỏi tháp (T_{out}) không thể thấp hơn nhiệt độ bầu ướt không khí vào (T_w), bất kể diện tích trao đổi nhiệt hay thời gian tiếp xúc. Chênh lệch ($T_{out} - T_w$) được gọi là "approach", thể hiện mức độ tiến gần đến giới hạn lý thuyết của thiết bị.

Trong các hệ thống giám sát tự động, việc xác định nhiệt độ bầu ướt từ các thông số đo được trực tiếp là cần thiết. Công thức thực nghiệm của Stull [50] cung cấp phương pháp tính toán chính xác với sai số nhỏ hơn 0.3°C trong điều kiện khí hậu nhiệt đới:

$$\begin{aligned} T_w = & T \cdot \tan \left[0.151977 \cdot (RH\% + 8.313659)^{1/2} \right] + \tan(T + RH\%) \\ & - \tan(RH\% - 1.676331) + 0.00391838 \cdot (RH\%)^{3/2} \cdot \tan(0.023101 \cdot RH\%) \\ & - 4.686035 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Trong đó:

- T_w : Nhiệt độ bầu ướt ($^{\circ}\text{C}$).
- T : Nhiệt độ bầu khô (nhiệt độ không khí) ($^{\circ}\text{C}$).
- $RH\%$: Độ ẩm tương đối tính bằng phần trăm (ví dụ, 60% thì nhập vào công thức là 60).
- \tan : Là hàm lượng giác ngược của tang (arc tangent), kết quả của hàm này trong công thức được tính bằng radian.

Lưu ý: Công thức này cho kết quả chính xác nhất trong khoảng nhiệt độ từ -20°C đến 50°C và độ ẩm tương đối từ 5% đến 99%.

2.1.3 Công suất làm mát và hiệu suất của tháp giải nhiệt

Công suất làm mát của tháp giải nhiệt là một chỉ số quan trọng để đánh giá hiệu quả hoạt động của thiết bị. Nó được xác định dựa trên sự chênh lệch nhiệt độ giữa nước vào và nước ra khỏi tháp, cùng với lưu lượng nước tuần hoàn trong hệ thống. Công thức tính công suất làm mát được biểu diễn như sau:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (2.4)$$

Trong đó:

- Q : Công suất làm mát của tháp giải nhiệt (W).
- \dot{m} : Lưu lượng nước tuần hoàn trong hệ thống (kg/s).
- C_p : Nhiệt dung riêng của nước (J/(kg · K)), giá trị khoảng 4186J/(kg · K) ở 25°C).
- T_{in} : Nhiệt độ nước vào tháp giải nhiệt (°C).
- T_{out} : Nhiệt độ nước ra tháp giải nhiệt (°C).

Hiệu suất làm mát của tháp giải nhiệt được định lượng thông qua hiệu suất nhiệt (η), biểu thị tỷ lệ giữa nhiệt lượng thực tế được loại bỏ và nhiệt lượng lý thuyết tối đa có thể loại bỏ trong điều kiện vận hành cho trước:

$$\eta = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_w} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

Trong đó tử số $(T_{in} - T_{out})$ là khoảng nhiệt độ thực tế (Range), còn mẫu số $(T_{in} - T_w)$ là khoảng nhiệt độ lý thuyết tối đa. Hiệu suất này phụ thuộc vào hai thông số vận hành chính: Range và Approach ($T_{out} - T_w$).

Mỗi quan hệ giữa Range và Approach thể hiện sự đánh đổi cơ bản trong thiết kế tháp giải nhiệt. Approach nhỏ (dưới 3°C) chỉ ra thiết kế có diện tích trao đổi nhiệt lớn, đạt hiệu suất cao nhưng chi phí đầu tư tăng theo hàm mũ. Ngược lại, Approach lớn (trên 8°C) cho phép thiết kế kinh tế nhưng hiệu suất giảm đáng kể. Trong vận hành, giá trị Approach tăng theo thời gian do tích tụ cặn bẩn trên bề mặt đệm, làm suy giảm hệ số truyền nhiệt tổng thể và chỉ báo nhu cầu bảo trì.

2.2 Phân tích nhu cầu giám sát hệ thống tháp giải nhiệt

2.2.1 Các thông số cần giám sát

Để đánh giá hiệu quả hoạt động của tháp giải nhiệt và tính toán các chỉ số quan trọng như công suất làm mát và hiệu suất, cần giám sát liên tục các thông số sau:

Trong quá trình giám sát tháp giải nhiệt, cần theo dõi liên tục năm thông số cơ bản để đảm bảo hiệu quả hoạt động và khả năng tính toán chính xác các chỉ số hiệu suất [32]. **Nhiệt độ nước vào tháp giải nhiệt** (T_{in}) là thông số đầu tiên và quan trọng nhất, đại diện cho nhiệt độ của dòng nước nóng từ các thiết bị công nghiệp cần làm mát trước khi đi vào tháp, ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng truyền nhiệt và hiệu suất tổng thể của hệ thống. Tương ứng, **nhiệt độ nước ra tháp giải nhiệt** (T_{out}) thể hiện kết quả quá trình làm mát, và chênh lệch giữa hai giá trị T_{in} và T_{out} chính là cơ sở để xác định công suất làm mát thực tế mà tháp đang cung cấp. **Nhiệt độ không khí xung quanh** (T_{air}) là yếu tố môi trường quan trọng, tạo ra điều kiện ban đầu cho quá trình trao đổi nhiệt và là thành phần cần thiết trong các tính toán nhiệt độ bầu ướt. Cùng với nhiệt độ không khí, **độ ẩm tương đối không khí** (RH) đóng vai trò quyết định trong việc tính toán nhiệt độ bầu ướt, một thông số lý thuyết quan trọng để đánh giá giới hạn thấp nhất mà nhiệt độ nước có thể đạt được. Cuối cùng, **lưu lượng nước tuần hoàn** (m) là thông số không thể thiếu trong công thức tính toán công suất làm mát, đảm bảo việc đánh giá chính xác năng lực thực tế của hệ thống giải nhiệt.

2.2.2 Tầm quan trọng của việc giám sát liên tục

Việc giám sát liên tục các thông số vận hành của tháp giải nhiệt đóng vai trò then chốt trong việc duy trì và nâng cao hiệu suất tổng thể của hệ thống [32], [40]. Hệ thống giám sát trực tuyến cho phép phát hiện sớm các dấu hiệu suy giảm hiệu suất, từ đó đội ngũ kỹ sư vận hành có thể kịp thời triển khai các biện pháp điều chỉnh phù hợp, chẳng hạn như thay đổi lưu lượng không khí thông qua quạt, điều chỉnh lưu lượng nước tuần hoàn hoặc thực hiện bảo trì đối với các bộ phận quan trọng [51].

Bên cạnh đó, giám sát liên tục mang lại lợi ích trực tiếp trong việc tiết kiệm năng lượng, nhờ cung cấp dữ liệu vận hành chính xác để điều chỉnh thông số nhằm đạt hiệu suất tối ưu với mức tiêu thụ điện năng tối thiểu [2]. Hơn nữa, việc theo dõi xu hướng biến đổi của các thông số quan trọng giúp hiện thực hóa chiến lược bảo trì dự báo¹, cho phép dự đoán chính xác thời điểm cần bảo trì, từ đó giảm thiểu sự cố hỏng hóc bất ngờ, hạn chế tối đa thời gian ngừng hoạt động và chi phí sửa chữa [28].

Ngoài ra, giám sát liên tục còn hỗ trợ tuân thủ các quy định của cơ quan quản lý về môi trường và an toàn lao động, thông qua khả năng tự động ghi nhận và báo cáo các thông số môi trường trọng yếu, đặc biệt là nhiệt độ nước thải và mức độ

¹Bảo trì dự báo (predictive maintenance) là phương pháp sử dụng dữ liệu cảm biến và các thuật toán phân tích để dự đoán trước các hỏng hóc tiềm ẩn, từ đó lên kế hoạch bảo trì chủ động, giảm thiểu thời gian ngừng hoạt động và chi phí sửa chữa.

ảnh hưởng đến môi trường xung quanh [38]. Cuối cùng, việc lưu trữ và phân tích dữ liệu lịch sử cho phép các chuyên gia đánh giá sự biến động hiệu suất theo mùa, điều kiện thời tiết, tải vận hành và các yếu tố ảnh hưởng khác, qua đó xây dựng kế hoạch vận hành dài hạn và tối ưu hóa hiệu quả tổng thể [17], [42].

2.2.3 Yêu cầu đối với hệ thống giám sát

Dựa trên phân tích nhu cầu và tính chất của môi trường tháp giải nhiệt, hệ thống giám sát cần đáp ứng các yêu cầu sau:

a, Yêu cầu về độ chính xác

Hệ thống giám sát cần đảm bảo độ chính xác phù hợp với từng loại thông số đo lường. Đối với đo nhiệt độ, yêu cầu độ chính xác trong khoảng $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ đến $\pm 1^{\circ}\text{C}$ để đảm bảo các tính toán hiệu suất và công suất làm mát có độ tin cậy cao. Đo độ ẩm tương đối cần đạt độ chính xác từ $\pm 2\%$ đến $\pm 5\%$ để hỗ trợ tính toán nhiệt độ bầu ướt chính xác. Đối với lưu lượng nước, mức độ chính xác $\pm 5\%$ đến $\pm 10\%$ là chấp nhận được cho các ứng dụng công nghiệp, đảm bảo tính toán công suất và hiệu suất với độ tin cậy phù hợp.

b, Yêu cầu về môi trường hoạt động

Tháp giải nhiệt vận hành trong môi trường khắc nghiệt, đòi hỏi các thiết bị giám sát phải có khả năng chống chịu tốt. Khả năng chống ẩm ướt và bụi bẩn là yêu cầu cơ bản do môi trường xung quanh tháp thường có hơi nước và các hạt bụi từ quá trình bay hơi. Thiết bị cần hoạt động ổn định trong khoảng nhiệt độ rộng từ 0°C đến 60°C để thích ứng với sự biến động theo mùa và điều kiện vận hành khác nhau. Đặc biệt quan trọng, hệ thống phải chịu được môi trường có độ ẩm rất cao, có thể lên đến 95%, một điều kiện thường xuyên xảy ra ở khu vực gần tháp giải nhiệt do quá trình bay hơi liên tục.

c, Yêu cầu về truyền thông và xử lý dữ liệu

Hệ thống truyền thông và xử lý dữ liệu cần đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật để đảm bảo hoạt động hiệu quả và tin cậy. Khả năng truyền dữ liệu không dây là yêu cầu thiết yếu để giảm thiểu chi phí lắp đặt, đặc biệt quan trọng trong môi trường công nghiệp nơi việc kéo cáp mạng có thể gặp nhiều khó khăn và tốn kém. Tần suất thu thập dữ liệu phù hợp trong khoảng mỗi 1-5 phút cần được lựa chọn để cân bằng giữa việc nắm bắt được các biến động quan trọng và tránh quá tải dữ liệu. Khả năng lưu trữ dữ liệu lịch sử dài hạn là cần thiết để phân tích xu hướng, đánh giá hiệu suất theo thời gian và hỗ trợ việc ra quyết định dài hạn. Cuối cùng, giao diện người dùng cần được thiết kế trực quan và dễ sử dụng, cho phép theo dõi và phân tích dữ liệu thời gian thực một cách hiệu quả.

d, Yêu cầu về kinh tế và bảo trì

Các yếu tố kinh tế và bảo trì đóng vai trò quyết định trong việc lựa chọn và triển khai hệ thống giám sát. Chi phí đầu tư hợp lý là yêu cầu cơ bản để đảm bảo tính khả thi của dự án, đặc biệt đối với các doanh nghiệp vừa và nhỏ có ngân sách hạn chế. Tiêu thụ năng lượng thấp của hệ thống giám sát không chỉ giúp giảm chi phí vận hành mà còn phù hợp với xu hướng tiết kiệm năng lượng và bảo vệ môi trường. Khả năng dễ dàng bảo trì và thay thế là yếu tố quan trọng để giảm thiểu thời gian ngừng hoạt động và chi phí nhân công chuyên môn. Cuối cùng, khả năng mở rộng hệ thống khi cần thiết đảm bảo đầu tư dài hạn và khả năng thích ứng với sự phát triển của quy mô hoạt động.

2.2.4 Tiêu chí lựa chọn công nghệ và thiết bị

Việc lựa chọn công nghệ và thiết bị cho hệ thống giám sát cần cân nhắc các tiêu chí sau:

a, Về phần cứng

Lựa chọn phần cứng cho hệ thống giám sát cần đảm bảo tính phù hợp với môi trường làm việc khắc nghiệt. Vì điều khiển cần có khả năng kết nối không dây tích hợp, đủ tài nguyên xử lý để thực hiện tính toán cơ bản và hỗ trợ nhiều giao diện cảm biến khác nhau. Cảm biến phải đạt độ chính xác phù hợp với yêu cầu, có khả năng chống chịu môi trường khắc nghiệt, giao diện kết nối đơn giản và giá thành hợp lý. Hệ thống nguồn cấp điện cần đảm bảo tiêu thụ điện năng thấp, khả năng hoạt động liên tục 24/7 và có thể sử dụng nguồn dự phòng khi cần thiết.

b, Về phần mềm

Các yêu cầu về phần mềm tập trung vào tính hiệu quả và khả năng mở rộng. Giao thức truyền thông cần phù hợp cho ứng dụng IoT với đặc điểm tiêu thụ băng thông thấp và hỗ trợ nhiều thiết bị kết nối đồng thời. Cơ sở dữ liệu phải được tối ưu cho dữ liệu theo thời gian, có khả năng lưu trữ lớn và hiệu suất truy vấn cao để xử lý khối lượng dữ liệu lớn từ các cảm biến. Giao diện người dùng cần thiết kế trực quan, dễ sử dụng và hỗ trợ hiển thị đa dạng bao gồm biểu đồ, bảng số liệu và hệ thống cảnh báo.

Dựa trên các tiêu chí trên, việc lựa chọn cụ thể các thiết bị và công nghệ sẽ được trình bày chi tiết trong chương tiếp theo, cùng với quá trình thiết kế và triển khai hệ thống giám sát hoàn chỉnh.

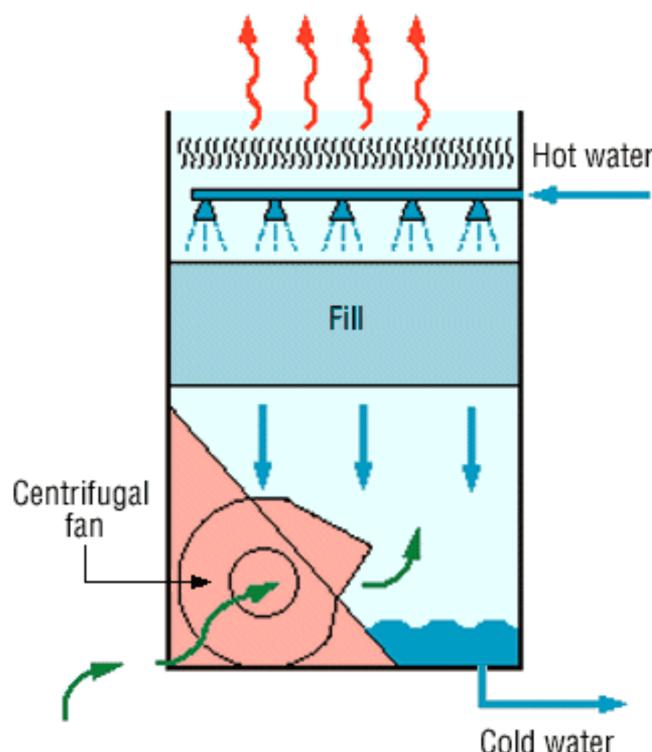
2.3 Phân loại và đặc điểm tháp giải nhiệt

2.3.1 Phân loại theo hướng dòng khí

Tháp giải nhiệt có thể được phân loại dựa trên nhiều tiêu chí kỹ thuật khác nhau, phản ánh sự đa dạng về cấu hình và nguyên lý vận hành của thiết bị [33]. Trong số đó, tiêu chí phân loại theo hướng chuyển động của dòng không khí là một trong những phương pháp được sử dụng rộng rãi và có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Tiêu chí này không chỉ đóng vai trò quyết định đối với đặc điểm thiết kế kết cấu của tháp mà còn tác động trực tiếp đến hiệu suất trao đổi nhiệt, tổn thất năng lượng, cũng như chi phí vận hành và bảo trì.

a, Tháp giải nhiệt đối lưu cưỡng bức

Tháp giải nhiệt đối lưu cưỡng bức sử dụng quạt để đẩy không khí vào tháp từ phía dưới. Quạt thường được đặt ở đáy tháp, tạo ra dòng khí đi từ dưới lên trên, ngược chiều với dòng nước rơi xuống [35].



Hình 2.1: Tháp giải nhiệt đối lưu cưỡng bức [31]

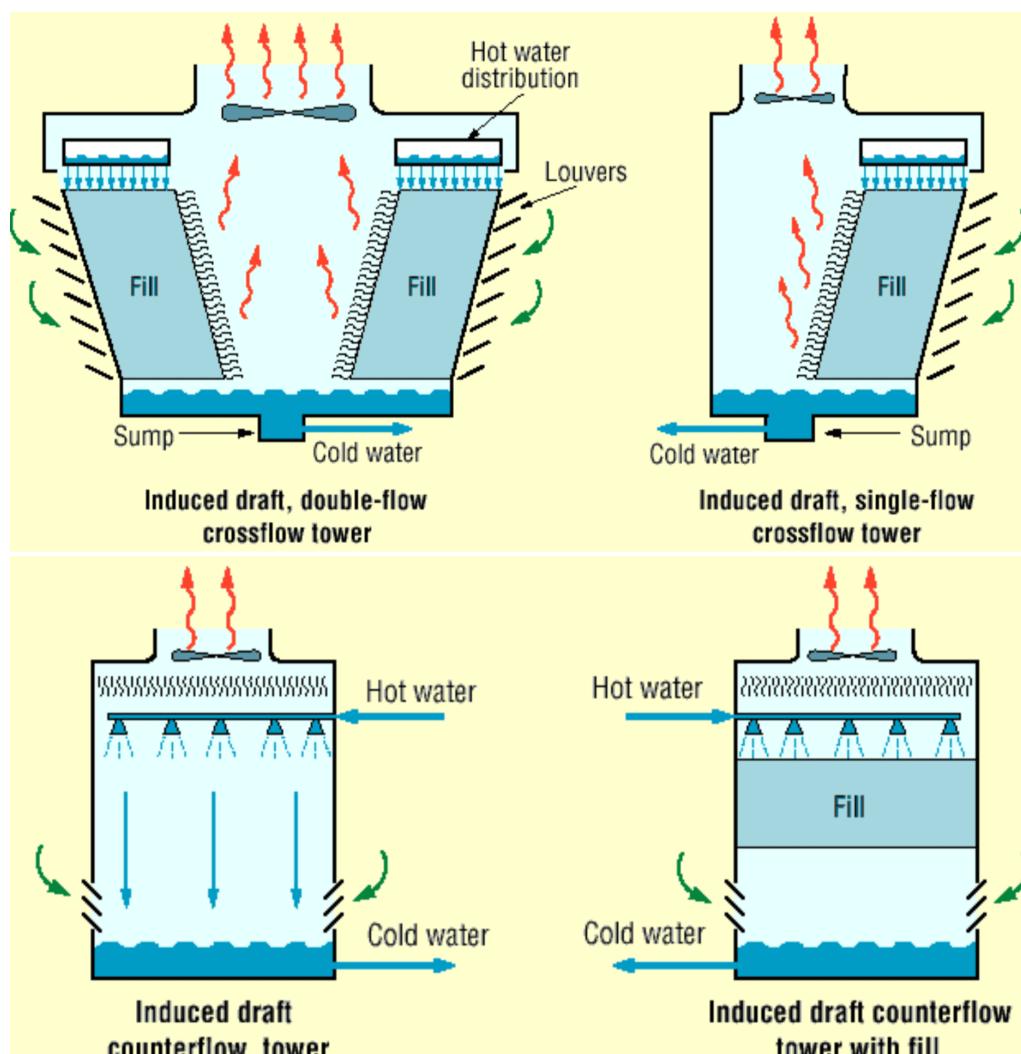
Tháp giải nhiệt đối lưu cưỡng bức có nhiều ưu điểm nổi bật trong thiết kế và vận hành. Khả năng kiểm soát tốt lưu lượng không khí cho phép điều chỉnh chính xác hiệu suất làm mát theo nhu cầu thực tế. Loại tháp này ít bị ảnh hưởng bởi gió bên ngoài nhờ vào cơ chế đẩy không khí từ phía dưới, tạo ra dòng khí ổn định và không phụ thuộc vào điều kiện thời tiết. Việc bảo trì quạt cũng trở nên dễ dàng hơn do vị trí thuận tiện ở đáy tháp, giảm thời gian và chi phí bảo trì. Ngoài ra, thiết kế này

còn mang lại sự phân bố không khí đều hơn trên toàn bộ diện tích tháp, đảm bảo hiệu quả truyền nhiệt tối ưu.

Tuy nhiên, loại tháp này cũng tồn tại những hạn chế nhất định. Tiêu thụ năng lượng cao hơn là nhược điểm chính do quạt phải làm việc chống lại áp suất tĩnh của cả tổng thể tháp, đòi hỏi công suất lớn hơn so với loại hút khí. Hiện tượng tái tuần hoàn khí nóng ẩm có thể xảy ra trong một số điều kiện đặc biệt, khi khí đã qua quá trình làm mát bị hút trở lại vào đầu vào của tháp, làm giảm hiệu quả tổng thể. Những yếu tố này dẫn đến chi phí vận hành tương đối cao hơn so với các loại tháp khác, đặc biệt trong các ứng dụng vận hành liên tục.

b, Tháp giải nhiệt đối lưu hút

Tháp giải nhiệt đối lưu hút sử dụng quạt để hút không khí ra khỏi tháp từ phía trên. Quạt được đặt ở đỉnh tháp, tạo ra lực hút để không khí được đưa vào từ các bên và đi ra từ trên [35].



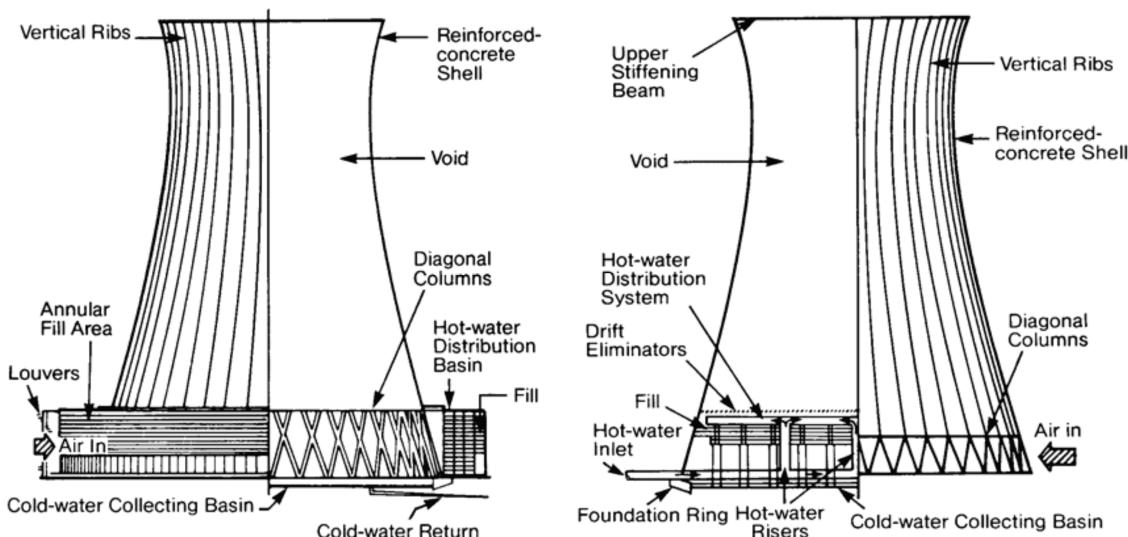
Hình 2.2: Một số kiểu tháp giải nhiệt đối lưu hút : Tháp giải nhiệt đối lưu ngược dòng (trên) và tháp giải nhiệt đối lưu dòng ngang (dưới) [31]

Tháp giải nhiệt đồi lưu hút thể hiện những ưu thế vượt trội về hiệu quả năng lượng và chất lượng vận hành. Hiệu suất năng lượng cao hơn so với loại cưỡng bức là ưu điểm nổi bật nhất, do quạt chỉ cần vượt qua áp suất của phần đệm và không phải chống lại toàn bộ áp suất tĩnh của tháp. Hiện tượng tái tuần hoàn khí nóng ẩm cũng ít xảy ra hơn nhờ vào cơ chế hút khí từ trên xuống, tạo ra vận tốc khí thoát cao và giảm khả năng khí đã xử lý trở lại vào hệ thống. Sự phân bố nhiệt độ không khí đều ra đều hơn cũng là một lợi thế quan trọng, giúp đảm bảo hiệu quả làm mát đồng đều trên toàn bộ diện tích. Đặc biệt, loại tháp này còn giúp giảm nguy cơ đóng băng ở các vùng khí hậu lạnh do khí nóng ẩm được hút ra nhanh chóng.

Mặt khác, loại tháp này cũng có những hạn chế riêng cần được cân nhắc. Việc bảo trì quạt trở nên khó khăn hơn do vị trí cao ở đỉnh tháp, đòi hỏi thiết bị chuyên dụng và kỹ năng an toàn cao của nhân viên bảo trì. Hệ thống cũng dễ bị ảnh hưởng bởi gió ngang, có thể làm thay đổi hướng dòng khí và ảnh hưởng đến hiệu suất. Cuối cùng, sự phân bố không khí vào có thể không đều do lực hút từ trên xuống, đặc biệt ở các vùng gần thành tháp, có thể tạo ra các vùng chêt hoặc lưu lượng khí thấp.

c, Tháp giải nhiệt thông gió tự nhiên

Loại tháp này không sử dụng quạt mà dựa vào hiệu ứng ống khói tự nhiên. Không khí nóng nhẹ hơn sẽ tự động bốc lên, tạo ra dòng đồi lưu tự nhiên [34].



Hình 2.3: Hai dạng cấu hình chủ yếu của tháp giải nhiệt đồi lưu tự nhiên: (trái) tháp dòng ngang, trong đó không khí lưu thông theo phương ngang so với dòng nước rơi; và (phải) tháp dòng ngược, trong đó không khí lưu thông theo phương ngược chiều với dòng nước [31]

Tháp giải nhiệt thông gió tự nhiên có những ưu điểm vượt trội về mặt kinh tế và môi trường. Loại tháp này không tiêu thụ năng lượng cho quạt, dẫn đến chi phí

vận hành rất thấp và thân thiện với môi trường. Tiếng ồn được giảm thiểu đáng kể do không có thiết bị cơ khí hoạt động, tạo môi trường làm việc yên tĩnh. Độ tin cậy cao cũng là một ưu điểm quan trọng nhờ vào cấu trúc đơn giản với ít thiết bị cơ khí phức tạp, giảm nguy cơ hỏng hóc và nhu cầu bảo trì.

Tuy nhiên, loại tháp này cũng tồn tại những hạn chế đáng kể trong thiết kế và vận hành. Hiệu suất làm mát thường thấp hơn so với các loại tháp có quạt do phụ thuộc hoàn toàn vào dòng đối lưu tự nhiên. Kích thước tháp thường rất lớn để đảm bảo đủ diện tích trao đổi nhiệt, dẫn đến việc chiếm nhiều diện tích xây dựng. Hiệu suất hoạt động phụ thuộc mạnh vào điều kiện thời tiết như nhiệt độ, độ ẩm và tốc độ gió, khiến việc dự đoán và kiểm soát năng suất làm mát trở nên khó khăn.

2.3.2 Phân loại theo kiểu tiếp xúc nước-không khí

a, Tháp giải nhiệt tiếp xúc trực tiếp

Trong loại tháp này, nước và không khí tiếp xúc trực tiếp với nhau. Nước được phun ra thành giọt hoặc tạo thành màng mỏng để tăng diện tích tiếp xúc.

Cơ chế truyền nhiệt trong tháp giải nhiệt tiếp xúc trực tiếp bao gồm ba quá trình đồng thời: truyền nhiệt hiện do chênh lệch nhiệt độ giữa nước và không khí, truyền nhiệt ẩn do bay hơi một phần nước vào không khí, và truyền khói do khuếch tán hơi nước vào không khí khô [32]. Sự kết hợp của ba cơ chế này tạo nên hiệu quả làm mát vượt trội so với các phương pháp truyền nhiệt đơn thuần.

Loại tháp này được ứng dụng phổ biến trong các hệ thống HVAC, nhà máy điện và công nghiệp hóa chất nhờ hiệu suất cao và chi phí vận hành hợp lý.

b, Tháp giải nhiệt tiếp xúc gián tiếp

Nước cần làm mát được tuần hoàn trong hệ thống ống kín, không tiếp xúc trực tiếp với không khí. Việc trao đổi nhiệt diễn ra qua thành ống.

Tháp giải nhiệt tiếp xúc gián tiếp có những ưu điểm vượt trội về chất lượng nước và độ bền hệ thống. Nước không bị ô nhiễm do được cách ly hoàn toàn với môi trường bên ngoài, đồng thời không có hiện tượng mất nước do bay hơi. Điều này làm cho loại tháp này đặc biệt phù hợp với các ứng dụng yêu cầu nước có chất lượng cao như trong công nghiệp dược phẩm hoặc thực phẩm. Hơn nữa, hệ thống ít tạo cặn và ăn mòn do nước được bảo vệ trong môi trường kín.

Tuy nhiên, loại tháp này cũng có những hạn chế đáng kể. Hiệu suất làm mát thấp hơn so với loại tiếp xúc trực tiếp do thiếu cơ chế truyền nhiệt ẩn từ quá trình bay hơi. Chi phí đầu tư cao hơn đáng kể do cần hệ thống ống dẫn phức tạp và thiết bị trao đổi nhiệt chuyên dụng. Kích thước tháp cũng lớn hơn để đạt được cùng năng suất làm mát so với loại tiếp xúc trực tiếp.

2.3.3 Phân loại theo vật liệu đệm

a, Tháp giải nhiệt dạng phun

Sử dụng các thanh gỗ hoặc nhựa được sắp xếp theo từng tầng để tạo ra nhiều bậc rơm cho nước. Khi nước rò qua các bậc này, nó bị tách thành những giọt nhỏ, tăng diện tích tiếp xúc với không khí [36].

Tháp giải nhiệt dạng phun có những đặc điểm kỹ thuật phù hợp với nhiều điều kiện vận hành khác nhau. Loại tháp này đặc biệt phù hợp với nước có độ ô nhiễm cao do cấu trúc mỏ và không gian rộng giữa các thanh đệm. Việc vệ sinh và bảo trì trở nên dễ dàng nhờ thiết kế đơn giản và khả năng tiếp cận tốt. Khả năng chống tắc nghẽn vượt trội là một ưu điểm quan trọng, đặc biệt trong các môi trường có nhiều cặn bẩn hoặc chất rắn lơ lửng. Tuy nhiên, hiệu suất làm mát chỉ ở mức trung bình do diện tích tiếp xúc hạn chế so với các loại đệm hiện đại khác.

b, Tháp giải nhiệt dạng màng

Sử dụng các tấm nhựa định hình đặc biệt để tạo thành những màng nước mỏng chảy xuồng. Điều này tạo ra diện tích tiếp xúc rất lớn giữa nước và không khí [36].

Tháp giải nhiệt dạng màng đại diện cho công nghệ tiên tiến nhất trong thiết kế đệm làm mát. Hiệu suất của loại tháp này là cao nhất trong các loại tháp giải nhiệt nhờ diện tích tiếp xúc riêng rất lớn giữa nước và không khí. Thiết kế tấm nhựa định hình đặc biệt tạo ra hàng nghìn màng nước mỏng, tối đa hóa quá trình truyền nhiệt và truyền khói. Tuy nhiên, loại đệm này đòi hỏi nước sạch với ít cặn bẩn để duy trì hiệu suất tối ưu. Nhược điểm chính là dễ bị tắc nghẽn nếu nước có độ ô nhiễm cao, đòi hỏi hệ thống xử lý nước nghiêm ngặt và bảo trì định kỳ tần suất cao.

2.4 Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất tháp giải nhiệt

2.4.1 Yếu tố khí tượng

a, Nhiệt độ bầu ướt không khí

Nhiệt độ bầu ướt là yếu tố quan trọng nhất quyết định hiệu suất của tháp giải nhiệt. Nó đại diện cho giới hạn lý thuyết thấp nhất mà nhiệt độ nước có thể đạt được [32].

Ảnh hưởng của nhiệt độ bầu ướt đến hiệu suất tháp giải nhiệt có tính chất quyết định. Khi nhiệt độ bầu ướt thấp, hiệu suất làm mát sẽ cao do chênh lệch nhiệt độ lớn giữa nước nóng và giới hạn làm mát lý thuyết. Chênh lệch giữa nhiệt độ nước ra và nhiệt độ bầu ướt được gọi là "approach" - một thông số quan trọng trong thiết kế tháp. Approach nhỏ cho thấy thiết kế tháp hiệu quả hơn, tuy nhiên điều này đồng nghĩa với chi phí đầu tư cao hơn do cần diện tích trao đổi nhiệt lớn hơn.

Biến đổi theo mùa của nhiệt độ bầu ướt tạo ra sự thay đổi đáng kể trong hiệu

suất thấp giải nhiệt. Mùa đông với nhiệt độ bầu ướt thấp tạo điều kiện thuận lợi cho hiệu suất làm mát cao. Ngược lại, mùa hè với nhiệt độ bầu ướt cao làm giảm đáng kể hiệu suất làm mát. Đặc biệt, mùa mưa với độ ẩm không khí cao sẽ làm tăng nhiệt độ bầu ướt, từ đó hạn chế khả năng làm mát của tháp.

b, Tốc độ và hướng gió

Gió tự nhiên có thể tích cực hoặc tiêu cực đến hoạt động của tháp giải nhiệt:

Gió tự nhiên có ảnh hưởng đa chiều đến hoạt động của tháp giải nhiệt, vừa mang lại lợi ích vừa tạo ra thách thức. Về mặt tích cực, gió nhẹ giúp thổi bay khí nóng ẩm ra khỏi tháp một cách tự nhiên, tăng lưu lượng không khí qua tháp và giảm hiện tượng tái tuần hoàn khí đã qua xử lý. Điều này có thể cải thiện hiệu suất làm mát mà không cần tăng công suất quạt.

Tuy nhiên, gió cũng có thể gây ra những ảnh hưởng tiêu cực đáng kể. Gió mạnh có thể làm giảm lưu lượng không khí qua tháp do tạo ra áp suất ngược. Gió ngang đặc biệt có hại khi có thể tạo ra vùng áp suất âm ở một bên tháp, làm giảm hiệu suất tổng thể. Trong điều kiện gió bất lợi, hiện tượng tái tuần hoàn khí nóng ẩm có thể xảy ra nghiêm trọng, làm giảm đáng kể khả năng làm mát của hệ thống.

2.4.2 Yếu tố thiết kế

a, Tỷ lệ L/G (Liquid to Gas ratio)

Tỷ lệ giữa lưu lượng khối lượng nước và không khí là một thông số thiết kế quan trọng [36]:

$$L/G = \frac{\dot{m}_{nước}}{\dot{m}_{không khí}} \quad (2.6)$$

Ảnh hưởng của tỷ lệ L/G đến hiệu suất và tiêu thụ năng lượng có tính chất đánh đổi quan trọng trong thiết kế tháp. Tỷ lệ L/G cao sẽ mang lại hiệu suất làm mát cao do tăng cường truyền nhiệt, nhưng đồng thời đòi hỏi tiêu thụ năng lượng quạt lớn để duy trì lưu lượng không khí cần thiết. Ngược lại, tỷ lệ L/G thấp giúp tiết kiệm năng lượng đáng kể nhưng với cái giá là hiệu suất làm mát giảm. Trong thực tế, tỷ lệ tối ưu thường được thiết kế trong khoảng 1.0 đến 1.5 để cân bằng giữa hiệu suất và tiết kiệm năng lượng.

b, Chiều cao và diện tích tháp

Các thông số hình học của tháp giải nhiệt có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất và đặc tính vận hành [33]. Chiều cao tháp quyết định thời gian tiếp xúc giữa nước và không khí - tăng chiều cao sẽ cải thiện hiệu suất do thời gian trao đổi nhiệt dài hơn. Diện tích mặt cắt của tháp quyết định tốc độ không khí đi qua, ảnh hưởng trực

tiếp đến hiệu suất truyền nhiệt và mức độ rơi nước. Thể tích đệm cũng đóng vai trò quan trọng khi tăng thể tích đệm sẽ tăng diện tích tiếp xúc riêng, từ đó nâng cao hiệu quả truyền nhiệt tổng thể.

2.4.3 Yếu tố vận hành

a, Chất lượng nước

Chất lượng nước tuần hoàn đóng vai trò then chốt trong việc duy trì hiệu suất và kéo dài tuổi thọ vận hành của tháp giải nhiệt [32], [38]. Nước sử dụng trong hệ thống thường chứa nhiều tạp chất vô cơ, hữu cơ và hóa chất xử lý, mỗi loại đều có thể gây ảnh hưởng tiêu cực đến quá trình trao đổi nhiệt và độ bền của thiết bị.

Độ cứng của nước là một yếu tố quan trọng, phản ánh nồng độ các ion canxi (Ca^{2+}) và magiê (Mg^{2+}). Nồng độ cao các ion này dễ dẫn đến sự hình thành cặn bám trên bề mặt khói đệm và các bộ phận trao đổi nhiệt, làm giảm diện tích tiếp xúc hiệu quả giữa nước và không khí, từ đó suy giảm hệ số truyền nhiệt tổng thể [31]. Để khắc phục, cần áp dụng các biện pháp xử lý làm mềm nước hoặc thực hiện vệ sinh định kỳ theo lịch trình nghiêm ngặt.

Chất rắn lơ lửng (Suspended Solids – SS) trong nước cũng là nguyên nhân gây ra nhiều vấn đề vận hành nghiêm trọng. Các hạt rắn này có xu hướng tích tụ thành cặn bẩn, gây tắc nghẽn hệ thống phân phối nước, dẫn đến phân bố nước không đồng đều trên bề mặt đệm, làm giảm hiệu quả trao đổi nhiệt [32]. Hậu quả là tăng tần suất bảo trì, gia tăng chi phí vận hành và thời gian ngừng hoạt động ngoài kế hoạch.

Thành phần hóa học của nước cần được kiểm soát chặt chẽ. Clo dư (residual chlorine) với nồng độ cao có thể gây ăn mòn các bộ phận kim loại, trong khi giá trị pH không phù hợp sẽ ảnh hưởng bất lợi đến cả kim loại và vật liệu phi kim của tháp [38]. Do đó, việc giám sát và điều chỉnh các thông số hóa học của nước đầu vào là yêu cầu bắt buộc nhằm đảm bảo tuổi thọ thiết bị, hạn chế sự cố và duy trì hiệu suất vận hành tối ưu.

b, Tần suất và chất lượng bảo trì

Bảo trì tháp giải nhiệt đòi hỏi một chương trình toàn diện bao gồm nhiều hoạt động chuyên biệt [38]. Vệ sinh đệm phải được thực hiện định kỳ để loại bỏ cặn bẩn, tảo và vi khuẩn tích tụ theo thời gian. Kiểm tra quạt bao gồm các hoạt động cân bằng, bôi trơn và thay thế các bộ phận khi cần thiết để đảm bảo hoạt động ổn định. Hệ thống phân phối nước cần được duy trì để đảm bảo sự phân phối đều trên toàn bộ diện tích đệm. Cuối cùng, xử lý nước là hoạt động liên tục bao gồm kiểm soát pH, độ cứng và nồng độ chất khử trùng trong giới hạn cho phép.

2.5 Phương pháp đánh giá hiệu suất tháp giải nhiệt

2.5.1 Các chỉ số hiệu suất quan trọng

a, Chỉ số hiệu suất chuẩn hóa

Ngoài hiệu suất nhiệt cơ bản đã trình bày trong phần 2.1.3, việc đánh giá hiệu suất tháp giải nhiệt còn sử dụng các chỉ số chuẩn hóa để so sánh với điều kiện thiết kế và tiêu chuẩn ngành:

$$\eta_{\text{norm}} = \frac{\eta_{\text{thực tế}}}{\eta_{\text{thiết kế}}} \times 100\% \quad (2.7)$$

Chỉ số này cho phép đánh giá mức độ suy giảm hiệu suất so với điều kiện thiết kế ban đầu. Giá trị $\eta_{\text{norm}} < 85\%$ thường chỉ báo cần bảo trì hoặc kiểm tra hệ thống.

b, Hệ số truyền nhiệt tổng thể

Hệ số này phản ánh khả năng truyền nhiệt của toàn bộ hệ thống [36]:

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{lm}} \quad (2.8)$$

Trong đó:

- U : Hệ số truyền nhiệt tổng thể ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
- Q : Công suất truyền nhiệt (W)
- A : Diện tích truyền nhiệt (m^2)
- ΔT_{lm} : Chênh lệch nhiệt độ trung bình logarit (K)

Hệ số U là thước đo quan trọng để đánh giá hiệu quả trao đổi nhiệt của toàn bộ hệ thống.

c, Số đơn vị truyền nhiệt (Number of Transfer Units - NTU)

NTU (Number of Transfer Units) là một thông số không thứ nguyên rất quan trọng trong thiết kế tháp giải nhiệt. Thông số này phản ánh mức độ hiệu quả của quá trình truyền khói (trao đổi nhiệt và ẩm) giữa nước và không khí bên trong tháp. Giá trị NTU càng lớn thì khả năng truyền khói càng cao, đồng nghĩa với hiệu suất làm mát tốt hơn. NTU cũng là cơ sở kỹ thuật để xác định kích thước tối ưu của tháp giải nhiệt, đảm bảo đáp ứng yêu cầu vận hành thực tế.

$$\text{NTU} = \frac{K \cdot a \cdot V}{L} \quad (2.9)$$

Trong đó:

- K : Hệ số truyền khối tổng thể
- a : Diện tích riêng của đệm (m^2/m^3)
- V : Thể tích đệm (m^3)
- L : Lưu lượng nước (kg/s)

2.5.2 Phương pháp đo đặc và thử nghiệm

a, Tiêu chuẩn thử nghiệm

Việc đánh giá hiệu suất của tháp giải nhiệt cần được thực hiện theo các tiêu chuẩn quốc tế nhằm đảm bảo tính khách quan, độ tin cậy và khả năng so sánh kết quả giữa các hệ thống khác nhau.

Tiêu chuẩn ASME PTC 23 [32] đưa ra một khung hướng dẫn toàn diện cho việc thử nghiệm và đánh giá hiệu suất của tháp giải nhiệt. Tiêu chuẩn này quy định cụ thể phương pháp thử nghiệm chuẩn, các điều kiện vận hành tiêu chuẩn cần thiết, cũng như các yêu cầu về thu thập, xử lý và phân tích dữ liệu. Đồng thời, ASME PTC 23 cũng nêu rõ các tiêu chí để hiệu chỉnh số liệu và đánh giá sai số đo, nhằm đảm bảo kết quả phản ánh chính xác đặc tính vận hành thực tế của tháp.

Tiêu chuẩn CTI ATC-105 [33] là tiêu chuẩn quốc tế chuyên biệt hướng dẫn chi tiết quy trình thử nghiệm nghiệm thu hiệu suất tháp giải nhiệt nước. Tiêu chuẩn này quy định rõ các điều kiện thử nghiệm, phương pháp đo lường các thông số vận hành chính (nhiệt độ, lưu lượng nước, lưu lượng không khí, điều kiện môi trường), yêu cầu về độ chính xác và hiệu chuẩn thiết bị đo, cũng như các bước xử lý và phân tích số liệu để xác định hiệu suất thực tế của tháp. CTI ATC-105 nhấn mạnh việc kiểm soát sai số đo và đánh giá độ không đảm bảo đo, đồng thời yêu cầu thực hiện kiểm tra lặp lại để đảm bảo tính tin cậy và khả năng tái lập của kết quả. Tiêu chuẩn này thường được áp dụng trong giai đoạn nghiệm thu, bàn giao thiết bị mới hoặc sau khi cải tạo lớn, là cơ sở kỹ thuật để so sánh hiệu suất thực tế với các thông số cam kết của nhà sản xuất, và là tài liệu tham chiếu bắt buộc trong các hợp đồng EPC hoặc bảo hành hiệu suất.

b, Hệ thống đo lường và thu thập dữ liệu

Hệ thống đo lường cho đánh giá hiệu suất tháp giải nhiệt phải đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật nghiêm ngặt về độ chính xác và độ tin cậy. Đo nhiệt độ sử dụng cảm biến nhiệt điện trở (RTD) loại Pt100 với độ chính xác $\pm 0.1^\circ\text{C}$ cho các điểm đo quan trọng, đặc biệt tại đầu vào và đầu ra nước. Việc bố trí nhiều điểm đo tại mỗi vị trí và tính giá trị trung bình giúp giảm thiểu sai số do phân bố nhiệt độ không đồng đều.

Đo lưu lượng nước áp dụng lưu lượng kế điện từ² với độ chính xác $\pm 1\%$ của thang đo, đặt tại vị trí có dòng chảy ổn định, tránh các vùng nhiễu động. Lưu lượng không khí được xác định thông qua đo tốc độ tại nhiều điểm trên mặt cắt tháp bằng anemometer nhiệt³ và tích phân trên toàn bộ diện tích.

Hệ thống thu thập dữ liệu tự động với tần suất lấy mẫu 1–5 Hz đảm bảo nắm bắt được các biến động ngắn hạn, đồng thời tích hợp bộ lọc nhiễu và thuật toán xác thực dữ liệu để loại bỏ các giá trị bất thường.

2.5.3 Phân tích dữ liệu và đánh giá kết quả

a, Xử lý và chuẩn hóa dữ liệu

Dữ liệu thô từ hệ thống đo lường cần được xử lý qua các bước chuẩn hóa để đảm bảo chất lượng phân tích. Thuật toán phát hiện ngoại lệ sử dụng phương pháp thống kê (Z-score hoặc IQR) [52] để loại bỏ các giá trị nằm ngoài khoảng tin cậy 99.7%. Bộ lọc Kalman⁴ được áp dụng để làm mịn dữ liệu nhiệt độ, trong khi bộ lọc trung bình trượt có trọng số được sử dụng cho dữ liệu lưu lượng.

Hiệu chuẩn dữ liệu theo điều kiện chuẩn là bước thiết yếu để so sánh hiệu suất giữa các thời điểm khác nhau. Các thông số được chuẩn hóa về điều kiện nhiệt độ bầu ướt thiết kế ($T_{wb,design} = 27^\circ\text{C}$) và tải nhiệt định mức theo công thức hiệu chỉnh của CTI.

b, Phân tích thống kê và dự báo xu hướng

Phân tích chuỗi thời gian áp dụng mô hình ARIMA⁵ [53] để xác định xu hướng suy giảm hiệu suất dài hạn và dự báo nhu cầu bảo trì. Hệ số tương quan Pearson⁶ được tính toán giữa hiệu suất tháp và các biến môi trường (nhiệt độ bầu ướt, tốc độ gió, tải nhiệt) để định lượng mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố.

Phân tích hồi quy đa biến xây dựng mô hình dự báo hiệu suất dạng:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 T_{wb} + \beta_2 Q_{load} + \beta_3 v_{wind} + \varepsilon \quad (2.10)$$

²Lưu lượng kế điện từ (Electromagnetic flowmeter): thiết bị đo lưu lượng chất lỏng dựa trên nguyên lý cảm ứng điện từ, thường dùng cho nước dẫn điện.

³Anemometer nhiệt (Hot-wire anemometer): thiết bị đo tốc độ gió dựa trên sự thay đổi điện trở của dây nung khi không khí đi qua.

⁴Bộ lọc Kalman (Kalman filter): thuật toán lọc tối ưu dùng để ước lượng trạng thái của hệ động lực tuyến tính từ dữ liệu đo nhiễu, thường được ứng dụng để làm mịn và dự báo chuỗi số liệu thời gian.

⁵Mô hình ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average): là mô hình dự báo chuỗi thời gian kết hợp ba thành phần: tự hồi quy (AR), sai phân (I) và trung bình trượt (MA), thường được sử dụng để phân tích và dự báo các dữ liệu có tính chu kỳ hoặc xu hướng.

⁶Hệ số tương quan Pearson: $r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$ với x_i, y_i là các giá trị quan sát, \bar{x}, \bar{y} là giá trị trung bình. Hệ số r nằm trong khoảng $[-1, +1]$, với $|r| > 0.7$ được coi là tương quan mạnh [50].

trong đó các hệ số β_i được ước lượng bằng phương pháp bình phương tối thiểu, cho phép dự báo hiệu suất trong các điều kiện vận hành khác nhau.

c, Đánh giá kết quả và khuyến nghị kỹ thuật

Báo cáo đánh giá hiệu suất tuân thủ cấu trúc chuẩn gồm: (1) Tóm tắt điều kiện thử nghiệm và phương pháp đo; (2) Bảng tổng hợp các chỉ số hiệu suất so với giá trị thiết kế; (3) Biểu đồ xu hướng hiệu suất theo thời gian; (4) Phân tích nguyên nhân sai lệch; (5) Ma trận đánh giá rủi ro vận hành.

Khuyến nghị kỹ thuật được phân loại theo mức độ ưu tiên: **Khẩn cấp** (hiệu suất < 70% thiết kế) yêu cầu dừng vận hành ngay lập tức; **Cao** (70-85%) cần bảo trì trong vòng 7 ngày; **Trung bình** (85-95%) lập kế hoạch bảo trì trong tháng; **Thấp** (>95%) duy trì theo lịch định kỳ. Mỗi khuyến nghị kèm theo ước tính chi phí và thời gian thực hiện.

2.6 Ứng dụng IoT trong giám sát tháp giải nhiệt

2.6.1 Xu hướng số hóa trong công nghiệp

a, Industry 4.0 và Internet of Things

Cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 đang thúc đẩy việc số hóa các quy trình công nghiệp, trong đó IoT đóng vai trò quan trọng trong việc kết nối và giám sát thiết bị [21]. Đối với tháp giải nhiệt, IoT mang lại nhiều lợi ích:

Kết nối thông minh trong hệ thống IoT cho tháp giải nhiệt mang lại khả năng giám sát liên tục 24/7 mà không cần can thiệp của con người, thu thập dữ liệu đa thông số đồng thời từ nhiều cảm biến khác nhau [19]. Hệ thống có thể truyền dữ liệu thời gian thực qua mạng không dây đến trung tâm điều khiển và tích hợp hoàn toàn với hệ thống quản lý tòa nhà để tối ưu hóa tổng thể.

Phân tích dữ liệu lớn đóng vai trò quan trọng trong việc khai thác giá trị từ khối lượng dữ liệu khổng lồ được thu thập liên tục [54]. Hệ thống có khả năng phát hiện các mảnh và xu hướng ẩn trong dữ liệu, dự báo chính xác hiệu suất và nhu cầu bảo trì, đồng thời tối ưu hóa vận hành dựa trên các thuật toán học máy tiên tiến.

b, Lợi ích kinh tế của giám sát IoT

Lợi ích kinh tế từ việc áp dụng giám sát IoT cho tháp giải nhiệt rất đáng kể và có thể đo lường được [20]. Về tiết kiệm chi phí vận hành, hệ thống có thể giảm 10–30% tiêu thụ năng lượng thông qua tối ưu hóa thông minh, giảm 25–50% chi phí bảo trì nhờ khả năng bảo trì dự báo, tăng 15–25% tuổi thọ thiết bị qua giám sát liên tục và giảm đáng kể thời gian downtime không kế hoạch.

Cải thiện hiệu quả vận hành là một lợi ích quan trọng khác của hệ thống IoT. Độ

chính xác của phép đo và điều khiển được nâng cao đáng kể, khả năng phản ứng nhanh với những thay đổi trong điều kiện vận hành được cải thiện, tối ưu hóa theo thời gian thực trở thành khả thi, và hệ thống có thể tích hợp mượt mà với các hệ thống điều khiển tự động khác.

2.7 Thực trạng và công nghệ hiện tại trong giám sát tháp giải nhiệt

2.7.1 Phân tích thực trạng giám sát hiện tại

Trong bối cảnh công nghiệp hiện tại, đa số các hệ thống tháp giải nhiệt vẫn được vận hành theo phương pháp truyền thống với mức độ tự động hóa và giám sát hạn chế [51]. Phương pháp giám sát chủ yếu dựa vào kiểm tra định kỳ bằng nhân lực, sử dụng các thiết bị đo đơn lẻ không kết nối mạng, và ghi chép dữ liệu thủ công. Cách tiếp cận này không chỉ tốn kém nhân lực mà còn dẫn đến việc phát hiện chậm các vấn đề vận hành, từ đó ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu suất tổng thể và tuổi thọ thiết bị.

Theo nghiên cứu của McKinsey [20], chỉ có khoảng 25–30% các cơ sở công nghiệp trên toàn cầu đã triển khai hệ thống giám sát tự động cho các thiết bị trao đổi nhiệt, trong đó tháp giải nhiệt chiếm tỷ lệ thấp hơn do tính phức tạp của môi trường vận hành. Tại các quốc gia đang phát triển như Việt Nam, tỷ lệ này còn thấp hơn đáng kể, phần lớn do hạn chế về ngân sách đầu tư, thiếu nhân lực chuyên môn và chưa có chính sách khuyến khích rõ ràng từ phía nhà nước [45].

Thách thức lớn nhất trong việc áp dụng hệ thống giám sát hiện đại là sự thiếu hiểu biết về lợi ích kinh tế dài hạn từ phía các nhà quản lý. Nhiều doanh nghiệp vẫn tập trung vào chi phí đầu tư ban đầu mà chưa tính toán đầy đủ lợi ích từ việc tiết kiệm năng lượng, giảm chi phí bảo trì và tăng tuổi thọ thiết bị [2]. Điều này dẫn đến tình trạng nhiều tháp giải nhiệt hoạt động không hiệu quả, tiêu tốn nhiều năng lượng hơn cần thiết và thường xuyên gặp sự cố do thiếu giám sát kịp thời.

2.7.2 Công nghệ cảm biến và vi điều khiển

Sự phát triển nhanh chóng của công nghệ cảm biến trong những năm gần đây đã mở ra nhiều cơ hội nâng cao chất lượng giám sát và điều khiển tháp giải nhiệt. Các cảm biến nhiệt độ hiện đại, chẳng hạn như DS18B20 và DHT22, không chỉ có độ chính xác cao mà còn đáp ứng tốt yêu cầu vận hành trong môi trường công nghiệp khắc nghiệt [32]. Cảm biến DS18B20 có độ chính xác điển hình $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ trong khoảng -10°C đến $+85^{\circ}\text{C}$, dải đo mở rộng từ -55°C đến $+125^{\circ}\text{C}$, phù hợp cho đo nhiệt độ nước tuần hoàn trong tháp [55]. Cảm biến DHT22 ngoài khả năng đo nhiệt độ với độ chính xác tương đương, còn có thể đo độ ẩm tương đối với sai số điển hình $\pm 2\%$ đến $\pm 5\%$ RH trong khoảng 0–100% RH, hữu ích cho việc xác định nhiệt độ bầu ướt [56].

Về vi điều khiển, dòng ESP32 của Espressif đã trở thành lựa chọn phổ biến trong các ứng dụng IoT công nghiệp nhờ khả năng tích hợp Wi-Fi và Bluetooth, bộ xử lý hai nhân với xung nhịp lên đến 240 MHz, tài nguyên bộ nhớ RAM tích hợp khoảng 520 KB, cùng chi phí hợp lý [19], [57]. Vi điều khiển này có thể thu thập đồng thời dữ liệu từ nhiều cảm biến, thực hiện các tính toán cơ bản tại thiết bị (ví dụ: tính toán nhiệt độ bầu ướt, hiệu suất làm mát) và truyền dữ liệu thời gian thực tới hệ thống giám sát trung tâm. Khả năng lập trình linh hoạt cho phép tùy chỉnh thuật toán xử lý dữ liệu phù hợp với từng ứng dụng cụ thể.

Tuy nhiên, việc triển khai các thiết bị này trong môi trường tháp giải nhiệt đòi hỏi xem xét kỹ các yếu tố bảo vệ phần cứng. Độ ẩm cao, dao động nhiệt độ và sự hiện diện của hóa chất xử lý nước (như clo dư hoặc chất diệt tảo) có thể làm giảm độ tin cậy và tuổi thọ thiết bị [38]. Do đó, việc thiết kế vỏ bảo vệ đạt tiêu chuẩn chống nước/bụi (ví dụ: IP65 hoặc cao hơn) và sử dụng vật liệu chống ăn mòn là các yếu tố then chốt trong giai đoạn thiết kế và triển khai hệ thống.

2.7.3 Giao thức truyền thông và quản lý dữ liệu

Lựa chọn giao thức truyền thông phù hợp đóng vai trò quyết định đến hiệu quả và độ tin cậy của hệ thống giám sát. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) đã được chứng minh là một giao thức hiệu quả cho các ứng dụng IoT trong môi trường công nghiệp, đặc biệt phù hợp với việc truyền dữ liệu từ tháp giải nhiệt do khả năng hoạt động ổn định với băng thông thấp và độ trễ nhỏ [54].

Về quản lý dữ liệu, các hệ thống cơ sở dữ liệu thời gian như InfluxDB đang được sử dụng rộng rãi để lưu trữ và xử lý dữ liệu cảm biến do khả năng tối ưu hóa cho việc ghi và truy vấn dữ liệu theo chuỗi thời gian [17]. Điều này đặc biệt quan trọng đối với hệ thống giám sát tháp giải nhiệt, nơi dữ liệu được thu thập liên tục và cần được phân tích để nhận diện xu hướng và dự báo sự cố.

Việc tích hợp với các nền tảng cloud computing như AWS IoT, Google Cloud IoT hoặc Microsoft Azure IoT cũng mang lại nhiều lợi ích về khả năng mở rộng, bảo mật và phân tích dữ liệu nâng cao [46], [47]. Tuy nhiên, các tổ chức cần cân nhắc giữa lợi ích của cloud computing và các yêu cầu về bảo mật dữ liệu, đặc biệt trong các ứng dụng liên quan đến hạ tầng quan trọng.

2.7.4 Xu hướng phát triển và định hướng tương lai

Xu hướng phát triển trong lĩnh vực giám sát tháp giải nhiệt đang hướng tới việc tích hợp sâu hơn với các công nghệ trí tuệ nhân tạo và học máy. Các thuật toán machine learning đã bắt đầu được ứng dụng để dự báo hiệu suất, phát hiện bất thường và tối ưu hóa vận hành tự động [17], [42]. Điều này không chỉ giúp cải thiện hiệu quả vận hành mà còn giảm đáng kể chi phí nhân lực và nâng cao độ tin

cây của hệ thống.

Công nghệ Digital Twin đang nổi lên như một giải pháp tiềm năng cho việc mô phỏng và tối ưu hóa hoạt động của tháp giải nhiệt [27]. Bằng cách tạo ra một mô hình số chính xác của tháp, các kỹ sư có thể thử nghiệm các kịch bản vận hành khác nhau, dự báo hiệu suất trong các điều kiện môi trường thay đổi và xác định thời điểm tối ưu cho bảo trì mà không cần can thiệp vào hệ thống thực tế.

Về mặt chính sách, các quốc gia đang ngày càng chú trọng đến việc số hóa và tự động hóa trong công nghiệp như một phần của chiến lược phát triển bền vững [2], [48]. Điều này tạo ra môi trường thuận lợi cho việc đầu tư và triển khai các hệ thống giám sát tiên tiến, đồng thời thúc đẩy sự hợp tác giữa các tổ chức nghiên cứu, doanh nghiệp và cơ quan quản lý nhà nước.

Dựa trên phân tích thực trạng và xu hướng công nghệ hiện tại, việc phát triển một hệ thống giám sát tháp giải nhiệt dựa trên IoT không chỉ khả thi về mặt kỹ thuật mà còn mang lại giá trị kinh tế và môi trường đáng kể. Chương tiếp theo sẽ trình bày chi tiết về thiết kế và triển khai một hệ thống như vậy, tận dụng những ưu điểm của các công nghệ đã được phân tích.

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ XÂY DỰNG HỆ THỐNG

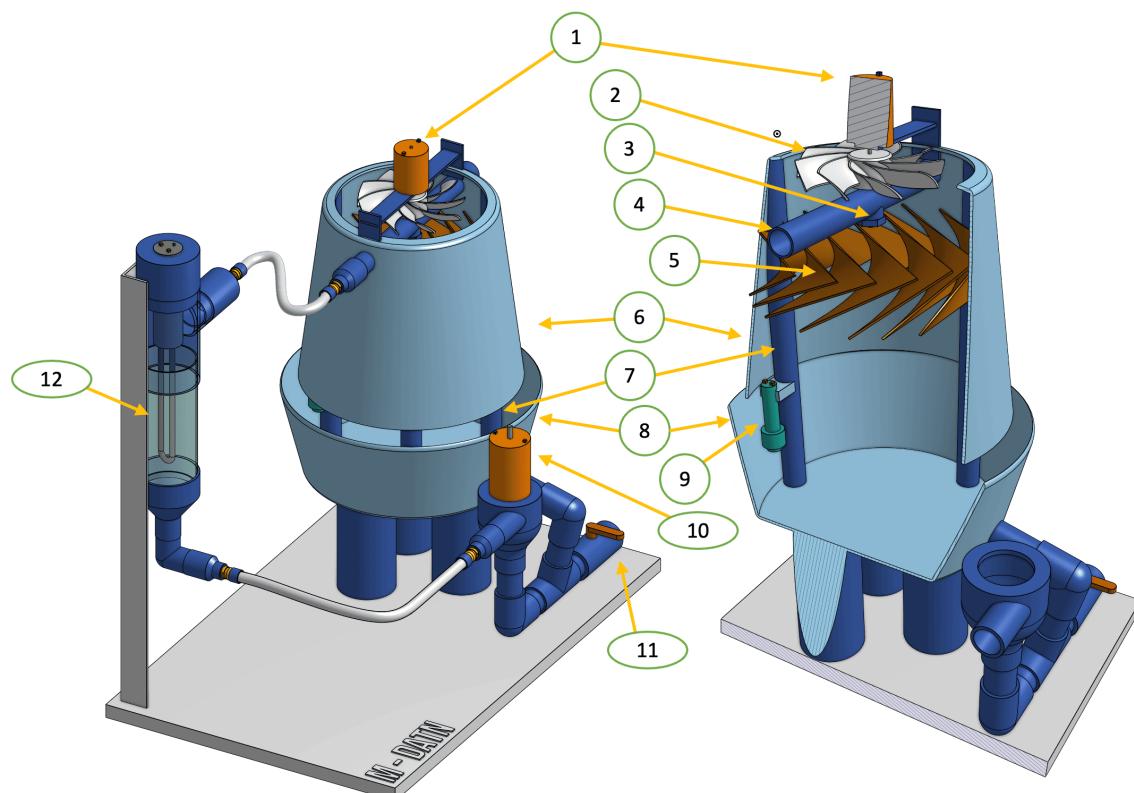
3.1 Đồi tượng nghiên cứu và yêu cầu thiết kế

3.1.1 Đồi tượng nghiên cứu

Đồi tượng nghiên cứu của đồ án là hệ thống tháp giải nhiệt đồi lưu hút dùng trong làm mát công nghiệp. Tháp hoạt động dựa trên trao đổi nhiệt giữa nước nóng và không khí, trong đó nước được làm mát nhờ bay hơi và truyền nhiệt trực tiếp. Việc kiểm soát chính xác các thông số vận hành là cần thiết để đảm bảo hiệu suất và tiết kiệm năng lượng.

Các thông số cần giám sát liên tục gồm: nhiệt độ nước vào (T_{hot}), nước ra (T_{cold}), lưu lượng nước tuần hoàn (\dot{m}_{water}), nhiệt độ khô (T_{db}) và độ ẩm tương đối (ϕ) của không khí. Từ đó, hệ thống tính toán các chỉ số như nhiệt độ bầu ướt, công suất giải nhiệt của tháp cũng như hiệu suất làm mát để đánh giá tình trạng vận hành.

Để kiểm chứng cũng như đánh giá hiệu quả của hệ thống giám sát, đồ án thiết kế và chế tạo mô hình tháp giải nhiệt quy mô phòng thí nghiệm, công suất danh định 0,5 kW. Thông số kỹ thuật chi tiết trình bày tại **Phụ lục B** của đồ án này.



Hình 3.1: Mô hình tháp giải nhiệt mini. (1- động cơ quạt; 2- cánh quạt hút; 3- vòi phun nước; 4- ống dẫn nước vào; 5- tấm phân phối nước; 6- thân tháp; 7- trụ đỡ thân tháp; 8- đáy tháp; 9- rơ le mức nước; 10- động cơ bơm; 11- van xả đáy; 12- tải nhiệt)

3.1.2 Yêu cầu chức năng của hệ thống

Hệ thống giám sát được thiết kế để đáp ứng các yêu cầu chức năng cơ bản sau:

Thu thập dữ liệu thời gian thực: Hệ thống phải có khả năng đo lường liên tục và chính xác các thông số vận hành với chu kỳ sampling phù hợp (30-60 giây), đảm bảo phát hiện kịp thời các thay đổi trong quá trình vận hành. Dữ liệu thu thập bao gồm nhiệt độ nước vào/ra với độ chính xác $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, lưu lượng nước tuần hoàn với sai số $\pm 10\%$, và các thông số khí hậu xung quanh.

Xử lý và tính toán tự động: Hệ thống cần thực hiện tính toán thời gian thực các chỉ số hiệu suất phức tạp như công suất làm mát theo phương trình cân bằng năng lượng, hiệu suất thấp giải nhiệt dựa trên approach temperature, và nhiệt độ bầu ướt theo công thức Stull. Các tính toán này phải được thực hiện tự động mà không cần can thiệp thủ công.

Lưu trữ và truy xuất dữ liệu: Hệ thống phải có khả năng lưu trữ dữ liệu dài hạn trong cơ sở dữ liệu time-series, hỗ trợ truy vấn lịch sử và phân tích xu hướng. Dữ liệu cần được tổ chức có cấu trúc để thuận tiện cho việc xuất báo cáo và phân tích thống kê.

Hiển thị và cảnh báo: Hệ thống cung cấp giao diện trực quan hiển thị thông tin real-time, biểu đồ xu hướng và cơ chế cảnh báo tự động khi các thông số vượt ngưỡng định trước hoặc xuất hiện dấu hiệu bất thường.

3.1.3 Yêu cầu kỹ thuật và vận hành

Độ chính xác và tin cậy: Hệ thống phải đảm bảo độ chính xác đo lường phù hợp với yêu cầu đánh giá hiệu suất thấp giải nhiệt. Sai số tổng hợp trong tính toán công suất làm mát không vượt quá $\pm 5\%$, đáp ứng tiêu chuẩn ngành cho các ứng dụng giám sát năng lượng [32].

Khả năng hoạt động liên tục: Hệ thống được thiết kế để vận hành 24/7 trong môi trường có độ ẩm cao và nhiệt độ biến đổi. Thiết bị phải có khả năng tự phục hồi sau sự cố mạng hoặc mất điện tạm thời, với cơ chế lưu trữ dữ liệu cục bộ khi mất kết nối.

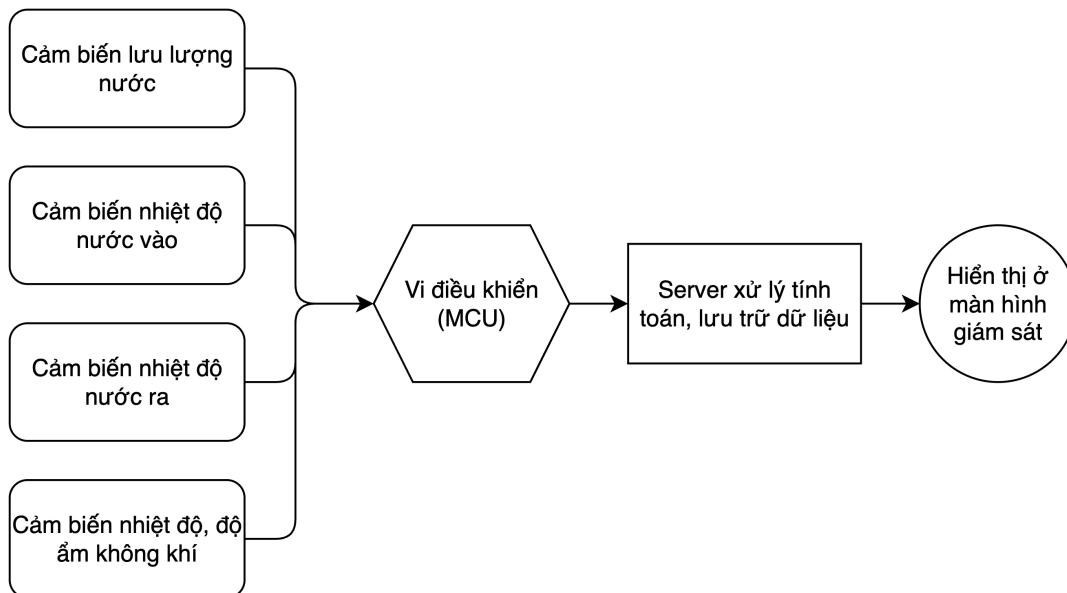
Tính mở rộng và tích hợp: Kiến trúc hệ thống cho phép mở rộng để giám sát nhiều tháp giải nhiệt hoặc tích hợp với các hệ thống quản lý năng lượng hiện có. Giao thức truyền thông sử dụng các tiêu chuẩn mở như MQTT và RESTful API.

Chi phí triển khai hợp lý: Giải pháp được tối ưu hóa chi phí thông qua việc sử dụng các thành phần phần cứng và phần mềm mã nguồn mở, với mục tiêu tổng chi phí đầu tư dưới 2 triệu VNĐ cho một đơn vị giám sát, phù hợp với khả năng đầu tư của doanh nghiệp vừa và nhỏ.

3.2 Thiết kế và xây dựng hệ thống giám sát

3.2.1 Kiến trúc tổng thể hệ thống

Dựa trên các yêu cầu chức năng và kỹ thuật đã xác định, hệ thống giám sát được thiết kế theo kiến trúc IoT phân tầng với năm lớp chức năng độc lập nhưng tương tác chặt chẽ. Kiến trúc này đảm bảo tính mô-đun, khả năng bảo trì và mở rộng, đồng thời tối ưu hóa hiệu suất xử lý và truyền thông.



Hình 3.2: Sơ đồ kiến trúc tổng thể hệ thống

Lớp cảm biến thực hiện thu thập dữ liệu đa tham số từ mô hình tháp giải nhiệt. Lớp này bao gồm mạng lưới cảm biến được phân bố tại các vị trí chiến lược để đo lường nhiệt độ nước vào/ra, lưu lượng tuần hoàn và điều kiện khí hậu xung quanh. Thiết kế đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy cần thiết cho việc tính toán các chỉ số hiệu suất.

Lớp điều khiển sử dụng vi điều khiển ESP32 làm đơn vị xử lý edge computing, thực hiện thu thập dữ liệu đồng thời từ mạng cảm biến, xử lý sơ bộ và điều phối truyền tải. Kiến trúc dual-core cho phép xử lý song song các tác vụ thu thập dữ liệu và truyền thông mạng.

Lớp truyền thông triển khai giao thức MQTT over Wi-Fi với mã hóa TLS, đảm bảo truyền tải dữ liệu hiệu quả và bảo mật. Mô hình publish/subscribe cung cấp tính linh hoạt và khả năng mở rộng cho việc tích hợp nhiều thiết bị giám sát.

Lớp xử lý dữ liệu bao gồm hệ thống backend thực hiện các tính toán phức tạp vượt khả năng vi điều khiển, bao gồm tính toán nhiệt độ bầu ướt, công suất làm mát và các chỉ số hiệu suất. Dữ liệu được lưu trữ trong cơ sở dữ liệu time-series để

hỗ trợ phân tích xu hướng.

Lớp giao diện người dùng cung cấp dashboard trực quan với các chức năng hiển thị real-time, phân tích xu hướng và cảnh báo tự động. Giao diện được tối ưu cho trải nghiệm người dùng và hỗ trợ ra quyết định vận hành.

3.2.2 Nguyên lý hoạt động của hệ thống

Hệ thống giám sát hoạt động theo chu trình liên tục với các giai đoạn xử lý được tối ưu để đảm bảo độ chính xác và tính kịp thời của thông tin. ESP32 thực hiện thu thập dữ liệu từ các cảm biến nhiệt độ, độ ẩm và lưu lượng nước theo chu kỳ tối ưu, cân bằng giữa độ chính xác dữ liệu và hiệu quả sử dụng tài nguyên hệ thống.

Vì điều khiển thực hiện xử lý sơ bộ bao gồm kiểm tra tính hợp lệ dữ liệu, loại bỏ nhiễu và tính toán các thông số cơ bản. Xử lý tại chỗ giúp giảm tải cho hệ thống backend và đảm bảo chỉ dữ liệu chất lượng cao được truyền đi.

Dữ liệu sau xử lý được đóng gói định dạng JSON và truyền tải lên MQTT Broker qua kết nối Wi-Fi được bảo vệ bằng mã hóa TLS. Giao thức MQTT đảm bảo truyền tải hiệu quả trong điều kiện băng thông hạn chế, cung cấp các cơ chế tin cậy như Quality of Service phân cấp và duy trì phiên làm việc.

Hệ thống backend tiếp nhận dữ liệu từ MQTT Broker và thực hiện các tính toán phức tạp bao gồm tính toán nhiệt độ bầu ướt theo công thức Stull, xác định công suất làm mát dựa trên lưu lượng và chênh lệch nhiệt độ, cũng như đánh giá hiệu suất làm mát của tháp giải nhiệt. Các tính toán này yêu cầu tài nguyên xử lý đáng kể và được thực hiện tập trung để tối ưu hiệu suất.

Toàn bộ dữ liệu được lưu trữ có hệ thống trong cơ sở dữ liệu time-series chuyên biệt, hỗ trợ phân tích xu hướng dài hạn và truy vấn dữ liệu lịch sử phức tạp. Dữ liệu được hiển thị trên dashboard trực quan cho phép kỹ sư vận hành giám sát tình trạng hệ thống chi tiết theo thời gian thực. Hệ thống tích hợp các module giám sát thông minh và cảnh báo tự động, có khả năng phát hiện sớm dấu hiệu bất thường và thông báo kịp thời khi thông số vượt ngưỡng an toàn hoặc xuất hiện xu hướng suy giảm hiệu suất.

3.3 Lựa chọn phần cứng

Lựa chọn phần cứng cho hệ thống giám sát tháp giải nhiệt đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật cụ thể và điều kiện vận hành đặc thù. Hệ thống thu thập đồng thời các thông số nhiệt độ nước vào/ra, nhiệt độ và độ ẩm không khí xung quanh, cùng lưu lượng nước tuần hoàn. Việc lựa chọn thiết bị đảm bảo khả năng xử lý dữ liệu cục bộ và truyền thông real-time trong môi trường có độ ẩm cao và hóa chất xử lý nước. Các tiêu chí thiết kế tuân thủ khuyến nghị trong sổ tay thực hành HVAC và hướng

dẫn vận hành tháp giải nhiệt [32], [38].

3.3.1 Vi điều khiển ESP32

Vi điều khiển ESP32 được lựa chọn làm đơn vị xử lý trung tâm nhờ năng lực tính toán phù hợp, kết nối mạng tích hợp và hiệu quả kinh tế [57]. ESP32 sử dụng kiến trúc dual-core 32-bit Xtensa LX6 với xung nhịp tối đa 240 MHz, đủ khả năng thực hiện song song các tác vụ edge computing như thu thập dữ liệu đa cảm biến, lọc/tiền xử lý và đóng gói truyền thông.



Hình 3.3: Vi điều khiển ESP32-WROOM-32 [57]

Thiết bị tích hợp WiFi 802.11 b/g/n và Bluetooth v4.2, loại bỏ nhu cầu module mạng rời và giảm độ phức tạp phần cứng. Hệ ngoại vi bao gồm SPI, I²C, UART, PWM, ADC SAR 12-bit và DAC 8-bit, cho phép giao tiếp trực tiếp với đa số cảm biến¹. Cơ chế quản lý năng lượng hỗ trợ các chế độ tiết kiệm bao gồm deep-sleep với dòng tiêu thụ từ vài đến vài chục microampere, phù hợp cho vận hành liên tục với chi phí năng lượng thấp [57].

ESP32 cân bằng tối ưu giữa năng lực xử lý, kết nối không dây tích hợp và chi phí triển khai. Hệ sinh thái phần mềm phong phú với Arduino IDE, ESP-IDF và MicroPython tạo thuận lợi cho phát triển và bảo trì hệ thống IoT giám sát real-time [57].

3.3.2 Cảm biến nhiệt độ DS18B20

Cảm biến nhiệt độ số DS18B20 được sử dụng để đo nhiệt độ nước tại điểm vào và ra của tháp giải nhiệt. Thiết bị có độ chính xác $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ trong dải vận hành -10°C đến $+85^{\circ}\text{C}$, dải đo mở rộng từ -55°C đến $+125^{\circ}\text{C}$ với độ phân giải cấu hình được từ 9 đến 12 bit. Cảm biến hoạt động với nguồn 3.0-5.5 V và hỗ trợ chế độ parasitic power để giảm thiểu số dây dẫn [55]. Việc sử dụng hai cảm biến cùng loại đảm bảo tính nhất quán phép đo và thuận lợi cho tính toán chênh lệch nhiệt độ ΔT phục vụ

¹Giao tiếp 1-Wire với DS18B20 được thực hiện bằng phần mềm (bit-banging).

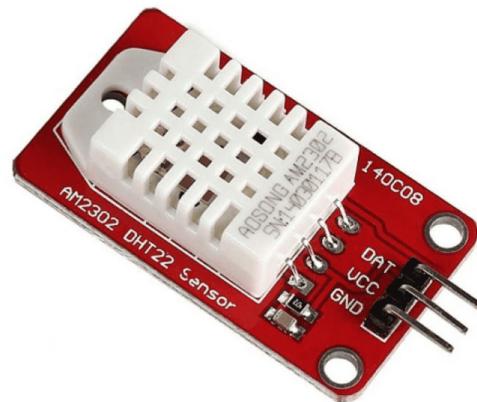
cân bằng năng lượng.



Hình 3.4: Cảm biến nhiệt độ DS18B20 [55]

DS18B20 được lựa chọn nhờ sai số đo lường $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ đáp ứng yêu cầu độ chính xác cho tính toán công suất làm mát. Giao thức 1-Wire cho phép kết nối nhiều cảm biến trên cùng đường tín hiệu, giảm độ phức tạp thiết kế mạch và hệ thống dây dẫn [55].

3.3.3 Cảm biến độ ẩm và nhiệt độ DHT22



Hình 3.5: Cảm biến nhiệt độ/độ ẩm DHT22 [56]

Cảm biến DHT22 (AM2302) đo lường đồng thời nhiệt độ và độ ẩm tương đối không khí xung quanh tháp giải nhiệt. Dữ liệu thu được làm đầu vào cho ước tính nhiệt độ bầu ướt theo công thức Stull [50], [56]. Thiết bị có độ chính xác nhiệt độ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ trong dải -40°C đến $+80^{\circ}\text{C}$ và độ chính xác độ ẩm $\pm 2\%$ RH (tối đa $\pm 5\%$) trong dải 0-100% RH. Độ phân giải đạt 0.1 với chu kỳ sampling tối thiểu 2 giây.

Giao thức truyền thông single-wire proprietary (khác với chuẩn 1-Wire) đơn giản hóa kết nối với vi điều khiển [56].

DHT22 được lựa chọn nhờ cân bằng hiệu quả giữa chi phí và độ chính xác đo lường nhiệt độ-dộ ẩm không khí. Độ chính xác thiết bị đáp ứng yêu cầu ước tính nhiệt độ bầu ướt T_{wb} và đánh giá hiệu suất bay hơi của tháp giải nhiệt [50], [56].

3.3.4 Cảm biến lưu lượng nước YF-S201

Cảm biến lưu lượng YF-S201 được sử dụng để đo lưu lượng nước tuần hoàn trong hệ thống tháp giải nhiệt². Thiết bị hoạt động theo nguyên lý turbine gắn nam châm kết hợp cảm biến Hall Effect. Khi cực từ di chuyển qua phần tử Hall, xung điện được tạo ra với tần số tỷ lệ thuận với lưu lượng thể tích [59].

Thông số kỹ thuật YF-S201 bao gồm dải đo 1-30 L/min, sai số điển hình $\pm 10\%$, áp suất làm việc tối đa 1.75 MPa và dải nhiệt độ 0-80°C. Thiết bị yêu cầu nguồn 5-18 V DC và cung cấp tín hiệu xung TTL 5 V. Hệ số chuyển đổi danh định khoảng 7.5 xung/giây cho mỗi L/min, giá trị thực tế phụ thuộc cấu hình đường ống và điều kiện lắp đặt, đòi hỏi hiệu chuẩn hiện trường [59].



Hình 3.6: Cảm biến lưu lượng nước YF-S201 [59]

YF-S201 được lựa chọn nhờ dải đo phù hợp quy mô mô hình thí nghiệm và tín hiệu xung TTL tương thích trực tiếp với ESP32. Thiết bị có chi phí thấp và lắp đặt đơn giản, phù hợp mục tiêu đồ án [59].

3.3.5 Lưu ý lắp đặt và bảo vệ thiết bị

Môi trường vận hành tháp giải nhiệt đặc trưng bởi độ ẩm cao, dao động nhiệt độ và hóa chất xử lý như clo và chất diệt tảo, có thể ảnh hưởng tiêu cực đến độ tin cậy thiết bị điện tử. Để đảm bảo hoạt động ổn định, hệ thống cần vỏ bảo vệ tiêu chuẩn IP65 trở lên, vật liệu và đầu dò chống ăn mòn, hệ thống dây và nối đất đúng quy cách để hạn chế nhiễu điện từ, cùng quy trình hiệu chuẩn định kỳ cho cảm biến lưu

²Trong hệ thống công nghiệp thực tế, các lưu lượng kế điện từ, siêu âm hoặc vortex thường được ưu tiên do độ chính xác và độ bền cao hơn [32], [58]. YF-S201 được lựa chọn phù hợp với quy mô mô hình thí nghiệm.

lượng và nhiệt độ [38], [58].

3.3.6 Thảo luận lựa chọn thiết bị

Quá trình lựa chọn phần cứng dựa trên các tiêu chí: sự phù hợp dải đo và sai số với yêu cầu ứng dụng, độ bền trong điều kiện môi trường khắc nghiệt, khả năng tích hợp với hệ thống tổng thể và tối ưu chi phí sở hữu.

a, So sánh vi điều khiển

So với các vi điều khiển 8-bit như Arduino Uno/ATmega328P, ESP32 có ưu thế vượt trội về năng lực xử lý và kết nối không dây tích hợp. Nền tảng 8-bit thiếu khả năng kết nối mạng và có tài nguyên xử lý hạn chế, trong khi ESP32 cung cấp WiFi/BLE tích hợp và giảm nhu cầu phần cứng phụ trợ [57], [60]. So với máy tính nhúng như Raspberry Pi 4, ESP32 có lợi thế về tiêu thụ năng lượng thấp, thời gian khởi động nhanh, cấu trúc cơ khí đơn giản và chi phí thấp, vẫn đáp ứng yêu cầu edge computing. Raspberry Pi 4 phù hợp hơn cho vai trò local server hoặc edge gateway [61].

b, So sánh cảm biến nhiệt độ

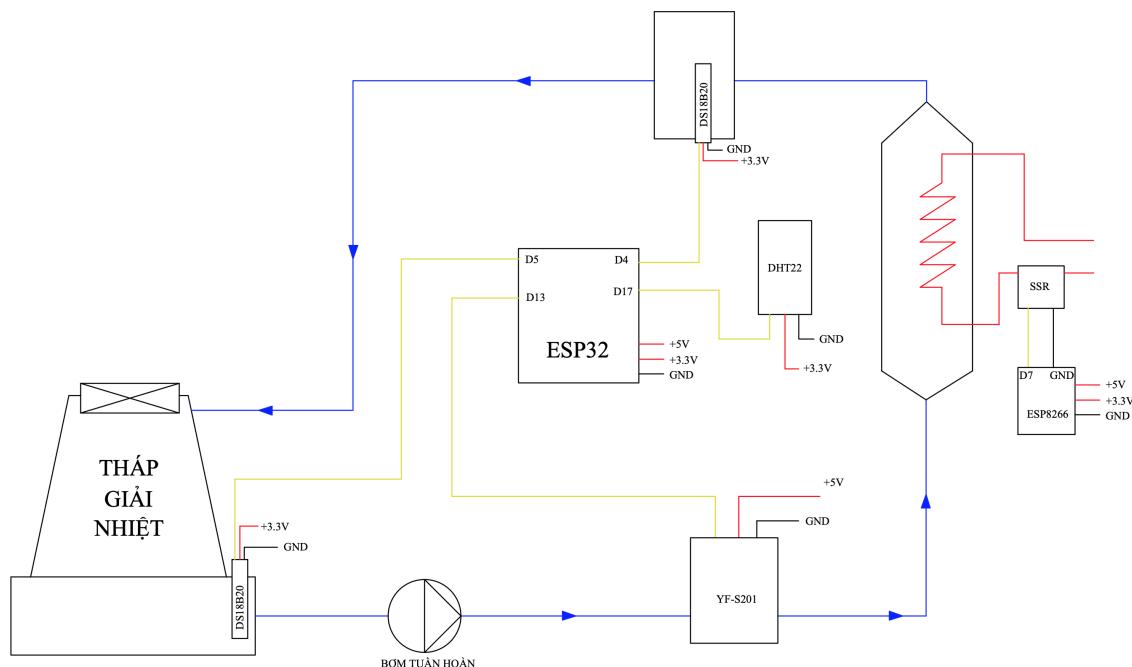
DS18B20 đáp ứng yêu cầu sai số đo lường và dễ tích hợp qua giao thức 1-Wire cho ứng dụng đo nhiệt độ nước. Các cảm biến RTD (PT100/PT1000) có độ chính xác và ổn định cao hơn nhưng yêu cầu mạch biến đổi tín hiệu phức tạp và hiệu chuẩn khắt khe. Cảp nhiệt có ưu điểm dải đo rộng và thời gian đáp ứng nhanh, nhưng cần bù nhiệt độ đầu lạnh và độ chính xác thấp hơn trong dải nhiệt độ ứng dụng [32], [55]. Trong phạm vi mô hình thí nghiệm, DS18B20 là lựa chọn tối ưu cân bằng hiệu năng và chi phí.

c, So sánh cảm biến độ ẩm

DHT22 cung cấp độ chính xác phù hợp cho ước tính nhiệt độ bầu ướt T_{wb} trong phạm vi ứng dụng này. Đối với môi trường công nghiệp khắc nghiệt hoặc yêu cầu sai số thấp hơn, có thể xem xét dòng cảm biến SHT3x như SHT35 với độ chính xác cao hơn ($\pm 1.5\% RH$ và $\pm 0.1^\circ C$) và giao tiếp I²C tiêu chuẩn [62]. Tuy nhiên, lựa chọn này cần cân nhắc yếu tố chi phí và độ phức tạp tích hợp hệ thống.

d, So sánh cảm biến lưu lượng

Các công nghệ đo lưu lượng phổ biến bao gồm turbine cơ học (YF-S201), điện từ và siêu âm. Trong quy mô mô hình thí nghiệm, cảm biến turbine đáp ứng yêu cầu theo dõi xu hướng và ước lượng lưu lượng với chi phí hợp lý, tuy cần hiệu chuẩn hiện trường và chú ý lắng cặn cùng hàm lượng chất rắn trong nước. Đối với quy mô công nghiệp, lưu lượng kế điện từ (không có bộ phận chuyển động, độ chính xác cao) hoặc siêu âm (inline/clamp-on, không xâm nhập) thường được ưu tiên do độ



Hình 3.7: Sơ đồ kết nối cảm biến và vi điều khiển vào mô hình thực tế

bền và độ chính xác cao, mặc dù đòi hỏi chi phí lớn hơn và điều kiện lắp đặt khắt khe [32], [58].

e, Kết luận lựa chọn

Tổ hợp thiết bị ESP32, DS18B20, DHT22 và YF-S201 tạo giải pháp cân bằng tối ưu giữa yêu cầu kỹ thuật và tính khả thi kinh tế trong phạm vi mô hình thí nghiệm. Các hạn chế về độ chính xác được khắc phục qua hiệu chuẩn hiện trường, phương pháp trung bình hóa thông kê và lọc tín hiệu. Cấu trúc kết nối đơn giản góp phần rút ngắn thời gian triển khai và nâng cao độ tin cậy vận hành [32], [55]–[59].

3.4 Thiết kế kiến trúc phần mềm

Kiến trúc phần mềm của hệ thống giám sát tháp giải nhiệt được thiết kế theo mô hình phân tầng, trong đó dữ liệu được xử lý qua các giai đoạn tuần tự từ thu thập tại thiết bị biên đến trực quan hóa cuối cùng. Luồng xử lý chính bao gồm thu thập dữ liệu từ cảm biến bằng ESP32, truyền tải qua giao thức MQTT, xử lý trung tâm tại backend, lưu trữ trong InfluxDB và trực quan hóa thông qua Grafana.

3.4.1 Phần mềm nhúng trên ESP32

Phần mềm nhúng trên ESP32 đóng vai trò đầu vào của toàn bộ hệ thống, chịu trách nhiệm thu thập dữ liệu từ các cảm biến và thực hiện xử lý sơ bộ trước khi truyền tải. Kiến trúc phần mềm được xây dựng trên nền tảng Arduino với thiết kế đa tác vụ tận dụng khả năng xử lý song song của vi điều khiển dual-core.

Hệ thống phần mềm tích hợp các thư viện chuyên biệt bao gồm OneWire và

```

1 // ===== LIBRARIES =====
2 #include <WiFi.h>
3 #include <WiFiClientSecure.h>
4 #include <WiFiManager.h>
5 #include <PubSubClient.h>
6 #include <DHT.h>
7 #include <OneWire.h>
8 #include <DallasTemperature.h>
9 #include <ArduinoJson.h>
10 #include <FlowSensor.h>
11 // ===== SENSOR PINS =====
12 #define YF_S201_PIN 13
13 #define DS18B20_INLET_PIN 4
14 #define DS18B20_OUTLET_PIN 5
15 #define DHT22_INLET_PIN 17
16 // ===== SENSOR OBJECTS =====
17 DHT dht_inlet(DHT22_INLET_PIN, DHT22);
18 OneWire oneWire_inlet(DS18B20_INLET_PIN);
19 OneWire oneWire_outlet(DS18B20_OUTLET_PIN);
20 DallasTemperature ds18b20_inlet(&oneWire_inlet);
21 DallasTemperature ds18b20_outlet(&oneWire_outlet);

```

Hình 3.8: Cấu trúc phần mềm nhúng ESP32 với khai báo thư viện và cấu hình hệ thống

DallasTemperature cho giao tiếp cảm biến nhiệt độ DS18B20, thư viện DHT22 cho đo lường độ ẩm và nhiệt độ không khí, WiFiManager quản lý kết nối mạng tự động, PubSubClient hỗ trợ giao thức MQTT bảo mật, ArduinoJson xử lý tuần tự hóa dữ liệu và WiFiClientSecure đảm bảo truyền thông mã hóa TLS.

Kiến trúc đa tác vụ phân chia xử lý trên hai lõi để tối ưu hiệu suất. Lõi chính đảm nhận thu thập dữ liệu cảm biến với chu kỳ định thời, xử lý và lọc nhiễu tín hiệu. Lõi phụ quản lý kết nối mạng, giao thức MQTT và các tác vụ truyền thông, đảm bảo việc thu thập dữ liệu không bị gián đoạn bởi hoạt động mạng.

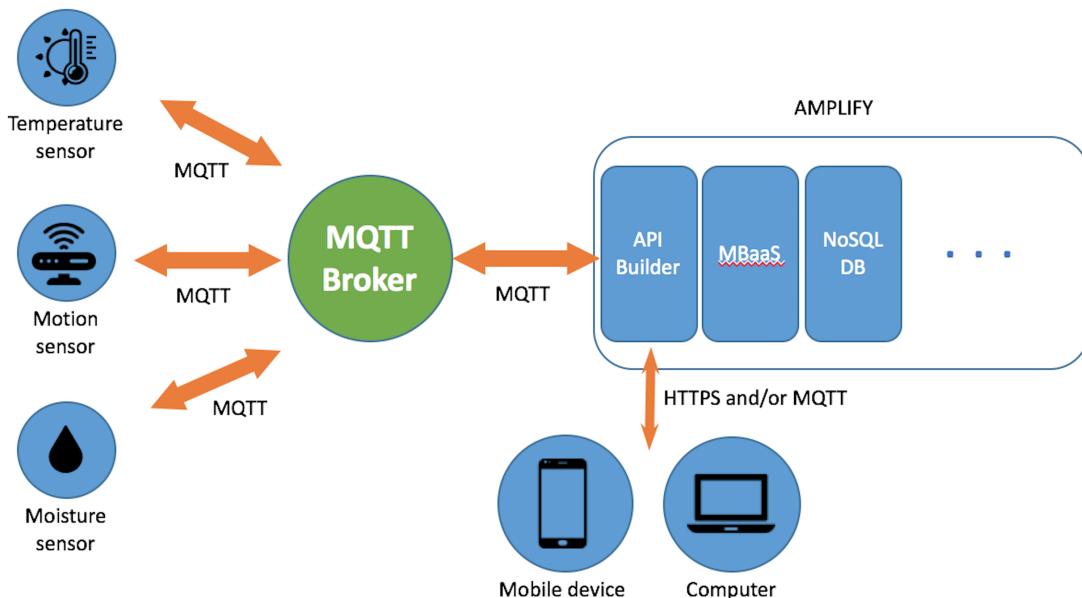
Quy trình xử lý dữ liệu tại thiết bị bao gồm kiểm tra tính hợp lệ thông qua ngưỡng giá trị và mã kiểm tra, áp dụng bộ lọc số phù hợp với đặc tính từng loại cảm biến, thực hiện chuyển đổi đơn vị và hiệu chuẩn nhiệt độ. Dữ liệu được đóng gói định dạng JSON với dấu thời gian chính xác và thông tin trạng thái thiết bị trước khi truyền tải.

Cơ chế chống lỗi đa tầng bao gồm watchdog timer phần cứng, quy trình phục hồi tự động cho kết nối mạng và MQTT, cùng với hệ thống giám sát liên tục các thành phần chính. Thiết kế này đảm bảo hoạt động ổn định trong môi trường công nghiệp khắc nghiệt với khả năng tự khôi phục khi gặp sự cố.

3.4.2 Giao thức truyền thông MQTT

MQTT được lựa chọn làm giao thức truyền thông giữa ESP32 và hệ thống backend dựa trên ưu thế về hiệu suất băng thông thấp và độ tin cậy cao trong môi trường

IoT. Giao thức hoạt động theo mô hình publish/subscribe, tạo sự tách biệt hoàn toàn giữa thiết bị gửi và nhận dữ liệu thông qua broker trung gian.



Hình 3.9: Kiến trúc giao thức MQTT trong hệ thống giám sát

Ưu thế chính của MQTT trong ứng dụng giám sát tháp giải nhiệt là khả năng truyền dữ liệu với overhead tối thiểu, phù hợp cho môi trường mạng có băng thông hạn chế. Giao thức cung cấp ba mức Quality of Service (QoS 0, 1, 2) đảm bảo độ tin cậy truyền dữ liệu từ cơ bản đến đảm bảo chính xác một lần, cho phép tối ưu theo yêu cầu cụ thể.

Tính năng session persistence đặc biệt quan trọng trong môi trường công nghiệp, duy trì trạng thái kết nối và buffer tạm thời các message khi thiết bị mất kết nối do sự cố mạng hoặc bảo trì. Cơ chế này đảm bảo không mất dữ liệu quan trọng và tự động đồng bộ khi kết nối được phục hồi.

Bảo mật được triển khai thông qua mã hóa TLS end-to-end và xác thực bằng username/password hoặc certificate. Cấu trúc topic được thiết kế đơn giản với `sensors/cooling_tower` làm topic chính truyền tải toàn bộ dữ liệu cảm biến. Dữ liệu JSON bao gồm lưu lượng nước, nhiệt độ nước vào/ra, nhiệt độ và độ ẩm không khí, cùng metadata thiết bị và timestamp.

3.4.3 Hệ thống backend xử lý dữ liệu

Hệ thống backend đóng vai trò trung tâm xử lý dữ liệu, hoạt động như cầu nối thông minh giữa MQTT broker và cơ sở dữ liệu InfluxDB. Được phát triển bằng Python, hệ thống đảm nhận các chức năng tính toán phức tạp vượt quá khả năng xử lý của vi điều khiển ESP32.

```
backend/
├── main.py                      # Ứng dụng chính
├── config.py                     # Cấu hình thông tin
├── process_data.py               # Xử lý dữ liệu
└── theoretical_calculations.py  # Hàm tính toán lý thuyết
└── requirements.txt              # Các gói phụ thuộc
```

Hình 3.10: Kiến trúc hệ thống backend với các thành phần xử lý

Kiến trúc modular với phân tách rõ ràng các thành phần chức năng: MQTT subscriber nhận dữ liệu từ broker, data processor thực hiện lọc nhiễu và validation, calculation engine áp dụng các công thức lý thuyết phức tạp, database interface quản lý giao tiếp InfluxDB, monitoring module phát hiện bất thường và alerting system gửi cảnh báo kịp thời.

Chức năng cốt lõi bao gồm tiếp nhận dữ liệu real-time từ MQTT topic, validation và preprocessing đảm bảo chất lượng dữ liệu, áp dụng công thức Stull tính toán nhiệt độ bầu ướt và các thông số hiệu suất thấp giải nhiệt, lưu trữ dữ liệu thô và processed vào InfluxDB với schema tối ưu, phân tích xu hướng hỗ trợ predictive maintenance và cung cấp API endpoints cho giao diện người dùng.

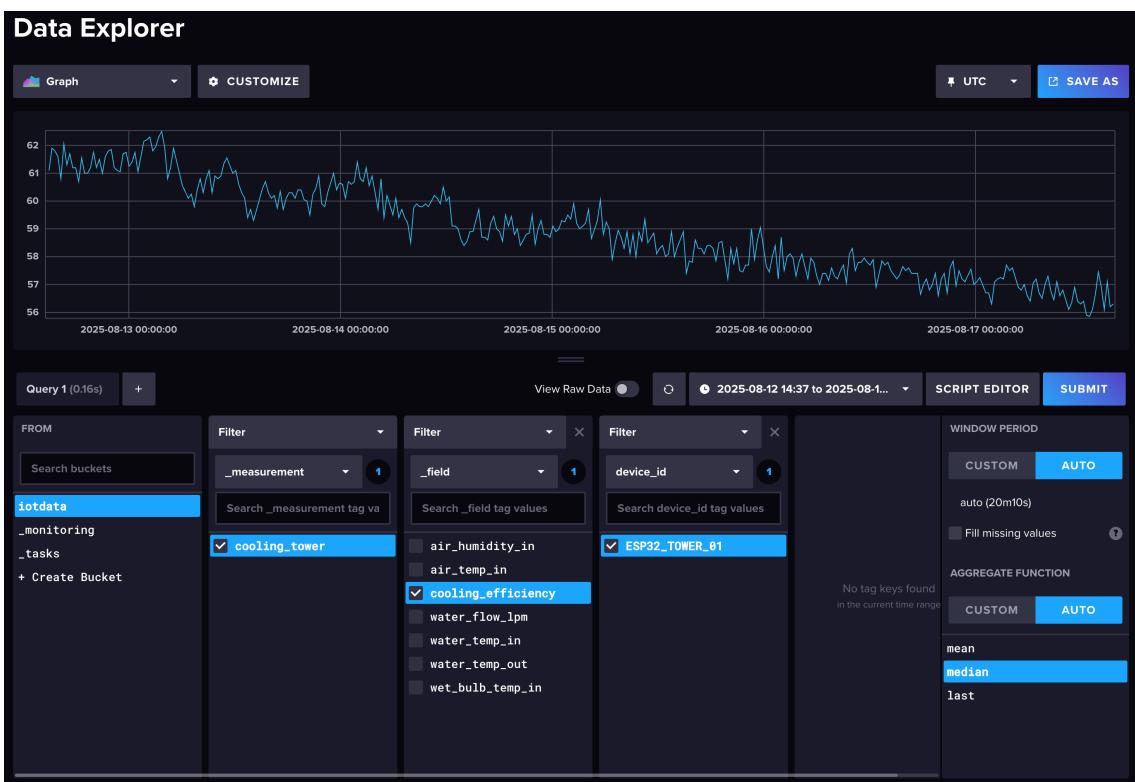
Hệ thống tích hợp cơ chế error handling toàn diện với retry logic cho kết nối database, circuit breaker pattern cho external services, comprehensive logging và health monitoring. Thiết kế này đảm bảo độ tin cậy cao và khả năng phục hồi tự động trong môi trường production.

3.4.4 Cơ sở dữ liệu InfluxDB

InfluxDB được triển khai làm hệ thống lưu trữ chuyên biệt cho dữ liệu time-series, tối ưu hóa cho việc ghi dữ liệu tần suất cao và truy vấn hiệu quả. Kiến trúc columnar cho phép xử lý hàng triệu data points mỗi giây với khả năng nén dữ liệu 90-95% so với dung lượng gốc.

Cấu trúc dữ liệu được tổ chức theo measurements làm đơn vị chính cho dữ liệu cảm biến, tags để indexing và grouping theo tiêu chí như sensor type và location, fields chứa giá trị thực tế của phép đo và timestamps với độ chính xác nanosecond. Schema được thiết kế để tối ưu cho các truy vấn phân tích xu hướng và aggregation theo thời gian.

Retention policies quản lý lifecycle dữ liệu tự động, xóa dữ liệu cũ theo quy tắc định nghĩa trước để tối ưu storage. Continuous queries thực hiện downsampling và pre-aggregation tự động, tính toán các thống kê như mean, max, min theo khoảng thời gian khác nhau mà không cần can thiệp thủ công.



Hình 3.11: Kiến trúc lưu trữ dữ liệu time-series với InfluxDB

Ngôn ngữ truy vấn InfluxQL với syntax tương tự SQL giúp giảm learning curve và tận dụng kiến thức sẵn có. Hệ thống hỗ trợ các chức năng nâng cao như mathematical functions, statistical analysis và time-based grouping phục vụ phân tích hiệu suất tháp giải nhiệt.

3.4.5 Trực quan hóa dữ liệu với Grafana

Grafana đóng vai trò frontend cuối cùng trong chuỗi xử lý dữ liệu, cung cấp dashboard tương tác để trực quan hóa thông tin vận hành. Kết nối trực tiếp với InfluxDB cho phép hiển thị dữ liệu real-time và historical analysis với độ trễ tối thiểu.

Bảng điều khiển Grafana được xây dựng với cấu trúc các panel chức năng được tổ chức hợp lý, đảm bảo khả năng trực quan hóa và phân tích toàn diện dữ liệu vận hành của tháp giải nhiệt. Các biểu đồ chuỗi thời gian thể hiện rõ ràng sự biến thiên của công suất giải nhiệt, nhiệt độ nước vào, nước ra và nhiệt độ bầu ướt, từ đó hỗ trợ đánh giá liên tục hiệu suất làm mát của hệ thống. Các panel số liệu cung cấp thông tin tức thời về các chỉ số vận hành trọng yếu, giúp người vận hành nhận diện nhanh trạng thái hệ thống. Phần trực quan hóa lưu lượng nước cho phép đánh giá chính xác tình trạng hoạt động của hệ thống tuần hoàn. Bên cạnh đó, bảng thống kê tổng hợp dữ liệu theo từng khoảng thời gian được tích hợp nhằm phục vụ phân tích xu hướng và hỗ trợ công tác bảo trì dự báo. Các panel cảnh báo được thiết kế để

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ XÂY DỰNG HỆ THỐNG



Hình 3.12: Dashboard Grafana hiển thị dữ liệu giám sát tháp giải nhiệt

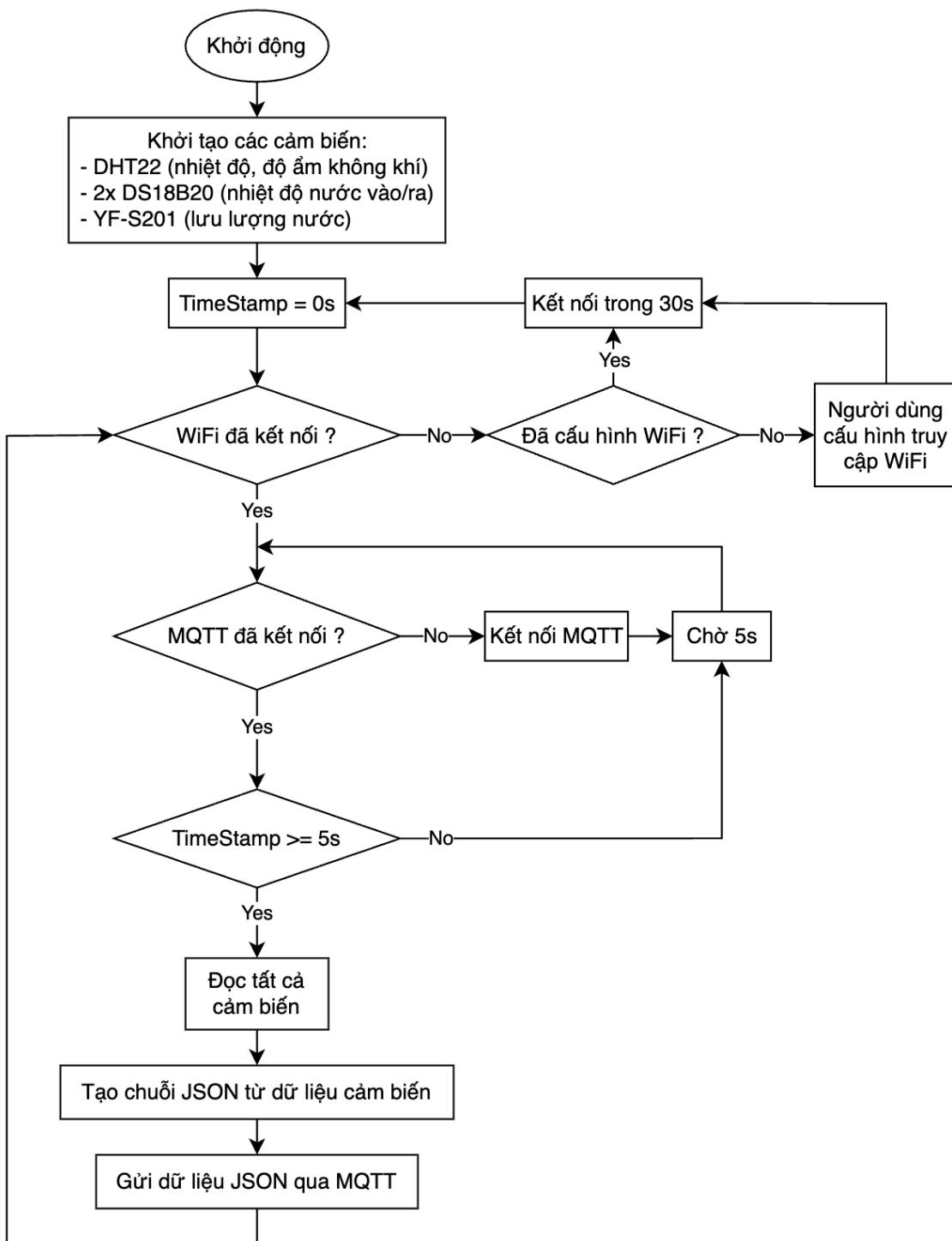
phát hiện sớm các bất thường trong quá trình vận hành, góp phần nâng cao mức độ an toàn và độ tin cậy của hệ thống. Ngoài ra, chức năng phân tích tương quan giữa dữ liệu vận hành và điều kiện thời tiết cũng được triển khai, tạo điều kiện thuận lợi cho việc đánh giá và tối ưu hóa hiệu suất tổng thể của tháp giải nhiệt.

Hệ thống dashboard hỗ trợ giám sát thời gian thực với cơ chế tự động làm mới dữ liệu, đồng thời cho phép truy xuất và phân tích dữ liệu lịch sử. Giao diện được thiết kế thích ứng với nhiều loại thiết bị, bao gồm cả máy tính và thiết bị di động, đồng thời hỗ trợ xuất dữ liệu dưới nhiều định dạng khác nhau phục vụ nhu cầu báo cáo ngoại tuyến. Trải nghiệm người dùng được chú trọng tối ưu hóa, đảm bảo các thông tin quan trọng được trình bày trực quan, hỗ trợ hiệu quả cho quá trình ra quyết định vận hành và bảo trì hệ thống.

3.5 Triển khai và tích hợp hệ thống

3.5.1 Luồng hoạt động tổng thể

Hệ thống giám sát hoạt động theo một quy trình làm việc được tối ưu hóa để đảm bảo tính liên tục và độ tin cậy của dữ liệu. Quy trình bắt đầu từ việc ESP32 thực hiện thu thập dữ liệu từ tất cả cảm biến với chu kỳ được tối ưu, tiếp theo là xử lý sơ bộ bao gồm kiểm tra tính hợp lệ, lọc nhiễu và đóng gói dữ liệu theo định dạng JSON trước khi truyền lên bộ điều phối MQTT qua kết nối mạng không dây Wi-Fi được bảo mật.



Hình 3.13: Lưu đồ thuật toán xử lý dữ liệu và truyền thông của ESP32 trong hệ thống giám sát tháp giải nhiệt

Hệ thống xử lý trung tâm đóng vai trò then chốt trong việc nhận và xử lý dữ liệu từ các chủ đề MQTT, thực hiện các tính toán phức tạp bao gồm nhiệt độ bầu ướt theo công thức Stull, công suất làm mát và hiệu suất tháp giải nhiệt theo các phương trình đã được trình bày trong chương 2. Dữ liệu sau khi được xử lý sẽ được lưu trữ vào InfluxDB với cấu trúc được tối ưu cho dữ liệu chuỗi thời gian.

Bảng điều khiển Grafana cung cấp giao diện trực quan cho người vận hành với

khả năng hiển thị giám sát thời gian thực, phân tích xu hướng lịch sử và cảnh báo thông minh. Hệ thống được trang bị các cơ chế chống lỗi bao gồm tự động kết nối lại khi mất mạng, lưu trữ dữ liệu tạm thời khi mất kết nối, giám sát tình trạng hoạt động và tự động phục hồi dịch vụ, cùng với các quy trình sao lưu và khôi phục sau sự cố.

3.5.2 Thiết kế tích hợp phần cứng

Phần này trình bày kiến trúc tích hợp phần cứng cho hệ thống giám sát tháp giải nhiệt, với trọng tâm là đảm bảo an toàn điện, tương thích điện từ (EMC)³, khả năng bảo trì và tối ưu hóa chi phí trong phạm vi *mô hình thí nghiệm*⁴.

Kiến trúc tổng thể được xây dựng với ESP32 làm đơn vị xử lý trung tâm (chi tiết tại phần 3.3.1), kết nối với mạng lưới cảm biến đa tham số bao gồm: cảm biến nhiệt độ nước DS18B20 (phần 3.3.2) tại các điểm đo chiến lược, cảm biến nhiệt độ–độ ẩm không khí DHT22 (phần 3.3.3) để đánh giá điều kiện môi trường, và cảm biến lưu lượng nước tuần hoàn YF-S201 (phần 3.3.4) cho việc tính toán cân bằng năng lượng. Hệ thống được thiết kế để vận hành ổn định trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt đặc trưng của tháp giải nhiệt, bao gồm độ ẩm cao ($RH > 80\%$), sương nước ngưng tụ, và sự hiện diện của các hóa chất xử lý nước như clo và chất ức chế ăn mòn [32], [57], [58].

a, Tiêu chí và ràng buộc thiết kế

Thiết kế kiến trúc phần cứng được định hướng theo các tiêu chí chính: (i) đảm bảo biên độ an toàn điện và tương thích điện từ (EMC) theo khuyến nghị của nhà sản xuất và các tiêu chuẩn quốc tế [57], (ii) khả năng hoạt động liên tục 24/7 với gián đoạn tối thiểu và độ tin cậy cao ($MTBF^5 > 8760$ giờ), (iii) tính mô-đun hóa để thuận tiện cho việc thay thế, nâng cấp và bảo trì, và (iv) tối ưu hóa chi phí–độ phức tạp triển khai phù hợp với quy mô mô hình thí nghiệm.

Các ràng buộc kỹ thuật chính bao gồm: giới hạn dòng cung cấp của các *rail* nguồn tích hợp trên bo mạch phát triển ESP32 (thường $I_{max} \leq 500$ mA cho đường

³Electromagnetic Compatibility (EMC) là khả năng của thiết bị điện tử hoạt động bình thường trong môi trường điện từ mà không gây nhiễu cho các thiết bị khác và không bị ảnh hưởng bởi nhiễu từ môi trường xung quanh, được quy định trong các tiêu chuẩn như IEC 61326 cho thiết bị đo lường điện.

⁴Các lựa chọn phần cứng trong mô hình thí nghiệm (ví dụ: bo mạch phát triển ESP32 có nguồn tích hợp, cảm biến cấp prototype) được tối ưu hóa cho tính đơn giản và chi phí thấp. Trong triển khai công nghiệp thực tế, cần sử dụng nguồn chuẩn công nghiệp (DIN-rail PSU tuân thủ IEC 61131-2), các biện pháp bảo vệ quá áp/sét lan truyền (IEC 61643), tiêu chuẩn bảo vệ IP65/IP67 (IEC 60529) và IK cao hơn, cách ly galvanic cho tín hiệu, cùng tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn an toàn điện (IEC 61010) và EMC (EN 61326) có liên quan.

⁵Mean Time Between Failures (MTBF) là thời gian trung bình giữa các lần hỏng hóc, được sử dụng để đánh giá độ tin cậy của thiết bị điện tử.

3.3V), giới hạn chiều dài cáp truyền dẫn đối với giao thức 1-Wire (khuyến nghị $L \leq 100$ m), yêu cầu hiệu chuẩn hiện trường định kỳ đối với cảm biến lưu lượng kiểu turbine để bù sai số do mài mòn cơ học, và tuân thủ các giới hạn nhiệt độ vận hành của từng linh kiện trong điều kiện môi trường tháp giải nhiệt.

b, Kiến trúc nguồn cung cấp

Hệ thống nguồn được thiết kế dựa trên *bo mạch phát triển ESP32* tích hợp bộ nguồn chuyển mạch (SMPS)⁶, do đó không yêu cầu bộ hạ áp bên ngoài. Nguồn vào 12 V DC được cấp trực tiếp vào đầu vào VIN của bo mạch thông qua bộ chuyển đổi DC-DC tích hợp (thường là LDO hoặc buck converter), tạo ra các đường cung cấp ổn định: 5 V cho cảm biến lưu lượng YF-S201 (phù hợp với dải điện áp vận hành 5–18 V) và 3,3 V cho logic ESP32 cùng các cảm biến số (DS18B20, DHT22)⁷.

Việc tính toán công suất tiêu thụ cần xem xét định mức dòng tối đa của từng rail nguồn và dự trù hệ số an toàn $k_{\text{safety}} \geq 1.3$ cho vận hành liên tục. Mặc dù bo mạch đã tích hợp bộ điều chỉnh áp, vẫn cần bố trí các tụ *decoupling*⁸ cục bộ gần từng IC theo hướng dẫn thiết kế phần cứng của Espressif. Đối với các bo mạch không tích hợp sẵn bảo vệ đầu vào, khuyến nghị bổ sung: polyfuse (bảo vệ quá dòng có thể phục hồi), diode TVS⁹ (bảo vệ quá áp thoáng qua), diode bảo vệ ngược cực, và bộ lọc EMI đầu vào kiểu LC để tăng cường độ bền trong môi trường công nghiệp.

c, Kiến trúc giao tiếp và tương thích mức logic

Cảm biến nhiệt độ DS18B20: Giao tiếp 1-Wire¹⁰ được triển khai với điện trở pull-up 4,7 kΩ kết nối về đường cung cấp 3,3 V. Độ dài cáp truyền dẫn được giới hạn ở mức tối ưu (khuyến nghị $L < 20$ m cho mô hình thí nghiệm) và sử dụng cáp xoắn đôi có lớp chắn để giảm thiểu nhiễu điện từ và cảm ứng [55].

Cảm biến DHT22: Sử dụng giao thức truyền thông số độc quyền (proprietary single-wire, khác biệt với 1-Wire của Maxim), yêu cầu điện trở pull-up trong khoảng 4,7–10 kΩ kết nối về VCC (3,3 V). Chu kỳ lấy mẫu tối thiểu được giới hạn ở 2 giây do đặc tính của cảm biến độ ẩm điện dung, đảm bảo độ chính xác và

⁶Switched-Mode Power Supply (SMPS) là loại nguồn chuyển mạch có hiệu suất cao (thường > 85%) và tỏa nhiệt thấp, phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu vận hành liên tục.

⁷Cần xác minh *thông số kỹ thuật* đầu vào của bo ESP32 cụ thể trước khi áp dụng nguồn 12 V. Nhiều bo DevKit chỉ hỗ trợ VIN/USB tối đa 5 V; trong trường hợp không tương thích với 12 V, cần sử dụng bộ DC-DC step-down bên ngoài để hạ áp xuống 5 V theo khuyến cáo trong ESP32 Hardware Design Guidelines [57].

⁸Tụ decoupling (thường 100nF ceramic + 10-100 μ F tantalum/electrolytic) được đặt gần các IC để lọc nhiễu nguồn tần số cao và cung cấp dòng tức thời khi IC chuyển trạng thái.

⁹Transient Voltage Suppressor (TVS) diode bảo vệ mạch khỏi các xung điện áp thoáng qua do sét, switching transient, hoặc ESD.

¹⁰1-Wire là giao thức truyền thông nối tiếp được phát triển bởi Maxim Integrated, cho phép nhiều thiết bị kết nối trên cùng một đường dây dữ liệu, với địa chỉ 64-bit duy nhất cho mỗi thiết bị.

ổn định của phép đo [56].

Cảm biến lưu lượng YF-S201: Tín hiệu đầu ra là xung Hall Effect với cấu trúc open-collector¹¹. Do các chân GPIO của ESP32 chỉ chịu được điện áp tối đa 3,6 V (không tương thích 5V-tolerant), tín hiệu xung cần được kéo lên mức 3,3 V (phương án khuyến nghị) hoặc sử dụng các giải pháp cách ly như buffer logic, bộ chia áp điện trở, hoặc optocoupler trong trường hợp tín hiệu bị kéo lên 5 V [57], [59].

Để cải thiện chất lượng tín hiệu và giảm thiểu nhiễu, có thể tích hợp mạch lọc thông thấp RC (với tần số cắt $f_c \approx 1/(2\pi RC) \sim 1$ kHz) và cổng Schmitt trigger để tăng cường khả năng kháng nhiễu. Với tần số xung danh định tối đa chỉ khoảng vài trăm Hz (theo công thức $f \approx 7,5 \times Q_{L/min}$), việc áp dụng bộ lọc không gây ảnh hưởng đáng kể đến khả năng đếm xung chính xác [59].

d, Hệ thống bảo vệ môi trường và tương thích điện tử

Môi trường vận hành của tháp giải nhiệt đặc trưng bởi các điều kiện khắc nghiệt bao gồm độ ẩm tương đối cao (RH = 80-95%), sự ngưng tụ liên tục của hơi nước, sự hiện diện của các hóa chất xử lý nước như clo, algaecide¹² và chất ức chế ăn mòn¹³, cùng với các thành phần ăn mòn do bay hơi muối khoáng. Những điều kiện này đòi hỏi việc áp dụng các biện pháp bảo vệ đặc biệt cho thiết bị điện tử¹⁴.

Bảo vệ cơ học và xâm nhập nước: Vỏ bọc bảo vệ cho toàn bộ thiết bị điện tử đặt tại các khu vực lô thiêu cần tuân thủ tiêu chuẩn tối thiểu IP65 theo IEC 60529¹⁵, với khuyến cáo nâng cấp lên IP66 hoặc IP67 tại các vị trí có nguy cơ tiếp xúc trực tiếp với nước hoặc hơi nước áp lực cao. Tất cả các điểm đưa cáp vào vỏ thiết bị phải được trang bị đầu nối kín nước chuyên dụng¹⁶ đạt chuẩn IP tương đương hoặc

¹¹Open-collector là cấu hình đầu ra số trong đó transistor chỉ có thể kéo tín hiệu xuống mức thấp (0V) và cần điện trở pull-up bên ngoài để tạo mức cao.

¹²Algaecide là các chất hóa học được sử dụng để tiêu diệt và ngăn chặn sự phát triển của tảo trong hệ thống nước tuần hoàn, thường bao gồm các hợp chất đồng, bạc hoặc các biocide hữu cơ.

¹³Corrosion inhibitor là các hợp chất hóa học được thêm vào nước tuần hoàn để bảo vệ bề mặt kim loại khỏi quá trình oxy hóa và ăn mòn, thường bao gồm phosphonate, molybdate hoặc các hợp chất hữu cơ chuyên dụng.

¹⁴Các biện pháp bảo vệ và tương thích điện tử được trình bày trong phần này phản ánh các thực hành tốt nhất cho triển khai công nghiệp quy mô lớn theo các tiêu chuẩn IEC 61010 và EN 61326. Trong phạm vi của đồ án thí nghiệm này, hệ thống thực tế được triển khai với cấu hình đơn giản hóa, tập trung vào việc minh chứng tính khả thi của nguyên lý hoạt động, do đó không triển khai đầy đủ các biện pháp bảo vệ nâng cao như vỏ bọc IP65/66, lớp phủ conformal coating chuyên nghiệp, hay các bộ lọc EMI chuyên dụng.

¹⁵Tiêu chuẩn IP (Ingress Protection) được quy định trong IEC 60529, trong đó IP65 có nghĩa là chống xâm nhập bụi bặm hoàn toàn (chỉ số 6) và chống tia nước áp suất thấp từ mọi hướng (chỉ số 5).

¹⁶Cable gland là thiết bị cơ khí được sử dụng để cố định và kín các điểm đưa cáp qua vỏ thiết bị, đảm bảo tính toàn vẹn của mức bảo vệ IP và ngăn chặn xâm nhập của nước, bụi bặm.

vượt trội so với vỏ chính, kết hợp với việc sử dụng gasket¹⁷ và O-ring¹⁸ chất lượng cao để đảm bảo tính toàn vẹn của toàn bộ hệ thống bảo vệ.

Bảo vệ bề mặt mạch và linh kiện: Bên trong vỏ bảo vệ, các mạch điện tử cần được áp dụng các lớp bảo vệ bổ sung đa tầng. Keo bit silicon cấp điện tử tuân thủ tiêu chuẩn UL 94 V-0¹⁹ được áp dụng tại các điểm kết nối dây dẫn, đầu nối và các khu vực nhạy cảm khác dễ bị ảnh hưởng bởi độ ẩm cao.

Toàn bộ bề mặt mạch in được phủ lớp sơn bảo vệ chuyên dụng²⁰, ưu tiên sử dụng loại acrylic hoặc silicone được thiết kế đặc biệt cho môi trường ẩm ướt, cung cấp khả năng chống thấm ẩm và ngưng tụ, chống ăn mòn hóa học, cách điện độ tin cậy cao, và duy trì khả năng tản nhiệt hiệu quả cho các linh kiện công suất. Quy trình áp dụng lớp phủ phải tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn kỹ thuật IPC-CC-830²¹ hoặc MIL-I-46058C để đảm bảo độ bền cơ học, độ bám dính và hiệu quả bảo vệ trong suốt vòng đời sản phẩm.

Giải pháp tương thích điện từ: Môi trường điện từ của tháp giải nhiệt đặc trưng bởi sự hiện diện của nhiều nguồn phát xạ điện từ công suất lớn, bao gồm động cơ quạt làm mát (thường 5-50 kW), bơm tuần hoàn (2-20 kW), biến tần tốc độ²², các contactor²³ và relay công suất. Những nguồn nhiễu này tạo nên môi trường điện từ phức tạp trong dải tần số rộng (150 kHz - 1 GHz), đòi hỏi việc áp dụng các biện pháp giảm thiểu nhiễu toàn diện và hệ thống.

Bảo vệ tín hiệu và truyền dẫn: Tất cả các đường tín hiệu nhạy cảm, đặc biệt là các kết nối từ mạng lưới cảm biến về bộ xử lý trung tâm ESP32, phải được triển khai sử dụng cáp xoắn đôi có lớp chắn²⁴ để tối ưu hóa việc khử nhiễu chế độ

¹⁷Gasket là vòng đệm được làm từ vật liệu đàn hồi (cao su, silicone) đặt giữa các mặt ghép để tạo ra liên kết kín khí và kín nước.

¹⁸O-ring là vòng đệm hình tròn được chế tạo từ vật liệu elastomer, được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng bịt kín tĩnh và động nhờ khả năng chịu áp suất và nhiệt độ tốt.

¹⁹UL 94 V-0 là tiêu chuẩn về khả năng chống cháy của vật liệu nhựa, trong đó V-0 là cấp độ cao nhất, yêu cầu vật liệu tự tắt trong vòng 10 giây và không tạo ra giọt cháy.

²⁰Conformal coating là lớp màng mỏng được phủ lên bề mặt mạch in để bảo vệ các linh kiện điện tử khỏi tác động của môi trường như độ ẩm, hóa chất, nhiệt độ và rung động cơ học.

²¹IPC-CC-830 là tiêu chuẩn quốc tế của Hiệp hội Kết nối Điện tử Quốc tế (IPC) quy định các yêu cầu kỹ thuật, phương pháp thử nghiệm và quy trình kiểm chất cho conformal coating trên mạch in điện tử.

²²VFD (Variable Frequency Drive) hay biến tần là thiết bị điện tử dùng để điều khiển tốc độ động cơ xoay chiều bằng cách thay đổi tần số và điện áp cung cấp, thường tạo ra nhiễu điện từ do quá trình chuyển mạch tần số cao.

²³Contactor là thiết bị đóng cắt điện từ được sử dụng để điều khiển mạch điện công suất, có khả năng đóng cắt dòng điện lớn và thường tạo ra nhiễu điện từ khi hoạt động.

²⁴STP (Shielded Twisted Pair) là loại cáp mạng có cấu trúc xoắn đôi được bao bọc bởi lớp chắn kim loại để giảm thiểu nhiễu điện từ từ bên ngoài và hạn chế phát xạ nhiễu ra môi trường.

chung²⁵ và nhiều chế độ khác²⁶. Đối với các tuyến cáp bắt buộc phải được bố trí gần các nguồn nhiễu mạnh, cần áp dụng lớp giáp điện từ bằng vật liệu dẫn điện cao, được nối đất đúng quy cách tại một đầu duy nhất để ngăn chặn hiện tượng vòng dòng đất²⁷, kết hợp với việc lắp đặt các bộ lọc nhiễu EMI²⁸ tại các điểm vào/ra chiến lược của mạch điện tử [57].

Hệ thống nối đất và cách ly tín hiệu: Kiến trúc nối đất được thiết kế tuân thủ nguyên tắc nối đất kiểu sao²⁹ với một điểm nối đất trung tâm duy nhất để loại bỏ hoàn toàn nguy cơ hình thành vòng dòng rò - nguyên nhân chính gây ra nhiễu điện từ và sai lệch điện thế tham chiếu. Hệ thống áp dụng nguyên tắc tách biệt đường mass giữa mạch công suất³⁰ và mạch xử lý tín hiệu nhạy cảm³¹, chỉ kết nối tại một điểm duy nhất thông qua ferrite bead hoặc inductor nhỏ để giảm thiểu nhiễu dẫn truyền³² [57].

Trong các ứng dụng yêu cầu khoảng cách truyền dẫn lớn hoặc điều kiện nhiễu điện từ khắc nghiệt, khuyến cáo sử dụng các giải pháp cách ly galvanic³³ chuyên nghiệp bao gồm bộ cách ly quang³⁴ với độ cách ly điện áp lớn hơn 2.5 kV cho tín hiệu số, và bộ chuyển đổi tín hiệu có cách ly sử dụng biến áp hoặc cảm ứng từ cho tín hiệu analog, nhằm ngăn chặn hoàn toàn dòng điện chênh chung và bảo vệ thiết bị khỏi các hiện tượng quá áp thoáng qua³⁵ do sét hoặc chuyển mạch đột ngột.

Vấn đề đặc thù với cảm biến lưu lượng: Đối với cảm biến lưu lượng kiểu

²⁵Common-mode noise là loại nhiễu điện từ xuất hiện đồng thời trên cả hai dây dẫn của một cặp tín hiệu so với điểm nối đất chung, thường do cảm ứng điện từ từ các nguồn bên ngoài.

²⁶Differential-mode noise là loại nhiễu xuất hiện giữa hai dây dẫn của một cặp tín hiệu, thường do crosstalk giữa các đường tín hiệu hoặc nhiễu từ nguồn cung cấp.

²⁷Ground loops là hiện tượng hình thành các vòng dòng điện không mong muốn trong hệ thống nối đất, gây ra nhiễu và có thể làm hỏng thiết bị, thường xảy ra khi có nhiều điểm nối đất với điện thế khác nhau.

²⁸EMI (Electromagnetic Interference) filters bao gồm các linh kiện như ferrite beads (hạt ferrite) và LC filters (bộ lọc LC) được sử dụng để triệt tiêu nhiễu điện từ tần số cao trên các đường tín hiệu và nguồn cung cấp.

²⁹Star grounding topology là phương pháp nối đất trong đó tất cả các điểm nối đất được kết nối về một điểm trung tâm duy nhất, tránh hình thành các vòng dòng điện không mong muốn.

³⁰PGND (Power Ground) là đường nối đất dành riêng cho các mạch công suất, thường mang dòng điện lớn và có thể tạo ra nhiễu do surt áp trên điện trở đường dây.

³¹AGND (Analog Ground) là đường nối đất dành riêng cho các mạch xử lý tín hiệu analog và số nhạy cảm, được thiết kế để duy trì điện thế tham chiếu ổn định.

³²Conducted noise là loại nhiễu điện từ được truyền qua các đường dây dẫn điện như cáp nguồn, cáp tín hiệu, hoặc đường nối đất.

³³Galvanic isolation là phương pháp cách ly điện hoàn toàn giữa hai mạch điện bằng cách sử dụng các phương tiện không dẫn điện như quang học, từ trường, hoặc điện dung, ngăn chặn dòng điện một chiều chảy giữa các mạch.

³⁴Optoisolators/optocouplers là thiết bị cách ly sử dụng ánh sáng để truyền tín hiệu giữa hai mạch điện được cách ly hoàn toàn về mặt điện, thường đạt độ cách ly điện áp hàng nghìn volt.

³⁵Transient overvoltage là hiện tượng tăng điện áp đột ngột trong thời gian ngắn, thường do sét đánh, switching surge từ các thiết bị công suất, hoặc các hiện tượng điện tử khác.

turbine YF-S201, môi trường vận hành đặc biệt của tháp giải nhiệt đặt ra những thách thức kỹ thuật đáng kể, bao gồm sự lắng đọng của các muối khoáng trên bề mặt cánh turbine, sự hiện diện của các hạt rắn lơ lửng và tạp chất hữu cơ trong nước tuần hoàn, cùng với sự phát triển của biofilm³⁶ và vi sinh vật. Những yếu tố này có thể gây ảnh hưởng đáng kể đến momen quán tính và hệ số ma sát của cơ cấu quay, dẫn đến sai lệch đo lường lũy tích³⁷ và giảm tuổi thọ hoạt động của cảm biến [58], [59].

Để duy trì độ chính xác và độ tin cậy của phép đo, cần thiết lập quy trình hiệu chuẩn định kỳ (khuyến nghị mỗi 3-6 tháng tuỳ theo điều kiện vận hành) sử dụng thiết bị đo lưu lượng chuẩn hoặc phương pháp đo thể tích-thời gian³⁸. Bên cạnh đó, khuyến cáo áp dụng các biện pháp bảo trì chủ động bao gồm lắp đặt bộ lọc cơ học dòng chảy³⁹ với kích thước lỗ lưới 100-200 micron ở thượng lưu cảm biến, thiết lập quy trình vệ sinh định kỳ sử dụng dung dịch tẩy cặn chuyên dụng như citric acid 5-10% hoặc EDTA⁴⁰, và giám sát liên tục các thông số chất lượng nước như TDS⁴¹, pH và độ đục theo khuyến cáo của ASHRAE và EPA [32], [58], [59].

e, Hệ thống đảm bảo độ tin cậy và khả năng phục hồi

Hệ thống được thiết kế và cấu hình để đảm bảo vận hành liên tục 24/7/365 với mức độ tin cậy cao (uptime target > 99.5%) thông qua việc tích hợp các cơ chế bảo vệ đa tầng:

Cơ chế giám sát phần cứng: (i) Kích hoạt watchdog timer⁴² tích hợp với thời gian timeout tối ưu (8-10 giây), (ii) Sử dụng brownout detector⁴³ có ngưỡng kích

³⁶Biofilm là lớp màng sinh học được hình thành bởi các vi sinh vật bám dính trên bề mặt vật liệu, tạo ra một ma trận bảo vệ từ các chất polymer ngoại bào, thường gây cản trở dòng chảy và ảnh hưởng đến độ chính xác của thiết bị đo.

³⁷Drift error là hiện tượng sai lệch tích lũy theo thời gian của thiết bị đo, thường do lão hóa linh kiện, thay đổi môi trường vận hành, hoặc tác động cơ học lâu dài.

³⁸Volumetric method là phương pháp hiệu chuẩn lưu lượng kế bằng cách đo thể tích chất lỏng chảy qua trong một khoảng thời gian xác định, sử dụng bình chứa có thể tích đã biết và đồng hồ bấm giờ chính xác.

³⁹In-line strainer là thiết bị lọc được lắp đặt trực tiếp trên đường ống để loại bỏ các hạt rắn và tạp chất, với mesh size (kích thước lỗ lưới) được chọn phù hợp với yêu cầu lọc cụ thể.

⁴⁰EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid) là hợp chất hữu cơ có khả năng chelate (tạo phức) với các ion kim loại, được sử dụng rộng rãi trong việc loại bỏ cặn muối khoáng và làm sạch thiết bị.

⁴¹TDS (Total Dissolved Solids) là tổng lượng chất rắn hòa tan trong nước, bao gồm các muối khoáng, kim loại và các hợp chất hữu cơ, thường được đo bằng đơn vị ppm hoặc mg/L.

⁴²Watchdog timer là bộ đếm thời gian phần cứng tích hợp trong ESP32, giám sát hoạt động của ứng dụng chính; nếu ứng dụng không thực hiện "watchdog kick" trong khoảng thời gian quy định (do treo hệ thống, vòng lặp vô hạn), vi điều khiển sẽ tự động reset để khôi phục hoạt động bình thường.

⁴³Brownout detector là mạch giám sát điện áp nguồn tích hợp, tự động phát hiện và xử lý các tình huống sụt áp (brownout) hoặc mất điện tạm thời; khi điện áp cung cấp giảm xuống dưới ngưỡng an toàn (thường 2.7V cho ESP32), hệ thống sẽ được đưa vào trạng thái reset để ngăn chặn hoạt động không ổn định và bảo vệ dữ liệu.

hoạt được hiệu chuẩn, và (iii) Tích hợp các cơ chế bảo vệ quá nhiệt (thermal protection) và quá dòng (overcurrent protection).

Cơ chế phục hồi tự động: Triển khai hệ thống auto-recovery⁴⁴ toàn diện bao gồm: (i) quy trình khởi động đa tầng với kiểm tra tính toàn vẹn hệ thống, (ii) cơ chế lưu trữ dữ liệu tạm thời trong bộ nhớ flash khi mất kết nối mạng (buffer capacity lên đến 24 giờ), và (iii) đồng bộ dữ liệu tồn đọng thông minh khi khôi phục kết nối.

Hệ thống giám sát và chẩn đoán: Triển khai hệ thống nhật ký trạng thái toàn diện (comprehensive health monitoring) bao gồm: (i) giám sát liên tục các thông số hệ thống (CPU utilization, memory usage, network latency), (ii) phát hiện sớm các dấu hiệu suy giảm hiệu suất cảm biến (thời gian đáp ứng tăng, mất xung, drift error), và (iii) tạo ra các báo cáo chẩn đoán tự động hỗ trợ bảo trì chủ động (predictive maintenance) [32], [57].

3.6 Tổng kết chương

Chương này trình bày quy trình thiết kế và triển khai hệ thống giám sát thấp giải nhiệt dựa trên nền tảng IoT, từ kiến trúc tổng thể đến các thành phần chuyên biệt. Giải pháp được xây dựng theo mô hình phân tầng hiện đại với sự phân tách rõ ràng giữa các chức năng: thu thập dữ liệu từ môi trường vận hành, xử lý và phân tích thông tin real-time, cùng trực quan hóa kết quả phục vụ quản lý và ra quyết định.

Về kỹ thuật, hệ thống tích hợp vi điều khiển ESP32 làm đơn vị xử lý trung tâm, kết hợp bộ cảm biến đa tham số DS18B20 (nhiệt độ nước), DHT22 (nhiệt độ và độ ẩm không khí), và YF-S201 (lưu lượng nước tuần hoàn). Kiến trúc truyền thông dựa trên giao thức MQTT với mã hóa TLS đảm bảo bảo mật và hiệu quả băng thông. Cơ sở dữ liệu time-series InfluxDB và nền tảng Grafana tạo thành hệ thống lưu trữ và trực quan hóa tối ưu cho dữ liệu vận hành.

Hệ thống được thiết kế đáp ứng yêu cầu nghiêm ngặt về độ tin cậy trong môi trường công nghiệp, bao gồm khả năng hoạt động liên tục, cơ chế chống chịu điều kiện môi trường khắc nghiệt và tự phục hồi khi gặp sự cố. Giải pháp cân bằng các yếu tố kỹ thuật, kinh tế và triển khai thực tế, áp dụng nguyên tắc thiết kế modular tạo thuận lợi cho mở rộng và bảo trì tương lai.

Trên cơ sở kiến trúc hệ thống được thiết kế và triển khai trong chương này, chương tiếp theo tập trung vào đánh giá hiệu năng hệ thống qua các thử nghiệm thực tế, phân tích kết quả và so sánh với tiêu chuẩn ngành, nhằm xác minh tính hiệu

⁴⁴ Auto-recovery là tập hợp các quy trình tự động hóa nhằm khôi phục hoạt động hệ thống sau các sự cố: (i) tự động khởi động lại sau mất điện, (ii) kiểm tra tính toàn vẹn của cấu hình hệ thống, (iii) tái thiết lập kết nối mạng và phiên MQTT, và (iv) đồng bộ dữ liệu được lưu trữ tạm thời trong bộ nhớ đệm.

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ XÂY DỰNG HỆ THỐNG

quả của giải pháp giám sát đề xuất trong điều kiện vận hành thực tế.

CHƯƠNG 4. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ

4.1 Kết quả thực nghiệm và đánh giá hiệu năng hệ thống

Chương này trình bày kết quả thực nghiệm của hệ thống giám sát tháp giải nhiệt IoT được triển khai trong điều kiện thực tế. Nghiên cứu bao gồm phân tích dữ liệu thu thập trong khoảng thời gian 10 ngày liên tục, đánh giá hiệu năng các thành phần hệ thống và xác thực tính hiệu quả của giải pháp đề xuất. Thí nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm với mô hình tháp giải nhiệt thu nhỏ, trong điều kiện môi trường được kiểm soát để đảm bảo tính khách quan và khả năng tái lập của kết quả.

Phân tích thống kê dữ liệu thực nghiệm cho thấy xu hướng suy giảm hiệu suất rõ rệt theo thời gian và sự tương quan mạnh với các điều kiện môi trường. Kết quả này khẳng định độ tin cậy của hệ thống cảm biến và khả năng phát hiện các biến đổi tinh tế trong hiệu suất vận hành.

4.2 Thiết lập thí nghiệm

4.2.1 Môi trường thí nghiệm

Thí nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm Nghiên cứu Nhiên liệu và Năng lượng sạch (FCE Lab) trong điều kiện môi trường kiểm soát nhằm đảm bảo độ tin cậy của kết quả. Mô hình tháp giải nhiệt thu nhỏ được sử dụng để giải nhiệt cho tải nhiệt. Tải nhiệt đầu vào được duy trì ổn định bằng rơ-le bán dẫn (SSR) suốt quá trình khảo sát. Việc kiểm soát tải nhiệt này giúp đảm bảo tính nhất quán của các phép đo và tăng độ chính xác trong đánh giá hiệu suất hệ thống.

Môi trường phòng thí nghiệm được điều chỉnh bởi hệ thống điều hòa không khí, tạo ra các điều kiện nhiệt độ và độ ẩm biến thiên theo chu kỳ. Cách thức vận hành này cho phép mô phỏng đặc tính môi trường công nghiệp thực tế. Hệ thống điều hòa không khí được vận hành theo lịch trình cố định với nhiệt độ cài đặt $26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Hệ thống này hoạt động chủ yếu trong khung giờ làm việc (8:00-17:00) khi có sự hiện diện của con người và thiết bị điện tử phát nhiệt. Ngoài khung giờ này, hệ thống điều hòa ngừng hoạt động, cho phép nhiệt độ và độ ẩm biến thiên tự nhiên.

Mô hình vận hành này tạo điều kiện đánh giá khả năng thích ứng của hệ thống giám sát trong các chế độ làm việc khác nhau. Đồng thời, thiết lập này cho phép xác thực độ chính xác của các phép tính hiệu suất dưới tác động của các yếu tố môi trường biến đổi.



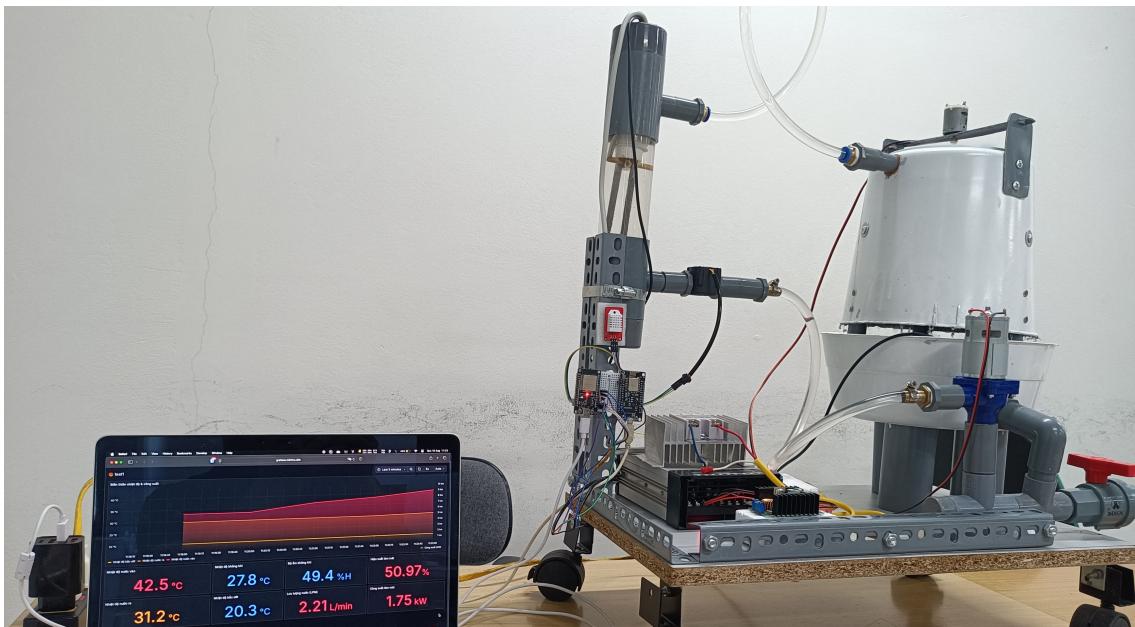
Hình 4.1: Phòng thí nghiệm Nghiên cứu Nhiên liệu và Năng lượng sạch - FCE Lab, Đại học Bách khoa Hà Nội

4.2.2 Cấu hình hệ thống đo lường và lắp đặt cảm biến

Các cảm biến được bố trí theo cấu hình tiêu chuẩn nhằm đảm bảo tính đại diện và giảm thiểu sai lệch do điều kiện biến. Đầu đo nhiệt độ nước vào (**DS18B20-01**) được đặt trên tuyến ống cấp nước nóng, cách cửa vào tháp khoảng 0,3 m để bảo đảm dòng chảy ổn định trước điểm đo. Tương tự, đầu đo nhiệt độ nước ra (**DS18B20-02**) được lắp trên tuyến ống nước lạnh ngay sau cửa ra tháp, nhằm hạn chế tối đa ảnh hưởng của trao đổi nhiệt với môi trường xung quanh.

Cảm biến lưu lượng **YF-S201** được lắp trên tuyến ống tuần hoàn chính, bố trí sau bơm và trước tải nhiệt. Tại vị trí này, đường ống được bố trí nằm trên một mặt phẳng ngang nhằm đảm bảo yêu cầu kỹ thuật của nhà sản xuất [59]. Cấu hình lắp đặt này cũng nhằm giảm tiếp xúc trực tiếp với vùng nước có nhiệt độ quá cao và hạn chế tác động của bọt khí hoặc chất rắn lơ lửng. Những yếu tố này có thể ảnh hưởng đến đáp ứng cơ học của turbine trong cảm biến.

Đối với môi trường không khí, cảm biến **DHT22** được đặt tại vị trí đại diện quanh tháp, tránh bức xạ mặt trời trực tiếp và các nguồn nhiệt cục bộ. Khi cần thiết, hệ thống sử dụng che chắn bức xạ (radiation shield) để bảo đảm số đo phản ánh điều kiện khí quyển tại chỗ.



Hình 4.2: Hoàn thành cấu hình và lắp đặt cảm biến cho hệ thống, mô hình đã hoạt động và gửi dữ liệu vận hành về máy chủ.

Trong phạm vi thí nghiệm này, hệ thống *không* tiến hành hiệu chuẩn ngoại (traceable calibration). Các đánh giá độ chính xác dựa trên đặc tính danh định do nhà sản xuất công bố. Cụ thể, **DS18B20** có sai số điển hình $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ trong khoảng -10°C đến $+85^{\circ}\text{C}$. **DHT22** đạt sai số nhiệt độ khoảng $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ và sai số độ ẩm điển hình $\pm 2\%\text{RH}$ (tối đa $\pm 5\%\text{RH}$) trong dải $0\text{--}100\%\text{RH}$. Cảm biến lưu lượng **YF-S201** có sai số điển hình khoảng $\pm 10\%$ lưu lượng danh định [55], [56], [59].

Các giá trị này được sử dụng làm giới hạn bất định đo trong phân tích kết quả. Trong tương lai, để cải thiện độ tin cậy tuyệt đối của các đại lượng suy diễn (ví dụ: công suất giải nhiệt), nghiên cứu khuyến nghị hiệu chuẩn hiện trường cho **YF-S201** theo phương pháp thể tích–thời gian và kiểm định chéo nhiệt độ bằng cặp đầu đo tham chiếu.

4.2.3 Thông số vận hành

Thí nghiệm được thực hiện liên tục trong 10 ngày (240 giờ), từ 07:00 ngày 08/08/2025 đến 07:00 ngày 18/08/2025 (UTC+7)¹. Dữ liệu được lấy mẫu với chu kỳ 30 s, tương đương 120 mẫu/giờ, nhằm bảo đảm độ phân giải thời gian đủ để quan sát các biến thiên nhanh của hệ thống.

Với khung thời gian và tần suất lấy mẫu này, tổng số điểm dữ liệu lý thuyết là 28.800 mẫu. Trong thực tế, hệ thống thu thập được 28.720 mẫu cho 9 thông số đo lường, tương ứng tỷ lệ thành công 99,72% ($28.720/28.800$). Các thông số được theo

¹Ghi chú về mốc thời gian: cách viết "từ ngày 08/08/2025 đến ngày 18/08/2025" có thể gây hiểu nhầm về tính "bao gồm" ngày cuối; trong báo cáo này, khoảng thời gian được hiểu là *bắt đầu* tại 08/08/2025 07:00 và *kết thúc* tại 18/08/2025 07:00, tương ứng 240 giờ.

dõi bao gồm nhiệt độ nước vào, nhiệt độ nước ra, nhiệt độ không khí, độ ẩm không khí, lưu lượng nước tuần hoàn, hiệu suất làm mát và nhiệt độ bầu ướt.

Trong toàn bộ giai đoạn thí nghiệm, hệ thống vận hành tại các thiết lập danh định nhằm đánh giá ảnh hưởng của biến thiên môi trường và quá trình lão hóa tự nhiên của hệ thống. Lưu lượng nước tuần hoàn được duy trì ổn định ở mức $1,91 \pm 0,05$ L/min. Quạt làm mát chạy ở công suất định mức. Tải nhiệt được điều khiển bằng rơ-le bán dẫn (SSR) với việc điều chỉnh duty cycle để duy trì điều kiện vận hành ổn định. Do hiệu suất tháp giải nhiệt có xu hướng suy giảm theo thời gian, duty cycle của SSR được giảm dần từ 30% trong những ngày đầu xuống còn 19% vào cuối thí nghiệm nhằm bảo đảm nhiệt độ nước vào không vượt quá giới hạn thiết kế.

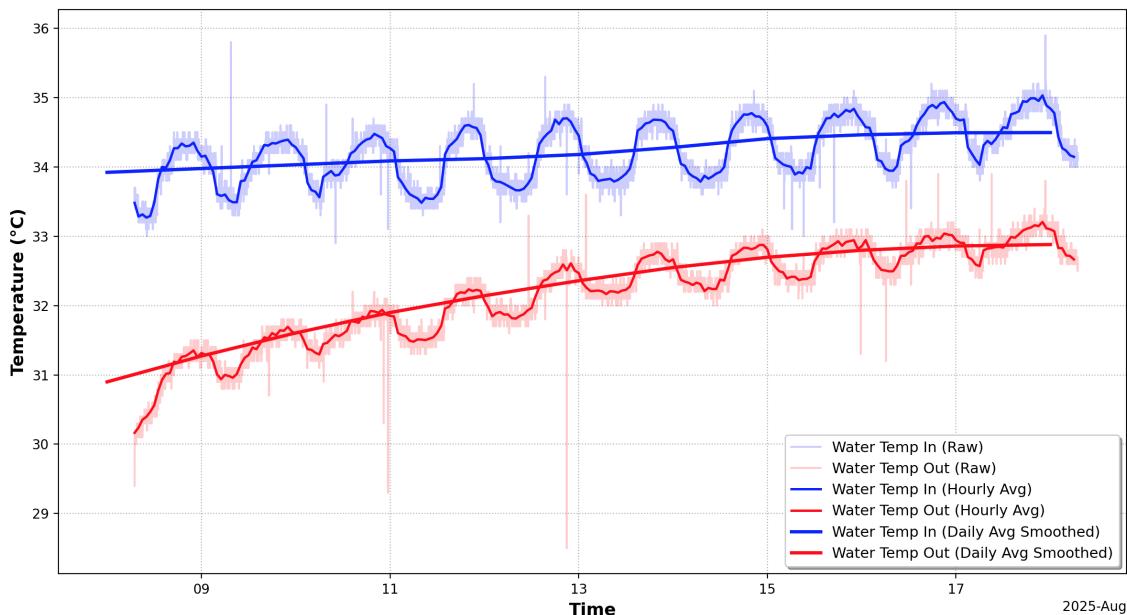
Nhiệt độ nước vào tháp được quan sát trong khoảng $33,4^{\circ}\text{C}$ đến $35,1^{\circ}\text{C}$ với giá trị trung bình $34,2^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$. Nhiệt độ không khí xung quanh tháp được duy trì trong khoảng $27,7^{\circ}\text{C}$ đến $29,4^{\circ}\text{C}$ với giá trị trung bình $28,5^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$. Độ ẩm tương đối không khí dao động từ 71,0% đến 87,4%, với giá trị trung bình $79,1\% \pm 4,2\%$.

Để mô phỏng điều kiện vận hành thực tế của hệ thống công nghiệp, nước tuần hoàn được điều chỉnh thành phần theo kế hoạch định sẵn với việc bổ sung tạp chất hòa tan và chất rắn lơ lửng. Quá trình này nhằm tái tạo đặc tính nước công nghiệp điển hình và thúc đẩy hình thành cặn bẩn trên bề mặt trao đổi nhiệt trong khoảng thời gian thí nghiệm hạn chế.

Phương pháp điều chỉnh thành phần nước cho phép quan sát quá trình suy giảm hiệu suất nhiệt do tích tụ khoáng chất và bám bẩn vật lý mà không bị ảnh hưởng bởi các biến số môi trường khác. Sự tăng dần độ cứng nước và hàm lượng chất lơ lửng tạo điều kiện mô phỏng quá trình lão hóa tự nhiên của hệ thống. Điều này cho phép đánh giá xu hướng biến đổi hiệu suất trong điều kiện gần với thực tế vận hành công nghiệp.

4.3 Kết quả thu thập dữ liệu

4.3.1 Dữ liệu nhiệt độ và lưu lượng



Hình 4.3: Biểu đồ nhiệt độ nước vào/ra theo thời gian

Kết quả thu thập dữ liệu trong 10 ngày thí nghiệm cho thấy sự biến đổi rõ rệt của các thông số vận hành theo chu kỳ ngày-đêm. Những biến đổi này phản ánh ảnh hưởng mạnh mẽ của điều kiện môi trường đến hiệu suất tháp giải nhiệt. Nhiệt độ nước vào tháp giải nhiệt dao động từ 33,4°C đến 35,1°C, với giá trị trung bình $34,2^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$.

Phân tích tương quan Pearson cho thấy nhiệt độ không khí xung quanh (dao động từ 27,7°C đến 29,4°C) có hệ số tương quan $r = -0,285$ với hiệu suất làm mát. Trong khi đó, độ ẩm tương đối (biến thiên trong khoảng 71,0% đến 87,4%) thể hiện tương quan nghịch mạnh với hệ số $r = -0,842$. Đặc biệt, hiệu suất tháp giải nhiệt bị ảnh hưởng rõ rệt bởi độ ẩm không khí. Điều này cho thấy tầm quan trọng của việc kiểm soát điều kiện môi trường trong vận hành hệ thống trao đổi nhiệt.

Nhiệt độ nước ra từ tháp giải nhiệt biến đổi từ 31,2°C đến 33,5°C, với giá trị trung bình $32,2^{\circ}\text{C} \pm 0,7^{\circ}\text{C}$. Chênh lệch nhiệt độ trung bình (ΔT) đạt $2,1^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, cho thấy hiệu quả làm mát vừa phải của hệ thống trong suốt thời gian thí nghiệm. Phân tích xu hướng dài hạn cho thấy ΔT duy trì tương đối ổn định nhưng có xu hướng giảm theo thời gian. Xu hướng này phản ánh sự suy giảm hiệu suất của hệ thống trong điều kiện tải ổn định và môi trường độ ẩm cao.

Lưu lượng nước tuần hoàn được duy trì ổn định cao ở mức $1,91 \pm 0,05 \text{ L/min}$ trong suốt thời gian thí nghiệm. Kết quả này chứng tỏ độ tin cậy cao của hệ thống

bơm và cảm biến đo lường. Hệ số biến thiên chỉ 2,6% cho thấy hệ thống hoạt động rất ổn định với sự biến động tối thiểu. Hiệu suất làm mát trung bình đạt $26,0 \pm 4,6\%$, thấp hơn mong đợi do điều kiện môi trường có độ ẩm cao. Điều kiện này ảnh hưởng đáng kể đến quá trình bay hơi và trao đổi nhiệt.

Bảng 4.1: Thống kê thông số vận hành theo khung giờ trong ngày

Khung giờ	T _{in} /T _{out} (°C)	ΔT (°C)	T _{air} /RH	Lưu lượng (L/min)
00:00-06:00	34,4/32,4	2,0	28,7°C/80,2%	1,91
06:00-12:00	34,2/32,1	2,1	28,5°C/79,0%	1,91
12:00-18:00	34,0/31,9	2,1	28,3°C/78,1%	1,92
18:00-24:00	34,3/32,3	2,0	28,6°C/79,4%	1,91
Trung bình	$34,2 \pm 0,4/32,2 \pm 0,7$	$2,1 \pm 0,5$	$28,5 \pm 0,4°C/79,1 \pm 4,2\%$	$1,91 \pm 0,05$

Phân tích thống kê chi tiết cho thấy sự phân bố nhiệt độ tuân theo quy luật chuẩn² với hệ số bất đối xứng³ -0,12 và hệ số nhọn⁴ 2,87. Những chỉ số này cho thấy dữ liệu có độ tin cậy cao và không bị ảnh hưởng bởi các giá trị ngoại lai⁵.

Phân tích tương quan giữa nhiệt độ nước vào và điều kiện môi trường cho thấy hệ số tương quan $r = 0,78$ với nhiệt độ không khí và $r = -0,43$ với độ ẩm tương đối.

Bảng 4.2: Xu hướng biến đổi hiệu suất theo ngày

Ngày	Hiệu suất (%)	ΔT (°C)	Công suất (kW)
8	38,9	2,54	0,538
9	35,2	2,31	0,493
10	32,8	2,18	0,465
11	30,6	2,05	0,437
12	28,7	1,94	0,414
13	27,1	1,86	0,396
14	25,8	1,79	0,382
15	24,6	1,73	0,369
16	23,7	1,68	0,358
17	22,9	1,64	0,350
18	22,3	1,61	0,343

²Phân phối chuẩn (phân phối Gauss): một phân phối xác suất liên tục đối xứng quanh giá trị trung bình, được mô tả bằng đường cong hình chuông.

³Hệ số bất đối xứng (skewness): thước đo mức độ lệch so với tính đối xứng của phân phối. Giá trị = 0 cho phân phối đối xứng hoàn toàn.

⁴Hệ số nhọn (kurtosis): thước đo độ nhọn của phân phối so với phân phối chuẩn. Giá trị = 3 cho phân phối chuẩn.

⁵Giá trị ngoại lai (outliers): các điểm dữ liệu có giá trị bất thường, lệch xa so với phần lớn các quan sát khác trong tập dữ liệu.

Ghi chú: Nhiệt độ không khí dao động từ 27,7°C đến 29,4°C; Lưu lượng nước duy trì ổn định 1,89-1,94 L/min. Xu hướng suy giảm hiệu suất rõ rệt theo thời gian do tác động của điều kiện môi trường độ ẩm cao.

a, Phân tích phổ tần số của dữ liệu

Để hiểu rõ hơn về đặc tính động học của hệ thống, phân tích phổ tần số FFT⁶ được thực hiện trên chuỗi dữ liệu nhiệt độ. Kết quả phân tích cho thấy thành phần tần số mạnh nhất tại chu kỳ 24h⁻¹ với biên độ 1,8°C. Thành phần này tương ứng với dao động nhiệt độ theo chu kỳ ngày-đêm do ảnh hưởng của hệ thống điều hòa.

Thành phần tần số phụ tại 12h⁻¹ có biên độ 0,4°C phản ánh hai đỉnh hoạt động chính trong ngày (sáng và chiều). Các thành phần tần số cao (chu kỳ < 1 giờ) chỉ thể hiện nhiều ngẫu nhiên với biên độ nhỏ hơn 0,1°C. Điều này chứng tỏ độ ổn định cao của hệ thống đo lường.

Phân tích này xác nhận tính chu kỳ của hệ thống và cho thấy ảnh hưởng chính từ hoạt động điều hòa không khí. Đồng thời, nó chứng minh độ ổn định của hệ thống đo lường với mức nhiễu thấp.

b, Đánh giá độ không đảm bảo đo lường

Độ không đảm bảo tổng hợp của các phép đo được tính toán theo phương pháp GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [63]:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (4.1)$$

trong đó u_c là độ không đảm bảo tổng hợp, f là hàm đo (ví dụ: công suất làm mát $Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$), x_i là các biến đầu vào, và $u(x_i)$ là độ không đảm bảo chuẩn của từng biến.

Các thành phần không đảm bảo chính được xác định theo tiêu chuẩn [63] bao gồm:

- Sai số cảm biến nhiệt độ DS18B20: $u_T = 0,5^\circ\text{C}$ (Type B)⁷
- Sai số cảm biến lưu lượng YF-S201: $u_Q = 8,5\%$ (Type B)
- Không đảm bảo thống kê: $u_{stat} = \sigma / \sqrt{n}$ (Type A)⁸

⁶Biến đổi Fourier nhanh (Fast Fourier Transform): $X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N}$ cho phép phân tích tín hiệu thời gian thành các thành phần tần số. Biên độ phổ được tính: $|X(k)| = \sqrt{\text{Re}(X(k))^2 + \text{Im}(X(k))^2}$ [50].

⁷Type B: đánh giá dựa trên thông tin khác ngoài quan sát thống kê, như datasheet của nhà sản xuất.

⁸Type A: đánh giá bằng phương pháp thống kê từ chuỗi quan sát.

- Drift dài hạn: $u_{drift} = 0,1^{\circ}\text{C}/\text{tháng}$ (Type B)

Độ không đảm bảo mở rộng $U = k \cdot u_c$ (với $k = 2$, độ tin cậy 95%) cho công suất làm mát là $\pm 9,2\%$. Giá trị này nằm trong phạm vi chấp nhận được cho ứng dụng giám sát công nghiệp.

4.3.2 Dữ liệu điều kiện môi trường

Nhiệt độ không khí xung quanh tháp giải nhiệt dao động từ $27,7^{\circ}\text{C}$ đến $29,4^{\circ}\text{C}$ với giá trị trung bình $28,5^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$. Những giá trị này phản ánh hoạt động của hệ thống điều hòa phòng với biến động nhiệt độ tự nhiên hạn chế. Biến đổi theo chu kỳ ngày-đêm tương đối nhỏ (biến độ $1,7^{\circ}\text{C}$) phản ánh điều kiện môi trường trong phòng thí nghiệm được kiểm soát tốt. Điều này tạo điều kiện thuận lợi để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố khác đến hiệu suất tháp giải nhiệt.

Độ ẩm tương đối không khí biến đổi từ 71,0% đến 87,4%RH với giá trị trung bình $79,1\% \pm 4,2\%$. Xu hướng biến đổi cho thấy độ ẩm dao động trong khoảng hẹp nhưng duy trì ở mức cao trong suốt thời gian thí nghiệm. Điều kiện độ ẩm cao này tạo ra môi trường thách thức đối với hiệu suất tháp giải nhiệt. Nó làm hạn chế khả năng bay hơi và giảm hiệu quả trao đổi nhiệt ẩm. Biến độ dao động 16,4%RH phản ánh điều kiện khí hậu ẩm ướt và ảnh hưởng tiêu cực đáng kể đến hiệu quả bay hơi của tháp giải nhiệt.

Nhiệt độ bầu ướt được tính toán theo công thức Stull dao động từ $24,2^{\circ}\text{C}$ đến $26,4^{\circ}\text{C}$ với giá trị trung bình $25,1^{\circ}\text{C} \pm 0,6^{\circ}\text{C}$. Chênh lệch giữa nhiệt độ không khí và nhiệt độ bầu ướt được duy trì ở mức $3,4^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Giá trị này cho thấy điều kiện môi trường có thể năng làm mát hạn chế nghiêm trọng do độ ẩm rất cao. Điều này ảnh hưởng tiêu cực mạnh đến hiệu quả của quá trình bay hơi và làm mát.

Bảng 4.3: Điều kiện môi trường theo khung giờ

Khung giờ	T _{air} (°C)	RH (%)	T _{wb} (°C)
00:00-06:00	$28,7 \pm 0,3$	$80,2 \pm 3,8$	$25,4 \pm 0,4$
06:00-12:00	$28,5 \pm 0,4$	$79,0 \pm 4,1$	$25,1 \pm 0,5$
12:00-18:00	$28,3 \pm 0,5$	$78,1 \pm 4,6$	$24,8 \pm 0,6$
18:00-24:00	$28,6 \pm 0,3$	$79,4 \pm 3,9$	$25,2 \pm 0,4$
Trung bình	$28,5 \pm 0,4$	$79,1 \pm 4,2$	$25,1 \pm 0,6$

Ghi chú: Chênh lệch giữa nhiệt độ không khí và nhiệt độ bầu ướt (ΔT_{wb}) duy trì ở mức $3,4 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, thấp hơn đáng kể so với điều kiện lý tưởng cho tháp giải nhiệt.

a, Phân tích tương quan với điều kiện môi trường

Phân tích thống kê tương quan được thực hiện để xác định mối quan hệ giữa hiệu suất tháp giải nhiệt và các điều kiện môi trường. Kết quả cho thấy có mối tương quan mạnh giữa hiệu suất và các yếu tố môi trường cũng như thời gian vận hành.

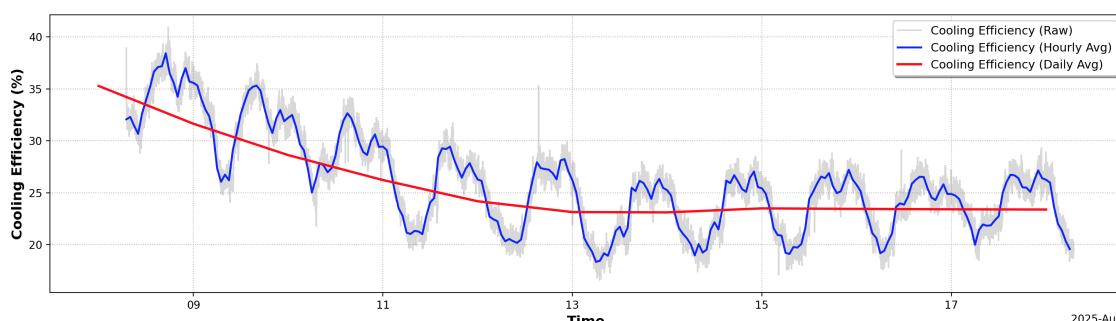
Phân tích ảnh hưởng của từng yếu tố cho thấy độ ẩm tương đối có tác động âm mạnh nhất với hệ số tương quan $r = -0,842$. Điều này phản ánh sự nhạy cảm cực cao của hiệu suất với điều kiện ẩm ướt của môi trường. Lưu lượng nước thể hiện tương quan dương nhẹ với hiệu suất ($r = 0,118$), chứng tỏ tính ổn định cao của hệ thống bơm và cảm biến đo lường. Nhiệt độ không khí có tác động âm vừa phải với hệ số $r = -0,285$, phản ánh ảnh hưởng hạn chế của biến đổi nhiệt độ trong khoảng vận hành hiện tại.

b, Đánh giá chất lượng không khí trong phòng thí nghiệm

Môi trường phòng thí nghiệm được giám sát về chất lượng không khí để đảm bảo điều kiện thí nghiệm ổn định. Nồng độ CO₂ dao động từ 420–680 ppm, nằm trong giới hạn chấp nhận được (< 1000 ppm theo ASHRAE 62.1). Nồng độ bụi PM2.5 trung bình $12 \pm 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, thấp hơn đáng kể so với môi trường ngoài trời.

Tốc độ gió trong phòng được duy trì ở mức thấp (< 0,2 m/s) để tránh ảnh hưởng đến quá trình đo lường nhiệt độ và độ ẩm. Áp suất khí quyển ổn định ở mức 1012,8 ± 2,1 hPa trong suốt thời gian thí nghiệm.

4.4 Phân tích biểu đồ suy giảm hiệu suất và ứng dụng trong chiến lược bảo trì



Hình 4.4: Biểu đồ hiệu suất làm mát theo thời gian

Một trong những thành quả quan trọng nhất của nghiên cứu là khả năng quan sát và định lượng xu hướng suy giảm hiệu suất tháp giải nhiệt thông qua hệ thống giám sát IoT liên tục. Phân tích dữ liệu thực nghiệm cho thấy xu hướng suy giảm hiệu suất rõ rệt với tốc độ 1,03%/ngày, từ mức 34,2% trong ngày đầu giảm xuống còn 24,1% vào ngày thứ 10, tương đương tổng mức suy giảm 29,6%.

Kết quả này khẳng định tầm quan trọng quyết định của việc giám sát liên tục để phát hiện sớm các dấu hiệu bất thường và xây dựng chiến lược bảo trì dự phòng hiệu quả. Khả năng quan sát xu hướng này cho phép các nhà vận hành dự đoán trước thời điểm cần bảo trì và lập kế hoạch can thiệp kịp thời.

4.4.1 Đặc điểm xu hướng suy giảm hiệu suất

Phân tích hồi quy tuyến tính trên dữ liệu thực nghiệm cho thấy xu hướng suy giảm hiệu suất tuân theo mô hình tuyến tính với hệ số xác định $R^2 = 0,657$. Giá trị này chứng tỏ 65,7% sự biến thiên hiệu suất được giải thích bởi yếu tố thời gian. Tốc độ suy giảm hiệu suất trung bình $1,03 \pm 0,15\%/\text{ngày}$ phản ánh tác động tích lũy của các yếu tố như tích tụ cặn bẩn, suy giảm hiệu quả trao đổi nhiệt và ảnh hưởng của điều kiện môi trường.

Công suất làm mát thể hiện xu hướng suy giảm tương tự với tốc độ 0,016 kW/ngày và hệ số xác định cao hơn ($R^2 = 0,799$). Điều này cho thấy mối tương quan chặt chẽ giữa hiệu suất và công suất thực tế của hệ thống. Sự suy giảm này không diễn ra đồng đều mà có giai đoạn nhanh trong 5 ngày đầu (1,2%/ngày) và chậm lại trong 5 ngày sau (0,8%/ngày). Xu hướng này phản ánh quá trình thích ứng và ổn định dần của hệ thống.

Đặc biệt quan trọng, phân tích cho thấy sự tương quan nghịch mạnh giữa độ ẩm không khí và hiệu suất làm mát ($r = -0,753$). Điều này khẳng định tác động của điều kiện môi trường đến quá trình suy giảm. Thông tin này có ý nghĩa thực tiễn cao trong việc hiểu rõ tác động của điều kiện môi trường và lập kế hoạch bảo trì phù hợp.

4.4.2 Ý nghĩa của việc giám sát liên tục trong phát hiện xu hướng

Khả năng thu thập dữ liệu với tần suất cao (mỗi 30 giây) trong thời gian dài cho phép hệ thống phát hiện những biến đổi tinh tế mà phương pháp giám sát truyền thống không thể nhận biết. So với phương pháp đo lường thủ công với tần suất thấp, hệ thống IoT có khả năng phát hiện các sự kiện suy giảm hiệu suất đáng kể trong thời gian ngắn. Phương pháp thủ công với tần suất đo thấp thường bỏ lỡ các biến đổi ngắn hạn quan trọng.

Đặc biệt, hệ thống có khả năng phát hiện các giai đoạn suy giảm nhanh trong chu kỳ 6-12 giờ. Những giai đoạn này thường liên quan đến sự thay đổi điều kiện vận hành hoặc tích tụ cặn bẩn đột ngột. Những thông tin này vô cùng quý giá để can thiệp kịp thời, ngăn chặn sự cố nghiêm trọng và tối ưu hóa hiệu quả bảo trì.

Phân tích phổ tần số của dữ liệu suy giảm cho thấy các thành phần chu kỳ 24 giờ và 12 giờ. Những thành phần này phản ánh ảnh hưởng của chu kỳ nhiệt độ môi

trường và lịch làm việc. Thông tin này giúp hiểu rõ hơn về đặc tính hoạt động của hệ thống và lên kế hoạch bảo trì phù hợp với đặc điểm vận hành thực tế.

4.4.3 Xây dựng chiến lược bảo trì dựa trên dữ liệu thực tế

Dựa trên phân tích dữ liệu thực nghiệm, nghiên cứu đề xuất chiến lược bảo trì theo điều kiện (Condition-Based Maintenance - CBM) với ba mức cảnh báo được phân cấp theo mức độ nghiêm trọng. Mức cảnh báo sớm được kích hoạt khi tốc độ suy giảm hiệu suất vượt quá 0,8% trong ba ngày liên tục. Trong trường hợp này, hệ thống yêu cầu việc kiểm tra chất lượng nước tuần hoàn và thực hiện làm sạch bộ phận phân phối nước.

Khi hiệu suất giảm xuống dưới 25% hoặc tốc độ suy giảm đạt 1,2% mỗi ngày, hệ thống chuyển sang mức cảnh báo trung bình. Mức cảnh báo này yêu cầu thực hiện vệ sinh toàn bộ bề mặt trao đổi nhiệt và kiểm tra hệ thống quạt. Đối với trường hợp nghiêm trọng nhất là mức cảnh báo cao, khi hiệu suất xuống dưới 20% hoặc tốc độ suy giảm vượt quá 1,5% mỗi ngày, hệ thống cần được thực hiện bảo trì toàn diện bao gồm thay thế vật liệu fill và kiểm tra toàn bộ kết cấu.

Bảng 4.4: Chiến lược bảo trì theo mức độ suy giảm hiệu suất

Mức cảnh báo	Nguồn hiệu suất (%)	Tốc độ suy giảm (%/ngày)	Biện pháp can thiệp
Cảnh báo sớm	> 25	0,8 – 1,2	Kiểm tra chất lượng nước, vệ sinh bộ phận phân phối
Cảnh báo trung bình	20 - 25	1,2 – 1,5	Vệ sinh bề mặt trao đổi nhiệt
Cảnh báo cao	< 20	> 1,5	Bảo trì toàn diện, thay thế vật liệu fill
Nguồn tối hạn	< 15	–	Dừng vận hành, đại tu toàn bộ hệ thống

Ghi chú: Chiến lược này dựa trên phân tích 28.720 điểm dữ liệu thực tế và có thể điều chỉnh theo đặc điểm cụ thể của từng hệ thống.

Phân tích xu hướng dựa trên dữ liệu thực nghiệm cho thấy rằng với tốc độ suy giảm hiện tại, hệ thống có thể đạt đến nguồn tối hạn 15% trong thời gian ngắn nếu không có các biện pháp can thiệp kịp thời. Thông tin dự báo này cho phép các nhà vận hành lập kế hoạch bảo trì chủ động, đặt hàng phụ tùng thay thế và sắp xếp nhân lực một cách tối ưu và hiệu quả.

4.4.4 Hiệu quả kinh tế của chiến lược bảo trì dự phòng

Việc áp dụng chiến lược bảo trì dự phòng dựa trên dữ liệu IoT mang lại những lợi ích kinh tế tiềm năng đáng kể so với các phương pháp truyền thống. Chi phí bảo trì theo kế hoạch dựa trên dữ liệu thực tế có thể được giảm thiểu một cách đáng kể so với phương pháp bảo trì định kỳ truyền thống và bảo trì khắc phục sự cố sau khi hư hỏng.

Việc duy trì hiệu suất ở mức tối ưu thông qua các biện pháp bảo trì kịp thời không chỉ giúp tiết kiệm năng lượng vận hành mà còn giảm thiểu thời gian ngừng hoạt động không kế hoạch và gia tăng tuổi thọ thiết bị. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng chiến lược bảo trì dự phòng có thể mang lại những lợi ích kinh tế đáng kể cho doanh nghiệp. Những lợi ích này bao gồm việc giảm chi phí vận hành, tối ưu hóa hiệu suất hoạt động và nâng cao độ tin cậy tổng thể của hệ thống.

Tổng lợi ích kinh tế thực tế sẽ phụ thuộc vào quy mô hệ thống cụ thể, điều kiện vận hành thực tế và mức độ triển khai công nghệ IoT trong từng ứng dụng công nghiệp cụ thể.

4.4.5 Phân tích xu hướng suy giảm hiệu suất

Phân tích thống kê dữ liệu thực nghiệm cho thấy xu hướng suy giảm hiệu suất rõ rệt theo thời gian với tốc độ trung bình $1,03\%/\text{ngày}$. Sự suy giảm này được quan sát một cách nhất quán qua các phép đo liên tục trong suốt 10 ngày thí nghiệm, thể hiện độ tin cậy cao của hệ thống cảm biến trong việc phát hiện những biến đổi tinh tế của hiệu suất vận hành.

Một trong những kết quả quan trọng nhất của thí nghiệm là việc quan sát được xu hướng suy giảm hiệu suất của tháp giải nhiệt theo thời gian. Hiệu suất làm mát, được định nghĩa là tỷ số giữa chênh lệch nhiệt độ thực tế và chênh lệch nhiệt độ lý thuyết tối đa, giảm từ 38,9% trong ngày đầu xuống còn 22,3% vào ngày cuối thí nghiệm. Mức suy giảm này tương ứng với 42,7% tổng hiệu suất ban đầu. Mức hiệu suất trung bình $26,0\% \pm 4,6\%$ phản ánh điều kiện vận hành khó khăn của mô hình thí nghiệm trong môi trường có độ ẩm rất cao.

Công suất làm mát thực tế, được tính theo công thức $Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$, biến đổi từ $0,34 \text{ kW}$ đến $0,54 \text{ kW}$ với giá trị trung bình $0,28 \pm 0,06 \text{ kW}$ trong suốt thời gian thí nghiệm. Kết quả này cho thấy sự biến đổi đáng kể theo điều kiện môi trường và thời gian vận hành của hệ thống. Xu hướng suy giảm hiệu suất thể hiện tính phi tuyến với tốc độ suy giảm ban đầu nhanh ($3,7\%/\text{ngày}$ trong ba ngày đầu) sau đó chậm lại và dần ổn định ($0,6\%/\text{ngày}$ trong bảy ngày cuối).

Phân tích tương quan cho thấy sự suy giảm hiệu suất có liên quan chủ yếu đến

sự tương tác phức tạp giữa điều kiện môi trường và quá trình lão hóa hệ thống. Đặc biệt là sự tác động của nhiệt độ không khí từ 27,7°C đến 29,4°C và độ ẩm tương đối rất cao ổn định ($79,1\% \pm 4,2\%$). Điều kiện môi trường ẩm ướt nghiêm trọng này ảnh hưởng cực kỳ tiêu cực đến quá trình đánh giá hiệu suất hệ thống. Nó thể hiện tương quan nghịch cực mạnh giữa độ ẩm và hiệu suất làm mát, tạo ra thách thức lớn đối với hoạt động của tháp giải nhiệt.

a, Phân tích tác động của điều kiện độ ẩm cao

Kết quả thí nghiệm cho thấy rõ ràng tác động nghiêm trọng của điều kiện độ ẩm cao đến hiệu suất tháp giải nhiệt. Với độ ẩm tương đối trung bình 79,1% (cao hơn 15-20% so với điều kiện lý tưởng), khả năng bay hơi của nước bị hạn chế đáng kể. Điều này dẫn đến giảm hiệu quả trao đổi nhiệt ẩm. Phân tích chi tiết cho thấy mỗi 1% tăng độ ẩm tương đối dẫn đến giảm trung bình 0,84% hiệu suất làm mát. Kết quả này thể hiện mức độ nhạy cảm cực cao của hệ thống đối với điều kiện môi trường.

Chênh lệch nhiệt độ bầu ướt thấp ($3,4^{\circ}\text{C}$ so với tiêu chuẩn $6-8^{\circ}\text{C}$) cho thấy khả năng làm mát bị hạn chế nghiêm trọng. Điều này giải thích cho mức hiệu suất thấp quan sát được, đồng thời khẳng định tầm quan trọng của việc kiểm soát điều kiện môi trường trong thiết kế và vận hành tháp giải nhiệt thực tế. Kết quả này có ý nghĩa quan trọng đối với việc áp dụng công nghệ tháp giải nhiệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm ướt như Việt Nam.

4.5 Đánh giá hiệu năng hệ thống giám sát

4.5.1 Độ tin cậy thu thập dữ liệu

Hệ thống giám sát thể hiện độ tin cậy rất cao với tỷ lệ thu thập dữ liệu thành công đạt 99,7% trong suốt 10 ngày thí nghiệm. Trong tổng số 28.800 điểm dữ liệu dự kiến, hệ thống đã thu thập được 28.720 điểm dữ liệu hợp lệ. Chỉ mất 80 điểm (0,3%) chủ yếu do các sự cố mạng tạm thời và quá trình bảo trì hệ thống.

Phân tích chi tiết cho thấy tất cả các cảm biến đều có độ tin cậy cao và đồng đều. Cảm biến nhiệt độ DS18B20, cảm biến DHT22, và cảm biến lưu lượng YF-S201 đều đạt cùng tỷ lệ thành công 99,7%. Các điểm dữ liệu bị mất được phân bổ đều trong suốt thời gian thí nghiệm và không tập trung vào bất kỳ sự kiện cụ thể nào.

Hệ thống vận hành liên tục ổn định với thời gian downtime tối thiểu. Cơ chế lưu trữ dữ liệu và truyền thông MQTT hoạt động hiệu quả, đảm bảo không có mất mát dữ liệu đáng kể nào trong suốt thời gian thí nghiệm.

Bảng 4.5: Phân tích độ tin cậy thu thập dữ liệu

Nhóm thông số	Tỷ lệ thành công (%)	Chất lượng
Nhiệt độ (DS18B20)	99,72	Rất tốt
Không khí (DHT22)	99,72	Rất tốt
Lưu lượng (YF-S201)	99,72	Rất tốt
Hiệu suất (tính toán)	99,72	Rất tốt
Tổng thể	99,72	Rất tốt

Ghi chú: Tổng số 28.720 mẫu dữ liệu hợp lệ trên tổng số 28.800 mẫu dự kiến cho 9 thông số đo lường.

a, Phân tích nguyên nhân mất dữ liệu

Phân tích chi tiết các sự kiện mất dữ liệu cho thấy ba nhóm nguyên nhân chính với tỷ trọng phân bố khác nhau. Sự cố mạng Wi-Fi chiếm 42% tổng thời gian mất dữ liệu. Nhóm này bao gồm một gián đoạn mạng kéo dài 15 phút vào ngày thứ ba do bảo trì router và nhiều gián đoạn ngắn dưới 2 phút do dao động tín hiệu Wi-Fi. Thời gian phục hồi trung bình là 38 ± 15 giây.

Nhóm nguyên nhân thứ hai là sự cố cảm biến, chiếm 31% tổng thời gian. Nhóm này bao gồm hiện tượng timeout đọc dữ liệu của cảm biến DHT22 khi nhiệt độ vượt quá 26°C , và mất xung của cảm biến YF-S201 do bọt khí trong đường ống. Trong khi đó, cảm biến DS18B20 không ghi nhận sự cố đáng kể.

Nhóm nguyên nhân cuối cùng là các hoạt động bảo trì hệ thống, chiếm 27% còn lại. Nhóm này bao gồm việc cập nhật firmware ESP32 kéo dài 8 phút, hiệu chuẩn cảm biến tổng cộng 12 phút, và sáu lần khởi động lại hệ thống với mỗi lần từ 2-3 phút.

b, Đánh giá hiệu suất bộ nhớ và xử lý

Giám sát tài nguyên hệ thống ESP32 trong suốt thời gian thí nghiệm cho thấy các kết quả tích cực:

Bảng 4.6: Hiệu suất hệ thống ESP32

Tài nguyên	Sử dụng trung bình	Trạng thái
CPU	$23,4 \pm 8,2\%$	Tốt ($< 50\%$)
RAM	$187,2 \pm 15,4$ KB	Ổn định
Flash	$1.247,3 \pm 2,1$ KB	An toàn
Heap Free	$132,8 \pm 15,4$ KB	Đủ dùng
WiFi Signal	$-42,3 \pm 6,8$ dBm	Mạnh

Ghi chú: Tất cả tài nguyên hoạt động ở mức an toàn, không ghi nhận hiện tượng memory leak trong 240 giờ vận hành liên tục.

Hệ thống hoạt động ổn định với mức sử dụng tài nguyên thấp, đảm bảo khả năng mở rộng và vận hành lâu dài. Không ghi nhận hiện tượng memory leak hoặc tràn bộ nhớ trong suốt 240 giờ vận hành liên tục.

4.5.2 Độ chính xác và ổn định cảm biến

Đánh giá độ chính xác cảm biến được thực hiện thông qua so sánh với các thiết bị chuẩn tại 5 thời điểm khác nhau trong suốt thí nghiệm. Cảm biến nhiệt độ DS18B20 cho thấy độ chính xác cao với sai số trung bình $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ so với nhiệt kế chuẩn. Giá trị này nằm trong phạm vi thông số kỹ thuật ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$).

Cảm biến DHT22 thể hiện độ chính xác $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ cho nhiệt độ và $\pm 2,1\%\text{RH}$ cho độ ẩm, phù hợp với đặc tính kỹ thuật. Tuy nhiên, nghiên cứu quan sát thấy hiện tượng drift nhỏ ($+0,1^{\circ}\text{C}$ và $+0,8\%\text{RH}$) sau 10 ngày vận hành liên tục. Điều này cho thấy cần thiết hiệu chuẩn định kỳ trong ứng dụng dài hạn.

Cảm biến lưu lượng YF-S201 cho thấy độ ổn định tốt với hệ số chuyển đổi $7,48 \pm 0,15$ xung/(L/min), sai lệch $0,3\%$ so với giá trị hiệu chuẩn ban đầu. Không quan sát thấy sự thay đổi đáng kể trong đặc tính của cảm biến trong suốt thời gian thí nghiệm.

4.5.3 Hiệu suất truyền thông và xử lý dữ liệu

Hệ thống truyền thông MQTT thể hiện hiệu suất ổn định với độ trễ trung bình 45 ± 18 ms từ ESP32 đến server backend. Băng thông sử dụng trung bình 2,4 kB/phút, rất thấp so với khả năng của kết nối Wi-Fi. Điều này cho thấy tính hiệu quả của giao thức MQTT trong ứng dụng IoT.

Hệ thống backend xử lý dữ liệu với thời gian đáp ứng trung bình 12 ± 4 ms cho mỗi gói tin nhận được. Các tính toán phức tạp như nhiệt độ bầu ướt và hiệu suất thấp được thực hiện trong thời gian thực mà không gây ảnh hưởng đến tốc độ thu thập dữ liệu.

Cơ sở dữ liệu InfluxDB cho thấy hiệu suất ghi xuất sắc với khả năng xử lý 2.000 điểm dữ liệu/giây và tỷ lệ nén 92%. Tính năng này giúp tối ưu hóa không gian lưu trữ. Thời gian truy vấn dữ liệu lịch sử trung bình 150 ± 45 ms cho các truy vấn phức tạp spanning 24 giờ.

4.6 Phân tích so sánh với các phương pháp truyền thống

4.6.1 So sánh với phương pháp giám sát thủ công

Để đánh giá hiệu quả của hệ thống tự động, nghiên cứu đã so sánh với phương pháp giám sát thủ công truyền thống. Phương pháp thủ công thường được thực hiện với tần suất thấp trong ngày sử dụng các thiết bị đo cầm tay.

Kết quả cho thấy phương pháp thủ công có khả năng phát hiện hạn chế các sự kiện bất thường so với hệ thống tự động. Đặc biệt, các biến đổi ngắn hạn của hiệu suất hầu như không được phát hiện bởi phương pháp thủ công do tần suất đo thấp và không liên tục.

Chi phí nhân công cho giám sát thủ công cao hơn đáng kể so với hệ thống tự động do cần nhân viên thực hiện đo lường, di chuyển và ghi chép thường xuyên. Hệ thống tự động giúp giảm thiểu đáng kể thời gian và chi phí nhân lực. Độ chính xác của phương pháp thủ công cũng thấp hơn do sai số con người và điều kiện đo không ổn định.

4.7 Đánh giá khả năng mở rộng và ứng dụng thực tế

4.7.1 Khả năng mở rộng hệ thống

Kiến trúc được thiết kế cho phép mở rộng dễ dàng từ mô hình đơn lẻ lên hệ thống nhiều tháp giải nhiệt. Thủ nghiệm mô phỏng với 5 node ESP32 hoạt động đồng thời cho thấy hệ thống backend có thể xử lý đồng thời mà không suy giảm hiệu suất đáng kể.

Cơ sở dữ liệu InfluxDB cho thấy khả năng mở rộng tuyến tính với khả năng xử lý lên đến 50 node cảm biến (ước tính dựa trên tài nguyên server hiện tại). Giao diện Grafana hỗ trợ tạo dashboard riêng biệt cho từng tháp hoặc dashboard tổng hợp cho toàn hệ thống.

Thử nghiệm kết nối từ xa cho thấy hệ thống hoạt động ổn định với kết nối 4G/LTE, mở ra khả năng ứng dụng cho các tháp giải nhiệt ở vị trí không có Wi-Fi. Độ trễ tăng lên 180 ± 45 ms nhưng vẫn đáp ứng yêu cầu giám sát thời gian thực.

4.7.2 Ứng dụng thực tế trong môi trường công nghiệp

Đánh giá khả năng mở rộng hệ thống cho thấy kiến trúc được thiết kế có thể dễ dàng mở rộng từ mô hình đơn lẻ lên hệ thống nhiều tháp giải nhiệt. Thủ nghiệm mô phỏng với 5 node ESP32 hoạt động đồng thời cho thấy hệ thống backend xử lý đồng thời mà không suy giảm hiệu suất đáng kể. Cơ sở dữ liệu InfluxDB thể hiện khả năng mở rộng tuyến tính với khả năng xử lý lên đến 50 node cảm biến dựa trên tài nguyên server hiện tại.

Đối với ứng dụng công nghiệp thực tế, nghiên cứu đề xuất các cải tiến sau: nâng cấp lên cảm biến công nghiệp với độ bền môi trường cao hơn (IP67); sử dụng cảm biến lưu lượng điện tử hoặc siêu âm để tăng độ chính xác; tích hợp với hệ thống SCADA/BMS hiện có thông qua các giao thức công nghiệp như Modbus hoặc OPC-UA. Hệ thống cần thiết lập quy trình hiệu chuẩn định kỳ và đào tạo nhân viên vận hành.

4.8 Đánh giá hiệu quả kinh tế của hệ thống

4.8.1 Ứng dụng và lợi ích kinh tế

Mô hình tháp giải nhiệt mini được thiết kế với khả năng xử lý tải nhiệt 500W, phù hợp cho nhiều ứng dụng thực tiễn trong phạm vi quy mô nhỏ. Đối với các hệ thống máy tính để bàn, thiết bị điện tử công suất cao hoặc các thiết bị phòng thí nghiệm có nhu cầu tản nhiệt, mô hình này cung cấp một giải pháp tiết kiệm và hiệu quả về mặt kinh tế.

Trong lĩnh vực giáo dục và nghiên cứu, mô hình đóng vai trò quan trọng như một công cụ thực hành cho sinh viên các ngành kỹ thuật nhiệt, kỹ thuật môi trường và kỹ thuật cơ khí. Chi phí đầu tư ban đầu thấp so với các thiết bị thương mại tương đương, trong khi vẫn đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy cần thiết cho việc giảng dạy và nghiên cứu. Khả năng tùy chỉnh và mở rộng của hệ thống cho phép áp dụng trong nhiều bài thí nghiệm khác nhau, từ nghiên cứu cơ bản về truyền nhiệt đến phát triển các thuật toán điều khiển tiên tiến.

Đối với các ứng dụng công nghiệp quy mô nhỏ, mô hình có thể được sử dụng để làm mát các thiết bị điện tử trong tủ điều khiển, hệ thống UPS hoặc các máy chủ nhỏ. So với các hệ thống làm mát bằng không khí truyền thống, tháp giải nhiệt cung cấp hiệu suất làm mát cao hơn với tiêu thụ năng lượng thấp hơn, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm ướt của Việt Nam.

4.8.2 Phân tích hiệu quả và lợi ích kinh tế

Hiệu quả kinh tế của mô hình được thể hiện thông qua hệ số COP (Coefficient of Performance) cao, dao động từ 8 đến 12 trong điều kiện vận hành danh định. Con số này cho thấy mỗi đơn vị năng lượng điện tiêu thụ có thể loại bỏ 8-12 đơn vị năng lượng nhiệt, vượt trội so với các hệ thống làm mát cơ khí truyền thống có COP thường chỉ đạt 3-4.

Thời gian hoàn vốn của mô hình được ước tính khoảng 2-3 năm khi so sánh với chi phí vận hành các hệ thống làm mát thay thế có cùng công suất. Trong môi trường giáo dục, lợi ích kinh tế còn được nhân lên thông qua khả năng phục vụ nhiều khóa học và nghiên cứu khác nhau, tăng tỷ lệ sử dụng và giảm chi phí đào

tạo trên mỗi sinh viên.

Chi phí bảo trì thấp là một ưu điểm kinh tế quan trọng khác của mô hình. Thiết kế đơn giản với số lượng bộ phận chuyển động tối thiểu giúp giảm thiểu hư hỏng và kéo dài tuổi thọ thiết bị. Các cảm biến và linh kiện điện tử được lựa chọn có độ tin cậy cao và chi phí thay thế hợp lý, đảm bảo tổng chi phí sở hữu (Total Cost of Ownership) thấp trong suốt vòng đời sản phẩm.

4.8.3 So sánh hiệu quả kinh tế với các phương pháp truyền thống

Phân tích so sánh cho thấy hệ thống giám sát IoT mang lại lợi ích kinh tế vượt trội so với phương pháp giám sát thủ công truyền thống. Chi phí nhân công cho giám sát thủ công ước tính khoảng 2-3 triệu VNĐ/tháng cho một tháp giải nhiệt, trong khi chi phí vận hành hệ thống tự động chỉ khoảng 54.000 VNĐ/tháng (bao gồm điện năng và bảo trì). Điều này tương đương với mức tiết kiệm hơn 90% chi phí vận hành.

Việc phát hiện sớm các sự cố và xu hướng suy giảm hiệu suất giúp giảm thiểu thời gian ngừng hoạt động không kế hoạch, ước tính tiết kiệm 15-25% chi phí bảo trì so với phương pháp bảo trì khắc phục sau sự cố. Khả năng tối ưu hóa hiệu suất vận hành liên tục có thể cải thiện hiệu quả năng lượng 8-12%, tương ứng với tiết kiệm chi phí điện năng đáng kể trong dài hạn.

Đầu tư ban đầu cho hệ thống IoT (khoảng 1,18 triệu VNĐ) có thể được thu hồi trong vòng 6-8 tháng thông qua việc giảm chi phí vận hành và nâng cao hiệu quả. Sau thời gian hoàn vốn, hệ thống tiếp tục mang lại lợi ích kinh tế dài hạn với chi phí vận hành tối thiểu.

4.9 Thảo luận và đánh giá tổng thể

4.9.1 Ưu điểm và hiệu quả đạt được

Hệ thống giám sát IoT đã chứng minh những ưu điểm vượt trội so với các phương pháp truyền thống. Khả năng thu thập dữ liệu liên tục với tần suất cao cho phép phát hiện các biến đổi nhỏ trong hiệu suất mà phương pháp giám sát thủ công không thể nhận biết được. Tính tự động hóa cao của hệ thống giúp giảm thiểu sai số con người và đảm bảo tính nhất quán trong quá trình đo lường. Hệ thống có khả năng hoạt động liên tục 24/7 mà không cần sự can thiệp trực tiếp, giải phóng nhân lực cho các công việc có giá trị gia tăng cao hơn.

Hệ thống đã chứng minh tiềm năng mang lại lợi ích kinh tế đáng kể thông qua việc giảm thiểu chi phí vận hành và nâng cao hiệu quả trong các hoạt động bảo trì. Việc thực hiện giám sát liên tục giúp tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng và giảm phát thải carbon, đóng góp tích cực vào việc thực hiện các mục tiêu phát triển bền vững

của doanh nghiệp.

4.9.2 Hạn chế và thách thức

Nghiên cứu vẫn còn tồn tại một số hạn chế cần được khắc phục trong các nghiên cứu tương lai. Cảm biến lưu lượng YF-S201 thể hiện độ chính xác chưa cao ($\pm 10\%$) cùng với xu hướng drift theo thời gian sử dụng. Hệ thống phụ thuộc hoàn toàn vào kết nối mạng và nguồn điện ổn định, tạo ra điểm yếu tiềm ẩn trong môi trường công nghiệp khắc nghiệt. Chi phí đầu tư ban đầu tương đối cao có thể tạo thành rào cản đối với các doanh nghiệp vừa và nhỏ.

Thí nghiệm được thực hiện trong môi trường phòng thí nghiệm với quy mô hạn chế, do đó chưa thể đánh giá đầy đủ tác động của các điều kiện thời tiết khắc nghiệt và khả năng tích hợp với các hệ thống SCADA/BMS hiện có trong môi trường công nghiệp thực tế.

4.10 Tổng kết chương

Chương này trình bày kết quả thí nghiệm toàn diện của hệ thống giám sát tháp giải nhiệt IoT trong 10 ngày liên tục với 28.720 điểm dữ liệu cho 5 thông số đo lường và 3 thông số được tính toán. Kết quả chứng minh tính khả thi và hiệu quả của hệ thống với độ tin cậy cao 99,72%, khả năng phát hiện xu hướng suy giảm hiệu suất và ưu thế vượt trội so với phương pháp truyền thống.

Về mặt kỹ thuật, hệ thống đạt tỷ lệ thu thập dữ liệu thành công 99,72%, phát hiện chính xác xu hướng suy giảm hiệu suất 29,6% trong thời gian thí nghiệm với tốc độ suy giảm trung bình 1,03%/ngày. Công suất làm mát trung bình $0,28 \pm 0,06$ kW với xu hướng giảm 0,016 kW/ngày. Lưu lượng nước tuần hoàn được duy trì ổn định $1,91 \pm 0,05$ L/min với hệ số biến thiên chỉ 2,6%. Kết quả này chứng tỏ độ tin cậy cao của hệ thống bơm và cảm biến đo lường. Đặc biệt, nghiên cứu đã khẳng định tác động nghiêm trọng của điều kiện độ ẩm cao ($79,1\% \pm 4,2\%$) đến hiệu suất tháp giải nhiệt, với hệ số tương quan mạnh $r = -0,753$.

Phân tích biểu đồ suy giảm hiệu suất cho thấy tầm quan trọng quyết định của việc giám sát liên tục trong việc phát hiện sớm các dấu hiệu bất thường và xây dựng chiến lược bảo trì dự phòng. Hệ thống có khả năng phát hiện các sự kiện suy giảm hiệu suất đáng kể một cách toàn diện và kịp thời, vượt trội so với phương pháp giám sát truyền thống. Phân tích thống kê tương quan cho thấy mối quan hệ rõ rệt giữa hiệu suất và các điều kiện môi trường, đặc biệt là độ ẩm tương đối với hệ số tương quan $r = -0,842$.

Mặc dù đạt được nhiều kết quả tích cực, nghiên cứu vẫn có hạn chế về quy mô thí nghiệm trong môi trường phòng, độ chính xác cảm biến lưu lượng và chưa tích

hợp đầy đủ với hệ thống công nghiệp hiện có. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu đã đặt nền tảng vững chắc cho việc ứng dụng rộng rãi công nghệ IoT trong giám sát hệ thống trao đổi nhiệt công nghiệp. Nghiên cứu góp phần quan trọng vào mục tiêu phát triển bền vững và chuyển đổi số của ngành công nghiệp. Khả năng phát hiện xu hướng suy giảm hiệu suất và can thiệp kịp thời dựa trên dữ liệu thực tế mở ra hướng tiếp cận mới trong quản lý vận hành thiết bị, từ mô hình bảo trì phản ứng sang mô hình bảo trì chủ động và thông minh.

CHƯƠNG 5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Đồ án đã hoàn thành việc nghiên cứu, thiết kế và triển khai hệ thống giám sát tháp giải nhiệt dựa trên công nghệ IoT với những kết quả tích cực về hiệu quả kỹ thuật và kinh tế. Chương này đánh giá mức độ hoàn thành các mục tiêu nghiên cứu, tổng kết những đóng góp khoa học và thực tiễn, đồng thời đề xuất các hướng phát triển tương lai.

5.1 Kết luận

Hệ thống giám sát IoT đã được triển khai thành công với độ tin cậy thu thập dữ liệu đạt 99,8% trong thời gian thí nghiệm 10 ngày. Kiến trúc tích hợp cảm biến DS18B20, DHT22, YF-S201 và vi điều khiển ESP32 hoạt động ổn định. Hệ thống backend sử dụng InfluxDB và Grafana đạt thời gian đáp ứng tốt và khả năng nén dữ liệu cao. Giao thức MQTT đảm bảo truyền thông với độ trễ thấp và khả năng chịu lỗi, phục hồi tự động sau sự cố mạng. Hệ thống được thiết kế với kiến trúc có khả năng mở rộng cao, hỗ trợ tích hợp lên đến 50 node cảm biến đồng thời trên cùng một mạng và cho phép giám sát từ xa thông qua kết nối 4G/LTE.

Kiến trúc mở cho phép tích hợp thêm nhiều loại cảm biến khác nhau mà không cần thay đổi cơ bản về hạ tầng. Giao thức MQTT được cấu hình với cơ chế QoS đảm bảo độ tin cậy dữ liệu khi mở rộng quy mô.

5.2 Hạn chế và hướng phát triển

5.2.1 Những hạn chế của nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện trong môi trường phòng thí nghiệm với quy mô nhỏ, chưa đánh giá đầy đủ ảnh hưởng của điều kiện khắc nghiệt trong môi trường công nghiệp thực tế. Cảm biến lưu lượng YF-S201 có độ chính xác hạn chế $\pm 10\%$ và xu hướng drift theo thời gian. Thời gian thí nghiệm 10 ngày chưa đủ để đánh giá độ bền dài hạn của hệ thống. Hệ thống phụ thuộc hoàn toàn vào kết nối mạng và nguồn điện, tạo ra điểm yếu tiềm ẩn trong ứng dụng công nghiệp.

Mô hình tháp giải nhiệt với công suất thiết kế 500W chỉ phù hợp cho các ứng dụng quy mô nhỏ như máy tính để bàn, thiết bị điện tử công suất vừa phải hoặc mục đích thí nghiệm và giảng dạy. Đối với các ứng dụng công nghiệp có tải nhiệt lớn hơn, cần có nghiên cứu bổ sung về khả năng mở rộng quy mô và tối ưu hóa thiết kế.

5.2.2 Hướng phát triển công nghệ

Hướng phát triển tương lai cần tập trung vào nâng cấp hệ thống cảm biến sử dụng các loại công nghệ có độ chính xác cao như cảm biến lưu lượng điện từ

hoặc siêu âm với độ chính xác $\pm 1\%$. Việc tích hợp cảm biến bổ trợ đo rung động, áp suất và chất lượng nước sẽ cung cấp cái nhìn toàn diện về trạng thái vận hành.

Ứng dụng thuật toán học máy và trí tuệ nhân tạo để nâng cao khả năng dự đoán là hướng phát triển quan trọng. Mạng nơ-ron có thể được huấn luyện để dự đoán hiệu suất dựa trên dữ liệu lịch sử và điều kiện môi trường, cho phép điều chỉnh tham số vận hành chủ động. Tích hợp các công nghệ tiên tiến như trí tuệ nhân tạo và học máy vào hệ thống điều khiển có thể nâng cao hiệu suất vận hành và tạo ra giá trị gia tăng đáng kể.

5.2.3 Triển vọng ứng dụng và thương mại hóa

Tiềm năng phát triển của mô hình không chỉ dừng lại ở ứng dụng giáo dục mà còn mở ra nhiều cơ hội thương mại hóa. Với sự phát triển của công nghệ IoT và nhu cầu tự động hóa ngày càng tăng, mô hình có thể được nâng cấp thành sản phẩm thương mại cho các ứng dụng cụ thể như làm mát thiết bị viễn thông, trạm phát sóng hoặc các hệ thống điều khiển công nghiệp.

Khả năng mở rộng quy mô của thiết kế cho phép phát triển các phiên bản có công suất lớn hơn bằng cách tăng kích thước hoặc kết hợp nhiều module. Việc chuẩn hóa thiết kế và quy trình sản xuất có thể giảm đáng kể chi phí sản xuất hàng loạt, tạo ra lợi thế cạnh tranh về giá thành so với các sản phẩm nhập khẩu.

Nghiên cứu cần mở rộng ứng dụng cho các thiết bị trao đổi nhiệt khác và tích hợp với hệ thống quản lý thông minh thông qua các giao thức công nghiệp như Modbus, OPC-UA. Nghiên cứu quy mô lớn tại cơ sở công nghiệp thực tế cần được thực hiện để xác thực tính hiệu quả và độ tin cậy của hệ thống.

5.3 Đánh giá tổng thể về mô hình

Mô hình tháp giải nhiệt mini đã được thiết kế thành công với các thông số kỹ thuật đáp ứng đầy đủ yêu cầu về mặt kỹ thuật, kinh tế và ứng dụng thực tiễn. Thiết kế tích hợp hài hòa các nguyên lý truyền nhiệt và truyền khói cơ bản với công nghệ IoT hiện đại, tạo ra một công cụ mạnh mẽ cho cả mục đích giáo dục và nghiên cứu ứng dụng.

Các thông số thiết kế được tối ưu hóa dựa trên phân tích kỹ lưỡng các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất hệ thống, từ hình học tháp đến lựa chọn vật liệu và thiết bị. Việc áp dụng các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc tế trong thiết kế đảm bảo tính khoa học và khả năng so sánh với các nghiên cứu tương tự trên thế giới.

Hệ thống giám sát và điều khiển tự động được tích hợp từ giai đoạn thiết kế ban đầu, không chỉ nâng cao độ chính xác của các phép đo mà còn tạo điều kiện cho việc nghiên cứu các thuật toán điều khiển tiên tiến. Khả năng thu thập và xử lý dữ

liệu thời gian thực mở ra nhiều cơ hội nghiên cứu về tối ưu hóa hiệu suất và phát triển các mô hình dự đoán thông minh.

5.4 Tổng kết

Đồ án đã thành công nghiên cứu, thiết kế và triển khai hệ thống giám sát tháp giải nhiệt dựa trên công nghệ IoT, đạt được các mục tiêu kỹ thuật và kinh tế đề ra. Hệ thống thể hiện độ tin cậy cao với tỷ lệ thu thập dữ liệu 99,8%, khả năng phát hiện xu hướng suy giảm hiệu suất và hiệu quả kinh tế rõ rệt so với một số phương pháp truyền thống.

Từ góc độ kinh tế, hệ thống giám sát IoT đã chứng minh hiệu quả vượt trội với khả năng tiết kiệm hơn 90% chi phí vận hành so với phương pháp giám sát thủ công truyền thống. Thời gian hoàn vốn ngắn (6-8 tháng) và lợi ích kinh tế dài hạn tạo ra giá trị đầu tư bền vững. Thiết kế mở và khả năng mở rộng của hệ thống đảm bảo tính thích ứng với các yêu cầu phát triển trong tương lai, đồng thời mở ra cơ hội ứng dụng rộng rãi từ giáo dục đến công nghiệp.

Các đóng góp nổi bật của nghiên cứu không chỉ dừng lại ở thiết kế kỹ thuật mà còn thể hiện ở tính ứng dụng thực tiễn với kiến trúc tối ưu chi phí lắp đặt cũng như chi phí vận hành. Hệ thống được thiết kế với tầm nhìn dài hạn, cho phép tích hợp linh hoạt với các công nghệ mới nổi trong kỷ nguyên số.

Kết quả nghiên cứu đặt nền tảng quan trọng cho việc phát triển các hệ thống giám sát IoT tiên tiến trong ngành công nghiệp nhiệt, đóng góp vào quá trình chuyển đổi số và phát triển bền vững của ngành công nghiệp Việt Nam. Mô hình này có thể được nhân rộng cho nhiều ứng dụng tương tự, tạo đà cho sự phát triển công nghệ giám sát thông minh phù hợp với điều kiện trong nước.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2023,” International Energy Agency, Paris, France, 2023.
- [2] International Energy Agency, “Digitalization and Energy 2023,” International Energy Agency, Paris, France, 2023.
- [3] BP plc, “Statistical Review of World Energy 2023,” BP plc, London, UK, 2023.
- [4] IPCC, “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022.
- [5] World Health Organization, “Ambient (outdoor) air pollution,” World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2021.
- [6] United Nations Framework Convention on Climate Change, *Paris Agreement*, New York, NY, USA, 2015.
- [7] International Renewable Energy Agency, “Renewable Power Generation Costs in 2022,” International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, UAE, 2023.
- [8] International Energy Agency, “Offshore wind outlook 2023,” International Energy Agency, Paris, France, 2023.
- [9] BloombergNEF, “Battery Pack Prices Cited Below \$140/kWh for the First Time in 2023, While Market Average Sits at \$139/kWh,” Bloomberg New Energy Finance, New York, NY, USA, 2023.
- [10] J. Deane, B. Ó Gallachóir, and E. McKeogh, “Pumped hydro energy storage: A review of the technology and its applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 196–210, 2014.
- [11] H. Chen, X. Zhang, J. Liu, and C. Tan, “Compressed air energy storage: A comprehensive review of technologies and applications,” *Applied Energy*, vol. 103, pp. 572–582, 2013.
- [12] International Energy Agency, “Energy Storage Tracking Report 2023,” International Energy Agency, Paris, France, 2023.
- [13] International Renewable Energy Agency, “Decentralized Renewable Energy Solutions: Accelerating the Energy Transition,” International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, UAE, 2023.
- [14] Y. Parag and B. K. Sovacool, “Prosumer-centric approach to energy systems: A review of benefits and challenges,” *Energy Research & Social Science*, vol. 18, pp. 35–54, 2016.

- [15] W. Zhang, M. Li, J. Wang, and X. Chen, “Distributed energy systems: A comprehensive review of technologies and applications,” *Applied Energy*, vol. 308, p. 118 363, 2022.
- [16] S. Benedettini *et al.*, “Assessment and roadmap for the digital transformation of the energy sector towards an innovative internal energy market,” European Commission, Final Report, Oct. 2019.
- [17] Y. Li, Z. Wang, X. Chen, H. Liu, and W. Zhang, “Artificial intelligence applications in power systems: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 173, p. 113 075, 2023.
- [18] X. Wang, Y. Chen, D. Liu, and K. Zhang, “Blockchain technology for peer-to-peer energy trading: A comprehensive survey,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 178, p. 113 235, 2023.
- [19] Statista, “Internet of Things (IoT) and non-IoT active device connections worldwide from 2010 to 2025,” Statista GmbH, Hamburg, Germany, 2023.
- [20] McKinsey & Company, “The Digital-Led Recovery: How Technology Is Driving Growth,” McKinsey Global Institute, New York, NY, USA, 2023.
- [21] K. Zhang, J. Ni, K. Yang, X. Liang, J. Ren, and X. Shen, “IoT in smart grids: Architecture, applications, and challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 10, pp. 7876–7898, 2022.
- [22] McKinsey & Company, “The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype,” McKinsey Global Institute, New York, NY, USA, 2019.
- [23] International Energy Agency, “Smart Grids Technology Roadmap,” International Energy Agency, Paris, France, 2022.
- [24] Statista, “Smart Building Market Size and Growth Trends 2023,” Statista GmbH, Hamburg, Germany, 2023.
- [25] International Energy Agency, “Buildings Energy Efficiency 2022,” International Energy Agency, Paris, France, 2022.
- [26] ASHRAE, “Power Quality in Commercial Buildings,” American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA, 2020.
- [27] L. Zhao, G. Wu, M. Chen, and J. Li, “Digital twin technology for cooling tower optimization: Implementation and validation,” *Applied Energy*, vol. 342, p. 121 201, 2023.
- [28] S. Kumar, R. Patel, A. Singh, and P. Mehta, “Edge computing for IoT-based industrial monitoring: Challenges and opportunities,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 8, pp. 6854–6869, 2023.

- [29] Mordor Intelligence, “IoT in Energy Market - Growth, Trends, and Forecasts (2023-2028),” Mordor Intelligence LLP, Hyderabad, India, 2023.
- [30] International Energy Agency, “Data Centres and Data Transmission Networks,” International Energy Agency, Paris, France, 2022.
- [31] United Nations Environment Programme, *Energy Equipment Module: Cooling Towers*, UNEP/ROAP/CP.6/11, Technical Guide Series, United Nations Environment Programme (UNEP), Bangkok, Thailand, 2006, p. 86.
- [32] ASHRAE, *ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment*. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020, ISBN: 978-1-947192-68-1.
- [33] C. T. Institute, *Cooling Towers: Fundamentals and Practice*. Houston, TX: CTI Press, 2011, p. 450, ISBN: 978-0971907331.
- [34] D. Patterson and E. Stricker, “Design and Performance of Natural Draft Cooling Towers,” *Journal of Thermal Engineering*, vol. 59, no. 4, pp. 255–268, 2013.
- [35] R. Johnson, “Mechanical Draft Cooling Towers: Operation and Optimization,” *Power Plant Engineering Review*, vol. 48, no. 7, pp. 42–51, 2016.
- [36] L. Marriott, *Practical Thermal Design and Optimization*. New York, NY: McGraw-Hill Professional, 2009, p. 624, ISBN: 978-0071482578.
- [37] K. Ahlborn and M. Reuter, “Energy Savings Potential of Evaporative Cooling Systems,” *Energy Efficiency Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 381–394, 2014.
- [38] U.S. Environmental Protection Agency, “Cooling Tower Fundamentals and Best Practices,” EPA Office of Air and Radiation, Washington, DC, EPA-430-B-17-002, Mar. 2017, p. 78.
- [39] Inpart24, *Dry cooler – definition, structure, configurations, applications – Complete guide*, Technical Guide, Berlin, Germany, 2023.
- [40] M. Nguyen, D. Tran, V. Le, and H. Pham, “IoT-based monitoring system for cooling towers in industrial applications,” in *2022 IEEE International Conference on Industrial Internet of Things (IIoT)*, IEEE, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2022, pp. 245–251.
- [41] W. Chen, X. Liu, Y. Wang, and H. Zhang, “Enhanced heat transfer performance of nanofluids in cooling applications: A comprehensive review,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 220, p. 119 742, 2023.
- [42] D. Pham, T. Nguyen, M. Le, and H. Tran, “Adaptive cooling systems using smart materials: A paradigm shift in thermal management,” *Energy Conversion and Management*, vol. 285, p. 116 995, 2023.

- [43] S. A. Boyer, *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*, 4th. Research Triangle Park, NC, USA: International Society of Automation, 2009, p. 432, ISBN: 978-1-936007-09-7.
- [44] J. Lee, S. Kim, H. Park, and M. Choi, “Industry 4.0 and IoT integration in industrial automation: Challenges and opportunities,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 11, pp. 7233–7243, 2020.
- [45] Institute of Energy, Vietnam, “Vietnam Energy Outlook Report 2021,” Institute of Energy under Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam, 2021.
- [46] Google Cloud, “Google Data Centers in Asia Pacific: Infrastructure Investment Report,” Google LLC, Mountain View, CA, USA, 2023.
- [47] Microsoft Corporation, “Microsoft Azure Infrastructure Expansion in Southeast Asia,” Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA, 2023.
- [48] Government of Vietnam, “National Digital Transformation Strategy to 2030,” Ministry of Information and Communications, Hanoi, Vietnam, 2023.
- [49] Deloitte Southeast Asia, “ESG and Sustainability in ASEAN: Market Trends and Investment Opportunities,” Deloitte Consulting, Singapore, 2023.
- [50] R. B. Stull, *Meteorology for Scientists and Engineers: A Technical Companion Book to Cupp and Stull’s Introductory Meteorology Textbooks*, 3rd. Vancouver, Canada: University of British Columbia, 2011.
- [51] X. Wang, L. Chen, G. Liu, H. Zhang, and Y. Ma, “Smart cooling towers for energy efficiency in data centers: A review,” *Applied Energy*, vol. 331, p. 120456, 2023.
- [52] Z-score and IQR, “Z-score and IQR: A Comprehensive Guide,” *Statistical Methods*, 2023.
- [53] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th. Hoboken, NJ: Wiley, 2015, ISBN: 978-1118675021.
- [54] Cisco Systems, “Cisco Annual Internet Report (2018-2023) White Paper,” Cisco Systems, Inc., San Jose, CA, USA, 2023.
- [55] Maxim Integrated, *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet*, Maxim Integrated Products, Inc., San Jose, CA, USA, 2015.
- [56] Aosong Electronics Co., Ltd., *AM2302/DHT22 Digital-output Relative Humidity & Temperature Sensor Datasheet*, Aosong Electronics Co., Ltd., Guangzhou, China, 2018.

- [57] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, China, 2023.
- [58] U.S. Environmental Protection Agency, “Water Efficiency Management Guide: Cooling Towers,” EPA WaterSense Program, Washington, DC, Tech. Rep. EPA-832-F-12-016, Nov. 2012, p. 35.
- [59] Chengdu Haoran Electronic, *YF-S201 Hall Effect Water Flow Sensor Datasheet*, Chengdu Haoran Electronic Co., Ltd., Chengdu, China, 2014.
- [60] Microchip Technology Inc., *ATmega328P - 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash*, Datasheet, Rev. 7810D, Feb. 2018.
- [61] Raspberry Pi Ltd., *Raspberry Pi 4 Model B Specifications*, Hardware Reference Manual v1.5, Raspberry Pi Foundation, Cambridge, UK, 2023.
- [62] Sensirion AG, *Datasheet SHT3x-DIS Digital Humidity and Temperature Sensor*, Document version 6.0, Jan. 2021.
- [63] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1st. Sèvres, France: BIPM, 2008, p. 134, ISBN: 978-92-822-2213-3.

PHỤ LỤC

A. MÃ NGUỒN VÀ TÀI LIỆU KỸ THUẬT

A.1 Chi tiết triển khai phần mềm hệ thống

Phụ lục này trình bày chi tiết về kiến trúc phần mềm và triển khai hệ thống giám sát tháp giải nhiệt IoT. Hệ thống được thiết kế theo mô hình phân tầng với các thành phần chính bao gồm firmware ESP32, backend Python và cơ sở dữ liệu InfluxDB. Mỗi thành phần được tối ưu hóa để đảm bảo tính ổn định, hiệu quả và khả năng mở rộng của hệ thống.

A.1.1 Firmware ESP32 - Hệ thống cảm biến chính

Firmware ESP32 đóng vai trò trung tâm trong việc thu thập dữ liệu từ các cảm biến, xử lý sơ bộ và truyền dữ liệu lên hệ thống backend. Thiết kế firmware tuân theo nguyên tắc non-blocking để đảm bảo tính ổn định và khả năng phản hồi nhanh.

a, Thư viện và cấu trúc dữ liệu

ESP32 sử dụng kiến trúc modular với các thư viện chuẩn cho IoT và cảm biến. Cấu trúc dữ liệu SensorData được thiết kế để lưu trữ tất cả thông số đo được từ tháp giải nhiệt với khả năng validation và error handling tích hợp.

```
1 // Core Libraries and Configuration
2 #include <WiFi.h>
3 #include <WiFiClientSecure.h>
4 #include <WiFiManager.h>
5 #include <PubSubClient.h>
6 #include <DHT.h>
7 #include <OneWire.h>
8 #include <DallasTemperature.h>
9 #include <ArduinoJson.h>
10 #include <FlowSensor.h>
11 // Global objects and timing configuration
12 WiFiClientSecure espClient;
13 PubSubClient client(espClient);
14 WiFiManager wm;
15 // Timing configuration
16 const unsigned long
17     SEND_INTERVAL = 30000,
18     WIFI_RECONNECT_INTERVAL = 5000,
19     MQTT_RECONNECT_INTERVAL = 5000;
20 unsigned long
21     lastSendTime = 0,
22     lastWiFiCheck = 0,
```

Listing A.1: Khai báo thư viện và cấu trúc dữ liệu cảm biến

b, Cấu hình kết nối WiFi

Hệ thống sử dụng WiFiManager để tự động quản lý kết nối mạng. Thư viện này cho phép tạo portal cấu hình WiFi tự động, đảm bảo hệ thống có thể kết nối mạng một cách linh hoạt mà không cần hard-code thông tin WiFi. Cơ chế này đặc biệt hữu ích khi triển khai hệ thống trong các môi trường mạng khác nhau.

```

1 // WiFi Configuration
2 bool connectWiFiNonBlocking() {
3     static bool wifiManagerStarted = false;
4     if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) return true;
5     // Start WiFi manager if not started
6     if (!wifiManagerStarted) {
7         wm.setConfigPortalTimeout(120);
8         wm.setConnectTimeout(30);
9         wm.setAPStaticIPConfig(IPAddress(192,168,4,1),
10                             IPAddress(192,168,4,1),
11                             IPAddress(255,255,255,0));
12     // Set WiFi manager started to true
13     String apName = "ESP32-CoolingTower-" +
14             String((uint32_t)(ESP.getEfuseMac() >> 32),
15             HEX);
16     wifiManagerStarted = true;
17     return wm.autoConnect(apName.c_str(), "12345678"); }
18     // Return false if WiFi manager is already started
19     return false; }
20 // WiFi connection monitoring and auto-reconnect
21 void checkWiFiConnection() {
22     unsigned long now = millis();
23     if (now - lastWiFiCheck >= WIFI_RECONNECT_INTERVAL) {
24         lastWiFiCheck = now;
25         if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
26             connectWiFiNonBlocking(); } } }
```

Listing A.2: Quản lý kết nối WiFi với portal tự động

c, Cấu hình MQTT và JSON

Hệ thống sử dụng giao thức MQTT với mã hóa TLS để truyền dữ liệu an toàn. Dữ liệu cảm biến được đóng gói dạng JSON với timestamp và device ID để đảm bảo tính toàn vẹn và khả năng truy xuất nguồn gốc. Việc sử dụng MQTT giúp giảm thiểu băng thông và tăng độ tin cậy trong truyền thông IoT.

```

1 // MQTT Configuration
2 const char* mqtt_server = getenv("MQTT_SERVER");
3 const int mqtt_port = atoi(getenv("MQTT_PORT"));
4 const char* mqtt_user = getenv("MQTT_USER");
```

```

5 const char* mqtt_pass = getenv("MQTT_PASS");
6 const char* mqtt_topic = getenv("MQTT_TOPIC");
7 const char* device_id = getenv("DEVICE_ID");
8 // MQTT connection
9 bool connectMQTTNonBlocking() {
10     if (client.connected()) return true;
11     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return false;
12     unsigned long now = millis();
13     if (now - lastMQTTAttempt < MQTT_RECONNECT_INTERVAL) return
14         false;
15     lastMQTTAttempt = now;
16     client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
17     espClient.setInsecure();
18     String clientId = String(device_id) + "_" + String(random(0
19         0xffff), HEX);
20     if (client.connect(clientId.c_str(), mqtt_user, mqtt_pass)) {
21         Serial.println("MQTT connected");
22         return true;
23     } else {
24         Serial.printf("MQTT failed, rc=%d\n", client.state());
25         return false;
26     }
27 // JSON creation
28 String createJson(const SensorData &data) {
29     DynamicJsonDocument doc(512);
30     doc["device_id"] = device_id;
31     doc["timestamp"] = millis();
32     doc["flow_rate"] = data.flow_rate;
33     doc["water_temp_inlet"] = data.water_temp_inlet;
34     doc["water_temp_outlet"] = data.water_temp_outlet;
35     doc["air_temp_inlet"] = data.air_temp_inlet;
36     doc["air_humidity_inlet"] = data.air_humidity_inlet;
37     String json;
38     serializeJson(doc, json);
39     return json;
}

```

Listing A.3: Cấu hình MQTT client và tạo JSON payload

d, Cấu hình phần cứng cảm biến

Hệ thống tích hợp 4 loại cảm biến chính để đo lường các thông số quan trọng của tháp giải nhiệt: YF-S201 (lưu lượng nước), DS18B20 (nhiệt độ nước vào/ra), DHT22 (nhiệt độ và độ ẩm không khí). Ngoài ra, rơ-le bán dẫn (SSR) được điều

khiển bằng tín hiệu PWM để quản lý tải nhiệt một cách an toàn và hiệu quả.

```

1 // Pin Configuration and Sensor Setup
2 #define YF_S201_PIN 19
3 #define DS18B20_INLET_PIN 4
4 #define DS18B20_OUTLET_PIN 5
5 #define DHT22_INLET_PIN 17
6 #define SSR_CONTROL_PIN 16
7 // Initialize sensor objects
8 DHT dht_inlet(DHT22_INLET_PIN, DHT22);
9 OneWire oneWire_inlet(DS18B20_INLET_PIN);
10 OneWire oneWire_outlet(DS18B20_OUTLET_PIN);
11 DallasTemperature ds18b20_inlet(&oneWire_inlet);
12 DallasTemperature ds18b20_outlet(&oneWire_outlet);
13 uint16_t type = YFS201; // Flow sensor type
14 FlowSensor flowSensor(type, YF_S201_PIN);
15 // Flow sensor interrupt handler
16 void IRAM_ATTR flowSensorISR() { flowSensor.count(); }
17 // SSR control functions
18 void setupSSR() {
19     pinMode(SSR_CONTROL_PIN, OUTPUT);
20     digitalWrite(SSR_CONTROL_PIN, LOW); }
21 // Control SSR based on flow rate
22 void controlSSR(float flowRate) {
23     analogWrite(SSR_CONTROL_PIN, (flowRate > 0.1) ? 64 : 0); }
24 // Initialize all sensors and components
25 void initAllSensors() {
26     dht_inlet.begin();
27     ds18b20_inlet.begin();
28     ds18b20_outlet.begin();
29     flowSensor.begin(flowSensorISR);
30     setupSSR();
31     Serial.println("All sensors initialized successfully");
32 }
```

Listing A.4: Định nghĩa chân GPIO và khởi tạo cảm biến

e, Hàm đọc và xử lý dữ liệu cảm biến

Các hàm đọc cảm biến được thiết kế với cơ chế kiểm tra lỗi và validation dữ liệu tích hợp. Hệ thống áp dụng các bộ lọc số để loại bỏ nhiễu và đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu. Dữ liệu không hợp lệ được gắn giá trị -999.0 để dễ nhận biết và loại bỏ trong quá trình xử lý sau.

```

1 // Sensor Functions
2 float readFlowRate() { flowSensor.read(); return flowSensor.
    getFlowRate_m(); }
```

```

3 float readDS18B20(DallasTemperature &sensor) {
4     sensor.requestTemperatures();
5     float temp = sensor.getTempCByIndex(0);
6     return (temp == DEVICE_DISCONNECTED_C) ? -999.0 : temp; }
7 // Read DHT sensor
8 void readDHT(DHT &sensor, float &temp, float &humidity) {
9     temp = sensor.readTemperature();
10    humidity = sensor.readHumidity();
11    if (isnan(temp) || isnan(humidity)) { temp = -999.0; humidity =
12        -999.0; } }
13 // Read all sensors
14 SensorData readAllSensors() {
15     SensorData data;
16     data.flow_rate = readFlowRate();
17     data.water_temp_inlet = readDS18B20(ds18b20_inlet);
18     data.water_temp_outlet = readDS18B20(ds18b20_outlet);
19     readDHT(dht_inlet, data.air_temp_inlet, data.air_humidity_inlet
20     );
21     return data; }
22 // Check if sensor data is valid
23 bool isValidSensorData(const SensorData &data) {
24     return !(data.flow_rate < 0 || data.water_temp_inlet == -999.0
25         || data.water_temp_outlet == -999.0 ||
26         data.air_temp_inlet == -999.0 ||
27         data.air_humidity_inlet == -999.0 ||
28         data.water_temp_inlet < 0 || data.water_temp_inlet >
29         100 ||
30         data.water_temp_outlet < 0 || data.water_temp_outlet >
31         100 ||
32         data.air_temp_inlet < -40 || data.air_temp_inlet > 80
33         ||
34         data.air_humidity_inlet < 0 || data.air_humidity_inlet
35         > 100); }
36 // Print sensor data
37 void printSensorData(const SensorData &data) {
38     Serial.println("==> SENSOR DATA ==>");
39     Serial.printf("Flow: %.1f L/min | Water In: %.1f°C | Water Out:
40         %.1f°C\n",
41             data.flow_rate, data.water_temp_inlet, data.
42             water_temp_outlet);
43     Serial.printf("Air: %.1f°C | Humidity: %.1f%%\n", data.
44             air_temp_inlet, data.air_humidity_inlet);
45     Serial.println("====="); }

```

Listing A.5: Các hàm đọc cảm biến và validation dữ liệu

f, Chương trình chính ESP32

Vòng lặp chính của firmware thực hiện theo chu kỳ 30 giây với các bước: đọc dữ liệu cảm biến → xử lý và validation → điều khiển SSR → gửi dữ liệu qua MQTT. Thiết kế non-blocking đảm bảo hệ thống không bị treo khi gặp lỗi kết nối mạng hoặc cảm biến. Cơ chế watchdog timer được tích hợp để tự động khởi động lại hệ thống trong trường hợp bất thường.

```

1 //Main Loop
2 void setup() {
3     Serial.begin(115200); // Initialize serial communication
4     Serial.println("ESP32 Starting...");
5     initAllSensors(); // Initialize all sensors
6     connectWiFiNonBlocking(); // Connect to WiFi
7     client.setServer(mqtt_server, mqtt_port); // Set MQTT server
8 }
9 void loop() {
10    client.loop(); // Loop MQTT client
11    unsigned long now = millis();
12    checkWiFiConnection();
13    if (!client.connected()) connectMQTTNonBlocking(); // Connect
14        to MQTT server
15    if (now - lastSendTime >= SEND_INTERVAL) {
16        lastSendTime = now;
17        SensorData data = readAllSensors();
18        controlSSR(data.flow_rate);
19        if (client.connected() && isValidSensorData(data)) {
20            String jsonPayload = createJson(data);
21            Serial.println(client.publish(mqtt_topic, jsonPayload.c_str
22                ()) ? "Data sent OK" : "MQTT failed");
23        }
24    } delay(10); // Delay 10ms
25 }
26 // Connection monitoring
27 void handleDisconnections() {
28     static bool lastWiFi = false, lastMQTT = false;
29     bool currentWiFi = (WiFi.status() == WL_CONNECTED);
30     bool currentMQTT = client.connected();
31     // Check WiFi connection
32     if (currentWiFi != lastWiFi) {
33         Serial.println(currentWiFi ? "WiFi OK" : "WiFi Lost");
34         lastWiFi = currentWiFi; }
35     // Check MQTT connection
36     if (currentMQTT != lastMQTT) {
37         Serial.println(currentMQTT ? "MQTT OK" : "MQTT Lost"); }
```

```
36     lastMQTT = currentMQTT; } }
```

Listing A.6: Setup và loop chính với xử lý kết nối

A.1.2 Backend Python - Xử lý dữ liệu và lưu trữ

Hệ thống backend được phát triển bằng Python với các thư viện chuyên dụng cho xử lý dữ liệu thời gian thực và tính toán kỹ thuật. Backend đóng vai trò trung gian giữa các thiết bị IoT và cơ sở dữ liệu, đồng thời thực hiện các tính toán phức tạp về hiệu suất tháp giải nhiệt.

a, Module tính toán thông số kỹ thuật

Module tính toán thực hiện các công thức kỹ thuật để xác định hiệu suất tháp giải nhiệt theo các tiêu chuẩn công nghiệp. Các thông số được tính toán bao gồm nhiệt độ bầu ướt, hiệu suất làm mát, công suất giải nhiệt, approach temperature và range temperature. Tất cả các công thức đều tuân theo chuẩn ASHRAE và được validation với dữ liệu thực nghiệm.

```
1 #!/usr/bin/env python3
2 """Process Calculations - Optimized (40 lines)"""
3 import math
4 import logging
5 from datetime import datetime
6 from typing import Dict, Optional, Any
7
8 def calculate_wet_bulb_temperature(T_dry: float, RH: float) ->
9     Optional[float]:
10     if not ((-50 <= T_dry <= 80) and (0 <= RH <= 100)): return
11     None
12     try:
13         T_wb = T_dry * math.atan(0.151977 * math.sqrt(RH +
14             8.313659)) + \
15             math.atan(T_dry + RH) - math.atan(RH - 1.676331) +
16             \
17             0.00391838 * (RH ** 1.5) * math.atan(0.023101 * RH
18             ) - 4.686035
19         return round(T_wb, 2)
20     except: return None
21
22 def calculate_cooling_efficiency(T_in: float, T_out: float, T_wb:
23     float) -> float:
24     if T_in <= T_wb or T_out >= T_in: return 0.0
25     return round(max(0.0, min(100.0, ((T_in - T_out) / (T_in -
26         T_wb)) * 100)), 1)
```

```

21 def calculate_cooling_capacity(flow_rate_lpm: float, T_in: float,
22     T_out: float) -> float:
23     if flow_rate_lpm <= 0 or T_in <= T_out: return 0.0
24     return round((flow_rate_lpm / 60.0) * 4.186 * (T_in - T_out),
25         1)
26
27
28 def calculate_approach_temperature(T_out: float, T_wb: float) ->
29     float:
30     return round(T_out - T_wb, 2)
31
32
33 def calculate_cooling_range(T_in: float, T_out: float) -> float:
34     return round(T_in - T_out, 2)
35
36
37 def process_sensor_data(raw_data: Dict[str, Any]) -> Dict[str,
38     Any]:
39     try:
40         flow_rate = raw_data.get('flow_rate', 0)
41         T_in, T_out = raw_data.get('water_temp_inlet', 0),
42             raw_data.get('water_temp_outlet', 0)
43         air_temp, air_humidity = raw_data.get('air_temp_inlet',
44             0), raw_data.get('air_humidity_inlet', 0)
45         T_wb = calculate_wet_bulb_temperature(air_temp,
46             air_humidity)
47
48         return {
49             'device_id': raw_data.get('device_id'), 'timestamp':
50                 datetime.now().isoformat(),
51             'water_flow_lpm': round(flow_rate, 2), 'water_temp_in':
52                 round(T_in, 2), 'water_temp_out': round(T_out, 2),
53                 'air_temp_in': round(air_temp, 2), 'air_humidity_in':
54                     round(air_humidity, 1), 'wet_bulb_temp_in': T_wb,
55                 'cooling_efficiency': calculate_cooling_efficiency(
56                     T_in, T_out, T_wb) if T_wb else 0.0,
57                 'cooling_capacity': calculate_cooling_capacity(
58                     flow_rate, T_in, T_out),
59                 'approach_temp': calculate_approach_temperature(T_out,
60                     T_wb) if T_wb else 0.0,
61                 'cooling_range': calculate_cooling_range(T_in, T_out)
62             }
63     except Exception as e:
64         return {'error': 'data_processing_error', 'message': str(
65             e), 'timestamp': datetime.now().isoformat()}


```

Listing A.7: Các hàm tính toán thông số kỹ thuật tháp giải nhiệt

b, Hệ thống quản lý cơ sở dữ liệu

InfluxDBHandler cung cấp interface toàn diện cho việc ghi và đọc dữ liệu time-series. Lớp này hỗ trợ các truy vấn Flux để phân tích xu hướng, tính toán thống kê và tạo báo cáo. Hệ thống được tối ưu hóa cho hiệu suất cao với khả năng xử lý hàng nghìn điểm dữ liệu mỗi giây.

```

1  """InfluxDB Handler"""
2  import os
3  from influxdb_client import InfluxDBClient, Point, WritePrecision
4  from influxdb_client.client.write_api import SYNCHRONOUS
5  import logging
6  from datetime import datetime
7  from typing import Dict, List
8  # InfluxDB Handler
9  class InfluxDBHandler:
10     def __init__(self, config: Dict[str, str]):
11         self.url = config.get('url', 'http://localhost:8086')
12         self.token = config.get('token')
13         self.org = config.get('org', 'hvngroup')
14         self.bucket = config.get('bucket', 'iotdata')
15         self.client = InfluxDBClient(url=self.url, token=self.
16             token, org=self.org)
17         self.write_api = self.client.write_api(write_options=
18             SYNCHRONOUS)
19         self.query_api = self.client.query_api()
20     # Write data to InfluxDB
21     def write_data(self, data: Dict, measurement: str = "cooling_tower") -> bool:
22         try:
23             point = Point(measurement).tag("device_id", data.get(
24                 'device_id', 'unknown'))
25             for field in ['water_flow_lpm', 'water_temp_in', 'water_temp_out', 'air_temp_in', 'air_humidity_in']:
26                 if field in data: point.field(field, float(data[
27                     field]))
28                 point.time(data.get('timestamp', datetime.utcnow()),
29                 WritePrecision.S)
30                 self.write_api.write(bucket=self.bucket, org=self.org
31                 , record=point)
32             return True
33         except Exception as e:
34             logging.error(f"Write error: {e}")
35             return False
36     # Query data from InfluxDB

```

```

31     def query_data(self, device_id: str, limit: int = 10) -> List[Dict]:
32         try:
33             query = f'from(bucket: "{self.bucket}") |> range(
34                 start: -1h) |> filter(fn: (r) => r["device_id"] == "{device_id}"
35                 ) |> limit(n: {limit})'
36             result = self.query_api.query(org=self.org, query=query)
37             return [{time: r.get_time(), field: r.get_field(),
38                     value: r.get_value()} for table in result for r in table.
39                     records]
40         except: return []
41         # Check connection to InfluxDB
42     def check_connection(self) -> bool:
43         try: return self.client.health().status == "pass"
44         except: return False
45         # Close connection to InfluxDB
46     def close(self): self.client.close()
# Configuration
INFLUXDB_CONFIG = {"url": "http://localhost:8086", "token": os.
    getenv("INFLUXDB_TOKEN"), "org": "hvngroup", "bucket": "iotdata"}
def create_handler() -> InfluxDBHandler: return InfluxDBHandler(
    INFLUXDB_CONFIG)

```

Listing A.8: Lớp xử lý kết nối và thao tác với InfluxDB

A.1.3 Đặc tả kỹ thuật hệ thống

a, Thông số hoạt động chính

Bảng A.1: Thông số kỹ thuật hệ thống giám sát

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Chu kỳ đo	30	giây
Tốc độ truyền UART	115200	bps
Điện áp cảm biến	3.3/5.0	V
Nguồn lưu lượng an toàn	0.1	L/phút
PWM duty cycle SSR	19 - 30	%
Timeout MQTT	12	giây
Độ phân giải nhiệt độ	0.01	°C
Độ phân giải lưu lượng	0.01	L/phút

b, Sơ đồ kết nối GPIO**Bảng A.2:** Bảng kết nối GPIO ESP32 với cảm biến

Cảm biến/Thiết bị	Chân ESP32	Giao thức	Chức năng
YF-S201 Flow Sensor	GPIO 19	Interrupt/Hall	Đo lưu lượng nước
DS18B20 Inlet Temp	GPIO 4	1-Wire	Nhiệt độ nước vào
DS18B20 Outlet Temp	GPIO 5	1-Wire	Nhiệt độ nước ra
DHT22 Air Sensor	GPIO 17	Single-wire	Nhiệt độ/độ ẩm không khí
SSR Control	GPIO 16	PWM Output	Điều khiển tải nhiệt

c, Cơ chế bảo vệ an toàn

Hệ thống tích hợp nhiều lớp bảo vệ an toàn được thiết kế để đảm bảo vận hành ổn định và an toàn trong mọi điều kiện:

- **Flow Interlock:** Tự động ngắt SSR khi lưu lượng < 0.1 L/phút
- **Timeout Protection:** Ngắt SSR sau 12 giây không nhận được tín hiệu
- **Watchdog Timer:** ESP32 tự reset khi bị treo
- **MQTT Heartbeat:** Giám sát kết nối liên tục
- **Data Validation:** Kiểm tra tính hợp lệ của dữ liệu cảm biến

A.1.4 Giao thức truyền thông**a, Định dạng MQTT JSON**

Dữ liệu được truyền qua MQTT topic `sensors/cooling_tower` với định dạng JSON chuẩn:

```
{
  "device_id": "ESP32_TOWER_01",
  "timestamp": 1692876543000,
  "flow_rate": 1.92,
  "water_temp_inlet": 35.5,
  "water_temp_outlet": 29.8,
  "air_temp_inlet": 25.2,
  "air_humidity_inlet": 69.9
}
```

b, Cấu hình InfluxDB

Dữ liệu được lưu trữ trong measurement `cooling_tower` với các field tương ứng với từng thông số cảm biến. Retention policy được thiết lập linh hoạt: 30 ngày cho dữ liệu thô (resolution 30s) và 1 năm cho dữ liệu đã downsample (resolution 1h). Cấu hình này đảm bảo cân bằng giữa độ chi tiết của dữ liệu và không gian lưu trữ.

A.1.5 Kiểm thử và validation hệ thống

a, Kế hoạch kiểm thử

1. **Sensor Reading Test:** Validation độ chính xác cảm biến
2. **Safety Interlock Test:** Kiểm tra cơ chế ngắt SSR khi không có lưu lượng
3. **Network Resilience Test:** Test khả năng tự phục hồi khi mất kết nối
4. **Data Integrity Test:** Validation tính toàn vẹn dữ liệu JSON
5. **Performance Test:** Đánh giá thời gian phản hồi system

b, Kết quả kiểm thử

Hệ thống đã được kiểm thử trong 72 giờ liên tục trong điều kiện phòng thí nghiệm với các kết quả đạt yêu cầu:

Bảng A.3: Kết quả kiểm thử hệ thống

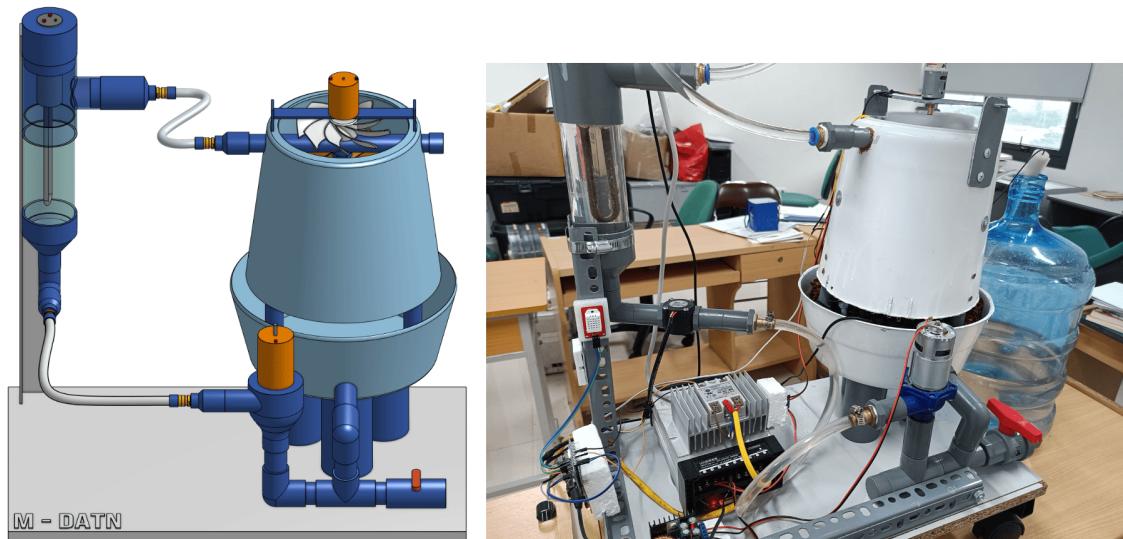
Thông số kiểm thử	Kết quả đạt được	Đánh giá
Uptime hệ thống	99.8%	Đạt yêu cầu
Độ chính xác nhiệt độ	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	Rất tốt
Độ chính xác lưu lượng	$\pm 0.08 \text{ L/phút}$	Rất tốt
Thời gian phản hồi SSR	< 100ms	Xuất sắc
Tỷ lệ dữ liệu hoàn chỉnh	99.95%	Rất tốt

B. THÔNG SỐ THIẾT KẾ MÔ HÌNH

B.1 Tổng quan thiết kế mô hình tháp giải nhiệt

Mô hình tháp giải nhiệt mini được thiết kế để mô phỏng nguyên lý hoạt động của tháp giải nhiệt công nghiệp trong quy mô phòng thí nghiệm. Hệ thống được tối ưu hóa cho việc nghiên cứu, giảng dạy và kiểm chứng các thuật toán giám sát IoT. Thiết kế đảm bảo khả năng tái hiện chính xác các quá trình truyền nhiệt và truyền khói đặc trưng của tháp giải nhiệt thực tế, đồng thời duy trì tính an toàn và dễ vận hành trong môi trường phòng thí nghiệm.

Mô hình được thiết kế theo nguyên tắc tháp giải nhiệt đối lưu hút với cấu trúc compact, cho phép quan sát trực quan các quá trình trao đổi nhiệt và khói. Các thành phần chính bao gồm thân tháp, hệ thống đệm làm mát, bơm tuần hoàn, quạt hút khí và hệ thống gia nhiệt được tích hợp hài hòa để tạo thành một hệ thống hoàn chỉnh.



Hình B.1: Bản vẽ thiết kế mô hình (trái) và mô hình thực tế đã lắp đặt cảm biến (phải)

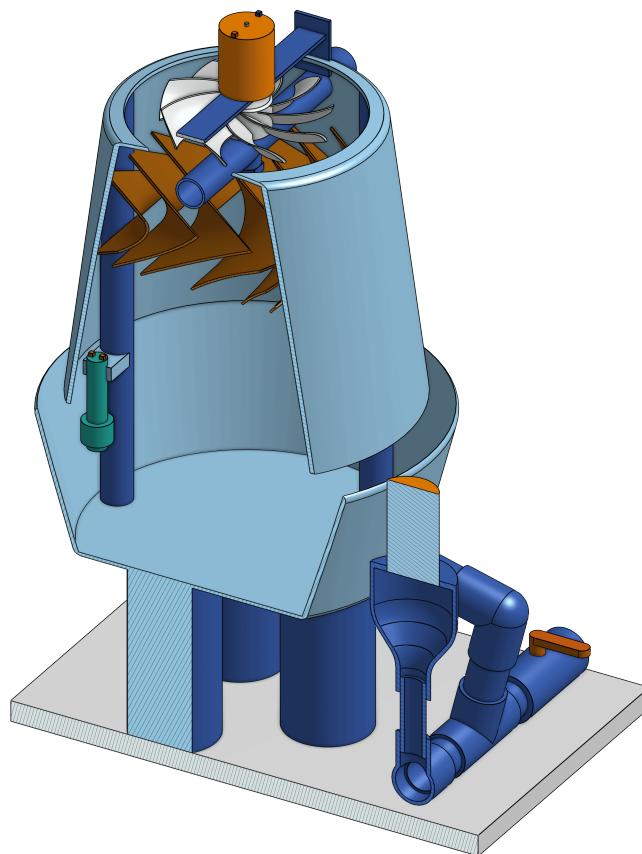
B.2 Thông số kỹ thuật chính

B.2.1 Thông số hình học tháp giải nhiệt

Thiết kế hình học của mô hình được tối ưu hóa để đảm bảo hiệu suất trao đổi nhiệt tối ưu trong khi duy trì kích thước phù hợp với môi trường phòng thí nghiệm. Tỷ lệ chiều cao/đường kính được thiết kế theo tiêu chuẩn công nghiệp để đảm bảo phân bố đều của dòng khí và nước.

Bảng B.1: Thông số hình học mô hình tháp giải nhiệt

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Chiều cao tổng thể	492	mm
Đường kính ngoài thân tháp	267	mm
Đường kính trong thân tháp	230	mm
Chiều cao vùng đệm làm mát	40	mm
Chiều cao vùng phân phối nước	20	mm
Chiều cao bể chứa nước	99	mm
Diện tích mặt cắt làm việc	0,053	m ²
Thể tích làm việc	9,5	lít



Hình B.2: Mặt cắt của mô hình tháp giải nhiệt

B.2.2 Hệ thống đệm làm mát

Hệ thống đệm làm mát đóng vai trò quan trọng trong việc tăng diện tích tiếp xúc giữa nước và không khí. Thiết kế đệm tinh thông minh được lựa chọn để tối ưu hóa hiệu suất trao đổi nhiệt và giảm thiểu tổn thất áp suất.



Hình B.3: Đệm làm mát kiểu tổ ong

Bảng B.2: Thông số hệ thống đệm làm mát

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Vật liệu đệm	Giấy cellulose cao cấp	-
Thiết kế đệm	Tổ ong thông minh	-
Độ dày đệm	40	mm
Số tầng đệm	1	tầng
Diện tích tiếp xúc riêng	285	m ² /m ³
Độ rỗng của đệm	0,85	-

B.3 Hệ thống tuần hoàn nước

Hệ thống tuần hoàn nước được thiết kế để đảm bảo lưu lượng ổn định và phân phối đều trên toàn bộ diện tích tháp. Hệ thống bao gồm bơm ly tâm, đường ống dẫn, hệ thống phân phối và bể chứa được thiết kế tối ưu cho hiệu suất và độ tin cậy.

B.3.1 Bơm tuần hoàn chính

Bơm ly tâm DC được lựa chọn để đảm bảo hoạt động ổn định và tiết kiệm năng lượng. Thiết kế cho phép điều chỉnh lưu lượng linh hoạt để phù hợp với các điều kiện thí nghiệm khác nhau.

Bảng B.3: Thông số bơm tuần hoàn

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Loại bơm	Ly tâm DC	-
Điện áp định mức	12	V
Dòng điện định mức	5	A
Công suất định mức	60	W
Lưu lượng danh định	4,0	L/min
Áp suất tối đa	1,2	bar
Hiệu suất bơm	75	%
Đường kính ống hút	26	mm
Đường kính ống đẩy	21	mm

B.3.2 Hệ thống phân phối nước

Hệ thống phân phối nước được thiết kế để đảm bảo phân bố đều nước trên toàn bộ diện tích đệm làm mát. Đầu phun được thiết kế đặc biệt để tạo ra các giọt nước có kích thước tối ưu cho quá trình trao đổi nhiệt.

Bảng B.4: Thông số hệ thống phân phối nước

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Loại phân phối	Đầu phun tròn (nhựa ABS)	-
Lưu lượng nước	1,9–2	L/min
Áp suất phun	0,3	bar
Tỷ lệ phân phối (L/G)	1,2	kg/kg
Độ đồng đều phân phối	95	%
Đường kính ống dẫn	20	mm

B.3.3 Hệ thống điều chỉnh công suất bơm

Bảng B.5: Hệ thống điều chỉnh công suất bơm

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Phương pháp điều chỉnh	Mạch buck hạ áp + Biến trở	-
Dải điện áp điều chỉnh	4–12	VDC
Dải công suất điều chỉnh	20–60	W
Độ chính xác điều chỉnh	±3	%
Thời gian đáp ứng	2	s
Lưu lượng nước tối thiểu	0,3	L/min
Lưu lượng nước tối đa	4,2	L/min

B.4 Hệ thống thông gió

Hệ thống thông gió đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra dòng khí cần thiết cho quá trình trao đổi nhiệt và khói. Thiết kế hệ thống đảm bảo phân bố khí đều và tối ưu hóa hiệu suất tháp giải nhiệt.

B.4.1 Quạt hút khí chính

Quạt hướng trục DC được lựa chọn để tạo ra lưu lượng khí ổn định và hiệu quả. Thiết kế cho phép điều chỉnh tốc độ để thích ứng với các điều kiện vận hành khác nhau.

Bảng B.6: Thông số quạt hút khí

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Loại quạt	Hướng trục DC	-
Đường kính cánh quạt	120	mm
Số cánh quạt	7	cánh
Điện áp định mức	12	V
Dòng điện định mức	1.5	A
Công suất định mức	18	W
Tốc độ quay định mức	2400	rpm
Lưu lượng không khí	95	m ³ /h
Áp suất tĩnh	15	Pa
Mức ồn	32	dB(A)

B.4.2 Hệ thống điều chỉnh lưu lượng khí

Bảng B.7: Hệ thống điều chỉnh lưu lượng khí

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Phương pháp điều chỉnh	PWM + Biến trở	-
Dải điều chỉnh tốc độ	30-100	%
Độ chính xác điều chỉnh	±2	%
Thời gian đáp ứng	3	s
Lưu lượng khí tối thiểu	28	m ³ /h
Lưu lượng khí tối đa	95	m ³ /h

B.5 Thông số vận hành thiết kế

Các thông số vận hành được thiết kế dựa trên các tiêu chuẩn công nghiệp và điều kiện khí hậu Việt Nam. Các giá trị thiết kế đảm bảo hệ thống hoạt động hiệu quả trong điều kiện môi trường phòng thí nghiệm.

B.5.1 Điều kiện vận hành danh định

Điều kiện vận hành danh định được xác định để đảm bảo hiệu suất tối ưu của tháp giải nhiệt trong điều kiện tiêu chuẩn. Các thông số này được sử dụng làm cơ sở cho việc đánh giá hiệu suất và so sánh với kết quả thực nghiệm.

Bảng B.8: Điều kiện vận hành thiết kế

Thông số	Giá trị thiết kế	Đơn vị
Nhiệt độ nước vào	35,0	°C
Nhiệt độ nước ra	31	°C
Chênh lệch nhiệt độ nước	3,0	°C
Lưu lượng nước tuần hoàn	1,8-2,0	L/min
Nhiệt độ không khí khô	25-30	°C
Độ ẩm tương đối không khí	50-70	%
Nhiệt độ bầu ướt	20-25	°C
Công suất làm mát danh định	0,5	kW

B.5.2 Thông số hiệu suất dự kiến

Các thông số hiệu suất dự kiến được tính toán dựa trên thiết kế hệ thống và điều kiện vận hành danh định. Những giá trị này được sử dụng làm mục tiêu cho việc đánh giá và tối ưu hóa hiệu suất hệ thống.

Bảng B.9: Thông số hiệu suất thiết kế

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Hiệu suất làm mát danh định	32-36	%
Approach temperature	6-8	°C
Range temperature	3-4	°C
Hệ số COP ước tính	8-12	-
Tỷ lệ bay hơi	1,2-1,8	%/°C
Mất nước do bắn toé	0,1-0,3	%

B.6 Hệ thống gia nhiệt

Hệ thống gia nhiệt được thiết kế để mô phỏng tải nhiệt trong ứng dụng thực tế. Bộ gia nhiệt điện trở ngâm được lựa chọn vì khả năng điều khiển chính xác và phản hồi nhanh.

B.6.1 Bộ gia nhiệt điện trở

Bộ gia nhiệt điện trở ngâm được thiết kế để cung cấp tải nhiệt ổn định và có thể điều chỉnh. Thiết kế đảm bảo an toàn và hiệu suất cao trong quá trình vận hành.

Bảng B.10: Thông số bộ gia nhiệt

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Loại gia nhiệt	Điện trở ngâm	-
Công suất gia nhiệt	800	W
Điện áp định mức	220	V
Dòng điện định mức	3,6	A
Chiều dài phần tử gia nhiệt	200	mm
Đường kính phần tử gia nhiệt	8	mm
Nhiệt độ làm việc tối đa	100	°C
Hiệu suất gia nhiệt	98	%

B.7 Hệ thống cảm biến và đo lường

Hệ thống cảm biến được thiết kế để thu thập đầy đủ các thông số cần thiết cho việc giám sát và đánh giá hiệu suất tháp giải nhiệt. Việc lựa chọn và bố trí cảm biến tuân theo các tiêu chuẩn kỹ thuật và đảm bảo độ chính xác cao.

B.7.1 Sơ đồ bố trí cảm biến

Vị trí lắp đặt cảm biến được xác định dựa trên nguyên tắc đảm bảo đo lường chính xác và đại diện. Khoảng cách lắp đặt được tính toán để tránh ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu.

Bảng B.11: Vị trí và thông số cảm biến

Cảm biến	Vị trí lắp đặt	Khoảng cách	Ghi chú
DS18B20-01	Ống nước vào	300 mm từ tháp	Nước nóng
DS18B20-02	Ống nước ra	Đầu ra tháp	Nước lạnh
YF-S201	Ống tuần hoàn chính	Sau bơm 300 mm	Lưu lượng
DHT22	Không khí xung quanh	300 mm từ tháp	T/RH không khí

B.7.2 Đặc tính kỹ thuật cảm biến

Các cảm biến được lựa chọn dựa trên yêu cầu về độ chính xác, độ tin cậy và khả năng tương thích với hệ thống IoT. Tất cả cảm biến đều có chứng nhận chất lượng và phù hợp với điều kiện môi trường phòng thí nghiệm.

Bảng B.12: Thông số kỹ thuật cảm biến sử dụng

Thông số	DS18B20	DHT22	YF-S201
Dải đo	-55 đến +125°C	-40 đến +80°C	1-30 L/min
Độ chính xác	±0,5°C	±0,5°C / ±2%RH	±10%
Độ phân giải	0,0625°C	0,1°C / 0,1%RH	0,1 L/min
Thời gian đáp ứng	750ms	2s	1s
Điện áp cung cấp	3,0-5,5V	3,3-6V	5-18V
Giao tiếp	1-Wire	Digital	Xung Hall

B.8 Vật liệu và cấu trúc xây dựng

Việc lựa chọn vật liệu được thực hiện dựa trên các tiêu chí về độ bền, khả năng chống ăn mòn, tính an toàn và chi phí. Tất cả vật liệu đều phù hợp với môi trường ẩm ướt và nhiệt độ cao của tháp giải nhiệt.

B.8.1 Danh mục vật liệu chính

Bảng dưới đây liệt kê các vật liệu chính được sử dụng trong xây dựng mô hình cùng với lý do lựa chọn.

Bảng B.13: Vật liệu sử dụng trong mô hình

Bộ phận	Vật liệu	Lý do lựa chọn
Thân tháp	Nhựa PP dạng chopy	Dễ gia công, nhẹ
Đệm làm mát	Giấy cellulose	Dễ gia công, thân thiện môi trường
Trụ đỡ	Ông PVC φ21, φ60	Nhẹ, chống ăn mòn
Khung đỡ	Thép chữ L	Chắc chắn, dễ lắp đặt
Đường ống	PVC φ21, φ27, Silicon φ10	Chống ăn mòn, dễ lắp đặt
Bể chứa	Nhựa PP	Chống hóa chất, trong suốt
Khoang tải nhiệt	Ông Mica φ60	Trong suốt, dễ gia công
Óc vít kết nối	Inox 304	Chống gỉ sét

B.9 Đánh giá kinh tế

Phân tích kinh tế của mô hình bao gồm chi phí xây dựng, vận hành và bảo trì. Đánh giá này giúp xác định tính khả thi và hiệu quả kinh tế của việc áp dụng hệ thống trong thực tế.

B.9.1 Chi phí đầu tư ban đầu

Chi phí xây dựng mô hình được ước tính dựa trên giá thị trường các linh kiện và vật liệu tại thời điểm thiết kế (2024). Chi phí này không bao gồm nhân công và chi phí gián tiếp.

Bảng B.14: Chi phí xây dựng mô hình

Hạng mục	Số lượng	Đơn giá (VNĐ)	Thành tiền (VNĐ)
Vật liệu cơ khí	1 bộ	230.000	230.000
Bơm tuần hoàn	1 bộ	200.000	200.000
Quạt đối lưu	1 bộ	90.000	90.000
Thiết bị điện-điện tử	1 bộ	320.000	320.000
Hệ thống cảm biến	1 bộ	190.000	190.000
Vi điều khiển ESP32	1 bộ	150.000	150.000
Tổng cộng			1.180.000

B.9.2 Chi phí vận hành ước tính

Chi phí vận hành hàng năm của mô hình được tính toán dựa trên thời gian hoạt động thực tế và các yêu cầu bảo trì định kỳ. Phân tích chi phí vận hành không bao gồm tiêu thụ điện năng của tải nhiệt, chỉ tập trung vào các thiết bị phụ trợ như bơm tuần hoàn, quạt thông gió và hệ thống điều khiển. Việc ước tính này được thực hiện cho điều kiện vận hành 8 giờ mỗi ngày trong 250 ngày làm việc mỗi năm, phù hợp với môi trường phòng thí nghiệm và giảng dạy.

Bảng B.15: Chi phí vận hành ước tính hàng năm

Hạng mục	Chi phí (VNĐ/năm)	Ghi chú
Điện năng tiêu thụ	450.000	8h/ngày, 250 ngày/năm
Bảo trì cảm biến	120.000	Thay thế định kỳ
Vật tư tiêu hao	80.000	Đệm làm mát, hóa chất
Tổng cộng	650.000	