

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ



Phạm Duy Linh

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO MÁY TRÁNG PHỦ MÀNG
MỎNG (BLADE COATER)
ỨNG DỤNG TRONG LINH KIỆN CHUYỂN ĐỔI ĐIỆN
NĂNG

KHÓA LUẬN TỐT NGHIỆP

Ngành: Vật lý kỹ thuật

HÀ NỘI - 2025

DẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

Phạm Duy Linh

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO MÁY TRÁNG PHỦ MÀNG
MỎNG (BLADE COATER)
ỨNG DỤNG TRONG LINHKIỆN CHUYỂN ĐỔI ĐIỆN
NĂNG

KHÓA LUẬN TỐT NGHIỆP

Ngành: Vật lý kỹ thuật

Cán bộ hướng dẫn: TS. Nguyễn Tuấn Cảnh

HÀ NỘI - 2025

Lời cảm ơn

Trước hết, tôi xin gửi lời tri ân sâu sắc đến các thầy cô giáo của trường Đại học Công Nghệ nói chung và đặc biệt là các thầy cô trong khoa Vật lý kỹ thuật đã tận tình giảng dạy, truyền đạt những kiến thức quý báu trong suốt quá trình học tập tại trường. Tôi đặc biệt cảm ơn thầy Nguyễn Tuấn Cảnh – người đã tận tâm hướng dẫn, chỉ bảo, và hỗ trợ tôi trong suốt quá trình thực hiện khóa luận tốt nghiệp. Những lời khuyên, sự chỉ dẫn tận tình và sự hỗ trợ của thầy đã giúp tôi hoàn thiện khóa luận này. Mặc dù đã cố gắng hết sức, nhưng do hạn chế về mặt thời gian và kiến thức, khóa luận tốt nghiệp của tôi chắc chắn vẫn còn những thiếu sót. Tôi rất mong nhận được ý kiến đóng góp từ các thầy cô và bạn bè để có thể hoàn thiện hơn trong tương lai.

Cuối cùng, tôi xin được gửi lời cảm ơn sâu sắc đến gia đình, những người thân đã nuôi tôi khôn lớn, trưởng thành hôm nay. Cảm ơn cha, mẹ, chị gái đã luôn động viên và là điểm tựa tinh thần giúp tôi vượt qua những khó khăn, thử thách.

Lời cam đoan

Tôi xin cam đoan rằng công trình nghiên cứu trong khóa luận này là kết quả của quá trình học tập, nghiên cứu và làm việc nghiêm túc. Tôi khẳng định rằng tất cả nội dung được trình bày trong luận văn này chưa từng được nộp để lấy bằng cấp hoặc chứng chỉ tại cơ sở giáo dục đại học này hoặc bất kỳ cơ sở giáo dục đại học nào khác. Tôi hiểu rằng bất kỳ hành vi sao chép, sử dụng trái phép, hoặc không trung thực nào đối với tài liệu trong luận văn này mà không có sự ghi nhận thích đáng đều vi phạm các quy tắc về đạo đức học thuật, và tôi hoàn toàn chịu trách nhiệm trước các hành vi này.

Bằng lời cam đoan này, tôi mong muốn thể hiện cam kết về sự trung thực, minh bạch, cũng như tinh thần trách nhiệm cao nhất của tôi đối với công trình nghiên cứu này.

Hà Nội, ngày .. tháng .. năm 2025

Sinh viên

Phạm Duy Linh

Tóm tắt

Trong những năm gần đây, công nghệ nano đã trở thành một lĩnh vực then chốt, đóng vai trò quan trọng trong việc phát triển các vật liệu và thiết bị có đặc tính vượt trội. Một trong những yếu tố nền tảng của công nghệ nano là khả năng chế tạo và kiểm soát các cấu trúc vật liệu ở cấp độ nano, trong đó công nghệ màng mỏng nổi lên như một phương pháp thiết yếu để tạo ra các lớp vật liệu chức năng có độ dày siêu mỏng, đồng đều và ổn định. Nhờ những ưu điểm như tiết kiệm vật liệu, khả năng điều chỉnh chính xác các tính chất bề mặt và phù hợp với nhiều quy trình sản xuất, công nghệ màng mỏng hiện đang được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực từ điện tử, y sinh đến năng lượng tái tạo.

Đặc biệt, trong lĩnh vực chuyển đổi năng lượng, màng mỏng đóng vai trò trung tâm trong việc chế tạo các linh kiện như nanogenerator – thiết bị có khả năng chuyển đổi năng lượng cơ học (chẳng hạn rung động, chuyển động) thành điện năng. Việc đảm bảo chất lượng lớp màng mỏng là điều kiện tiên quyết để các thiết bị này đạt hiệu suất hoạt động cao. Một trong những phương pháp tráng phủ màng mỏng được đánh giá cao về tính đơn giản, chi phí thấp nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác là blade coating. Nhờ khả năng kiểm soát tốt độ dày lớp phủ và cấu trúc bề mặt, phương pháp này ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nghiên cứu và sản xuất.

Xuất phát từ nhu cầu đó, khóa luận này hướng đến việc thiết kế và chế tạo một hệ thống máy tráng phủ tự động ứng dụng phương pháp blade coating, tích hợp công nghệ IoT (Internet of Things) nhằm tăng tính linh hoạt và khả năng giám sát, điều khiển từ xa. Thiết bị được xây dựng với mục tiêu phục vụ nghiên cứu và phát triển các loại vật liệu mới cho nanogenerator và các thiết bị thu hoạch năng lượng. Việc tích hợp các thành phần như Arduino, ESP8266, động cơ bước và màn hình hiển thị, cùng với phần mềm điều khiển, giúp hệ thống đạt độ chính xác cao và vận hành ổn định.

Khóa luận không chỉ mang lại một giải pháp kỹ thuật hiệu quả cho việc chế tạo màng mỏng, mà còn mở ra tiềm năng ứng dụng trong các lĩnh vực khác như cảm biến tự cấp nguồn, thiết bị điện tử thông minh, và hệ thống năng lượng bền vững trong tương lai.

Từ khóa: *IOT, blade coating, nanogenerator, phương pháp tráng phủ màng mỏng*

Mục lục

Lời cảm ơn	
Lời cam đoan	i
Tóm tắt	ii
Mục lục	iii
Danh sách hình vẽ	v
Danh sách bảng	vii
Danh mục các từ viết tắt	viii
Mở đầu	1
Chương 1 Giới thiệu	3
1.1 Bối cảnh và lý do thực hiện đề tài	3
1.2 Mục tiêu của khóa luận	5
1.3 Phạm vi nghiên cứu	7
Kết luận Chương 1	8
Chương 2 Cơ sở lý thuyết và tổng quan công nghệ	10
2.1 Cơ sở lý thuyết về tráng phủ màng mỏng (blade coating)	10
2.1.1 Các phương pháp được sử dụng để chế tạo vật liệu nano	12
2.1.2 Các phương pháp phủ màng mỏng	15
2.2 Nanogenerator và ứng dụng Thực tiễn	21
2.2.1 Định nghĩa và nguyên lý hoạt động của Nanogenerator	21
2.2.2 Phương pháp Blade Coating trong chế tạo Nanogenerator	23
2.2.3 Các vật liệu sử dụng trong Nanogenerator	24
2.2.4 Ứng dụng thực tiễn của Nanogenerator chế tạo bằng Blade Coating	25

2.2.5 Kết Luận	26
2.3 Tổng quan về công nghệ IoT	26
2.3.1 Khái niệm IOT	26
2.3.2 Cơ sở kỹ thuật của IoT	30
2.4 Giao tiếp UART giữa ESP và Arduino	31
Kết luận Chương 2	33
Chương 3 Thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng	34
3.1 Thiết kế cấu trúc thiết bị	34
3.1.1 Yêu cầu kỹ thuật của hệ thống máy sơn phủ	34
3.1.2 Thiết kế cấu trúc hệ thống	35
3.2 Quy trình chế tạo và lắp ráp	41
3.3 Quy trình thử nghiệm và đánh giá sản phẩm	43
3.3.1 thử nghiệm hiệu quả quá trình sơn phủ	43
3.3.2 Kiểm tra các thông số của hệ	44
3.3.3 Phân tích dữ liệu và đề xuất cải tiến	45
Kết luận Chương 3	46
Chương 4 Ứng dụng máy tráng phủ màng mỏng trong linh kiện chuyển đổi điện năng	47
4.1 Thử nghiệm và đánh giá hiệu quả	47
4.1.1 Thí nghiệm trên linh kiện nanogenerator	47
4.2 Đánh giá hiệu quả chuyển đổi năng lượng	51
4.3 Thảo luận	58
Kết luận Chương 4	58
Kết luận	59
Tài liệu tham khảo	61

Danh sách hình vẽ

1.1	Smart TENG và các ứng dụng đa dạng	4
1.2	Máy tráng phủ doctor blade coater	6
1.3	Triboelectric Nanogenerators	6
2.1	Phương pháp sơn phủ doctor blade	10
2.2	Phương pháp spin coating	15
2.3	Phương pháp balde coating	16
2.4	Phương pháp dip coating	17
2.5	Phương pháp slot die coating	17
2.6	phương pháp bar coating	18
2.7	phương pháp spray coating	19
2.8	Các cấu trúc cơ bản của máy phát điện ma sát nanogenerator (TENGs).	22
2.9	Minh họa cấu trúc tiếp xúc – tách rời của máy phát điện ma sát nano (TENG).	23
2.10	“Internet of Things”	27
2.11	Ứng dụng nhà thông minh với IOT	29
2.12	Ví dụ về mqtt	30
2.13	Ví dụ về http	31
2.14	Ví dụ về xmpp	31
2.15	Giao tiếp UART	32
3.1	Dao sơn phủ (Doctor blade)	35
3.2	Thiết kế hệ thống bàn làm việc bladecoating	36
3.3	Arduino Uno R3	37
3.4	Driver TB6600	37
3.5	Module Joystick	38
3.6	Màn hình LCD 16×2	38
3.7	Module ESP8266	39

3.8 Giao diện màn hình kết nối Wi-Fi	40
3.9 Giao diện giám sát và điều khiển động cơ	40
3.10 Sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển	41
3.11 Sơ đồ luồng dữ liệu của hệ thống IoT	42
4.1 Ví dụ góc tiếp xúc (Contact Angle) của nước trên bề mặt kính	48
4.2 So sánh góc tiếp xúc giữa dung dịch 9% PVA và nước trên bề mặt kính	49
4.3 So sánh bề mặt màng mỏng tạo ra từ spin coating và blade coating với cùng nồng độ 9% PVA	49
4.4 Cấu trúc vòng của nanogenerator với hai lớp PVA và PVC	53
4.5 Màng được tạo bởi phương pháp blade coating nồng độ 8% PVA . .	53
4.6 Màng được tạo bởi phương pháp blade coating với nồng độ 10% PVA	54
4.7 Màng được tạo bởi phương pháp blade coating với nồng độ 12% PVA	54
4.8 Màng được tạo bởi phương pháp blade coating với nồng độ 6% PVA	55
4.9 Đồ thị dao động điện áp của lớp chức năng PVC-PVA với nồng độ 8% PVA	56
4.10 Độ thi dòng điện theo thời gian của lớp chức năng PVC-PVA với nồng độ 9% PVA	57
4.11 Đồ thị mật độ dòng điện theo thời gian của lớp chức năng PVC-PVA với nồng độ 9% PVA	57

Danh sách bảng

2.1	So sánh các kỹ thuật solution processing trong sơn phủ màng mỏng .	20
2.2	Tổng hợp các ứng dụng và ưu/nhược điểm của Blade Coating trong nanogenerator	25
3.1	Chi phí các linh kiện cấu thành thiết bị	43
3.2	So sánh thiết bị đề tài và thiết bị thương mại	45

Danh mục các từ viết tắt

STT	Từ viết tắt	Cụm từ đầy đủ	Cụm từ tiếng Việt
1	IOT	Internet of Things	Internet vạn vật
2	TENG	Triboelectric Nanogenerator	công nghệ chuyển đổi nguồn năng lượng cơ học từ tự nhiên thành năng lượng điện
3	API	Application Programming Interface	giao diện lập trình ứng dụng
4	UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter	Bộ truyền nhận dữ liệu không đồng bộ
5	DB	Database	cơ sở dữ liệu
6	BEM	Block – Element – Modifier	tiêu chuẩn quy ước đặt tên
7	FM	Feature Model	Mô hình hệ thống
8	CONFIG	Configuration	Cấu hình sản phẩm
9	SUT	System Under Test	Hệ thống đang kiểm thử
10	SBPL	Spectrum-Based Fault Localization	Kỹ thuật khoanh vùng lỗi
11	RT	Random Testing	Kỹ thuật kiểm thử ngẫu nhiên
12	SBT	Search-Based Testing	Kỹ thuật kiểm thử dựa trên thuật toán tìm kiếm
13	BMD	Benchmark Dataset	Bộ dữ liệu đánh giá

Mở đầu

Trong bối cảnh toàn cầu đang hướng tới phát triển các nguồn năng lượng sạch và bền vững, nhu cầu khai thác năng lượng từ các nguồn tự nhiên như chuyển động, rung động, gió, và các dạng năng lượng cơ học khác đã trở thành một lĩnh vực nghiên cứu đầy triển vọng. Các hệ thống sử dụng nanogenerator (linh kiện chuyển đổi điện năng), với khả năng chuyển đổi năng lượng cơ học từ môi trường thành điện năng, được xem là một giải pháp tiềm năng để cung cấp nguồn điện cho các linh kiện điện tử và các ứng dụng vi mạch [1, 2].

Tuy nhiên, hiệu suất chuyển đổi của nanogenerator phụ thuộc rất lớn vào chất lượng của lớp màng mỏng được tạo ra trên bề mặt của linh kiện. Một lớp màng mỏng đồng nhất, có cấu trúc bề mặt mịn màng và kiểm soát chính xác độ dày là yếu tố then chốt để tối ưu hóa hiệu suất thu năng lượng [3]. Trong quá trình chế tạo, việc áp dụng các kỹ thuật phủ hiện đại trở nên cần thiết để đảm bảo các đặc tính bề mặt đạt yêu cầu kỹ thuật.

Trong nhiều thiết kế nanogenerator hiện nay, các lớp hoạt động thường sử dụng các vật liệu polymer có độ nhớt cao như PVA, PVDF hoặc các composite chứa hạt nano phân tán trong nền polymer. Những vật liệu này có xu hướng khó lan trãi trên bề mặt nếu dùng các kỹ thuật phủ truyền thống như spin coating. Do đó, cần phải sử dụng các phương pháp tráng phủ phù hợp để tạo màng đồng đều.

Doctor Blade Coating là một trong những phương pháp phủ màng mỏng được nghiên cứu rộng rãi nhờ tính đơn giản, hiệu quả và khả năng kiểm soát độ dày của lớp màng một cách chính xác [4]. Phương pháp này đặc biệt thích hợp cho các dung dịch có độ nhớt cao, giúp vật liệu trải đều hơn trên bề mặt, giảm thiểu hiện tượng tạo khuyết tật và đảm bảo tính đồng nhất của lớp phủ.

Tuy nhiên, hiện nay việc ứng dụng phương pháp này trong chế tạo nanogenerator còn hạn chế, chủ yếu do thiếu các thiết bị tráng phủ chuyên dụng có khả năng tự động hóa và duy trì sự đồng nhất trong quá trình sản xuất.

Do đó, nghiên cứu này đề xuất thiết kế và chế tạo một hệ tráng phủ Doctor Blade Coating chuyên dụng, tích hợp các công nghệ điều khiển tự động và thu thập dữ liệu qua IoT, nhằm tạo ra các lớp màng mỏng có chất lượng cao cho nanogenerator. Qua đó, hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator được kỳ vọng sẽ được

cải thiện đáng kể, góp phần thúc đẩy sự phát triển của các hệ thống tự cấp nguồn và ứng dụng trong IoT.

Các mục tiêu nghiên cứu cụ thể bao gồm:

1. Phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng lớp màng mỏng trong quá trình tráng phủ.
2. Thiết kế mô hình và cấu trúc của hệ tráng phủ Doctor Blade Coating.
3. Chế tạo và thử nghiệm hệ, đánh giá hiệu suất tạo lớp màng trên nanogenerator.
4. Tích hợp hệ thống IoT để giám sát và điều khiển quá trình tráng phủ theo thời gian thực.

Kết quả của nghiên cứu kỳ vọng sẽ mở ra hướng đi mới trong sản xuất các nanogenerator có hiệu suất cao, từ đó góp phần vào sự phát triển bền vững của nguồn năng lượng sạch trong kỷ nguyên công nghệ số.

Chương 1

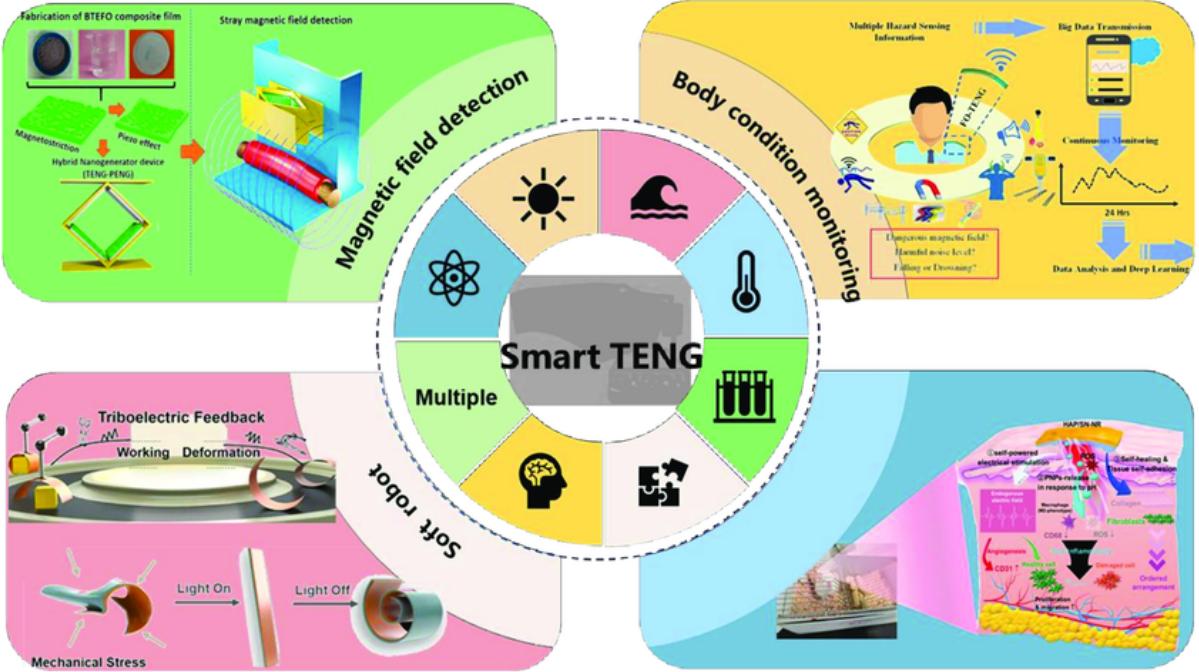
Giới thiệu

Trong chương này sẽ giới thiệu về hệ thống sản phẩm doctor blade coater được tích hợp công nghệ IOT và những ứng dụng của nó trong sơn phủ màng mỏng áp dụng cho nền công nghiệp điện tử hiện nay. Hơn nữa, cấu trúc của một hệ thống BladeCoating cũng được trình bày chi tiết kèm theo một quy trình xây dựng hoàn thiện. Cuối cùng là khảo sát màng mỏng được chế tạo bởi sản phẩm có hình thái học bề mặt và chất lượng của màng mỏng.

1.1 Bối cảnh và lý do thực hiện đề tài

Trong thời đại công nghiệp 4.0, nhu cầu về các thiết bị điện tử nhỏ gọn, tiết kiệm năng lượng và thân thiện với môi trường đang ngày càng gia tăng mạnh mẽ. Việc phát triển các công nghệ chuyển đổi và thu hoạch năng lượng (energy harvesting) đóng vai trò then chốt trong việc cung cấp nguồn điện ổn định, liên tục cho các thiết bị điện tử hiện đại như cảm biến không dây, thiết bị đeo thông minh (wearables) và hệ thống điều khiển phân tán. Trong số các công nghệ mới nổi, nanogenerator – thiết bị có khả năng chuyển đổi năng lượng cơ học từ môi trường (như áp lực, rung động, hoặc chuyển động) thành điện năng – đang nhận được sự quan tâm đặc biệt nhờ tiềm năng ứng dụng rộng rãi và thân thiện với môi trường.

Nanogenerator thường hoạt động dựa trên các hiệu ứng như hiệu ứng áp điện (piezoelectric) và hiệu ứng ma sát điện (triboelectric), vốn yêu cầu các màng mỏng chức năng có tính chất cơ học, điện tử và hóa học đặc biệt. Độ đồng đều, độ dày và tính ổn định của màng mỏng là những yếu tố then chốt quyết định đặc tính và tuổi thọ của thiết bị. Do đó, quy trình chế tạo màng mỏng chất lượng cao là một mắt xích quan trọng trong chuỗi phát triển linh kiện chuyển đổi năng lượng thế hệ mới. [5].



Hình 1.1: Smart TENG và các ứng dụng đa dạng

Hiện nay, có nhiều phương pháp được ứng dụng tạo màng mỏng như spin coating, dip coating, spray coating,... Trong đó, blade coating (doctor blade coating) nổi bật là một phương pháp đơn giản, dễ triển khai nhưng vẫn cho phép kiểm soát tốt độ dày lớp màng và khả năng lắp lại cao. Đặc biệt, blade coating có thể áp dụng cho nhiều loại vật liệu như polymer, vật liệu nano, hợp chất lai và thậm chí là các dung dịch chức năng đa pha, phục vụ tốt cho các ứng dụng nghiên cứu trong lĩnh vực năng lượng, cảm biến và điện tử linh hoạt.

Tuy nhiên, một thực tế là các hệ thống blade coating hiện đại trên thị trường thường có giá thành rất cao, thiết kế công kềnh và không dễ tùy biến. Điều này gây ra nhiều khó khăn cho các nhóm nghiên cứu nhỏ, phòng thí nghiệm trong các trường đại học hoặc viện nghiên cứu tại Việt Nam, vốn có ngân sách đầu tư hạn chế. Ngay cả các phiên bản đơn giản được thương mại hóa cũng có giá bán vượt ngoài khả năng tiếp cận của nhiều cơ sở nghiên cứu trong nước.

Bên cạnh đó, xu hướng công nghệ hiện nay đang chuyển dịch mạnh mẽ sang các thiết bị thông minh tích hợp Internet of Things (IoT). Việc tích hợp IoT vào các hệ thống nghiên cứu, sản xuất không chỉ giúp tăng tính linh hoạt, hỗ trợ điều khiển và giám sát từ xa mà còn mở ra khả năng thu thập, lưu trữ và phân tích dữ liệu theo thời gian thực, góp phần nâng cao hiệu suất và độ ổn định trong quá trình

vận hành. Điều này đặc biệt có ý nghĩa trong bối cảnh chuyển đổi số và xây dựng mô hình nhà máy thông minh trong tương lai gần.

Xuất phát từ các vấn đề nêu trên, đề tài “Thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng (doctor blade coater) ứng dụng trong linh kiện chuyển đổi điện năng” được thực hiện với mục tiêu cụ thể là:

Xây dựng một hệ thống blade coating có chi phí chế tạo thấp, kích thước gọn nhẹ, dễ vận hành nhưng vẫn đảm bảo được độ chính xác và hiệu quả tráng phủ.

Tích hợp công nghệ IoT vào hệ thống để hỗ trợ điều khiển, giám sát quá trình hoạt động từ xa cũng như lưu trữ dữ liệu phục vụ cho quá trình phân tích và tối ưu hóa.

Ứng dụng hệ thống này để chế tạo màng mỏng chức năng phục vụ cho nghiên cứu và phát triển nanogenerator, từ đó góp phần thúc đẩy tiến trình tự chủ công nghệ và đổi mới sáng tạo trong lĩnh vực chuyển đổi năng lượng.

Với cách tiếp cận hướng đến tối ưu hóa hiệu suất – chi phí – tích hợp công nghệ thông minh, đề tài không chỉ mang ý nghĩa nghiên cứu mà còn có tiềm năng ứng dụng thực tiễn cao, góp phần vào mục tiêu phát triển công nghệ vật liệu tiên tiến và thiết bị năng lượng bền vững tại Việt Nam. [3].

1.2 Mục tiêu của khóa luận

Mục tiêu của khóa luận này là thiết kế và chế tạo một hệ thống máy tráng phủ màng mỏng nhằm ứng dụng trong sản xuất các linh kiện chuyển đổi điện năng như pin mặt trời, máy phát điện nano (nanogenerator), và các thiết bị năng lượng tái tạo khác.

khóa luận tập trung vào việc nghiên cứu và phát triển quy trình tráng phủ, với mục tiêu đảm bảo độ đồng đều, độ dày chính xác và chất lượng bề mặt của màng phủ. Việc tối ưu hóa chất lượng màng phủ sẽ góp phần nâng cao hiệu quả chuyển đổi năng lượng của các linh kiện, từ đó cải thiện hiệu suất của các hệ thống sử dụng năng lượng tái tạo.

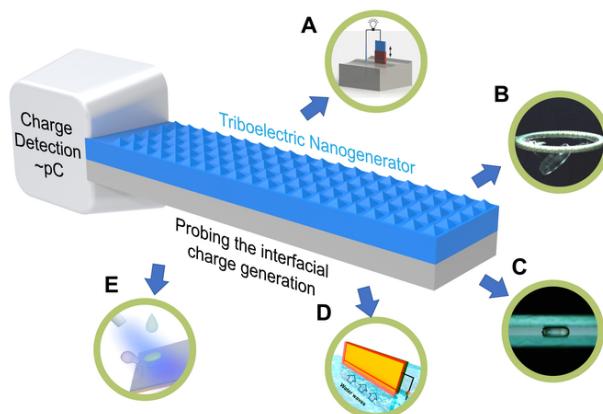
Trong quá trình thiết kế hệ thống, các yếu tố quan trọng như hình dạng và kích thước của lưỡi dao tráng phủ, tốc độ di chuyển, độ dày mong muốn của màng mỏng, cũng như các điều kiện môi trường như nhiệt độ và độ ẩm sẽ được nghiên

cứu và điều chỉnh phù hợp với yêu cầu kỹ thuật cụ thể của từng loại vật liệu và ứng dụng.



Hình 1.2: Máy tráng phủ doctor blade coater

Ngoài ra, khóa luận còn hướng đến việc chế tạo một hệ thống cơ khí chính xác với các thành phần có độ bền cao, đảm bảo khả năng hoạt động ổn định trong quá trình sản xuất thực tế. Các vật liệu và công nghệ chế tạo sẽ được lựa chọn sao cho hệ thống không những đạt hiệu suất cao mà còn tiết kiệm năng lượng và chi phí vận hành. Hệ tráng phủ sau khi chế tạo sẽ được kiểm tra và đánh giá dựa trên các tiêu chí như độ chính xác trong điều khiển độ dày màng phủ, độ lặp lại của quy trình và khả năng duy trì chất lượng màng trong nhiều điều kiện vận hành khác nhau.



Hình 1.3: Triboelectric Nanogenerators

Một trong những mục tiêu quan trọng khác của khóa luận là nghiên cứu khả năng ứng dụng của màng mỏng tráng phủ trong các linh kiện chuyển đổi năng lượng. Các linh kiện này cần đạt các tiêu chuẩn kỹ thuật như độ dẫn điện cao, chống oxy hóa hiệu quả nhằm đảm bảo tuổi thọ và hiệu suất làm việc lâu dài. Khóa luận sẽ đi sâu phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến tính chất vật lý và hình thái học bề mặt của màng, đồng thời đề xuất các phương pháp tối ưu hóa quy trình tráng phủ để đạt kết quả tốt nhất.

Cuối cùng, khóa luận kỳ vọng đóng góp vào sự phát triển công nghệ sản xuất linh kiện năng lượng tại Việt Nam, thông qua việc chế tạo một hệ thống tráng phủ có chi phí hợp lý, dễ tiếp cận và phù hợp với điều kiện của các viện nghiên cứu và doanh nghiệp trong nước. Những kết quả thu được sẽ là nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo hướng tới phát triển công nghệ sản xuất năng lượng tái tạo một cách bền vững và hiệu quả hơn trong tương lai.

1.3 Phạm vi nghiên cứu

Đề tài “Thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng (Blade Coater) ứng dụng trong linh kiện chuyển đổi điện năng” tập trung vào các khía cạnh kỹ thuật liên quan đến quy trình tạo lớp màng mỏng có độ đồng đều cao, tự động hóa thao tác vận hành, thiết kế – chế tạo máy móc, cũng như đánh giá khả năng ứng dụng thực tiễn của màng phủ trong lĩnh vực năng lượng.

Phạm vi nghiên cứu bao gồm các bước từ khảo sát cơ sở lý thuyết về phương pháp Blade Coating, thiết kế và mô hình hóa các bộ phận cơ khí, đến quá trình chế tạo và lắp ráp hệ thống tráng phủ. Các thông số kỹ thuật ảnh hưởng đến chất lượng màng phủ như tốc độ tráng phủ, độ dày, độ đồng đều và độ bám dính sẽ được phân tích chi tiết nhằm tối ưu hóa hiệu suất hệ thống.

Ngoài các khía cạnh thiết kế và vận hành, nghiên cứu còn mở rộng đến việc khảo sát ứng dụng của lớp màng mỏng trong các linh kiện chuyển đổi điện năng như pin mặt trời, pin lithium-ion, và thiết bị điện tử sử dụng năng lượng tái tạo. Các đặc tính quan trọng như độ dẫn điện, khả năng chống oxy hóa và hiệu suất chuyển đổi năng lượng của màng phủ sẽ được đánh giá thông qua các thử nghiệm thực tế, từ đó xác định độ bền và tuổi thọ của linh kiện.

Phạm vi nghiên cứu cũng bao gồm việc tìm hiểu và đối chiếu với các quy chuẩn,

tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành trong lĩnh vực sản xuất linh kiện điện tử và năng lượng. Điều này nhằm đảm bảo rằng sản phẩm tạo ra từ hệ thống tráng phủ đáp ứng yêu cầu kỹ thuật và phù hợp với các tiêu chí công nghiệp.

Bên cạnh đó, đề tài còn mở rộng hướng ứng dụng hệ thống trong việc phủ màng cho các thiết bị tiên tiến như nanogenerator, pin mặt trời thế hệ mới, hoặc linh kiện sử dụng vật liệu mới như perovskite và polymer dẫn điện. Tuy nhiên, đề tài không đi sâu vào phân tích hóa học vật liệu mà tập trung vào khía cạnh kỹ thuật của hệ thống phủ và khả năng tích hợp vào quy trình sản xuất.

Phương pháp nghiên cứu được triển khai theo hướng kết hợp giữa lý thuyết và thực nghiệm. Trước tiên, nghiên cứu tiến hành khảo sát tài liệu liên quan đến công nghệ tráng phủ, đặc biệt là phương pháp Blade Coating. Sau đó, sử dụng phần mềm chuyên dụng (sketchup) để thiết kế hệ thống, lựa chọn và chế tạo các chi tiết cơ khí, tiến hành lắp ráp hoàn chỉnh và chạy thử nghiệm để đánh giá khả năng hoạt động và chất lượng màng phủ.

Về cấu trúc, khóa luận được chia thành bốn chương chính:

Chương 1: Trình bày tổng quan đề tài, bao gồm bối cảnh, mục tiêu, phạm vi và phương pháp nghiên cứu.

Chương 2: Phân tích cơ sở lý thuyết về công nghệ tráng phủ mảng mỏng, nguyên lý hoạt động của hệ thống Blade Coating, và các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình tạo mảng.

Chương 3: Trình bày quá trình thiết kế, mô hình hóa, chế tạo và lắp ráp hệ thống tráng phủ.

Chương 4: Đánh giá ứng dụng của hệ thống tráng phủ trong chế tạo linh kiện chuyển đổi điện năng.

Kết luận Chương 1

Trong chương này, đề tài đã giới thiệu tổng quan về hệ thống máy sơn phủ sử dụng công nghệ doctor blade coating, hướng đến mục tiêu chế tạo các lớp mảng mỏng có hình thái bề mặt đồng đều và hạn chế tối đa các khuyết tật. Bên cạnh đó, các nội dung như bối cảnh thực tiễn, mục tiêu nghiên cứu, phạm vi và phương pháp thực hiện cũng đã được trình bày cụ thể. Chương tiếp theo sẽ tập trung trình bày

cơ sở lý thuyết về công nghệ phủ màng mỏng, các phương pháp sơn phủ phổ biến, cùng nguyên lý hoạt động của hệ thống blade coater nhằm làm nền tảng cho quá trình thiết kế và chế tạo trong các chương sau.

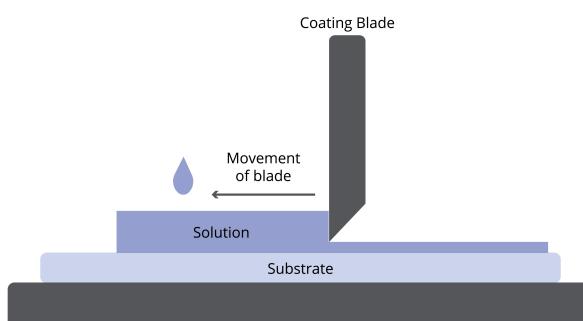
Chương 2

Cơ sở lý thuyết và tổng quan công nghệ

Phương pháp blade coating là một trong những kỹ thuật phổ biến để sơn phủ màng mỏng, đặc biệt trong các ứng dụng nghiên cứu và phát triển các vật liệu mới như màng perovskite trong các tế bào quang điện (solar cells) [6] [7]. Phương pháp này sử dụng một lưỡi dao để phân phối dung dịch tiền chất đều trên bề mặt để, tạo thành một lớp màng mỏng. Đặc điểm nổi bật của phương pháp này là khả năng tạo ra các lớp màng có độ dày đồng đều, dễ kiểm soát và có thể mở rộng cho các ứng dụng công nghiệp [8].

2.1 Cơ sở lý thuyết về tráng phủ màng mỏng (blade coating)

Blade coating là một kỹ thuật sơn phủ màng mỏng phổ biến và quan trọng, đặc biệt trong các nghiên cứu và sản xuất các vật liệu tiên tiến như màng perovskite cho tế bào quang điện (solar cells). Kỹ thuật này đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, từ nghiên cứu cơ bản cho đến sản xuất công nghiệp, nhờ vào khả năng tạo ra những lớp màng mỏng đồng đều, kiểm soát được độ dày của màng và có thể áp dụng quy mô lớn. Blade coating giúp tạo ra các lớp phủ mỏng trên bề mặt để bằng cách sử dụng một lưỡi dao (blade) di chuyển qua dung dịch tiền chất được đặt trên bề mặt, từ đó phân phối dung dịch đều trên toàn bộ bề mặt và tạo ra một lớp màng mỏng [6].



Hình 2.1: Phương pháp sơn phủ doctor blade

Quá trình sơn phủ trong blade coating có thể được điều chỉnh thông qua nhiều

yếu tố khác nhau, chẳng hạn như tốc độ di chuyển của lưỡi dao, nhiệt độ của dung dịch, tốc độ bay hơi của dung môi, và độ nhớt của dung dịch tiền chất. Việc kiểm soát các yếu tố này có thể tạo ra những lớp màng có chất lượng rất cao, với độ đồng đều và tính chất phù hợp cho các ứng dụng đặc biệt. Bên cạnh đó, phương pháp này còn có ưu điểm là dễ dàng tích hợp với các kỹ thuật khác, chẳng hạn như xử lý nhiệt nhanh (rapid thermal processing), phương pháp lăn cuộn (roll-to-roll), hay phương pháp xử lý hơi dung môi (solvent annealing), giúp tối ưu hóa quá trình sản xuất màng mỏng trong quy mô công nghiệp [9].

Phương pháp blade coating đặc biệt được quan tâm trong việc chế tạo các màng perovskite, một loại vật liệu có tiềm năng lớn trong lĩnh vực năng lượng mặt trời, nhờ vào khả năng hấp thụ ánh sáng mạnh và dễ chế tạo. Màng perovskite, khi được sơn phủ đồng đều và có cấu trúc tinh thể tốt, có thể cải thiện hiệu suất của tế bào quang điện, từ đó tạo ra những sản phẩm có hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao. Chính vì vậy, nghiên cứu và phát triển các phương pháp sơn phủ màng mỏng như blade coating là một trong những hướng đi quan trọng trong ngành công nghiệp năng lượng tái tạo, đặc biệt là trong việc sản xuất tế bào quang điện perovskite [10] [11].

Một trong những yếu tố quan trọng trong quá trình blade coating là việc lựa chọn dung môi và kiểm soát quá trình bay hơi của dung môi trong khi sơn phủ. Dung môi không chỉ có vai trò hòa tan các tiền chất mà còn ảnh hưởng đến độ nhớt và khả năng trải đều của dung dịch trên bề mặt. Sự bay hơi của dung môi trong suốt quá trình sơn phủ cũng ảnh hưởng lớn đến sự hình thành và phát triển tinh thể của màng, từ đó ảnh hưởng đến chất lượng và hiệu suất của màng perovskite. Do đó, việc điều chỉnh các điều kiện như nhiệt độ và tốc độ bay hơi của dung môi đóng vai trò cực kỳ quan trọng trong việc tối ưu hóa quá trình sản xuất màng mỏng chất lượng cao [6].

Ngoài ra, blade coating còn được sử dụng để cải thiện khả năng tạo màng mỏng trong các ứng dụng khác như màn hình hiển thị, pin mặt trời và các vật liệu điện tử. Do tính linh hoạt của phương pháp này, nó có thể được áp dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, từ nghiên cứu phát triển cho đến sản xuất thương mại. Với những ưu điểm như tính đồng đều, khả năng kiểm soát độ dày và dễ dàng mở rộng quy mô, blade coating đang ngày càng chứng tỏ được vai trò quan trọng của mình trong ngành công nghiệp sản xuất màng mỏng, đặc biệt là trong ngành năng lượng

tái tạo.

Trong bối cảnh hiện nay, khi nhu cầu sử dụng năng lượng tái tạo ngày càng tăng cao, việc phát triển các công nghệ chế tạo tế bào quang điện hiệu quả và tiết kiệm chi phí là vô cùng cần thiết. Phương pháp blade coating không chỉ giúp tạo ra các màng quang điện perovskite có hiệu suất cao mà còn mở ra triển vọng sản xuất các tế bào quang điện quy mô lớn với chi phí hợp lý, góp phần quan trọng vào việc phát triển nguồn năng lượng sạch cho tương lai.

2.1.1 Các phương pháp được sử dụng để chế tạo vật liệu nano

Cách tiếp cận "từ trên xuống"

Phương pháp nghiên cơ học hoặc phân tán chất lỏng Nghiên cơ học và phân tán chất lỏng là hai phương pháp điển hình của công nghệ nano "từ trên xuống" (top-down). Ban đầu, các phương pháp này chủ yếu được sử dụng để thu nhận bột kim loại với kích thước hạt cỡ micron. Tuy nhiên, khi chuyển sang cỡ hạt nano, hiệu quả của chúng suy giảm đáng kể do chi phí năng lượng để vượt qua sức căng bề mặt trong quá trình hình thành bề mặt hạt nano trở nên rất lớn.

Ngoài ra, phương pháp nghiên cơ học khó có thể thu nhận các hạt nano có phô phân bố kích thước hẹp. Do đó, ngày nay phương pháp này khó có thể cạnh tranh với các phương pháp hóa-lý "từ dưới lên" (bottom-up), nơi hạt nano được tạo ra từ các nguyên tử hoặc phân tử riêng lẻ [12].

Phương pháp lắng đọng chân không vật lý (Physical Vapor Deposition - PVD) Công nghệ PVD gồm ba giai đoạn chính: hóa hơi vật liệu, vận chuyển chất hơi đến bề mặt để và ngưng tụ. Vật liệu được hóa hơi ở nhiệt độ từ 500 - 1200°C, sau đó ngưng tụ trên bề mặt để lạnh tạo thành bột nano.

Để giảm động năng của các nguyên tử hóa hơi và tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình ngưng tụ, phương pháp này được thực hiện trong môi trường khí trơ như He hoặc Ar, dưới áp suất không cao (khoảng 10^3 Pa) [13].

Phương pháp lắng đọng chân không hóa học (Chemical Vapor Deposition - CVD) Trong phương pháp CVD, tiền chất được hóa hơi, sau đó các nguyên tử hóa hơi khuếch tán đến bề mặt để đã được đốt nóng để phản ứng với

các nguyên tử hóa hơi của chất khác, tạo ra sản phẩm rắn dưới dạng hạt nano. Các thành phần bay hơi không tham gia được loại bỏ ra ngoài [13].

Phương pháp laze bóc lớp (Laser Ablation) Phương pháp này sử dụng xung laser để bóc hơi vật liệu, sau đó vật liệu được ngưng tụ tạo thành hạt nano. Khác với PVD, quá trình laze bóc lớp được thực hiện với bia rắn ngâm trong dung dịch. Các hạt nano thu được dưới dạng dung dịch keo, cho phép tiếp tục chiếu laser nhiều lần để giảm kích thước hạt [14].

Cách tiếp cận "từ dưới lên"

Phương pháp "từ dưới lên" bao gồm việc hình thành vật liệu nano từ các nguyên tử hoặc ion riêng lẻ. Đây là phương pháp phát triển rất mạnh mẽ do tính linh hoạt và chất lượng sản phẩm cao. Phần lớn vật liệu nano ứng dụng trong nông nghiệp hiện nay được chế tạo bằng phương pháp này.

Phương pháp "từ dưới lên" có thể là phương pháp vật lý, phương pháp hóa học hoặc kết hợp cả hai.

Phương pháp vật lý Phương pháp vật lý tạo vật liệu nano từ nguyên tử bằng các kỹ thuật chuyển pha. Nguyên tử được hình thành thông qua các quá trình như bốc bay nhiệt (đốt, phún xạ, phóng điện hồ quang).

Quá trình chuyển pha: vật liệu được nung nóng rồi làm nguội nhanh để thu được trạng thái vô định hình; sau đó tiếp tục xử lý nhiệt để chuyển pha từ vô định hình sang tinh thể (phương pháp nguội nhanh).

Phương pháp hóa học Phương pháp hóa học tạo vật liệu nano từ các ion. Phương pháp này rất đa dạng, tùy thuộc vào vật liệu cụ thể mà lựa chọn kỹ thuật phù hợp.

Có hai nhóm chính:

- Phương pháp tạo từ pha lỏng: khử hóa học, kết tủa, sol-gel, ...
- Phương pháp tạo từ pha khí: nhiệt phân, khử hóa học, ...

Phương pháp hóa học cho phép tạo ra các hạt nano, dây nano, ống nano, màng nano, bột nano với kích thước và hình dạng có thể kiểm soát.

Phương pháp kết hợp Phương pháp kết hợp sử dụng cả nguyên lý vật lý và hóa học, ví dụ như: điện phân, ngưng tụ từ pha khí, kết tủa có hỗ trợ năng lượng sóng vi ba hoặc siêu âm. Phương pháp này có thể tạo ra các hạt nano, dây nano, ống nano, màng nano, bột nano.

Đối với các nước đang phát triển, do hạn chế về trang thiết bị vật lý đắt tiền, các nhà khoa học thường ưu tiên các phương pháp hóa học "từ dưới lên" để chế tạo vật liệu nano phục vụ trong nông nghiệp.

Chế tạo vật liệu nano bằng phương pháp hóa học "từ dưới lên"

Phương pháp sol-gel Phương pháp sol-gel dựa trên các phản ứng đa trùng ngưng từ các chất vô cơ, bao gồm bốn giai đoạn chính: thủy phân, đa trùng ngưng, sấy và phân hủy nhiệt.

Ban đầu, tiền chất kim loại hoặc alkoxide được thủy phân với nước hoặc cồn. Tiếp theo, quá trình đa trùng ngưng xảy ra, giải phóng nước và cồn, tạo ra polymer vô cơ lỏng xuống dưới dạng kết tủa. Độ phân tán của kết tủa có thể kiểm soát thông qua thành phần dung dịch, pH và nhiệt độ. Cuối cùng, sản phẩm được sấy khô và phân hủy nhiệt để loại bỏ các thành phần hữu cơ còn sót lại. Phương pháp này chủ yếu dùng để chế tạo các nano oxit kim loại [15].

Phương pháp kết tủa hóa học Phương pháp kết tủa hóa học được thực hiện trong dung dịch nước, cho phép tạo ra các hạt nano đa lớp bằng cách kiểm soát nồng độ ion và độ axit của môi trường phản ứng.

Phương pháp này cho phép thay đổi độ dày của lớp nano nhất định (ví dụ: lớp HgS bên trong lớp CdS) bằng cách hòa tan và tái kết tủa ion Cd^{2+} , từ đó thu nhận các hạt nano có kích thước hẹp, phù hợp để chế tạo các cảm biến ứng dụng trong nông nghiệp [16].

Phương pháp ngưng tụ plasma hóa học Phương pháp này sử dụng dòng khí nóng để khử kim loại từ hợp chất. Trong buồng plasmatron, plasma được tạo ra bởi dòng điện hồ quang cường độ lớn, với nhiệt độ từ 4000 - 10000°C. Một dòng

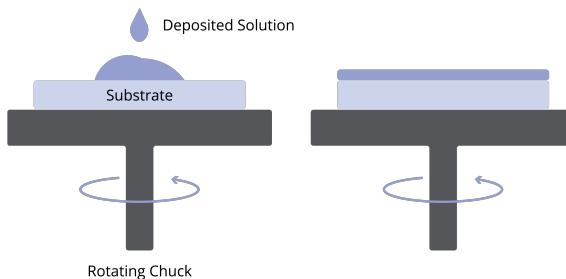
khí khử (như hydro hoặc khí đốt tự nhiên) được đưa vào buồng để thực hiện phản ứng khử.

Sau khi khử, tiền chất chuyển thành hạt nano kim loại dạng ngưng tụ. Phương pháp này đặc biệt hiệu quả để thu nhận các hạt nano kim loại có nhiệt độ nóng chảy cao như Ni, Mo, W [16].

2.1.2 Các phương pháp phủ màng mỏng

Spin Coating

Spin coating là kỹ thuật phổ biến trong phòng thí nghiệm, trong đó dung dịch được đặt lên bề mặt chất nền và sau đó quay với tốc độ cao để tạo ra hiệu ứng ly tâm loại bỏ dung môi dư thừa. Phương pháp này cho phép tạo ra các lớp màng mỏng đồng nhất với độ dày có thể kiểm soát bằng tốc độ quay và thời gian quay. Tuy nhiên, spin coating gặp khó khăn khi cần mở rộng quy mô sản xuất do lãng phí dung dịch và giới hạn trên kích thước của chất nền [6, 17].



Hình 2.2: Phương pháp spin coating

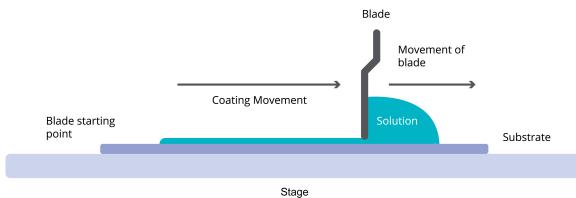
Doctor Blade Coating

Doctor blade coating (hay blade coating) là phương pháp sơn phủ màng mỏng bằng cách di chuyển một lưỡi dao trên bề mặt để để trải đều dung dịch phủ. Giữa lưỡi dao và bề mặt để có một khoảng cách nhỏ, và độ dày của màng ướt sau khi phủ sẽ phụ thuộc vào khoảng cách này, cùng với đặc tính nhớt – đàn hồi của dung dịch và tốc độ di chuyển của lưỡi dao.

Phương pháp blade coating được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu như điện tử màng mỏng, công nghệ pin, gốm sứ, và sơn phủ. Phương pháp này đặc biệt phù hợp với các ứng dụng sử dụng dung dịch có độ nhớt cao và yêu

cầu lớp màng có độ dày lớn hơn.

Blade coating thường được sử dụng như một phương pháp tạo mẫu (prototyping) cho kỹ thuật slot-die coating, vì mặc dù độ chính xác thấp hơn, nhưng nó dễ thực hiện và tiết kiệm hơn trong giai đoạn nghiên cứu ban đầu. [4, 6].



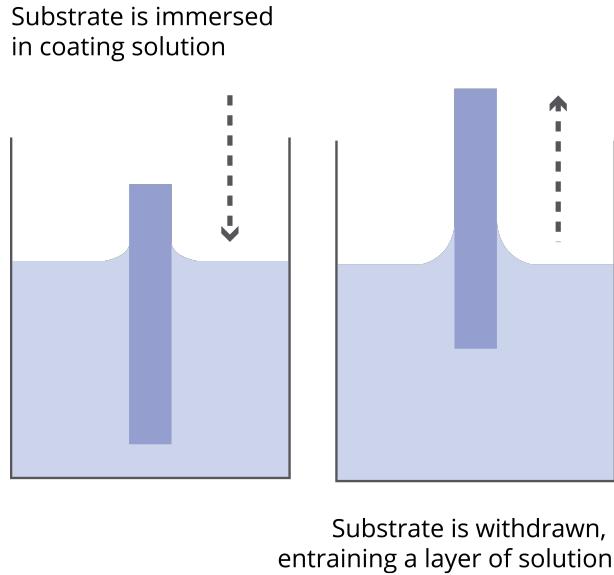
Hình 2.3: Phương pháp blade coating

Dip Coating

Phủ nhúng là một kỹ thuật đơn giản và hiệu quả thường được sử dụng trong sản xuất ở nhiều ngành công nghiệp khác nhau. Trong quá trình nghiên cứu và phát triển, nó đã trở thành một phương pháp phủ quan trọng để chế tạo màng mỏng bằng máy phủ nhúng chuyên dụng. Khi quy trình được tối ưu hóa, có thể sử dụng phủ nhúng để sản xuất màng có độ đồng đều cao. Quan trọng là các yếu tố chính như độ dày màng có thể dễ dàng được kiểm soát.

Một lợi thế của lớp phủ nhúng so với các kỹ thuật xử lý khác là tính đơn giản trong thiết kế. Chi phí thiết lập và bảo trì thấp, có thể tạo ra màng có độ đồng đều cực cao và độ nhám nanomet.

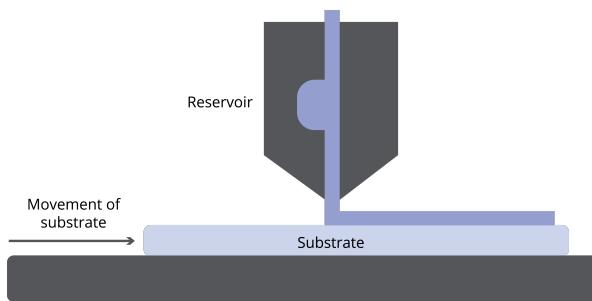
Phủ nhúng là một kỹ thuật tương đối đơn giản. Tuy nhiên, để đạt được khả năng kiểm soát tối đa khi phủ một chất nền, điều quan trọng là phải nhận thức được những gì có thể ảnh hưởng đến kết quả của bạn. Để tạo ra các màng chất lượng cao, các thông số như tốc độ rút phải được tối ưu hóa. Các yếu tố khí quyển bao gồm nhiệt độ, luồng không khí và độ sạch cũng đóng vai trò lớn trong chất lượng màng và phải được theo dõi chặt chẽ trong quá trình phủ nhúng [18].



Hình 2.4: Phương pháp dip coating

Slot-Die Coating

Slot-die coating là kỹ thuật tiên tiến cho sản xuất quy mô lớn, sử dụng một khe hở để đẩy dung dịch trực tiếp lên chất nền di chuyển. Phương pháp này cho phép tạo ra các màng mỏng liên tục với độ đồng nhất cao và khả năng kiểm soát tốt độ dày của lớp màng. Slot-die coating được xem là một giải pháp lý tưởng cho sản xuất điện tử hữu cơ, pin mặt trời và các ứng dụng yêu cầu sản xuất liên tục[6].



Hình 2.5: Phương pháp slot die coating

Bar Coating

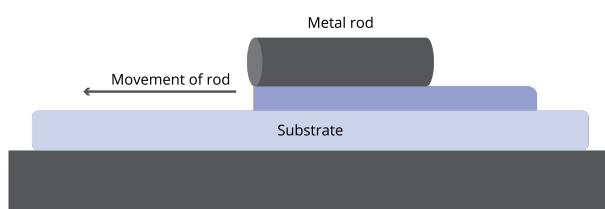
Phương pháp bar coating (sơn phủ bằng thanh lăn) có nguyên lý hoạt động rất giống với phương pháp blade coating (sơn phủ bằng lưỡi dao). Trong kỹ thuật này, dung dịch được trải đều lên bề mặt để thông qua một thanh lăn hình trụ, quanh

đó được quấn dây kim loại theo dạng xoắn ốc.

Khoảng cách giữa dây kim loại và bề mặt đế sẽ quyết định lượng dung dịch di qua, từ đó kiểm soát độ dày của lớp màng. Quá trình sơn phủ có thể được tối ưu bằng cách điều chỉnh chiều cao và áp lực của thanh lăn, tốc độ lăn, cũng như nồng độ và độ nhớt của dung dịch phủ.

Phương pháp này có thể được thực hiện bằng cách thủ công (kéo thanh lăn bằng tay qua bề mặt đế) hoặc bằng máy sơn phủ tự động, chẳng hạn như Ossila Bar Coater.

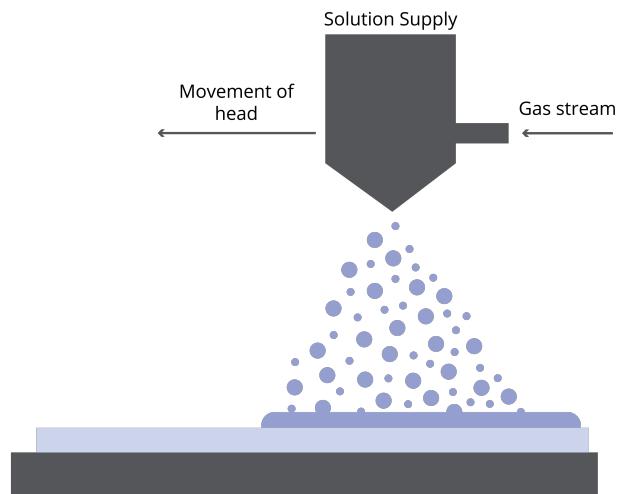
Mặc dù bar coating phù hợp với các ứng dụng nghiên cứu màng mỏng, nhưng đây là kỹ thuật ít được sử dụng phổ biến. Tuy nhiên, do có nhiều điểm tương đồng với blade coating, phương pháp này vẫn được ứng dụng trong các lĩnh vực nghiên cứu vật liệu và màng mỏng tương tự.[6].



Hình 2.6: phương pháp bar coating

Spray Coating

Spray coating sử dụng áp suất khí nén để phun dung dịch lên chất nền, cho phép phủ các bề mặt không phẳng và đạt được lớp màng đồng nhất. Ưu điểm của phương pháp này là chi phí thấp và khả năng phủ rộng, nhưng kiểm soát độ dày của lớp màng có thể không cao như các kỹ thuật khác[6].



Hình 2.7: phương pháp spray coating

So sánh và đánh giá

Bảng 2.1 tổng hợp các tiêu chí chính khi so sánh các phương pháp phủ màng mỏng:

Bảng 2.1: So sánh các kỹ thuật solution processing trong sơn phủ màng mỏng

Thông số	Spin	Dip	Slot Die	Blade	Bar	Spray
	Coating	Coating	Coating	Coating	Coating	Coating
Chi phí tương đối	Trung bình	Thấp	Cao	Trung bình	Trung bình	Cao
Khả năng mở rộng	Không thể	Hạn chế	Có thể mở rộng	Có thể mở rộng	Hạn chế	Có thể mở rộng
Độ phức tạp của quá trình	Thấp	Thấp	Cao	Trung bình	Thấp	Trung bình
Đồng nhất của màng	Cao	Cao	Cao	Trung bình	Trung bình	Thấp
Độ dày đạt được	Nanomet	Nanomet	Nanomet	Hàng chục µm	~ 10 µm - µm	Nanomet
Tạo mẫu nội tại	Không có thể	Gradient + mẫu 2D đơn giản	Gradient	Gradient có thể	Không	Không
Bề mặt có thể tráng	Bề mặt nhỏ, phẳng	Hình dạng cứng, phức tạp	Linh hoạt hoặc cứng	Linh hoạt hoặc cứng	Linh hoạt, hoặc cong	Linh hoạt, hoặc phẳng
Roll-to-Roll	Không	Có	Có	Có	Có	Có
Lãng phí dung dịch	Cao	Cao	Thấp	Trung bình	Trung bình	Trung bình
Thời gian sấy khô	Nhanh (với buồng sấy)	Chậm (với nung)	Chậm (với nung)	Chậm (với nung)	Chậm (với nung)	Nhanh
Tốc độ sơn phủ	Rất chậm	Chậm	Nhanh	Nhanh	Chậm	Nhanh

Từ bảng 2.1, có thể nhận định rằng trong các kỹ thuật solution processing, với các dung dịch có độ nhớt cao phương pháp **Doctor Blade Coating** mang lại nhiều ưu điểm vượt trội, đặc biệt là về khả năng kiểm soát độ dày của lớp màng mỏng và đồng nhất của màng [4]. Cụ thể:

- **Đồng nhất và kiểm soát độ dày:** Doctor Blade Coating cho phép tạo ra các lớp màng mỏng có độ đồng nhất cao với khả năng kiểm soát độ dày tốt hơn so với các phương pháp như spin coating hoặc inkjet printing. Điều này rất quan trọng đối với các ứng dụng yêu cầu hiệu suất cao như nanogenerator, nơi lớp màng đồng nhất góp phần tối ưu hóa quá trình thu hoạch năng lượng [19, 20].
- **Khả năng mở rộng sản xuất:** So với spin coating, Doctor Blade Coating được áp dụng hiệu quả trong các quy trình sản xuất công nghiệp, đặc biệt là trong các hệ thống roll-to-roll. Phương pháp này giúp giảm thiểu lãng phí dung dịch và dễ dàng kiểm soát quy trình sản xuất với chi phí đầu tư hợp lý.
- **Tính ổn định và hiệu quả kinh tế:** Với khả năng kiểm soát chính xác các thông số vận hành (như tốc độ di chuyển của dao tráng, độ nhớt của dung dịch), phương pháp này không chỉ đảm bảo chất lượng lớp màng mà còn tối ưu hóa chi phí sản xuất, điều này rất phù hợp với yêu cầu của dự án nghiên cứu trong khóa luận.

Những yếu tố trên đã tạo nền tảng cho việc lựa chọn phương pháp Doctor Blade Coating trong nghiên cứu này, nhằm phát triển một quy trình phủ màng mỏng ổn định, hiệu quả và dễ mở rộng, từ đó nâng cao hiệu suất của các nanogenerator và đáp ứng các yêu cầu khắt khe của các ứng dụng IoT hiện đại.

2.2 Nanogenerator và ứng dụng Thực tiễn

2.2.1 Định nghĩa và nguyên lý hoạt động của Nanogenerator

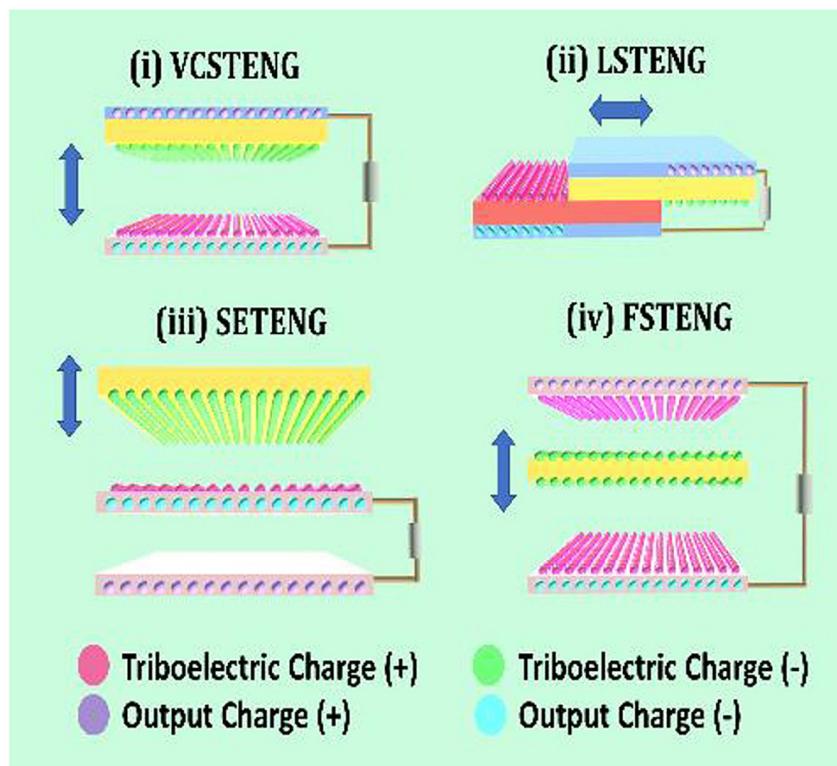
Nanogenerator (NG) là một thiết bị thu năng lượng từ môi trường, chuyển đổi năng lượng cơ học như rung động, chuyển động hay gió thành năng lượng điện thông qua hiệu ứng piezoelectric hoặc triboelectric [21]. Nguyên lý hoạt động của nanogenerator dựa trên khả năng tạo ra điện áp khi vật liệu bị biến dạng cơ học, từ đó khai thác được năng lượng từ các chuyển động cơ học nhỏ nhất trong tự nhiên [22].

Trong đó, một hướng phát triển nổi bật và phổ biến hiện nay là Triboelectric Nanogenerators (TENGs) – thiết bị sử dụng hiệu ứng ma sát điện (triboelectric

effect) kết hợp với cảm ứng tĩnh điện (electrostatic induction) để tạo ra dòng điện. TENGs đặc biệt hiệu quả trong việc chuyển đổi các chuyển động cơ học có biên độ nhỏ, năng lượng thấp thành năng lượng điện, với nhiều ứng dụng trong cảm biến, thiết bị y tế và thu năng lượng môi trường.

Dựa trên phương thức tiếp xúc và chuyển động giữa các lớp vật liệu, TENGs được phân loại thành bốn cấu trúc hoạt động chính [23]:

1. **Contact-separation mode (Tiếp xúc-tách rời):** Hai lớp vật liệu tiếp xúc rồi tách ra theo phương vuông góc, tạo ra sự tích điện và chênh lệch điện áp.
2. **Lateral-sliding mode (Trượt ngang):** Hai lớp vật liệu trượt tương đối theo phương ngang, làm thay đổi diện tích tiếp xúc và sinh ra dòng điện.
3. **Single-electrode mode (Một điện cực):** Sử dụng một vật liệu cố định và một điện cực duy nhất để thu nhận tín hiệu điện khi có chuyển động.
4. **Freestanding triboelectric-layer mode (Lớp ma sát tự do):** Vật liệu ma sát có thể di chuyển tự do giữa hai điện cực tĩnh.

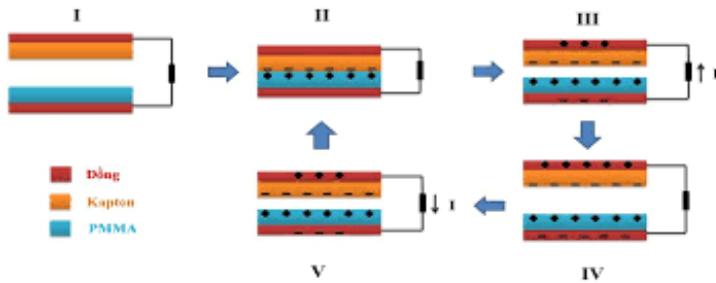


Hình 2.8: Các cấu trúc cơ bản của máy phát điện ma sát nanogenerator (TENGs).

Trong nghiên cứu này, cấu trúc được lựa chọn là cấu trúc tiếp xúc – tách rời (contact-separation mode) – một trong bốn cấu trúc hoạt động cơ bản của TENG. Cấu trúc này có những ưu điểm nổi bật như:

- Dễ dàng quay trở lại trạng thái ban đầu sau khi biến dạng nhờ đặc tính đàn hồi của vật liệu;
- Tăng số lần tiếp xúc và tách rời trong mỗi chu kỳ dao động, từ đó cải thiện hiệu suất chuyển đổi năng lượng;
- Phù hợp với các ứng dụng có dao động nhỏ, như rung động môi trường hoặc chuyển động cơ thể.

Trong nghiên cứu, cấu trúc này được chế tạo bằng cách sử dụng hai lớp vật liệu có tính chất triboelectric đối lập, cụ thể là PVA (polyvinyl alcohol) và PVC (polyvinyl chloride), tạo nên hiệu ứng tích điện rõ rệt khi bị biến dạng và tiếp xúc lặp lại.



Hình 2.9: Minh họa cấu trúc tiếp xúc – tách rời của máy phát điện ma sát nano (TENG).

2.2.2 Phương pháp Blade Coating trong chế tạo Nanogenerator

Blade coating (hay còn gọi là Doctor Blade Coating) là kỹ thuật sơn phủ màng mỏng bằng cách sử dụng một lưỡi dao để kéo dung dịch tiền chất trên bề mặt chất nền. Phương pháp này cho phép tạo ra các lớp màng mỏng có độ đồng nhất cao và kiểm soát chính xác độ dày của màng, điều này đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator [4].

Việc áp dụng blade coating giúp:

- **Kiểm soát độ dày và đồng nhất:** Lớp màng được tạo ra có cấu trúc mịn và đồng đều, làm tăng khả năng chuyển đổi năng lượng khi vật liệu bị biến dạng.

- **Khả năng mở rộng sản xuất:** Phương pháp này thích hợp cho quy trình sản xuất liên tục, đặc biệt là trong các hệ thống roll-to-roll, giúp giảm thiểu lãng phí dung dịch và tối ưu chi phí sản xuất.

2.2.3 Các vật liệu sử dụng trong Nanogenerator

Trong quá trình chế tạo nanogenerator, một số vật liệu piezoelectric và triboelectric được sử dụng phổ biến bao gồm:

- **PVDF (Polyvinylidene Fluoride):** Một polymer áp điện có khả năng chuyển đổi năng lượng tốt và tính linh hoạt cao.
- **BaTiO₃ (Barium Titanate):** Vật liệu gồm với hiệu suất piezoelectric cao.
- **ZnO (Zinc Oxide):** Được sử dụng dưới dạng nanowire, giúp tăng diện tích tiếp xúc và hiệu quả chuyển đổi.

Blade coating cho phép điều chỉnh các tham số như nồng độ dung dịch, tốc độ di chuyển của dao và điều kiện bay hơi của dung môi, từ đó tối ưu hóa cấu trúc màng vật liệu, góp phần nâng cao hiệu suất của nanogenerator.

Tham số quy trình và tối ưu hóa

Blade coating phụ thuộc vào các tham số cơ bản sau:

- **Độ nhớt dung dịch (η):** Điều chỉnh bằng nồng độ vật liệu, ảnh hưởng tới độ dày và tính đồng đều của màng.
- **Chiều cao lưỡi dao (h):** Xác định độ dày màng ướt theo công thức $h = \frac{Q}{v \cdot w}$, trong đó Q là lưu lượng, v tốc độ phủ, w chiều rộng nền [8].
- **Tốc độ phủ (v):** Tốc độ dao động lưỡi dao/di chuyển nền; tốc độ thấp cho màng dày, tốc độ cao cho màng mỏng và mịn.
- **Điều kiện môi trường:** Nhiệt độ và độ ẩm ảnh hưởng đến tốc độ bay hơi dung môi, hình thành cấu trúc tinh thể của màng.

2.2.4 Ứng dụng thực tiễn của Nanogenerator chế tạo bằng Blade Coating

Các nanogenerator được chế tạo bằng phương pháp blade coating có thể được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như:

- **Thu Năng Lượng Từ Chuyển Động:** Thiết bị có thể thu năng lượng từ các nguồn cơ học như rung động của máy móc, chuyển động của con người, gió hoặc sóng biển, phục vụ cho các hệ thống cảm biến không dây và IoT [24].
- **Cảm Biến Thông Minh:** Tích hợp nanogenerator vào các cảm biến áp suất, gia tốc và thiết bị đeo giúp các cảm biến tự cấp nguồn, giảm sự phụ thuộc vào nguồn điện truyền thống.
- **Ứng dụng Y Tế:** Các thiết bị theo dõi sức khỏe đeo trên cơ thể có thể sử dụng nanogenerator để thu năng lượng từ chuyển động tự nhiên của cơ thể, từ đó kéo dài thời gian hoạt động mà không cần sạc pin.
- **Hệ Thống Năng Lượng Tái Tạo:** Nanogenerator có thể tích hợp vào các hệ thống thu năng lượng nhỏ gọn như đèn LED ngoài trời hoặc các thiết bị giám sát môi trường, giúp tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng từ các nguồn tái tạo [3].

Bảng 2.2: Tổng hợp các ứng dụng và ưu/nhược điểm của Blade Coating trong nanogenerator

Ứng dụng	Ưu điểm	Hạn chế
Thu năng lượng từ chuyển động	Kiểm soát độ dày tốt, dễ mở rộng quy mô	Cần tối ưu ghép mạch
Cảm biến tự cấp nguồn	Tiết kiệm vật liệu, tích hợp IoT dễ dàng	Độ bền còn phụ thuộc vật liệu
Ứng dụng y tế	Thiết kế linh hoạt, nhẹ	Yêu cầu tiệt trùng bề mặt
Hệ thống năng lượng tái tạo nhỏ	Chi phí thấp, tự động hóa	Hiệu suất thay đổi theo môi trường

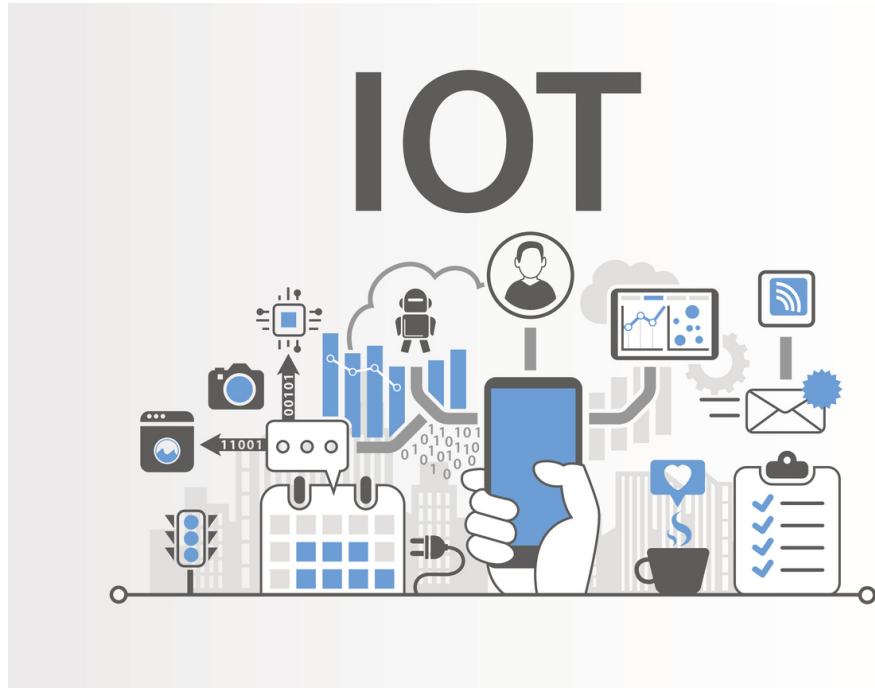
2.2.5 Kết Luận

Việc ứng dụng blade coating trong chế tạo nanogenerator mang lại nhiều lợi ích vượt trội, đặc biệt là về kiểm soát độ dày và đồng nhất của lớp màng mỏng. Điều này không chỉ giúp cải thiện hiệu suất chuyển đổi năng lượng mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho sản xuất công nghiệp với chi phí hợp lý. Nghiên cứu này mở ra hướng đi mới trong việc tối ưu hóa quá trình phủ màng mỏng, từ đó góp phần thúc đẩy sự phát triển của các hệ thống thu năng lượng tự cấp nguồn và các ứng dụng IoT hiện đại.

2.3 Tổng quan về công nghệ IoT

2.3.1 Khái niệm IOT

Internet of Things (IoT) là thuật ngữ dùng để chỉ các đối tượng có thể được nhận biết cũng như sự tồn tại của chúng trong một kiến trúc mang tính kết nối. Đây là một viễn cảnh trong đó mọi vật, mọi con vật hoặc con người được cung cấp các định danh và khả năng tự động truyền tải dữ liệu qua một mạng lưới mà không cần sự tương tác giữa con người-với-con người hoặc con người-với-máy tính. IoT tiến hoá từ sự hội tụ của các công nghệ không dây, hệ thống vi cơ điện tử (MEMS) và Internet. Cụm từ này được đưa ra bởi Kevin Ashton vào năm 1999. Ông là một nhà khoa học đã sáng lập ra Trung tâm Auto-ID ở đại học MIT



Hình 2.10: “Internet of Things”

Internet of Things (IoT) là một mô hình công nghệ mang tính biến đổi, kết nối các vật dụng và thiết bị hàng ngày với Internet, cho phép chúng thu thập, trao đổi và phân tích dữ liệu theo thời gian thực. Về cốt lõi, IoT đại diện cho sự hội tụ của thế giới vật lý và kỹ thuật số, nơi các cảm biến, bộ truyền động và công nghệ truyền thông được nhúng vào các vật thể, cho phép chúng tương tác với nhau và với con người. Mạng thiết bị được kết nối này trải rộng trên nhiều ứng dụng, từ nhà thông minh và thiết bị đeo cho đến tự động hóa công nghiệp và thành phố thông minh.[25]

Công nghệ IoT dựa vào một số thành phần chính để hoạt động hiệu quả. Đầu tiên, các cảm biến và bộ truyền động đóng vai trò là lớp nền tảng, thu thập dữ liệu từ môi trường (ví dụ: nhiệt độ, chuyển động hoặc ánh sáng) và thực hiện các hành động dựa trên dữ liệu đó. Những thiết bị này thường nhỏ, chi phí thấp và tiết kiệm năng lượng, khiến chúng trở nên lý tưởng để triển khai rộng rãi. Thứ hai, kết nối là điều cần thiết để truyền dữ liệu giữa các thiết bị và hệ thống tập trung. IoT tận dụng nhiều giao thức truyền thông khác nhau, bao gồm Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, mạng di động (4G/5G) và Mạng diện rộng công suất thấp (LPWAN), để đảm bảo truyền dữ liệu liên mạch trên nhiều môi trường khác nhau. Thứ ba, xử lý và phân tích dữ liệu đóng một vai trò quan trọng trong việc rút ra những hiểu

biết có ý nghĩa từ lượng dữ liệu khổng lồ do các thiết bị IoT tạo ra. Điện toán đám mây và điện toán biên thường được sử dụng để xử lý và lưu trữ dữ liệu, trong đó điện toán biên cho phép đưa ra quyết định nhanh hơn bằng cách xử lý dữ liệu gần nguồn hơn. Cuối cùng, giao diện người dùng cho phép con người tương tác với các hệ thống IoT, thường thông qua các ứng dụng di động, bảng điều khiển web hoặc trợ lý giọng nói.

Các ứng dụng của IoT rất rộng lớn và tiếp tục mở rộng trong các ngành công nghiệp. Trong nhà thông minh, IoT cho phép tự động hóa hệ thống chiếu sáng, sưởi ấm, hệ thống an ninh và thiết bị, nâng cao sự tiện lợi và tiết kiệm năng lượng. Trong chăm sóc sức khỏe, các thiết bị đeo và hệ thống giám sát từ xa giúp bệnh nhân và nhà cung cấp dịch vụ chăm sóc sức khỏe theo dõi các dấu hiệu quan trọng và quản lý các tình trạng mãn tính hiệu quả hơn. Trong nông nghiệp, các kỹ thuật canh tác chính xác dựa trên IoT sẽ tối ưu hóa việc tưới tiêu, bón phân và giám sát cây trồng, giúp tăng năng suất và bảo tồn tài nguyên. Trong môi trường công nghiệp, Internet vạn vật công nghiệp (IoT) hỗ trợ bảo trì dự đoán, tối ưu hóa chuỗi cung ứng và giám sát máy móc theo thời gian thực, cải thiện năng suất và giảm thời gian ngừng hoạt động. Ngoài ra, IoT đóng vai trò then chốt trong việc phát triển các thành phố thông minh, nơi cơ sở hạ tầng được kết nối, như đèn giao thông, hệ thống quản lý chất thải và lưới năng lượng, nâng cao cuộc sống đô thị bằng cách giảm tắc nghẽn, cải thiện tính bền vững và đảm bảo an toàn công cộng.



Hình 2.11: Ứng dụng nhà thông minh với IOT

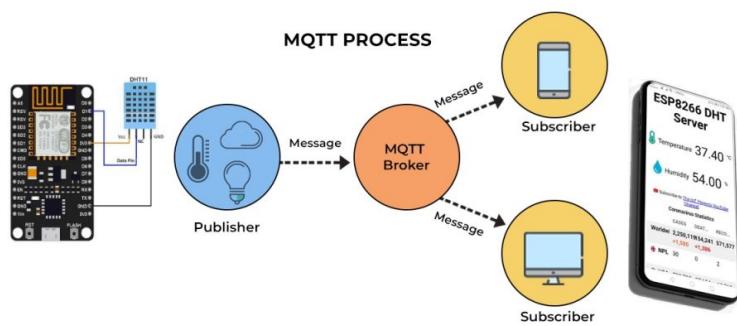
Mặc dù có tiềm năng to lớn nhưng công nghệ IoT cũng phải đối mặt với một số thách thức. Bảo mật và quyền riêng tư là mối quan tâm lớn vì sự phổ biến của các thiết bị được kết nối làm tăng nguy cơ tấn công mạng và vi phạm dữ liệu. Đảm bảo các cơ chế mã hóa, xác thực và kiểm soát truy cập mạnh mẽ là rất quan trọng để bảo vệ hệ sinh thái IoT. Khả năng tương tác là một thách thức khác, vì việc thiếu các giao thức chuẩn hóa có thể cản trở việc giao tiếp liền mạch giữa các thiết bị từ các nhà sản xuất khác nhau. Ngoài ra, khả năng mở rộng của hệ thống IoT phải được giải quyết để phù hợp với sự tăng trưởng theo cấp số nhân của các thiết bị được kết nối, dự kiến sẽ đạt tới hàng chục tỷ trong những năm tới. Cuối cùng,

mức tiêu thụ năng lượng của các thiết bị IoT, đặc biệt là các thiết bị chạy bằng pin, đặt ra thách thức về tính bền vững, thúc đẩy nhu cầu về các thiết kế tiết kiệm năng lượng và giải pháp năng lượng tái tạo.

2.3.2 Cơ sở kỹ thuật của IoT

Trong IoT, các thiết bị phải giao tiếp được với nhau (D2D¹). Dữ liệu sau đó phải được thu thập và gửi tới máy chủ (D2S²). Máy chủ cũng có thể chia sẻ dữ liệu với nhau (S2S³), hoặc cung cấp lại cho các thiết bị để phân tích các chương trình, hoặc cho người dùng. Các giao thức có thể dùng trong IoT là:

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): Giao thức nhẹ dựa trên mô hình publish/subscribe, rất thích hợp cho các thiết bị có tài nguyên hạn chế và môi trường mạng không ổn định.



Hình 2.12: Ví dụ về mqtt

CoAP (Constrained Application Protocol): Được thiết kế cho các thiết bị IoT có tài nguyên hạn chế, hoạt động trên giao thức UDP và hỗ trợ các thao tác cơ bản (GET, POST, PUT, DELETE) tương tự HTTP nhưng tối ưu hóa cho môi trường nhạy cảm về tài nguyên.

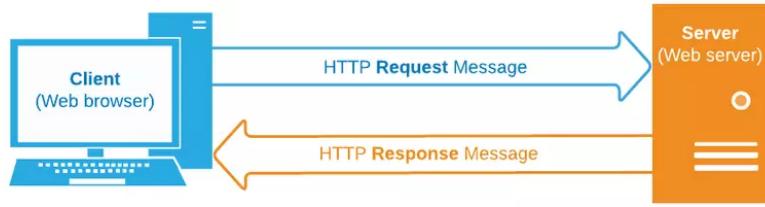
HTTP/HTTPS: Mặc dù nặng hơn so với MQTT hay CoAP, HTTP/HTTPS vẫn được sử dụng rộng rãi nhờ tính tương thích cao và khả năng bảo mật (đặc biệt với

¹Direct-to-Device

²Direct-to-Server

³Server-to-Server

HTTPS).

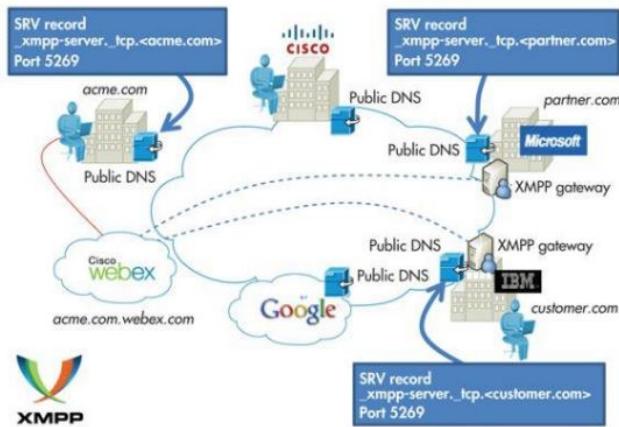


Hình 2.13: Ví dụ về http

AMQP (Advanced Message Queuing Protocol): Được sử dụng trong các hệ thống doanh nghiệp, đảm bảo độ tin cậy cao khi truyền tải tin nhắn theo mô hình publish/subscribe.

DDS (Data Distribution Service): Giao thức thời gian thực, thích hợp cho các ứng dụng yêu cầu độ trễ thấp và hiệu suất cao.

XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol): Ban đầu được phát triển cho ứng dụng nhắn tin, XMPP cũng được ứng dụng trong IoT nhờ tính mở và khả năng mở rộng.



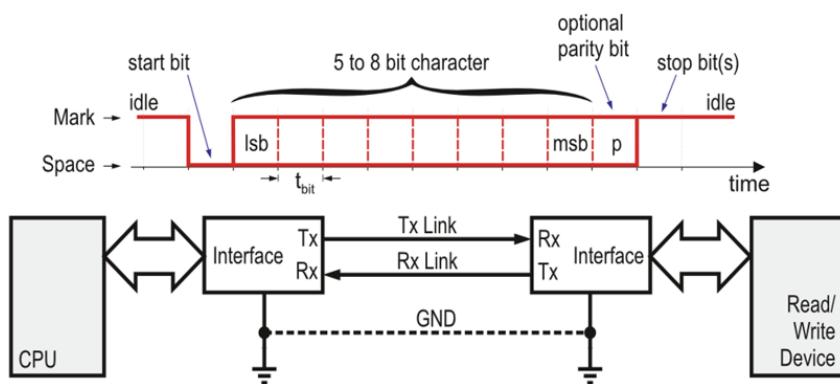
Hình 2.14: Ví dụ về xmpp

2.4 Giao tiếp UART giữa ESP và Arduino

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) là một giao thức truyền thông nối tiếp bất đồng bộ được sử dụng phổ biến trong các hệ thống nhúng. Dưới đây là các đặc điểm và ứng dụng của giao tiếp UART:

Đặc điểm của giao tiếp UART

- **Bất đồng bộ:** Dữ liệu được truyền đi không cần đồng bộ hóa bằng tín hiệu đồng hồ chung. Các bên gửi và nhận cần cấu hình cùng tốc độ truyền (baud rate) để đảm bảo dữ liệu được giải mã chính xác.
- **Truyền nối tiếp:** Dữ liệu được gửi từng bit qua một kênh truyền với hai chân chính: TX (truyền) và RX (nhận).
- **Đơn giản và hiệu quả:** UART là giao thức dễ triển khai, phù hợp cho giao tiếp giữa các thiết bị có tài nguyên hạn chế như ESP và Arduino.



Hình 2.15: Giao tiếp UART

Ứng dụng của giao tiếp UART trong hệ thống ESP-Arduino

Trong nhiều dự án IoT, giao tiếp UART giữa ESP và Arduino được sử dụng để:

- Truyền dữ liệu cảm biến từ Arduino lên ESP để xử lý và chuyển tiếp dữ liệu lên server hoặc ứng dụng đám mây.
- Gửi lệnh điều khiển từ ESP về Arduino nhằm điều khiển các module ngoại vi hoặc các thiết bị điều khiển như động cơ.
- Đảm bảo tốc độ truyền phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu giao tiếp dữ liệu liên tục mà không gây quá tải cho các thiết bị.

Kết luận Chương 2

Trong chương này, các kiến thức về phương pháp sơn phủ màng mỏng bằng doctor blade coater đã được nhắc lại cùng với các phương pháp phủ màng mỏng khác. Trong đó em đã chỉ ra các ưu nhược điểm của từng phương pháp và cho ra kết luận về phương pháp doctor blade. Kết hợp với các kiến thức về IOT, ở chương tiếp theo em sẽ nói về thiết kế và chế tạo doctor blade coater kết hợp với hệ thống IOT.

Chương 3

Thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng

Chương này trình bày chi tiết quá trình thiết kế và chế tạo hệ thống máy sơn phủ màng mỏng sử dụng phương pháp Doctor Blade Coating. Mục tiêu chính là phát triển một hệ thống sơn phủ có khả năng kiểm soát chính xác độ dày và độ đồng nhất của lớp màng, từ đó nâng cao hiệu suất hoạt động của các thiết bị sử dụng màng mỏng, chẳng hạn như nanogenerator.

Quá trình nghiên cứu tập trung vào hai khía cạnh chính:

- (i) Thiết kế cấu trúc cơ khí – điện tử và các yêu cầu kỹ thuật của hệ thống máy.
- (ii) Quy trình hoàn thiện thiết bị, thử nghiệm và đánh giá tính năng.

3.1 Thiết kế cấu trúc thiết bị

3.1.1 Yêu cầu kỹ thuật của hệ thống máy sơn phủ

Để đảm bảo hiệu quả sơn phủ và tạo ra lớp màng chất lượng cao, hệ thống Doctor Blade Coater được thiết kế dựa trên các tiêu chí kỹ thuật sau:

- **Kiểm soát độ dày và đồng nhất:** Hệ thống cần có khả năng điều chỉnh độ dày lớp phủ trong khoảng nano đến micromet với sai số nhỏ, đồng thời đảm bảo độ phủ đồng đều trên toàn bộ bề mặt vật liệu nền.
- **Độ ổn định và tính lặp lại:** Hệ thống phải hoạt động ổn định trong thời gian dài, cho phép tái lập kết quả sơn phủ qua nhiều chu kỳ mà không gây sai khác đáng kể về đặc tính vật lý hoặc hóa học của màng phủ.
- **Tích hợp điều khiển tự động và giám sát IoT:** Sử dụng vi điều khiển Arduino Uno kết hợp với driver TB6600 để điều khiển động cơ bước, đảm bảo độ chính xác trong quá trình di chuyển của dao tráng hoặc bàn nền. Ngoài ra, tích hợp module ESP8266 (Wi-Fi) để truyền dữ liệu lên nền tảng IoT, cho

phép giám sát và điều khiển thiết bị từ xa. Các cảm biến nhiệt độ và cảm biến vị trí, cùng với màn hình LCD, sẽ hỗ trợ người vận hành theo dõi trạng thái hệ thống theo thời gian thực.

- **Khả năng mở rộng:** Cấu trúc thiết kế cho phép nâng cấp lên quy trình roll-to-roll trong công nghiệp, tạo điều kiện thuận lợi để mở rộng quy mô sản xuất trong tương lai mà vẫn duy trì chất lượng lớp phủ.

3.1.2 Thiết kế cấu trúc hệ thống

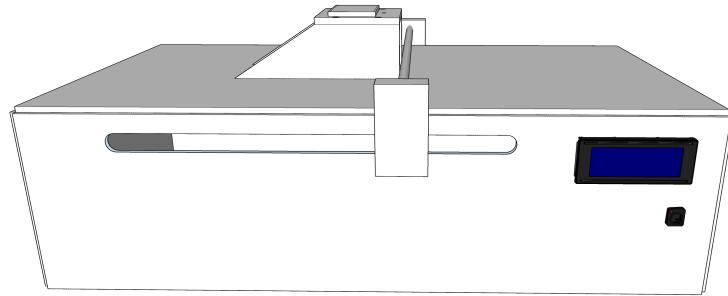
Thiết kế cơ khí

Phần cơ khí của máy sơn phủ được thiết kế nhằm đảm bảo khả năng điều chỉnh chính xác tốc độ và khoảng cách của dao tráng trên bề mặt chất nền. Các yếu tố quan trọng bao gồm:



Hình 3.1: Dao sơn phủ (Doctor blade)

- **Hệ thống dao tráng (Blade):** Dao tráng là thành phần quan trọng trong việc quyết định độ dày lớp màng. Thiết bị sử dụng dao tráng có thể điều chỉnh được góc nghiêng và khe hở so với bề mặt chất nền. Điều này giúp kiểm soát chính xác lượng dung dịch phủ, đồng thời ảnh hưởng đến chất lượng và độ dày lớp màng tạo thành [8].



Hình 3.2: Thiết kế hệ thống bàn làm việc bladecoating

- **Bàn làm việc:** Bàn làm việc được thiết kế với cơ cấu trượt tuyến tính có khả năng di chuyển chất nền theo tốc độ lập trình sẵn, giúp duy trì tốc độ ổn định trong suốt quá trình tráng phủ. Điều này đặc biệt quan trọng để đảm bảo phân bố dung dịch đồng đều và tránh hiện tượng tụ hoặc rỗ màng.
- **Cơ cấu điều chỉnh:** Cơ cấu cơ khí cho phép điều chỉnh khoảng cách giữa dao và nền, đồng thời tinh chỉnh áp lực dao nhằm tương thích với các loại dung dịch khác nhau (như sol-gel, polymer, vật liệu nano...). Cơ cấu này bao gồm: Cần trực vít me, Bộ gá trượt chính xác, Hệ truyền động bằng động cơ bước + đai dẫn hướng. Các chi tiết được gia công CNC từ hợp kim nhôm để đảm bảo độ bền, giảm rung lắc và đáp ứng yêu cầu chính xác cao.

Thiết kế phần cứng vi xử lý và điều khiển

Hệ thống phần cứng chịu trách nhiệm nhận tín hiệu từ cảm biến, điều khiển động cơ bước và hiển thị thông tin cơ bản lên màn hình. Các thành phần chính gồm:

- **Arduino Uno (bộ điều khiển trung tâm):** Xử lý tín hiệu từ các cảm biến và xuất lệnh điều khiển tới driver TB6600. Arduino Uno dễ lập trình, cộng đồng hỗ trợ mạnh, phù hợp cho hệ thống nhúng độ phức tạp vừa phải.



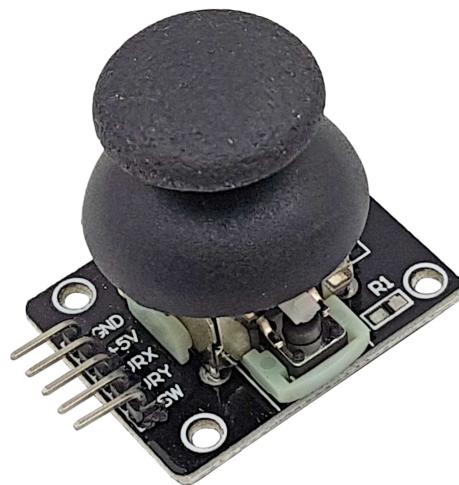
Hình 3.3: Arduino Uno R3

- **Driver TB6600 & Động cơ bước:** Driver TB6600 cấp dòng ổn định, hỗ trợ vi bước cho động cơ bước, giúp điều khiển chính xác vị trí dao tráng hoặc bàn nền.



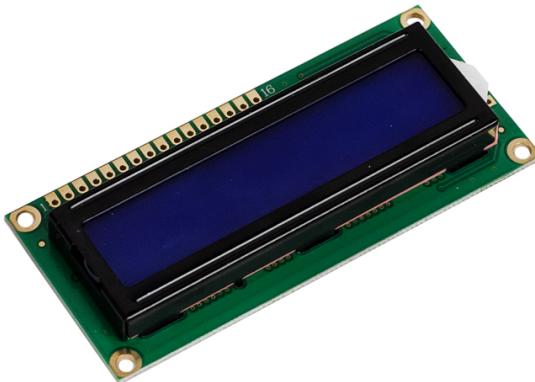
Hình 3.4: Driver TB6600

- **Joystick:** Cần điều khiển tay cho phép người vận hành điều chỉnh thủ công các thông số như vị trí hoặc tốc độ di chuyển.



Hình 3.5: Module Joystick

- **Màn hình LCD 16×2:** Hiển thị các thông số như tốc độ, nhiệt độ, trạng thái hệ thống...

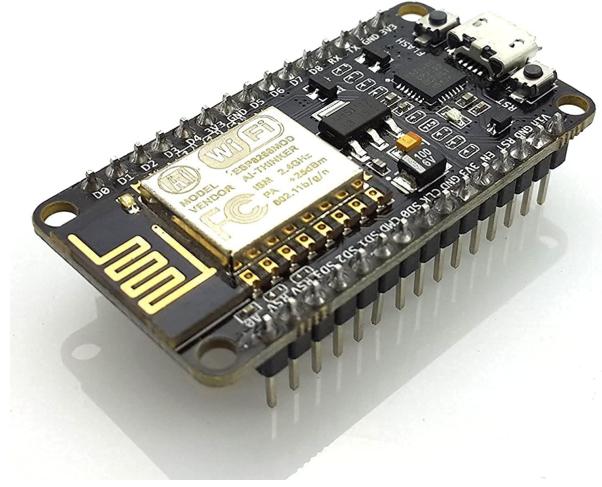


Hình 3.6: Màn hình LCD 16×2

Thiết kế phần mềm IoT và giao diện người dùng

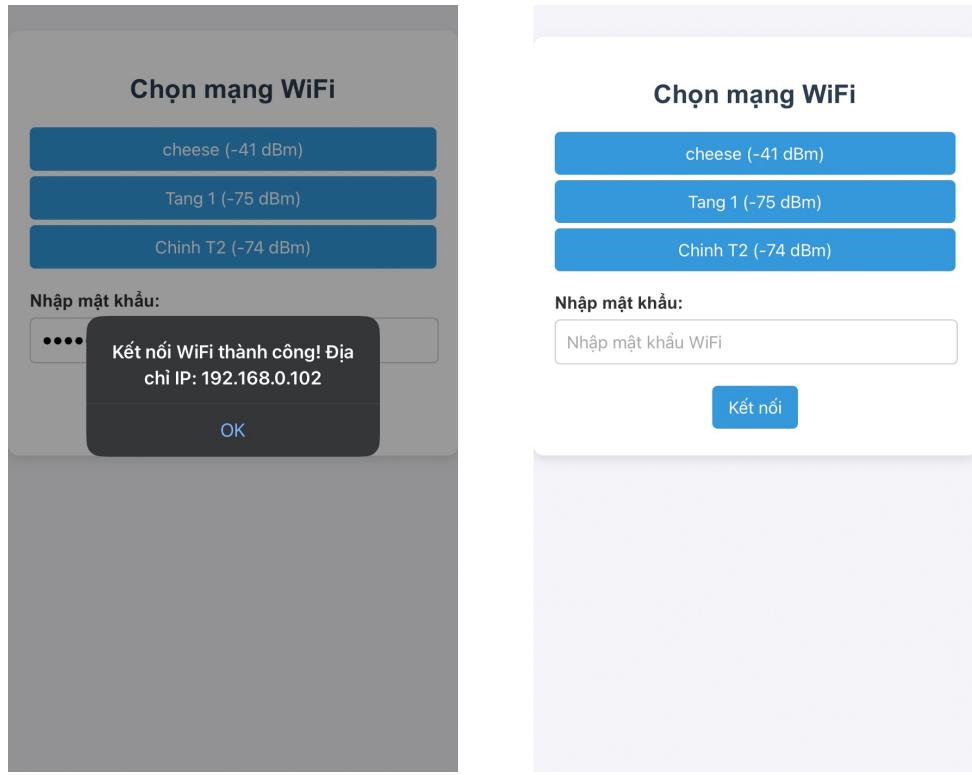
Phần mềm đảm nhận việc thu thập dữ liệu từ ESP8266, lưu trữ, hiển thị và cho phép điều khiển từ xa.

- **Module ESP8266 (Wi-Fi):** Kết nối Internet, nhận lệnh từ giao diện web/mobile và gửi dữ liệu cảm biến.

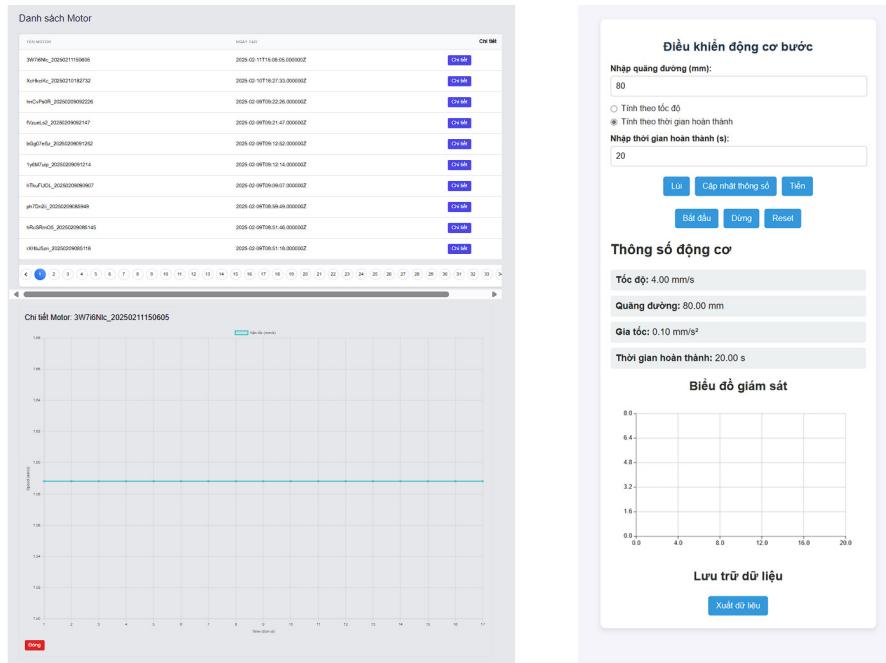


Hình 3.7: Module ESP8266

- **Backend IoT (HTTP):** API dùng để giao tiếp giữa client và server được triển khai trên framework laravel và hệ thống cơ sở dữ liệu sử dụng mySQL để truy vấn dữ liệu một cách dễ dàng và nhanh chóng, chịu trách nhiệm thu thập, lưu trữ và phân tích dữ liệu thời gian thực.
- **Giao diện người dùng:** Xây dựng web/app bằng VueJS để hiển thị tốc độ, nhiệt độ, trạng thái. Hệ thống hỗ trợ hai chế độ kết nối:
 - *Station (STA)*: ESP8266 kết nối vào Access Point hiện có để người dùng truy cập.
 - *Access Point (AP)*: ESP8266 tạo mạng Wi-Fi riêng, người dùng kết nối trực tiếp vào địa chỉ MAC thiết bị.



Hình 3.8: Giao diện màn hình kết nối Wi-Fi

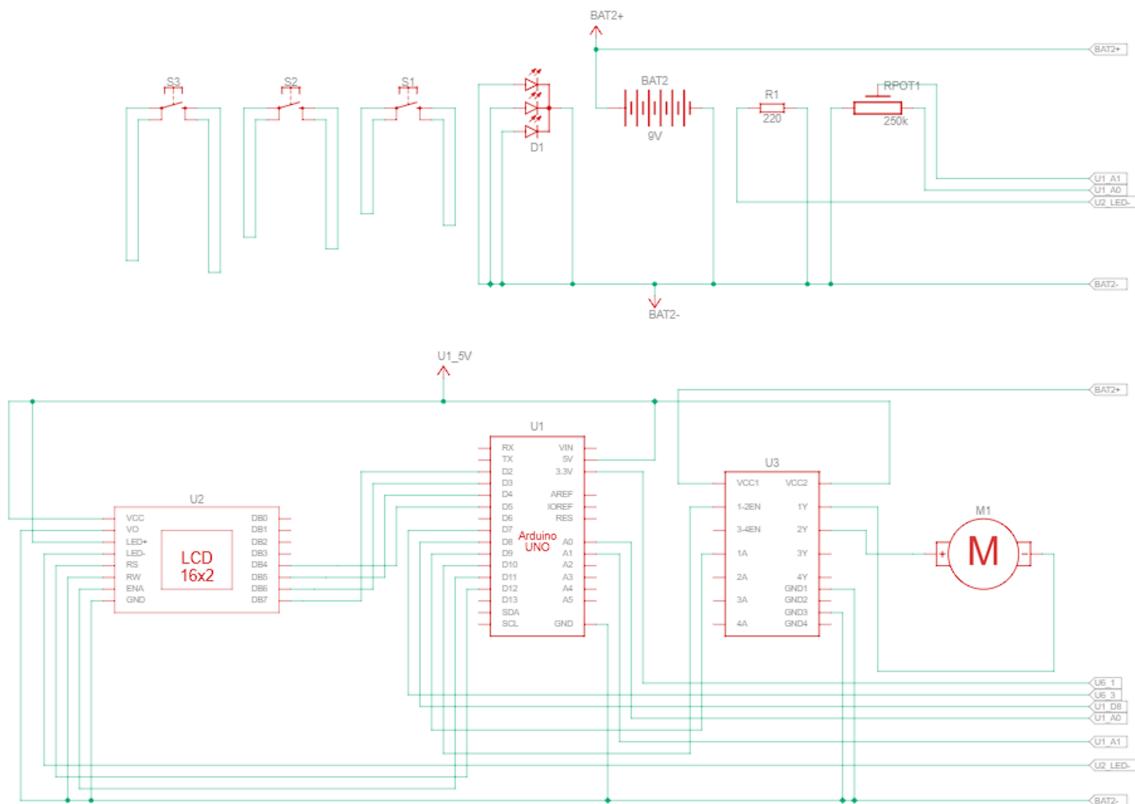


Hình 3.9: Giao diện giám sát và điều khiển động cơ

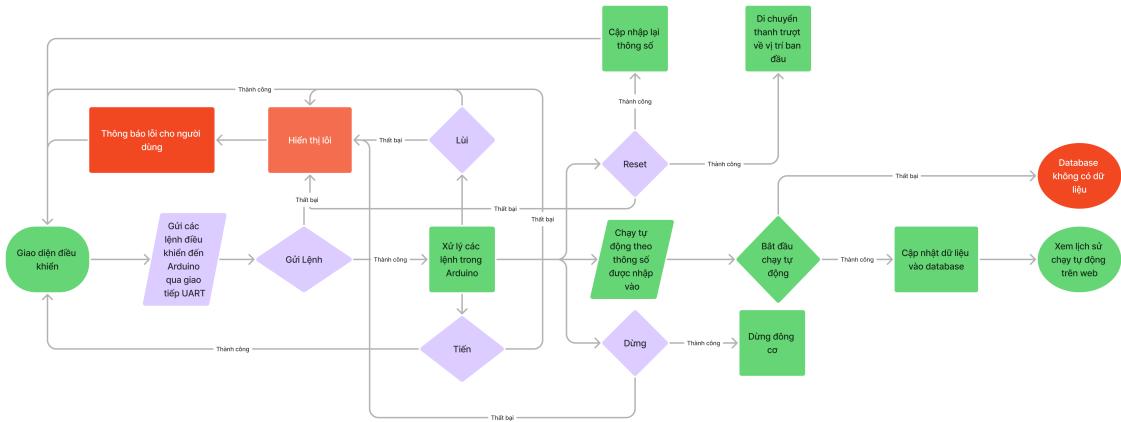
3.2 Quy trình chế tạo và lắp ráp

Quá trình chế tạo máy sơn phủ được thực hiện qua các bước sau:

1. **Phân tích và thiết kế:** Dựa trên các yêu cầu kỹ thuật, tiến hành mô phỏng và vẽ bản vẽ 3D chi tiết cho các bộ phận cơ khí, đồng thời thiết kế sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển (bao gồm Arduino Uno, driver TB6600, cảm biến, ESP8266) để đảm bảo tín hiệu từ cảm biến được xử lý chính xác và động cơ bước vận hành ổn định (Hình 3.10). Ngoài ra, xây dựng sơ đồ luồng dữ liệu và hành động của người dùng (Hình 3.11) để kiểm soát toàn bộ quá trình và ngăn ngừa các sự cố không mong muốn.



Hình 3.10: Sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển



Hình 3.11: Sơ đồ luồng dữ liệu của hệ thống IoT

- Chế tạo các bộ phận:** Gia công các bộ phận cơ khí từ kim loại hoặc nhựa kỹ thuật theo bản vẽ đã được phê duyệt. Đặc biệt, các bộ phận liên quan đến cơ cấu dao tráng và hệ thống định vị phải đạt độ chính xác cao.
 - Lắp ráp hệ thống:** Kết hợp các bộ phận cơ khí với hệ thống điện tử, bao gồm động cơ bước, driver TB6600, Arduino Uno, cảm biến nhiệt độ, ESP8266, joystick và màn hình LCD. Quá trình này đòi hỏi sự phối hợp chặt chẽ giữa các nhóm cơ khí, điện và phần mềm.
 - Tích hợp phần mềm:** Phát triển phần mềm điều khiển và giám sát, bao gồm giao diện cơ học trên màn hình LCD và hệ thống IoT để truyền tải dữ liệu theo thời gian thực qua giao diện web/app.
 - Chi phí sản xuất:** Bảng sau trình bày chi tiết chi phí linh kiện để chế tạo hệ thống trong đề tài:

STT	Tên linh kiện	Chi phí (VND)
1	Động cơ bước (Stepper Motor)	360.000
2	Thanh trượt tuyến tính (Linear Rail + Lead Screw)	300.000
3	Arduino Uno	150.000
4	ESP8266	110.000
5	Bộ điều khiển TB6600	140.000
6	Màn hình LCD	70.000
7	Khung cơ khí	500.000
8	Nguồn điện và phụ kiện (adapter, dây, socket...)	300.000
9	Doctor Blade	1.500.000
Tổng cộng		3.430.000

Bảng 3.1: Chi phí các linh kiện cấu thành thiết bị

Các linh kiện được lựa chọn trong bảng 3.1 đều khá phổ biến, dễ tìm kiếm trên thị trường và có chi phí hợp lý. Việc sử dụng các thiết bị như Arduino Uno, ESP8266 hay bộ điều khiển TB6600 giúp tối ưu chi phí trong khi vẫn đảm bảo khả năng mở rộng và lập trình linh hoạt. Tổng chi phí chế tạo chỉ khoảng 3.500.000 VND, thấp hơn rất nhiều so với các thiết bị thương mại cùng chức năng, cho thấy tính khả thi cao trong các ứng dụng học tập, nghiên cứu và phát triển sản phẩm ở quy mô nhỏ.

3.3 Quy trình thử nghiệm và đánh giá sản phẩm

Sau khi hoàn thiện quá trình chế tạo và lắp ráp thiết bị phủ lớp màng mỏng bằng phương pháp blade coating, hệ thống được đưa vào quy trình thử nghiệm toàn diện nhằm đánh giá chất lượng lớp phủ, hiệu suất hoạt động và tiềm năng ứng dụng thực tiễn của sản phẩm. Quy trình thử nghiệm bao gồm các nội dung chính sau:

3.3.1 thử nghiệm hiệu quả quá trình sơn phủ

- **Đo lường độ đồng nhất và độ dày lớp phủ:** Độ dày lớp màng mỏng ngay sau khi phủ (màng ướt) được đo bằng các thiết bị đo quang học hoặc kính

hiển vi điện tử có độ phân giải micromet. Quá trình thử nghiệm tập trung đánh giá mức độ đồng đều trên toàn bề mặt và khả năng kiểm soát độ dày theo yêu cầu, từ 0,1 μm trở lên. Kết quả cho thấy hệ thống có khả năng tạo màng mỏng với độ dày ổn định và sai số nhỏ, gần tương đương với các hệ thống thương mại.

- **Do hiệu suất chuyển đổi năng lượng:** Các mẫu nanogenerator được chế tạo từ lớp màng phủ sê được thử nghiệm bằng cách tác động cơ học có điều khiển (theo các tần số và biên độ khác nhau) để tạo dao động và đo lường điện áp cũng như dòng điện sinh ra. Từ đó, hiệu suất chuyển đổi năng lượng được tính toán và so sánh với các giá trị mục tiêu. Thiết bị cho kết quả đầu ra ổn định và đáp ứng yêu cầu đối với nghiên cứu cơ bản và ứng dụng giáo dục.

3.3.2 Kiểm tra các thông số của hệ

- **So sánh thông số kỹ thuật:** Thiết bị chế tạo có khả năng hoạt động ổn định trong khoảng tốc độ từ **0,1 mm/s** đến **100 mm/s**, tiệm cận với các thiết bị thương mại có tốc độ tối đa **200 mm/s**. Độ dày lớp màng phủ đạt từ **0,1 μm trở lên**, tương đương mức phổ biến trên các hệ thống chuyên dụng. Độ chính xác điều chỉnh tốc độ, khoảng cách lưỡi dao và nhiệt độ nền gia nhiệt cũng được kiểm soát tốt, phù hợp cho nghiên cứu và thử nghiệm vật liệu.
- **So sánh chi phí sản xuất:** Trong khi các thiết bị thương mại cùng loại trên thị trường quốc tế có giá thành dao động từ **3.400 USD** đến **5.000 USD** (tương đương khoảng **85–125 triệu VND**), thì thiết bị chế tạo trong nghiên cứu này chỉ tốn khoảng **3.000.000** đến **3.500.000 VND** (tức chưa đến 5% chi phí so với thiết bị thương mại). Điều này cho thấy khả năng tiết kiệm chi phí vượt trội, đặc biệt phù hợp với môi trường học thuật, nghiên cứu tại các phòng thí nghiệm đại học hoặc cơ sở giáo dục kỹ thuật.

Thiết bị	Tốc độ (mm/s)	Điều khiển từ xa	Chi phí (VND)	Ghi chú
Thiết bị đề tài	0.1–100	Có (IoT/Web)	3.500.000	Tự chế, dễ tùy biến
MTI EQ-Se-KTQ-150	0.1–200	Không	125.000.000	Hệ thương mại phổ biến
Yotec YT-DZ-100	0.5–150	Không	85.000.000	Trung Quốc, phổ biến tại VN
Ossila L200	0.1–150	Có (USB-PC)	110.000.000	Hệ cao cấp, có phần mềm điều khiển

Bảng 3.2: So sánh thiết bị đề tài và thiết bị thương mại

Bảng 3.2 [26–28] cho thấy thiết bị đề tài có thông số kỹ thuật tương đương với các thiết bị thương mại phổ biến. Tuy nhiên, thiết bị đề tài được tích hợp thêm khả năng điều khiển từ xa và thu thập dữ liệu qua Internet. Với chi phí sản xuất thấp nhưng vẫn đảm bảo các tính năng và hiệu quả tương đối so với những sản phẩm thương mại, thiết bị này có tiềm năng lớn trong nghiên cứu và phát triển trong tương lai.

- **So sánh tính năng điều khiển:** Không giống như phần lớn thiết bị thương mại sử dụng điều chỉnh cơ học hoặc thủ công thông qua các nút vặn cơ hoặc bảng điều khiển cục bộ, thiết bị được chế tạo trong đề tài này đã tích hợp **hệ thống IoT hỗ trợ điều khiển từ xa qua giao diện web hoặc ứng dụng di động**. Tính năng này giúp tăng tính linh hoạt, thuận tiện trong vận hành, đồng thời hỗ trợ thu thập và giám sát dữ liệu thời gian thực, điều mà phần lớn thiết bị thương mại chưa tích hợp ở mức cơ bản.

3.3.3 Phân tích dữ liệu và đề xuất cải tiến

1. **Thu thập và xử lý dữ liệu:** Hệ thống được tích hợp cảm biến và nền tảng IoT cho phép thu thập dữ liệu liên tục về các thông số vận hành (tốc độ tráng phủ, nhiệt độ nền, khoảng cách lưỡi dao, độ dày màng mỏng sau khi phủ,...). Các dữ liệu này được xử lý bằng các công cụ phân tích định lượng để tìm mối tương quan giữa thông số quá trình và hiệu suất đầu ra của nanogenerator.
2. **Đề xuất cải tiến hệ thống:** Dựa trên kết quả phân tích, có thể nhận diện các yếu tố ảnh hưởng mạnh đến chất lượng lớp màng như độ nhớt dung dịch, độ sạch bề mặt chất nền, và chế độ gia nhiệt. Từ đó, đề xuất các hướng cải

tiến như nâng cấp cơ cấu điều chỉnh khoảng cách lưỡi dao tự động, tối ưu hóa thuật toán điều khiển tốc độ phủ, và tích hợp thêm các mô-đun hiệu chỉnh nhiệt độ để tăng độ chính xác.

Kết luận Chương 3

Qua quá trình thiết kế, chế tạo và ứng dụng sản phẩm trong chế tạo màng mỏng, hệ thống máy sơn phủ màng mỏng bladecoating đã cho thấy khả năng tạo ra các lớp màng với độ đồng đều cao và kiểm soát tương đối chính xác độ dày ở mức micrometer. Các kết quả thử nghiệm ban đầu chỉ ra rằng thiết bị có thể đáp ứng được yêu cầu kỹ thuật của các linh kiện chuyển đổi điện năng, đồng thời mở ra hướng phát triển cho các quy trình sản xuất công nghiệp tích hợp IoT.

Chương 4

Ứng dụng máy tráng phủ màng mỏng trong linh kiện chuyển đổi điện năng

Chương này trình bày ứng dụng của máy sơn phủ màng mỏng trong công nghệ mảng mỏng sử dụng để sản xuất linh kiện chuyển đổi điện năng. Nghiên cứu tập trung vào các thí nghiệm thực tế, đánh giá chất lượng và hiệu quả của lớp màng mỏng trong việc chuyển đổi năng lượng và thảo luận về các kết quả thử nghiệm. Qua đó, đánh giá khả năng ứng dụng của công nghệ blade coating trong sản xuất các thiết bị năng lượng tái tạo như nanogenerator.

4.1 Thử nghiệm và đánh giá hiệu quả

4.1.1 Thí nghiệm trên linh kiện nanogenerator

Nhằm đánh giá hiệu suất chuyển đổi năng lượng của linh kiện nanogenerator được chế tạo bằng phương pháp sơn phủ sử dụng thiết bị doctor blade coater do nhóm thiết kế, tôi đã tiến hành chuỗi thí nghiệm bao gồm ba bước chính: chuẩn bị mẫu, thực hiện sơn phủ và thu thập dữ liệu, và phân tích hiệu suất đầu ra.

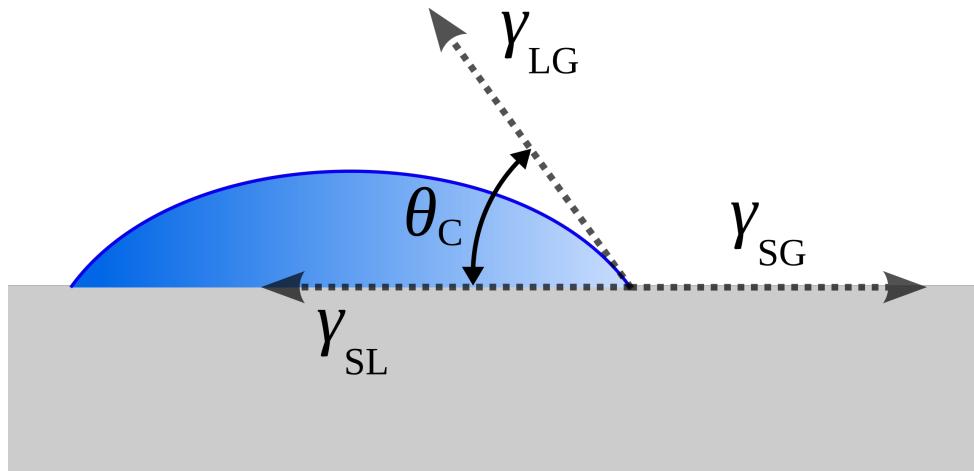
Chuẩn bị mẫu

- **Chế tạo dung dịch PVA:** Trong thí nghiệm này, tôi sử dụng PVA (Polyvinyl Alcohol) làm vật liệu tạo màng mỏng do tính chất dễ hòa tan trong nước và khả năng tạo dung dịch có độ nhớt cao. Để khảo sát ảnh hưởng của độ nhớt lên chất lượng màng, tôi chuẩn bị 5 loại dung dịch PVA với nồng độ khác nhau: 6%, 8%, 9% 10% (w/v). Quá trình pha dung dịch diễn ra như sau:
 - Cân lượng PVA tương ứng với nồng độ cần thiết.
 - Cho vào nước cất và đun nóng đến khoảng 85–90°C, khuấy liên tục đến khi tan hoàn toàn.

- Chuẩn bị nền và mã hóa mẫu: Màng được sơn trên các nền thủy tinh (glass slide) đã được làm sạch bằng ethanol và sấy khô. Mỗi mẫu sau khi tạo được gắn mã số riêng, kèm theo thông tin về nồng độ dung dịch, tốc độ quét và điều kiện môi trường, giúp thuận tiện cho việc phân loại và phân tích sau này.

Phân tích góc tiếp xúc (Contact Angle)

Góc tiếp xúc (contact angle) là một đại lượng vật lý đặc trưng cho khả năng ướt của chất lỏng trên bề mặt rắn. Khi một giọt chất lỏng được đặt lên bề mặt, góc tạo thành giữa biên giọt và bề mặt được gọi là góc tiếp xúc. Giá trị này phản ánh sự cân bằng giữa lực căng bề mặt của chất lỏng và lực tương tác với bề mặt chất rắn [29].



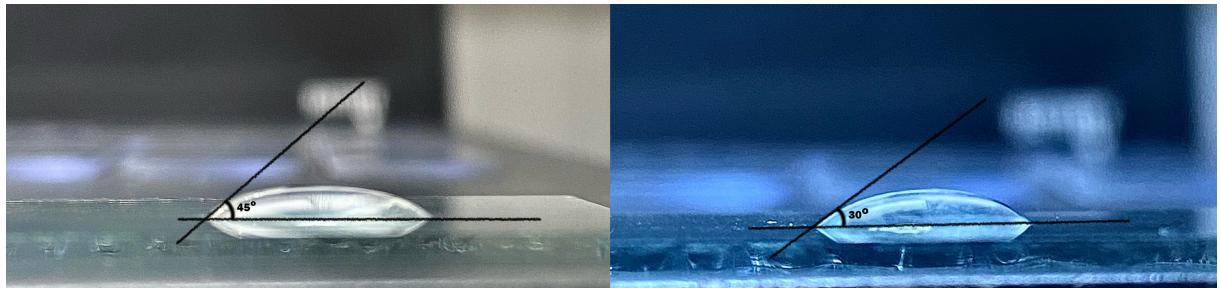
Hình 4.1: Ví dụ góc tiếp xúc (Contact Angle) của nước trên bề mặt kính

Trong lĩnh vực chế tạo màng mỏng, đặc biệt là các kỹ thuật phủ như spin coating hoặc blade coating, góc tiếp xúc là một chỉ số quan trọng để đánh giá khả năng lan tỏa của dung dịch phủ.

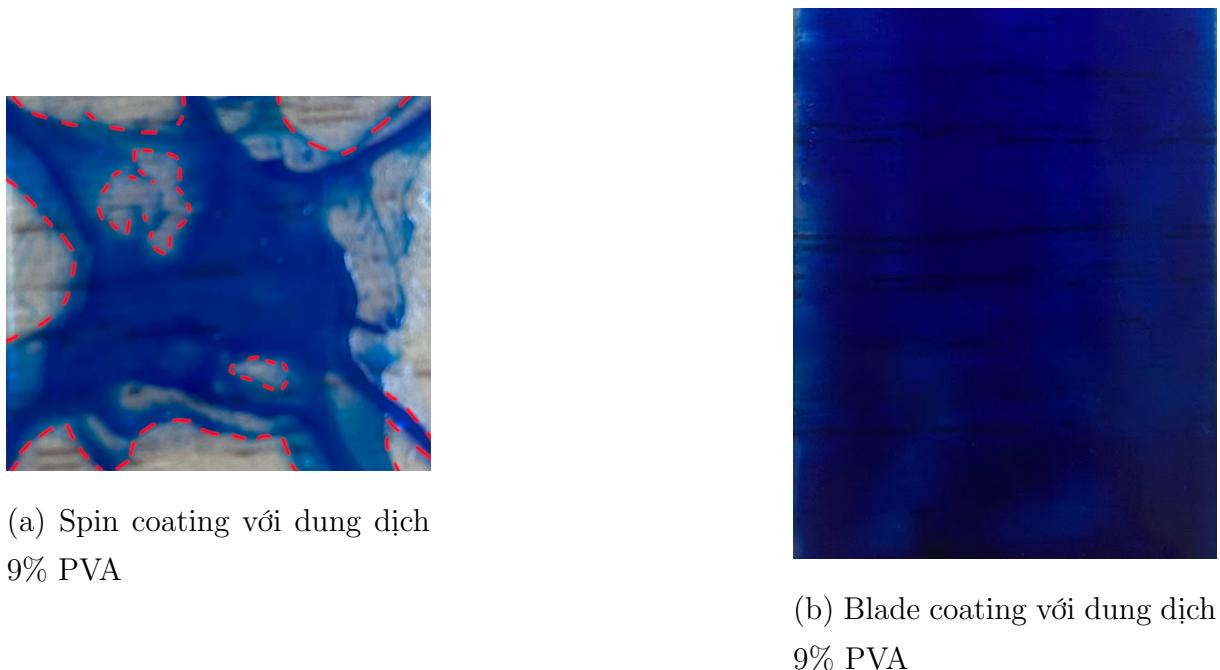
Dung dịch có độ nhớt thấp thường tạo góc tiếp xúc nhỏ, thể hiện khả năng lan trải tốt trên bề mặt – rất phù hợp cho các phương pháp như spin coating. Ngược lại, dung dịch có độ nhớt cao tạo góc tiếp xúc lớn, khó lan rộng đều, từ đó dễ hình thành khuyết tật nếu sử dụng sai phương pháp phủ.

Để khảo sát đặc tính này, tôi tiến hành đo contact angle giữa giọt nước và dung

dịch 9% PVA trên nền kính đã được làm sạch bằng ethanol.



Hình 4.2: So sánh góc tiếp xúc giữa dung dịch 9% PVA và nước trên bề mặt kính



(a) Spin coating với dung dịch
9% PVA

(b) Blade coating với dung dịch
9% PVA

Hình 4.3: So sánh bề mặt màng mỏng tạo ra từ spin coating và blade coating với cùng nồng độ 9% PVA

Từ hình 4.2 và 4.3, kết quả cho thấy:

- **Nước tinh khiết:** Tạo thành góc tiếp xúc trung bình khoảng $30\text{--}35^\circ$, phản ánh khả năng ướt tốt và độ lan tỏa cao trên bề mặt kính.
- **Dung dịch 9% PVA:** Có độ nhớt cao, tạo góc tiếp xúc lớn hơn, khoảng $45\text{--}50^\circ$, cho thấy khả năng lan trãi kém hơn so với nước.

Sự khác biệt này cho thấy rằng dung dịch PVA không phù hợp với phương pháp spin coating do lan tỏa kém và khó tạo lớp mỏng đồng đều. Thay vào đó, phương

pháp doctor blade coating (blade coating) được sử dụng để kiểm soát độ dày và đảm bảo lớp phủ đều trên toàn bề mặt, khắc phục được nhược điểm của dung dịch có độ nhớt cao.

Tiến hành tráng phủ và thu thập dữ liệu

Thiết lập cơ học cho quá trình coating: Để đảm bảo lớp màng có độ dày đồng đều, tôi điều chỉnh mặt phẳng của thiết bị bằng cách cân bằng 3 chân để và sử dụng thủy chuẩn. Chiều cao lưỡi dao được cố định ở mức 20 μm , và tốc độ quét được điều chỉnh từ 0.1–1 mm/s tùy loại dung dịch.

Mỗi loại dung dịch được sơn lên nền bằng lưỡi dao không giật, đảm bảo bề mặt được phủ đầy và đều. Sau khi coating, mẫu được đem sấy ở 60°C trong 2 giờ để loại bỏ hoàn toàn hơi nước và ổn định cấu trúc màng.

Thu thập dữ liệu hình thái học: Sau khi sấy khô, bề mặt màng được quan sát dưới kính hiển vi quang học để đánh giá các yếu tố:

- Độ phủ bề mặt (có vùng trống, co màng không)
- Độ mịn và sự xuất hiện khuyết tật (bong bóng khí, rạn nứt)
- Tính đồng đều về màu sắc và bề mặt màng

Tích hợp hệ thống IoT và đo đặc thông số đầu ra:

Thiết bị blade coater được tích hợp hệ thống IoT giúp thu thập dữ liệu theo thời gian thực như: tốc độ quét, biên độ dao động và môi trường làm việc. Ngoài ra, sau khi màng hoàn tất và được lắp vào nanogenerator, hệ thống cũng thực hiện đo điện áp (V), dòng điện (I), công suất (P) sinh ra thông qua cảm biến điện tử và lưu dữ liệu vào hệ thống cơ sở dữ liệu để phục vụ phân tích.

Phân tích hình thái học của màng:

Dung dịch PVA có độ nhớt cao thường khó tạo lớp màng đồng đều khi sử dụng các phương pháp như spin coating. Tuy nhiên, với thiết bị doctor blade, các màng tạo được tại nồng độ 8–10% thể hiện chất lượng tốt, không có hiện tượng co màng hoặc tụ vật liệu. Tại nồng độ 15%, màng bắt đầu có dấu hiệu chảy sệ nếu không được sấy kịp thời.

So sánh với spin coating:

Để đánh giá tương quan, tôi tiến hành tạo một số mẫu bằng phương pháp spin coating với các nồng độ PVA 8%, 9%, 10%. Kết quả cho thấy:

- Spin coating tạo màng mỏng hơn ($1\text{--}2\mu\text{m}$) và rất đồng đều nhưng chỉ hiệu quả với dung dịch loãng.
- Blade coating phù hợp hơn với dung dịch nhớt, cho độ dày ổn định ($10\text{--}20\mu\text{m}$) và dễ kiểm soát thông số hơn.

Độ bền và tính lặp lại:

Các mẫu được thử nghiệm trong 50–100 chu kỳ đóng mở cơ học để kiểm tra độ bền. Sau 100 chu kỳ, điện áp vẫn giữ được trên 90% so với ban đầu đối với mẫu phủ từ dung dịch 12%.

Qua thí nghiệm, em chứng minh được rằng thiết bị blade coating tự chế có khả năng tạo lớp màng mỏng đồng đều và ổn định khi sử dụng dung dịch có độ nhớt cao như PVA. Ngoài ra, hiệu suất điện thu được từ các mẫu cho thấy tính ứng dụng thực tiễn cao của thiết bị, đặc biệt trong nghiên cứu vật liệu màng mỏng và linh kiện cơ-nhiệt-điện thế hệ mới. Thiết bị có chi phí thấp, dễ tùy biến, phù hợp với các phòng thí nghiệm nghiên cứu cơ bản và ứng dụng.

4.2 Đánh giá hiệu quả chuyển đổi năng lượng

Trong các nghiên cứu sử dụng phương pháp blade coating, việc kiểm soát chính xác độ dày lớp màng ướt ngay tại thời điểm phủ là một yếu tố then chốt để đảm bảo các đặc tính mong muốn của sản phẩm cuối cùng, chẳng hạn như độ dẫn điện, độ bám dính, độ đồng đều điện trường và đặc tính rào cản.

Độ dày lớp phủ ướt (wet film thickness, ký hiệu h) phụ thuộc vào ba tham số kỹ thuật chính trong quá trình phủ: lưu lượng dung dịch (Q), tốc độ phủ (v) và chiều rộng chất nền (w). Mối quan hệ này được mô tả bằng công thức:

$$h = \frac{Q}{v \cdot w} \quad (4.1)$$

(Theo [8])

Trong đó:

- h : Độ dày màng ướt (m)
- Q : Lưu lượng vật liệu phủ (m^3/s hoặc $L/phút$)
- v : Tốc độ phủ (m/s)
- w : Chiều rộng chất nền được phủ (m)

Công thức này cho thấy:

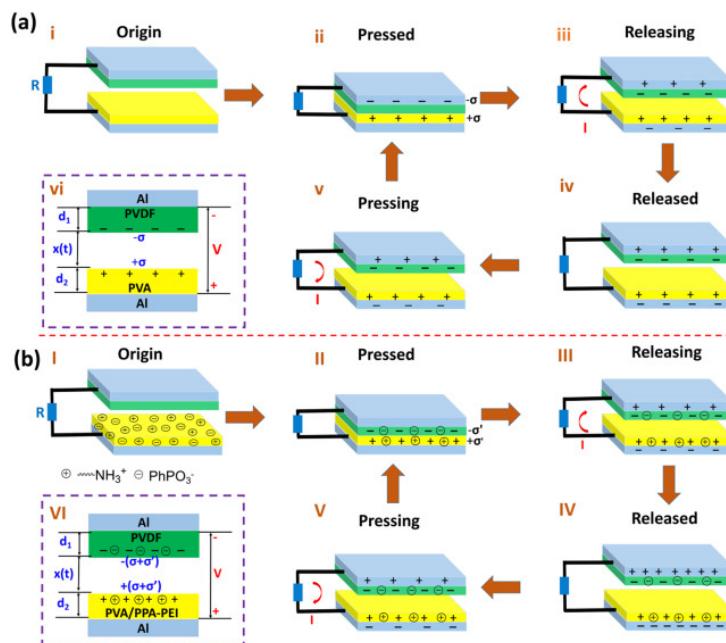
- Tăng lưu lượng Q sẽ làm tăng độ dày màng ướt nếu giữ các thông số còn lại không đổi.
- Tăng tốc độ phủ v hoặc tăng chiều rộng nền w sẽ làm giảm độ dày màng ướt.

Việc thiết lập chính xác các thông số Q , v và w trong quá trình thực nghiệm cho phép kiểm soát tốt độ dày lớp phủ, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất chuyển đổi năng lượng của thiết bị. Kết quả thu được từ các thí nghiệm cho thấy rằng hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator phụ thuộc rất mạnh vào chất lượng của lớp màng mỏng được sơn phủ bằng máy blade coating.

- **Độ đồng nhất và kiểm soát độ dày:** Các mẫu nanogenerator mà lớp màng mỏng được sơn phủ với độ đồng nhất cao và độ dày được kiểm soát chặt chẽ cho thấy hiệu suất chuyển đổi năng lượng vượt trội. Các dữ liệu đo lường cho thấy rằng mẫu có lớp màng mỏng đồng nhất cho ra điện áp và dòng điện đều ra ổn định hơn so với các mẫu có độ dày không đồng đều. Điều này chứng tỏ rằng sự đồng nhất của lớp màng là một yếu tố then chốt để tối ưu hóa quá trình chuyển đổi năng lượng từ cơ học sang điện năng.
- **Giám sát và phân tích qua IoT:** Hệ thống thu thập dữ liệu được tích hợp với công nghệ IoT cho phép theo dõi các thông số quan trọng của quá trình thử nghiệm theo thời gian thực, bao gồm điện áp, dòng điện, và tần số của các chuyển động tác động đến mẫu. Dữ liệu thu được không chỉ giúp xác định hiệu suất chuyển đổi năng lượng mà còn cung cấp các thông số kỹ thuật cần thiết để đánh giá chất lượng của từng linh kiện. Phân tích dữ liệu cho thấy mối tương quan chặt chẽ giữa các thông số quá trình (như tốc độ tráng, nhiệt độ và điều kiện môi trường) với hiệu suất hoạt động của nanogenerator.

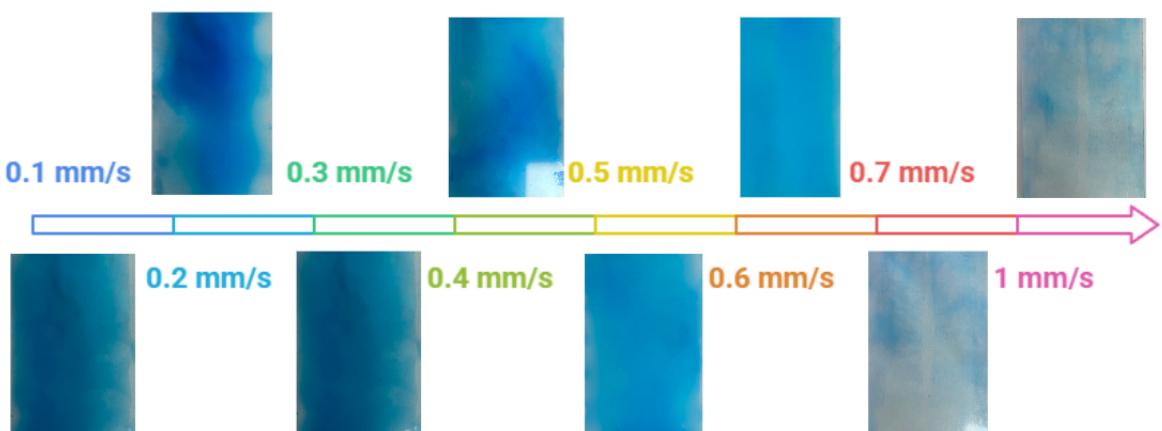
- Đánh giá hiệu suất chuyển đổi năng lượng

Sau khi phủ lớp màng PVC–PVA bằng blade coating, các mẫu với nồng độ PVA 6%, 8%, 9%, 10% và 12% được ghép thành cấu trúc vòng hai lớp (Hình 4.4) để đo điện áp và dòng điện đầu ra. Kết quả cho thấy:



Hình 4.4: Cấu trúc vòng của nanogenerator với hai lớp PVA và PVC

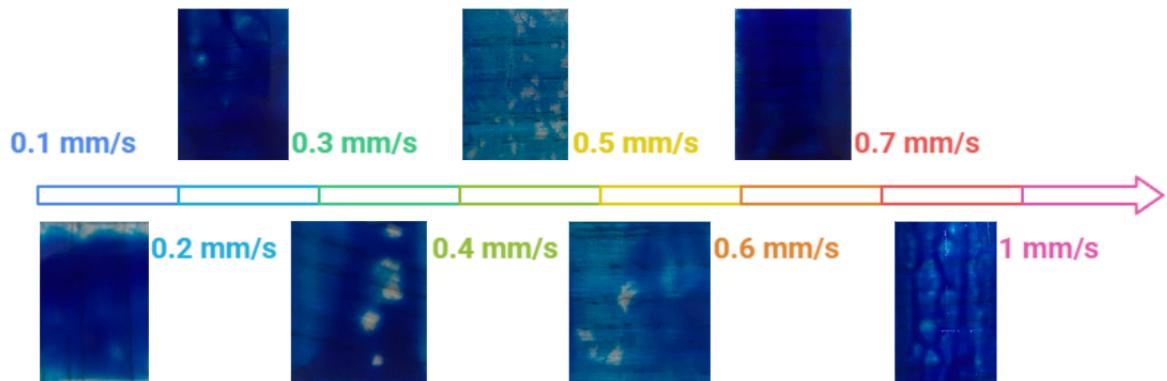
Ảnh hưởng của nồng độ PVA đến độ đồng nhất màng và điện áp:



Hình 4.5: Màng được tạo bởi phương pháp blade coating nồng độ 8% PVA



Hình 4.6: Màng được tạo bởi phương pháp blade coating với nồng độ 10% PVA



Hình 4.7: Màng được tạo bởi phương pháp blade coating với nồng độ 12% PVA

Các hình trên minh họa ảnh hưởng của tốc độ blade coating đến hình thái học bề mặt màng PVA:

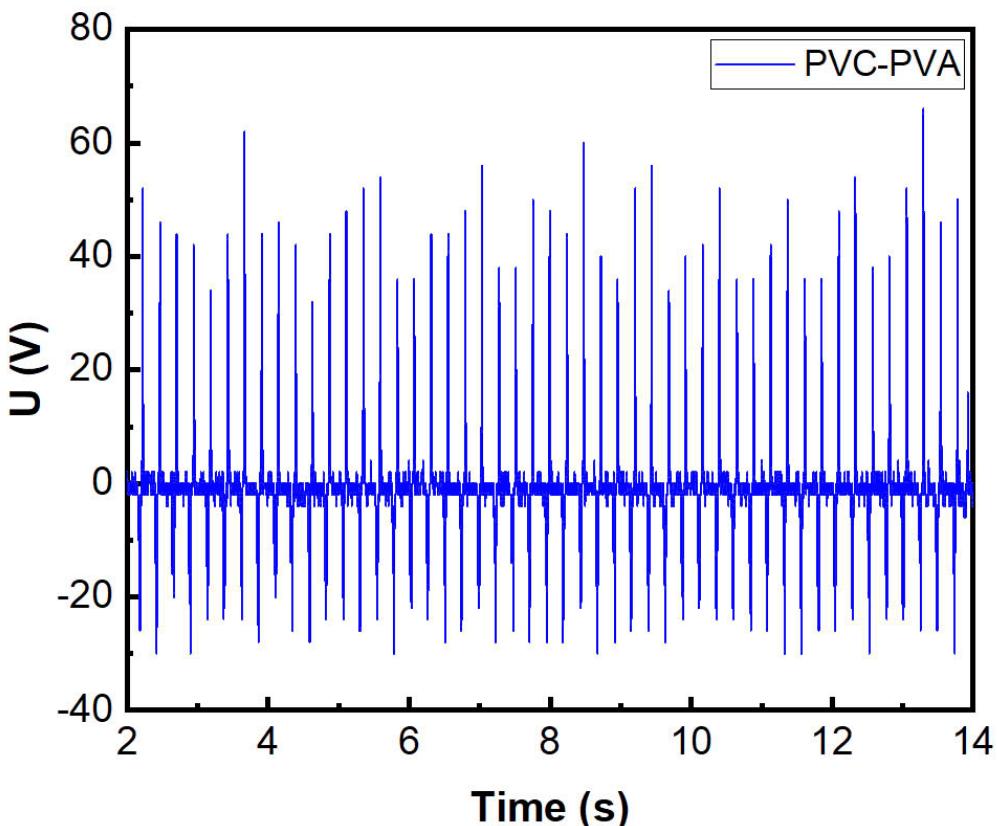
- **Tốc độ 0,1-0,3mm/s:** Lớp màng cho thấy bề mặt khá đồng đều nhưng vẫn còn một số vùng hơi gợn nhẹ do dung dịch mỏng và thời gian trôi chưa tối ưu.
- **Tốc độ 0,5-0,7mm/s:** Đây là dải tốc độ cho kết quả hình thái học tốt nhất, với bề mặt mịn, không có khuyết tật, cho phép phân bố vật liệu đồng đều và tối ưu độ nhớt của dung dịch.
- **Tốc độ 1,0mm/s:** Màng bắt đầu xuất hiện vệt mỏng không đồng đều và một số khe nứt nhỏ, do tốc độ quá cao khiến dung dịch không kịp trải đều trước khi bay hơi.

Từ các kết quả thí nghiệm này, có thể kết luận rằng với dung dịch PVA ở nồng độ 8% và tốc độ blade coating trong khoảng 0,5–0,7mm/s, màng mỏng đạt chất lượng hình thái học tốt nhất, góp phần nâng cao hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator.

- Màng từ dung dịch có nồng độ PVA dưới 8% cho ra màng có độ mỏng hơn nhưng đầu ra điện áp thấp hơn so với màng từ dung dịch có nồng độ 8% PVA.



Hình 4.8: Màng được tạo bởi phương pháp blade coating với nồng độ 6% PVA

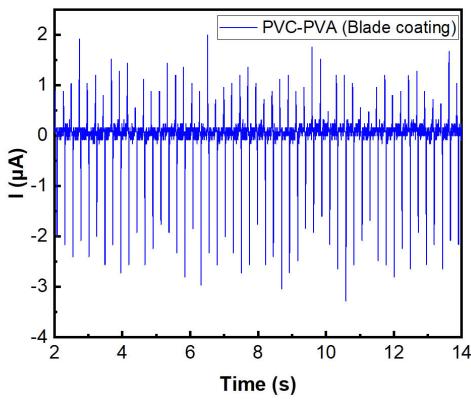


Hình 4.9: Đồ thị dao động điện áp của lớp chức năng PVC-PVA với nồng độ 8% PVA

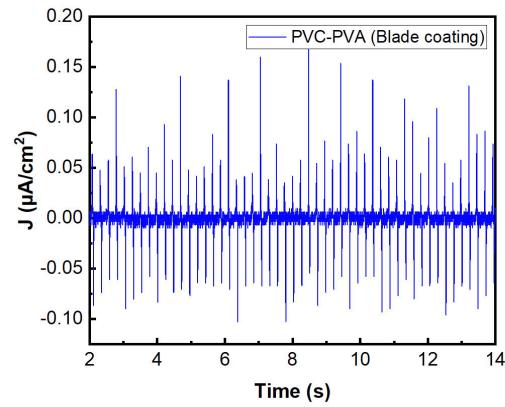
Phân tích cho thấy:

- Với 6% PVA, màng quá mỏng nên điện áp thấp và không ổn định.
- 8% PVA là điểm tối ưu: độ dày đủ, đồng đều, cho điện áp đỉnh 40–60V và tín hiệu ổn định.
- Trên 9%, bão hòa chất nền và khuyết tật bề mặt làm giảm hiệu suất 20–40%.

Tính ổn định dòng điện và mật độ dòng:



Hình 4.10: Độ thi dòng điện theo thời gian của lớp chức năng PVC-PVA với nồng độ 9% PVA



Hình 4.11: Độ thi mật độ dòng điện theo thời gian của lớp chức năng PVC-PVA với nồng độ 9% PVA

Đồ thị cho thấy tín hiệu dòng điện tuần hoàn, mật độ dòng ổn định $0.05\mu\text{A}/\text{cm}^2$, khẳng định tính lặp lại và độ tin cậy cao.

So sánh với sản phẩm thương mại: Thiết bị blade coating của dề tài đạt hiệu suất tương đương hoặc vượt trội, trong khi chi phí chỉ 3.5 triệu VND (thấp hơn 95%), và hỗ trợ IoT điều khiển từ xa — một ưu điểm nổi bật so với các hệ thống thương mại.

- **So sánh với sản phẩm thương mại:** Qua việc so sánh các kết quả thí nghiệm với các sản phẩm thương mại hiện có, nanogenerator chế tạo bằng máy blade coating được đánh giá có khả năng cạnh tranh cao về cả hiệu suất chuyển đổi năng lượng và chi phí sản xuất. Các mẫu sản xuất từ hệ thống của chúng tôi cho thấy điện áp và dòng điện đầu ra đạt mức tương đương hoặc vượt trội so với một số sản phẩm thương mại tiêu chuẩn, đồng thời chi phí sản xuất được tối ưu hóa nhờ vào quy trình sơn phủ hiệu quả và khả năng mở rộng quy mô sản xuất.

Nhìn chung, các kết quả này khẳng định rằng việc sử dụng máy blade coating không chỉ giúp tạo ra các lớp màng mỏng có chất lượng vượt trội mà còn cải thiện đáng kể hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator. Qua đó, hệ thống sản xuất sử dụng phương pháp này hứa hẹn sẽ góp phần tạo ra các thiết bị năng lượng tự cấp nguồn có hiệu quả cao, giảm thiểu sự phụ thuộc vào nguồn điện truyền

thông và đáp ứng tốt các yêu cầu của các ứng dụng IoT và các hệ thống năng lượng tái tạo hiện đại.

4.3 Thảo luận

Kết quả thử nghiệm đã chỉ ra rằng:

1. Quá trình sơn phủ bằng blade coating có khả năng tạo ra các lớp màng mỏng với cấu trúc tinh thể tốt, góp phần nâng cao hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator.
2. Việc tích hợp hệ thống IoT vào quy trình thử nghiệm không chỉ giúp theo dõi liên tục các thông số mà còn cung cấp dữ liệu cần thiết để tối ưu hóa quy trình sản xuất.
3. Một số hạn chế của máy sơn phủ hiện tại, chẳng hạn như sự phụ thuộc vào điều kiện môi trường và tính ổn định của dung dịch, cần được cải thiện trong các nghiên cứu sau này.

Kết luận Chương 4

Qua các thí nghiệm và đánh giá, ứng dụng của máy sơn phủ màng mỏng trong chế tạo linh kiện chuyển đổi điện năng đã chứng minh được tiềm năng cải thiện hiệu suất của các thiết bị nanogenerator. Việc tối ưu hóa quy trình sơn phủ, kết hợp với giám sát và điều khiển tự động qua IoT, không chỉ giúp giảm chi phí sản xuất mà còn mở ra cơ hội ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực năng lượng tái tạo và các thiết bị điện tử thông minh.

Kết luận

Trong đề tài này, chúng tôi đã đề xuất và triển khai một giải pháp thiết kế, chế tạo máy tráng phủ màng mỏng ứng dụng trong linh kiện chuyển đổi điện năng, với trọng tâm là nanogenerator. Qua quá trình nghiên cứu, thiết kế, chế tạo và kiểm thử, các kết quả đạt được cho thấy:

- **Hiệu quả của quy trình tráng phủ:** Hệ thống máy tráng phủ sử dụng phương pháp Doctor Blade Coating cho phép tạo ra các lớp màng mỏng có độ đồng nhất cao và độ dày được kiểm soát chính xác. Điều này góp phần tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nanogenerator, từ đó nâng cao hiệu quả thu năng lượng trong các ứng dụng thực tiễn.
- **Tích hợp công nghệ IoT:** Việc tích hợp các cảm biến và module IoT vào hệ thống máy tráng phủ đã giúp giám sát và điều khiển quá trình sản xuất theo thời gian thực. Qua đó, người vận hành có thể theo dõi chính xác các thông số quá trình, đưa ra các điều chỉnh kịp thời nhằm duy trì chất lượng của lớp màng và đảm bảo tính ổn định của hệ thống.
- **Tiềm năng ứng dụng rộng rãi:** Các kết quả thí nghiệm cho thấy nanogenerator chế tạo từ lớp màng mỏng tráng phủ bằng máy blade coating có hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao, đáp ứng được yêu cầu của các linh kiện chuyển đổi điện năng trong các hệ thống thu năng lượng tự cấp nguồn, cảm biến tự động và các ứng dụng IoT. Điều này mở ra cơ hội ứng dụng của công nghệ này trong sản xuất các thiết bị điện tử, năng lượng tái tạo và các hệ thống điện tử thông minh.
- **Khả năng mở rộng và cải tiến:** Mặc dù hệ thống máy tráng phủ hiện tại đã đạt được các tiêu chuẩn kỹ thuật ban đầu, nhưng vẫn tồn tại một số hạn chế, như sự phụ thuộc vào điều kiện môi trường và tính ổn định của dung dịch tiền chất. Các hướng nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào tối ưu hóa các thông số quá trình, cải tiến cấu trúc máy và tích hợp thêm các công nghệ kiểm soát tự động tiên tiến để nâng cao chất lượng sản phẩm.

Tóm lại, đề tài đã đóng góp vào việc phát triển một giải pháp kỹ thuật hiệu quả cho quá trình phủ màng mỏng trong chế tạo linh kiện chuyển đổi điện năng, đặc biệt

là nanogenerator. Các kết quả đạt được không chỉ khẳng định vai trò của phương pháp Doctor Blade Coating trong việc tạo ra lớp màng mỏng đồng nhất, mà còn chứng minh được tiềm năng ứng dụng của hệ thống tích hợp IoT trong việc giám sát và điều khiển quy trình sản xuất. Hy vọng rằng, các kết quả nghiên cứu của đề tài sẽ tạo nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo và đóng góp vào sự phát triển bền vững của công nghệ năng lượng tái tạo và các ứng dụng điện tử thông minh trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

- [1] Internet of things. <https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [2] Syed Nasimul Alam. A nanogenerator converts mechanical or vibrational energy into electrical energy using piezoelectric, triboelectric and pyroelectric effects. *Journal not available*, Year not available. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352507X23000434>.
- [3] Nanogenerators: An introduction. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978012821548700004X>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [4] Doctor blade coating. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/doctor-blade-coating>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [5] Nanogenerators: a new paradigm in blue energy harvesting. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128217092000049>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [6] Thin film deposition: Comparing coating methods. <https://www.ossila.com/pages/solution-processing-techniques-comparison>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [7] Solvent engineering for the formation of high-quality perovskite films: a review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X2303551X>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [8] Doctor blade coating: Method, coating thickness and design. <https://www.ossila.com/pages/doctor-blade-coating>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [9] 7 - roll-to-roll printing and coating techniques for manufacturing large-area flexible organic electronics. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781782420354000075>, 2025. Accessed: February 20, 2025.

- [10] A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X20300888>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [11] Strategies from small-area to scalable fabrication for perovskite solar cells. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2095495620305969>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [12] Prof.S.V.Munde Dr. V.M.Arole. Fabrication of nanomaterials by top-down and bottom-up approaches – an overview. *Journal not available*, Year not available. https://www.milliyaresearchportal.org/sites/default/files/25.Abst_29.pdf.
- [13] Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001868621002384>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [14] 3 - synthesis of carbon quantum dots. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978032390895500014X>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [15] Sol-gel. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/sol-gel>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [16] Các phương pháp chế tạo vật liệu nano. <http://www.nanophuckhang.com/2020/12/cac-phuong-phap-che-tao-vat-lieu-nano.html>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [17] A comprehensive review on counter electrodes for dye sensitized solar cells: A special focus on pt-tco free counter electrodes. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X18309903>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [18] Dip coating. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/dip-coating>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [19] W.-B. Chen, W.-R. Guo, W.-Y. Mou, and Z.-Z. Du. Comparing of inkjet printing versus spin coating for preparing fine structure hole transfer

and emitting layers in oled display construction. *Journal not available*, Year not available. https://www.researchgate.net/publication/329168521_Comparing_of_Inkjet_Printing_Versus_Spin_Coating_for_Preparing_Fine_Structure_Hole_Transfer_and_Emitting_Layers_in_OLED_Display_Construction.

- [20] Năng lượng tái tạo (renewable energy) là gì? các nguồn phổ biến và lợi ích. <https://oxalisadventure.com/vi/netzero/nang-luong-tai-tao/>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [21] Máy phát nano triboelectric như công nghệ năng lượng mới cho các hệ thống tự cung cấp năng lượng và như cảm biến cơ học và hóa học chủ động. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24079963/>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [22] Triboelectric nanogenerators as flexible power sources. <https://www.nature.com/articles/s41528-017-0007-8>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [23] Towards optimized triboelectric nanogenerators. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211285519304628>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [24] Energy harvesting. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/energy-harvesting>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [25] What is internet of things (iot): Overview and explanation. <https://aloa.co/blog/what-is-internet-of-things-iot-overview-and-explanation>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [26] se-ktq-150d. <https://mtixtl.com/products/se-ktq-150d>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [27] automatic-film-applicator. <https://www.ossila.com/products/automatic-film-applicator>, 2025. Accessed: February 20, 2025.
- [28] doctor-blade_p309., 2025. Accessed: February 20, 2025.

Contact angle. https://en.wikipedia.org/wiki/Contact_angle, 2025. Accessed: February 20, 2025.