

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



NGUYỄN THANH DUY

**NGHIÊN CỨU TỔNG HỢP THAN SINH HỌC TỪ
THÂN GIẢ CÂY CHUỐI CAVENDISH NHIỄM BỆNH
Fusarium oxysporum f. sp. cubense
ỨNG DỤNG TRONG PHÂN BÓN NÔNG NGHIỆP**

LUẬN VĂN THẠC SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Thành phố Hồ Chí Minh - 2026

NGUYỄN THANH DUY

NGÀNH HÓA VẬT CƠ

2026

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



NGUYỄN THANH DUY

**NGHIÊN CỨU TỔNG HỢP THAN SINH HỌC TỪ
THÂN GIẢ CÂY CHUỐI CAVENDISH NHIỄM BỆNH
Fusarium oxysporum f. sp. cubense
ỨNG DỤNG TRONG PHÂN BÓN NÔNG NGHIỆP**

LUẬN VĂN THẠC SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Hóa vô cơ

Mã số: 8440113

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

TS. LÊ NGHIÊM ANH TUẤN

TS. TRẦN THIỆN KHÁNH

Thành phố Hồ Chí Minh - Năm 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đề tài nghiên cứu trong luận văn này là công trình nghiên cứu của tôi dựa trên những tài liệu, số liệu do chính tôi tự tìm hiểu và nghiên cứu. Chính vì vậy, các kết quả nghiên cứu đảm bảo trung thực và khách quan nhất. Đồng thời, các kết quả này chưa từng xuất hiện trong bất cứ một nghiên cứu nào. Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực nếu sai tôi hoàn toàn chịu trách nhiệm trước pháp luật.

Nguyễn Thanh Duy

LỜI CẢM ƠN

Trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận văn này, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn đến Quý Thầy, Cô của Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam đã tận tình giảng dạy, truyền đạt cho tôi những kiến thức chuyên môn, phương pháp nghiên cứu khoa học và tạo điều kiện thuận lợi trong suốt quá trình học tập. Những kiến thức và sự chỉ dẫn quý báu của Quý Thầy, Cô là nền tảng quan trọng giúp tôi có thể triển khai và hoàn thành luận văn này.

Tôi xin trân trọng cảm ơn TS. Lê Nghiêm Anh Tuấn và TS. Trần Thiện Khánh, là những người hướng dẫn khoa học đã dành nhiều thời gian, tâm huyết để định hướng, góp ý chuyên môn, chỉnh sửa nội dung và động viên tôi trong suốt quá trình thực hiện luận văn. Sự hướng dẫn tận tình, nghiêm túc và trách nhiệm của Quý Thầy đã giúp tôi từng bước hoàn thiện đề tài một cách hệ thống và khoa học.

Tôi xin chân thành cảm ơn gia đình, bạn bè và đồng nghiệp, những người luôn ở bên cạnh động viên, chia sẻ và hỗ trợ tôi cả về tinh thần lẫn công việc trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu. Sự quan tâm và đồng hành của mọi người là nguồn động lực to lớn giúp tôi vượt qua những khó khăn để hoàn thành luận văn này.

Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn đến Viện Nghiên cứu Cải tiến và Phát triển bền vững iLap đã hỗ trợ về cơ sở vật chất, thiết bị và điều kiện nghiên cứu để tôi có thể hoàn thành luận văn này.

Xin trân trọng cảm ơn.

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	1
Lý do chọn đề tài	1
Mục đích nghiên cứu	2
Những đóng góp của luận văn	2
Chương 1. TỔNG QUAN	4
1.1. Tiềm năng kinh tế từ cây chuối	4
1.2. Hiện trạng cây chuối bị nhiễm bệnh Foc	7
1.3. Nền kinh tế tuần hoàn từ than sinh học	13
1.4. Các phương pháp sản xuất than sinh học.....	16
1.4.1. Phương pháp nhiệt phân chậm	16
1.4.2. Phương pháp nhiệt phân nhanh	17
1.4.3. Phương pháp carbon hoá thủy nhiệt.....	18
1.4.4. Phương pháp khí hoá.....	19
1.4.5. Một số phương pháp chuyển hoá sinh khối	21
1.5. Tình hình nghiên cứu trên thế giới	22
1.6. Tình hình nghiên cứu trong nước	23
Chương 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU.....	25
2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu	25
2.1.1. Đối tượng nghiên cứu.....	25
2.1.2. Phạm vi nghiên cứu.....	25
2.2. Hóa chất, nguyên liệu và thiết bị	27
2.3. Thực nghiệm	29
2.3.1. Tổng hợp than sinh học	29
2.3.2. Tổng hợp phân bón NK - than sinh học	31
2.3.3. Đặc tính của than sinh học	33
2.3.4. Đánh giá than sinh học ứng dụng trong phân bón.....	34
2.4. Phương pháp phân tích vật liệu	37
2.4.1. Phương pháp SEM-EDX.....	37
2.4.2. Phương pháp BET	38
2.4.3. Phương pháp FTIR.....	39
2.4.4. Phương pháp XRD	40

2.4.5. Phương pháp TGA	41
Chương 3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN	42
3.1. Đặc tính của than sinh học	42
3.1.1. Kết quả phân tích SEM-EDX.....	42
3.1.2. Kết quả phân tích BET	48
3.1.3. Kết quả phân tích nguyên tố và phân tích kỹ thuật	50
3.1.4. Kết quả phân tích FTIR.....	55
3.1.5. Kết quả phân tích XRD	59
3.1.6. Kết quả phân tích TGA	62
3.2. Hiệu quả loại bỏ mầm bệnh Foc	64
3.3. Đặc tính của phân bón NK - than sinh học	65
3.3.1. Hàm lượng thành phần hữu cơ của than sinh học	65
3.3.2. Đặc tính hoá lý của phân bón NK - than sinh học.....	66
3.3.3. Kết quả đánh giá chất lượng phân bón NK - than sinh học	67
3.3.4. Thực nghiệm ứng dụng phân bón NK - than sinh học	69
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	72
Kết luận.....	72
Kiến nghị	73
TÀI LIỆU THAM KHẢO	74

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. Các thành phần lignocellulose của chất thải sinh khối từ cây chuối và các phế phẩm nông nghiệp khác.....	6
Bảng 1.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến sự phát triển và sinh trưởng bào tử của nấm Foc sau 10 ngày ủ nuôi.....	11
Bảng 1.3. Ảnh hưởng của độ pH đến sự phát triển và sinh trưởng bào tử của nấm Foc sau 10 ngày ủ nuôi.....	12
Bảng 1.4. Các vật liệu carbon phổ biến.....	14
Bảng 1.5. Tổng hợp một số phương pháp chuyển hoá sinh khối.....	21
Bảng 2.1. Hoá chất và nguyên liệu.....	27
Bảng 2.2. Thiết bị và dụng cụ	28
Bảng 2.3. Ký hiệu mẫu TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc.....	30
Bảng 2.4. Ký hiệu mẫu thí nghiệm phân bón.....	32
Bảng 3.1. Kết quả diện tích bề mặt riêng, thể tích lỗ xốp, đường kính lỗ xốp của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc.....	48
Bảng 3.2. Kết quả diện tích bề mặt riêng, thể tích lỗ xốp, đường kính lỗ xốp của TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh Foc.....	49
Bảng 3.3. Đặc tính của thân giả cây chuối chưa nhiệt phân và TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc	51
Bảng 3.4. So sánh đặc tính TSH BCF-500 từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc và TSH từ thân giả cây chuối không nhiễm bệnh của các nhóm nghiên cứu khác.....	53
Bảng 3.5. Bảng tổng hợp kết quả phân tích FTIR của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc	57
Bảng 3.6. Hàm lượng thành phần hữu cơ của TSH	66
Bảng 3.7. Đặc tính hoá lý của phân bón NK - than sinh học	66
Bảng 3.8. Kết quả thử nghiệm hạt phân bón NK - than sinh học.....	68
Bảng 3.9. Kết quả ảnh hưởng của phân bón NK - than sinh học đến kích thước của cây chuối Cavendish sau 60 ngày trồng	70

DANH MỤC HÌNH

Hình 1.1. Sản lượng chuối trên thế giới năm 2024	4
Hình 1.2. Thành phần lignocellulose của thân giả cây chuối.....	5
Hình 1.3. Đường cong phân hủy nhiệt của hemicellulose, cellulose và lignin trong phương pháp phân tích TGA.....	7
Hình 1.4. Sự lây lan không kiểm soát của bệnh Foc trên cây chuối	8
Hình 1.5. Vòng đời của nấm Foc trên cây chuối.....	9
Hình 1.6. Triệu chứng của cây chuối bị nhiễm bệnh Foc	10
Hình 1.7. Ứng dụng của TSH trong nền kinh tế tuần hoàn.....	13
Hình 1.8. Ứng dụng của TSH làm giàu chất dinh dưỡng đối với đất và sự phát triển của thực vật	15
Hình 1.9. Quy trình sản xuất bằng phương pháp nhiệt phân chậm	16
Hình 1.10. Quy trình sản xuất bằng phương pháp nhiệt phân nhanh.....	17
Hình 1.11. Quy trình sản xuất bằng phương pháp carbon hoá thủy nhiệt.....	19
Hình 1.12. Quy trình sản xuất bằng phương pháp khí hoá.....	20
Hình 1.13. Xu hướng nghiên cứu trên thế giới về bệnh Foc theo quốc gia và năm.	22
Hình 2.1. Sơ đồ triển khai nghiên cứu.....	26
Hình 2.2. Sơ đồ khối quy trình tổng hợp TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc.....	29
Hình 2.3. Sơ đồ khối quy trình tổng hợp phân bón NK - than sinh học	31
Hình 2.4. Phương pháp SEM	37
Hình 2.5. Phương pháp EDX	38
Hình 2.6. Phương pháp BET	39
Hình 2.7. Phương pháp FTIR	40
Hình 2.8. Phương pháp XRD	40
Hình 2.9. Phương pháp TGA	41
Hình 3.1. Kết quả phân tích SEM-EDX của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc.....	42

Hình 3.2. Kết quả phân tích SEM-EDX của TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh Foc	45
Hình 3.3. Kết quả phân tích FTIR của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc	55
Hình 3.4. Kết quả phân tích FTIR của TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh Foc	58
Hình 3.5. Kết quả phân tích XRD của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc	60
Hình 3.6. Kết quả phân tích TGA của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc	62
Hình 3.7. Kết quả hiệu quả loại bỏ mầm bệnh Foc trên TSH	64
Hình 3.8. Kết quả thực nghiệm ứng dụng phân bón NK – than sinh học trên cây chuối giống Cavendish	69

DANH MỤC VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Nội dung tiếng Anh	Nội dung tiếng Việt
Foc	<i>Fusarium oxysporum f. sp. cubense</i>	<i>Fusarium oxysporum f. sp. cubense</i>
TSH	Biochar	Than sinh học
FTIR	Fourier-transform infrared spectroscopy	Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier
XRD	X-ray diffraction	Nhiễu xạ tia X
TGA	Thermogravimetric analysis	Phân tích nhiệt trọng lượng
SEM	Scanning Electron Microscopy	Kính hiển vi điện tử quét
EDX	Energy-dispersive X-ray spectroscopy	Phổ tán xạ năng lượng tia X
BET	Brunauer-Emmett-Teller	Phân tích hấp phụ đẳng nhiệt Brunauer-Emmett-Teller
PDA	Potato Dextrose Agar	Môi trường thạch khoai tây Dextrose
QCVN		Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia
TCVN		Tiêu chuẩn Việt Nam

MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh nông nghiệp hiện nay phải đối mặt đồng thời với áp lực xử lý phế phẩm, suy giảm chất lượng đất và nguy cơ dịch bệnh trên cây trồng, việc tìm kiếm các hướng tận dụng sinh khối nông nghiệp theo mô hình kinh tế tuần hoàn đang trở thành yêu cầu cấp thiết. Đối với cây chuối, ngoài giá trị thu hoạch từ quả, quá trình canh tác còn tạo ra lượng lớn phế phẩm sau thu hoạch, trong đó thân giả chiếm tỷ lệ đáng kể. Khi cây chuối bị bệnh héo rũ do nấm *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc) gây ra, phần sinh khối này thường bị xem là nguồn lây nhiễm tiềm tàng, chủ yếu bị tiêu hủy, làm gia tăng áp lực môi trường và lãng phí nguồn nguyên liệu giàu lignocellulose. Trong khi đó, thân giả cây chuối là loại sinh khối có hàm lượng cellulose và hemicellulose tương đối cao, phù hợp cho quá trình chuyển hóa nhiệt để tạo thành than sinh học (TSH), một vật liệu có tiềm năng trong cải tạo đất, giữ dinh dưỡng và phát triển sản phẩm phân bón.

Xuất phát từ thực tiễn đó, đề tài tập trung nghiên cứu tổng hợp TSH từ thân giả cây chuối Cavendish nhiễm bệnh Foc nhằm vừa xử lý sinh khối theo hướng an toàn hơn, vừa nâng cao giá trị sử dụng của phế phẩm nông nghiệp. Hướng nghiên cứu này không chỉ dừng ở việc tạo ra TSH từ một nguồn nguyên liệu đặc thù, mà còn hướng đến việc làm rõ đặc tính cấu trúc, thành phần khoáng, khả năng loại bỏ mầm bệnh và tiềm năng ứng dụng trong phân bón nông nghiệp. Qua đó, đề tài góp phần gợi mở một hướng tiếp cận mới trong khai thác phế phẩm cây chuối gắn với kinh tế tuần hoàn, giảm phát thải và nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên sinh khối trong thực tiễn sản xuất.

Lý do chọn đề tài

Việc phát triển hướng nghiên cứu tận dụng nguồn phế phẩm nông nghiệp là mục tiêu quan trọng hướng đến mô hình kinh tế tuần hoàn. Nông nghiệp Việt Nam phát sinh khoảng 159 triệu tấn phế phẩm mỗi năm, trong đó lĩnh vực trồng trọt chiếm 56,6%, chăn nuôi chiếm 39%, thủy sản chiếm 0,6% và lâm nghiệp chiếm 3,8%. Riêng nhóm phế phẩm trồng trọt chiếm khoảng 90 triệu tấn, nhưng tỷ lệ thu gom và tái sử dụng mới khoảng 52,2%. Tiềm năng từ phế phẩm cây trồng có thể tương đương khoảng 43 triệu tấn phân hữu cơ, 10,8 triệu tấn phân đạm urê, 1,6 triệu tấn supe lân đơn và 2,2 triệu tấn kali sunphat mỗi năm, song hiệu quả khai thác hiện vẫn còn thấp do thiếu đồng bộ về chính sách, công nghệ, chi phí và thị trường [1].

Hiện nay tình hình về bệnh Foc vẫn là vấn đề khó khăn đối với người nông dân. Khi chuối bị nhiễm bệnh Foc thì biện pháp duy nhất là tiêu hủy, chưa có hướng tận dụng hiệu quả nguồn sinh khối nhiễm bệnh sau khi loại bỏ khỏi ruộng [2]. Các

công bố khoa học hiện nay đều tập trung việc nghiên cứu giống mới hoặc kiểm soát sinh học nấm Foc nhưng chưa mang lại giá trị hiệu quả về mặt kinh tế.

Vì vậy, đề tài luận văn “Nghiên cứu tổng hợp TSH từ thân chuối Cavendish nhiễm bệnh Foc ứng dụng trong phân bón nông nghiệp” được lựa chọn như một hướng tiếp cận mới, vừa xử lý sinh khối nhiễm bệnh theo hướng an toàn hơn, vừa mở rộng giá trị sử dụng của thân giả chuối trong mô hình kinh tế tuần hoàn. Đề tài không chỉ giải quyết một vấn đề khoa học còn bỏ ngỏ, mà còn có ý nghĩa thực tiễn trong việc chuyển hóa một dòng phế phẩm mang nguy cơ dịch bệnh thành vật liệu có giá trị gia tăng, góp phần giảm áp lực chất thải nông nghiệp và tăng hiệu quả sử dụng tài nguyên sinh khối ở Việt Nam.

Mục đích nghiên cứu

Đề tài được thực hiện nhằm xây dựng cơ sở khoa học cho việc chuyển hóa thân giả cây chuối Cavendish nhiễm bệnh Foc thành TSH bằng phương pháp nhiệt phân trong môi trường hạn chế oxy, từ đó định hướng ứng dụng vật liệu thu được trong lĩnh vực phân bón. Nghiên cứu tập trung làm rõ ảnh hưởng của nhiệt độ nhiệt phân đến sự hình thành và biến đổi tính chất của TSH. Đồng thời đánh giá khả năng loại bỏ mầm bệnh còn tồn tại sau xử lý nhiệt. Từ vật liệu TSH thu được, đề tài tiếp tục lựa chọn mẫu phù hợp để phát triển thành hạt phân bón chứa nèn TSH, qua đó xem xét vai trò của vật liệu trong việc mang dinh dưỡng, giữ nước, giữ ẩm và hỗ trợ cải thiện môi trường vùng rễ. Để đạt được mục đích nêu trên, đề tài thực hiện các nội dung nghiên cứu sau:

Nội dung 1: Tổng hợp TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc

Nội dung 2: Phân tích và đánh giá đặc trưng vật liệu của TSH

Nội dung 3: Đánh giá hiệu quả loại bỏ mầm bệnh Foc của TSH

Nội dung 4: Nghiên cứu tổng hợp phân bón NK - TSH

Nội dung 5: Đánh giá đặc tính và chất lượng của phân bón NK - TSH

Nội dung 6: Thực nghiệm ứng dụng phân bón NK - TSH trên cây chuối giống

Những đóng góp của luận văn

Luận văn đã góp phần đề xuất một hướng tiếp cận mới trong xử lý và tận dụng thân giả cây chuối Cavendish nhiễm bệnh Foc theo định hướng kinh tế tuần hoàn. Đây là nguồn sinh khối đặc thù, vừa có tiềm năng làm nguyên liệu giàu lignocellulose cho quá trình nhiệt phân, vừa đặt ra yêu cầu xử lý an toàn do gắn với nguy cơ dịch bệnh trong sản xuất chuối. Việc định hướng chuyển hóa nguồn sinh khối này thành

TSH đã góp phần bổ sung một cách tiếp cận mới trong nghiên cứu vật liệu carbon từ phế phẩm nông nghiệp, không chỉ dừng ở mục tiêu tận dụng chất thải mà còn gắn với bài toán xử lý sinh khối nhiễm bệnh theo hướng có giá trị sử dụng.

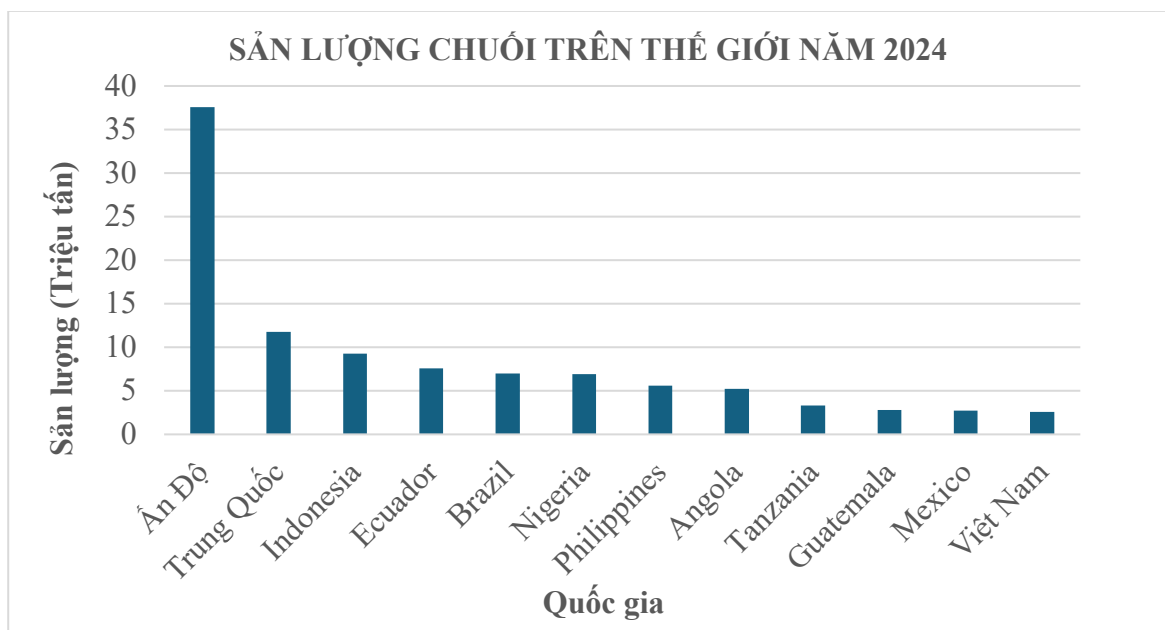
Luận văn cũng xây dựng được định hướng nghiên cứu tương đối toàn diện, từ tổng hợp vật liệu, khảo sát đặc tính, đánh giá tính an toàn sinh học đến xem xét khả năng ứng dụng trong phân bón nông nghiệp. Cách tiếp cận này cho phép nhìn nhận TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh không chỉ như một sản phẩm trung gian của quá trình nhiệt phân mà như một hệ vật liệu có tiềm năng ứng dụng thực tiễn. Qua đó, luận văn góp phần làm rõ cơ sở để liên kết giữa nghiên cứu vật liệu, xử lý phế phẩm nông nghiệp và phát triển sản phẩm phục vụ sản xuất nông nghiệp bền vững.

Chương 1. TỔNG QUAN

1.1. Tiềm năng kinh tế từ cây chuối

Chuối là cây ăn quả nhiệt đới phổ biến ở nhiều quốc gia. Trái chuối có giá trị về mặt kinh tế và dinh dưỡng đối với an ninh lương thực, là thực phẩm chủ yếu của 400 triệu người trên thế giới [3]. Chuối đứng thứ hai trong danh mục trái cây sau cam, quýt và cây trồng quan trọng thứ tư sau gạo, lúa mì và ngô. Việc tiêu thụ chuối đã tăng lên cùng với những thay đổi trong chế độ ăn uống, đặc biệt là để tăng lượng chất xơ, một chất dinh dưỡng thiết yếu. Thành phần dinh dưỡng trong trái chuối chứa nhiều chất xơ, đường, vitamin B6, vitamin C, mangan, axit amin và các chất phenolic như axit gallic, catechin, epicatechin, tannin và anthocyanin nên nó là một loại thực phẩm ít chất béo với năng lượng cung cấp cao [4].

Về quy mô sản xuất chuối, Ấn Độ là quốc gia đang dẫn đầu với xấp xỉ 37,6 triệu tấn năm 2024, tiếp đến là Trung Quốc 11,8 triệu tấn và Indonesia 9,3 triệu tấn; châu Á đóng góp khoảng 51% sản lượng thế giới. Tại Việt Nam, chuối là loại cây ăn quả đứng đầu về diện tích và sản lượng.

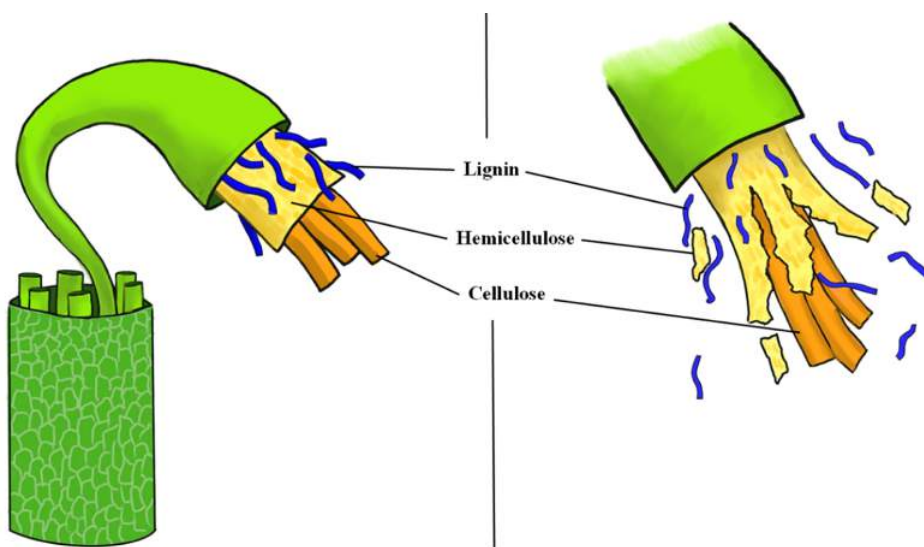


Hình 1.1. Sản lượng chuối trên thế giới năm 2024 [5]

Dựa theo hình 1.1, sản lượng chuối trên thế giới năm 2024, Việt Nam có diện tích trồng chuối khoảng 144.600 ha, với sản lượng đạt trên 2,6 triệu tấn [5]. Một số tỉnh có diện tích, sản lượng lớn là Đồng Nai, Tây Ninh và các tỉnh miền núi phía Bắc. Các giống chuối thường được trồng là Siamese, Plantain, Vietnamese aromatic, ... Đặc biệt giống chuối Cavendish hiện đang là giống phổ biến nhất trên thị trường nông sản Việt Nam vì các giống chuối này chiếm ưu thế nhất trong các mô hình canh tác thương mại cho năng suất cao và phù hợp với xuất khẩu.

Diện tích trồng chuối trên toàn thế giới tăng từ 4,8 triệu ha năm 2000 lên 5,9 triệu ha vào năm 2024. Do đó ngành trồng chuối ngày càng phát triển, đồng thời kéo theo phát sinh dòng phát thải lớn từ quả, vỏ, cuống buồng đến thân giả và lá. Mỗi tấn quả thu hoạch tạo ra khoảng 78,4% phế phẩm, trong đó có khoảng 3000 kg thân, 150 kg cuống, 480 kg lá. Sau mùa thu hoạch cho thấy tiềm năng nguồn phế phẩm rất dồi dào nếu được khai thác theo hướng tuần hoàn [6]. Đặc trưng sinh học của cây chuối là hệ thân giả cấu tạo từ các bẹ lá cuộn xoắn, có vòng đời ngắn và thường bị loại bỏ hoàn toàn sau thu hoạch để phục vụ tái sinh chồi mới. Hệ quả là lượng phế phẩm phát sinh tại vườn rất lớn, tạo ra áp lực về xử lý môi trường nhưng cũng mở ra tiềm năng sử dụng như một nguồn tài nguyên tái tạo giàu carbon [3].

Với nguồn tài nguyên phế phẩm từ cây chuối dồi dào, kéo theo tổng hàm lượng lignocellulose cao đã khiến nó trở thành một nguyên liệu khả thi để sản xuất TSH. Đây là thành phần chiếm tỷ lệ rất lớn trong sinh khối thực vật hình thành từ quá trình quang hợp, thường được xem là nguồn năng lượng hữu cơ tái tạo quan trọng của tự nhiên. Cellulose thường chiếm tỷ lệ cao nhất, thành phần của cellulose là các mạch thẳng dài, các đơn vị glucose liên kết với nhau bằng liên kết 1,4 β glucozit. Phần lớn cellulose có cấu trúc tinh thể nên bền, có tính đàn hồi và khó bị hòa tan trong nước hoặc một số dung môi [7]. Hemicellulose cấu tạo từ các đường pentose và đường hexose. Mạch hemicellulose ngắn và có nhánh nên hemicellulose dễ bị thủy phân hơn so với cellulose. Cellulose và hemicellulose là các đại phân tử polysaccharide được cấu tạo từ nhiều đơn vị đường. Do đó hai thành phần này thường được xem là nguồn tiềm năng cho các quá trình chuyển hóa sinh học như sản xuất ethanol. Ngược lại, lignin là polymer có bản chất thơm, hình thành từ các tiền chất phenylpropanoid, góp phần tạo độ bền cấu trúc và ảnh hưởng rõ đến tính chất nhiệt của sinh khối.



Hình 1.2. Thành phần lignocellulose của thân giả cây chuối [8]

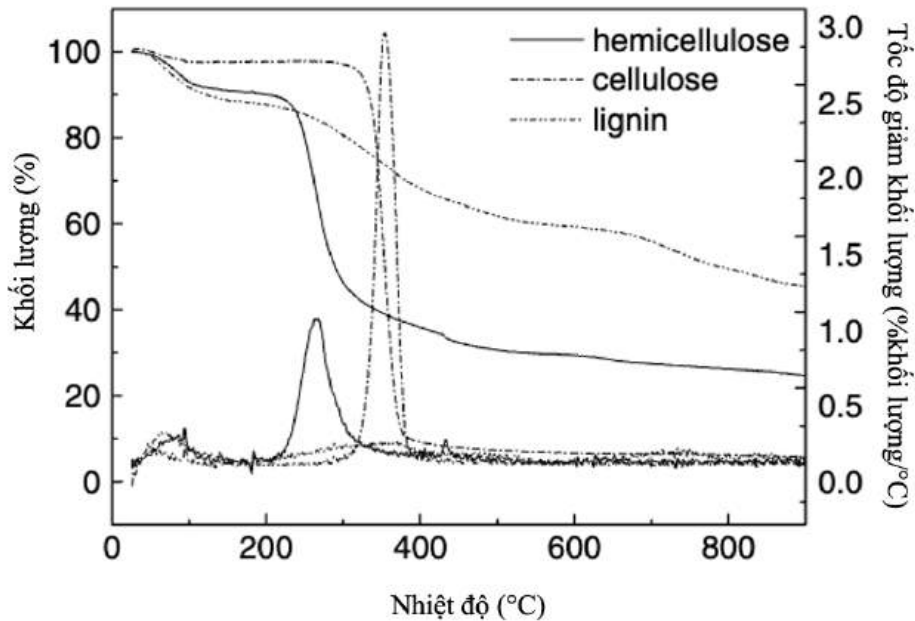
Cấu trúc lignocellulosic này không chỉ xác định tính chất cơ học của vật liệu mà còn quyết định hiệu suất và cơ chế chuyển hóa trong quá trình nhiệt phân. Cellulose và hemicellulose là hai thành phần dễ phân hủy nhiệt, góp phần hình thành hệ vi mao quản, trong khi lignin là pha carbon bền nhiệt giúp duy trì cấu trúc khung của TSH.

Bảng 1.1. Các thành phần lignocellulose của chất thải sinh khối từ cây chuối và các phế phẩm nông nghiệp khác

Phế phẩm	Ligin (%)	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Tài liệu tham khảo
Vỏ chuối	6 - 12	7 - 10	40 - 45	[9]
Lá chuối	9 - 17	26 - 43	20 - 34	[10]
Thân giả chuối	5 - 18	35 - 50	20 - 30	[11]
Bã mía	17 - 32	32 - 45	20 - 32	[12]
Vỏ trấu	15 - 20	29 - 35	12 - 29	[13]
Vỏ dừa	30 - 50	20 - 30	15 - 30	[14]
Lõi ngô	9 - 20	35 - 45	28 - 42	[15]

Thành phần lignocellulose của các phế phẩm chuối cho thấy sự phân bố không đồng đều giữa các bộ phận. Hàm lượng hemicellulose trong vỏ chuối đạt 41,38%, trong khi cellulose lại nổi bật ở thân giả với 38,48% và lignin cao nhất ở lá với 10,58% [16]. Hàm lượng hemicellulose, cellulose và lignin trong phế phẩm chuối có xu hướng tương đồng với nhiều loại sinh khối khác như bã mía, vỏ trấu và vỏ dừa. Cho thấy phế phẩm chuối là nguồn nguyên liệu lignocellulose điển hình và có thể khai thác theo các hướng chuyển hóa nhiệt.

Sự khác biệt về hàm lượng cellulose, hemicellulose, lignin giữa các phế phẩm chuối sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến cơ chế phân hủy và khả năng hình thành pha rắn sau nhiệt phân. Trong đó, hemicellulose là thành phần kém bền nhiệt hơn, thường phân hủy ở vùng nhiệt độ thấp hơn, còn cellulose phân hủy mạnh hơn ở vùng nhiệt độ trung bình và lignin có xu hướng bền nhiệt hơn, phân hủy chậm trong khoảng nhiệt độ rộng.



Hình 1.3. Đường cong phân hủy nhiệt của hemicellulose, cellulose và lignin trong phương pháp phân tích TGA [17]

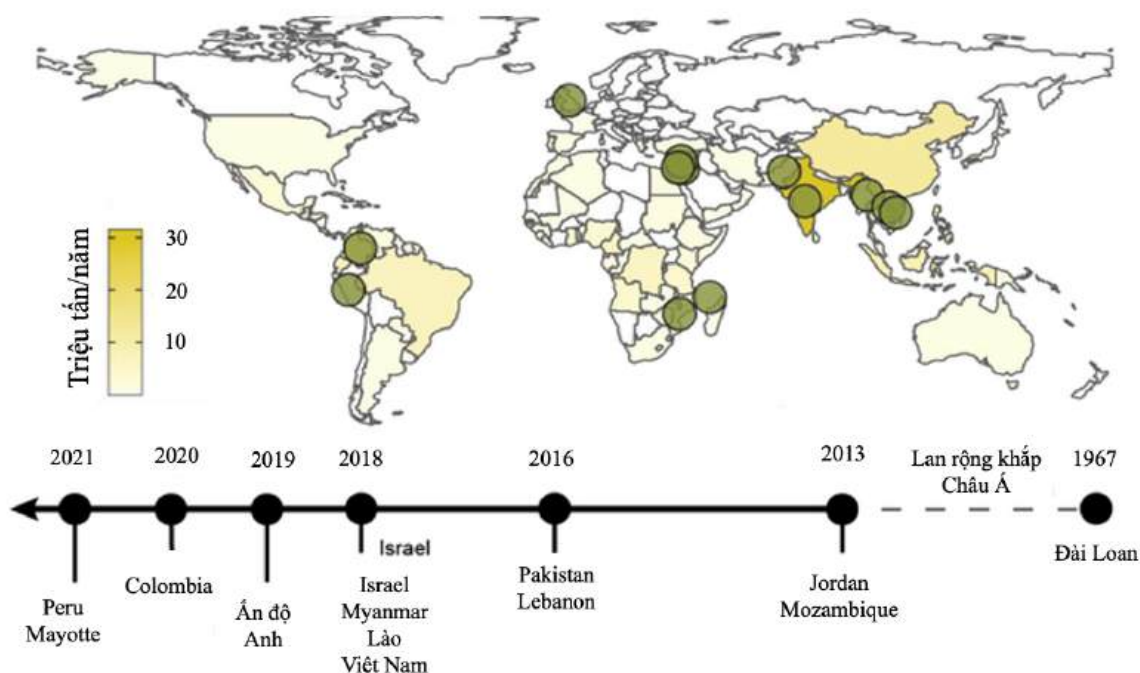
Hemicellulose và cellulose phân hủy tương đối nhanh trong các khoảng nhiệt độ đặc trưng, còn lignin phân hủy chậm và kéo dài trên khoảng nhiệt độ rất rộng. Cụ thể, phần mất khối lượng chính của hemicellulose tập trung từ 250 °C đến 350 °C, cellulose tập trung từ 325 °C đến 400 °C, trong khi lignin có thể giảm khối lượng từ 300 °C đến 550 °C và để lại phần cặn rắn rất cao khoảng 40% khối lượng [17].

Lignin là pha bền nhiệt nên khi hàm lượng lignin cao, quá trình chuyển hóa không kết thúc gọn trong vùng nhiệt độ trung bình như cellulose hay hemicellulose mà tiếp tục kéo dài khi nhiệt độ tăng. Khi nhiệt độ tăng, mức độ carbon hoá tăng, cấu trúc carbon trở nên ổn định hơn, nhưng lượng sản phẩm bay hơi thường tăng theo, làm giảm hiệu suất thu hồi pha rắn. Đồng thời, quá trình khử oxy và khử chức diễn ra mạnh hơn, có thể làm suy giảm một phần nhóm chức bề mặt giàu oxy, là những tâm tương tác quan trọng đối với cơ chế giữ và giải phóng dinh dưỡng khi ứng dụng trong đất. Do đó, thân giả cây chuối là nguồn nguyên liệu phù hợp cho quá trình tổng hợp TSH, nhờ hàm lượng cellulose và hemicellulose tương đối cao, trong khi hàm lượng lignin thấp hơn so với nhiều loại sinh khối khác.

1.2. Hiện trạng cây chuối bị nhiễm bệnh Foc

Bệnh héo vàng chuối, còn gọi là bệnh Panama, do nấm Foc gây ra, là một trong những bệnh được ghi nhận sớm và có ảnh hưởng sâu rộng nhất đối với sản xuất chuối trên thế giới. Những mô tả sớm về bệnh được ghi nhận lần đầu tại Úc vào năm 1874, trước khi trở thành vấn đề mang tính toàn cầu, Foc là tác nhân gây bệnh làm

thiệt hại kinh tế đến các vùng trồng giống chuối Gros Michel đơn canh ở nhiều khu vực trong thế kỷ 20, bao gồm châu Mỹ, châu Phi và vùng Viễn Đông [18]. Sau đó, bệnh tiếp tục được ghi nhận tại Costa Rica và Panama vào năm 1913, nơi khoảng 80.000 ha vùng trồng giống chuối Gros Michel đã bị phá hủy ở Mỹ Latinh bởi chủng Foc R1 từ năm 1890 đến năm 1960. Việc thay thế giống chuối Gros Michel bằng nhóm giống chuối Cavendish có tính kháng đã giúp ngành chuối thương mại phục hồi trong một giai đoạn, tuy nhiên hướng phát triển dựa trên độc canh giống chuối Cavendish cũng tạo điều kiện để một biến thể độc lực mới của Foc xuất hiện và khuếch tán trên phạm vi rộng [19].

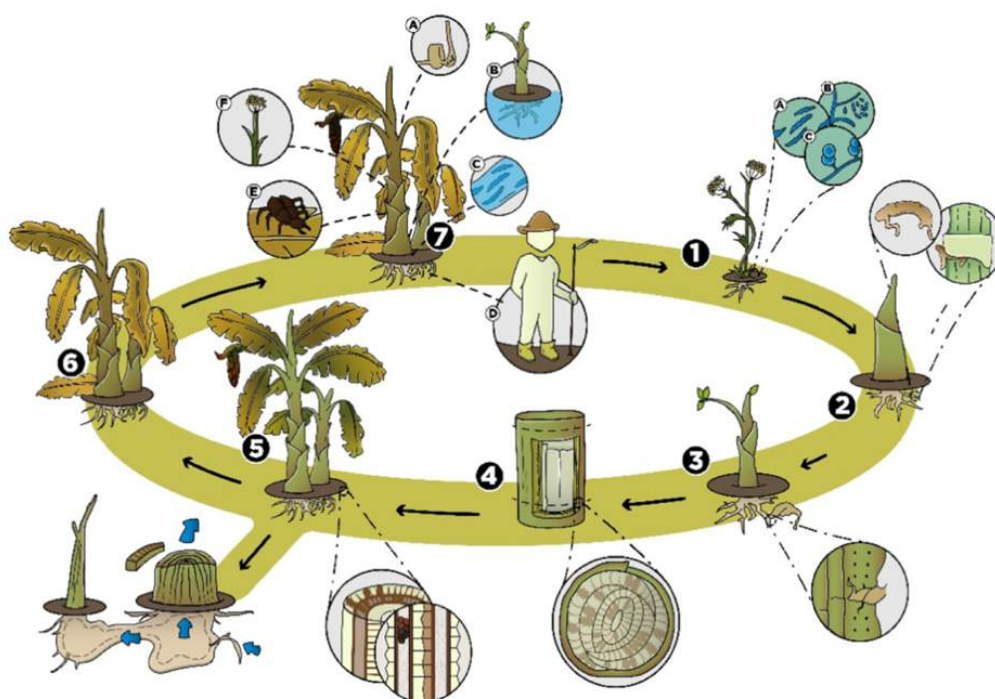


Hình 1.4. Sự lây lan không kiểm soát của bệnh Foc trên cây chuối [20]

Các bằng chứng dịch tễ và tổng thuật gần đây cho thấy chủng Tropical Race 4 (TR4) của Foc đã được phát hiện sớm tại Đài Loan vào năm 1967, nhiều khả năng liên quan đến sự xâm nhập của cây giống bị nhiễm từ Indonesia. Từ ổ dịch ban đầu, tác nhân lan vào nhiều tỉnh của Trung Quốc như Phúc Kiến, Quảng Đông, Quảng Tây, Hải Nam và Vân Nam, đồng thời tiếp tục mở rộng ra Đông Nam Á và Australia trong các thập niên sau đó, gây chết cây kể cả giống Cavendish vốn được coi là kháng bệnh [21]. Sự lan rộng toàn cầu của chủng Foc TR4 thường được mô tả như một chuỗi sự kiện xâm nhập nối tiếp bắt nguồn từ trung tâm xuất hiện ở châu Á. Các tổng thuật cho thấy sau các ghi nhận ban đầu tại Đài Loan, tác nhân đã mở rộng trong khu vực Đông Nam Á, rồi đến năm 2013 xuất hiện tại Jordan. Sau đó các ổ dịch tiếp tục được ghi nhận ở Trung Đông, tiểu lục địa Ấn Độ, châu Phi và gần đây là khu vực Mỹ Latinh [22].

Về cơ chế lan truyền, nấm Foc dễ lây lan từ các vật liệu trồng nhiễm bệnh, đất bám trên thiết bị canh tác, đặc biệt là khi thâm canh quy mô lớn làm tăng tần suất vận chuyển cây giống và máy móc giữa các vùng trồng. Điều này được xem là nguyên nhân thúc đẩy sự phát tán của Foc TR4 từ các vùng đã nhiễm sang các quốc gia lân cận như Lào, Myanmar, Việt Nam và Campuchia vào năm 2018, khiến khu vực tiểu vùng sông Mekong trở thành một trọng điểm rủi ro mới trong lịch sử lan truyền của bệnh. Ngoài việc tổng hợp diễn biến lây lan, các phân tích quan hệ di truyền còn gợi ý rằng các quần thể Foc TR4 ở Trung Đông và Nam Á có thể phản ánh các sự kiện xâm nhập khác nhau. Qua đó cho thấy nguy cơ tái xâm nhập luôn tồn tại ngay cả khi một vùng đã triển khai các biện pháp kiểm soát nội vùng.

Sau giai đoạn lây lan ở khu vực châu Á, các báo cáo xâm nhiễm mới cho thấy bệnh tiếp tục vượt ra ngoài khu vực này và hình thành các ổ dịch ở Trung Đông và châu Phi. Một số mốc lan truyền được ghi nhận gồm các phát hiện tại Jordan, tiếp đến là các báo cáo tại Pakistan, Lebanon, Israel và Oman, và đặc biệt là sự hiện diện của TR4 tại Mozambique được công bố vào năm 2015, đánh dấu bước lan sang lục địa châu Phi. Song song, việc ghi nhận TR4 tại Ấn Độ làm gia tăng quan ngại vì đây là quốc gia sản xuất chuối lớn, trong đó Cavendish chiếm tỷ trọng đáng kể trong cơ cấu sản xuất và tiêu thụ [23].

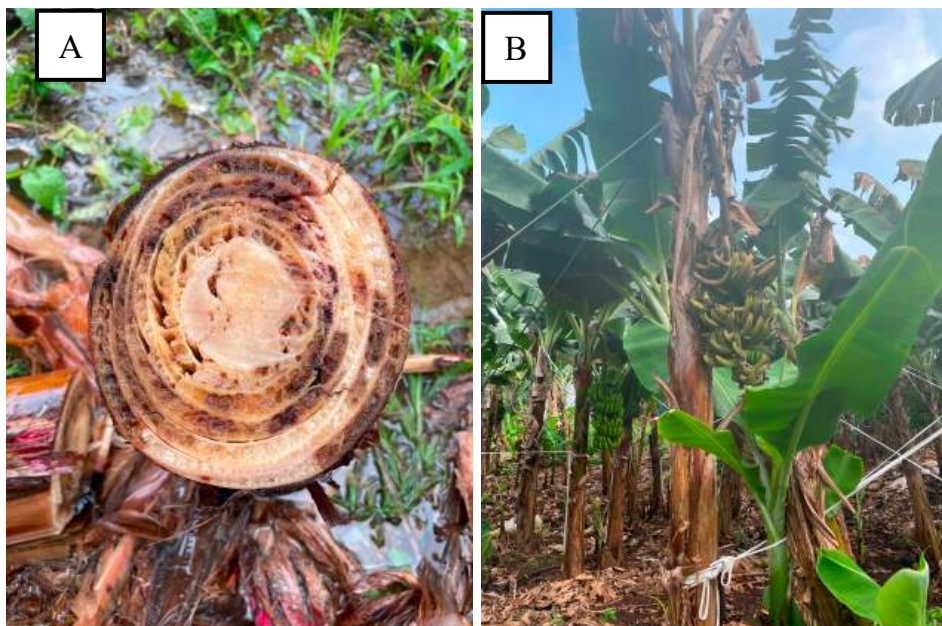


Hình 1.5. Vòng đời của nấm Foc trên cây chuối [24]: (1) Bào tử Foc tồn tại trong đất, (2) bào tử nảy mầm, (3) xâm nhiễm rễ, (4) nhiễm củ, (5) hình thành các triệu chứng héo rũ, (6) cây bị héo rũ hoàn toàn và (7) phát tán mầm bệnh: a. giống trồng; b. nước thoát hoặc dòng chảy; c. nước tưới; d. công nhân; e. mọt; f. cỏ dại

Foc là nguyên nhân gây bệnh héo vàng Panama trên chuối, có khả năng tồn tại dai dẳng trong đất dưới dạng chlamyospore tới 30 năm, có khả năng phát tán rộng rãi và làm tắc nghẽn bó mạch, dẫn tới vàng lá từ lá già ở tầng thấp, lan dần vào gân giữa, héo rũ và nứt thân già. Khi cắt ngang thân rễ cho thấy sự đổi màu vàng, đỏ, nâu đặc trưng của các mao dẫn [25].

Vòng đời của nấm gây bệnh héo vàng Panama trên chuối, được duy trì theo cơ chế tồn lưu lâu dài trong môi trường đất và tàn dư cây bệnh. Sau đó chúng xâm nhiễm lại vào rễ cây khỏe và tiếp tục nhân lên trong mao dẫn của cây. Ở giai đoạn khởi phát, nguồn nấm thường có sẵn trong đất hoặc bám theo tàn dư rễ, thân già và các phần cây đã bị bệnh từ vụ trước. Khi có cây chủ phù hợp, kết hợp với điều kiện ngoại cảnh thuận lợi, nấm nảy mầm, tiếp cận vùng rễ, đặc biệt là các rễ non hoặc vị trí rễ bị tổn thương trong canh tác. Từ rễ, sợi nấm phát triển vào bên trong mao dẫn, tiến dần đến lõi và bắt đầu xâm nhập vào hệ mạch gỗ [26].

Khi đã hiện diện trong hệ mạch, nấm sinh trưởng và phát triển theo chiều dọc thân cây thông qua các bó mạch. Quá trình này làm suy giảm khả năng vận chuyển nước và dinh dưỡng của cây. Đồng thời kích hoạt các phản ứng sinh lý bất lợi khiến cây biểu hiện triệu chứng vàng lá, héo rũ và giảm sinh trưởng [27]. Ở các cây bị nhiễm nặng, bó mạch trong thân già có thể đổi màu theo hướng nâu hóa, phản ánh mức độ xâm chiếm của nấm trong mao dẫn. Triệu chứng thường trở nên rõ rệt ở giai đoạn cây trưởng thành, giai đoạn tạo buồng, khi nhu cầu nước, dinh dưỡng tăng cao, dẫn đến cây suy kiệt và chết.



Hình 1.6. Triệu chứng của cây chuối bị nhiễm bệnh Foc: (A) Mặt cắt ngang thân già cây chuối và (B) Biểu hiện bệnh héo rũ của cây chuối

Sau khi cây chết hoặc bị chặt bỏ, nấm tiếp tục hình thành nguồn bệnh trong mao dẫn nhiễm và trong tàn dư thực vật. Sau đó quay trở lại đất để duy trì quần thể gây bệnh cho các vụ sau. Quá trình phát tán có thể xảy ra khi đất nhiễm nấm bám theo dụng cụ canh tác, giày dép, phương tiện cơ giới hoặc bị cuốn theo nước tưới và dòng chảy bề mặt sang các vị trí khác trong vườn và sang vùng trồng mới [28]. Nếu giống hoặc cây con mang mầm bệnh được đưa vào khu vực trồng, chu trình xâm nhiễm sẽ được khởi động lại từ ban đầu, làm tăng nguy cơ hình thành ổ bệnh và lan rộng trên diện tích lớn.

Bảng 1.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến sự phát triển và sinh trưởng bào tử của nấm Foc sau 10 ngày ủ nuôi [29]

STT	Nhiệt độ (°C)	Mức độ sinh trưởng bào tử
1	10	Yếu
2	15	Trung bình yếu
3	20	Tốt
4	25	Rất tốt
5	30	Rất tốt
6	35	Tốt
7	40	Yếu
8	45	Yếu
9	50	-

Theo kết quả nghiên cứu của Somesh và cộng sự về sinh học của Foc, tốc độ phát triển tăng dần từ 15 - 30 °C và đạt cực đại ở 30 °C trong 10 ngày ủ nuôi [29]. Và mức độ phát triển bào tử được đánh giá là cao nhất ở nhiệt độ từ 25 - 35°C. Khi nhiệt độ tăng dần vượt 35 °C, sự phát triển của nấm bắt đầu giảm và ở 40 °C và 45 °C sự phát triển bị ức chế đáng kể. Khi nhiệt độ môi trường tăng đến 50 °C các bào tử của nấm Foc hoàn toàn không phát triển [29]. Do đó giả thuyết rằng nếu sử dụng nhiệt độ nhiệt phân cao để tổng hợp TSH, có thể kiểm soát được việc loại bỏ mầm bệnh Foc.

Bảng 1.3. Ảnh hưởng của độ pH đến sự phát triển và sinh trưởng bào tử của nấm Foc sau 10 ngày ủ nuôi [29]

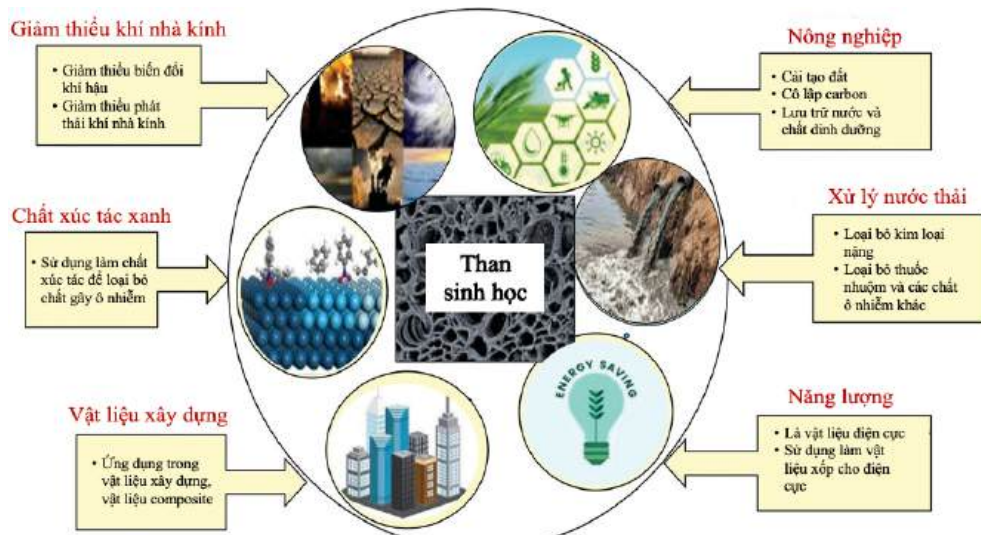
STT	pH	Mức độ sinh trưởng bào tử
1	3,0	Yếu
2	4,0	Yếu
3	4,5	Yếu
4	5,0	Trung bình yếu
5	5,5	Tốt
6	6,5	Rất tốt
7	7,0	Rất tốt
8	7,5	Tốt
9	8,0	Yếu

Song song đó, độ pH môi trường nuôi cây cũng ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng sinh trưởng của nấm Foc. Các bào tử nấm Foc phát triển yếu ở môi trường axit mạnh, ở khoảng pH 3,0 - 4,5. Khi pH tăng lên khoảng 5,0 - 5,5; nấm Foc bắt đầu có dấu hiệu phát triển ổn định hơn và phát triển tốt nhất trong vùng pH 6,5 - 7,0. Khi môi trường chuyển dần sang kiềm, đặc biệt ở pH $\geq 8,0$ thì khả năng sinh trưởng của các bào tử nấm Foc bắt đầu suy giảm. Điều này cho thấy điều kiện tối ưu cho nấm hoạt động là vùng trung tính, ẩm khoảng 30 °C và pH 6,5 - 7,0 [29]. Trong bối cảnh đó, việc xử lý sinh khối cây chuối nhiễm bệnh theo hướng nhiệt phân yếm khí để tạo TSH được xem là một hướng tiếp cận cần thiết, vì không chỉ góp phần giảm nguy cơ lưu tồn và phát tán dịch hại mà còn tái định hướng nguồn phế phẩm này vào ứng dụng phân bón và cải tạo đất. Dưới góc độ kinh tế tuần hoàn, việc tái sử dụng phế phẩm chuối là một chiến lược khả thi nhằm giảm phát thải, gia tăng giá trị sử dụng của sinh khối và nâng cao hiệu quả chuỗi cung ứng nông nghiệp. Khi được bổ sung vào đất, TSH không chỉ góp phần cải thiện cấu trúc đất, độ ẩm và khả năng giữ dinh dưỡng mà còn hỗ trợ ổn định hệ sinh thái đất và định hướng phát triển nông nghiệp bền vững.

1.3. Nền kinh tế tuần hoàn từ than sinh học

Trong bối cảnh chuyển dịch từ mô hình kinh tế tuyến tính sang mô hình kinh tế tuần hoàn, việc tận dụng nguyên liệu sinh khối làm nguyên liệu đầu vào cho các vật liệu carbon đang được xem là một hướng tiếp cận có ý nghĩa cả về môi trường lẫn kinh tế. Việc gia tăng sản xuất vật liệu từ sinh khối tái tạo thay cho nguồn dầu mỏ được xem là một giải pháp đổi mới nhằm giảm các vấn đề môi trường gắn với sự phân bố không đồng đều của tài nguyên dầu mỏ và sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch [30]. Theo mô hình kinh tế tuần hoàn, trọng tâm là giảm thiểu tái sử dụng, tái chế vật liệu nhằm hạn chế phát sinh chất thải và gia tăng hiệu quả sử dụng tài nguyên. Một trong những hướng đi có giá trị là chuyển đổi phế phẩm nông nghiệp thành TSH, từ đó tạo ra sản phẩm có thể quay trở lại phục vụ hệ thống nông nghiệp như một vật liệu có giá trị gia tăng [31], [32].

TSH không chỉ được xem là sản phẩm của quá trình chuyển hóa sinh khối, mà còn là một mắt xích quan trọng trong hệ sinh thái kinh tế tuần hoàn. TSH có thể được ứng dụng trong nông nghiệp như một chất cải tạo đất, hỗ trợ lưu giữ carbon và nâng cao hiệu quả sử dụng dinh dưỡng. Trong xử lý nước thải, TSH như một vật liệu hấp phụ đối với kim loại nặng và các chất ô nhiễm hữu cơ. Trong lĩnh vực môi trường, TSH là một giải pháp góp phần giảm phát thải khí nhà kính. Đồng thời, TSH còn có tiềm năng ứng dụng trong xúc tác xanh, vật liệu xây dựng và vật liệu điện cực phục vụ lưu trữ năng lượng [33].



Hình 1.7. Ứng dụng của TSH trong nền kinh tế tuần hoàn [33]

Trong nhóm vật liệu carbon, TSH, than củi và than hoạt tính khác nhau về mục đích tạo thành, nguyên liệu đầu vào, quy trình sản xuất và phạm vi ứng dụng. TSH được tạo từ vật chất hữu cơ như sinh khối từ nguồn phế phẩm nông nghiệp và có thể

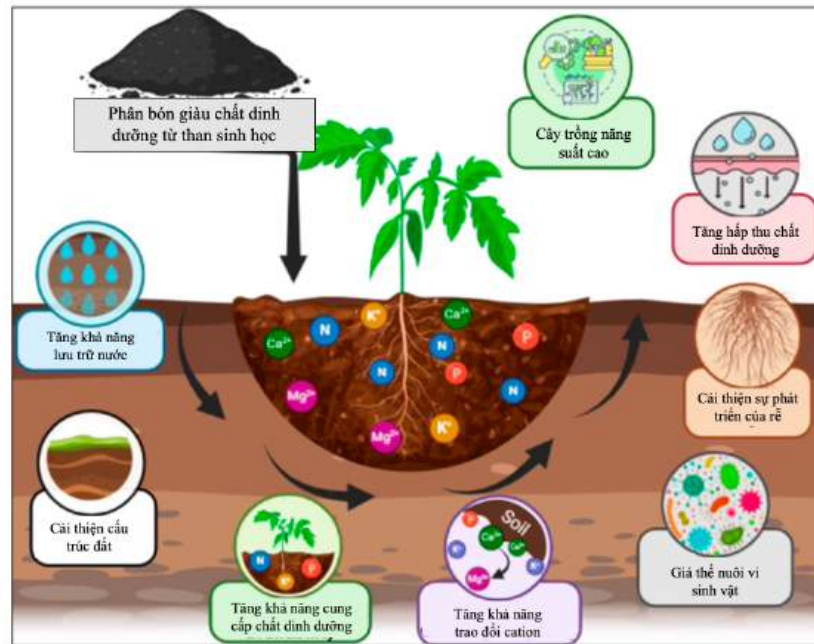
được sản xuất bằng các phương pháp nhiệt phân, khí hoá, carbon hoá thuỷ nhiệt. Than củi là vật liệu rắn màu đen, giàu carbon, có tính cháy cao và thường được tạo thành qua quá trình nung than chậm. Than hoạt tính là vật liệu có diện tích bề mặt rất cao, được tạo thành sau giai đoạn carbon hoá và hoạt hóa nhằm tăng mạnh khả năng hấp phụ [34].

Bảng 1.4. Các vật liệu carbon phổ biến

Tiêu chí	TSH	Than củi	Than hoạt tính	Tài liệu tham khảo
Định nghĩa	Vật liệu carbon có nguồn gốc từ hữu cơ hoặc sản phẩm nông nghiệp	Chất rắn màu đen, xốp, được tạo ra từ gỗ hoặc vật liệu thực vật trong trạng thái vô định hình	Vật liệu carbon có diện tích bề mặt cao, được tạo thành sau quá trình carbon hoá và hoạt hóa	[35]
Nguyên liệu đầu vào	Phế phẩm nông nghiệp, trấu, phân chuồng, gỗ, cây bụi, cỏ và cành cây	Gỗ cứng	Nguồn dầu mỏ, phế phẩm nông nghiệp, sinh khối và nước thải công nghiệp	[34]
Đặc tính	Khả năng hấp phụ cao và độ xốp lớn	Tính bất ẩm cao	Khả năng hấp phụ rất cao	[35]
Quá trình sản xuất	Nhiệt phân, khí hóa, carbon hoá thuỷ nhiệt	Nung than bằng lò hoặc nhiệt phân chậm.	Có hai giai đoạn chính là carbon hoá bằng khí hóa, nhiệt phân và carbon hoá thuỷ nhiệt, sau đó là giai đoạn hoạt hóa	[34], [35]
Chi phí	Chi phí thấp	Chi phí thấp	Chi phí cao do cần nhiệt độ cao	[34]
Ứng dụng	Lọc nước, xử lý nước thải và cải tạo đất	Nguồn năng lượng sử dụng làm nhiên liệu đốt nấu	Lọc nước, xử lý nước thải, dược phẩm và tưới tiêu nước	[36], [37]

Dựa vào bảng 1.4 cho thấy TSH là vật liệu carbon đặc biệt phù hợp với các quốc gia có nền sản xuất nông nghiệp phát triển, nơi nguồn phế phẩm nông nghiệp luôn dồi dào và nhu cầu tái sử dụng tài nguyên trong nội bộ hệ thống canh tác rất lớn.

Đối với sản phẩm chuối, sau khi thu hoạch để lại gần 78,4% lượng phế phẩm bị bỏ lại dưới dạng chất thải làm phát sinh trên toàn cầu có thể đạt khoảng 114,08 triệu tấn, gây ra nhiều vấn đề môi trường nếu không được thu hồi và tái sử dụng [38]. Các phế phẩm này lại chứa hàm lượng đáng kể cellulose, hemicellulose và xơ tự nhiên, nhờ đó có thể được chuyển hóa thành nhiên liệu sinh học, phân bón hữu cơ, vật liệu hấp phụ và nhiều sản phẩm có giá trị khác, góp phần vào kinh tế tuần hoàn [39].



Hình 1.8. Ứng dụng của TSH làm giàu chất dinh dưỡng đối với đất và sự phát triển của thực vật [40]

Trong lĩnh vực nông nghiệp, TSH hiện được xem là một trong những vật liệu có vai trò nổi bật nhất trong việc thúc đẩy kinh tế tuần hoàn, vì nó có thể tham gia đồng thời vào chu trình carbon, nước, dinh dưỡng và năng lượng. Theo kết quả nghiên cứu của tác giả Jindo và các cộng sự cho thấy TSH đã được sử dụng rộng rãi trong nông nghiệp và môi trường như một công cụ hiệu quả để giảm chất thải và nâng cao hiệu quả của kinh tế tuần hoàn. Nghiên cứu này cũng nhấn mạnh rằng việc bổ sung TSH có thể làm giảm phát thải NH_3 , N_2O , cải thiện khả năng giải phóng đạm thông qua tăng hòa tan với các thành phần khoáng trong đất. Đồng thời TSH cũng góp phần cải thiện pH và nâng cao khả năng trao đổi cation cao [41], [42].

Mặt khác, việc ứng dụng TSH trong nông nghiệp bền vững đối với cây trồng ngày càng được quan tâm. Sự có mặt của TSH trong phân bón thương mại giúp ổn định giải phóng chất dinh dưỡng, phù hợp với khả năng hấp thu thực tế của cây trồng. Khi sử dụng phân bón kết hợp với TSH, TSH như lớp màng bao bảo vệ, tránh tình trạng chất dinh dưỡng thất thoát lãng phí chất dinh dưỡng, tối ưu chi phí mà vẫn đem

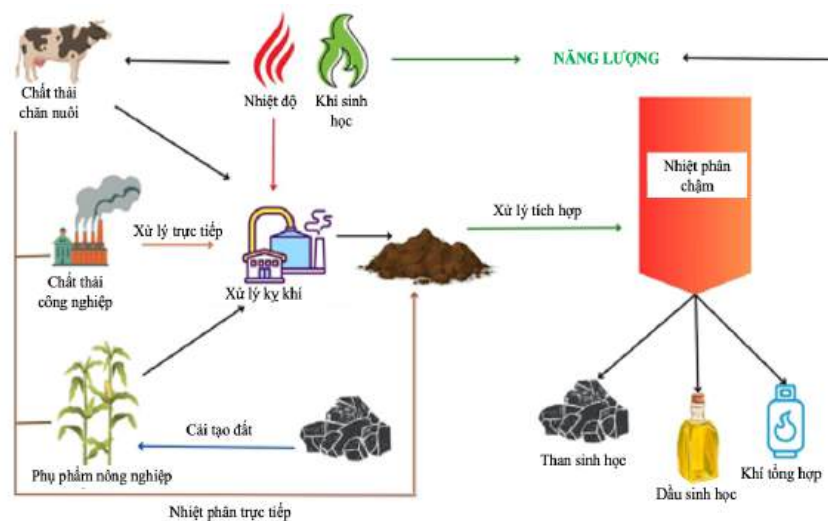
lại năng suất hiệu quả kinh tế cao. Do đó TSH ngày càng nhận được nhiều sự quan tâm trong việc ứng dụng vào phân bón nhà chậm, nâng cao năng suất cây trồng. Cách tiếp cận này được xem là thân thiện với môi trường và góp phần duy trì năng suất dài hạn của hệ thống canh tác nông nghiệp bền vững [42].

1.4. Các phương pháp sản xuất than sinh học

Các phương pháp sản xuất TSH hiện nay chủ yếu dựa trên các quá trình chuyển hóa nhiệt của sinh khối. Tùy theo môi trường phản ứng và mức độ cung cấp oxy, sinh khối có thể được chuyển hóa theo hướng tạo sản phẩm rắn là TSH, sản phẩm lỏng là dầu sinh học và sản phẩm khí là khí tổng hợp. Quá trình phân hủy chính của sinh khối thường diễn ra mạnh trong khoảng từ 200 °C đến 400 °C, trong đó hemicellulose phân hủy chủ yếu từ 250 °C đến 350 °C, cellulose từ 325 °C đến 400 °C và lignin là cấu phần bền nhiệt hơn, phân hủy trong khoảng từ 300 °C đến 550 °C. Sự khác biệt này giúp ích cho việc lựa chọn phương pháp có thể làm thay đổi đáng kể tỷ lệ thu hồi TSH và đặc tính cấu trúc bề mặt của sản phẩm [43].

1.4.1. Phương pháp nhiệt phân chậm (Slow pyrolysis)

Nhiệt phân chậm là một dạng nhiệt phân sinh khối trong điều kiện thiếu oxy, được sử dụng khi mục tiêu là thu hồi pha rắn giàu carbon là TSH. Điểm đặc trưng của phương pháp là tốc độ gia nhiệt thấp và thời gian lưu dài, nhờ đó quá trình chuyển hóa diễn ra từ từ và có xu hướng tăng tỷ lệ tạo than nhiều hơn so với các chế độ nhiệt phân nhanh. Nhiệt phân chậm thường được thực hiện ở vùng nhiệt độ trung bình, phổ biến từ khoảng 350 °C đến 500 °C hoặc lên đến 600 °C tùy nguyên liệu và thiết kế thiết bị [44]. Hiệu suất thu hồi TSH của nhiệt phân chậm có thể dao động rộng theo điều kiện công nghệ; theo một số tổng hợp cân bằng khối lượng, tỷ lệ thu hồi TSH có thể đạt khoảng 35%, phần còn lại phân bố vào pha lỏng và pha khí [44].



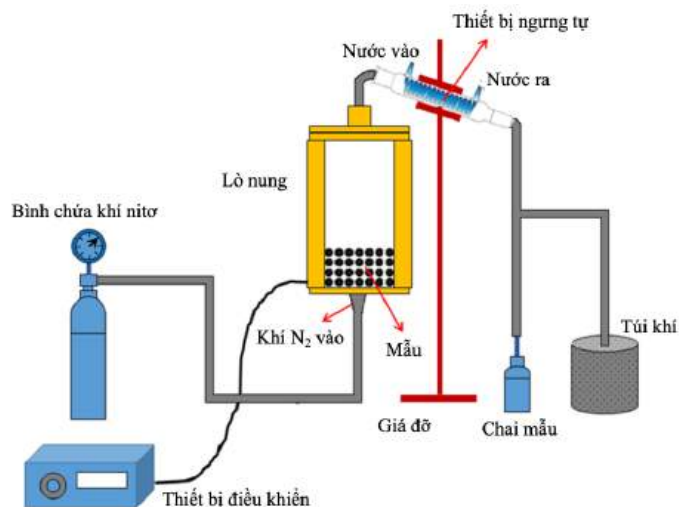
Hình 1.9. Quy trình sản xuất bằng phương pháp nhiệt phân chậm [40]

Khi nhiệt độ tăng, mức độ carbon hoá của sản phẩm thường tăng, đồng thời có thể thúc đẩy sự phát triển đặc trưng bề mặt do quá trình loại bỏ hợp chất bay hơi diễn ra mạnh hơn. Tuy nhiên, hiệu suất thu hồi của than có xu hướng giảm khi khử bay hơi và các phản ứng cracking diễn ra sâu hơn, làm chuyển dịch khối lượng pha rắn sang pha lỏng và pha khí [45]. Tốc độ gia nhiệt cũng ảnh hưởng đến hiệu suất tạo than. Gia nhiệt quá nhanh làm hơi nhiệt phân thoát ra và rời khỏi vùng nhiệt độ cao trong thời gian ngắn, từ đó hạn chế cơ hội xảy ra các phản ứng thứ cấp có lợi cho hình thành pha rắn và hệ quả thường là giảm tỷ lệ thu hồi TSH [46]. Ví dụ, TSH thu được từ quá trình nhiệt phân gỗ ở nhiệt độ trong khoảng 750 °C đến 900 °C, kết hợp thời gian lưu dài khoảng 30 phút, có thể tạo vật liệu than có chất lượng cao hơn cho các ứng dụng thay thế than và than cốc trong luyện kim [47]. Hàm lượng carbon của TSH thu được từ quá trình nhiệt phân chậm của gỗ tuyết tùng đo đạt tới 88,88% ở nhiệt độ 500 °C, tốc độ gia nhiệt 6 °C/phút [48].

Ngoài sản phẩm chính là TSH, dầu sinh học có thể xem như là sản phẩm phụ của quá trình nhiệt phân chậm. Trong quá trình nhiệt phân chậm, khí được giải phóng từ nguyên liệu có chứa các thành phần ngưng tụ ở nhiệt độ cao dưới dạng dầu sinh học, còn được gọi là "giám gỗ" do nó chứa một lượng axit axetic nhất định. Dầu sinh học chủ yếu bao gồm các hợp chất hữu cơ được oxy hóa, chẳng hạn như axit, este, ke-tones và phenol [49]. Nhiều hóa chất trong dầu sinh học này có thể được chiết xuất và sử dụng làm sản phẩm sinh học có giá trị gia tăng [50].

1.4.2. Phương pháp nhiệt phân nhanh (Fast pyrolysis)

Nhiệt phân nhanh là một phương pháp nhiệt phân được thiết kế để chuyển hóa sinh khối trong thời gian rất ngắn, mục tiêu thu hồi phần hơi nhiệt phân và ngưng tụ thành dầu sinh học.



Hình 1.10. Quy trình sản xuất bằng phương pháp nhiệt phân nhanh [51]

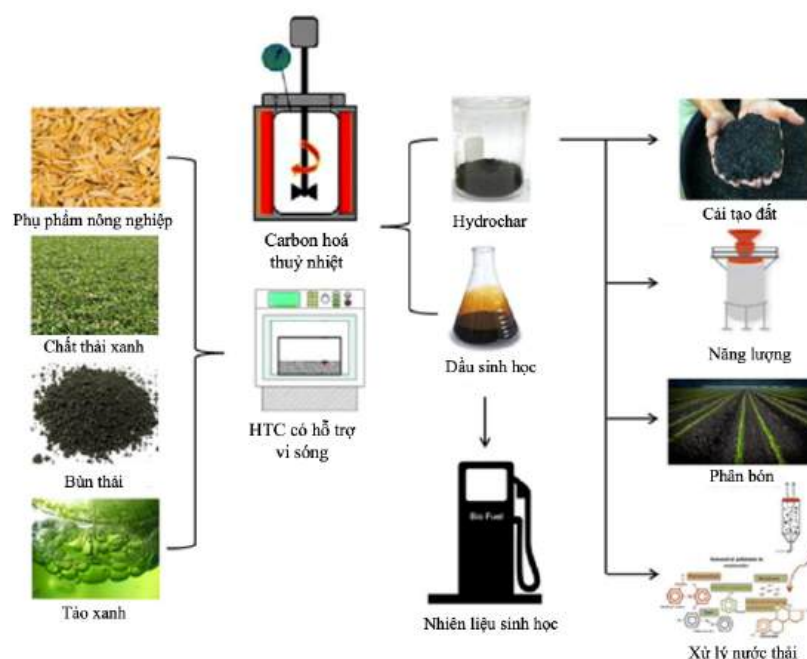
Quá trình nhiệt phân nhanh được thực hiện ở nhiệt độ từ 350 °C đến 1000 °C trong điều kiện không có oxy, tương tự như trường hợp nhiệt phân chậm, nhưng tốc độ gia nhiệt 17 °C/giây cao hơn nhiều so với nhiệt phân chậm [52]. Dưới điều kiện gia nhiệt nhanh, các nguyên liệu sinh khối phân hủy mạnh tạo ra hơi nhiệt và một lượng TSH (12%). Phần hơi có khả năng ngưng tụ được làm lạnh nhanh để thu dầu sinh học (75%) có màu nâu sẫm. Khi nhiệt phân ở nhiệt độ cao, chất bay hơi ở dạng khí giải phóng nhiều hơn, do đó phần khối lượng chuyển sang pha hơi và khí tăng lên. Đồng thời sẽ làm giảm tỷ lệ tạo ra than. Theo kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả Chen và cộng sự, năng suất TSH gỗ dương giảm từ 34,83 - 31,95 % ở nhiệt độ nhiệt phân 400 °C, tốc độ gia nhiệt tăng từ 10 - 50 °C/phút [53].

Chất lượng TSH trong nhiệt phân nhanh thường dựa trên hàm lượng carbon và cấu trúc bề mặt. Nhiệt độ nhiệt phân cao có xu hướng làm tăng hàm lượng carbon và diện tích bề mặt của TSH do giải phóng các chất bay hơi khỏi nguyên liệu sinh khối. Diện tích bề mặt riêng của TSH thân cây cải dầu tăng từ 1 - 45 m²/g khi nhiệt độ nhiệt phân tăng từ 200 °C đến 700 °C [54]. Hàm lượng carbon của TSH có nguồn gốc từ quá trình nhiệt phân mùn cưa thông tăng từ 70,68 - 78,75% khi nhiệt độ nhiệt phân tăng từ 550 °C đến 750 °C [55]. Ở tốc độ gia nhiệt cao, hàm lượng carbon và diện tích bề mặt riêng cao hơn so với TSH tốc độ gia nhiệt thấp vì tốc độ gia nhiệt khác nhau dẫn đến sự khác biệt về tốc độ khử bay hơi và do đó làm thay đổi cấu trúc của TSH [56].

1.4.3. Phương pháp carbon hoá thủy nhiệt (Hydrothermal Carbonization)

Carbon hoá thủy nhiệt là một quá trình chuyển hóa sử dụng nước làm môi trường phản ứng ở điều kiện nhiệt độ và áp suất cao. Nhờ đó có thể xử lý sinh khối ẩm mà không cần tiền xử lý sấy khô sâu. Cả quá trình carbon hoá thủy nhiệt diễn ra trong thiết bị kín, hệ được nạp khí nitơ để hạn chế oxy, sau đó gia nhiệt từ 180 °C đến 250 °C và duy trì khoảng 30 phút. Trong điều kiện này, nước vừa đóng vai trò dung môi vừa đóng vai trò xúc tác, thúc đẩy chuỗi phản ứng thủy phân, khử nước, ngưng tụ, qua đó hình thành sản phẩm rắn là hydrochar [57].

Đồng thời sản phẩm của phương pháp carbon hoá thủy nhiệt có thể hình thành pha lỏng giàu dinh dưỡng và pha khí mà thành phần chủ yếu là carbon dioxide, tùy theo điều kiện vận hành. Tuy nhiên, nếu kích thước hạt trong nguyên liệu lớn hơn 2 cm và thời gian phản ứng quá ngắn hơn 30 phút làm ảnh hưởng đến quá trình truyền nhiệt [58]. Kích thước hạt phải không đổi để cung cấp nhiệt và khối lượng truyền đồng đều. Mặt khác, sản phẩm cuối cần được ly tâm hoặc lọc để tách nước xử lý và thu hồi các hạt.



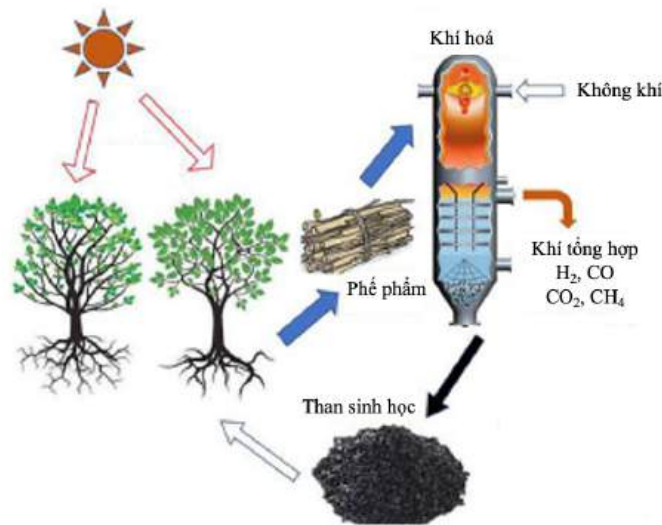
Hình 1.11. Quy trình sản xuất bằng phương pháp carbon hoá thủy nhiệt [59]

Hydrochar là sản phẩm rắn của phương pháp carbon hoá thủy nhiệt mang lại nhiều lợi ích đáng kể về môi trường, bao gồm giảm tới 81,5% GWP và giảm 96% độc tính đối với con người. Hydrochar có thể thay thế nhiên liệu hóa thạch như một mục tiêu chính trong các chiến lược phát thải âm và cô lập carbon ổn định ở dạng rắn, giảm phát thải khí nhà kính. Hydrochar giàu carbon và dễ cháy với các đặc tính tương tự như than đá subbitum [60]. Hydrochar được đặc trưng bởi hàm lượng carbon tương đối cao khoảng 48% và hàm lượng tro thấp khoảng 4,8%. Việc sử dụng hydrochar làm nhiên liệu cũng dựa trên hàm lượng tro tương đối thấp so với các chất thải sinh học khác [61]. Công nghệ này có thể được kết hợp với khí hóa, chuyển hoá sinh khối đạt hiệu suất thu hồi 90% sản phẩm rắn chất lượng cao [62]. Hàm lượng tro thấp và khả năng tương thích với các quá trình khí hóa càng nhấn mạnh tính hữu ích của nó đối với năng lượng sạch và môi trường.

1.4.4. Phương pháp khí hoá (Gasification)

Phương pháp khí hóa là một quá trình chuyển hóa nhiệt hóa trong đó sinh khối được chuyển đổi thành hỗn hợp khí bằng cơ chế oxy hóa một phần ở nhiệt độ cao. Trong quá trình này, sinh khối được tiếp xúc với lượng chất oxy hóa được kiểm soát. Quá trình cháy diễn ra trong điều kiện tiếp xúc với không khí, oxy tinh khiết hoặc hơi nước, làm cho các cấu phần hữu cơ bị phân hủy thành các khí đơn giản hơn. Thành phần khí thu được thường gồm H_2 , CO , CO_2 , một lượng nhỏ khí CH_4 và các khí khác. Sản phẩm khí tổng hợp có tỷ lệ H_2 và CO cao được xem là sản phẩm mang năng lượng linh hoạt và cũng là nguồn nguyên liệu cho nhiều ứng dụng công nghiệp khác nhau [63]. Phương pháp khí hóa sinh khối thường diễn ra trong khoảng 700 °C đến

1000 °C. Sản phẩm của phương pháp khí hóa là 85% khí tổng hợp, 10% dầu sinh học và 5% TSH, qua đó phản ánh đặc trưng của phương pháp ưu tiên là tạo pha khí hơn so với thu hồi than [64].



Hình 1.12. Quy trình sản xuất bằng phương pháp khí hoá [65]

Các nghiên cứu về phương pháp khí hóa thường tập trung vào cải thiện chất lượng, năng suất khí tổng hợp và đồng thời giảm các chất ô nhiễm như tro bay, NO, SO₂ và nhựa đường. Sự góp mặt của oxy trong phương pháp khí hóa cũng có hai mặt. Thứ nhất giúp thúc đẩy các phản ứng không đồng nhất, chuyển đổi carbon và có thể tạo điều kiện cho sự hình thành các lỗ xốp và làm tăng diện tích bề mặt riêng của TSH. Thứ hai là nhiều phân tử oxy hơn trong quá trình khí hóa có thể làm giảm hiệu suất thu hồi của TSH, làm giảm độ bền cơ học và cũng như làm tăng hàm lượng tro của sản phẩm.

Phương pháp khí hoá là phương pháp hữu ích với môi trường, góp phần giảm thiểu rác thải tại bãi chôn lấp và chuyển đổi chất thải carbon thành hydro để thay thế một phần nhiên liệu hóa thạch. Quá trình khí hóa có kiểm soát theo hướng biến đổi TSH tạo thành một sản phẩm rắn giàu carbon và làm tăng hiệu quả thu hồi các khí tổng hợp. Ngoài ra sự cải tiến của phương pháp khí hóa là quá trình khí hoá diễn ra trong môi trường nước siêu tới hạn, cho phép chuyển đổi chất thải ướt mà không cần sấy khô. Đồng thời, có thể thiết kế hệ thống tích hợp nhiệt phân, khí hóa và đốt cháy trong một thiết bị nhằm sản xuất khí hydro và tối ưu hóa thu hồi TSH. Việc tận dụng TSH như chất xúc tác để giảm nhựa đường từ 3,24 xuống 1,02 g/Nm³ (giảm 68,6%). Trong hệ thống tích hợp này, TSH được khí hóa với CO và hơi nước để tạo H₂, với tỷ lệ thu hồi tối đa đạt 3,91% [66]. Sản phẩm TSH từ quá trình khí hóa cũng có thể

tận dụng làm nguyên liệu cho các quá trình khí hóa tiếp theo nhằm chuyển đổi carbon còn lại thành khí nhiên liệu bổ sung.

1.4.5. Một số phương pháp chuyển hoá sinh khối

Ngoài bốn phương pháp sinh khối chủ yếu trên còn nhiều phương pháp khác như phương pháp sấy nhiệt (Torrefaction), phương pháp nhiệt phân có hỗ trợ lò vi sóng (Nhiệt phân có hỗ trợ vi sóng), phương pháp đốt truyền thống,... Tùy theo nguyên liệu đầu vào, điều kiện và mục tiêu sản phẩm cuối mà việc lựa chọn phương pháp sinh khối phù hợp nhằm tối ưu quy trình sản xuất.

Bảng 1.5. Tổng hợp một số phương pháp chuyển hoá sinh khối

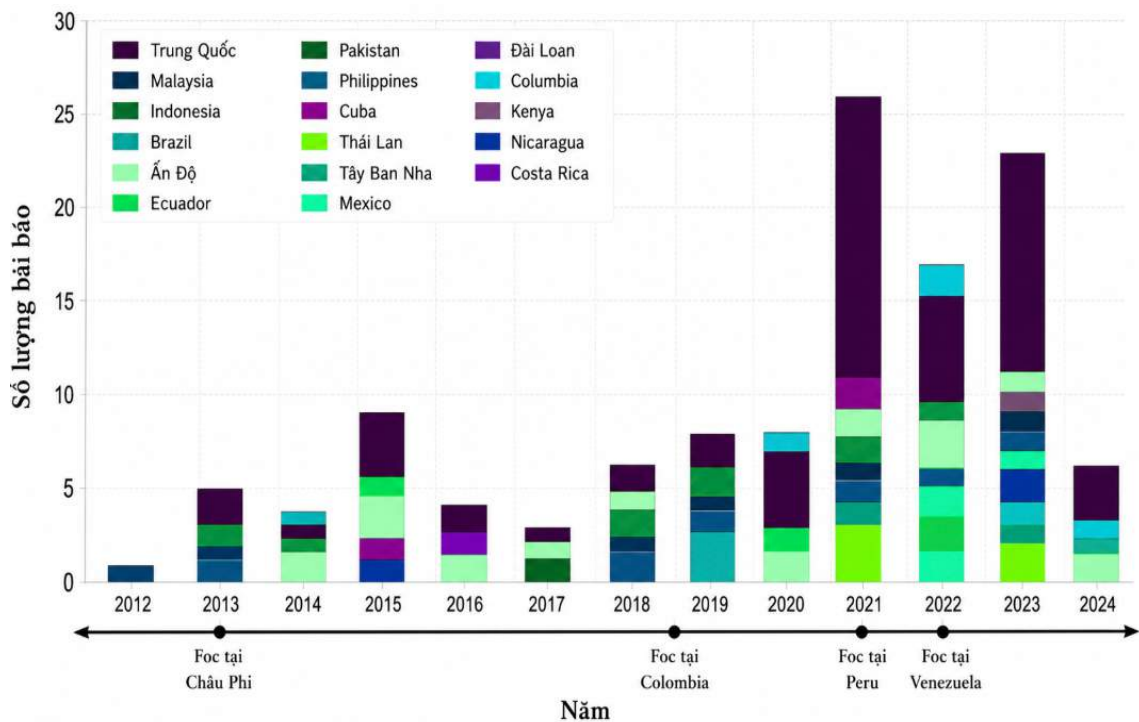
Phương pháp	Điều kiện nhiệt độ (°C)	Điều kiện đặc trưng	Dầu sinh học	TSH	Khí tổng hợp	Nguồn
Nhiệt phân chậm	350 - 700	Tốc độ gia nhiệt thấp, thời gian lưu dài	30%	35%	35%	[67]
Nhiệt phân nhanh	450 - 550	Tốc độ gia nhiệt rất cao	75%	12%	13%	[68]
Carbon hoá thủy nhiệt	150 - 400 (Áp suất cao)	Môi trường nước, áp suất cao trong thiết bị kín	5-20%	50-80%	2-5%	[69]
Khí hoá	>800	Oxy hóa một phần trong điều kiện kiểm soát lượng oxy	5%	10%	85%	[70]

Dựa vào bảng 1.5 tổng hợp một số phương pháp chuyển hoá sinh khối như phương pháp nhiệt phân chậm, nhiệt phân nhanh, carbon hoá thủy nhiệt và khí hóa. Các phương pháp khác nhau chủ yếu ở môi trường phản ứng, mức độ xử lý nhiệt và định hướng sản phẩm thu hồi. Trong đó, phương pháp nhiệt phân chậm và nhiệt phân nhanh đều là phương pháp nhiệt phân trong điều kiện thiếu oxy, nhưng nhiệt phân chậm ưu tiên pha rắn do tốc độ gia nhiệt thấp và thời gian lưu dài. Về phương pháp nhiệt phân nhanh thì mục tiêu là thu hồi tối đa sản phẩm hóa dầu sinh học nhờ tốc độ gia nhiệt rất cao và thời gian lưu hơi rất ngắn. Còn đối với phương pháp carbon hoá thủy nhiệt diễn ra trong môi trường nước và áp suất cao nên phù hợp với sinh khối ẩm và tạo hydrochar mang các đặc trưng khác so với TSH từ nguyên liệu khô. Cuối

cùng là phương pháp khí hóa trong môi trường phản ứng có oxy, nguyên liệu bị oxy hóa một phần ở nhiệt độ cao, do đó phương pháp này chỉ tập trung tạo khí tổng hợp, TSH chỉ là sản phẩm phụ. Với mục tiêu của đề tài là tổng hợp TSH và đánh giá khả năng ứng dụng TSH từ thân giả chuỗi nhiễm bệnh Foc trong phân bón, phương pháp nhiệt phân chậm được lựa chọn vì ưu tiên thu hồi pha rắn, cho hiệu suất tạo than cao hơn và phù hợp hơn so với nhiệt phân nhanh, khí hóa và carbon hóa thủy nhiệt [67].

1.5. Tình hình nghiên cứu trên thế giới

Trên thế giới nghiên cứu về Foc đã phát triển theo nhiều hướng song song, trong đó nổi bật nhất là dịch tễ học và lan truyền toàn cầu các chủng, chẩn đoán phân tử, cơ chế gây bệnh ở mức tế bào và gen, sàng lọc nguồn kháng trên cây chuối, cũng như phát triển các chiến lược kiểm soát sinh học và quản lý tổng hợp bệnh. Các nghiên cứu gần đây về chủng TR4 cũng như về Foc hiện là mối đe dọa lớn đối với sản xuất chuối toàn cầu, đặc biệt vì chủng này gây hại trên nhóm chuối Cavendish và nhiều giống khác. Trong khi các biện pháp kiểm soát hiệu quả còn rất hạn chế. Vì vậy, các nghiên cứu quốc tế đang tập trung mạnh vào phát hiện sớm, nhận diện chính xác tác nhân, khoanh vùng, kiểm dịch và phát triển các giải pháp quản lý bền vững [71].



Hình 1.13. Xu hướng nghiên cứu trên thế giới về bệnh Foc theo quốc gia và năm [72]

Các xu hướng nghiên cứu hiện nay trên thế giới được thể hiện rõ qua hình 1.13, phần lớn các công bố được xuất bản trong giai đoạn 2014 đến 2024, phản ánh sự tăng quan tâm đối với kiểm soát sinh học trên cây chuối. Từ năm 2020, số công

bổ tăng rõ rệt và đạt đỉnh vào năm 2021 với 25 bài, tiếp theo là năm 2023 với 23 bài và đến năm 2024 số lượng công bố về Foc có xu hướng giảm nhẹ. Trong tổng số 118 bài báo nghiên cứu về Foc, Trung Quốc là quốc gia có tỷ lệ nghiên cứu cao nhất, chiếm 55,9% và tiếp theo đó là Malaysia và Philippines, cho thấy châu Á vẫn là trung tâm nghiên cứu lớn nhất của lĩnh vực này [72].

Song song với đó, ở lĩnh vực vật liệu và nông nghiệp, các công trình nghiên cứu về TSH từ thân giả cây chuối lại tập trung chủ yếu vào cải thiện tính chất đất, gia tăng khả năng sử dụng dinh dưỡng và nâng năng suất cây trồng. Đối với nguồn nguyên liệu thân giả cây chuối tươi, hàm lượng dinh dưỡng K và N chiếm 2,87% và 2,02% cao hơn so với các nguồn nguyên liệu khác. Từ nguồn thành phần dinh dưỡng này cho thấy việc tổng hợp TSH từ thân giả cây chuối mang lại giá trị kinh tế cao trong ngành phân bón nông nghiệp [73]. Theo kết quả nghiên cứu khác về TSH từ thân giả chuối có thể làm tăng carbon hữu cơ đất lên 1,92%, tăng hàm lượng K lên 258,45 kg/ha, góp phần giảm 25% lượng phân bón và tăng năng suất 21% [74]. Đồng thời khi nghiên cứu so sánh giữa TSH từ thân giả cây chuối và TSH từ vỏ chuối, kết quả nghiên cứu cho thấy TSH từ thân giả cây chuối hiệu quả vượt trội hơn TSH từ vỏ chuối về diện tích bề mặt, độ xốp, khả năng trao đổi cation (CEC) và khả năng giữ nước của đất tăng lên đến 30% [75].

1.6. Tình hình nghiên cứu trong nước

Ở Việt Nam, bệnh héo vàng trên cây chuối do Foc hiện đã được ghi nhận tại nhiều vùng trồng chuối trên phạm vi cả nước và đang trở thành một vấn đề đáng quan tâm ở các vùng sản xuất tập trung. Một số vùng xuất hiện bệnh và gây hại nặng tại các vùng trồng chuối như Hưng Yên, Vĩnh Phúc, Phú Thọ và Lào Cai với diện tích nhiễm lên tới hàng trăm hecta ở mỗi vùng trồng [76]. Trước đây, do chủng Foc TR4 chưa được ghi nhận tại Việt Nam, nên công tác nghiên cứu và chuẩn bị cho quản lý phòng bệnh còn chưa được chú trọng đúng mức. Tuy nhiên, các nghiên cứu sau đó đã xác nhận sự hiện diện của chủng Foc TR4 ở Việt Nam từ năm 2018 [77]. Do chưa có sự chuẩn bị đầy đủ cho công tác quản lý phòng bệnh, Foc đã tiếp tục lây lan và hiện được ghi nhận tại hơn 20 tỉnh, thành trên cả nước.

Sự phân bố của Foc tại Việt Nam không đồng nhất giữa các khu vực. Từ năm 2018, trên 147 ruộng được khảo sát, có đến 23 ruộng nhiễm Foc như Lào Cai, Lai Châu, Hà Nội, Hưng Yên, Tây Ninh và Long An. Đến khảo sát năm 2020, Foc tiếp tục được xác nhận tại 37 trên 85 ruộng, phản ánh sự tồn tại của nhiều nhóm tác nhân gây bệnh trong vùng trồng và sản xuất chuối ở Việt Nam [78].

Song song với điều tra dịch tễ và định danh tác nhân, các nghiên cứu trong nước về giải pháp khắc phục bệnh Foc hiện tập trung chủ yếu vào hướng chẩn đoán sớm và kiểm soát sinh học. Nhiều công trình nghiên cứu đã kết hợp quan sát hình thái với định danh phân tử bằng môi đặc hiệu để xác nhận tác nhân gây bệnh, đồng thời xác định các điều kiện sinh trưởng thích hợp của Foc, trong môi trường pH \approx 6-7 và nhiệt độ khoảng 28 °C [76]. Nhiều nghiên cứu cũng đánh giá cao về tiềm năng lớn của vi sinh vật đối kháng. Kết quả phân lập *Trichoderma* từ đất trồng chuối tại huyện Đại Lộc, tỉnh Quảng Nam cho thấy hầu hết các chủng đều có khả năng đối kháng với Foc, trong đó 4 chủng Tri.01, Tri.05, Tri.07 và Tri.11 đạt hiệu quả ức chế lớn hơn 90% và có hơn 5 chủng khác đạt hiệu quả ức chế từ 80 - 90% [79].

Bên cạnh đó, giống *Streptomyces diastatochromogenes* VNUA27 phân lập từ đất trồng chuối tại Hà Tĩnh thể hiện khả năng đối kháng mạnh với Foc TR4, với tỷ lệ đối kháng 54,78% khi đồng nuôi cấy và khả năng ức chế nảy mầm bào tử đạt 82,42% [80]. Bên cạnh đó, giống *Streptomyces sp.* VNUA116 cũng cho thấy hoạt tính kháng nấm Foc TR4 mạnh nhất ở điều kiện môi trường YIM 301, pH \approx 7 và 30 °C, với đường kính vòng kháng nấm đạt $30,67 \pm 0,58$ mm sau 10 ngày nuôi cấy và hiệu lực ức chế tới 93,20% [81].

Trong khi đó, bức tranh nghiên cứu trong nước về phế phẩm thân giả chuối hiện còn tương đối hẹp và chủ yếu tập trung vào hướng ủ phân hữu cơ hoặc chế tạo vật liệu sinh học, chưa hình thành rõ một hướng khai thác sâu theo kinh tế tuần hoàn cho nguồn phế phẩm này. Nghiên cứu ủ phân từ thân chuối bổ sung chế phẩm vi nấm *Trichoderma* và vi khuẩn *Bacillus* cho thấy thân chuối có thể được sử dụng làm nguyên liệu tạo phân hữu cơ vi sinh thân thiện môi trường [82]. Các nghiên cứu khác lại khai thác thân chuối hoặc lá chuối để chế tạo sản phẩm bao gói thực phẩm [83] hay vật liệu phân hủy sinh học [84], cho thấy phế phẩm chuối đã được xem như một nguồn nguyên liệu có ích, nhưng định hướng sử dụng vẫn chủ yếu dừng ở phân hữu cơ và vật liệu sinh học thông thường. Do đó, việc nghiên cứu tổng hợp TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc sẽ mở ra một hướng nghiên cứu rộng hơn, vừa nâng cao giá trị kinh tế vừa giải quyết xử lý lượng lớn phế phẩm đang tồn đọng do bệnh Foc gây ra trên cây chuối.

Chương 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

2.1.1. Đối tượng nghiên cứu

TSH được tổng hợp từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc tại xã Thanh Sơn, thành phố Đồng Nai, Việt Nam. Việc lựa chọn nguyên liệu sinh khối nhiễm bệnh không chỉ giúp giảm áp lực tiêu hủy, mà còn mở ra hướng sử dụng hợp lý các nguồn tài nguyên nông nghiệp bị loại bỏ.

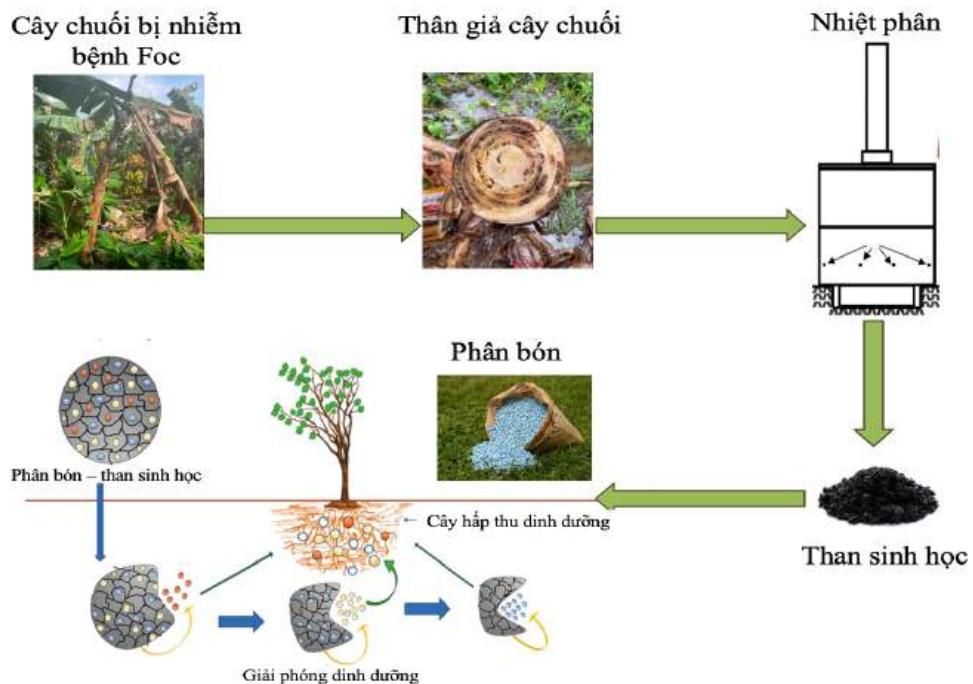
Sau quá trình nhiệt phân, TSH thu được từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc được khảo sát về khả năng giữ dinh dưỡng, điều tiết giải phóng đạm và kali, bổ sung khoáng chất dinh dưỡng cho cây chuối, cũng như hiệu quả ức chế mầm bệnh tồn dư. Đề tài tập trung vào việc định tính và định lượng các đặc trưng lý hóa của TSH để đánh giá tiềm năng ứng dụng làm nền vật liệu cho phân bón, hướng tới phục vụ mục tiêu nông nghiệp bền vững và tái tạo đất.

2.1.2. Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi nghiên cứu của đề tài giới hạn trong quy mô phòng thí nghiệm, tập trung vào các bước chính: thu thập thân chuối nhiễm bệnh, tiền xử lý, nhiệt phân yếm khí ở các dải nhiệt độ khác nhau và tạo hạt phân bón NK-hữu cơ. Sau đó, các sản phẩm TSH được phân tích đặc trưng bằng các phương pháp phân tích hiện đại như kính hiển vi điện tử quét (SEM), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX), phân tích hấp phụ đẳng nhiệt Brunauer–Emmett–Teller (BET), phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR), nhiễu xạ tia X (XRD), phân tích nhiệt trọng lượng (TGA). Ngoài phân tích vật liệu, TSH được đánh giá sơ bộ hiệu quả bất hoạt nấm Foc dựa trên điều kiện nhiệt phân. Để mở rộng khả năng ứng dụng của TSH trong nông nghiệp, đề tài tiến hành phối trộn TSH với các thành phần dinh dưỡng như đạm và kali nhằm tổng hợp phân bón như đạm và kali để tổng hợp phân bón. Sản phẩm phân bón được khảo sát các chỉ tiêu gồm khả năng giữ nước, khả năng hấp thụ nước, tỉ lệ trương nở, độ ẩm cân bằng và xác định thành phần dinh dưỡng trong phân bón theo TCVN 9294:2012, TCVN 10682:2015, TCVN 8560:2018, TCVN 13263-9:2020; TCVN 9297:2012 đạt tiêu chuẩn QCVN 106:2025/BNNMT [85]. Để đánh giá hiệu quả ứng dụng của TSH từ thân giả cây chuối trong phân bón nông nghiệp, sản phẩm được sử dụng là nguồn cung cấp dinh dưỡng cho cây chuối giống và trồng tại xã Thanh Sơn, thành phố Đồng Nai.

Trong nghiên cứu này, phương pháp nhiệt phân chậm được lựa chọn vì mục tiêu chính của đề tài là thu hồi tối đa lượng TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc. So với các hướng chuyển hóa nhiệt khác, nhiệt phân chậm phù hợp hơn khi sản

phẩm đích là pha rắn, do quá trình gia nhiệt diễn ra từ từ và thời gian lưu đủ dài, qua đó làm tăng hiệu suất tạo than và hạn chế sự chuyển dịch nguyên liệu sang pha khí và pha lỏng [86], [87]. Một trong những lợi thế chính của phương pháp nhiệt phân chậm là khả năng giữ lại carbon hữu cơ và chất dinh dưỡng trong TSH thu được, do đó nâng cao giá trị của nó như một chất giữ cấu trúc xốp của đất và nơi lưu trữ chất dinh dưỡng phù hợp với các loại đất cụ thể, yêu cầu cây trồng, điều kiện môi trường hoặc chiến lược quản lý đất [88]. Việc lựa chọn phương pháp này không chỉ phù hợp với mục tiêu thu hồi TSH, mà còn tạo cơ sở để khai thác hiệu quả nguồn sinh khối chuỗi nhiệm bệnh theo hướng nâng cao giá trị sử dụng trong nông nghiệp.



Hình 2.1. Sơ đồ triển khai nghiên cứu

Thí nghiệm tổng hợp TSH từ thân già cây chuối Cavendish bị nhiễm bệnh Foc bao gồm hai giai đoạn. Giai đoạn đầu là quá trình chuẩn bị mẫu và khử nước và giai đoạn hai là quá trình carbon hoá bằng phương pháp nhiệt phân trong môi trường hạn chế oxy. Sau khi xác định được mẫu TSH tối ưu, TSH được sử dụng để chế tạo phân bón hỗn hợp NK-hữu cơ dạng hạt trên nền TSH với mục tiêu tận dụng vai trò “nền giữ dinh dưỡng” của vật liệu carbon xốp. Quy trình tạo phân bón NK được thực hiện theo nguyên lý phối trộn thành phần dinh dưỡng với nền TSH, điều chỉnh điều kiện phối trộn để đảm bảo tính ổn định, sau đó tạo hạt bằng phương pháp tạo viên trong khay tạo hạt, sấy khô và sàng phân loại để thu sản phẩm có kích thước hạt tương đối đồng nhất. Cuối cùng, để đánh giá hiệu quả ứng dụng của phân bón, sản phẩm được sử dụng làm nguồn cung cấp dinh dưỡng cho thực nghiệm trồng giống cây chuối.

2.2. Hóa chất, nguyên liệu và thiết bị

Bảng 2.1. Hoá chất và nguyên liệu

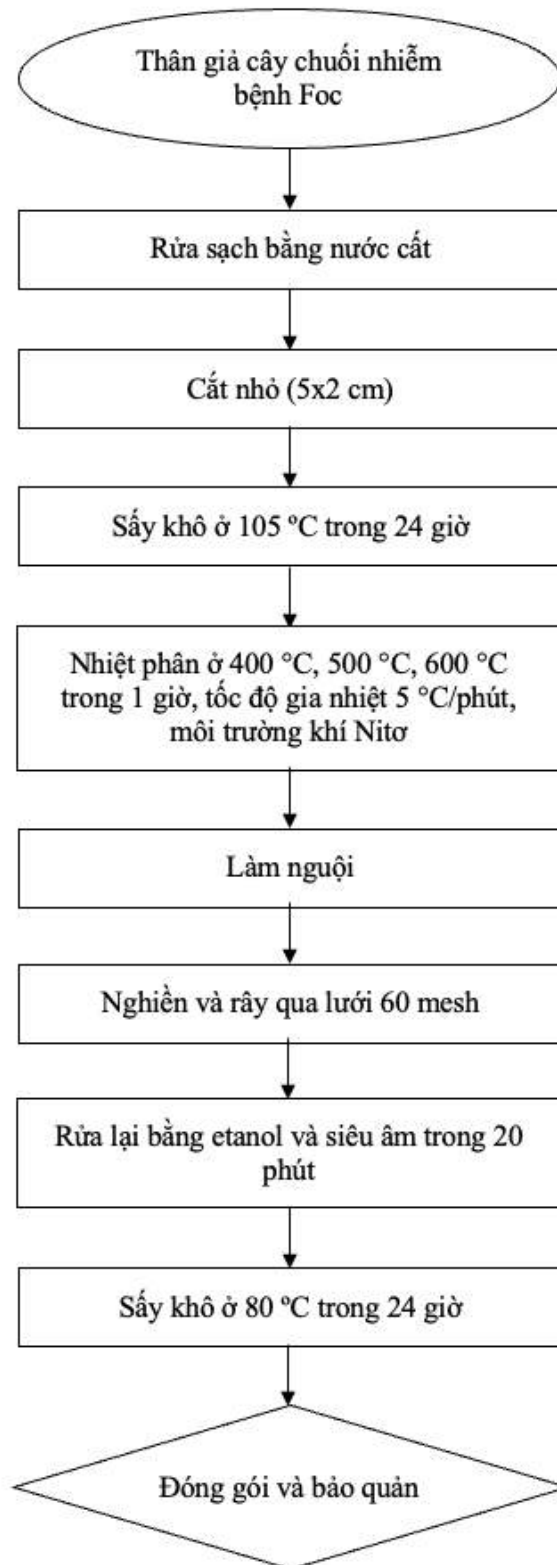
STT	Tên hóa chất và nguyên liệu	Thông số kỹ thuật	Nguồn gốc
1	Thân chuối bị nhiễm bệnh Foc	Các vết nứt dọc ngoài thân giả, bẹ lá giả vàng khô héo rũ xuống. Khi cắt ngang, bên trong thân giả có các bó mạch dẫn chuyển màu nâu đỏ hoặc đen	Xã Thanh Sơn, thành phố Đồng Nai, Việt Nam
2	Kali sulfat	Độ tinh khiết $\geq 98\%$, dạng bột trắng, tan trong nước	Hàn Quốc
3	Urea	Độ tinh khiết $\geq 99,5\%$, dạng hạt trắng, tan trong nước	Trung Quốc
4	Zeolite	Dạng bột ($\bar{d} < 0,01$ mm), không tan trong nước, khả năng trao đổi ion cao	Trung Quốc
5	Chloramphenicol	Độ tinh khiết $\geq 98\%$, dạng bột tinh thể trắng, ít tan trong nước	Viện sinh học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam
6	Potato Dextrose Agar	pH $5,6 \pm 0,2$, dạng bột mịn	Viện sinh học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam
7	Đất canh tác	Đã sàng (kích thước sàng 6×12 mesh) loại tạp chất; độ ẩm tự nhiên	Xã Thanh Sơn, thành phố Đồng Nai, Việt Nam

Bảng 2.2. Thiết bị và dụng cụ

STT	Tên dụng cụ	Hãng sản xuất	Nguồn
1	Cân phân tích 4 số	HENGZHAN - FPA214	Viện nghiên cứu Cải tiến và Phát triển bền vững iLap
2	Tủ sấy	HENGZHAN - 101- 0AB	Viện nghiên cứu Cải tiến và Phát triển bền vững iLap
3	Lò nhiệt phân	SH SCIENTIFIC - SH-FU-14MG	Viện nghiên cứu Cải tiến và Phát triển bền vững iLap
4	Bể siêu âm	Jeken - PS - 20	Viện nghiên cứu Cải tiến và Phát triển bền vững iLap
5	Máy đo pH	EZDO - 7011	Viện nghiên cứu Cải tiến và Phát triển bền vững iLap
6	Máy đo phổ hồng ngoại biến đổi Fourier	Frontier NIR/MIR	Viện Công nghệ tiên tiến, Viện Hàn Lâm KHCNVN
7	Máy đo nhiễu xạ tia X	Bruker - D8 ADVANCE	Viện Công nghệ tiên tiến, Viện Hàn Lâm KHCNVN
8	Máy đo phân tích nhiệt trọng lượng	Mettler Toledo – TGS/DSC 3+	Viện Công nghệ tiên tiến, Viện Hàn Lâm KHCNVN
9	Máy đo hiển vi điện tử quét và phổ tán xạ năng lượng tia X	JSM-IT200A/LA	Viện Công nghệ tiên tiến, Viện Hàn Lâm KHCNVN
10	Máy đo Phân tích Brunauer-Emmett-Teller	BET NOVA 4200 E	Viện Công nghệ tiên tiến, Viện Hàn Lâm KHCNVN

2.3. Thực nghiệm

2.3.1. Tổng hợp than sinh học



Hình 2.2. Sơ đồ khối quy trình tổng hợp TSH từ thân già cây chuối bị nhiễm bệnh Foc

Thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc được thu gom từ xã Thanh Sơn, thành phố Đồng Nai, Việt Nam. Trước tiên, nguyên liệu sau khi thu gom được rửa sạch bằng nước cất để loại bỏ bụi bẩn và tạp chất, sau đó tách lớp, cắt thành từng đoạn nhỏ khoảng 5×2 cm và sấy ở $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ trong 24 giờ nhằm loại bỏ độ ẩm. Sau khi làm nguội, mẫu thân giả đã sấy khô được bố trí trên giá đỡ bằng thép không gỉ, đặt trong chén sứ có nắp và đưa vào lò nhiệt phân ở các mức nhiệt độ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ và $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ trong 1 giờ với tốc độ gia nhiệt $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{phút}$ [89]. Trong toàn bộ quá trình nhiệt phân và làm nguội, dòng khí nitơ được duy trì liên tục để tạo môi trường hạn chế oxy và hạn chế oxy hóa mẫu. Các mẫu TSH được tóm tắt các thông số nghiên cứu và ký hiệu như trình bày trong bảng 2.3:

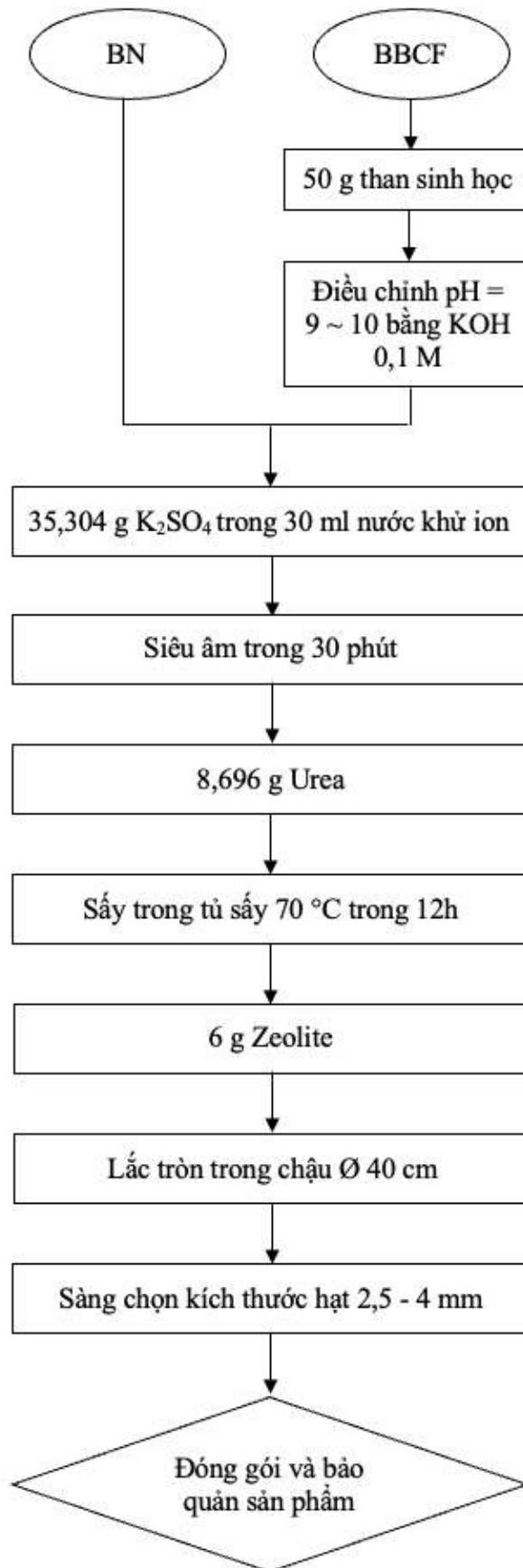
Bảng 2.3. Ký hiệu mẫu TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc

STT	Tên mẫu	Nhiệt độ nhiệt phân	Thời gian nhiệt phân	Tốc độ gia nhiệt	Ký hiệu
1	TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc ở $400\text{ }^{\circ}\text{C}$	$400\text{ }^{\circ}\text{C}$	1 giờ	$5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{phút}$	BCF-400
2	TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc ở $500\text{ }^{\circ}\text{C}$	$500\text{ }^{\circ}\text{C}$	1 giờ	$5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{phút}$	BCF-500
3	TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc ở $600\text{ }^{\circ}\text{C}$	$600\text{ }^{\circ}\text{C}$	1 giờ	$5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{phút}$	BCF-600

Sau nhiệt phân, các mẫu được nghiền mịn và rây qua lưới 60 mesh. Tiếp theo, mẫu được rửa bằng ethanol kết hợp siêu âm trong 20 phút nhằm loại bỏ các tạp chất còn bám trên bề mặt. Cuối cùng, sản phẩm được sấy ở $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ trong 24 giờ, sau đó đóng gói và lưu mẫu.

Để đánh giá hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh Foc, cần sử dụng phương pháp tách và thu hồi bào tử ra khỏi nền TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc. Cân mỗi mẫu 5g TSH và cho vào ống vô trùng, mỗi mẫu trải qua phương pháp vô trùng bằng dung dịch etanol 70% trong 20 giây rồi sau đó trong dung dịch NaOCl 1% trong 3,5 phút và sấy khô trên giấy lụa để khử trùng [88]. Các đĩa petri được chuẩn bị bằng cách hơ qua ngọn lửa đèn cồn nhằm tạo vùng không gian vô trùng. Mẫu được trải đều lên bề mặt môi trường PDA trong các đĩa petri và được ủ ở nhiệt độ khoảng $25\text{-}28\text{ }^{\circ}\text{C}$ duy trì từ 3-5 ngày. Nếu nấm Foc còn tồn tại thì khuẩn lạc sẽ có đặc điểm là màu trắng đến hồng tím, sợi nấm phát triển tỏa tròn xung quanh mẫu. Nhưng nếu không xuất hiện khuẩn lạc đặc trưng, kết quả nấm Foc đã bị loại bỏ [91].

2.3.2. Tổng hợp phân bón NK - than sinh học



Hình 2.3. Sơ đồ khối quy trình tổng hợp phân bón NK – than sinh học

Mẫu TSH tối ưu được lựa chọn từ kết quả thí nghiệm tổng hợp TSH. Trên cơ sở đó, thí nghiệm bố trí thành hai mẫu:

Bảng 2.4. Ký hiệu mẫu thí nghiệm phân bón

STT	Tên Mẫu	Thành phần				Ký hiệu
		4% N	18% K ₂ O	TSH	6% Zeolite	
1	Phân bón không có TSH	8,696 g Urea	35,304 g K ₂ SO ₄	0 g	6,000 g	BN
2	Phân bón có TSH từ thân giả chuối nhiễm bệnh Foc	8,696 g Urea	35,304 g K ₂ SO ₄	50,000 g	6,000 g	BBCF

Mẫu TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc ở nhiệt độ tối ưu được sử dụng để tổng hợp phân bón vô cơ (4% Đạm và 18% Kali) có chứa thành phần hữu cơ. Để chuẩn bị 100 g mỗi mẫu, đối với mẫu BBCF cần chuẩn bị 50,000 g TSH được điều chỉnh pH = 9 ~ 10 bằng dung dịch KOH 0,1 M. Sau khi điều chỉnh pH, mẫu được bổ sung 35,304 g K₂SO₄ trong 30 ml nước khử ion (K₂SO₄ chứa 51% K₂O hữu hiệu) và siêu âm trong 30 phút. Tiếp đến bổ sung 8,696 g Urea (Urea có chứa 46% N tổng số), sau đó làm khô mẫu trong lò sấy 70 °C trong 12 giờ. Đối với mẫu BN vẫn bổ sung khối lượng Urea và K₂SO₄ tương tự nhưng không có mặt của TSH.

Quy trình tạo hạt bằng cách bổ sung 6,000 g Zeolite vào mỗi mẫu và được cho vào chậu nhựa đường kính 40 cm. Lắc tròn chậu đồng thời xịt ẩm để các hạt lăn tròn vào nhau hình thành các hạt phân bón. Để đạt được kích thước hạt đồng nhất, thành phẩm được chọn lọc qua hệ thống sàng 2 tầng và chọn kích thước hạt 2,5 - 4 mm. Thành phẩm được cho vào túi hút ẩm và đóng gói bảo quản ở nhiệt độ phòng và tránh ẩm. Thí nghiệm được lặp lại 3 lần.

Để đánh giá hiệu quả ứng dụng của phân bón chứa TSH, Các mẫu đất được thu thập ngẫu nhiên ở độ sâu 0 - 20 cm tại xã Thanh Sơn, thành phố Đồng Nai. Cây chuối giống Cavendish được mua tại Hợp tác xã thương mại và dịch vụ Nông nghiệp Trảng Bom, giống chuối Cavendish con được lựa chọn đồng nhất kích thước cây. Mỗi cây có chiều cao khoảng $8,24 \pm 1,52$; số lượng lá là 5; chu vi thân giả $1,50 \pm 0,67$. Giống cây được đặt vào chậu nhân giống với nền mùn cưa, tưới nước và phủ

giấy nhựa. Mỗi chậu với đường kính 30 cm được trồng một cây chuối giống Cavendish.

Thực nghiệm được thiết kế bằng 4 nghiệm thức (NT). Mỗi NT lặp lại ba lần, mỗi chậu gồm 1 cây chuối giống và 5 kg đất, nhưng các NT khác nhau ở thành phần bổ sung: TN1 chỉ 5 kg đất; TN2 có 5kg đất và 2% khối lượng TSH từ thân giả cây chuối ở nhiệt độ nhiệt phân tối ưu; TN3 có 5 kg đất và 2% khối lượng BN; TN4 có 5 kg đất và 2% khối lượng BBCF. Thí nghiệm triển khai trong 60 ngày, ghi nhận kiểm tra kết quả, chăm sóc, nhổ cỏ, giăng lưới phòng sâu bệnh và tưới nước với liều lượng phù hợp mỗi buổi sáng hàng ngày.

2.3.3. Đặc tính của than sinh học

- **Hiệu suất tổng hợp than sinh học**

Để đánh giá hiệu suất (H) tổng hợp TSH từ thân chuối nhiễm bệnh Foc. Chuẩn bị 30 g (M_0) nguyên liệu sinh khối cho vào chén sứ có nắp. Sau quá trình nhiệt phân trong môi trường khí nitơ theo thiết kế thí nghiệm. Mẫu được lấy ra đặt vào bể hút ẩm nhằm hạn chế quá trình tro hoá, để nguội trong 30 phút. Cân lại khối lượng (M_1). Để tính hiệu suất tổng hợp than sinh theo công thức như sau:

$$H = \frac{M_1}{M_0} \times 100 \quad [92]$$

Trong đó:

M_1 : Khối lượng sau khi nhiệt phân (g)

M_0 : Khối lượng trước khi nhiệt phân (g)

- **Xác định hàm lượng ẩm của than sinh học**

Hàm lượng ẩm (MC) của TSH được đo bằng cách cân 1g (M_b) TSH và làm nóng ở 105 °C đến khối lượng không đổi (trong 6 giờ), sau đó đo khối lượng (M_a) [93]. Công thức tính độ ẩm của TSH như sau:

$$MC = \frac{M_a}{M_b} \times 100 \quad [93]$$

Trong đó:

M_a : Khối lượng sau khi sấy ở 105 °C trong 6 giờ (g)

M_b : Khối lượng trước khi sấy (g)

- **Xác định hàm lượng tro của than sinh học**

Hàm lượng tro (AC) được đo bằng cách tro hoá 1g (M_b) nguyên liệu TSH trong lò nung ở nhiệt độ 950 °C trong 4 giờ, sau đó cân TSH sau khi nung nóng (M_c) [93]. Công thức xác định hàm lượng tro của TSH như sau:

$$AC = \frac{M_c}{M_b} \times 100 \quad [93]$$

Trong đó:

M_c : Khối lượng sau khi nung ở 950 °C trong 4 giờ (g)

M_b : Khối lượng trước khi nung (g)

- **Xác định hàm lượng hợp chất bay hơi của than sinh học**

Để xác định hàm lượng hợp chất bay hơi của TSH bằng cách chuẩn bị 5 g (M_b) mẫu sấy khô trong lò 105 °C trong 6 giờ sau đó nung trong lò ở 950 °C trong 6 phút, sau đó cân TSH sau khi nung nóng (M_d) [94]. Chất dễ bay hơi được tính bằng tỷ lệ khối lượng sấy lò của TSH.

$$VM = \frac{M_b - M_d}{M_b} \times 100 \quad [94]$$

Trong đó:

M_d : Khối lượng sau khi nung 950 °C trong 6 phút (g)

M_b : Khối lượng trước khi nung (g)

- **Xác định hàm lượng cố định carbon của than sinh học**

Hàm lượng cố định carbon (FC) được xác định bằng cách loại bỏ độ ẩm, hàm lượng tro và hợp chất bay hơi của TSH [94]. Công thức tính hàm lượng cố định carbon như sau:

$$FC = 100 - (MC + AC + VM) \quad [94]$$

Trong đó:

MC : Độ ẩm của TSH (%)

AC : Hàm lượng tro của TSH (%)

VM : Hàm lượng hợp chất bay hơi của TSH (%)

2.3.4. Đánh giá than sinh học ứng dụng trong phân bón

- **Xác định hàm lượng chất hữu cơ của than sinh học**

Hàm lượng chất hữu cơ của TSH được xác định gián tiếp thông qua hàm lượng cacbon hữu cơ bằng phương pháp Walkley Black theo tiêu chuẩn TCVN 9294:2012 [95]. Nguyên tắc của phương pháp dựa trên quá trình oxy hóa cacbon hữu cơ trong mẫu bằng dung dịch $K_2Cr_2O_7$ trong môi trường H_2SO_4 đậm đặc. Sau khi phản ứng oxy hóa xảy ra, lượng $K_2Cr_2O_7$ còn dư được chuẩn độ bằng dung dịch muối $[FeSO_4(NH_4)_2SO_4.6H_2O]$, từ đó tính ra hàm lượng cacbon hữu cơ trong mẫu. Trên cơ sở giá trị cacbon hữu cơ thu được, hàm lượng chất hữu cơ được quy đổi theo hệ số thích hợp.

Mẫu TSH sau khi tổng hợp được nghiền mịn và rây qua rây 0,2 mm để bảo đảm độ đồng nhất. Cân khoảng 0,1 g đến 0,2 g mẫu, rồi cho vào bình erlen 250 ml. Sau đó thêm chính xác 20 ml dung dịch $K_2Cr_2O_7$ 0,16 M, tiếp tục thêm nhanh 40 ml H_2SO_4 , lắc nhẹ để trộn đều và đặt bình trên tấm cách nhiệt trong 30 phút. Sau thời gian phản ứng, thêm 100 ml nước cất và 10 ml H_2SO_4 85%, để nguội về nhiệt độ phòng. Đồng thời tiến hành hai mẫu trắng với cùng quy trình nhưng không chứa mẫu TSH.

Sau khi làm nguội, thêm 0,5 ml chỉ thị Ferrouin và chuẩn độ lượng $K_2Cr_2O_7$ dư bằng dung dịch $FeSO_4(NH_4)_2SO_4.6H_2O$ 0,5 M cho đến khi dung dịch chuyển màu từ xanh sẫm sang đỏ. Kết quả xác định cacbon hữu cơ (OC) được tính theo công thức:

$$OC = \frac{V \times (a - b) \times 3 \times 10\,000}{a \times 75 \times 1000 \times m} \quad [96]$$

Trong đó:

V : Thể tích dung dịch $K_2Cr_2O_7$ (ml)

a : Thể tích dung dịch muối Mohr chuẩn độ mẫu trắng (ml)

b : Thể tích dung dịch muối Mohr chuẩn độ mẫu thử (ml)

m : Khối lượng mẫu (g)

3: Đương lượng gam của carbon

100/75: Hệ số quy đổi (do phương pháp Walkley - Black chỉ oxy hóa trung bình (75%) tổng lượng cacbon hữu cơ thực tế)

Sau khi xác định được hàm lượng cacbon hữu cơ, hàm lượng chất hữu cơ tổng số (OM) được tính theo công thức:

$$OM = OC \times 2,2 \quad [97]$$

Trong đó:

2,2: hệ số chuyển đổi carbon hữu cơ sang chất hữu cơ

- **Đánh giá tỉ lệ trương nở và độ ẩm cân bằng của phân bón**

Để đánh giá khả năng trương nở, giữ ẩm và hấp thụ nước của hạt phân bón cần kiểm tra tỉ lệ trương nở (*SR*) và độ ẩm cân bằng (*EWC*) của hạt phân bón [93]. Mỗi mẫu được chuẩn bị 2 g (W_d) và ngâm trong 200 ml nước cất trong 24 giờ. Sau đó được lọc qua phễu lọc giữ các hạt và cân khối lượng hạt ẩm (W_s), mỗi thí nghiệm được lặp lại 3 lần để tính trung bình và độ lệch chuẩn. Để tính tỉ lệ trương nở và độ ẩm cân bằng theo 2 công thức *SR* và *EWC* như sau:

$$EWC = \frac{W_s - W_d}{W_s} \times 100$$

$$SR \equiv \frac{W_s - W_d}{W_d}$$
[93]

Trong đó:

W_s : Khối lượng hạt sau khi ngâm trong nước cất 24 giờ (g)

W_d : Khối lượng hạt trước khi ngâm trong nước cất 24 giờ (g)

- **Đánh giá khả năng hấp thụ nước của phân bón**

Để đánh giá khả năng hấp thụ nước của hạt phân bón (*WA*), cần chuẩn bị cân khối lượng đĩa petri rỗng (W_2) rồi tiếp tục cho 1g mỗi mẫu (W_1) vào mỗi đĩa petri khô và đặt vào bình hút ẩm. Sau 5 ngày, cân lại đĩa petri có chứa mẫu (W_3), mỗi thí nghiệm được lặp lại 3 lần để tính trung bình và độ lệch chuẩn [98]. Để tính khả năng hấp thụ nước theo công thức *WA* như sau:

$$WA = \frac{W_3 - W_2}{W_1} \times 100$$
[98]

Trong đó

W_1 : Khối lượng mẫu ban đầu (g)

W_2 : Khối lượng đĩa petri rỗng (g)

W_3 : Khối lượng đĩa petri và mẫu sau 5 ngày hút ẩm (g)

- **Đánh giá khả năng giữ nước của phân bón**

Để kiểm tra về khả năng giữ nước (*WR*) được thực hiện bằng cách kết hợp với đất canh tác được thu gom tại xã Thanh Sơn, thành phố Đồng Nai, Việt Nam. Cân 50 g đất được sàng lọc để đạt kích thước hạt đồng nhất 6x12 mesh. Đồng thời chuẩn bị

3 g mỗi mẫu rồi cho vào 3 becher tương ứng mỗi becher chứa 50 g đất và 3 g mỗi mẫu hạt phân bón. Sau 24 giờ, thêm vào 30 ml nước cất vào 3 becher, để ngâm và cân kiểm tra khối lượng (W_1). Các cốc được bảo quản trong hộp thủy tinh và cân lại kiểm tra liên tục xuyên suốt 15 ngày để kiểm tra khối lượng (W_2 :) [98]. Mỗi thí nghiệm được lặp lại 3 lần để tính trung bình và độ lệch chuẩn. Để tính khả năng giữ nước theo công thức WR như sau:

$$WR = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad [98]$$

Trong đó:

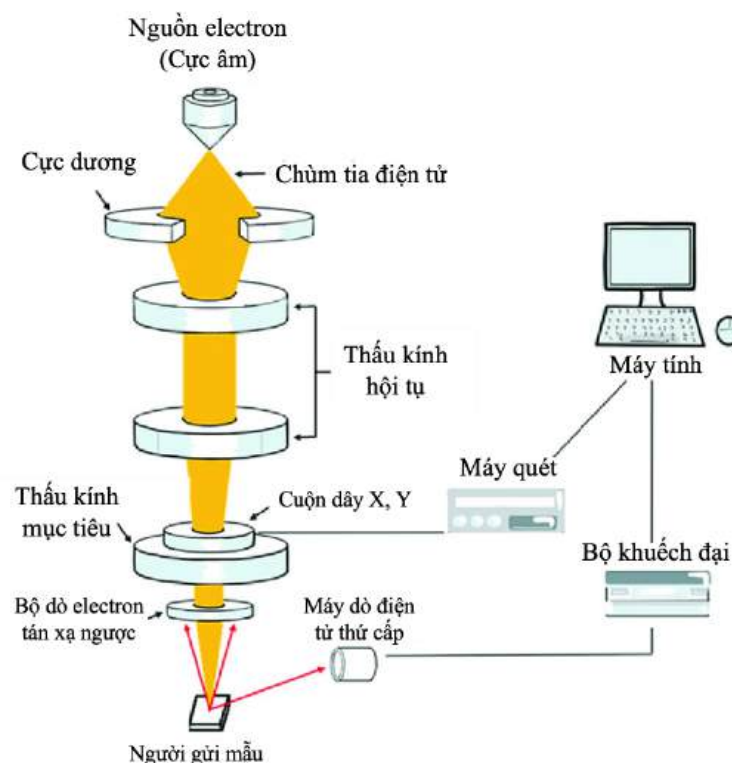
W_1 : Khối lượng becher ngay sau khi ngâm 30ml nước và cân lần đầu (g)

W_2 : Khối lượng becher tại thời điểm theo dõi trong 15 ngày (g)

2.4. Phương pháp phân tích vật liệu

2.4.1. Phương pháp SEM-EDX

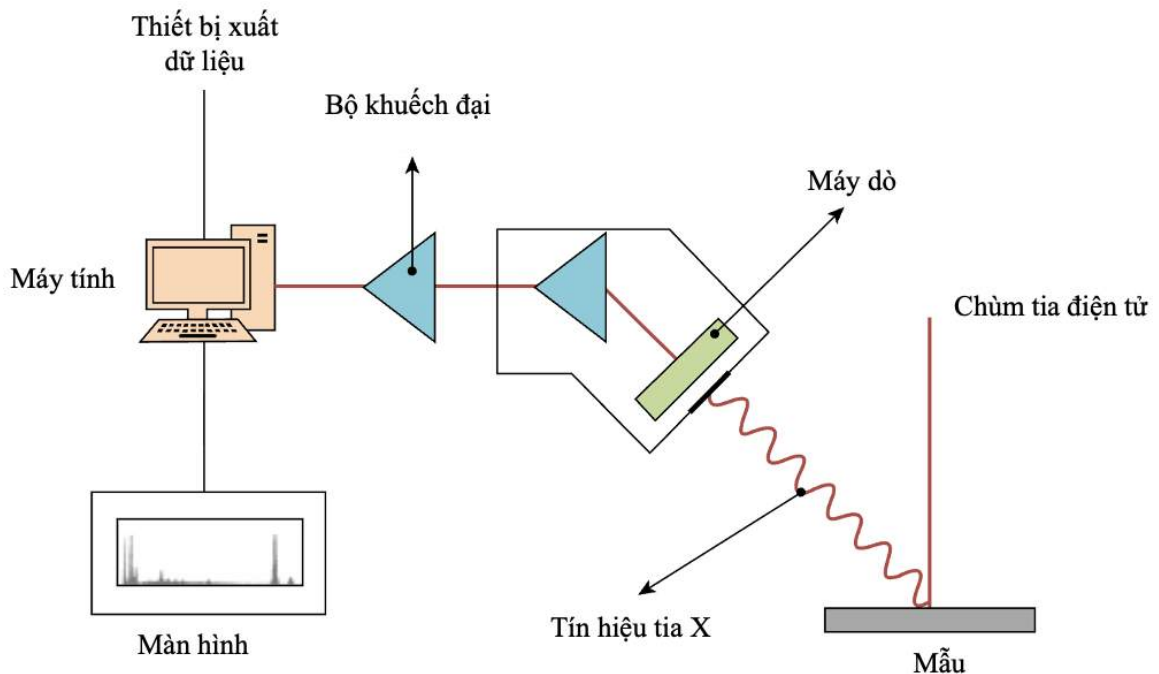
Phương pháp SEM được sử dụng để quan sát hình thái bề mặt, cấu trúc lỗ xốp và mức độ phát triển mao quản của TSH. Mẫu được nghiền mịn, làm khô và cố định trên băng dính carbon trước khi phân tích. Các điện tử được tạo thành chùm tia electron, chùm tia electron đi qua thấu kính để tạo thành chùm tia electron hội tụ vào mẫu TSH. Chùm tia electron cho phép quét trên bề mặt mẫu và thu được thông tin trên khu vực xác định trên mẫu.



Hình 2.4. Phương pháp SEM [99]

Trước khi phân tích, mẫu được nghiền mịn, sau đó sấy ở 80 °C trong 3 giờ để loại ẩm, hạn chế ảnh hưởng của nước hấp phụ lên chất lượng ảnh. Mẫu khô được cố định trên băng dính carbon và quan sát bằng máy đo SEM-EDX ở điện áp gia tốc 15 keV, ảnh được ghi ở độ phóng đại điện hình ~1000× và có thể mở rộng thêm các mức phóng đại khác để mô tả đầy đủ hình thái và mức độ xốp của vật liệu [100].

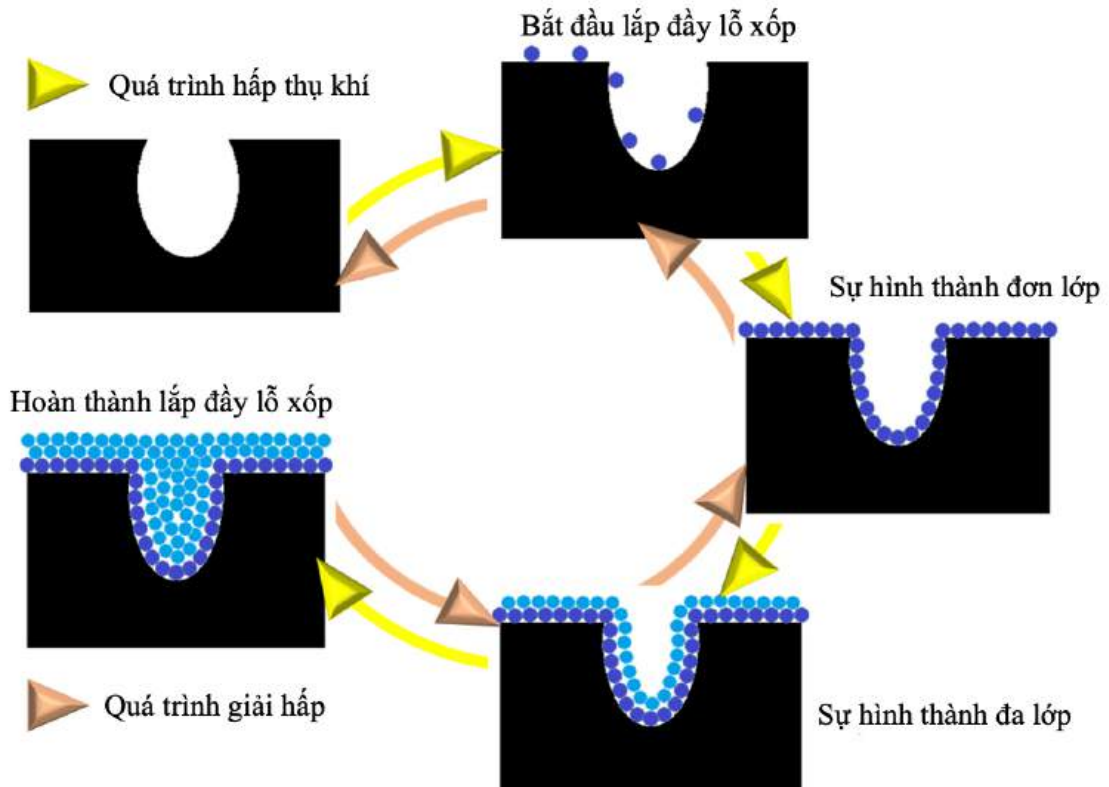
Phương pháp EDX được thực hiện đồng thời trong quá trình chụp SEM nhằm xác định thành phần nguyên tố bề mặt và đánh giá sự hiện diện và phân bố của các nguyên tố khoáng, đặc biệt các nguyên tố liên quan dinh dưỡng như K, Ca, Si, Al.... Đối với mẫu không dẫn điện, để hạn chế hiện tượng tích điện khi chụp trong chế độ chân không cao, có thể áp dụng phủ lớp dẫn mỏng nhằm tăng dẫn điện và giảm charging, đồng thời cải thiện chất lượng ảnh [100].



Hình 2.5. Phương pháp EDX [101]

2.4.2. Phương pháp BET

Phương pháp BET được sử dụng để đặc trưng diện tích bề mặt riêng của TSH và các thông số liên quan đến hệ mao quản. Nguyên lý phép đo dựa trên hấp phụ vật lý ở nhiệt độ nitơ lỏng khoảng 77 K (-196 °C), các phân tử nitơ sẽ được hấp phụ tuần tự lên bề mặt vật liệu, hình thành lớp hấp phụ đơn phân tử và sau đó là đa phân tử. Dựa trên lượng nitơ hấp phụ theo áp suất tương đối, mô hình Brunauer–Emmett–Teller được áp dụng để tính diện tích bề mặt riêng. Đồng thời, đường đẳng nhiệt hấp phụ và giải hấp cung cấp cơ sở để suy ra thể tích mao quản và phân bố kích thước lỗ xốp, trong đó phương pháp Barrett–Joyner–Halenda thường được sử dụng để xử lý dữ liệu trên nhánh giải hấp [102].

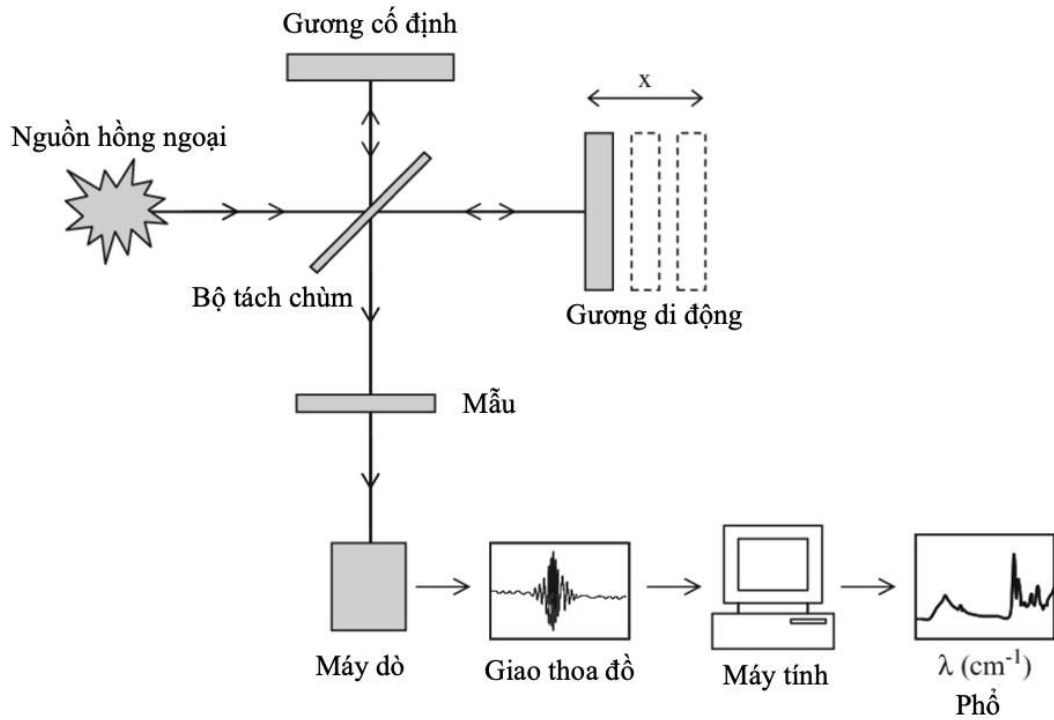


Hình 2.6. Phương pháp BET [103]

Diện tích bề mặt của TSH được phân tích bằng phương pháp BET đẳng nhiệt đa điểm hấp phụ vật lý. Chuẩn bị mỗi mẫu 0,02 g được sấy khô trong lò ở 80 °C trong 3 giờ để loại bỏ độ ẩm. Sau đó, mẫu được làm lạnh đến nhiệt độ phòng và khử khí ở 300 °C trong 15 giờ. Các đẳng nhiệt hấp phụ-giải hấp nitơ thu được ở 77 K (-196 °C) bằng cách sử dụng mô hình phân tích diện tích bề mặt. Diện tích bề mặt riêng được tính bằng phương trình BET, sử dụng áp suất tương đối trên phạm vi hấp phụ từ 0,04 đến 0,49. Phương pháp Barrett-Joyner-Halenda (BJH) đã được sử dụng để tính toán kích thước lỗ xốp và thể tích lỗ xốp trên nhánh giải hấp.

2.4.3. Phương pháp FTIR

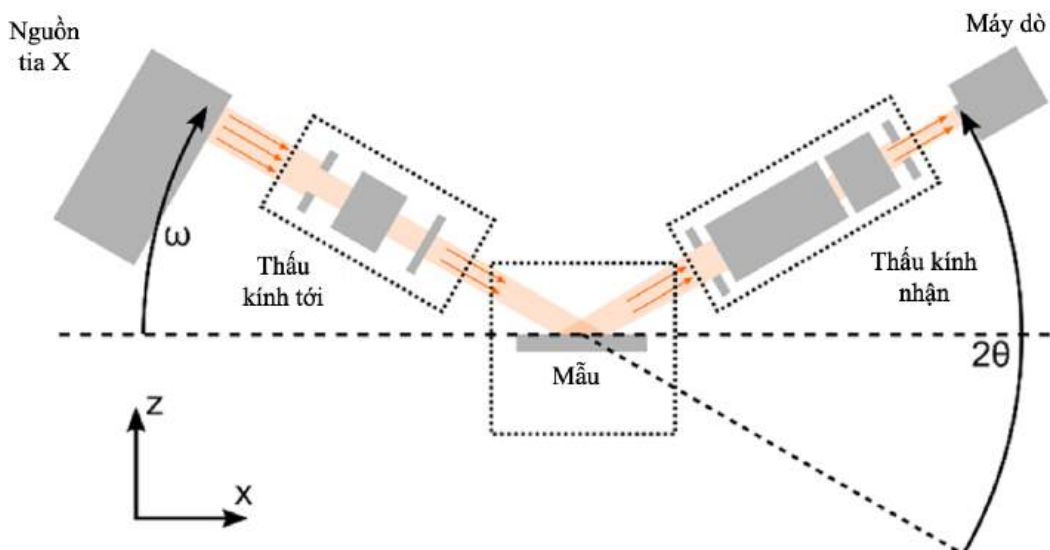
Phương pháp FTIR được sử dụng để nhận diện các nhóm chức bề mặt và đánh giá biến đổi cấu trúc hóa học của TSH ở điều kiện nhiệt phân khác nhau. Các mẫu TSH được nghiền mịn và trộn 0,5 mg mẫu với 200 mg KBr khan, sau đó ép viên để đo phổ. Phổ FTIR được ghi trong vùng số sóng từ 4000-400 cm^{-1} với 64 lần quét và ở độ phân giải 4 cm^{-1} ; nền được hiệu chỉnh bằng không khí xung quanh và KBr tinh khiết. Kết quả phổ được sử dụng để so sánh sự thay đổi các dải hấp thụ đặc trưng liên quan đến nhóm chức oxy hóa và khung carbon thơm giữa các mẫu, từ đó hỗ trợ thảo luận mức độ carbon hoá và khả năng tương tác bề mặt của vật liệu [104].



Hình 2.7. Phương pháp FTIR [105]

2.4.4. Phương pháp XRD

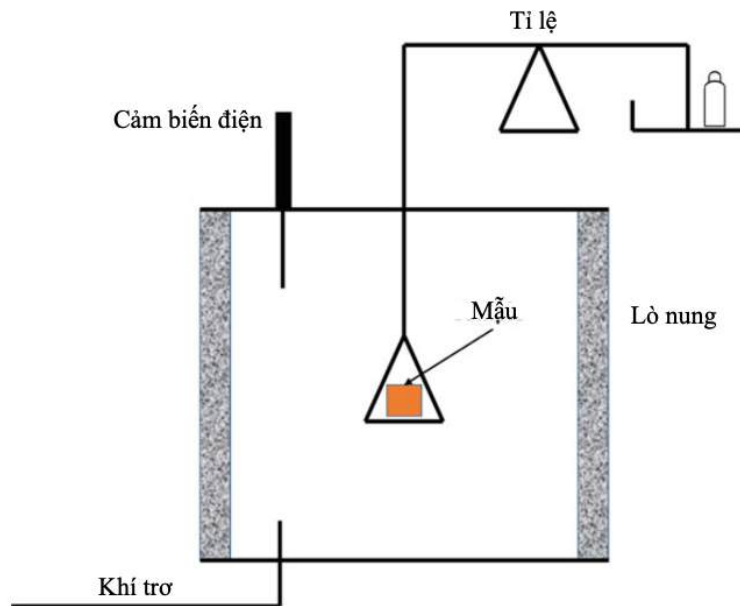
Phương pháp XRD được sử dụng để xác định cấu trúc tinh thể và thành phần pha khoáng của TSH và đánh giá sự thay đổi cấu trúc theo điều kiện nhiệt phân. Chuẩn bị khoảng 0,5 g mỗi mẫu TSH và thêm vào chảo aluminum và phép đo được thực hiện ở điện áp 50 kV. Các tia X tán xạ từ ống tia X, được phản xạ qua mẫu với góc tới θ . Chùm tia phản xạ ra khỏi các tinh thể với cùng một góc θ và thu được vào máy dò. Bằng cách sử dụng định luật Bragg – Brentano ($n\lambda = 2d\sin\theta$) để xác định các đặc tính khác nhau của vật liệu [106].



Hình 2.8. Phương pháp XRD [107]

2.4.5. Phương pháp TGA

Phương pháp TGA được sử dụng để đánh giá tính ổn định nhiệt và đặc tính mất khối lượng của TSH theo nhiệt độ, qua đó hỗ trợ suy luận tương đối về ẩm còn lại, phần chất bay hơi và mức độ bền nhiệt của khung carbon. Chuẩn bị 8 mg mẫu được đặt trong chén gốm alumina và gia nhiệt trong môi trường nitơ với tốc độ 10 °C/phút trong khoảng 30 - 900 °C. Đường cong TGA/DTG thu được được sử dụng để so sánh hành vi phân hủy nhiệt giữa các mẫu TSH tổng hợp ở các điều kiện nhiệt phân khác nhau [108].



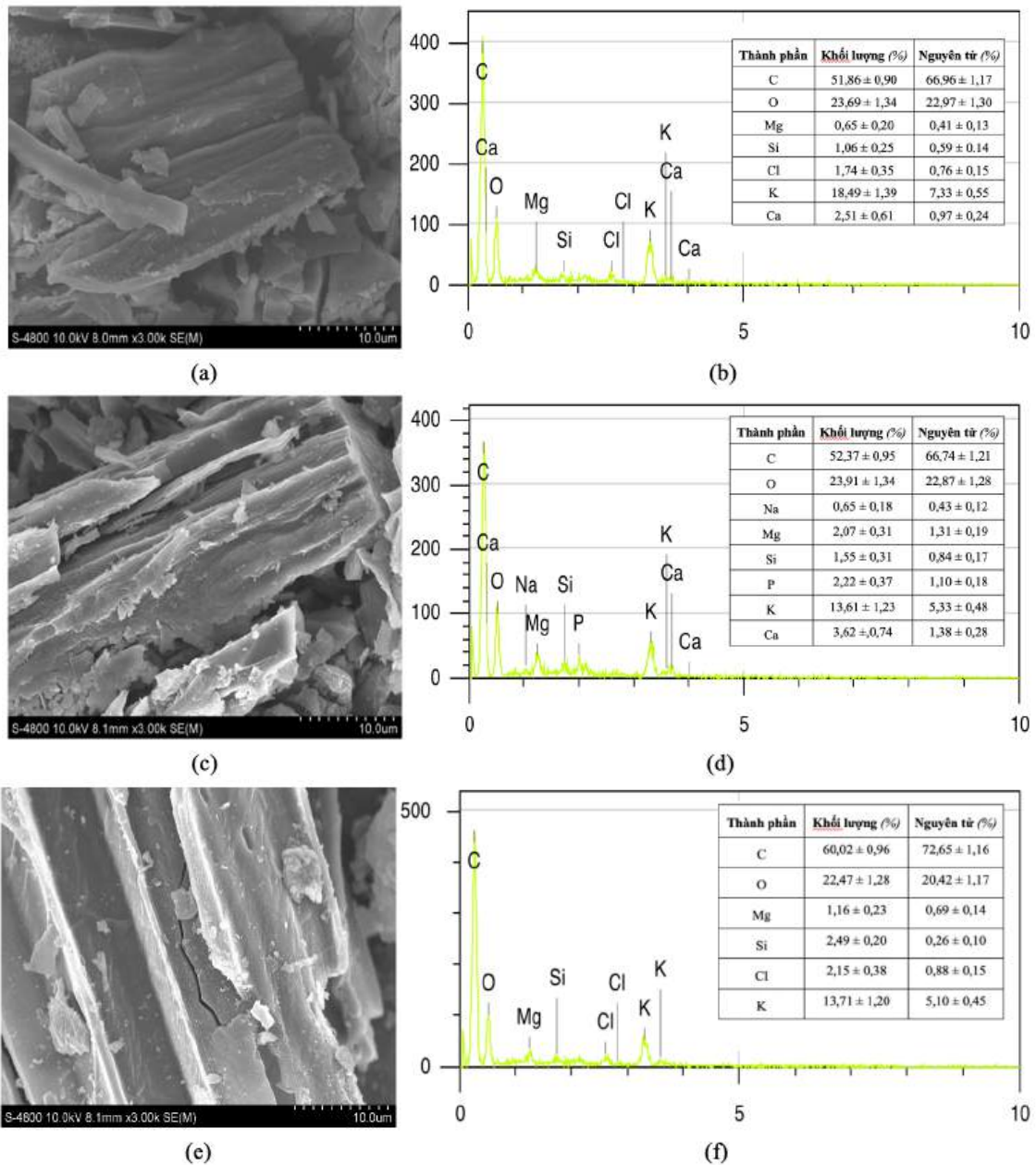
Hình 2.9. Phương pháp TGA [109]

Chương 3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Đặc tính của than sinh học

3.1.1. Kết quả phân tích SEM-EDX

TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc được tổng hợp thông qua quá trình nhiệt phân yếm khí ở các mức nhiệt độ 400 °C, 500 °C và 600 °C trong 1 giờ. Sau đó các mẫu TSH được nghiền mịn, rây qua để đồng nhất kích thước hạt, rửa lại bằng ethanol kết hợp siêu âm để làm sạch phần tạp chất bám trên bề mặt và sấy khô nhằm loại bỏ tối đa hàm lượng ẩm trong TSH.



Hình 3.1. Kết quả phân tích SEM-EDX của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc: (a) Kết quả SEM của mẫu BCF-400, (b) Kết quả EDX của mẫu BCF-400, (c) Kết quả SEM của mẫu BCF-500, (d) Kết quả EDX của mẫu BCF-500, (e) Kết quả SEM của mẫu BCF-600 và (f) Kết quả EDX của mẫu BCF-600

Để khảo sát hình thái bề mặt và thành phần nguyên tố của TSH, các mẫu được phân tích bằng phương pháp SEM-EDX. Chuẩn bị một lượng nhỏ mẫu khô, cố định trên băng dính carbon và đưa vào buồng chân không. Các điện tử tạo thành chùm tia electron, đi qua thấu kính quét trên bề mặt mẫu sẽ tạo ra tín hiệu cho phép ghi nhận và truyền thông tin về máy chủ tạo ra hình ảnh. Hình ảnh được ghi ở độ phóng đại từ 2 μm đến 100 μm nhằm đánh giá hình thái của TSH theo nhiệt độ nhiệt phân khác nhau. Bên cạnh đó để đánh giá thành phần nguyên tố trên bề mặt các mẫu TSH BCF-400, BCF-500 và BCF-600 được tiếp tục xác định bằng phổ tán xạ năng lượng tia X. Phương pháp phân tích EDX cho phép nhận diện tương đối các nguyên tố còn lưu giữ trên bề mặt thân giả cây chuối sau nhiệt phân, từ đó làm rõ hơn bản chất carbon - khoáng của TSH cũng như sự thay đổi thành phần nguyên tố trên bề mặt theo nhiệt độ xử lý. Việc kết hợp SEM-EDX không chỉ phản ánh sự biến đổi hình thái của thân giả cây chuối sau quá trình carbon hoá mà còn góp phần làm rõ mối liên hệ giữa cấu trúc bề mặt và sự phân bố các thành phần khoáng trong TSH.

Dựa vào hình 3.1, kết quả phân tích SEM-EDX cho thấy nhiệt độ nhiệt phân ảnh hưởng đồng thời đến hình thái bề mặt và thành phần nguyên tố của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc. Ở cả ba mẫu BCF-400, BCF-500 và BCF-600, kết quả SEM đều cho thấy thân giả cây chuối sau khi nhiệt phân vẫn mang đặc trưng của hệ sợi thực vật nhưng đã bị biến đổi theo mức độ khác nhau, trong khi phổ EDX cho thấy bề mặt TSH không phải là carbon thuần túy mà là một hệ carbon-khoáng, trong đó C và O luôn là hai nguyên tố chiếm ưu thế, nhưng vẫn bảo lưu một lượng đáng kể các nguyên tố khoáng trên bề mặt. Quá trình nhiệt phân không chỉ làm biến đổi cấu trúc lignocellulose ban đầu mà còn chi phối sự tái phân bố các thành phần khoáng trong TSH.

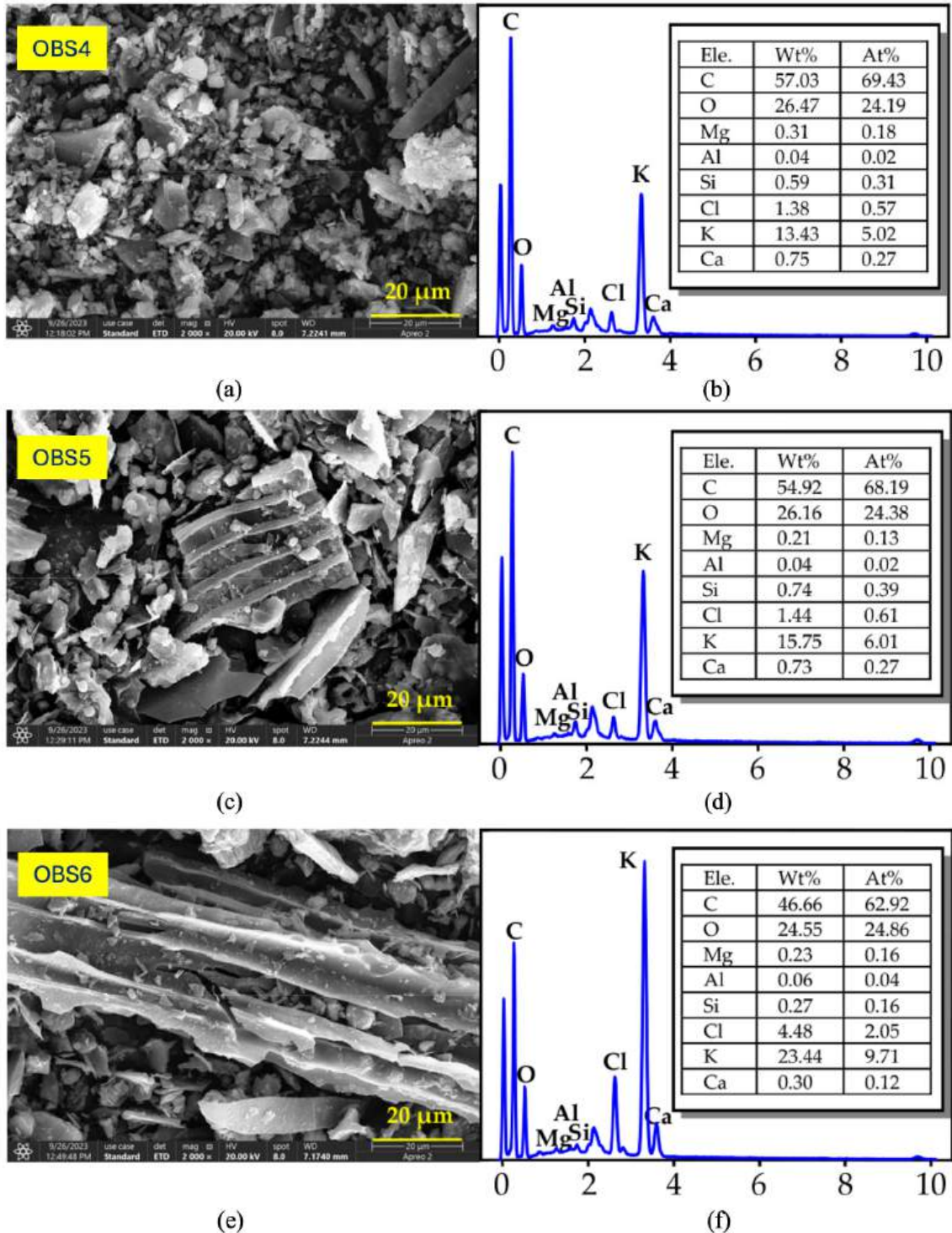
Đối với mẫu BCF-400, dựa vào quan sát hình 3.1 (a) cho thấy bề mặt mẫu đã bắt đầu xuất hiện sự phân tách giữa các lớp, có xu hướng xếp song song và hình thành các rãnh dọc trên bề mặt. Nhưng nhìn chung hình thái tổng thể của sợi vẫn chưa bị phá vỡ, vẫn còn giữ tương đối rõ cấu trúc bó sợi của thân giả cây chuối. Khi ở nhiệt độ 400 $^{\circ}\text{C}$, quá trình nhiệt phân làm mất một phần các cấu tử dễ bay hơi và bắt đầu làm biến dạng khung lignocellulose, trong khi nền cấu trúc ban đầu vẫn còn được duy trì ở mức đáng kể. Dựa vào hình 3.1 (b) kết quả EDX của BCF-400 cũng cho thấy hàm lượng C đạt 51,86%, O đạt 23,69%, K đạt 18,49% và ghi nhận sự hiện diện của Mg, Si, Cl và Ca với hàm lượng thấp hơn. Sự hiện diện đồng thời của C, O và K ở mức tương đối cao cho thấy BCF-400 đã hình thành pha carbon hoá ban đầu nhưng vẫn còn bảo lưu các thành phần khoáng của nguyên liệu sinh khối.

Khi tăng nhiệt độ nhiệt phân lên 500°C, quan sát hình 3.1 (c) cho thấy mức độ tách lớp giữa các sợi tăng lên, các mép gãy, khoảng trống và bề mặt thô ráp xuất hiện rõ hơn, phản ánh sự phân hủy mạnh hơn của cellulose và hemicellulose cùng với sự giải phóng các chất dễ bay hơi ra khỏi nền carbon. Mức nhiệt độ này, TSH không còn giữ nguyên trạng thái sợi tương đối nguyên vẹn như ở BCF-400 mà chuyển sang trạng thái mở hơn, nhám hơn và tăng bề mặt tiếp xúc. Bên cạnh đó, dựa vào hình 3.1 (d) cho thấy hàm lượng C tăng nhẹ lên 52,37%, trong khi O gần như không thay đổi đáng kể ở mức 23,91%. Hàm lượng K giảm xuống 13,61%, nhưng đồng thời trên bề mặt lại xuất hiện thêm Na và P, trong khi Mg và Ca tăng lên lần lượt đạt 2,07% và 3,62%. Diễn biến này cho thấy khi nhiệt độ tăng đến 500 °C, ngoài quá trình carbon hoá tiếp tục diễn ra, sự phân hủy của nền hữu cơ còn làm bộc lộ rõ hơn một số thành phần khoáng vốn nằm trong thân giả cây chuối ban đầu, từ đó làm cho thành phần khoáng trên bề mặt trở nên đa dạng hơn ở vùng phân tích [110].

Đối với mẫu BCF-600, hình 3.1 (e) cho thấy quá trình carbon hoá đã diễn ra mạnh hơn, làm cho cấu trúc bề mặt bị phân mảnh nhiều hơn so với hai mẫu còn lại. Bề mặt xuất hiện các nếp gãy, khe nứt rõ hơn, phản ánh sự phá vỡ sâu hơn của khung cấu trúc ban đầu và sự chuyển dần sang trạng thái carbon rắn có hình thái không đồng đều. Đồng thời dựa vào hình 3.1 (f) kết quả EDX cho thấy hàm lượng C tăng mạnh lên 60,02%, trong khi O giảm còn 22,47%. Khi ở nhiệt độ 600 °C TSH có xu hướng giàu carbon hơn và nghèo oxy hơn. Bên cạnh đó, hàm lượng K vẫn còn hiện diện ở mức 13,71%, Si tăng lên đến 2,49%, trong khi Mg và Cl tiếp tục được ghi nhận với hàm lượng thấp, còn Na, P và Ca không còn xuất hiện trong vùng phân tích. Sự gia tăng nhiệt độ nhiệt phân không chỉ làm tăng mức độ carbon hoá mà còn làm thay đổi trạng thái tồn tại của các nguyên tố khoáng trong TSH [111]. Kết quả cho thấy khi nhiệt độ tăng lên 600 °C, thành phần khoáng trên bề mặt không chỉ bị tái phân bố mà còn có thể xảy ra chuyển pha và gợi ý sự hiện diện rõ hơn của pha khoáng vô cơ và các cấu tử giàu silicat trên bề mặt TSH ở nhiệt độ cao hơn [112]. Khi nhiệt độ nhiệt phân tăng TSH có xu hướng giàu C hơn và nghèo O hơn, tổng hàm lượng các nhóm chức chứa oxy giảm dần khi nhiệt độ nhiệt phân tăng do sự phân hủy mạnh của cellulose và hemicellulose, đồng thời quá trình decarbonylation và aromatization diễn ra rõ hơn ở nhiệt độ cao [113].

Để đánh giá rõ hơn ảnh hưởng của tình trạng nhiễm bệnh Foc đến hình thái bề mặt và thành phần nguyên tố của TSH từ thân giả cây chuối. Kết quả phân tích SEM-EDX của các mẫu BCF-400, BCF-500 và BCF-600 được so sánh với kết quả SEM-EDX của TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh thông qua các mẫu OBS4, OBS5, OBS6 được nhiệt phân tại các nhiệt độ 400 °C, 500 °C, 600 °C của tác giả

Wang và cộng sự [114]. Việc đối chiếu đồng thời cả hình thái cấu trúc và thành phần nguyên tố bề mặt giúp làm rõ hơn mức độ tương đồng cũng như khác biệt giữa hai nguồn nguyên liệu, từ đó đánh giá liệu sự hiện diện của bệnh Foc trong nguyên liệu ban đầu ảnh hưởng đến sự thay đổi bản chất của TSH sau nhiệt phân.



Hình 3.2. Kết quả phân tích SEM-EDX của TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh Foc [114]: (a) Kết quả SEM của mẫu OBS4, (b) Kết quả EDX của mẫu OBS4, (c) Kết quả SEM của mẫu OBS5, (d) Kết quả EDX của mẫu OBS5, (e) Kết quả SEM của mẫu OBS6 và (f) Kết quả EDX của mẫu OBS6

Xét về hình thái bề mặt, dựa vào hình 3.1 (a), (c), (e) với hình 3.2 (a), (c), (e) nhận thấy sự biến đổi hình thái bề mặt của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc có sự tương đồng với TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh Foc. Ở hình 3.1 (a) mẫu BCF-400 vẫn còn giữ được tương đối rõ cấu trúc bó sợi dạng phiến dài xếp song song, bề mặt xuất hiện các rãnh dọc và sự phân tách lớp nhưng hình thái sợi ban đầu vẫn còn nhận diện được. Ngược lại, hình 3.2 (a) mẫu OBS4 lại biểu hiện trạng thái phân mảnh mạnh hơn, gồm nhiều mảnh vụn và hạt rời không đồng đều, trong đó cấu trúc bó sợi không còn thể hiện rõ như ở mẫu BCF-400. Quá trình nhiệt phân mới chỉ làm biến dạng bước đầu khung lignocellulose mà chưa phá hủy sâu cấu trúc nguyên liệu.

Khi tăng nhiệt độ lên 500 °C, quan sát ở hình 3.1 (c) của mẫu BCF-500 và hình 3.2 (c) của mẫu OBS5 đều cho thấy mức độ biến đổi bề mặt mạnh hơn so với mẫu BCF-400 và mẫu OBS4. Tuy nhiên mẫu BCF-500 có xu hướng thô ráp hơn, các mép gãy và khoảng trống giữa các phiến sợi xuất hiện rõ hơn, cấu trúc phân mảnh hơn. Ngược lại, mẫu OBS5 vẫn còn duy trì được các bó sợi dạng phiến tương đối gọn, dù đã có hiện tượng tách lớp và vỡ vụn. Kết quả cho thấy khi ở nhiệt độ 500 °C cả hai mẫu đều bắt đầu có sự phá vỡ cấu trúc nguyên liệu ban đầu, nhưng mẫu BCF-500 bị nhiễm bệnh Foc có xu hướng mở cấu trúc mạnh hơn trên bề mặt TSH, phản ánh sự phân hủy mạnh hơn của các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi.

Còn khi nhiệt độ đến 600 °C, dựa vào hình 3.1 (e) của mẫu BCF-600 và hình 3.2 (e) của mẫu OBS6 cả hai mẫu đều cho thấy cấu trúc dạng phiến sợi kéo dài. Tuy nhiên, mẫu BCF-600 biểu hiện rõ khe nứt dọc theo bề mặt phiến, xuất hiện các hạt nhỏ khoảng 2-5 µm bám trên bề mặt TSH, phản ánh trạng thái carbon hoá sâu hơn kèm theo sự phá vỡ cục bộ của cấu trúc TSH. Trong khi đó, mẫu OBS6 cũng thể hiện dạng phiến sợi kéo dài nhưng khe nứt nhỏ hơn, xuất hiện nhiều hạt nhỏ khoảng 2-3 µm bám trên bề mặt TSH và có xu hướng liên khối hơn so với mẫu BCF-600.

Xét về thành phần nguyên tố trên bề mặt, kết quả EDX của các mẫu đều cho thấy hàm lượng C, O và K là các thành phần nguyên tố chính, dù nguyên liệu đầu vào bị nhiễm hoặc không bị nhiễm bệnh Foc thì TSH sau nhiệt phân vẫn mang bản chất của một hệ carbon-khoáng. Tuy nhiên, khi so sánh theo từng nhiệt độ, sự phân bố nguyên tố giữa hai loại TSH có sự khác nhau.

Ở nhiệt độ 400 °C, nhận thấy ở hình 3.2 (b) của mẫu OBS4 có hàm lượng C chiếm 57,03% cao hơn so với 51,86% ở hình 3.1 (b) của mẫu BCF-400. Đồng thời hàm lượng O của mẫu OBS4 cũng chiếm 26,47% cao hơn so với 23,69% của mẫu BCF-400. Ngược lại, mẫu BCF-400 lại giàu hàm lượng K, mẫu BCF-400 có đến

18,49% cao hơn so với 13,43% của mẫu OBS4. Và đặc biệt hàm lượng Ca của mẫu BCF-400 cũng cao hơn nhiều, đạt 2,51% trong khi mẫu OBS4 chỉ đạt 0,75%. Ngoài ra, mẫu BCF-400 không ghi nhận sự có mặt của hàm lượng Al nhưng lại có các thành phần khác như Mg, Si và Cl ở mức cao hơn so với mẫu OBS4.

Đối với nhiệt độ 500 °C, quan sát hình 3.1 (d) của mẫu BCF-500 và hình 3.2 (d) của mẫu OBS5 cho thấy hàm lượng C của hai mẫu khá gần nhau, lần lượt là 52,37% và 54,92%. Nhưng hàm lượng O của mẫu OBS5 vẫn tiếp tục cao hơn, đạt 26,16% so với mẫu BCF-500 đạt 23,91%. Đồng thời hàm lượng K của mẫu OBS5 đạt 15,75% cao hơn mẫu BCF-500 là 13,61%. Nhưng mẫu BCF-500 lại giàu hàm lượng Mg, Si và đặc biệt là Ca. Hàm lượng Ca của mẫu BCF-500 đạt 3,62% cao hơn so với mẫu OBS5 chỉ có 0,73%. Ngoài ra mẫu BCF-500 xuất hiện thêm Na và P với hàm lượng lần lượt là 0,65% và 2,22%, trong khi mẫu OBS5 không ghi nhận hai nguyên tố này.

Khi nhiệt độ đến 600 °C, dựa vào hình 3.1 (f) của mẫu BCF-600 và hình 3.2 (f) của mẫu OBS6, nhận thấy sự khác biệt trở nên rõ nhất khi mẫu BCF-600 có hàm lượng C rất cao đạt 60,02%, trong khi mẫu OBS6 chỉ còn 46,66%. Kéo theo đó, hàm lượng Si của mẫu BCF-600 chiếm 2,49% cũng cao hơn nhiều so với mẫu OBS6 chỉ đạt 0,27%. Ngược lại, mẫu OBS6 lại làm giàu hàm lượng K đạt đến 23,44% cao hơn so với mẫu BCF-600 chỉ có 13,71%. Đồng thời, hàm lượng Cl ở mẫu OBS6 cũng tăng lên 4,48%, trong khi mẫu BCF-600 chỉ đạt 2,15%.

Từ kết quả SEM-EDX của cả hai loại nguyên liệu có thể thấy, cả hai đều hình thành TSH mang bản chất carbon-khoáng sau nhiệt phân, nhưng hình thái cấu trúc và thành phần khoáng trên bề mặt đều có sự khác nhau. Về hình thái cấu trúc bề mặt, các mẫu TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc có hình thái bề mặt với cấu trúc bó sợi. Trong khi các mẫu TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh Foc đều xuất hiện các mảnh rời rạc, đặc trưng như ở mẫu OBS4 và mẫu OBS5. Khi đến nhiệt độ cao hơn, cả mẫu BCF-600 và mẫu OBS6 đều xuất hiện các vết nứt và nhiều mảnh bám trên bề mặt TSH. Về thành phần nguyên tố, các mẫu TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc có xu hướng giàu thành phần khoáng như: Ca, Mg, Si, Na, P. Trong khi các mẫu TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh Foc có xu hướng giữ hàm lượng O cao hơn và đặc biệt làm giàu hàm lượng K, mạnh nhất là ở mẫu OBS6. Kết quả này cho thấy sự hiện diện của bệnh Foc không làm mất đi bản chất carbon-khoáng của TSH sau nhiệt phân, nhưng có ảnh hưởng rõ đến hình thái bề mặt TSH cũng như xu hướng phân bố các nguyên tố khoáng trên bề mặt TSH, thành phần khoáng bề mặt của TSH từ thân giả chuối nhiễm bệnh Foc đa nguyên tố hơn so

với TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh [115]. Đây là một điểm có ý nghĩa đối với ứng dụng, TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc vừa giàu carbon vừa giữ được thành phần khoáng đa dạng có lợi hơn cho mục tiêu sử dụng trong phân bón và cải tạo đất.

3.1.2. Kết quả phân tích BET

TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc được tổng hợp ở các mức nhiệt độ 400 °C, 500 °C và 600 °C trong thời gian 1 giờ. Các mẫu BCF-400, BCF-500, BCF-600 được nghiền mịn, rây qua lưới 60 mesh, sau đó rửa lại bằng etanol và xử lý siêu âm trong 20 phút nhằm loại bỏ các thành phần tạp chất còn bám trên bề mặt vật liệu. Để đảm bảo độ chính xác cao, các mẫu được khử khí ở 300 °C trong 15 giờ trước khi tiến hành hấp phụ và giải hấp nitơ ở nhiệt độ 77 K. Diện tích bề mặt riêng của mẫu được tính theo phương trình Brunauer Emmett Teller, thể tích lỗ xốp và đường kính lỗ xốp của mẫu được xác định từ đường đẳng nhiệt giải hấp bằng mô hình Barrett Joyner Halenda [116].

Bảng 3.1. Kết quả diện tích bề mặt riêng, thể tích lỗ xốp, đường kính lỗ xốp của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc

	Diện tích bề mặt riêng (m^2/g)	Thể tích lỗ xốp (cm^3/g)	Đường kính lỗ xốp (nm)
BCF-400	4,856	0,019	2,065
BCF-500	27,979	0,054	2,598
BCF-600	24,227	0,053	3,252

Dựa vào bảng 3.1. kết quả cho thấy nhiệt độ nhiệt phân có ảnh hưởng rõ rệt đến sự phát triển cấu trúc mao quản của vật liệu. Khi nhiệt độ tăng từ 400 °C lên 500 °C, diện tích bề mặt riêng tăng mạnh từ 4,856 m^2/g lên 27,979 m^2/g , đồng thời thể tích lỗ xốp tăng từ 0,019 cm^3/g lên 0,054 cm^3/g . Nhiệt độ của quá trình nhiệt phân tăng dẫn đến sự phân hủy của các thành phần như cellulose, hemicellulose, một phần lignin sẽ thúc đẩy quá trình giải phóng chất dễ bay hơi, làm mở các lỗ xốp hoặc hình thành thêm các lỗ xốp mới. Từ đó làm tăng diện tích bề mặt riêng, thể tích lỗ xốp, đường kính lỗ xốp của TSH [117].

Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng nhiệt độ lên 600 °C, diện tích bề mặt riêng giảm xuống còn 24,227 m^2/g , trong khi thể tích lỗ xốp hầu như không thay đổi đáng kể, chỉ giảm nhẹ còn 0,053 cm^3/g . Ngược lại, đường kính lỗ xốp của TSH lại tăng từ 2,065 nm ở mẫu BCF-400 lên 2,598 nm ở mẫu BCF-500 và đạt 3,252 nm ở mẫu BCF-600.

Khi tăng nhiệt độ nhiệt phân, các hợp chất dễ bay hơi càng bị loại bỏ, nhưng nhiệt độ càng cao cũng ảnh hưởng đến quá trình tái cấu trúc vật liệu có thể làm các lỗ nhỏ hơn nhất, mở rộng thành lỗ lớn hơn hoặc nhiệt độ tăng làm hàm lượng tro tăng dẫn đến che phủ các lỗ xốp làm diện tích bề mặt tiếp xúc giảm dù đường kính lỗ tăng lên [118].

Để đánh giá ảnh hưởng của nguyên liệu sinh khối từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc đến diện tích bề mặt riêng, kích thước lỗ xốp và thể tích lỗ xốp. Các mẫu BCF-400, BCF-500, BCF-600 được so sánh với các mẫu TSH từ thân giả cây chuối không nhiễm bệnh theo nghiên cứu của nhóm tác giả Shuang và cộng sự. Mẫu của nhóm tác giả được chuẩn bị và sấy khô trong không khí ở 60 °C bằng lò sấy gió, sau đó nghiền nhỏ để lọt qua rây 60 mesh. Bột thân giả chuối được nung nóng với tốc độ 5°C/phút cho đến khi đạt nhiệt độ từ 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C duy trì 1 giờ trong lò nung môi trường khí nitơ. Sau đó, TSH được rửa nhiều lần bằng nước khử ion, sấy khô ở 60 °C trong 24 giờ. TSH sau khi đã sấy khô được bảo quản trong bình hút ẩm kín khí, được ký hiệu lần lượt là BB300, BB400, BB500 và BB600.

Bảng 3.2. Kết quả diện tích bề mặt riêng, thể tích lỗ xốp, đường kính lỗ xốp của TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh Foc [119]

	Diện tích bề mặt riêng (m^2/g)	Thể tích lỗ xốp (cm^3/g)	Đường kính lỗ xốp (nm)
BB300	4,98	0,00959	10,39
BB400	6,62	0,01458	11,85
BB500	11,27	0,03932	15,60
BB600	8,53	0,04389	19,45

Dựa vào bảng 3.1 và bảng 3.2 ở cả hai thí nghiệm, khi so sánh ở vùng nhiệt độ từ 400 °C đến 600 °C, diện tích bề mặt riêng tăng từ 400 °C lên 500 °C, sau đó giảm xuống ở nhiệt độ 600 °C. Diện tích bề mặt riêng của kết quả của nhóm tác giả Shuang tăng từ 6,62 m^2/g lên đến 11,27 m^2/g rồi giảm xuống 8,53 m^2/g , thể tích lỗ xốp tăng từ 0,01458 cm^3/g lên 0,03932 cm^3/g và tiếp tục tăng nhẹ đến 0,04389 cm^3/g , còn đường kính lỗ xốp tăng liên tục từ 11,85 nm lên 15,60 nm và 19,45 nm. Kết quả cho thấy tại nhiệt độ 500 °C được đánh giá là vùng nhiệt độ lý tưởng cho diện tích bề mặt riêng của TSH. Khi tăng lên 600 °C, quá trình mở rộng đường kính lỗ xốp diễn ra mạnh hơn nhưng không còn làm tăng thêm diện tích bề mặt riêng nữa.

Từ kết quả diện tích bề mặt ở cả hai nghiên cứu, đối với mẫu BCF-400 có diện tích bề mặt riêng là 4,856 m²/g và thể tích lỗ xốp là 0,019 cm³/g gần tương đồng với mẫu BB300 với diện tích bề mặt riêng là 4,98 m²/g và thể tích lỗ xốp là 0,00959 cm³/g. Kết quả cho thấy quá trình phát triển cấu trúc bề mặt và lỗ xốp của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc diễn ra chậm hơn, cần nhiệt độ cao hơn so với TSH từ thân giả cây chuối không nhiễm bệnh. Do thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc nên đã làm thay đổi cấu trúc và mức độ liên kết của lignocellulose ban đầu, đồng thời ảnh hưởng đến sự phân bố khoáng trong mô thực vật, từ đó làm dịch chuyển ngưỡng nhiệt cần thiết để mở rộng lỗ xốp sang vùng nhiệt độ cao hơn.

Ở vùng nhiệt độ 500 °C, cả hai thí nghiệm đều cho thấy đây là mức nhiệt độ mà diện tích bề mặt riêng đạt giá trị lớn nhất. Đối với mẫu BCF-500 có diện tích bề mặt riêng là 27,979 m²/g cao hơn so với mẫu BB500 với diện tích bề mặt riêng là 11,27 m²/g. Khi so sánh ở cùng nhiệt độ, TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc có khả năng phát triển diện tích bề mặt cao hơn so với TSH từ thân giả cây chuối không nhiễm bệnh.

Cùng với đó, khi so sánh về đường kính lỗ xốp, các mẫu BCF-400, BCF-500, BCF-600 có kích thước lỗ xốp dao động từ 2,065 nm đến 3,252 nm nhỏ hơn so với các mẫu BB300, BB400, BB500, BB600 dao động từ 10,39 nm đến 19,45 nm. Kết quả so sánh cho thấy mao quản của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc có xu hướng phát triển theo hướng tạo nhiều lỗ xốp hơn và đường kính lỗ xốp nhỏ hơn thay vì chỉ mở rộng thành các lỗ xốp lớn. Với diện tích bề mặt tiếp xúc của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc cao hơn và đường kính lỗ xốp nhỏ hơn so với TSH từ thân giả cây chuối không nhiễm bệnh, đây là lợi thế cho việc phát triển TSH từ thân giả cây chuối làm nền giữ chất dinh dưỡng trong phân bón và giữ nước giúp ích cho cây trồng.

3.1.3. Kết quả phân tích nguyên tố và phân tích kỹ thuật

Các mẫu TSH sau nhiệt phân được nghiền mịn, rây qua lưới 6x10 mesh, tiếp tục rửa bằng etanol, siêu âm trong 20 phút, sau đó sấy ở 80 °C trong 24 giờ và bảo quản kín trước khi đem đi phân tích. Mẫu nguyên liệu thân giả cây chuối ban đầu và ba mẫu TSH tương ứng được sử dụng để phân tích nguyên tố và phân tích kỹ thuật. Kết quả thu được cho phép đánh giá mức độ biến đổi thành phần hóa học và đặc tính nguyên liệu của TSH theo nhiệt độ nhiệt phân.

Phân tích nguyên tố và phân tích kỹ thuật được sử dụng như hai nhóm chỉ tiêu hỗ trợ nhằm làm rõ bản chất hóa học và đặc tính công nghệ của TSH trước và sau nhiệt phân. Trong đó, phân tích nguyên tố cho phép theo dõi sự biến đổi của các

nguyên tố chính như C, H, O, N, S. Qua đó phản ánh mức độ carbon hoá, xu hướng khử oxy và sự hình thành khung carbon bền hơn của TSH khi nhiệt độ nhiệt phân tăng. Các chỉ tiêu phân tích kỹ thuật như độ ẩm, hàm lượng tro, chất bốc, carbon cố định, hiệu suất thu hồi và pH. Các kết quả cung cấp cơ sở để đánh giá mức độ chuyển hóa của nguyên liệu, sự tích lũy pha khoáng vô cơ và tính chất nền của TSH sau khi nhiệt phân.

Bảng 3.3. Đặc tính của thân giả cây chuối chưa nhiệt phân và TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc

Thành phần phân tích		Thân giả cây chuối chưa nhiệt phân	BCF-400	BCF-500	BCF-600
Phân tích nguyên tố (Ultimate analysis)	C%	33,93 ± 0,03	49,62 ± 0,23	54,25 ± 0,42	58,46 ± 0,56
	H%	4,02 ± 0,01	3,56 ± 0,17	2,83 ± 0,15	2,24 ± 0,38
	O%	60,49 ± 0,06	43,27 ± 0,32	39,41 ± 0,23	34,52 ± 0,42
	N%	1,47 ± 0,01	2,26 ± 0,22	2,14 ± 0,18	3,28 ± 0,34
	S%	0,09 ± 0,01	1,29 ± 0,16	1,37 ± 0,24	1,50 ± 0,23
Phân tích kỹ thuật (Proximate analysis)	MC%	1,93 ± 0,01	6,12 ± 0,52	6,58 ± 0,57	9,67 ± 0,41
	AC%	23,53 ± 0,07	25,56 ± 0,31	26,48 ± 0,53	29,43 ± 0,58
	VM%	59,77 ± 0,48	25,07 ± 0,24	18,62 ± 0,44	16,52 ± 0,36
	FC%	14,78 ± 0,04	43,25 ± 0,46	48,32 ± 0,37	44,38 ± 0,25
Hiệu suất (%)			30,05	26,95	22,14
pH			10,30	10,25	10,46
<p><i>Ghi chú:</i> MC%: Hàm lượng ẩm AC%: Hàm lượng tro VM%: Hàm lượng hợp chất bay hơi FC%: Hàm lượng cố định carbon</p>					

Dựa vào bảng 3.3 cho thấy thân giả cây chuối ban đầu là nguồn sinh khối lignocellulose có hàm lượng O rất cao (60,49%), trong khi hàm lượng C còn thấp (33,93%), và hàm lượng H (4,02%). Kết quả cho thấy trong thân giả cây chuối còn chứa nhiều nước và thành phần hữu cơ tương đối cao. Về phân tích kỹ thuật, nguyên liệu có hàm lượng chất dễ bay hơi 59,77%, hàm lượng tro tương đối lớn 23,53% và

carbon cố định chỉ đạt 14,78%. Thân giả chuỗi là loại sinh khối giàu oxy, giàu chất dễ bay hơi nhưng đồng thời cũng chứa lượng khoáng khá lớn, nên quá trình nhiệt phân sẽ chịu ảnh hưởng đáng kể của các thành phần vô cơ trong nguyên liệu. Đồng thời trong thân giả cây chuỗi chứa hàm lượng N và S thấp là một lợi thế về mặt môi trường khi sử dụng thân giả chuỗi làm nguyên liệu chuyên hóa nhiệt.

Sau quá trình nhiệt phân, thành phần nguyên tố của TSH biến đổi theo hướng đặc trưng cho quá trình carbon hoá càng sâu khi nhiệt độ tăng. Hàm lượng C tăng liên tục từ 49,62% ở mẫu BCF-400 lên 54,25% ở mẫu BCF-500 và đạt 58,46% ở mẫu BCF-600, trong khi hàm lượng O giảm tương ứng từ 43,27% xuống 39,41% và còn 34,52%. Kết quả chứng minh khi nhiệt độ nhiệt phân tăng, các phản ứng khử nước và carboxyl diễn ra mạnh hơn, làm loại bỏ dần các nhóm chức chứa oxy và thúc đẩy sự hình thành cấu trúc carbon ổn định hơn. Hàm lượng H giảm từ 4,02% ở nguyên liệu ban đầu xuống 3,56% ở BCF-400, sau đó tiếp tục giảm còn 2,83% ở BCF-500 và 2,24% ở BCF-600, cho thấy các thành phần hữu cơ kém bền nhiệt đã bị loại bỏ dần khi nhiệt độ tăng.

Kết quả phân tích kỹ thuật cũng thể hiện ảnh hưởng nhiệt độ đến đặc tính của TSH. Hiệu suất TSH giảm từ 30,05% mẫu BCF-400 xuống 26,95% mẫu BCF-500 và còn lại 22,14% mẫu BCF-600. Đồng thời hàm lượng chất dễ bay hơi giảm mạnh từ 25,07% xuống 18,62% và 16,52% do ngày càng nhiều cấu tử dễ bay hơi bị tách khỏi nền sinh khối. Bên cạnh đó, hàm lượng tro tăng dần từ 25,56% đến 29,43% kết quả đánh giá được các thành phần khoáng vô cơ dần hình thành khi các thành phần hữu cơ bị phân hủy theo nhiệt độ. Sự hình thành các thành phần pha khoáng vô cơ tăng khi nhiệt độ tăng, làm ảnh hưởng đến độ pH của TSH cao. Do đó TSH thường mang tính kiềm cao, pH dao động từ 10,25 đến 10,46. Hàm lượng carbon cố định tăng từ 43,25% ở mẫu BCF-400 lên 48,32% ở mẫu BCF-500, nhưng giảm xuống 44,38% ở mẫu BCF-600. Trong khoảng nhiệt độ từ 400 °C đến 500 °C, mẫu BCF-500 cho thấy sự cân bằng tốt hơn giữa quá trình loại bỏ thành phần dễ bay hơi và duy trì hàm lượng carbon cố định. Mặc dù ở mẫu BCF-600 mức độ carbon hoá vẫn tiếp tục tăng hàm lượng nguyên tố C, nhưng hàm lượng carbon cố định giảm dần. Các phản ứng cracking thứ cấp và phân hủy khi nhiệt độ tăng làm hao hụt thành phần carbon hữu cơ. Đồng thời hàm lượng tro của mẫu BCF-600 tăng dần làm cho hàm lượng carbon cố định tính theo khối lượng tương đối bị giảm. Hơn thế nữa hàm lượng tro cao góp phần làm giảm hiệu suất [120].

Các kết quả phân tích kỹ thuật và thành phần nguyên tố đều cho thấy khi tăng nhiệt độ nhiệt phân từ 400 °C lên 600 °C, TSH từ thân giả cây chuỗi nhiễm bệnh Foc

chuyển dần theo hướng giàu C hơn, nghèo O hơn, ít thành phần dễ bay hơi hơn và giàu thành phần khoáng hơn. Đặc biệt mẫu BCF-500 đạt được giá trị tối ưu vì khả năng thu hồi hàm lượng carbon cố định cao, mẫu này được so sánh với một số nghiên cứu về TSH từ thân giả cây chuối không nhiễm bệnh tại cùng nhiệt độ 500 °C. Việc lựa chọn cùng một mức nhiệt độ khảo sát có ý nghĩa phương pháp luận quan trọng, vì giúp hạn chế ảnh hưởng của điều kiện công nghệ đến đặc tính sản phẩm, từ đó tạo cơ sở phù hợp hơn để xem xét vai trò của bản chất nguyên liệu đầu vào đối với thành phần và tính chất của TSH.

Bảng 3.4. So sánh đặc tính TSH BCF-500 từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc và TSH từ thân giả cây chuối không nhiễm bệnh của các nhóm nghiên cứu khác

Thành phần phân tích		BCF-500 <i>trong nghiên cứu này</i>	TSH từ thân giả cây chuối của nhóm tác giả <i>Vijayprakash và cộng sự, 2025</i>	TSH từ thân giả cây chuối của nhóm tác giả <i>Abdullah và cộng sự, 2023</i>	TSH từ thân giả cây chuối của nhóm tác giả <i>Song và cộng sự, 2023</i>
Phân tích nguyên tố (Ultimate analysis)	C%	54,25 ± 0,42	58,8 ± 0,2	43,23	47,61
	H%	2,83 ± 0,15	2,3 ± 0,03	0	2
	O%	39,41 ± 0,23	35,86 ± 0,4	36,81	19,39
	N%	2,14 ± 0,18	1,61 ± 0,02	19,96	0,41
	S%	1,37 ± 0,24	1,42 ± 0,02	0	-
Phân tích kỹ thuật (Proximate analysis)	MC%	6,58 ± 0,57	5,8 ± 0,4	6,1	-
	AC%	26,48 ± 0,53	20,3 ± 0,2	34	-
	VM%	18,62 ± 0,44	30,6 ± 0,3	33,2	-
	FC%	48,32 ± 0,37	43,3 ± 0,2	32,8	-
Tài liệu tham khảo			[121]	[122]	[123]
<p><i>Ghi chú:</i> MC%: Hàm lượng ẩm AC%: Hàm lượng tro VM%: Hàm lượng hợp chất bay hơi FC%: Hàm lượng cố định carbon</p>					

Dựa vào bảng 3.4 mẫu BCF-500 có nhiều đặc điểm vừa tương đồng và ít sự khác biệt so với các mẫu TSH từ thân giả cây chuối không nhiễm bệnh. Về phân tích nguyên tố, hàm lượng C của mẫu BCF-500 đạt 54,25% thấp hơn so với với kết quả TSH của nhóm tác giả Vijayprakash là 58,8%, nhưng cao hơn rõ rệt so với TSH của nhóm tác giả Abdullah là 43,23% và của nhóm tác giả Song là 47,61% [121], [122], [123]. Khi so sánh ở cùng nhiệt độ 500 °C, quá trình nhiệt phân thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc vẫn tạo ra sản phẩm có mức độ carbon hoá cao, không thua kém so với một số nguồn nguyên liệu không nhiễm bệnh.

Mặc dù hàm lượng H và S trong mẫu BCF-500 chứa 2,83% và 1,37% đạt xấp xỉ so với các mẫu TSH từ các nhóm nghiên cứu. Nhưng hàm lượng O của mẫu BCF-500 chứa 39,41%, cao hơn so với mẫu TSH của nhóm tác giả Vijayprakash và nhóm tác giả Abdullah. Đồng thời cao hơn nhiều khi so với hàm lượng O trong TSH của nhóm tác giả Song. Sự hiện diện tương đối lớn của các nhóm chức chứa oxy có thể chứa nhiều thành phần hữu cơ chưa carbon hoá, nhưng lại có thể là một ưu thế đối nhu cầu ứng dụng TSH trong phân bón nông nghiệp, như một vật liệu mang dinh dưỡng hoặc cải tạo đất. Mặc dù nguyên liệu là thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc, nhưng thành phần nguyên tố của TSH thu được vẫn nằm trong khoảng biến thiên tương tự như TSH từ thân giả cây chuối không nhiễm bệnh.

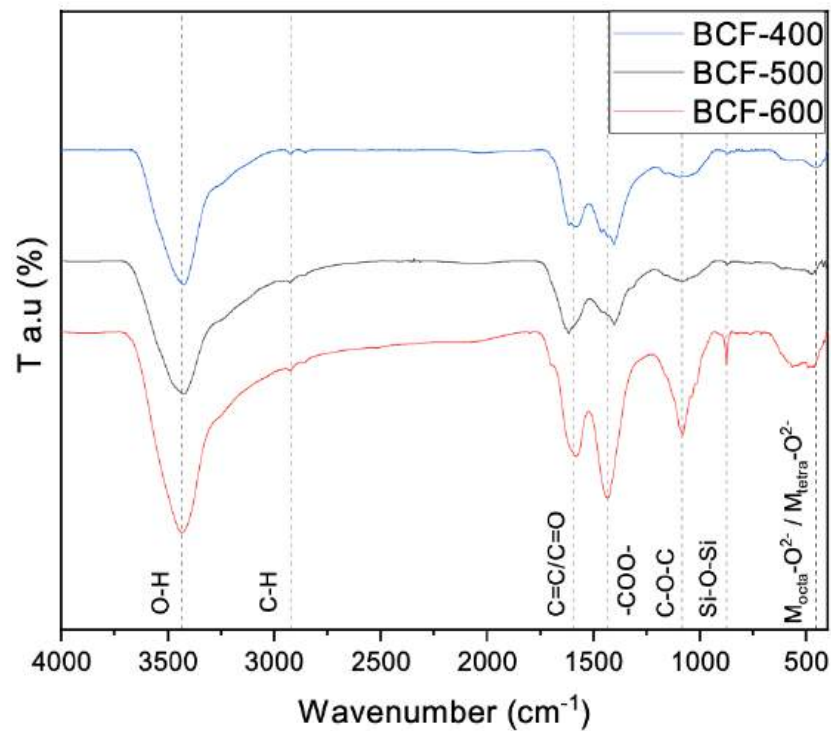
Về kết quả phân tích kỹ thuật, độ ẩm của mẫu BCF-500 chứa 6,58%, tương đương với TSH của nhóm tác giả Vijayprakash chứa 5,8% và của nhóm tác giả Abdullah chứa 6,1%, cho thấy trạng thái mẫu sau xử lý là tương đối tương đồng. Tuy nhiên, hàm lượng tro của mẫu BCF-500 chứa 26,48% cao hơn so với TSH của nhóm tác giả Vijayprakash và thấp hơn so với TSH của nhóm tác giả Abdullah. Kết quả này cho thấy TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc vẫn chứa các thành phần khoáng vô cơ nhiều. Trong khi đó, hàm lượng chất dễ bay hơi của mẫu BCF-500 chỉ còn 18,62% thấp hơn so với TSH của nhóm tác giả Vijayprakash (30,6%) và TSH của nhóm tác giả Abdullah (33,2%). Sự suy giảm mạnh hàm lượng chất dễ bay hơi, đã làm gia tăng hàm lượng carbon cố định, đối với mẫu BCF-500 đạt 48,32% cao hơn các mẫu TSH của nhóm tác giả Vijayprakash và Abdullah. Kết quả cho thấy mẫu BCF-500 đã đạt mức độ carbon hoá sâu hơn ở cùng nhiệt độ 500 °C. Dù cùng ở mức nhiệt độ nhiệt phân như nhau, TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc lại mang giá trị carbon tương đối tốt hơn, nhờ vào hàm lượng carbon cố định cao hơn và thành phần chất bay hơi thấp hơn.

Kết quả so sánh cho thấy mẫu BCF-500 tuy được tổng hợp từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc, nhưng chất lượng vẫn ổn định hơn so với các mẫu TSH từ

thân giả chuỗi không nhiễm bệnh. Ở một số chỉ tiêu quan trọng như hàm lượng C và carbon cố định, mẫu BCF-500 còn cho kết quả nổi bật hơn. Kết quả mang lại giá trị thực tiễn trong ứng dụng TSH vào phân bón nông nghiệp, vì nguồn sinh khối bị loại bỏ do mầm bệnh vẫn có thể được chuyển hóa thành TSH có chất lượng tốt, vừa góp phần xử lý phế phẩm nông nghiệp, vừa mở ra hướng ứng dụng trong lĩnh vực cải tạo đất và phân bón.

3.1.4. Kết quả phân tích FTIR

Phổ FTIR được nghiên cứu trong khoảng $400-4000\text{ cm}^{-1}$ của ba mẫu TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc ở các nhiệt độ khác nhau được thể hiện ở hình 3.3 kết quả phổ FTIR được sử dụng nhằm xác định sự biến đổi của các nhóm chức bề mặt theo nhiệt độ nhiệt phân. Ở cả ba mẫu BCF-400, BCF-500 và BCF-600 đều thể hiện một số vùng hấp thụ đặc trưng của vật liệu carbon có nguồn gốc lignocellulose sau nhiệt phân.



Hình 3.3. Kết quả phân tích FTIR của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc

Tại dải hấp thụ trong khoảng 3200 đến 3600 cm^{-1} , cả ba mẫu đều xuất hiện dải hấp thụ rộng tại đỉnh 3434 cm^{-1} của mẫu BCF-400; đỉnh 3436 cm^{-1} của mẫu BCF-500 và đỉnh 3433 cm^{-1} của mẫu BCF-600. Dải này là đặc trưng của nhóm hydroxyl, chủ yếu liên quan đến nước và các nhóm hydroxyl còn lại trong cấu trúc cellulose, hemicellulose, lignin hoặc các hợp phần oxy hóa trên bề mặt TSH. Mặc dù quá trình nhiệt phân đã diễn ra, nhưng bề mặt vật liệu vẫn còn chứa các nhóm chức giàu oxy,

có khả năng tương tác với nước và ion dinh dưỡng [124]. Khi nhiệt độ tăng từ 400 °C đến 600 °C, các thành phần hữu cơ được chuyển hoá làm lộ rõ ràng hơn các đỉnh hấp thụ.

Tại dải hấp thụ khoảng 2920-2850 cm^{-1} tương ứng với dao động kéo dài của liên kết C-H trong cấu trúc aliphatic CH và CH_2 . Sự xuất hiện của đỉnh 2923 cm^{-1} ở cả ba mẫu, chứng tỏ vẫn còn tồn tại mạch carbon aliphatic có nguồn gốc từ cellulose và hemicellulose chưa bị phân hủy hoàn toàn [125].

Đối với dải hấp thụ khoảng 1600-1750 cm^{-1} thể hiện rõ hơn sự khác biệt giữa các mẫu. Mẫu BCF-400 xuất hiện đỉnh tại 1615 cm^{-1} và mẫu BCF-500 xuất hiện đỉnh tại 1616 cm^{-1} và mẫu BCF-600 chủ yếu thể hiện đỉnh tại 1584 cm^{-1} . Các đỉnh này được đặc trưng cho dao động kéo dài của liên kết C=C trong vòng thơm hoặc C=O liên hợp [126]. Sự xuất hiện và dịch chuyển nhẹ của các đỉnh trong vùng này cho thấy quá trình nhiệt phân đã thúc đẩy sự tái sắp xếp cấu trúc lignin và sự hình thành hệ liên hợp thơm trong TSH. Trong đó, mẫu BCF-400 và mẫu BCF-500 vẫn giữ kiểu phân bố các đỉnh gần nhau hơn, còn mẫu BCF 600 cho thấy xu hướng tập trung tại đỉnh 1584 cm^{-1} , phản ánh mức độ tái cấu trúc thơm mạnh hơn ở nhiệt độ cao.

Tại dải hấp thụ trong khoảng 1400 đến 1500 cm^{-1} , các đỉnh của mẫu BCF-400 xuất hiện tại 1461 và 1402 cm^{-1} , mẫu BCF-500 xuất hiện đỉnh 1402 cm^{-1} và mẫu BCF-600 xuất hiện đỉnh 1436 cm^{-1} . Dải hấp thụ này đặc trưng cho dao động hóa trị đối xứng của nhóm -COO- [127]. Sự biến đổi các đỉnh cho thấy ảnh hưởng của nhiệt độ đến mức độ phân hủy và tái tổ chức các cấu trúc hữu cơ chứa nhóm carboxyl.

Đối với dải hấp thụ trong khoảng 1000-1200 cm^{-1} , các đỉnh tại 1092, 1084 và 1083 cm^{-1} lần lượt xuất hiện ở các mẫu BCF 400, mẫu BCF 500 và mẫu BCF 600, đặc trưng cho dao động kéo dài của liên kết C-O-C [128]. Đây là dải hấp thụ đặc trưng cho các cấu trúc ether hoặc liên kết oxy trong khung lignocellulose còn lại sau nhiệt phân. Mặc dù vị trí các đỉnh giữa ba mẫu khá gần nhau, nhưng hình dạng phổ của mẫu BCF-600 có dải hấp thụ rõ hơn, khi ở nhiệt độ 600 °C làm nổi bật một số nhóm chức chứa oxy bền hơn trên bề mặt vật liệu.

Ở dải hấp thụ thấp hơn 650-1000 cm^{-1} , cả ba mẫu đều xuất hiện các đỉnh quanh 875 cm^{-1} đến 872 cm^{-1} . Các đỉnh vùng này là đặc trưng của dao động kéo dài của liên kết Si-O-Si [129]. Đối với mẫu BCF-400 chỉ xuất hiện đỉnh tại 872 cm^{-1} , mẫu BCF-500 xuất hiện các đỉnh tại 873 và 758 cm^{-1} , trong khi mẫu BCF-600 xuất hiện nhiều đỉnh hơn tại 875, 825, 761 và 713 cm^{-1} . Kết quả cho thấy mẫu BCF-600 xuất hiện nhiều đỉnh hơn trong vùng, chứng minh mẫu BCF-600 chứa nhiều thành phần vô cơ hoặc cấu trúc silicat trong tro của TSH trở nên rõ rệt hơn khi nhiệt độ nhiệt phân tăng.

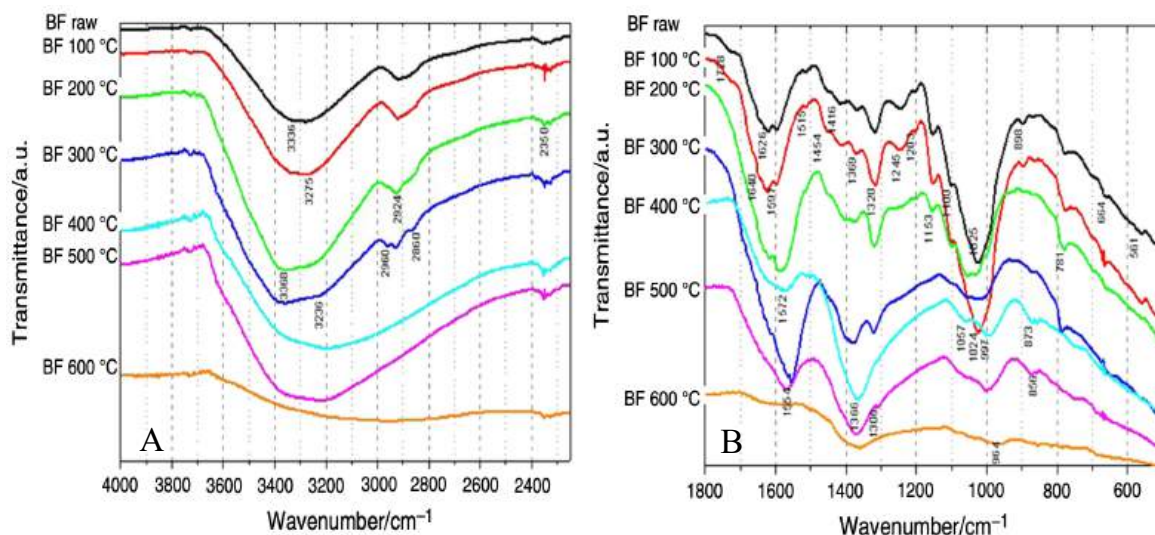
Đồng thời sự xuất hiện nhiều đỉnh trong vùng dải hấp thụ thấp từ 400-600 cm^{-1} như mẫu BCF-400 xuất hiện đỉnh tại 455 cm^{-1} , mẫu BCF-500 xuất hiện các đỉnh tại 520, 471 và 454 cm^{-1} , còn BCF 600 xuất hiện các đỉnh tại 566, 491 và 463 cm^{-1} . Đây là những đặc trưng của dao động liên kết oxit kim loại. Kết quả cho thấy khi nhiệt độ càng tăng quá trình carbon hoá tăng, hình thành các thành phần tro và pha khoáng trên phổ FTIR trở nên rõ hơn.

Bảng 3.5. Bảng tổng hợp kết quả phân tích FTIR của TSH từ thân giả chuỗi bị nhiễm bệnh Foc

Dải hấp thụ (cm^{-1})	BCF-400 (cm^{-1})	BCF-500 (cm^{-1})	BCF-600 (cm^{-1})	Đặc trưng liên kết	Tài liệu tham khảo
3200-3600	3434	3436	3433	Dao động kéo dài của liên kết O–H	[124]
2850-3000	2923	2924	2924	Dao động kéo dài của liên kết C–H	[125]
1600-1750	1615	1616	1584	Dao động kéo dài của liên kết C=C trong vòng thơm hoặc C=O liên hợp	[126]
1400-1500	1461 1402	1402	1436	Dao động hoá trị đối xứng của nhóm -COO-	[127]
1000-1200	1092	1084	1083	Dao động kéo dài của liên kết C–O–C	[128]
650-1000	872	873 758	875 825 761 713	Dao động kéo dài của liên kết Si-O-Si	[129]
400-600	455	520 471 454	566 491 463	Dao động của liên kết oxit kim loại ($M_{\text{tetra}}\text{-O}^{2-}$) ($M_{\text{octa}}\text{-O}^{2-}$)	[130]

Để làm rõ sự biến đổi cấu trúc hóa học của TSH từ thân giả chuỗi nhiễm bệnh Foc, phổ FTIR của các mẫu BCF-400, BCF-500 và BCF-600 được so sánh với phổ FTIR của TSH từ thân giả chuỗi không nhiễm bệnh đã được nghiên cứu của Dias và

các cộng sự [131]. Nguyên liệu thân giả chuỗi được sấy khô ở 60 °C trong 24 giờ, rồi nghiền nhỏ (ký hiệu BF raw) và tiến hành nhiệt phân ở các mức nhiệt độ khác nhau từ 100 đến 600 °C trong 1 giờ ở điều kiện yếm khí tương đồng với bố trí thí nghiệm của quy trình tổng hợp TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc. Các mẫu TSH sau quá trình nhiệt phân được ký hiệu lần lượt là BF100, BF200 BF300, BF400, BF500 và BF600.



Hình 3.4. Kết quả phân tích FTIR của TSH từ thân giả cây chuối không bị nhiễm bệnh Foc: (A) Phổ FTIR trong dải hấp thụ khoảng 4000–2200 cm^{-1} , (B) Phổ FTIR trong dải hấp thụ khoảng 1800–500 cm^{-1} [131]

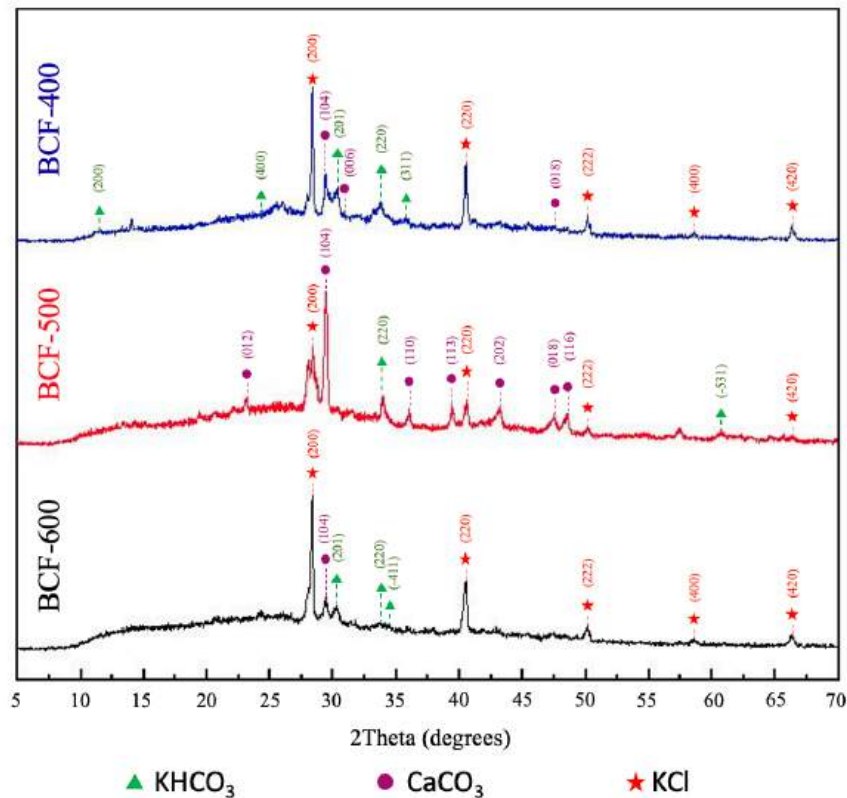
Dựa vào hình 3.3, hình 3.4 A và B trình bày kết quả phổ FTIR của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc và không nhiễm bệnh theo nghiên cứu của nhóm tác giả Dias và cộng sự [131]. Kết quả cho thấy phổ FTIR của các mẫu TSH BCF-400, BCF-500, BCF-600 đều có sự tương đồng rõ rệt với phổ FTIR của các mẫu BF 400, BF 500, BF 600. Tại dải hấp thụ trong khoảng 3200-3600 cm^{-1} đặc trưng cho dao động hóa trị của nhóm hydroxyl, phản ánh sự tồn tại của các nhóm chức chứa oxy liên quan đến cellulose, hemicellulose và lignin. Ở dải hấp thụ khoảng 2850-3000 cm^{-1} , đặc trưng cho dao động kéo dài của liên kết C–H, chứng minh cho sự hiện diện của các cấu trúc hydrocarbon còn lại sau quá trình nhiệt phân. Ngoài ra, các đỉnh hấp thụ trong khoảng 1600-1750 cm^{-1} và 1000-1200 cm^{-1} lần lượt được biểu diễn cho dao động của liên kết C=C/C=O trong cấu trúc thơm và dao động kéo dài của liên kết C–O–C trong polysaccharide hoặc ether, cho thấy sự hình thành cấu trúc carbon thơm ổn định khi nhiệt độ nhiệt phân tăng. Nhìn chung sự khác biệt không quá nhiều đối với nghiên cứu của nhóm tác giả Dias và cộng sự [131]. Sự tương đồng đã chứng minh bản chất lignocellulose của nguyên liệu đóng vai trò quyết định trong việc hình thành cấu trúc hóa học của TSH.

Tuy nhiên trong nghiên cứu của nhóm tác giả Dias và các cộng sự, khi tăng nhiệt độ lên 600 °C, dải hấp thụ trong khoảng từ 3200 đến 3600 cm^{-1} rộng gần như không còn được ghi nhận, phản ánh mức độ khử nước và khử oxy mạnh hơn của vật liệu [131]. Ngược lại, trong cả ba mẫu BCF-400, BCF-500 và BCF-600 vẫn còn duy trì các đỉnh trong khoảng 3433-3436 cm^{-1} . Sự khác biệt này cho thấy mặc dù quá trình nhiệt phân đã thúc đẩy quá trình carbon hoá, bề mặt TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc vẫn bảo lưu một phần nhóm chức chứa oxy. Bên cạnh đó, tại dải hấp thụ trong khoảng 1000-1200 cm^{-1} và dải hấp thụ thấp trong khoảng 650-400 cm^{-1} , phổ FTIR của cả ba mẫu đều cho thấy sự hiện diện khá rõ của các đỉnh đặc trưng cho liên kết C–O–C, Si–O–Si và các dao động của pha khoáng vô cơ, trong đó mẫu BCF-600 thể hiện số lượng đỉnh nhiều nhất. Ngoài ra, một số đỉnh hấp thụ của cả ba mẫu BCF-400, BCF-500 và BCF-600 có sự dịch chuyển nhỏ so với các mẫu BF400, BF500 và BF600, với độ lệch dao động trong khoảng 1-5 cm^{-1} . Sự dịch chuyển này thường liên quan đến sự thay đổi môi trường liên kết hóa học hoặc mức độ ngưng tụ của cấu trúc carbon thơm trong quá trình nhiệt phân. Tuy nhiên, mức độ sai lệch không đáng kể và không làm thay đổi bản chất của các nhóm chức chính, cho thấy quá trình nhiệt phân đóng vai trò chi phối trong việc hình thành cấu trúc hóa học của vật liệu, đồng thời làm giảm ảnh hưởng của tình trạng nhiễm bệnh ban đầu.

Dựa vào kết quả phổ FTIR cho thấy TSH từ thân giả chuối bị nhiễm bệnh Foc có đặc trưng cấu trúc hóa học tương đồng với TSH từ thân giả chuối không nhiễm bệnh. Sự khác biệt chủ yếu thể hiện ở cường độ hấp thụ và xu hướng biến đổi theo nhiệt độ, phản ánh sự thay đổi thành phần lignocellulose ban đầu do tác động của bệnh Foc.

3.1.5. Kết quả phân tích XRD

Sau quá trình nhiệt phân, phương pháp XRD được sử dụng để làm rõ sự biến đổi cấu trúc tinh thể và thành phần pha khoáng của TSH. Đây là phương pháp phân tích không phá hủy mẫu và có độ chính xác cao trong nhận diện các pha tinh thể của vật liệu. Các mẫu BCF-400, BCF-500, BCF-600 sau nhiệt phân được rửa lại nhiều lần để cân bằng pH về môi trường trung tính, tránh TSH đang ở môi trường kiềm nhằm hạn chế ảnh hưởng đến chảo Alumium. Sau đó TSH được sấy khô và nghiền mịn để đồng nhất trước khi đưa vào chảo để quét phổ XRD trong vùng góc 2 θ . Vị trí các đỉnh nhiễu xạ và cường độ của giản đồ kết quả XRD thu được so sánh với cơ sở dữ liệu quốc tế của COD bằng phần mềm X'Pert HighScore. Kết quả thu được cho phép nhận diện các pha khoáng vô cơ còn lưu lại trong nền TSH sau nhiệt phân, đồng thời phản ánh mức độ kết tinh tương đối của từng pha khoáng.



Hình 3.5. Kết quả phân tích XRD của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc

Dựa vào hình 3.5 có thể nhận thấy giản đồ XRD của ba mẫu BCF-400, BCF-500 và BCF-600 đều xuất hiện các đỉnh đặc trưng của CaCO_3 , KCl và KHCO_3 , tuy nhiên cường độ và số lượng peak của từng pha khoáng có sự khác nhau rõ rệt giữa các mẫu. Điều này cho thấy quá trình nhiệt phân không làm mất hoàn toàn pha khoáng trong TSH, mà làm thay đổi mức độ biểu hiện và sự phân bố tương đối của các pha vô cơ trong nền TSH. Cả ba mẫu đều không phải là hệ carbon thuần túy mà là hệ carbon khoáng, trong đó các đỉnh nhiễu xạ chủ yếu liên quan đến ba pha khoáng chính gồm CaCO_3 (JCPDS 05-0586), KCl (JCPDS 41-1476) và KHCO_3 (JCPDS 12-0292). Sự hiện diện đồng thời của các pha này cho thấy sau nhiệt phân, phần khoáng vô cơ của nguyên liệu vẫn được bảo lưu trong TSH với mức độ kết tinh khác nhau.

Đối với mẫu BCF-400, giản đồ XRD cho thấy vật liệu đồng thời mang đặc trưng của cả ba pha khoáng, trong đó các pha chứa kali biểu hiện khá rõ. Các đỉnh tại vị trí $2\theta \approx 29,4^\circ$; $31,3^\circ$ và $47,5^\circ$ lần lượt tương ứng với các mặt tinh thể (104), (006) và (018) của CaCO_3 [132]. Bên cạnh đó, các đỉnh tại vị trí $2\theta \approx 28,3^\circ$; $40,4^\circ$; $50,1^\circ$; $58,6^\circ$ và $66,3^\circ$ đặc trưng cho các mặt tinh thể (200), (220), (222), (400) và (420) của KCl [133]. Ngoài ra, mẫu còn xuất hiện các đỉnh tại vị trí $2\theta \approx 12,0^\circ$; $24,2^\circ$; $30,2^\circ$; $33,9^\circ$ và $37,9^\circ$, tương ứng với các mặt tinh thể (200), (400), (201), (220) và (311) của

KHCO_3 [134]. Ở mẫu BCF-400, cho thấy sự hiện diện tương đối rõ của KCl và KHCO_3 , trong khi CaCO_3 vẫn còn tồn tại nhưng biểu hiện qua số lượng đỉnh ít hơn. Do đó mẫu BCF-400 có chứa các thành phần khoáng giàu kali, còn pha carbonate chứa canxi vẫn được bảo lưu nhưng không chiếm ưu thế tuyệt đối.

Đối với mẫu BCF-500, giản đồ XRD thể hiện số lượng đỉnh của CaCO_3 nhiều nhất trong ba mẫu, cho thấy đây là mẫu biểu hiện rõ nhất pha carbonate chứa canxi. Cụ thể, các đỉnh tại vị trí $2\theta \approx 23,0^\circ$; $29,4^\circ$; $36,0^\circ$; $39,4^\circ$; $43,1^\circ$; $47,5^\circ$ và $48,4^\circ$ lần lượt tương ứng với các mặt tinh thể (012), (104), (110), (113), (202), (018) và (116) của CaCO_3 [132]. Đồng thời, các đỉnh tại vị trí $2\theta \approx 28,4^\circ$; $40,5^\circ$; $50,1^\circ$ và $66,3^\circ$ phản ánh sự hiện diện của KCl [133], còn các đỉnh tại vị trí $2\theta \approx 33,9^\circ$ và $60,7^\circ$ tương ứng với các mặt tinh thể (220) và (-531) của KHCO_3 [134]. So với hai mẫu còn lại, mẫu BCF-500 cho thấy CaCO_3 nổi bật hơn hẳn, do đó ở mẫu này pha carbonate chứa canxi có mức độ kết tinh rõ hơn. Sự xuất hiện đồng thời của KCl và KHCO_3 cho thấy TSH vẫn bảo lưu được các pha giàu kali, tuy nhiên sự hiện diện không mạnh bằng pha CaCO_3 .

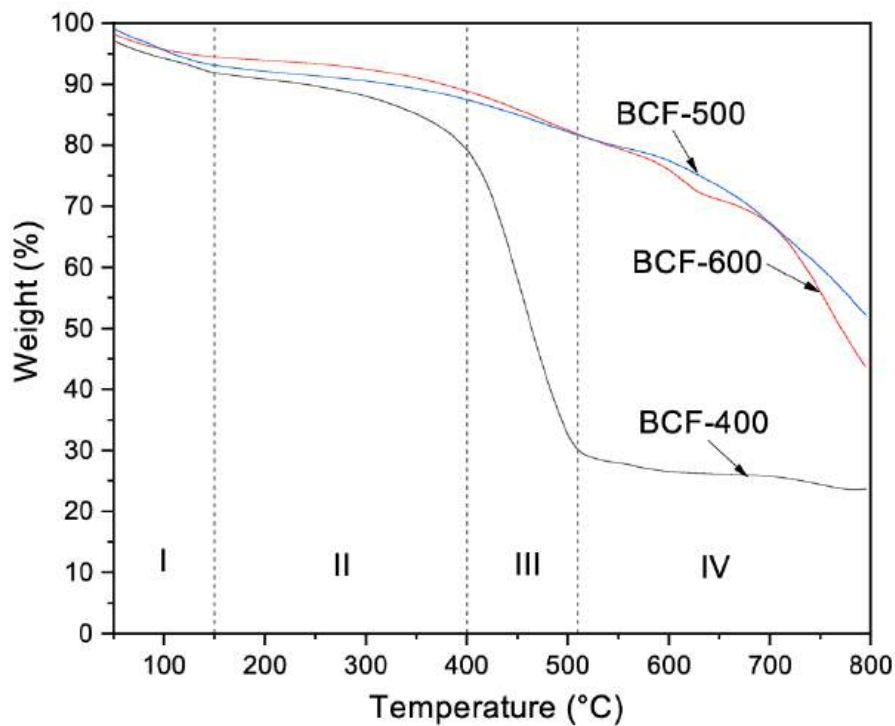
Đối với mẫu BCF-600, giản đồ XRD trở nên ít đỉnh hơn so với BCF-400 và BCF-500. Ở mẫu này, CaCO_3 chỉ còn biểu hiện rõ qua đỉnh tại vị trí $2\theta \approx 29,4^\circ$, tương ứng với mặt tinh thể (104) [132]. Trong khi đó, các đỉnh tại vị trí $2\theta \approx 28,3^\circ$; $40,5^\circ$; $50,1^\circ$; $58,6^\circ$ và $66,3^\circ$ lần lượt tương ứng với các mặt tinh thể (200), (220), (222), (400) và (420) của KCl vẫn được duy trì [133]. Đồng thời, các đỉnh tại vị trí $2\theta \approx 30,2^\circ$; $33,9^\circ$ và $34,3^\circ$ đặc trưng cho các mặt tinh thể (201), (220) và (-411) của KHCO_3 [134]. Kết quả cho thấy mẫu BCF-600, KCl vẫn là pha khoáng biểu hiện ổn định nhất, KHCO_3 vẫn còn tồn tại khá rõ, trong khi CaCO_3 chỉ còn biểu hiện qua một đỉnh chính. So với BCF-500, giản đồ của BCF-600 cho thấy hệ khoáng đã được tinh giản hơn, trong đó các pha giàu kali tiếp tục được duy trì, còn pha carbonate chứa canxi giảm rõ mức độ biểu hiện tinh thể.

Kết quả cho thấy cả ba mẫu BCF-400, BCF-500 và BCF-600 đều là vật liệu carbon khoáng có chứa các pha CaCO_3 , KCl và KHCO_3 , tuy nhiên mức độ biểu hiện của từng pha thay đổi theo từng mẫu. Mẫu BCF-400 thể hiện rõ sự đồng tồn tại của các pha giàu kali, đặc biệt là KCl và KHCO_3 . Mẫu BCF-500 lại cho thấy đỉnh của CaCO_3 nổi bật nhất, đồng thời vẫn duy trì được các pha KCl và KHCO_3 , nên có thể xem là mẫu có hệ khoáng đa dạng và kết tinh rõ hơn. Trong khi đó, mẫu BCF-600 cho thấy giản đồ đã được tinh giản hơn, chủ yếu còn duy trì rõ các đỉnh của KCl, còn CaCO_3 và KHCO_3 biểu hiện với số lượng đỉnh ít hơn. Quá trình nhiệt phân không làm vật liệu chuyển sang trạng thái đơn pha, mà làm cho hệ khoáng trong than được

sàng lọc theo hướng chỉ còn giữ lại những pha ổn định hơn. Kết quả XRD cho thấy TSH từ thân giả cây chuối ngoài khung carbon mà còn chứa các thành phần giàu khoáng như K, Ca là những thành phần dinh dưỡng có ích trong ứng dụng phân bón nông nghiệp.

3.1.6. Kết quả phân tích TGA

Sau quá trình nhiệt phân trong môi trường yếm khí, TSH được nghiền và rửa lại nhiều lần với etanol nhằm loại bỏ các tạp chất. Để đánh giá độ bền nhiệt và mức độ biến đổi khối lượng của các mẫu TSH theo nhiệt độ, các mẫu BCF-400, BCF-500 và BCF-600 được phân tích bằng phương pháp nhiệt trọng lượng. Thiết bị TGA được vận hành với tốc độ gia nhiệt xác định để theo dõi sự thay đổi phần trăm khối lượng của mẫu theo nhiệt độ. Trong phân tích TGA thường đánh giá được từ nhiệt độ phòng đến vùng nhiệt độ cao để xác định các giai đoạn mất ẩm, phân hủy chất dễ bay hơi, carbon hoá sâu và lượng thành phần rắn còn lại. [135].



Hình 3.6. Kết quả phân tích TGA của TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc

Dựa vào hình 3.6 cho thấy đường cong TGA của cả ba mẫu đều có xu hướng giảm khối lượng theo nhiệt độ và hình dạng đường cong khác nhau. Trong đó, khối lượng của mẫu BCF-400 giảm lớn nhất gần 75% và khi đến 800 °C thành phần rắn còn lại chỉ 23%. Đối với mẫu BCF-500 thì mất khoảng 55% khối lượng và khi đến 800 °C còn lại 43% khối lượng rắn. Còn với mẫu BCF-600 chỉ mất 47% khối lượng và duy trì lượng rắn cuối cùng cao nhất khoảng đạt 52%.

Trong giai đoạn I cả ba mẫu cho thấy khối lượng chỉ giảm ở mức tương đối nhỏ. Với mẫu BCF-400, từ nhiệt độ phòng đến vùng 150°C, khối lượng giảm khoảng 8%, với mẫu BCF-500 thì giảm khoảng 5%, còn mẫu BCF-600 thì giảm khoảng 7%. Đây là vùng biến đổi nhiệt độ đặc trưng cho sự tách ẩm cùng một lượng rất nhỏ các hợp chất dễ bay hơi còn lại trên bề mặt hoặc trong mao quản TSH. Khi đến vùng nhiệt độ khoảng 200 °C là giai đoạn cung cấp năng lượng để gia nhiệt và làm khô mẫu [136].

Sau vùng mất ẩm, trong giai đoạn II và III đường cong TGA của ba mẫu bắt đầu có sự phân hóa. Ở giai đoạn II khối lượng các mẫu tiếp tục giảm nhưng với mức độ nhỏ hơn, chủ yếu liên quan đến sự loại bỏ các cấu tử kém bền nhiệt và một phần nhóm chức chứa oxy còn lại trên bề mặt TSH. Do BCF-400 và BCF-500 đã được nhiệt phân trước đó, giai đoạn này không còn phản ánh quá trình carbon hóa sơ cấp của sinh khối ban đầu, mà chủ yếu là sự biến đổi tiếp theo của các thành phần còn lại trong vật liệu

Trong quá trình nhiệt phân nhiệt độ từ 300 °C đến 500°C, cellulose và lignin bị phân hủy theo các phản ứng tỏa nhiệt cao, tạo ra một lượng lớn CO₂, CO, CH₄, H₂, ethanol, axit axetic, axit formic, formaldehyde và hắc ín [137]. Khi ở giai đoạn III ở vùng nhiệt độ từ 400 °C đến 510 °C, mẫu BCF-400 bị phân hủy nhiều nhất, khối lượng mẫu giảm khoảng 65%, giảm nhiều hơn so với mẫu BCF-500 và mẫu BCF-600. Kết quả cho thấy mẫu BCF-400 vẫn còn chứa nhiều thành phần hữu cơ chưa carbon hoá hoàn toàn hoặc còn giữ lại đáng kể các nhóm chức chứa oxy và các cấu tử kém bền nhiệt. Khi tiếp tục gia nhiệt trong môi trường N₂, những thành phần hữu cơ được tiếp tục carbon hoá, dẫn đến khối lượng giảm lớn. Còn đối với mẫu BCF-500 và mẫu BCF-600, khối lượng vẫn giảm nhưng nhỏ hơn nhiều so với mẫu BCF-400, mẫu BCF-500 thì giảm 15%, còn với mẫu BCF-600 thì giảm 13%. Dạng đường cong này cho thấy thành phần dễ bị phân hủy trong hai mẫu đã được loại bỏ đáng kể trong quá trình nhiệt phân ở 500 °C và 600 °C. Nhưng khối lượng của mẫu BCF-500 vẫn giảm nhiều hơn so với mẫu BCF-600, do đó thành phần hữu cơ trong mẫu BCF-500 vẫn còn nhiều hơn so với mẫu BCF-600. Khi nhiệt độ nhiệt phân từ 500 °C đến 600 °C, các thành phần cellulose, hemicellulose và các nhóm chứa oxy kém bền đã bị phân huỷ gần như hoàn toàn [138], nên khi tiếp tục gia nhiệt, khối lượng mẫu không còn giảm mạnh như BCF-400.

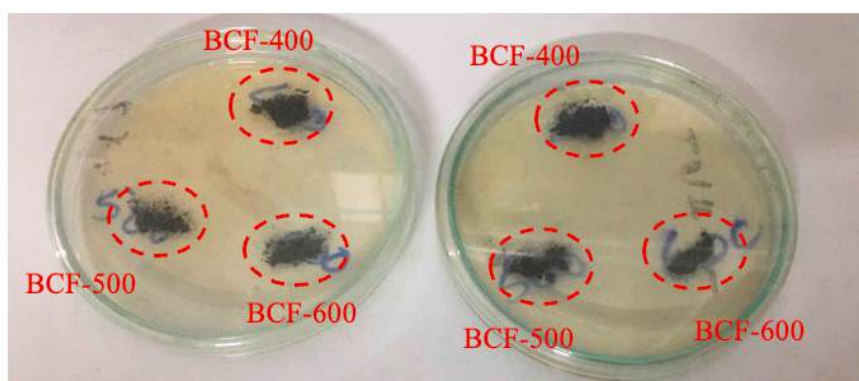
Ở giai đoạn IV, từ khoảng 520 đến 800 °C, khối lượng của các mẫu tiếp tục suy giảm. Đây không còn là vùng phân hủy chính của polysaccharide, mà chủ yếu phản ánh sự biến đổi của phần cấu trúc bền hơn, đặc biệt là lignin, các thành phần

carbon rắn vô định hình và một số thành phần vô cơ như carbonate. Đối với mẫu BCF-400 trong giai đoạn này chỉ còn một bước giảm khối lượng nhỏ khoảng 3% trong vùng nhiệt độ từ 710 °C đến 770°C, cho thấy cấu trúc bền nhiệt còn lại sau giai đoạn III không còn nhiều. Ngược lại, với mẫu BCF-500 mất thêm 7% trong vùng 590 °C đến 630 °C và tiếp tục giảm 27% trong khoảng 710 °C đến 770 °C. Còn với mẫu BCF-600 khối lượng giảm khoảng 27% trong khoảng 675 °C đến 790 °C.

Có thể thấy quá trình biến đổi nhiệt của ba mẫu diễn ra riêng biệt. Giai đoạn I và giai đoạn II chủ yếu là tách ẩm. Riêng giai đoạn II là vùng chuyển tiếp, trong đó các cấu tử kém bền hơn và một phần nhóm chức chứa oxy tiếp tục bị loại bỏ. Giai đoạn III là vùng phân hủy chính, đặc biệt rõ đối với BCF-400, phản ánh mức độ carbon hoá chưa sâu của mẫu này. Giai đoạn IV là vùng phân hủy sâu hơn của phần cấu trúc bền nhiệt, trong đó BCF-500 và nhất là BCF-600 thể hiện rõ sự hiện diện của các cấu trúc carbon rắn vô định hình và thành phần khoáng vô cơ khó hủy hơn. Kết quả cho thấy mẫu BCF-400 là mẫu kém bền nhiệt nhất, còn BCF-600 là mẫu bền nhiệt nhất, trong khi BCF-500 nằm ở trạng thái trung gian. Khi tăng nhiệt độ nhiệt phân, TSH thu được có xu hướng ổn định hơn và độ bền nhiệt cao hơn. Đây là cơ sở quan trọng để đánh giá tiềm năng sử dụng TSH trong môi trường đất, nơi độ bền của khung carbon đóng vai trò quyết định đối với khả năng tồn lưu và hiệu quả cải tạo lâu dài của TSH.

3.2. Hiệu quả loại bỏ mầm bệnh Foc

Để đánh giá khả năng tồn tại của nấm Foc trên mẫu TSH sau quá trình nhiệt phân. Các mẫu BCF-400, BCF-500, BCF-600 được đưa vào đĩa petri và trải lên bề mặt môi trường PDA trong điều kiện vô trùng. Mỗi đĩa petri được bố trí một số mẫu tại các vị trí khác nhau nhằm đảm bảo khả năng quan sát sự phát triển của vi sinh vật nếu còn tồn tại. Các đĩa nuôi cấy sau đó được ủ ở nhiệt độ từ 25-28 °C trong khoảng 7-10 ngày và kiểm tra kết quả hiệu quả khả năng bất hoạt của mầm bệnh Foc trên TSH.



Hình 3.7. Kết quả hiệu quả loại bỏ mầm bệnh Foc trên TSH

Quan sát hình 3.7 kết quả nuôi cấy trực tiếp trên môi trường PDA cho thấy tại các vị trí đặt mẫu TSH không xuất hiện hiện tượng phát triển khuẩn lạc nấm lan tỏa ra môi trường xung quanh. Các mẫu than vẫn giữ nguyên hình dạng ban đầu, và bề mặt thạch không ghi nhận sự hình thành hệ sợi nấm hoặc khuẩn lạc dạng toả tròn với màu trắng đến hồng tím đặc trưng của Foc xung quanh TSH.

Về mặt sinh học, nấm Foc có khả năng tồn tại dưới dạng bào tử, đặc biệt là chlamyospore, giúp chúng chịu được điều kiện bất lợi trong môi trường đất. Tuy nhiên, khả năng sinh trưởng và phát triển của nấm phụ thuộc mạnh vào điều kiện môi trường như nhiệt độ và pH. Nhiệt độ là yếu tố quyết định đến sự phát triển và khả năng nảy mầm của nấm Foc, nhiệt độ tối ưu cho sinh trưởng chỉ nằm trong vùng trung bình khoảng 25-30 °C. Đồng thời độ pH là yếu tố ảnh hưởng đến sự hoạt động của nấm Foc trong khoảng 6,5 - 7,0 hoạt động mạnh nhất [29]. Kết quả độ pH của cả ba mẫu BCF-400, BCF-500 và BCF-600 đều nằm trong khoảng 10,25 - 10,46. Nhờ quá trình nhiệt phân hình thành các thành phần pha khoáng vô cơ như các oxit và carbonat kim loại dẫn đến độ pH của TSH mang tính kiềm cao. Khi độ pH cao, bào tử Foc gặp điều kiện bất lợi, cấu trúc protein và enzyme của nấm dễ bị biến tính, làm gián đoạn các quá trình trao đổi chất. Đồng thời, độ pH làm áp suất thẩm thấu và cân bằng ion qua màng tế bào cũng bị phá vỡ, dẫn đến suy giảm hoặc mất hoàn toàn khả năng sinh trưởng của vi sinh vật. Đặc biệt khi quá trình nhiệt phân ở nhiệt độ từ 400 °C đến 600 °C để tổng hợp TSH, cấu trúc tế bào và enzyme của nấm cũng sẽ bị phá hủy, gây bất hoạt hoàn toàn mầm bệnh Foc.

Kết quả cho thấy quá trình sinh khối bằng phương pháp nhiệt phân trong môi trường yếm khí đã đạt hiệu quả cao trong việc tiêu diệt mầm bệnh Foc. Việc tổng hợp TSH được xem là giải pháp xử lý an toàn về mặt sinh học khi ứng dụng với phân bón, tận dụng tối đa các nguồn nguyên liệu phế phẩm từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc, nâng cao giá trị trong chuỗi kinh tế tuần hoàn nông nghiệp.

3.3. Đặc tính của phân bón NK - than sinh học

3.3.1. Hàm lượng thành phần hữu cơ của than sinh học

TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc được nhiệt phân trong môi trường yếm khí ở các nhiệt độ khác nhau từ 400 °C đến 600 °C ở 1 giờ. Các mẫu BCF-400, BCF-500, BCF-600 sau khi được rửa sạch bằng etanol kết hợp siêu âm trong 20 phút nhằm hạn chế tối đa các tạp chất còn bám trên TSH. Sau đó các mẫu được xác định hàm lượng thành phần hữu cơ thông qua phương pháp xác định gián tiếp hàm lượng carbon hữu cơ bằng phương pháp Walkley Black theo TCVN 9294:2012 [96].

Bảng 3.6. Hàm lượng thành phần hữu cơ của TSH

Chỉ tiêu	BCF-400	BCF-500	BCF-600
Hàm lượng carbon hữu cơ (OC)	34,43%	14,90%	14,22%
Hàm lượng thành phần hữu cơ (OM)	75,75%	32,79%	31,29%

Dựa vào kết quả ở bảng 3.6 cho thấy hàm lượng chất hữu cơ của các mẫu TSH thay đổi rõ rệt theo nhiệt độ nhiệt phân. Mẫu BCF-400 có hàm lượng chất hữu cơ cao nhất đạt 75,75%, trong khi hai mẫu BCF-500 và BCF-600 giảm mạnh xuống còn 32,79% và 31,29%. Ở nhiệt độ 400 °C, TSH vẫn còn chứa nhiều thành phần hữu cơ có nguồn gốc từ cấu trúc lignocellulose. Khi tăng nhiệt độ nhiệt phân lên 500 °C và 600 °C, quá trình khử nước, khử carboxyl diễn ra mạnh hơn, làm cho vật liệu chuyển dần sang trạng thái carbon hoá và bền hơn về mặt hóa học. Theo Nghị định 84/2019/NĐ-CP trong phân bón hữu cơ là $OM \geq 20\%$ [139]. Theo kết quả OM của cả ba mẫu TSH đều có hàm lượng chất hữu cơ lớn hơn 20%. Do đó TSH từ thân giả cây chuối nhiễm Foc được nhiệt phân từ 400 °C trở lên đã đạt tiêu chuẩn sản phẩm thuộc nhóm phân bón hữu cơ.

3.3.2. Đặc tính hoá lý của phân bón NK - than sinh học

Từ kết quả phân tích OM cho thấy nhiệt độ nhiệt phân ảnh hưởng đến khả năng giữ thành phần hữu cơ trong TSH. Việc lựa chọn TSH để phối trộn phân bón không chỉ dựa vào riêng hàm lượng chất hữu cơ, mà cần xem xét đồng thời mức độ carbon hoá, hàm lượng carbon cố định, thành phần khoáng và độ ổn định hóa học của vật liệu. Do đó, mặc dù mẫu BCF-400 có giá trị OM cao nhất, nhưng mẫu BCF-500 lại thể hiện sự cân bằng phù hợp hơn giữa hàm lượng thành phần hữu cơ và hàm lượng carbon tương đối cao hơn so với mẫu BCF-600. Đồng thời, với diện tích bề mặt riêng của mẫu BCF-500 đạt giá trị tối ưu với 27,979 m²/g. Do đó, BCF-500 được lựa chọn làm nền carbon cấu trúc xốp có khả năng lưu trữ nước cao và bổ sung hàm lượng dinh dưỡng vô cơ như đạm và kali nhằm hướng đến TSH giàu dinh dưỡng trong phân bón nông nghiệp.

Bảng 3.7. Đặc tính hoá lý của phân bón NK - than sinh học

Đặc tính hoá lý	BN	BBCF
Tỉ lệ trương nở (SR)	1,67	2,43
Độ ẩm cân bằng (EWC)	61%	67%
Khả năng hấp thụ nước (WA)	82%	88%

Các hạt BBCF, phân bón NK được phối trộn nền TSH từ mẫu BCF-500, Ure, Kali nhằm bổ sung đạm tổng số và kali hữu hiệu đạt tiêu chuẩn quy chuẩn kỹ thuật

quốc gia về chất lượng phân bón (QCVN 106:2025/BNNMT), trong đó tổng số hàm lượng đạm tổng số và kali hữu hiệu $\geq 18\%$ (Đạm tổng số $\geq 3\%$, kali hữu hiệu $\geq 3\%$). Bên cạnh đó việc chuẩn bị mẫu nền trắng BN nhằm đánh giá hiệu quả của TSH ứng dụng trong phân bón NK. Sau khi tạo hạt và sấy ổn định, hai mẫu BN và BBCF được tiến hành khảo sát một số chỉ tiêu đặc trưng gồm tỉ lệ trương nở, độ ẩm cân bằng và khả năng hấp thụ nước.

Dựa vào kết quả ở bảng 3.7 cho thấy sự có mặt của TSH đã làm thay đổi rõ rệt các đặc tính hóa lý của hạt phân bón. Cụ thể, tỉ lệ trương nở của mẫu BBCF đạt 2,43, cao hơn đáng kể so với giá trị 1,67 của mẫu BN. Khi được bổ sung TSH, hạt phân bón có khả năng hút nước và trương nở tốt hơn, phản ánh vai trò của nền vật liệu carbon trong việc tạo thêm không gian giữ nước bên trong cấu trúc hạt. Đối với độ ẩm cân bằng, mẫu BBCF đạt 67% cao hơn so với 61% của mẫu BN. Các hạt BBCF có chứa TSH giúp tăng khả năng duy trì trạng thái ẩm tốt hơn trong điều kiện môi trường, góp phần hạn chế sự mất nước quá nhanh của hệ vật liệu sau khi đưa vào đất. Bên cạnh đó, khả năng hấp thụ nước của mẫu BBCF đạt 88%, cao hơn so với 82% của mẫu BN. Mức tăng này tuy không quá lớn nhưng vẫn đánh giá được sự ảnh hưởng tích cực của TSH đối với khả năng giữ nước của hệ phân bón.

Sự hiện diện của nền TSH, vốn là vật liệu carbon có chứa các nhóm chức hữu cơ và thành phần phần khoáng vô cơ làm tăng khả năng tương tác với nước. Khi TSH được phối trộn vào hệ phân bón, vật liệu không chỉ đóng vai trò là pha mang dinh dưỡng mà còn góp phần cải thiện tính chất giữ ẩm và hấp phụ nước của hạt. Kết quả này có ý nghĩa đối với định hướng phát triển phân bón nhà chậm, vì khả năng giữ nước tốt hơn thường đi kèm với khả năng duy trì môi trường khuếch tán dinh dưỡng ổn định hơn trong quá trình sử dụng.

3.3.3. Kết quả đánh giá chất lượng phân bón NK - than sinh học

Chất lượng của sản phẩm phân bón NK - than sinh học sau quá trình phối trộn và tạo hạt được đánh giá thông qua các chỉ tiêu. Mẫu BBCF đã được gửi thử nghiệm tại phòng Kỹ thuật - Công ty TNHH Voi Trắng (phường Hồ Nai, thành phố Đồng Nai). Các chỉ tiêu thử nghiệm gồm hàm lượng đạm tổng số, hàm lượng kali hữu hiệu, hàm lượng chất hữu cơ, tỷ lệ C/N, pH và độ ẩm là những chỉ tiêu đánh giá việc nhận diện nhóm phân bón, giá trị dinh dưỡng và khả năng bảo quản của sản phẩm.

Về phương pháp thử, QCVN 106:2025/BNNMT liệt kê các phương pháp TCVN tương ứng cho các chỉ tiêu này, trong đó hàm lượng đạm tổng số, kali hữu hiệu, chất hữu cơ, tỷ lệ C/N, pH và độ ẩm đều là các chỉ tiêu được chấp nhận trong hệ phương pháp quản lý chất lượng phân bón ở Việt Nam.

Bảng 3.8. Kết quả thử nghiệm hạt phân bón NK - than sinh học

STT	Tên chỉ tiêu	Kết quả	Phương pháp
1	Hàm lượng Đạm tổng số (N_{ts}),%	4,25	TCVN 10682:2015
2	Hàm lượng Kali hữu hiệu (K_2O_{hh}), %	17,57	TCVN 8560:2018
3	Chất hữu cơ (OM),%	25,45	TCVN 9294:2012
4	Tỷ lệ C/N	2,72	TCVN 9294:2012 TCVN 8557:2010
5	pH _{H₂O}	6,7	TCVN 13263-9:2020
6	Độ ẩm,%	4,52	TCVN 9297:2012

Từ bảng 3.8 có thể thấy mẫu BBCF có đặc điểm nổi bật là hàm lượng kali hữu hiệu cao 17,57% và hàm lượng chất hữu cơ tương đối lớn và đạm tổng số ở mức 4,25. Theo tiêu chuẩn QCVN 106:2025/BNNMT, nhóm phân bón NPK hữu cơ, NP hữu cơ, NK hữu cơ hoặc PK hữu cơ dùng bón rễ được quy định phải có tổng hàm lượng các chất dinh dưỡng đa lượng tương ứng đạt từ 18% trở lên, mỗi hàm lượng dinh dưỡng thành phần đạt từ 3% trở lên, đồng thời hàm lượng chất hữu cơ đạt từ 10% trở lên. Với mẫu BBCF, tổng hàm lượng $N_{ts} + K_2O_{hh} = 21,82\%$, cao hơn ngưỡng 18%; hàm lượng riêng lẻ $N_{ts} = 4,25\%$ và $K_2O_{hh} = 17,57\%$ đều cao hơn mức tối thiểu 3%; ngoài ra chất hữu cơ đạt 25,45%, cao hơn nhiều so với mức tối thiểu 10% của nhóm NK hữu cơ. Bên cạnh đó mẫu BBCF có hàm lượng kali hữu hiệu cao 17,57%, tạo lợi thế cung cấp chất dinh dưỡng phù hợp với các cây trồng có nhu cầu kali cao. Trên cơ sở các chỉ tiêu đã được thử, có thể nhận định rằng sản phẩm này đáp ứng tốt các tiêu chuẩn chất lượng chính của nhóm phân bón NK hữu cơ bón rễ theo QCVN 106:2025/BNNMT.

Theo tiêu chuẩn QCVN 106:2025/BNNMT, với phân bón hữu cơ, tỷ lệ C/N là chỉ tiêu chất lượng bổ sung được phép đăng ký và mức quy định này không được lớn hơn 12. Đối với mẫu BBCF, tỷ lệ C/N đạt 2,72 đây là giá trị thấp và phù hợp với tiêu chuẩn phân bón hữu cơ. Tỷ lệ C/N giúp xác định tốc độ giải phóng nitơ cho cây trồng. Tỷ lệ C/N thấp thường cho thấy mẫu đã ở trạng thái tương đối ổn định, cung cấp nitơ nhanh chóng cho vi sinh vật có lợi trong đất, giúp vi sinh vật phát triển, tăng khả năng phân hủy chất hữu cơ dễ dàng hơn và duy trì chất lượng đất.

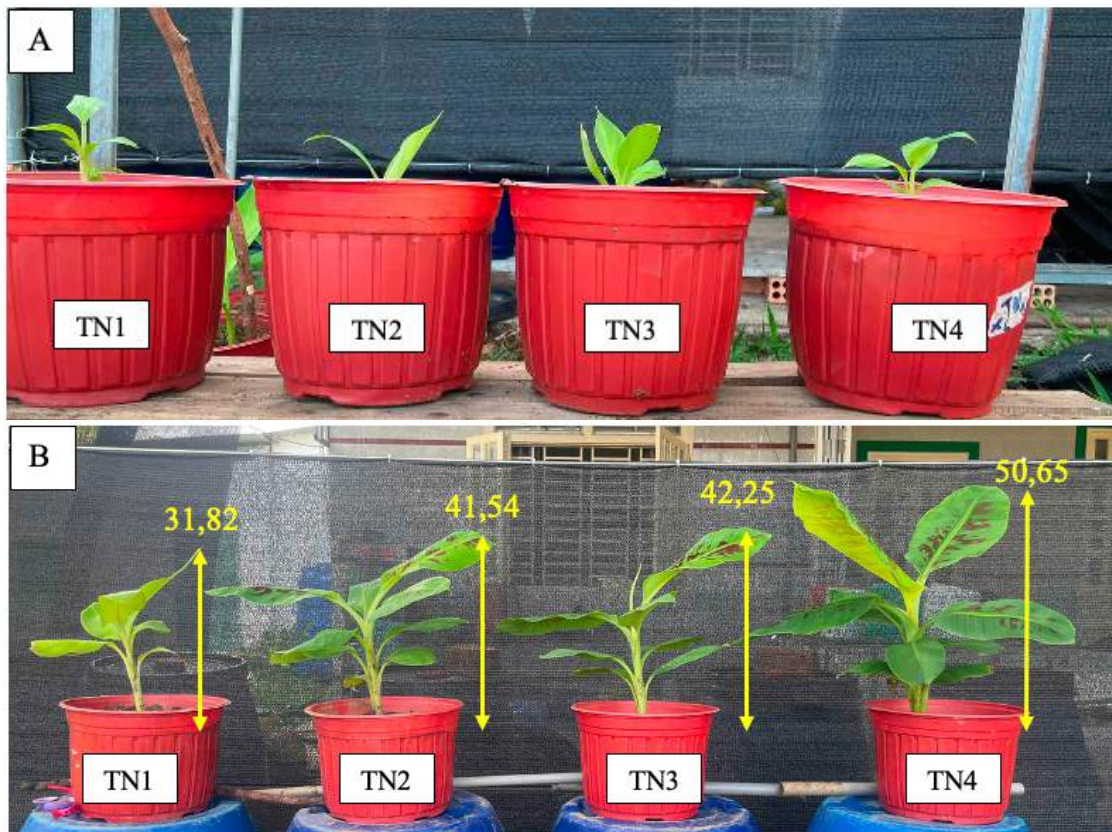
Để đánh giá khả năng sử dụng và bảo quản, mẫu BBCF có độ pH_{H₂O} đạt 6,7 và độ ẩm đạt 4,52% cho thấy mẫu đã đạt trạng thái hóa lý tương đối phù hợp. Giá trị pH gần trung tính cho thấy sản phẩm không quá chua cũng không quá kiềm, từ đó hạn chế nguy cơ gây sốc pH khi cho đất. Trong khi đó, độ ẩm thấp là một ưu điểm về mặt công nghệ, vì giúp hạn chế hiện tượng vón cục, tạo thuận lợi cho quá trình đóng

gói, bảo quản và duy trì độ ổn định của hạt phân trong quá trình lưu kho. Từ kết quả thử nghiệm mẫu BBCF cho thấy khả năng đáp ứng các chỉ tiêu chất lượng chính của nhóm phân bón NK hữu cơ theo QCVN 106:2025/BNNMT.

3.3.4. Thử nghiệm ứng dụng phân bón NK - than sinh học

Để đánh giá hiệu quả ứng dụng của phân bón trong điều kiện trồng chậu, thí nghiệm được bố trí với cây chuối giống trên nền đất canh tác tại xã Thanh Sơn, thành phố Đồng Nai. Đất được sàng đồng nhất, loại bỏ tạp chất và xác định một số chỉ tiêu hóa lý ban đầu. Chất lượng đất ban đầu có pH 5,84, hàm lượng carbon hữu cơ 1,27%, hàm lượng nitơ 0,18% và hàm lượng kali 0,47 mol/kg, phản ánh nền đất ban đầu có tính chua nhẹ và mức dinh dưỡng thấp.

Cây chuối giống Cavendish được lựa chọn với kích thước ban đầu tương đối đồng đều, có chiều cao trung bình $8,24 \pm 1,52$ cm, có 5 lá và chu vi thân giả $1,50 \pm 0,67$ cm. Việc đồng nhất giống chuối trồng ban đầu giúp hạn chế sai lệch do khác biệt sinh trưởng tự nhiên giữa các cá thể, từ đó làm rõ hơn ảnh hưởng của từng nghiệm thức trong quá trình theo dõi. Thử nghiệm được bố trí thành bốn nghiệm thức, mỗi nghiệm thức lặp lại ba lần và theo dõi liên tục trong 60 ngày.



Hình 3.8. Kết quả thử nghiệm ứng dụng phân bón NK - than sinh học trên cây chuối giống Cavendish: (A) Kích thước cây chuối ban đầu, (B) Kích thước cây chuối sau 60 ngày trồng

Kết quả sau 60 ngày trồng cho thấy tất cả các nghiệm thức đều giúp cây tiếp tục sinh trưởng so với trạng thái ban đầu, tuy nhiên mức độ tăng trưởng khác nhau khá rõ giữa các nghiệm thức.

Bảng 3.9. Kết quả ảnh hưởng của phân bón NK - than sinh học đến kích thước của cây chuối Cavendish sau 60 ngày trồng

Thí nghiệm	Chiều cao cây (cm)	Số lượng lá	Chu vi thân giả (cm)
TN1	$31,82 \pm 0,76$	6,00	$4,52 \pm 0,24$
TN2	$41,54 \pm 2,84$	9,00	$6,84 \pm 0,56$
TN3	$42,25 \pm 1,27$	9,00	$7,05 \pm 0,58$
TN4	$50,65 \pm 1,43$	10,00	$8,35 \pm 0,32$

Ở nghiệm thức TN1, cây đạt chiều cao $31,82 \pm 0,76$ cm, có 6 lá và chu vi thân giả $4,52 \pm 0,24$ cm. Thực nghiệm cho thấy ngay cả khi không bổ sung TSH hay phân bón, cây chuối giống vẫn có thể phát triển trong nền đất thí nghiệm, nhưng mức tăng trưởng còn hạn chế vì đất nghèo dinh dưỡng. So với kích thước ban đầu, chiều cao cây ở TN1 tăng khoảng 23,58 cm, tăng thêm 1 lá và chu vi thân giả tăng khoảng 3,02 cm. Trong giai đoạn phát triển đầu của cây chuối giống, cây cần nhiều chất dinh dưỡng như đạm và kali giúp cây tăng kích thước, lá xanh giúp cây quang hợp tốt hơn và giúp bộ rễ phát triển mạnh [140]. Dù điều kiện trồng tương tự nhau, nhưng về dinh dưỡng của đất chỉ có sẵn hàm lượng nitơ là 0,18% và kali là 0,47 mol/kg. Do đó nên nguồn dinh dưỡng tự nhiên trong đất chưa đủ để thúc đẩy mạnh sinh trưởng của cây chuối ở thực nghiệm TN1.

Đối với nghiệm thức TN2, khi bổ sung riêng TSH vào đất, cây đạt chiều cao $41,54 \pm 2,84$ cm, có số lá là 9 và chu vi thân giả $6,84 \pm 0,56$ cm. So với đối chứng TN1, chiều cao, số lá và chu vi thân giả đều tăng. Kết quả cho thấy TSH đã phát huy vai trò như một vật liệu cải thiện môi trường đất, góp phần nâng cao khả năng giữ ẩm, giữ dinh dưỡng và tạo điều kiện thuận lợi hơn cho sự phát triển của bộ rễ, từ đó thúc đẩy tăng trưởng thân và chiều cao cây. Tuy nhiên, do TSH đơn thuần không phải là nguồn cung cấp dinh dưỡng đa lượng như một sản phẩm phân bón hoàn chỉnh, nên hiệu quả thúc đẩy sinh trưởng của TN2 vẫn thấp hơn so với các nghiệm thức có bổ sung phân bón.

Ở nghiệm thức TN3, khi chỉ bổ sung 2% phân bón BN không chứa TSH, cây cũng đạt mức sinh trưởng khá cao với chiều cao $42,25 \pm 1,27$ cm, có số lá là 9 và chu vi thân giả $7,05 \pm 0,58$ cm. Mặc dù nghiệm thức TN3 có kết quả tương đồng với TN2,

nhưng vẫn cho mức sinh trưởng tốt hơn, đồng thời tán lá phát triển hơn. Sau 60 ngày, cây đã cao hơn 34,01 cm, chu vi thân giả tăng lên đến 5,55 cm và tăng thêm 4 lá. Việc bổ sung dinh dưỡng nitơ và kali từ phân bón đã thúc đẩy mạnh sự phát triển của cây chuối giống.

Tuy nhiên, nếu so với TN4, các chỉ tiêu của TN3 vẫn thấp hơn. Khi quan sát nghiệm thức TN4, có bổ sung 2% phân bón BBCF, cho kết quả sinh trưởng cao nhất trong toàn bộ thí nghiệm. Sau 60 ngày, cây đạt chiều cao $50,65 \pm 1,43$ cm, có số lá là 10 và chu vi thân giả $8,35 \pm 0,32$ cm. So với trạng thái ban đầu, số lá tăng thêm 5,00; chiều cao cây tăng khoảng 42,41 cm và chu vi thân giả tăng khoảng 6,85 cm, tăng trưởng lớn nhất trong bốn nghiệm thức. Phân bón BBCF không chỉ cung cấp dinh dưỡng mà còn tạo ra một môi trường nền thuận lợi cho sự phát triển liên tục của cây chuối giống. Kết quả này phù hợp với đặc tính của mẫu BBCF, khi sản phẩm có hàm lượng kali hữu hiệu 17,57%, đạm tổng số 4,25% và chất hữu cơ 25,45%, đồng thời có khả năng trương nở, giữ ẩm và hấp thụ nước tốt hơn so với mẫu BN. Trong phân bón, sự có mặt của TSH giúp tăng khả năng giữ nước, cải thiện độ pH cho đất, thúc đẩy khả năng trao đổi cation hiệu quả hơn [141]. Sự kết hợp giữa nguồn dinh dưỡng khoáng và nền TSH đã tạo nên hiệu quả đồng thời về cung cấp chất dinh dưỡng và cải thiện điều kiện lý hóa vùng rễ, từ đó giúp cây tăng trưởng mạnh hơn về chiều cao, số lá và chu vi thân giả.

Xét theo từng chỉ tiêu sinh trưởng, chiều cao cây là chỉ tiêu phản ánh rõ nhất sự khác biệt giữa các nghiệm thức. Thứ tự tăng trưởng chiều cao và chu vi thân giả của cây chuối được ghi nhận là $TN4 > TN3 > TN2 > TN1$. Kết quả tăng trưởng này cho thấy hiệu quả của phân bón có nền TSH không chỉ đến từ dinh dưỡng của đạm tổng và kali hữu hiệu, mà còn liên quan đến vai trò hỗ trợ của nền TSH trong cấu trúc hạt phân bón. Đối với số lượng lá, ở TN2 và TN3 cùng đạt 9 lá; ở TN4 đạt chất lượng cao nhất với 10 lá; trong khi TN1 chỉ đạt 6,00 lá. Điều này cho thấy sự bổ sung dinh dưỡng từ phân bón đã có tác động rõ đến khả năng hình thành nhiều lá mới. Từ kết quả của bốn nghiệm thức trên cho thấy, khi TSH được tích hợp trực tiếp vào hạt phân bón, sản phẩm này không chỉ đóng vai trò nền mang dinh dưỡng mà còn góp phần điều tiết ẩm và cải thiện vùng tiếp xúc giữa phân bón với đất, nhờ đó làm tăng hiệu quả sử dụng dinh dưỡng của cây trồng. Kết quả thực nghiệm cho thấy TSH từ thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc, sau khi được xử lý và bổ sung thêm 4% N và 18% K_2O , không chỉ an toàn về mặt sinh học mà còn có tiềm năng ứng dụng thực tế trong phân bón nông nghiệp nhằm hỗ trợ sinh trưởng cây trồng, đặc biệt đối với cây chuối giống Cavendish trong giai đoạn đầu phát triển.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

TSH từ thân giả cây chuối Cavendish nhiễm bệnh Foc được tổng hợp bằng phương pháp nhiệt phân trong môi trường yếm khí ở các mức nhiệt độ 400 °C, 500 °C và 600 °C trong 1 giờ. Từ các kết quả phân tích SEM-EDX, BET, FTIR, TGA và XRD cho thấy thân giả cây chuối nhiễm bệnh Foc đã được chuyển hoá thành TSH. Các kết quả phân tích đặc trưng cho thấy nhiệt độ nhiệt phân ảnh hưởng rõ rệt đến cấu trúc, thành phần và tính chất của TSH. Khi nhiệt độ tăng, TSH có xu hướng carbon hoá mạnh hơn, cấu trúc bề mặt thay đổi theo hướng phân tách và phát triển mao quản rõ hơn. Sau quá trình nhiệt phân, TSH thu được không phải là vật liệu carbon thuần túy mà là một hệ carbon khoáng, ngoài nền carbon còn hiện diện các thành phần khoáng có ích, đặc biệt là hàm lượng K, Ca và một số nguyên tố vô cơ khác. Trong ba mẫu khảo sát, mẫu BCF-500 thể hiện sự cân bằng phù hợp hơn giữa mức độ carbon hoá, diện tích bề mặt, thành phần hữu cơ, carbon cố định và đặc tính khoáng, do đó được lựa chọn làm mẫu tối ưu để tiếp tục phát triển thành phân bón NK-TSH.

Kết quả cũng cho thấy TSH đạt hiệu quả loại bỏ mầm bệnh Foc còn tồn tại trong sinh khối đầu vào. Trên môi trường PDA, các mẫu TSH sau nhiệt phân không ghi nhận sự phát triển khuẩn lạc đặc trưng của nấm, chứng tỏ vật liệu sau xử lý đã không còn biểu hiện khả năng duy trì mầm bệnh.

Từ mẫu BCF-500 đã tổng hợp phân bón NK trên nền TSH. Kết quả đánh giá cho thấy mẫu BBCF có các đặc tính hóa lý phù hợp, đồng thời đạt các chỉ tiêu chất lượng chính của nhóm phân bón NK-hữu cơ theo tiêu chuẩn QCVN 106:2025/BNMT. Khi thử nghiệm trên cây chuối giống, nghiệm thức có sử dụng BBCF cho kết quả sinh trưởng tốt hơn, thể hiện qua chiều cao cây, số lá và chu vi thân giả đều cao hơn các nghiệm thức còn lại. TSH không chỉ đóng vai trò là nền mang dinh dưỡng mà còn góp phần cải thiện khả năng giữ ẩm, giữ nước và nâng cao hiệu quả sử dụng phân bón trong vùng rễ.

Về mặt kinh tế xã hội, TSH từ thân giả cây chuối bị nhiễm bệnh Foc là một hướng đi có tính thực tiễn đối với vùng trồng chuối đang chịu ảnh hưởng của bệnh Foc. Việc tận dụng thân giả cây chuối nhiễm bệnh để sản xuất TSH và phát triển sản phẩm phân bón có thể góp phần giảm chi phí xử lý phế phẩm, giảm áp lực ô nhiễm môi trường, đồng thời tạo thêm giá trị từ nguồn sinh khối vốn bị xem là bỏ đi. Đây là một hướng xử lý có ý nghĩa thực tiễn vì vừa góp phần tận dụng phế phẩm nông

nghiệp, vừa mở ra khả năng tái sử dụng nguồn sinh khối bị loại bỏ theo hướng có giá trị gia tăng.

Kiến nghị

Trên cơ sở các kết quả đã đạt được, đề tài bước đầu cho thấy thân giả cây chuối Cavendish nhiễm bệnh Foc có tiềm năng được chuyển hóa thành TSH và tiếp tục phát triển thành sản phẩm phân bón phục vụ nông nghiệp. Tuy nhiên, nghiên cứu mới được thực hiện chủ yếu ở quy mô phòng thí nghiệm và bước đầu thử nghiệm hiệu lực nông học, cần tiếp tục mở rộng theo hướng khảo sát ở quy mô nhà lưới và đồng ruộng để đánh giá đầy đủ hơn hiệu quả của vật liệu trong điều kiện canh tác thực tế. Việc theo dõi dài hạn trên cây trồng, đặc biệt đối với các chỉ tiêu sinh trưởng, năng suất, khả năng hấp thu dinh dưỡng và ảnh hưởng đến tính chất đất, sẽ là cơ sở quan trọng để khẳng định tính ổn định và khả năng ứng dụng thực tiễn của sản phẩm.

Bên cạnh đó, đề tài cần mở rộng nghiên cứu sâu hơn về cơ chế giữ và giải phóng dinh dưỡng của mẫu BBCF, đặc biệt là khả năng nhả chậm trong các điều kiện đất và độ ẩm khác nhau. Đồng thời, đánh giá đối với các chỉ tiêu an toàn và chất lượng sản phẩm ở mức đầy đủ hơn, cũng như tiếp tục tối ưu hóa quy trình tổng hợp TSH và tạo phân bón theo hướng tiết kiệm năng lượng, nâng cao hiệu suất thu hồi và giảm chi phí sản xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Lam and S. Cao Truong, “Thực trạng phát sinh phế phụ phẩm nông nghiệp và giải pháp quản lý tại Việt Nam,” in *Môi trường nông nghiệp, nông thôn và Phát triển bền vững*, Apr. 2024, pp. 159–168.
- [2] T. Thị Vân, N. Thị Ngọc An, V. Thị Thiên Thu, Đ. Quốc Toàn, P. Thị Phương Trang, and L. Đình Đôn, “Nghiên cứu tác nhân *Fusarium oxysporum* f.sp. cubense gây bệnh héo vàng hại cây chuối già tại huyện Trảng Bom, tỉnh Đồng Nai (cũ),” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, vol. 67, no. 7, pp. 67–73, Jul. 2025, doi: 10.31276/VJST.
- [3] R. Thangavelu *et al.*, “Identification of sources resistant to a virulent *Fusarium* wilt strain (VCG 0124) infecting Cavendish bananas,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-82666-7.
- [4] A. K. Jaleel, S. Jacob, M. Ghosh, and A. Suresh, “A Comprehensive Review on Nutrient Profile and Pharmacological Benefits of *Musa paradisiaca*,” 2024.
- [5] “Banana Production by Country 2024,” World Population Review.
- [6] E. R. K. Fernandes, C. Marangoni, O. Souza, and N. Sellin, “Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 603–608, 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.008.
- [7] Z. Anwar, M. Gulfraz, and M. Irshad, “Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review,” *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 163–173, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.jrras.2014.02.003.
- [8] Y. Sewsynker-Sukai, M. Laltha, A. N. David, E. L. Meyer, and E. B. G. Kana, “Advancing a circular bioeconomy: Unlocking the potential of banana pseudostem for microbially-derived value-added products,” Dec. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.indcrop.2025.122120.
- [9] S. Mishra, B. Prabhakar, P. S. Kharkar, and A. M. Pethe, “Banana Peel Waste: An Emerging Cellulosic Material to Extract Nanocrystalline Cellulose,” *ACS Omega*, vol. 8, no. 1, pp. 1140–1145, Jan. 2023, doi: 10.1021/acsomega.2c06571.
- [10] H. M. Zaini *et al.*, “Banana biomass waste: A prospective nanocellulose source and its potential application in food industry – A review,” Aug. 01, 2023, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18734.

- [11] H. Patil, R. Naik, and S. K. Paramasivam, "Utilization of banana crop ligno-cellulosic waste for sustainable development of biomaterials and nanocomposites," Dec. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137065.
- [12] Alokika, Anu, A. Kumar, V. Kumar, and B. Singh, "Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective," Feb. 01, 2021, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.12.175.
- [13] T. Tabata, Y. Yoshiba, T. Takashina, K. Hieda, and N. Shimizu, "Bioethanol production from steam-exploded rice husk by recombinant *Escherichia coli* KO11," *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 33, no. 3, Mar. 2017, doi: 10.1007/s11274-017-2221-x.
- [14] S. O. Anuchi, K. L. S. Campbell, and J. P. Hallett, "Effective pretreatment of lignin-rich coconut wastes using a low-cost ionic liquid," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-09629-4.
- [15] E. Martin *et al.*, "From Corncob By-Product to Functional Lignins: Comparative Analysis of Alkaline and Organosolv Extraction Followed by Laccase Treatment," *Biomolecules*, vol. 15, no. 9, Sep. 2025, doi: 10.3390/biom15091226.
- [16] I. Kabenge, G. Omulo, N. Banadda, J. Seay, A. Zziwa, and N. Kiggundu, "Characterization of Banana Peels Wastes as Potential Slow Pyrolysis Feedstock," *J. Sustain. Dev.*, vol. 11, no. 2, p. 14, Mar. 2018, doi: 10.5539/jsd.v11n2p14.
- [17] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee, and C. Zheng, "Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis," *Fuel*, vol. 86, no. 12–13, pp. 1781–1788, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2006.12.013.
- [18] R. C. Ploetz, "Panama Disease: An Old Nemesis Rears Its Ugly Head Part 1. The Beginnings of the Banana Export Trades," 2005, doi: 10.1094/PHP.
- [19] N. Ordonez *et al.*, "Worse Comes to Worst: Bananas and Panama Disease—When Plant and Pathogen Clones Meet," Nov. 01, 2015, *Public Library of Science*. doi: 10.1371/journal.ppat.1005197.
- [20] A. C. van Westerhoven, H. J. G. Meijer, M. F. Seidl, and G. H. J. Kema, "Uncontained spread of *Fusarium* wilt of banana threatens African food

- security,” *PLoS Pathog.*, vol. 18, no. 9, Sep. 2022, doi: 10.1371/journal.ppat.1010769.
- [21] N. Ordóñez *et al.*, “A loop-mediated isothermal amplification (LAMP) assay based on unique markers derived from genotyping by sequencing data for rapid in planta diagnosis of Panama disease caused by Tropical Race 4 in banana,” *Plant Pathol.*, vol. 68, no. 9, pp. 1682–1693, Dec. 2019, doi: 10.1111/ppa.13093.
- [22] A. Viljoen *et al.*, “Occurrence and spread of the banana fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense TR4 in Mozambique,” *S. Afr. J. Sci.*, vol. 116, no. 11, Nov. 2020, doi: 10.17159/sajs.2020/8608.
- [23] R. Thangavelu *et al.*, “First detection of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 (TR4) on Cavendish banana in India,” *Eur. J. Plant Pathol.*, vol. 154, no. 3, pp. 777–786, Jul. 2019, doi: 10.1007/s10658-019-01701-6.
- [24] B. O. Olivares, J. C. Rey, D. Lobo, J. A. Navas-Cortés, J. A. Gómez, and B. B. Landa, “*Fusarium* wilt of bananas: A review of agro-environmental factors in the venezuelan production system affecting its development,” *Agronomy*, vol. 11, no. 5, May 2021, doi: 10.3390/agronomy11050986.
- [25] V. M. Brake and A. K. G. Pegg, “The Influence of Temperature, Inoculum Level and Race of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense on the Disease Reaction of Banana cv. Cavendish,” 1995.
- [26] A. Browne Wariebi, “Morpho-Molecular Characterization of *Fusarium oxysporum* F.sp. Cubense Associated Fungal Species, Antagonism and Effects on Disease Severity and Growth of Tissue-Cultured Banana Varieties,” Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology, 2025.
- [27] *Cultivating Progress: New Frontiers in Agricultural Science and Technology*. AkiNik Publications, 2025. doi: 10.22271/ed.book.3189.
- [28] Biruk Kedir Mohammed, “Distribution of banana (*Musaspp.*) *Fusarium* wilt (*Fusarium oxysporum* f. Sp. Cubense) and evaluation of cultivars against the disease in gamo zone, southern ethiopia,” Haramaya University, Haramaya, 2023.
- [29] N. Singh, L. Behera, R. Kumar Bais, A. Tiwari, S. Kumar, and C. Sumit Kumar, “Effect of temperature and pH on growth and sporulation of *Fusarium oxysporum* f.sp. lini (Bolley) Synder and Hensan causing linseed wilt under

- environmental condition,” ~ 1427 ~ *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, vol. 8, no. 2, pp. 1427–1430, 2019.
- [30] A. T. Adeleye, H. Louis, O. U. Akakuru, I. Joseph, O. C. Enudi, and D. P. Michael, “A Review on the conversion of levulinic acid and its esters to various useful chemicals,” 2019, *AIMS Press*. doi: 10.3934/ENERGY.2019.2.165.
- [31] B. Sarkar, M. Ullah, and M. Sarkar, “Environmental and economic sustainability through innovative green products by remanufacturing,” *J. Clean. Prod.*, vol. 332, p. 129813, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129813>.
- [32] B. Sarkar, A. Debnath, A. S. F. Chiu, and W. Ahmed, “Circular economy-driven two-stage supply chain management for nullifying waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 339, p. 130513, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130513>.
- [33] R. T. Kapoor, P. Ahmad, and M. Rafatullah, “Insights into Biochar Applications: A Sustainable Strategy toward Carbon Neutrality and Circular Economy,” in *ACS Symposium Series*, vol. 1479, American Chemical Society, 2024, pp. 1–30. doi: 10.1021/bk-2024-1479.ch001.
- [34] Johannes Lehmann and Stephen Joseph, “Biochar for Environmental Management,” 2015. doi: <https://doi.org/10.4324/9780203762264>.
- [35] N. Hagemann, K. Spokas, H. P. Schmidt, R. Kägi, M. A. Böhler, and T. D. Bucheli, “Activated carbon, biochar and charcoal: Linkages and synergies across pyrogenic carbon’s ABCs,” Feb. 09, 2018, *MDPI AG*. doi: 10.3390/w10020182.
- [36] J. S. Cha *et al.*, “Production and utilization of biochar: A review,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 40, pp. 1–15, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>.
- [37] K. P. Gopinath, D. N. Vo, D. G. Prakash, A. A. Joseph, S. Viswanathan, and J. Arun, “Environmental applications of carbon-based materials: a review,” *Environ. Chem. Lett.*, vol. 19, pp. 557–582, 2020, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221479129>
- [38] S. Alzate Acevedo, Á. J. Díaz Carrillo, E. Flórez-López, and C. D. Grande-Tovar, “Recovery of Banana Waste-Loss from Production and Processing: A

- Contribution to a Circular Economy,” Aug. 31, 2021, *NLM (Medline)*. doi: 10.3390/molecules26175282.
- [39] G. Sauve and K. Van Acker, “The environmental impacts of municipal solid waste landfills in Europe: A life cycle assessment of proper reference cases to support decision making,” *J. Environ. Manage.*, vol. 261, p. 110216, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110216>.
- [40] S. Sharma *et al.*, “Biochar as a Potential Nutrient Carrier for Agricultural Applications,” Dec. 01, 2025, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s40726-025-00349-7.
- [41] K. Jindo *et al.*, “Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles,” Dec. 01, 2020, *Springer*. doi: 10.1186/s40538-020-00182-8.
- [42] S. K. Das and G. K. Ghosh, “Developing biochar-based slow-release N-P-K fertilizer for controlled nutrient release and its impact on soil health and yield,” *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 13, no. 14, pp. 13051–13063, Sep. 2023, doi: 10.1007/s13399-021-02069-6.
- [43] M. Köves, V. Madár, M. Ringer, and T. Kocsis, “Overview of Traditional and Contemporary Industrial Production Technologies for Biochar along with Quality Standardization Methods,” Sep. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/land13091388.
- [44] F. . Verheijen, S. . Jeffery, and A. C. . Bastos, *Biochar application to soils : a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions*. Publications Office, 2010.
- [45] S. A. Razzak, “Municipal solid and plastic waste derived high-performance biochar production: A comprehensive review,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 181, p. 106622, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106622>.
- [46] S. I. Yang and M. S. Wu, “The droplet combustion and thermal characteristics of pinewood bio-oil from slow pyrolysis,” *Energy*, vol. 141, pp. 2377–2386, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.119>.
- [47] E. Mousa, C. Wang, J. Riesbeck, and M. Larsson, “Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities,” Nov. 01, 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2016.07.061.

- [48] M. I. Inyang *et al.*, “A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal,” Feb. 16, 2016, *Taylor and Francis Inc.* doi: 10.1080/10643389.2015.1096880.
- [49] C. Setter, F. T. M. Silva, M. R. Assis, C. H. Ataíde, P. F. Trugilho, and T. J. P. Oliveira, “Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions,” *Fuel*, vol. 261, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116420.
- [50] Z. Shen, J. Zhou, X. Zhou, and Y. Zhang, “The production of acetic acid from microalgae under hydrothermal conditions,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3444–3447, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.12.060.
- [51] D. S. Fardhyanti *et al.*, “Production of bio-oil from sugarcane bagasse by fast pyrolysis and removal of phenolic compounds,” *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 14, no. 1, pp. 217–227, Jan. 2024, doi: 10.1007/s13399-022-02527-9.
- [52] J. H. Choi, S. S. Kim, H. V. Ly, J. Kim, and H. C. Woo, “Effects of water-washing *Saccharina japonica* on fast pyrolysis in a bubbling fluidized-bed reactor,” *Biomass Bioenergy*, vol. 98, pp. 112–123, 2017, doi: 10.1016/j.biombioe.2017.01.006.
- [53] D. Chen, Y. Li, K. Cen, M. Luo, H. Li, and B. Lu, “Pyrolysis polygeneration of poplar wood: Effect of heating rate and pyrolysis temperature,” *Bioresour. Technol.*, vol. 218, pp. 780–788, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.07.049.
- [54] M. Wang *et al.*, “Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil and sediment remediation,” Jan. 01, 2018, *Chinese Academy of Sciences.* doi: 10.1016/j.jes.2017.08.004.
- [55] F. Peng, P. W. He, Y. Luo, X. Lu, Y. Liang, and J. Fu, “Adsorption of Phosphate by Biomass Char Deriving from Fast Pyrolysis of Biomass Waste,” *Clean (Weinh.)*, vol. 40, no. 5, pp. 493–498, May 2012, doi: 10.1002/clen.201100469.
- [56] O. Onay, “Influence of pyrolysis temperature and heating rate on the production of bio-oil and char from safflower seed by pyrolysis, using a well-swept fixed-bed reactor,” *Fuel Processing Technology*, vol. 88, no. 5, pp. 523–531, May 2007, doi: 10.1016/j.fuproc.2007.01.001.

- [57] M. Yan *et al.*, “Innovative carbonization techniques for food waste: A comparative study of hydrothermal carbonization (HTC) and vapor-thermal carbonization (VTC),” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 182, p. 106685, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106685>.
- [58] J. Wang and S. Wang, “Preparation, modification and environmental application of biochar: A review,” Aug. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.282.
- [59] R. Sharma *et al.*, “A Comprehensive Review on Hydrothermal Carbonization of Biomass and its Applications,” Mar. 01, 2020, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.* doi: 10.1007/s42250-019-00098-3.
- [60] V. Benavente, A. Fullana, and N. D. Berge, “Life cycle analysis of hydrothermal carbonization of olive mill waste: Comparison with current management approaches,” *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 2637–2648, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.013.
- [61] M. Owsianiak, D. Fozer, Ł. Chrzanowski, M. Renz, B. Nowacki, and M. Ryberg, “Evaluation of hydrothermal carbonization of biomass residues for bioenergy: A life-cycle based comparison against incumbent technologies,” *EFB Bioeconomy Journal*, 2024, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:272070881>
- [62] G. Duman, K. Akarsu, A. Yilmazer, T. Keskin Gundogdu, N. Azbar, and J. Yanik, “Sustainable hydrogen production options from food wastes,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 23, pp. 10595–10604, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.146.
- [63] A. Kumar, K. Saini, and T. Bhaskar, “Advances in design strategies for preparation of biochar based catalytic system for production of high value chemicals,” Mar. 01, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.biortech.2019.122564.
- [64] M. Tripathi, J. N. Sahu, and P. Ganesan, “Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review,” Mar. 01, 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2015.10.122.
- [65] E. Kwaku Armah *et al.*, “Biochar: Production, Application and the Future,” in *Biochar - Productive Technologies, Properties and Applications*, IntechOpen, 2023. doi: 10.5772/intechopen.105070.

- [66] Y. Zhao *et al.*, “Experimental study of cyclone pyrolysis – Suspended combustion air gasification of biomass,” *Bioresour. Technol.*, vol. 243, pp. 1241–1246, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.07.065.
- [67] M. Ahmad *et al.*, “Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review,” 2014, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071.
- [68] F. Verheijen, S. Jeffery, A. C. Bastos, M. Van Der Velde, and I. Diafas, “Biochar Application to Soils A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions”, doi: 10.2788/472.
- [69] A. L. Pauline and K. Joseph, “Hydrothermal carbonization of organic wastes to carbonaceous solid fuel – A review of mechanisms and process parameters,” Nov. 01, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.fuel.2020.118472.
- [70] S. De Gryze *et al.*, “Evaluation of the Opportunities for Generating Carbon Offsets from Soil Sequestration of Biochar,” 2010. [Online]. Available: <http://www.terraglobalcapital.com>
- [71] J. M. Roberts, L. C. Carvalhais, C. O’Dwyer, V. A. Rincón-Flórez, and A. Drenth, “Diagnostics of Fusarium wilt in banana: Current status and challenges,” May 01, 2024, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1111/ppa.13863.
- [72] R. Solórzano, H. A. Ramírez Maguiña, L. Johnson, C. Ureta Sierra, and J. Cruz, “Current Progress in Microbial Biocontrol of Banana Fusarium Wilt: A Systematic Review,” Mar. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/agronomy15030619.
- [73] T. Ghutke, V. Bhalerao, A. Mendhe, and R. Kadam, “Recycling of banana pseudostem waste, it’s effective method for decomposition and nutrient analysis,” *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, vol. 8, no. 11, pp. 286–292, Nov. 2024, doi: 10.33545/26174693.2024.v8.i11d.2845.
- [74] D. Rajendran, “UTILIZATION OF BIOCHAR FROM DIFFERENT BIORESOURCES FOR SOIL HEALTH AND CROP PRODUCTION by,” 2021.
- [75] R. Diya, A. V. Meera, B. Rani, N. Leno, and J. John, “Physico-chemical Characterization of Biochar from Different Biomass Materials,” *International Journal of Environment and Climate Change*, vol. 13, no. 11, pp. 2781–2787, Nov. 2023, doi: 10.9734/ijecc/2023/v13i113446.

- [76] L. X. Vi, N. M. Hùng, L. T. Hằng, N. Q. Huy, K. T. Hiền, and P. N. Thạch, “Một số kết quả nghiên cứu bệnh héo vàng lá chuối do nấm *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* tại Vĩnh Phúc,” no. 4, pp. 8–15, May 2023.
- [77] S. J. Zheng *et al.*, “New geographical insights of the latest expansion of *Fusarium oxysporum* f.sp. *Cubense* tropical race 4 into the greater mekong subregion,” *Front. Plant Sci.*, vol. 9, Apr. 2018, doi: 10.3389/fpls.2018.00457.
- [78] K. Chittarath *et al.*, “Geographical Distribution and Genetic Diversity of the Banana *Fusarium* Wilt Fungus in Laos and Vietnam,” *Journal of Fungi*, vol. 8, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/jof8010046.
- [79] Đ. T. Hà, “Nghiên cứu tuyển chọn các chủng nấm *Trichoderma* có khả năng đối kháng mạnh với nấm bệnh *Fusarium* gây bệnh héo vàng trên cây chuối tại huyện Đại Lộc, tỉnh Quảng Nam,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, vol. 88, no. 3, pp. 104–108, 2015.
- [80] Đ. Trường Sơn *et al.*, “Nghiên cứu đặc tính đối kháng với nấm *Fusarium oxysporum* gây bệnh trên chuối của chủng xạ khuẩn *Streptomyces* sp. VNUA27,” *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam*, vol. 20, no. 8, pp. 1042–1053, 2022, Accessed: Apr. 25, 2026. [Online]. Available: <https://vie.vjas.vn/index.php/vjasvn/article/view/1032>
- [81] T. T. M. Nguyen, T. T. Nguyen, X. T. Bui, V. T. Tran, H. H. Pham, and X. C. Nguyen, “Determination of fermentation conditions of *Streptomyces* sp. VNUA116 to improve the antifungal activities against *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* causing Panama wilt disease on banana plants,” *Ministry of Science and Technology, Vietnam*, vol. 66, no. 6, pp. 26–33, Jun. 2024, doi: 10.31276/VJST.66(6).26-33.
- [82] N. Thị Hồng Xuyên, L. Trọng Nghĩa, T. Thị Bảo Trang, N. Xuân Hồng, and Đ. Phương Linh, “Nghiên cứu quy trình ủ phân từ thân chuối bổ sung chế phẩm *Trichoderma* - *Bacillus*,” *Tạp chí Khoa học Yesin*, vol. 14, no. 4, pp. 20–30, 2023.
- [83] H. T. Ngọc *et al.*, “Nghiên cứu, sử dụng phụ phẩm nông nghiệp (thân cây chuối) làm nguyên liệu sản xuất sản phẩm đưng thực phẩm,” *Khoa học Công nghệ*, no. 12, pp. 224–229, 2022.
- [84] H. A. Vang, Q. V. Tran, P. N. Le, N. A. T. Huynh, and V. V. L. Nguyen, “Fabrication of biodegradable masks from banana leaves by thermal

- compression method,” *Ministry of Science and Technology, Vietnam*, vol. 65, no. 6, pp. 31–36, Jun. 2023, doi: 10.31276/VJST.65(6).31-36.
- [85] N. T. Giang, N. Thị, N. Dinh, N. T. Phương, and H. Nga, “Nghiên cứu sử dụng zeolite tự nhiên, than sinh học và phân rơm để hạn chế tích lũy kim loại nặng chì và cadimi trong rau ăn lá do sử dụng nước tưới ô nhiễm,” *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy Lợi và Môi trường*, no. 74, 2021.
- [86] S. Sharma *et al.*, “Biochar as a Potential Nutrient Carrier for Agricultural Applications,” Dec. 01, 2025, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s40726-025-00349-7.
- [87] X. Yang and S. J. Ergas, “Production and characterization of biochar derived from raw and anaerobically digested banana waste,” *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 32, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.biteb.2025.102325.
- [88] S. Meyer, B. Glaser, and P. Quicker, “Technical, economical, and climate-related aspects of biochar production technologies: A literature review,” Nov. 15, 2011. doi: 10.1021/es201792c.
- [89] N. Rajendiran, S. Ganesan, D. Weichgrebe, and S. S. Venkatachalam, “Optimization of pyrolysis process parameters for the production of biochar from banana peduncle fibrous waste and its characterization,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 25, no. 10, pp. 3189–3201, Dec. 2023, doi: 10.1007/s10098-023-02592-2.
- [90] M. Maymon, N. Sela, U. Shpatz, N. Galpaz, and S. Freeman, “The origin and current situation of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in Israel and the Middle East,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-58378-9.
- [91] A. K. Hassan, “Induction of systemic resistance of eggplant against sclerotinia sclerotiorum infection using biochar and bio-health,” *J. Biotechnol.*, vol. 14, no. 4, pp. 653–661, 2017, [Online]. Available: www.pjbt.org
- [92] S. S. Sahoo, V. K. Vijay, R. Chandra, and H. Kumar, “Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo,” *Clean. Eng. Technol.*, vol. 3, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100101.
- [93] R. K. Widi, P. Setyoprato, P. E. Danatha, V. D. Nanlohy, and E. Savitri, “Preparation and Characterization of Activated Carbon from Cavendish

- Banana (*Musa acuminata*) Peels for Ferric Ions Adsorption,” *International Journal of Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 1362–1374, Jul. 2025, doi: 10.14716/ijtech.v16i4.6664.
- [94] L. Nanganoa *et al.*, “Integrated application of banana peduncle-derived biochar and fertilizer affect soil physicochemical properties and plant nutrient uptake,” *Fundamental and Applied Agriculture*, no. 0, p. 1, 2019, doi: 10.5455/faa.64828.
- [95] V. T. Nguyễn, X. H. Nguyễn, T. H. Nguyễn, Q. V. Hoàng, V. H. Cao, and V. C. Phạm, “Chất thải chăn nuôi công nghiệp: Một góc nhìn từ phương pháp xử lý,” *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam*, vol. 23, no. 8, pp. 1080–1089, Aug. 2025, doi: 10.31817/tckhnnvn.2025.23.8.10.
- [96] C. A. Davies-Smith *et al.*, “Enhancing biochar quality for the steel industry via Hydrothermal Pretreatment-Steam Explosion and pyrolysis,” 2025, doi: 10.17632/ypbr4mb24w.3.
- [97] A. Font, J. F. de Brito, V. Riffault, S. Conil, J. L. Jaffrezo, and A. Bourin, “Calculations of the conversion factor from organic carbon to organic matter for aerosol mass balance,” *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 15, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.apr.2024.102301.
- [98] K. Ramesh and V. Raghavan, “Biochar/bentonite composite beads for controlled nitrogen release and reduced environmental impact: From banana waste to sustainable food security,” *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 19, May 2025, doi: 10.1016/j.rsurfi.2025.100500.
- [99] E. Ortiz Ortega *et al.*, “Progress in Optical Science and Photonics Material Characterization Techniques and Applications.” [Online]. Available: <https://link.springer.com/bookseries/10091>
- [100] X. Ma *et al.*, “Study of Biochar Properties by Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX),” *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, vol. 47, no. 5, pp. 593–601, Mar. 2016, doi: 10.1080/00103624.2016.1146742.
- [101] C. O. Colpan, Y. Nalbant, and M. Ercelik, “Fundamentals of Fuel Cell Technologies,” in *Comprehensive Energy Systems: Volumes 1-5*, vol. 4, Elsevier, 2018, pp. V4-1107-V4-1130. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00446-6.

- [102] R. Bardestani, G. S. Patience, and S. Kaliaguine, “Experimental methods in chemical engineering: specific surface area and pore size distribution measurements—BET, BJH, and DFT,” Nov. 01, 2019, *Wiley-Liss Inc.* doi: 10.1002/cjce.23632.
- [103] S. Syazana Mohtar *et al.*, “catalysts Impact of Doping and Additive Applications on Photocatalyst Textural Properties in Removing Organic Pollutants: A Review,” vol. 11, p. 1160, 2021, doi: 10.3390/catal.
- [104] C. H. Chia, B. Gong, S. D. Joseph, C. E. Marjo, P. Munroe, and A. M. Rich, “Imaging of mineral-enriched biochar by FTIR, Raman and SEM-EDX,” *Vib. Spectrosc.*, vol. 62, pp. 248–257, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.vibspec.2012.06.006.
- [105] J. J. Ojeda and M. Dittrich, “Fourier transform infrared spectroscopy for molecular analysis of microbial cells,” *Methods in Molecular Biology*, vol. 881, pp. 187–211, 2012, doi: 10.1007/978-1-61779-827-6_8.
- [106] J. Zhang, B. Huang, L. Chen, J. Du, W. Li, and Z. Luo, “Pyrolysis kinetics of hullless barley straw using the distributed activation energy model (DAEM) by the TG/DTA technique and SEM/XRD characterizations for hullless barley straw derived biochar,” *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 1039–1050, Jul. 2018, doi: 10.1590/0104-6632.20180353s20170382.
- [107] G. F. Harrington and J. Santiso, “Back-to-Basics tutorial: X-ray diffraction of thin films,” *J. Electroceram.*, vol. 47, no. 4, pp. 141–163, Dec. 2021, doi: 10.1007/s10832-021-00263-6.
- [108] S. Elkhalfa *et al.*, “Biochar development from thermal TGA studies of individual food waste vegetables and their blended systems,” *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 15, no. 23, pp. 29965–29982, Dec. 2025, doi: 10.1007/s13399-022-02441-0.
- [109] C. de Blasio, “Thermogravimetric analysis (TGA),” in *Green Energy and Technology*, Springer Verlag, 2019, pp. 91–102. doi: 10.1007/978-3-030-11599-9_7.
- [110] W. J. Liu, W. W. Li, H. Jiang, and H. Q. Yu, “Fates of Chemical Elements in Biomass during Its Pyrolysis,” May 10, 2017, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00647.

- [111] X. Shen, J. Zeng, D. Zhang, F. Wang, Y. Li, and W. Yi, “Effect of pyrolysis temperature on characteristics, chemical speciation and environmental risk of Cr, Mn, Cu, and Zn in biochars derived from pig manure,” *Science of the Total Environment*, vol. 704, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135283.
- [112] P. Fu *et al.*, “Effects of pyrolysis temperature on characteristics of porosity in biomass chars,” in *2009 International Conference on Energy and Environment Technology, ICEET 2009*, 2009, pp. 109–112. doi: 10.1109/ICEET.2009.33.
- [113] K. Cen, X. Li, X. Ni, L. Qiu, and D. Chen, “Impact of torrefaction pretreatment on the pyrolytic behavior of hemicellulose: A systematic analysis of biochar, bio-oil, and gaseous products,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 243, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.indcrop.2026.123086.
- [114] S.-Y. Peng, Y.-W. Lin, Y.-Y. Lin, and K.-L. Lin, “Hydrothermal synthesis of hydroxyapatite nanocrystals from calcium-rich limestone sludge waste: Preparation, characterization, and application for Pb²⁺ adsorption in aqueous solution,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 160, p. 111943, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111943>.
- [115] H. Wang *et al.*, “Insights into the Roles of Surface Functional Groups and Micropores in the Sorption of Ofloxacin on Banana Pseudo-Stem Biochars,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 7, Apr. 2024, doi: 10.3390/su16072629.
- [116] S. M. Dawoud, M. A. Hussein, and R. K. Zaidan, “Investigation of Methylene Blue Dye Removal by Activated Carbon Made from Buffalo Dung: Adsorption and kinetic Studies,” *Science and Technological Trends*, vol. 1, no. 2, pp. 2959–1937, 2023, doi: 10.48112/jestt.v1i2.511.
- [117] Y. Chen *et al.*, “Effect of volatiles interaction during pyrolysis of cellulose, hemicellulose, and lignin at different temperatures,” *Fuel*, vol. 248, pp. 1–7, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.070.
- [118] C. Yang, J. Liu, and S. Lu, “Pyrolysis temperature affects pore characteristics of rice straw and canola stalk biochars and biochar-amended soils,” *Geoderma*, vol. 397, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115097.
- [119] S. Xu, W. Yu, S. Liu, C. Xu, J. Li, and Y. Zhang, “Adsorption of hexavalent chromium using banana pseudostem biochar and its mechanism,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 11, Nov. 2018, doi: 10.3390/su10114250.

- [120] W. Tongpoothorn, M. Sriuttha, P. Homchan, S. Chanthai, and C. Ruangviriyachai, "Preparation of activated carbon derived from *Jatropha curcas* fruit shell by simple thermo-chemical activation and characterization of their physico-chemical properties," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 89, no. 3, pp. 335–340, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.cherd.2010.06.012.
- [121] M. Vijayprakash, V. Rajagopalan, and N. Keerthivasan, "Carbon mitigation potential of banana crops biomass and biochar in tropical semi-arid region of India.," *Global Nest Journal*, vol. 27, no. 7, 2025, doi: 10.30955/gnj.07413.
- [122] N. Abdullah, R. Mohd Taib, N. S. Mohamad Aziz, M. R. Omar, and N. Md Disa, "Banana pseudo-stem biochar derived from slow and fast pyrolysis process," *Heliyon*, vol. 9, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e12940.
- [123] S. Song *et al.*, "Properties of Biochar Obtained from Tropical Crop Wastes Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Application on Acidic Soil," *Agronomy*, vol. 13, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/agronomy13030921.
- [124] Q. Hu, Y. Zhu, B. Hu, S. Lu, and G. Sheng, "Mechanistic insights into sequestration of U(VI) toward magnetic biochar: Batch, XPS and EXAFS techniques," *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 70, pp. 217–225, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jes.2018.01.013.
- [125] Z. Sheng *et al.*, "Physicochemical characterization of raw and modified banana pseudostem fibers and their adsorption capacities for heavy metal Pb²⁺ and Cd²⁺ in water," *Polym. Compos.*, vol. 39, no. 6, pp. 1869–1877, Jun. 2018, doi: 10.1002/pc.24140.
- [126] H. Lu, W. Zhang, Y. Yang, X. Huang, S. Wang, and R. Qiu, "Relative distribution of Pb²⁺ sorption mechanisms by sludge-derived biochar," *Water Res.*, vol. 46, no. 3, pp. 854–862, 2012, doi: 10.1016/j.watres.2011.11.058.
- [127] Y. Yi, X. Wang, J. Ma, and P. Ning, "Fe(III) modified *Egeria najas* driven-biochar for highly improved reduction and adsorption performance of Cr(VI)," *Powder Technol.*, vol. 388, pp. 485–495, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.04.066.
- [128] M. Patel, R. Kumar, C. U. Pittman, and D. Mohan, "Ciprofloxacin and acetaminophen sorption onto banana peel biochars: Environmental and process parameter influences," *Environ. Res.*, vol. 201, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111218.

- [129] L. Qian *et al.*, “Nanoscale zero-valent iron supported by biochars produced at different temperatures: Synthesis mechanism and effect on Cr(VI) removal,” *Environmental Pollution*, vol. 223, pp. 153–160, 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2016.12.077.
- [130] H. Chakhtouna, H. Benzeid, N. Zari, A. el kacem Qaiss, and R. Bouhfid, “Functional CoFe₂O₄-modified biochar derived from banana pseudostem as an efficient adsorbent for the removal of amoxicillin from water,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 266, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2021.118592.
- [131] D. dos S. Dias *et al.*, “Moisture sorption of biochar from banana pseudostem fibers according to the pyrolysis temperature,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 138, no. 5, pp. 3825–3832, Dec. 2019, doi: 10.1007/s10973-019-08141-8.
- [132] N. H. M. A. Lê, N. T. Phạm, and K. T. Đăng, “Tổng hợp vật liệu hấp phụ từ vỏ ốc biển tính MnO₂ và ứng dụng trong xử lý Cr(VI),” *Dong Thap University Journal of Science*, vol. 14, no. 04S, pp. 36–50, Mar. 2025, doi: 10.52714/dthu.14.04s.2025.1546.
- [133] D. Dadebo, A. Atukunda, M. G. Ibrahim, and M. Nasr, “A novel bio-coagulation/co-digestion/pyrolysis scheme for banana pseudostem waste management: techno-economic and sustainability approaches,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 48, pp. 58430–58444, Oct. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-34917-z.
- [134] J. V. Fernández *et al.*, “Use of Unmodified Coffee Husk Biochar and Ashes as Heterogeneous Catalysts in Biodiesel Synthesis,” *Bioenergy Res.*, vol. 16, no. 3, pp. 1746–1757, Sep. 2023, doi: 10.1007/s12155-022-10516-z.
- [135] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee, and C. Zheng, “Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis,” *Fuel*, vol. 86, no. 12–13, pp. 1781–1788, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2006.12.013.
- [136] B. B. Uzun, A. E. Pütün, and E. Pütün, “Composition of products obtained via fast pyrolysis of olive-oil residue: Effect of pyrolysis temperature,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 79, no. 1-2 SPEC. ISS., pp. 147–153, 2007, doi: 10.1016/j.jaap.2006.12.005.
- [137] C. Quan, N. Gao, and Q. Song, “Pyrolysis of biomass components in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviors, kinetics, and product characterization,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 121, pp. 84–92, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jaap.2016.07.005.

- [138] E. Apaydın Varol and Ü. Mutlu, “TGA-FTIR Analysis of Biomass Samples Based on the Thermal Decomposition Behavior of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 9, May 2023, doi: 10.3390/en16093674.
- [139] Đ. Quý Diễm, N. Văn Sơn, V. Thanh Khuê, and V. Thành Công, “Tổng hợp than sinh học từ phế phẩm vỏ cà phê ứng dụng làm chất cải tạo đất nông nghiệp ở Việt Nam,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, vol. 68, p. 2024, 2024, doi: 10.46242/jstiuh.v68i02.5082.
- [140] L. Zhao *et al.*, “Physiological and Transcriptional Characteristics of Banana Seedlings in Response to Nitrogen Deficiency Stress,” *Horticulturae*, vol. 10, no. 3, Mar. 2024, doi: 10.3390/horticulturae10030290.
- [141] C. Chaiyaraksa and K. Chaiyasit, “Effect of Chemical Fertilizers on the Efficiency of Biochar in Reducing Lead Mobility in Soil,” *Science & Technology Asia*, vol. 29, no. 2, doi: 10.14456/scitechasia.2024.38.