

NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH CHẤT THẢI NHÀ TIÊU KHÔ HỘ GIA ĐÌNH ĐỂ ĐỊNH HƯỚNG GIẢI PHÁP CÔNG NGHỆ XỬ LÝ, TÁI SỬ DỤNG AN TOÀN TRONG NÔNG NGHIỆP

Đỗ Hồng Anh^{a,*}

^aKhoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 15/11/2023, Sửa xong 11/01/2024, Chấp nhận đăng 08/5/2024

Tóm tắt

Chất thải từ con người là một trong những nguyên nhân chủ yếu gây ô nhiễm môi trường đất và nước do chứa lượng lớn vi sinh vật gây bệnh, bên cạnh đó nó cũng chứa một lượng lớn chất dinh dưỡng đặc biệt là photpho, kali và các vi chất khác, vì vậy đây là nguồn tài nguyên cần được tận dụng. Để đáp ứng phù hợp với tập quán tái sử dụng truyền thống, rút ngắn thời gian ủ phân hướng tới tái sử dụng an toàn phân bón trong nông nghiệp cần có những đánh giá lựa chọn các biện pháp phù hợp nhằm tăng cường hiệu quả xử lý (phân hủy chất hữu cơ, tiêu diệt mầm bệnh, ...), trên cơ sở tận dụng và phát huy tối đa các giải pháp vệ sinh, tập quán sử dụng và bảo quản nhà tiêu, xử lý và tái sử dụng truyền thống.

Từ khóa: tái sử dụng an toàn; chất thải người; vi sinh vật gây bệnh; trứng giun; ủ hiếu khí.

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF HUMAN EXCRETA, ORIENTING TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR TREATMENT AND SAFE REUSE IN AGRICULTURE

Abstract

Human excreta is one of the main causes of soil and water pollution because it contains a large amount of pathogenic microorganisms, besides it also contains a large amount of nutrients, especially phosphorus, potassium, and other micronutrients, so this is a resource that needs to be utilized. In order to meet the requirements of traditional reuse practices, shorten the composting time towards the safe reuse for agriculture, it is necessary to evaluate and select appropriate measures to enhance the treatment efficiency (decomposition of organic matter, destruction of pathogens, ...), on the basis of making the most of and promoting hygienic solutions, practices of using and preserving latrines, and treating and traditional reusing.

Keywords: safe reuse; human excreta; pathogen die-off; helminth egg; composting.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(3V\)-13](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(3V)-13) © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Chất thải từ con người được sử dụng rộng rãi ở các nước châu Á và Trung Mỹ như một dạng mùn hữu cơ để duy trì độ phì nhiêu của đất ở các vùng nông thôn [1]. Việc tái chế loại chất thải này giúp khép vòng lặp giữa nông nghiệp và vệ sinh và giải quyết những thách thức trong tương lai đối với nhu cầu phân bón trong nông nghiệp cũng như tận thu nguồn tài nguyên tốt hơn. Lượng phân thải ra từ 7,6 tỷ người chứa khoảng 34 triệu tấn nitơ và 4 triệu tấn photpho còn lại là kali, lưu huỳnh và các vi chất khác. Giá trị dinh dưỡng của chất thải nhà tiêu cao, vì vậy đây là nguồn tài nguyên cần được tận dụng [2]. Bên cạnh đó chất thải của gia súc, gia cầm và con người là một trong những nguyên nhân chủ yếu gây ô nhiễm môi trường đất và nước, khi thải ra môi trường nếu không được xử lý sẽ trở thành nguồn mầm bệnh lớn, có thể xâm nhập trở lại vào thực phẩm qua các đường truyền khác nhau như nước sinh hoạt, đất, côn trùng và làm ảnh hưởng tới sức khỏe của chính con người.

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: anhdh@huce.edu.vn (Anh, Đ. H.)

Các bệnh liên quan đến chất thải là các bệnh thường gặp tại Việt Nam. Trong nước thải, nhất là từ bệnh viện, có chứa nhiều mầm bệnh: vi khuẩn, virus, Protoza, trứng giun, ... Có tới trên 30 loại bệnh khác nhau lây nhiễm từ chất thải, đó là vấn đề sức khỏe cộng đồng quan trọng [3]. Một nghiên cứu được Viện Sốt rét – Ký sinh trùng – Côn trùng Trung ương năm 2016 trên 6.135 học sinh tiểu học tại 105 trường của 21 tỉnh thành phố cho thấy tỷ lệ nhiễm giun truyền qua đất chung tại 21 tỉnh thành là 6,39%, một số tỉnh có tỷ lệ cao như Quảng Ninh 20,31%; Trà Vinh 18,08%; Ninh Bình 17,46%, Bình Thuận 17,25%, Hưng Yên 10,11%, Hải Phòng 9,97%, Sóc Trăng 9,63% các tỉnh còn lại có tỷ lệ nhiễm giun từ < 1% - 8,28% trong đó thành phố Hồ Chí Minh không có trường hợp xét nghiệm dương tính với giun truyền qua đất [4]. Điều đó cho thấy điều kiện kinh tế và tập quán sinh hoạt có liên quan mật thiết tới tỷ lệ này, các tỉnh phía Bắc và miền Trung với thói quen tái sử dụng chất thải người trong nông nghiệp như Quảng Ninh, Ninh Bình, Bình Thuận, các tỉnh đồng bằng Nam bộ với thói quen sử dụng cầu tằm như Trà Vinh, Sóc Trăng đều có tỷ lệ nhiễm giun cao.

Phân người, nếu không được thu gom và xử lý hợp vệ sinh sẽ gây ô nhiễm nguồn nước, ô nhiễm thực phẩm, ô nhiễm môi trường xung quanh và gây nên nhiều loại bệnh tật, trong đó phải kể đến bệnh tiêu chảy, giun sán, ngoài da, phụ khoa, mắt và các bệnh khác. Các bệnh giun đường ruột có liên quan chặt chẽ với tập quán sinh hoạt và vệ sinh môi trường. Nền kinh tế nước ta chủ yếu dựa vào nông nghiệp với tập quán sử dụng phân người bón lúa và hoa màu, bên cạnh đó ý thức vệ sinh chưa cao, đó chính là một trong những lý do làm cho bệnh giun sán ở nước ta là một bệnh phổ biến mang tính xã hội. Tại khu vực nông thôn Việt Nam, hộ gia đình sử dụng nhà tiêu khô thường có nhu cầu lấy phân ra khỏi hố chứa khi đầy, đánh đóng ủ tại góc vườn hoặc đóng bao và để trong vườn nhà hoặc đưa ra ruộng, để từ 1-2 tuần rồi đem bón ruộng, điều này khiến cho mầm bệnh trong chất thải có khả năng phát tán ra môi trường đất, nước. Một thực tế nữa là số hộ gia đình sử dụng bếp củi không còn phổ biến, rơm thường được đốt ngay ngoài ruộng hoặc được sử dụng làm thức ăn cho gia súc, lượng tro rắc vào hố tiêu sau khi đi tiêu thường không đủ lượng, dẫn đến hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh trong hố ủ hạn chế.

Các khuyến nghị của VIHEMA và WHO thời gian lưu giữ phân cần thời gian dài hơn 6 tháng hoặc từ 1-2 năm thường khó thực hiện do tập quán canh tác và thói quen của người dân. Do tập quán canh tác một năm hai vụ lúa và một vụ trồng màu (ngô, khoai, dưa chuột, ...) nên người nông dân thường có nhu cầu sử dụng phân bón lót từ 2 đến 3 lần trong năm, khiến cho mầm bệnh vẫn còn tồn tại trong đất gây nên những nguy cơ về sức khỏe đối với người dân [5].

Theo hướng dẫn của Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn thì phân ủ trong nhà tiêu có thể được coi như là nguồn dinh dưỡng tốt cho cây trồng nếu yêu cầu về các chỉ tiêu vi sinh vật được đảm bảo theo tiêu chuẩn được quy định tại phụ lục VIII của Thông tư 41/2014/TT-BNNPTNT.

Nhằm tăng cường kiểm soát ô nhiễm môi trường, kiểm soát dịch bệnh, bảo vệ sức khỏe của người dân, bên cạnh đó, vẫn tận thu được những tài nguyên có ích trong chất thải, chất dinh dưỡng, phục vụ nông nghiệp, do đó nghiên cứu này sẽ đi sâu vào nghiên cứu, đánh giá đặc điểm thành phần chất thải nhà tiêu, các biện pháp đang được sử dụng để xử lý chất thải nhà tiêu, từ đó đánh giá hiệu quả của các giải pháp đang được áp dụng, định hướng lựa chọn biện pháp/nhóm giải pháp nhằm cải thiện quá trình phân huỷ và tiêu diệt mầm bệnh trong chất thải nhà tiêu đồng thời rút ngắn thời gian ủ phù hợp với nhu cầu và tập quán canh tác trong nông nghiệp.

2. Thành phần chất thải nhà tiêu và phân bón

Phân người chủ yếu bao gồm các chất hữu cơ chưa tiêu hóa như cellulose, chất béo đều được cấu tạo từ các bon, các bon hữu cơ thường được chia thành 3 loại là hydrat các bon phân hủy nhanh (đường hay tinh bột); hydrat các bon phân hủy trung bình (Cellulose hay Hemicellulose) và các chất hữu cơ khó phân huỷ khác. Phân của người trưởng thành có chứa hàm lượng nước từ 63% - 86% và trung

binh là 75% tùy thuộc vào chế độ dinh dưỡng và lượng chất xơ đưa vào cơ thể. Trong 25% khối lượng rắn còn lại trong phân gồm chủ yếu là chất hữu cơ (chiếm 84% - 93%), phần rắn hữu cơ này bao gồm: sinh khối của vi sinh vật (25% - 54%), protein hoặc hợp chất chứa ni tơ (2% - 25%), các bon hydrat hoặc thức ăn chưa được tiêu hoá (25%), lipid chưa được tiêu hoá (2% - 15%) [6], các tỷ lệ này sẽ thay đổi phụ thuộc rất nhiều vào chế độ dinh dưỡng và đặc tính sinh học sẵn có của thức ăn đưa vào. Vì thế, lượng các bon trong phân chiếm từ 44% - 55% tính theo trọng lượng khô, và chất hữu cơ bay hơi chiếm 92% trọng lượng khô, lượng ni tơ trong phân chiếm khoảng 5-7% [7].

a. Lượng chất rắn

Một nghiên cứu tại Thái Lan cho thấy lượng phân và nước tiểu của một người thải ra trong một ngày là từ 730 – 1.530g/ng.ngày, tính theo TS là 50 – 87 g/ng.ngày [8]. Một số kết quả nghiên cứu về hàm lượng TS và lượng phân thải người tại một số nước trên thế giới được mô tả trong Bảng 1.

Bảng 1. Lượng phân và nước tiểu phát sinh (g/ng.ngày) [9]

Địa điểm	Nước tiểu	Phân	Hỗn hợp phân và nước tiểu	TS
Đan Mạch	-	-	1.700	59-81
Thụy Điển	800-1.500	140		27-68
Châu Âu và Bắc Mỹ	1.000-1.300	100-200	1.350	-
Các nước phát triển	500 - 600	132- 136	-	60-80
Nhật và Trung Quốc	-	116-200	-	-
Trung Quốc	1.600	315	-	-
Việt Nam	820-1.200	130-140	990-1.333	43-93
Thái Lan	500-1.200	120-400	730-1.530	50-87
Nước đang phát triển	1.000-1.300	130-520	1.450-1.550	-

Chú thích: (-) không có thông tin.

b. Các hợp chất hữu cơ

Chất hữu cơ trong phân rất đa dạng phụ thuộc vào độ tuổi, chế độ dinh dưỡng và các yếu tố xã hội khác. Lượng chất hữu cơ trong phân được đánh giá thông qua một số các chỉ tiêu đặc trưng như: lượng chất rắn bay hơi (VS), BOD, COD. Lượng chất rắn bay hơi (VS) có giá trị từ 24,8 – 44,5 g/ng.ngày. Lượng TS nằm trong khoảng từ 20 đến 30 g/ng.ngđ, giá trị trung bình thường được sử dụng để thiết kế là 25 g/ng.ngày [7]. Nghiên cứu của Hồng Anh và cộng sự đối với chất thải nhà tiêu khô Việt Nam cũng cho thấy TS nằm trong khoảng từ 30 – 40% tùy thuộc loại nhà tiêu tách hay không tách nước tiểu, tỷ lệ VS/TS của chất thải nhà tiêu khô tại khu vực đồng bằng Bắc bộ xấp xỉ 60% [10].

c. N, P, K và S

Lượng nitơ trong phân được thống nhất bởi hai nghiên cứu, thực hiện bởi Cơ quan bảo vệ môi trường Thụy Điển và Vinneras là 1,5 g/ng.ngày [7]. Lượng nitơ amon trong hỗn hợp phân và nước tiểu có giá trị là 0,66 g/ng.ngày và có khoảng 0,5 g/ng.ngày là do nước tiểu lẫn vào. Phốt pho trong phân tồn tại chủ yếu dưới dạng các hạt nhỏ canxi phốt phát.

Lượng lưu huỳnh trong phân được xác định bởi Andersson và Jenssen [7] dựa trên việc phân tích 28 mẫu, có giá trị là 0,21 g/ng.ngày. Sự chuyển hóa của lưu huỳnh thường diễn ra tỷ lệ với nitơ. Khoảng 20% nitơ trong phân tồn tại ở dạng nitơ amon và tỷ lệ giữa lưu huỳnh hòa tan trên lưu huỳnh tổng số cũng có giá trị tương tự.

d. Kim loại nặng

Rất khó xác định chính xác hàm lượng các kim loại nặng trong phân. Nghiên cứu của Butkovskyi và cs., chất thải từ nhà tiêu khô, chứa lượng lớn các chất dinh dưỡng và hàm lượng nhỏ các kim loại nặng và hoá chất được phẩm [11]. Tổng hợp kết quả nghiên cứu của Cơ quan bảo vệ môi trường Thụy Điển; Vinneras và cs.; Anderson & Jenssen và Weglin & Vinneras đã đưa ra giá trị về hàm lượng một số kim loại trong phân và được thể hiện ở Bảng 2 [7].

Bảng 2. Thành phần kim loại nặng trong phân người [7, 11] (đơn vị: g/ng.ngày)

Thành phần	Số mẫu	Mô hình UR- WARE – Thụy Điển		Mô hình Geber – Thụy Điển		Mô hình Ekoporten - Thụy Điển	Nghiên cứu ở Thailand	OR- WARE	Giá trị trung bình đề xuất	Butkovskyi và cs. mg/kg <i>n</i> = 2, (SD)
		Phân	Phân + giấy vệ sinh	Phân + giấy vệ sinh	Phân + giấy vệ sinh					
Pb	34	0,038	0,040	0,037	0,037	1.200	(0,07-0,14)*10 ⁻³	0,02	0,02	
Cd	35	0,01	0,01	0,016	0,016	0,015	0,003*10 ⁻³	0,01	0,010	
Hg	36	0,009	0,009	0,009	0,009	< 0,0068	0,01*10 ⁻³	0,063	0,009	
Cu	37	1,00	1,10	1,74	1,74	2,9	0,0015	1,1	1,10	21 (1,0)
Cr	38	0,124	0,13	0,135	0,135	0,15		0,02	0,02	
Ni	39	0,188	0,19	0,226	0,226	0,19	0,0003	0,074	0,07	3,2 (0,05)
Zn	40	10,7	10,7	46,4	46,4	13	0,009-0,016	11	10,68	230 (10)

e. Vi sinh vật gây bệnh đặc trưng

- Vi khuẩn:

Phân của người khỏe mạnh cũng chứa rất nhiều vi khuẩn, kể cả các vi khuẩn gây bệnh. Các vi khuẩn này thường được đào thải vào môi trường thông qua con đường bài tiết, và sau đó lây lan vào các nguồn nước hoặc các môi trường sinh sống thuận lợi khác như các bãi rác hoặc thực phẩm bị lên men. Tiêu chảy là triệu chứng phổ biến nhất của các bệnh nhiễm trùng đường ruột do vi khuẩn gây ra.

Escherichia Coli (E.coli): là trực khuẩn sống thường xuyên trong ruột người và động vật, trong 1 gam phân người có thể chứa từ 10⁸ đến 10¹⁰ tế bào E.coli [10, 12]. *E.coli* chiếm tới 80% vi khuẩn hiếu khí sống ở ruột, bình thường chúng không gây bệnh, khi cơ thể suy yếu một số chủng có khả năng gây bệnh [11].

Streptococci: thuộc nhóm cầu khuẩn, Gram dương kích thước khoảng 1 µm, chúng thường có mặt ở trong ruột người và động vật máu nóng, *Enterococci* thuộc nhóm liên cầu phân (*Fecal Streptococci*) là loài vi khuẩn thường được dùng để làm vi khuẩn chỉ thị sự nhiễm phân, mật độ của nhóm này trong phân người trong khoảng từ 10⁵ – 10⁸ tế bào/g phân [12].

Salmonella: là loại vi khuẩn gây bệnh thương hàn typhos và paratyphos với mật độ tế bào trong 1 gam phân người mang bệnh khoảng từ 10⁴ - 10¹¹. *Salmonella* không sinh sản ở môi trường bên ngoài nhưng có thể bảo tồn trong nước sông trong 6 tháng, trong nước giếng khơi trong 4 tháng, trong phân được lưu giữ sau 10 tháng (ở điều kiện nhiệt đới) [12].

- Vi sinh vật chỉ thị trong phân:

E. coli: là loài duy nhất có nguồn gốc chính xác từ phân người và động vật máu nóng, có thể được tìm thấy ở trong môi trường tự nhiên trong đất và nước bị nhiễm phân. Trong phân người và động vật máu nóng thì *E. coli* chiếm tới hơn 90% Coli tổng số [7].

Coli chịu nhiệt: là vi khuẩn Gram âm hình que có chiều dài từ 2-5 µm và đường kính 0,4 µm.

Giun, sán: Số lượng trứng giun, sán trong một gam phân người thường vào khoảng 100 đến 10,000 trứng [13]. Trứng giun thường tồn tại trong môi trường đất hoặc nước, còn các loại trứng và ấu trùng sán thì thường được tìm thấy trong một số vật chủ trung gian như một số loại thủy sinh vật (cua, cá, ốc hoặc rau trồng trong nước bẩn). Thời gian tồn tại của chúng thường từ vài tháng đến 1 năm, tuy

nhiên số lượng trứng giun bị giảm đi khá nhiều khi phơi nhiễm với các yếu tố môi trường như mặt trời, nhiệt độ, pH, v.v...

3. Một số biện pháp xử lý chất thải nhà tiêu

3.1. Ủ hiếu khí

Ủ hiếu khí là quá trình ủ phối trộn phân bón với các vật liệu độn khác nhau, trong đồng ủ sẽ diễn ra quá trình phân huỷ chất hữu cơ dưới sự có mặt của vi sinh vật trong điều kiện hiếu khí được kiểm soát, sản phẩm cuối cùng của quá trình ủ là chất hữu cơ đã được ổn định và có khả năng cải tạo đất trồng do có chứa các chất dinh dưỡng như một loại phân bón hữu cơ giải phóng chậm. Trong quá trình ủ hiếu khí, các vi sinh vật phân huỷ các hợp chất hữu cơ bao gồm hydratcacbon, đường, protein, chất béo, chất xơ (hemicellulose, cellulose) và lignin. Đồng ủ hiếu khí có thể được thực hiện dưới 2 hình thức là đồng ủ kín và đồng ủ hở. Việc cấp khí cho đồng ủ có thể được thực hiện dưới 2 hình thức: cấp khí cưỡng bức bằng máy cấp khí vào hệ thống ống đục lỗ bên trong đồng ủ (thường thực hiện với đồng ủ kín), cấp khí tự nhiên nhờ đảo trộn (thường thực hiện với đồng ủ hở). Việc ủ hiếu khí với đồng ủ hở có chi phí đầu tư và vận hành thấp nhưng đòi hỏi diện tích lớn. Trong đồng ủ hở, người ta chất phân bón và các vật liệu ủ khác thành đồng và vật liệu ủ sẽ được phân huỷ trong điều kiện hiếu khí.

Theo Savage thì việc kết hợp giữa đảo trộn thường xuyên và bổ sung chất độn như mùn cưa (cung cấp nguồn cacbon và độ thoáng khí cho đồng ủ) sẽ làm giảm nhanh chóng vi sinh vật gây bệnh tới 7log trong vòng 14 ngày [14]. Bên cạnh đó bổ sung nguồn vi sinh vật phù hợp cho đồng ủ compost cũng có thể là giải pháp tiềm năng để thúc đẩy quá trình phân huỷ và tiêu diệt mầm bệnh diễn ra hiệu quả.

Nghiên cứu của Klingel cho thấy nhiệt độ trong đồng ủ hiếu khí (composting) có thể lên tới 60 – 70 °C, nhờ đó vi sinh vật gây bệnh sẽ được tiêu diệt. Sau khoảng 30 ngày nhiệt độ sẽ giảm xuống tới 50 °C. Trong suốt quá trình ổn định sau đó nhiệt độ sẽ duy trì trong khoảng 40 °C, và kết thúc quá trình ủ, nhiệt độ đồng ủ sẽ giảm xuống nhiệt độ môi trường [14]. Sản phẩm sau ủ có thể sử dụng là chất cải tạo đất trồng tốt, giảm nhu cầu phân hữu cơ và giảm chi phí mua phân bón.

Nghiên cứu của Nguyễn Thu Huyền, phối trộn trong điều kiện hiếu khí rác thải sinh hoạt hữu cơ với phân bón từ bể tự hoại cho thấy, với tỷ lệ phối trộn chất thải rắn/phân bón là 4:1 (theo thể tích) hiệu quả phân huỷ chất hữu cơ bay hơi (TVS) đạt 70% sau 21 ngày ủ, đồng ủ được duy trì nhiệt độ trên 60 °C trong 6 ngày (ngày thứ 5 đến ngày thứ 11) và đạt giá trị cực đại xấp xỉ 70 °C ở ngày thứ 10, điều này đảm bảo cho việc tiêu diệt vi khuẩn, tuy nhiên nghiên cứu không đưa ra số liệu về vi sinh vật gây bệnh trong vật liệu sau ủ [15].

3.2. Ủ kỵ khí

Công trình tiêu biểu của phương pháp ủ kỵ khí: nhà tiêu khô đào chìm (VIP), nhà tiêu 2 ngăn sử dụng luân phiên (DVCL), hào lưu giữ bùn,... Nhà tiêu khô đào chìm (VIP) là công trình ủ kỵ khí chất thải nhà tiêu đơn giản nhất. DVCL với hai ngăn sử dụng luân phiên trong đó một ngăn sử dụng và 1 ngăn ủ phân, sau 6 tháng ủ hầu hết mầm bệnh (trứng giun *Asscaris*, *Sal.Typhymurium*) bị tiêu diệt [16]. Hào lưu giữ bùn có chức năng lưu giữ và xử lý bùn, loại công trình này đã được áp dụng để xử lý bùn từ mạng lưới thoát nước từ những năm 1980 và áp dụng ở Durban, Nam Phi. Nghiên cứu của Still cho thấy, sau 1 năm cây trồng trên hào lưu giữ bùn tăng trưởng gấp 3 lần và chất thải sau 2,8 năm được lưu giữ trong đường hào có trứng giun giảm xuống còn 0,1% so với ban đầu (chủ yếu là các ấu trùng kém phát triển hoặc không di động) [17]. Xử lý chất thải nhà tiêu bằng DVCL có ưu điểm chất thải sau xử lý đã tới xấp xỉ, mầm bệnh được tiêu diệt sau thời gian ủ trong điều kiện người sử dụng thực hiện quy trình vận hành tốt. Việc áp dụng hào lưu giữ bùn hay VIP chỉ phù hợp với những nơi có diện tích lớn và có mực nước ngầm thấp.

3.3. Lên men kỵ khí

Lên men kỵ khí cho phép chuyển hoá chất hữu cơ trong phân bùn thành khí biogas với thành phần chủ yếu là khí metan và cacbonic, phân bùn sau xử lý có thể sử dụng với mục đích cải tạo đất. Công nghệ xử lý kỵ khí cũng được phát triển và áp dụng để xử lý chất thải chăn nuôi cùng với phân bùn [18]. Tuy nhiên việc vận hành công trình này đòi hỏi chi phí cao và công nhân vận hành có kỹ thuật. Nghiên cứu của Livia cho thấy xử lý kỵ khí bùn bể tự hoại trong điều kiện lên men nóng đã khiến cho trứng giun giảm 5log sau 6 giờ trong điều kiện bể xử lý đạt nhiệt độ 50 °C [19]. Khi ủ kỵ khí rác thải hữu cơ cho thấy sau quá trình ủ 20 ngày, hiệu quả phân huỷ chất hữu cơ tính theo VS giảm 45% - 48%, nhiệt độ đồng ủ hầu như không thay đổi so với nhiệt độ môi trường trong khoảng từ 35 – 37 °C [14].

3.4. Sấy - Đốt – Làm khô

Đốt là hình thức xử lý phân bùn ở nhiệt độ 850° – 900°, phương pháp này không tận dụng để thu hồi tài nguyên. Bùn trước khi xử lý bằng phương pháp này cần được tách nước. Nhược điểm chính của kỹ thuật này là giá thành cao và đòi hỏi kỹ thuật quản lý, vận hành bảo dưỡng phức tạp, chi phí cho công nghệ này khoảng 55 – 75 bảng Anh/tấn TS [19]. Kỹ thuật làm khô phân bùn nhờ năng lượng mặt trời đã được áp dụng ở quy mô lớn từ thế kỷ 19 ở châu Âu và Mỹ, tuy nhiên tia UV bị chặn lại bởi lớp phủ bề mặt hồ chứa bùn khiến cho hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh rất thấp đặc biệt là faecal coliform (rất nhạy cảm với tia UV) [20]. Xử lý phân bùn trong điều kiện kỵ khí ở nhiệt độ 50 °C, trứng giun đũa bị bất hoạt sau 6 giờ, kết quả này không phụ thuộc pH, điều quan trọng là phải tạo được nhiệt độ ổn định và kiểm soát trong suốt quá trình vận hành [19].

3.5. Một số biện pháp tăng cường tiêu diệt mầm bệnh trong phân bùn

- Nâng pH:

Ủ kỵ khí chất thải nhà tiêu khô không và có tách nước tiểu đồng thời bổ sung canxi hydroxit nâng pH tới 12, *E.coli* giảm 9,3log đạt ở mức dưới 103 sau 10,6 giờ; mô hình nhà tiêu không tách nước tiểu và không bổ sung vôi, hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh theo *E.coli* diễn ra chậm, sau 10,6 giờ chỉ giảm được 1log. Bổ sung vôi vào chất thải nhà tiêu khô với tỷ lệ từ 1% – 11% theo khối lượng tương đương với pH sau khi bổ sung vôi trong khoảng từ 9,4 – 11,6, kết quả cho thấy hơn 99% trứng giun bị tiêu diệt sau thời gian ủ từ 105 đến 117 ngày và có tới 97% trứng giun bị bất hoạt sau 88 ngày ủ tuy nhiên trong thời gian ủ phân cần được đảo trộn đều và thường xuyên để có thể tiếp xúc đều với vôi, tro và đạt được pH cần thiết từ 9,4 – 11,6 [21]. Ủ hiếu khí chất thải từ nhà tiêu 1 ngăn tách và không tách nước tiểu có bổ sung vôi với tỷ lệ 10% theo khối lượng, sau 111 ngày ủ lượng trứng giun còn lại trong đồng ủ đạt tiêu chuẩn theo hướng dẫn của WHO [22].

Với điều kiện pH 12,7, nhiệt độ 45 °C với độ ẩm lần lượt là 10%, 80% thì tất cả các loại trứng giun sẽ bị tiêu diệt hoàn toàn sau thời gian lần lượt là 19 và 60 ngày. Ở điều kiện 22 °C, độ ẩm 80%, pH > 12 phải sau 9 đến 11 tháng trứng giun mới bị tiêu diệt hoàn toàn. Ở điều kiện nhiệt độ là 70 °C và độ ẩm 80%, 100% trứng giun bị tiêu diệt sau 120 phút [23].

Điều đó cho thấy các điều kiện ảnh hưởng tới sự sống sót của trứng giun là nhiệt độ, độ ẩm và pH của môi trường, nếu kết hợp các điều kiện này đồng thời có thể giảm thời gian ủ cần thiết. Yếu tố bất hoạt chính đối với vi khuẩn gây bệnh và trứng giun được tìm ra từ thí nghiệm là độ ẩm thấp, amoniac (độ pH), ủ kỵ khí chất thải nhà tiêu khô với tro đồng thời bổ sung ure (0,5%) có thể tiêu diệt 7log vi khuẩn gây bệnh trong vòng từ 83 – 183 ngày, đồng thời làm giảm khả năng sống của trứng giun (*Ascaris*) [24]. Ở nhiệt độ cao hơn, sự bất hoạt của trứng giun đũa nhanh hơn với nồng độ amoniac cần thiết thấp hơn, với nồng độ amoniac 60 mM và điều kiện 28 °C sau 1 tháng trứng giun đã bị bất hoạt [25]. Sử dụng nước tiểu để thay thế amoniac nhằm tăng cường hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh trong

nhà tiêu UDDTs, phương án này đạt hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh tốt mà không cần sử dụng urea tổng hợp. Đồng ủ compost với phân lợn và rơm có bổ sung 2% urea (theo khối lượng) trong thời gian 45 ngày, sau 2 tuần ủ lượng *E.coli* trong mẫu phân ủ giảm từ 104 xuống dưới 5 (CFU/g) [26].

- Canh tranh sinh học:

Eastman đã tiến hành thí nghiệm đánh giá sự tiêu diệt vi sinh vật gây bệnh trong bùn cống thoát nước bằng phương pháp ủ hiếu khí với giun đất và phương pháp ủ thông thường, kết quả cho thấy sau 6 ngày ủ hiếu khí cùng với giun đất làm *E.coli* giảm 6,4log còn mô hình ủ thông thường Ecoli chỉ giảm 1,6log [27].

Việc ủ phân bằng kỹ thuật vermi composting (ủ cùng với giun đất) là giải pháp thay thế cho việc ủ thông thường và đã được chứng minh bằng việc chất thải sau ủ có đặc tính tốt hơn so với ủ thông thường và chất dinh dưỡng không bị tiêu hao trong quá trình ủ và có tác dụng cải tạo đất tốt. Ủ hiếu khí phân bùn với giun đất, kết quả cho thấy VS của vật liệu ủ giảm từ 85% xuống 65% – 73%, vật liệu sau ủ vẫn chứa lượng lớn chất mùn hữu cơ. Thí nghiệm ủ phân bùn bề tự hoại cùng với giun đất cho thấy, có sự suy giảm lượng trứng giun sau 60 ngày ủ phân bùn bề tự hoại với giun đất, mật độ *E.coli*, trứng giun và *Salmonella* đáp ứng quy chuẩn theo hướng dẫn của WHO [28]. Đối với những nơi có điều kiện nhiệt độ thấp thì việc áp dụng kỹ thuật này sẽ hạn chế do giun đất không sống được, tuy nhiên nếu áp dụng ở những nước nhiệt đới thì đây là một kỹ thuật có tiềm năng để xử lý phân bùn.

Ruồi lính đen (Black Soldier) là loại ruồi có nguồn gốc ở Mỹ, nhưng thường thấy ở nơi có khí hậu ôn đới ẩm áp. Ấu trùng ruồi ăn các chất hữu cơ đang trong quá trình phân rã như rau, củ quả hoặc phân chuồng [18]. Ấu trùng ruồi lính đen phát triển tốt trong môi trường chỉ có phân bùn, ngoài ra nếu trộn phân bùn với rác thải sinh hoạt tốc độ tiêu thụ của ấu trùng ruồi còn cao hơn rất nhiều. Kỹ thuật xử lý rác thải hữu cơ và phân bùn bằng ấu trùng ruồi lính đen đã được nghiên cứu ở quy mô phòng thí nghiệm. Tuy nhiên, những thông tin kinh nghiệm ở các nước có thu nhập thấp và trung bình còn hạn chế [18].

- Ôxy hoá bậc cao:

Kali ferat là một hợp chất ôxy hoá thân thiện với môi trường, cùng với việc ôxy hoá chất hữu cơ trong chất thải, hợp chất này còn có khả năng tiêu diệt vi sinh vật trong môi trường chất lỏng [29]. Trong thí nghiệm sử dụng kali ferat để tiền xử lý phân bò cho thấy độ pH trong hỗn hợp nhanh chóng tăng lên xấp xỉ 10 sau 5 phút, đó cũng là một tác nhân tích cực giúp làm giảm lượng vi sinh vật gây bệnh trong đồng ủ [30].

4. Đánh giá tiềm năng của các phương pháp xử lý phân bùn

Tổng quan tài liệu cho thấy phương pháp ủ hiếu khí và kỵ khí có nhiều ưu điểm như, vật liệu sau ủ có độ mùn cao thích hợp cho việc cải tạo đất, độ ẩm thấp dễ dàng vận chuyển, an toàn về mặt vệ sinh, quá trình xử lý tốn ít năng lượng và yêu cầu trình độ vận hành trung bình. Tổng hợp những ưu nhược điểm của các phương pháp xử lý chất thải nhà tiêu được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Tổng hợp đặc điểm các phương pháp xử lý chất thải nhà tiêu [30]

Điều kiện vận hành	Ủ hiếu khí	Ủ kỵ khí	Lên men kỵ khí	Đốt – làm khô
Khả năng tái sử dụng	Bón cây	Bón cây	Bón cây	Không
Nhiệt độ đạt được	50 - 70 °C	50 - 70 °C	Không sinh nhiệt	800–900 °C
Thời gian tiêu diệt 90% mầm bệnh	1 tháng	6 tháng		1,8 – 3,1 ngày
Khả năng bảo tồn Nito	Ít – nhiều	Ít – nhiều	Ít – trung bình	Không
Vận hành	Dễ đến khó	Dễ đến khó	Khó	Khó
Năng lượng tiêu hao	Không	Không	Trung bình	Nhiều
Mùi	Nhiều	Nhiều	Ít	Nhiều

Điều kiện vận hành	Ủ hiếu khí	Ủ kỵ khí	Lên men kỵ khí	Đốt – làm khô
Phân bùn sau xử lý				
Độ ẩm	40 - 50%	40 - 50%	88 - 92%	
Hàm lượng mùn	Nhiều	Nhiều	Ít	Không
Tiêu diệt mầm bệnh	Tốt	Khá	Trung bình	Tốt
Vận chuyển	Dễ dàng	Dễ dàng	Khó	Dễ dàng
Yêu cầu xử lý tiếp tục	Không	Không	Có	Không
Lưu trữ	Dễ dàng	Dễ dàng	Khó	Dễ dàng

Các tác nhân gây bất lợi cho quá trình hoạt động của vi sinh vật như nhiệt độ, độ ẩm, độ pH, thời gian tồn lưu trong môi trường, ..., hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh trong chất thải từ một số nghiên cứu được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh trong phân bùn/chất thải nhà tiêu theo một số giải pháp xử lý tăng cường [15, 16, 19–22, 24, 25, 27, 31–38]

Hướng giải pháp	Hiệu quả tiêu diệt		Thời gian xử lý
	<i>E.coli</i>	Trứng giun	
Sấy bằng nhiệt			
Sấy trực tiếp, T = 95 °C - 100 °C	-	< 1 trứng	5 phút
Sấy gián tiếp	-	< 1 trứng	45 phút
Sấy bằng năng lượng mặt trời	0-1 log	-	18 ngày
Ủ với tro và đất bột	-	2 log	169 ngày
Ủ với tro	-	100%	291 ngày
Ủ với tro và vôi	-	2 log	105-117 ngày
Ủ với tro, pH = 8,6	4 log	-	26 ngày
Ủ với tro, pH = 10,5	4 log	-	2,1 ngày
Hào lưu giữ bùn	-	3 log	33 tháng
Bổ sung phế thải hữu cơ	5 log	-	1 tuần
Bổ sung mùn cưa	-	100%	3 tháng
Bổ sung rác chợ	-	1,5 – 2 log	3 tháng
Bổ sung vôi, pH = 12	-	100%	2,5 tháng
Bổ sung vôi, pH = 12	4 log	-	1-2 giờ
Bổ sung vôi vào bùn lỏng và ủ, pH = 12,5	-	< 1 trứng	14 ngày
Bổ sung vôi và amoniac	5–6 log	94%	-
Bổ sung amoniac, 44 – 170 mg/l	-	99,9%	1,5–6 tháng
Bổ sung vỏ sò nghiền (150%), tro, urê (0,5%)	7 log	92% – 99%	83–183 ngày
Bổ sung Kali ferrat (K ₂ FeO ₄)	3,5 log		40 phút
Bổ sung sulfate radical	3,5 log		180 phút
Phân bùn + vôi + T 50 °C - 60 °C	-	< 1 trứng	8–128 phút
Ủ hiếu khí + đảo trộn		100%	36 ngày
Phân lợn + rơm + amoniac	3 log	-	0,5 tháng
Phân bùn + vôi pH = 12,7, 45 °C, độ ẩm 80%	-	< 1 trứng	2 tháng
Phân bùn + vôi pH = 12,7 + T 70 °C – 80 °C, độ ẩm 80%	-	< 1 trứng	2 giờ
Ủ hiếu khí phân người + nước tiểu + vôi	3 log	-	1 ngày
Ủ hiếu khí phân người + vôi	-	< 1 trứng	111 ngày
Ủ hiếu khí phân người + nước tiểu + vôi	9,3 log	-	10,6 giờ
	-	2 log	2 tuần
Ủ hiếu khí với giun đất	6,4 log		6 ngày
Ủ hiếu khí với giun đất	< 10 ³	< 1 trứng	2 tháng
Ủ hiếu khí bùn kỵ khí + phân bò + vỏ cà phê	6 log		50 ngày

Chú thích: (-) không có thông tin.

Phương pháp sấy và đốt bùn có ưu điểm là giảm được thể tích của bùn cặn và tiêu diệt được vi sinh vật gây bệnh. Tuy nhiên nhược điểm lớn là phát thải ra khí ô nhiễm, công nhân vận hành và bảo trì đòi hỏi có tay nghề cao, chi phí đầu tư và chi phí vận hành lớn, sản phẩm sau đốt (tro) cần có hình thức quản lý phù hợp.

Ủ hiếu khí (co-composting) hoặc vermi-composting với chất thải hữu cơ sẽ tạo điều kiện tốt cho quá tiêu diệt mầm bệnh (*E.coli*) trong chất thải nhà tiêu, tuy nhiên hiệu quả tiêu diệt đối với trứng giun vẫn còn hạn chế. Công nghệ này đòi hỏi kỹ thuật vận hành và chất thải nhà tiêu cần phải được ủ bên ngoài nhà tiêu.

Các yếu tố khác như độ ẩm, độ pH và nồng độ oxy cũng là các tác nhân ảnh hưởng tới khả năng sống và hoạt động của vi sinh vật. Giải pháp nâng pH bằng cách bổ sung vôi, amoniac hoặc các chất có độ oxy hoá cao là giải pháp tiềm năng, có tính khả thi cao để tăng cường hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh trong chất thải. Để tạo môi trường tốt cho việc phân huỷ chất hữu cơ, phân thải sau khi nâng pH cần được bổ sung chất độn phù hợp giúp cân bằng pH.

Ủ kỵ khí với chất độn bổ sung là tro hoặc đất bột có hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh hạn chế, thời gian ủ dài, dễ rút ngắn thời gian ủ cần phải sử dụng lượng tro lớn, hồ tiêu nhanh chóng bị đầy hoặc cần phải được thiết kế với kích thước lớn.

Biện pháp ủ hiếu khí (co-composting) được áp dụng khá phổ biến ở khu vực nông thôn đồng bằng Bắc bộ tại các hộ gia đình có nhu cầu tái sử dụng chất thải người và vật nuôi cho mục đích nông nghiệp, bên cạnh đó trong quá trình sử dụng nhà tiêu khô (dry-toilet) hộ gia đình đã bổ sung vôi và tro để giảm thiểu tác động của mầm bệnh và tránh côn trùng tiếp xúc trực tiếp với chất thải khiến mầm bệnh có thể lan truyền ra môi trường xung quanh.

5. Kết luận

Mặc dù phân chứa ít chất dinh dưỡng, nhưng mùn được sản xuất từ phân chứa nồng độ photpho và kali cao. Sau khi tiêu diệt mầm bệnh, phân có thể được sử dụng cho đất để tăng hàm lượng chất hữu cơ và cải thiện khả năng giữ nước của đất trồng.

Tiền xử lý bằng vôi là một hướng giải pháp tiềm năng khiến cho hiệu quả tiêu diệt mầm bệnh cao với thời gian ngắn. Trong quá trình xử lý ổn định phân bùn bằng vôi/amoniac có thể xảy ra sự phát triển trở lại của mầm bệnh. Cần đòi hỏi người vận hành sử dụng phải được đào tạo đồng thời đảm bảo tuân thủ các quy trình về sức khỏe và an toàn vệ sinh. Việc xử lý bằng amoniac có thể đặc biệt dễ dàng áp dụng cho khu vực có nhà tiêu khô tách nước tiểu (UDDTs). Nếu sử dụng amoniac dạng hoá chất, chi phí cho việc xử lý cao, hạn chế tính khả thi về kinh tế và tính bền vững của công nghệ. Nồng độ nitơ trong sản phẩm cuối cùng có thể không duy trì như ban đầu vì trong quá trình xử lý nitơ bị hao hụt. Ủ hiếu khí chất thải nhà tiêu với giun đất cũng là biện pháp khả thi, tuy nhiên do tập quán và hướng dẫn sử dụng nhà tiêu khô hợp vệ sinh, người sử dụng thường bổ sung tro pH của chất thải cao, có thể ảnh hưởng tới hoạt động của giun.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về cơ sở vật chất của bộ môn Cấp thoát nước, khoa Kỹ thuật Môi trường, trường Đại học Xây dựng Hà Nội, chân thành cảm ơn Viện Sốt rét và Ký sinh trùng – Côn trùng Trung ương, Trung tâm y tế tỉnh Hà Nam đã tạo điều kiện hỗ trợ nhóm đề tài thực hiện nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ferguson, D. T. (2014). [Nightsoil and the ‘Great Divergence’: human waste, the urban economy, and economic productivity, 1500–1900. *Journal of Global History*, 9\(3\):379–402.](#)

- [2] WHO (2006). *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater*. Volume IV, France, 60-69.
- [3] Dalsgard, A. (2001). *Health Aspects of the Reuse of Wastewater in Agriculture and Demographic and Health Surveys (DHS) reports 2006 - 2009*.
- [4] Dũng, Đ. T., Tinh, N. L., Dương, T. T., Thiều, N. Q., Monaghan, P. (2018). Thực trạng nhiễm giun truyền qua đất ở học sinh tiểu học tại 21 tỉnh thành phố của Việt Nam năm 2016. *Tạp chí phòng chống bệnh sốt rét và các bệnh ký sinh trùng*, 5(107):9.
- [5] LSHTM (2012). *Cross-sectional study results, Project on New Concepts in On-Site Sanitation*. Extending the life of the Pit, London School of Hygiene & Tropical Medicine, London, UK.
- [6] Rose, C., Parker, A., Jefferson, B., Cartmell, E. (2015). [The Characterization of Feces and Urine: A Review of the Literature to Inform Advanced Treatment Technology](#). *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(17):1827–1879.
- [7] Jonsson, H., Baky, A., Jeppsson, U. (2005). *Composition of urine, faeces, greywater and biowaste for utilisation in the URWARE model*. Chalmers University of Technology, Sweden.
- [8] Schouw, N. L., Danteravanich, S., Mosbaek, H., Tjell, J. C. (2002). [Composition of human excreta — a case study from Southern Thailand](#). *Science of The Total Environment*, 286(1–3):155–166.
- [9] Vinnerås, B., Jönsson, H. (2002). [Faecal separation for nutrient management—evaluation of different separation techniques](#). *Urban Water*, 4(4):321–329.
- [10] Anh, Đ. H., Anh, N. V., Hằng, Đ. T. (2014). Đánh giá khả năng phân huỷ chất thải và tiêu diệt mầm bệnh theo thời gian trong nhà tiêu khô một ngăn. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 20:66–74.
- [11] Butkovskiy, A., Leal, L. H., Zeeman, G., Rijnaarts, H. H. M. (2017). [Micropollutants in source separated wastewater streams and recovered resources of source separated sanitation](#). *Environmental Research*, 156: 434–442.
- [12] Feachem, R. G., Bradley, D. J., Garelick, H., Mara, D. D. (1983). *Sanitation and disease: health aspects of excreta and wastewater management*. The World Bank, New York, Washington, D.C.
- [13] World Health Organization (1989). *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture: report of a WHO scientific group*, World Health Organization. WHO Publications Center USA [distributor], Geneva : Albany, NY.
- [14] Polprasert, C. (2007). *Organic waste recycling: technology and management*. IWA Publ, London.
- [15] Huyền, N. T. (2010). *Nghiên cứu giải pháp nâng cao hiệu quả quản lý phân bón bề mặt tự hoại cho các đô thị Việt Nam - nghiên cứu điển hình cho Hà Nội*. Luận văn Tiến sĩ, Đại học Xây dựng, Hà Nội.
- [16] Chien, B. T., Phi, D. T., Chung, B. C., Stenström, T. A., Carlander, A., Westrell, T., Winblad, U. (2001). Biological study on retention time of microorganisms in faecal material in urine-diverting eco-san latrines in Vietnam. *1st International Conference on Ecological Sanitation, Nanning, People's Republic of China, internet dialogue on ecological sanitation*, www.ias.unu.edu/proceedings/icibs/ecosan/bui.html.
- [17] Still, D., Louton, B., Bakare, B., Taylor, C., Foxon, K. M., Lorentz, S. A. (2012). *Investigating the Potential of Deep Row Entrenchment of Pit Latrine and Waste Water Sludges for Forestry and Land Rehabilitation Purposes: Report to the Water Research Commission*. Water Research Commission.
- [18] Arthur, R., Brew-Hammond, A. (2010). Potential biogas production from sewage sludge: A case study of the sewage treatment plant at Kwame Nkrumah university of science and technology, Ghana. *International Journal of Energy & Environment*, (6).
- [19] Jost, L. (2015). *Influence of Temperature, VFA and pH on the inactivation of pathogens in anaerobic digestion of faecal sludge*. Master of Science, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Switzerland.
- [20] Shanahan, E. F., Roiko, A., Tindale, N. W., Thomas, M. P., Walpole, R., Kurtböke, D. I. (2010). [Evaluation of Pathogen Removal in a Solar Sludge Drying Facility Using Microbial Indicators](#). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(2):565–582.
- [21] Ogunyoku, T. A., Habebo, F., Nelson, K. L. (2015). [In-toilet disinfection of fresh fecal sludge with ammonia naturally present in excreta](#). *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 6(1): 104–114.
- [22] Vu-Van, T., Pham-Duc, P., Winkler, M. S., Zurbrugg, C., Zinsstag, J., Le Thi Thanh, H., Bich, T. H.,

- Nguyen-Viet, H. (2016). *Ascaris lumbricoides* egg die-off in an experimental excreta storage system and public health implication in Vietnam. *International Journal of Public Health*, 62(S1):103–111.
- [23] Maya, C., Torner-Morales, F. J., Lucario, E. S., Hernández, E., Jiménez, B. (2012). Viability of six species of larval and non-larval helminth eggs for different conditions of temperature, pH and dryness. *Water Research*, 46(15):4770–4782.
- [24] Magri, M. E., Philippi, L. S., Vinnerås, B. (2013). Inactivation of Pathogens in Feces by Desiccation and Urea Treatment for Application in Urine-Diverting Dry Toilets. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(7):2156–2163.
- [25] Fidjeland, J., Magri, M. E., Jönsson, H., Albiñ, A., Vinnerås, B. (2013). The potential for self-sanitisation of faecal sludge by intrinsic ammonia. *Water Research*, 47(16):6014–6023.
- [26] Son, T. T. D. (2011). *Hygiene aspect of manure management and antimicrobial resistance in intergrated pig-fish farms in Vietnam*. Doctoral Thesis, University of Copenhagen, Denmark.
- [27] Eastman, B. R., Kane, P. N., Edwards, C. A., Trytek, L., Gunadi, B., Stermer, A. L., Mobley, J. R. (2001). The Effectiveness of Vermiculture in Human Pathogen Reduction for USEPA Biosolids Stabilization. *Compost Science & Utilization*, 9(1):38–49.
- [28] Rodríguez-Canché, L. G., Cardoso Vigueros, L., Maldonado-Montiel, T., Martínez-Sanmiguel, M. (2010). Pathogen reduction in septic tank sludge through vermicomposting using *Eisenia fetida*. *Bioresource Technology*, 101(10):3548–3553.
- [29] Huang, Z.-S., Wang, L., Liu, Y.-L., Jiang, J., Xue, M., Xu, C.-B., Zhen, Y.-F., Wang, Y.-C., Ma, J. (2018). Impact of Phosphate on Ferrate Oxidation of Organic Compounds: An Underestimated Oxidant. *Environmental Science & Technology*, 52(23):13897–13907.
- [30] Wang, J., Cui, H., Xie, G., Liu, B., Cao, G., Xing, D. (2020). Co-treatment of potassium ferrate and peroxymonosulfate enhances the decomposition of the cotton straw and cow manure mixture. *Science of The Total Environment*, 724:138321.
- [31] Strande, L., Ronteltap, M., Brdjanovic, D. (2014). *Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation*. IWA Publishing.
- [32] Harada, H., Matsui, S., Phi, D. T., Shimizu, Y., Matsuda, T., Utsumi, H. (2006). Keys for successful introduction of ecosan toilets: experiences from an ecosan project in Vietnam. *Proceeding of the 7th Specialised Conference on Small Water and Wastewater Systems*, International Water Association London.
- [33] Jensen, P. K. M., Phuc, P. D., Konradsen, F., Klank, L. T., Dalsgaard, A. (2009). Survival of *Ascaris* eggs and hygienic quality of human excreta in Vietnamese composting latrines. *Environmental Health*, 8(1).
- [34] Harada H., Kimoto Y., F. S. (2012). Evaluation of inactivation process of pathogenic microorganisms in dry toilet. *Journal of Science and Technology, Special Issue for IFGTM 2012*, 50:145–150.
- [35] Cui, H., Wang, J., Cai, X., Li, Z., Liu, B., Xing, D. (2020). Accelerating nutrient release and pathogen inactivation from human waste by different pretreatment methods. *Science of The Total Environment*, 733: 139105.
- [36] Wordofa, D. N., Walker, S. L., Liu, H. (2017). Sulfate Radical-Induced Disinfection of Pathogenic *Escherichia coli* O157:H7 via Iron-Activated Persulfate. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(4): 154–160.
- [37] Ogunyoku, T. A., Nelson, K. L. Safe sludge: The disinfection of latrine faecal sludge with ammonia naturally present in excreta - SuSanA. *Future Work*, 23.
- [38] Banda, B., Habtu, N. G., Gebreyessus, G. D., Meshesha, B. T. (2023). Vermicomposting as an effective approach to municipal sewage sludge management through optimization of the selected process variables. *Water Science & Technology*, 88(8):1957–1973.