

APPLICATION OF REED (*Phragmites australis*) IN TREATING HEAVY METAL CONTAMINATED SOIL IN TU LE LEAD-ZINC MINE, TU LE COMMUNE, LAO CAI PROVINCE, VIETNAM

Tran Thi Pha, Dam Xuan Van*

TNU - University of Agriculture and Forestry

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 08/6/2025 Revised: 14/11/2025 Published: 18/11/2025	This study assessed the effectiveness of reed (<i>Phragmites australis</i>) in treatment of soil contaminated with heavy metals at the Tu Le lead-zinc mine waste dump, Tu Le commune, Lao Cai province. The field experiment was carried out for eight months with randomized block design to monitor the growth, heavy metals accumulation and effectiveness of the reed treatment against pollution. The results showed that reed had the ability to grow stably on heavily contaminated soil at 145.33 cm in height and at 57.43 cm in root length. Analysis of plant samples showed that the plant accumulated heavy metals predominantly in the roots, particularly in the case of Pb, Cd and As. After 8 months, the heavy metal treatment efficiency in the soil reached high levels: Zn (66.5%), Pb (73.95%), Cd (66.71%) and As (73.43%). In addition, there is a positive correlation between the concentration of heavy metals in the soil and the accumulation in the plant (R^2 reaches 0.81 - 0.95 in the roots and R^2 reaches 0.55 - 0.76 in the stems and leaves). The results show that reed is a potential plant species in the treatment of heavy metals contaminated soil in mining areas, which can be applied in sustainable soil improvement and environmental restoration programs in the mountainous areas of Northern Vietnam.
KEYWORDS Phytoremediation Heavy metals <i>Phragmites australis</i> Contaminated soil Tu Le	

ỨNG DỤNG CÂY Sậy (*Phragmites australis*) TRONG XỬ LÝ ĐẤT Ô NHIỄM KIM LOẠI NẶNG TẠI VÙNG MỎ CHÌ – KẼM TÚ LỆ, XÃ TÚ LỆ, TỈNH LÀO CAI, VIỆT NAM

Trần Thị Phả, Đàm Xuân Vận*

Trường Đại học Nông Lâm – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 08/6/2025 Ngày hoàn thiện: 14/11/2025 Ngày đăng: 18/11/2025	Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả của cây sậy (<i>Phragmites australis</i>) trong xử lý đất ô nhiễm kim loại nặng tại khu vực bãi thải mỏ chì – kẽm Tú Lệ, xã Tú Lệ, tỉnh Lào Cai. Thí nghiệm đồng ruộng được triển khai trong 8 tháng với thiết kế khối ngẫu nhiên, nhằm theo dõi khả năng sinh trưởng, tích lũy kim loại nặng và hiệu quả xử lý ô nhiễm của cây sậy. Kết quả cho thấy cây sậy có khả năng sinh trưởng ổn định trên nền đất bị ô nhiễm nặng, với chiều cao đạt 145,33 cm và chiều dài rễ 57,43 cm. Phân tích mẫu thực vật cho thấy cây tích lũy kim loại nặng chủ yếu tại rễ, đặc biệt đối với Pb, Cd và As. Sau 8 tháng, hiệu suất xử lý kim loại nặng trong đất đạt mức cao: Zn (66,5%), Pb (73,95%), Cd (66,71%) và As (73,43%). Ngoài ra, tồn tại mối tương quan thuận giữa nồng độ kim loại nặng trong đất và hàm lượng tích lũy trong cây (R^2 đạt 0,81 – 0,95 ở rễ và R^2 đạt 0,55 – 0,76 ở thân, lá). Kết quả cho thấy cây sậy là loài thực vật tiềm năng trong xử lý đất ô nhiễm kim loại nặng tại các khu vực mỏ, có thể ứng dụng vào các chương trình cải tạo đất và phục hồi môi trường bền vững tại vùng núi phía Bắc Việt Nam.
TỪ KHÓA Phytoremediation Kim loại nặng <i>Phragmites australis</i> Đất ô nhiễm Tú Lệ	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13010>

* Corresponding author. Email: damxuanvan@tuaf.edu.vn

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, ô nhiễm môi trường do hoạt động khai thác khoáng sản đang trở thành một thách thức nghiêm trọng tại nhiều khu vực ở Việt Nam. Đặc biệt, các khu mỏ khai thác chì (Pb) và kẽm (Zn) để lại hậu quả nặng nề, nổi bật là tình trạng ô nhiễm đất với nồng độ kim loại nặng (KLN) vượt ngưỡng cho phép. Theo QCVN 03:2023/BTNMT, khi hàm lượng các kim loại như Pb, Zn, Cd và As vượt quy chuẩn, sẽ gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng đất, cây trồng và sức khỏe con người [1].

Trước thực trạng này, việc tìm kiếm các biện pháp xử lý đất ô nhiễm theo hướng thân thiện với môi trường đang được ưu tiên hàng đầu. Trong đó, phương pháp phytoremediation (sinh học thực vật xử lý ô nhiễm) được xem là một giải pháp hiệu quả, chi phí thấp và phù hợp với điều kiện sinh thái tại Việt Nam [2], [3]. Cây sậy (*Phragmites australis*) là loài thực vật đã được nghiên cứu và ứng dụng phổ biến trong xử lý ô nhiễm nhờ khả năng hấp thụ, tích lũy KLN tốt, đồng thời thích nghi cao với môi trường đất nghèo dinh dưỡng và ô nhiễm [4] - [7]. Nhiều nghiên cứu quốc tế đã ghi nhận hiệu quả của *P. australis* trong xử lý KLN như Pb, Zn, Cd tại các khu vực đất bị ô nhiễm nghiêm trọng [8], [9].

Tại Việt Nam, đã có một số nghiên cứu sử dụng cây sậy trong xử lý đất ô nhiễm KLN, trong đó đã ứng dụng cây sậy để xử lý đất ô nhiễm sau khai thác khoáng sản tại tỉnh Thái Nguyên, cho thấy hiệu quả tích lũy và giảm thiểu nồng độ KLN đáng kể [7]. Tuy nhiên, vẫn còn thiếu các nghiên cứu thực nghiệm ứng dụng cụ thể tại những khu vực khai thác khoáng sản đặc thù như Tú Lệ – nơi có địa hình đồi núi, lượng mưa lớn và cấu trúc đất bị biến đổi mạnh sau khai thác [10]. Việc đánh giá hiệu quả xử lý ô nhiễm đất bằng cây sậy tại khu vực này có ý nghĩa khoa học và thực tiễn quan trọng trong phục hồi môi trường đất sau khai thác khoáng sản.

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá khả năng sinh trưởng và hiệu quả tích lũy KLN (Pb, Zn, Cd, As) của cây sậy (*Phragmites australis*) trong điều kiện đất bị ô nhiễm bởi hoạt động khai thác khoáng sản tại khu mỏ chì – kẽm Tú Lệ, xã Tú Lệ, tỉnh Lào Cai. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp cơ sở khoa học để đề xuất mô hình xử lý đất ô nhiễm bằng thực vật phù hợp với điều kiện sinh thái miền núi phía Bắc Việt Nam.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là cây sậy (*Phragmites australis*); các KLN được nghiên cứu bao gồm Pb, Zn, As và Cd được xác định trong đất và các bộ phận thân, rễ và lá cây sậy.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp bố trí thí nghiệm

Thí nghiệm đồng ruộng được bố trí theo kiểu khối ngẫu nhiên tại khu bãi thải rộng khoảng 9 m² thuộc mỏ khai thác chì – kẽm Tú Lệ. Gồm 3 ô thí nghiệm và mỗi ô được lặp lại 3 lần.

Cây sậy sử dụng trong thí nghiệm được chọn đồng đều về sinh trưởng, cắt ngắn thân còn khoảng 20 cm và rễ dài 7–8 cm. Sau khi trồng, thực hiện các biện pháp chăm sóc: dặm cây, tưới nước, làm cỏ định kỳ 10 ngày/ lần.

Đặc điểm thời tiết khí hậu

Nhiệt độ trung bình trong quá trình thực hiện thí nghiệm tại xã Tú Lệ, tỉnh Lào Cai: khoảng 21–29 °C, cao nhất vào tháng 6–7 (~34 °C), thấp nhất tháng 1 (~14 °C). Lượng mưa tăng dần, từ khoảng 10 mm (tháng 1–2) lên đến 216 mm (tháng 8). Tổng lượng mưa 8 tháng khoảng 812 mm.

Chỉ tiêu theo dõi

- Khả năng sinh trưởng:

+ Chiều cao cây: đo từ gốc đến lá cao nhất, 1 tháng/lần (trung bình 5 cây/ô).

+ Chiều dài lá: đo từ bẹ lá đến mỏ lá, lấy trung bình của các lần nhắc lại.

- Khả năng tích lũy KLN: phân tích hàm lượng Pb, Zn, Cd, As trong rễ, thân và lá.

- Hiệu quả xử lý KLN: đánh giá thông qua phân tích hàm lượng KLN còn lại trong đất sau trồng cây.

Phương pháp lấy mẫu và xử lý mẫu

- Mẫu cây: Sấy khô ở 60–70 °C, nghiền nhỏ, bảo quản trong bình hút ẩm.

- Mẫu đất: Loại bỏ tạp chất, phơi khô tự nhiên, nghiền mịn qua rây 1 mm.

Phương pháp phân tích trong phòng thí nghiệm

- pH đất đo bằng máy pH meter.

- Kim loại nặng (Pb, Zn, Cd...) trong mẫu đất và cây được xác định theo phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử (AAS) sử dụng thiết bị Optizen 1412Vz (Korea). Mẫu được xử lý theo quy trình phân hủy axit dựa trên chuẩn EPA 3050B (đối với đất) và EPA 3051A (đối với cây). Phân tích AAS tuân theo hướng dẫn trong EPA 7000B với bước sóng đặc trưng cho từng nguyên tố.

Phương pháp phân tích xử lý số liệu

Dữ liệu được tổng hợp và phân tích các chỉ tiêu thống kê (giá trị trung bình, tỷ lệ phần trăm, độ lệch chuẩn) bằng phần mềm Microsoft Excel.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Đánh giá chất lượng đất trước khi trồng sậy

Bãi thải tại khu mỏ chì – kẽm Tú Lệ là nơi tích tụ chất thải từ hoạt động khai thác và chế biến khoáng sản, dẫn đến ô nhiễm nghiêm trọng. Nguyên nhân chính bao gồm hoạt động khai thác mỏ, trong đó quá trình chế biến quặng chì – kẽm thải ra các chất chứa kim loại nặng như Zn, Pb, Cd và As. Nếu không được xử lý đúng cách, các chất thải này thấm vào đất, gây ô nhiễm nghiêm trọng. Môi trường đất axit với pH 5,4 làm tăng khả năng hòa tan và di động của kim loại nặng, khiến chúng dễ dàng xâm nhập vào đất, nước ngầm và chuỗi thức ăn. Bên cạnh đó, việc quản lý chất thải yếu kém, khi bãi thải không được thiết kế hoặc vận hành theo tiêu chuẩn môi trường, khiến kim loại nặng phát tán qua nước mưa, gió hoặc dòng chảy bề mặt, làm trầm trọng thêm tình trạng ô nhiễm.

Mức độ ô nhiễm kim loại nặng tại khu vực này gây ra nhiều hệ quả nghiêm trọng. Đối với đất và nông nghiệp, đất bị axit hóa và ô nhiễm làm giảm độ phì nhiêu, ảnh hưởng đến vi sinh vật đất cũng như khả năng giữ nước và dinh dưỡng, khiến đất không thể sử dụng cho trồng trọt hoặc chăn nuôi do nguy cơ cây trồng hấp thụ kim loại nặng, dẫn đến tích lũy sinh học. Về hệ sinh thái, các kim loại nặng như Cd và As có độc tính cao, gây chết hoặc suy giảm sự phát triển của thực vật, động vật và vi sinh vật, đồng thời ô nhiễm có thể lan rộng qua nước ngầm hoặc dòng chảy, ảnh hưởng đến các hệ sinh thái lân cận. Đối với sức khỏe con người, Cd và As là các chất gây ung thư, có thể xâm nhập qua thực phẩm, nước uống hoặc bụi đất, trong khi Pb và Zn tích lũy lâu dài gây tổn thương thần kinh, suy giảm chức năng thận và ảnh hưởng đến sự phát triển của trẻ em. Về kinh tế và xã hội, ô nhiễm đất làm giảm giá trị sử dụng đất, ảnh hưởng đến sinh kế của người dân phụ thuộc vào nông nghiệp, đồng thời chi phí phục hồi môi trường đòi hỏi nguồn lực tài chính và công nghệ cao, tạo ra thách thức lớn cho khu vực.

Bảng 1. pH và hàm lượng KLN trong đất trước khi trồng cây

Chỉ tiêu	Kết quả	QCVN: 03:2023/BTNMT
pH	5,40	-
Zn (mg/kg)	1540,80	300
Pb (mg/kg)	281,24	200
Cd (mg/kg)	21,18	4
As (mg/kg)	246,31	25

Kết quả phân tích tại Bảng 1 cho thấy đất tại bãi thải khu mỏ chì – kẽm Tú Lệ có pH = 5,4 là môi trường axit và chứa hàm lượng kim loại nặng vượt xa giới hạn cho phép theo QCVN: 03:2023/BTNMT. Cụ thể, hàm lượng Zn, Pb, Cd và As lần lượt cao hơn tiêu chuẩn 5,14; 1,41; 5,29 và 9,85 lần. Mức độ ô nhiễm này không chỉ ảnh hưởng đến chất lượng đất mà còn gây ra

những rủi ro lớn đối với hệ sinh thái, sức khỏe con người, và khả năng sử dụng đất cho nông nghiệp hoặc các mục đích khác.

3.2. Khả năng sinh trưởng của cây sậy trên đất ô nhiễm KLN

Kết quả theo dõi sau 8 tháng trồng cây sậy (*Phragmites australis*) trong môi trường đất ô nhiễm kim loại nặng tại bãi thải khu mỏ chì – kẽm Tú Lệ cho thấy loài cây này có khả năng thích nghi cao với điều kiện bất lợi. Cụ thể, cây đạt chiều cao trung bình 145,33 cm, chiều dài lá 41,17 cm và chiều dài rễ 57,43 cm (Bảng 2), mặc dù tốc độ sinh trưởng chậm hơn so với điều kiện lý tưởng do đất nghèo dinh dưỡng, pH axit (5,4) và hàm lượng kim loại nặng (Zn, Pb, Cd, As) vượt xa giới hạn cho phép theo QCVN 03:2023/BTNMT. Sự phát triển ổn định của cây sậy, với hệ rễ sâu và rộng, cho thấy khả năng hấp thụ nước, chất dinh dưỡng và cố định kim loại nặng tại vùng rễ. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu tại Thái Nguyên [7], khẳng định tiềm năng của cây sậy trong công nghệ xử lý ô nhiễm bằng thực vật nhờ cơ chế tích lũy kim loại và chịu đựng môi trường axit. Tuy nhiên, hiệu quả xử lý Cd và As cần nghiên cứu thêm do độc tính cao của các kim loại này. Việc kết hợp cây sậy với các biện pháp cải tạo đất hoặc vi sinh vật cộng sinh có thể tăng cường hiệu quả phục hồi, trong khi sinh khối cây sau thu hoạch cần được xử lý an toàn để tránh tái phát tán kim loại. Kết quả nghiên cứu này mở ra triển vọng ứng dụng cây sậy trong phục hồi đất ô nhiễm tại các khu vực khai thác mỏ, góp phần cải thiện chất lượng đất và bảo vệ môi trường.

Bảng 2. Kết quả theo dõi khả năng sinh trưởng của cây sậy trong môi trường đất ô nhiễm KLN

(Đơn vị tính: cm)

Chỉ tiêu	Ban đầu	Chỉ tiêu sinh trưởng cây sậy sau trồng							
		1 tháng	2 tháng	3 tháng	4 tháng	5 tháng	6 tháng	7 tháng	8 tháng
Chiều cao cây	20	23,97±1,60	34,37±0,87	52,1±1,18	71,17±1,60	98,1±1,73	120,3±1,08	131,77±1,44	145,33±1,82
Chiều dài lá	10±1,55	15,57±1,30	20,63±1,86	24,87±1,02	28,67±1,53	31,5±1,97	34,83±1,21	38,53±1,15	41,17±1,17
Chiều dài rễ	7,5±1,15	-	-	-	31,5±1,25	-	-	-	57,43±1,70

3.3. Khả năng tích lũy KLN của cây sậy

Bảng 3. Khả năng tích lũy KLN của cây sậy trên đất ô nhiễm

(Đơn vị: mg/kg)

Chỉ tiêu	Bộ phận cây	Ban đầu	Sau 4 tháng	Sau 8 tháng
Hàm lượng Zn	Thân + lá	25,45	49,32 ± 1,13	64,49 ± 1,04
	Rễ	16,24	23,91 ± 0,46	39,45 ± 0,95
Hàm lượng Pb	Thân + lá	0,09	3,89 ± 0,14	4,56 ± 0,28
	Rễ	0,43	9,30 ± 0,45	15,02 ± 0,60
Hàm lượng Cd	Thân + lá	0,06	2,65 ± 0,21	3,98 ± 0,14
	Rễ	0	3,67 ± 0,11	6,81 ± 0,54
Hàm lượng As	Thân + lá	0,68	2,91 ± 0,38	5,17 ± 0,29
	Rễ	5,72	9,06 ± 0,24	18,26 ± 1,02

Kết quả phân tích tại Bảng 3 cho thấy cây sậy (*Phragmites australis*) có khả năng tích lũy KLN chủ yếu tại rễ, với nồng độ Pb, Cd và As trong rễ cao hơn đáng kể so với thân và lá sau 8 tháng trồng trên đất ô nhiễm tại bãi thải khu mỏ chì – kẽm Tú Lệ. Cụ thể, nồng độ Pb trong rễ đạt 15,02 mg/kg, Cd đạt 6,81 mg/kg và As đạt 18,26 mg/kg, trong khi nồng độ các kim loại này ở thân và lá thấp hơn nhiều lần (Pb: 4,56 mg/kg; Cd: 3,98 mg/kg; As: 5,17 mg/kg). Điều này chứng minh cây sậy có cơ chế ưu tiên hấp thụ và cố định KLN tại rễ, hạn chế vận chuyển lên các bộ phận trên mặt đất, qua đó giảm thiểu nguy cơ phát tán kim loại vào môi trường hoặc chuỗi thức ăn. Cơ chế này phù hợp với nghiên cứu của Ali và cộng sự [2], Zhang và cộng sự [8], trong đó ghi nhận rễ cây sậy tiết ra các chất chelate và axit hữu cơ, hỗ trợ cố định KLN trong vùng rễ, giảm độc tính và hạn chế sự di chuyển của kim loại lên thân và lá. Khả năng tích lũy Zn cũng đáng chú ý, với nồng độ trong rễ đạt 39,45 mg/kg sau 8 tháng, dù thấp hơn so với Pb và As. Kết quả này khẳng định tiềm năng của cây sậy trong công nghệ xử lý ô nhiễm bằng thực vật, đặc biệt

là ở các khu vực đất ô nhiễm KLN như Tú Lệ. Tuy nhiên, để tối ưu hóa hiệu quả, cần nghiên cứu thêm về khả năng xử lý sinh khối rễ chứa KLN và kết hợp với các biện pháp cải tạo đất nhằm tăng cường hiệu suất tích lũy và đảm bảo an toàn môi trường.

3.4. Khả năng xử lý kim loại nặng trong đất của cây sậy

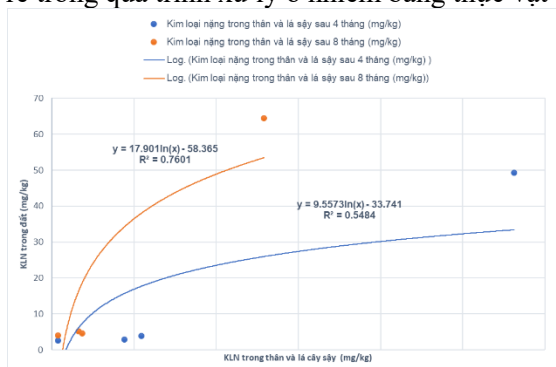
Kết quả phân tích sau 8 tháng trồng cây sậy (*Phragmites australis*) tại bãi thải khu mỏ chì – kẽm Tú Lệ cho thấy hàm lượng kim loại nặng (KLN) trong đất giảm đáng kể, với hiệu suất xử lý đạt Zn 66,5%, Pb 73,95%, Cd 66,71% và As 73,43% (Bảng 4). Cụ thể, hàm lượng Zn giảm từ 1540,80 mg/kg xuống 516,18 mg/kg, Pb từ 281,24 mg/kg xuống 73,25 mg/kg, Cd từ 21,18 mg/kg xuống 14,71 mg/kg và As từ 246,31 mg/kg xuống 65,43 mg/kg. So với nghiên cứu của Li và cộng sự [9], hiệu suất xử lý KLN tại Tú Lệ tương đương hoặc vượt trội, chứng tỏ cây sậy thích nghi tốt với điều kiện đất axit (pH 5,4) và khí hậu vùng núi có lượng mưa lớn. Kết quả này cũng phù hợp với nghiên cứu của Trần Thị Phả [7] tại Thái Nguyên, khẳng định khả năng tích lũy và loại bỏ KLN hiệu quả của cây sậy thông qua cơ chế xử lý ô nhiễm bằng thực vật. Sự giảm đáng kể hàm lượng KLN, đặc biệt là Pb và As, cho thấy tiềm năng của cây sậy trong việc cải thiện chất lượng đất ô nhiễm. Tuy nhiên, để đạt ngưỡng an toàn theo QCVN 03:2023/BTNMT, cần kéo dài thời gian xử lý hoặc kết hợp với các biện pháp cải tạo đất như bổ sung vôi hoặc vi sinh vật cộng sinh. Kết quả này nhấn mạnh vai trò của cây sậy như một giải pháp sinh học bền vững, có thể áp dụng rộng rãi tại các khu vực mỏ khai thác tương tự.

Bảng 4. Hàm lượng KLN còn lại trong đất sau khi trồng sậy tại vùng mỏ chì – kẽm Tú Lệ

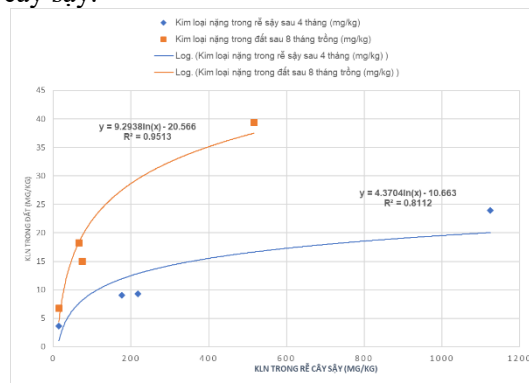
KLN	QCVN: 03:2023/BTNMT	Hàm lượng KLN trong đất trước khi trồng (mg/kg)	KLN trong đất sau khi trồng 4 tháng (mg/kg)	Hiệu suất xử lý (%)	KLN trong đất sau khi trồng 8 tháng (mg/kg)	Hiệu suất xử lý (%)
Zn	300	1540,80	1124,78	27,00	516,18	66,50
Pb	200	281,24	217,49	22,67	73,25	73,95
Cd	4	21,18	14,71	30,55	14,71	66,71
As	25	246,31	176,76	28,24	65,43	73,43

3.5. Mối tương quan giữa hàm lượng KLN trong đất và cây

Hình 1 cho thấy mối tương quan tuyến tính mạnh giữa KLN trong đất và trong rễ cây ($R^2 = 0,81 - 0,95$), trong khi ở thân + lá R^2 chỉ đạt 0,55 – 0,76. Điều này củng cố vai trò trung tâm của rễ trong quá trình xử lý ô nhiễm bằng thực vật của cây sậy.



a) Tương quan giữa hàm lượng KLN trong thân + lá cây sậy và trong đất



b) Tương quan giữa hàm lượng KLN trong rễ cây sậy và trong đất

Hình 1. Tương quan giữa hàm lượng KLN trong cây sậy và hàm lượng KLN trong đất

Đất tại khu vực nghiên cứu có pH = 5,4 – môi trường axit nhẹ, làm tăng tính di động của KLN, giúp cây hấp thụ dễ dàng hơn [5]. Đồng thời, lượng mưa cao tại Tú Lệ góp phần di chuyển KLN từ tầng mặt xuống vùng rễ. Ngoài ra, hệ vi sinh vật đất đặc trưng vùng đồi núi có thể tham gia hỗ trợ cây trong việc chuyển hóa hoặc cố định KLN thông qua tiết enzyme hoặc cộng sinh [11].

Kết quả nghiên cứu tại Tú Lệ có sự tương đồng về cơ chế tích lũy với nhiều nghiên cứu quốc tế như Ali và cộng sự [2], nhưng vượt trội về hiệu suất xử lý Cd và As so với nghiên cứu của Li và cộng sự [9]. Điểm mới của nghiên cứu là đã ứng dụng thành công cây sậy trong điều kiện đất bị phá vỡ cấu trúc mạnh sau khai thác, có độ dốc lớn, pH thấp và mưa nhiều. Từ đó khẳng định tính khả thi của mô hình xử lý ô nhiễm đất bằng cây sậy tại các vùng mỏ miền núi phía Bắc Việt Nam.

4. Kết luận và đề nghị

Nghiên cứu tại khu mỏ chì – kẽm Tú Lệ, xã Tú Lệ, tỉnh Lào Cai, đã đánh giá khả năng sinh trưởng và hiệu quả tích lũy kim loại nặng của cây sậy (*Phragmites australis*) trên đất ô nhiễm sau khai thác khoáng sản. Kết quả cho thấy cây sậy sinh trưởng tốt trong điều kiện đất có pH axit nhẹ (5,4) và hàm lượng KLN (Zn, Pb, Cd, As) vượt xa giới hạn theo QCVN 03:2023/BTNMT. Sau 8 tháng, hàm lượng KLN trong đất giảm đáng kể, với Zn giảm 66,5%, Pb giảm 73,95%, Cd giảm 66,71% và As giảm 73,43%, chứng minh hiệu quả xử lý ô nhiễm rõ rệt thông qua cơ chế xử lý ô nhiễm bằng thực vật. Nồng độ KLN được tích lũy chủ yếu ở rễ, với hệ số tích lũy cao hơn nhiều so với thân và lá, phản ánh cơ chế ưu tiên hấp thụ và cố định KLN tại vùng rễ. Mối tương quan tuyến tính mạnh giữa hàm lượng KLN trong đất và rễ cây ($R^2 = 0,81-0,95$) khẳng định vai trò quan trọng của rễ trong quá trình xử lý. Các yếu tố như pH đất axit, lượng mưa lớn và hoạt động của hệ vi sinh vật bản địa có thể đã hỗ trợ tích cực cho quá trình hấp thụ và chuyển hóa KLN. So sánh với các nghiên cứu trong và ngoài nước, hiệu quả xử lý KLN tại Tú Lệ tương đương hoặc vượt trội, đặc biệt trong điều kiện địa hình đồi dốc và đất xáo trộn sau khai thác – một bối cảnh ít được nghiên cứu trước đây. Kết quả này nhấn mạnh tiềm năng ứng dụng cây sậy trong cải tạo đất ô nhiễm KLN tại các vùng mỏ miền núi phía Bắc Việt Nam, mở ra hướng tiếp cận bền vững cho phục hồi môi trường.

Để đánh giá tính bền vững của mô hình công nghệ xử lý ô nhiễm bằng thực vật sử dụng cây sậy (*Phragmites australis*) trong điều kiện thực địa, cần triển khai các nghiên cứu dài hạn nhằm theo dõi hiệu quả xử lý kim loại nặng và sự ổn định của hệ sinh thái đất. Nên mở rộng phạm vi thí nghiệm, bao gồm các thử nghiệm theo mùa vụ và trên các loại địa hình khác nhau, đồng thời kết hợp đánh giá độc tính sinh học sau xử lý để xác định mức độ an toàn của đất cho các mục đích sử dụng tiếp theo. Việc nghiên cứu kết hợp cây sậy với các loài vi sinh vật phân giải KLN hoặc sử dụng các chất điều hòa sinh học như chất mùn và axit humic có thể tăng cường hiệu quả hấp thụ KLN, đồng thời cải thiện cấu trúc và độ phì nhiêu của đất. Ngoài ra, cần xây dựng các mô hình thử nghiệm quy mô lớn, tích hợp giữa cải tạo đất và phục hồi sinh thái, nhằm tạo cơ sở khoa học cho việc nhân rộng áp dụng tại các khu vực khai thác khoáng sản miền núi phía Bắc Việt Nam. Các định hướng này không chỉ nâng cao hiệu quả của công nghệ xử lý ô nhiễm bằng thực vật mà còn góp phần phát triển các giải pháp bền vững cho quản lý và phục hồi môi trường tại các vùng mỏ ô nhiễm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] Ministry of Natural Resources and Environment, *QCVN 03:2023/BTNMT – National technical regulation on permissible limits of heavy metals in soil*, Hanoi: Vietnam Natural Resources, Environment and Mapping Publishing House, (in Vietnamese), 2023.
- [2] H. Ali, E. Khan, and M. A. Sajad, “Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications,” *Chemosphere*, vol. 91, no. 7, pp. 869–881, 2013.
- [3] J. Vymazal, “Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience,” *Environmental Science & Technology*, vol. 45, no. 1, pp. 61–69, 2011.
- [4] V. H. Tran and T. N. Nguyen, “Application of plants in the remediation of heavy metal-contaminated soils,” (in Vietnamese), *Vietnam Journal of Environment*, vol. 13, no. 2, pp. 55–61, 2021.
- [5] V. H. Nguyen, “Phytoremediation – A green solution for contaminated soil,” (in Vietnamese), *Vietnam Soil Science Journal*, vol. 29, no. 1, pp. 18–26, 2022.
- [6] M. T. Bui et al., “*Phragmites australis* and its application in the treatment of polluted water and soil,” (in Vietnamese), *Journal of Natural Resources and Environment Science*, vol. 27, no. 3, pp. 45–51, 2019.

-
- [7] P. T. Tran, "Study on the absorption capacity of some heavy metals (As, Pb, Cd, Zn) in soil by reed (*Phragmites australis*) and application in treating soil contaminated with heavy metals after mineral exploitation in Thai Nguyen province," (in Vietnamese), Ph.D. dissertation, University of Science - Vietnam National University, Hanoi, Vietnam, 2014.
- [8] L. Zhang, Y. Yang, and X. Wang, "Long-term phytoremediation of heavy metal-contaminated soils using *Phragmites australis*: A case study in Northern China," *Environmental Pollution*, vol. 263, 2020, Art. no. 114526.
- [9] T. Li, M. Liu, and Y. Zhang, "Efficiency of *Phragmites australis* in removing heavy metals from contaminated soil in different climatic conditions," *Ecological Engineering*, vol. 132, pp. 1–8, 2019.
- [10] V. D. Nguyen *et al.*, "Geological characteristics and impacts of mining on soil in Tu Le area, Yen Bai province," (in Vietnamese), *Vietnam Journal of Geosciences*, vol. 62, no. 2, pp. 109–117, 2021.
- [11] A. Gadd, "Interactions of fungi with toxic metals," *New Phytologist*, vol. 124, no. 1, pp. 25–60, 1993.