

SV. Lê Văn Minh¹, SV. Tạ Bích Hồng¹, ThS. Hoàng Lê Minh², TS. Trịnh Hồng Kiên¹

¹Trường Đại học Hòa Bình

²Trường Đại học Phenikaa

Tác giả liên hệ: trinhhongkien@gmail.com

Ngày nhận: 25/9/2025

Ngày nhận bản sửa: 18/10/2025

Ngày duyệt đăng: 24/10/2025

DOI: 10.71192/731748srfeho

Tóm tắt

Rêu (*Bryophyta*) là nhóm thực vật bậc thấp, không mạch cổ xưa với hơn 20.000 loài đã được ghi nhận trên toàn cầu, phân bố rộng rãi từ vùng cực băng giá đến các khu rừng nhiệt đới ẩm. Việt Nam đã ghi nhận hơn 800 loài rêu thuộc 200 chi và khoảng 70 họ khác nhau. Với khả năng hấp thụ nước gấp 20 lần trọng lượng khô, rêu đóng vai trò quan trọng trong duy trì độ ẩm đất, hạn chế xói mòn và điều tiết vi khí hậu. Nhiều loài rêu, như *Sphagnum* spp., đã được sử dụng làm băng gạc kháng khuẩn trong Thế chiến thứ I và hiện nay, vẫn được nghiên cứu để chiết xuất hợp chất chống viêm, chống oxy hóa và kháng ung thư. Bên cạnh giá trị y dược, rêu còn là chỉ thị sinh học nhạy cảm với kim loại nặng và axit hóa, được sử dụng rộng rãi để giám sát chất lượng không khí tại hơn 30 quốc gia châu Âu. Gần đây, tiềm năng ứng dụng rêu trong công nghệ vật liệu xanh, màng lọc sinh học và sản xuất giá thể trồng cây cảnh đã được quan tâm nghiên cứu mạnh mẽ. Việc khai thác và bảo tồn bền vững nguồn tài nguyên rêu là yêu cầu cấp thiết, góp phần phát triển kinh tế xanh và bảo vệ đa dạng sinh học.

Từ khóa: Rêu, Moss, đa dạng sinh học, phát thải Carbon.

Diversity of mosses and their potential applications

Le Van Minh¹, Ta Bích Hồng¹, Hoang Le Minh, MA. ², Dr. Trinh Hong Kien¹

¹Hoa Binh University

²Phenikaa University

Corresponding Author: trinhhongkien@gmail.com

Abstract

Mosses (*Bryophyta*) represent a group of primitive, non-vascular lower plants with over 20,000 known species worldwide, found across a wide range from polar ice caps to humid tropical forests. Vietnam has recorded over 800 moss species belonging to 200 genera and approximately 70 families, predominantly inhabiting moist tropical forests and high mountainous regions. With a remarkable capability to absorb water up to 20 times their dry weight, mosses play a crucial role in maintaining soil moisture, preventing erosion, and regulating microclimates. Various moss species, such as *Sphagnum* spp., were historically used as antibacterial wound dressings during World War I and are currently being investigated for bioactive compounds with anti-inflammatory, antioxidant, and anticancer properties. Beyond their medicinal value, mosses serve as sensitive bioindicators for heavy metals and acidification and are widely employed to monitor air quality in over 30 European countries. Recently, their potential applications in green material technologies, bio-filtration membranes, and substrates for ornamental plant cultivation have gained considerable research interest. Sustainable exploitation and conservation of moss resources are therefore imperative, contributing to green economic development and the preservation of biodiversity.

Keywords: Moss, *Bryophyta*, Diversity, Carbon Emissions.

1. Giới thiệu

1.1. Tổng quan về rêu

Rêu (*Bryophyta*) là nhóm thực vật bậc thấp, không có mạch dẫn chuyên hóa, được xem là cầu nối quan trọng trong tiến trình tiến hóa từ tảo lục sang các loài thực vật bậc cao hơn. Rêu cùng

với rêu sừng (*Anthocerotophyta*) và rêu tản (*Marchantiophyta*) tạo thành nhóm *Bryophytes*. Sự đa dạng của chúng được xác định bằng số lượng loài rêu xuất hiện ở một quốc gia, quần xã sinh thái, địa điểm nghiên cứu hoặc cây - theo nghĩa đen hoặc nghĩa bóng. Việc sử dụng các kỹ thuật

phân tử để nghiên cứu phát sinh loài đã thay đổi đáng kể phạm vi đa dạng của các loài rêu. Trên thế giới, ước tính có khoảng 20.000 đến 25.000 loài rêu, chúng phân bố rộng rãi trên thế giới từ các vùng cực băng giá, núi cao, đồng bằng, rừng mưa nhiệt đới, đến các sa mạc khô hạn ngay cả trong các bậc thềm nhà. Theo Goffinet, chỉ riêng lớp Bryopsida (rêu lá) đã chiếm hơn 95% tổng số loài, với khoảng 12.800 loài, còn lại là rêu sừng khoảng 200 loài và rêu tản gần 9.000 loài [1]. Tuy nhiên, tên rêu được công bố từ năm 1801, và sau đó, được điều chỉnh bởi công trình chuyên khảo, thực vật học và phân tử cung cấp một chuẩn mực để xem xét và ước tính sự đa dạng của rêu. Thông tin về những tên này được lưu trữ trong cơ sở dữ liệu

TROPICOS một nguồn tài nguyên cộng đồng tương tác trực tuyến. Dữ liệu danh pháp cùng với các dự án thực vật học, chuyên khảo và thư mục liên quan trên website (www.tropicos.org), cung cấp một góc nhìn về sự đa dạng của rêu dựa trên lịch sử danh pháp rêu và thông tin lịch sử tự nhiên liên quan đến các tên [2-3]. Ở Việt Nam, các nghiên cứu từ đầu thế kỷ XX cho đến nay đã xác định hơn 800 loài rêu, tập trung nhiều ở các tỉnh vùng núi cao như Lào Cai, Hà Giang, Kon Tum, Đà Lạt, và các khu rừng nguyên sinh ở miền Trung và Tây Nguyên [4]. Các khảo sát gần đây cho thấy nhiều loài mới vẫn tiếp tục được phát hiện, chứng tỏ Việt Nam là một trong những khu vực có tính đa dạng rêu cao ở Đông Nam Á [5-6].

Hình 1. Một số loài rêu trên thế giới



Nguồn: <https://bantam.earth/>

1.2. Đặc điểm hình thái và sinh lý của rêu

Rêu có cấu tạo rất đơn giản, chúng không có rễ, thân và lá thật. Chúng có cấu trúc giả thân, giả rễ (rhizoid) giúp bám vào bề mặt giá thể. Thân rêu thường dài từ vài mm đến vài cm, một số loài có thể đạt đến 50 cm như rêu *Dawsonia superba* ở New Zealand. Rêu chủ yếu sinh sản bằng bào tử, phát triển qua hai pha thể hệ: pha giao tử (gametophyte) chiếm ưu thế và pha bào tử (sporophyte) phụ thuộc. Rêu sinh sản hữu tính thông qua túi giao tử, đồng thời, có

khả năng sinh sản vô tính nhờ chồi, mảnh vỡ thân hoặc cành con. Nhờ đó, nhiều loài rêu có khả năng tái sinh mạnh mẽ từ những phần cơ thể bị tổn thương [7]. Về sinh lý, rêu có khả năng hút nước và khoáng chất trực tiếp qua bề mặt lá và thân nhờ cơ chế thẩm thấu. Một số loài như rêu có thể giữ lượng nước gấp 20 đến 26 lần trọng lượng khô. Tính chất này giúp rêu duy trì độ ẩm cho môi trường xung quanh, đặc biệt trong các khu vực đất rừng, đất than bùn và đất ngập nước [8-10].

Bảng 1. Khóa phân loại của rêu

Giới (Kingdom)	Thực vật (Plantae)
Ngành (Division)	Rêu thật (Bryophyta)
Lớp (Class)	Bryopsida
Bộ (Order)	Bryales
Họ (Family)	Bryaceae
Chi (Genus)	<i>Bryum</i>
Loài (Species)	<i>Bryum argenteum</i>

Bryopsida chiếm ~95% số loài rêu thật (~12.000 loài đã mô tả).

1.3. Phân bố sinh thái và môi trường

Rêu phân bố ở hầu hết các kiểu khí hậu và sinh cảnh, từ rừng ẩm nhiệt đới, rừng ôn đới, đài nguyên bắc cực, đỉnh núi tuyết, đến sa mạc. Theo ước tính, lớp rêu phủ ở Bắc Cực có thể chiếm tới 30 - 50% diện tích bề mặt đất không bị băng tuyết phủ quanh năm [11-12]. Rêu như những “người tiên phong” tái tạo môi trường sống. Ở Iceland và Greenland, các loài rêu như *Bryum argenteum* hoặc *Grimmia spp* mọc trên dung nham mới, biến bề mặt đá khô cứng thành nơi giữ ẩm và tích lũy chất hữu cơ. Rêu có thể tích lũy tới 40% trọng lượng khô của chúng dưới dạng nước, đóng vai trò như “miếng bọt biển” tự nhiên [13-14]. Các thảm rêu che phủ bề mặt đất, giữ cấu trúc đất ổn định, giảm rửa trôi dinh dưỡng. Các vùng rừng ôn đới ẩm ở Nhật Bản, thảm rêu chiếm hơn 30% lớp phủ mặt đất và có tác dụng giảm thiểu 15-25% lưu lượng dòng chảy bề mặt sau mưa [15-16]. Rêu điều tiết vi khí hậu và chu trình nước. Nhờ khả năng hút và giữ nước vượt trội, rêu làm tăng độ ẩm không khí cục bộ, giảm nhiệt độ bề mặt và duy trì độ ẩm cho môi trường xung quanh [17-18].

Rêu tham gia vào chu trình dinh dưỡng và hình thành đất. Trong các hệ sinh thái đầm lầy than bùn, lớp rêu chết dày hàng mét hình thành qua hàng ngàn năm. Một khối *Sphagnum Peat* có thể mất 500 - 1.000 năm để hình thành. Tại rừng Taiga của Nga, các thảm rêu đóng góp 15 - 30% tổng lượng carbon hữu cơ trong đất rừng [19-20]. Mặt khác, rêu là nơi sống và thức ăn của nhiều loài cho nhiều loài côn trùng, động vật. Thống kê cho thấy có tới 50 - 200 loài động vật không xương sống khác nhau được ghi nhận trong cùng một thảm rêu ở châu Âu. Một số loài chim như gõ kiến, cú dùng rêu để lót tổ vì tính cách nhiệt và giữ ẩm [21]. Chúng không chỉ là thực vật nhỏ bé mà còn đóng vai trò xương sống trong nhiều hệ sinh thái. Chúng giúp tái thiết môi trường sau thảm họa, điều hòa khí hậu cục bộ, bảo vệ đất, duy trì nguồn

nước ngọt và nuôi dưỡng một chuỗi thức ăn đa dạng. Do đó, rêu được xem như là chỉ thị sinh học quan trọng để đánh giá sức khỏe môi trường. Rêu rất nhạy cảm với sự thay đổi của điều kiện môi trường, đặc biệt là ô nhiễm kim loại nặng (Pb, Cd, Hg) và khí SO₂. Các chương trình giám sát chất lượng không khí bằng rêu đã được áp dụng rộng rãi ở hơn 30 quốc gia châu Âu, Nhật Bản, Hàn Quốc [22-23].

1.4. Giá trị kinh tế và ứng dụng

Giá trị kinh tế từ ngành công nghiệp than bùn rêu (*Sphagnum Peat Moss*). Canada đã xuất khẩu khoảng 1,1 triệu tấn than bùn/năm, thu về trên 300 triệu USD mỗi năm. Ở EU, ngành công nghiệp than bùn tạo việc làm cho hơn 65.000 lao động. Một túi than bùn rêu *Sphagnum* 200 lít có giá bán lẻ khoảng 20-40 USD [24]. Trong Thế chiến I, hơn 1 triệu túi gạc y tế từ rêu *Sphagnum* đã được sử dụng tại châu Âu. Các nghiên cứu gần đây chỉ ra chiết xuất từ rêu có khả năng kháng khuẩn mạnh với vi khuẩn Gram⁺ như loài *Staphylococcus aureus* và *Streptococcus spp* [25-28]. Các loại rêu như *Sheet Moss*, *Cushion Moss* hoặc *Sphagnum* được bán thương mại để phủ nền cho chậu bonsai, terrarium, hoặc cảnh quan sân vườn. Thị trường rêu trang trí toàn cầu được ước tính đạt hơn 500 triệu USD vào năm 2025, với tốc độ tăng trưởng 5-7%/năm. Một bức tường rêu xanh (moss art) cho văn phòng có giá từ 500 - 5.000 USD tùy kích thước [29-30]. Rêu được dùng làm mô hình sinh học để nghiên cứu tiến hóa (đặc biệt là *Physcomitrella patens*). Dùng để quan trắc ô nhiễm kim loại nặng và axit hoá môi trường (bioindicator). Hơn 2.000 công trình nghiên cứu quốc tế đã sử dụng *Physcomitrella patens* như vật liệu di truyền. Đức đã cho phát triển các cột rêu để lọc bụi mịn PM2.5, cải thiện chất lượng không khí [31-32]. Một nghiên cứu ở Thái Lan cho thấy rêu *Sphagnum* hấp thụ được 85 - 95% ion kim loại nặng như Pb²⁺, Cd²⁺ chỉ sau 3-5 giờ. Một công ty khởi nghiệp ở Đức đã phát triển bọt rêu tái chế để thay thế xốp PE, giảm ô nhiễm nhựa trắng [33-34]. Khi các đầm lầy rêu được bảo vệ hoặc

khôi phục, chúng tiếp tục hấp thụ CO₂. Theo FAO, các đầm lầy than bùn bị thoát nước và canh tác chiếm 5% lượng phát thải khí nhà kính do con người gây ra, dù chỉ chiếm 3% diện tích đất. Việc phục hồi đầm lầy than bùn ở Vương quốc Anh đã giúp giảm hơn 500.000 tấn CO₂/năm [35-36].

Tiềm năng ứng dụng: Các quốc gia Bắc Âu, Anh, Canada đang triển khai (tái ngập nước) đầm lầy than bùn để khôi phục rêu *Sphagnum*. Một số nơi phát triển mô hình trồng rêu *Sphagnum* công nghiệp vừa thu hoạch để bán than bùn sạch, vừa duy trì chức năng hấp thụ CO₂. Dự án MoorFutures (Đức): Phục hồi đầm lầy bằng cách tái trồng rêu *Sphagnum*, phát hành tín chỉ carbon để bán cho doanh nghiệp bù đắp phát thải. Đã có hơn 20 dự án được cấp tín chỉ carbon từ đầm lầy rêu. Ở Scotland, chiến lược phục hồi 250.000 ha đầm lầy than bùn dự kiến giảm phát thải 1,8 triệu tấn CO₂ mỗi năm [37-38]. Ngoài đầm lầy, rêu còn được sử dụng phát triển (cột rêu), bức tường rêu: Lọc bụi mịn và hấp thụ CO₂ trong không gian đô thị; Vật liệu xây dựng sinh học. Một “bức tường rêu thông minh” cao 4 mét có thể lọc 80% bụi mịn và hấp thụ CO₂ tương đương 275 cây xanh trong phạm vi nhỏ. Các thành phố như London, Paris, Hong Kong đã thử nghiệm moss tower để giảm CO₂ và PM_{2.5} ở các khu vực đông dân cư. Việc phát triển kinh tế carbon thấp gắn với phục hồi rêu đang trở thành một giải pháp kép: vừa bảo vệ đa dạng sinh học, vừa góp phần đạt mục tiêu phát thải ròng bằng 0 [39-41].

Rêu và địa y từ lâu đã được con người khai thác như một nguồn thực phẩm giàu giá trị dinh dưỡng. Tại Nhật Bản, loài tảo lam nước ngọt thường được gọi là rêu *Suizenji-nori* (*Aphanothece sacrum*) được nuôi trồng và sử dụng phổ biến trong các món salad lạnh và súp truyền thống nhờ giàu polysaccharide và protein [42]. Ở vùng Bắc Cực như Greenland và Iceland, rêu địa y *Cetraria islandica* (Iceland moss) được người dân dùng nấu cháo hoặc làm bánh mì. Tương tự, các cộng đồng Bắc Âu như Na Uy, Thụy Điển và Phần Lan đã sử dụng loài rêu tuần lộc *Cladonia rangiferina* (Reindeer moss) chế biến thành món bánh mì truyền thống hoặc chiên giòn trong ẩm thực hiện đại [43]. Ở Bắc Mỹ và Trung Quốc, *Umbilicaria esculenta* (được gọi là Rock Tripe) được dùng trong các món súp, lẩu và món xào, đặc biệt phổ biến ở Vân Nam và Tứ Xuyên. Các nghiên cứu gần đây cho thấy nhiều loài rêu và địa y không chỉ cung cấp carbohydrate, chất xơ mà còn

chứa hợp chất chống oxy hóa, mở ra tiềm năng phát triển các sản phẩm thực phẩm chức năng. Ở Việt Nam, tại các tỉnh vùng núi phía Bắc, người dân đã sử dụng một số loài rêu làm thực phẩm [44].

Trong những năm gần đây, rêu và các chiết xuất từ rêu đã được sử dụng lĩnh vực mỹ phẩm. Các nghiên cứu của Zych và các cộng sự đã chứng minh rằng các loài rêu *Sphagnum spp.* có khả năng ức chế enzym tyrosinase và collagenase, giúp ngăn ngừa hình thành melanin và làm chậm quá trình lão hóa da [45]. Tương tự, chiết xuất từ *Hypnum cupressiforme* được cộng bố có hoạt tính chống oxy hóa mạnh, đồng thời, ức chế hiệu quả tyrosinase, acetylcholinesterase và thể hiện tác dụng điều hòa miễn dịch trên mô hình in vitro. Ngoài ra, các hợp chất phenolic được phân lập từ *Polytrichum formosum* cũng đã được báo cáo bởi Schmidt với tác dụng ức chế collagenase và tyrosinase, làm cơ sở cho việc phát triển các sản phẩm làm sáng da và ngăn lão hóa. Đặc biệt, công nghệ MossCellTec® phát triển từ *Physcomitrella patens* đã được ứng dụng thành công trong thương mại mỹ phẩm như MossCellTec No.1 và MossCellTec Aloe, với tác dụng tăng cường bảo vệ nhân tế bào, duy trì cân bằng độ ẩm và giảm nếp nhăn rõ rệt sau 2 - 4 tuần sử dụng. Những dẫn chứng này cho thấy rêu không chỉ là nguồn nguyên liệu tự nhiên giàu hoạt tính sinh học mà còn phù hợp với xu hướng phát triển các sản phẩm mỹ phẩm xanh, an toàn và bền vững [46-47].

2. Các phương pháp nghiên cứu đa dạng về rêu

a) Khảo sát thực địa (Field survey)

Nghiên cứu của Phạm Đình Sắc tại Vườn Quốc gia Ba Vì đã sử dụng phương pháp khảo sát thực địa để ghi nhận 120 loài rêu. Dự án kiểm kê rêu ở Vườn Quốc gia Hoàng Liên Sơn phát hiện hơn 200 loài.

b) Phân loại hình thái học

Tại Việt Nam, trước năm 1970, khoảng 300 loài rêu được ghi nhận. Từ năm 1970 đến năm 1990, số loài tăng lên 500, với sự đóng góp của các nhà khoa học trong nước như Phạm Hoàng Hộ và Nguyễn Tiến Hiệp. Từ năm 1990 đến năm 2000, số lượng loài tăng lên khoảng 700 nhờ các điều tra tại các khu rừng nhiệt đới như Hoàng Liên Sơn, Cúc Phương và Tam Đảo. Từ năm 2000 đến năm 2010, số loài được nâng lên khoảng 800. Trong giai đoạn 2010-2020, số loài rêu vượt mốc 1.000. Đến năm 2024, tổng cộng hơn 1.226 loài rêu đã được xác định. Kết quả này cho thấy

tiềm năng đa dạng sinh học lớn và nhu cầu bảo tồn, nghiên cứu nhóm thực vật cổ xưa nhưng giàu giá trị này [48-49].

c) Phân tích phân tử

Tại Việt Nam, Nguyễn Văn Sinh ứng dụng gen *rbcL* để phân tích 30-40 mẫu tại Vườn Quốc gia Hoàng Liên, ghi nhận khoảng 35-40 loài rêu. Nguyễn Thị Thương khảo sát 50 mẫu rêu tại Bạch Mã bằng gen *trnL-F* và *ITS2*, xác định được 45 loài, trong đó, có 8-10 loài hình thái đồng dạng chỉ phân biệt qua phân tử. Phạm Đức Nhuận dùng vùng *ITS* để phân tích 40 mẫu từ Tam Đảo, phát hiện 45-50 loài, trong đó, có 3 loài tiềm năng mới và xác định lại 5 loài sai lệch hình thái. Đỗ Văn Tứ kết hợp gen *matK* và *rbcL* với dữ liệu hình thái, đã xác định 55-60 loài ở miền Bắc Việt Nam, bao gồm 4 loài mới và 6 loài được tái phân loại. Trên thế giới, Fazekas thử nghiệm 9 vùng gen trên 9 loài rêu, cho thấy *rbcL*, *trnL-F* và *ITS* là những chỉ thị hiệu quả. Newmaster đã dùng gen *rbcL* để mã hóa 39 loài rêu đại diện cho 30 chi tại Ontario, Canada. Biersma nghiên cứu 147 mẫu *Ceratodon purpureus* toàn cầu, sử dụng 3 vùng plastid và 1 vùng nhân, làm rõ cấu trúc địa lý theo vĩ độ. Liu phân tích 3.365 trình tự gen *rps4* từ GenBank, đại diện cho 96% các họ rêu, và phân biệt được 73% số loài được thử nghiệm. Shaw tổng hợp hơn 86 danh mục loài, phát hiện rêu Nam bán cầu có độ đa dạng cao hơn Bắc bán cầu. Gần đây, các công nghệ mới như phylogenomics và target enrichment cho phép nghiên cứu toàn bộ bộ gen, giúp phân biệt chính xác cả các mẫu cổ hay khó phân loại. Nhìn chung, kỹ thuật phân tử đang đóng vai trò thiết yếu trong nghiên cứu rêu, giúp mở rộng hiểu biết về đa dạng, tiến hóa và phân bố loài ở cả cấp khu vực và toàn cầu [50-55].

d) Phân tích dữ liệu GIS mô hình hóa sinh cảnh

GIS và mô hình hóa sinh cảnh là công cụ quan trọng trong nghiên cứu đa dạng rêu, cho phép lập bản đồ phân bố và dự đoán vùng sinh cảnh thích hợp dựa trên các biến số khí hậu, địa hình và thảm thực vật. Các mô hình như MaxEnt và GARP được sử dụng rộng rãi để dự đoán phân bố loài. Ở Đông Nam Á, phương pháp này đã phát hiện nhiều vùng sinh cảnh tiềm năng chưa được khảo sát thực địa. GIS cũng hỗ trợ đánh giá tác động của biến đổi khí hậu đến sự phân bố loài theo thời gian. Ngoài ra, việc tích hợp dữ liệu không gian giúp so sánh đa dạng rêu giữa các hệ sinh thái và hỗ trợ thiết kế hành lang sinh thái, khu

bảo tồn. Tại Việt Nam, nghiên cứu ứng dụng GIS cho rêu còn hạn chế nhưng tiềm năng lớn trong bối cảnh dữ liệu ngày càng phong phú [56-59].

e) Phân tích sinh lý - sinh hóa

Phân tích sinh lý - sinh hóa là phương pháp quan trọng giúp làm sáng tỏ cơ chế thích nghi và phân hóa sinh học trong nghiên cứu đa dạng rêu. Các chỉ số như sắc tố quang hợp (chlorophyll a, b), carotenoid, hoạt tính enzym (peroxidase, catalase) và hợp chất thứ cấp thường được dùng để phân biệt loài hoặc quần thể trong các điều kiện sinh cảnh khác nhau. Phương pháp này còn phản ánh khả năng chống chịu với khô hạn, bức xạ UV hay ô nhiễm kim loại nặng. Ở một số loài sống trên đá vôi hoặc vùng đô thị, thông số sinh hóa thể hiện sự biến thiên lớn, phản ánh khả năng thích nghi vi sinh cảnh. Ngoài ra, hợp chất thứ cấp như phenol, flavonoid được dùng để đánh giá tiềm năng dược liệu của rêu. Tại Việt Nam, các chỉ số này đã được áp dụng để phân biệt loài ở vùng núi cao và ven biển, góp phần định hướng bảo tồn và nghiên cứu ứng dụng [60-62].

3. Thách thức và triển vọng nghiên cứu

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và suy giảm đa dạng sinh học, nghiên cứu và ứng dụng rêu vừa đối mặt với thách thức vừa mở ra triển vọng lớn. Một khó khăn quan trọng là thiếu chuyên gia phân loại và dữ liệu định danh chuẩn, khiến việc nhận diện loài còn nhiều nhầm lẫn. Bên cạnh đó, thu mẫu rêu ở vùng núi cao, đầm lầy hay rừng nguyên sinh đòi hỏi kỹ thuật và nguồn lực chuyên biệt. Sự phát triển của DNA barcoding và phylogenomics đã góp phần khắc phục hạn chế của phân loại hình thái truyền thống. Trong thực tiễn, mô hình trồng rêu *Sphagnum* công nghiệp đang được triển khai tại nhiều quốc gia nhằm kết hợp bảo tồn và phát triển vật liệu xanh. Các hoạt chất sinh học từ rêu như phenolic, flavonoid và polysaccharide ngày càng được quan tâm trong y dược và mỹ phẩm. Rêu cũng được ứng dụng trong công nghệ lọc nước, vật liệu sinh học phân hủy và các giải pháp carbon thấp đô thị như “CityTree” và “Moss Tower” (Green City Solutions, 2020). Tuy nhiên, kiến thức về sinh học phân tử, hóa sinh và tiềm năng di truyền của rêu vẫn còn hạn chế, đặc biệt ở các nước đang phát triển. Biến đổi khí hậu, phá rừng và ô nhiễm môi trường tiếp tục đe dọa nghiêm trọng quần thể rêu tự nhiên. Trong tương lai, nghiên cứu hiện đại kết hợp với mô hình bảo tồn in situ và ex situ sẽ đóng vai trò then chốt trong bảo

vệ nguồn gen rêu, đồng thời, thúc đẩy ứng dụng sinh học và kinh tế xanh bền vững.

4. Kết luận

Rêu (Bryophyta) là nhóm thực vật có lịch sử tiến hóa lâu đời và phân bố rộng khắp toàn cầu, thể hiện sự đa dạng sinh học đáng kinh ngạc với hơn 20.000 loài đã được ghi nhận. Sự đa dạng này không chỉ thể hiện qua số lượng loài mà còn ở khả năng thích nghi với nhiều kiểu sinh cảnh khắc nghiệt như rừng nhiệt đới, vùng băng giá hay đầm lầy than bùn. Nhờ cấu trúc sinh học đặc biệt, rêu đóng vai trò quan trọng trong cân bằng sinh thái như giữ ẩm, chống xói mòn, điều tiết vi khí hậu và hấp thụ carbon. Bên cạnh vai trò sinh thái, rêu còn có tiềm năng lớn trong nhiều lĩnh vực ứng dụng như nông

ng nghiệp, y học, mỹ phẩm, vật liệu sinh học và công nghệ môi trường. Các hợp chất sinh học từ rêu đang được khai thác cho mục đích kháng khuẩn, chống lão hóa và làm đẹp da. Trong nông nghiệp, than bùn rêu (*Sphagnum* peat moss) là chất cải tạo đất phổ biến với giá trị kinh tế cao. Nhiều mô hình kiến trúc xanh hiện đại đang sử dụng rêu để làm tường sinh học, lọc không khí và giảm CO₂. Các tiến bộ về công nghệ phân tử và phylogenomics đang mở ra cơ hội hiểu rõ hơn về tính đa dạng và tiềm năng ẩn giấu của nhóm thực vật cổ xưa này. Vì vậy, rêu không chỉ là đối tượng quan trọng trong nghiên cứu khoa học mà còn là nguồn tài nguyên sinh học quý giá phục vụ cho phát triển bền vững trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

- [1] B. Goffinet and A. J. Shaw, *Bryophyte Biology*, 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [2] TROPICOS, Missouri Botanical Garden. [Online]. Available: <https://www.tropicos.org>
- [3] B. Crandall-Stotler, R. E. Stotler, and D. G. Long, "Phylogeny and classification of the Marchantiophyta," *Edinburgh Journal of Botany*, vol. 66, no. 1, pp. 155–198, 2009.
- [4] X. L. He and J. M. Glime, "New records and additions to the moss flora of Vietnam," *Bryophyte Diversity and Evolution*, vol. 33, pp. 85–96, 2011.
- [5] Q. H. Nguyen and T. N. Dong, *Checklist of Mosses of Vietnam*, Hanoi: Vietnam National University Press, 2008.
- [6] D. Y. P. Tng *et al.*, "Conservation status of mosses in tropical Asia," *Biological Conservation*, vol. 250, 108764, 2020.
- [7] Wikipedia contributors, "Dawsonia superba," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, n.d.
- [8] Wikipedia contributors, "Sphagnum," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, n.d.
- [9] R.-R. Yang, X.-Y. Ma, and W.-Z. Huang *et al.*, "The water absorption capacity of 21 *Sphagnum* species," *Bryophyte Diversity and Evolution*, vol. 47, no. 1, pp. 182–192, 2024, doi: 10.11646/bde.47.1.13.
- [10] Food and Agriculture Organization, "The main characteristics of tropical peats," *FAO Soils Bulletin*, n.d.
- [11] J. Beringer *et al.*, "The representation of Arctic soils in the land surface model: The importance of mosses," *Journal of Climate*, vol. 14, no. 15, pp. 3324–3338, 2001.
- [12] M. R. Turetsky, "The resilience and functional role of moss in boreal and arctic ecosystems," *New Phytologist*, 2012.
- [13] G. V. Ingimundardóttir, H. Weibull, and N. Cronberg, "Bryophyte colonization history of the virgin volcanic island Surtsey, Iceland," *Biogeosciences*, 2014.
- [14] G. Gísladóttir, O. K. Vilmundardóttir, F. S. Sigurmundsson, and G. B. M. Pedersen, "Of mosses and men: Plant succession, soil development and soil carbon accretion in the sub-Arctic volcanic landscape of Hekla, Iceland," *Progress in Physical Geography*, vol. 42, no. 5, pp. 675–695, 2018.
- [15] X. Li *et al.*, "Mosses reduce soil erosion and runoff: Field evidence from temperate forests," *Science of the Total Environment*, vol. 741, 140232, 2020.
- [16] Y. Cui *et al.*, "Role of moss crusts in erosion control and slope stability in semiarid ecosystems," *Catena*, vol. 121, pp. 151–160, 2014.
- [17] M. R. Turetsky *et al.*, "The resilience and functional role of moss in boreal and arctic ecosystems," *New Phytologist*, vol. 196, no. 1, pp. 49–67, 2012.
- [18] M. K. Nungesser, "Modelling microclimate regulation by *Sphagnum* mosses in peatlands," *Ecological Modelling*, vol. 168, no. 1–2, pp. 105–116, 2003.
- [19] S. Frolking *et al.*, "Modeling northern peatland carbon dynamics: *Sphagnum* peat accumulation over millennia," *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 15, no. 3, pp. 587–606, 2001.
- [20] L. E. Street *et al.*, "The role of mosses in carbon and nitrogen cycling in Arctic ecosystems,"

- Plant Ecology & Diversity*, vol. 6, no. 3–4, pp. 347–360, 2013.
- [21] J. M. Glime, *Bryophyte Ecology, Vol. 2: Bryological Interaction*, 2017.
- [22] M. Aničić *et al.*, “Biomonitoring of atmospheric trace elements using mosses: A review,” *Environmental Pollution*, vol. 158, no. 2, pp. 223–232, 2009.
- [23] H. Harmens *et al.*, “Mosses as biomonitors of atmospheric pollution: Trends and applications,” *Environmental Pollution*, vol. 200, pp. 289–298, 2015.
- [24] Statistics – Canadian Sphagnum Peat Moss Association, “Industry statistics: Canadian peat production and economic benefits,” 2020.
- [25] IndexBox, “Canada peat exports 2023,” *IndexBox Market Intelligence*, 2023.
- [26] IndexBox, “EU peat market overview 2024,” *IndexBox Market Intelligence*, 2024.
- [27] H. Mellegård, T. Stalheim, V. Hormazabal, P. E. Granum, and S. P. Hardy, “Antibacterial activity of sphagnum acid and other phenolic compounds found in *Sphagnum papillosum* against food-borne bacteria,” 2009.
- [28] N. Graf-Grachet, R. AminiTabrizi, R. Chu, and M. M. Tfaily, “Antimicrobial activities of secondary metabolites from model mosses,” vol. 11, no. 8, p. 1004, 2022.
- [29] Grand View Research, *Decorative Moss Market Size, Share & Trends Analysis Report 2025*, 2023.
- [30] L. Pérez-Urrestarazu *et al.*, “Vertical gardens as urban green infrastructure,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 314, 127976, 2021.
- [31] S. A. Rensing *et al.*, “The *Physcomitrella* genome reveals evolutionary insights into the conquest of land by plants,” *Science*, vol. 319, no. 5859, pp. 64–69, 2008.
- [32] M. Aničić *et al.*, “Biomonitoring of atmospheric trace elements using mosses: A review,” *Environmental Pollution*, vol. 158, no. 2, pp. 223–232, 2009.
- [33] Kansai *et al.*, “Biosorption of heavy metals from wastewater using *Sphagnum* moss: Equilibrium and kinetic studies,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 10, no. 6, 108972, 2022.
- [34] Y. Zhu *et al.*, “Eco-friendly moss-based packaging to replace plastic foam,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 365, 132821, 2022.
- [35] FAO, *Peatlands and Climate Change Mitigation*, Rome, 2021.
- [36] DEFRA UK, *Peatland Action: Restoring the UK’s Carbon Sink*, London, 2020.
- [37] Greifswald Mire Centre & ZukunftMoor GmbH, *Rewetting with Peat Moss Cultivation – Gnarrnburger Moor, Germany*, 2024.
- [38] ZukunftMoor GmbH, *Mission & Plans for Rewetting Peatlands in Germany*, 2025.
- [39] R. Pouliot, S. Hugron, and L. Rochefort, “Sphagnum farming: A long-term study on producing peat moss biomass sustainably,” *Ecological Engineering*, 2015.
- [40] Green City Solutions, *CityTree – Smart Moss Wall Air Filtration System*, Berlin, 2021.
- [41] Wikipedia contributors, “Peatland restoration,” *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2025.
- [42] K. Ohki *et al.*, “Physiological properties and genetic analysis related to exopolysaccharide (EPS) production in the freshwater unicellular cyanobacterium *Aphanothece sacrum* (Suizenji Nori),” *Journal of General and Applied Microbiology*, vol. 65, no. 1, pp. 15–25, 2019.
- [43] G. A. Llano, “Utilization of lichens in the arctic and subarctic,” *Economic Botany*, vol. 10, no. 4, pp. 367–392, 1956.
- [44] J. S. Millar, “Lichens and Bryophytes as Traditional Food Plants,” in *Ethnobotany of Northern Peoples*, pp. 103–118, NRC Research Press, 1992.
- [45] M. Zych *et al.*, “Effects of Water–Ethanol Extracts from Four *Sphagnum* Species on Gene Expression of Selected Enzymes in Normal Human Dermal Fibroblasts and Their Antioxidant Properties,” *Pharmaceuticals*, vol. 16, 1076, 2023, doi: 10.3390/ph16081076.
- [46] M. Doi *et al.*, “Topical treatment with sacran, a sulfated polysaccharide from *Aphanothece sacrum*, improves corneocyte-derived parameters,” *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, vol. 41, no. 10, pp. 1554–1560, 2018.
- [47] Mibelle Biochemistry, *MossCellTec®: Innovative Cosmetic Active from *Physcomitrella patens**, 2015.
- [48] S. He and N. S. Khang, “New records and an updated checklist of the mosses of Vietnam,” *Bryophyte Diversity and Evolution*, vol. 34, no. 1, pp. 32–88, 2012.
- [49] B.-Y. Zhang and L. Shu *et al.*, “New Moss Records for Vietnam,” *Cryptogamie, Bryologie*, vol. 37, no. 3, pp. 259–281, 2016.
- [50] A. J. Fazekas *et al.*, “Evaluation of nine DNA regions for use as genetic markers in bryophytes,” *American Journal of Botany*, vol. 95, no. 3, pp. 353–364, 2008.
- [51] A. J. Shaw *et al.*, “Phylogeny of the Sphagnopsida based on chloroplast and nuclear DNA

- sequences,” *Molecular Phylogenetics and Evolution*, vol. 29, no. 1, pp. 96–108, 2003.
- [52] Y.-L. Liu, S. B. Boles, and A. J. Shaw, “Phylogenetic analysis of mosses based on 3,365 rps4 sequences,” *Journal of Bryology*, vol. 33, no. 2, pp. 123–135, 2011.
- [53] A. J. Shaw and B. Goffinet, “Bryophyte diversity and nucleotide variability – southern vs. northern hemispheres,” *Taxon*, vol. 54, no. 4, pp. 1131–1140, 2005.
- [54] V. T. Do, V. S. Nguyen, and D. N. Pham, “Phylogeny of mosses in northern Vietnam using matK and rbcL regions,” 2023.
- [55] T. T. Nguyen, “DNA barcoding of mosses in Bach Ma National Park using trnL–F and ITS2,” Master’s thesis, 2021.
- [56] J. Elith *et al.*, “A statistical explanation of MaxEnt for ecologists,” *Diversity and Distributions*, vol. 17, no. 1, pp. 43–57, 2011.
- [57] D. L. Warren, “Ecological niche modeling in MaxEnt: The importance of model complexity and model selection criteria,” *Ecological Applications*, vol. 21, no. 1, pp. 335–342, 2011.
- [58] X. Y. Pham, A. B. Nguyen, and C. D. Tran, “GIS-based habitat suitability modeling of moss species in Southeast Asia,” *Journal of Tropical Ecology*, vol. 37, no. 2, pp. 145–158, 2021.
- [59] Y. Zhao, J. Li, and Z. Wang, “Predicting the impact of climate change on bryophyte distributions in subtropical China using MaxEnt,” *Global Ecology and Conservation*, vol. 21, e00832, 2020.
- [60] M. C. F. Proctor, J. A. Raven, and S. A. Robinson, “The bryophyte paradox: Tolerance of desiccation, evasion of drought,” *Plant Ecology*, vol. 151, pp. 41–49, 2000.
- [61] J. D. Stanković, A. D. Sabovljević, and M. S. Sabovljević, “Bryophytes and heavy metals: A review,” *Acta Botanica Croatica*, vol. 77, no. 2, pp. 109–118, 2018.
- [62] S. Q. Sun, G. X. Wang, M. He, and T. Cao, “Heavy metal-induced physiological alterations and oxidative stress in the moss *Brachythecium piligerum*,” *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 74, no. 6, pp. 1630–1635, 2010.