

KHÉP KÍN VÒNG TUẦN HOÀN NÔNG NGHIỆP THÔNG QUA VIỆC CHUYỂN HÓA RƠM RẠ THÀNH VẬT LIỆU CẢI TẠO ĐẤT

Ngô Thúy An^{1,*}, Nguyễn Trần Thiện Khánh¹, Phan Thị Bảo Châu²

¹Giảng viên, Trường Đại học An Giang, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Sinh viên, Trường Đại học An Giang, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Tóm tắt

Khép kín vòng tuần hoàn vật chất là yêu cầu quan trọng của nông nghiệp bền vững, trong đó phụ phẩm cần được chuyển hóa thành tài nguyên có giá trị. Tại Việt Nam, rơm rạ là nguồn sinh khối lignocellulose dồi dào, có tiềm năng phát triển vật liệu cải tạo đất trong bối cảnh suy thoái đất và gia tăng khô hạn. Bài báo này tổng quan về khả năng chuyển hóa rơm rạ thành hydrogel gốc cellulose theo định hướng hóa học xanh và kinh tế tuần hoàn. Cellulose có thể được thu hồi bằng các phương pháp như hơi nước áp suất cao, oxy hóa bằng hydro peroxit, enzyme hoặc dung môi eutectic sâu. Trên cơ sở đó, hydrogel gốc cellulose cho thấy tiềm năng nhờ cấu trúc mạng lưới polymer ba chiều, giúp hấp thụ và nhả chậm nước, cải thiện ẩm độ đất và hỗ trợ lưu giữ dinh dưỡng. Khi được thiết kế từ vật liệu sinh học và tác nhân liên kết ngang thân thiện với môi trường, vật liệu này còn có tiềm năng phân hủy sinh học sau sử dụng.

Từ khóa: Rơm rạ; Cellulose; Hydrogel; Vật liệu cải tạo đất; Kinh tế tuần hoàn.

Abstract

Closing agricultural loops through the conversion of rice straw into cellulose-based soil amendment materials

Closing material loops is central to sustainable agriculture, where agricultural residues should be revalorized as functional resources rather than treated as waste. In Vietnam, rice straw represents an abundant lignocellulosic biomass with strong potential for developing soil amendment materials in the context of soil degradation and increasing drought stress. This review examines the potential for converting rice straw into cellulose-based hydrogels through the lenses of green chemistry and the circular economy. Cellulose can be recovered using a range of approaches, including high-pressure steam treatment, hydrogen peroxide oxidation, enzymatic processes, and deep eutectic solvents. Building on these pathways, cellulose-based hydrogels emerge as promising materials because their three-dimensional polymer networks enable water uptake and gradual release, thereby improving soil moisture regulation and supporting nutrient retention. When designed from biobased feedstocks and environmentally benign crosslinking agents, these materials also offer the prospect of biodegradation after use.

Keywords: Rice straw; Cellulose; Hydrogel; Soil amendment materials; Circular economy.

BBT nhận bài: 24/02/2026; Phản biện xong: 20/3/2026; Chấp nhận đăng: 12/6/2026

*Tác giả liên hệ, Email: ntan@agu.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.63064/khtnmt.2026.847>

1. Đặt vấn đề

Việt Nam là một trong những quốc gia sản xuất lúa gạo hàng đầu thế giới. Theo số liệu của Tổng cục Thống kê, sản lượng lúa cả năm 2024 của Việt Nam đạt xấp xỉ 43,45 triệu tấn [4]. Tương ứng với sản lượng này, hàng chục triệu tấn rơm rạ được thải ra môi trường sau mỗi vụ thu hoạch. Hiện nay, phần lớn rơm rạ vẫn được xử lý bằng cách đốt ngoài đồng hoặc vùi trực tiếp vào đất. Quá trình đốt rơm rạ lộ thiên không chỉ lãng phí một nguồn sinh khối giàu carbon có tiềm năng sử dụng cao mà còn phát thải lượng lớn khí nhà kính (điển hình như CO_2) và các chất gây ô nhiễm không khí, đặc biệt là bụi dạng hạt PM [11].

Song song với vấn đề quản lý phế phẩm, đất canh tác tại nhiều vùng nông nghiệp đang đối mặt với tình trạng suy thoái, biểu hiện qua sự suy giảm của hàm lượng hữu cơ, hiện tượng nén chặt và giảm khả năng giữ nước cũng như dinh dưỡng. Những thách thức này ngày càng trở nên nghiêm trọng trong bối cảnh biến đổi khí hậu và thói quen canh tác thâm canh kéo dài [15].

Để giải quyết bài toán giữ ẩm cho đất, các vật liệu cải tạo đất hiện nay, đặc biệt là polymer siêu thấm (Superabsorbent polymers - SAPs), đã cho thấy hiệu quả rất tốt. Tuy nhiên, phần lớn các SAPs thương mại đều có nguồn gốc từ dầu mỏ. Hạn chế lớn nhất của chúng là khó phân hủy sinh học, tiềm ẩn rủi ro tồn lưu và tích tụ vi nhựa trong môi trường đất về lâu dài [1]. Do đó, việc phát triển các vật liệu cải tạo đất có nguồn gốc sinh khối tự nhiên, thân thiện với môi trường và phân hủy sinh học hoàn toàn là yêu cầu cấp thiết.

Trong bối cảnh đó, bài báo này tập trung tổng quan về tiềm năng chuyển hóa rơm rạ thành vật liệu cải tạo đất gốc cellulose theo định hướng hóa học xanh và kinh tế tuần hoàn. Trọng tâm của bài viết không chỉ dừng lại ở một quy trình công nghệ riêng lẻ, mà hướng tới làm rõ các cách tiếp cận xanh trong thu hồi cellulose từ sinh khối lignocellulose, đồng thời phân tích vì sao hướng tạo hydrogel gốc cellulose được xem là một lựa chọn có giá trị gia tăng cao đối với mục tiêu giữ ẩm, điều hòa nhả nước, hỗ trợ lưu giữ dinh dưỡng và cải thiện chất lượng đất. Theo hướng tiếp cận này, rơm rạ không còn được xem là phế phẩm cần xử lý, mà là một nguồn nguyên liệu sinh học có thể tham gia vào chuỗi giá trị tuần hoàn của nền nông nghiệp bền vững.

2. Rơm rạ - nguồn cellulose dồi dào cho vật liệu sinh học

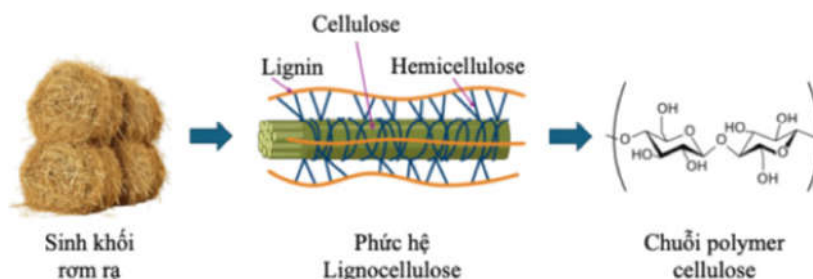
2.1. Thành phần hóa học và cấu trúc lignocellulose của rơm rạ

Rơm rạ là vật liệu lignocellulose điển hình, bao gồm ba thành phần chính là cellulose, hemicellulose và lignin. Trong đó, cellulose chiếm tỷ lệ cao nhất, thường khoảng 35 - 40 % khối lượng khô, đóng vai trò là khung polymer tự nhiên quyết định phần lớn tính chất cơ học của rơm rạ [6]. Hemicellulose và lignin phân bố xen kẽ giữa các sợi cellulose, tạo nên một cấu trúc phức hợp bền vững giúp bảo vệ thực vật và duy trì độ ổn định trong điều kiện tự nhiên.

Về mặt hóa học, cellulose là một polysaccharide mạch thẳng, được cấu tạo từ các đơn vị β -D-glucopyranose liên kết với nhau bằng liên kết β -1,4-glycosidic [6]. Các chuỗi cellulose sắp

xếp song song, hình thành hệ vi sợi có độ kết tinh cao nhờ mạng lưới liên kết hydro nội phân tử và liên phân tử. Trên bề mặt chuỗi cellulose tồn tại mật độ lớn các nhóm hydroxyl (-OH) tự do, là những vị trí phản ứng thuận lợi cho các

quá trình biến tính và tạo liên kết ngang. Chính đặc điểm cấu trúc này tạo cơ sở quan trọng cho việc tách chiết và chuyển hóa cellulose từ rơm rạ thành các vật liệu sinh học có chức năng, trong đó có vật liệu cải tạo đất.



Hình 1: Cấu trúc phân cấp từ vĩ mô đến vi mô của rơm rạ và thành phần hóa học

2.2. Lợi thế của rơm rạ trong tiếp cận kinh tế tuần hoàn

So với các nguồn cellulose truyền thống như gỗ hoặc cây công nghiệp (thường được xếp vào nhóm sinh khối thế hệ thứ nhất), rơm rạ (đại diện tiêu biểu cho sinh khối thế hệ thứ hai) có nhiều lợi thế vượt trội trong bối cảnh phát triển bền vững. Là phụ phẩm nông nghiệp có tính sẵn có cao theo mùa vụ và phân bố tập trung tại các vùng chuyên canh lúa, việc tận dụng rơm rạ giúp tối ưu hóa chi phí thu gom và vận chuyển. Đặc biệt, việc khai thác nguồn nguyên liệu này không đòi hỏi mở rộng quỹ đất canh tác, do đó hoàn toàn không gây áp lực lên tài nguyên đất hay cạnh tranh trực tiếp với an ninh lương thực toàn cầu [13].

Bên cạnh đó, việc trích ly và chuyển hóa rơm rạ thành cellulose không chỉ giải quyết triệt để bài toán ô nhiễm môi trường do đốt bỏ lộ thiên mà còn tạo ra các sản phẩm giá trị gia tăng hướng tới mô hình kinh tế sinh học tuần hoàn [12]. Quan trọng hơn, khi vật liệu cải tạo đất gốc cellulose được bón trở lại đồng ruộng, chu

trình carbon trong nông nghiệp sẽ được khép kín. Carbon hữu cơ thay vì phát thải vào khí quyển dưới dạng khí nhà kính sẽ được lưu giữ tạm thời trong cấu trúc vật liệu xốp, sau đó thông qua quá trình phân hủy sinh học tự nhiên để tái hoàn trả mùn hữu cơ và phục hồi chức năng sinh thái cho đất.

3. Định hướng công nghệ chuyển hóa cellulose thành cấu trúc xốp phục vụ cải tạo đất

Để chuyển hóa rơm rạ thành vật liệu cải tạo đất gốc cellulose, bước nền tảng là tách cellulose ra khỏi ma trận lignocellulose vốn được gia cường bởi hemicellulose, lignin và một phần khoáng vô cơ [6, 12]. Trong những năm gần đây, xu hướng công nghệ không còn chỉ tập trung vào hiệu suất tách chiết đơn thuần mà chuyển sang ưu tiên các phương pháp xanh, tức là giảm sử dụng hóa chất độc hại, hạn chế phát sinh dòng thải thứ cấp, đồng thời tạo điều kiện cho việc thu hồi các pha phụ để tiếp tục tận dụng trong mô hình kinh tế tuần hoàn [13].

Một trong những hướng tiếp cận xanh quan trọng là xử lý bằng hơi nước áp suất cao hoặc nước nóng nén, diễn hình dưới dạng phương pháp nổ hơi hoặc tiền xử lý bằng nước nóng. Cơ chế chính của nhóm phương pháp này là làm trương nở sinh khối ở nhiệt độ và áp suất cao, sau đó phá vỡ cấu trúc lignocellulose nhờ quá trình tự thủy phân hemicellulose và sự suy giảm liên kết cơ học giữa các pha [13]. Ưu điểm của hướng này là không cần hoặc chỉ cần rất ít dung môi hữu cơ, đồng thời có khả năng làm tăng độ xốp bề mặt và tạo điều kiện thuận lợi cho các bước xử lý tiếp theo. Tuy vậy, nếu điều kiện xử lý quá khắc nghiệt, một phần carbohydrate có thể bị phân hủy và tạo thành các sản phẩm phụ gây bất lợi cho các công đoạn tiếp theo.

Bên cạnh đó, oxy hóa bằng hydro peroxit cũng là một hướng xanh đáng chú ý, đặc biệt khi kết hợp với nước dưới tới hạn hoặc các bước tẩy trắng nhẹ. Trong môi trường kiềm thích hợp, hydro peroxit tạo ra tác nhân oxy hóa có khả năng phá vỡ phần lignin còn lại và làm giàu pha cellulose mà không tạo ra các dư lượng clo hóa độc hại như một số quy trình tẩy trắng truyền thống [6, 12]. Hướng tiếp cận này phù hợp khi mục tiêu là thu được cellulose có màu sáng, tương đối tinh sạch để tiếp tục biến tính thành vật liệu hydrogel. Dù vậy, hiệu quả của quá trình phụ thuộc chặt chẽ vào pH, nồng độ hydro peroxit và thời gian xử lý. Nếu chưa được tối ưu tốt, tổn thất cellulose vẫn có thể xảy ra.

Một lựa chọn khác là tiền xử lý bằng enzyme hoặc oxy hóa enzyme, đặc biệt với hệ enzyme laccase và các enzyme phân giải thành phần không phải cellulose [7]. Nhóm phương pháp này diễn ra ở

điều kiện ôn hòa hơn, có tính chọn lọc cao và giảm nguy cơ phát sinh ô nhiễm thứ cấp. Đây là ưu điểm lớn nếu mục tiêu là bảo tồn tối đa cấu trúc polymer tự nhiên và giảm hư hại lên mạch cellulose. Tuy nhiên, nhược điểm thường gặp là tốc độ xử lý chậm hơn, chi phí enzyme còn tương đối cao và khó mở rộng quy mô nếu chưa tối ưu được điều kiện vận hành.

Trong số các công nghệ mới, dung môi cộng tinh sâu (còn gọi là phương pháp DES - Deep Eutectic Solvents) hiện được xem là một hướng rất triển vọng trong tách chiết lignocellulose. Xử lý rơm rạ bằng DES giúp phá vỡ liên kết của lignin và hemicellulose ở điều kiện nhiệt độ ôn hòa, thu được cellulose có độ tinh khiết cao, đồng thời bảo toàn tối đa các nhóm hydroxyl (-OH) phản ứng mà không phát sinh chất thải thứ cấp độc hại [14]. So với nhiều hệ dung môi truyền thống, dung môi cộng tinh sâu có ưu điểm về tính linh hoạt trong thiết kế thành phần, điều kiện xử lý tương đối ôn hòa và phù hợp với định hướng phân tách chọn lọc các cấu tử của sinh khối. Tuy nhiên, hiệu quả thực tế vẫn phụ thuộc mạnh vào loại sinh khối, thành phần dung môi, tỷ lệ dung môi trên nguyên liệu và chiến lược thu hồi dung môi sau xử lý.

Từ những phân tích trên có thể thấy không tồn tại một phương pháp xanh duy nhất phù hợp cho mọi mục tiêu. Nếu ưu tiên đơn giản hóa quy trình và khả năng mở rộng, xử lý bằng hơi nước áp suất cao hoặc nước nóng nén là lựa chọn đáng cân nhắc; Nếu ưu tiên độ chọn lọc và độ tinh sạch cao của cellulose, dung môi cộng tinh sâu, hydro peroxit hoặc enzyme có thể cho lợi thế rõ hơn. Vì vậy, trong bối cảnh chế tạo vật liệu cải tạo đất, việc lựa

chọn công nghệ không nên chỉ dựa trên hiệu suất tách chiết riêng lẻ mà cần xem xét đồng thời chất lượng cellulose, khả năng tận dụng lignin và hemicellulose đi kèm, chi phí xử lý và mức độ phù hợp với bước tạo hydrogel tiếp theo [16].

Sau khi thu được cellulose, bước quyết định giá trị ứng dụng của vật liệu là thiết kế lại cellulose thành mạng lưới polymer ba chiều có khả năng trương nở và giữ nước [3, 16]. Do cellulose tự nhiên có cấu trúc vi sợi tinh thể chặt và khả năng trương nở hạn chế, quá trình tạo liên kết ngang là cần thiết để hình thành hydrogel có độ bền cơ học phù hợp. Trong định hướng thân thiện môi trường, axit citric là một chất tạo liên kết ngang đáng chú ý vì dưới tác động nhiệt, axit citric có thể tạo Anhydrit trung gian rồi tham gia phản ứng este hóa với các nhóm hydroxyl trên mạch cellulose [8], từ đó hình thành các cầu nối giữa các chuỗi polymer. So với nhiều chất tạo liên kết ngang tổng hợp, axit citric có ưu điểm là ít độc hại hơn và phù hợp với mục tiêu phát triển hydrogel sinh học. Dù vậy, mật độ liên kết ngang cần được tối ưu cẩn thận vì nếu quá thấp sẽ khó hình thành mạng gel ổn định, còn nếu quá cao lại có thể làm giảm khả năng hút nước của vật liệu.

4. Tiềm năng ứng dụng và cơ chế tác động của vật liệu cải tạo đất gốc cellulose

Trong nông nghiệp tuần hoàn, rơm rạ có thể được sử dụng theo nhiều hướng như ủ phân hữu cơ, làm thức ăn chăn nuôi sau xử lý, sản xuất than sinh học hoặc chuyển hóa thành vật liệu chức năng [12]. Mỗi hướng có giá trị riêng tùy mục tiêu sử dụng. Tuy nhiên, nếu mục tiêu là tạo ra vật

liệu vừa giữ nước, nhả chậm ẩm độ, hỗ trợ lưu giữ dinh dưỡng, vừa có khả năng phân hủy sinh học và quay trở lại môi trường đất, thì hydrogel gốc cellulose là một lựa chọn có giá trị gia tăng cao [16]. Hydrogel không phải là con đường duy nhất cho mọi bối cảnh, nhưng đặc biệt phù hợp với cải tạo đất trong điều kiện khô hạn, đất suy thoái hoặc các hệ canh tác cần nâng cao hiệu quả sử dụng nước.

Trên thế giới, hydrogel từ sinh khối đang được quan tâm như một nhóm vật liệu xanh cho nông nghiệp bền vững. Nhiều nghiên cứu đã phát triển hydrogel từ cellulose, tinh bột, chitosan và các phụ phẩm lignocellulose nhằm tạo ra vật liệu có khả năng hấp thụ lượng nước lớn, duy trì ẩm độ đất và giảm phụ thuộc vào polymer siêu thấm có nguồn gốc dầu mỏ [1]. So với hydrogel tổng hợp, hydrogel từ sinh khối có ưu thế ở nguồn nguyên liệu tái tạo, mức độ thân thiện môi trường cao hơn và tiềm năng phân hủy sinh học sau sử dụng [16]. Với rơm rạ, hướng tiếp cận này càng có ý nghĩa khi gắn trực tiếp nguồn phụ phẩm dồi dào với nhu cầu cải tạo đất trong sản xuất nông nghiệp.

Về công nghệ, quá trình chế tạo hydrogel từ rơm rạ thường gồm hai giai đoạn chính: Thu hồi cellulose từ nền lignocellulose và tạo liên kết ngang để hình thành mạng lưới polymer ba chiều [8]. Hiệu suất thu hồi cellulose, tỷ lệ sản phẩm phụ và chất lượng vật liệu cuối cùng phụ thuộc mạnh vào công nghệ tiền xử lý. Với các phương pháp xanh như hơi nước áp suất cao, oxy hóa bằng hydro peroxit, enzyme hoặc dung môi cộng tinh sâu, cellulose thường được làm giàu ở pha rắn, trong khi lignin và một phần hemicellulose được tách ra ở các mức độ

khác nhau [7, 14]. Vì vậy, khi đánh giá hiệu quả công nghệ, không nên chỉ xét lượng cellulose thu được mà cần xem xét đồng thời chất lượng cellulose, mức tiêu hao năng lượng, khả năng tận dụng các cấu tử đi kèm và mức độ phù hợp với bước tạo hydrogel.

Một vấn đề quan trọng là số phận của lignin và hemicellulose sau tách chiết. Trên thực tế, hai thành phần này không nhất thiết trở thành chất thải. Lignin có thể được tận dụng làm vật liệu carbon, chất hấp phụ hoặc nguyên liệu cho các sản phẩm hóa học sinh học, hemicellulose cũng có thể được dùng cho các hệ vật liệu sinh học khác hoặc hoàn trả về chu trình hữu cơ [14]. Trong trường hợp một phần lignin và hemicellulose còn tồn dư trong cellulose sau xử lý, chúng cần được kiểm soát ở mức phù hợp. Hàm lượng lignin dư quá cao có thể làm giảm độ ưa nước và hạn chế khả năng trương nở của hydrogel, trong khi hemicellulose dư có thể làm tăng tính hút nước nhưng đồng thời làm giảm độ bền cơ học và thúc đẩy phân hủy nhanh hơn [5]. Do đó, điều quan trọng không phải là loại bỏ tuyệt đối các cấu tử này mà là kiểm soát chúng để cân bằng giữa khả năng giữ nước, độ bền mạng polymer và tốc độ phân hủy sinh học của vật liệu.

Xét về hiệu quả kinh tế, hydrogel gốc cellulose từ rơm rạ là hướng chế biến sâu

hơn so với các hình thức sử dụng truyền thống như ủ phân hữu cơ hoặc dùng trong chăn nuôi sau xử lý, nên chi phí công nghệ, hóa chất, năng lượng và công đoạn tạo vật liệu thường cao hơn. Tuy nhiên, giá trị của hướng tiếp cận này không nằm ở việc xử lý đại trà toàn bộ lượng rơm rạ phát sinh mà ở khả năng tạo ra vật liệu chức năng có hiệu quả cao trong những bối cảnh đặc thù như vùng thiếu nước, đất nhẹ, đất nghèo hữu cơ hoặc hệ canh tác cần kiểm soát ẩm độ tốt. Nếu vật liệu giúp giảm nhu cầu nước tưới, hạn chế rửa trôi phân bón và cải thiện chất lượng đất, thì lợi ích chức năng thu được có thể bù đắp một phần chi phí chế biến ban đầu. Để làm rõ vị trí của hydrogel từ rơm rạ trong bức tranh chung của các vật liệu cải tạo đất, có thể so sánh định tính một số lựa chọn tiêu biểu như trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1 cho thấy hydrogel gốc cellulose không thay thế hoàn toàn các vật liệu cải tạo đất khác, nhưng nổi bật ở khả năng kết hợp đồng thời giữ ẩm, nhả chậm và phân hủy sinh học sau sử dụng. Chính sự kết hợp này làm rõ hơn ý nghĩa “khép kín vòng tuần hoàn”: Carbon hữu cơ trong rơm rạ trước hết được chuyển thành vật liệu chức năng phục vụ đất, sau đó tiếp tục quay trở lại môi trường đất thông qua quá trình phân hủy sinh học, thay vì để lại tồn dư bền như vi nhựa hoặc hóa chất khó phân hủy.

Bảng 1. So sánh định tính một số vật liệu cải tạo đất và hướng sử dụng rơm rạ liên quan đến mục tiêu tuần hoàn

Vật liệu/ hướng sử dụng	Cơ chế tác động chính	Khả năng giữ ẩm	Khả năng nhả chậm	Phân hủy sinh học	Hạn chế chính	Nguồn tham khảo
Phân hữu cơ hoặc compost từ rơm rạ	Bổ sung chất hữu cơ, cải thiện độ phì và cấu trúc đất	Trung bình	Thấp đến trung bình	Cao	Tác động chậm, khó tạo hiệu ứng giữ ẩm có kiểm soát	[12, 15]

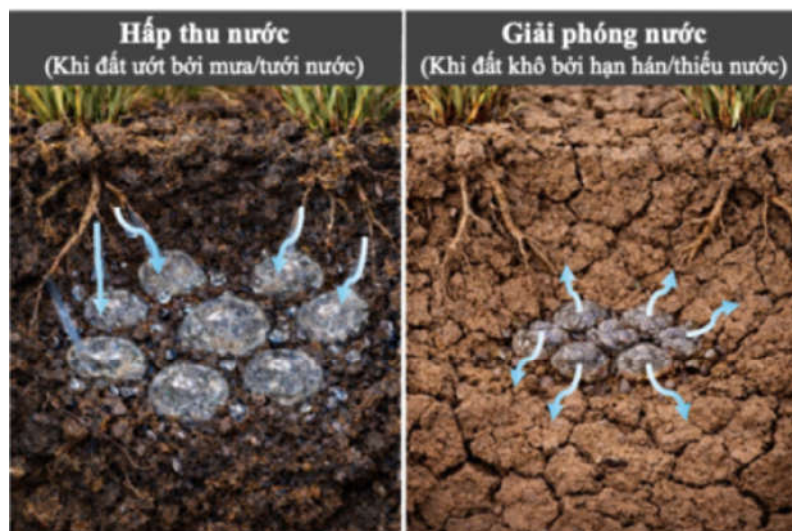
Vật liệu/ hướng sử dụng	Cơ chế tác động chính	Khả năng giữ ẩm	Khả năng nhả chậm	Phân hủy sinh học	Hạn chế chính	Nguồn tham khảo
Than sinh học từ rơm rạ	Tăng độ xốp, tăng hấp phụ, cải thiện giữ dinh dưỡng	Trung bình	Thấp	Rất chậm phân hủy	Không có cơ chế trương nở - nhả nước rõ rệt	[2]
Polymer siêu thấm gốc dầu mỏ	Hấp thụ và giữ nước mạnh	Cao	Cao	Thấp	Nguy cơ tồn lưu lâu dài, có thể phát sinh vi nhựa	[1, 16]
Hydrogel gốc cellulose từ rơm rạ	Mạng lưới polymer ba chiều hấp thụ và nhả chậm nước, hỗ trợ lưu giữ dinh dưỡng	Cao	Cao	Cao	Quy trình chế tạo phức tạp hơn, chi phí cao hơn	[3, 10, 16]

Về cơ chế hoạt động, hydrogel gốc cellulose phát huy tác dụng nhờ cấu trúc mạng lưới polymer ba chiều chứa nhiều nhóm ưa nước, đặc biệt là các nhóm hydroxyl và trong một số trường hợp có thêm nhóm carboxyl sau biến tính. Khi gặp nước, các nhóm chức này liên kết với phân tử nước, làm cho toàn bộ mạng polymer trương nở. Do vật liệu đã được liên kết ngang, hydrogel không bị hòa tan mà chỉ nở ra và giữ lượng nước lớn trong các khoảng rỗng, mao quản nội tại [9]. Các vùng này có thể được xem như những vi khoang trữ nước phân bố trong khối vật liệu. Khi phối trộn vào đất, chúng đóng vai trò tích trữ nước cục bộ quanh vùng rễ.

Khi độ ẩm đất giảm do bốc hơi hoặc do rễ cây hút nước, sự chênh lệch thế nước giữa hydrogel và đất sẽ làm nước được giải phóng dần ra môi trường xung quanh. Nhờ đó, hydrogel không chỉ làm tăng lượng nước giữ lại trong đất mà còn giúp điều hòa quá trình cung cấp ẩm, hạn chế hiện tượng đất khô đột ngột sau tưới hoặc sau mưa [10]. Đồng thời, khi trương nở, vật liệu còn góp phần tăng độ rỗng hữu hiệu, giảm nén chặt cục bộ

và duy trì tốt hơn không gian khí - nước trong vùng rễ. Với diện tích bề mặt lớn và các nhóm chức phân cực, hydrogel cũng có khả năng hấp phụ một phần ion dinh dưỡng, qua đó làm chậm quá trình rửa trôi và góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng phân bón [3].

Một ưu thế quan trọng khác của hydrogel gốc cellulose từ rơm rạ là khả năng phân hủy sinh học khi vật liệu được thiết kế từ nền polymer sinh học và sử dụng các chất liên kết ngang thân thiện môi trường. Sau một thời gian tồn tại trong đất, mạng polymer có thể bị phân giải dần dưới tác động của vi sinh vật và các điều kiện tự nhiên, từ đó hạn chế nguy cơ tồn lưu vật liệu bền vững không mong muốn. Tốc độ phân hủy thực tế còn phụ thuộc vào mật độ liên kết ngang, độ ẩm, pH, nhiệt độ và hoạt động của hệ vi sinh vật đất. Dù vậy, xét trên nguyên tắc thiết kế vật liệu, hydrogel cellulose vẫn có ưu thế rõ hơn so với các polymer siêu thấm có nguồn gốc dầu mỏ ở chỗ không hướng tới sự tồn lưu lâu dài và không làm gia tăng nguy cơ vi nhựa bền trong đất [16].



Hình 2: Cơ chế hấp thụ và nhả nước có kiểm soát của vật liệu hydrogel cellulose

5. Kết luận

Tổng quan cho thấy rơm rạ là nguồn sinh khối lignocellulose dồi dào, có tiềm năng chuyển hóa thành vật liệu cải tạo đất gốc cellulose theo định hướng hóa học xanh và kinh tế tuần hoàn. Từ rơm rạ, cellulose có thể được thu hồi bằng nhiều hướng công nghệ xanh như hơi nước áp suất cao, oxy hóa bằng hydro peroxit, enzyme hoặc dung môi cộng tinh sâu. Đồng thời, lignin và hemicellulose cũng có thể tiếp tục được tận dụng như các dòng đồng sản phẩm.

Trong các hướng nâng cao giá trị phụ phẩm, hydrogel gốc cellulose là một lựa chọn phù hợp cho mục tiêu cải tạo đất nhờ khả năng giữ ẩm, nhả chậm nước, hỗ trợ lưu giữ dinh dưỡng và có tiềm năng phân hủy sinh học khi được thiết kế từ polymer sinh học và chất liên kết ngang thân thiện với môi trường. Vì vậy, vật liệu này đặc biệt có ý nghĩa đối với các hệ canh tác chịu áp lực khô hạn, suy thoái đất hoặc cần nâng cao hiệu quả sử dụng nước.

Trong thời gian tới, nghiên cứu cần tập trung vào tối ưu đồng thời quá trình

thu hồi cellulose và tạo hydrogel, đánh giá rõ hơn hiệu quả kinh tế, đồng thời kiểm chứng hiệu quả vật liệu ở quy mô đồng ruộng. Những kết quả này sẽ góp phần hoàn thiện chuỗi giá trị của rơm rạ và thúc đẩy phát triển các vật liệu cải tạo đất thân thiện với môi trường cho nông nghiệp bền vững tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Buchmann, C., Neff, J., Meyer, M., Bundschuh, M., & Steinmetz, Z. (2024). *Superabsorbent polymers in soil: The new microplastics?*. Cambridge Prisms: Plastics, 2, e5. <https://doi.org/10.1017/plc.2024.2>.
- [2]. Chukwuma, E. C., Anyibuekwu, K. I., Chukwu, O., Ezeubajekwe, K. F., Dukundane, B., Akanwa, A. O. (2026). *Effects of rice straw biochar soil amendment on soil properties and environmental impact of opening burning*. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. <https://doi.org/10.1007/s44447-026-00138-8>.
- [3]. Durpekova, S., Di Martino, A., Dusankova, M., Drohsler, P., & Sedlarik, V. (2021). *Biopolymer hydrogel based on acid whey and cellulose derivatives for enhancement water retention capacity of soil and slow release of fertilizers*. Polymers, 13(19), 3274. <https://doi.org/10.3390/polym13193274>.

- [4]. General Statistics Office [GSO]. (2024). *Niên giám thống kê 2024*. Tổng cục Thống kê Việt Nam. <https://www.gso.gov.vn/nien-giam-thong-ke/>.
- [5]. Iglesias, M. C., Shiviyari, N., Norris, A., Martin-Sampedro, R., Eugenio, M. E., Lahtinen P., Auad M. L., Elder T., Jiang Z., Frazier C. E., Peresin, M. S. (2020). *The effect of residual lignin on the rheological properties of cellulose nanofibril suspensions*. Journal of Wood Chemistry and Technology, 40(6), 370 - 381. <https://doi.org/10.1080/02773813.2020.1828472>.
- [6]. Islam, M., Saini, P., Das, R., Shekhar, S., Sinha, A. S. K., & Prasad, K. (2023). *Rice straw as a source of nanocellulose for sustainable food packaging materials: A review*. BioResources, 18(1), 2351 - 2385.
- [7]. Koupaie, H. E., Dahadha, S., Lakeh, B. A. A., Azizi, A., Elbeshbishy, E. (2019). *Enzymatic pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production - A review*. Journal of Environmental Management, 233, 774 - 784. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.106>.
- [8]. Nasution, H., Harahap, H., Dalimunthe, N. F., Ginting, M. H. S., Jaafar, M., Tan, O. O. H., Aruan, H. K., & Herfananda, A. L. (2022). *Hydrogel and effects of crosslinking agent on cellulose-based hydrogels: A review*. Gels, 8(9), 568. <https://doi.org/10.3390/gels8090568>.
- [9]. Ngo, T. A., Mori, Y., & Bui, T. L. (2024). *Effects of cellulose nanofibers on soil water retention and aggregate stability*. Environmental Technology & Innovation, 33, 103491. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103650>.
- [10]. Ngo, T. A., Nguyen, C. M., Maeda, M., & Mori, Y. (2025). *Cellulose nanofibers boost soil water availability, plant growth, and irrigation water use efficiency under deficit irrigation*. Catena, 248, 108518. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108998>.
- [11]. Pham, T. H. P., Nghiem, T. D., Pham, T. M. T., & Trinh, T. T. (2022). *Emissions Factors of Air Pollutants from Rice Straw Burning-hood Experiments*. VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences, 38(3). <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuues.4848>.
- [12]. Ramos, M., Laveriano, E., San Sebastián, L., Perez, M., Jiménez, A., Lamuela-Raventos, R. M., Garrigós, M. C., & Vallverdú-Queralt, A. (2023). *Rice straw as a valuable source of cellulose and polyphenols: Applications in the food industry*. Trends in Food Science & Technology, 131, 14 - 27. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.020>.
- [13]. Souza, T. V. D., Sousa, J. C., Prado, E. R. L., & Rial, R. C. (2025). *Advances in second-generation biofuel production from rice straw and barley straw*. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. <https://doi.org/10.1002/bbb.70014>.
- [14]. Sunar, S. L., Bhattacharyya, D., Vanniappan, G., & Panda, T. K. (2024). *Green approach on pretreatment of rice straw using deep eutectic solvent for lignin recovery and efficient hydrolysis*. Biomass Conversion and Biorefinery, 14(19), 25981 - 26003. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05634-x>.
- [15]. Tran, M. T., Tran, T. M. T., Nguyen, Q. H., Nguyen, M. H., Cao, T. T. G., Vu, M. Q., Ngo, D. M., & Nguyen, V. B. (2024). *Sức khỏe đất Việt Nam, thực trạng và một số giải pháp*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam, 159(8). <http://tapchivaas.vn/tap-chi/view/116574>.
- [16]. Zhu, J., Zhang, Z., Wen, Y., Song, X., Tan, W. K., Ong, C. N., & Li, J. (2024). *Recent advances in superabsorbent hydrogels derived from agro waste materials for sustainable agriculture: A review*. Journal of Agricultural and Food Chemistry. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c04970>.