

SYNTHESIS OF THERMOSENSITIVE COMPOSITE GEL CONTAINING NANOCOMPOSITE HYDROGEL APPLIED TO EXTINGUISH CLASS A FIRES

Le Ha Giang^{1*}, Duong Anh Thanh¹, Pham Thi Ha My¹, Pham Thi Thu Trang¹,
Quan Thi Thu Trang¹, Nguyen Ha Thanh¹, Pham The Chinh², Nguyen Van Chien², Ngo Quoc Anh¹

¹Institute of Chemistry - Vietnam Academy of Science and Technology

²TNU - University of Sciences

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	15/5/2023	Extinguishing agents are essential firefighting tools in the fight against fires. In this work, a composite gel used to extinguish class A fire is created from methylcellulose, super absorbent polymer and nano bentonite. The composite gel is formed through the hydro bonding between the three components. The composite gel has thermal sensitivity and is used to extinguish wood cribs fires. The results show that the phase transition of the composite gel occurs when the temperature is above 90 °C, increasing its viscosity and adhesion to the surface of the burning material, and acting as a barrier to isolate oxygen from the flame. Small-scale fire extinguishing tests reveal that the composite gel has better fire extinguishing capabilities, cooling time and CO gas adsorption capacity than the water. The sample of composite gel with a nano bentonite content of 0.25 g has the shortest time to completely extinguish the fire (129 s) and emits a CO concentration below 100 ppm.
Revised:	13/6/2023	
Published:	13/6/2023	
KEYWORDS		
Composite gel		
Extinguish class A		
Adsorption		
Nano bentonite		
Superabsorbent polymer		

TỔNG HỢP GEL COMPOZIT NHẠY NHIỆT CHỨA HYDROGEL NANO COMPOZIT ỨNG DỤNG ĐỂ DẬP TẮT ĐÁM CHÁY LOẠI A

Lê Hà Giang^{1*}, Dương Anh Thanh¹, Phạm Thị Hà My¹, Phạm Thị Thu Trang¹,
Quản Thị Thu Trang¹, Nguyễn Hà Thanh¹, Phạm Thế Chính², Nguyễn Văn Chiến², Ngô Quốc Anh¹

¹Viện Hóa học - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

²Trường Đại học Khoa học – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	15/5/2023	Chất chữa cháy là công cụ chữa cháy thiết yếu trong cuộc chiến chống lại đám cháy. Trong nghiên cứu này, một loại gel compozit được sử dụng để dập tắt đám cháy loại A đã được tạo ra bằng cách sử dụng methylcellulose, polyme siêu hấp thụ và bentonit nano. Gel compozit được hình thành thông qua liên kết hydro giữa ba thành phần trên. Gel compozit có tính chất nhạy nhiệt và được ứng dụng để dập tắt đám cháy loại A. Kết quả cho thấy sự chuyển pha của gel compozit xảy ra khi nhiệt độ lớn hơn 90 °C làm tăng độ nhớt, khả năng bám dính vào bề mặt vật liệu cháy và hoạt động như một rào cản cách ly oxy với ngọn lửa. Kết quả thử nghiệm chữa cháy trong quy mô nhỏ cho thấy gel compozit có khả năng chữa cháy, thời gian làm mát và khả năng hấp phụ khí CO đều tốt hơn so với nước. Mẫu gel compozit có hàm lượng nano bentonit 0,25 g có thời gian dập tắt hoàn toàn đám cháy là thấp nhất (129 s) và sự phát thải nồng độ CO dưới ngưỡng 100 ppm.
Ngày hoàn thiện:	13/6/2023	
Ngày đăng:	13/6/2023	
TỪ KHÓA		
Gel compozit		
Dập tắt đám cháy A		
Hấp phụ		
Bentonit nano		
Polymer siêu hấp thụ		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7952>

* Corresponding author. Email: giangnasa86@gmail.com

1. Giới thiệu

Nước đã được sử dụng để dập lửa và ngăn chặn sự lan rộng của đám cháy trong nhiều thế kỷ do nhiệt dung riêng cao, nhiệt ẩn hóa hơi lớn và độ phổ biến của nó [1]. Tuy nhiên, do nước là chất lỏng có độ nhớt thấp nên nước khó bao phủ hoặc thấm sâu vào cấu trúc vật liệu gây cháy mà bị thất thoát theo dòng chảy và gây lãng phí [2]. Để giải quyết sự hạn chế của nước, các nhà khoa học đã cho thêm vật liệu siêu hấp thụ (SAP) vào nước để tạo ra các hỗn hợp có đặc tính phù hợp cho việc ngăn ngừa/dập cháy [3] - [6]. SAP khi trộn với nước sẽ xảy ra quá trình hydrat hóa, các SAP bao bọc các giọt nước trong vỏ giống như bong bóng tạo thành dạng gel. Gel có thể tồn tại từ 24 - 36 giờ và duy trì hiệu quả của nó thông qua việc làm ướt lại bề mặt mà gel còn bám dính. Ngoài ra, gel rất dễ dàng để loại bỏ khỏi bề mặt đã bám dính và chúng có tính thân thiện môi trường. Thành phần chính của gel chữa cháy thương phẩm bao gồm: SAP, chất độn vô cơ, chất hữu cơ, nước; chúng được trộn lẫn vào nhau tạo ra dung dịch có độ nhớt cao và được phun vào các đám cháy bằng các thiết bị chuyên dụng. Tuy nhiên các loại gel truyền thống để đạt hiệu quả dập cháy tốt thường có nhược điểm là độ nhớt cao, dễ gây tắc nghẽn đường ống và khó lưu trữ vận chuyển [7], [8]. Gần đây các SAP nhạy nhiệt được các nhà nghiên cứu quan tâm do tính chất hấp thụ/nhả hấp thụ nước theo nhiệt độ tới hạn (LCST). Nó có tính lưu động mạnh và độ nhớt thấp ở nhiệt độ phòng, đồng thời có thể nhanh chóng giải phóng nước ở nhiệt độ cao và tạo thành keo trên bề mặt vật liệu cháy [9]. Nghiên cứu của Lima đã chuẩn bị một loại SAP nhạy nhiệt trên cơ sở kết hợp methylcellulose (MC), poly acrylic acid và $MgCl_2$ có độ nhớt thay đổi từ 4,256 pas (20 °C) lên 40,858 pas (80 °C) cho hiệu quả dập cháy với đám cháy gỗ đạt 280s. Trong đó $MgCl_2$ hoạt động như là chất xúc tác tạo ra nhiều than và tăng hiệu quả làm mát cho đám cháy. Tuy nhiên, sự phát thải khí, khả năng bám dính gel trong quá trình dập cháy chưa được nghiên cứu đến [3]. Nghiên cứu của Jia Chun-lei sử dụng SAP nhạy nhiệt đi từ Poly(N-isopropylacrylamide/sodium acrylate) kết hợp MC, NaCl có độ nhớt thay đổi từ 1000 mPas (20 °C) lên 5000 mPas (90 °C) cho hiệu quả dập cháy với đám cháy xăng dầu đạt 298s [9]. Tuy nhiên khó triển khai lượng lớn vì tiền chất để tổng hợp lên SAP nhạy nhiệt sử dụng N-isopropylacrylamide (NIPAm) có giá thành cao. Minggao Yu sử dụng SAP nhạy nhiệt đi từ konjac glucomannan kết hợp graphit bóc lớp có LCST đạt 76 °C gel tạo thành từ SAP trên có hiệu quả trong ngăn ngừa và dập tắt các đám cháy từ than, việc sử dụng graphit bóc lớp giúp giảm sự phát thải nồng độ CO từ 1200 ppm xuống 1000 ppm [5]. Tuy nhiên, chưa có nhiều thông tin được đưa ra trong lĩnh vực chữa cháy. Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng MC, SAP và nanobentonite để tạo thành gel compozit nhạy nhiệt ứng dụng để dập tắt đám cháy loại A. Đặc trưng cấu trúc, độ nhớt, độ bám dính, hiệu quả dập cháy và sự phát thải nồng độ CO đã được đề cập đến.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Hóa chất

Methylcellulose (Tianjin, Trung Quốc), Bentonit tinh khiết: 56% MMT, kích thước hạt < 74 µm (Bình Thuận, Việt Nam), Acrylic acid, N, N'-methylene-bisacrylamide (MBA), Potassium peroxydisulfate (KPS), Natri hydroxide (NaOH), Sulfuric acid (H_2SO_4), Nitric acid (HNO_3), Sorbitan oleate (Span80), Polyethylene glycol tert-octylphenyl ether (Triton X-100) đều là hóa chất Trung Quốc được sử dụng trực tiếp không qua quá trình tinh chế lại.

2.2. Tổng hợp vật liệu

2.2.1. Tổng hợp nano bentonite (NB) và hydrogel nano compozit (SAP-NB)

Quy trình tạo NB và SAP-NB từ nguồn sét Bình Thuận trong đó SAP-NB là polymer siêu hấp thụ nước có chứa hạt NB (1% về khối lượng) [10]. Theo đó 100 g bentonit (Bình Thuận) được phân tán trong 300 g hỗn hợp H_2SO_4 2M và HNO_3 2M (tỷ lệ 1:1 về thể tích) thời gian vi sóng 10

phút công suất vi sóng 700W để tạo NB kích thước 200 – 300 nm. Tạo SAP-NB bằng quá trình trùng hợp ghép acrylic acid và NB có mặt chất tạo lưới MBA sử dụng chất khơi mào KPS. Hai sản phẩm NB và SAP-NB được sấy loại nước ở nhiệt độ 110°C sau đó nghiền bi với tỷ lệ 1:4 về khối lượng (vật liệu/bi sắt) thu được hạt dạng micro (<250 μm); sản phẩm bảo quản trong bình kín. Độ hấp thụ trong nước cất của SAP-NB > 300 g/g. Trong đó kích thước hạt được xác định bằng phương pháp sàng cơ học theo báo cáo của Miguel Gil và cộng sự [11]. Độ hấp thụ nước cân bằng xác định theo phương pháp trọng lượng [10].

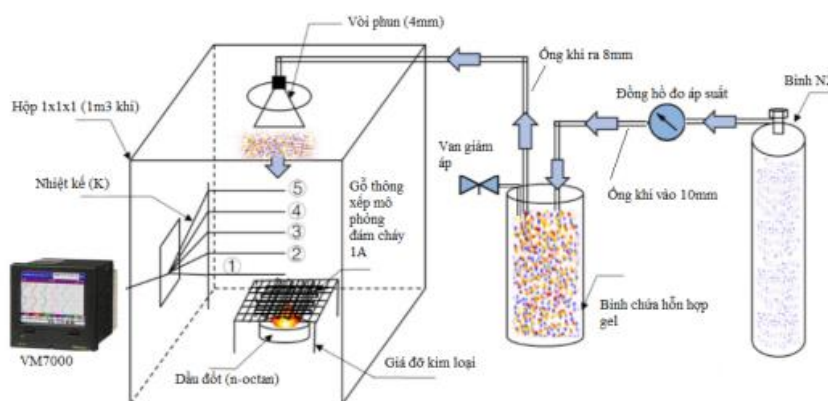
2.2.2. Tổng hợp gel compozit

Cân chính xác khối lượng (0,25 g – 1,0 g) hạt NB rồi phân tán vào nước cất và bổ sung thêm 0,14% Span80, 0,07% Triton X-100 (về khối lượng) sử dụng siêu âm đầu dò CPX500 (500W, 20KHz, USA) trong 30 phút thu được hệ huyền phù chứa hàm lượng NB từ 0,5 - 2,0%. Tiếp theo, phân tán 1,0 g SAP-NB vào 300 mL hệ huyền phù trên và để yên tự hút nước thu được hệ gel A. Gel B được chuẩn bị bằng cách phân tán 13,0 g MC vào trong 1,0 L nước cất tại nhiệt độ 80 °C. Sau đó hạ nhanh xuống nhiệt độ phòng và khuấy đến khi tạo gel nhớt trong suốt. Bảo quản ở nhiệt độ 4 °C cho đến khi sử dụng. Cho từ từ 300 mL gel B vào 300 mL gel A tại nhiệt độ 4 °C sử dụng hệ thiết bị đồng hóa IKA-T10 (tốc độ 7000 v/p, trong thời gian 10 phút). Kết thúc thời gian phản ứng để yên hỗn hợp gel trong 12 h ở nhiệt độ môi trường để loại hết bọt thu được gel compozit. Các mẫu có hàm lượng NB khác nhau thu được ký hiệu là M1 (0,25 g NB); M2 (0,5 g NB) và M3 (1,0 g NB).

2.3. Phương pháp đặc trưng vật liệu

Cấu trúc của gel compozit được đặc trưng trên máy FTIR Shimadzu IRAffinity-1 (Shimadzu Corporation, Nhật Bản) với dải sóng từ 400 – 4000 cm^{-1} . Độ nhớt và sự chuyển pha tại nhiệt độ môi trường đến 90 °C được kiểm tra trên máy RheolabQC (Viện Hóa học). Xác định LCST sử dụng phương pháp DSC trong đó 0,5 g mẫu được hòa tan trong 10 mL nước khử ion, tiếp theo lấy 50 mg đưa vào cốc bọc kín và quét trên máy TGA-DSC/DTA (1600 setram, Pháp) với tốc độ quét 5 °C/phút từ nhiệt độ môi trường đến 90 °C. Kính hiển vi điện tử quét (SEM) đo trên máy S-4800 (FE-SEM, Hitachi). Các mẫu được phủ lớp mỏng platin để tăng độ dẫn. Độ bám dính (Ad%) của gel compozit trên bề mặt gỗ theo phương pháp trọng lượng [12]. Trong đó gỗ thông có kích thước 4cmx4cmx15cm độ ẩm 9-13% (g/g). Nhiệt độ xác định độ bám dính là 90 °C.

2.4. Đánh giá quá trình dập cháy trên hệ gel compozit



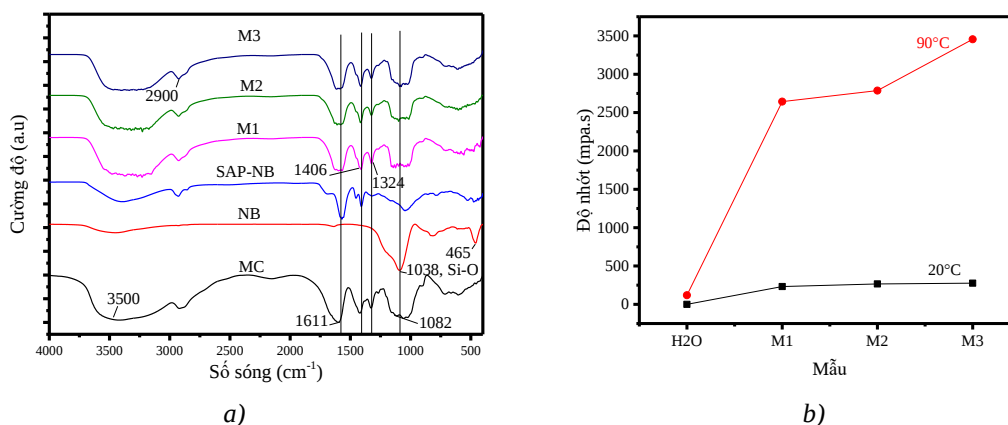
Hình 1. Hệ thiết bị thử nghiệm dập tắt đám cháy loại A quy mô nhỏ

Hệ thí nghiệm chữa cháy quy mô nhỏ (hình 1) được xây dựng theo các tiêu chuẩn về thử nghiệm chữa cháy như: GB4066-2017, GB 17835-2008, ISO 7202-2012, NFPA 17, ANSI/UL 299 đã được mô tả trong các công trình trước đây [3], [13].

Theo đó, gỗ thông mặt cắt vuông (4 cm x 15 cm) (độ ẩm 9% đến 13%) được xếp chồng lên nhau. Một khay đánh lửa có đường kính 8,0 cm và cao 1,5 cm được đặt ngay dưới đồng gỗ. Hệ thống 5 cặp nhiệt độ (T1 – T5) có dải đo đến 1500 °C được thiết lập với khoảng cách mỗi cặp nhiệt độ là 15 cm. Trong mỗi thí nghiệm, lượng gel được nạp vào bình là 2,0 L. Áp suất bình thí nghiệm được thiết kế ở mức 2 - 6 bar với khí đẩy là nitơ, tốc độ dòng phun 0,4 L/ phút. Tiến hành thí nghiệm, 150 mL n-octan được đặt trong khay và châm lửa để gỗ cháy trong 210 s. Sau đó gel được phun vào đám cháy ở góc 30 hoặc 90 độ. Ghi lại thời gian dập cháy và quan sát sự cháy lại trong vòng 5 phút. Sự phát thải khí CO trong quá trình được ghi lại trên thiết bị đo khí Testo 317-3 CO dải đo đến 2000 ppm.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Phổ FTIR và độ nhớt trên các mẫu vật liệu thu được



Hình 2. Phổ FTIR (a), độ nhớt tại 20 °C và 90 °C (b) của các vật liệu

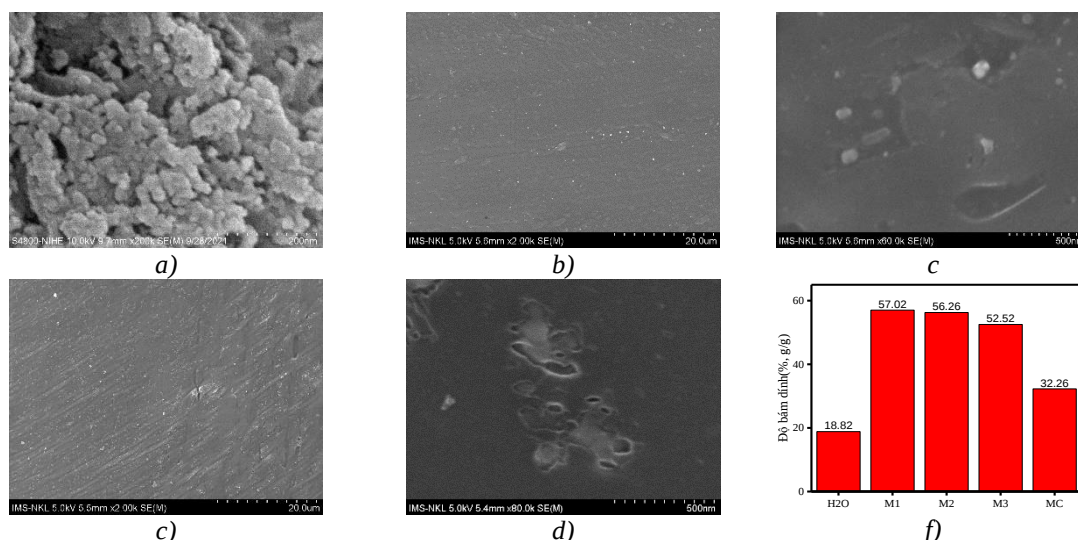
Phổ hồng ngoại của MC, SAP-NB, NB và gel compozit được trình bày ở hình 2a. Kết quả cho thấy với mẫu MC, SAP-NB đều có mặt các nhóm hydroxyl với các đỉnh nằm trong khoảng 3200-3500 cm^{-1} . Các đỉnh phổ nằm ở 2900 cm^{-1} đặc trưng cho liên kết C-H và đỉnh nằm ở 1082 cm^{-1} đặc trưng cho liên kết C-O-C trong MC và SAP-NB. Các đỉnh phổ ở 1324 và 1406 đặc trưng cho dao động uốn cong của nhóm $-\text{CH}_2\text{-O-CH}$ và đỉnh phổ ở 1611 cm^{-1} đặc trưng cho dao động kéo dài C=C trong MC và SAP-NB [3], [14]. Đối với NB xuất hiện các đỉnh phổ đặc trưng tại 1038 cm^{-1} và 465 cm^{-1} đặc trưng cho dao động Si-O trong tứ diện và dao động uốn cong Si-O [10]. Trong phổ FTIR của các mẫu gel compozit đều quan sát thấy các đỉnh đặc trưng của MC, SAP-NB và NB cho thấy sự hình thành liên kết vật lý giữa ba thành phần trên. Tất cả các đỉnh đều có cường độ nhỏ hơn chứng tỏ rằng có một số lượng lớn liên kết hydro được hình thành giữa MC, SAP-NB và NB.

Hình 2b cho thấy độ nhớt của H₂O không phụ thuộc vào nhiệt độ, trong khi đó đối với gel độ nhớt tăng khi nhiệt độ và nồng độ NB tăng. Độ nhớt của mẫu gel tại 20 °C nằm trong khoảng 230 -280 mpa.s. Nhiệt độ LCST của mẫu gel M1 theo phương pháp DSC là 63 °C. Khi nhiệt độ (90 °C) lớn hơn LCST xảy ra sự chuyển pha của hệ thúc đẩy tương tác kỵ nước của các nhóm kỵ nước trong chuỗi phân tử dẫn đến độ nhớt tăng lên (9-10 lần). Độ nhớt tăng lên làm cải thiện tính bám dính của gel với bề mặt vật liệu cháy, tạo ra lớp bảo vệ cách ly oxy và làm mát nhanh đám cháy [3].

3.2. Ảnh SEM

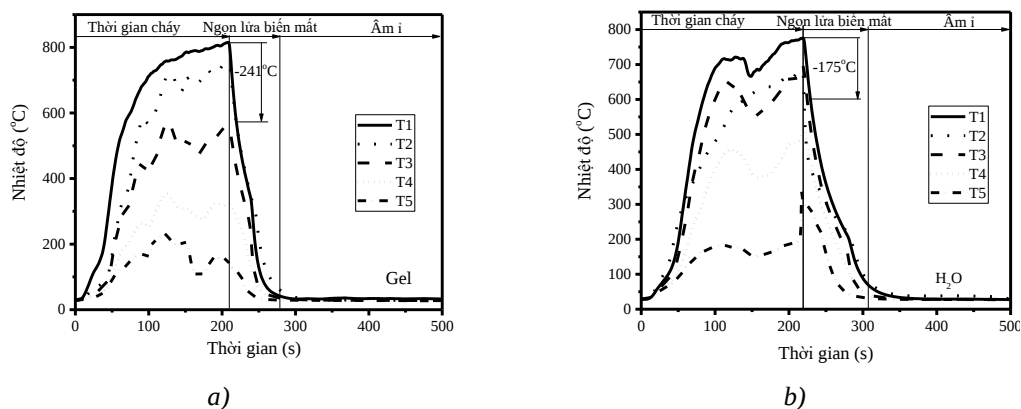
Hình 3 mô tả ảnh SEM và độ bám dính các vật liệu trên gỗ cho thấy hạt NB có kích thước 50 nm và bị kết tập lại thành từng đám có kích thước 200 - 300 nm. Hình 3b, c cho thấy SAP-NB sau khi sấy khô loại nước xuất hiện mao quản nhỏ phân bố không đồng nhất. NB hoạt động trong mạng polymer như một tác nhân liên kết ngang vật lý làm tăng độ xốp và độ nhám của bề mặt

hydrogel thu được [15]. Đối với gel compozit độ nhám bề mặt tăng lên khi có sự phân bố đều giữa 3 thành phần MC, NB và SAP-NB (hình 3d, e). Khi độ nhám bề mặt tăng sẽ làm tăng khả năng bám dính gel trên bề mặt các vật liệu [16]. Kết quả này được chứng minh trên hình 3f, gel compozit cho độ bám dính tốt hơn so với sử dụng nước hoặc MC đơn lẻ. Khi nồng độ NB trong gel compozit tăng độ bám dính giảm là do sự lắng xuống của các hạt NB [17].



Hình 3. Ảnh SEM (a) NB; (b, c)SAP-NB ; (d, e) gel compozit M1 và (f) độ bám dính trên gỗ trên các vật liệu tại nhiệt độ 90 °C

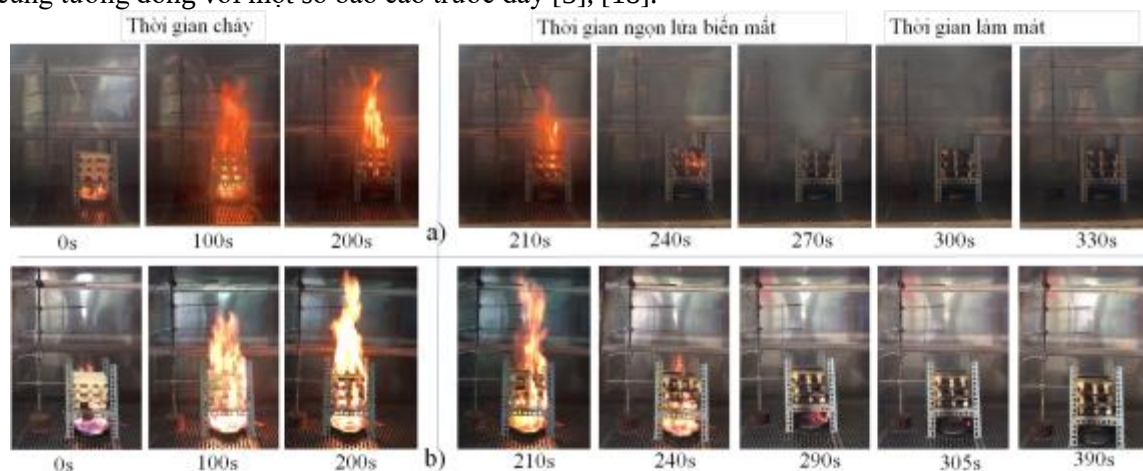
3.3. Đánh giá quá trình dập cháy trên hệ vật liệu gel compozit



Hình 4. Biến thiên nhiệt độ quá trình dập cháy sử dụng gel (M1) (a) và nước (b) trên đám cháy mô phỏng

Sự biến thiên nhiệt độ quá trình dập tắt đám cháy mô phỏng được theo dõi và ghi lại trên hình 4, 5 và bảng 1. Kết quả cho thấy ngọn lửa không bị dập tắt nếu chỉ sử dụng N₂ với áp suất phun 2 bar, điều đó chứng tỏ N₂ không phải là yếu tố chính ảnh hưởng đến sự tắt của ngọn lửa. Hình 4 và 5 cho thấy thời gian dập tắt ngọn lửa của mẫu M1 đều thấp hơn so với H₂O. Khả năng làm mát của gel M1 cũng ưu việt hơn, trong khoảng 10s sau khi bơm gel nhiệt độ đám cháy giảm nhanh (-241 °C) cao hơn so với nước (-175 °C). Dữ liệu từ bảng 1 và hình 5 cho thấy thời gian để dập tắt ngọn lửa đối với nước đạt 85 s và cần 80 s để làm mát đám cháy. Tổng thời gian dập cháy đối với nước là 165 s. Khi sử dụng gel thời gian dập tắt ngọn lửa, thời gian làm mát đều giảm hơn so với nước. Điều này được cho là gel có tính lưu động và độ nhớt lớn hơn nước do đó chúng dễ dàng xâm nhập sâu vào tâm và đáy của đám cháy do đó dễ dàng làm mát và dập tắt đám cháy. Cả 3

mẫu gel đều không quan sát thấy hiện tượng cháy lại sau khi đám cháy đã dập tắt. Kết quả này cũng tương đồng với một số báo cáo trước đây [3], [18].



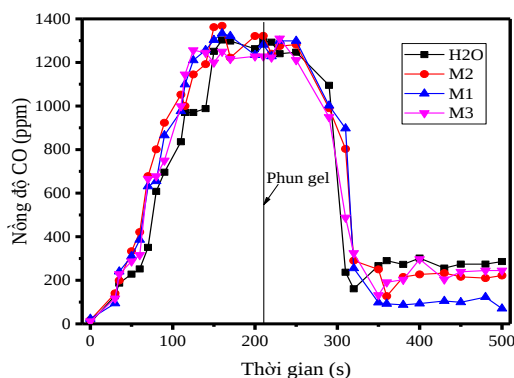
Hình 5. Hình ảnh thực tế quá trình dập cháy bằng gel (M1)(a) và nước (b) trên đám cháy mô phỏng

Bảng 1. Thời gian dập tắt, thời gian làm mát và tổng thời gian dập cháy trên đám cháy mô phỏng (số liệu trung bình sau 3 lần thử nghiệm)

Mẫu	Thời gian dập tắt ngọn lửa (s)	Thời gian làm mát (s)	Tổng thời gian dập cháy (s)
H ₂ O	85	80	165
M1	69	60	129
M2	81	62	143
M3	83	71	154
Nitơ	-	-	-

3.4. Đánh giá sự hấp phụ khí CO trên các mẫu gel compozit

Ảnh hưởng của gel và nước đến sự phát thải CO đã được nghiên cứu, kết quả được đưa ra trên hình 6. Nồng độ CO tăng nhanh khi đốt cháy và ổn định (1300 ppm) sau thời gian đốt cháy > 180s. Khi phun một lượng nước nhất định vào đám cháy nồng độ CO giảm nhanh chóng sau đó tăng lên và ổn định ở 286 ppm. Khi sử dụng cùng một lượng gel để dập cháy nồng độ CO phát thải ổn định ở 222 ppm (M2), 245 ppm (M3) và 70 ppm (M1). Điều này có thể là do gel tạo thành một lớp cách ly oxy với vật cháy làm giảm nồng độ oxy bề mặt. Ngoài ra, trong gel compozit có chứa các hạt nano bentonite có diện tích bề mặt lớn 150 m²/g với thành phần chứa oxit magie, oxit sắt là các chất có khả năng hấp phụ khí CO [10], [19]. Do đó trong cùng điều kiện thử nghiệm sự phát thải CO khi sử dụng gel dập cháy giảm hơn so với sử dụng nước.



Hình 6. Quá trình phát thải khí CO trong quá trình dập cháy sử dụng gel compozit và nước

4. Kết luận

Vật liệu gel compozit đã được tổng hợp từ các thành phần như MC, SAP-NB và NB. Kết quả đặc trưng cho thấy sự hình thành vật liệu compozit thông qua các liên kết hydro giữa các thành phần chứa trong gel. Mẫu gel compozit M1 có tính chất nhạy nhiệt (LCST = 63 °C), độ nhớt, độ bám dính tăng khi nhiệt độ lớn hơn LCST của hệ.

Gel thu được có khả năng dập tắt đám cháy gỗ mô phỏng ở quy mô nhỏ. Trong cùng một điều kiện thí nghiệm các kết quả cho thấy gel M1 có khả năng làm mát nhanh hơn so với nước. Tổng thời gian dập cháy, khả năng hấp phụ khí CO đều tốt hơn so với sử dụng nước để dập cháy.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin cảm ơn Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt nam đã hỗ trợ kinh phí cho công trình này (TĐPCCC.01/21-23).

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] Z. Tang, Z. Fang, J. P. Yuan, and B. Merci, "Experimental study of the downward displacement of fire-induced smoke by water sprays," *Fire Safety Journal*, vol. 55, pp. 35-49, 2013, doi: 10.1016/j.firesaf.2012.10.014.
- [2] N. K. Kim and D. H. Rie, "A study on the fire extinguishing characteristics of deep-seated fires using the scale model experiment," *Fire Safety Journal*, vol. 80, pp. 38-45, 2016, doi: 10.1016/j.firesaf.2016.01.003.
- [3] L. Ma, X. Huang, Y. Sheng, X. Liu, and G. Wei, "Experimental Study on Thermosensitive Hydrogel Used to Extinguish Class A Fire," *Polymers*, vol. 13, no. 3, 2021, doi: 10.3390/polym13030367.
- [4] G. Xiao, F. Li, Y. Li, C. Chen, C. Chen, Q. Liu, and W. Chen, "A novel biomass material composite hydrogel based on sodium alginate," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 648, 2022, Art. no. 129383, doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.129383.
- [5] L. Wang, Z. Liu, H. Yang, H. Li, M. Yu, T. He, Z. Luo, and F. Liu, "A novel biomass thermoresponsive konjac glucomannan composite gel developed to control the coal spontaneous combustion: Fire prevention and extinguishing properties," *Fuel*, vol. 306, 2021, Art. no. 121757, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121757.
- [6] Y. Tang and H. Wang, "Development of a novel bentonite-acrylamide superabsorbent hydrogel for extinguishing gangue fire hazard," *Powder Technology*, vol. 323, pp. 486-494, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2017.09.051.
- [7] X. Ren, X. Hu, D. Xue, Y. Li, Z. Shao, H. Dong, W. Cheng, Y. Zhao, L. Xin, and W. Lu, "Novel sodium silicate/polymer composite gels for the prevention of spontaneous combustion of coal," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 371, pp. 643-654, 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.041.
- [8] Z. Huang, L. Yan, Y. Zhang, Y. Gao, X. Liu, Y. Liu, and Z. Li, "Research on a new composite hydrogel inhibitor of tea polyphenols modified with polypropylene and mixed with halloysite nanotubes," *Fuel*, vol. 253, pp. 527-539, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.152.
- [9] C. L. Jia and K. Tang, "A Temperature-Sensitive Hydrogel for Suppressing Oil Fire," *Advanced Materials Research*, vol. 785-786, pp. 724-728, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.785-786.724.
- [10] G. H. Le, D. A. Thanh, P. T. H. My, T. T. T. Pham, T. T. T. Quan, T. N. Nguyen, Q. K. Nguyen, and Q. A. Ngo, "One-step synthesis of super-absorbent nanocomposite hydrogel based on bentonite," *Materials Research Express*, vol. 10, no. 1, 2023, Art. no. 015001, doi: 10.1088/2053-1591/acaef4.
- [11] M. Gil, E. Teruel, and I. Arauzo, "Analysis of standard sieving method for milled biomass through image processing. Effects of particle shape and size for poplar and corn stover," *Fuel*, vol. 116, pp. 328-340, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.08.011.
- [12] Z. Han, P. Chen, M. Hou, Q. Li, G. Su, J. Meng, B. Shi, and J. Deng, "Modification of Freezing Point for Hydrogel Extinguishant and Its Effect on Comprehensive Properties in Simulated Forest Fire Rescue," *Sustainability*, vol. 14, no. 2, 2022, doi: 10.3390/su14020752.

-
- [13] H. Jiang, Y. Jiang, and R. Fan, "Extinguishing capability of novel ultra-fine dry chemical agents loaded with iron hydroxide oxide," *Fire Safety Journal*, vol. 130, 2022, Art. no. 103578, doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103578.
- [14] Z. Huang, X. Xiao, X. Jiang, S. Yang, C. Niu, Y. Yang, L. Yang, C. Li, and L. Feng, "Preparation and evaluation of a temperature-responsive methylcellulose/polyvinyl alcohol hydrogel for stem cell encapsulation," *Polymer Testing*, vol. 119, 2023, Art. no. 107936, doi: 10.1016/j.polymertesting.2023.107936.
- [15] W.-M. Cheng, X.-M. Hu, Y.-Y. Zhao, M.-Y. Wu, Z.-X. Hu, and X.-T. Yu, "Preparation and swelling properties of poly(acrylic acid-co-acrylamide) composite hydrogels," *Polymers*, vol. 17, no. 1, pp. 95-106, 2017, doi: 10.1515/epoly-2016-0250.
- [16] L. Z. Zhao, C. H. Zhou, J. Wang, D.S. Tong, W.H. Yu, and H. Wang, "Recent advances in clay mineral-containing nanocomposite hydrogels," *Soft Matter*, vol. 11, no. 48, pp. 9229-9246, 2015, doi: 10.1039/C5SM01277E.
- [17] P.K. Sethy, K. Prusty, P. Mohapatra, and S.K. Swain, "Nanoclay decorated polyacrylic acid/starch hybrid nanocomposite thin films as packaging materials," *Polymer Composites*, vol. 40, no. 1, pp. 229-239, 2019, doi: 10.1002/pc.24636.
- [18] Z. Han, Y. Zhang, Z. Du, F. Xu, S. Li, and J. Zhang, "New-type gel dry-water extinguishants and its effectiveness," *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, pp. 590-600, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.005.
- [19] A. Mitra, M. R. Hermes, M. Cho, V. Agarawal, and L. Gagliardi, "Periodic Density Matrix Embedding for CO Adsorption on the MgO(001) Surface," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 13, no. 32, pp. 7483-7489, 2022, doi: 10.1021/acs.jpclett.2c01915.