

Ngày nhận bài: 15/7/2025; Ngày thẩm định: 14/8/2025; Ngày duyệt đăng: 28/10/2025.

ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỐNG CHÁY CỦA MỘT SỐ POLYMER THÔNG DỤNG SỬ DỤNG PHỤ GIA VẬT LIỆU HỮU CƠ KHUNG KIM LOẠI (MOF)

Thượng tá, TS PHAN ANH

Phó trưởng Khoa Phòng cháy, Trường Đại học PCCC

Thiếu tá, ThS ĐỖ NGỌC BÍCH - Đại úy, ThS NGUYỄN HỮU HIỆU

Khoa Khoa học cơ bản và Ngoại ngữ, Trường Đại học PCCC

*Tác giả liên hệ: Nguyễn Hữu Hiệu (Email: hieunh@daihocpccc.edu.vn)

Tóm tắt: Vật liệu hữu cơ khung kim loại (MOF) đang nổi lên như những chất độn cơ kim đa năng, có khả năng cải thiện đáng kể khả năng chống cháy, giảm tỏa nhiệt và ức chế khói cho nhiều loại Polymer kỹ thuật. Bài đánh giá này tóm lược những tiến bộ gần đây trong ứng dụng MOF để bảo vệ an toàn cháy cho các loại nhựa thông dụng, bao gồm cấu trúc, các phương pháp biến tính bề mặt, chiến lược tạo vật liệu lai, và cơ chế hoạt động. Bài viết cũng so sánh hiệu quả chống cháy, đồng thời nêu bật các thách thức và định hướng phát triển MOF thế hệ mới cho vật liệu Polymer an toàn cháy.

Từ khóa: MOF, chất chống cháy, Polymer, Polystyrene, Polyethylene, Polycarbonate.

Abstract: Metal–Organic Frameworks (MOFs) have emerged as multifunctional organometallic fillers capable of significantly enhancing flame retardancy, reducing heat release, and suppressing smoke generation in various engineering Polymers. This review summarizes recent advances in the application of MOFs to enhance the fire safety of common plastics, focusing on their structural characteristics, surface modification methods, hybrid material design strategies, and flame-retardant mechanisms. The article also compares flame-retardant performance and highlights the current challenges and future directions for developing next-generation MOFs for fire-retardant Polymer materials.

Keywords: MOF, flame retardant, Polymer, Polystyrene, Polyethylene, Polycarbonate.

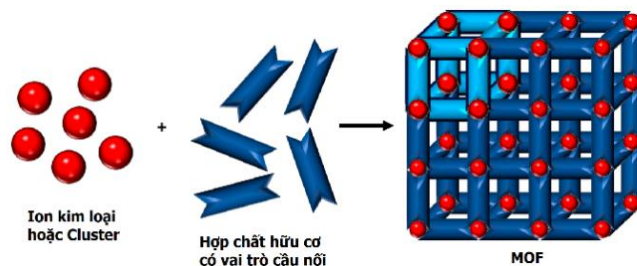
1. Đặt vấn đề

Cháy do vật liệu Polymer gây ra vẫn là mối đe dọa lớn cho an toàn công nghiệp và dân sinh [1]. Trong đó, nhựa Epoxy (EP), Polyurethane (PU), Poly- α -olefin hay Polyester là các loại nhựa được sử dụng tương đối phổ biến nhưng chúng lại có nhược điểm là dễ cháy và khi cháy thường phát thải khói, khí độc. Từ sau lệnh cấm sử dụng các chất chống cháy chứa Halogen từ một số nước (Nghị định thư Montreal 1987), vật liệu vô cơ chứa kim loại ($Mg(OH)_2$, $Al(OH)_3$) và Phosphorus-Nitrogen được quan tâm nhưng còn hạn chế về hiệu suất cũng như lượng khói phát sinh [2]. Sự xuất hiện của vật liệu hữu cơ khung kim loại (MOF) – các mạng tinh thể phối trí kim loại-ligand siêu xốp – mở ra hướng tiếp cận mới nhờ diện tích bề mặt lớn, khả năng điều chỉnh lỗ xốp và thành

phần nguyên tố [3]. Các trung tâm kim loại (Fe, Co, Ni, Cu, Zr...) đóng vai trò xúc tác cho quá trình carbon hoá, trong khi khung hữu cơ giàu C-N-O có thể sinh màng than ổn định ở nhiệt độ cháy. Bên cạnh đó, lỗ xốp MOF hấp phụ khí dễ cháy, giảm nồng độ Oxygen cục bộ và giữ lại khói, khí độc [2]. Giai đoạn 2020-2025 ghi nhận bùng nổ số lượng công trình ứng dụng MOF như chất độn độc lập hoặc chất cộng hưởng trong hệ phòng nổ, đem lại mức giảm tốc độ tỏa nhiệt cực đại (pHRR) tới 80 % [4]. Tuy nhiên, vẫn còn câu hỏi về cơ chế vi mô, tương thích hoá - lý với nền Polymer, cũng như độ bền cơ học-môi trường của vật liệu Composite MOF/Polymer. Bài báo này nhằm lấp khoảng trống đó thông qua tổng hợp và phân tích có hệ thống những kết quả mới nhất trong những năm gần đây.

2. Tổng quan về vật liệu MOF

MOF, còn gọi là vật liệu hữu cơ khung kim loại, là một loại vật liệu tương đối mới với cấu trúc gồm nút kim loại/cluster kim loại liên kết với phối tử hữu cơ đa chức, tạo mạng 3D có cấu trúc tương đối xốp (hình 1). Một số hệ MOF điển hình gồm: ZIF-8 (Zn/2-methyl-imidazolate), ZIF-67 (Co-imidazolate), HKUST-1 (Cu-BTC), MIL-101 (Fe/Cr-BDC) và UiO-66 (Zr-BDC). Một trong những ưu điểm tuyệt vời của MOF là khả năng điều chỉnh tính chất của nó bằng 3 phương pháp, cụ thể: (1) thay đổi kim loại; (2) thay thế/pha tạp phối tử; (3) khắc lỗ hoặc biến tính bề mặt. Vật liệu MOF có thể được phân loại theo nhiều tiêu chí như thành phần kim loại trung tâm (ví dụ: Zr, Fe, Cu), loại phối tử hữu cơ (như: BDC, BTC), hình học cấu trúc (một chiều - 1D, hai chiều - 2D, ba chiều - 3D), phương pháp tổng hợp (thủy nhiệt, vi sóng, cơ học) và đặc tính chức năng (dẫn điện, phát quang, xúc tác, hấp phụ...). MOF được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như lưu trữ và tách khí, cảm biến hóa học, xúc tác dị thể, giải phóng thuốc và lưu trữ năng lượng, nhờ cấu trúc xốp ổn định và khả năng điều chỉnh hóa học linh hoạt. Chính sự thay đổi linh hoạt này giúp các nhà khoa học có thể biến tính MOF theo các mong muốn khác nhau giúp định hướng việc sử dụng vật liệu MOF trong lĩnh vực, trong đó lĩnh vực chống cháy cũng đã được ứng dụng trong những năm gần đây. Các ví dụ về sự biến tính theo mong muốn giúp cải thiện khả năng chống cháy của MOF cho một số Polymer có thể được liệt kê như sau: Sun và cộng sự đã chứng minh biến tính MOF bằng Silan-Hydrophobic giúp tăng độ phân tán trong nhựa, nâng chỉ số Oxygen giới hạn (LOI) của một số loại nhựa nhiệt dẻo (TPU) lên 30 % với chỉ 1% khối lượng chất độn MOF [5]. Song và các cộng sự đã chứng minh, việc cắt liên kết phối trí tại chỗ tạo ra vật liệu MOF bị khuyết tật mạng, giải phóng kim loại hoạt hoá xúc tác cho quá trình than hoá ở 350 – 400°C, tăng hiệu quả chống cháy cho nhựa Epoxy [6]. Bên cạnh đó, lai ghép MOF với vật liệu dạng 2 chiều phẳng (2-D) như Mxene hay Graphene có thể tạo ra một loại vật liệu có cấu trúc kiểu “gạch - vữa” đa bậc, cải thiện đáng kể khả năng cản trở khí và khói độc phát thải ra môi trường khi cháy của vật liệu Polymer [4].



Hình 1: Cấu trúc MOF.

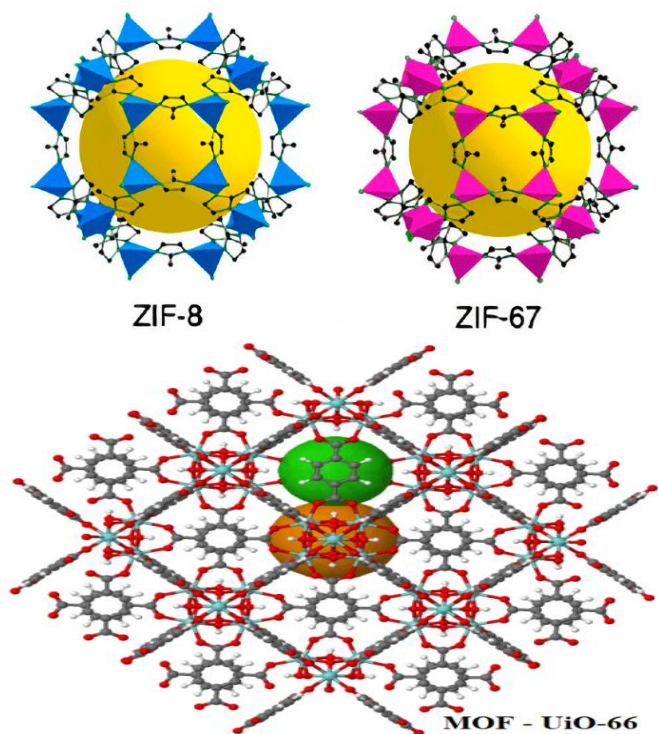
MOF còn được chuyển hoá thành dẫn xuất (oxide, carb-N) thông qua quá trình gia nhiệt nung hoá, điển hình là MOF- Hydroxide lớp kép (Derived Layered Double Hydroxide - LDH). Piao và các cộng sự đã sử dụng MOF-LDH phủ lên xốp Poly Urethane (PU), nhờ đó, vật liệu xốp PU đã đạt khả năng tự dập lửa và độ siêu kỵ nước, đồng thời đáp ứng khả năng phân tách dầu - nước [7]. Một số kết quả này khẳng định MOF không chỉ là “chất độn xốp” mà còn là nền tảng kiến trúc cho các vật liệu đa chức năng ứng dụng trong lĩnh vực vật liệu chống cháy. Khả năng chống cháy cụ thể của một số vật liệu MOF sẽ được trình bày ở phần tiếp theo.

3. Khả năng chống cháy của MOF cho một số loại Polymer

3.1. Nhựa Epoxy

Nhựa Epoxy là một loại nhựa dễ cháy nhỏ giọt, sinh khói đậm đặc. Do vậy, việc xử lý chống cháy cho nhựa này là một yêu cầu bắt buộc. Huang và các cộng sự đã bổ sung vào nhựa Epoxy 2% PNC_o-MOF về khối lượng, đồng thời kết hợp với chất chống cháy Ammonium Polyphosphate (APP) đã hạ pHRR xuống 78% so với ban đầu và đạt UL-94 V-0 [8]. Bên cạnh đó, với sự bổ sung hệ MOF ZIF67@ZIF8/PA - đã được chức năng hoá bằng Phytic Acid, Wang và các cộng sự đã làm giảm tổng năng lượng nhiệt (Total Heat Release - THR) của vật liệu nhựa Epoxy 60% so với ban đầu và giảm tổng lượng khói phát sinh (Total Smoke Production - TSP) 49% so với ban đầu [9]. Một nghiên cứu khác của Zhang và cộng sự (năm 2022) đã phát triển hệ MOF-POSS đa nguyên tố, tương thích tốt với mạng Epoxy, kết quả sau khi thử nghiệm với ngọn lửa là thu được một màng Carbon dày, làm giảm tốc độ tỏa nhiệt cực đại (Peak Heat Release Rate - pHRR) khoảng 27% [10]. Gần đây, Shao và các cộng sự (năm 2025) đã tiến hành pha trộn

vào Epoxy vật liệu MOF - UiO-66 được phủ lên một lớp vật liệu có cấu trúc lõi – vỏ Chitosan@APP bằng phương pháp lắp ráp từng lớp tuần tự. Kết quả thu được rất khả quan, chỉ 2% khối lượng MOF đã giảm pHRR thêm 25% và giảm lượng phát thải CO lên đến 38% [11]. Trong các nghiên cứu này, các tác giả đều chỉ ra cơ chế chống cháy của MOF, các cơ chế chủ đạo gồm: (i) xúc tác khử vòng Epoxy → cấu trúc aromat giàu C, (ii) kim loại Zr/Cu/Co tạo Oxide-Phosphate gia cố lớp tro than, (iii) lỗ trống trong MOF hấp phụ nhỏ giọt oligomer nóng chảy hạn chế nhỏ giọt cháy. Các cơ chế này có được đều do cấu trúc phân tử đặc biệt của các hệ MOF. Một số cấu trúc hệ MOF được dùng chống cháy cho nhựa epoxy được trình bày tại hình 2.

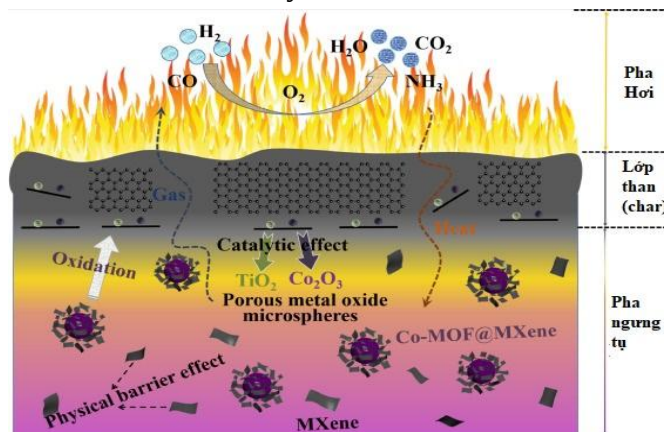


Hình 2: Cấu trúc một số MOF dùng để chống cháy cho nhựa Epoxy.

3.2. Polyurethane (PU)

PU là loại vật liệu có cấu trúc rất xốp, dễ cháy và lan truyền cháy nhanh. Do vậy, PU là vật liệu cần thiết phải được xử lý chống cháy. Shi và các cộng sự (năm 2022) đã thiết kế vật liệu MOF có tên là Co-MOF@MXene lai 2D để thêm vào PU. Kết quả cho thấy, chỉ 3% khối lượng MOF được thêm vào trong PU có thể làm giảm pHRR tới 81% nhờ hiệu ứng che chắn đám cháy kết hợp xúc tác hiệp đồng [12]. Bên cạnh đó, Piao và cộng sự (năm 2023) đã chứng minh MOF-LDH phủ bề mặt vật liệu xốp PU

đã tạo thành một lớp cứng có cấu trúc tương tự gốm dạng nano ngay trên bề mặt xốp PU. Điều này giúp xốp PU đạt được chỉ số Oxygen giới hạn (Limited oxygen index - LOI) 28% và khả năng tự dập tắt ngọn lửa [7]. Các nghiên cứu trên đã gợi ý rằng cấu trúc mạng hờ của PU cho phép MOF phân bố đều, tạo xương than ba chiều liên tục, giúp tăng cường khả năng chống cháy ở mọi phía. Cơ chế chống cháy của Co-MOF@MXene lai 2 chiều (2 Dimensional - 2D trên PU được trình bày tại hình 3.



Hình 3: Cơ chế chống cháy của Co-MOF@MXene lai 2D trên PU.

3.3. Polypropylene (PP) và polyolefin

Polypropylene (PP), đại diện tiêu biểu cho nhóm polyolefin, là loại Polymer có cấu trúc mạch thẳng với tỷ lệ Hydrogen cao và không chứa dị tố, do đó, khi chịu tác động của nhiệt, PP rất khó Carbon hóa và dễ bắt cháy, đồng thời khi cháy thường không hình thành lớp than bảo vệ, khiến quá trình lan truyền ngọn lửa diễn ra nhanh chóng. Để cải thiện khả năng chống cháy cho PP, cần sử dụng các hệ phụ gia có khả năng tạo màng phòng nổ (Intumescent Flame Retardants – IFR), trong đó việc bổ sung thêm chất hiệp đồng (Synergist) nhằm tăng hiệu quả của hệ IFR là một hướng nghiên cứu quan trọng. Trong công trình nghiên cứu của Shen và cộng sự (2022), nhóm tác giả đã tổng hợp và ứng dụng một vật liệu MOF chứa Cobalt có tên Co-BDC (Co^{2+} –Benzene Dicarboxylate) như một chất cộng hưởng hiệu quả cho hệ IFR sử dụng trong nền PP. Khi được kết hợp với hệ IFR truyền thống ở tỷ lệ tổng phụ gia 25% khối lượng, Co-BDC giúp vật liệu PP đạt cấp V-0 trong thử nghiệm UL-94 và giá trị chỉ số Oxy giới hạn (LOI) lên tới 31%, cao hơn đáng kể so với PP nguyên chất [13]. Đặc biệt, vật liệu này làm giảm giá trị pHRR (tốc độ

giải phóng nhiệt cực đại) tới 60%, cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc kiểm soát quá trình cháy. Cơ chế chống cháy chủ yếu của Co-BDC là thông qua việc giải phóng các Ion kim loại Co^{2+} trong quá trình nhiệt phân, đóng vai trò xúc tác cho quá trình Cyclo hóa và Carbon hóa, từ đó thúc đẩy sự hình thành lớp than Graphitic ổn định và có cấu trúc liên tục. Ngoài ra, khung MOF không những góp phần nâng cao hiệu quả của hệ phòng mà còn tạo ra các cặn vô cơ ổn định, giúp duy trì hình dạng và tính liên kết của màng than ở nhiệt độ cao. Kết quả nghiên cứu đã khẳng định rằng MOF-Co-BDC không chỉ tương thích tốt với nền PP và hệ IFR, mà còn là một chất cộng hưởng triển vọng trong việc phát triển các hệ chống cháy hiệu quả và thân thiện với môi trường cho Polyolefin dễ cháy như Polypropylene [13].

3.4. Polyester (PLA, PET)

Đối với nhựa Polylactic Acid (PLA), tính bền nhiệt của nó khá thấp, khiến PLA bắt cháy nhanh và nhanh chóng hút khối do các liên kết Carbonyl thường không bền. Do vậy, loại nhựa này cần phải được xử lý chống cháy thích hợp. Một số chất phụ gia chống cháy thông thường hiếm khi phù hợp với PLA. Tuy vậy, việc sử dụng vật liệu MOF là một hướng đi hứa hẹn cho loại vật liệu này. Một nghiên cứu của Liu và cộng sự công bố năm 2025 đã sử dụng hợp chất $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{Co-MOF}/\text{DOPO}$ lai sinh học sử dụng cho nhựa PLA thu được kết quả rất khả quan. Loại MOF này đã nâng LOI của PLA lên 30%, và giúp PLA đạt mức V-0 trong thử nghiệm UL-94. Đồng thời, nó cũng hạ pHRR xuống 70% so với mức ban đầu [14].

Tương tự, với nhựa Polyethylene Terephthalate (PET), nó cũng là một loại nhựa kém bền nhiệt và tương đối kén chất phụ gia chống cháy. Tuy vậy, với cơ chế chống cháy đa dạng, MOF được coi là có tiềm năng nhất trong các loại phụ gia chống cháy. Điều này đã được chứng minh bởi Sun và các cộng sự (năm 2025). Nhóm của Sun đã dùng vật liệu MOF có cấu trúc Ni-MOF@MXene pha trộn với nhựa PET và thu được kết quả rất khả quan. Kết quả thu được cho thấy, pHRR giảm đến 49% và độ bền cơ học của PET được tăng lên đáng kể nhờ tương tác hydrogen giữa nhóm carboxyl PET và MXene [5].

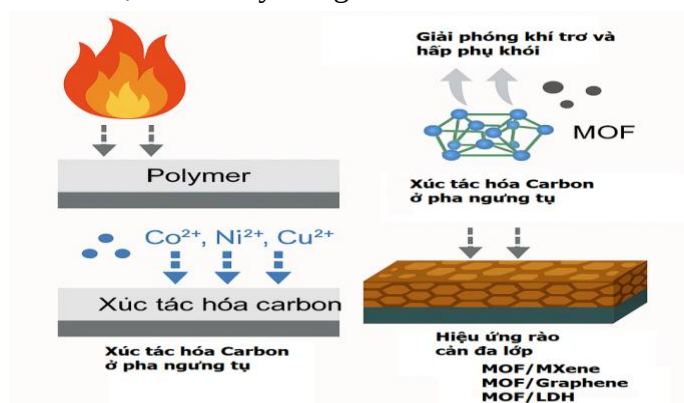
3.5. Polycarbonate (PC)

Trong một nghiên cứu tiêu biểu được thực hiện bởi Hou và các cộng sự vào năm 2023, nhóm nghiên cứu đã thành công trong việc tổng hợp một loại vật liệu MOF chứa ion cerium-phosphate, được gọi là Zr-MOF@CeHPP [15]. Loại MOF lai này được thiết kế bằng cách kết hợp khung Zr-MOF bền nhiệt với các nhóm phosphate giàu cerium (CeHPP), nhờ đó tạo ra một hệ vật liệu không những có khả năng phân tán tốt trong nền Polymer mà còn có đặc tính chống cháy vượt trội. Khi được bổ sung vào nhựa polycarbonate (PC) với tỷ lệ chỉ 2% khối lượng, vật liệu này đã tăng đáng kể khả năng chống cháy của hệ composite thu được. Cụ thể, mẫu PC chứa 2% Zr-MOF@CeHPP đã đạt được cấp V-0 trong thử nghiệm UL-94, là mức cao nhất về khả năng chống cháy nhỏ giọt và lan truyền ngọn lửa. Đáng chú ý hơn, chỉ với một lượng rất nhỏ MOF, giá trị pHRR đã giảm đến 45% so với PC nguyên chất. Điều này cho thấy tác động rõ rệt của MOF đối với khả năng làm chậm cháy và kiểm soát nhiệt lượng sinh ra khi vật liệu bị đốt nóng. Kết quả này được giải thích bằng sự tạo thành pha gồm $\text{CePO}_4\text{-ZrO}_2$ ở 600 - 700°C giúp bền hóa màng than hình thành trên bề mặt vật liệu và hạn chế khả năng nứt vỡ.

4. Cơ chế chống cháy của MOF cho vật liệu Polymer

Khi so sánh các nghiên cứu điển hình về ứng dụng vật liệu MOF làm phụ gia chống cháy cho Polymer, có thể nhận thấy ba cơ chế chính đóng vai trò nổi bật trong việc cải thiện khả năng kháng cháy của hệ vật liệu nền Polymer chứa MOF. Thứ nhất, cơ chế xúc tác Carbon hóa ở pha ngưng tụ, trong đó các ion kim loại chuyển tiếp như: Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} được giải phóng từ khung MOF và phân tán vào nền Polymer khi chịu nhiệt. Các Ion này đóng vai trò xúc tác cho phản ứng khử Hydrogen (Dehydrogen hóa), thúc đẩy quá trình hình thành các cấu trúc vòng thơm bền nhiệt, từ đó tạo nên lớp than dày và ổn định bao phủ bề mặt vật liệu. Đồng thời, sự phân hủy của MOF còn tạo ra các Oxide kim loại có khả năng hình thành lớp gốm vi xốp, giúp cách ly nhiệt và cản trở lan truyền đám cháy nhờ tính chất bền cơ học và ổn định nhiệt cao. Cơ chế thứ hai là giải phóng khí trơ và hấp

phụ khối, xuất phát từ các phối tử giàu Nitrogen (ví dụ: Imidazolate) hoặc chứa Phosphorus (như: Phytic Acid, DOPO) trong cấu trúc MOF. Khi bị nhiệt phân, các phối tử này giải phóng khí trơ như: N_2 và H_3PO_4 , tạo môi trường không cháy xung quanh vật liệu, đồng thời làm loãng nồng độ Oxy và chất dễ cháy trong vùng phản ứng. Không những vậy, đặc tính xốp cao của MOF còn giúp hấp phụ hiệu quả các sản phẩm cháy độc hại như: Toluene, khí CO và bụi mịn ($PM_{2.5}$), từ đó giảm độc tính của khói – một yếu tố quan trọng trong an toàn cháy hiện đại [8,16]. Cơ chế thứ ba là hiệu ứng rào cản đa lớp, trong đó các MOF được lai ghép với các vật liệu hai chiều như: MXene, Graphene hoặc với các Hydroxide lớp kép (LDH) nhằm tạo thành kiến trúc “gạch – vữa” đa tầng. Cấu trúc này hoạt động như một rào cản vật lý hiệu quả, buộc dòng khí và nhiệt trong quá trình cháy phải di chuyển theo đường đi xoắn ốc phức tạp hơn, từ đó làm giảm tốc độ lan truyền ngọn lửa và sự thoát khí dễ cháy [4,12]. Bên cạnh đó, việc biến tính bề mặt MOF bằng các tác nhân như: Silane, Dopamine, Phytic Acid hay kết hợp với hệ Polymer thân thiện như: Chitosan/Ammonium Polyphosphate không chỉ nâng cao tính tương hợp với nền Polymer, mà còn duy trì cơ tính tổng thể của vật liệu Composite, giúp khắc phục nhược điểm giòn, vốn là điểm yếu thường thấy của các chất độn vô cơ. Tổng hợp các cơ chế này cho thấy MOF không đơn thuần là một chất độn chịu nhiệt, mà còn là phụ gia chức năng đa chiều, góp phần đồng thời vào việc kiểm soát quá trình cháy, bảo vệ cấu trúc vật liệu và giảm thiểu nguy cơ độc hại trong quá trình cháy. Tóm tắt các cơ chế chống cháy của MOF được trình bày trong hình 4.



Hình 4: Tóm tắt các cơ chế chống cháy của MOF.

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu trước đây đã được trình bày ở trên, MOF đã chứng tỏ là nền tảng triển vọng để phát triển chất chống cháy thế hệ mới cho Polymer nhờ khả năng thiết kế cấu trúc linh hoạt, xúc tác tạo than và giảm khói độc. Phạm vi ứng dụng trải dài từ Epoxy nhiệt rắn, Polyurethane đàn hồi đến Polyolefin và Polyester phân hủy sinh học. Hiệu quả thực nghiệm cho thấy mức giảm pHRR 50 - 80%, LOI tăng 5 - 10% và đạt hạng V-0 với hàm lượng phụ gia thường dưới 3wt%. Các hướng nghiên cứu tiếp theo bao gồm: (i) công nghệ quy mô lớn tổng hợp MOF giá rẻ; (ii) MOF thông minh tự phục hồi sau cháy; (iii) mô hình hoá đa thang để tiên đoán động học than hoá; (iv) đánh giá độc tính dài hạn của sản phẩm cháy có chứa kim loại nặng. Việc hội tụ giữa hoá học phối trí, khoa học bề mặt và kỹ thuật Polymer hứa hẹn mở ra thế hệ vật liệu an toàn cháy, thân thiện môi trường phục vụ công nghiệp hàng không, điện - điện tử và xây dựng bền vững. ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Irvine, D. J., McCluskey, J. A., & Robinson, I. M. (2000). Fire hazards and some common Polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 67(3), 383–396. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00127-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00127-5)
- Li, J., Zhao, H., Liu, H., Sun, J., Wu, J., & Liu, Q. (2023). Recent advances in metal-family flame retardants: a review. *RSC Advances*, 13, 22639–22662. <https://doi.org/10.1039/D3RA03536K>
- Zhang, J., Li, Z., Qi, X.-L., & Wang, D.-Y. (2020). Recent progress on metal–organic framework and its derivatives as novel fire retardants to Polymeric materials. *Nano-Micro Letters*, 12, 173. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-00497-z>
- Bi, X., Hou, Y., Pan, Y.-T., Huo, S., Shi, C., He, J., & Yang, R. (2024). Metal–Organic Frameworks Meet Two-Dimensional Materials in Polymer Matrices for Flame-Retardant and Sensor Applications. *Small Structures*, e2400611. <https://doi.org/10.1002/smssc.202400611>
- Sun, X., Pan, Y.-T., Wang, W., & Yang, R. (2025). Surface modification of MOF towards flame-retardant Polymer composites. *RSC Applied Interfaces*, 2, 14–24. <https://doi.org/10.1039/D4LF00252K>
- Song, K., Pan, Y., He, J., & Yang, R. (2024). Coordination bond cleavage of metal–organic frameworks and application to flame-retardant Polymeric materials.

Industrial Chemistry & Materials, 2, 556-570.
<https://doi.org/10.1039/D3IM00110E>.

7. Piao, J., Lu, M., Ren, J., et al. (2023). MOF-derived LDH modified flame-retardant polyurethane sponge for high-performance oil–water separation. *Journal of Hazardous Materials*, 444, 130398. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130398>.

8. Huang, J., Yang, X., Zhu, Y., & Wang, G. (2024). Preparation of a cobalt-based metal-organic framework and its application as a synergistic flame retardant in epoxy resins. *ACS Applied Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1021/acsaenm.4c00451>.

9. Wang, H., Li, X., Su, F., Xie, J., Xin, Y., Zhang, W., ... Yao, D. (2022). Core–Shell ZIF-67@ZIF-8 modified with phytic acid as an effective flame retardant for epoxy resins. *ACS Omega*, 7, 21664-21674. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01545>.

10. Zhang, W., Lu, H., Hou, B., & Yang, R. (2022). Multielement flame-retardant system constructed with metal POSS-organic frameworks for epoxy resin. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14, 49326-49337. <https://doi.org/10.1021/acsaami.2c14740>

11. Shao, S., Jin, L., He, S., Feng, Y., & Guo, W. (2025). Construction of CS@APP@UiO-66 through self-assembly as flame retardant and smoke suppressant for epoxy resins. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 19, 25. <https://doi.org/10.1007/s11705-025-2526-5>.

12. Shi, C., Wan, M., Hou, Z., et al. (2022). Co-MOF@MXene hybrids flame retardants for enhancing the fire safety of thermoplastic polyurethanes. *Polymer Degradation and Stability*, 205, 110119. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110119>.

13. Shen, R., Quan, Y., Zhang, Z., Ma, R., & Wang, Q. (2022). Metal–organic framework as an efficient synergist for intumescent flame retardants against highly flammable polypropylene. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61, 7292-7302. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00715>.

14. Liu, Q., Zhao, R., Chen, D., & Zhang, S. (2025). Bio-inspired construction of hydrophobic Mg(OH)₂/Co-MOF/DOPO hybrids for simultaneously improving flame retardancy and mechanical properties of PLA composites. *Chemical Engineering Journal*, 504, 158853. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158853>.

15. Hou, B., Zhang, W., Lu, H., Pan, Y.-T., & Song, P. (2023). Metal-organic frameworks as promising flame retardants for Polymeric materials.

Microstructures, 3, 2023039. <https://doi.org/10.20517/microstructures.2023.37>.

16. Yang, H., Qin, Y., Liang, D., Lu, X., & Gu, X. (2023). Preparation of a novel phosphorus/nitrogen-modified lignin@HKUST-1 flame retardant and its application in epoxy resin. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 12845-12857. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12578-3>.