Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption
Tạp chí xúc tác và hấp phụ Việt Nam

https://jca.edu.vn

# Tổng hợp aluminum phosphate từ xỉ thải nhôm và ứng dụng làm phụ gia chống cháy cho composite nền UPE gia cường sợi

# Synthesis of Aluminum Phosphate from Aluminum Dross and Its Application as a Flame-Retardant Additive for Polymer Composites

Đỗ Thị Thanh Hà[1], Lê Hà Nhật[1], Lê Mạnh Cường[1], Vũ Thị Bình Minh[1,*], Nguyễn Văn Hải[1], Hoàng Lý Hải[1]

[1] *Khoa Vật liệu xây dựng, Đại học Xây dựng Hà Nội, Số 55 Giải Phóng, Đồng Tâm, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*
** Email: minhvtb@huce.edu.vn*

ARTICLE INFO

Received: 26/12/2025
Accepted: 21/01/2026
Published: 30/03/2026

*Keywords:*
$AlPO_4$; flame retardant; aluminium slag waste; polymer composite; unsaturated polyester

ABSTRACT

In this study, an aluminum phosphate–based material (denoted as AlPO) was synthesized from aluminium slag waste and investigated as a flame-retardant additive for unsaturated polyester (UPE) composites reinforced with glass fiber and pineapple fiber. Aluminum dross was first dissolved in NaOH solution, followed by $CO_2$ bubbling to precipitate aluminum hydroxide, which was subsequently reacted with phosphoric acid to form an aluminum phosphate–based material. The synthesized AlPO was incorporated into UPE composites at different loadings, and its effects on curing behavior, flame retardancy, and mechanical properties were evaluated.

XRD analysis indicated that the synthesized AlPO mainly exhibited an amorphous structure, while FTIR spectra confirmed the formation of Al–O–P bonds characteristic of aluminum phosphate–based materials. DSC results revealed that the presence of AlPO retarded the curing reaction of the UPE matrix, leading to a shift of the curing exotherm toward higher temperatures and a reduction in released heat. Flame retardancy tests showed that the incorporation of AlPO effectively improved the fire performance of the composites, with samples containing 8 wt.% AlPO achieving UL94 V-0 classification. Although the addition of AlPO resulted in a reduction in mechanical strength, the composites maintained acceptable mechanical properties at moderate AlPO loadings. These results demonstrate that aluminum phosphate–based material synthesized from aluminum dross is a promising flame-retardant additive for polymer composite applications, while also contributing to the recycling and valorization of industrial aluminum waste.

## Giới thiệu chung

Vật liệu polymer composite hiện được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật nhờ các ưu điểm như khối lượng nhẹ, độ bền cơ học cao và khả năng gia công linh hoạt [4,11]. Tuy nhiên, tính dễ bắt lửa của polymer vẫn là một hạn chế lớn trong các ứng dụng yêu cầu tiêu chuẩn an toàn cháy nghiêm ngặt. Do đó, việc bổ sung các tác nhân chậm cháy là cần thiết nhằm cải thiện khả năng chịu nhiệt, giảm tốc độ cháy và đáp ứng các tiêu chuẩn đánh giá khả năng chống cháy như UL94 [1,8,14].

Trong những năm gần đây, nhiều hướng tiếp cận phát triển chất chậm cháy đã được nghiên cứu, trong đó các hệ chứa photpho và các hệ lai vô cơ–hữu cơ cho thấy

©2026 by the authors. Licensee Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

https://doi.org/10.62239/jca.2025.025

hiệu quả tích cực khi ứng dụng cho nhựa polyeste không no (UPE) [2,3,12,13,15]. Một số công trình đã ghi nhận hiệu ứng hiệp đồng chậm cháy khi kết hợp các hợp chất photpho với các oxit hoặc hydroxide chứa nhôm, điển hình như hệ ammonium polyphosphate kết hợp $Al(OH)_3$ hoặc AlOOH [16–18]. Các hệ này có khả năng cải thiện hành vi cháy của vật liệu, đồng thời được cho là góp phần thúc đẩy sự hình thành lớp bảo vệ trong quá trình cháy, qua đó hạn chế sự lan truyền nhiệt và khí dễ cháy [8,14]. Tuy nhiên, ammonium polyphosphate là phụ gia chứa nitơ, có bản chất và cơ chế khác biệt so với các vật liệu phosphate vô cơ trên cơ sở nhôm.

Song song với đó, các vật liệu aluminum phosphate trên cơ sở nhôm, không chứa amoni, đang thu hút sự quan tâm nhờ tính ổn định nhiệt cao và tiềm năng tương thích với nền polymer. Tuy vậy, phần lớn các nghiên cứu hiện nay vẫn sử dụng nguồn nhôm tinh khiết hoặc hóa chất thương mại, trong khi việc phát triển phụ gia chậm cháy thân thiện môi trường, giá thành thấp và có nguồn gốc từ chất thải công nghiệp vẫn còn rất hạn chế.

Tại Việt Nam, ngành công nghiệp nhôm tạo ra một lượng lớn xỉ thải nhôm hằng năm. Nếu không được xử lý phù hợp, loại chất thải này có thể gây ô nhiễm môi trường đất và nước, chiếm diện tích lưu chứa và tiềm ẩn rủi ro liên quan đến tính kiềm mạnh. Một số nghiên cứu gần đây đã bước đầu sử dụng xỉ thải nhôm để tổng hợp các hệ binder phosphate cho sơn chịu nhiệt hoặc polyaluminium phosphate ứng dụng trong vật liệu vô cơ [19,20]. Tuy nhiên, việc tận dụng xỉ thải nhôm để tổng hợp vật liệu aluminum phosphate trên cơ sở nhôm và ứng dụng làm phụ gia chậm cháy cho composite nền UPE, đặc biệt đối với các hệ gia cường bằng sợi tự nhiên như sợi dứa – một nguồn vật liệu xanh đang được quan tâm [5–7] – vẫn chưa được báo cáo một cách hệ thống.

Xuất phát từ thực tiễn đó, nghiên cứu này tập trung tổng hợp vật liệu aluminum phosphate trên cơ sở nhôm (ký hiệu AlPO) từ xỉ thải nhôm và khảo sát khả năng ứng dụng của vật liệu như một phụ gia chậm cháy cho composite nền UPE gia cường bằng sợi thủy tinh và sợi dứa. Mục tiêu của nghiên cứu là đánh giá ảnh hưởng của AlPO đến hành vi cháy, đặc tính nhiệt và cơ tính của composite, qua đó đề xuất một hướng tái chế chất thải công nghiệp nhằm phát triển phụ gia chậm cháy hiệu quả và thân thiện môi trường theo định hướng kinh tế tuần hoàn.

## Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

### *Thực nghiệm*

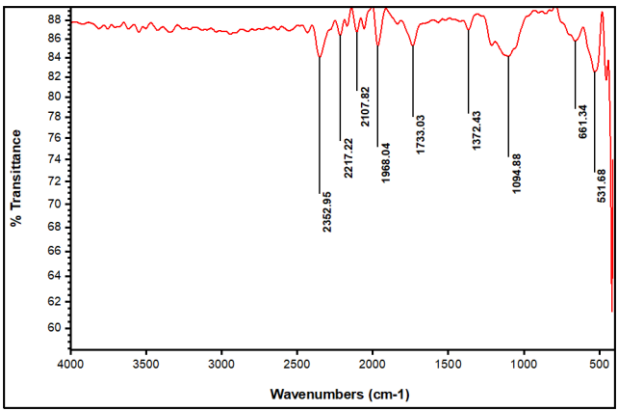
Xỉ thải nhôm (aluminum dross) được thu thập từ cơ sở tái chế nhôm tại huyện Sóc Sơn (Hà Nội). Thành phần hóa học và đặc trưng ban đầu của xỉ thải được xác định bằng các phương pháp XRF, XRD và SEM–EDS. Nhựa nền sử dụng là nhựa polyeste không no (UPE); vật liệu gia cường gồm sợi thủy tinh và sợi dứa. Dung dịch NaOH, khí $CO_2$ và axit phosphoric ($H_3PO_4$) được sử dụng để tổng hợp vật liệu phosphate trên cơ sở nhôm. Các hóa chất được sử dụng trực tiếp không qua tinh chế thêm.

Vật liệu aluminum phosphate trên cơ sở nhôm (ký hiệu AlPO) được tổng hợp từ xỉ thải nhôm bằng cách hòa tan trong dung dịch NaOH 1,5 M ở 70 °C trong 2,5 giờ (khuấy 100 vòng/phút), sau đó lọc thu dung dịch natri aluminat. Khí $CO_2$ được sục vào dung dịch trong 20 phút để kết tủa $Al(OH)_3$, tiếp theo cho phản ứng với $H_3PO_4$ để tạo vật liệu phosphate trên cơ sở nhôm. Do sản phẩm thu được chủ yếu ở trạng thái vô định hình, vật liệu được gọi chung là AlPO thay vì khẳng định pha tinh thể $AlPO_4$. Sản phẩm được lọc, rửa đến trung tính và sấy khô trước khi sử dụng.

Vật liệu composite nền UPE gia cường bằng sợi thủy tinh và sợi dứa được chế tạo bằng phương pháp ép nóng. AlPO được phối trộn vào nhựa nền theo các hàm lượng khảo sát, hỗn hợp được khuấy trộn đồng nhất với chất đóng rắn, sau đó đổ khuôn và ép ở 100 °C trong 10 phút để tạo mẫu thử.

## Kết quả và thảo luận

Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) của vật liệu aluminum phosphate trên cơ sở nhôm (AlPO) tổng hợp được từ xỉ thải nhôm (Hình 1) cho thấy sự xuất hiện của các dải hấp thụ đặc trưng của các vật liệu phosphate.



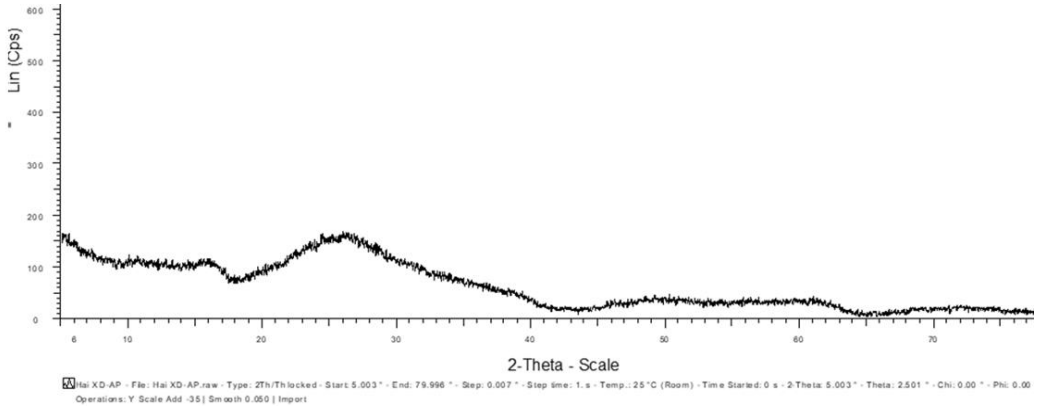

Hình 1. Phổ FTIR của mẫu AlPO

Đỉnh hấp thụ mạnh tại khoảng 1095 $cm^{-1}$ được gán cho dao động kéo giãn bất đối xứng của nhóm $PO_4^{3-}$, đặc trưng cho các hợp chất phosphate. Ngoài ra, các dải hấp thụ tại khoảng 661 $cm^{-1}$ và 531 $cm^{-1}$ có thể liên quan đến dao động của các liên kết Al–O và P–O–Al, cho thấy sự hình thành các liên kết đặc trưng của vật liệu phosphate trên cơ sở nhôm.

https://doi.org/10.62239/jca.2025.025

Bên cạnh đó, phổ FTIR còn xuất hiện dải hấp thụ yếu tại khoảng 1372 $cm^{-1}$, có thể liên quan đến các nhóm hydroxyl hoặc nước hấp phụ trên bề mặt vật liệu. Các tín hiệu yếu trong vùng trên 2000 $cm^{-1}$ được cho là bắt nguồn từ $CO_2$ hấp phụ hoặc các tạp chất carbonate hình thành trong quá trình sục khí $CO_2$. Hiện tượng này thường gặp đối với các vật liệu phosphate tổng hợp trong môi trường nước và kiềm.

Nhìn chung, kết quả FTIR xác nhận sự hiện diện của các nhóm chức phosphate và các liên kết Al–O–P đặc trưng, chứng tỏ quá trình tổng hợp vật liệu aluminum phosphate trên cơ sở nhôm từ xỉ thải nhôm đã diễn ra thành công. Các đặc trưng hóa học này được kỳ vọng sẽ góp phần vào khả năng ổn định nhiệt và cải thiện hành vi chậm cháy của vật liệu composite khi được sử dụng làm phụ gia.




Hình 2. Phổ XRD của mẫu AlPO




Hình 3. Thực hiện thí nghiệm đốt ngang (a) và dọc (b)

Phổ nhiễu xạ tia X (XRD) của vật liệu aluminum phosphate trên cơ sở nhôm (AlPO) tổng hợp được cho thấy sự vắng mặt của các đỉnh nhiễu xạ sắc nét, đặc trưng cho cấu trúc tinh thể, cho thấy vật liệu chủ yếu tồn tại ở trạng thái vô định hình. Hiện tượng này thường gặp đối với các vật liệu aluminum phosphate tổng hợp ở nhiệt độ thấp.

Cấu trúc vô định hình của AlPO được cho là có thể mang lại diện tích bề mặt riêng lớn hơn, từ đó tạo điều kiện thuận lợi cho sự phân tán của phụ gia trong nền polymer và tăng cường tương tác giữa pha vô cơ và nhựa nền. Những đặc điểm này được kỳ vọng sẽ góp phần cải thiện hành vi chậm cháy của vật liệu composite khi AlPO được sử dụng làm phụ gia. Tuy nhiên, khả năng ổn định nhiệt của vật liệu vô định hình so với dạng tinh thể cần được xem xét trong các điều kiện cháy khắc nghiệt hơn.

Kết quả thử nghiệm đốt dọc theo tiêu chuẩn UL94 V được trình bày ở bảng 1.

Bảng 1. Kết quả thử nghiệm đốt

| Mẫu | Thời gian cháy sau đốt lần 1 (giây) | Thời gian cháy sau đốt lần 2 (giây) | Thời gian cháy âm ỉ (giây) | Cấp chống cháy (theo UL 94 – V) |
|---|---|---|---|---|
| MG0 | 10 | 27 | 49 | V-1 |
| MP0 | 12 | 30 | 55 | V-1 |
| MG8 | 5 | 6 | 12 | V-0 |
| MP8 | 9 | 8 | 18 | V-0 |
| MG10 | 2 | 3 | 10 | V-0 |
| MP10 | 5 | 7 | 15 | V-0 |

https://doi.org/10.62239/jca.2025.025

Các mẫu composite không chứa phụ gia aluminum phosphate trên cơ sở nhôm (AlPO) (MG0 và MP0) có thời gian cháy sau khi mồi lửa lần hai trong khoảng 27–30 s và thời gian cháy âm ỉ 49–55 s, tương ứng với cấp chống cháy UL94 V-1.

Khi bổ sung AlPO với hàm lượng 8% và 10%, thời gian cháy sau khi mồi lửa của các mẫu đều giảm xuống nhỏ hơn 10 s, đồng thời thời gian cháy âm ỉ cũng giảm đáng kể. Các mẫu này đạt cấp chống cháy UL94 V-0, cho thấy khả năng tự dập lửa được cải thiện so với các mẫu không chứa phụ gia. So sánh giữa các mẫu có phụ gia cho thấy mẫu chứa 10% AlPO có thời gian cháy và cháy âm ỉ ngắn hơn so với mẫu chứa 8% AlPO.

Như vậy, việc bổ sung aluminum phosphate trên cơ sở nhôm đã nâng cao đáng kể khả năng chống cháy của composite nền UPE, thể hiện qua sự cải thiện cấp UL94 từ V-1 lên V-0. Trên cơ sở kết quả này, hàm lượng 8% AlPO được lựa chọn để tiếp tục đánh giá ảnh hưởng của phụ gia đến tính chất cơ học của vật liệu composite.

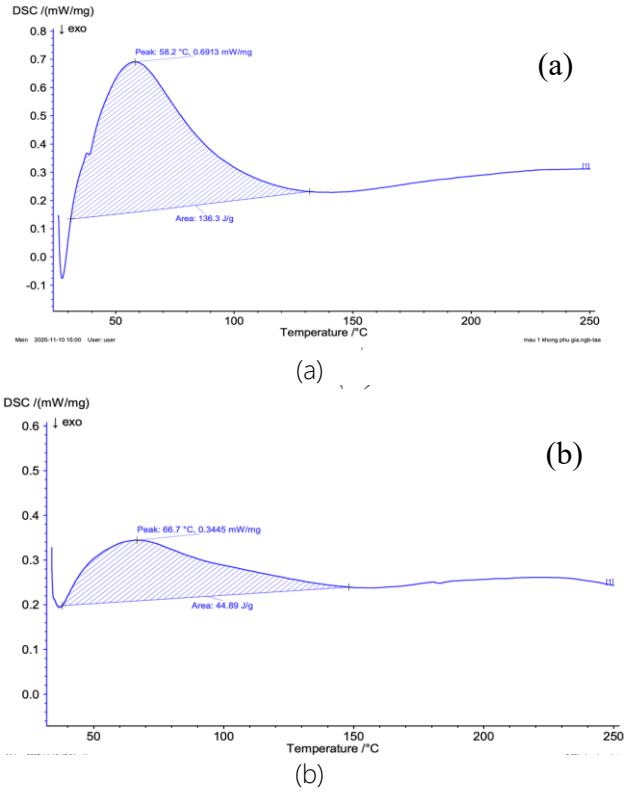
Bảng 2. Độ bền kéo, uốn của vật liệu composite

| Mẫu | Độ bền kéo (MPa) | Độ bền uốn (MPa) |
|---|---|---|
| MG0 | 82,48 | 187,25 |
| MG8 | 68,28 | 173,36 |
| MP0 | 47,07 | 113,36 |
| MP8 | 24,00 | 92,59 |

Kết quả trong Bảng 2 cho thấy việc bổ sung 8% aluminum phosphate trên cơ sở nhôm (AlPO) dẫn đến sự suy giảm nhất định độ bền kéo và độ bền uốn của các mẫu composite nền nhựa UPE gia cường bằng sợi thủy tinh và sợi dứa. Sự suy giảm cơ tính này có thể liên quan đến ảnh hưởng của AlPO đến quá trình đóng rắn của nhựa nền cũng như khả năng tương tác giữa nhựa và sợi gia cường.

Kết quả phân tích DSC cho thấy sự thay đổi rõ rệt trong hành vi đóng rắn của nhựa nền khi có mặt AlPO. Cụ thể, cực đại phản ứng đóng rắn dịch chuyển về phía nhiệt độ cao hơn và nhiệt tỏa giảm, cho thấy quá trình đóng rắn của nhựa polyeste không no bị chậm lại và mức độ phản ứng giảm. Hiện tượng này có thể xuất phát từ sự tương tác giữa bề mặt hạt AlPO với hệ nhựa–chất đóng rắn, làm hạn chế sự khuếch tán của các gốc tự do và cản trở sự hình thành mạng polyme liên kết chéo, từ đó ảnh hưởng đến cơ tính của vật liệu composite.

So sánh các đường cong DSC cho thấy sự thay đổi rõ rệt trong hành vi đóng rắn của nhựa nền khi có mặt phụ gia aluminum phosphate trên cơ sở nhôm (AlPO). Đối với mẫu không chứa AlPO, đường cong DSC xuất hiện cực đại phản ứng đóng rắn tại 58,2 °C với nhiệt tỏa lớn, cho thấy quá trình đóng rắn diễn ra thuận lợi. Khi bổ sung 8% AlPO, cực đại phản ứng đóng rắn dịch chuyển lên 66,7 °C, đồng thời diện tích đỉnh và nhiệt tỏa giảm đáng kể.




Hình 4. Kết quả phân tích DSC của các mẫu vật liệu khi không có (a) và có 8% AlPO (b).

Sự dịch chuyển của cực đại phản ứng đóng rắn về phía nhiệt độ cao hơn cùng với sự suy giảm nhiệt tỏa cho thấy quá trình đóng rắn của nhựa polyeste không no bị chậm lại và mức độ phản ứng giảm khi có mặt AlPO. Hiện tượng này có thể liên quan đến sự tương tác giữa bề mặt hạt AlPO với hệ nhựa–chất đóng rắn, làm hạn chế sự khuếch tán của các gốc tự do và cản trở sự hình thành mạng polyme liên kết chéo.

Những thay đổi trong đặc tính đóng rắn quan sát được từ phân tích DSC phù hợp với xu hướng suy giảm cơ tính của vật liệu composite khi bổ sung AlPO, thể hiện qua độ bền kéo và độ bền uốn thấp hơn so với mẫu không chứa phụ gia. Do đó, khi sử dụng AlPO làm phụ gia chậm cháy cho nhựa polyeste không no, cần xem xét điều chỉnh điều kiện đóng rắn nhằm hạn chế sự suy giảm cơ tính của vật liệu.

## Kết luận

Trong nghiên cứu này, vật liệu aluminum phosphate trên cơ sở nhôm (ký hiệu AlPO) đã được tổng hợp thành công từ xỉ thải nhôm, với hiệu suất thu hồi cao nhất đạt

32,33% tại điều kiện NaOH 1,5 M, nhiệt độ 70 °C, thời gian 2,5 giờ và sục khí $CO_2$ trong 20 phút. Kết quả phân tích cho thấy vật liệu AlPO thu được chủ yếu ở trạng thái vô định hình.

Khi được sử dụng làm phụ gia chậm cháy cho composite nền nhựa polyeste không no (UPE), AlPO với hàm lượng 8–10% đã cải thiện đáng kể khả năng chống cháy của vật liệu, thể hiện qua sự nâng cấp cấp độ UL94 từ V-1 lên V-0. Mặc dù việc bổ sung AlPO dẫn đến sự suy giảm nhất định cơ tính của composite, các mẫu vật liệu vẫn duy trì các tính chất cơ học ở mức chấp nhận được tại hàm lượng phụ gia phù hợp.

Nhìn chung, kết quả nghiên cứu cho thấy vật liệu aluminum phosphate trên cơ sở nhôm tổng hợp từ xỉ thải nhôm là một phụ gia chậm cháy tiềm năng cho composite nền polymer, đồng thời góp phần vào việc tái chế và gia tăng giá trị sử dụng của chất thải công nghiệp theo định hướng phát triển bền vững.

## Lời cám ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE) trong đề tài mã số 33-2026/KHXD

## Tài liệu tham khảo

1. S. Pandey, S. Mishra, J. Mater. Sci. Mech. Eng., 10(1) (2023) 68-73.
2. Y. Xiang, X.M. Tan, L. Han, J. Zhang, L. Chen, S.D. Zhang, J.Z. Xu, Front. Chem., 10 (2022) 1018998. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1018998
3. S.H. Lee, S.H. Kim, J.R. Youn, Y.S. Song, J. Eng. Fibers Fabr., 15 (2020) 1558925020901323. https://doi.org/10.1177/1558925020901323
4. T. Royle, N. Keen, S. Job, Fire Performance of Fibre-Reinforced Polymer Composites, Composites UK Ltd, United Kingdom (2019).
5. M. Asim, M. Jawaid, K. Abdan, M.R. Ishak, Int. J. Polym. Sci., 2015 (2015) 950567. https://doi.org/10.1155/2015/950567
6. S.A. Chukwunwike, O.P. Gbenebor, S.I. Akpan, S.O. Adeosun, J. Mater. Environ. Sci., 10(7) (2019) 647-656.
7. R.M.N. Arib, S.M. Sapuan, M.M.H.M. Ahmad, M.T. Paridah, H.M.D.K. Zaman, Polym. Polym. Compos., 12(4) (2004) 341-348. https://doi.org/10.1177/096739110401200408
8. C.A. Wilkie, A.B. Morgan, Fire Retardancy of Polymeric Materials, CRC Press, New York (2010).
9. A.M. Saat, A.R. Abu Bakar, M.Z. Selamat, M.A. Lajis, ARPN J. Eng. Appl. Sci., 12(4) (2017) 1148-1153.
10. K. Dziuba, M. Masłowski, A. Strąkowska, M. Zaborski, Materials, 16(3) (2023) 1247. https://doi.org/10.3390/ma16031247
11. J.S. Renner, S. Fischer, K. Richter, A. Wolter, Polymers, 13(6) (2021) 941. https://doi.org/10.3390/polym13060941
12. P. Wu, Y. Zhang, J. Liang, G. Zhao, Z. Lu, Coatings, 15(1) (2025) 54. https://doi.org/10.3390/coatings15010054
13. E. Kicko-Walczak, G. Rymarz, J. Polym. Eng., 38(10) (2018) 931-939. https://doi.org/10.1515/polyeng-2017-0448
14. E.D. Weil, S.V. Levchik, J. Fire Sci., 22(6) (2004) 487-510. https://doi.org/10.1177/0734904104043232
15. K. Wazarkar, M. Kathalewar, A. Sabnis, J. Appl. Polym. Sci., 132(23) (2015) 42042. https://doi.org/10.1002/app.42042
16. J. Reuter, B. Schartel, Polym. Degrad. Stab., 178 (2020) 109187. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109187
17. J. Reuter, G. Heitmann, S. Grishchuk, B. Schartel, J. Appl. Polym. Sci., 136(2) (2018) 46927. https://doi.org/10.1002/app.46927
18. M.C. Le, T.D. Nguyen, L.X. Tuyen, T.M. Phan, Polym. Test., 141 (2025) 108620. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108620
19. M.C. Le, N.X. Nguyen, T.D. Nguyen, Vietnam J. Catal. Adsorpt., 14(2) (2025) 33-37. https://doi.org/10.62239/jca.2025.021
20. M.C. Le, N.X. Nguyen, T.D. Nguyen, J. Mil. Sci. Technol., 104 (2025) 87-93. https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.104.2025.87-93