

Khả năng chống cháy của polyurethane xốp được tổng hợp từ PET phế thải với sự hiện diện của phụ gia chống cháy aluminum hydrogen phosphonate

Phạm Trần Thị Ái Trâm, Hoàng Thị Đông Quy

Tóm tắt—Tổng hợp polyurethane xốp (PUf) từ sản phẩm glycol giải PET phế thải đã được nghiên cứu. Với mong muốn nâng cao tính chất chống cháy, khả năng chịu nhiệt, và đáp ứng được yêu cầu cũng như phạm vi ứng dụng của vật liệu, aluminum hydrogen phosphonate (AHP) được tổng hợp và ứng dụng làm phụ gia chống cháy trên nền PUf. Kết quả kiểm tra khả năng chống cháy bằng phương pháp UL-94 cho thấy với sự hiện diện của phụ gia chống cháy AHP đã cải thiện đáng kể khả năng chống cháy của vật liệu; cụ thể UL-94HB đạt chuẩn với vận tốc cháy giảm dần khi tăng hàm lượng AHP và UL-94V đạt chuẩn V-1 với hàm lượng AHP thêm vào 10-15 phr. Bên cạnh đó, một số tính chất khác như độ xốp, tỷ trọng, độ hấp thu nước, và khả năng điều hòa độ ẩm cũng được khảo sát.

Từ khóa—phụ gia chống cháy phi halogen, PU xốp, PET phế thải, phụ gia chống cháy phosphorus, AHP

1 GIỚI THIỆU

Poly(ethylene terephthalate) (PET) là một trong những polymer được sử dụng nhiều nhất, sau khi sử dụng có thể tái chế để tổng hợp các loại vật liệu polymer như polyurethane xốp (PUf) [1] và polyester bất bão hòa (UP). Việc tận dụng nguồn PET phế thải để tái chế tạo polyol nhằm thay thế nguồn polyol từ hóa dầu trong việc tổng hợp PUf cũng được khá nhiều nhà khoa học quan tâm. PUf hiện là vật liệu tiềm năng có khả năng chống va đập và chịu mài mòn tốt, vật liệu cách nhiệt, cách âm... Đó cũng là lý do tại sao PUf đã và đang dần

thay thế các vật liệu truyền thống. Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm trên, PUf là vật liệu có khả năng bắt cháy cao, có chỉ số oxy tới hạn (LOI) tương đối thấp, khoảng 16–18% [2].

Để mở rộng phạm vi ứng dụng, bảo đảm khả năng chống cháy của PUf cũng như góp phần bảo vệ môi trường và an toàn cho người sử dụng, việc thêm vào phụ gia chống cháy trong quá trình gia công vật liệu là rất cần thiết. Hợp chất chống cháy halogen thường được sử dụng do hiệu quả chống cháy cao [3, 4], tuy nhiên, chúng thường sinh ra các sản phẩm độc hại trong quá trình cháy nên hiện nay đã bị hạn chế sử dụng và các nhà nghiên cứu đã sử dụng phụ gia chống cháy thân thiện với môi trường thay thế các hợp chất phụ gia chống cháy halogen. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành tổng hợp và khảo sát khả năng chống cháy của PUf khi có mặt của phụ gia chống cháy aluminum hydrogen phosphonate (AHP).

2 VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

Nguyên vật liệu

Hóa chất được sử dụng bao gồm aluminum nitrate nonahydrate ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), ethylene glycol (EG), kẽm acetate dihydrate ($\text{Zn}(\text{Ac})_2$), natri hydroxide (NaOH) có xuất xứ từ Trung Quốc, dầu Silicone (Việt Nam), methylene diphenyl diisocyanate (MDI, hàm lượng NCO 31,0%; độ nhớt 210mPa.s, tỷ trọng 1,23kg/m³ ở 25°C) sản xuất ở Đức.

*Ngày nhận bản thảo: 28-08-2017; Ngày chấp nhận
đăng: 18-07-2018; Ngày đăng: 30-8-2018*

Phạm Trần Thị Ái Trâm, Hoàng Thị Đông Quy* – Trường
Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM

*Email: htdquy@hcmus.edu.vn

Tổng hợp chất chống cháy aluminum hydrogen phosphonate (AHP)

Hòa tan $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ vào nước và cho vào bình cầu, khuấy đến khi dung dịch trong suốt. Cho từ từ dung dịch $\text{H}_3\text{PO}_3/\text{NaOH}$ vào bình phản ứng. Phản ứng diễn ra trong 12h ở 90°C , kết tủa thu được rửa nhiều lần với nước, đem lọc thu sản phẩm rắn, và sấy ở 80°C đến khối lượng không đổi.

Quy trình glycol giải PET phế thải với Ethylene glycol

Cho hỗn hợp PET phế thải, EG, $\text{Zn}(\text{Ac})_2$ vào bình cầu thủy tinh ba cổ đáy tròn gắn với một nhiệt kế, một máy khuấy cơ, và một van xả khí. Các phản ứng glycol giải xảy ra ở khoảng nhiệt độ $196\text{--}200^\circ\text{C}$ trong môi trường khí N_2 trong 4 giờ. Sản phẩm thu được hòa tan vào nước nóng và lọc nóng bằng phễu Buchner. Dung dịch qua lọc để lạnh thu được bis(2-hydroxyethyl terephthalate) (BHET) kết tinh, rửa lại nhiều lần với nước lạnh, sấy khô sản phẩm đến khối lượng không đổi.

Tạo mẫu PUF/AHP

Đun nóng hỗn hợp BHET, silicone oil, nước thành dung dịch lỏng, tiếp tục cho chất chống cháy AHP vào và khuấy sơ bộ tạo hỗn hợp đồng nhất. Cuối cùng cho MDI vào, khuấy cơ học và ngay lập tức cho vào khuôn đóng có kích thước $150 \times 150 \times 50 \text{mm}^3$, quá trình phản ứng diễn ra trong vài phút. Sau đó mẫu được giữ trong tủ sấy ở 60°C trong 24 giờ.

Thiết bị và phương pháp phân tích

Phổ hồng ngoại (FTIR) thu được từ máy FT/IR-6600 type A, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM. Mẫu được đo truyền qua bằng cách ép viên KBr, sử dụng để định danh nhóm chức của vật liệu.

Kiểm tra khả năng chống cháy của vật liệu với phương pháp Underwriters Laboratories Tests UL-94V và UL-94HB. Mẫu được cắt theo chuẩn ASTM D 3801-96 và ASTM 635-98 lần lượt với kích thước mỗi thanh $127 \times 13 \times 10 \text{mm}^3$ và $125 \times 13 \times 10 \text{mm}^3$ tương ứng với kiểm tra bằng phương pháp UL-94V và UL-94HB.

Cấu trúc lỗ xốp của mẫu vật liệu PUF được quan sát bằng kính hiển vi quang học trên thiết bị XSZ-107T, xuất xứ từ Trung Quốc.

$$\varepsilon_B = 1 - \left(\frac{\rho_B}{\rho_P} \right) \frac{\rho_P - \rho_A \rho_P / \rho_B}{\rho_P - \rho_A} \quad (1)$$

$$\varepsilon_B = \left(100 - \frac{V_{\text{sau}}}{V_{\text{ban đầu}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Với $\rho_A = 1,29 \text{kg/m}^3$ là trọng lượng riêng của không khí, $\rho_P = 1200 \text{kg/m}^3$ là trọng lượng riêng của xốp PU (giá trị giả thiết theo bài báo [5]) và ρ_B là tỷ trọng khối xốp PU. $V_{\text{ban đầu}}$, V_{sau} tương ứng với thể tích ban đầu trước khi nén và sau khi nén.

Tỷ trọng của mẫu được xác định theo tiêu chuẩn EN 323. Tiến hành cắt mẫu có kích thước $30 \times 30 \times 30 \text{mm}^3$ (đo chính xác kích thước bằng thước kẹp) và cân khối lượng m bằng cân phân tích. Tỷ trọng được tính toán theo công thức (3):

$$\rho = \frac{m}{a \times b \times c} \times 100 \quad (3)$$

Khảo sát độ hấp thu nước: chuẩn bị ba mẫu thử cho mỗi vật liệu với phương pháp khảo sát theo tiêu chuẩn EN317 và tiến hành cắt mẫu thành khối hộp vuông cạnh $25 \pm 1 \text{mm}$, cho vào nước cất để ở nhiệt độ phòng. Sau 24 giờ mẫu được lấy ra kiểm tra khối lượng, khảo sát liên tục trong 96 giờ. Độ hấp thu nước được tính theo công thức (4):

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

Với m_1 , m_2 lần lượt tương ứng với khối lượng mẫu trước và sau khi cho vào nước.

Khảo sát độ hút ẩm và giải hấp tối đa của mẫu PU: cắt mẫu thành những thanh nhỏ có kích thước $50 \times 20 \times 10 \text{mm}^3$. Mẫu cho vào môi trường độ ẩm 80%RH và ghi nhận sự thay đổi khối lượng của mẫu đến không đổi. Sau đó chuyển sang môi trường độ ẩm 50%RH và cân mẫu ghi nhận sự thay đổi khối lượng (tương tự trong môi trường độ ẩm 80%RH).

Độ hút ẩm trong môi trường 80%RH và 50%RH lần lượt được tính theo công thức (5) và (6):

$$\% \text{Độ ẩm}_{50\%} = \frac{M_2 - M_1}{M_0} \times 100 \quad (5)$$

$$\% \text{Độ ẩm}_{80\%} = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (6)$$

Với M_1 , M_2 lần lượt là khối lượng mẫu cân được ở độ ẩm 80%RH và 50%RH.

3 KẾT QUẢ VÀ BIỆN LUẬN

Khảo sát hàm lượng tác chất tối ưu tổng hợp Puf

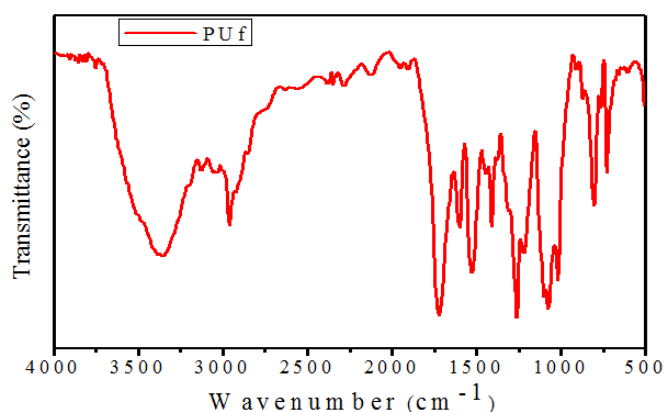


Hình 1. Hình dạng của các mẫu PUF với hàm lượng silicone: A) 3 phr; B) 2 phr

Quan sát Hình 1A và Hình 1B, hình dạng bên ngoài và bên trong của các mẫu PUF với hàm lượng chất hoạt động bề mặt lần lượt là 3phr và 2 phr theo BHET. Khi thêm chất hoạt động bề mặt có sức căng bề mặt thấp vào hệ, có tác dụng làm giảm sức căng bề mặt của hệ và lỗ xốp trở nên đồng đều hơn. Tuy nhiên, với hàm lượng silicone 3phr so với BHET, có thể thấy rằng, mẫu PUF có kích thước lỗ xốp lớn hơn và không đồng đều so với mẫu sử dụng 2phr silicone.

Tổng hợp mẫu PUF

Tiến hành tổng hợp vật liệu PUF với hàm lượng silicone, nước cất lần lượt là 2, và 3 phr so với BHET với thời gian khuấy 35s. Kết quả phân tích phổ hồng ngoại (FT-IR) của PUF từ Hình 2 cho các nhóm chức đặc trưng bao gồm: dao động kéo dãn của N-H ở bước sóng 3380cm^{-1} , dao động kéo dãn C=O của nhóm urethane ở bước sóng 1722cm^{-1} , dao động kéo dãn C-C của vòng thơm, vòng isocyanate ở dao động 1600 ; 1411cm^{-1} , dao động kéo dãn C-O ở bước sóng 1263 và 1221cm^{-1} .



Hình 2. Phổ FT-IR của PUF

Khảo sát tính chất chống cháy

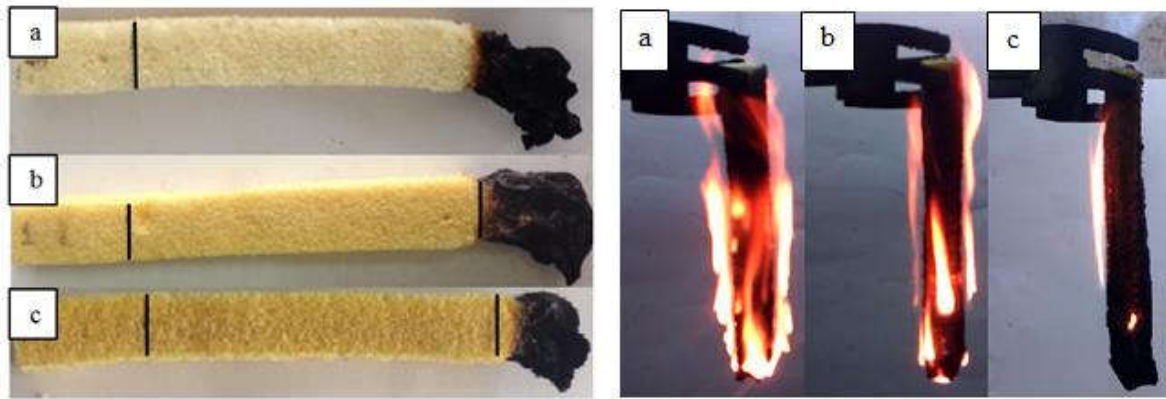
Kết quả khảo sát khả năng chống cháy của PUF và PUF/AHP được thể hiện trong Bảng 1 và Hình 3.

Bảng 1. Kết quả kiểm tra khả năng kháng cháy UL94 V và UL94 HB

| Mẫu | UL94 V | | Kết quả | UL94 HB |
|-----------------------|--------------------|-------|----------------------------------|---------|
| | Thời gian cháy (s) | | | |
| | Lần 1 | Lần 2 | | |
| PUf | 21 | 0 | Không đạt | Đạt |
| PUf/AHP ₁₀ | 16 | 0 | Không đạt (cháy đến giá giữ mẫu) | Đạt |
| PUf/AHP ₁₅ | 12 | 0 | V-1 | Đạt |

Quan sát Bảng 1 và Hình 3, có thể thấy mẫu PUF cháy vượt quá vạch 25 mm, cháy nhiều hơn so với 2 mẫu PUF/AHP còn lại. Các mẫu PUF/AHP với hàm lượng AHP càng tăng có quãng đường cháy ngắn hơn.

Tương tự phương pháp kiểm tra UL-94HB được lần lượt tiến hành kiểm tra khả năng kháng cháy của các mẫu theo phương pháp kiểm tra UL-94V. Có thể thấy, khi tăng hàm lượng phụ gia chống cháy AHP, thời gian cháy lần 1 của các mẫu càng giảm. Bên cạnh đó, các hiện tượng nhỏ giọt hay cháy đến giá giữ mẫu cũng được cải thiện khi sử dụng hàm lượng AHP 15phr so với BHET và đạt chuẩn V-1.



Hình 3. Hình ảnh kiểm tra UL-94HB (trái) và UL-94V (phải) của a) PUF; b) PUF/AHP₁₀; c) PUF/AHP₁₅

Độ xốp và tỷ trọng của vật liệu PUF và PUF/AHP

Tỷ trọng và độ xốp là một trong những yếu tố quan trọng, kiểm soát các tính chất nhiệt, tính chất cơ lý, hình thái học, khả năng hấp thu nước, tính dẫn nhiệt, và có sự ảnh hưởng nhiều nhất khi thay đổi một trong các tác nhân như tác nhân tạo xốp, thời gian khuấy, tỉ lệ giữa polyol và MDI... [7].

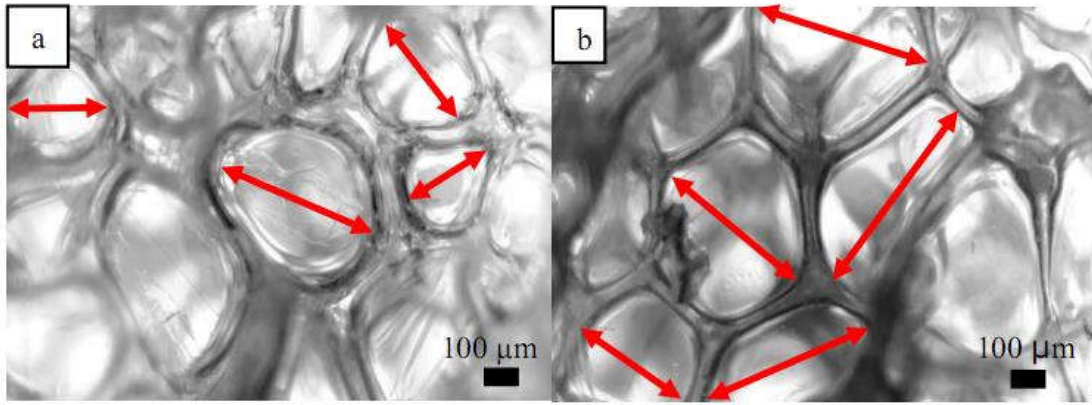
Bảng 2. Giá trị tỷ trọng và độ xốp của PUF, PUF/AHP₁₀, và PUF/AHP₁₅.

| Mẫu | Tỷ trọng (kg/m ³) | Độ xốp (%) |
|-----------------------|-------------------------------|------------------------|
| PUf | 111 | 90 (1,1) 60,4 (1,2) |
| PUf/AHP ₁₀ | 99 | - |
| PUf/AHP ₁₅ | 97 | 92 (1,1) 65,4 (1,2) |

Số liệu của Bảng 2 cho thấy, khi tăng hàm lượng chất chống cháy AHP, tỷ trọng của các mẫu có xu hướng giảm, cụ thể giảm lần lượt 111; 99; 97kg/m³ khi tăng dần hàm lượng AHP từ 0; 10; 15phr AHP. Bên cạnh giá trị tỷ trọng, độ xốp của các mẫu PUF và PUF/AHP₁₅ (mẫu có khả năng kháng cháy tối ưu) cũng được tính toán. Dựa vào kết quả cho thấy, khi tăng hàm lượng phụ gia chống cháy, giá trị độ xốp có xu hướng tăng.

Hình dạng và kích thước lỗ xốp

Để quan sát được hình dạng cấu trúc lỗ xốp các mẫu PUF và PUF/AHP₁₅, các mẫu được chụp dưới kính hiển vi quang học và kết quả thể hiện trong Hình 4.



Hình 4. Ảnh chụp kính hiển vi quang học (x120) a) PUF; b) PUF/AHP₁₅

Hình 4 cho thấy các mẫu PUF có cấu trúc xốp đóng, lỗ xốp tương đối đồng đều, khi bổ sung chất chống cháy AHP vào hệ, kích thước lỗ xốp trở nên lớn hơn. Ước lượng kích thước trung bình của các mẫu PUF và PUF/AHP₁₅ lần lượt khoảng 350µm và 480µm.

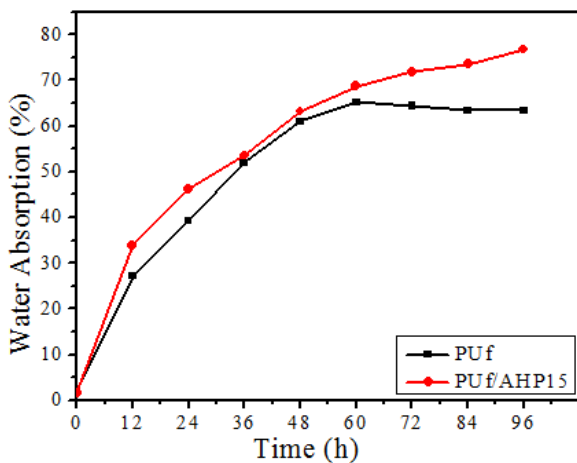
Độ hấp thu nước của vật liệu PUF và PUF/AHP

Để xác định khả năng hấp thu nước của các mẫu PUF và PUF/AHP. Nhóm nghiên cứu tiến hành khảo sát độ hấp thu nước và kết quả thể hiện dưới Bảng 4 và Hình 5.

Kết quả khảo sát độ hấp thu nước của PUF và PUF/AHP₁₅ cho thấy độ hấp thu nước tăng khi sử dụng phụ gia chống cháy AHP với hàm lượng 15 phr. Cụ thể sau 96 giờ, độ hấp thu nước của PUF và PUF/AHP₁₅ lần lượt là 63,31 và 71,80%. Dựa vào kết quả giá trị độ xốp của các mẫu PUF (Bảng 3) và hình ảnh chụp từ kính hiển vi quang học (Hình 5), có thể thấy, lỗ xốp của các mẫu PUF/AHP₁₅ có kích thước lớn hơn so với mẫu PUF. Chính vì vậy, các phân tử nước dễ dàng xen lẫn vào bên trong cấu trúc mẫu RPUFAHP₁₅ dẫn đến độ hấp thu nước cao hơn so với mẫu PUF.

Bảng 4. Độ hấp thu nước (%) của mẫu PUF và PUF/AHP₁₅

| Mẫu | Độ hấp thụ nước (%) | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 giờ | 12 giờ | 24 giờ | 36 giờ | 48 giờ | 60 giờ | 72 giờ | 84 giờ | 96 giờ |
| PUf | 0 | 27,16 | 39,3 | 51,96 | 61,01 | 65,16 | 64,39 | 63,37 | 63,31 |
| Sai số | 0 | 8,63 | 11,23 | 13,3 | 8,68 | 7,09 | 4,09 | 4,72 | 4,87 |
| PUf/AHP ₁₅ | 0 | 33,87 | 46,16 | 53,62 | 63,24 | 68,75 | 71,87 | 73,53 | 76,80 |
| Sai số | 0 | 4,87 | 6,22 | 12,5 | 17,05 | 11,87 | 14,53 | 15,63 | 15,5 |



Hình 5. Đồ thị thể hiện độ hấp thu nước mẫu PUF và PUF/AHP₁₅

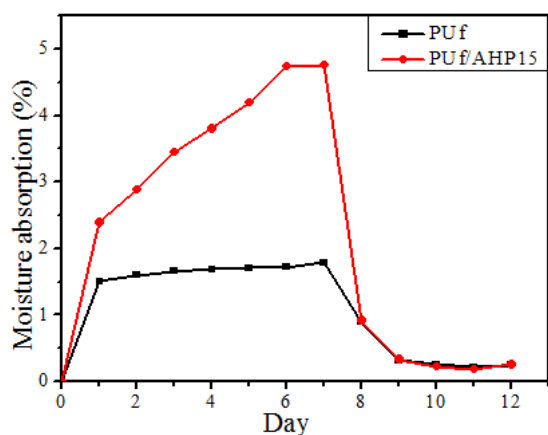
Khảo sát khả năng điều hòa độ ẩm

Tính chất cách nhiệt là một trong những tính chất của PU được ứng dụng rộng rãi. Kết quả thực nghiệm thể hiện ở Bảng 5 và Hình 6, cho thấy, khả năng hấp thu và giải hấp thu độ ẩm của mẫu PUF/AHP₁₅ có xu hướng cao hơn so với mẫu PUF. Sau 7 ngày đầu tiên, phần trăm hấp thu độ ẩm các mẫu PUF và PUF/AHP₁₅ lần lượt là 1,78 và 4,76. Từ ngày 8 đến ngày 12, độ ẩm các mẫu PUF và PUF/AHP₁₅ giảm đáng kể. Sau ngày đầu tiên trong môi trường 50%RH, phần trăm độ ẩm mẫu PUF và PUF/AHP₁₅ giảm lần lượt 50% và 80% tương ứng (so với phần trăm độ ẩm ngày 7). Và sau 12 ngày, phần trăm độ ẩm gần như trở

về 0. Với bản chất mẫu PUF/AHP₁₅ có tỷ trọng hấp thu độ ẩm và giải hấp cao hơn so với mẫu thấp và độ xốp cao hơn mẫu PUF nên khả năng PUF.

Bảng 5. Độ hấp thu ẩm và giải hấp của vật liệu PUF và PUF/AHP₁₅

| Ngày | Độ hấp thu môi trường 80 %RH | | | | | | | Độ hấp thu môi trường 50 %RH | | | | |
|-----------------------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------------------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| PUf | 1,50 | 1,60 | 1,65 | 1,68 | 1,71 | 1,72 | 1,78 | 0,89 | 0,31 | 0,25 | 0,22 | 0,25 |
| PUf/AHP ₁₅ | 2,40 | 2,89 | 3,45 | 3,80 | 4,20 | 4,74 | 4,76 | 0,92 | 0,33 | 0,23 | 0,18 | 0,25 |



Hình 6. Độ hấp thu và giải hấp tối đa của các mẫu PUF và PUF/AHP₁₅

4 KẾT LUẬN

Tổng hợp thành công vật liệu PUF từ PET phế thải, và sử dụng chất chống cháy AHP, là chất chống cháy phi halogen và thân thiện với môi trường, giúp cải thiện và nâng cao khả năng chống cháy của vật liệu PUF. Với hàm lượng AHP 15 phr, mẫu cho kết quả đạt chuẩn UL-94 V-1. Với phương pháp kiểm tra khả năng kháng cháy UL-94 HB, các mẫu PUF và PUF/AHP đều cho kết quả đạt chuẩn HB với vận tốc cháy giảm dần khi tăng hàm lượng phụ gia chống cháy AHP. Với phương pháp chụp ảnh kính hiển vi quang học, cấu trúc lỗ xốp hình cầu với kích thước khoảng 350 μm và 480 μm tương ứng với mẫu PUF và PUF/AHP₁₅. Độ hấp thu nước, độ hấp thu và giải hấp của mẫu PUF/AHP₁₅ có xu hướng cao hơn so với các giá trị của mẫu PUF, tuy nhiên sau 12 ngày, phần trăm độ ẩm của PUF/AHP₁₅ gần như quay trở về giá trị ban đầu.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM), mã số 562-2018-18-02.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Li, J. Luo, Y. Huang, X. Li, T. Yu, M. Ge, "Recycling of waste poly(ethylene terephthalate) into flame-retardant rigid polyurethane foams", *Journal of Applied Polymer Sciences*, vol. 131, pp. 40857–40863, 2014.
- [2] M. Thirumal, D. Khastgir, G.J. Nando, P.Y. Naik, K.N. Singha, "Halogen-free Flame Retardant PUF: Effect of melamine compounds on mechanical, thermal and flame retardant properties", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 95, pp. 1138–1145, 2010.
- [3] H.T.Đ. Quỳ, N.T.T. Hiền, P.T.Th. Linh, "Phụ gia chống cháy phosphor ứng dụng trên nền nhựa polyester bất bão hòa", *Tạp chí Phát triển KH&CN*, vol. 18, pp. 145–152, 2015.
- [4] D. Hoang, J. Kim, B.N. Jang, "Synthesis and Performance of cyclic phosphorus-containing flame retardants", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 93, pp. 2042–2047 (2008).
- [5] A.S. Guelcher, V. Patel, M.K. Gallagher, S. Connolly, E.J. Didier, S.J. Doctor, O. Hollinger, "Synthesis and in vitro biocompatibility of injectable polyurethane foam scaffolds", *Tissue Engineering*, vol. 12, pp. 1247–1259, 2006.
- [6] J.M. Krupers, F.C. Bartelink, J.M. Henri, M. Martin, "Formation of rigid polyurethane foams with semi-fluorinated diblock copolymeric surfactants", *Polymer*, vol. 39, pp. 2049–2053, 1998.
- [7] M. Desroches, M. Escouvois, R. Auvergne, S. Caillol, B. Boutevin, "From vegetable oils to polyurethanes: synthetic routes to polyols and main industrial products", *Polymer Reviews*, vol. 52, pp. 2–96, 2012.

Fireproof behavior of polyurethane foam based on waste poly(ethylene terephthalate) using aluminum hydrogen phosphonate flame retardant

Pham Tran Thi Ai Tram¹, Hoang Thi Dong Quy^{1,*}

University of Science, VNUHCM

*Corresponding author: htdquy@hcmus.edu.vn

Received: 28-08-2017; Accepted: 18-07-2018; Published: 30-8-2018

Abstract—Poly(ethylene terephthalate) is a widely used polymer in the blow molding bottles, electron industry, textile industry and can be recycled to synthesize new materials such as polyurethane foam (PUf) and unsaturated polyester (UP). One of them, PUf has many desirable properties such as low thermal conductivity, low density, excellent dimensional stability, high strength-to-weight ratio, low moisture permeability and low water absorption.

However, PUf is a highly flammable material. In this study, aluminum hydrogen phosphonate (AHP) was synthesized in order to investigate their flame retarding performances for PUf. UL-94 V-1 was obtained at 15 phr loading of AHP. The incorporation of flame retardant increased the fire-resistant property of PUf. In addition, other properties such as density, foam structure, and water and moisture absorption were also investigated.

Keywords—Waste poly(ethylene terephthalate), AHP, Polyurethane foam, Non-halogen flame retardants, Phosphorus flame retardants