

KHẢO SÁT KHẢ NĂNG THAY THẾ POLYOL CỦA DẦU THẦU DẦU TRONG TỔNG HỢP VẬT LIỆU XỐP CỨNG POLYURETHANE TỶ TRỌNG THẤP

Quang Thị Ngọc Anh⁽¹⁾, Nguyễn Thị Bích Thảo⁽¹⁾

(1) Trường Đại học Thủ Dầu Một

Ngày nhận bài 7/12/2023; Ngày gửi phản biện 19/01/2024; Chấp nhận đăng 5/02/2024

Liên hệ email: anhqtn@tdmu.edu.vn

<https://doi.org/10.37550/tdmu.VJS/2024.01.505>

Tóm tắt

Xốp cứng Polyurethane (PU) tỷ trọng thấp được tổng hợp bằng phương pháp nở tự do một giai đoạn, sử dụng dầu thầu dầu như một bio-polyol để thay thế cho polyether polyol truyền thống với chất tạo bọt duy nhất là nước. Ảnh hưởng của hàm lượng dầu thầu dầu thay thế và chất tạo bọt nước đến trọng lượng riêng nở tự do, hình thái bề mặt của xốp và thời gian phản ứng được khảo sát. Cấu trúc liên kết, hình thái và kích thước tế bào bọt kín của xốp cứng PU được đánh giá thông qua phổ FT-IR và ảnh FE-SEM. Nghiên cứu cho thấy dầu thầu dầu có thể thay thế tới 60-70% hàm lượng polyol, xốp cứng PU đạt trọng lượng riêng nở tự do 43,6-45,7kg/m³, mật độ tế bào bọt kín cao với kích thước trung bình của tế bào bọt kín từ 279μm có tiềm năng thay thế được cho polyether polyol truyền thống trong sản xuất xốp cứng PU.

Từ khóa: chất tạo bọt, dầu thầu dầu, polyol sinh học, xốp cứng polyurethane

Abstract

STUDY ON CASTOR OIL AS A POLYOL REPLACEMENT IN PREPARATION OF LOW-DENSITY RIGID POLYURETHANE FOAM

Low-density rigid polyurethane foams (PU) were prepared by the free-rise method using castor oil as bio-polyol to replace traditional polyether polyol and distilled water as a unique blowing agent. The effect of the content of sustained castor oil and distilled water on free rise density, surface morphology, and reaction time of foams were evaluated. The structure characteristics, morphology and closed cell size were determined by FT-IR spectroscopy and FE-SEM analysis. Results indicated that content of castor oil could be replaced up to 60-70% by weight of total polyol in rigid PU foam fabrication with the free rise density of 43,6-45,7kg/m³, high closed cell distribution with the closed-cell average size of around 279μm. The results could bring a potential alternative to traditional polyether polyol in PU foam production.

1. Đặt vấn đề

Trong các loại vật liệu cách nhiệt, xốp cứng Polyurethane (PU) được xem là vật liệu cách nhiệt vượt trội và tối ưu nhất hiện nay. Xốp cứng PU được sử dụng rất nhiều trong các ứng dụng cách nhiệt khác nhau tùy thuộc vào tỷ trọng và cơ lý tính của chúng (Vladimir và nnk., 2021; Moyeenuddin và nnk., 2018; Nuno và nnk., 2018). Tuy nhiên, hạn chế lớn nhất của ngành công nghiệp PU đang gặp phải là phần lớn các sản phẩm cách nhiệt xốp cứng PU trên thị trường hiện nay đều sử dụng nguồn nguyên liệu không thân thiện với môi trường.

Hai thành phần chính tổng hợp xốp cứng PU là Polyether polyol và Polyisocyanate đều là các sản phẩm có nguồn gốc từ dầu mỏ. Ngoài ra, hai tác nhân tạo bọt được sử dụng trong công nghiệp sản xuất xốp PU là chất tạo bọt vật lý và chất tạo bọt hoá học. Chúng đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành cấu trúc lỗ xốp và hiệu quả cách nhiệt. Trong đó, tác nhân tạo bọt vật lý thường là các hợp chất dễ bay hơi và có hệ số dẫn nhiệt thấp (Vladimir và nnk., 2021). Hiệu quả cách nhiệt của xốp cứng PU phụ thuộc chủ yếu vào hệ số dẫn nhiệt của các tác nhân tạo bọt vật lý. Phần lớn các nhà máy sản xuất vật liệu cách nhiệt PU hiện nay đều đang sử dụng các hợp chất halogen-free như hydrocarbons (n-pentane, cyclo pentane) là thế hệ tạo bọt thứ ba thân thiện với môi trường hơn các hợp chất chlorofluorocarbons (CFCs) đã bị cấm sử dụng theo nghị định thư Montreal vì làm suy giảm tầng ozon (Vladimir và nnk., 2021). Tuy nhiên, các hợp chất hydrocarbons này dễ cháy nên cần yêu cầu nghiêm ngặt về thiết bị chứa và độ an toàn nhà xưởng khi sử dụng.

Việc tìm kiếm nguồn nguyên liệu thay thế thân thiện với môi trường đang nhận được sự quan tâm rất lớn từ các nhà cung cấp hoá chất cũng như trong lĩnh vực khoa học. Nhiều nghiên cứu tập trung phát triển bio-polyol từ các nguồn nguyên liệu tái tạo như bã sinh khối, dầu thực vật hoặc các sản phẩm phụ công nghiệp (Moyeenuddin và nnk., 2018; Nuno và nnk., 2018). Với ưu điểm là nguồn nguyên liệu dồi dào và rẻ tiền, độc tính thấp, có khả năng phân huỷ sinh học, dầu thực vật đang trở thành nguồn tài nguyên tái tạo quan trọng để thay thế cho Polyether polyol trong lĩnh vực sản xuất PU (Nuno và nnk., 2018). Một số loại dầu thực vật điển hình như dầu đậu nành (Chu và nnk., 2014), dầu cọ (Chuayjuljit và nnk., 2010), dầu hạt cải (Uldis và nnk., 2013), dầu thầu dầu (Lee và nnk., 2021) được sử dụng như một bio-polyol trong tổng hợp PU với nhiều ứng dụng khác nhau, tuy nhiên ngoại trừ dầu thầu dầu, đa số các loại dầu thực vật đều cần thêm bước biến tính để đưa nhóm hydroxyl vào mạch phân tử trước khi sử dụng làm nguyên liệu thay thế cho polyether polyol (Atika và nnk., 2021).

Dầu thầu dầu được biết đến là một triglyceride chiết xuất từ hạt của cây thầu dầu (*Ricinus communis*), hàm lượng chứa tới 90% axit Ricinoleic là một loại axit béo tự nhiên duy nhất có sẵn nhóm hydroxyl bậc hai trong mạch phân tử (Vinay và nnk., 2016). Là nguồn năng lượng tái tạo giá rẻ với ưu điểm vượt trội so với các loại dầu thực vật khác, dầu thầu dầu đang nhận được sự quan tâm lớn trong nhiều lĩnh vực như sơn phủ, chất đàn hồi, chất kết dính, xốp polyurethane (Uldis và nnk., 2012). Dầu thầu dầu có thể sử dụng trực tiếp như một polyol sinh học hoặc biến tính bằng phương pháp epoxy hoá, khử nước, nhiệt phân hoặc thủy phân... để tăng giá trị nhóm hydroxyl (Ntsako và nnk., 2019).

Trong nghiên cứu này, dầu thầu dầu được sử dụng trực tiếp mà không cần qua công đoạn biến tính để khảo sát khả năng thay thế cho nguyên liệu polyether polyol truyền thống. Glycerol góp mặt như chất tạo liên kết ngang nhằm làm tăng giá trị nhóm hydroxyl của polyol sinh học có giá trị hydroxyl thấp như dầu thầu dầu (Atika và nnk., 2021). Đồng thời, nghiên cứu không sử dụng các chất tạo bọt vật lý có nguồn gốc từ hydrocacbon như các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước mà chỉ sử dụng nước như chất tạo bọt hoá học duy nhất để thân thiện với môi trường hơn.

2. Hóa chất và phương pháp nghiên cứu

2.1. Hóa chất

Dầu thầu dầu (tỉ trọng 0,96g/cm³, chỉ số iodine 92) và Glycerol được cung cấp từ VWR-Prolabo (Pháp). Polyether polyol EXCENOLE (chỉ số hydroxyl –OH = 400) được mua từ AGC Chemicals Asia Pacific (Singapo). Polymeric 4,4-diphenylmethane diisocyanate MR-200 PMDI (chỉ số cyanate -NCO = 31%) được cung cấp từ NIPPON Polyurethane Industry (Nhật Bản). Xúc tác DABCO 33Lv và N, N-Dimethylethanolamine (DMEA) được cung cấp từ Hàn Quốc. NIAX Silicon L6900 của COIM ASIA PACIFIC, Tris (cloroethylphosphate) (TCEP) của BM BEHN MEYER đóng vai trò lần lượt là chất hoạt động bề mặt và chất chống cháy. Nước cất hai lần sử dụng với vai trò là chất tạo bọt hoá học.

2.2. Quy trình tổng hợp xốp cứng PU nở tự do

Xốp cứng PU được chế tạo bằng phương pháp nở tự do một giai đoạn. Hỗn hợp polyol gồm dầu thầu dầu (CO), Glycerol (G), Excenol (EX) được khảo sát ở các tỉ lệ % khối lượng khác nhau như Bảng 1, trong đó Glycerol giữ ở tỉ lệ cố định là 20%. Nước đóng vai trò là chất tạo bọt duy nhất được khảo sát ở tỉ lệ 2%-5%. Hỗn hợp polyol được phối trộn ở các tỉ lệ khảo sát như Bảng 1 trong 30 phút với tốc độ khuấy 1000 vòng/phút. Sau đó, PMDI được cho vào hỗn hợp polyol và khuấy mạnh ở tốc độ 3000 vòng/phút trong 30-35 giây. Xốp cứng PU được nở tự do trong cốc nhựa 500ml, sau đó để ổn định ít nhất 24 giờ tại nhiệt độ phòng để mẫu lưu hoá hoàn toàn trước khi tiến hành phân tích.

Bảng 1. Thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng CO và H₂O trong tổng hợp xốp PU

Mẫu TN	Excenol (%)	Dầu thầu dầu (%)	Glycerol (%)	DABCO/DME A (3/1) (%)	NIAX (%)	TCEP (%)	H ₂ O (%)
M1	100	0	0	2	2	2	2-5
M2	70	10	20				
M3	60	20	20				
M4	50	30	20				
M5	40	40	20				
M6	30	50	20				
M7	20	60	20				
M8	10	70	20				
M9	0	80	20				

2.3. Thông số thời gian phản ứng của quá trình tổng hợp xốp cứng PU

Cream time (thời gian tạo kem): thời gian tính từ thời điểm khuấy trộn hỗn hợp hai thành phần đến khi hỗn hợp có dạng khối kem. Trong nhiều trường hợp có thể dễ dàng nhận thấy sự thay đổi màu sắc của hỗn hợp phản ứng.

Gel time (thời gian gel hoá): thời gian tính từ thời điểm khuấy trộn đến khi hỗn hợp phản ứng bắt đầu chuyển từ trạng thái lỏng sang rắn. Thời điểm gel hoá được xác định bằng cách nhúng que gỗ sâu vào khối xốp khoảng 1-2cm và thấy có hiện tượng kéo sợi. Đến thời gian này phản ứng xem như đã xảy ra được 50%.

Tack-free time (thời gian không dính): sau thời gian gel hoá, tốc độ xốp cứng nở chậm dần. Thời gian không dính tính từ thời điểm khuấy trộn đến khi chạm nhẹ đầu ngón tay vào bề mặt xốp cứng không thấy dính.

Rise time (thời gian nở): thời gian tính từ thời điểm khuấy trộn đến khi xốp cứng hoàn toàn ngừng nở.

Curing time (thời gian lưu hóa): xốp cứng sẽ lưu hóa hoàn toàn sau 24 giờ.

2.4. Phương pháp nghiên cứu

Trọng lượng riêng nở tự do (FRD) của xốp cứng PU được xác định dựa theo tiêu chuẩn ASTM 1622-20, theo đó lấy giá trị trung bình trọng lượng riêng của ít nhất ba mẫu đo được cắt từ lõi của mẫu xốp với kích thước mỗi mẫu đo khoảng $2 \times 2 \times 2$ cm. Hình thái bề mặt và sự phân bố kích thước tế bào bọt kín được quan sát bằng máy FE-SEM S4800 Hitachi, Nhật Bản. Kích thước bọt kín được xác định bằng phần mềm Image J dựa trên ảnh SEM, đo ngẫu nhiên kích thước của ít nhất 25 tế bào bọt kín và lấy giá trị trung bình. Phổ FTIR được ghi nhận từ máy Jasco FT/IR-6600 với bước sóng quét từ $500-4000\text{cm}^{-1}$ để đánh giá liên kết của phân tử dầu thầu dầu trong mạng lưới xốp cứng PU.

3. Kết quả và thảo luận

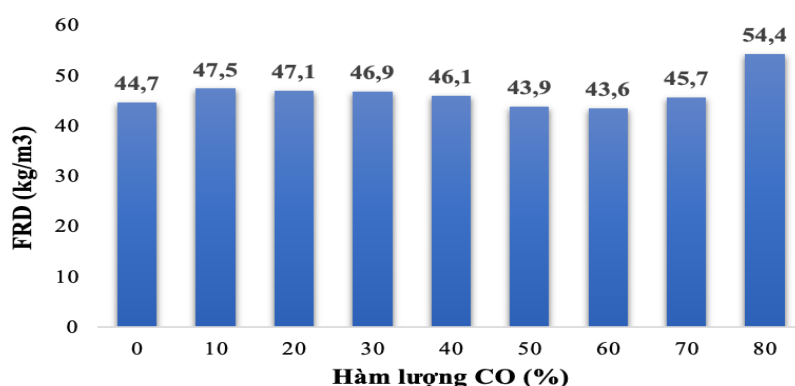
3.1. Khảo sát tỉ lệ thay thế của dầu thầu dầu trong tổng hợp vật liệu xốp cứng PU nở tự do

Hàm lượng dầu thầu dầu được khảo sát ở tỉ lệ từ 0 tới 80% trên tổng lượng polyol để đánh giá khả năng thay thế cho polyether polyol Excenol trong tổng hợp xốp cứng PU. Mẫu M1 với 100% Excenol được lựa chọn làm mẫu chuẩn để so sánh. Quan sát đồ thị ở hình 1 cho thấy khi tăng dần hàm lượng CO từ 10% lên 60% và cố định hàm lượng Glycerin ở 20%, hàm lượng tạo bọt hoá học nước ở 2%, trọng lượng riêng nở tự do (Free rise density – FRD) của xốp PU giảm dần từ $47,5\text{kg/m}^3$ xuống $43,6\text{kg/m}^3$. Lý do chủ yếu là do dầu thầu dầu có trọng lượng phân tử cao nhưng chỉ số hydroxyl thấp, do đó càng tăng hàm lượng dầu thầu dầu thì tỉ lệ NCO/OH càng thấp, tương đương với lượng PMDI phản ứng càng ít, dẫn đến giá trị FRD của xốp càng giảm. Tuy nhiên, khi hàm lượng CO tăng trên 70%, giá trị FRD lại tăng lên dần. Điều này có thể được giải thích là do khi hàm lượng CO quá cao,

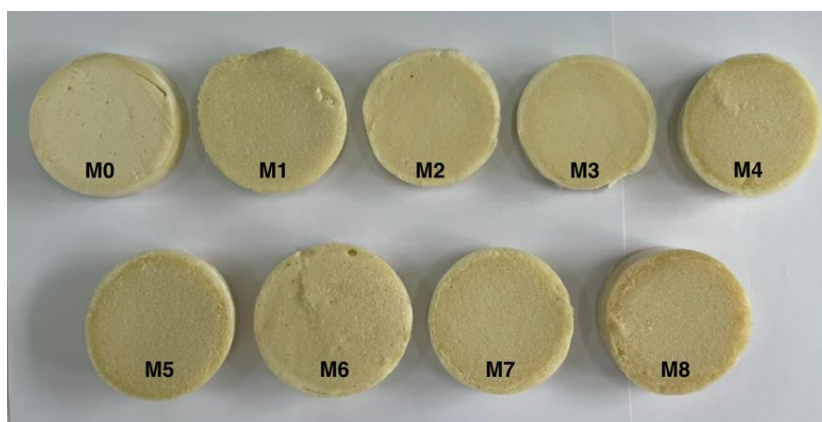
mật độ liên kết ngang giảm làm các thành tế bào trở nên mỏng hơn, khí CO₂ hình thành từ phản ứng tạo xốp bị nhốt trong các tế bào bọt kín thoát ra ngoài dẫn đến cấu trúc mạng lưới xốp có thể bị phá vỡ (Mark và nnk., 2008). Quan sát bằng mắt thường dễ dàng nhận thấy mẫu M8 chứa 80% CO có bề mặt không đồng nhất, xốp trở nên mềm và bở hơn (Hình 2). So sánh với mẫu chuẩn M0 có thể thấy mẫu M6 chứa 60% CO và M7 chứa 70% CO đạt trọng lượng riêng và hình thái bề mặt gần tương đương nên được lựa chọn để tiếp tục khảo sát ảnh hưởng tỉ lệ chất tạo bọt hoá học nước.

Bảng 2. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng CO tới FRD và thời gian phản ứng

TN	EX/CO/G (%)	NCO/OH	H ₂ O (%)	Gel time (s)	Tack-free time (s)	FRD (kg/m ³)
M0	100/0/0	1,35	2	129	168	44,7
M1	70/10/20	1,64	2	88	90	47,5
M2	60/20/20	1,56	2	99	105	47,1
M3	50/30/20	1,49	2	105	120	46,9
M4	40/40/20	1,41	2	105	119	46,1
M5	30/50/20	1,33	2	114	122	43,9
M6	20/60/20	1,26	2	120	125	43,6
M7	10/70/20	1,18	2	145	150	45,7
M8	0/80/20	1,10	2	218	220	54,4

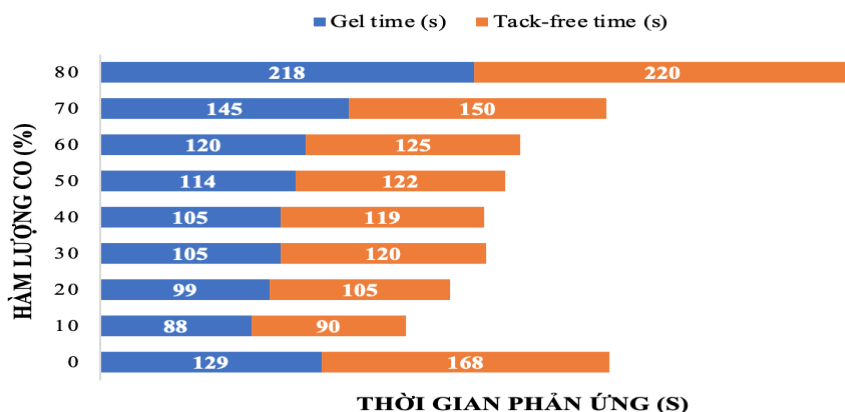


Hình 1. Đồ thị biểu diễn ảnh hưởng của hàm lượng CO đến trọng lượng riêng nở tự do của xốp cứng PU



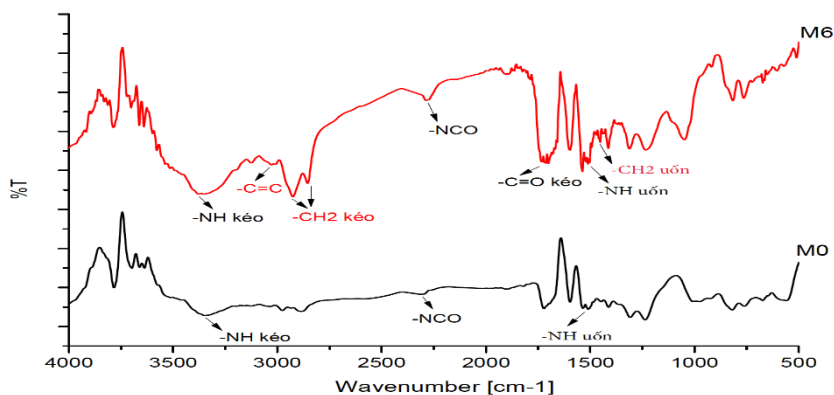
Hình 2. Các mẫu xốp cứng PU tổng hợp với các hàm lượng CO từ 0% tới 80%

Hai thông số thời gian phản ứng quan trọng trong quá trình tổng hợp xốp cứng PU là Gel time và Tack-free time được thể hiện qua Hình 3. Quan sát đồ thị cho thấy thời gian phản ứng tăng khi tăng dần hàm lượng CO từ 10% lên 80% do hàm lượng CO càng tăng, phản ứng tạo gel giữa nhóm hydroxyl của phân tử CO và nhóm isocyanate của phân tử PMDI xảy ra càng chậm, dẫn đến thời gian phản ứng tăng dần.

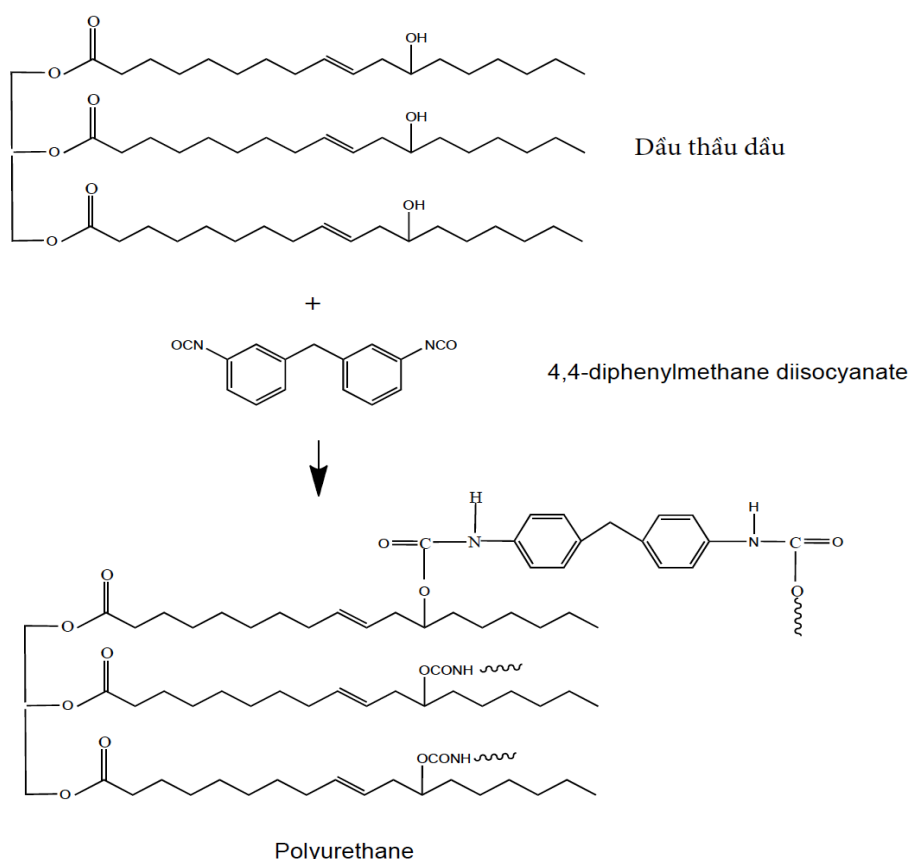


Hình 3. Đồ thị biểu diễn ảnh hưởng của hàm lượng CO đến thời gian phản ứng

Cấu trúc liên kết của xốp cứng PU tổng hợp từ polyether polyol Excenol và CO được khảo sát qua phổ FTIR (Hình 4). Các đỉnh đặc trưng đại diện cho các liên kết trong xốp cứng polyurethane thể hiện ở $3347\text{-}3378\text{cm}^{-1}$ và $1509\text{-}1510\text{cm}^{-1}$ được gán cho dao động kéo và uốn của nhóm -NH . Đỉnh xuất hiện ở 2288cm^{-1} đặc trưng cho dao động của nhóm isocyanate -NCO , trong khi đó đỉnh xuất hiện ở dải bước sóng $1700\text{-}1712\text{cm}^{-1}$ đặc trưng cho dao động kéo dãn của nhóm cacbonyl trong liên kết urethane. So sánh với phổ FTIR của xốp cứng PU tổng hợp từ Excenol (M0), mẫu xốp PU tổng hợp từ CO (M6) xuất hiện thêm một số đỉnh phổ mới đặc trưng cho liên kết của mạch phân tử CO. Đỉnh phổ xuất hiện ở bước sóng 3009cm^{-1} đặc trưng cho dao động $\text{C}=\text{C}$, dải phổ ở $2855\text{-}2926\text{cm}^{-1}$ và 1452cm^{-1} đặc trưng cho dao động kéo và uốn của nhóm -CH_2 trong mạch aliphatic (Lee và nnk., 2021; Camila và nnk, 2017; Łukasz và nnk., 2014). Kết quả phổ FTIR cho thấy có sự liên kết giữa nhóm hydroxyl bậc hai trong mạch phân tử CO và nhóm cyanate trong mạch phân tử PMDI hình thành từ phản ứng tạo gel trong quá trình tổng hợp xốp cứng PU (Hình 5).



Hình 4. Phổ FTIR của xốp cứng PU tổng hợp từ 100% Excenol (M0) và 60% CO (M6)



Hình 5. Phản ứng tạo gel hình thành liên kết urethane giữa dầu thầu dầu và isocyanate

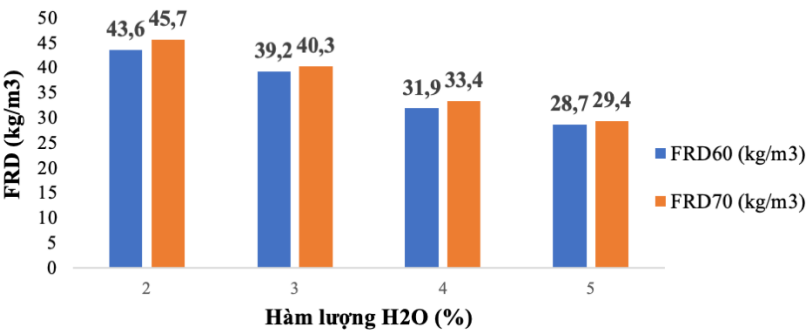
3.2. Khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng nước trong tổng hợp vật liệu xốp cứng PU

Tỷ lệ CO ở 60% và 70% được lựa chọn để khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng nước tới trọng lượng riêng và thời gian phản ứng của xốp cứng PU. Đồ thị ở Hình 6 cho thấy khi tăng dần hàm lượng nước từ 2% lên 5%, trọng lượng riêng FRD của xốp PU giảm dần từ 43,6kg/m³ xuống 28,7kg/m³ ở tỉ lệ CO là 60% và giảm dần từ 45,7kg/m³ xuống 29,6kg/m³ ở tỉ lệ CO là 70%. Điều này được giải thích là do khi tăng hàm lượng nước, phản ứng tạo foam giữa nhóm hydroxyl của phân tử nước và nhóm isocyanate của phân tử PMDI (Hình 8) diễn ra mãnh liệt dẫn đến hình thành nhiều khí CO₂ được bao bọc trong các tế bào bọt kín, lúc này thể tích pha khí càng tăng dẫn đến trọng lượng riêng của xốp giảm dần (Camila và nnk, 2017). Ngược lại, thời gian phản ứng tăng dần khi tăng hàm lượng nước từ 2% lên 5% như đồ thị thể hiện ở hình 7.

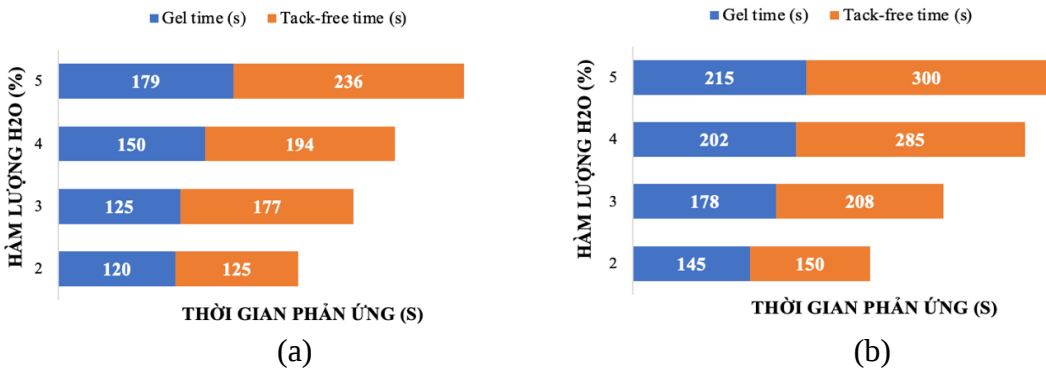
Bảng 3. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng nước tới FRD và thời gian phản ứng

TN	EX/CO/G (%)	NCO/OH	H ₂ O (%)	Gel time (s)	Tack-free time (s)	FRD ₆₀ (kg/m ³)	FRD ₇₀ (kg/m ³)	FRD ₀ (kg/m ³)
M6	20/60/20	1,26	2	120	125	43,6	-	-
M6a		1,42	3	125	177	39,2	-	-
M6b		1,58	4	150	194	31,9	-	-
M6c		1,74	5	179	236	28,7	-	-

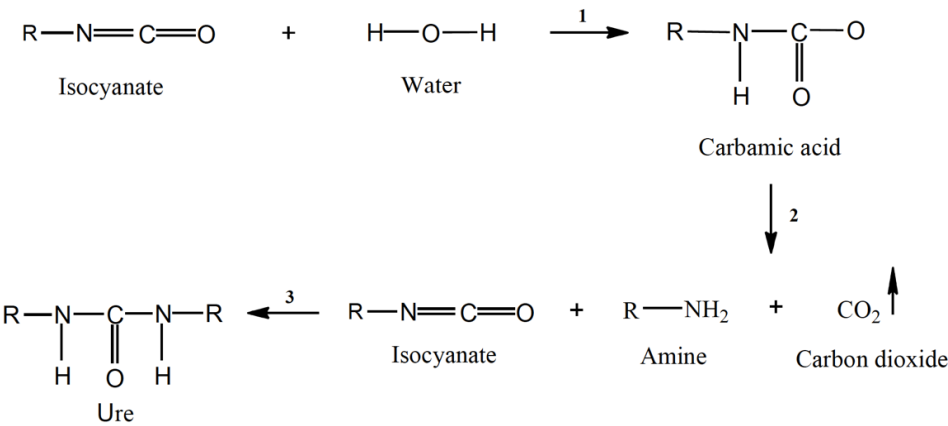
M7	10/70/20	1,18	2	145	150	-	45,7	-
M7a		1,34	3	178	208	-	40,3	-
M7b		1,51	4	202	285	-	33,4	-
M7c		1,67	5	215	300	-	29,6	-
M0	100/0/0	1,35	2	129	168	-	-	44,7
M9		1,40	5	95	145	-	-	21,8



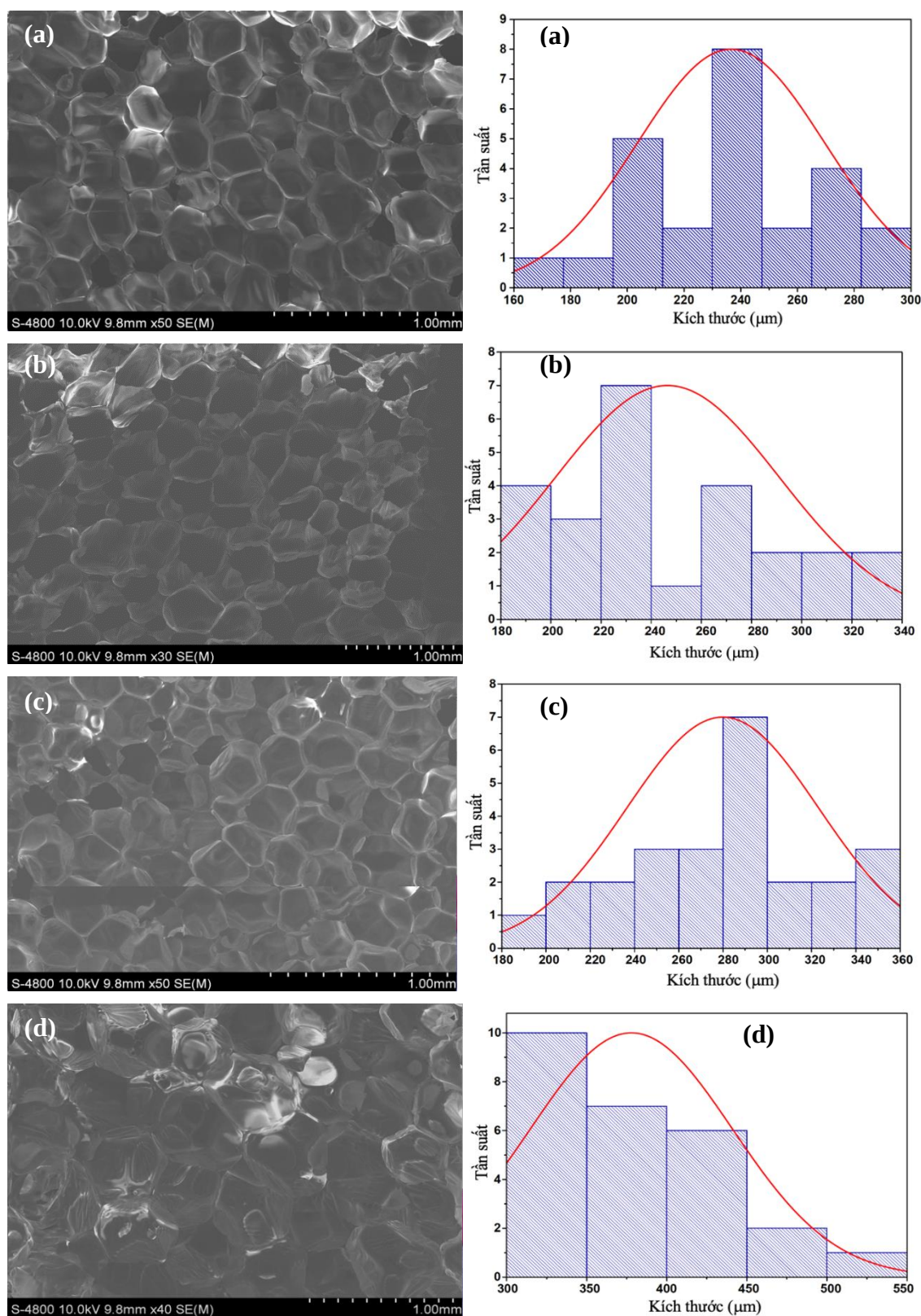
Hình 6. Đồ thị biểu diễn ảnh hưởng của hàm lượng H₂O tới trọng lượng riêng của PU ở tỉ lệ CO thay thế 60% và 70%



Hình 7. Đồ thị biểu diễn ảnh hưởng của hàm lượng chất tạo bọt H₂O tới thời gian phản ứng ở hàm lượng CO thay thế (a) 60%; (b) 70%



Hình 8. Phản ứng tạo foam giữa isocyanate và nước giải phóng khí CO₂



Hình 9. Ảnh SEM và biểu đồ phân bố kích thước tương ứng của các mẫu xốp cứng PU của (a): M0, (b): M6, (c): M9, (d): M6c

Quan sát ảnh SEM và biểu đồ phân bố kích thước ở hình 9 có thể thấy khi hàm lượng chất tạo bọt là nước càng tăng, kích thước các tế bào bọt kín càng lớn, đồng thời vách ngăn giữa các tế bào trở nên mỏng hơn. Kết quả ở bảng 4 cho thấy khi tăng hàm lượng nước từ 2% lên 5%, kích thước trung bình của tế bào bọt kín tăng từ 236 μm lên 246 μm trong trường hợp sử dụng 100% polyol Excenol, tương tự với mẫu xốp ở hàm lượng dầu thầu dầu 60%, kích thước trung bình của tế bào bọt kín tăng từ 279 μm lên 378 μm . Dễ dàng nhận thấy rằng khi sử dụng dầu thầu dầu để thay thế cho polyol Excenol, kích thước tế bào bọt kín trở nên lớn hơn, cụ thể tăng 18% đối với trường hợp sử dụng 2% nước (M0 và M6) và tăng 53% đối với trường hợp sử dụng 5% nước (M9 và M6c) so với khi không sử dụng dầu thầu dầu.

Bảng 4. Kích thước trung bình tế bào bọt kín của các mẫu xốp cứng PU

Mẫu	EX/CO/G (%)	H ₂ O (%)	Kích thước trung bình bọt kín (μm)
M0	100/0/0	2	236
M6	20/60/20	2	279
M9	100/0/0	5	246
M6c	20/60/20	5	378

4. Kết luận

Nghiên cứu tổng hợp thành công xốp cứng PU tỷ trọng thấp bằng phương pháp nở tự do một giai đoạn, trong đó hàm lượng dầu thầu dầu được khảo sát để thay thế cho polyether polyol Excenol và sử dụng nước là chất tạo bọt duy nhất. Trọng lượng riêng nở tự do, thông số thời gian phản ứng và hình thái bề mặt xốp cứng PU đã được khảo sát. Kết quả cho thấy hàm lượng dầu thầu dầu càng tăng, trọng lượng riêng của xốp càng giảm, ngược lại thời gian phản ứng tăng dần. Chất tạo bọt nước được khảo sát ở tỉ lệ từ 2-5% cho thấy khi tăng hàm lượng nước, trọng lượng riêng của xốp giảm dần, thời gian phản ứng tăng dần, ngoài ra kích thước trung bình của tế bào bọt kín lớn hơn khi sử dụng dầu thầu dầu so với polyol Excenol. Nghiên cứu cho thấy dầu thầu dầu có khả năng thay thế tới 60-70% hàm lượng Excenol, xốp cứng PU đạt trọng lượng riêng 43,6-47,5kg/m³ ở hàm lượng chất tạo bọt nước 2%, mật độ tế bào bọt kín cao với kích thước trung bình từ 279 μm có tiềm năng ứng dụng trong một số lĩnh vực cách nhiệt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Atika A., Mustafa A.G. (2021). Investigating the Recent Development of Bio-based Polyurethane Foam Produced from Renewable Resources. *Eco-Friendly Adhesives for Wood and Natural Fiber Composites*, 231-254.
- [2] Camila S.C., Thaís F., Vagner E.C., Vânia M.D.P. (2017). Polyurethane Foams for Thermal Insulation Uses Produced from Castor Oil and Crude Glycerol Biopolyols. *Molecules*, 22, 1091-1105.
- [3] Chu X., Shaojie L., Zhao F. (2014). Preparation of acrylated epoxidized soybean oil with excellent properties. *Applied Mechanics and Materials*, 662, 7-10.

- [4] Chuayjuljit S., Maungchareon A., Saravari O. (2010). Preparation and properties of palm oil-based rigid polyurethane nanocomposite foams, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 218-225.
- [5] Lee, J.H., Kim, S.H., Oh, K.W (2021). Bio-Based Polyurethane Foams with Castor Oil Based Multifunctional Polyols for Improved Compressive Properties. *Polymers*, 13, 576.
- [6] Łukasz P., Michał S., Magdalena D., Aleksander H., Józef T.H. (2014). Rigid polyurethane foams from a polyglycerol-based polyol. *European Polymer Journal*, 57, 143-150.
- [7] Mark S., Benjamin L.W., Alan K.S., Jean-Marie S., Anthony J.R. (2008). The relationship between polyurethane foam microstructure and foam aging. *Polymer*, 49, 934-942.
- [8] Moyeenuddin A.S. (2018), Polyurethanes from vegetable oils and applications: a review. *Journal of Polymer Research* 25, 184.
- [9] Ntsako P.C., Hembe E.M, Diakanua B.N (2019). Chemical modifications of castor oil: A review. *Science Progress*, 102(3), 199-217.
- [10] Nuno V.G., Artur F., Ana B.T. (2018). Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. *Materials*, 11(10), 1841.
- [11] Pablo Acuña, Jing Zhang, Guang-Zhong Yin, Xue-Qi Liu, De-Yi Wang (2021). Bio-based rigid polyurethane foam from castor oil with excellent flame retardancy and high insulation capacity via cooperation with carbon-based materials. *Journal of Materials Science*, 56, 2684-2701.
- [12] Uldis S., Anda F., Brigita L., Marija M., Dzintra V. (2013). Biobased Polyurethanes from Rapeseed Oil Polyols: Structure, Mechanical and Thermal Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 21, 952-962.
- [13] Uldis S., Brigita L., Dzintra V., Maria J.L., Maria C.V.G., Francisca S.E., Joaquin M. (2012). Structure and properties of the polyurethane and polyurethane foam synthesized from castor oil polyols. *Journal of Cellular Plastics*, 48(6), 476-488.
- [14] Vinay R.P., Gerard G.D., Lakshmi C.K.V., Randall M., Bryan J.J.S. (2016). Castor Oil: Properties, Uses, and Optimization of Processing Parameters in Commercial Production. *Lipid Insights*, 9, 1-12.
- [15] Vladimir Y., Ugis C., Velta F., Sergey K., Romass P. (2021). Properties of polyurethane foam with fourth-generation blowing agent. *e-Polymers* 21, 763-769.