

NGHIÊN CỨU TỔNG HỢP BIODIESEL TỪ NGUYÊN LIỆU DẦU VI TẢO BẰNG QUÁ TRÌNH HAI GIAI ĐOẠN SỬ DỤNG HỆ XÚC TÁC AXIT-BAZƠ RẮN

Nguyễn Trung Thành*, Nguyễn Khánh Diệu Hồng, Đinh Thị Ngọc

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Đến Tòa soạn 27-3-2014

Abstract

This report covered a two-stage biodiesel synthesis process by using acid-base catalysts consisting of $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ and $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{SiO}_2$. A micro-algal oil typed *Botryococcus* having a very high content of free fatty acids (FFAs) was used as feedstock. In the first stage, a major amount of FFAs was converted to fatty acid methyl esters (FAMES) on the solid acid catalyst $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$. The product of this process including FAMES and triglycerides became the feedstock for the second stage reactions; in which they was completely transesterified to FAMES on a solid base catalyst $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{SiO}_2$. The conditions for the reactions were investigated to reach the optimum parameters for whole biodiesel synthesis.

Keywords: Biodiesel, calcium nitrate, zirconia, microalgae oil, *Botryococcus*.

1. MỞ ĐẦU

Theo bài báo đã công bố trước đây [1], đối với dầu vi tảo họ *Botryococcus* có chỉ số axit cao (58,2) nên quá trình chuyển hóa dầu vi tảo loại này thành biodiesel có hiệu quả cao khi sử dụng quá trình hai giai đoạn với sự kết hợp hai hệ xúc tác axit và bazơ rắn [7-9].

Trong hai bài báo trước [10, 11], chúng tôi đã nghiên cứu chế tạo và đặc trưng hai hệ xúc tác axit và bazơ rắn dị thể $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ và $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{SiO}_2$ (pha hoạt tính được xác định là CaO/SiO_2 ở công trình nghiên cứu trước đây) có thể ứng dụng vào quá trình chuyển hóa những loại dầu có chỉ số axit cao thành biodiesel [2-6], với các đặc tính axit và bazơ rất phù hợp cho từng loại phản ứng este hóa và trao đổi este. Trong nghiên cứu này, hai hệ xúc tác trên được sử dụng để chuyển hóa dầu vi tảo họ *Botryococcus* thành biodiesel trong quá trình phản ứng hai giai đoạn. Trong đó, giai đoạn 1 sử dụng hệ xúc tác axit $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ để chuyển hóa các axit béo tự do thành metyl este, giai đoạn 2 sử dụng hệ xúc tác bazơ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{SiO}_2$ để chuyển hóa nốt các triglyxerit có trong dầu vi tảo thành các metyl este - biodiesel. Các điều kiện phản ứng theo đó được tối ưu hóa để có thể ứng dụng cho từng quá trình tổng hợp.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Phản ứng giai đoạn một với nguyên liệu dầu vi tảo họ *Botryococcus* trên xúc tác $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$

Dầu vi tảo họ *Botryococcus* được phân tích thành phần hóa học trong một báo cáo khác [1], bao gồm khá nhiều hydrocacbon (được tách ra) nằm trong phân đoạn diesel mà chủ yếu là heptadecan, có chỉ số axit là 58,2, được đưa vào quy trình phản ứng giai đoạn 1 nhằm hạ chỉ số axit xuống giới hạn cho phép (< 2). Xúc tác $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ với hàm lượng từ 1 đến 4 % khối lượng (so với dầu) được đưa vào bình cầu có khuấy từ, bếp gia nhiệt, nhiệt kế và các bộ phận cần thiết. Metanol được đưa vào với tỷ lệ thể tích metanol/dầu từ 0,5/1 đến 2,5/1. Phản ứng được thực hiện từ 50 đến 70 °C trong thời gian từ 2 đến 6 giờ. Sau phản ứng, hỗn hợp được đưa sang phễu chiết, thu metanol ở pha trên, pha dưới được rửa với nước nóng 80 °C, sau đó tách nước tại 120 °C, sản phẩm có chỉ số axit đảm bảo (< 2) sau đó được đưa sang quá trình trao đổi este trong giai đoạn 2. Chỉ số axit của sản phẩm sau tách nước được xác định để tính toán hiệu quả phản ứng. Hiệu quả phản ứng được xác định theo độ giảm chỉ số axit theo công thức sau: $H = 100 \times (\text{AN}_0 - \text{AN}_1) / \text{AN}_0$; trong đó: AN_0 là chỉ số axit của dầu vi tảo ban đầu, AN_1 là chỉ số

của dầu thu được sau quá trình chuyển hóa giai đoạn 1.

2.2. Phản ứng giai đoạn hai với nguyên liệu dầu vi tảo họ *Botryococcus* đã qua phản ứng giai đoạn 1

Dầu vi tảo họ *Botryococcus* đã qua phản ứng giai đoạn 1 được đưa vào quy trình phản ứng giai đoạn 2 để thu biodiesel. Xúc tác $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{SiO}_2$ hàm lượng từ 3-5 % tính theo khối lượng nguyên liệu được đưa vào bình phản ứng hình cầu có khuấy từ, gia nhiệt, nhiệt kế và các bộ phận cần thiết. Metanol được đưa vào với tỷ lệ mol metanol/dầu là từ 4-12/1. Nhiệt độ phản ứng thay đổi từ 50-70 °C trong thời gian từ 4-8 giờ. Sau phản ứng, tắt gia nhiệt và máy khuấy, lấy sản phẩm ra gạn lọc, thu hồi sản phẩm. Sau đó đưa hỗn hợp sản phẩm lên phễu chiết và tiến hành rửa bằng nước nóng, cuối cùng là sấy khô tại 120 °C để thu biodiesel. Hiệu suất phản ứng được tính theo:

$$H = m_{\text{ME}} \times (C_{\text{ME}}/M_{\text{ME}}) \times (M_{\text{dầu}}/3m_{\text{dầu}}) \times 100 \%$$

trong đó m_{ME} , $m_{\text{dầu}}$ - khối lượng sản phẩm và khối lượng nguyên liệu, gam; C_{ME} - hàm lượng metyl este có trong sản phẩm; M_{ME} , $M_{\text{dầu}}$ - khối lượng phân tử trung bình của metyl este và của dầu. Hệ số 3 xuất hiện trong phương trình vì mỗi phân tử glyxerit tạo ra 3 phân tử metyl este.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phản ứng giai đoạn 1

3.1.1. Một số tính chất đầu vào của nguyên liệu

Dầu vi tảo họ *Botryococcus* được trích ly từ vi tảo khô họ *Botryococcus* và được phân tích thành phần hóa học trong một nghiên cứu khác, kết quả chỉ ra ngoài các hợp phần chứa các gốc axit béo, dầu còn chứa hàm lượng lớn hydrocarbon, trong đó chủ yếu là heptadecan. Sau quá trình tách hydrocarbon, chúng tôi sử dụng loại dầu này vào quá trình tổng hợp biodiesel hai giai đoạn. Một số tính chất của dầu vi tảo trước và sau phản ứng giai đoạn 1 đã được xác định và đưa ra trong bảng 1.

Trong bảng 1, chỉ số axit của dầu vi tảo lên đến 58,2, tức là chiếm tới khoảng 30 % khối lượng, bắt buộc phải chuyển lượng axit béo tự do này thành các metyl este mà không thể xử lý bằng cách trung hòa và tách lượng xà phòng tạo thành ra được do sẽ mất một lượng rất lớn nguyên liệu. Sau phản ứng giai đoạn 1, chỉ số axit sẽ giảm xuống mức phù hợp cho quá trình trao đổi este bằng xúc tác kiềm để chuyển toàn bộ dầu vi tảo họ *Botryococcus* thành biodiesel.

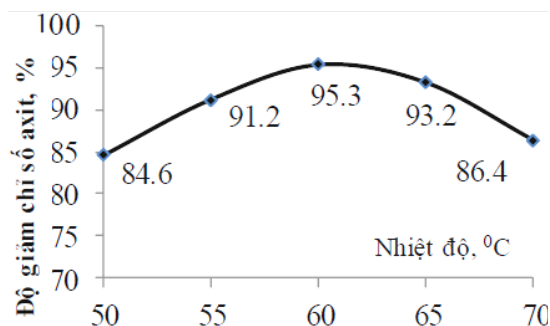
Nghiên cứu sẽ khảo sát các yếu tố của phản ứng giai đoạn 1 như nhiệt độ, thời gian, tỷ lệ thể tích metanol/dầu, tốc độ khuấy và hàm lượng xúc tác $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$.

Bảng 1: Một số chỉ tiêu kỹ thuật của dầu vi tảo họ *Botryococcus* trước và sau phản ứng giai đoạn 1

STT	Các chỉ tiêu	Phép thử	Dầu vi tảo trước phản ứng	Dầu vi tảo sau phản ứng giai đoạn 1
1	Tỷ trọng, 15,5 °C	D 1298	0,91	0,9036
2	Điểm chảy (°C)	D 87	5,2	8,3
3	Chỉ số axit (mg/g)	D 664	58,2	1,9
4	Độ nhớt tại 40 °C, cSt	D445	45,5	30,8
5	Chỉ số xà phòng (mg/g)	D 464	198,2	186,2
6	Chỉ số iod (g/g)	pr EN 14111	76	39,5
7	Hàm lượng nước (mg/kg)	D 95	123	123
8	Tạp chất cơ học (mg/kg)	EN 12662	210	210
9	Màu	-	Xanh đậm	Xanh đậm
10	Mùi	-	Đặc trưng	Đặc trưng

3.1.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ phản ứng

Khảo sát tìm nhiệt độ thích hợp cho phản ứng tổng hợp biodiesel. Kết quả phản ứng được thể hiện trên hình 1.



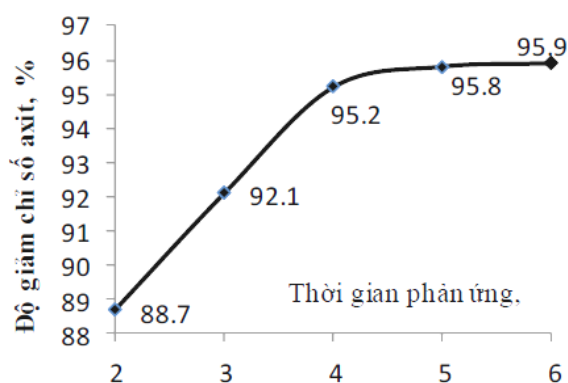
Hình 1: Ảnh hưởng của nhiệt độ phản ứng tới độ giảm chỉ số axit

Tỷ lệ thể tích metanol/dầu = 2/1; tốc độ khuấy = 500 vòng/phút, thời gian phản ứng 4 giờ; hàm lượng xúc tác 2 % khối lượng dầu; thay đổi nhiệt độ phản ứng trong khoảng 50-70 °C

Kết quả khảo sát qua đồ thị cho thấy nhiệt độ thích hợp nhất cho phản ứng là 60 °C với độ giảm của chỉ số axit là 95,3 %. Dưới nhiệt độ này, tốc độ phản ứng giảm nên độ chuyển hóa của các axit béo tự do sẽ giảm, còn khi nhiệt độ tăng quá cao làm metanol bay hơi mãnh liệt, thất thoát tác nhân phản ứng nên cũng làm giảm hiệu quả của quá trình.

3.1.3. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng

Khảo sát ảnh hưởng của thời gian phản ứng đối với quá trình tổng hợp biodiesel với xúc tác $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$, kết quả được thể hiện trên hình 2.



Hình 2: Ảnh hưởng của thời gian phản ứng tới độ giảm chỉ số axit

(Hàm lượng xúc tác 2 % khối lượng dầu; tỷ lệ thể tích metanol/dầu = 2/1; nhiệt độ phản ứng 60 °C; tốc độ khuấy 500 vòng/phút.

Thời gian phản ứng thay đổi từ 2 giờ đến 6 giờ)

Như vậy, thời gian phản ứng tối ưu đạt được cho quá trình este hóa trong giai đoạn 1 là 5 giờ, vượt quá thời gian này độ giảm chỉ số axit cũng chỉ tăng không đáng kể do hàm lượng xúc tác chưa đủ lớn để tăng tốc cho phản ứng nhanh chóng đạt tới trạng thái cân bằng; trong khi nếu thời gian thấp hơn 5 giờ, lượng axit béo tự do chưa được chuyển hóa hoàn toàn.

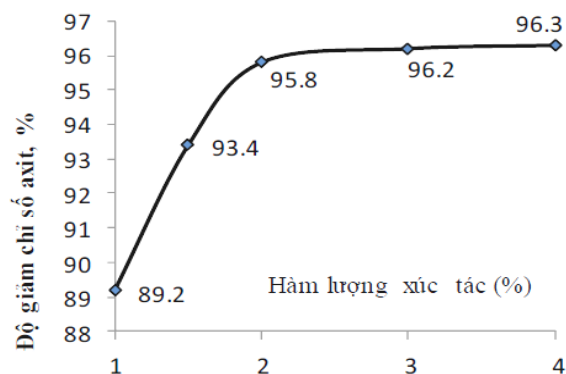
3.1.4. Ảnh hưởng của hàm lượng xúc tác

Khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng xúc tác đối với quá trình tổng hợp biodiesel giai đoạn 1, kết quả được thể hiện trên hình 3.

Rõ ràng khi hàm lượng xúc tác tăng lên sẽ làm tăng tỷ lệ xúc tác/nguyên liệu, dẫn đến trong cùng một thời điểm, xác suất va chạm hiệu quả giữa các tác nhân phản ứng và các tâm hoạt tính tăng lên.

Điều này làm tăng số tương tác trung gian giữa chất phản ứng và xúc tác để làm giảm năng lượng hoạt hóa của phản ứng, dẫn đến tăng tốc độ phản ứng. Sau thời gian tối ưu 5 giờ, lượng xúc tác thích

hợp là 3 %, và cho dù tăng lên 4 % thì độ giảm chỉ số axit cũng chỉ tăng rất nhẹ. Để tăng tiếp giá trị độ giảm chỉ số axit này, chúng tôi tiếp tục cải tiến yếu tố nồng độ metanol ban đầu hay nói cách khác là tỷ lệ metanol/dầu.

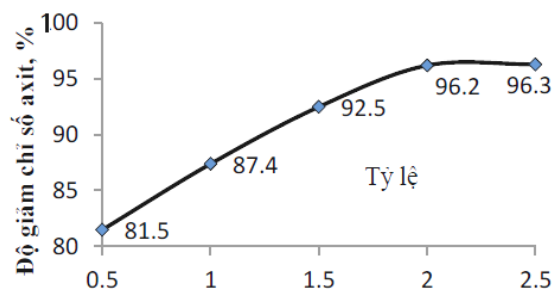


Hình 3: Ảnh hưởng của hàm lượng xúc tác tới độ giảm chỉ số axit

Tỷ lệ thể tích metanol/dầu = 2/1; Nhiệt độ phản ứng 60 °C; Tốc độ khuấy 500 vòng/phút; Thời gian phản ứng 5 giờ. Thay đổi hàm lượng xúc tác từ 1 % đến 4 % khối lượng dầu vi tảo

3.1.5. Ảnh hưởng của tỷ lệ thể tích metanol/dầu

Khảo sát tìm tỷ lệ thể tích metanol/dầu tối ưu, kết quả phản ứng được thể hiện trên hình 4.



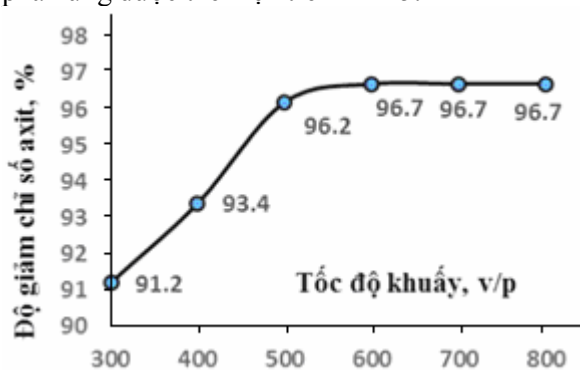
Hình 4: Ảnh hưởng của tỷ lệ thể tích metanol/dầu tới độ giảm chỉ số axit

Nhiệt độ phản ứng 60 °C; Tốc độ khuấy 500 vòng/phút; Thời gian phản ứng 5 giờ; Hàm lượng xúc tác 3 % khối lượng dầu. Tỷ lệ thể tích metanol/dầu vi tảo thay đổi trong khoảng 0,5÷2,5

Tỷ lệ metanol/dầu tăng sẽ dẫn đến giảm chỉ số axit do làm tăng mức độ tiếp xúc giữa metanol, dầu và các tâm axit của xúc tác. Yếu tố này góp phần làm tăng tốc độ phản ứng chuyển hóa axit béo tự do thành methyl este. Các khảo sát cũng chỉ ra việc tăng tỷ lệ metanol/dầu đến mức 2/1 theo thể tích là thích hợp cho phản ứng tiệm cận với trạng thái cân bằng. Việc tăng tỷ lệ metanol/dầu hơn nữa là không cần thiết do metanol sẽ bị dư nhiều, dẫn đến tổn năng lượng để thu hồi.

3.1.6. Ảnh hưởng của tốc độ khuấy trộn

Khảo sát ảnh hưởng của tốc độ khuấy trộn đến hiệu suất tổng hợp biodiesel giai đoạn 1, kết quả phản ứng được thể hiện trên hình 5.



Hình 5: Ảnh hưởng của tốc độ khuấy trộn tới độ giảm chỉ số axit

Tỷ lệ thể tích metanol/dầu = 2/1; nhiệt độ phản ứng 60 °C; thời gian phản ứng 5 giờ; hàm lượng xúc tác 3 % khối lượng dầu. Thay đổi tốc độ khuấy trộn trong khoảng 300 vòng/phút đến 600 vòng/phút

Qua các kết quả khảo sát có thể thấy, tốc độ khuấy từ 500-600 vòng/phút cải thiện nhanh chóng độ chuyển hóa các axit béo tự do thông qua độ giảm chỉ số axit (lên tới 96,2-96,7 %).

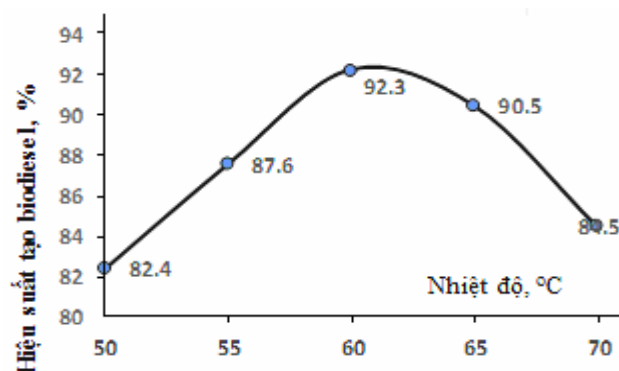
Nếu tăng tốc độ khuấy lên nữa, độ giảm chỉ số axit cũng không tăng đáng kể, mà khuấy trộn mạnh sẽ tốn năng lượng, rất khó khăn để thực hiện trong điều kiện phòng thí nghiệm. Do đó, tốc độ khuấy thích hợp là 500 vòng/phút. Với độ giảm chỉ số axit này, sản phẩm sau khi tinh chế sẽ có chỉ số axit là 1,92 (< 2) Theo các nghiên cứu trên thế giới trong lĩnh vực này, với chỉ số axit như vậy hoàn toàn có khả năng chuyển hóa tiếp triglyxerit trong dầu vi tảo thành biodiesel trên hệ xúc tác bazơ rắn $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{SiO}_2$ mà không sợ bị xà phòng hóa.

Dầu vi tảo sau giai đoạn thứ nhất này vẫn có độ nhớt rất cao 30,8 mm²/s (xem bảng 1) do quá trình này mới chỉ chuyển hóa các axit béo tự do thành biodiesel, còn lại phần lớn triglyxerit chưa chuyển hóa. Muốn đạt yêu cầu về biodiesel thì độ nhớt phải đạt từ 1,9 đến 6 mm²/s, do đó cần phải tiếp tục đưa dầu qua giai đoạn phản ứng thứ hai tiến hành quá trình trao đổi este bằng metanol trên xúc tác bazơ rắn $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{SiO}_2$ để chuyển hóa hầu hết các triglyxerit thành metyl este.

3.2. Kết quả chuyển hóa giai đoạn 2 của dầu vi tảo trên xúc tác $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{SiO}_2$

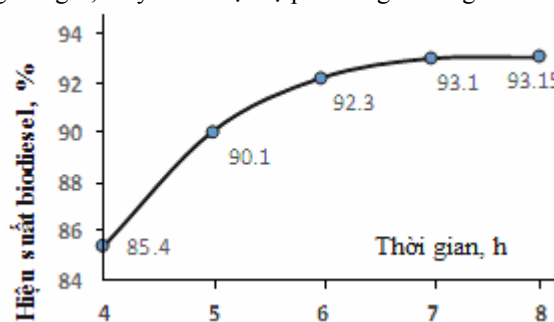
Bằng các bước làm và hướng giải thích tương tự như trong giai đoạn 1, chúng tôi đã khảo sát và tìm ra được các điều kiện tối ưu cho quá trình chuyển

hóa dầu vi tảo thành biodiesel. Các kết quả khảo sát thể hiện ở các hình 6-10.



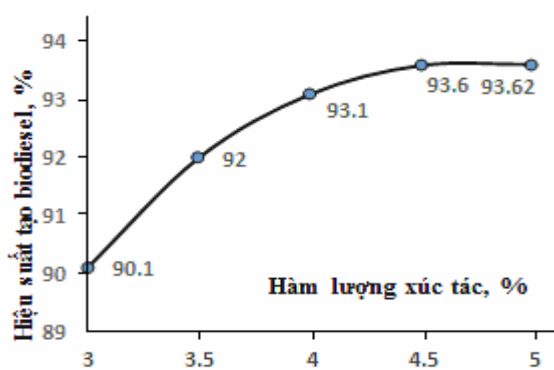
Hình 6: Đồ thị quan hệ giữa nhiệt độ phản ứng và hiệu suất phản ứng

Tỷ lệ mol metanol/dầu = 8/1; lượng xúc tác = 4 % khối lượng dầu; tốc độ khuấy = 400 vòng/phút; thời gian phản ứng = 6 giờ; thay đổi nhiệt độ phản ứng khoảng 50-70 °C



Hình 7: Đồ thị quan hệ giữa thời gian phản ứng và hiệu suất phản ứng

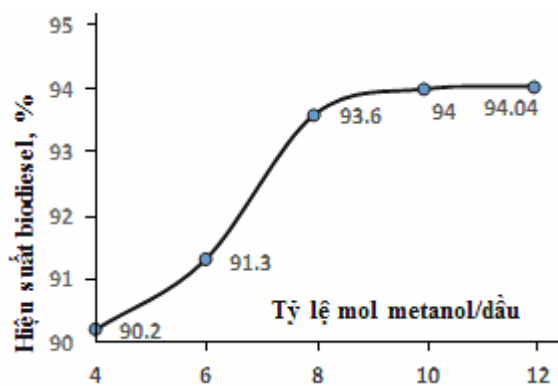
Tỷ lệ mol metanol/dầu = 8/1; lượng xúc tác = 4 % khối lượng; nhiệt độ phản ứng = 60 °C; tốc độ khuấy = 400 vòng/phút; thời gian phản ứng thay đổi từ 4-8 giờ



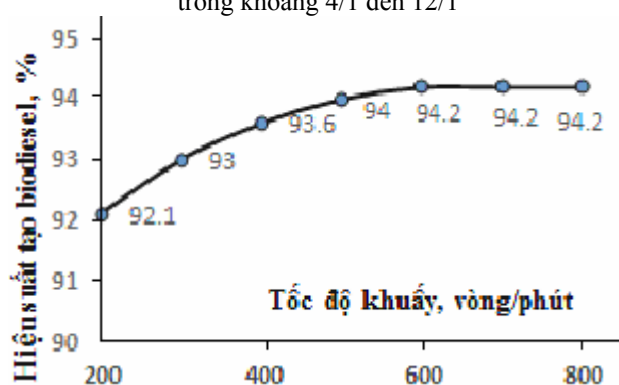
Hình 8: Đồ thị quan hệ giữa hàm lượng xúc tác và hiệu suất phản ứng

Tỷ lệ mol metanol/dầu = 8/1; nhiệt độ phản ứng = 60 °C; tốc độ khuấy = 400 vòng/phút; thời gian phản ứng = 7 giờ; thay đổi hàm lượng xúc tác từ 3-5 % -tính theo % khối lượng xúc tác trên khối lượng vi tảo

Từ các khảo sát và phân tích ở trên, chúng tôi đã đưa ra các thông số tối ưu cho quá trình tổng hợp biodiesel trong giai đoạn 2 của phản ứng trong bảng 2.



Hình 9: Đồ thị quan hệ giữa tỷ lệ mol metanol/dầu Lượng xúc tác, % khối lượng so với dầu = 4,5 %; nhiệt độ phản ứng = 60 °C; tốc độ khuấy = 400 vòng/phút; thời gian phản ứng = 7 giờ; tỷ lệ mol metanol/dầu thay đổi trong khoảng 4/1 đến 12/1



Hình 10: Đồ thị quan hệ giữa tốc độ khuấy và hiệu suất phản ứng

Tỷ lệ mol metanol/dầu = 10/1; lượng xúc tác = 4,5 %; nhiệt độ phản ứng = 60 °C; thời gian phản ứng = 7 giờ; thay đổi tốc độ khuấy trộn trong khoảng 200 vòng/phút đến 800 vòng/phút

Bảng 2: Các thông số tối ưu cho quá trình tổng hợp biodiesel giai đoạn 2

Các thông số công nghệ	Giá trị tối ưu
Thời gian phản ứng (giờ)	7
Hàm lượng xúc tác bazơ rắn (% khối lượng)	4,5
Tỷ lệ mol metanol/dầu	10/1
Tốc độ khuấy trộn (vòng/phút)	500
Nhiệt độ phản ứng (°C)	60

Như vậy, để chuyển hóa hoàn toàn dầu vi tảo thành biodiesel cần thời gian tổng cộng cho cả hai giai đoạn là 12 giờ. Kết quả nghiên cứu trước đây của chính tác giả cho biết, nếu chỉ sử dụng xúc tác axit rắn $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ thì phải mất đến 22 giờ mới có thể đạt được hiệu suất biodiesel tương tự. Kết quả đã khẳng định ưu việt khi thực hiện phản ứng hai giai đoạn.

4. KẾT LUẬN

1. Khảo sát tìm được các điều kiện tối ưu cho phản ứng tổng hợp biodiesel trong giai đoạn 1 – giai đoạn giảm chỉ số axit của nguyên liệu, sử dụng hệ xúc tác siêu axit rắn $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$. Các điều kiện phản ứng thích hợp như sau: Nhiệt độ 60 °C, thời gian 5 giờ, hàm lượng xúc tác 3 % tính theo khối lượng dầu vi tảo, tỷ lệ thể tích metanol/dầu là 2/1 và tốc độ khuấy trộn 500 vòng/phút. Hiệu quả của phản ứng được đánh giá qua độ giảm chỉ số axit. Sau phản ứng giai đoạn 1, chỉ số axit giảm từ 58,2 xuống còn 1,92 - hoàn toàn phù hợp với quá trình phản ứng trong giai đoạn 2 sử dụng hệ xúc tác bazơ mà không bị xà phòng hóa.

2. Khảo sát tìm được các điều kiện tối ưu cho phản ứng tổng hợp biodiesel trong giai đoạn 2 – giai đoạn chuyển hóa các triglyxerit thành các metyl este trên hệ xúc tác bazơ rắn $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{SiO}_2$. Các điều kiện thích hợp cho giai đoạn này như sau: Nhiệt độ 60 °C, thời gian phản ứng 7 giờ, hàm lượng xúc tác 4,5 % theo khối lượng dầu, tỷ lệ mol metanol/dầu là 10/1 và tốc độ khuấy trộn 500 vòng/phút. Hiệu suất tạo biodiesel cao nhất đạt 94 %.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Nguyễn Khánh Diệu Hồng, Nguyễn Đăng Toàn, Nguyễn Trung Thành, Lê Thị Hồng Ngân, Đinh Thị Ngo. *Xác định các chỉ tiêu kỹ thuật và phân tích thành phần hóa học dầu vi tảo họ Botryococcus sp. làm nguyên liệu cho sản xuất biodiesel*, Tạp chí Hóa học, **4A(50)**, 375-378 (2012).
- M. Di Serio, M. Cozzolino, R. Tesser, P. Patrono, F. Pinzari, B. Bonelli. *Santacesaria. Vanadyl phosphate catalyst in biodiesel production*, E., Appl. Catal. A: Gen., **320**, 1-7 (2007).
- M. Di Serio, M. R. Tesser, L. Pengmei. *Heterogeneous catalysts for biodiesel production* Santacesaria, E., Energy Fuels., **22(1)**, 207-217 (2008).
- Q. Shu, Q. Zhang, G. Xu, Z. Nawaz, D. Wang, J. Wang. *Synthesis of biodiesel from cottonseed oil and methanol using a carbon-based solid acid catalyst*, Fuel Process. Technol., **90(7)**, 1002-1008 (2009).
- C. M. Garcia, S. Teixeira, L. L. Marciniuk, U. Schuchardt. *Transesterification of soybean oil catalyzed by sulfated zirconia*, Bioresour. Technol., **99(14)**, 6608-6613 (2008).
- A. C. Carma Jr., L. K. C. de Souza, C. E. F. da Costa, E. Longo, J. R. Zamian, da Rocha Filho. *Production of biodiesel by esterification of palmitic acid over mesoporous aluminosilicate Al-MCM-41*, G. N., Fuel, **88**, 461-468 (2009).
- Surbhi Semwal, Ajay K. Arora, Rajendra P. Badoni, Deepak K. Tuli. *Biodiesel production using*

- heterogeneous catalysts*, Bioresource Technology, **102(3)** 2151-2161 (2011).
8. Piyanuch Nakpong, Sasiwimol Wootthikanokkhan. *High free fatty acid coconut oil as a potential feedstock for biodiesel production in Thailand*, Renewable Energy, **35(8)**, 1682-1687 (2010).
 9. A. P. Singh Chouhan, A. K. Sarma. *Modern heterogeneous catalysts for biodiesel production: A comprehensive review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, **15(9)**, 4378-4399 (2011).
 10. Nguyễn Trung Thành, Đinh Thị Ngọc. *Nghiên cứu chế tạo xúc tác SO_4^{2-}/ZrO_2 , ứng dụng cho quá trình tổng hợp biodiesel từ dầu vi tảo*, Tạp chí Hóa học, **51 (4AB)**, 187-192 (2013).
 11. Nguyễn Trung Thành, Lê Quang Diễn, Nguyễn Thế Hào, Đinh Thị Ngọc. *Nghiên cứu chế tạo xúc tác $Ca(NO_3)_2/SiO_2$, ứng dụng cho phản ứng giai đoạn hai trong quá trình tổng hợp biodiesel từ nguyên liệu dầu vi tảo*, Tạp chí Hóa học, **51 (6ABC)**, 399-404 (2013).

Liên hệ: Nguyễn Trung Thành

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
Số 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội
Điện thoại: 0913 467 588
Email: thanh.nguyentrung@hust.edu.vn.