Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ
website: sj.ctu.edu.vn

TỐI ƯU HÓA QUY TRÌNH TỔNG HỢP BIODIESEL TỪ DẦU *Jatropha curcas* L. BẰNG PHƯƠNG PHÁP BỀ MẶT ĐÁP ỨNG

Nguyễn Văn Đạt[1], Nguyễn Quốc Châu Thanh[1], Trần Quang Thanh[2], Đặng Gia Huy[2] và Phạm Cảnh Em[3]

[1] *Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Cần Thơ*
[2] *Lớp Hóa học K37, Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Cần Thơ*
[3] *Lớp Hóa dược K37, Khoa Khoa học Tự nhiên Trường Đại học Cần Thơ*

Thông tin chung:
Ngày nhận: 11/08/2014
Ngày chấp nhận: 26/02/2015

Title:
Optimization of biodiesel production from Jatropha curcas L. using response surface methodology

Từ khóa:
Biodiesel, dầu mè, phương pháp bề mặt đáp ứng

Keywords:
Biodiesel, Jatropha curcas, RSM

ABSTRACT

The overall goal of this work is to optimize biodiesel production process from Jatropha curcas oil (JO). To achieve this goal, an acid-catalyzed pretreatment of highly acidic Jatropha curcas oil (AV = 49 mg KOH/g) followed by a transesterification procedure with methanol and potassium hydroxide as a catalyst was used to produce Jatropha curcas biodiesel (JME). The optimum reaction conditions were obtained by using response surface methodology (RSM) coupled with central composite design (CCD). The results showed that an optimum biodiesel yield of 83.71% could be obtained under the following reaction conditions: methanol content of 20.2% (by weight with respect to the oil), catalyst concentration of 0.64% (by weight with respect to the oil), and the reaction time of 40.8 minutes.

TÓM TẮT

Nghiên cứu này hướng đến tổng hợp biodiesel từ một loại dầu không ăn được là dầu Jatropha (JO). Để đạt được mục tiêu này, một quá trình hai giai đoạn gồm ester hóa xúc tác acid và tiếp theo là transester hóa với methanol xúc tác KOH đã được sử dụng để tổng hợp biodiesel từ dầu Jatropha (JME) (AV = 49 mg KOH/g). Điều kiện tối ưu của phản ứng đạt được bằng cách sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) kết hợp với mô hình tâm phức hợp (CCD). Kết quả cho thấy quá trình transester hóa đạt được hiệu suất tối ưu là 83.71% tương ứng với các điều kiện sau: hàm lượng methanol và chất xúc tác lần lượt là 20.2% và 0.64% so với khối lượng dầu và thời gian phản ứng là 40.8 phút.

1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, thế giới đang phải đối mặt với sự thay đổi liên tục giá của nguồn nhiên liệu hóa thạch, đặc biệt là dầu mỏ do những nguồn năng lượng này ngày càng cạn kiệt và lượng tiêu thụ ngày càng tăng. Điều này đã dẫn đến việc phải tìm nguồn nhiên liệu để thay thế. Phản ứng giữa dầu thực vật hoặc mỡ động vật và một alcohol với sự có mặt của base mạnh tạo ra những hợp chất hóa học mới gọi là biodiesel (Guru *et al.*, 2009). Biodiesel có hàm lượng oxy cao nên khi sử dụng làm nhiên liệu cho động cơ diesel sẽ giảm được CO_2, CO, hydrocarbon, SO_2, các hạt rắn lơ lửng trong khí quyển (PM – particulate matter), khói, tiếng ồn... Ngoài ra, sử dụng biodiesel làm nhiên liệu sẽ không làm tăng hàm lượng CO_2 trong khí quyển vì lượng CO_2 tạo thành do đốt cháy tương

đương lượng CO_2 do cây xanh hấp thu trong quá trình quang hợp (Alptekin *et al.*, 2010).

Cây dầu mè có tên khoa học là *Jatropha curcas* L., có nguồn gốc từ châu Phi, Bắc Mỹ và vùng biển Caribê. Cây có dạng thân bụi, sống lưu niên, có thể cao tới 5 m, nhưng trong sản xuất thường để chiều cao không quá 2 m cho tiện việc thu hái. Cây có thể sinh trưởng và phát triển ở nơi có độ cao 0–500 m so với mặt biển, trên các vùng đất xấu, khô hạn với lượng mưa từ 300 mm/năm trở lên. Quả có ba ngăn trong chứa hạt hình bầu dục, màu đen, kích thước 2×1 cm, khi phơi khô có thể lấy hạt ra dễ dàng. Việt Nam đã đáp ứng được nhiều điều kiện để có thể phát triển cây dầu mè. Trong điều kiện đất đai, khí hậu nhiệt đới, cây dầu mè có thể sinh trưởng nhanh và bắt đầu cho ra quả sau khi trồng từ 6–12 tháng. Hàm lượng dầu của hạt dầu mè khoảng 35–40%, nên năng suất cho dầu của cây rất cao, từ 2,500–3,000 lít dầu /ha/năm (Akintayo E.T. *et al.*, 2004; Banerji R. , 1985; Kandpal J.B. *et al.*, 1995; Kumar M.S. *et al.*, 2003; Pramanik K., 2003; Shah S. *et al.*, 2004).

Phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) là một công cụ thống kê hữu hiệu được ứng dụng trong nghiên cứu nhiều quá trình phức tạp. Phương pháp phân tích tương quan và hồi quy đa biến cũng được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của hai hay nhiều yếu tố độc lập trên hàm mục tiêu. Hơn nữa, mô hình tâm phức hợp (CCD) của RSM được sử dụng để tối ưu hóa nhiều quá trình hóa học và công nghệ (Jeong *et al.*, 2009). Thuận lợi chính của phương pháp này là giảm được số thí nghiệm nhưng vẫn cho được thông tin đầy đủ và những kết quả có ý nghĩa về mặt thống kê. RSM đã thành công trong việc tối ưu hóa sản xuất biodiesel từ nguyên liệu đầu là dầu thực vật và mỡ động vật (Ghadge *et al.*, 2006).

Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm được thực hiện theo mô hình CCD và RSM với năm mức và ba yếu tố để tối ưu hóa quá trình transester hóa tổng hợp JME.

2 PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1 Vật liệu

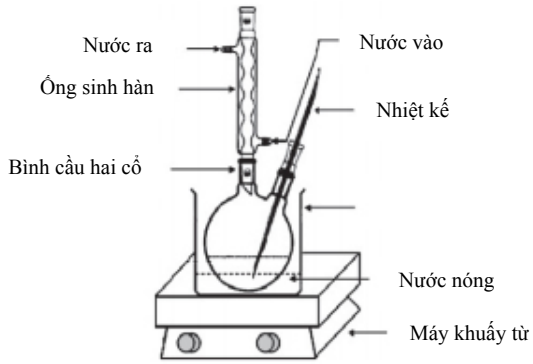
Dầu mè được mua từ khu công nghiệp Biên Hòa, Đồng Nai. Dầu có màu nâu sậm, độ nhớt động học ở 40°C là 43.26 mm^2/s, chỉ số acid khoảng 49 mg KOH/g.

Tất cả các hóa chất được sử dụng là các hóa chất tinh khiết thương mại có xuất xứ Đức hoặc Trung Quốc.

2.2 Phương pháp nghiên cứu

2.2.1 Ester hóa xúc tác acid

Thí nghiệm được bố trí như Hình 1. Giai đoạn này, các điều kiện phản ứng được cố định như sau: nhiệt độ 65°C, thời gian phản ứng là 3 giờ, phần trăm thể tích methanol và phần trăm khối lượng acid sulfuric so với JO lần lượt là 50% và 1%, tốc độ khuấy là 600 vòng/phút và khối lượng JO ở mỗi thí nghiệm được dùng không đổi là 50g.



Hình 1: Thiết bị thực hiện phản ứng ester hóa

2.2.2 Transester hóa xúc tác base

Sau giai đoạn 1, JO thu được có chỉ số acid bằng 2.4 mg KOH/g, thích hợp cho thực hiện phản ứng ở giai đoạn 2. Trong giai đoạn transester hóa, khối lượng của JO thu được sau giai đoạn ester hóa ở mỗi thí nghiệm được dùng không đổi là 50 g, khối lượng methanol từ 16.59 đến 33.41% (tính theo khối lượng dầu), hàm lượng xúc tác thay đổi từ 0.16 đến 1.84% (tính theo khối lượng dầu), thời gian khảo sát từ 26.36 đến 93.64 phút. Xúc tác KOH hòa tan trong methanol bằng máy khuấy từ trước khi cho vào bình phản ứng chứa hỗn hợp dầu và acetone (lượng acetone được lấy không đổi là 10% so với khối lượng dầu) tại nhiệt độ phòng.

Hỗn hợp sau phản ứng được để ổn định trong phễu chiết và tách lớp. Tách lấy lớp trên, cho thêm petroleum ether vào lắc mạnh, sau đó cho tiếp một lượng vừa đủ methanol vào. Lúc này biodiesel sẽ tan trong methanol, còn dầu thừa sẽ tan trong petroleum ether. Tách lấy phần tan trong methanol thu được biodiesel. Rửa hỗn hợp với 30% thể tích nước ấm khoảng 60°C và làm khan bằng cách đun 110°C khoảng 20 phút. Cân sản phẩm và xác định hiệu suất phản ứng.

Dựa vào kết quả phân tích thành phần tính được $\overline{M}_{JME} = \frac{\sum M_i m_i}{\sum m_i}$ trong đó, M_i: khối lượng phân tử trung bình của hỗn hợp methyl ester; m_i: phần trăm

khối lượng methyl ester. Từ đó, tính được hiệu suất tổng hợp biodiesel.

$$(\overline{R}COO)_3C_3H_5 + MeOH \xrightarrow{KOH} 3\overline{R}COOCH_3 + Glycerol \quad (*)$$

Từ khối lượng JO và $\overline{M}_{JO}$ đã biết tính được số mol của JO tham gia phản ứng. Do trong thí nghiệm, lượng MeOH được dùng dư, nên hiệu suất phản ứng sẽ được tính theo JO tham gia phản ứng, từ đó tính được số mol biodiesel theo phản ứng (*).

Hiệu suất phản ứng (kí hiệu H_{JME}) được tính theo công thức sau: $H_{JME} = \frac{m_{TT}}{m_{LT}} \times 100$, với $m_{LT} = \overline{M}_{JME} \times \overline{3n}_{dầu}$.

2.2.3 Xác định độ nhớt động học tại 40ºC và chỉ số acid

Độ nhớt động học được xác định ở 40ºC bằng cách đo thời gian để một thể tích chất lỏng xác định chảy qua một mao quản thủy tinh dưới tác dụng của trọng lực. Trong nghiên cứu này, thiết bị đo độ nhớt Viscosity Measuring unit ViscoClock (Schott Instrument) có chế độ tự động hiển thị thời gian được sử dụng để xác định độ nhớt động học của JO cũng như JME. Độ nhớt động học là kết quả tính được từ thời gian chảy và hằng số tương ứng của nhớt kế Ostwald.

Chỉ số acid của dầu nguyên liệu cũng như biodiesel được xác định bằng phương pháp chuẩn độ thể tích.

2.2.4 Xác định thành phần hỗn hợp methyl ester

Thành phần methyl ester của acid béo được phân tích bằng GC–MS (Thermo scientific), với cột TG-SQC GC (15m×0.25mm×0.25um). He được sử dụng làm khí mang với tốc độ dòng 1.2 mL/min. Chương trình nhiệt độ như sau: Nhiệt độ đầu 60ºC, tốc độ gia nhiệt 10ºC/min đến 260ºC và giữ 1 phút. Thành phần acid béo được xác định thông qua các đỉnh của phổ đồ tương ứng với khối lượng phân tử có trong dữ liệu đi kèm với hệ thống GC–MS.

2.2.5 Các bước thực hiện bài toán quy hoạch theo RSM kết hợp với mô hình CCD

Lựa chọn nhân tố độc lập ảnh hưởng đến hàm mục tiêu Y (hiệu suất tổng hợp biodiesel)

Phần trăm khối lượng methanol so với dầu (X_1), phần trăm khối lượng xúc tác so với dầu (X_2) và thời gian phản ứng (X_3).

Số thí nghiệm

JME

Số thí nghiệm $N = 2^k + 2k + 6$ (N = 20 với k =3). Trong đó, *k* là số biến số độc lập và *2k* số thí nghiệm bổ sung tại điểm sao. Khoảng cách từ tâm đến điểm sao $\alpha = 2^{k/4}$ (α = 1,68 với k =3). Tất cả các nghiên cứu được thực hiện ở năm mức ($-\alpha$, –1, 0, +1, $+\alpha$). Như vậy, trong nghiên cứu này 20 thí nghiệm sẽ được thực hiện với 2^3 số thí nghiệm của quy hoạch toàn phần, 6 thí nghiệm lặp lại tại tâm để đánh giá sai số và 6 thí nghiệm bổ sung tại điểm sao nằm cách vị trí tâm thực nghiệm một khoảng $\pm\alpha$.

Bảng 1: Xác định giới hạn phạm vi và mức biến đổi của các nhân tố

Biến thực	Biến mã hóa	Đơn vị	Mức nghiên cứu				
			–1.68(–α)	**–1**	**0**	**+1**	**+1.68(+α)**
Hàm lượng methanol/dầu	X_1	%	16.59	20	25	30	33.41
Hàm lượng xúc tác/dầu	X_2	%	0.16	0.5	1	1.5	1.84
Thời gian phản ứng	X_3	phút	26.36	40	60	80	93.64

Trong nghiên cứu này, miền khảo sát như sau: hàm lượng methanol từ 16.59 đến 33.41% (tính theo khối lượng dầu), hàm lượng xúc tác thay đổi từ 0.16 đến 1.84% (tính theo khối lượng dầu), thời gian khảo sát từ 26.36 đến 93.64 phút.

Phân tích thống kê

Mô hình thống kê biểu diễn sự phụ thuộc của hiệu suất biodiesel vào các nhân tố được mã hóa là một phương trình đa thức bậc hai có dạng:

$$Y = b_o + \sum_{i=1}^{3} b_i X_i + \sum_{i=1}^{3} b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1+1}^{3} b_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

Y hiệu suất dự đoán tạo thành biodiesel (%).

b_o hệ số hồi quy bậc 0.

X_i nhân tố độc lập thứ i ảnh hưởng đến hàm mục tiêu Y.

b_i hệ số hồi quy bậc 1 mô tả ảnh hưởng của nhân tố X_i với Y.

b_{ii} hệ số hồi quy tương tác mô tả ảnh hưởng của yếu tố X_i với Y.

b_{ij} hệ số hồi quy tương tác mô tả ảnh hưởng đồng thời X_i và X_j với Y.

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Thành phần methyl ester của JME

Thành phần acid béo chính của JME được phân tích bằng GC–MS. Kết quả phân tích thành phần được tóm tắt trong Bảng 2. Thành phần C16:0, C18:1 và C18:2 chiếm nhiều nhất (khoảng 75%). Hàm lượng của đa nối đôi chiếm khoảng 31.37%.

Bảng 2: Thành phần methyl ester của acid béo chính của JME, %

Tên thông thường	Tên theo IUPAC	Cấu trúc*	Phần trăm
Methyl palmitoleate	Methyl 9-hexadecenoate	16:1	2.25
Methyl palmitate	Methyl hexadecanoate	16:0	23.39
Methyl oleate	Methyl 9Z-octadecenoate	18:1	20.16
Methyl linoleate	Methyl 9Z,12Z–octadecadienoate	18:2	31.37
Methyl stearate	Methyl octadecanoate	18:0	13.12
Methyl ricinoleate	Methyl 9–cis–12–hydroxyoctadecenoate	18:1	6.86
Acid béo bão hòa			36.51
Acid béo chứa một nối đôi C=C			29.27
Acid béo chứa nhiều nối đôi C=C			31.37
Thành phần khác			2.85
Khối lượng phân tử trung bình của JO			843.25

** xx:y tương ứng với xx carbon trong acid béo và y là số liên kết đôi*

3.2 Xác định điều kiện tối ưu của phản ứng transester hóa JO bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm theo RSM kết hợp với mô hình CCD

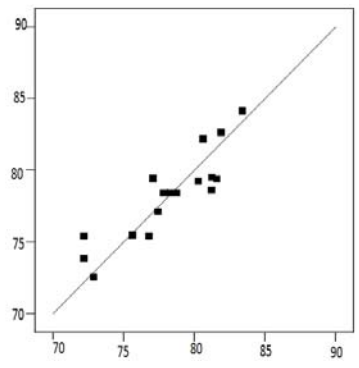
Bài toán tối ưu được lập dựa trên phương trình hồi quy xác định bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm là hàm mô tả sự phụ thuộc của hiệu suất biodiesel vào các nhân tố hàm lượng methanol, hàm lượng xúc tác và thời gian phản ứng của phản ứng transester hóa. Điều kiện ràng buộc là giới hạn của vùng nghiên cứu. Phần mềm Design–Expert 6.0.8 được sử dụng để phân tích, xây dựng phương trình hồi quy và giải bài toán tối ưu.

Bảng 3: Ma trận kế hoạch thực nghiệm và kết quả thực nghiệm

STT	Giá trị thực			Hiệu suất (Y)	
	X_1, Methanol	X_2, Xúc tác	X_3, Thời gian	Thực nghiệm	Tính toán
1	25	1	60	78.33	78.38
2	25	1	60	78.33	78.38
3	25	1	60	78.57	78.38
4	25	1	60	77.84	78.38
5	25	1	60	78.75	78.38
6	25	1	60	78.33	78.38
7	20	0.5	40	83.42	84.12
8	30	0.5	40	80.30	79.2
9	20	1.5	40	81.24	78.59
10	30	1.5	40	77.10	79.40
11	20	0.5	80	81.26	79.48
12	30	0.5	80	72.21	75.38
13	20	1.5	80	72.21	73.82
14	30	1.5	80	75.64	75.45
15	16.59	1	60	80.63	82.14
16	33.41	1	60	81.62	79.38
17	25	0.16	60	77.45	77.11
18	25	1.84	60	72.90	72.51
19	25	1	26.36	81.92	82.61
20	25	1	93.64	76.81	75.39

Mô hình toán học mô tả mối quan hệ giữa hiệu suất phản ứng tổng hợp biodiesel với các biến mã hóa như sau: $Y = 78.38 - 0.82*X_1 - 1.37*X_2 - 2.15*X_3 + 0.84*X_1^2 - 1.26*X_2^2 + 0.22*X_3^2 + 1.43*X_1*X_2 + 0.21*X_1*X_3 - 0.03*X_2*X_3$ (2)

Kết quả so sánh hiệu suất biodiesel thu được từ thực nghiệm với giá trị dự đoán dựa trên mô hình vừa xây dựng thể hiện ở Hình 2.



Hình 2: So sánh hiệu suất biodiesel từ thực nghiệm và từ mô hình được xây dựng

r = 0.89

Hệ số tương quan (coefficient of correlation) r cao cho thấy có thể sử dụng mô hình để tiên đoán thực nghiệm và ngược lại. Điều này cho thấy phương trình hồi quy đã mô tả chính xác các số liệu thực nghiệm.

Giá trị P liên quan đến kiểm định F của mô hình (F–test hay kiểm định Fisher) ở Bảng 4 có giá trị nhỏ hơn 0.05 (179 P = 0.0179) cho thấy độ tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm từ đó cho thấy độ tin cậy thống kê. Hệ số xác định R^2 (coefficient of determination) cho biết 79.21% sự biến đổi của hiệu suất biodiesel là do ảnh hưởng của các biến độc lập như hàm lượng methanol, hàm lượng xúc tác và thời gian phản ứng, chỉ có 20.79% sự thay đổi là do các yếu tố không xác định được gây ra (sai số ngẫu nhiên). Bên cạnh đó, hệ số biến thiên CV (coefficient of variation) thấp chứng tỏ rằng các thí nghiệm được thực hiện chính xác và độ lặp lại cao (Box GEP *et al.*, 1978).

Bảng 4: Kết quả phân tích phương sai cho mô hình đa thức bậc hai

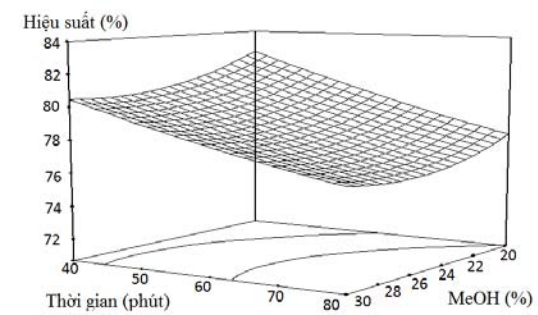
Nguồn biến thiên	Tổng bình phương	Bậc tự do	Trung bình bình phương	Giá trị F	Giá trị P
Mô hình	151.98	9	16.89	4.18	0.0179
X_1	9.21	1	9.21	2.28	0.1621
X_2	25.47	1	25.47	6.30	0.0309
X_3	63.01	1	63.01	15.59	0.0027
X_1X_2	16.42	1	16.42	4.06	0.0715
X_1X_3	0.34	1	0.34	0.083	0.7789
X_2X_3	7.200E-003	1	7.200E-003	1.782E-003	0.9672
X_1^2	10.18	1	10.18	2.52	0.1436
X_2^2	22.99	1	22.99	5.69	0.0383
X_3^2	0.69	1	0.69	0.17	0.6890
Phần dư	40.41	10	4.04		0.1621
Sai số của mô hình	39.94	5	7.99	85.12	<0.0001
Sai số ngẫu nhiên	0.47	5	0.094		
Tổng số	192.39	19			

CV= 2.57%, R^2 = 0.7921

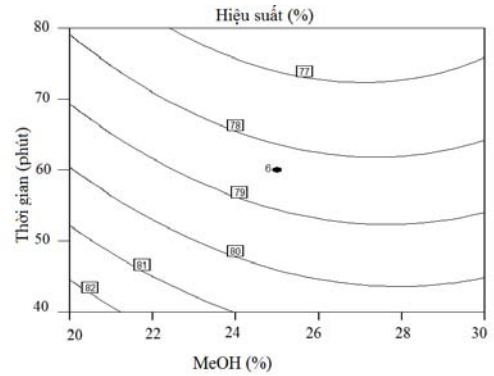
Trong vùng khảo sát, phương trình hồi quy cho thấy hiệu suất biodiesel chịu ảnh hưởng bậc 1, bậc 2 của cả ba nhân tố nghiên cứu X1, X2, X_3 và chịu ảnh hưởng đồng thời của các cặp nhân tố hàm lượng methanol – hàm lượng xúc tác (X_1*X_2), hàm lượng methanol – thời gian phản ứng (X_1*X_3), hàm lượng xúc tác – thời gian phản ứng (X_2*X_3).

Ảnh hưởng của các yếu tố độc lập có thể được giải thích dựa vào phương trình hồi quy (2). Hàm lượng xúc tác có ảnh hưởng tiêu cực đối với hiệu suất phản ứng tổng hợp biodiesel cả bậc một và bậc hai. Điều này có thể được giải thích là do khi tăng hàm lượng KOH, phản ứng xà phòng hóa xảy ra mạnh làm tăng độ nhớt của hỗn hợp phản ứng và làm giảm hiệu suất. Thời gian phản ứng ảnh hưởng tiêu cực bậc một lớn nhất đến hiệu suất phản ứng. Điều này cũng có thể được giải thích là do khi phản ứng gần như hoàn tất việc kéo dài thời gian phản ứng sẽ không có ý nghĩa, ngược lại, có thể xảy ra phản ứng thủy phân ester (phản ứng nghịch) làm giảm hiệu suất phản ứng. Hàm lượng methanol ảnh hưởng tiêu cực bậc một và tích cực bậc hai đến hiệu suất phản ứng nhưng hầu như không đáng kể.

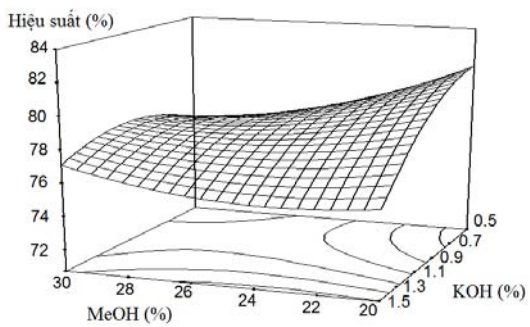
Đồ thị các đường đồng mức (contour) Hình 3b, 3d và 3f được xây dựng trên cơ sở giữ cố định hàm lượng KOH (1% so với khối lượng dầu), thời gian và hàm lượng MeOH (25% so với khối lượng dầu) tương ứng. Theo đồ thị Hình 3b và 3d thì khi hàm lượng MeOH lớn hơn 21% hiệu suất phản ứng có khuynh hướng giảm. Tương tự như vậy, đồ thị Hình 3b và 3f cho thấy khi thời gian phản ứng kéo dài hơn 45 phút thì hiệu suất phản ứng giảm. Hàm lượng xúc tác cũng ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu suất phản ứng khi hàm lượng của nó vượt quá 0.8% so với lượng dầu.



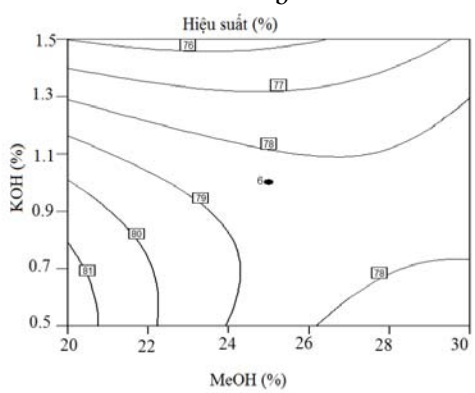
a



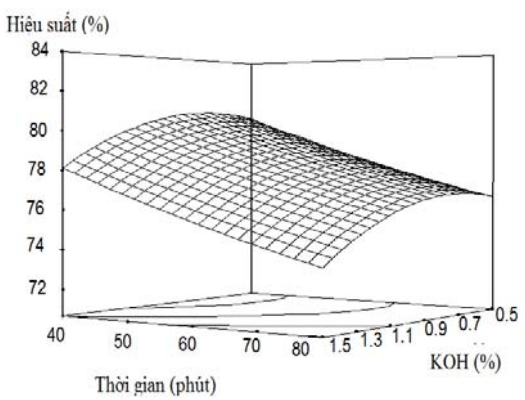
b



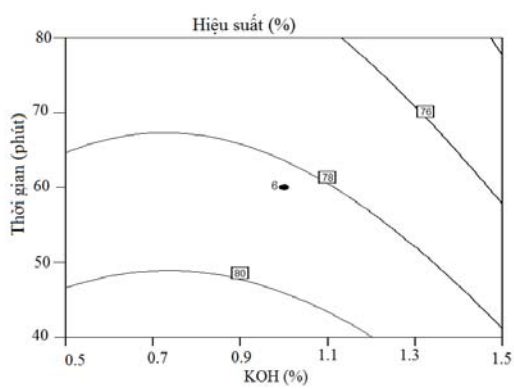
c



d



e



f

Hình 3: Đồ thị dạng 3D (a), (c), (e) (3D response surface) và các đường đồng mức (b), (d), (f) (2D contour) cho biết ảnh hưởng của các cặp yếu tố đến hiệu suất biodiesel khi yếu tố còn lại được giữ cố định ở mức không: (a) và (b) hàm lượng methanol – thời gian phản ứng; (c) và (d) hàm lượng methanol – hàm lượng xúc tác, (e) và (f) hàm lượng xúc tác – thời gian phản ứng

3.3 Những tính chất hóa – lý của JME

ASTM: American Standards for Testing Materials

Theo tiêu chuẩn ASTM, giới hạn thấp nhất của hàm lượng ester (tỷ lệ với hiệu suất biodiesel) của biodiesel là 96.5%, từ kết quả ở Bảng 5, hàm lượng ester của JME là 97.15%, điều này cho thấy hầu như toàn bộ JO đã chuyển hóa thành ester.

Các chỉ tiêu về chỉ số acid và độ nhớt động học ở 40^{o}C của sản phẩm biodiesel tổng hợp được đều đạt yêu cầu theo tiêu chuẩn ASTM.

Bảng 5: Những tính chất hóa–lý của JME

Các thông số phân tích	ASTM	Dầu Diesel	JME
Hàm lượng methyl ester tổng, %	96.5	–	97.15
Chỉ số acid, mg KOH/g	0.5 max	–	0.41
Độ nhớt động học ở 40 ^{o}C, mm^2/s	1.9–5.0	3.2	4.25

4 KẾT LUẬN

Một quá trình gồm hai bước gồm (1) ester hóa xúc tác acid và (2) transester hóa xúc tác base đã được thực hiện trong nghiên cứu này để tổng hợp biodiesel JO. Những yếu tố ảnh hưởng đến quá trình transester hóa như hàm lượng methanol, hàm lượng xúc tác và thời gian phản ứng đã được phân tích thống kê theo mô hình tâm phức hợp (CCD) và phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM). Hiệu suất tối ưu đạt được 83.71% tương ứng với các điều kiện sau: hàm lượng methanol 20.2% so với lượng dầu, nồng độ xúc tác 0.64 % so với khối lượng dầu, sau 40.8 phút thực hiện phản ứng. Các chỉ tiêu về chất lượng như hàm lượng methyl ester, chỉ số acid và độ nhớt động học ở 40^{o}C của sản phẩm biodiesel tổng hợp được đều đạt yêu cầu theo tiêu chuẩn ASTM.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Akintayo, E.T., 2004. Characteristics and composition of Parkia biglobbossa and Jatropha curcas oils and cakes. Bioresource Technology 92, 307–310.
2. Banerji R., Chowdhury A.R., Misra G., Sudarsanam G., Verma S.C., Srivastava,G.S., 1985. Jatropha seed oils for energy. Biomass 8, 277–282.
3. Box G. E. P, Hunter W.G., Hunter J.S., Statistics for experimenters, 1978. New York: Wiley; p. 291–334.
4. Ghadge S.V., Raheman H., 2006. Process optimization for biodiesel production from mahua (*Madhuca indica)* oil using response surface methodology. Bioresource Technology, 97, 379–384.
5. Guru M, Artukongln B.O., Keskin A, Koca A., 2009. Biodiesel production from waste animal fat and improvement of its characteristics by synthesized nickel and magnesium additive. Energy conversion and Management, 50, 498–502.
6. Jeong, G. T., Yang, H. S., & Park, D. H., 2009. Bioresource Technology, 100, 25–30.
7. Kandpal J.B., Madan M., 1995. Jatropha curcus: a renewable source of energy for meeting future energy needs. Renewable Energy 6 (2), 159–160.
8. Kumar M.S., Ramesh A., Nagalingam B., 2003. An experimental comparison of methods to use methanol and Jatropha oil in a compression ignition engine. Biomass and Bioenergy 25, 309–318.
9. Pramanik K., 2003. Properties and use of Jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. Renewable Energy 28, 239–248.
10. Shah S., Sharma A., Gupta M.N., 2004. Extraction of oil from Jatropha curcas L. seed kernels by enzyme assisted three phase partitioning. Industrial Crops and Products 20, 275–279.