



สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไขไก่
โดยใช้อุลตราโซนิกในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

Optimization for Biodiesel Production from Waste Chicken Fat
Using Ultrasonic Assisted in Transesterification

ธีรวัช สิงหศิริ¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไขไก่โดยใช้อุลตราโซนิกช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน วางแผนการทดลองโดยวิธี Box-Behnken Design ด้วยโปรแกรม Minitab (Version 16) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.5 1.0 และ 1.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (3:1 6:1 และ 9:1) และเวลาการทำปฏิกิริยา (20 30 และ 40 นาที) โดยใช้อุลตราโซนิกคลื่นความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ช่วยในการทำปฏิกิริยา จากผลการศึกษารูปแบบสมการที่ได้พบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน และเวลาการทำปฏิกิริยา มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์อย่างมีนัยสำคัญ $R^2 = 99.96\%$ สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลพบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.50 ร้อยละโดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมัน เท่ากับ 6.87:1 และเวลาการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 32.52 นาที ตามลำดับ โดยสภาวะดังกล่าวสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.11 น้ำมันไขไก่มีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ เนื่องจากมีค่าเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าร้อยละ 96.5 ตามมาตรฐานของ ASTM 6751

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000

ABSTRACT

The aim of this work was to investigate the optimum conditions of biodiesel production from waste chicken fat by ultrasonic assisted transesterification. The Box-Behnken design of experiment was carried out using the Minitab (version 16) with three experimental factors affecting on the production of biodiesel including catalyst concentration (0.5, 1.0 and 1.5 % w/w), methanol to oil molar ratio (3:1, 6:1 and 9:1) and reaction time (20, 30 and 40 min) using ultrasonic at 30 kHz. The results were analyzed using response surface methodology (RSM). A quadratic model was used for the prediction of the methyl ester yield. Probability value ($P < 0.05$) showed a very high significance for the regression model with the R^2 of 99.96% indicating the high accuracy of the model. The optimum conditions were 1.50 %w/w NaOH, methanol to oil molar ratio of 6.87:1 and reaction time of 32.52 min. Using the optimum conditions, the production yield of methyl ester was of 99.11%. The chicken fat has a potential to be used as raw material in the biodiesel production as it provided the production yield higher than the 96.5% according to biodiesel standard of ASTM 6751.

คำสำคัญ: ทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน การหาสภาวะที่เหมาะสม พื้นที่ผิวตอบสนอง การออกแบบการทดลอง

Keywords: Transesterification, Optimal condition, Response surface methodology, Statistical experimental design

บทนำ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในหลายประเทศทั่วโลกที่มีอัตราการใช้พลังงานทุกประเภทเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อาทิ ถ่านหิน ปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันดีเซล โดยในปี พ.ศ. 2556 ประเทศไทยใช้น้ำมันดีเซลจำนวน 20,832 ล้านลิตร เพิ่มขึ้นเป็น 21,078 ล้านลิตร ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยจึงได้ตระหนักและส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียน ตลอดจนเชื้อเพลิงชีวภาพ ได้แก่ เอทานอล และไบโอดีเซล เนื่องจากสามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตร ไขมันสัตว์ และของเสียจากอุตสาหกรรม ประเทศไทยมีการผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นทุกปี โดยในปี พ.ศ. 2557 สามารถผลิตไบโอดีเซลได้จำนวน 1,164 ล้านลิตร

เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2556 จำนวน 1,038 ล้านลิตร หรือคิดเป็นร้อยละ 12 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์, 2558) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมาจากผลผลิตทางการเกษตร และไขมันสัตว์ อาทิ ปาล์ม ทานตะวัน สบู่ดำ น้ำมันเหลือใช้ และไขมันสัตว์ ได้แก่ หมู วัว และไก่ (ศิริรัชช, 2557; จักรพงศ์และสรพงษ์, 2556; Nadir et al., 2009) น้ำมันไข่ไก่ได้จากการสกัดเป็นน้ำมันจากอุตสาหกรรมแปรรูปเนื้อไก่ โดยประเทศไทยส่งออกเนื้อไก่ราว 560,000 ตันในปี พ.ศ.2557 (สมาคมผู้ผลิตไก่เพื่อส่งออกไทย, 2557) ในกระบวนการแปรรูปไก่จะมีส่วนที่เป็นของเสียชนิดไขมันไก่อยู่ประมาณร้อยละ 4 หรือ 22,400 ตัน และเมื่อนำมาสกัดเป็นน้ำมันจะได้ปริมาณน้ำมันประมาณร้อยละ 77 หรือ 17,248 ตัน (ชิน, 2551) หากปล่อยสู่

สิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะแหล่งน้ำสาธารณะ โดยไม่ผ่านการบำบัดก่อนทิ้งหรือการจัดการที่มีประสิทธิภาพไม่เพียงพอจะทำให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำและส่งผลกระทบต่อระบบสิ่งแวดล้อมได้ จากปัญหาของสิ่งแวดล้อม และวิกฤติพลังงาน น้ำมันไขไก่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ Box-behnken design ในการออกแบบการทดลองของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไขไก่โดยใช้อุลตราโซนิกช่วยในการทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชัน

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่างน้ำมัน

น้ำมันไขไก่สำหรับการสังเคราะห์ไบโอดีเซลรวบรวมไขไก่จากโรงงานชำแหละเนื้อไก่ ในพื้นที่จังหวัดอุดรธานี โดยนำไขไก่จำนวน 6 กิโลกรัม มาสกัดน้ำมันด้วยวิธีการเจียวในกระทะไฟฟ้า ด้วยอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับค่าปัจจัยของการออกแบบโดย Box-Behnken

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ระดับ		
		-1	0	+1
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	M	0.5	1.0	1.5
อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อโมลน้ำมัน	C	3:1	6:1	9:1
เวลาการทำปฏิกิริยา (นาที)	T	20	30	40

3. การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

นำผลการวิเคราะห์ของร้อยละเมทิลเอสเทอร์นำไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยใช้ multiple regression analysis เมื่อได้ค่าประมาณและค่าทดสอบสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยแล้วนำผลมาสร้างสมการทำนายสถานะที่เหมาะสม แสดงดังสมการที่ (1) เมื่อได้สมการทำนายจึงนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองและหาค่าปัจจัย

กรองด้วยกระดาษกรอง จะได้น้ำมันไขไก่ประมาณ 4.6 กิโลกรัม นำไปทดสอบร้อยละกรดไขมันอิสระ (%FFA) ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.65 และเตรียมเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

2. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมแบบพื้นผิวตอบสนองของการผลิตไบโอดีเซลด้วยโปรแกรม MINITAB Release 16.1.0 ด้วยวิธี Box-Behnken (กิตติพลและคณะ, 2555) โดยมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิตไบโอดีเซลจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (M; 0.5 1.0 และ 1.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก) อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมันไขไก่ (C; 3:1 6:1 และ 9:1) และเวลาการทำปฏิกิริยา (T; 20, 30 และ 40 นาที) แสดงดังตารางที่ 1 และเมื่อใช้โปรแกรม MINITAB ออกแบบการทดลองผลที่ได้จำนวน 15 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 2 นำผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์

ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด โดยใช้ฟังก์ชัน response optimizer ในโปรแกรม MINITAB

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + \varepsilon \quad (1)$$

เมื่อ Y = ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซล

b_0 = ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร

b_i = สัมประสิทธิ์เชิงเส้นตรงของตัวแปร

b_{ii} = สัมประสิทธิ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปร

b_{ij} = สัมประสิทธิ์ของปฏิกริยาสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

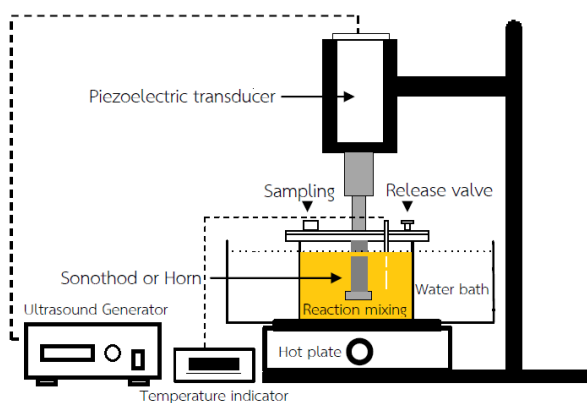
\mathcal{E} = สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

X_i = ปัจจัยที่ศึกษา

4. การเตรียมไบโอดีเซล

ชั่งน้ำมันไข่ไก่ 150 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนจนกระทั่งน้ำมันมีอุณหภูมิเข้าใกล้ 60 องศาเซลเซียส ละลายเมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามปริมาณ

ของแต่ละการทดลอง แล้วเทลงไปในน้ำมันไข่ไก่ ทำการกวนผสมด้วย magnetic stirrer ปลดคลื่นอัลตราโซนิก ความถี่ 30 kHz และเริ่มจับเวลาของแต่ละการทดลอง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำไบโอดีเซลเทลงในกรวยแยกเพื่อแยกเอากลิเซอรินซึ่งอยู่ชั้นล่างออกให้เหลือแต่ไบโอดีเซล ล้างด้วยน้ำกลั่นที่อุ่นหลายครั้ง โดยตรวจสอบด้วยค่าพีเอชเท่ากับตอนก่อนล้างไบโอดีเซล นำไบโอดีเซลมากำจัดน้ำด้วย Na_2SO_4 หลังจากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง นำไปวิเคราะห์ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี อุปกรณ์การสังเคราะห์ไบโอดีเซล แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อุปกรณ์การสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

5. การวิเคราะห์ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ฉีดตัวอย่างไบโอดีเซลปริมาตร 1 ไมโครลิตร เข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Thermo Finnigan, Italy) โดยใช้แคพิลารีคอลัมน์ ZB-5MS เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร อุณหภูมิของคอลัมน์ 280 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของ detector 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของ injector 260 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (ฮีเลียม) 1 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวตรวจวัดแบบฟเลมไอออไนเซชัน

(flame ionization detector, FID) ฉีดสารโดยใช้ split ratio เท่ากับ 1:50

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติของการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2 และ 3 และจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Box-Behnken จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและค่าสถิติจากสมการที่ (1) แสดงดังตารางที่

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken และร้อยละเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันไข่ไก่

การทดลองที่	ปริมาณตัวเร่ง NaOH; M (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อัตราส่วนโดยโมล เมทานอลต่อโมลน้ำมัน; C	เวลา; T (นาที)	ร้อยละ เมทิลเอสเทอร์
1	1.5	9	30	90.2
2	1.0	3	20	81.0
3	1.5	3	30	88.3
4	0.5	6	20	88.9
5	1.0	6	30	98.4
6	0.5	3	30	78.2
7	1.0	9	20	92.4
8	1.0	6	30	98.2
9	1.0	3	40	87.0
10	1.0	9	40	93.5
11	1.5	6	40	95.0
12	0.5	6	40	93.2
13	0.5	9	30	94.7
14	1.5	6	20	93.1
15	1.0	6	30	98.1

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและค่าสถิติของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันไข่ไก่

Term	Coef	SE Coef	ค่าสถิติ T	ค่าสถิติ P
Constant	-8.5750	1.45384	-5.898	0.002
ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์; M	46.3333	1.10824	41.808	0.000
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมัน; C	14.8097	0.18471	80.180	0.000
เวลาการทำปฏิกิริยา; T	2.0487	0.06878	29.789	0.000
M*M	-12.6167	0.41546	-30.368	0.000
C*C	-0.8032	0.01154	-69.601	0.000
T*T	-0.0253	0.00104	-24.350	0.000
M*C	-2.4333	0.06653	-36.576	0.000
M*T	-0.1200	0.01996	-6.013	0.002
C*T	-0.0408	0.00333	-12.276	0.000

หมายเหตุ: ค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง (S) = 0.199583, ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) = 99.96%, ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ (R^2 -adj) = 99.89%

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการมีค่า R^2 เท่ากับ 99.96% ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ R^2 -adj มีค่า

เป็น 99.89% หมายความว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลของน้ำมัน และเวลาการทำปฏิกิริยาสามารถอธิบายความผันแปร

หรือเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์ แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) ในตารางที่ 4 พบว่า ค่าสถิติ P เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ($P < 0.05$) ทำให้ทราบถึงปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลน้ำมัน และเวลาการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์ นั่นคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ของปัจจัยปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลของน้ำมัน และเวลาการทำปฏิกิริยาจะส่งผลต่อคุณภาพหรือปริมาณของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ นอกจากนี้ยังแสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวตอบสนอง (ดารีกาและคณะ, 2556)

จากตารางที่ 3 สามารถสร้างสมการทำนายร้อยละเมทิลเอสเทอร์จากปัจจัยของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลของ

น้ำมัน และเวลาการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} \% \text{Methylester} &= 46.3333M + 14.8097C + 2.0487T \\ &- 2.4333M * C - 0.1200M * T \\ &- 0.0408C * T - 12.6167M^2 \\ &- 0.8032C^2 - 0.0253T^2 - 8.5750 \end{aligned} \quad (2)$$

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการจากตารางที่ 4 พบว่า ความสมบูรณ์ของแบบจำลอง (lack of fit) ซึ่งได้พิจารณาจากค่าสถิติ P ของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ มีค่าเท่ากับ 0.330 มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความสมบูรณ์กับข้อมูล ที่ระดับนัยสำคัญ 99.96% แบบจำลองนี้มีตัวแปรในสมการที่เพียงพอ ดังนั้นจึงสามารถนำสมการข้างต้นมาใช้ในการทำนายร้อยละเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันไข่ไก่

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source of variance	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	ค่าสถิติ F	ค่าสถิติ P
Regression	9	494.338	494.338	54.926	1378.91	0.000
Linear	3	203.643	290.921	96.974	2434.48	0.000
Square	3	229.963	229.963	76.654	1924.38	0.000
Interaction	3	60.733	60.733	20.244	508.22	0.000
Residual Error	5	0.199	0.199	0.040		
Lack-of-Fit	3	0.152	0.152	0.051	2.18	0.330
Pure Error	2	0.047	0.047	0.023		

2. การสร้างพื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลตัวแปรที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันไข่ไก่

เมื่อได้สมการทำนายร้อยละเมทิลเอสเทอร์จากสมการที่ (2) จึงนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (surface) และกราฟแสดงรูปร่าง (contour) แสดงดังรูปที่ 2 ถึง 4

2.1 อิทธิพลของเวลาการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากสมการและกราฟพื้นผิวตอบสนองของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการทำปฏิกิริยากับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยกำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของ-

เมทานอลกับโมลของน้ำมันอยู่ที่ระดับกลาง เท่ากับ 6:1 (3:1 6:1 และ 9:1) แสดงดังรูปที่ 2 พบว่า ร้อยละเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 98.6 ในสภาวะที่มีเวลาการทำปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 28–38 นาที และเมื่อเวลาผ่านไปหลังจาก 38 นาที ปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลงในช่วงระยะเวลาเริ่มแรกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดค่อนข้างช้า ทั้งนี้ อาจเกิดจากการผสมกวนและการทำปฏิกิริยาระหว่างกันของเมทานอลกับน้ำมัน แต่จะดำเนินไปได้อย่างรวดเร็วมากเมื่อเวลาผ่านไป จนทำให้เกิดเมทิลเอสเทอร์สูงสุด แต่เมื่อมีการใช้เวลานานมากเกินไปอัตราการผลิตคืนกลับของปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นผลทำให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ลดลง (Viriya-empikul et al., 2009) อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้คลื่นอัลตราโซนิก ความถี่ 30 KHz ช่วยในการทำปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาจนเสร็จสมบูรณ์จะสั้นกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันทั่วไป (Ji et al., 2006) โดยเมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไข่ไก่ โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (ธีรวัช, 2557) พบว่า เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาของสภาวะที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 81.82 นาที ซึ่งใช้มากกว่าในการศึกษานี้ ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิกสามารถทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจึงส่งผลต่ออิทธิพลการทำปฏิกิริยาของเมทานอลกับน้ำมันให้กลายเป็นเอสเทอร์ได้เร็วขึ้น (Vlada et al., 2012) สำหรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อใช้ปริมาณเพิ่มขึ้นพบว่า ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่มีค่าสูงสุดนั้นปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0.87-1.32 ร้อยละโดยน้ำหนัก และเมื่อใช้มากกว่า 1.32 ร้อยละโดยน้ำหนักแล้วจะทำให้ร้อยละเมทิล-

เอสเทอร์ลดลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเกิดได้เร็วขึ้น แต่จะเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าคงที่หนึ่งและจะเริ่มลดลง (Demirbas, 2005) หากใช้ปริมาณมากจะทำให้เกิดสบู่ (ปกรณ, 2554) และอิมัลชันสูงขึ้นจึงส่งผลให้ได้เมทิลเอสเทอร์ในปริมาณที่ต่ำ (Aninidita, 2010)

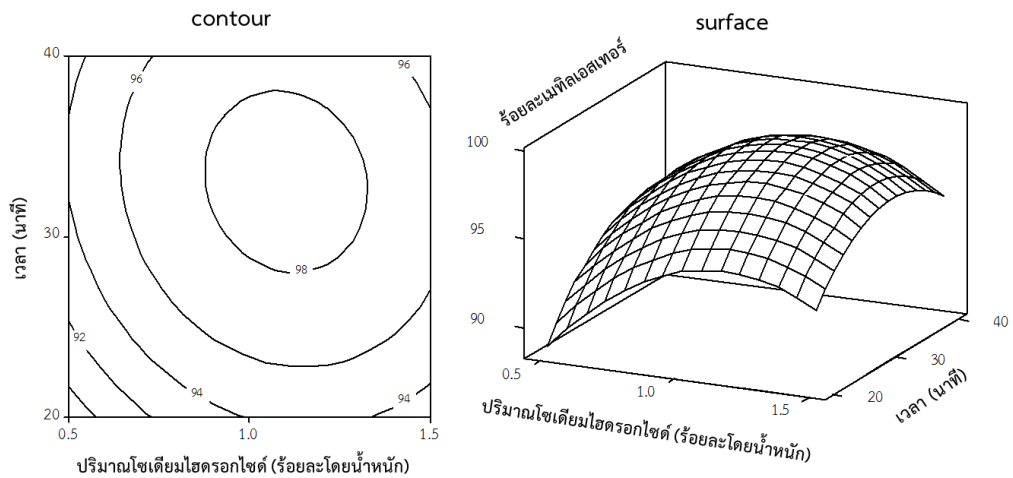
2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมันและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลของน้ำมัน และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยกำหนดให้เวลาการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ระดับกลาง มีค่าเท่ากับ 30 นาที แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า ร้อยละเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมันเพิ่มขึ้น โดยร้อยละเมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 98.9 เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันเท่ากับ 4.8:1 – 8.9:1 เมื่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.5–1.50 ร้อยละโดยน้ำหนัก การใช้เมทานอลในปริมาณที่มากพอจะทำให้ปฏิกิริยาถูกผลักไปข้างหน้าได้เร็วขึ้นและทำให้เกิดเมทิลเอสเทอร์ในปริมาณที่สูง (Shu, 2010) แต่ต้องไม่สูงจนเกินไป เนื่องจากจะส่งผลต่อการแยกเฟสของเมทิลเอสเทอร์และเกิดปฏิกิริยาผันกลับส่งผลทำให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ลดลง (Crabbe, 2001)

2.3 อิทธิพลของเวลาการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมัน

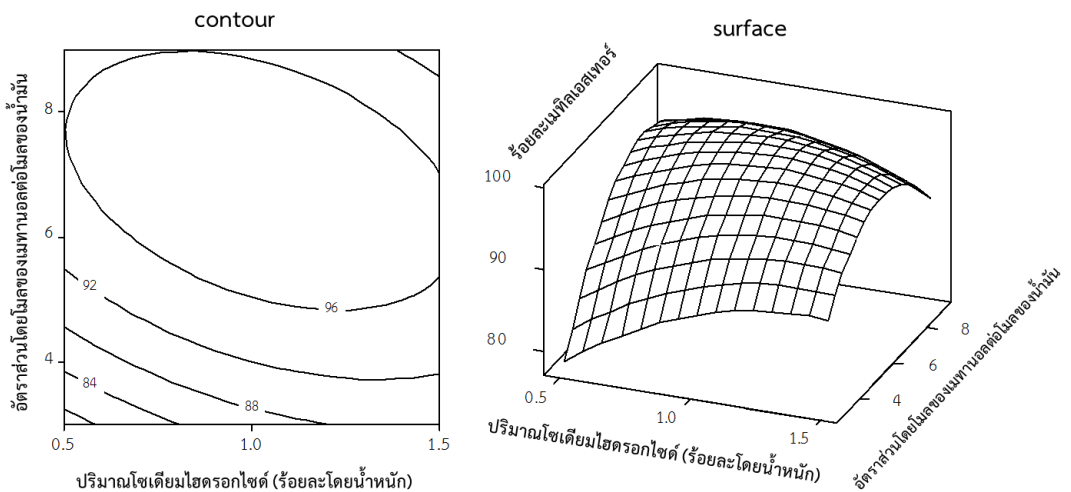
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมัน โดยกำหนดให้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ที่ระดับกลาง มีค่าเท่ากับ 1.0 ร้อยละโดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า ร้อยละเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มขึ้น โดยร้อยละเมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงสุด

เท่ากับ ร้อยละ 99.1 เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30-34 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลของน้ำมันเท่ากับ 6.4:1 - 7.2:1 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลของน้ำมันเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลกระทบของปฏิกิริยาจากการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่ช่วยในการทำปฏิกิริยาพบว่า ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมันยังคง

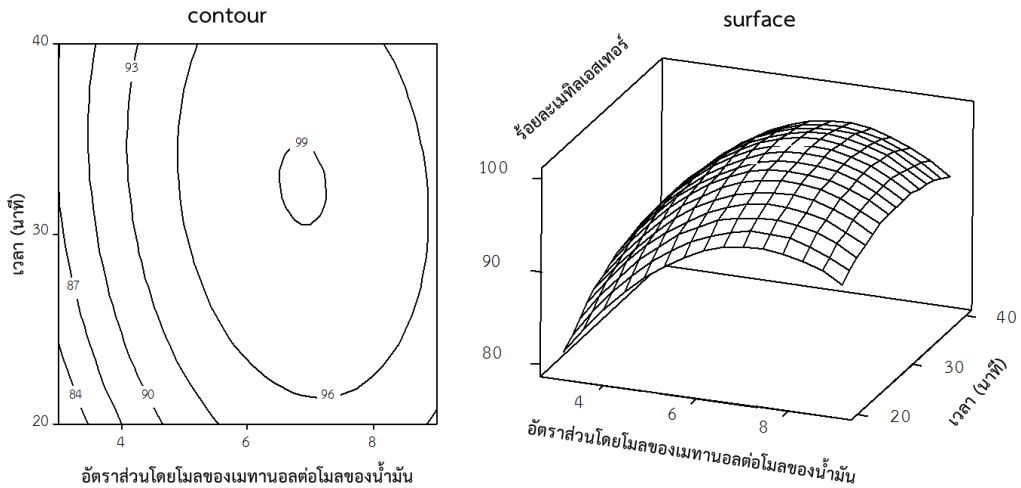
ใช้มากกว่า 3:1 (ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมลทำปฏิกิริยากับเมทานอล 3 โมล) กล่าวคือ คลื่นอุลตราโซนิกทำให้เกิดฟองอากาศของขนาดเล็กและทำให้เมทานอลทำปฏิกิริยากับน้ำมันและเป็นเมทิลเอสเทอร์ได้เร็วขึ้นเท่านั้น แต่อาจจะไม่มีผลต่อความเข้มข้นของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลของน้ำมันในปฏิกิริยา (Hsiao, 2010; Lifka, 2004; Georgogianni, 2009; Chand, 2010)



รูปที่ 2 contour plot และ surface plot อิทธิพลของเวลาการทำปฏิกิริยาและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3 contour plot และ surface plot อิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อ โมลของน้ำมัน



รูปที่ 4 contour plot และ surface plot อิทธิพลของเวลาการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมัน ต่อโมลของน้ำมัน

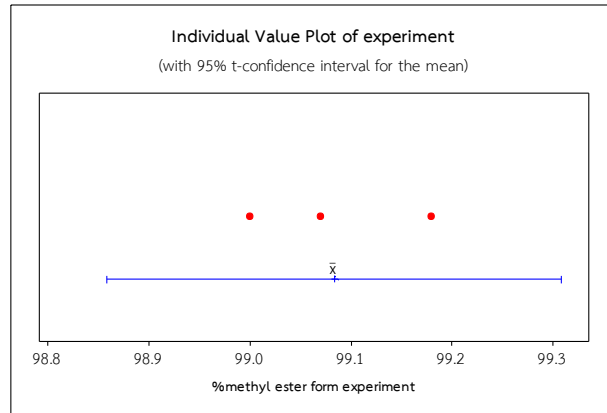
Optimal D 0.98228	High C ₁ Low	NaOH 1.50 [1.0152] 0.50	Methanol 9.0 [6.8788] 3.0	Time 40.0 [32.5253] 20.0
Composite Desirability 0.98228				
yield Maximum y = 99.1142 d = 0.98228				

รูปที่ 5 สภาวะที่เหมาะสม (optimization chart) ที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

3. การหาค่าสภาวะที่เหมาะสม

เมื่อนำสมการที่ (2) ศึกษาค่าสภาวะที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม MINITAB จะได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไข่ไก่ แสดงดังรูปที่ 5 เป็นดังนี้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (M) เท่ากับ 1.50 ร้อยละโดยน้ำหนักอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมัน (C) เท่ากับ 6.87:1 และเวลาการทำปฏิกิริยา (T) เท่ากับ 32.52 นาที โดยได้เมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.11

เพื่อทำการยืนยันสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลที่จะมีปริมาณสูงสุดจากสมการ (2) จึงได้ทำการทดลองผลิตไบโอดีเซลตามสภาวะที่เหมาะสมซ้ำจำนวน 3 การทดลอง เพื่อทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ย โดยโปรแกรม MINITAB โดยจะได้ค่าสถิติ $T = -0.17$ และ $T_{\alpha/2} = 4.303$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถยอมรับ H_0 อย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และที่ระดับความเชื่อมั่นนี้มีช่วงของค่าเฉลี่ยเมทิลเอสเทอร์ในช่วงร้อยละ 98.85 ถึง 99.35 นั่นคือร้อยละเมทิลเอสเทอร์จากการทดลองซ้ำมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางสถิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ช่วงของค่าเฉลี่ยร้อยละเมทิลเอสเทอร์ในสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไข่ไก่ โดยใช้อุลตราโซนิกในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้โปรแกรม MINITAB ด้วยวิธีออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ปัจจัยการศึกษา ได้แก่ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมัน และเวลาการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ที่ระดับความเชื่อมั่น R^2 เท่ากับ 99.96% และมีสภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการผลิตไบโอดีเซลดังนี้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.02 ร้อยละโดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมัน เท่ากับ 6.88:1 และเวลาการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 32.53 นาที ตามลำดับ โดยสภาวะดังกล่าวได้เมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.11 เมื่อทำการทดลองเพื่อยืนยันร้อยละเมทิลเอสเทอร์จากแบบจำลอง พบว่าค่าเฉลี่ยของเมทิลเอสเทอร์อยู่ในช่วงร้อยละ 98.85 ถึง 99.35

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยงบประมาณรายได้จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ประจำปีงบประมาณ 2558

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ฯ. สถิติพลังงานของประเทศไทย พ.ศ. 2557. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ฯ กระทรวงพลังงาน, แหล่งข้อมูล: <http://www.dede.go.th/dede>. ค้นเมื่อวันที่ 25 มกราคม 2558.
- กิตติพล กลสิการ วัชระ เวียงแก้ว ศิริวรรณ ศรีสรณ์ และชนาธิป สามารถ. (2555). การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยง *Chlorella vulgaris* ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 41(1): 188-197.
- จักรพงษ์ ไชยบุรี และสรพงษ์ แสงสุวรรณ. (2556). การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KF/CaO ในตัวทำละลายร่วม. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 41(1): 176-182.
- ชิน ผางนุ้ย. (2551). การผลิตไบโอดีเซลจากไข่ไก่ในระดับชุมชน. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพมหานคร: 83 หน้า

- ดาภิภา อวะภาค นพรัตน์ มะเท และ ดลฤดี พิชัยรัตน์. (2556). การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากสาหร่ายพมนางโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 41(2): 414-430.
- ธีรวัช สิงหศิริ. (2557). การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไขไก่ โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง. วารสารวิจัยพลังงาน 11(2): 54-66.
- ปกรณ วิษยานุวัติน. (2554). เทคโนโลยีการเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อการผลิตไบโอดีเซล. วารสารวิจัยพลังงาน 8(2): 61-75.
- สมาคมผู้ผลิตไก่เพื่อส่งออกไทย. สถิติการส่งออกเนื้อไก่. แหล่งข้อมูล: <http://www.thaipoultry.org/STATISTIC/tabid/248/Default.aspx>. ค้นเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2557.
- Aninidita, K., Subrata, K. and Souti, M. (2010). Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource Technology* 10: 7201–7210.
- Chand, P., Chintareddy, V.R., Verkade, J.G. and Grewell, D. (2010). Enhancing biodiesel production from soybean oil using ultrasonics. *Energy Fuels* 24: 2010–2015.
- Crabbe, E., Nolasco-Hipolito, C., Kobayashi, G., Sonomoto, K., and Ishizaki, A. (2001). Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties. *Process Biochemistry* 37(1): 65-71.
- Demirbas, A. (2005). Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and noncatalytic supercritical methanol transesterification methods. *Progress Energy Combustion Science* 3: 466–487.
- Georgogianni, K.G., Katsoulidis, A.K., Pomonis, G., Manos, P.J. and Kontominas, M.G. (2009). Transesterification of rapeseed oil for the production of biodiesel using homogeneous and heterogeneous catalysis. *Fuel Process Technology* 90: 1016–1022.
- Hsiao, M.C., Lin, C.C., Chang, Y.H. and Chen, L.C. (2010). Ultrasonic mixing and closed microwave irradiation-assisted transesterification of soybean oil. *Fuel* 2010(89): 3618–3622.
- Ji, J., Wang, J., Li, Y., Yu, Y. and Xu, Z. (2006). Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics* 44: 411–414.
- Lifka, J. and Ondruschka, B. (2004). Influence of mass transfer on the production of biodiesel. *Chemical Engineering Technology* 27: 1156–1159.
- Nadir, D., Coskun, A., Derya, Y. I., Mahmut, B., and Aziz, T. (2009). Biodiesel production from sunflower, soybean, and waste cooking oils by transesterification using lipase immobilized onto a novel microporous polymer. *Bioresource Technology* 100: 1983–1991.
- Shu, Q., Gao, J., Nawaz, Z., Liao, Y. and Wang, D. (2010). Synthesis of biodiesel from waste vegetable oil with large amounts of free fatty acids using a carbonbased solid acid catalyst. *Applied Energy* 87: 2589–2596.
- Viriya-empikul, N., Krasae, P., Puttasawat, B., Yoosuk, B., Chollacoop, N., and Faungnawakij, K. (2010). Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. *Bioresource Technology* 101(10): 3765–3767.
- Vlada, B. V., Jelena, M. A. and Olivera, S. S. (2012). Biodiesel production by ultrasound-assisted transesterification: State of the art and the perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 1193–1209.