

ผลและวิจารณ์

จากการทดลองผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะต่างๆ ตามตารางการออกแบบแบบ Box – Behnken Design ได้ผลร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) และ ร้อยละของผลได้ (% Yield) ดังตารางที่ 10 โดยลักษณะโครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีดูได้ที่ภาคผนวก จ

1. ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MINITAB นั้น มีแบบจำลองที่มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ด้วยตัวแปรอิสระ (อุณหภูมิทำปฏิกิริยา เวลาการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โพลีเอทเธอร์ไฮดรอกไซด์ และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมัน) อยู่ 4 แบบจำลอง ดังสมการที่ 1 ถึง 4 โดยที่ Y คือร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ x_i, x_{ij} คือตัวแปรอิสระ β_0 คือค่าคงที่ (Constant) ของแบบจำลอง และ $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรอิสระในแบบจำลอง

Linear model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i \quad 1$$

Linear + interaction model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_{ij} \quad 2$$

Linear + square model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 \quad 3$$

Full quadratic model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_{ij} \quad 4$$

ตารางที่ 10 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์และร้อยละของผลได้

การ ทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ปริมาณตัวเร่ง KOH (เปอร์เซ็นต์)	อัตราส่วนโดยโมล MeOH:Oil	%FAME	%Yield
1	45	90	1.0	6	97.9	94.15
2	60	90	0.5	6	92.7	93.37
3	45	90	1.0	6	95.3	95.74
4	45	60	0.5	6	82.3	93.4
5	45	90	0.5	3	71.6	78.64
6	45	90	1.5	3	81.8	76.59
7	60	90	1.0	3	72.8	70.12
8	45	120	1.0	3	76.6	84.04
9	30	120	1.0	6	92.2	94.66
10	60	120	1.0	6	93.6	91.27
11	60	90	1.0	9	93.3	92.65
12	45	60	1.0	9	94.9	95.24
13	60	60	1.0	6	91.2	91.12
14	45	120	1.0	9	92.8	92.2
15	30	60	1.0	6	91.0	94.57
16	45	90	1.5	9	95.0	90
17	45	120	0.5	6	88.7	92.57
18	30	90	1.0	9	93.9	94.9
19	30	90	1.0	3	77.4	88.63
20	45	90	1.0	6	94.3	94.59
21	30	90	0.5	6	84.2	93.59
22	30	90	1.5	6	92.8	92.87
23	45	120	1.5	6	95.7	92.07
24	45	90	0.5	9	91.0	94.7
25	45	60	1.0	3	73.9	89.37
26	45	60	1.5	6	94.1	93.73
27	60	90	1.5	6	93.3	87.46

ตัวแบบจำลองทั้ง 4 แบบนี้ต้องพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแต่ละแบบจำลองเปรียบเทียบกับกัน เพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่จะสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด จากการใช้โปรแกรม MINITAB ประมวลผลด้วยวิธี Response Surface Methodology ได้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแต่ละตัวแบบดังในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

แบบจำลอง	$R^2(\%)$	$R^2(\text{adj})(\%)$	SE
Linear	68.1	62.3	4.868
Linear + interaction	70.7	52.3	5.476
Linear + square	93.8	91.1	2.368
Full quadratic	96.4	92.1	2.226

ค่า $R^2(\text{adj})$ ในตารางที่ 11 เป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ใช้ประกอบการพิจารณาเมื่อข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \times (1 - R^2) \quad 5$$

โดยที่ n = จำนวนการทดลอง
 k = จำนวนสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง

โดยจากตารางที่ 11 พบว่า แบบจำลอง Full Quadratic มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานน้อยที่สุดคือ 2.226 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้วมากที่สุดคือ 92.1 เปอร์เซนต์ นั้นแสดงว่าแบบจำลอง Full Quadratic มีความเหมาะสมที่สุดในนำมาเป็นตัวแทนอธิบายผลการทดลอง

2. การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแบบ

เมื่อได้ตัวแบบที่เหมาะสมนั้นคือแบบจำลองแบบ Full Quadratic สำหรับการอธิบายผลการทดลองได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปดำเนินการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปร (X_i) โดยโปรแกรม MINITAB ใช้วิธี Response Surface Regression ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

Term	Coef	StDev	<i>t</i>	P
Constant	-44.0750	24.4443	-1.803	0.097
Temp(T)	0.9633	0.4941	1.950	0.075
time(t)	0.6289	0.2470	2.546	0.026
MeOH:oil(M)	15.9667	2.1739	7.345	0.000
%KOH(C)	54.8333	13.0434	4.204	0.001
Temp*Temp(T ²)	-0.0096	0.0043	-2.231	0.046
time*time(t ²)	-0.0026	0.0011	-2.412	0.033
MeOH:oil*MeOH:oil(M ²)	-0.9806	0.1071	-9.155	0.000
%KOH*%KOH(C ²)	-11.2000	3.8556	-2.905	0.013
Temp*time(T*t)	0.0007	0.0025	0.270	0.792
Temp*MeOH:oil(T*M)	0.0222	0.0247	0.898	0.387
Temp*%KOH(T*C)	-0.2667	0.1484	-1.797	0.098
time*MeOH:oil(t*M)	-0.0133	0.0124	-1.078	0.302
time*%KOH(t*C)	-0.0800	0.0742	-1.078	0.302
MeOH:oil*%KOH(M*C)	-1.0333	0.7420	-1.393	0.189

หมายเหตุ S = 2.226 R² = 96.4 % R²(adj) = 92.1 %

Coef คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย β_i ของแต่ละตัวแปรในสมการ Full Quadratic

StDev คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

t และ P คือ ตัวสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐานและค่าความน่าจะเป็นตามลำดับ

จากตารางที่ 12 สามารถเขียนแบบจำลองแบบ Full Quadratic แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระ (อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา เวลาการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมัน) ได้ดังสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \%FAME = & -44.075 + 0.9633T + 0.6289t' + 15.9667M + 54.8333C \\ & - 0.0096T^2 - 0.0026t'^2 - 0.9806M^2 - 11.2C^2 + 0.007Tt' \\ & + 0.0222TM - 0.2667TC - 0.0133t'M - 0.08t'C - 1.0333MC \end{aligned} \quad 6$$

โดยที่	T	อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)
	t'	เวลาการทำปฏิกิริยา (นาที)
	M	อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมัน
	C	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

3. การวิเคราะห์นัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของแต่ละตัวแปร (Test on Individual Regression Coefficients)

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและรูปแบบจำลองดังสมการที่ 6 แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นขั้นตอนของการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ซึ่งเป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระ X_i แต่ละตัวในสมการที่ 6 นั้นมีอิทธิพลหรือไม่ต่อตัวแปรตาม (%FAME) โดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

$$H_0: \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k = 0 \quad \text{ตัวแปรอิสระที่ } i (X_i) \text{ ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

$$H_1: \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k \neq 0 \quad \text{ตัวแปรอิสระที่ } i (X_i) \text{ มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบคือ ตัวสถิติ t

ที่ระดับนัยสำคัญ α จะปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อ t_0 (ค่าที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 12) มีค่ามากกว่า $t_{\alpha/2, n-k-1}$ (n เป็นจำนวนการทดลองและ k คือจำนวนสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง) ซึ่งเป็นค่าที่เปิดจากตารางสถิติ (ศิริชัย, 2548) นอกเหนือจากพิจารณาค่าตัวสถิติ t แล้ว ยังสามารถพิจารณาค่า p -value ได้ด้วย โดยจะปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อค่า p -value ของตัวแปรอิสระมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด จากการใช้โปรแกรม MINITAB ประมวลผลค่า p -value ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 12 จากตารางเมื่อพิจารณาในส่วนของ Linear Terms อันได้แก่ T t' M และ C มีค่า p -value เป็น 0.075 0.026 0.000 และ 0.001 ตามลำดับ เพราะฉะนั้นที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 พบว่าค่า p -value ของ t' มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่าง %FAME กับตัวแปรอิสระ t' เป็นไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.01 พบว่าค่า p -value ของ M และ C มีค่าน้อยกว่า 0.01 แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง %FAME กับตัวแปรอิสระ M และ C เป็นไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ ตรงข้ามกันกับตัวแปรอิสระ T ซึ่งมีค่า p -value มากกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่าง %FAME กับตัวแปรอิสระ T เป็นไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นต่ำกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ตัวแปรอิสระ t' M และ C สามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ %FAME ในสมการที่ 6 ได้

ลำดับต่อไปพิจารณาส່วนของ Square Terms อันได้แก่ T^2 t'^2 M^2 และ C^2 พบว่ามีค่า p -value เป็น 0.046 0.033 0.000 และ 0.013 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่า p -value ของตัวแปรอิสระ T^2 t'^2 และ C^2 ในส่วนของ Square Terms มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 ความสัมพันธ์ระหว่าง %FAME กับตัวแปรอิสระ T^2 t'^2 และ C^2 เป็นไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.01 พบว่า ค่า p -value ของตัวแปรอิสระ M^2 มีค่าน้อยกว่า 0.01 แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง %FAME กับตัวแปรอิสระ M^2 เป็นไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า T^2 t'^2 M^2 และ C^2 สามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ %FAME ในสมการที่ 6

สุดท้ายพิจารณาส່วนของ Interaction Terms ได้แก่ Tt' TM TC $t'M$ $t'C$ และ MC พบว่ามีค่า p -value เป็น 0.792 0.387 0.098 0.302 0.302 และ 0.189 ตามลำดับ ที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 จะเห็นได้ว่าค่า p -value ของตัวแปรอิสระทุกตัวในส่วนของ Interaction Terms มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรอิสระ Tt' TM TC $t'M$ $t'C$ และ

MC ไม่มีอิทธิพลต่อ %FAME ดังนั้นตัวแปรอิสระดังกล่าวจึงไม่ควรอยู่ในตัวแบบ (ในสมการที่ 6) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง (ANOVA)

เมื่อใช้โปรแกรม MINITAB วิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองได้ผลลัพธ์ดังตารางที่

13

ตารางที่ 13 ความแปรปรวนของแบบจำลอง

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	1575.62	1575.623	112.545	22.71	0.000
Linear	4	1113.76	304.958	76.239	15.39	0.000
Square	4	420.38	420.377	105.094	21.21	0.000
Interaction	6	41.49	41.490	6.915	1.40	0.293
Residual Error	12	59.46	59.463	4.955		
Lack-of-Fit	10	52.56	52.557	5.256	1.52	0.461
Pure Error	2	6.91	6.907	3.453		
Total	26	1635.09				

หมายเหตุ

DF = องศาความเป็นอิสระ (Degrees of Freedom)

Seq SS = ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

Adj SS = ผลบวกกำลังสองที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted Sum of Square)

Adj MS = ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted Mean Square)

F = ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรปรวน

4.1 วิเคราะห์นัยสำคัญของแบบจำลอง (Test for Significant of Regression)

เป็นการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมๆกัน (ศิริชัย, 2548) โดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad \text{ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \quad \text{มีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

การทดสอบสมมติฐานข้างต้น จะพิจารณาผลรวมกำลังสองทั้งหมด (SS_T : Total Sum of Squares) ซึ่งเป็นผลบวกระหว่างผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากตัวแบบ (SS_R : Sum of Squares due to Regression) กับผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากส่วนตกค้าง (SS_E : Sum of Squares due to Residual error) ดังสมการ 7

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad 7$$

ส่วนตัวสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐานคือ ตัวสถิติ F โดยมีตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคำนวณค่าตัวสถิติ F ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 วิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองเพื่อคำนวณค่าตัวสถิติ F_0

Sources of variation	Sum of Squares	DF	Mean Square	F_0
Regression	SS_R	k	MR_S	MR_S / MS_E
Residual Error	SS_E	n-k-1	MS_E	
Total	SS_T	n-1		

หมายเหตุ k = เป็นจำนวนสัมประสิทธิ์ (β_i) = 14

n = จำนวนการทดลอง = 27

ที่มา: Myers and Montgomery (2002)

โดยจะปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อ F_0 (ได้จากการคำนวณจากตารางที่ 13) มีค่ามากกว่าค่า $F_{\alpha,k,n-k-1}$ (ค่าที่ได้จากตารางสถิติ) เมื่อกำหนดนัยสำคัญ (α) เป็น 0.05 พบว่าค่า $F_{0.05,14,12}$ ($\alpha = 0.05, k = 14, n-k-1 = 12$) จากตารางสถิติมีค่าเท่ากับ 2.64 แต่จากการใช้โปรแกรม MINITAB คำนวณค่า F_0 (ในตารางที่ 13) ได้ค่าเท่ากับ 22.71 ดังนั้น F_0 มีค่ามากกว่า $F_{0.05,14,12}$ เพราะฉะนั้นจึงปฏิเสธ H_0 สามารถสรุปได้ว่า มีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม (%FAME) สามารถนำไปใช้พยากรณ์ในตัวแบบได้ Myers and Montgomery (2002) นอกจากจะพิจารณาตัวสถิติ F แล้วยังสามารถพิจารณาค่า p -value ของตัวแบบ (Regression Model) ได้ด้วย โดยจะปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อ p -value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด จากตารางที่ 13 พบว่า p -value ของตัวแบบมีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0

4.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

เนื่องจากการทดลองมีการกำหนดให้ทำการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลาง จึงนำเทคนิคการวิเคราะห์ความไม่สมรูปของตัวแบบ (Testing for Lack of Fit) มาใช้ในการวิเคราะห์ วิธีการนี้จะพิจารณาผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากส่วนตกค้าง (SS_E) โดยมีองค์ประกอบ 2 ส่วนคือผลบวกกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาด (Sum of Squares due to Pure Error: SS_{PE}) กับ ผลบวกกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากความไม่สมรูปของตัวแบบ (Sum of Squares due to Lack of Fit: SS_{LOF}) ดังสมการที่ 8

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad 8$$

ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบคือ ตัวสถิติ F โดยมีตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคำนวณค่า F ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 วิเคราะห์ความแปรปรวนของความถูกต้องของแบบจำลองเพื่อคำนวณค่า F_0

Source of variable	Sum of Squares	DF	Mean Square	F_0
Residual Error	SS_E	$n - k - 1$	$MS_E = SS_E / (n - k - 1)$	
Lack of Fit	SS_{LOF}	$n - k - n_c$	$MS_{LOF} = SS_{LOF} / (n - k - n_c)$	MS_{LOF} / MS_{PE}
Pure error	SS_{PE}	$n_c - 1$	$MS_{PE} = SS_{PE} / (n_c - 1)$	

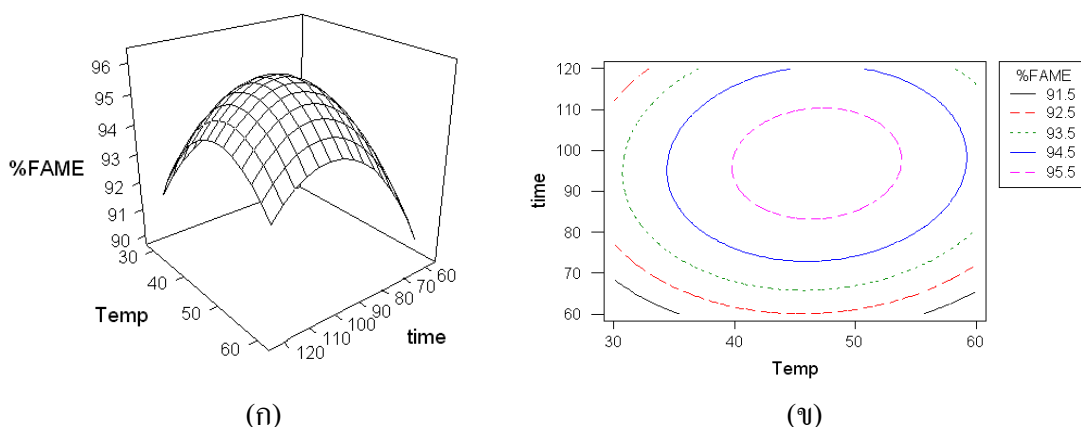
หมายเหตุ n_c = เป็นจำนวนการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลางเท่ากับ 3

เราสามารถสรุปว่า ฟังก์ชันการถดถอย (Regression Function) ไม่ได้มีความสัมพันธ์แบบ Full Quadratic เมื่อ F_0 มีค่ามากกว่า $F_{\alpha, n-k-n_c, n_c-1}$ (ซึ่งเป็นค่าจากตารางสถิติ) เมื่อกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 จากตารางสถิติพบว่าค่า $F_{0.05, 10, 2}$ ($n - k - n_c = 10$, $n_c - 1 = 2$) มีค่าเท่ากับ 19.40 แต่จากตารางที่ 4 ค่า F_0 ที่ได้จากการใช้โปรแกรม MINITAB ในการประมวลผล มีค่าเท่ากับ 1.52 ซึ่งจะเห็นได้ว่า F_0 มีค่าน้อยกว่า $F_{0.05, 10, 2}$ ดังนั้นสามารถสรุปว่า ฟังก์ชันการถดถอย มีความสัมพันธ์เป็นแบบ Full Quadratic ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

5. การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME)

5.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาต่อ %FAME

จากภาพที่ 12 (ก) และ (ข) แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ลักษณะของพื้นผิวผลตอบสนองเป็นแบบ Dome shape ดังนั้นทั้งอุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยาจึงต่างก็มีผลต่อ %FAME



ภาพที่ 12 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาการทำ

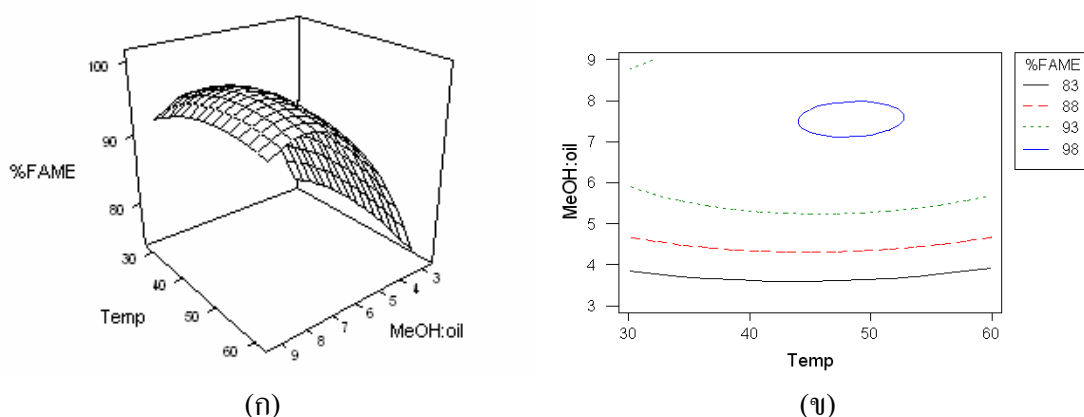
ปฏิกิริยาต่อ %FAME ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

โดยเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME พบว่า %FAME มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 องศาเซลเซียส ถึงประมาณ 45 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 45 องศาเซลเซียสไปจนถึง 60 องศาเซลเซียส กลับพบว่า %FAME มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้คาดว่าอาจมีสาเหตุมาจากการรั่วไหล (Leak) ของเมทานอลออกจากระบบทำให้สัดส่วนเมทานอลต่อน้ำมันลดลง ส่วนอิทธิพลของเวลาการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME เป็นไปในลักษณะที่คล้ายกับอิทธิพลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยานั้นคือ เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 60 นาที จนถึงเวลาประมาณ 90 นาที พบว่า %FAME มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 90 นาที ไปจนถึงเวลา 120 นาที พบว่า %FAME มีแนวโน้มลดลง อาจเป็นไปได้ว่าเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวขัดแย้งกับงานวิจัยของ Meher *et al.* (2005) ที่ได้ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน *Pongamia pinnata* โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สภาวะใดๆ เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยานานมากกว่า 90 นาทีเป็นต้นไป พบว่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มคงที่ แต่ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Chirta *et al.* (2005) ที่ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส โดยใช้เมทานอลปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาทำปฏิกิริยาจาก 30 ไปเป็น 60 และ 90 นาที %FAME เพิ่มขึ้นจาก 89.33 ไปเป็น 94.50 และ 98.00 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 90 ไปเป็น 120 นาที พบว่า %FAME ลดลงเล็กน้อยจาก 98.00 ไปเป็น 97.83 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น

จากภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่า ที่สภาวะเวลาการทำปฏิกิริยาประมาณ 80 – 110 นาที และ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาประมาณ 40 – 55 องศาเซลเซียส จะให้ค่า %FAME สูงสุด (มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์)

5.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME

จากภาพที่ 13 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 90 นาที และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



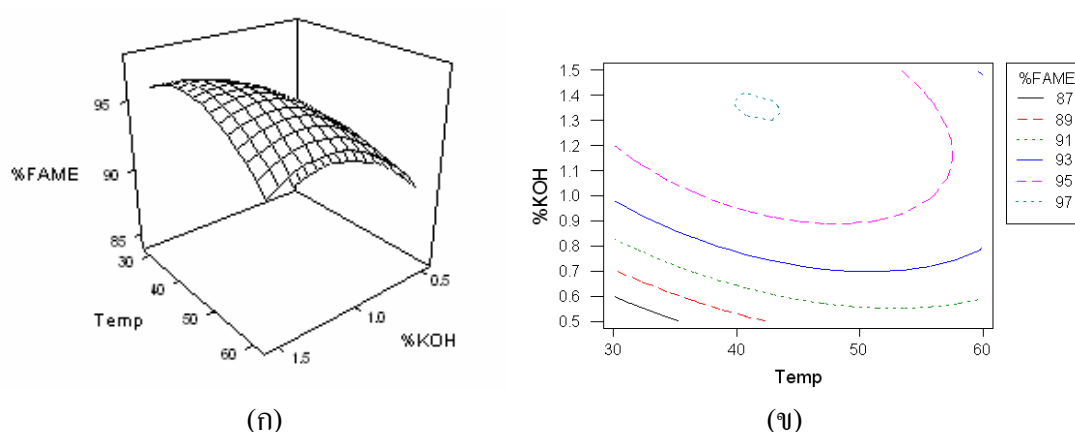
ภาพที่ 13 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 90 นาที และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาภาพ 13 (ก) และ (ข) ประกอบกันจะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 45 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 60 องศาเซลเซียส พบว่า %FAME แนวโน้มไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน พบว่า %FAME มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 3:1 ไปจนถึงประมาณ 7.5:1 ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลนั้น เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ (Reversible Reaction) ดังนั้นเมื่อใช้เมทานอลในสัดส่วนที่มากกว่า 3:1 จะทำให้ปฏิกิริยาไปทางด้านเกิดผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้นทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ (%FAME) มากขึ้นนั่นเอง (Meher *et al.*, 2006; Agarwal, 2006) และพบว่า %FAME มีค่าเริ่มจะคงที่

ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 7.5:1 ไปจนถึง 9:1 ดังนั้นเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมีอิทธิพลต่อ %FAME มากกว่าเมื่อเทียบกับอิทธิพลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่เวลาการทำปฏิกิริยา 90 นาที และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.3 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME

จากภาพที่ 14 (ก) และ (ข) พบว่า %FAME มีค่าน้อย เมื่อใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่ำๆ (0.5 เปอร์เซ็นต์) จะเห็นได้ชัดเจนที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 14 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

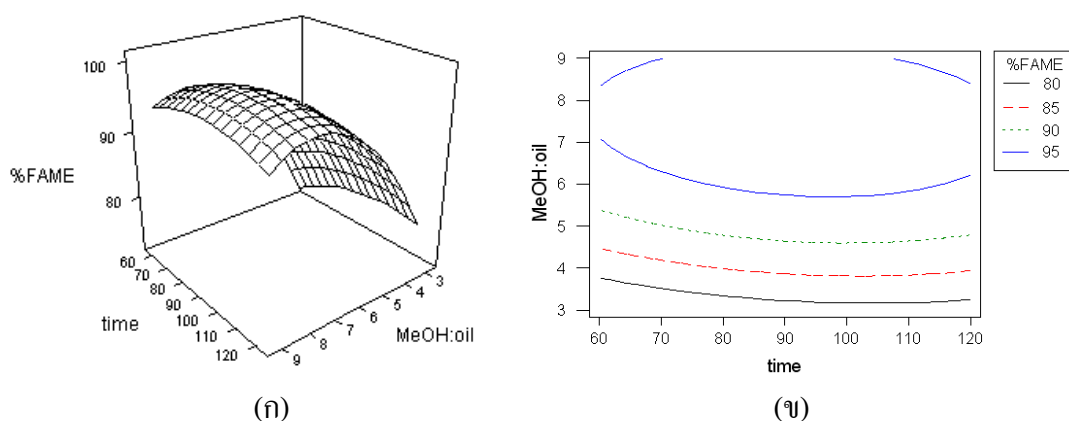
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME ที่เวลาการทำปฏิกิริยาเป็น 90 นาที และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1

แต่เมื่อปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.5 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึงประมาณ 1.3 เปอร์เซ็นต์ พบว่า %FAME มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเกิดได้เร็วขึ้น (Ma and Hanna, 1999) ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งจึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ (%FAME) ได้มากขึ้นที่เวลาการทำปฏิกิริยาเดียวกัน แต่ผลิตภัณฑ์จะเพิ่มมากขึ้นจนถึงปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่าหนึ่งเท่านั้น หลังจากนั้นแม้จะเพิ่มปริมาณตัวเร่งมากขึ้นเพียงใดก็ไม่ได้เป็นการช่วยให้ผลิตภัณฑ์เกิดมากขึ้น (Agarwal, 2006) โดยจะเห็นได้จากการทดลองในภาพที่ 14 (ก) และ (ข) เมื่อปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มจาก 1.3 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึง 1.5

เปอร์เซ็นต์ พบว่า %FAME มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแต่ก็มีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Chitra *et al.* (2005) ที่ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสนดำโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ผลการทดลองของ Chitra *et al.* (2005) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.5 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ จะให้ %FAME เพิ่มขึ้นจาก 92 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า %FAME ลดลงจาก 97 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 75 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้จากภาพที่ 14 ยังพบว่า ที่ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 – 1.3 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นช่วงที่ให้ %FAME สูงสุด (มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์)

5.4 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและเวลาการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME

จากภาพที่ 15 ที่ช่วงอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 – 9:1 เวลาการทำปฏิกิริยาเป็น 90 นาที เป็นช่วงที่ให้ค่า %FAME มากที่สุด (มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์)



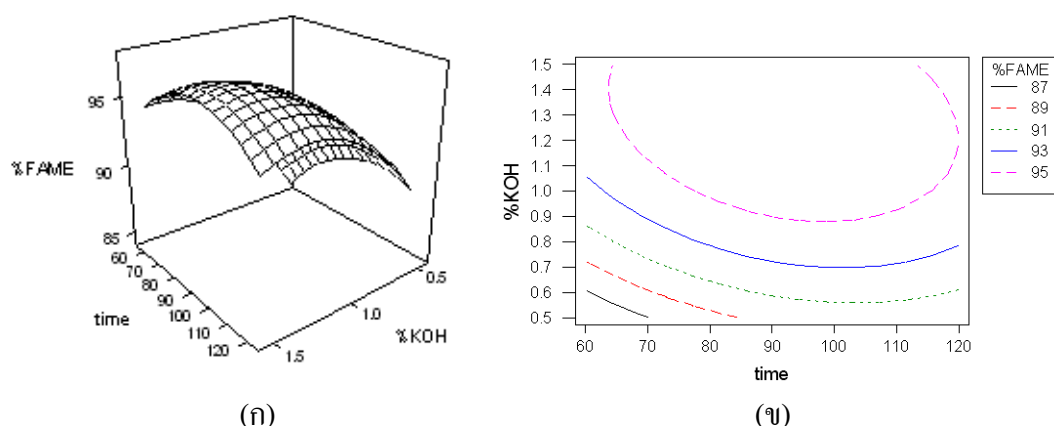
ภาพที่ 15 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและเวลาการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME ที่ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 45 องศาเซลเซียส และ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลระหว่างอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันกับเวลาการทำปฏิกิริยาพบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมีอิทธิพลต่อ %FAME มากกว่า ซึ่งจะเห็นได้จากภาพที่ 15 ว่าเมื่ออัตราส่วนโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มขึ้น พบว่า %FAME มีค่า

เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่ในช่วงปลายคือประมาณ 7.5:1 – 9:1 พบว่า %FAME มีแนวโน้มไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนผลของอุณหภูมิพบว่า เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่ม %FAME มีแนวโน้มไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง

5.5 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME

จากภาพที่ 16 ลักษณะผลตอบแทนพื้นผิวมีลักษณะคล้ายกับผลตอบแทนพื้นผิวของอิทธิพลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 16 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

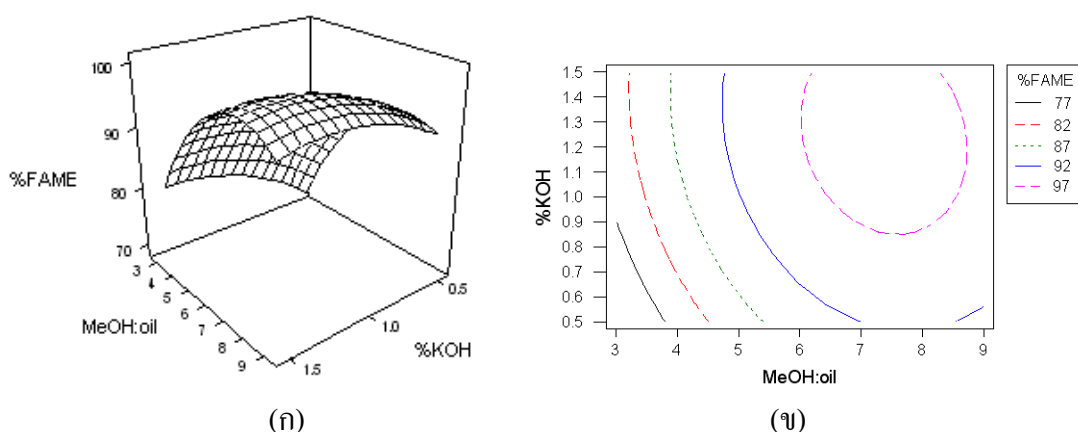
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาการทำปฏิกิริยาต่อ %FAME ที่อุณหภูมิการทำ

ปฏิกิริยา 45 องศาเซลเซียส และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1

โดยเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นพบว่า %FAME มีค่าเพิ่มขึ้น แต่หลังจาก 1.3 เปอร์เซ็นต์จนถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า %FAME มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ส่วนผลของเวลาพบว่า เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น %FAME ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่เพิ่มไม่มากนัก และหลังจากเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มหลังจาก 90 นาที พบว่า %FAME เริ่มมีค่าคงที่ นอกจากนั้นจากภาพที่ 16 ที่ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 1.0 – 1.5 เปอร์เซ็นต์ และ เวลาการทำปฏิกิริยาประมาณ 90 นาที พบว่าเป็นช่วงที่ให้ค่า %FAME สูงที่สุด (มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์)

5.6 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อ %FAME

จากภาพที่ 17 พบว่า %FAME มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มขึ้น และจะมีค่าเริ่มคงที่เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันอยู่ในช่วง 6:1 – 9:1 ส่วนผลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งในปริมาณมากขึ้นก็จะทำให้ %FAME เพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 – 9:1 และ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 – 1.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เป็นช่วงที่ %FAME มีค่าสูงที่สุด



ภาพที่ 17 Surface Plot (ก) และ Contour Plot (ข) แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อ %FAME ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 45 องศาเซลเซียส และ เวลาทำปฏิกิริยา 90 นาที

6. การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม

ในการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม MINITAB เป็นการนำเอาเทคนิคที่เรียกว่า Simultaneous Optimization Technique เป็นการนำเอา Desirability Functions มาใช้ในการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม (Myers and Montgomery, 2002) การใช้โปรแกรม MINITAB ในการประมวลผล มีสิ่งที่จะต้องกำหนดดังต่อไปนี้

6.1 ค่าเป้าหมาย (Target) ของ %FAME ที่ต้องการ

เนื่องจากวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้ได้ค่า %FAME มากที่สุด (Maximize) และเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นจึงกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 98 เปอร์เซนต์

6.2 ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) ของ %FAME

เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่า %FAME มากที่สุด ดังนั้นจึงต้องกำหนด Lower Limit ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 96.5 เปอร์เซนต์

6.3 ค่า Weight

ค่า Weight เป็นตัวกำหนดรูปแบบของ Desirability Functions ในที่นี้กำหนดให้เป็น 1

เมื่อกำหนดค่าดังกล่าวข้างต้นแล้ว โปรแกรม MINITAB จะประมวลผลได้สถานะที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ได้ %FAME เท่ากับเป้าหมายที่กำหนดคือ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 45 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 90 นาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6.9:1 และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซนต์ พิจารณางานวิจัยของ Leung and Guo (2006) ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน Canola โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนกัน พบว่า ที่สถานะที่ดีที่สุด ใช้อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 45 องศาเซลเซียส ซึ่งตรงกับอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติข้างต้น

จากการทดลองผลิตไบโอดีเซลโดยใช้สภาวะที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ นั่นคือ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 45 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 90 นาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลค่อน้ำมันเป็น 6.9:1 และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง Full Quadratic โดยจากการทดลองภายใต้ สภาวะดังกล่าวพบว่า ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 97.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้กำหนดเป็นค่าเป้าหมาย (98 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง Full Quadratic ผลการทดลองดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Chitra *et al.* (2005) ที่ได้ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสนดำโดยใช้เบสโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์ คือ ใช้ เมทานอลปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ทำปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 90 นาที จะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมของการทดลองเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่สภาวะที่เหมาะสมของ Chitra *et al.* (2005) แต่กลับพบว่า ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 98 เปอร์เซ็นต์ ที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมของ Chitra *et al.* (2005) มีค่าใกล้เคียงกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 97.9 เปอร์เซ็นต์ ที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง แต่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาเท่ากันที่ 90 นาที ทั้งนี้คาดว่า ประการแรกอาจมีสาเหตุมาจากการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันโดยในงานทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยของ Chitra *et al.* (2005) และประการที่สองอาจมีสาเหตุมาจากลักษณะและความเร็วรอบของการกวนผสมที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยของ Chitra *et al.* (2005) ไม่ได้ระบุลักษณะและความเร็วรอบของการกวนผสมไว้ แต่ในงานทดลองใช้ตัวกวนแบบ Magnetic Stirrer กวนผสมที่ความเร็วรอบสูงถึง 600 รอบต่อนาที ซึ่งเชื่อได้ว่าระบบเป็นแบบ Homogeneous เกิดปฏิกิริยาได้ดี ประกอบกับการพิจารณางานวิจัยของ Vicente *et al.* (2006) ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในการทำปฏิกิริยาใช้ความเร็วรอบของการกวนเท่ากับที่ใช้ในงานทดลองคือ 600 รอบต่อนาที แต่ใช้ตัวกวนแบบ Mechanical Stirrer โดยคาดว่าน่าจะมีประสิทธิภาพการกวนดีกว่าแบบ Magnetic Stirrer ที่ใช้ในงานทดลอง ดังนั้นจึงพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดของงานวิจัยของ Vicente *et al.* (2006) จึงใช้อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 25 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าที่ใช้ในการทดลอง (45 องศาเซลเซียส) จึงเป็นการสนับสนุนสมมติฐานประการที่สอง จากสมมติฐาน 2 ประการข้างต้น จึงน่าจะเป็นสาเหตุทำให้ อุณหภูมิที่เหมาะสมของการทดลองต่ำกว่าอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่สภาวะที่เหมาะสมของ Chitra *et al.* (2005)

นอกจากนั้นยังวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตภายใต้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติข้างต้นดังในตารางที่ 16 จากตารางพบว่า คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้นั้นเป็นไปตามมาตรฐานยุโรป EN 14214

ตารางที่ 16 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

คุณสมบัติ	ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ	มาตรฐานไบโอดีเซล EN 14214
ค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (มิลลิเมตร ² ต่อวินาที)	4.53	3.5 – 5.0
จุดหมอกควัน (องศาเซลเซียส)	6	-
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	197	ไม่ต่ำกว่า 120
ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	0.388	ไม่สูงกว่า 0.5

7. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid Value) ของไบโอดีเซล

ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เป็นไปดังตารางที่ 17 เนื่องจากค่าความเป็นกรดเริ่มต้นของน้ำมันสบู่ดำชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ก่อนทำปฏิกิริยามีค่า 1.683 และ 1.391 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน ดังนั้นจากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ส่วนใหญ่มีค่าลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน (Saponification) ในระหว่างการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ทำให้กรดไขมันอิสระบางส่วนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นลดลงเนื่องจากไปทำปฏิกิริยากับเบสที่ใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Khan, 2002) ส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันเริ่มต้น และส่วนใหญ่มีค่าความเป็นกรดเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14214

ตารางที่ 17 ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ปริมาณตัวเร่ง KOH (เปอร์เซ็นต์)	อัตราส่วนโดยโมล MeOH:Oil	Acid Value (mgKOH/g)
1	45	90	1.0	6	0.396
2	60	90	0.5	6	0.376
3	45	90	1.0	6	0.46
4	45	60	0.5	6	0.52
5	45	90	0.5	3	0.281
6	45	90	1.5	3	0.404
7	60	90	1.0	3	0.281
8	45	120	1.0	3	0.404
9	30	120	1.0	6	0.281
10	60	120	1.0	6	0.502
11	60	90	1.0	9	0.458
12	45	60	1.0	9	0.376
13	60	60	1.0	6	0.349
14	45	120	1.0	9	0.281
15	30	60	1.0	6	0.292
16	45	90	1.5	9	0.482
17	45	120	0.5	6	0.376
18	30	90	1.0	9	0.373
19	30	90	1.0	3	0.416
20	45	90	1.0	6	1.37
21	30	90	0.5	6	0.4
22	30	90	1.5	6	0.421
23	45	120	1.5	6	0.459
24	45	90	0.5	9	0.484
25	45	60	1.0	3	0.525
26	45	60	1.5	6	0.49
27	60	90	1.5	6	1.367