บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองจากการเพิ่มคุณภาพทางเชื้อเพลิงของไขวัวด้วยการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ZSM-5 ทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาประกอบไปด้วย 3 พารามิเตอร์หลักคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา, เวลาในการทำปฏิกิริยา และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา นำไปวิเคราะห์หาค่าที่ให้ผลตอบสนองสูงที่สุด ด้วยโปรแกรมซอฟแวร์สำเร็จรูปทางสถิติ Minitab17 ช่วยในการวิเคราะห์ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ จุดที่เหมาะสมที่สุดไปทำการกลั่นที่อุณหภูมิ 350°C แล้วนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางเคมีด้วยวิธี GC-MS และคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด ค่าความร้อน และค่าความเป็นกรด เสร็จสิ้นการทดลอง

4.1 ผลการทำปฏิกิริยาแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาในหัวข้อการเพิ่มคุณภาพทางเชื้อเพลิงของไขวัวด้วยการแตกตัวโดยใช้ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการนำไขวัวที่ผ่านการเคี้ยวและกรองแล้วมาทำการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของไขวัว พารามิเตอร์ที่จะศึกษานั้นประกอบไปด้วย อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 350 – 450°C, เวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 20-60 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลได้ผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์เหลว สามารถคำนวณได้จากสมการ (Twaiq et al., 1999 และ Ramya et al., 2014)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$\%\ \text{Yield ของผลิตภัณฑ์เหลว แก๊ส หรือกาก} = \frac{\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลว, แก๊ส หรือกาก (กรัม)}}{\text{ปริมาณไขวัว (กรัม)}}$$

โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง เข้ามาร่วมในการออกแบบการทดลอง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาหลังจากทำปฏิกิริยาตามสภาวะที่กำหนด มีลักษณะที่เป็นของเหลว จึงนำมาชั่งหาน้ำหนักสุดท้ายและนำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักของไขวัวตั้งต้น ตามสภาวะที่ถูกกำหนดด้วยออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงสภาวะในการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

Test	X_A	X_B	X_C	A	B	C	Yield (%)
1	-1	-1	-1	370	32	2.8	8.67
2	-1	-1	1	370	32	8.2	9.33
3	-1	1	-1	370	52	2.8	11.33
4	-1	1	1	370	52	8.2	12.67
5	1	-1	-1	430	32	2.8	52.67
6	1	-1	1	430	32	8.2	55.33
7	1	1	-1	430	52	2.8	69.33
8	1	1	1	430	52	8.2	70.67
9	- 1.68	0	0	350	40	5.5	5.80
10	+ 1.68	0	0	450	40	5.5	50.67
11	0	- 1.68	0	400	20	5.5	49.67
12	0	+ 1.68	0	400	60	5.5	59.33
13	0	0	- 1.68	400	40	1	49.33
14	0	0	+ 1.68	400	40	10	52.33
15	0	0	0	400	40	5.5	51.33
16	0	0	0	400	40	5.5	51.00
17	0	0	0	400	40	5.5	51.17
18	0	0	0	400	40	5.5	50.67
19	0	0	0	400	40	5.5	50.67
20	0	0	0	400	40	5.5	51.00

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อได้ผลลัพธ์ของ %Yield ในแต่ละสภาวะของการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของไขวัว ตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง จำนวน 20 การทดลอง จะสามารถนำไปหาสมการการถดถอยได้ในลำดับถัดไป

ตารางที่ 4.2 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของการวิเคราะห์การถดถอยในการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

Term		Coefficients	Standard Error of Coef	Test statistic	P-value
Constant		50.68	3.37	15.05	0.000
Temp	A	20.04	2.25	8.89	0.000
Time	B	3.80	2.49	1.52	0.158
Catalyst	C	0.81	2.25	0.36	0.725
Temp*Temp	AA	-9.74	2.19	-4.45	0.001
Time*Time	BB	0.26	2.27	0.11	0.913
Catalyst*Catalyst	CC	-1.75	2.19	-0.80	0.442
Temp*Time	AB	4.94	3.42	1.44	0.180
Temp*Catalyst	AC	0.25	2.87	0.09	0.934
Time*Catalyst	BC	-0.11	3.42	-0.03	0.976

$R^2 = 91.64\%$

ตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงค่าการประมาณพารามิเตอร์ของการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งจะสามารถนำมาประมาณพื้นผิวตอบสนองโดยใช้ตัวแปรความสัมพันธ์อันดับสอง (Second-Order Model) ทำให้ได้สมการ %Yield ดังนี้

$$Y = -1772 + 8.92X_A - 5.39X_B + 1.9X_C - 0.01102\,X_A^2 + 0.0018X_B^2\ 0.245X_C^2 + 0.01396X_AX_B + 0.0031X_AX_C - 0.003X_BX_C$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากสมการ %Yield ที่ได้ทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อ %Yield นั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกคืออิทธิพลจากพารามิเตอร์หลัก(Main effects) ซึ่งประกอบไปด้วย อิทธิพลจากอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา(X_A), อิทธิพลของเวลาในการทำปฏิกิริยา(X_B) และอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(X_C) และส่วนที่สองคืออิทธิพลจากพารามิเตอร์ร่วม (Interaction effects) ซึ่งประกอบไปด้วย อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาต่ออิทธิพลของเวลาในการทำปฏิกิริยา(X_AX_B) อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาต่ออิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

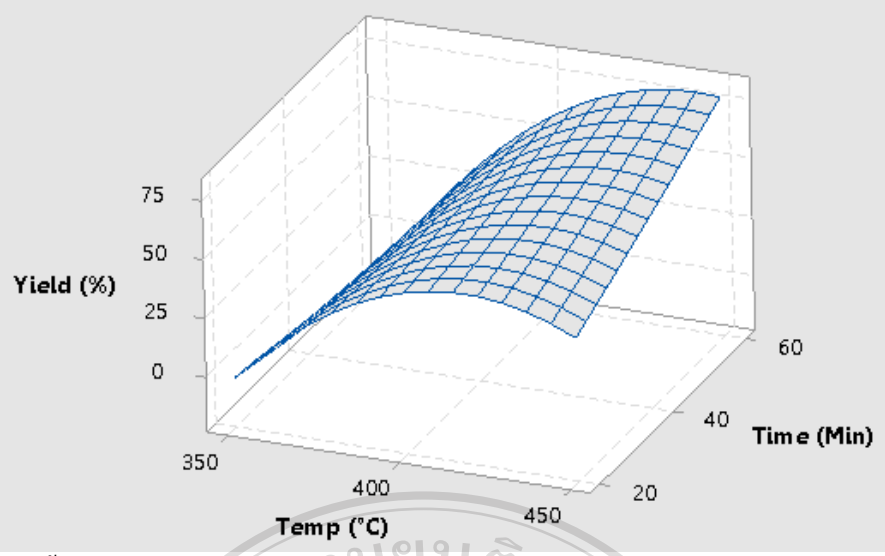
ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(X_AX_C) และอิทธิพลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่ออิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(X_BX_C)จากการทดลองทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์หลักมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ออกมามากกว่าพารามิเตอร์ร่วม สังเกตได้จากสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์หลัก โดยจะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์หลักมีค่ามากกว่าพารามิเตอร์ร่วม และพบว่าพารามิเตอร์หลักที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุดคือ อิทธิพลอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(X_A) มีค่าเท่ากับ 8.92 รองลงมาเป็นอิทธิพลของเวลาในการทำปฏิกิริยา(X_B) ที่มีค่าเท่ากับ 5.39 และอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(X_C) มีค่าเท่ากับ 1.9 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมพบว่า พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดคืออิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่ออิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(X_BX_C) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.245

กราฟแบบ 3 มิติ กำหนดให้แกน x คืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา, แกน y คือ เวลาในการทำปฏิกิริยา และแกน z คือผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ โดยที่กำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่เท่ากับ 5.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.1 ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาในการปฏิกิริยา พบว่า ได้ผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุดที่สภาวะอุณหภูมิสูงช่วง 402 ถึง 450^{o}C และระยะเวลาช่วง 38.5 ถึง 60 นาที ดังภาพที่ 4.2

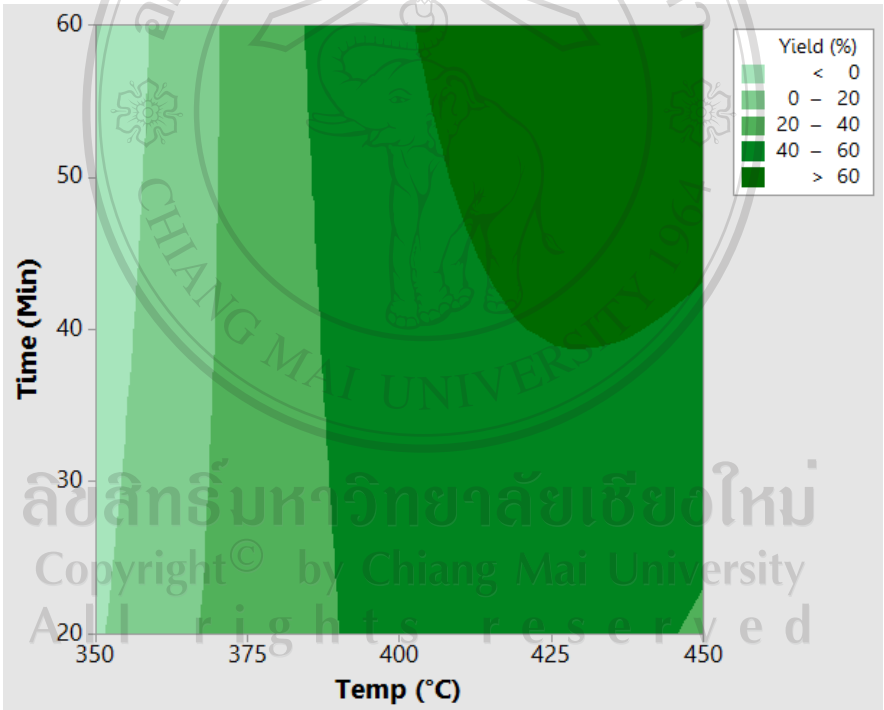
กราฟแบบ 3 มิติ กำหนดให้แกน x คืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา, แกน y คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และแกน z คือผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ โดยที่กำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่เวลา 40 นาที ดังภาพที่ 4.3 ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ได้ผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุดที่สภาวะอุณหภูมิสูงช่วง 420 ถึง 441^{o}C และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาช่วง 4.15 ถึง 8.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.4

กราฟแบบ 3 มิติ กำหนดให้แกน x คือ เวลาในการทำปฏิกิริยา, แกน y คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และแกน z คือผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ โดยที่กำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่อุณหภูมิ 400^{o}C ดังภาพที่ 4.5 ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ได้ผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาช่วง 55 ถึง 60 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาช่วง 3.1 ถึง 8.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.6

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

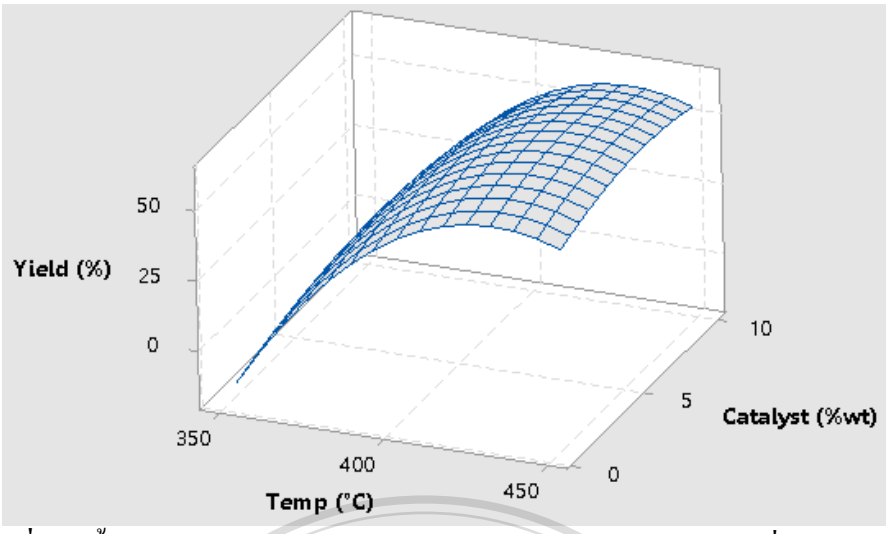


ภาพที่ 4.1 พื้นผิวตอบสนองระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 5.5 % เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

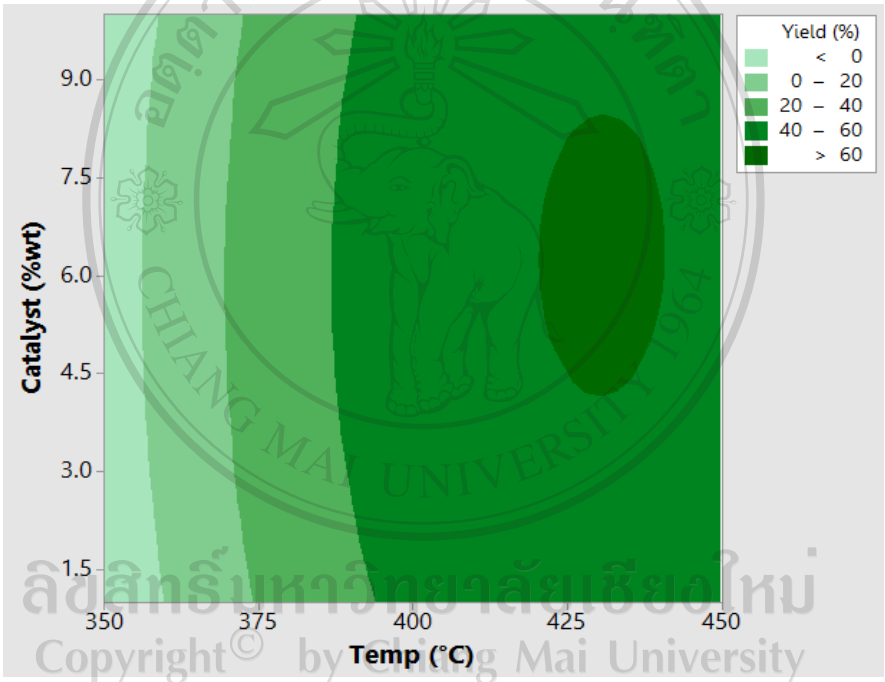


ภาพที่ 4.2 Contour plot ของปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 5.5 %เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

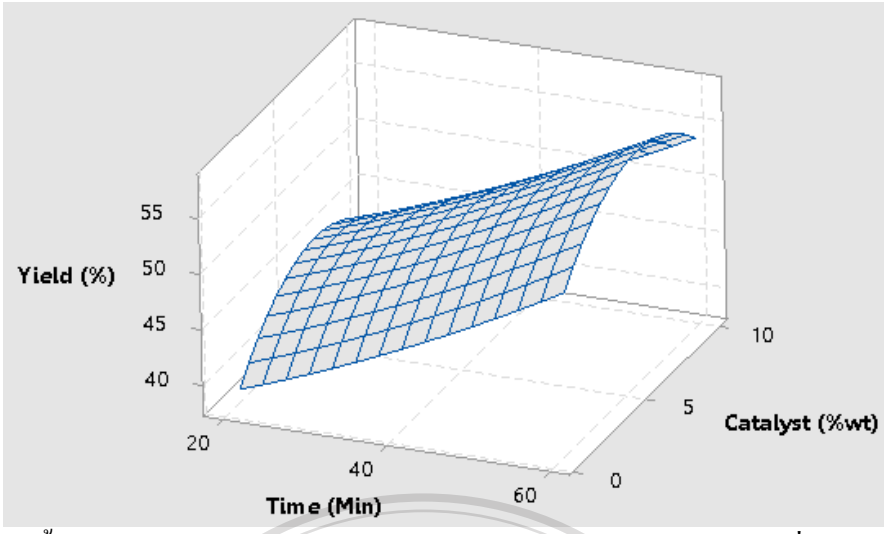


ภาพที่ 4.3 พื้นผิวตอบสนองระหว่างอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลา 40 นาที

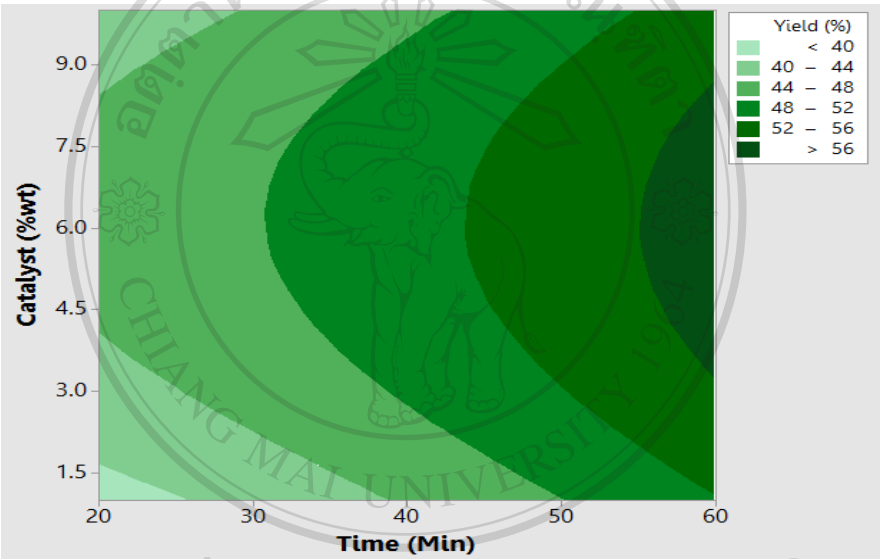


ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพที่ 4.4 Contour plot ของปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ระหว่างอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลา 40 นาที



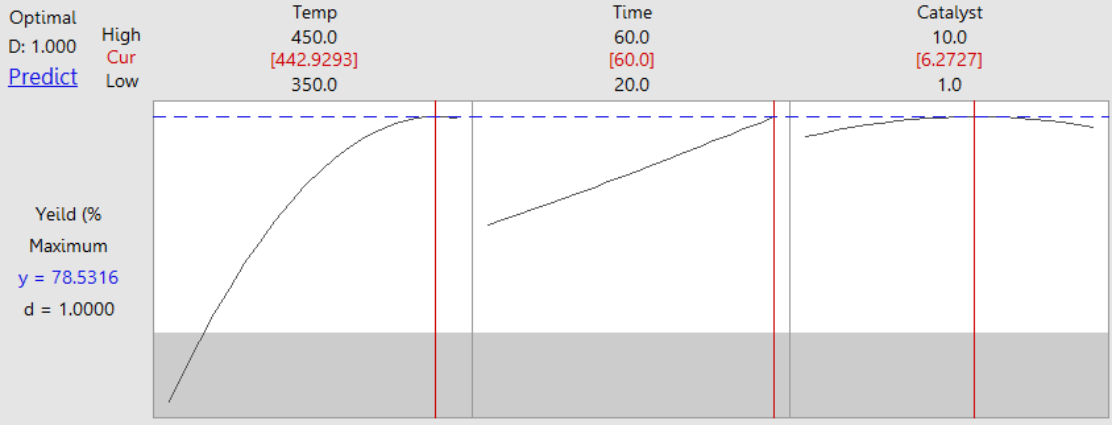
ภาพที่ 4.5 พื้นผิวตอบสนองระหว่างเวลาทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400°C



ภาพที่ 4.6 Contour plot ของปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ระหว่างเวลาและตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400°C

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำข้อมูลของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มาคำนวณเพื่อหาจุดของสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวในปริมาณมากที่สุด ด้วยการใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab17 จากการประมวลผลได้ค่าของพารามิเตอร์แต่ละพารามิเตอร์ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 พยากรณ์ค่าสภาวะที่ดีที่สุดในแต่ละพารามิเตอร์

ค่าจากการทำนายปริมาณของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะมีค่าเท่ากับ 78.53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความพึงพอใจโดยรวม(Composite Desirability) มีค่าเท่ากับ 1 โดยค่าที่เหมาะสมของแต่ละพารามิเตอร์ประกอบไปด้วย อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 442.9293°C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 6.2727 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมในแต่ละพารามิเตอร์แล้ว จึงนำมากำหนดเป็นสภาวะในการทดสอบการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของไขวัว จากนั้นได้มีการปรับค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรม Minitab17 หาค่า Response Optimizer เพื่อความเหมาะสมในการทดลอง โดยมีการปรับค่าดังนี้ ปรับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 443 °C และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาปรับเป็น 6.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำค่าในแต่ละพารามิเตอร์ที่ทำการปรับค่าแล้ว มาทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม Minitab17 โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง พบว่าได้ค่าเฉลี่ยของปริมาณของผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับ 74.84 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเปรียบเทียบกับผลที่โปรแกรมพยากรณ์

Condition	Temp(°C)	Time(min)	Catalyst(%wt)	% Yield
Optimizer	442.93	60	6.27	78.53
Experiment	443	60	6.3	74.84

จากการทดลองตามสภาวะที่ได้จากการพยากรณ์การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของไขวัว ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับ 74.84 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของผลิตภัณฑ์เหลวที่โปรแกรม Minitab17 ทำการพยากรณ์พบว่า ปริมาณของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้แตกต่างกัน อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เนื่องจากอาจมีความคลาดเคลื่อนบางส่วนเกิดขึ้นได้จากการ

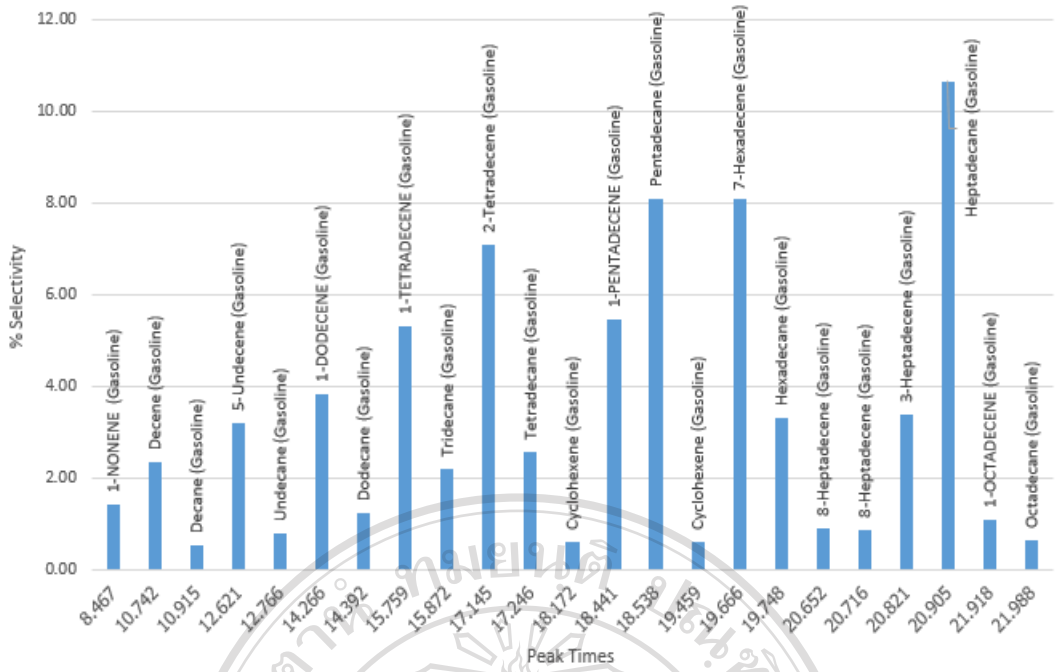
ทดลองและการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อความเหมาะสมในการทดลอง สรุปได้ว่าสภาวะที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 443°C, เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 6.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของไขวัว

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบา

เป้าหมายของการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับ Yield ของปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้และประสิทธิภาพในการเลือก(Selectivity) ในปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเร่งของไขวัว งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองหาสภาวะ การทดลองที่เหมาะสมที่สุด โดย Yield สูงสุดของปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่ทำให้เกิดแก๊สน้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพในการเลือก(Selectivity) ที่ทำให้ไขวัวเปลี่ยนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูงสุด ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ประกอบไปด้วย อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา, ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

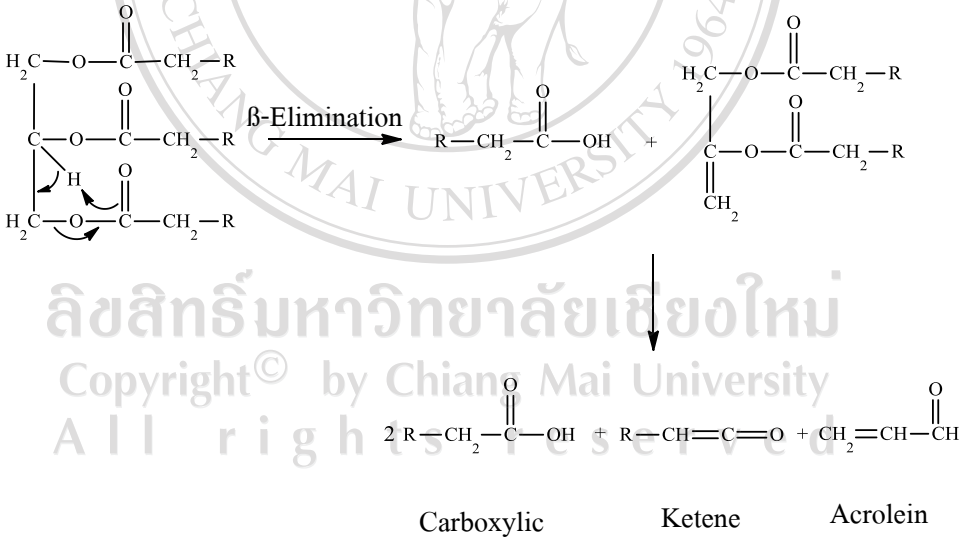
งานวิจัยนี้ได้กำหนดช่วงอุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่ศึกษาตั้งแต่ 350°C ถึง 450°C ช่วงระยะเวลา 20 ถึง 60 นาที โดยทำปฏิกิริยาผ่านปริมาณตัวเร่ง ZSM-5 ในปริมาณ 1 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ความดันบรรยากาศ แล้วนำไปกลั่นที่อุณหภูมิ 350°C เพื่อให้ได้เป็นของเหลวโมเลกุลเบา ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาด้วย GC-MS พบว่าผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถแสดงองค์ประกอบหลักได้ดังภาพที่ 4.8 ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรงทั่วไปเช่น decanes, nonenes, Tridecane เป็นต้น และสารประกอบที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนเช่น carboxylic acids และ ketones เป็นต้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ GC-MS ของ ของเหลวโมเลกุลเบา

โดยที่กรดคาร์บอกซิลิกและคีโตนเป็นสารที่บงบอกถึงการแตกตัวที่ไม่สมบูรณ์ของไตรกลีเซอไรด์ (Vonghia et al., 1995) กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์แสดงได้ดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์

ซึ่งไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นสารประกอบของไขวัวจะ เกิดการแตกตัวแบบ ß-elimination ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดคาร์บอกซิลิก คีทีน และอะโครเลอิน เนื่องจากคีทีนและอะโครเลอิน มีความเสถียรค่อนข้างน้อยจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดต่อไปได้อีก บางครั้งกรดคาร์บอกซิลิกอาจมีการรวมตัวกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แล้วเกิดเป็นสารในกลุ่มคีโตน ดังนั้นปริมาณกรดคาร์บอกซิลิกและคีโตนจึงเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์ของการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เงื่อนไขการทดลองในแต่ละสภาวะ (Gusmão et al., 1989)

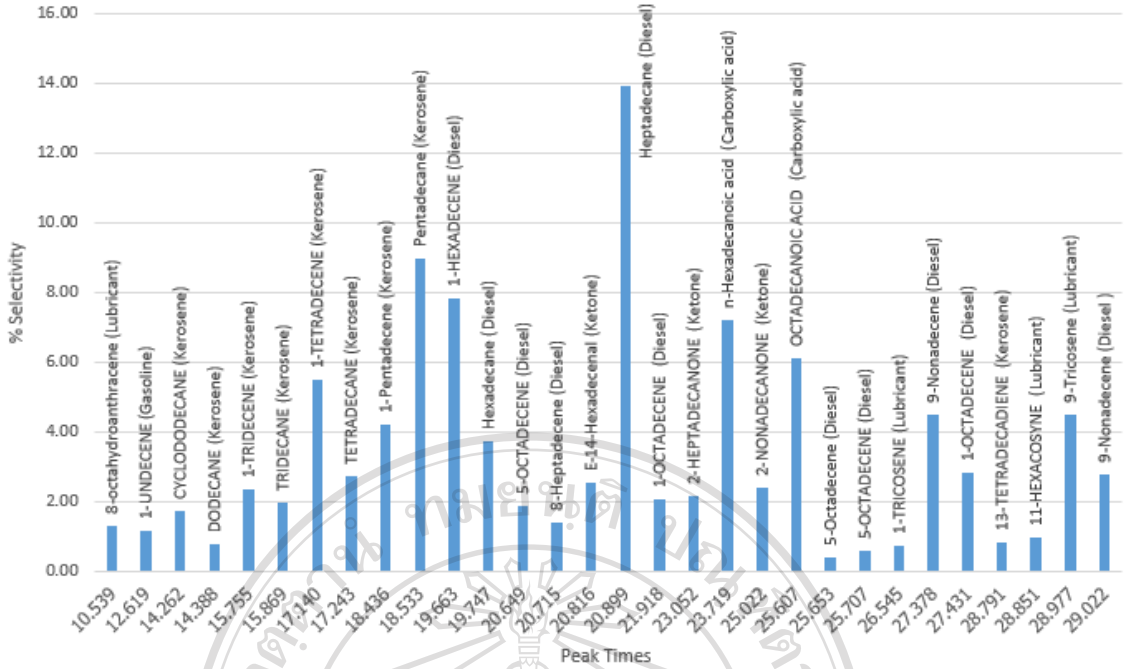
ผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาที่ได้ออกมาประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 9 ถึง 19 การวิเคราะห์แยกชนิดผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่ แก๊สโซลีนซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ C_7-C_{11}, เคโรซีนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ C_{12}-C_{15} และดีเซลที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ C_{16}-C_{21} (Asminternational.org, 2016 และ Mota et al., 2014) ซึ่งแบ่งได้จากผล GC-MS และการคำนวณจากสมการ (Twaiq et al., 1999 และ Ramya et al., 2014)

$$\%\ \text{Selectivity ของแก๊สโซลีน เคโรซีน หรือดีเซล} = \frac{\text{ปริมาณแก๊สโซลีน เคโรซีน หรือดีเซล}}{\text{ปริมาณสารประกอบกลุ่มเชื้อเพลิง}}$$

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ ของเหลวโมเลกุลเบา พบว่ามีองค์ประกอบของเคโรซีน 35.82%, ดีเซล 28.94% และแก๊สโซลีน 9.48% ตามลำดับ

งานวิจัยนี้ได้มีการทำการทดลองเพิ่มเติมในสภาวะที่ไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยในการทำปฏิกิริยาอีก 9 การทดลอง พบว่า สภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 450°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลอง ณ จุดที่ดีที่สุด โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการทำปฏิกิริยามาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาด้วย GC-MS ได้ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการแตกตัวด้วยโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังภาพที่ 4.10

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ GC-MS ผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรงทั่วไปเช่น Dodecane, Tridecane, Pentadecane เป็นต้น และสารประกอบที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนเช่น carboxylic acids และ ketones เช่นเดียวกับ ผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาที่ได้จากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่กว่า คือมีสารไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 11 ถึง 26 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยในการแตกตัวไขวัว มีผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาที่ได้จากการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีคุณภาพดีขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบา

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบา ที่ทำการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบามากที่สุด ดังภาพที่ 4.11

ภาพที่ 4.11 ลักษณะผลิตภัณฑ์เหลวที่เตรียมวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของไขวัวเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์เหลว พบว่า ไขวัวหลังผ่านการทำปฏิกิริยากลายเป็นผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบา มีค่าความร้อนสูงขึ้น ในทางกลับกันความหนืดมีค่าลดลง เพราะองค์ประกอบทางเคมีของไขวัว อย่างเช่น ขนาดของโมเลกุล, ความอิ่มตัวของสสารและชนิดของสารเปลี่ยนแปลงไป (Noureddini et al., 1992) ส่วนค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เหลวที่สูงกว่าไขวัวนั้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหลวประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่จำนวนมากกว่า (Zhao et al., 2015) และ ในด้านของค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์เหลวที่มีค่าต่ำเพียง 3.2 cSt ซึ่งน้อยกว่าไขวัวค่อนข้างมาก เพราะว่าขนาดของโมเลกุลในสารตั้งต้นเล็กลงและมีกรดไขมันน้อยลง เมื่อสังเกตค่าความเป็นกรดรวม (Total Acid Number, TAN) พบว่าผลิตภัณฑ์เหลวมีค่า TAN สูงกว่าไขวัว เนื่องจากไขวัวแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์เหลวที่ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนและกรดคาร์บอกซิลิก หรือกรดไขมันที่มีโมเลกุลเล็กลง เมื่อนำมาวิเคราะห์ ดังภาคผนวก จ จำนวนโมเลกุลของกรดในผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาจึงมีมากกว่าในไขวัวที่ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบเป็นไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันที่มีโมเลกุลใหญ่

คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาส่วนใหญ่ หลังจากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่ในท้องตลาดทั่วไป ซึ่งจะเห็นได้จากคุณสมบัติทางกายภาพในด้านต่อไปนี้ คือค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าสูงถึง 45.8 MJ/kg พบว่ามีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลกลุ่มดีเซล แต่ใกล้เคียงกับเคโรซีนรวมถึงแก๊สโซลีนอีกด้วย ความหนืดของผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาที่ได้อยู่ในช่วงของดีเซล ส่วนค่าความหนาแน่นนั้นจะสูงกว่าความหนาแน่นของดีเซล สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์เหลวโมเลกุลเบาที่ได้จากการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยามีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงฟอสซิล อีกทั้งยังไม่พบจากองค์ประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์อีกด้วย ดังตารางที่ 4.4

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เหลว

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธี	งานวิจัยนี้	ไขวัว	เชื้อเพลิงฟอสซิลในเชิงพาณิชย์		
					เบนซิน	เคโรซีน	ดีเซล
ค่าความร้อน	MJ/kg	ASTM 240-64	45.8	36.64	44.39-47.29	42.99-46.19	43.79-44.79
ค่าความหนืดที่ 40°C	cSt	ASTM D88	3.2	46.37	0.5-0.6	1.3	2.8-5.0
ความหนาแน่น	kg/m^3	ASTM D4052	870	929	719.7	780-810	832
ความเป็นกรด	$\frac{mg\ KOH}{g_{sample}}$	ASTM D974	142.27	5.3	n/a	n/a	n/a

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved