

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันปาล์มดิบ

ตาราง 4.1 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันปาล์มดิบที่วิเคราะห์เพิ่มเติม

น้ำมันปาล์มดิบ	หน่วย	ปริมาณ
กรดไขมันอิสระ	% w/w	5.06
ปริมาณน้ำ	% w/w	0.26
ปริมาณฟอสฟอรัส	mg/kg	11.24

จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสซึ่งเป็นตัวแทนของปริมาณกำมะถันมีค่าต่ำ โดยสูงกว่าค่ามาตรฐานของไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) ของกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 10 mg/kg เพียงเล็กน้อย กระบวนการขจัดกำมะถันในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันพืชส่วนใหญ่จะใช้กรดฟอสฟอริก (10%) ผสมและกวนกับน้ำมัน ในอุณหภูมิ 80-90 °C ปล่อยให้ร้อนกัน ถ่ายออกแล้วล้างด้วยน้ำ หรือ ใช้ดินฟอกขจัดสีและขจัดกำมะถันในคราวเดียวกัน ดังนั้นในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน มีการใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถเกิดการขจัดกำมะถันไปพร้อมกับกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันได้ ดังนั้นจึงทดลองขจัดกำมะถันในขั้นตอนเดียวกับเอสเตอริฟิเคชัน เพื่อลดขั้นตอนในการดำเนินการ ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตด้วย

4.2 กระบวนการเอสเตอริฟิเคชันน้ำมันปาล์มดิบด้วยเอทานอล

กระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบและแอลกอฮอล์โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือเอทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ กรดซัลฟิวริก

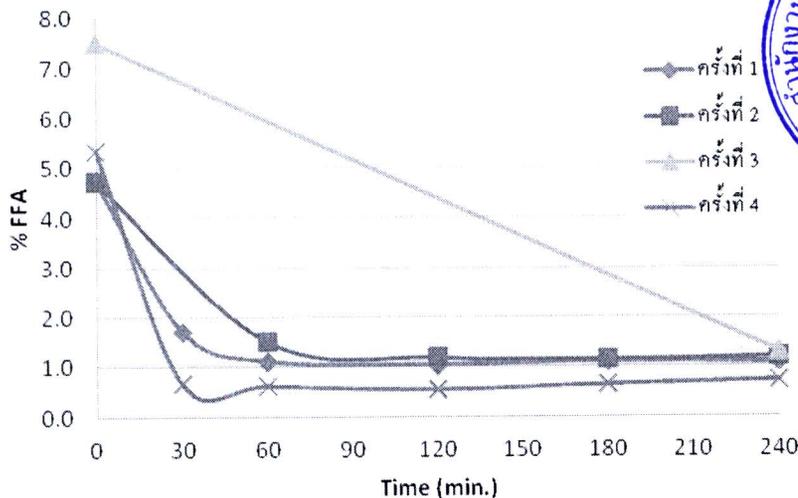
ผลการทดลองเอสเตอริฟิเคชันได้ผลดังตาราง 4.2 ข้างล่างนี้

ตาราง 4.2 ผลการเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบด้วยเอทานอล

เวลา (นาท)	ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
0	4.73	4.73	7.5	5.35
30	1.72	-	-	0.66
60	1.11	1.51	-	0.61
120	1.04	1.19	-	0.54
180	1.10	1.15	-	0.64
240	1.07	1.20	1.3	0.72

หมายเหตุ

- การทดลอง# 1 และ #2 ใช้ น้ำมันปาล์มดิบ 226.87 กรัม เอทานอล 73.13 กรัม (32.23%w/w CPO) กรดซัลฟิวริก 0.24% w/w CPO อุณหภูมิ 80 °C
- การทดลอง# 3 ใช้ น้ำมันปาล์มดิบ 400 กรัม เอทานอล 128.37 กรัม (32.09%w/w CPO) กรดซัลฟิวริก 1% w/w CPO อุณหภูมิ 70 °C
- การทดลอง# 4 ใช้ น้ำมันปาล์มดิบ 500 กรัม เอทานอล 136.72 กรัม (27.34%w/w CPO) กรดซัลฟิวริก 3.28% w/w CPO อุณหภูมิ 60 °C



ภาพ 4.1 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ลดลงตามเวลาของปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

จากผลการทดลองครั้งที่ 1-3 พบว่า สำหรับน้ำมันปาล์มดิบปกติที่มีกรดไขมันอิสระไม่เกิน 5% นั้น เมื่อใช้อุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่ 80 °C สามารถลดกรดไขมันอิสระให้เหลือ ประมาณ 1% ได้ภายในเวลา 2 ชั่วโมง แต่เมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยานานขึ้น กรดไขมันอิสระจะเพิ่มขึ้น แม้จะเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1% ก็ยังไม่สามารถลดกรดไขมันอิสระให้เหลือต่ำกว่า 1.0% ได้ ผลการทดลองนี้ได้ข้อสมมติฐาน 2 ประเด็น คือ

- เอทานอลระเหยออกไปจากขวด screw cap ทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับของเอสเตอริฟิเคชัน
- ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน จะให้น้ำเป็นผลผลิต 1 โมลในทุกๆ 1 โมลของ FFA ที่ลดลงไป น้ำอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้กับทั้งเอสเตอริฟิเคชัน และไตร, ได และโมโนกลีเซอไรด์จำนวนมากเกิดเป็นกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น

สมมติฐานที่ตั้งขึ้น นำไปสู่การทดลองครั้งที่ 4 ที่ใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริกเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่เพียงเพิ่มการเร่งปฏิกิริยา แต่กรดซัลฟิวริกยังละลายน้ำได้ดี ซึ่งจะช่วยลดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้อีกด้วย โดยใช้อุณหภูมิทำปฏิกิริยาเพียง 60°C

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในเวลาเพียง 120 นาที ค่า FFA จะลงมาต่ำที่สุดได้ แต่เมื่อทำปฏิกิริยานานออกไป ค่า FFA จะมีค่าสูงขึ้น

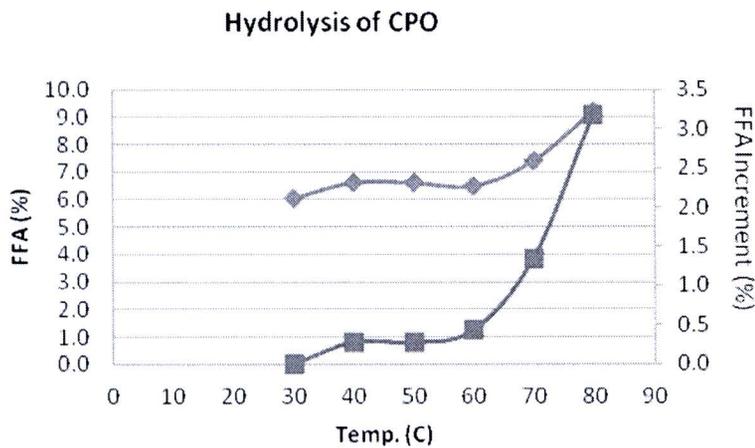
การทดลองเพื่อหาอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์และเอทิลเอสเตอริฟิเคชัน จึงดำเนินการโดยใช้การเติมน้ำจำนวนที่มากเกินไปจริง (เพื่อให้เห็นอิทธิพลชัดเจนขึ้น) และไม่มีเอทานอล โดยแปรค่าอุณหภูมิที่ต่างๆ กันโดยใช้สภาวะที่เลียนแบบสภาวะที่จุดสมดุลของกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบด้วยเอทานอล ดังนี้ คือ

ตาราง 4.3 สภาวะที่เลียนแบบสภาวะที่จุดสมดุลของกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบด้วยเอทานอล

	น้ำหนัก (g)	โมล
ไตรกลีเซอไรด์	93.95	0.111
ปริมาณกรดไขมันอิสระ	6.05	0.022
ปริมาณน้ำ	1.61	0.090
กรดซัลฟิวริก (98%)	3.70	0.038
เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที		

ตาราง 4.4 ผลของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

Temp. (°C)	Average FFA (wt%)	FFA Increment (wt%)
30	6.05	0
40	6.61	0.28
50	6.60	0.27
60	6.49	0.44
70	7.40	1.35
80	9.22	3.17



ภาพ 4.2 การไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มดิบที่อุณหภูมิต่างกัน

จากการทดลองพบว่าในสภาวะที่ทำเอสเตอริฟิเคชันนั้น กรดไขมันอิสระจากการไฮโดรไลซิสของน้ำและกลีเซอไรด์ในสภาพกรดจะเกิดขึ้นได้ดี และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 60 °C ดังนั้นหากต้องการทำเอสเตอริฟิเคชัน โดยให้เหลือกรดไขมันอิสระให้ต่ำที่สุดควรทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำด้วย และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันได้ดี และไม่เร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้เกิดสูงเกินไป คือ 60 °C

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากระบวนการเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบด้วยเอทานอล ควรใช้เอทานอลประมาณ 32% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ ใช้ตัวกรดซัลฟิวริก 0.24-3.3 % โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ หรือเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ FFA อุณหภูมิ 60 °C เวลาต่ำกว่า 2 ชั่วโมง

4.3 กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านกระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน (Esterified Palm Oil, EPO) และน้ำมันปาล์มรีไฟน์

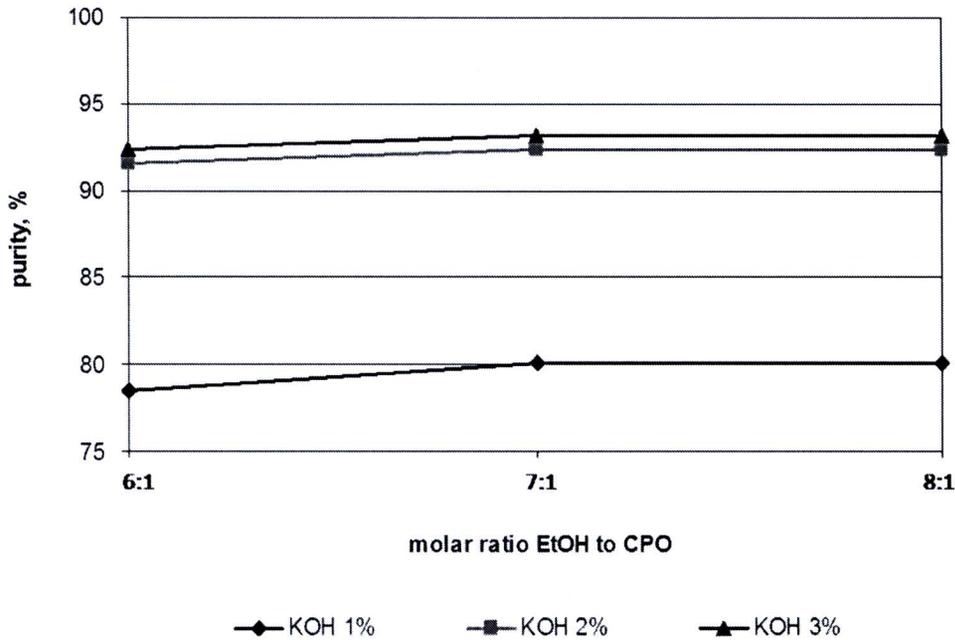
4.3.1 ศึกษาปัจจัยอิทธิพลพื้นฐานที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของเอทิลเอสเตอริคุณสมบัติของ EPO ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตาราง 4.5

ตาราง 4.5 คุณสมบัติน้ำมันปาล์ม EPO ที่ใช้ในการทดลอง

EPO Properties	Results (%wt.)
Free fatty acid (FFA)	1.32
Ethanol residue	20.50
Water content	0.32

4.3.1.1 ผลของสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลต่อ EPO

เนื่องจากใน EPO เริ่มต้นมีเอทานอลเหลืออยู่ 20.50% หรือคิดเป็นสัดส่วนเชิงโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm oil, CPO) เริ่มต้นประมาณ 4:1 ดังนั้นเมื่อนำ EPO มาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจึงต้องเพิ่มปริมาณเอทานอลเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลจนทำให้สัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลต่อ CPO มีค่าเป็น 6:1 - 8:1 จะทำให้ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอริสูงขึ้น ในทุกๆ ปริมาณ KOH ที่ศึกษา ดังแสดงในภาพ 4.2 แต่เมื่อใช้ปริมาณเอทานอลสูงจะสูญเสียเอทิลเอสเตอริในกระบวนการแยกเฟสมากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ J.M. Encinar et al. (2007) ที่กล่าวว่าเอทานอลจะขัดขวางการแยกเฟสระหว่างเอสเตอริและกลีเซอรอลเนื่องจากเอทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะทำให้สภาพความมีขี้และความหนาแน่นของกลีเซอรอลลดลงและใกล้เคียงกับเอทิลเอสเตอริมากขึ้น ดังนั้นสัดส่วนเชิงโมลของเอทานอลต่อ CPO ที่เหมาะสมในการทดลองนี้อยู่ในช่วง 6:1 – 7:1



ภาพ 4.3 แสดงผลของสัดส่วนเชิงโมลเอทานอลต่อ CPO ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ปริมาณ KOH 1-3% (สภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที)

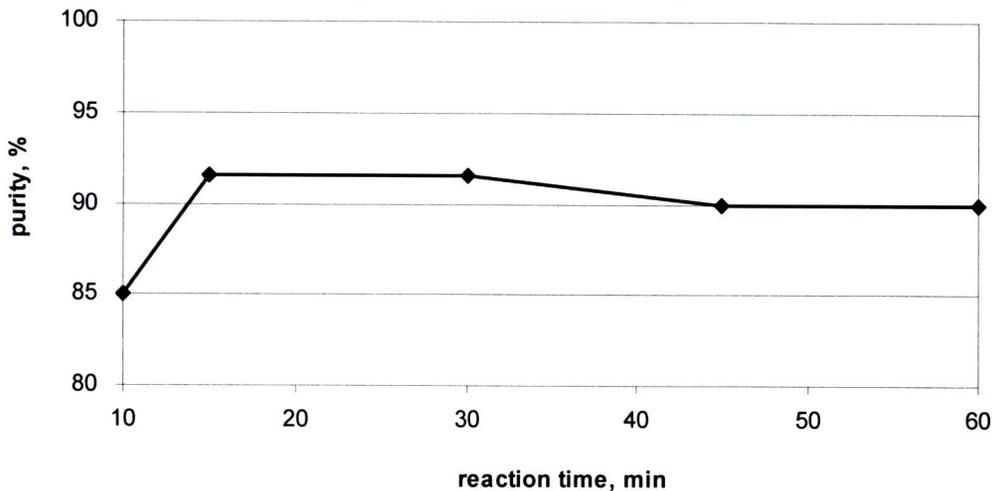
4.3.1.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ KOH ขึ้นในช่วง 1.0-2.0% จะส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ KOH เป็น 3.0% พบว่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพ 4.3 นอกจากนั้น เมื่อใช้ KOH 3% จะทำให้เกิดสบู่ในระบบสูงมาก การแยกเฟสเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลเกิดขึ้นยาก ทำให้ผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ต่ำ ดังนั้นปริมาณ KOH ที่เหมาะสมในการทดลองนี้ คือ 2%

4.3.1.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

ทำการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในช่วง 10-60 นาที พบว่าในช่วง 10-15 นาที ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็ว โดยที่เวลา 15 -30 นาที จะมีค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับ 91.58 % และที่เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 30 นาที ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์จะลดต่ำลงเล็กน้อย เนื่องจากผลของปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังนั้นเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้

คือ 15 นาที โดยผลเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอร์ แสดงดังภาพ 4.4

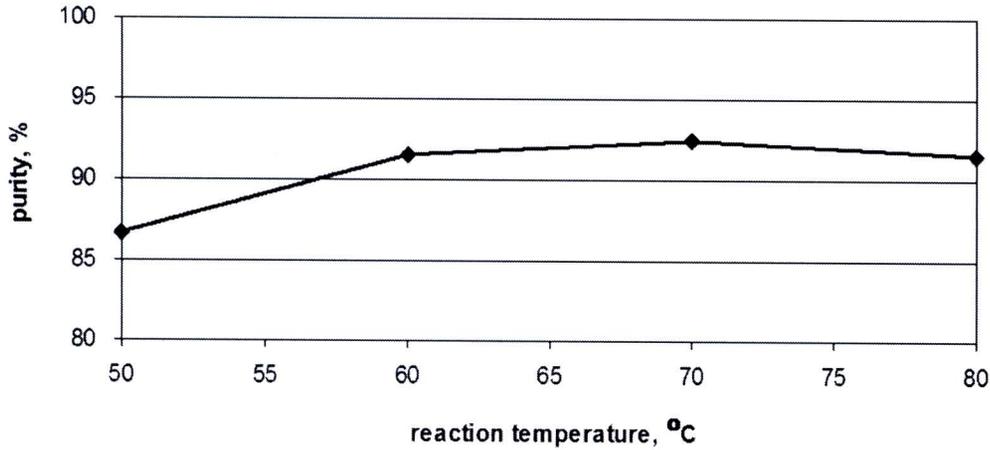


ภาพ 4.4 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอร์

(สภาวะการทดลอง: KOH 2% อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สัดส่วนเชิงโมลเอทานอลต่อ CPO 2 : 1)

4.3.1.4 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจะเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดแอลกอฮอล์ (M. Canakci et al., 1999) จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิในช่วง 60-80 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอร์ใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินกว่าจุดเดือดเอทานอล (78 องศาเซลเซียส) ยังส่งผลให้เกิดการระเหยออกของเอทานอลซึ่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์เช่นกัน และอุณหภูมิที่สูงเกินจุดเดือดแอลกอฮอล์จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันระหว่างกลีเซอไรด์กับ KOH ซึ่งจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (L. Lin et. al, 2009) รวมถึงขัดขวางการแยกเฟสของเอทิลเอสเตอร์และกลีเซอรอลได้ ดังนั้นอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทดลองควรอยู่ในช่วง 60-70 องศาเซลเซียส โดยผลอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอร์แสดงดังภาพ 4.5



ภาพ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ (สภาวะการทดลอง: KOH 2% เวลา 15 นาที สัดส่วนเชิงโมลเอทานอล ต่อ EPO 6: 1)

4.3.2 ศึกษากระบวนการแยกเฟสเอทิลเอสเทอร์

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตเอทิลเอสเทอร์ จาก EPO พบว่าในทุกสภาวะการทดลองเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลจะไม่สามารถแยกเฟสออกจากกันด้วยแรงโน้มถ่วง เนื่องจากปริมาณสบู่ที่เกิดขึ้นในระบบค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับกรณีการใช้เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษากระบวนการแยกเฟสเอทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอล โดยการเติมสารอื่นเพื่อเพิ่มสลายสภาพความเป็นขั้วเดียวกัน เช่น น้ำ และกลีเซอรอลชนิดต่างๆ น้ำมันดีเซล และสารที่สามารถดูดซับกลีเซอรอล ได้แก่ Aluminium silicate และ Resin PD206 โดยพบว่า กลีเซอรอลบริสุทธิ์ และน้ำสามารถช่วยแยกเอทิลเอสเทอร์ออกจาก กลีเซอรอลได้สูงสุดและใกล้เคียงกัน โดยได้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์ประมาณ 80% ซึ่งสูงกว่าการใช้กลีเซอรอลที่ผ่านการแยกเฟสสารอินทรีย์เล็กน้อย (73.51%) แต่เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมในส่วนของของเสียที่จะเกิดขึ้น คุณภาพของกลีเซอรอลหลังจากแยกเอทิลเอสเทอร์ และต้นทุนในการแยกเฟสแล้วพบว่า การใช้กลีเซอรอลที่ผ่านการแยกเฟสสารอินทรีย์มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยผลของชนิดและปริมาณสารที่ช่วยในการแยกเฟสที่มีต่อปริมาณเอทิลเอสเทอร์ที่แยกได้ แสดงดังตาราง 4.6

ตาราง 4.6 แสดงชนิดและปริมาณของสารที่ใช้ในการแยกเอทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอล

Reagent	Amount of reagent,%	EE,%
Pure glycerol, 95%	10	79.79
Glycerol after separated organic phase, 75%	10	73.51
Crude glycerol, 45%	30	36.38
Water	10	80.06
Diesel	100	70.03
Aluminium silicate	30	33.31
Resin PD206	50	-

4.3.3 การผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยการทำปฏิกิริยา 2 ครั้ง

โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ส่งผลให้การทำให้เอทิลเอสเทอร์มีความบริสุทธิ์สูงด้วยการทำปฏิกิริยาเพียงครั้งเดียวจึงเป็นเรื่องยาก ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษากระบวนการปรับปรุงคุณภาพของเอทิลเอสเทอร์ โดยใช้การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน 2 ครั้ง เพื่อแยกกลีเซอรอลบางส่วนออกในการทำปฏิกิริยาครั้งแรก ก่อนนำไปทำปฏิกิริยาครั้งที่ 2 เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ซึ่งในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาสภาวะการทำปฏิกิริยาครั้งที่ 1 ที่ สัดส่วนเชิงโมลเอทานอลต่อ CPO รวมเป็น 6:1 ปริมาณ KOH 2% อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที แยกกลีเซอรอลครั้งที่ 1 ออกโดยการเติมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ 10 % จากนั้นนำเอทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันครั้งที่ 2 ที่ สัดส่วนเชิงโมลเอทานอลต่อ CPO รวม 7:1 ปริมาณ KOH 0.5% อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที แยกกลีเซอรอลครั้งที่ 2 ออก โดยการเติมกลีเซอรอลบริสุทธิ์ 10 % พบว่าได้เอทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นเป็น 97.31% แต่ผลได้ของเอทิลเอสเทอร์จะลดลงเหลือเพียง 62.50% ซึ่งถือว่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาครั้งที่ 2 เอทิลเอสเทอร์บางส่วนจะทำปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันกับ KOH เกิดเป็นสบู่ได้

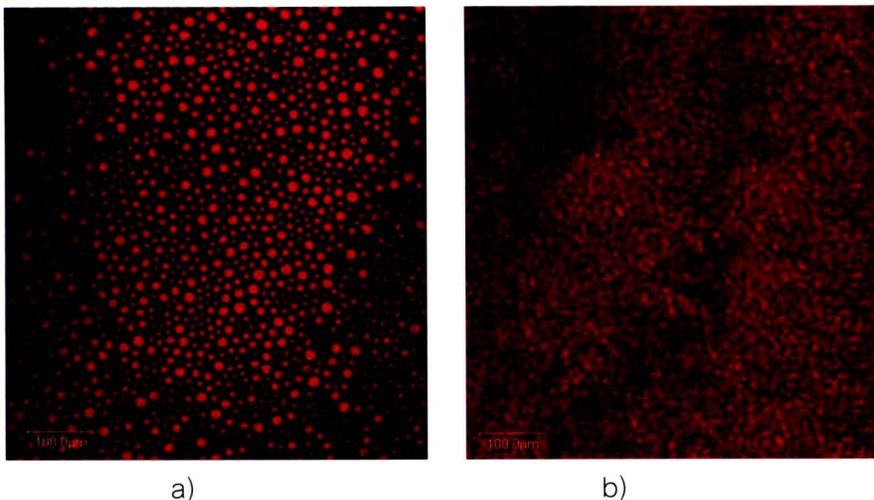
4.3.4 กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันน้ำมันปาล์มรีไฟน์ด้วยเอทานอล

จากผลการทดลองหาสภาวะการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้ EPO พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่ เป็นที่น่าพอใจนัก ทั้งในเรื่องวิธีการแยกเฟสซึ่งยุ่งยาก และผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ที่

ค่อนข้างต่ำ จึงควรแสวงหาสาเหตุที่แท้จริงของการไม่แยกเฟสของกลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์ ดังนั้นจึงมีการปรับวิธีทดลอง โดยจะใช้น้ำมันปาล์มรีไฟน์ (Refined Palm Oil, RPO) เป็นวัตถุดิบเบื้องต้นก่อนเพื่อประหยัดเวลาในขั้นตอนเตรียม EPO จากนั้นทำการศึกษาหาสาเหตุเชิงลึกของการไม่แยกเฟสเมื่อใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยา โดยจะเปรียบเทียบความแตกต่างกับกรณีที่ใช้เมทานอล ซึ่งเป้าหมายที่ตั้งไว้คือ ควรรู้สาเหตุของการไม่แยกเฟสระหว่างเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลที่แท้จริง พร้อมทั้งสามารถหาแนวทางแก้ไขปัญหาที่ง่าย เพื่อให้การผลิตมีผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ที่สูงและสามารถแข่งขันกับอุตสาหกรรมการผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้ จะนำไปประยุกต์ใช้กับวัตถุดิบ EPO ต่อไป

4.3.4.1 ศึกษาความแตกต่างระหว่างการใช้เมทานอลและเอทานอลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคกลีเซอรอลหลังปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจากความแตกต่างระหว่างการใช้เมทานอลและเอทานอลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันซึ่งพบว่า การใช้แอลกอฮอล์เป็นเมทานอล จะทำให้เกิดการแยกเฟสของกลีเซอรอลและเมทิลเอสเทอร์ แต่ในกรณีที่ใช้แอลกอฮอล์เป็นเอทานอล จะไม่เกิดการแยกเฟสขึ้น จึงทำให้เกิดแนวคิดการตรวจสอบลักษณะสภาพที่เกิดขึ้นจริงของการคงอยู่ของเฟสเอสเทอร์และเฟสกลีเซอรอลหลังจากเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจากการใช้แอลกอฮอล์ที่ต่างชนิดกัน โดยประยุกต์ใช้ confocal laser scanning microscope (CLSM) เนื่องจาก CLSM มีข้อดีคือ สามารถเลือกโฟกัสจุดที่สนใจได้แม่นยำ จึงสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความหนาได้ (สามารถเลือกโฟกัสในช่วงความหนาที่ต้องการ) โดยไม่จำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างให้เป็นฟิล์มบางๆ หรือปิดแผ่นกระจก ทำให้ได้ลักษณะรูปทรงของตัวอย่างที่ถูกต้อง ซึ่งเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบลักษณะสภาพการกระจายตัวของเอสเทอร์ทั้ง 2 ชนิดกับกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันพบว่า ภาพจากกล้อง confocal สามารถเห็นถึงความแตกต่างได้ชัดเจน โดยกรณีของการใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยา อนุภาคกลีเซอรอลจะแยกตัว ออกจากเมทิลเอสเทอร์ได้ชัดเจน แต่กรณีของการใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยาอนุภาคกลีเซอรอลจะไม่แยกออกจากเอทิลเอสเทอร์ ดังแสดงในภาพ 4.6 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการก่อเกิดอิมัลชันที่มีความเสถียรของเฟสกลีเซอรอลที่ขัดขวางในการแยกเฟสออกจากเอทิลเอสเทอร์นั่นเอง



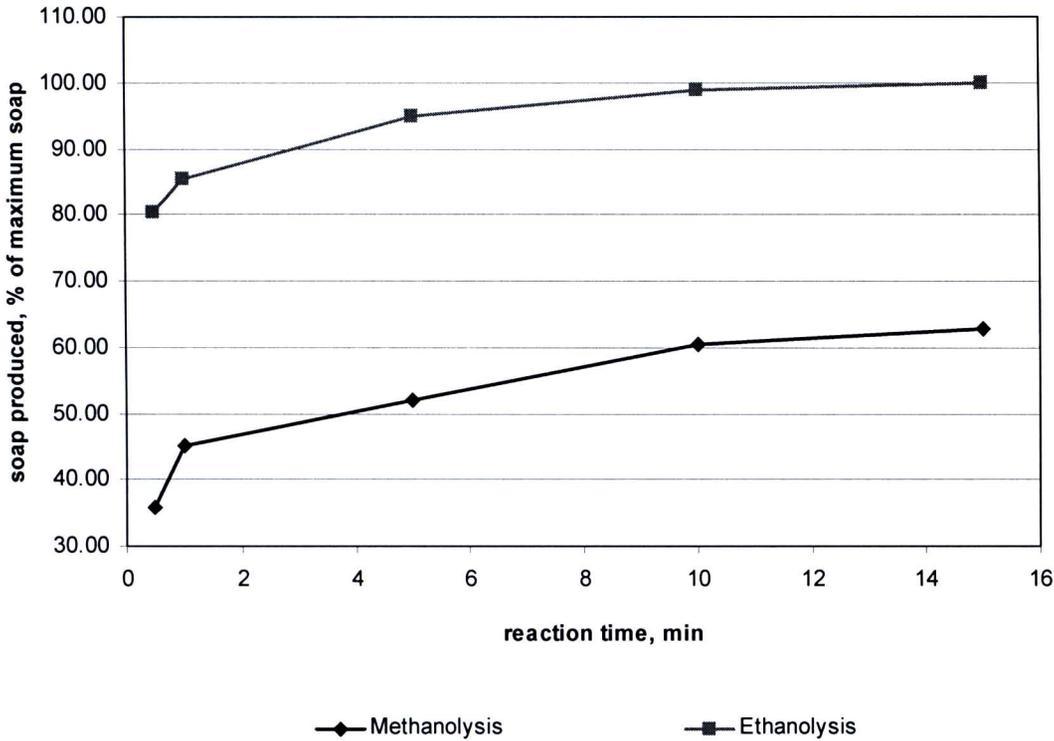
ภาพ 4.6 แสดงลักษณะการกระจายตัวของกลีเซอรอลและ a) เมทิลเอสเทอร์ b) เอทิลเอสเทอร์ หลังปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่กำลังขยาย 200 เท่า (สภาวะ: สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ 1:6 ปริมาณ KOH 1%wt เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และ อุณหภูมิ 60 °C)

4.3.4.2 ปริมาณสบู่ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยทั่วไปจะมีการเกิดสบู่จากปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงค่อนข้างสูงและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันสูงมาก โดยในช่วงเวลาที่แรกของการทำปฏิกิริยาพบว่าจะเกิดสูงถึง 80% ของปริมาณสบู่ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ และเพิ่มสูงขึ้นถึงเกือบ 100% ของปริมาณสบู่ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที โดยการเปรียบเทียบปริมาณสบู่ที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อใช้เมทานอล และเอทานอลเป็นแอลกอฮอล์แสดงดังภาพ 4.7

ปริมาณสบู่ที่เกิดขึ้นนอกจากจะขัดขวางการแยกเฟสระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลแล้ว ยังขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน รวมถึงยังสามารถบ่งบอกได้ว่าระบบมีการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาไปกับปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันอีกด้วย





ภาพ 4.7 ปริมาณสบู่ที่เวลาต่างๆ ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้เมทานอล และเอทานอลเป็นแอลกอฮอล์

(สภาวะ: สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ 1:6 ปริมาณ KOH 1%wt เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และ อุณหภูมิ 60 °C)

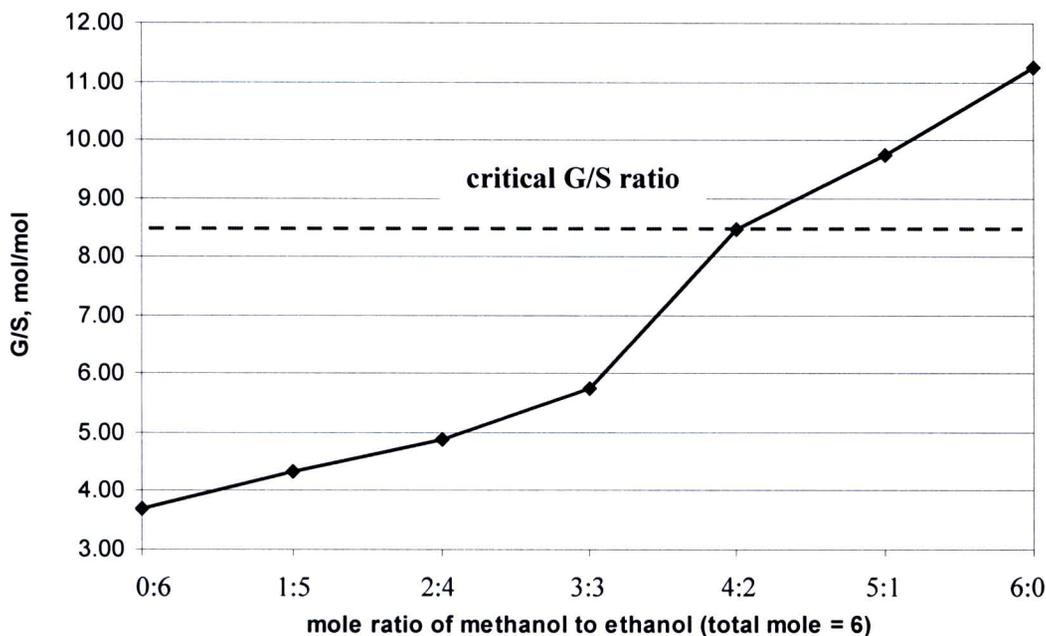
4.3.4.3 ศึกษาสาเหตุและแนวทางแก้ไขปัญหาในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเตอ์

ค่าสัดส่วนกลีเซอรอลต่อสบู่ (Glycerol/Soap ratio, G/S ratio)

จากการศึกษาความแตกต่างระหว่างการใช้เมทานอล และเอทานอลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ทำให้เกิดสมมติฐานการเกิดอิมัลชันที่เสถียรในกรณีการผลิตเอทิลเอสเตอ์อาจมาจากสัดส่วนของ G/S โดยมีแนวคิดที่ว่าจะต้องมีค่าความเข้มข้นวิกฤตค่าหนึ่งในการเกิดอิมัลชัน และเมื่อสบู่เป็น emulsifier ที่ดีนั้น การแยกเฟสของกลีเซอรอลนั้นอาจขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ กลีเซอรอลต่อสบู่ ซึ่งจะเป็นค่าที่กำหนดการแยกเฟสนั้นเอง

ดังนั้นจึงทดลองใช้แอลกอฮอล์ผสมระหว่างเมทานอลและเอทานอลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน และวัดค่าปริมาณกลีเซอรอลและสบู่ที่เกิดขึ้นในเวลาต่าง ๆ และสังเกตการแยกเฟสและพบว่ากลีเซอรอลและเอสเตอ์จะสามารถแยกออกจากกันได้ค่อนข้างสมบูรณ์ เมื่อมีค่าสัดส่วน G/S

มากกว่า 8.5 ซึ่งจุดนี้ถือเป็นค่าวิกฤต โดยหากค่าสัดส่วน G/S ต่ำกว่าค่าวิกฤตจะทำให้มีผลชันยังคงความเสถียรอยู่ ส่งผลให้กลีเซอรอลและเอสเทอร์แยกเฟสออกจากกันได้ยาก ดังนั้นสมมติฐานของสัดส่วน G/S นี้มีความเป็นไปได้สูง สำหรับผลการทดลองเพื่อหาค่าสัดส่วน G/S วิกฤตแสดงดังภาพ 4.8



ภาพที่ 4.8 G/S ratio ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้แอลกอฮอล์ผสมระหว่างเมทานอลต่อเอทานอลที่สัดส่วนเชิงโมลต่างๆ

ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

(สภาวะ: สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ 1:6 ปริมาณ KOH 1%wt

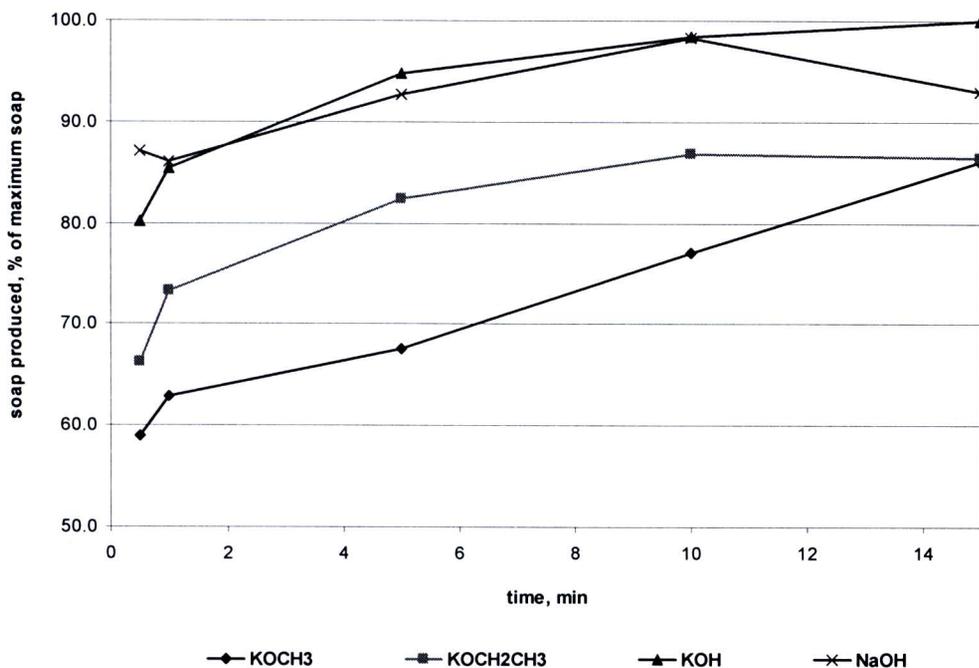
เวลาทำปฏิกิริยา 5 นาที และ อุณหภูมิ 60 °C)

ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

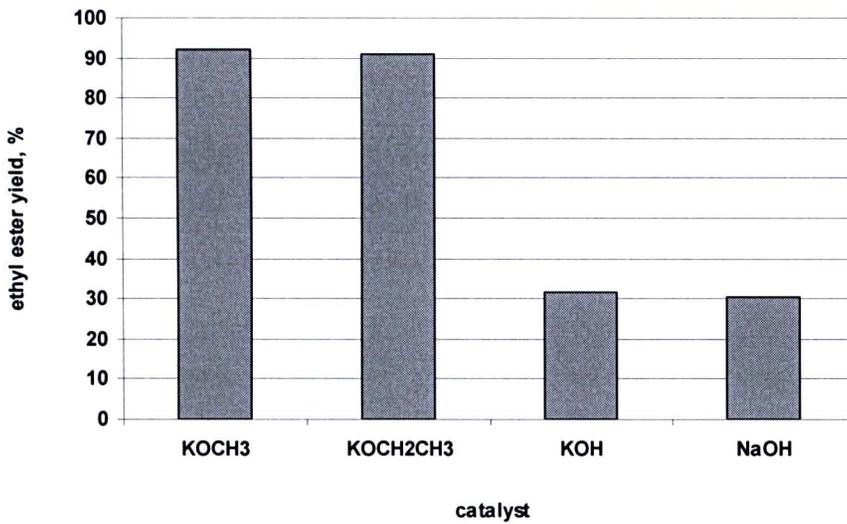
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ส่งผลต่อปริมาณสบู่ที่เกิดขึ้นในระบบการผลิตเอทิลเอสเทอร์ที่ต่างกัน โดยปริมาณสบู่ที่เกิดขึ้นในระบบการผลิตเอทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOCH_3 , KOCH_2CH_3 , KOH และ NaOH ปริมาณ 1% ที่อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที แสดงดังภาพ 4.9 ซึ่งปริมาณสบู่ที่แตกต่างกันนี้จะนำไปสู่ค่า G/S ratio ที่แตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOCH_3 , KOCH_2CH_3 , KOH และ NaOH ค่า G/S ratio ที่ได้เท่ากับ 10.23, 9.78, 3.68 และ 4.39 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อใช้ KOCH_3 และ KOCH_2CH_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบว่า กลีเซอรอลและเอทิลเอสเทอร์สามารถแยก

เฟสออกจากกันได้โดยอาศัยเพียงแรงโน้มถ่วงเท่านั้น ซึ่งส่งผลให้ผลได้ของเอทิลเอสเทอร์สูงขึ้นมากกว่า 90% โดยมีค่าสูงใกล้เคียงกับกรณีของเมทิลเอสเทอร์ (95%) ดังแสดงในภาพ 4.10

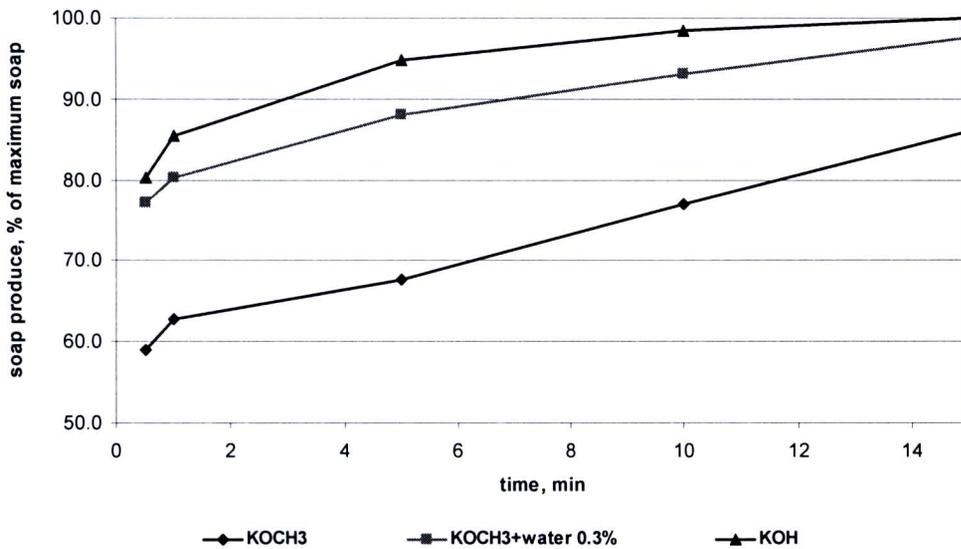
สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดสนุ่ปริมาณมากเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม hydroxide (KOH และ NaOH) คือการแตกตัวในแอลกอฮอล์เกิดเป็นน้ำ ซึ่งสภาวะที่มีน้ำ จะทำให้ปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันเกิดได้ดี ซึ่งเมื่อทำการทดสอบโดยเติมน้ำลงในตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม alkoxide คือ KOCH_3 ปริมาณ 0.3% (เท่ากับปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด hydroxide คือ KOH) พบว่าอัตราการเกิดสนุ่สูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพ 4.10 ตลอดจนไม่เกิดการแยกเฟสระหว่างเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล



ภาพ 4.9 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อปริมาณสนุ่ในระบบผลิตเอทิลเอสเทอร์ (สภาวะ: สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และ อุณหภูมิ 60 °C)



ภาพ 4.10 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ของเอทิลเอสเตอร์
 (สภาวะ: สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt
 เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และ อุณหภูมิ 60 °C)



ภาพ 4.11 ผลของปริมาณน้ำต่อปริมาณสบู่ในระบบผลิตเอทิลเอสเตอร์
 (สภาวะ: สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt
 เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และ อุณหภูมิ 60 °C)

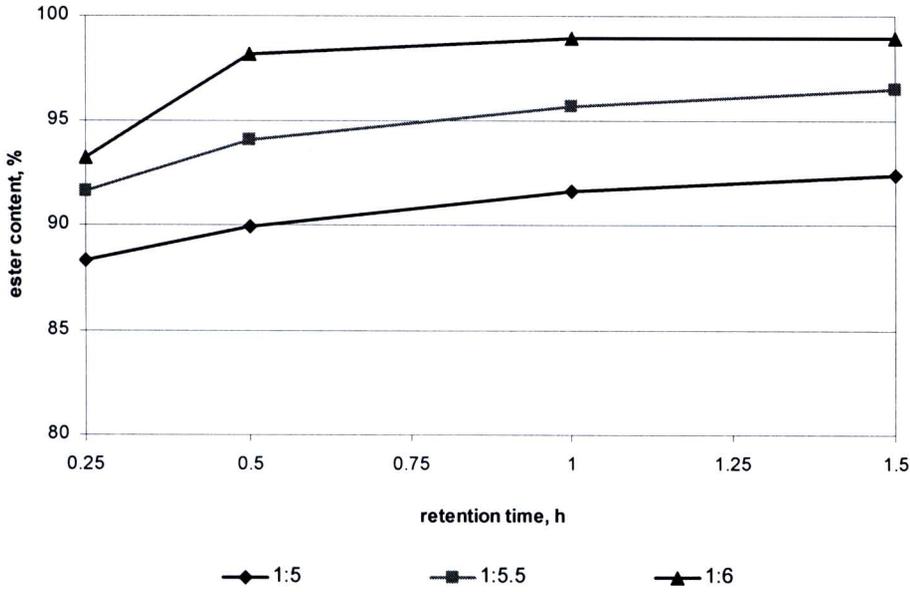
อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม alkoxide จะทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล แต่ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ที่ได้ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดไว้ คือต้องมีความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ มากกว่า 96.5% เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ใช้ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์นี้ เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาและมีผลผลิตเกิดขึ้น จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง อีกทั้งแนวความคิดการแยกเฟสของสัดส่วน G/S ซึ่งคาดว่าในระยะเวลาเริ่มแรกอัตราการเกิดกลีเซอรอลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจะสูงกว่าอัตราการเกิดสบู่ ค่าสัดส่วน G/S จะสูงและแยกเฟสได้โดยง่าย แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเกิดกลีเซอรอลจะลดลง ในขณะที่อัตราการเกิดสบู่จะสูงขึ้น ทำให้ค่าสัดส่วน G/S ลดลงซึ่งส่งผลให้การแยกเฟสเกิดได้ไม่ดี การแยกเอาเฟสกลีเซอรอลออกไปจะเป็นการลดการสะสมของกลีเซอรอลและสบู่ของระบบในภาพรวม ลดการกีดขวางของอิมัลชัน ซึ่งสามารถรักษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันให้อยู่ในระดับสูง ส่งผลให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์มากพอที่จะผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้

4.3.5 ศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์คุณภาพสูงด้วยระบบ CD process

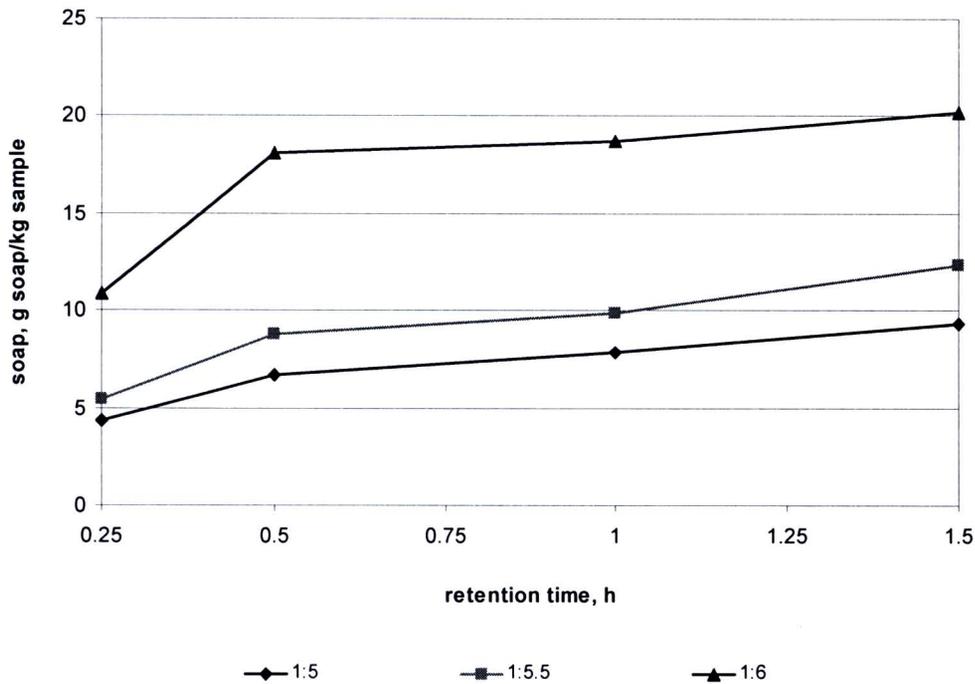
ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยระบบ CD process ได้ถูกศึกษาดังนี้

4.3.5.1 สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอลที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

จากการศึกษาผลของสัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอลในช่วง 1:5 – 1:6 โดยใช้ KOCH_3 1% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C พบว่า ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอลเพิ่มขึ้น โดยที่สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอลเท่ากับ 1:6 และเวลาในการทำปฏิกิริยาดังแต่ 0.5 ชั่วโมงขึ้นไป ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จะมากกว่า 97% ที่สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอลเท่ากับ 1:5.5 ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์จะมากกว่า 96.5% เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 1.5 ชั่วโมง และที่สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอลเท่ากับ 1:5 ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์มีค่าสูงสุดที่ 92% ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพ 4.12 แต่อย่างไรก็ตามการใช้เอทานอลในปริมาณมากจะมีผลต่อความสามารถในการละลาย (solubility) ของสบู่ในเฟสของเอทิลเอสเทอร์ด้วย โดยพบว่าที่สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอลเท่ากับ 1:6 จะปริมาณสบู่ในเอทิลเอสเทอร์สูงด้วยเช่นกัน โดยที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 0.5 ชั่วโมง ปริมาณสบู่สูงถึง 18 g soap/kg sample ดังแสดงในภาพ 4.13 โดยปริมาณสบู่จะส่งผลให้ต้องใช้น้ำในกระบวนการล้างทำความสะอาดเอทิลเอสเทอร์มากขึ้น รวมถึงสูญเสียเอทิลเอสเทอร์ไปกับการล้างค่อนข้างสูง ดังนั้นสัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอลที่น่าสนใจศึกษาต่อคือ 1:5.5



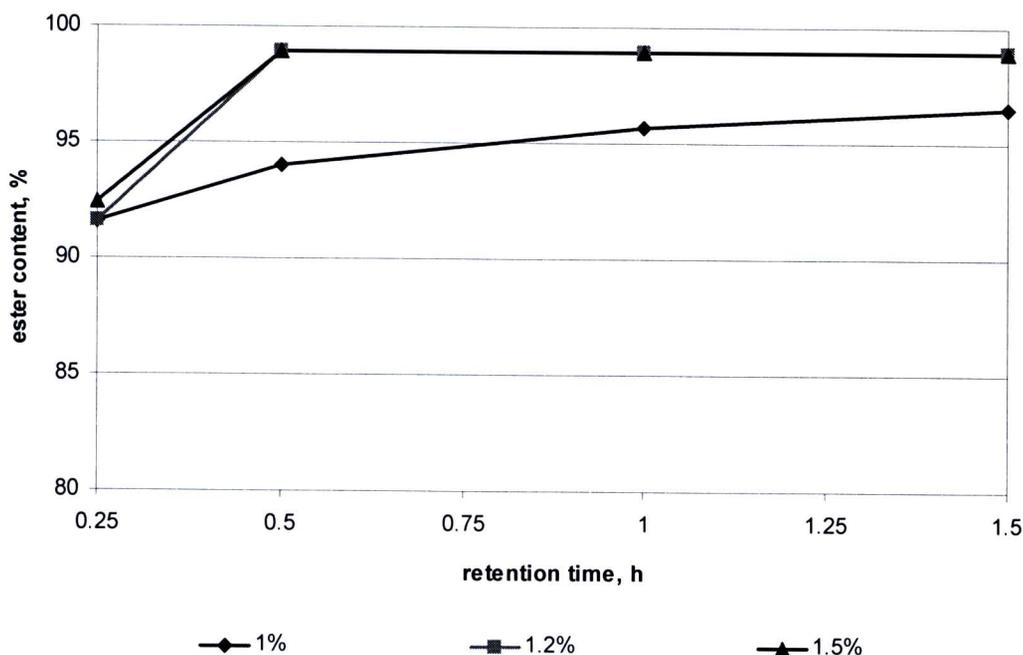
ภาพ 4.12 ผลของสัดส่วนเชิงโมลของน้ำมัน:เอทานอลต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ (สภาวะ: ปริมาณ KOCH_3 1%wt และ อุณหภูมิ 60°C)



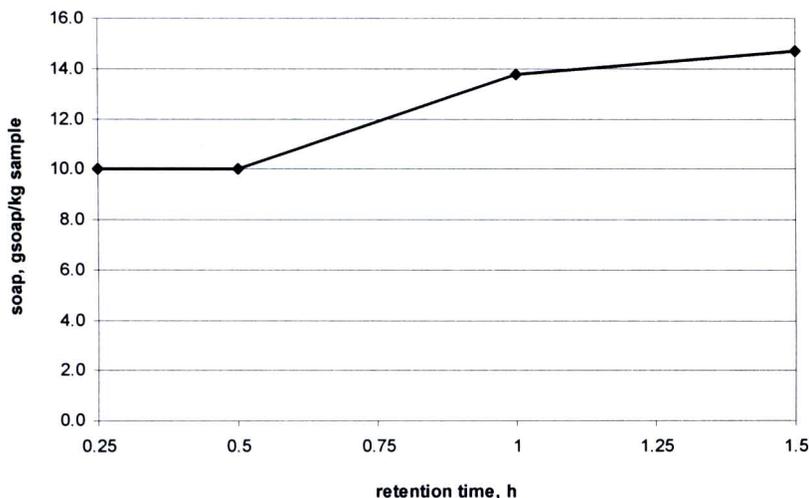
ภาพ 4.13 ผลของสัดส่วนเชิงโมลของน้ำมัน:เอทานอลต่อปริมาณสบู่ในเอทิลเอสเทอร์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ (สภาวะ: ปริมาณ KOCH_3 1%wt และ อุณหภูมิ 60°C)

4.3.5.2 ผลของปริมาณ KOH ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

ทำศึกษาผลของปริมาณ KOH ในช่วง 1-1.5% เมื่อใช้สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:5.5 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าการเพิ่มปริมาณ KOH เป็น 1.2% จะช่วยให้ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอร์มีค่าสูงประมาณ 98% ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 0.5 ชั่วโมงเป็นต้นไป ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้ KOH ที่ 1.5% ดังแสดงในภาพ 4.14 นอกจากนั้นพบว่าปริมาณสบู่ในเฟสเอทิลเอสเตอร์ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 0.5 ชั่วโมง มีค่าประมาณ 10 g soap/kg sample ซึ่งไม่สูงมากนัก โดยปริมาณสบู่ในเอทิลเอสเตอร์ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างๆ ในสภาวะการผลิตสัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:5.5 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ และปริมาณ KOH เป็น 1.2% แสดงดังภาพ 4.15



ภาพ 4.14 ผลของปริมาณ KOH ต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอร์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ (สภาวะ: สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:5.5 และ อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$)



ภาพ 4.15 ปริมาณสบู่ในเอทิลเอสเตอร์ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างๆ (สภาวะ: สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:5.5 และ อุณหภูมิ 60 °C)

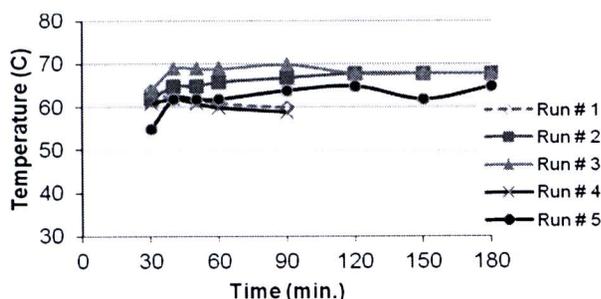
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทิลเอสเตอร์ได้แก่ สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1: 5.5 ปริมาณ KOCH₃ 1.2% เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และอุณหภูมิ 60 °C ซึ่งเอทิลเอสเตอร์ที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ และผลได้ เท่ากับ 98.0% และ 93.1% ตามลำดับ

4.4 กระบวนการเอสเตอริฟิเคชันและทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแบบต่อเนื่องขนาด 500 ลิตร/วัน

4.4.1 ผลการทดลองการเอสเตอริฟิเคชันน้ำมันปาล์มดิบด้วยเอทานอล

อุณหภูมิของการทดลองแบบต่อเนื่องด้วยวิธีการของ Taguchi ในช่วงอุณหภูมิ 60-70°C แสดงไว้ใน

ภาพ 4.16



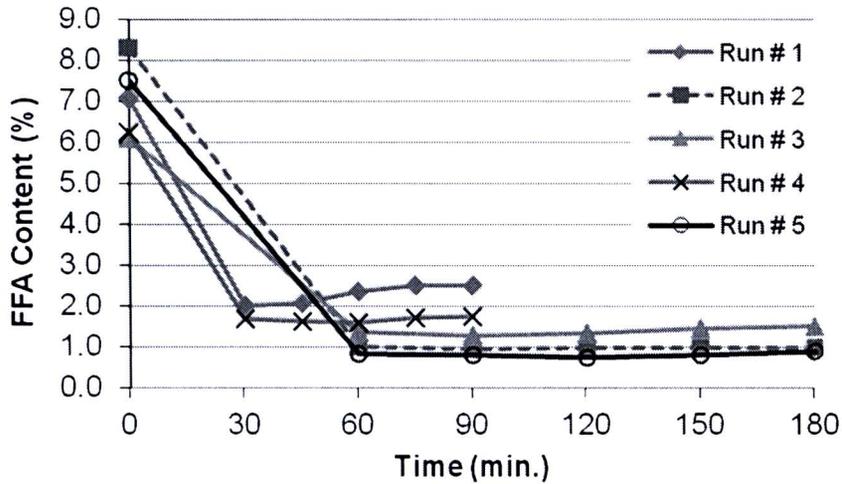
ภาพ 4.16 อุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ของการทดลองแบบต่อเนื่อง

หมายเหตุ Run # 5 คือ confirmation run

การลดลงของกรดไขมันอิสระซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน แสดงดังตาราง 4.7 (บางชุดการทดลองทำการทดลองเพียง 90 นาที เนื่องจาก retention time ต่ำ)
 ตาราง 4.7 ค่ากรดไขมันอิสระที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันแบบต่อเนื่อง

Time (min)	Average FFA (%)				
	Run # 1	Run # 2	Run # 3	Run # 4	Run # 5
0	7.07	8.32	6.11	6.24	7.50
30	2.01			1.69	
45	2.07			1.63	
60	2.37	1.00	1.36	1.60	0.85
75	2.51			1.72	
90	2.52	0.95	1.27	1.74	0.81
120		0.99	1.33		0.74
150		0.99	1.47		0.80
180		0.98	1.53		0.88
Average					0.81
Cal FFA					0.90

ภาพ 4.17 แสดงค่า FFA ที่เข้าสู่สถานะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 เท่าของ retention time (2 RT)



ภาพ 4.17 กรดไขมันอิสระที่ลดลง

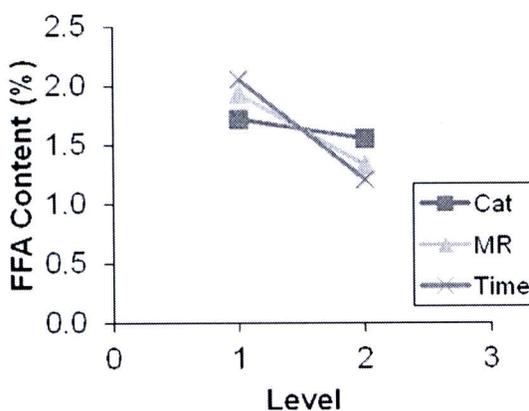
ตาราง 4.8 แสดง response characteristics ของการทดลองแบบ Taguchi และตาราง 4.9 แสดง response table ภาพ 4.18 แสดง response graph

ตาราง 4.8 Response characteristics

Run No.	Factors				Response	
	Cat	MR	Time	y1	y2	Characteristic (y)
1	1	1	1	2.37	2.52	2.44
2	1	2	2	0.99	0.98	0.99
3	2	1	2	1.33	1.53	1.43
4	2	2	1	1.60	1.74	1.67
T						1.63

ตาราง 4.9 Response table

Level	Cat	MR	Time
1	1.72	1.94	2.06
2	1.55	1.33	1.21
Delta	0.17	0.61	0.85
Order		2	1
Select	Cat 2	MR 2	Time 2
μ	= T+(MR2-T)+(Time2-T)		
μ	= 0.90		

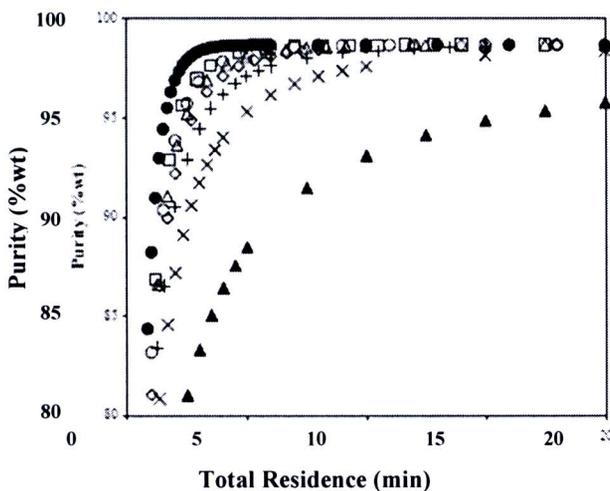


ภาพ 4.18 The response graph

ผลของการเอสเตอริฟิเคชันน้ำมันปาล์มดิบที่มีค่ากรดไขมันอิสระเริ่มต้นแตกต่างกันด้วยเอทานอล ซึ่งดำเนินการที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 RT โดยมี response characteristics แสดงค่ากรดไขมันอิสระเฉลี่ยที่ 1.63 wt%. หลังจากวิเคราะห์ตาราง response table (ตาราง 4.9) แสดงให้เห็นว่ามีเพียง 2 ตัวแปรที่มีนัยสำคัญ เรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้คือ เวลาที่กักเก็บ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อกรดไขมันอิสระ ส่วนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริก) มีค่า delta น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของตัวถัดไป ไม่จำเป็นต้องนำมาคำนวณ predicted FFA ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ response ในภาพที่ 4.18 กรดไขมันอิสระที่คำนวณได้จากสมการ predicted FFA คือ 0.90 wt% ใกล้เคียงกับ 0.81 wt% ที่ได้จากการ confirmation run ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันแบบต่อเนื่องของน้ำมัน

ปาล์มดิบกับเอทานอล คือ เวลาเก็บ 1 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อกรดไขมันอิสระเป็น 30: 1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 60 wt% ของกรดไขมันอิสระ ซึ่งสามารถลดกรดไขมันอิสระจาก 7.50 ลงเหลือ 0.81 wt%. โดยปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำมันปาล์มดิบลดลงจากค่า 21.70 mg/kg เหลือในน้ำมันเอสเตอร์ไฟยัดเท่ากับ 1.01 mg/kg

อย่างไรก็ตาม ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่สุดท้ายไม่อาจต่ำกว่า 0.5 wt% ซึ่งเป็นเป้าหมายที่คาดหวัง ผู้วิจัยได้ลองทดสอบกระบวนการเอสเตอร์ฟิเคชันแบบแบทช์ ด้วยถังปฏิกรณ์เดียวกันนี้ และด้วยสภาวะเช่นเดียวกับที่ใช้ในแบบต่อเนื่อง พบว่า กรดไขมันอิสระสามารถลดลงเหลือ 0.5 wt% ได้ เหตุผลที่เป็นเช่นนี้ สามารถอธิบายได้จากการศึกษาของ Leevijit et al. (2006) จาก Transesterification of palm oil in series of continuous stirred tank reactors. Leevijit et al. (2006) ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ด้วยเมทานอลในถังกวนต่อเนื่อง 6 stages ถึงจะได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับถังปฏิกรณ์แบบแบทช์หรือแบบ plug flow ที่เป็นเช่นนี้เพราะถังกวนต่อเนื่อง stage เดียว ไม่สามารถทำให้เกิดการผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างแท้จริง (nonideal mixing performance) อย่างที่แบบแบทช์หรือแบบ plug flow ทำได้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากการไหลข้าม (short cut flow) หรือการเกิดจุดอับ (stagnant zone) ดังนั้น ถังกวนต่อเนื่องจึงต้องใช้ถึง 6 stages ถึงจะมีประสิทธิภาพในการผสมดีเท่ากับแบบแบทช์หรือแบบ plug flow



ภาพ 4.19 Predicted purity for the transesterification of palm oil in series of CSTRs at molar ratio 6:1, temperature 60°C, NaOH concentration 1 wt % of oil; (▲) 1-CSTR; (×) 2-CSTRs; (+) 3-CSTRs; (◊) 4-CSTRs; (△) 5-CSTRs; (o) 6-CSTRs; (□) 7-CSTRs; (●) PFR.

(Leevijit et al., 2006)

สำหรับถึงกวนต่อเนื่องที่ใช้ในระบบวนการเอสเตอริฟิเคชันนี้ ประกอบด้วย 3 stages แม้ว่าเรโนลด์ นัมเบอร์ของการผสม ($N_{Re} = 20,249$) จะมีค่าอยู่ในระดับ turbulence ก็ตาม แต่การผสมของเหลวหนืดที่ อุณหภูมิ 60°C ให้เป็นเนื้อเดียวกันอย่างแท้จริง อาจทำไม่ได้ หากต้องการให้การผสมดียิ่งขึ้น อาจต้องใช้ stages ที่มากขึ้นกว่านี้ซึ่งจะส่งผลให้ระบบวนการเอสเตอริฟิเคชันในระบบนี้ สามารถลดกรดไขมันอิสระ ลง เหลือ 0.5 wt% ได้ ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องศึกษาต่อไป

ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบวนการเอสเตอริฟิเคชันด้วยถึงกวนต่อเนื่องอยู่ที่ 72-78% ถือว่า อยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ตาราง 4.10 Energy efficiency

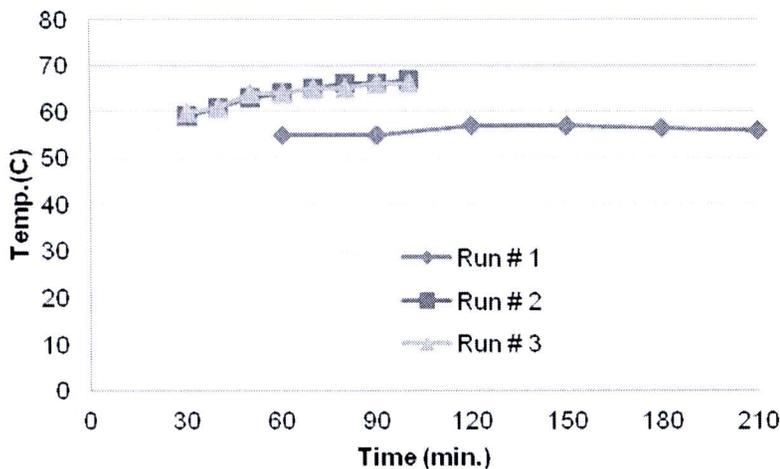
	Energy (Wh/kg CPO)				
	Run # 1	Run # 2	Run # 3	Run # 4	Run # 5
CSTR	28.24	41.28	34.92	29.44	33.94
Theory	21.67	31.31	25.72	22.56	27.05
Efficiency	76.74%	75.86%	73.67%	76.62%	79.70%

4.4.2 กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแบบต่อเนื่องขนาด 500 ลิตร/วัน

การทดลองกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแบบต่อเนื่องมี 3 การทดลอง กระทำด้วยสภาวะ ต่างกัน แสดงไว้ในตาราง 4.11 ข้างล่างนี้

ตาราง 4.11 แสดงสภาวะในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันใน CD reactor

สภาวะในการทดลอง	Unit	การทดลอง		
		Run # 1	Run # 2	Run # 3
อัตราป้อน EPO	L/hr	12.86	35.62	35.34
ปริมาณกรดไขมันอิสระ	%	1.18	0.65	0.53
อัตราส่วน Ethanol: TG	โมล	5.7	7.73	5.66
อัตราส่วน KOCH ₃ :TG	โมล	0.2	0.2	0.2
อุณหภูมิปฏิกิริยา	(°C)	56	67	66
เวลาเก็บกัก	(Min.)	60	25	25

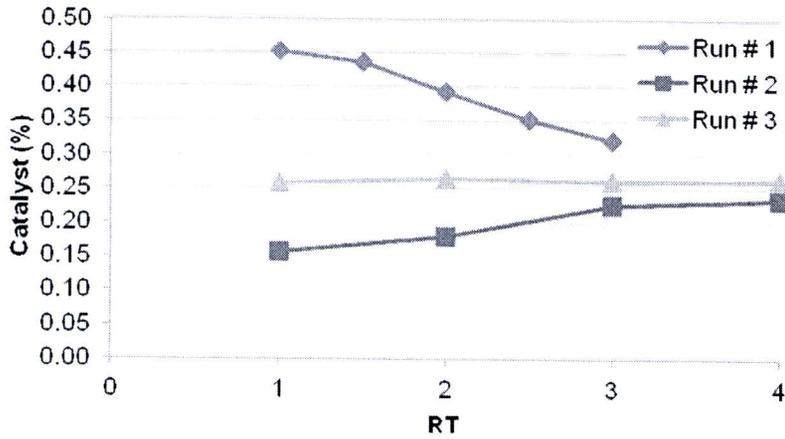


ภาพ 4.20 Outlet temperature profiles

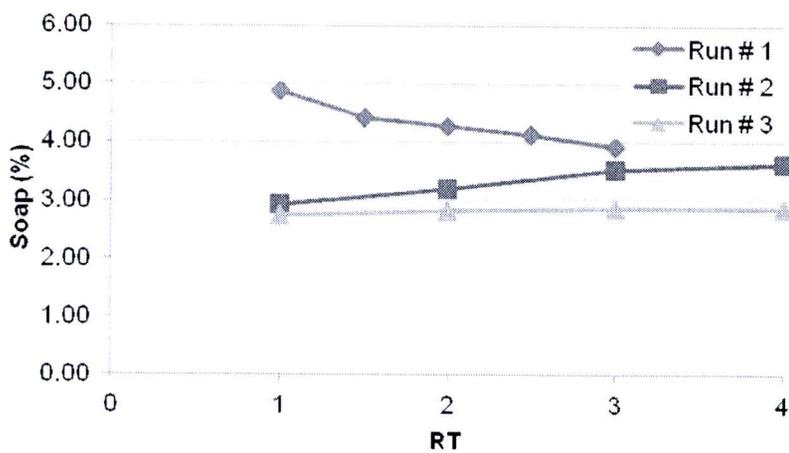
ตาราง 4.12 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา สบู่ เอทิลเอสเทอร์ และค่ากรดในเฟสเอสเทอร์

Time (RT)	Catalyst (%)			Soap (%)			Ester (%)			AV (mgKOH/g)		
	Run #	Run #	Run #	Run #	Run #	Run #	Run #	Run #	Run #	Run #	Run #	Run #
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.45	0.16	0.26	4.88	2.92	2.74	97.31	94.85	96.49	0.57	0.71	0.68
1.5	0.44			4.42			98.95			0.72		
2	0.39	0.18	0.26	4.27	3.20	2.81	98.95	98.95	98.95	0.55	0.75	0.62
2.5	0.35			4.13			98.95			0.73		
3	0.32	0.23	0.26	3.92	3.52	2.87	98.95	98.95	98.95	0.60	0.65	0.64
4		0.24	0.26		3.62	2.87		98.95	98.54		0.70	0.57

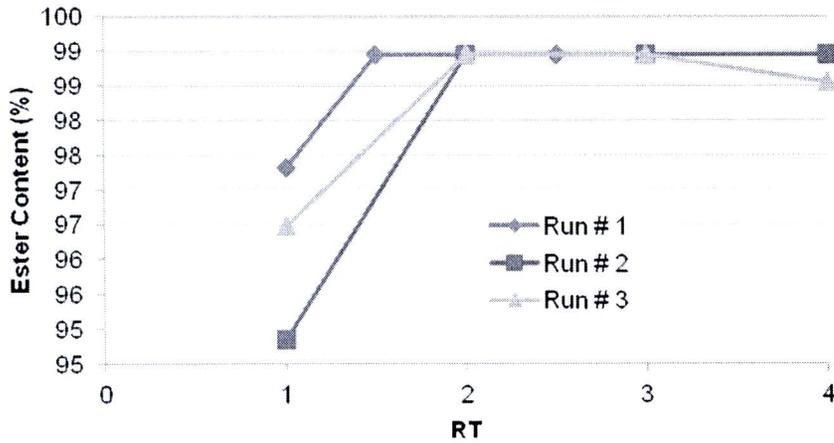
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยายังเหลืออยู่ในเฟสเอสเทอร์ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ระหว่าง การทดลองที่ 1 ซึ่งใช้เวลาเก็บกัก 60 นาทีและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาดำ (56 °C) และการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้สัดส่วนเอทานอลสูง (7.0) เวลาเก็บกัก 25 นาที ค่ากรดไขมันอิสระเริ่มต้นต่ำ และการทดลองที่ 3 ซึ่งใช้สัดส่วนเอทานอลต่ำ (5.66) โดยปริมาณสบู่ในการทดลองที่ 3 จะต่ำลง ซึ่งมาจากการมีเอทานอลที่น้อยกว่า ส่วนค่าปริมาณเอทิลเอสเทอร์และค่าความเป็นกรดในทั้ง 3 การทดลองไม่แตกต่างกัน



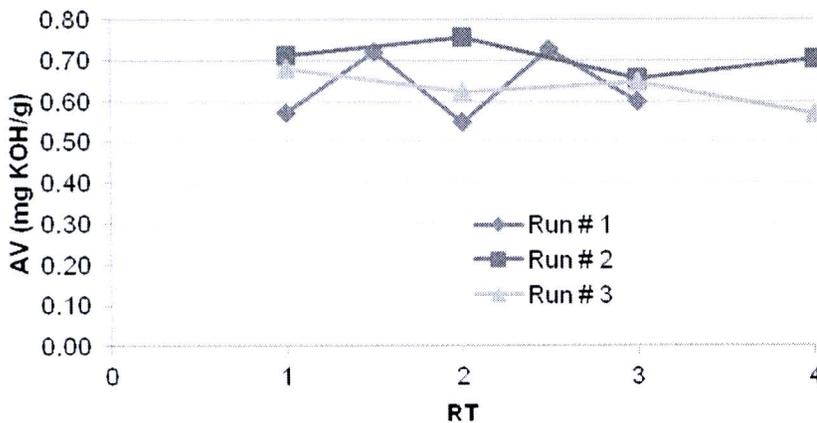
ภาพ 4.21 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในเฟสเอสเทอร์ที่เวลาเก็บกักต่างๆ กัน



ภาพ 4.22 ปริมาณสบู่ในเฟสเอสเทอร์ที่เวลาเก็บกักต่างๆ กัน



ภาพ 4.23 ปริมาณเอทิลเอสเทอร์ในเฟสเอสเทอร์ที่เวลาเก็บกักต่างๆ กัน



ภาพ 4.24 ปริมาณกรดในเฟสเอสเทอร์ที่เวลาเก็บกักต่างๆ กัน

การดำเนินการที่ 3 มีค่าผลได้ (yield) ประมาณ 90.4%

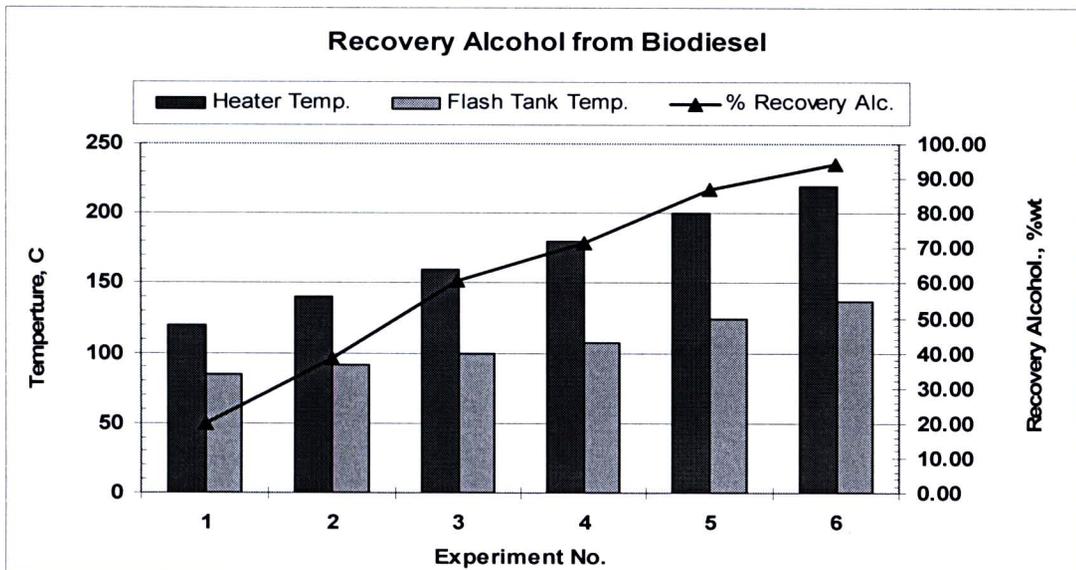
4.5 การปรับแต่งคุณภาพไบโอดีเซล

4.5.1 การแยกคีนแอลกอฮอล์ด้วยการระเหยแบบแฟลช

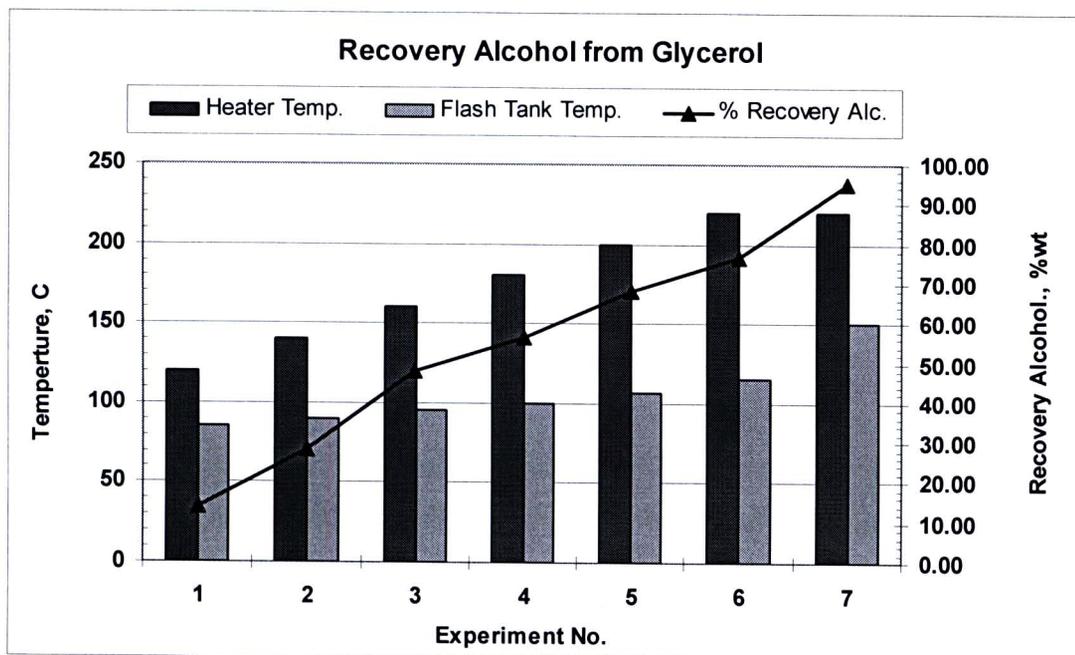
จากการทดลองโดยใช้ไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันหรือกลีเซอรอลที่แยกได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเข้าระเหยเอทานอลในชุดระเหยแอลกอฮอล์แบบต่อเนื่อง โดยใช้ระบบ flash evaporation ที่ความดัน 30 บาร์ ด้วยปั๊มแรงดันสูง และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ชุดให้ความร้อนเท่ากับ 120, 140, 160, 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยที่ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลมีปริมาณ

เอทานอลเริ่มต้นเท่ากับ 34.00% และ 16.22% โดยน้ำหนักตามลำดับ และอัตราการป้อนเข้าชุดระเหยแอลกอฮอล์แบบต่อเนื่องเมื่อใช้ไบโอดีเซลและกลีเซอรอล ประมาณ 25 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของชุดให้ความร้อนจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การแยกคืนเอทานอลสูงขึ้นทั้งในไบโอดีเซลและกลีเซอรอลแสดงดังภาพ 4.25 และภาพ 4.26 โดยที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส (การทดลองครั้งที่ 6) ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลจะให้เปอร์เซ็นต์การแยกคืนเอทานอลสูงสุดเท่ากับ 94.08% และ 76.47% ตามลำดับ และมีเอทานอลคงเหลืออยู่ใน ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลหลังจากระเหยแล้ว เท่ากับ 0.96% และ 8.00% ตามลำดับ แสดงดังตาราง 4.13

สาเหตุที่เปอร์เซ็นต์การแยกคืนเอทานอลในกลีเซอรอลที่มีค่าน้อยกว่าในไบโอดีเซล เนื่องจากปริมาณเอทานอลเริ่มต้นที่มีมากกว่าเท่ากับ 2.09 เท่า ทำให้ต้องใช้พลังงานในการระเหยเอทานอลที่มากกว่า ซึ่งชุดให้ความร้อนขนาด 6000 วัตต์ ไม่สามารถแยกคืนเอทานอลของกลีเซอรอลให้มีประสิทธิภาพสูงภายใน 1 ครั้ง ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองในส่วนของกลีเซอรอล ด้วยการนำกลีเซอรอลที่ผ่านการระเหยเอทานอลคืนในครั้งแรก วนกลับมาระเหยซ้ำอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส (การทดลองครั้งที่ 7) โดยที่มีปริมาณเอทานอลเริ่มต้นเท่ากับ 8.00% ซึ่งจะให้เปอร์เซ็นต์การแยกคืนเอทานอลเท่ากับ 95.00% และมีเอทานอลคงเหลืออยู่ในกลีเซอรอลหลังจากระเหยแล้ว เท่ากับ 0.40% ซึ่งทำให้เปอร์เซ็นต์การแยกคืนเอทานอลรวมของกลีเซอรอลเท่ากับ 98.82%



ภาพ 4.25 เปอร์เซ็นต์การแยกคืนเอทานอลจากไบโอดีเซล



ภาพ 4.26 เปรอ์เซ็นต์การแยกคืนเอทานอลจากกลีเซอรอล

ตาราง 4.13 แสดงปริมาณเอทานอลเริ่มต้นและหลังออกจากชุดระเหยแอลกอฮอล์แบบต่อเนื่อง

Biodiesel Experiment No.	Temp., C		Flow rate L/hr	%EtOH	
	Heater	Flash tank		ini, wt/wt	fin, wt/wt
1	120	85	24.00	16.22	12.98
2	140	92	24.00	16.22	9.98
3	160	100	24.00	16.22	6.35
4	180	108	21.43	16.22	4.66
5	200	125	21.82	16.22	2.12
6	220	137	20.00	16.22	0.96

Glycerol Experiment No.	Temp., C		Flow rate L/hr	%EtOH	
	Heater	Flash tank		ini, wt/wt	fin, wt/wt
1	120	85	23.08	34.00	29.20

2	140	90	23.53	34.00	24.40
3	160	95	23.08	34.00	17.61
4	180	100	21.05	34.00	14.80
5	200	106	21.05	34.00	10.80
6	220	115	18.18	34.00	8.00
7	220	150	20.00	8.00	0.40

4.5.2 การล้างไบโอดีเซล

การทดลองใช้ไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์) ที่ผ่านการแยกคีนเอทานอลจากการระเหยแอลกอฮอล์โดยใช้ระบบ flash evaporation และป้อนไบโอดีเซลเข้าสู่ชุดกระบวนการล้างด้วยน้ำร่วมกับสารดูดซับด้วยอัตราการใช้ 40 ลิตรต่อชั่วโมง โดยที่ค่าสบู่เริ่มต้นที่ 29,529 ppm พบว่า ค่าสบู่เมื่อผ่านอุปกรณ์ต่างๆ คือ ถึงเรซิน 1 ถึงเรซิน 2 และถึงล้าง เท่ากับ 26,160 24,218 และ 9,994 ppm ตามลำดับ หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสบู่เท่ากับ 10.02 6.68 และ 48.93% ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของปริมาณสบู่รวมมีค่าเท่ากับ 65.62% เนื่องจากค่าสบู่เริ่มต้นในไบโอดีเซลที่มีค่าสูงมาก จึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของชุดกระบวนการล้างด้วยน้ำร่วมกับสารดูดซับมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) ที่ค่าสบู่เริ่มต้นประมาณ 5,000 ppm และยังมีค่าการลดลงของปริมาณสบู่รวมเท่ากับ 95% (ชาคริตและคณะ, 2554)

ดังนั้นจึงต้องทำการการลดค่าสบู่เริ่มต้นในไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์) ให้มีค่าลดลงก่อนเข้าสู่ชุดกระบวนการล้างด้วยน้ำร่วมกับสารดูดซับ ซึ่งจากการทดลองนำไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์) ที่มีค่าสบู่เริ่มต้นเท่ากับ 24,125 ppm นำมาเติมกลีเซอรอลที่ผ่านการระเหยเอทานอลแล้วและกลีเซอรอลบริสุทธิ์ เพื่อที่จะให้กลีเซอรอลที่เติมลงไปดูดซับสบู่และกลีเซอรอลที่แขวนลอยอยู่ในไบโอดีเซล โดยที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที แล้วปล่อยให้แยกชั้น ปรากฏว่าไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์) มีค่าสบู่ลดลงเท่ากับ 86.56 และ 95.87% เมื่อใช้กลีเซอรอลที่ผ่านการระเหยเอทานอลแล้วและกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามหลังจากการแยกแล้วก็มีการสูญเสียไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์) ไปกับกลีเซอรอล โดยคิดเป็น 30.85 และ 15.21% เมื่อใช้กลีเซอรอลที่ผ่านการระเหยเอทานอลแล้วและกลีเซอรอลบริสุทธิ์ ตามลำดับ แสดงดังตาราง 4.14

ตาราง 4.14 การลดค่าสบู่ในไบโอดีเซล (เอทิลเอสเตอร์)

ครั้งที่ 1	น้ำหนัก, g	ค่าสบู่, ppm
ไบโอดีเซล (เอทิลเอสเตอร์)	100.00	24,125
กลีเซอรอลที่ผ่านการระเหยเอทานอลแล้ว	23.67	23,284
น้ำหนักรวม	123.67	
หลังจากการแยก		
ไบโอดีเซล (เอทิลเอสเตอร์)	69.15	3,240
กลีเซอรอลที่ผ่านการระเหยเอทานอลแล้ว	51.23	146,117
น้ำหนักรวม	120.38	
ครั้งที่ 2	น้ำหนัก, g	ค่าสบู่, ppm
ไบโอดีเซล (เอทิลเอสเตอร์)	100.00	24,125
กลีเซอรอลบริสุทธิ์	12.56	0
น้ำหนักรวม	112.56	
หลังจากการแยก		
ไบโอดีเซล (เอทิลเอสเตอร์)	84.79	996
กลีเซอรอลบริสุทธิ์	23.46	90,674
น้ำหนักรวม	108.25	

4.6 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเอทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ตามมาตรฐานของกรมมาตรฐานพลังงาน

ตาราง 4.15 ผลการวิเคราะห์ที่ตามมาตรฐานข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพ และประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2552 ของกรมธุรกิจพลังงาน

รายการ	ข้อกำหนด	ค่าวิเคราะห์	ผ่าน/ตก	อัตราสูง/ต่ำตามมาตรฐาน	วิธีทดสอบ ^{1/}
1	เอทิลเอสเตอร์ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl Ester, % Wt.)	99.65	ผ่าน	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15°C, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Density at 15 °C, kg/m ³)	882.2	ผ่าน	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า 860 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40 °C, cSt)	4.60	ผ่าน	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า 3.5 5.0	ASTM D 445

แผนงานวิจัย : การผลิตเอทิลเอสเตอร์เชิงอุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์มดิบ

Commercial Production of Ethyl Ester from Crude Palm Oil

สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รายการ	ข้อกำหนด	ค่า วิเคราะห์	ผ่าน/ ตก	อัตราสูง/ต่ำ ตามมาตราฐาน	วิธี ทดสอบ ^{1/}
4	จุดวาบไฟองศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	167	ผ่าน	ไม่ต่ำกว่า	ASTM D 93
5	กำมะถันร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %Wt)	0.000097	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	ASTM 2622
6	กากถ่านร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue, on 10% distillation residue, %Wt.)	0.23	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	ASTM 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	na	-	ไม่ต่ำกว่า	ASTM 613
8	เถ้าซัลเฟตร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulfated Ash, %Wt)	<0.005	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	ASTM 874
9	น้ำร้อยละโดยน้ำหนัก (Water, %Wt)	0.123	ไม่ผ่าน	ไม่สูงกว่า	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมดร้อยละโดยน้ำหนัก (Total Contaminate, %Wt)	0.0020	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	1a	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1 ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ชั่วโมง (Oxidation Stability at 110 °C, hours)	0.06	ไม่ผ่าน	ไม่ต่ำกว่า	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด มิลลิลิตร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Value, mg KOH/g)	0.56	ไม่ผ่าน	ไม่สูงกว่า	0.50 (0.80) ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน กรัมไอโอดีน/100 กรัม (Iodine Value, g Iodine/100 g)	51.31	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Linolenic Acid Methyl Ester, %Wt)	0.06	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	EN 14103
16	เอทานอล ร้อยละโดยน้ำหนัก (Ethanol, %Wt)	<0.01	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	EN 14110
17	โมโนกลีเซอไรด์ร้อยละโดยน้ำหนัก (Monoglyceride, %Wt)	0.56	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	EN 14105

รายการ	ข้อกำหนด	ค่า วิเคราะห์	ผ่าน/ ตก	อัตราสูง/ต่ำ ตามมาตรฐาน	วิธี ทดสอบ ^{1/}
18	ไตรกลีเซอไรด์ร้อยละโดยน้ำหนัก (Diglyceride,%Wt)	0.18	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	0.20 EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ร้อยละโดยน้ำหนัก (Triglyceride,%Wt)	0.00	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	0.20 EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin,%Wt)	0.00	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	0.02 EN 14105 (ASTM D 6584)
21	กลีเซอรินทั้งหมดร้อยละโดยน้ำหนัก (Total glycerin,%Wt)	0.17	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	0.25 EN 14105 (ASTM D 6584)
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group I metals (Na+K)mg/kg)	na	-	ไม่สูงกว่า	5.0 EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group II metals (Ca+Mg) mg/kg)			ไม่สูงกว่า	5.0 prEN 14538
23	ฟอสฟอรัสร้อยละโดยน้ำหนัก (Phosphorus, %Wt)	0.0008	ผ่าน	ไม่สูงกว่า	0.0010 ASTM D 4951
24*	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	-	-	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี กรมธุรกิจพลังงาน	
25*	สี (Colour)	-	-	ม่วง	ตรวจพินิจ ด้วยสายตา

หมายเหตุ - 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนด
ในรายละเอียดแนบท้ายนี้

จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเอทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้สามารถผ่านมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานได้ 18 รายการ จากที่ส่งวิเคราะห์ 21 รายการ ยกเว้นปริมาณน้ำ ค่าความเป็นกรดและเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

ปริมาณน้ำมีค่าที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 0.123% ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไบโอดีเซลจะสามารถดูดความชื้นจากอากาศให้มีปริมาณน้ำสะสมอยู่ภายในและจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.15% ดังนั้นจึงสามารถแก้ไขได้โดยใช้สารดูดความชื้นจากไบโอดีเซล ซึ่งจากการเติมสารดูดความชื้น Purolite PD206 ลงไป 3% โดยน้ำหนัก

ของไบโอดีเซลและกวนเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งทำให้ปริมาณน้ำมีค่าเท่ากับ 0.027% และผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

ค่าความเป็นกรดซึ่งจะอยู่ในช่วง 0.55-0.75 mgKOH/g ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยเติมต่างลงไปสะเทินกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในเอทิลเอสเตอร์ ในขั้นตอนหลังจากแยกกลีเซอรอลออกจากเอสเตอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดการสะเทินได้ดี เนื่องจากไม่มีกลีเซอรอลขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของด่าง สำหรับความเข้มข้นของด่างที่ใช้ในกรณีค่าความเป็นกรดอยู่ในช่วง 0.55-0.75 mgKOH/g ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.1% โดยน้ำหนักเอสเตอร์ ละลายในเอทานอล (ปริมาณเอทานอล เท่ากับ 3% โดยน้ำหนักเอสเตอร์ กวนประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงนำเอสเตอร์ที่ผ่านการกำจัดกรดไขมันอิสระเข้าสู่การแยกคีนแอลกอฮอล์ การล้างและการกำจัดน้ำ ก็จะได้เอทิลเอสเตอร์ที่มีค่าความเป็นกรดที่ต่ำกว่า 0.50 mgKOH/g ซึ่งผ่านมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานมาก แต่สามารถแก้ไขได้โดยเติมสารเคมีเพื่อเพิ่มค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งได้เติม สาร Kerobit ลงไปในไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างแล้วจำนวน 1,000 ppm จึงทำให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีค่าเท่ากับ 23.4 ชั่วโมง ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

