

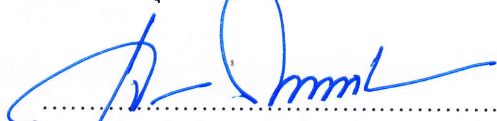
พฤติกรรมวิทยาในปฏิกิริยาเอทานอลไอซิส

อริศรา แสนคำแย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
สิงหาคม 2560
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ อริศรา แสนคำแย ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม
ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

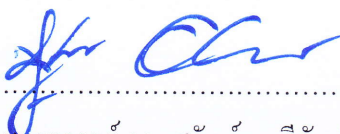
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

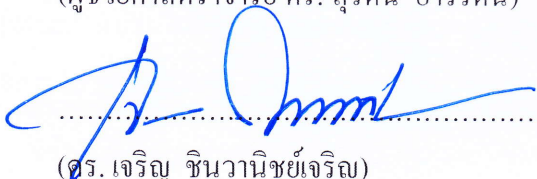
(ดร. เจริญ ชินวานิชย์เจริญ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



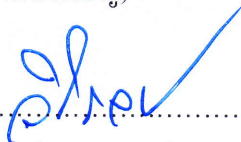
..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)



..... กรรมการ

(ดร. เจริญ ชินวานิชย์เจริญ)



..... กรรมการ

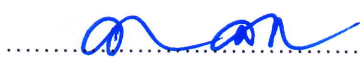
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรจน์ เรืองประเทืองสุข)



..... กรรมการ

(ดร. ทนงศักดิ์ เทพสนธิ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อมของ
มหาวิทยาลัยบูรพา



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 16 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2560

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องพฤติกรรมวัฏภาคในปฏิกิริยาเอทานอลไซสเป็นส่วนหนึ่งในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ในการทำวิทยานิพนธ์ถือเป็นหัวใจหลักในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อก่อให้เกิดความรู้ใหม่ ก่อให้เกิดความก้าวหน้าทางวิชาการและเป็นประโยชน์ต่อผู้อื่นที่ได้ศึกษา

งานวิจัยเรื่องพฤติกรรมวัฏภาคในปฏิกิริยาเอทานอลไซสเป็นการศึกษาการเข้าสู่อิมัลชันและการแยกวัฏภาคของปฏิกิริยาเอทานอลไซสเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาเมทานอลไซส ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส เพื่อหาคำตอบของปัญหาในการใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อเพิ่มปริมาณเอทานอลมากขึ้นเพื่อให้ได้เอทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) มากขึ้น แต่กลับพบว่าเมื่อเพิ่มเอทานอลมากขึ้นส่งผลให้ไม่เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างเอสเทอร์และกลีเซอรอล

ผู้ทำวิจัยได้พยายามรวบรวมข้อมูลให้มากที่สุดเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการทำวิจัยชิ้นนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านและเป็นความรู้ให้ผู้อ่านนำไปต่อยอด หากข้อมูลขาดตกบกพร่องประการใด ขออภัยมา ณ ที่นี้

อริศรา แสนคำแย

56910167: สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม; วศ.ม. (วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม)

คำสำคัญ: พฤติกรรมวัฏภาค/ ปฏิกิริยาเอทานอลไอซิส/ แผนภาพวัฏภาค

อริศรา แสนดำแย: พฤติกรรมวัฏภาคในปฏิกิริยาเอทานอลไอซิส (PHASE BEHAVIOR IN ETHANOLYSIS) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: เจริญ ชินวานิชย์เจริญ, Ph.D., 114 หน้า. พ.ศ. 2560

การศึกษาพฤติกรรมวัฏภาคในปฏิกิริยาเอทานอลไอซิสโดยการวิเคราะห์มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และศึกษาสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบของระบบแอลกอฮอล์-เอสเทอร์-กลีเซอรอล พร้อมทั้งศึกษาการละลายของแอลกอฮอล์ พบว่าปฏิกิริยาเอทานอลไอซิสมีปริมาณ มอนอกลิเซอไรด์มากกว่าปฏิกิริยาเอทานอลไอซิสจึงทำให้ปฏิกิริยาเอทานอลไอซิสกลายเป็นวัฏภาคเดียวกันเร็วกว่าปฏิกิริยาเอทานอลไอซิส หลังจากเข้าสู่มีลชันจะปรากฏการแยกวัฏภาคระหว่างเอสเทอร์กับกลีเซอรอลจากข้อมูลสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบเอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล ถ้ามีปริมาณเอทานอลเหลืออยู่ในปฏิกิริยาเอทานอลไอซิสมากกว่าร้อยละ 68 โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยาเอทานอลไอซิสไม่เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างเอสเทอร์กับกลีเซอรอล ในขณะที่ระบบเอทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอลต้องมีเอทานอลเหลืออยู่ในปฏิกิริยาเอทานอลไอซิสมากกว่าร้อยละ 84 โดยน้ำหนักจะไม่เกิดการแยกวัฏภาค ปฏิกิริยาเอทานอลไอซิสแยกวัฏภาคยากกว่าปฏิกิริยาเอทานอลไอซิสเพราะเอทานอลละลายในวัฏภาคของเอทิลเอสเทอร์มากกว่าที่เอทานอลละลายในวัฏภาคของเมทิลเอสเทอร์

56910167: MAJOR: CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING; M.Eng.
(CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING)

KEYWORDS: PHASE BEHAVIOR/ ETHANOLYSIS/ PHASE DIAGRAMS

ARISSARA SAENTUMYAE: PHASE BAHAVIOR IN ETHANOLYSIS.

ADVISORY COMMITTEE: CHAROEN CHINWANITCHAROEN, Ph.D., 114 P. 2017

Phase behavior in ethanolsis is investigated in this study. Monoglyceride and diglyceride from transesterification are determined. At the same reaction time, monoglyceride in ethanolsis is found more than in methanolsis thus phase separated triglyceride and alcohol in ethanolsis changes to single phase mixture faster than in methanolsis. The liquid-liquid equilibrium for alcohol-ester-glycerol ternary system are shown in binodal curves, if ethanol, in ethanolsis, is remained more than 68 wt% the phase separation between ethyl ester and glycerol is not appear. While methanol, in methanolsis, is remained more than 84 wt% the phase separation is invisible. Ethanol dissolves in ethyl ester more than methanol dissolves in methyl ester.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์การทดลอง.....	3
สมมติฐาน.....	3
ขอบเขตงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ไบโอดีเซล.....	5
ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	5
พารามิเตอร์ของความสามารถในการละลาย.....	9
โมเลกุลมีขั้ว.....	12
สมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ.....	13
สารลดแรงตึงผิว.....	15
อิมัลชัน.....	18
มอนอกลิเซอไรด์ ไคกลิเซอไรด์.....	20
อูณหเคมี.....	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
อุปกรณ์และสารเคมี.....	23
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	24
วิธีสังเคราะห์งานวิจัย.....	25
วิธีสังเคราะห์สาร.....	28

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและอธิบายผลการทดลอง.....	29
พฤติกรรมวิฤภาคจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	29
ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ในปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	36
การหาเส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบโดยการ ทดลองไทเทรตหาจุดขุ่น.....	56
การละลายของแอลกอฮอล์.....	64
5 สรุปผลการทดลอง.....	86
ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ในปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	86
การหาเส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบโดยการ ทดลองไทเทรตหาจุดขุ่น.....	86
การละลายของแอลกอฮอล์.....	86
ข้อเสนอแนะการนำผลวิจัยไปใช้.....	87
บรรณานุกรม.....	88
ภาคผนวก.....	
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	94
ภาคผนวก ข Calibration curve และการคำนวณ.....	104
ภาคผนวก ค ภาพผลการทดลองจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	107

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	องค์ประกอบของน้ำมันพืช.....	8
2-2	สัญลักษณ์และตัวย่อทางสถิติ.....	10
2-3	พารามิเตอร์การละลาย.....	11
2-4	พารามิเตอร์ความเป็นขั้ว.....	13
2-5	ช่วงเวลาในการเกิดองค์ประกอบของสารผลิตภัณฑ์.....	21

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2-1	เส้นโค้งการละลายของสมมูลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ.....	14
2-2	เส้นเชื่อมวัฏภาคของสมมูลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ.....	15
2-3	โมเลกุลสารลดแรงตึงผิว.....	15
2-4	โครงสร้างโมเลกุล โซเดียม โอลิเอต.....	16
2-5	โครงสร้างโมเลกุลอัลคิล ไดมethyl เบซิล แอมโมเนียมคลอไรด์.....	17
2-6	โครงสร้างโมเลกุลนอมอล อัลคิล อะมิโน โฟฟิโอะเนต.....	17
2-7	โครงสร้างโมเลกุลไดกลีเซอไรด์.....	18
2-8	เอทานโกลิซิสของน้ำมันปาล์ม โอลิเอต.....	19
2-9	เมทานโกลิซิสของน้ำมันปาล์ม โอลิเอต.....	20
3-1	ขั้นตอนการวิเคราะห์หมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์.....	24
3-2	ขั้นตอนการทดลองของสมมูลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ.....	24
4-1	พฤติกรรมวัฏภาคของปฏิกิริยา.....	30
4-2	พฤติกรรมวัฏภาคของปฏิกิริยา.....	31
4-3	พฤติกรรมวัฏภาคของปฏิกิริยา.....	32
4-4	พฤติกรรมวัฏภาคของปฏิกิริยา.....	33
4-5	พฤติกรรมวัฏภาคของปฏิกิริยาเอทานโกลิซิส.....	34
4-6	พฤติกรรมวัฏภาคของปฏิกิริยาเมทานโกลิซิส.....	35
4-7	สัดส่วนโดยโมลของหมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์.....	37
4-8	ร้อยละโดยน้ำหนัก.....	37
4-9	สัดส่วนโดยโมลของหมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์.....	38
4-10	ร้อยละโดยน้ำหนัก.....	38
4-11	สัดส่วนโดยโมลของหมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์.....	39
4-12	ร้อยละโดยน้ำหนัก.....	39
4-13	สัดส่วนโดยโมลของหมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์.....	40
4-14	ร้อยละโดยน้ำหนัก.....	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-15 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ๒ ไคกลีเซอไรด์ ๓ ไตรกลีเซอไรด์.....	41
4-16 ร้อยละโดยน้ำหนัก.....	42
4-17 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ๒ ไคกลีเซอไรด์ ๓ ไตรกลีเซอไรด์.....	42
4-18 ร้อยละโดยน้ำหนัก.....	43
4-19 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ๒ ไคกลีเซอไรด์ ๓ ไตรกลีเซอไรด์.....	43
4-20 ร้อยละโดยน้ำหนัก.....	44
4-21 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ๒ ไคกลีเซอไรด์ ๓ ไตรกลีเซอไรด์.....	44
4-22 ร้อยละโดยน้ำหนัก.....	45
4-23 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์.....	46
4-24 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์.....	46
4-25 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์.....	47
4-26 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์.....	47
4-27 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไคกลีเซอไรด์.....	48
4-28 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไคกลีเซอไรด์.....	48
4-29 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไคกลีเซอไรด์.....	49
4-30 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไคกลีเซอไรด์.....	49
4-31 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไตรกลีเซอไรด์.....	50
4-32 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไตรกลีเซอไรด์.....	51
4-33 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไตรกลีเซอไรด์.....	51
4-34 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไตรกลีเซอไรด์.....	52
4-35 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์.....	52
4-36 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไคกลีเซอไรด์.....	53
4-37 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไตรกลีเซอไรด์.....	53
4-38 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์.....	54
4-39 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไคกลีเซอไรด์.....	54
4-40 สัดส่วนโดยโมลของ๒ไตรกลีเซอไรด์.....	55

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4-41	เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ.....	56
4-42	เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ.....	57
4-43	การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่เหลือ.....	59
4-44	การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลที่เหลือ.....	60
4-45	เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ.....	61
4-46	เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ.....	62
4-47	เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ.....	63
4-48	เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ.....	64
4-49	ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอล.....	65
4-50	ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอล.....	66
4-51	ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอล.....	67
4-52	ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอล.....	68
4-53	ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอล.....	69
4-54	ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอล.....	70
4-55	ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอล.....	71
4-56	ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอล.....	72
4-57	ร้อยละโดยน้ำหนักของแอลกอฮอล์.....	73
4-58	ร้อยละโดยน้ำหนักของแอลกอฮอล์.....	73
4-59	ร้อยละโดยน้ำหนักของแอลกอฮอล์.....	74
4-60	ร้อยละโดยน้ำหนักของแอลกอฮอล์.....	74
4-61	ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลและเมทานอล.....	75
4-62	ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลและเมทานอล.....	75
4-63	ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลและเมทานอล.....	76
4-64	ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลและเมทานอล.....	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-65	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอล.....	77
4-66	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอล.....	78
4-67	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอล.....	78
4-68	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเมทานอล.....	79
4-69	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเมทานอล.....	80
4-70	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเมทานอล.....	80
4-71	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอล.....	81
4-72	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอล.....	82
4-73	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอล.....	82
4-74	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอล.....	83
4-75	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอล.....	84
4-76	ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอล.....	84

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

น้ำมันดีเซลส่วนใหญ่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งเกิดจากการทับถมกันของซากพืชซากสัตว์เป็นเวลานาน โดยเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป นอกจากนี้ น้ำมันดีเซลที่ผลิตจากซากฟอสซิลยังส่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นสาเหตุให้มีการคิดค้นพลังงานทดแทนที่ใช้แล้วไม่หมดไป และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย หรือไม่ส่งผลกระทบต่อเลย พลังงานชีวมวลตอบโจทยดังกล่าว ชีวมวลเหล่านี้มาจากแหล่งต่าง ๆ เช่น พืชผลทางการเกษตร เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เป็นต้น โดยวัสดุเหล่านี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยนั้นเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการผลิต และการส่งออกพืชหลายชนิด เช่น ปาล์ม ข้าว มัน-สำปะหลัง อ้อย เป็นต้น พืชเหล่านี้นอกจากจะปลูกไว้เพื่อการบริโภคแล้วยังสามารถนำมาประยุกต์เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานชีวมวล อาทิ การนำอ้อยมาผลิตเป็นเอทานอล เป็นต้น และพลังงานทดแทนที่สำคัญชนิดหนึ่ง คือ ไบโอดีเซล

ผลิตไบโอดีเซลสามารถผลิตจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification) ระหว่างไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ ผลิตภัณฑ์คือเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) และกลีเซอรอล

ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาอินทรีย์พื้นฐานที่สำคัญ โดยเป็นการเปลี่ยน (Transform) เอสเทอร์ชนิดหนึ่งไปเป็นเอสเทอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้เอสเทอร์ตั้งต้นทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ดังนั้นกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจึงถูกเรียกว่า แอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) (Feedman, Pryde & Mounts, 1984; Schuchard, Sercheli & Vargas, 1997)

ตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในปัจจุบันมี 3 ชนิด คือ กรด เบส และเอนไซม์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และคาร์บอเนต กลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอกไซด์นิยมนำมาใช้เป็นอย่างมากเนื่องจากมีราคาถูก แต่ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่เป็นกลุ่มไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้เกิดโมเลกุลของน้ำ ทำให้มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นควบคู่ไปกับปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันอีก 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับปฏิกิริยาสะบู่ เมื่อมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอสเทอร์ลดลง

ในช่วงแรกไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์จะแยกวัฏภาคกันเป็น 2 วัฏภาค เมื่อได้รับการกวนอย่างปั่นป่วนจึงทำให้กลายเป็น 1 วัฏภาคเรียกสารผสมที่เห็นเป็น 1 วัฏภาคว่า อิมัลชัน สาเหตุการเกิดอิมัลชันมาจากสาร 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้ากัน ซึ่งจะสามารถละลายเข้ากันเมื่อมีสารลดแรงตึงผิว (emulsifier) ในสารผสมข้างต้น โดยภายในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมี สารลดแรงตึงผิว ได้แก่ มอนอกลิเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดจากการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นไดกลีเซอไรด์ มอนอกลิเซอไรด์ และกลีเซอรอล โดยปกติแล้วน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ซึ่งเป็นโมเลกุลไม่มีขั้วจะไม่ละลายเข้ากับโมเลกุลมีขั้ว เช่น แอลกอฮอล์ ตามหลัก like dissolve like สารที่มีขั้วจะละลายในสารที่มีขั้ว สารที่ไม่มีขั้วจะละลายในสารที่ไม่มีขั้ว แต่การเกิดมอนอกลิเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว ทำให้ไตรกลีเซอไรด์ที่ได้จากน้ำมันพืช และไขมันสัตว์เกิดอิมัลชันกับแอลกอฮอล์ (Soares, Lachter, Rodrigues Jr, Batista & Nascimento, 2011; Nakpong & wootthikanokkhon, 2010; Rodrigues, Mazzone, Santos, Cruz & Fernandes, 2009)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีการเลือกใช้แอลกอฮอล์ที่เป็นเอทานอลแทนเมทานอล เนื่องจาก เอทานอลผลิตจากวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตร จึงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของเอทานอลมีมากกว่า การใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทำให้เกิดเป็นอิมัลชันเร็วกว่าใช้เมทานอล แต่การแยกวัฏภาคระหว่างเอสเทอร์ และกลีเซอรอลเมื่อใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยาใช้เวลาแยกนานกว่าใช้เมทานอล นอกจากนี้ยังอาจจะกลายเป็นวัฏภาคเดียวโดยไม่แยกวัฏภาค (Zhou & Boocock, 2006)

งานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดอิมัลชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ เพื่อตอบปัญหาเกี่ยวกับการเข้าสู่อิมัลชันจากการใช้เอทานอลและเมทานอลเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยการศึกษาหาค่า มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ที่เวลาและอุณหภูมิที่กำหนด

นอกจากนี้การใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นจะส่งผลให้การแยกวัฏภาคระหว่างเอสเทอร์ และกลีเซอรอลในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแยกวัฏภาคช้ากว่าใช้เมทานอลเป็นสารตั้งต้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบของระบบเอทิลเอสเทอร์-เอทานอล-กลีเซอรอลและเมทิลเอสเทอร์-เมทานอล-กลีเซอรอลและศึกษาการละลายของแอลกอฮอล์ในวัฏภาคของเอสเทอร์กับกลีเซอรอล เพื่อศึกษาการแยกวัฏภาคของเอสเทอร์และกลีเซอรอลที่มีแอลกอฮอล์เหลืออยู่ด้วย

วัตถุประสงค์การทดลอง

1. เพื่อศึกษาการเกิดอิมัลชันของเอทานอล-โกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส
2. เพื่อศึกษาการเกิดอิมัลชันของเมทานอล-โกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส
3. เพื่อศึกษาสมมูลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบของระบบเอทิลเอสเทอร์-เอทานอล-โกลีเซอไรด์ ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส
4. เพื่อศึกษาสมมูลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบของระบบเมทิลเอสเทอร์-เมทานอล-โกลีเซอไรด์ ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

สมมติฐาน

1. ณ เวลาที่เท่ากัน ถ้าเอทานอล-โกลีเซอไรด์ มีอนุภาคเล็กกว่า โกลีเซอไรด์-โกลีเซอไรด์ จะเกิดอิมัลชันเร็วกว่า เมทานอล-โกลีเซอไรด์ การเกิดอิมัลชันของสารระหว่างน้ำมันปาล์มโอเลอีนกับเอทานอลเร็วกว่าน้ำมันปาล์มโอเลอีนกับเมทานอล
2. ถ้าเอทานอลละลายในเอทิลเอสเทอร์ได้ดีกว่าเมทานอลละลายในเมทิลเอสเทอร์แล้ว เอทิลเอสเทอร์จะแยกวัฏภาคจากโกลีเซอไรด์ได้ยากกว่าเมทิลเอสเทอร์แยกวัฏภาคจากโกลีเซอไรด์

ขอบเขตงานวิจัย

1. ปฏิบัติการตามสเปคโตรโฟโตเมตริก ใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มโอเลอีนต่อแอลกอฮอล์ต่อโกลีเซอไรด์คือ 1 ต่อ 6 ต่อ 0.2
2. ทำปฏิบัติการเป็นเวลา 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 วินาที
3. อุณหภูมิที่ทำการศึกษา 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

ประโยชน์ที่ได้รับจากการงานวิจัย

1. เป็นข้อมูลในการเลือกสารตั้งต้นที่จะใช้ผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้อย่างเหมาะสมตามต้องการ
2. ขั้นตอนในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
3. ข้อมูลอุณหพลศาสตร์ของของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบเอทิลเอสเทอร์-เอทานอล-กลีเซอรอลและเมทิลเอสเทอร์-เมทานอล-กลีเซอรอล
4. ได้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดอิมัลชันของสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพิ่มมากขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นน้ำมันดีเซลทางเลือกที่ผลิตจากแหล่งพลังงานทดแทนทางชีวภาพ เช่น น้ำมันพืช และ ไขมันสัตว์ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ ไม่เป็นพิษและมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ ดังนั้นมันจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในการนำน้ำมันพืชมาใช้นั้นมีทั้งใช้น้ำมันพืชเติมใส่เครื่องยนต์โดยตรง และผสมกับน้ำมันดีเซล แต่ผลลัพธ์ที่ได้ไม่เป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากน้ำมันพืชมีความหนืดสูงมีผลต่อการพ่นของหัวฉีดและการก่อตัวเป็นคราบยางเหนียว อีกทั้งน้ำมันพืชยังมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนเครื่องยนต์ ตลอดจนการเกิดการออกซิเดชันพอลิเมอร์ไรเซชันรวมถึง การเก็บรักษา การเผาไหม้ เกิดตะกอนคาร์บอน และความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น ยังคงเป็นปัญหา (Ma & Hanna, 1999)

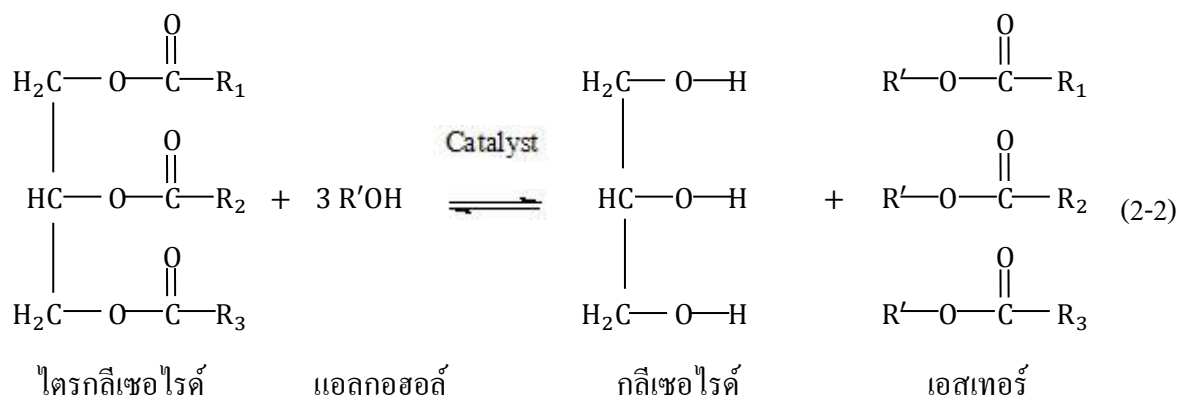
วิธีการแก้ปัญหาคือการลดความหนืดของน้ำมันพืช กระบวนการที่หนึ่ง คือ การทำให้น้ำมันพืชเกิดไมโครอิมัลชันกับตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล บิวทานอล กระบวนการที่สอง คือ การแตกสลายน้ำมันพืชด้วยความร้อน โดยการเปลี่ยนสารประกอบของสารชนิดหนึ่งไปเป็นสารชนิดอื่นอีกหลายชนิดโดยใช้ความร้อน หรือ ให้ความร้อนร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การให้ความร้อนที่จำกัดปริมาณอากาศ หรือปริมาณออกซิเจน (Ma & Hanna, 1999) และการสลายพันธะเคมี ซึ่งมีผลต่อร้อยละผลได้ของโมเลกุลขนาดเล็ก (Weisz, Haag & Rodewald, 1979) การแตกสลายน้ำมันพืช ด้วยความร้อนมีการบวมที่ซับซ้อน เพราะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ที่อาจจะเกิดจากปฏิกิริยามีหลายผลิตภัณฑ์ด้วย กระบวนการที่สาม คือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืช หรือ ไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์เกิดผลิตภัณฑ์ คือ เอสเทอร์ และกลีเซอรอล (Ma & Hanna, 1999)

ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

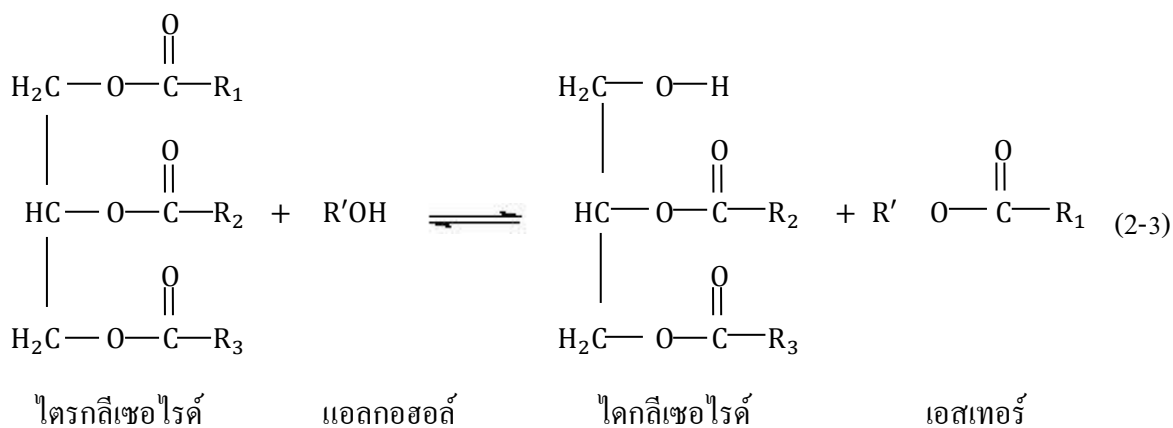
ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่เป็นการผสมกันอย่างง่ายของสารสองชนิด เพื่อให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้นจึงใช้กรดแก่ หรือ เบสแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Otera, 1993) ดังสมการที่ 2-1

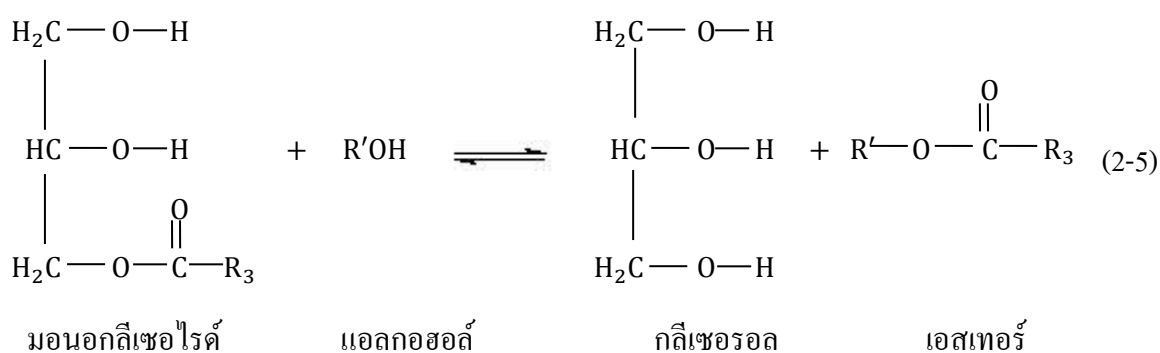
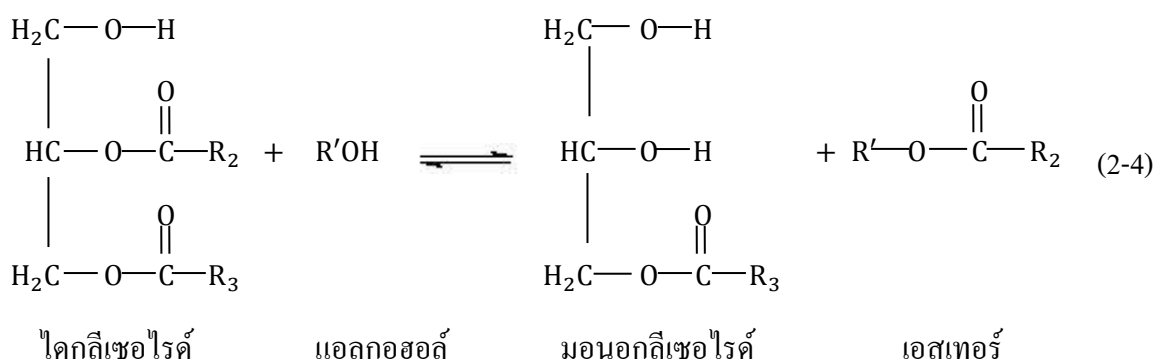


ทรานส์เอสเทอร์ของน้ำมันพืชมีไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก ทำปฏิกิริยากับ แอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 ของน้ำหนักน้ำมันพืช (Schuchandt et. al., 1997) เพื่อผลิต เอสเทอร์ และกลีเซอรอล ดังสมการที่ 2-2

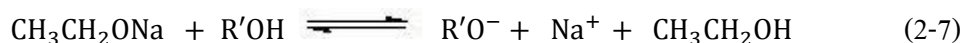
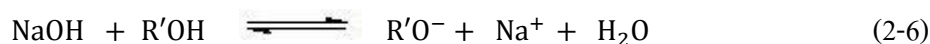


กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดจากไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับ แอลกอฮอล์ ประกอบไปด้วยปฏิกิริยาสามปฏิกิริยาต่อเนื่องกัน เริ่มต้นจากการไตรกลีเซอไรด์ เปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์ จากไดกลีเซอไรด์เป็นมอนอกลิเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์เป็น กลีเซอรอล (Issariyakul & Dalai, 2014) ดังสมการที่ 2-3 สมการที่ 2-4 สมการที่ 2-5 ในแต่ละ ขั้นตอนใช้แอลกอฮอล์ หนึ่งโมล ผลิตเอสเทอร์ หนึ่งโมล รวมทั้งหมดใช้แอลกอฮอล์สามโมลทำ ปฏิกิริยากับ ไตรกลีเซอไรด์หนึ่ง โมลผลิตเอสเทอร์ สาม โมล กับกลีเซอรอล หนึ่งโมล

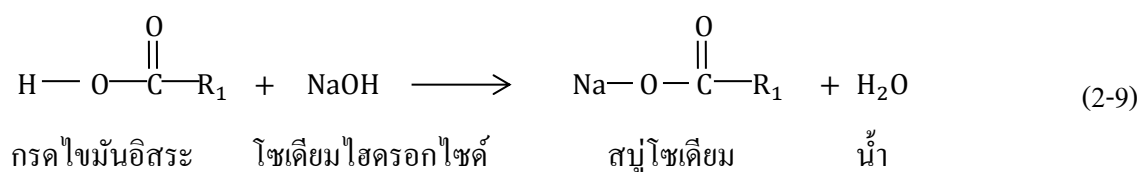
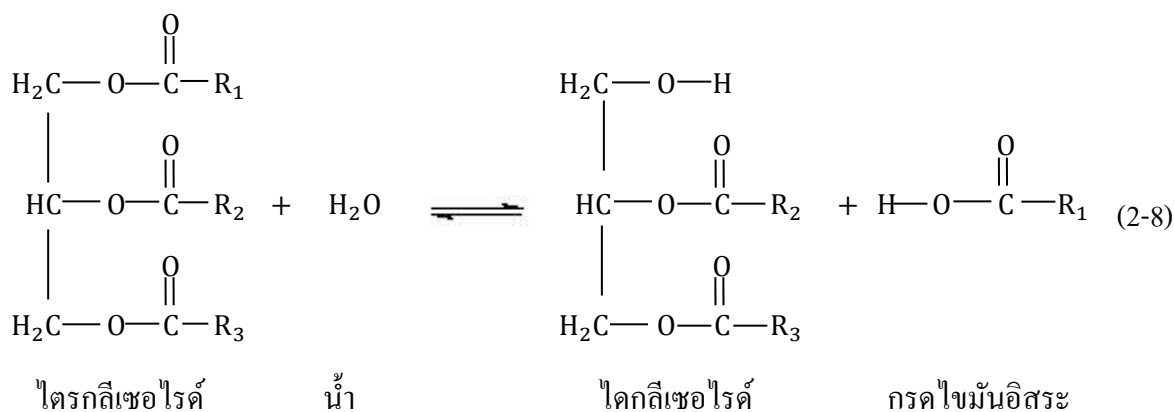




ก่อนจะนำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสไปใช้ในทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ต้องเตรียมตัวเร่งโดยละลายตัวเร่งปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เพื่อให้ได้ อัลคอกไซด์ไอออน (RO^-) ซึ่งเป็นตัวเร่งที่แท้จริงที่จะเข้าไปช่วยเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ยกตัวอย่าง การเตรียมตัวเร่งกลุ่มไฮดรอกไซด์ (Ma & Hanna, 1999) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการที่ 2-6 และการเตรียมตัวเร่งกลุ่มอัลคอกไซด์ เช่น โซเดียมเอทอกไซด์ ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{ONa}$) ดังสมการที่ 2-7



ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มไฮดรอกไซด์จะเป็นที่นิยมเนื่องจากมีราคาถูกกว่าตัวเร่งกลุ่มอัลคอกไซด์ แต่เนื่องจากตัวเร่งกลุ่มไฮดรอกไซด์เกิดโมเลกุลของน้ำขึ้นในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดไลซิส (Hydrolysis) และปฏิกิริยาสบู่ (Saponification) แสดงดังสมการที่ 2-8 และสมการที่ 2-9 ตามลำดับ (Niza, Tan, Leec & Ahmad, 2013; Atadashi, Aroua, Abdul Aziz & Sulaiman, 2012)



การเรียกชื่อสบู่ เนื่องจากไตรกลีเซอไรด์ที่นำมาจากน้ำมันปาล์ม โอเลอิน ซึ่งมีกรดโอเลอิกอยู่มากที่สุด จึงเรียกสบู่โซเดียมว่า โซเดียมโอเลอิกด์ ข้อมูลองค์ประกอบของน้ำมันแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบของน้ำมันพืช (Mittelbach & Remsechmidt, 2004)

น้ำมัน	กรดไขมันอิ่มตัว				กรดไขมันไม่อิ่มตัว อิ่มตัว เชิงเดี่ยว	กรดไขมันไม่อิ่มตัว เชิงซ้อน	
	C 12:0	C 14:0	C 16:0	C 18:0		C 18:2	C 18:3
น้ำมันดอกทานตะวัน	-	-	6	3-5	17-22	67-74	-
น้ำมันเรพลีด			3-5	1-2	55-65	20-26	8-10
น้ำมันปาล์มโอเลอิน	0.5	1	31.5	3	49	14	0.3

ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

น้ำมัน	กรดไขมันอิ่มตัว				กรดไขมันไม่อิ่มตัว	กรดไขมันไม่อิ่มตัว	
					อิ่มตัว	เชิงซ้อน	
	C 12:0	C 14:0	C 16:0	C 18:0	C 18:1	C 18:2	C 18:3
น้ำมันถั่ว			6	3-5	23-25	52-56	6-8
เหลือง							

หมายเหตุ ความหมาย C 12:0 กรดลอริก (Lauric Acid), C 14:0 กรดไมริสติก (Myristic Acid), C 16:0 (กรดปาล์มติก) (Palmitic Acid), C18:0 กรดสเตียริก (Stearic Acid), C18:1 กรดโอเลอิก (Oleic Acid), C18:2 กรดไลโนเลอิก (Linoleic), C18:3 กรดแอลฟาไลโนเลอิก (Alpha Linolenic Acid)

พารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter)

Hildebrand และ Scott เริ่มใช้พารามิเตอร์การละลาย (δ) เป็นครั้งแรก (สัญลักษณ์และตัวย่อทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 2-2) และบุคคลอื่น ๆ ได้นำมาพัฒนาต่อ พารามิเตอร์การละลายของ Hildebrand (Hildebrand solubility parameter) คือ ค่ารากที่สองของพลังงานที่ใช้ในการแยกโมเลกุลของสารให้กลายเป็นไอ (Cohesive energy density) (Hansen, 1999) ดังสมการที่ 2-10 ค่าพารามิเตอร์การละลายมีหน่วยเป็น $\text{MPa}^{0.5}$ หรือ $(\text{Cal/cm}^3)^{0.5}$

$$\delta = C^{0.5} = \left[\frac{E}{V} \right]^{0.5} \quad (2-10)$$

ทางอุณหพลศาสตร์มีพลังงานเสรีของกิบสำหรับของผสมดังสมการที่ 2-11 เมื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้ว พลังงานเสรีของกิบต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ มีค่าน้อยกว่าศูนย์เพื่อให้ของผสมสามารถละลายเข้ากันเองตามธรรมชาติ (Hansen, 1999; Bartan, 1991)

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (2-11)$$

ตามทฤษฎีของ Flory-Huggins เอนโทรปีของการผสมของพอลิเมอร์ในสารละลายซึ่งมีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถเขียนสมการเอนโทรปีได้ดังสมการที่ 2-12

นอกจากนี้ยังได้มีการแสดง

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R(x_1 \ln \phi_1 + x_2 \ln \phi_2) \quad (2-12)$$

พลังงานเสรีของการผสมดังนี้

$$\Delta G_{\text{mix}} = -RT(\chi\varphi_1\varphi_2 + x_1\ln\varphi_1 + x_2\ln\varphi_2) \quad (2-13)$$

χ คือ เทอมของเอนทัลปีก ซึ่งเป็นการปรับรูปแบบใหม่ภายหลัง และเป็นการพิจารณา เทอมพลังงานเสรีจาก ΔG_{mix} จะแสดงโดย $\Delta G_{\text{noncomb}}$ และ $\Delta S_{\text{noncomb}}$ ซึ่ง $\Delta G_{\text{noncomb}}$ คือ พลังงานเสรีไม่ได้รวมเอนโทรปีของสารละลาย ΔS_{comb} เท่ากับค่าเอนโทรปีการผสมของ Flory-Huggins ดังนั้น

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta G_{\text{noncomb}} - T\Delta S_{\text{comb}} \quad (2-14)$$

เพื่อความถูกต้อง χ ได้แบ่งสมการส่วนของเอนทัลปีก (Enthalpic part) และเอนโทรปีก (Entropic part)

$$\chi = \chi_H + \chi_S$$

ส่วนของเอนทัลปีก โดย Chi-parameter ถูกนำไปใช้ในพารามิเตอร์การละลายของ Hildebrand คือ

$$\chi_H = \frac{V_{\text{mix}}}{RT} (\delta_1 - \delta_2)^2$$

ส่วนของเอนโทรปีก (χ_S) มีค่าเท่ากับ 0.34 พารามิเตอร์การละลายของ Hildebrand มีค่า พลังงานเสรีของก๊ิบของของผสม ดังสมการที่ 2-15 (โดย $V_{\text{mix}} = x_1V_1 + x_2V_2$)

$$\Delta G_{\text{noncomb}} = \varphi_1\varphi_2V_{\text{mix}}(\delta_1 - \delta_2)^2 + RT(\varphi_1\varphi_2\chi_S + x_1\ln\varphi_1 + x_2\ln\varphi_2) \quad (2-15)$$

เอนโทรปี comb ของการผสม ($\Delta S_{\text{comb}} = -R(x_1\ln\varphi_1 + x_2\ln\varphi_2)$) มีค่าน้อย ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์การละลายของ Hildebrand สำหรับตัวทำละลาย และตัวถูกละลายมีค่าใกล้เคียงกัน $\Delta G_{\text{noncomb}}$ จะมีค่าน้อย และ ΔS_{comb} จะทำให้ ΔG_{mix} มีค่าน้อยกว่าศูนย์ (Larsen, 2009) ทำให้ สารสองชนิดละลายเข้ากันได้เอง

ตารางที่ 2-2 สัญลักษณ์และตัวย่อทางสถิติ

สัญลักษณ์และตัวย่อทางสถิติ	คำจำกัดความ
C	Cohesive energy density
E	Energy of vaporization
ΔG_{mix}	พลังงานเสรีของการผสม
ΔH_{mix}	การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม

ตารางที่ 2-2 (ต่อ)

สัญลักษณ์และตัวย่อทางสถิติ	คำจำกัดความ
R	ค่าคงที่ของแก๊ส
R'	หมู่แอลคิลของแอลกอฮอล์
R''	หมู่แอลคิล (Alkyl group)
R ₁ , R ₂ , R ₃	สายโซ่คาร์บอนของน้ำมัน
ΔS_{mix}	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม
T	อุณหภูมิเคลวิน (K)
V	ปริมาตรของสารต่อหนึ่งโมล
x ₁ , x ₂	สัดส่วนโมลของสารชนิดที่หนึ่ง และสอง
δ	พารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter)
δ_1, δ_2	พารามิเตอร์การละลายของสารชนิดที่หนึ่งและชนิดที่สอง
φ_1, φ_2	สัดส่วนโดยปริมาตรของสารชนิดที่หนึ่งและชนิดที่สอง

ค่าพารามิเตอร์การละลายของเอทานอล เมทานอล เมทิลเอสเทอร์ เอทิลเอสเทอร์ แสดง
ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 พารามิเตอร์การละลาย

สาร	พารามิเตอร์การละลาย [cal/cm ³] ^{0.5}	อ้างอิง
น้ำ	23.4	[1]
กลีเซอรอล	17.6	[1]
เมทานอล	14.5	[1]
เอทานอล	12.9	[1]
น้ำมันปาล์ม	8.4	[2]

ตารางที่ 2-3 (ต่อ)

สาร	พารามิเตอร์การละลาย [cal/cm^3] ^{0.5}	อ้างอิง
เมทิลเอสเทอร์	8.4	[3]
น้ำมันถั่วเหลือง	7.9	[4]
เอทิลเอสเทอร์	7.6	[3]

หมายเหตุ อ้างอิง [1] (Wright, 1996) [2] (King, 1995) [3] (Yaws, 2009) [4] (Batista, 2013)

โมเลกุลมีขั้ว

การผสมกันของสาร คือ การที่อนุภาคของตัวทำละลายเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของตัวถูกละลาย จึงขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลาย และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลาย

ความมีขั้วของโมเลกุลเกิดจากโมเลกุลของสารประกอบไปด้วยพันธะมีขั้ว พันธะมีขั้วนั้นเกิดขึ้นระหว่างอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่างกัน อะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงกว่าจะดึงดูดอะตอมคู่ร่วมพันธะได้ดีกว่า ทำให้อะตอมของพันธะเข้าใกล้อะตอมของธาตุนี้มากกว่า สภาพความเป็นขั้วของพันธะจะมาก หรือ น้อยขึ้นกับค่าผลต่างของอิเล็กโตรเนกาติวิตี ถ้าผลต่างมากจะทำให้สภาพความเป็นขั้วของโมเลกุลนั้นสูงขึ้น จากหลัก Like dissolve like โมเลกุลของสารที่มีขั้วจะละลายในโมเลกุลที่มีขั้วด้วยกัน เพราะ โมเลกุลมีขั้วจะมีแรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole) ดึงดูดระหว่างโมเลกุลเหมือนกัน ส่วนโมเลกุลไม่มีขั้วจะมีแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้วละลายในโมเลกุลไม่มีขั้ว

ตารางที่ 2-4 แสดงค่าความเป็นขั้วของ กลีเซอรอล เมทานอล เอทานอล ตามลำดับ

ตารางที่ 2-4 พารามิเตอร์ความเป็นขั้ว (Wypych, 2012)

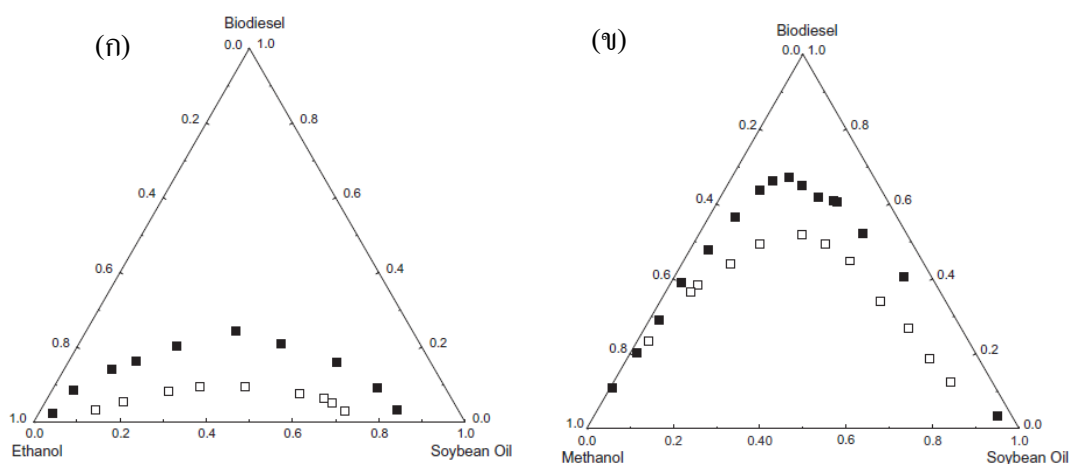
สาร	ความเป็นขั้ว (kcal/mol)
น้ำ	63.1
กลีเซอรอล	57.0
เมทานอล	55.4
เอทานอล	51.9

สมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ

วัฏภาค หรือ เฟส (Phase) หมายถึง ส่วนที่มีคุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพเหมือนกัน ซึ่งสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกัน คือ มีวัฏภาคเดียว ฉะนั้นการมีสารอยู่คนละวัฏภาค จะเห็นว่ามีกั้นแยกกันทางกายภาพอย่างชัดเจน หากจะศึกษาวัฏภาคของเหลว จะต้องใช้สมดุลของเหลวระบบสององค์ประกอบ หรือ สมดุลของเหลวระบบสามองค์ประกอบในการพิจารณา

สมดุลวัฏภาคของเหลวสามองค์ประกอบ คือ สมดุลของของเหลวสามชนิดประกอบไปด้วย ของเหลวสองชนิดซึ่งผสมกันได้เพียงเล็กน้อย และของเหลวชนิดที่สามสามารถผสมของเหลวทั้งสองชนิดแรกโดยสมบูรณ์ (Clarke, 1974) สมดุลของของเหลวสามองค์ประกอบนั้นจะแสดงปริมาณสัดส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักของของเหลวทั้งสามชนิดบนแผนภาพวัฏภาค (Phase diagram) ส่วนประกอบของแผนภาพวัฏภาคแสดงเส้น โค้งการละลาย (Binodal curve) โดยพื้นที่ด้านบนเส้น โค้งการละลายจะแสดงส่วนที่เป็นเนื้อเดียวกัน และพื้นที่ด้านล่างเส้น โค้งการละลายแสดงถึงส่วนที่แยกกันเป็นสองวัฏภาค โดยเส้น โค้งการละลายบนแผนภาพวัฏภาคนั้นจะนำค่ามาจากการทดลองสองครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งจะได้เส้นกราฟมาเพียงครั้งเส้น ยกตัวอย่าง สมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบของระบบเมทานอล-ไบโอดีเซล-น้ำมันถั่วเหลือง การสร้างเส้น โค้งการละลายของระบบนี้จะทำจากการทดลองโดยเตรียมไบโอดีเซลผสมกับเมทานอล ไทเทรตด้วยน้ำมันถั่วเหลือง จะหยุดไทเทรตเมื่อถึงจุดขุ่น (Turbidity) บันทึกปริมาณของน้ำมันถั่วเหลือง สิ่งนี้เป็นข้อมูลการทดลองเพียงหนึ่งจุดบนเส้น โค้งการละลาย เมื่อทำการทดลองครบตามจำนวนจุดที่กำหนดแล้ว

เริ่มการทำทดลองหาค่าเส้นโค้งการละลายอีกครั้งหนึ่งโดยเตรียมน้ำมันไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันถั่วเหลือง ไทเทรตกับเมทานอล นำข้อมูลการทดลองทั้งหมดมาสร้างเส้นโค้งการละลายบนแผนภาพวัฏภาค



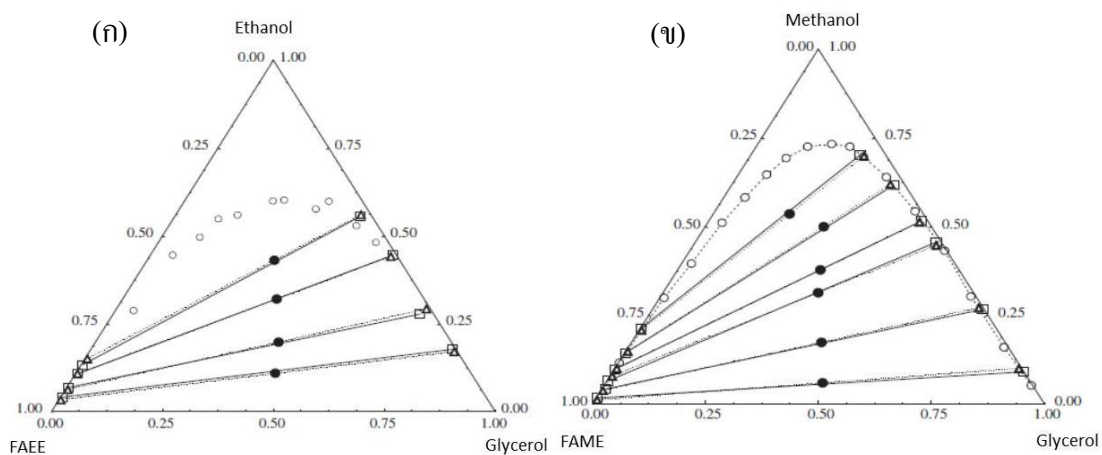
ภาพที่ 2-1 เส้นโค้งการละลายของสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบ

(ก) เอทานอล-น้ำมันไบโอดีเซล-น้ำมันถั่วเหลือง (ข) เมทานอล-น้ำมันไบโอดีเซล-น้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ (■) 25 องศาเซลเซียสและ (□) 50 องศาเซลเซียส (Segalen da Silva et. al., 2013)

ดังภาพที่ 2-1 สามารถสรุปว่าเส้นโค้งการละลายของภาพ (ก) ต่ำกว่า ภาพ (ข) แสดงว่าการละลายระหว่างเอทานอล และน้ำมันถั่วเหลืองจะละลายได้ดีกว่าเมทานอลกับน้ำมันถั่วเหลือง เพราะเส้นโค้งการละลายยิ่งต่ำ พื้นที่ใต้เส้นโค้งน้อยส่งผลให้พื้นที่ด้านบนเส้นโค้งมีมากขึ้น หมายถึงการกลายเป็นวัฏภาคเดียวกันก็จะมากขึ้น

เส้นเชื่อมวัฏภาค (Tie line) คือ เส้นเชื่อมระหว่างวัฏภาคของสาร ยกตัวอย่างระบบไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง เมทานอล และกลีเซอรอลผสมกัน จะแยกเป็นสองวัฏภาคระหว่างไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง และวัฏภาคของกลีเซอรอล การวิเคราะห์สัดส่วนของแต่ละวัฏภาคจะใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) นำข้อมูลมาลากเส้นเชื่อมวัฏภาคบนแผนภาพวัฏภาคเพื่อวิเคราะห์ความสามารถละลายของเมทานอลสามารถละลายในวัฏภาคใด โดยพิจารณาจากการกระจายของเส้นเชื่อมวัฏภาค ดังภาพที่ 2-2 สามารถสรุปว่าภาพ (ข) เส้นเชื่อมวัฏภาคมีการกระจายมากที่ฝั่งกลีเซอรอล เมทานอลสามารถละลายในกลีเซอรอลได้ดีกว่าในไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง และภาพ (ก) เอทานอลสามารถละลายได้ดีใน

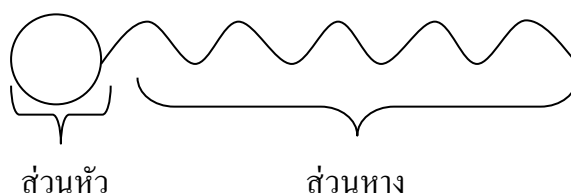
กลีเซอรอลแต่ในขณะเดียวกันสามารถละลายในน้ำมัน ไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันถั่วเหลืองได้มากกว่าเมทานอล



ภาพที่ 2-2 เส้นเชื่อมวิภาคของสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบ (ก) น้ำมันไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง-เอทานอล-กลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) น้ำมันไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง-เมทานอล-กลีเซอรอล (Δ) เส้นเชื่อมวิภาคจากการทดลอง (\square) เส้นเชื่อมวิภาคจากการคำนวณ โมเดล UNIQUAC (Mazutti et. al., 2013)

สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (Surface active materials (Myers, 1999) Surface active agent หรือ Surfactant) เป็น โมเลกุลที่ประกอบไปด้วยส่วนที่มีขั้วซึ่งเป็นส่วนหัว และส่วนที่ไม่มีขั้วเป็นส่วนหาง (Tadros, 2013; Farn, 2006; Schramm, Stasiuk & Marangoni, 2003) ส่วนหางของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะมีอะตอมคาร์บอนประมาณ 8-18 อะตอม ดังภาพที่ 2-3 ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวมีทั้งส่วนที่เป็น นอนไอออนิก (Non-ionic) แอนไอออนิก (Anionic)

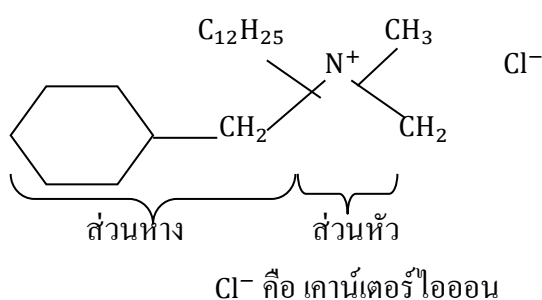


ภาพที่ 2-3 โมเลกุลสารลดแรงตึงผิว

2. สารลดแรงตึงผิวชนิดแคทไอออนิก

สารลดแรงตึงผิวชนิดแคทไอออนิกเมื่อละลายน้ำแตกตัวโดยส่วนหัวให้ประจุบวก สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้นำไปใช้ในสารทำความสะอาดเช่น ทำให้ผ้านุ่ม (Tadros, 2005)

ยกตัวอย่าง อัลคิล ไดเมทิล เบนซิล แอมโมเนียมคลอไรด์ (Alkyl dimethyl benzyl ammonium chloride)

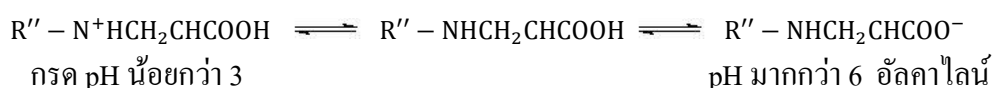


ภาพที่ 2-5 โครงสร้างโมเลกุลอัลคิล ไดเมทิล เบนซิล แอมโมเนียมคลอไรด์

3. สารลดแรงตึงผิวชนิดแอมโฟเทอริก

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีแอนไอออนิกและแคทไอออนิกอยู่ในโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ประจุจะขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย ถ้าสารละลายเป็นกรดโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะแสดงเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดแคทไอออนิก แต่ถ้าสารละลายเป็นด่างโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวจะเป็นชนิดแอนไอออนิก (Tadros, 2005)

ยกตัวอย่าง นอมอล อัลคิล อะมิโน โฟฟิโอะเนต (n-Alkyl amino propionate)



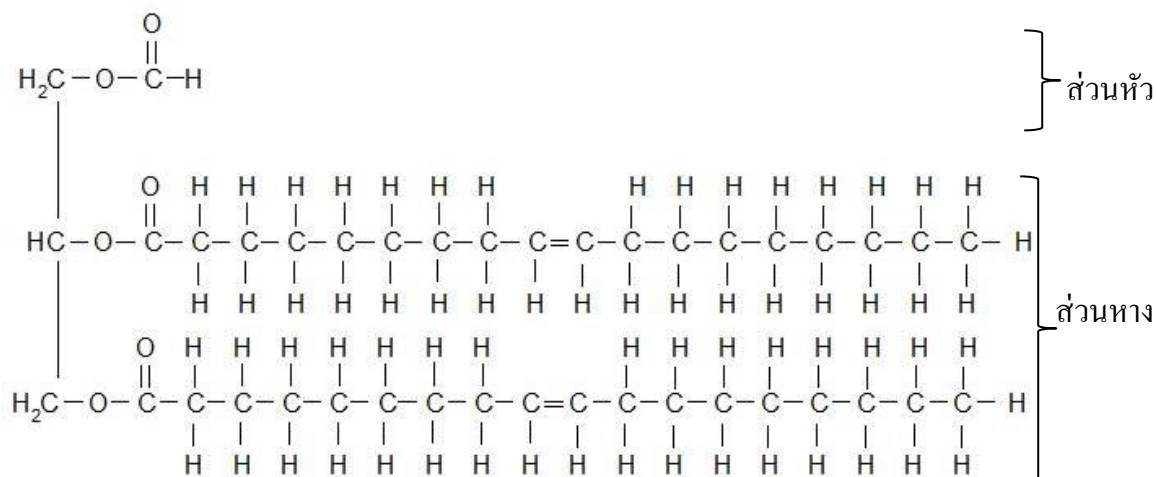
ภาพที่ 2-6 โครงสร้างโมเลกุลนอมอล อัลคิล อะมิโน โฟฟิโอะเนต

4. สารลดแรงตึงผิวชนิดนอนไอออนิก

เมื่อละลายในตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์แล้วจะไม่แตกตัวดังนั้นจึงไม่มีประจุเกิดขึ้น

(Tadros, 2005)

ยกตัวอย่าง ไคทิลเซอไรด์



ภาพที่ 2-7 โครงสร้างโมเลกุลไคทิลเซอไรด์











อิมัลชัน

อิมัลชัน คือ การกระจายตัวของคอลลอยด์ (Colloidal) ในของเหลว โดยของเหลวชนิดหนึ่งกระจายในอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบต่างกัน (Schramm, 2005) หรือ เป็นระบบของการกระจายตัวประกอบไปด้วยของเหลวแต่ละชนิดที่ไม่ผสมกัน หยดของของเหลวแทรกตัวอยู่ในของเหลว มีหลายชนิด (Tadros, 2005) ยกตัวอย่าง น้ำมัน-ใน-น้ำ (oil-in-water, O/W) น้ำ-ใน-น้ำมัน (water-in-oil, W/O) (Shaw, 1992) น้ำมัน-ใน-น้ำมัน (oil-in-oil, O/O) ชนิดหลังอาจจะเป็นตัวอย่างที่อิมัลชันประกอบไปด้วยน้ำมันมีขั้วเป็นของเหลวที่แทรกอยู่ในน้ำมันที่ไม่มีขั้ว และในทางกลับกันการกระจายตัวของของเหลวไม่ผสมกันจำเป็นต้องมีสารลดแรงตึงผิว เพื่อให้ของเหลวทั้งสองชนิดผสมกัน สารลดแรงตึงผิวมีส่วนสำคัญในการก่อตัวเป็นอิมัลชัน (Tadros, 2005)

การเกิดอิมัลชันในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเนื่องจากการมีมอนอกลิเซอไรด์ และ ไคทิลเซอไรด์ (Zhou, Konar & Boocock, 2003) โดยโมเลกุลของทั้งสองตัวมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีขั้ว



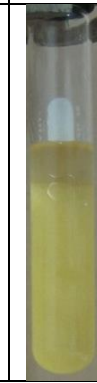







และสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วในโมเลกุลเดียวกัน คุณสมบัติข้างต้นเป็นคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว อิมัลชันจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาเอทานอลิซิส คือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้น ดังภาพที่ 2-8 ก่อนทำปฏิกิริยಾವัฏภาคของน้ำมันปาล์มโอเลอินกับเอทานอลจะแยกกันเป็นสองวัฏภาคหลังจากเขย่าครั้งที่สองเข้าสู่อิมัลชันส่งผลให้มองเห็นเป็นวัฏภาคเดียวกันหลังจากนั้นเมื่อเขย่าครั้งที่ 8 แล้วตั้งทิ้งไว้ จะพบว่ามี การเปลี่ยนแปลง โดยวัฏภาคล่างของหลอดทดลองปรากฏ กลีเซอรอล วัฏภาคด้านบนจะเริ่มใส และมีอนุภาคนาขนาดเล็กตกลงมาที่วัฏภาคกลีเซอรอล ทั้จนเกิดการแยกวัฏภาคสมบูรณ์ โดยวัฏภาคด้านบนของหลอดทดลอง คือ เอสทิลเอสเทอร์ และวัฏภาคล่าง คือ กลีเซอรอล แสดงดังภาพในหลอดทดลองสุดท้าย (อริศรา และ เจริญ, 2016)

ก่อน	เขย่า 1	เขย่า 2	เขย่า 3	เขย่า 4	เขย่า 5	เขย่า 6	เขย่า 7	เขย่า 8	สมดุล
									
สองวัฏภาค		หนึ่งวัฏภาค							สอง วัฏภาค

ภาพที่ 2-8 การทดลองปฏิกิริยาเอทานอลิซิสของน้ำมันปาล์มโอเลอิน

การใช้เมทานอลเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเรียกว่า ปฏิกิริยาเมทานอลิซิส (Methanolysis) ดังภาพที่ 2-9 ก่อนทำปฏิกิริยาวัฏภาคระหว่างน้ำมันปาล์มโอเลอินกับเมทานอลจะแยกกันเป็นสองวัฏภาคหลังจากเขย่าครั้งที่สาม

ก่อน	เขย่า 1	เขย่า 2	เขย่า 3	เขย่า 4	เขย่า 5	เขย่า 6	เขย่า 7	เขย่า 8	สมดุล
									
สองวัฏภาค			หนึ่งวัฏภาค						สองวัฏภาค

ภาพที่ 2-9 การทดลองปฏิกิริยามะทาโนไลซิสของน้ำมันปาล์มโอเลอิน

กลายเป็นหนึ่งวัฏภาคเนื่องจากเกิดอิมัลชันในปฏิกิริยามะทาโนไลซิส โดยไตรกลีเซอไรด์เปลี่ยนเป็น ไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว ส่งผลให้มองเห็นน้ำมันปาล์มโอเลอินกับเมทานอลเป็นวัฏภาคเดียวกัน เมื่อเขย่าครั้งที่ 8 วัฏภาคบนในหลอดทดลองเริ่มมีเอทิลเอสเทอร์ (สีเหลืองใส) วัฏภาคล่างของหลอดทดลองปรากฏกลีเซอรอลเกิดขึ้นเล็กน้อย (สีน้ำตาล) บริเวณตรงกลางยังคงเป็นอิมัลชันอยู่ หลังจากตั้งไว้พบว่ามีการแยกวัฏภาคที่สมบูรณ์ โดยวัฏภาคด้านบนของหลอดทดลอง คือ เมทิลเอสเทอร์ และวัฏภาคล่าง คือ กลีเซอรอลดังภาพในหลอดทดลองสุดท้าย (อริศรา และ เจริญ, 2016)

การใช้เมทานอล และเอทานอลเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยามะทาโนไลซิสจะพบว่าการเกิดอิมัลชันในปฏิกิริยามะทาโนไลซิสเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเมทาโนไลซิสแต่กลับพบว่ากลายแยกวัฏภาคหลังจากการทำปฏิกิริยานั้นกลับช้ากว่าเมทาโนไลซิส

มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์

เป็นที่ทราบกันว่ากลีเซอรอลมาจาก มอนอกลิเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ของกรดไขมัน ปัจจุบันนิยมใช้มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ในการเติมลงในเครื่องสำอางค์ และอาหาร เพื่อไม่ให้องค์ประกอบที่มีขั้วต่างกันแยกชั้นกัน มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ได้จากการกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลกับกรดไขมันโดยตรง หรือ กลีเซอรอลไลซิส (glycerolysis) หรือ ไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์จากน้ำมันพืช หรือ ไขมันสัตว์ (Soares et. al., 2011)

ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของเมทาโนไลซิส และ เอทานอลิซิส แสดงดังตารางที่ 2-5 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณไตรกลีเซอไรด์ของเมทาโนไลซิส และ เอทานอลิซิสจะลดลง ตรงกันข้ามปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ และ ไคกลีเซอไรด์จะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะลดลงเนื่องจาก ไคกลีเซอไรด์จะเปลี่ยนไปเป็นมอนอกลิเซอไรด์ และ มอนอกลิเซอไรด์จะเปลี่ยนไปเป็นกลีเซอรอล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของเมทาโนไลซิสและ เอทานอลิซิส

ตารางที่ 2-5 ช่วงเวลาในการเกิดองค์ประกอบของสารผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วน โมลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6 ต่อ 1 (Zhou & Boocock, 2006)

เวลา (นาที)	เมทาโนไลซิส (1.0 wt% NaOCH ₃)			เอทานอลิซิส (1.26 wt% NaOC ₂ H ₅)		
	MG	DG	TG	MG	DG	TG
3	1.0	10.6	84.4	10.0	11.6	14.2
6	2.5	12.2	44.9	8.2	8.9	8.4
10	2.5	9.4	26.1	7.0	7.3	5.7
20	1.8	6.2	16.6	5.5	5.3	3.4
30	1.3	4.9	12.7	4.7	4.2	2.4
60	0.8	3.2	7.7	3.2	2.5	1.5

หมายเหตุ MG คือ มอนอกลิเซอไรด์, DG คือ ไคกลีเซอรอล, TG คือ ไตรกลีเซอรอล

อุณหเคมี (Thermochemistry)

ในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้น สถานะเริ่มแรก ได้แก่สถานะเมื่อระบบเป็นตัวทำปฏิกิริยา สถานะหลังได้แก่สถานะที่ระบบเปลี่ยนเป็นสารที่ได้หรือผลิตภัณฑ์ ดังสมการ 2-16

$$\Delta H = \sum H_{\text{สารที่ได้}} - \sum H_{\text{ตัวทำปฏิกิริยา}} \quad (2-16)$$

ถ้าการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อความดันคงที่ เช่น ทำการทดลองในบรรยากาศ $\Delta H = q_p$ ก็หาได้จากการทดลองในแคลอริมิเตอร์ แล้ววัดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นหรือที่เกี่ยวข้อง (ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (Enthalpy) ของปฏิกิริยาเคมี, q_p คือ ปริมาณความร้อนของสาร 1 โมลเมื่อความดันคงที่) นิยมเรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยา (Heat of reaction) และมีชื่อเรียกย่อยตามชนิดปฏิกิริยาเคมีนั้น เช่น ปฏิกิริยาการเผาไหม้ ΔH เรียกว่า ความร้อนของการเผาไหม้ (Heat of combustion) ΔH ของปฏิกิริยาที่สารชนิดหนึ่งละลายในตัวทำละลาย เรียกว่า ความร้อนของการละลาย (Heat of solution) เป็นต้น (คณาจารย์ภาควิชาเคมี, 2555)

ΔH ขึ้นอยู่กับปริมาณ ถ้าใช้สารในปฏิกิริยามากน้อยต่างกัน $\Delta H = q_p$ ก็จะมีค่าน้อยต่างกัน (หน่วยของ ΔH คือ $J mol^{-1}$) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ถ้า ΔH มีค่ามากกว่าศูนย์ หรือ ΔH มีเครื่องหมายบวก เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic Reaction) ส่วนปฏิกิริยาที่มี ΔH น้อยกว่าศูนย์ หรือ ΔH มีเครื่องหมายลบ เรียกว่าปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) (Keszei, 2012)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1.1 หลอดทดลอง เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร
- 1.2 ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 1.3 เครื่องควมแน่น
- 1.4 เทอร์โมมิเตอร์
- 1.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ยี่ห้อ Varian รุ่น CP3800

Chrompack Capillary Column

1.5.1 ขนาดของคอลัมน์

- 1.5.1.1 ความยาว 25 เมตร
- 1.5.1.2 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร
- 1.5.1.3 ความหนาของฟิล์ม 0.15 ไมโครเมตร

1.5.2 ตัวตรวจวัด (Detector) ชนิด Flame Ionization Detector (FID)

2. สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 2.1 เมทานอล ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9, Carlo erba, ประเทศเยอรมันนี
- 2.2 เอทานอล ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9, QRëC Grade AR, ประเทศนิวซีแลนด์
- 2.3 กลีเซอรอล ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5, QRëC Grade AR, ประเทศนิวซีแลนด์
- 2.4 น้ำปราศจากไอออน
- 2.5 สีสผสมอาหาร
- 2.6 เมทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 96.5 จากการสังเคราะห์

ภายในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

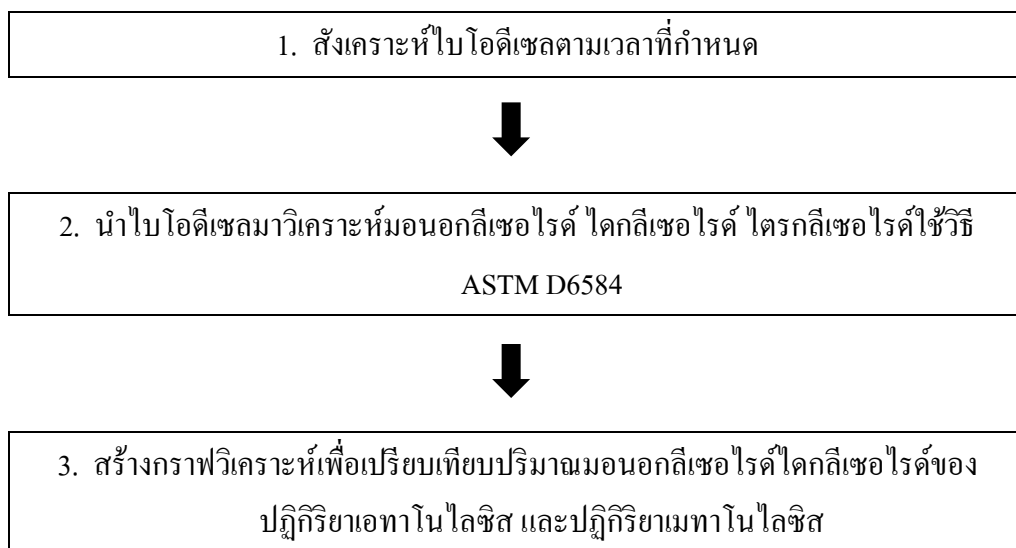
- 2.7 เอทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 96.5 จากการสังเคราะห์

ภายในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

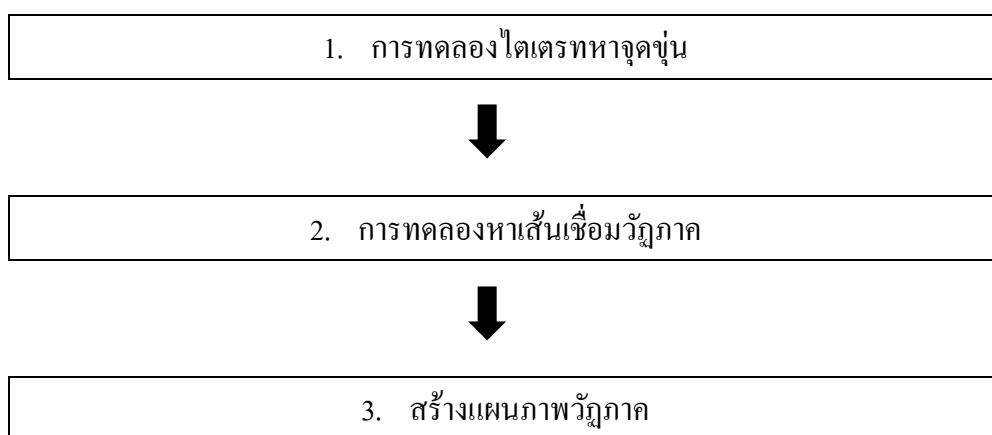
การสังเคราะห์ปริมาณ มอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์จะปฏิบัติตามขั้นตอนดังภาพที่

3-1



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการวิเคราะห์มอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์

การศึกษาลักษณะของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบและการศึกษาการละลายของ แอลกอฮอล์จะปฏิบัติตามขั้นตอนดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ขั้นตอนการทดลองของสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ

วิธีสังเคราะห์งานวิจัย

1. การสังเคราะห์หาปริมาณ มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์

1.1 เตรียมน้ำมันปาล์มโอเลอิน 8 มิลลิโมล (6.8500 กรัม) ต่อเอทานอล 48 มิลลิโมล (2.2120 กรัม) ต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 มิลลิโมล (0.0640 กรัม) ใส่ลงในหลอดทดลองพร้อมกับ ใส่มะแม่เหล็กกวนสาร ปิดฝาหลอดทดลอง

1.2 นำหลอดทดลองข้อ 1 มาวางบนเครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน ควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วแบบปั่นป่วนในการกวนผสม พร้อมกับจับเวลา 30 วินาที

1.3 หยุดปฏิกิริยาทันทีด้วยการใส่กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 10 โดย น้ำหนักปริมาณ 7-8 มิลลิลิตร แล้วนำหลอดทดลองแช่ในน้ำเย็น อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้ สารผลิตภัณฑ์แยกชั้นจากการทดลอง ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

1.4 ใช้ปิเปตดูดเฉพาะส่วนบน (เอสเทอร์) ใส่ลงในหลอดทดลองอีกอันหนึ่ง หลังจากนั้น ทำการล้างเอสเทอร์ด้วยน้ำกลั่น โดยใช้ปริมาตรแต่ละครั้งประมาณ สามในสี่ส่วนของปริมาตร เอสเทอร์ และหยุดล้างเมื่อค่า pH ของน้ำก่อนล้างเอสเทอร์ เท่ากับน้ำหลังจากการล้างเอสเทอร์ (ปกติจะล้างประมาณ 7-8 ครั้งจึงหยุด)

1.5 นำเอสเทอร์ในข้อ 4 ไปให้ความร้อนระหว่าง 100-105 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ เมทานอลและน้ำ

1.6 นำเอสเทอร์ที่ได้จากข้อ 5 ไปวิเคราะห์หามอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โดยใช้ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตามวิธี ASTM D6584

1.7 ทำการทดลองในข้อ 1-6 ซ้ำ โดยเปลี่ยนเวลาการทำปฏิกิริยาในข้อ 2 เป็น 60, 90, 120, 150, 180, 240, 270 และ 300 วินาที ตามลำดับ

1.8 ทำการทดลองในข้อ 1-7 ซ้ำ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิ ในข้อ 2 เป็น 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

1.9 ทำการทดลองในข้อ 1-8 ซ้ำ โดยเปลี่ยนสารตั้งต้นในข้อ 1 จากเอทานอล เป็น เมทานอล (1.5384 กรัม)

2. การหาเส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบโดยการทดลองไทเทรตหาจุดขุ่น

2.1 เตรียมสารละลายของเหลวระหว่างเอทิลเอสเทอร์ (18 กรัม) กับเอทานอล (2 กรัม) มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 90 ต่อ 10 เติลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 500 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส

2.2 ไทเทรตด้วยกลีเซอรอล สังเกตความขุ่นของสารละลาย หยุดการไทเทรตเมื่อสารละลาย เปลี่ยนจากใสเป็นขุ่น บันทึกปริมาตรของกลีเซอรอล

2.3 เปลี่ยนอัตราส่วน โดยน้ำหนักของเอทิลเอสเทอร์ต่อเอทานอล เป็น 100 ต่อ 0, 80 ต่อ 20, 70 ต่อ 30, 60 ต่อ 40, 50 ต่อ 50, 40 ต่อ 60, 30 ต่อ 70, 20 ต่อ 80 และ 10 ต่อ 90 กรัม ตามลำดับ

2.4 เตรียมสารละลายของเหลวระหว่างกลีเซอรอล (18 กรัม) และเอทานอล (2 กรัม) มีอัตราส่วน โดยน้ำหนักเท่ากับ 90 ต่อ 10 เติลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 500 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส

2.5 ไทเทรตด้วยเอทิลเอสเทอร์ สังเกตความขุ่นของสารละลาย หยุดการไทเทรตเมื่อสารละลายเปลี่ยนจากใสเป็นขุ่น บันทึกปริมาตรของเอทิลเอสเทอร์

2.6 เปลี่ยนอัตราส่วน โดยน้ำหนักของกลีเซอรอลและเอทานอลเป็น 100 ต่อ 0, 80 ต่อ 20, 70 ต่อ 30, 60 ต่อ 40, 50 ต่อ 50, 40 ต่อ 60, 30 ต่อ 70, 20 ต่อ 80 และ 10 ต่อ 90 กรัม

2.7 นำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาร้อยละ โดยน้ำหนักของสารแต่ละตัว ในแต่ละครั้งของการทดลอง และสร้างแผนภาพวิภูภาค

2.8 ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-7 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิจาก 30 เป็น 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

2.9 เปลี่ยนการทดลองของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบจากระบบ เอทิลเอสเทอร์-เอทานอล-กลีเซอรอลเป็นเมทิลเอสเทอร์-เมทานอล-กลีเซอรอล

3. การละลายของแอลกอฮอล์

3.1 เพื่อทดสอบการละลายของแอลกอฮอล์ในเอสเตอร์และกลีเซอรอลจึงเตรียม ปริมาณสารทั้งสามดังนี้ ด้วยอัตราส่วน โดยน้ำหนักของเอทานอล ต่อ เอทิลเอสเตอร์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 5 : 3 : 7 บรรจุลงในหลอดทดลอง

3.2 นำของผสมตามข้อที่ 1 ไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พร้อม กวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารอย่างปั่นป่วน เป็นเวลา 5 นาที เมื่อหยุดกวน จับเวลาดานาน 6 ชั่วโมง เพื่อการแยกวัฏภาคที่ชัดเจน

3.3 เมื่อครบ 6 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นว่าของผสมจะแยกเป็น 2 วัฏภาคอย่างชัดเจน นำปิเปตดูดวัฏภาคด้านบนไปชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนัก และนำวัฏภาคด้านล่างไปชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนัก ทั้งนี้ ถ้าน้ำหนักของวัฏภาคด้านบน (เอสเตอร์) เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักเดิมก่อนผสม แสดงว่าน้ำหนักที่เพิ่มคือน้ำหนักของแอลกอฮอล์ ซึ่งวัฏภาคด้านล่าง (กลีเซอรอล) ก็เช่นกันหาก น้ำหนักกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าน้ำหนักที่เพิ่มคือน้ำหนักของแอลกอฮอล์

3.4 ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 1-3 เปลี่ยนอัตราส่วน โดยน้ำหนักของเอทานอล ต่อ เอทิลเอสเตอร์ ต่อ กลีเซอรอลจาก 5 : 3 : 7 เป็น 5 : 5 : 5 และ 5 : 7 : 3 ตามลำดับ

3.5 ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 1-4 เปลี่ยนอุณหภูมิการทดลองเป็น 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

3.6 ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 1-5 เปลี่ยนสารตั้งต้นจากเอทิลเอสเตอร์เป็นเมทิลเอสเตอร์ และเปลี่ยนจากเอทานอลเป็นเมทานอล

วิธีวิเคราะห์สาร

1. การวิเคราะห์หมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์และ กลีเซอรอล
 - 1.1 อูณหภูมิหัวฉีด (Injector) 370 องศาเซลเซียส
 - 1.2 อัตราการไหล/ความดัน (Flow/Pressure) 3.0 มิลลิลิตรต่อนาที Hold ไว้ 120 นาที
 - 1.3 อูณหภูมิคอลัมน์ (Column) 50 องศาเซลเซียส hold ไว้ 1 นาที ปรับเพิ่มอูณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มคือ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นถึงอูณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มคือ 7 องศาเซลเซียสต่อนาที และเพิ่มอูณหภูมิถึง 380 องศาเซลเซียส การเพิ่มคือ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที Hold ไว้ 20 นาที
 - 1.4 อูณหภูมิตัวตรวจวัด 380 องศาเซลเซียส
 - 1.5 Internal standard ที่ใช้ 1,2,3-Tricaproylglycerol (Tricaprin)
 - 1.5.1 เตรียม Tricaprin ปริมาณ 80 มิลลิกรัม บรรจุลงขวดปรับปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วย pyridine
 - 1.5.2 ชั่งเอสเทอร์ ปริมาณ 100 มิลลิกรัม บรรจุลงขวดเก็บตัวอย่าง หลังจากนั้น เติมสารในข้อ 1 ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร เขย่า 15 นาที
 - 1.5.3 เมื่อครบ 15 นาที เติม n-heptane ปริมาณ 1 มิลลิลิตร
2. การวิเคราะห์เอทิลเอสเทอร์และ เมทิลเอสเทอร์
 - 2.1 อูณหภูมิหัวฉีด (Injector) 370 องศาเซลเซียส
 - 2.2 อัตราการไหล/ความดัน (Flow/Pressure) 3.0 มิลลิลิตรต่อนาที ค้างไว้ 120 นาที
 - 2.3 อูณหภูมิคอลัมน์ (column) 120 องศาเซลเซียส hold ไว้ 5 นาที ปรับเพิ่มอูณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส โดยอัตราการเพิ่มคือ 25 องศาเซลเซียสต่อนาที hold ไว้ 10 นาที และเพิ่มอูณหภูมิถึง 220 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มคือ 25 องศาเซลเซียสต่อนาที hold ไว้ 12.50 นาที
 - 2.4 อูณหภูมิตัวตรวจวัด 380 องศาเซลเซียส
 - 2.5 Internal standard ที่ใช้ Methyl heptadecanoate
 - 2.5.1 เตรียม Methyl heptadecanoate 50 มิลลิกรัม บรรจุลงขวดปรับปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วย n-heptane
 - 2.5.2 ชั่งเอสเทอร์ ปริมาณ 25 มิลลิกรัม บรรจุลงขวดเก็บตัวอย่าง หลังจากนั้น เติมสารในข้อ 1 ปริมาณ 1 มิลลิลิตร

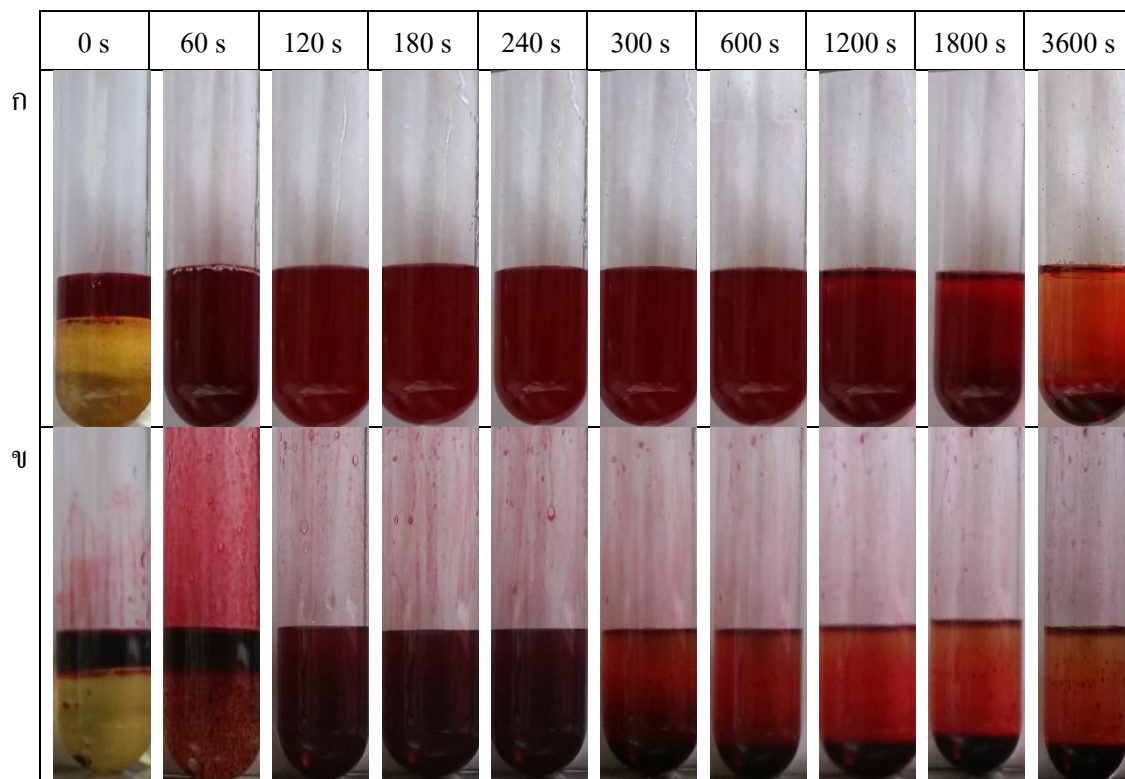
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

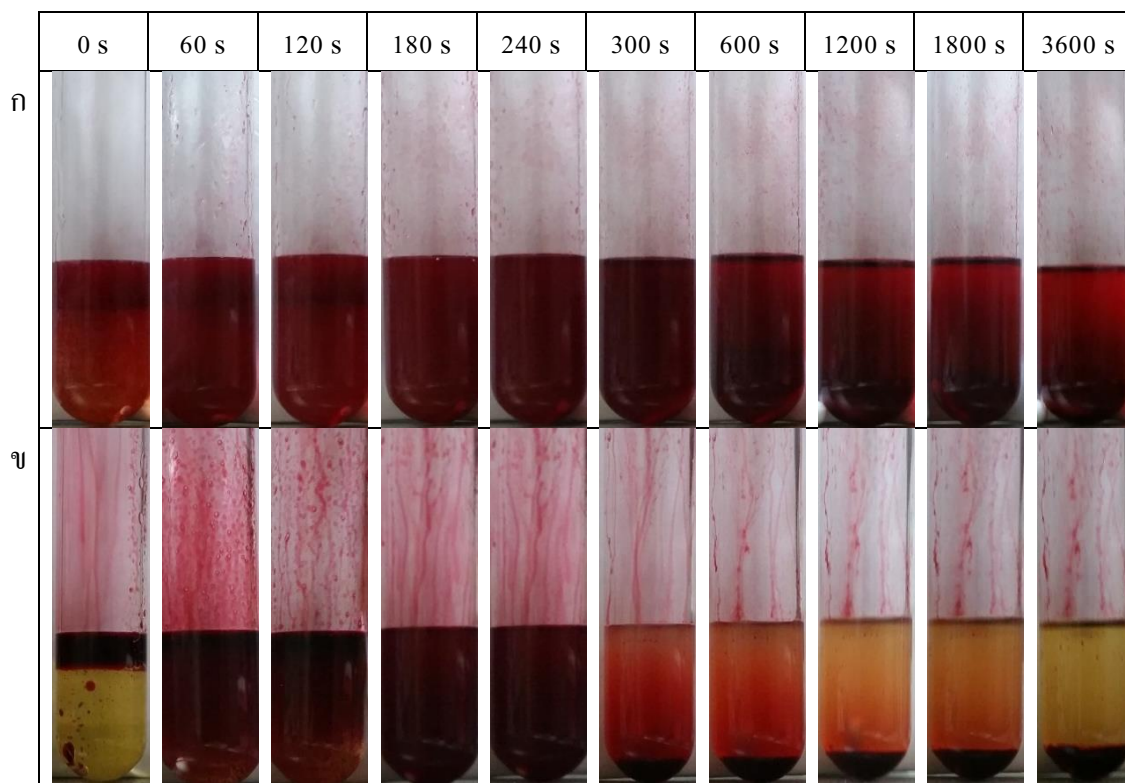
พฤติกรรมวิทยาจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การสังเคราะห์ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นการทำให้ปฏิกิริยาระหว่าง ไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ ซึ่งชนิดของแอลกอฮอล์ที่เลือกใช้ ได้แก่ เมทานอล และ เอทานอล ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยภาพที่ 4-1 แสดงพฤติกรรมวิทยาของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (ก) ปฏิกิริยาเอทานอลิซิส คือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นกับ ไตรกลีเซอไรด์ (ข) ปฏิกิริยาเมทานอลิซิส คือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เมทานอลเป็นสารตั้งต้นกับ ไตรกลีเซอไรด์ที่เวลาเริ่มต้น (0 วินาที) ปฏิกิริยาเอทานอลิซิสและปฏิกิริยาเมทานอลิซิส แยกเป็นสองภูมิภาค ประกอบด้วยภูมิภาคด้านบน คือ แอลกอฮอล์ผสมกับส่วนผสมอาหารสีแดงเพื่อให้เห็นสีของแอลกอฮอล์ชัดเจนเมื่อทำการทดลอง (ไม่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน) ซึ่ง เมทานอลมีความหนาแน่น 0.78720 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เอทานอล 0.78546 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (González, Calvar, Gómez & Domínguez, 2007) และภูมิภาคด้านล่างคือ น้ำมันปาล์ม โอเลอิน โดยความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม โอเลอินคือ 0.917 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Siddique, Ahmad, Ibrahim, Hena, Rafatullah & AK, 2010) เนื่องจากแอลกอฮอล์มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำมันปาล์ม โอเลอิน แอลกอฮอล์จึงอยู่ด้านบน เมื่อกวนผสมโดยใช้ความเร็วแบบปั่นป่วนประมาณ 1 นาทีตั้งทิ้งไว้และจับเวลาพบว่าเมื่อผ่านไป 60 วินาที ปฏิกิริยาเอทานอลิซิสเข้าสู่ภูมิภาคเดียวกัน หรือที่เรียกว่า การเข้าสู่อิมัลชัน แต่เมทานอลิซิสยังคงแยกเป็นสองภูมิภาค จนถึง 120 วินาที เมทานอลิซิสเข้าสู่ภูมิภาคเดียวกัน (ผลการทดลองคล้ายคลึงกับ Zhou & Boocock, 2006) เมื่อผ่านไป 240 วินาที พบว่าภูมิภาคด้านบนของเมทานอลิซิสเริ่มใสขึ้น ซึ่งเป็นภูมิภาคของ เมทิลเอสเทอร์ ขณะเดียวกันเมื่อสังเกตด้านล่างของหลอดทดลองมีสีเข้มขึ้น ซึ่งเป็นภูมิภาคของ กลีเซอรอล ส่วนเอทานอลิซิสที่เวลา 240 วินาทียังคงเป็นภูมิภาคเดียวกันอยู่ จนผ่านไป 1,200 วินาที ภูมิภาคด้านบนของเอทานอลิซิสเริ่มใสขึ้น ซึ่งเป็นภูมิภาคของ เมทิลเอสเทอร์ และพบว่าด้านล่างหลอดทดลองมีสีเข้มขึ้นคือ เริ่มมีกลีเซอรอลเกิดขึ้นด้วย เมื่อสังเกตปฏิกิริยาเมทานอลิซิสด้วยสายตาจะพบว่าเกิดการแยกที่สมบูรณ์หรือเห็นเส้นแบ่งภูมิภาคระหว่างเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลที่ชัดเจนในช่วงเวลา 1,800 วินาที เป็นต้นไป

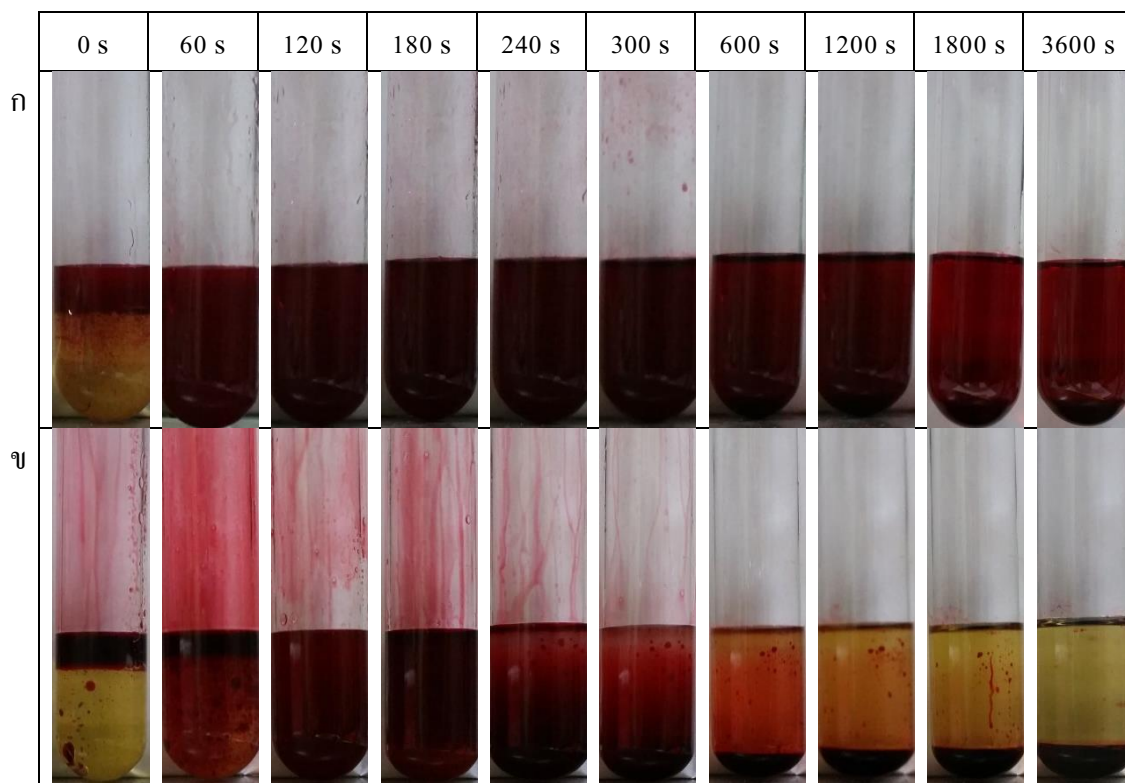
เอทานอลไอซิสเห็นเส้นแบ่งวัฏภาคที่ชัดเจนระหว่างเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลที่ 3,600 วินาที
เป็นต้นไป



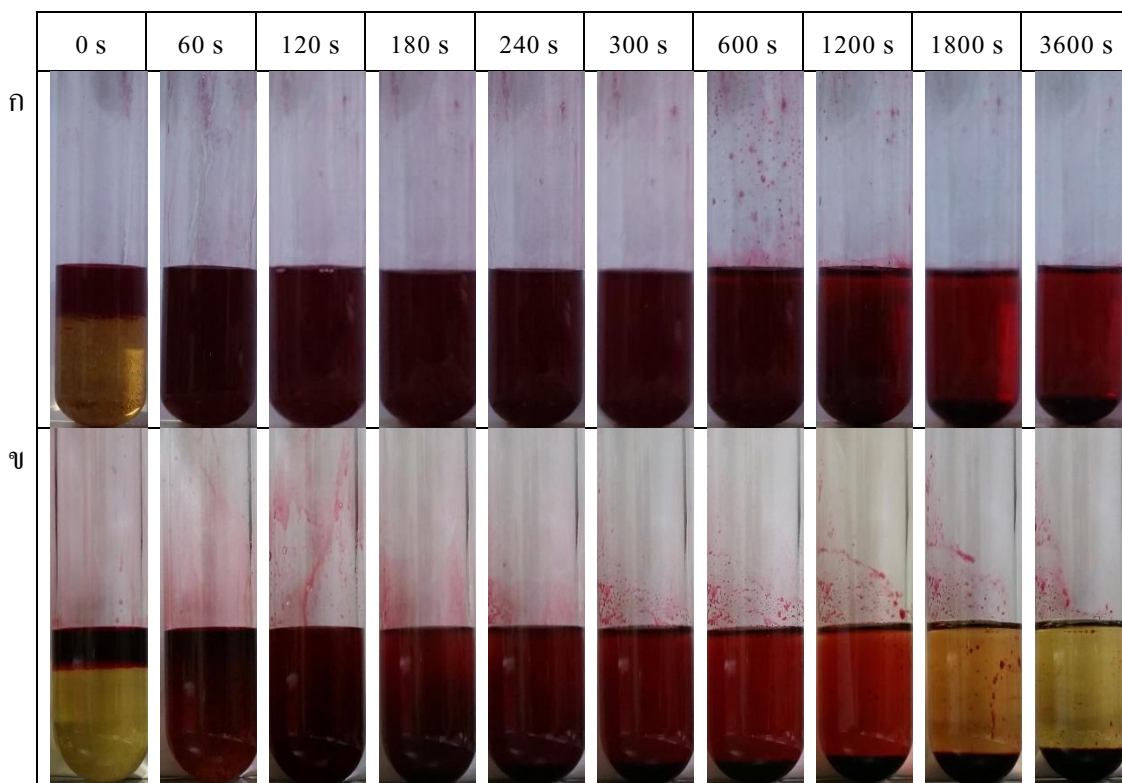
ภาพที่ 4-1 พฤติกรรมวัฏภาคของปฏิกิริยา (ก) เอทานอลไอซิส และ (ข) เมทานอลไอซิส ณ
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-2 พฤติกรรมการแยกวัฏภาคของปฏิกิริยา (ก) เอทานอลाइซิส และ (ข) เมทานอลाइซิส ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



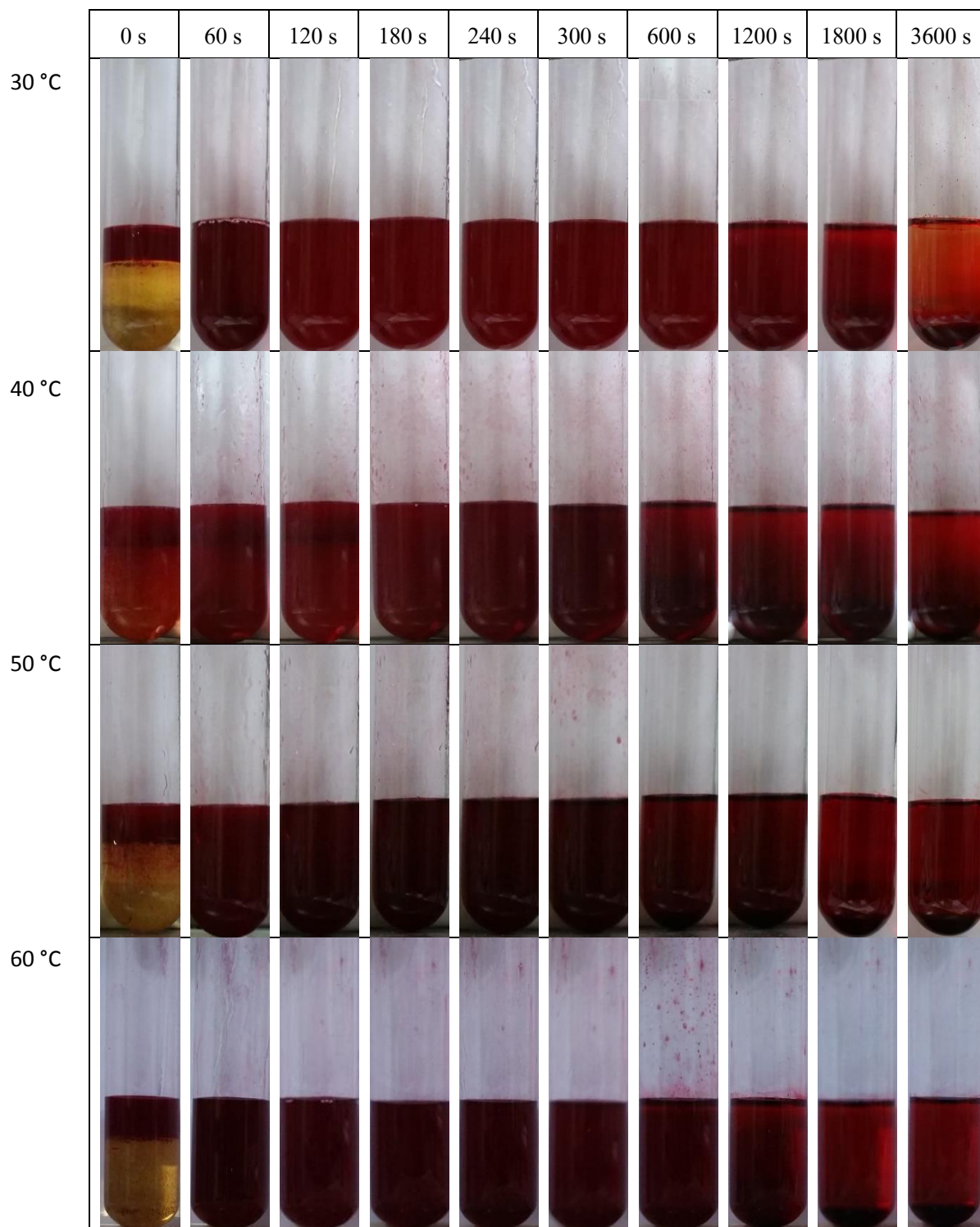
ภาพที่ 4-3 พฤติกรรมการแยกวัฏภาคของปฏิกิริยา (ก) เอทานอลाइซิส และ (ข) เมทานอลाइซิส ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



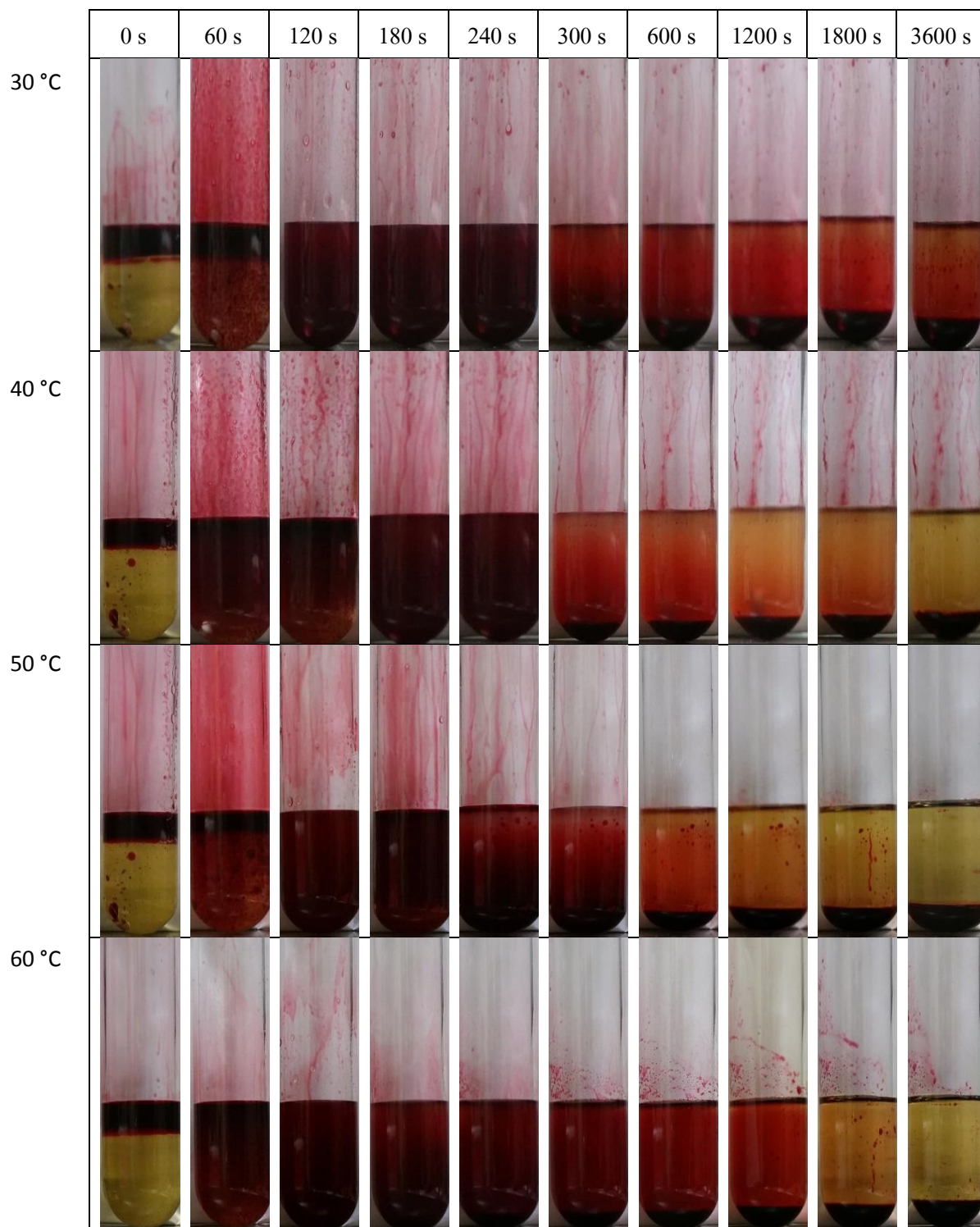
ภาพที่ 4-4 พฤติกรรมวัฏภาคของปฏิกิริยา (ก) เอทานอลไซส และ (ข) เมทานอลไซสที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 4-1 ถึง 4-4 พบว่าปฏิกิริยาเอทานอลไซสเข้าสู่อิมัลชันเมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาที ปฏิกิริยาเมทานอลไซสเข้าสู่อิมัลชันเมื่อเวลาผ่านไป 120 วินาที ต่อมาปฏิกิริยาเมทานอลไซสเริ่มแยกวัฏภาคเมื่อเวลาผ่านไป 240 วินาที แต่ปฏิกิริยาเอทานอลไซสยังคงเป็นวัฏภาคเดียวกันอยู่จนกระทั่งผ่านไป 1,200 วินาทีจึงเริ่มแยกวัฏภาค เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพิ่มเป็น 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิไม่มีผลในการเข้าสู่อิมัลชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ และอุณหภูมิยังไม่ส่งผลต่อการแยกวัฏภาคระหว่างเอสเทอร์กับกลีเซอรอล เนื่องจากเวลาการเข้าสู่อิมัลชันและการแยกวัฏภาคของปฏิกิริยาเอทานอลไซสแสดงดังภาพ 4-5 เกิดขึ้นที่เวลาเดียวกัน ทั้งนี้เวลาการเข้าสู่อิมัลชันและการแยกวัฏภาคของปฏิกิริยาเมทานอลไซสแสดงดังภาพที่ 4-6 ก็เกิดขึ้นที่เวลาเดียวกัน



ภาพที่ 4-5 พฤติกรรมวิฤภาคของปฏิกิริยาเอทาโนไลซิส



ภาพที่ 4-6 พฤติกรรมวิฤภาคของปฏิกิริยามาเทนไฮซิส

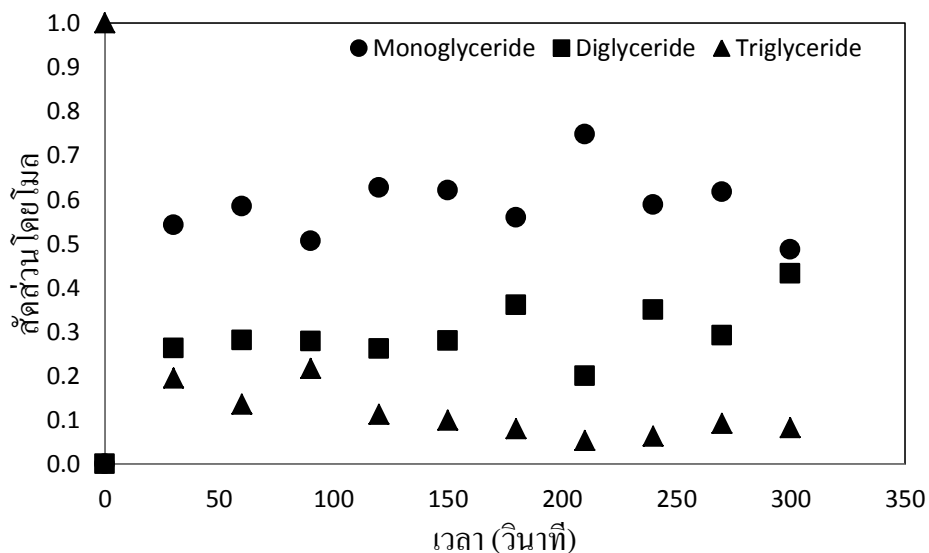
ปริมาณ มอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ในปฏิกิริยา

ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

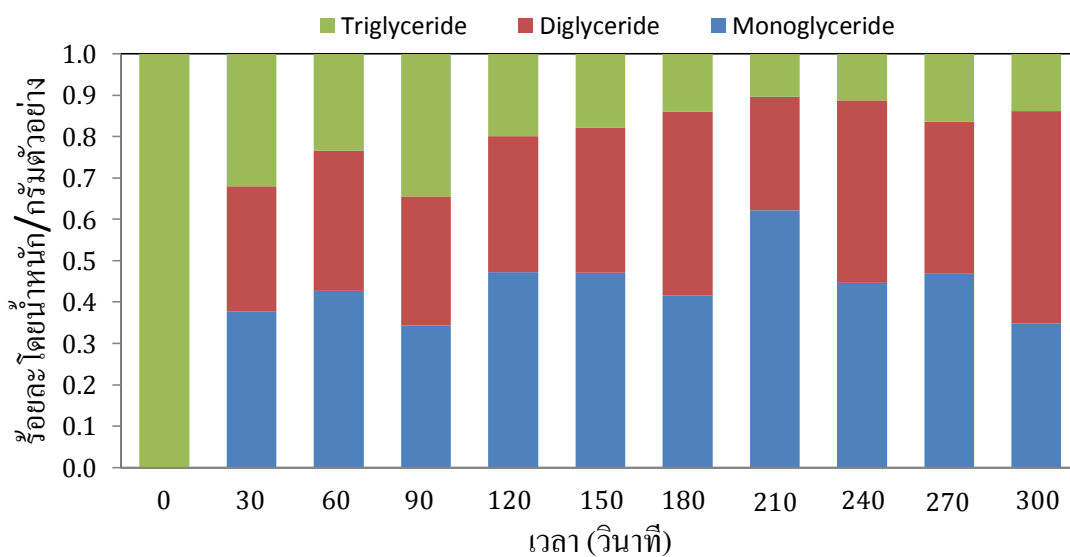
จากการศึกษาพฤติกรรมมวลภาคของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่าปฏิกิริยาเอทานอลิซิสเข้าสู่อิมัลชันเร็วกว่าปฏิกิริยาเมทานอลิซิส โดยสาเหตุของการเกิดอิมัลชันคือเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวอยู่ระหว่างไตรกลีเซอไรด์และ แอลกอฮอล์ที่ไม่ละลายเข้ากัน เนื่องจากแอลกอฮอล์มีขั้ว ไตรกลีเซอไรด์ไม่มีขั้ว โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบไปด้วยส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ซึ่งโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวส่วนที่มีขั้วจะทำหน้าที่ละลายในแอลกอฮอล์ ส่วนที่ไม่มีขั้วละลายในไตรกลีเซอไรด์ สารลดแรงตึงผิวดังกล่าว คือ มอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ จะเกิดจากไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ไคกลีเซอไรด์ หลังจากนั้นไคกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์อีกหนึ่งโมเลกุล ได้ผลิตภัณฑ์เป็น มอนอกลิเซอไรด์

สาเหตุของการเข้าสู่อิมัลชันของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์ม โอเลอีนกับแอลกอฮอล์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส เราจะพิจารณาจากการเข้าสู่อิมัลชัน โดยการดูปริมาณของ มอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ ที่เกิดขึ้น และการลดลงของ ไตรกลีเซอไรด์ ณ เวลาที่กำหนด

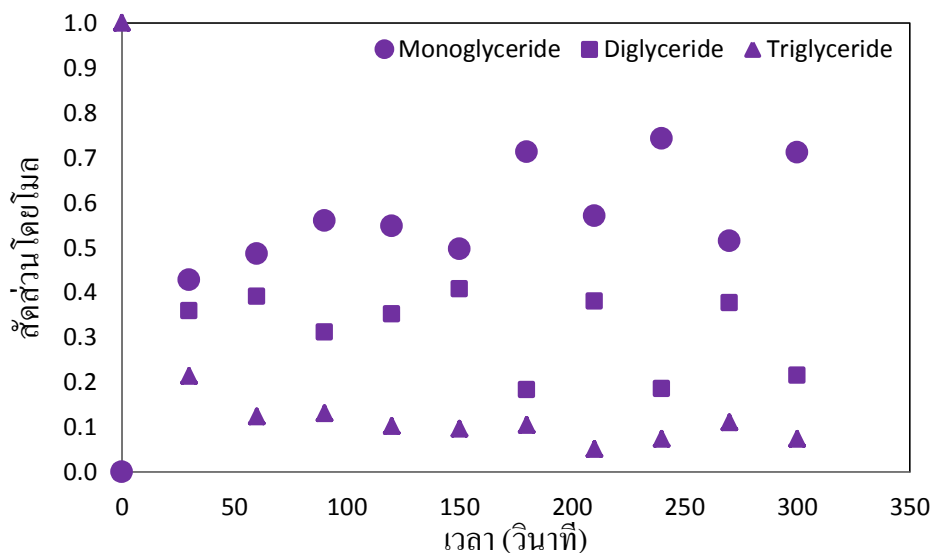
ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเอทานอลิซิส ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4-7 ถึง 4-14 ตามลำดับ ปริมาณ ไตรกลีเซอไรด์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 วินาทีและมีแนวโน้มเริ่มคงที่หลังจากนั้น โดยปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่ลดลงเนื่องจากถูกใช้ในการทำปฏิกิริยากับเอทานอล ส่วนปริมาณของมอนอกลิเซอไรด์และไคกลีเซอไรด์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 วินาทีแรกและเริ่มคงที่หลังจากนั้น ซึ่งปฏิกิริยาเอทานอลิซิสนั้นจะมีปริมาณมอนอกลิเซอไรด์มากกว่าไคกลีเซอไรด์ ในช่วง 300 วินาทีเป็นผลสืบเนื่องมาจากไตรกลีเซอไรด์เปลี่ยนไปเป็นไคกลีเซอไรด์และไคกลีเซอไรด์เปลี่ยนไปเป็นมอนอกลิเซอไรด์มากในช่วง 300 วินาที



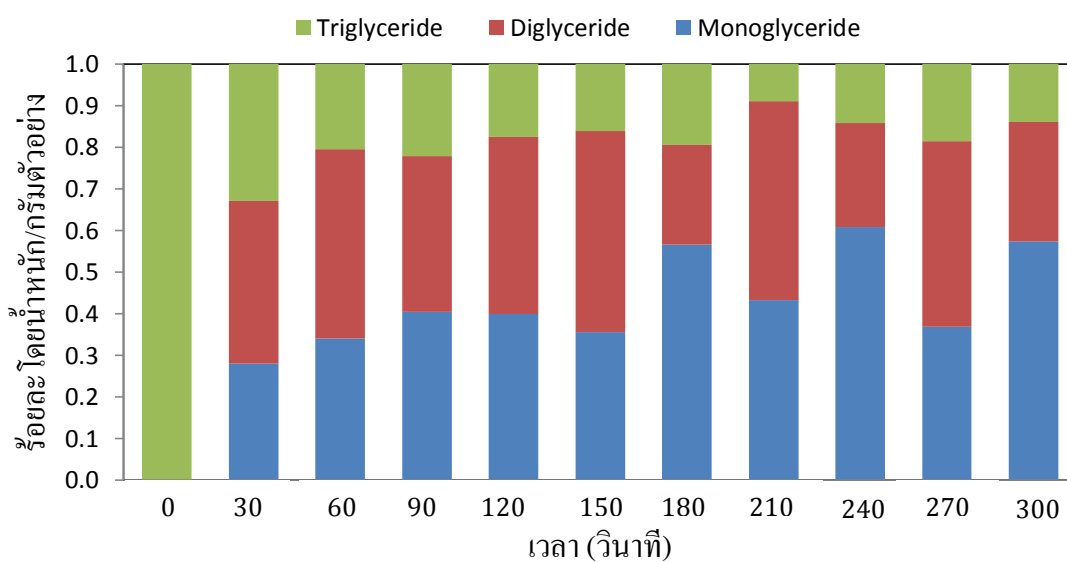
ภาพที่ 4-7 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเอทานอลไลซิสที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



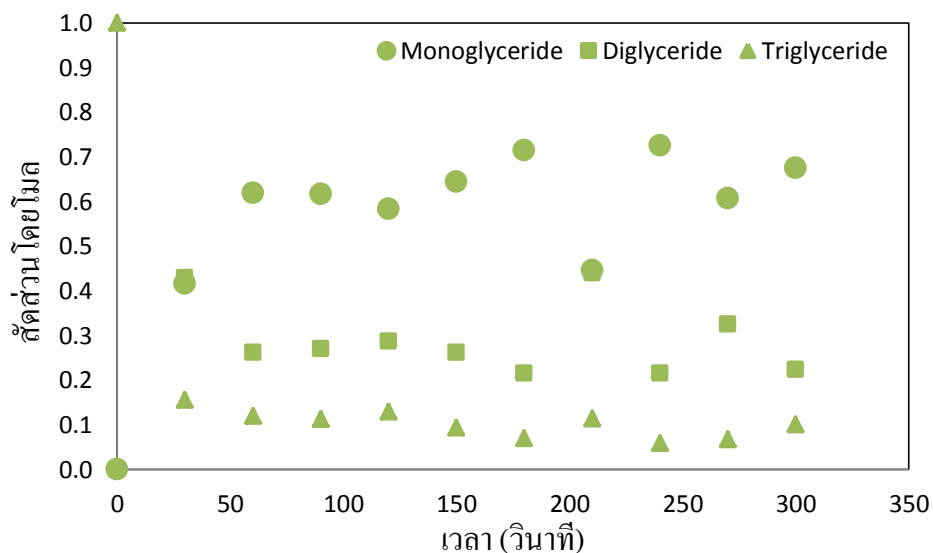
ภาพที่ 4-8 ร้อยละโดยน้ำหนักของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเอทานอลไลซิสที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



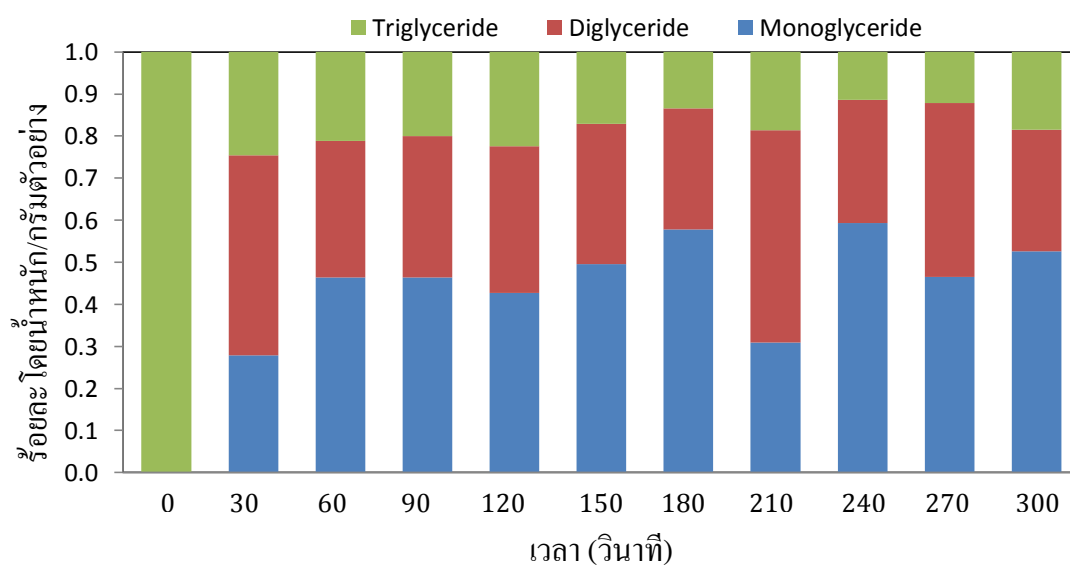
ภาพที่ 4-9 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเอทานอลิซิสที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



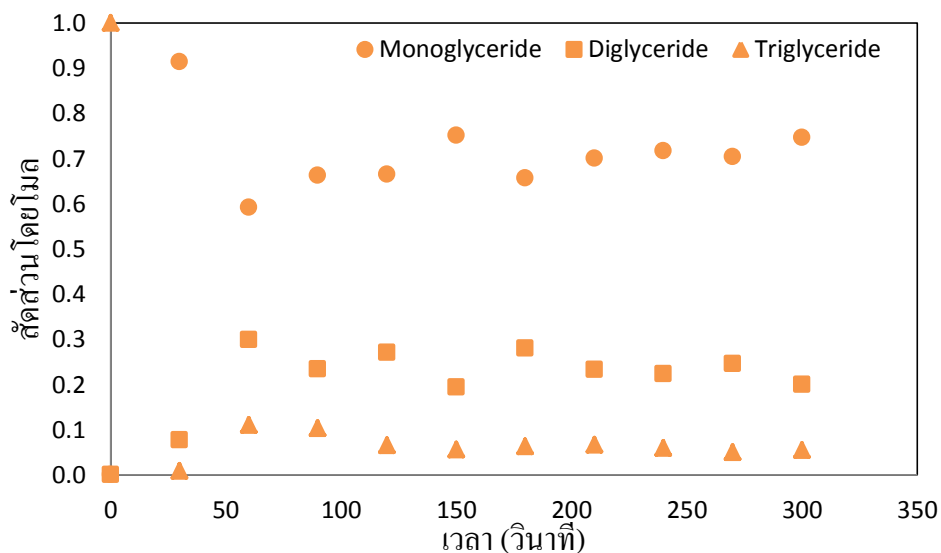
ภาพที่ 4-10 ร้อยละโดยน้ำหนักของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเอทานอลิซิสที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



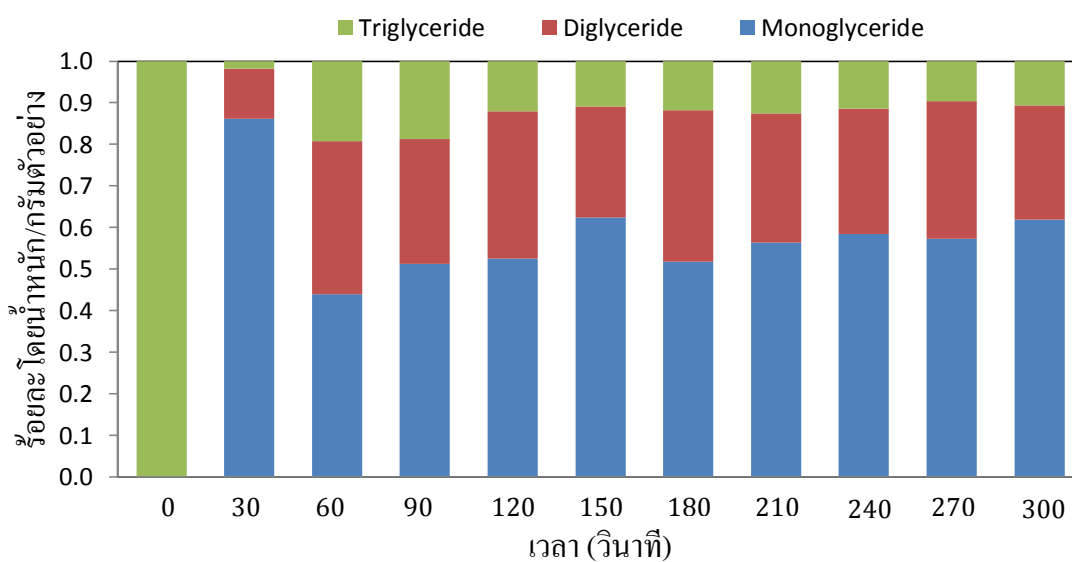
ภาพที่ 4-11 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเอทานอลิซิสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-12 ร้อยละโดยน้ำหนักของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเอทานอลิซิสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

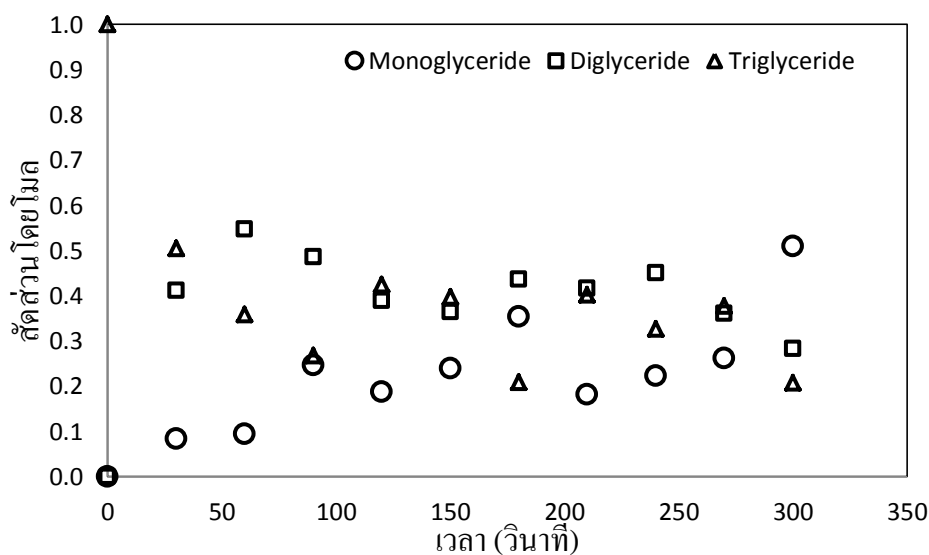


ภาพที่ 4-13 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเอทานอลไลซิสที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

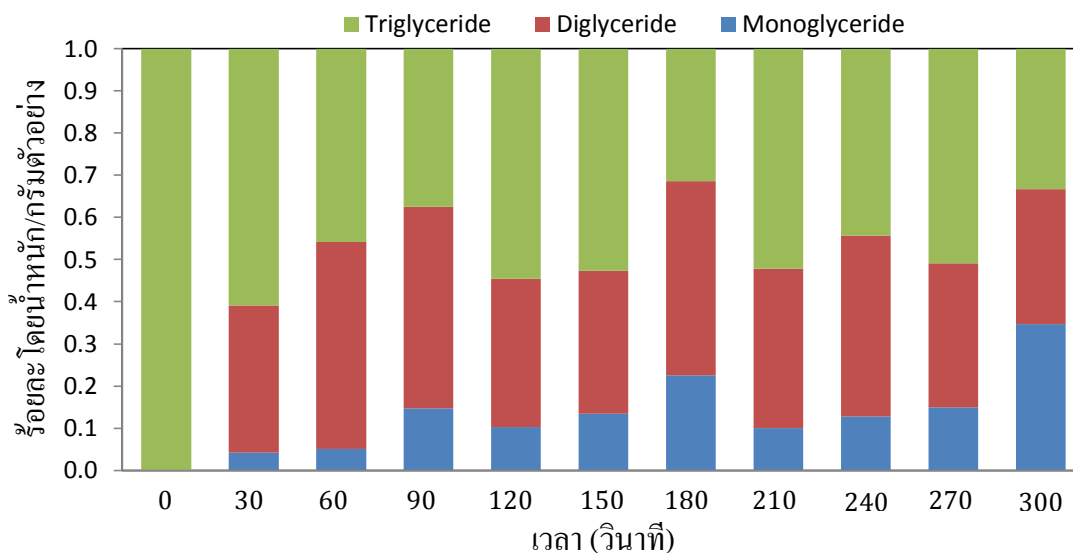


ภาพที่ 4-14 ร้อยละโดยน้ำหนักของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเอทานอลไลซิสที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

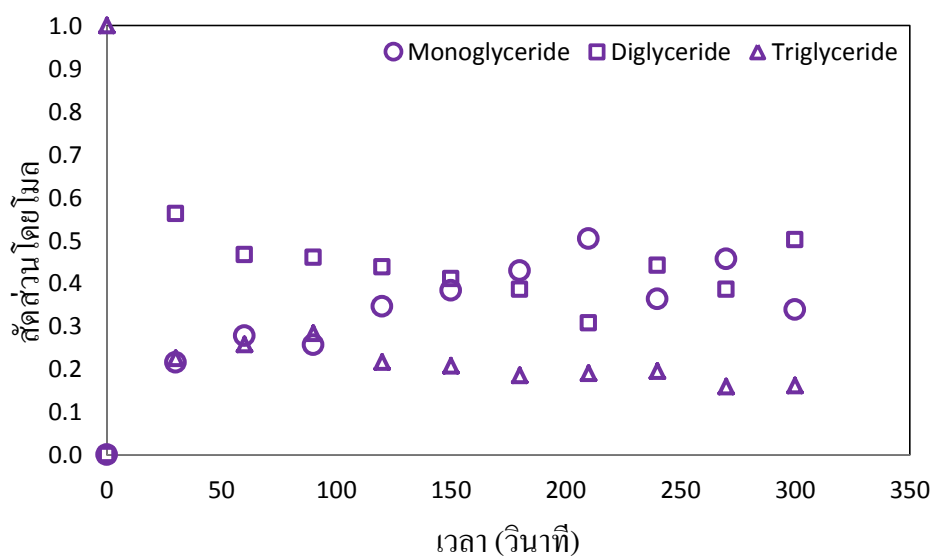
ปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 4-15 ถึง 4-22 พบว่าปริมาณไตรกลีเซอไรด์ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงช่วง 120 วินาทีหลังจากนั้นมีแนวโน้มเริ่มคงที่ ส่วนมอนอกลิเซอไรด์และไคกลีเซอไรด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึง 120 วินาทีหลังจากนั้นเริ่มคงที่ ซึ่งปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสมีปริมาณไคกลีเซอไรด์มากกว่ามอนอกลิเซอไรด์ หมายความว่าปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสอยู่ในช่วงที่ไตรกลีเซอไรด์เปลี่ยนไปเป็นไคกลีเซอไรด์มากในช่วง 300 วินาที



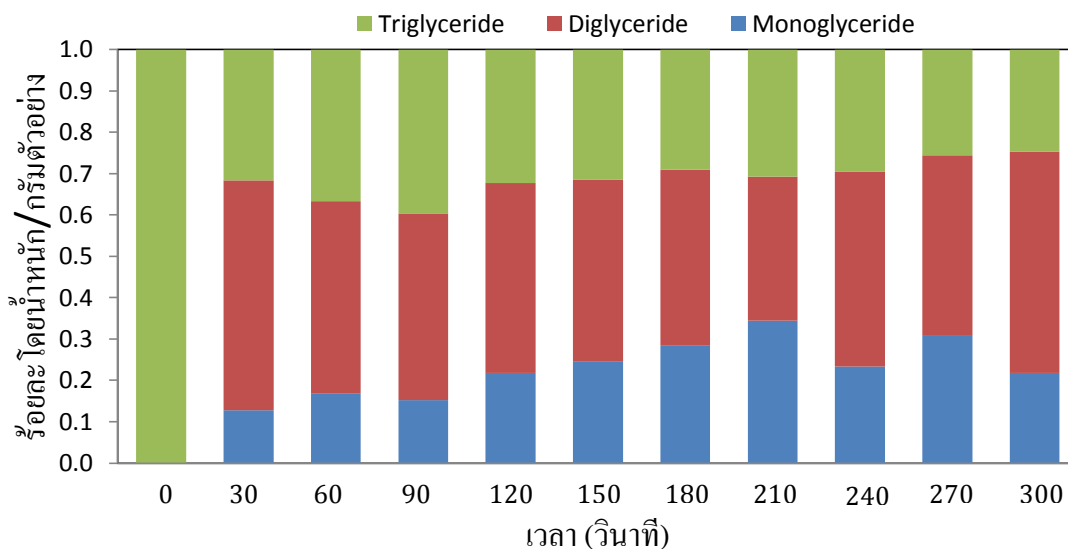
ภาพที่ 4-15 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเมทาโนไลซิส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



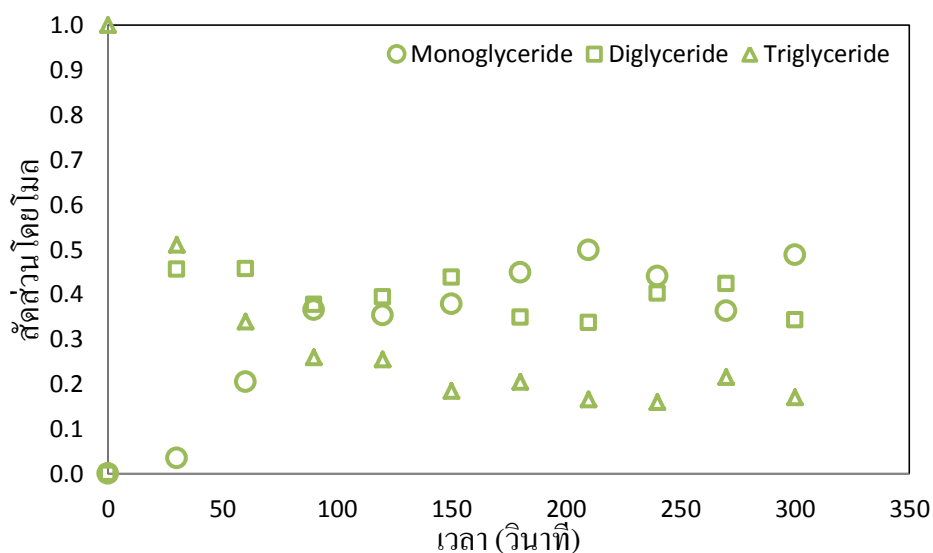
ภาพที่ 4-16 ร้อยละโดยน้ำหนักของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



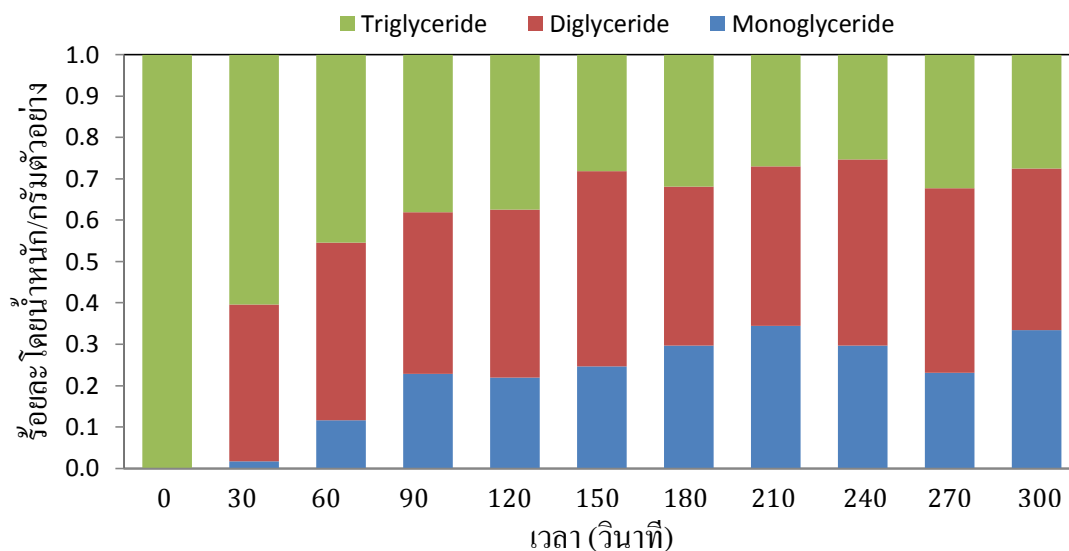
ภาพที่ 4-17 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเมทาโนไลซิส ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



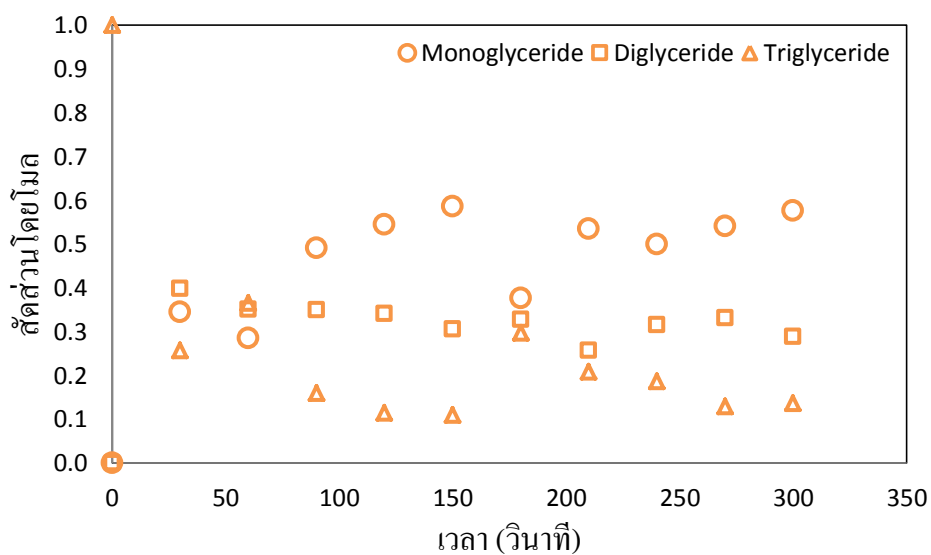
ภาพที่ 4-18 ร้อยละโดยน้ำหนักของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเมทานอลิซิสที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



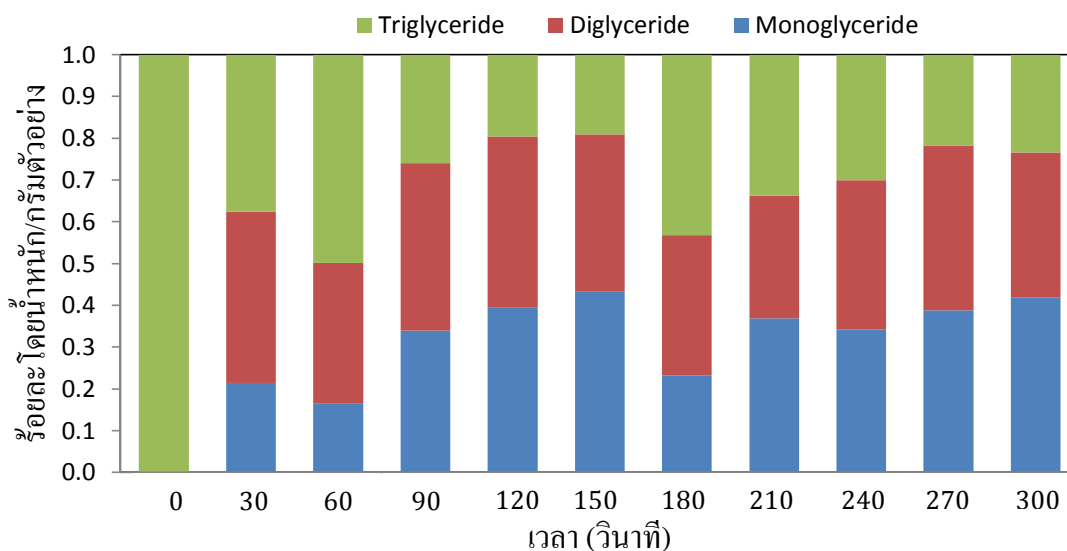
ภาพที่ 4-19 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเมทานอลิซิส ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-20 ร้อยละโดยน้ำหนักของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

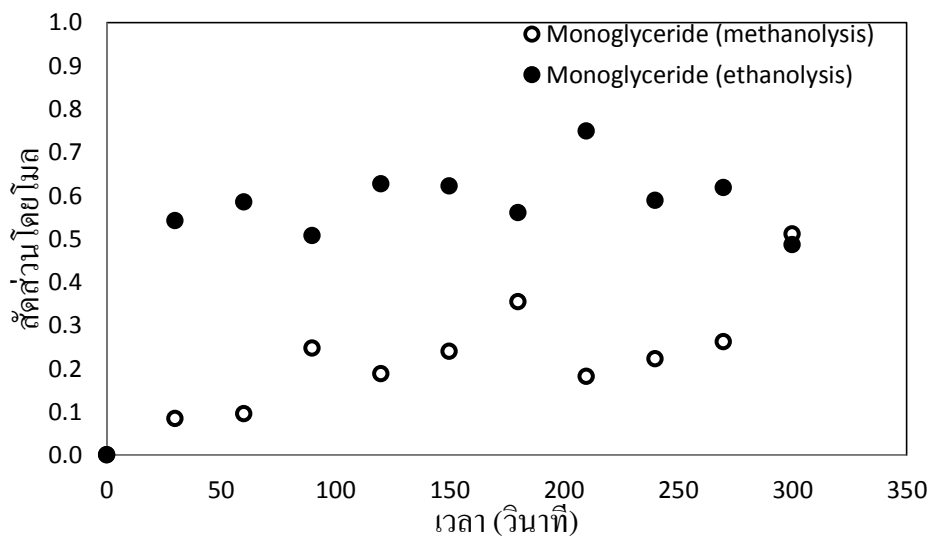


ภาพที่ 4-21 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเมทาโนไลซิส ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

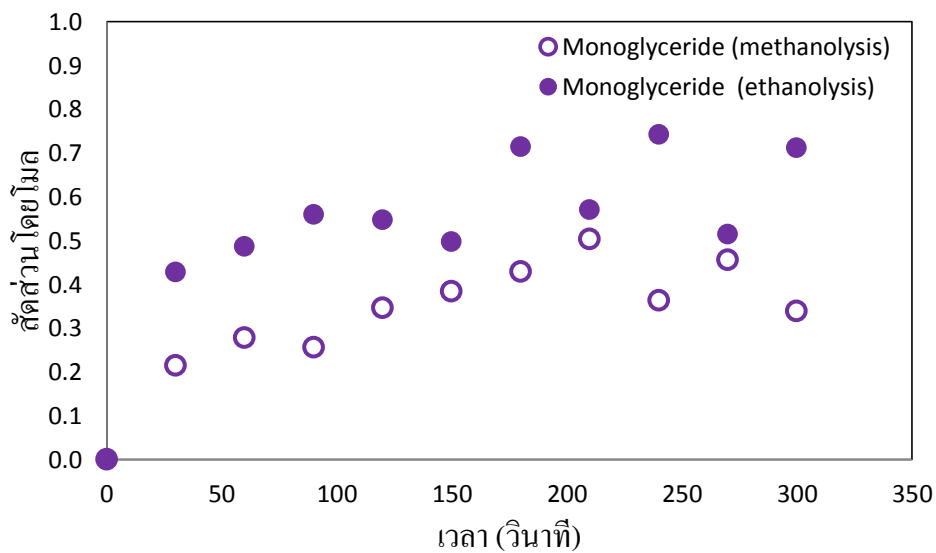


ภาพที่ 4-22 ร้อยละ โดยน้ำหนักของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

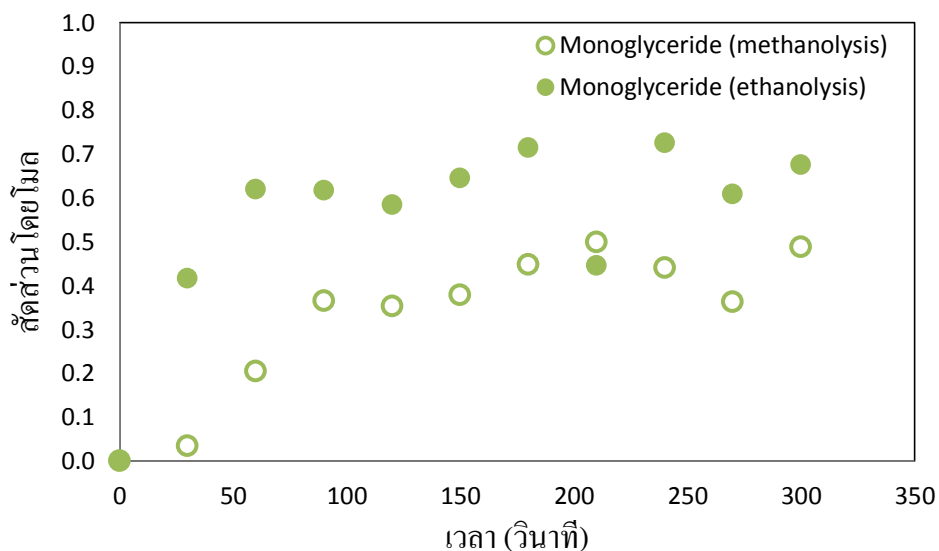
เมื่อเปรียบเทียบมอนอกลิเซอไรด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเอทาโนไลซิสกับปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดกลีเซอไรด์ หลังจากนั้นไดกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยาต่อกับแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็น มอนอกลิเซอไรด์ แสดงดังภาพที่ 4-23 ถึง 4-26 ตามลำดับ ณ เวลาเดียวกัน มอนอกลิเซอไรด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเอทาโนไลซิส มีปริมาณมากกว่ามอนอกลิเซอไรด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเมทาโนไลซิส



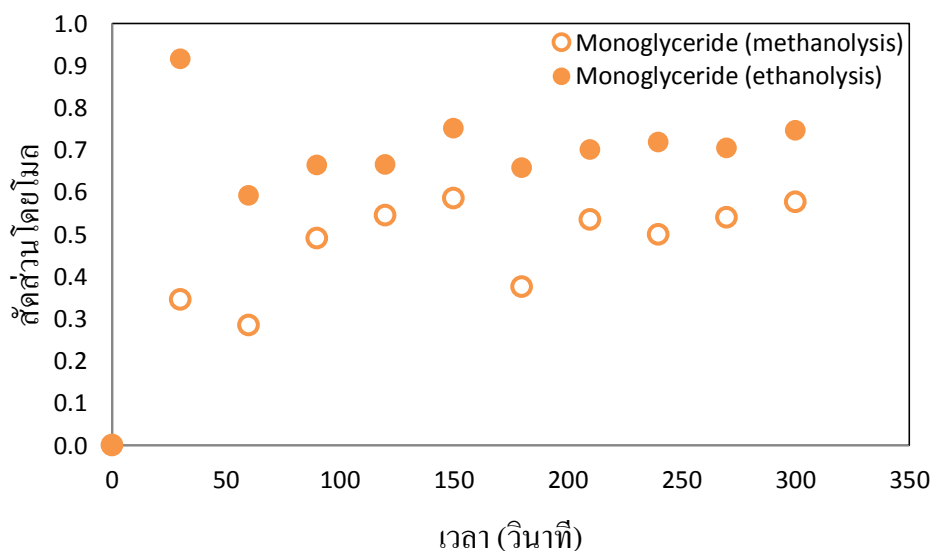
ภาพที่ 4-23 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-24 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

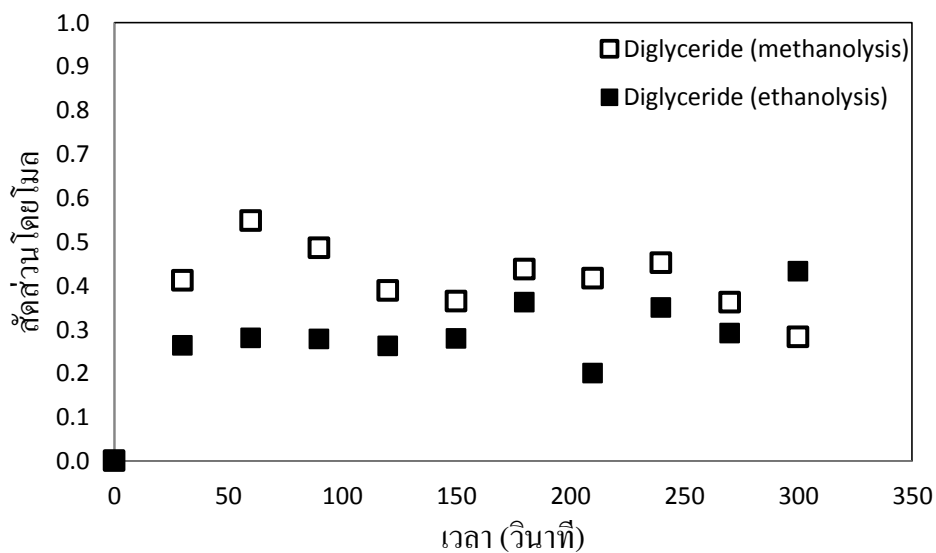


ภาพที่ 4-25 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

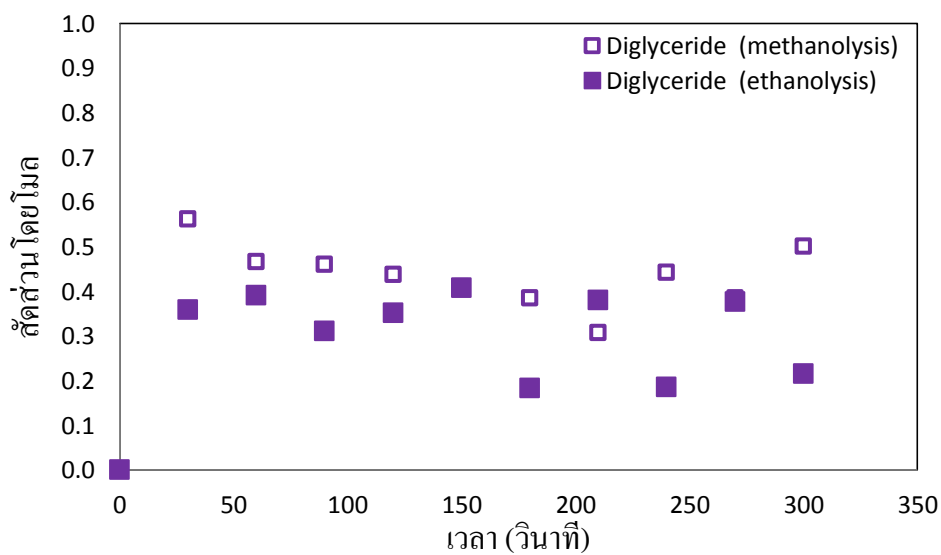


ภาพที่ 4-26 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

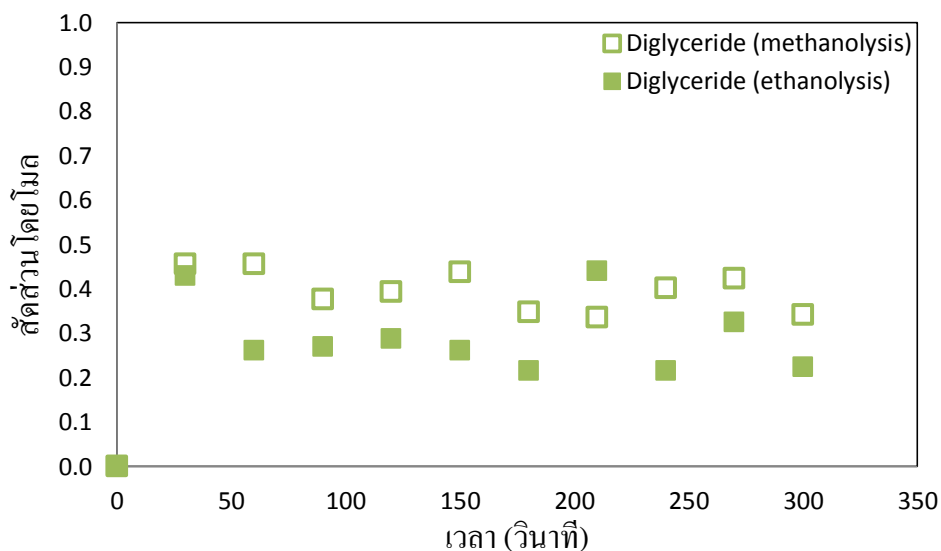
พิจารณาไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเอทานอลิซิสกับปฏิกิริยามทานอลิซิสที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ แสดงดังภาพที่ 4-27 ถึง 4-30 ณ เวลาเดียวกัน ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเอทานอลิซิสกับปฏิกิริยามทานอลิซิสมีความแตกต่างกันไม่มาก



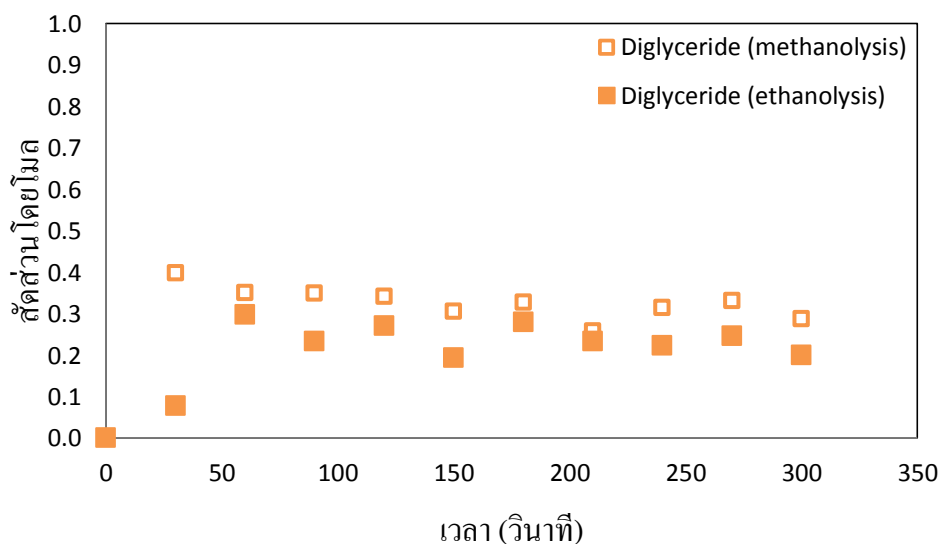
ภาพที่ 4-27 สัดส่วนโดยโมลของไดกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-28 สัดส่วนโดยโมลของไดกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



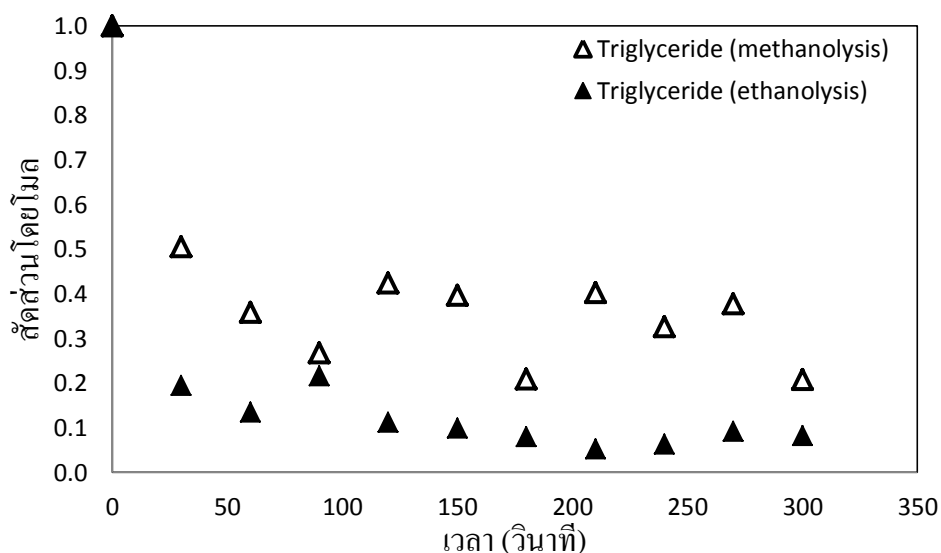
ภาพที่ 4-29 สัดส่วนโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



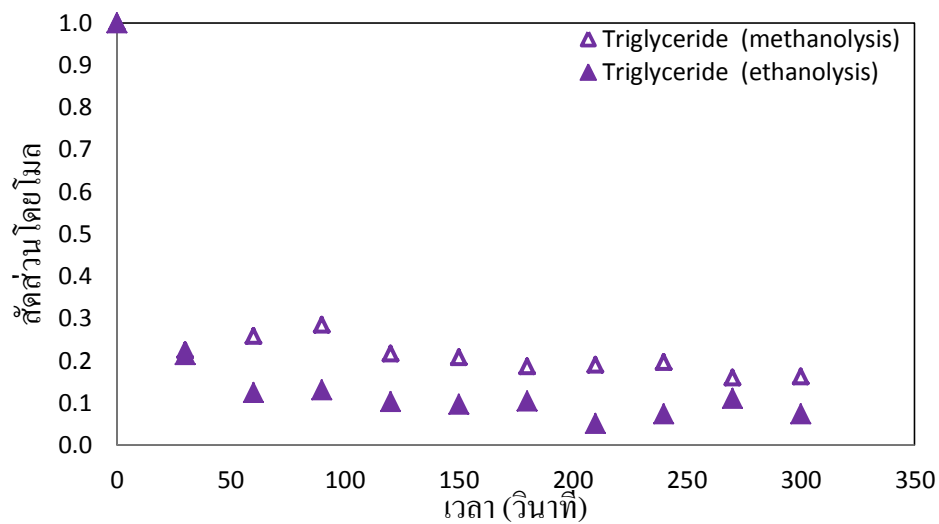
ภาพที่ 4-30 สัดส่วนโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ในขณะเดียวกันปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดจากไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับ แอลกอฮอล์ มีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณไตรกลีเซอไรด์จะลดลงเมื่อถูกใช้ในการเปลี่ยนไปเป็นไตรกลีเซอไรด์ แสดงดังภาพที่ 4-31 ถึง 4-34 ณ เวลาเดียวกัน ปริมาณของ

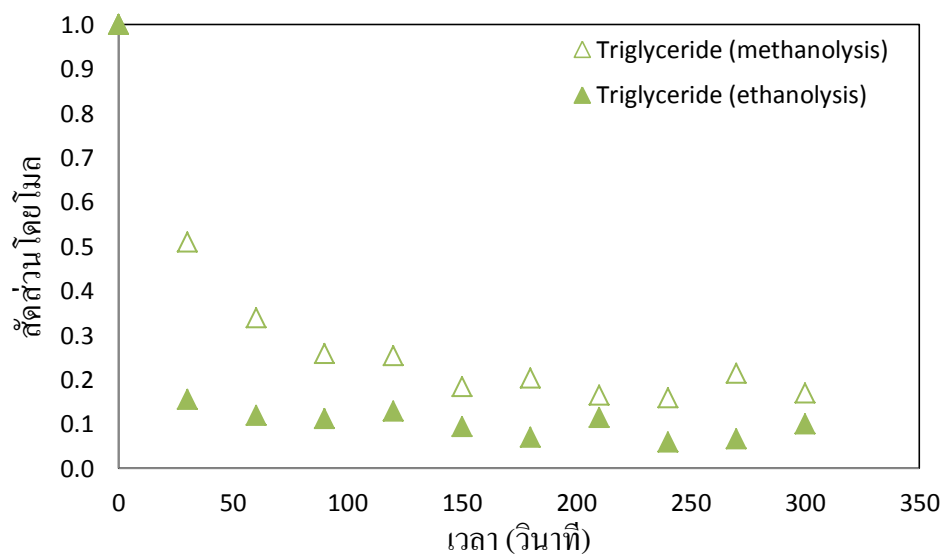
ไตรกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสเหลืออยู่มากกว่าปฏิกิริยาเอทาโนไลซิส หมายความว่าไตรกลีเซอไรด์ที่ใช้ในปฏิกิริยาเอทาโนไลซิสถูกใช้ในการทำปฏิกิริยามากกว่าในปฏิกิริยาเมทาโนไลซิส ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่ลดลงมากกว่าแสดงว่าไตรกลีเซอไรด์ถูกเปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์ มอนอกลิเซอไรด์มากกว่า ซึ่งไดกลีเซอไรด์ มอนอกลิเซอไรด์ ในปฏิกิริยาเอทาโนไลซิสมีปริมาณมากกว่าโดยไดกลีเซอไรด์ มอนอกลิเซอไรด์ เป็นสารลดแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นถ้ามีมากกว่าทำให้ปฏิกิริยาเอทาโนไลซิสเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าปฏิกิริยาเมทาโนไลซิส



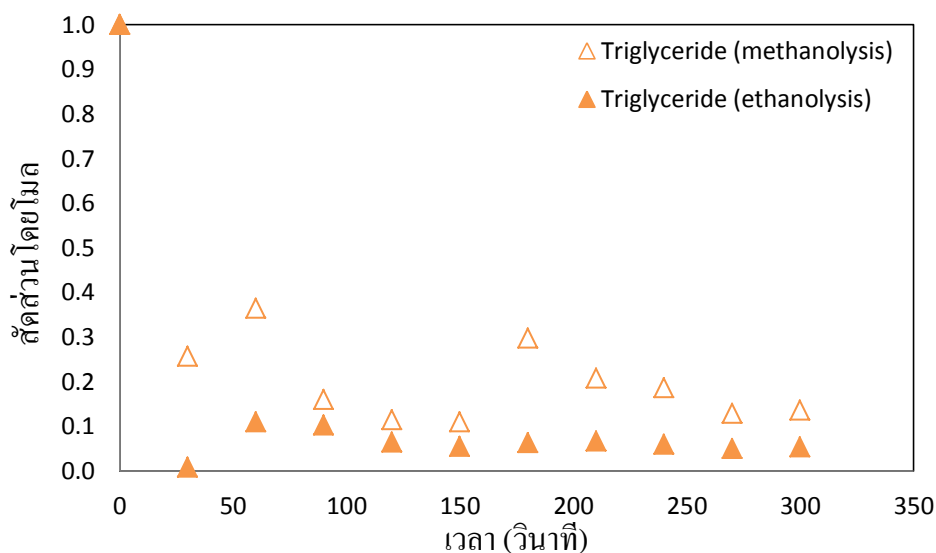
ภาพที่ 4-31 สัดส่วนโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-32 สัดส่วนโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

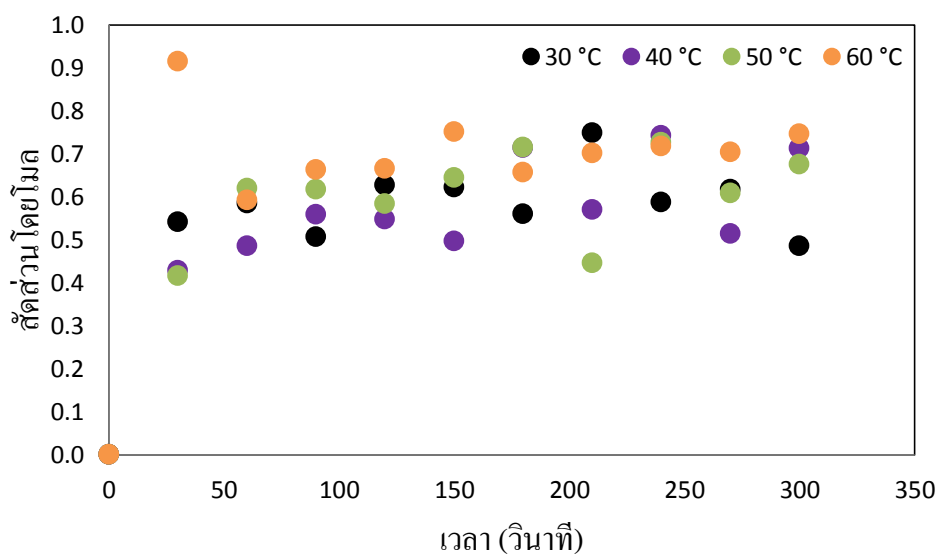


ภาพที่ 4-33 สัดส่วนโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

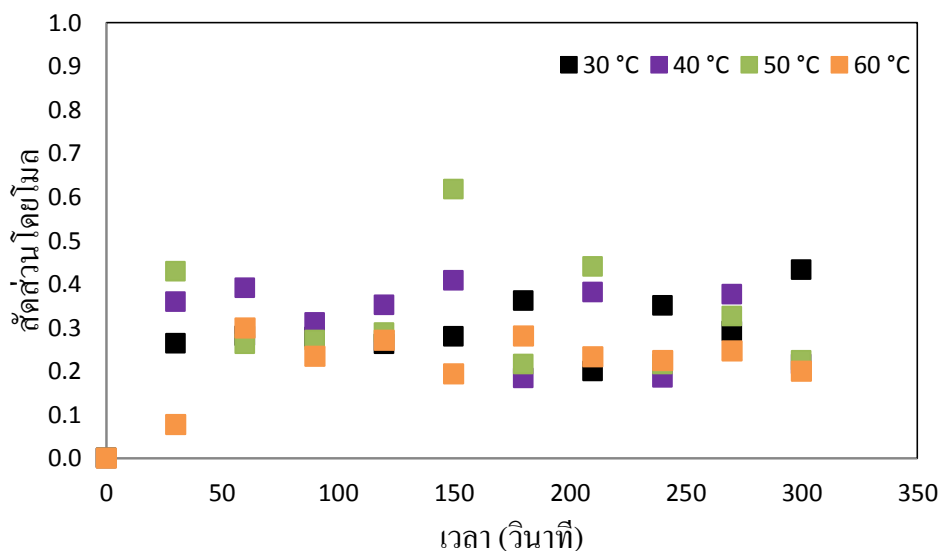


ภาพที่ 4-34 ร้อยละ โดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

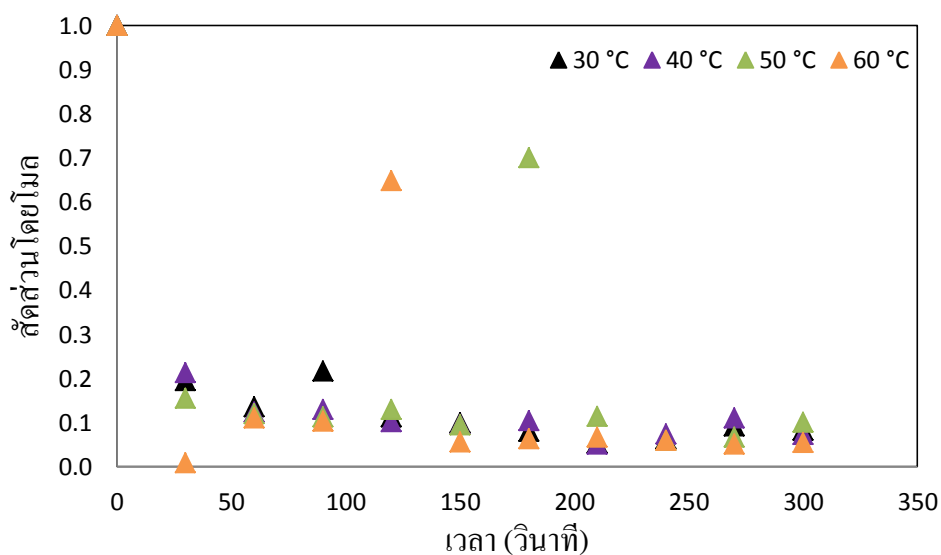
หากพิจารณาปฏิกิริยาเอทานอลิซิสเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิพบว่าปริมาณมอนอกลิเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 4-35 ปริมาณไดกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 4-36 และไตรกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 4-37 อุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อยที่จะทำให้ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ไดกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม และมีผลเพียงเล็กน้อยที่ทำให้ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ลดลงมากกว่าเดิม



ภาพที่ 4-35 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ของปฏิกิริยาเอทานอลิซิส

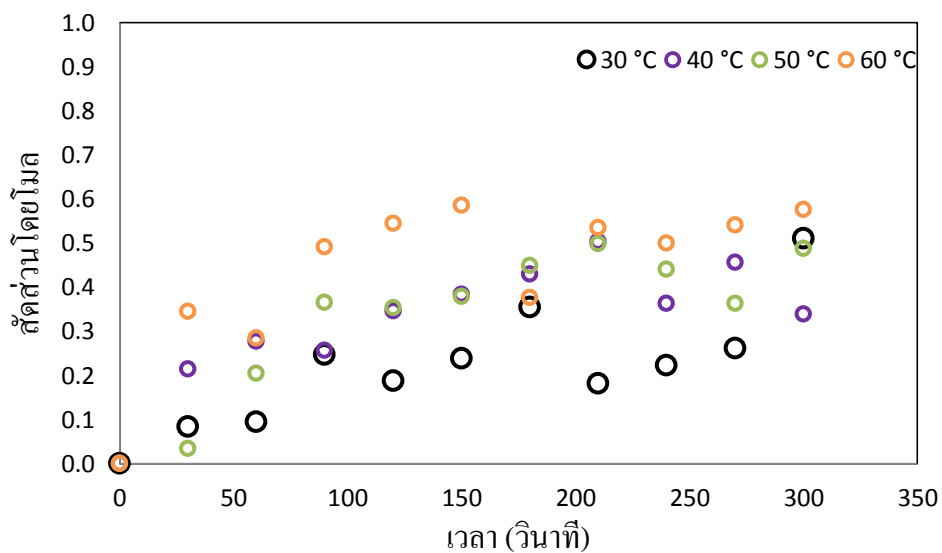


ภาพที่ 4-36 สัดส่วนโดยโมลของไคกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาเอทานอลाइซิส

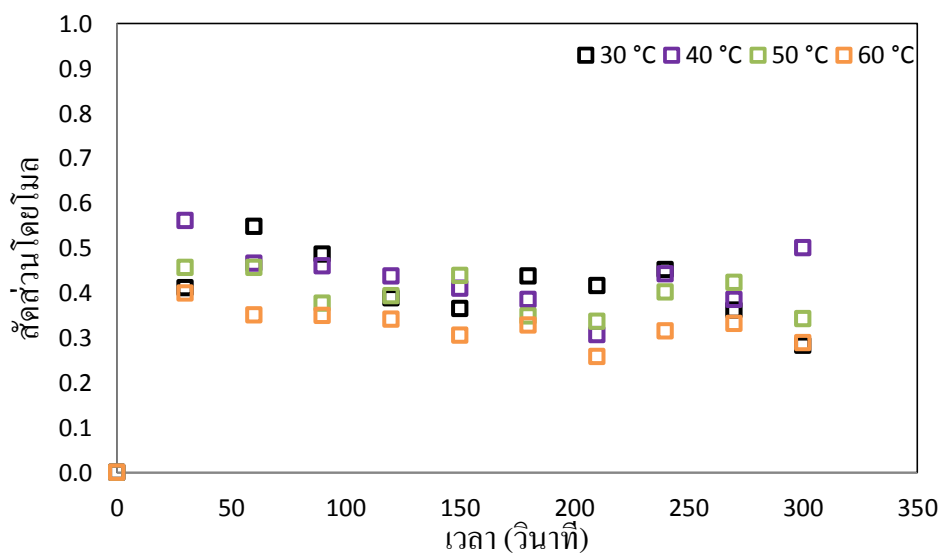


ภาพที่ 4-37 สัดส่วนโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยาเอทานอลाइซิส

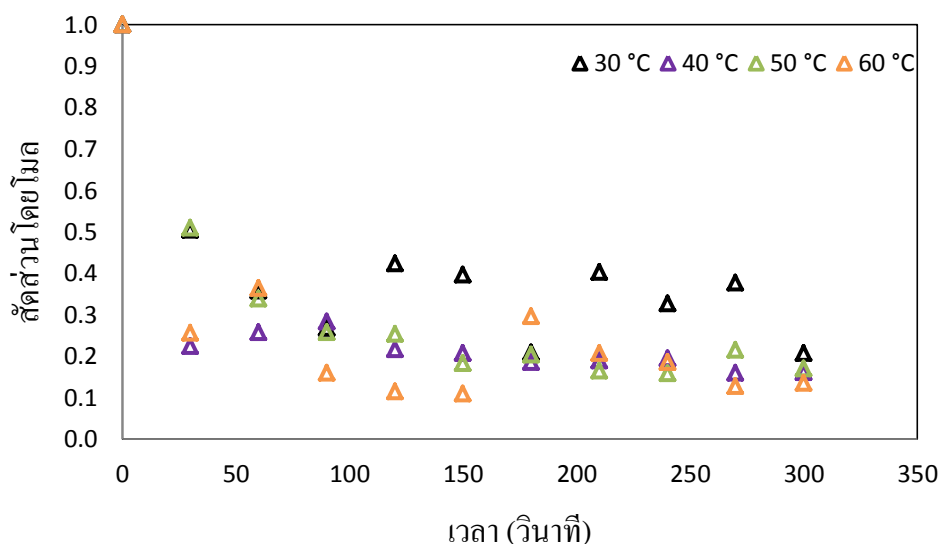
เช่นเดียวกันปฏิกิริยาเอทานอลाइซิสเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิปริมาณมอนอกลิเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 4-38 ปริมาณไคกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 4-39 และ ไตรกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 4-40 พบว่า อุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อยที่จะทำให้ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม และอุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อยที่จะทำให้ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ลดลงมากกว่าเดิม



ภาพที่ 4-38 สัดส่วนโดยโมลของมอนอกลิเซอไรด์ของปฏิกิริยามาทานอไลซิส



ภาพที่ 4-39 สัดส่วนโดยโมลของไดคลอไรด์ของปฏิกิริยามาทานอไลซิส



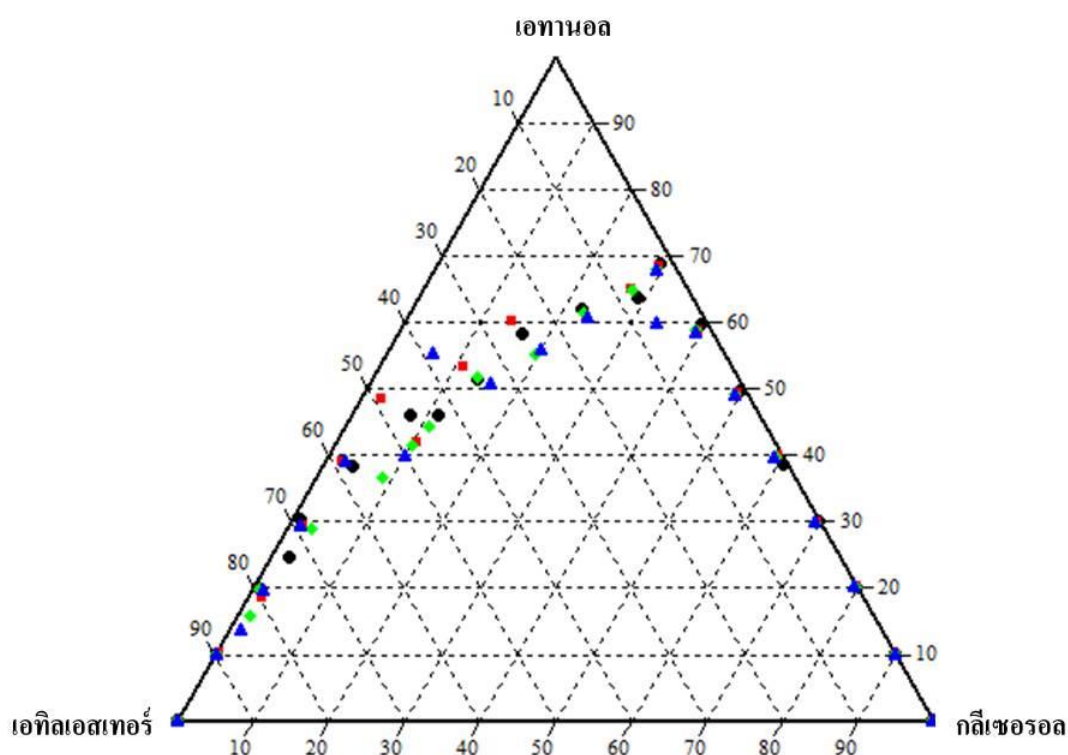
ภาพที่ 4-40 สัดส่วนโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์ของปฏิกิริยามาทานโอไลซิส

พิจารณาปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาเอทานโอไลซิสและเมทานโอไลซิสสอดคล้องกับการศึกษาพฤติกรรมวฏภาค เนื่องจากในช่วงเวลา 60 วินาทีของทุกอุณหภูมิของปฏิกิริยาเอทานโอไลซิสจะเข้าสู่มีลชันเร็วกว่าปฏิกิริยามาทานโอไลซิส และเมื่อตรวจสอบหาปริมาณ มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ก็พบว่า ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ของปฏิกิริยาเอทานโอไลซิสนั้นมีมากกว่าปฏิกิริยามาทานโอไลซิส ทั้งนี้ยังรวมไปถึงปฏิกิริยาเอทานโอไลซิสมีปริมาณไตรกลีเซอไรด์น้อยกว่าปฏิกิริยามาทานโอไลซิส ซึ่งการลดลงของปริมาณไตรกลีเซอไรด์นี้หมายถึงการที่ไตรกลีเซอไรด์เปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์ มอนอกลิเซอไรด์มากกว่าปฏิกิริยามาทานโอไลซิส ผลการทดลองสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา (Yow & Liew, 1999; Nouredini & Zhu, 1997; Doell, Konar & Boocock, 2008) การที่มีปริมาณไดกลีเซอไรด์ มอนอกลิเซอไรด์เกิดขึ้นมากหมายถึงมีสารลดแรงตึงผิวอยู่ระหว่างไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์มาก ทำให้สารทั้งสองเข้าสู่มีลชันได้เร็ว การเข้าสู่มีลชันเร็วทำให้สารตั้งต้นระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์มีโอกาสพบกันมากขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเร็วขึ้นได้ผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น

การเพิ่มอุณหภูมิในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีผลเพียงเล็กน้อยที่ทำให้มอนอกลิเซอไรด์เพิ่มมากขึ้น หรือไตรกลีเซอไรด์ลดลง เช่นเดียวกับการศึกษาพฤติกรรมวฏภาคที่อุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อยในการเข้าสู่มีลชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

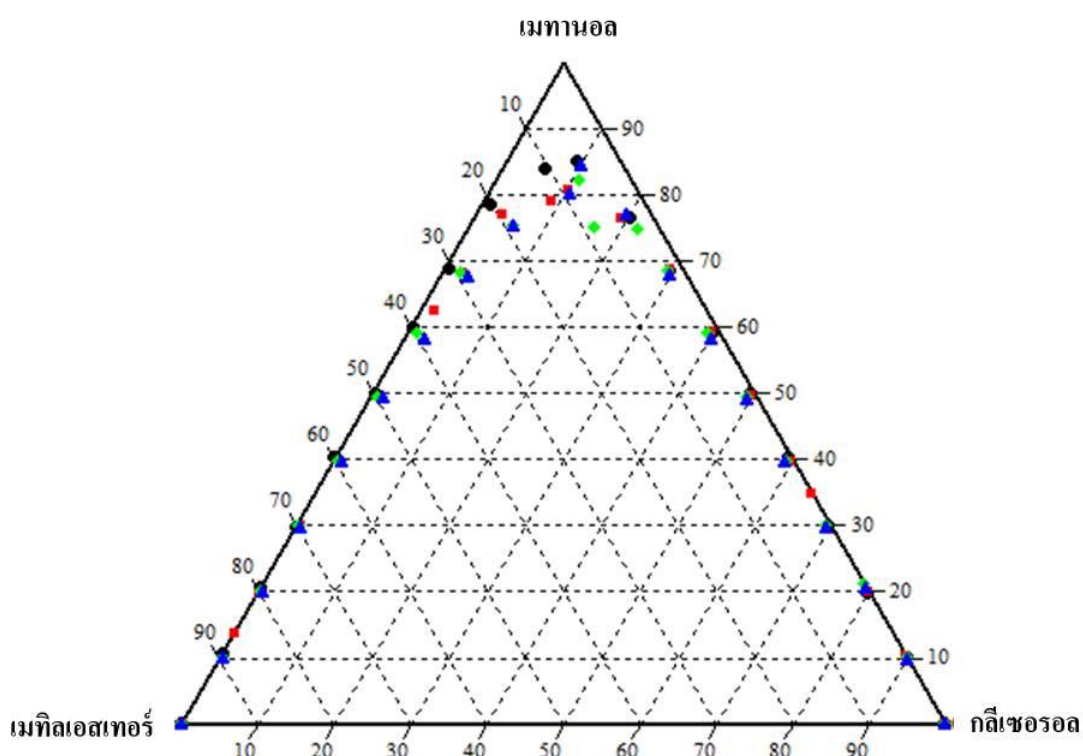
การหาเส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบโดยการทดลองไทเทรต หาจุดขุ่น

การหาเส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบโดยการไทเทรตหาจุดขุ่น ทำการทดลองจากการเตรียมอัลคิลเอสเทอร์ผสมกับแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนที่สนใจศึกษา ไทเทรตด้วยกลีเซอรอล อีกระบบ คือ เตรียมกลีเซอรอลกับแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนที่สนใจ ไทเทรตด้วยอัลคิลเอสเทอร์ ปรากฏดังภาพที่ 4-41 คือ สมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบของระบบเอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเส้นโค้งการละลายลดต่ำลงแต่ต่ำลงไม่มาก แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการละลายระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Liu , Piao, Wang & Zhu, 2008, Da Silva et. al., 2013, De Azevedo Rocha, Follegatti Romero, Duvoisin & Aznar, 2014) ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการแยกวัฏภาคระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลจะแยกยากขึ้นเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 4-41 เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบ เอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอลอุณหภูมิ (●)30 (■)40 (◆)50 และ (▲)60 องศาเซลเซียส

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เส้นโค้งการละลายของสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ ระบบเมทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอลไม่ได้แตกต่างกันมาก (Andreatta et. al., 2013; Dongsri & Sookkumnerd, 2011; Lee, Lo & Lin, 2010; Oliveira et. al., 2011; Barreau et. al., 2010; Gunvachai, Hassan, Shama & Hellgardt, 2007) ดังแสดงในภาพที่ 4-42 เช่นเดียวกับระบบเอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล



ภาพที่ 4-42 เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบ เมทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอลอุณหภูมิ (●)30 (■)40 (◆)50 และ (▲)60 องศาเซลเซียส

แผนภาพเส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบของทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์การศึกษาพฤติกรรมวิภูภาคซึ่ง เมื่อเวลาผ่านไป 180 วินาทีจะยังไม่เกิดการแยกวิภูภาคระหว่างอัลคิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลเนื่องจากปริมาณแอลกอฮอล์ยังมีอยู่มาก สังเกตเส้นโค้งการละลายของสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบเอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล พบว่าถ้าปริมาณเอทานอลมีมากกว่าร้อยละ 68 โดยน้ำหนักในแผนภาพวิภูภาคจะอยู่ในช่วงการเป็นวิภูภาคเดียว คือ ไม่เกิดการแยกวิภูภาคระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล

ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลอง De Azevedo และคณะ (De Azevedo et. al., 2014) กล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เอทิลเอสเทอร์กลีเซอรอลละลายเข้ากับเอทานอล ซึ่งเอทานอลใช้ระยะเวลาในการแยกวัฏภาคระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลเพราะถ้าเอทานอลยังคงเหลืออยู่ในปฏิกิริยามากกว่าร้อยละ 68 โดยน้ำหนัก จึงยังไม่มีปรากฏการแยกวัฏภาคระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลให้เห็น

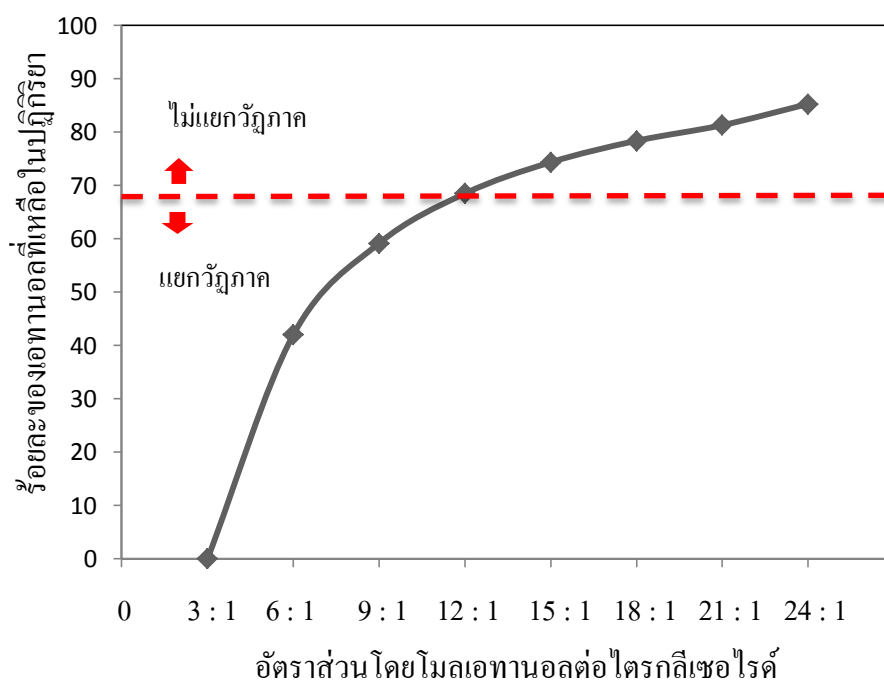
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเส้นโค้งการละลายของสมดุลของเหลวทั้งสองระบบลดต่ำลงแต่ไม่ได้แตกต่างกันมาก กล่าวได้ว่าอุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อยในการแยกวัฏภาคระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล

การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ให้มากขึ้น จากปฏิกิริยาหลักคือแอลกอฮอล์ 3 โมล ต่อ ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมลไปเป็นแอลกอฮอล์ 6 โมล ต่อ ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมลหรืออัตราส่วนของแอลกอฮอล์มากกว่า 6 โมลต่อ ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล ซึ่งการเพิ่มจำนวนโมลของแอลกอฮอล์มากขึ้นเพื่อจะเพิ่มผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้นตามกฎของเลอ ชาเตอลิเย ซึ่งกล่าวว่า เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลถูกรบกวน โดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะสมดุลของระบบ ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่จะลดผลของการรบกวนนั้น เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง แต่กลับพบว่า การเพิ่มแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปไม่ใช่ผลดี ผลการวิจัย (Encinar, González, Rodriguez & Tejedor, 2002 และ Giovanilton, Fernando & Andrea, 2011) ระบุว่า การใช้เอทานอลมากเกินไปซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลเอทานอลต่อ ไตรกลีเซอไรด์ตั้งแต่ 9 ต่อ 1 ถึง 12 ต่อ 1 เหมาะสมที่จะใช้ในการทำปฏิกิริยาเอทานอลไลซิสเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์มากในระยะเวลาสั้น แต่ถ้าอัตราส่วนโดย โมลของเอทานอลต่อน้ำมันมากกว่า 12 ต่อ 1 จะส่งผลทำให้กลีเซอรอลละลายในวัฏภาคเอทิลเอสเทอร์มาก ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์น้อยลง นอกจากนี้การวิจัย (Xue, Mu, Mao, Yang & Xiu, 2014) ยังศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมันพืชตั้งแต่ 3 ต่อ 1 ถึง 25 ต่อ 1 พบว่าการใช้เอทานอลมากเกินไปกว่า 12 โมล ขึ้นไปส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ลดลง จากข้อมูลเส้นโค้งการละลายของสมดุลของเหลว-ของเหลว

สามารถประกอบระบบ เอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล แสดงให้เห็นว่าถ้ามีปริมาณเอทานอลมากเกินไปอยู่ในระบบ จะส่งผลให้ไม่แยกวัฏภาคระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล

การเพิ่มเอทานอลที่เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเอทานอลไลซิสเพื่อจะได้เอทิลเอสเทอร์มากขึ้น ส่งผลให้เอทานอลเหลืออยู่ภายในระบบมากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุให้เอสเทอร์แยกวัฏภาคกับกลีเซอรอลยาก การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมันพืชทำให้มีเอทานอลเหลืออยู่ในปฏิกิริยาเอทานอลไลซิสแสดงดังภาพที่ 4-43 พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมันพืช

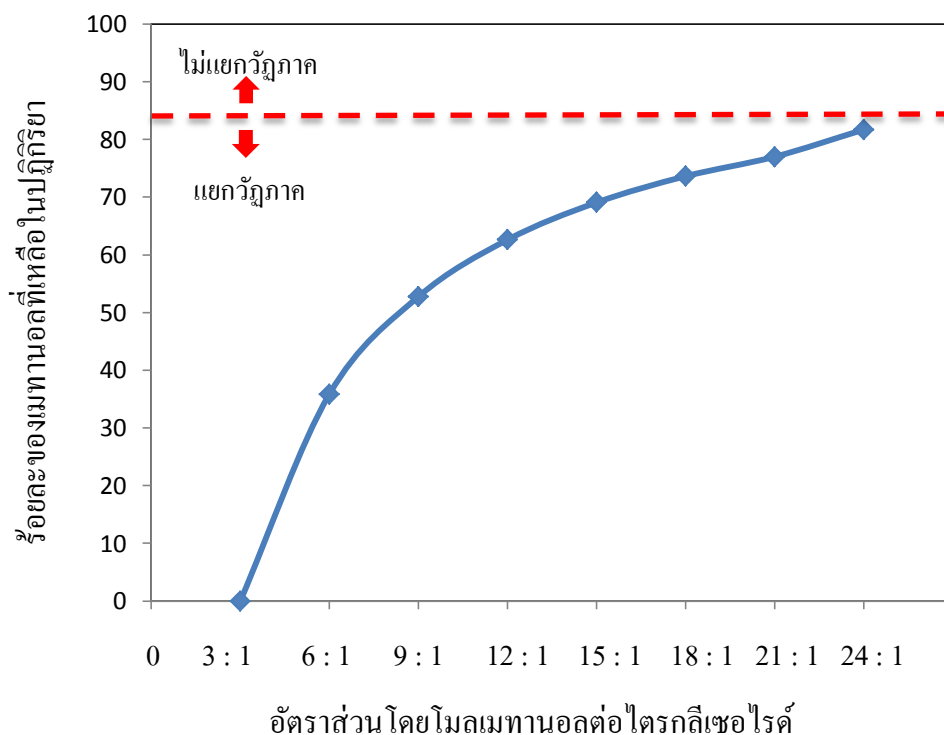
มากกว่า 12 ต่อ 1 ส่งผลให้เอทานอลเหลืออยู่ในระบบมากกว่าร้อยละ 68 โดยน้ำหนัก จากข้อมูลของเส้นโค้งการละลายของสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบเอทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอลจะพบว่าถ้ามีแอลกอฮอล์เกินร้อยละ 68 โดยน้ำหนักจะทำให้เอสเทอร์กับกลีเซอรอลไม่แยกวัฏภาคกัน จึงเป็นเหตุผลว่าไม่ควรใช้อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมันเกินกว่า 12 ต่อ 1 เพราะจะทำให้ได้ร้อยละผลได้ของเอสเทอร์น้อยลง



ภาพที่ 4-43 การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่เหลือในปฏิกิริยาเอทานอล-ไตรกลีเซอไรด์เมื่อทำปฏิกิริยาสมบูรณ์

เส้นโค้งการละลายของสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบเอทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอลพบว่า หากปริมาณเอทานอลเหลืออยู่ในปฏิกิริยามากกว่าร้อยละ 84 โดยน้ำหนัก ในแผนภาพวัฏภาคก็จะกลายเป็นวัฏภาคเดียวกัน ดังนั้นจากเส้นโค้งการละลายของสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบเอทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล สอดคล้องกับการศึกษาของ Musa (Musa, 2016) ที่พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเอทานอล-ไตรกลีเซอไรด์อยู่ในช่วง 3 ต่อ 1 ถึง 9 ต่อ 1 และการศึกษา Vyas และคณะ (Vyas, Verma & Subrahmanyam 2011) พบว่า อัตราส่วนของเอทานอลต่อน้ำมันคือ 12 ต่อ 1 ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด ในช่วงระยะเวลา 30 นาที อย่างไรก็ตาม Gülyurt et. al. (2016)

กล่าวว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมากขึ้น เขาพบว่า อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของเมทานอลต่อน้ำมัน คือ 8 ต่อ 1 ถึง 9 ต่อ 1 ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์จะลดลง เมื่อ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันมากกว่า 11 ต่อ 1 ขึ้นไป

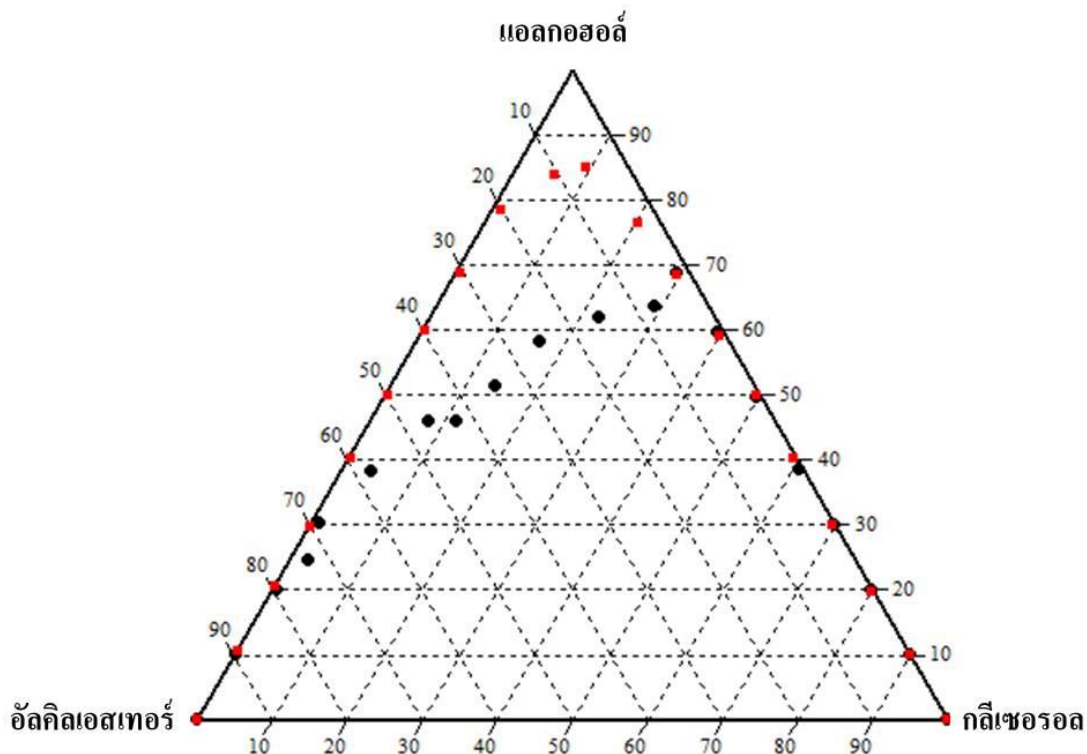


ภาพที่ 4-44 การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลที่เหลือในปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสเมื่อทำปฏิกิริยาสมบูรณ์

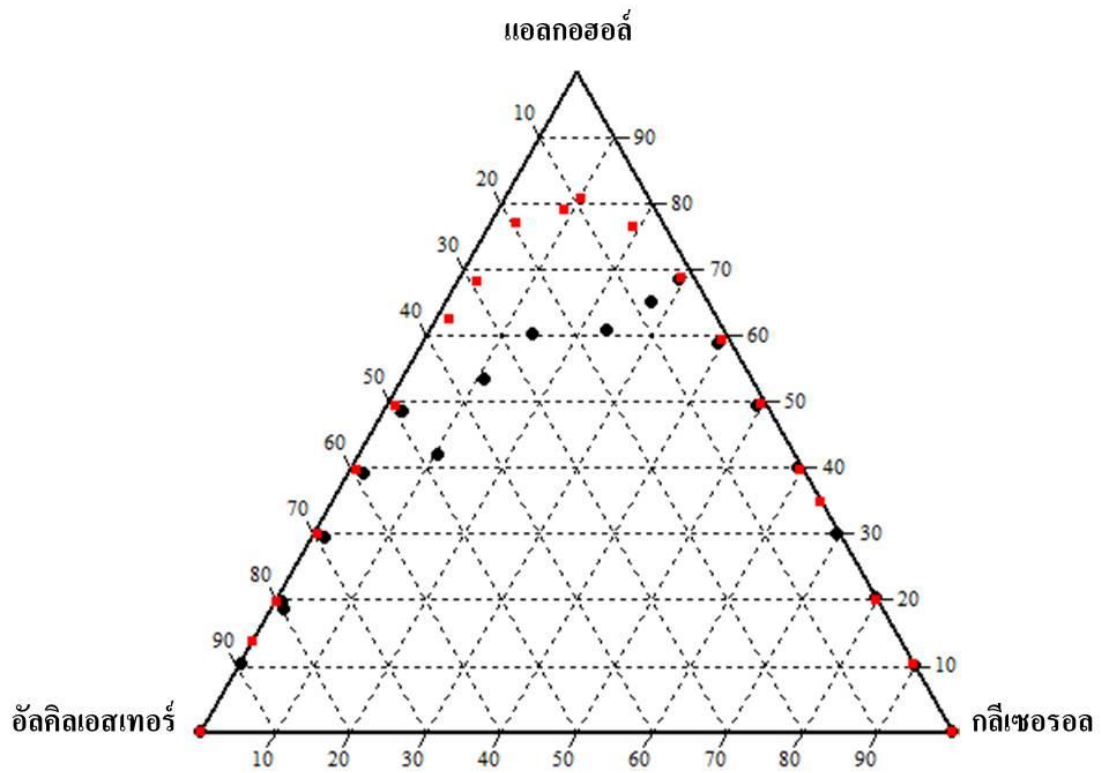
เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเพื่อจะทำให้ได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้น ภาพที่ 4-44 แสดงร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลที่เหลือในปฏิกิริยาเมทาโนไลซิสพบว่า แม้จะใช้อัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเป็น 24 ต่อ 1 ก็ตามร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลที่เหลืออยู่ในระบบก็ยังไม่เกิน 84 จากข้อมูลเส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบระบบ เมทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล พบว่ายังคงอยู่ในช่วงที่มีการแยกวัฏภาคระหว่างเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลอยู่

เส้นโค้งการละลายของของเหลวสามองค์ประกอบระบบเอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอลและระบบเมทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4-45 ถึง 4-48 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการแยกวัฏภาคระหว่างเส้นโค้ง

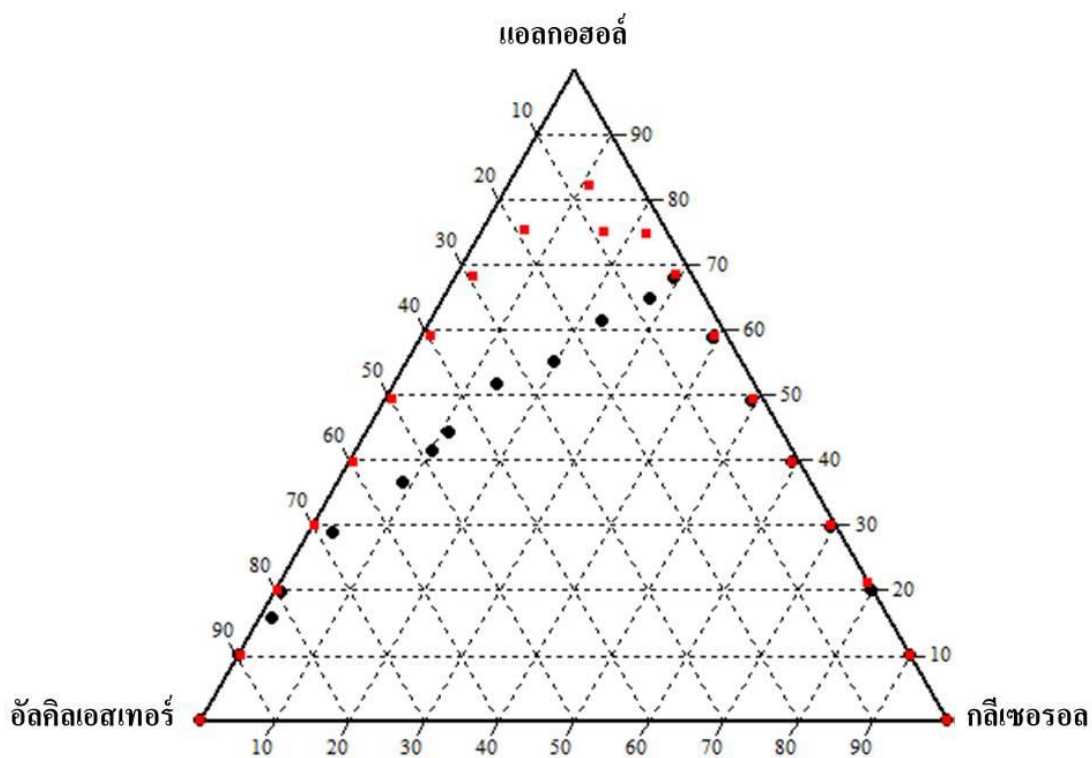
การละลายของของเหลวสามองค์ประกอบระบบเอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอลต่ำกว่าเส้น
 โคน้ำการละลายของเหลวสามองค์ประกอบระบบเมทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล
 หมายความว่า การแยกวัฏภาคระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลยากกว่าเมทิลเอสเทอร์กับ
 กลีเซอรอล



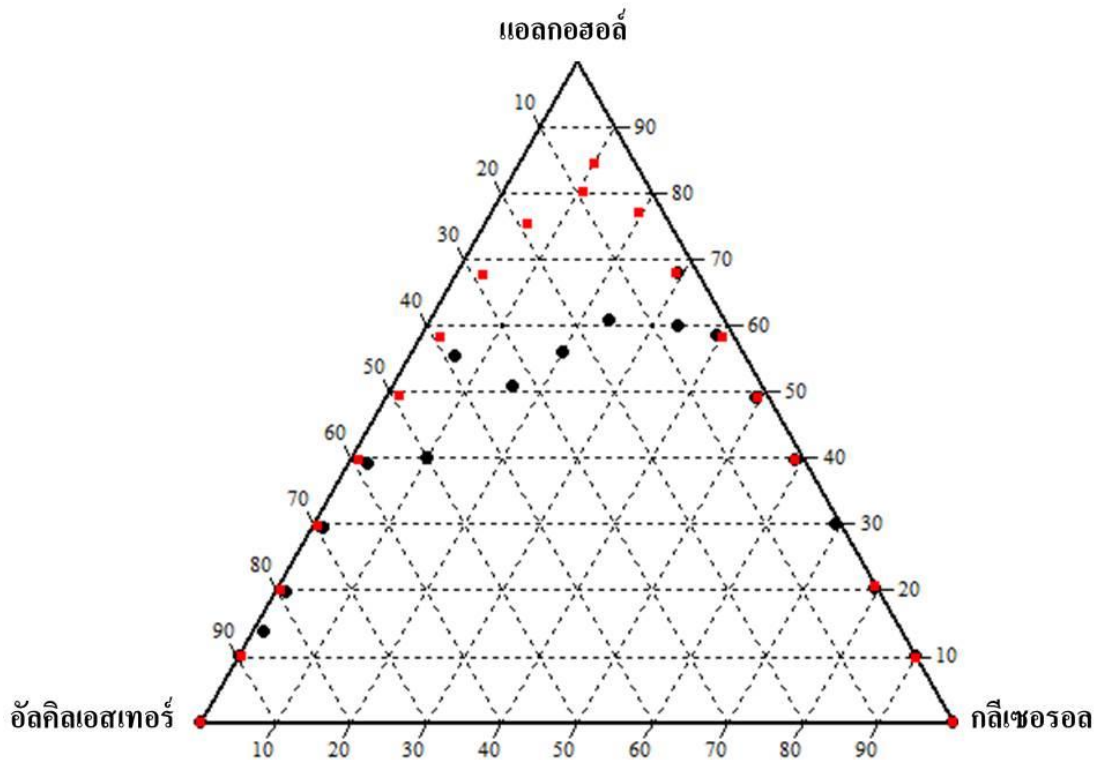
ภาพที่ 4-45 เส้น โคน้ำการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ (●)ระบบ เอทานอล-
 เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล (■) ระบบ เมทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล อุณหภูมิ
 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-46 เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ (●) ระบบ เอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล (■) ระบบ เมทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



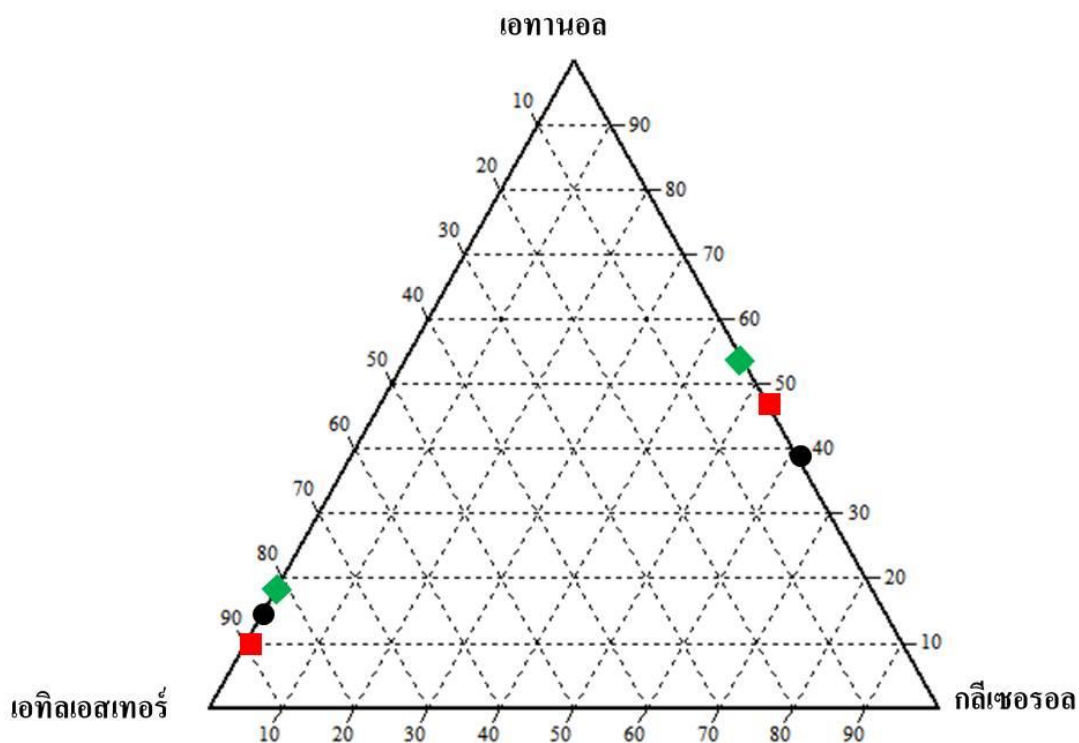
ภาพที่ 4-47 เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ (●)ระบบ เอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล (■) ระบบ เมทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



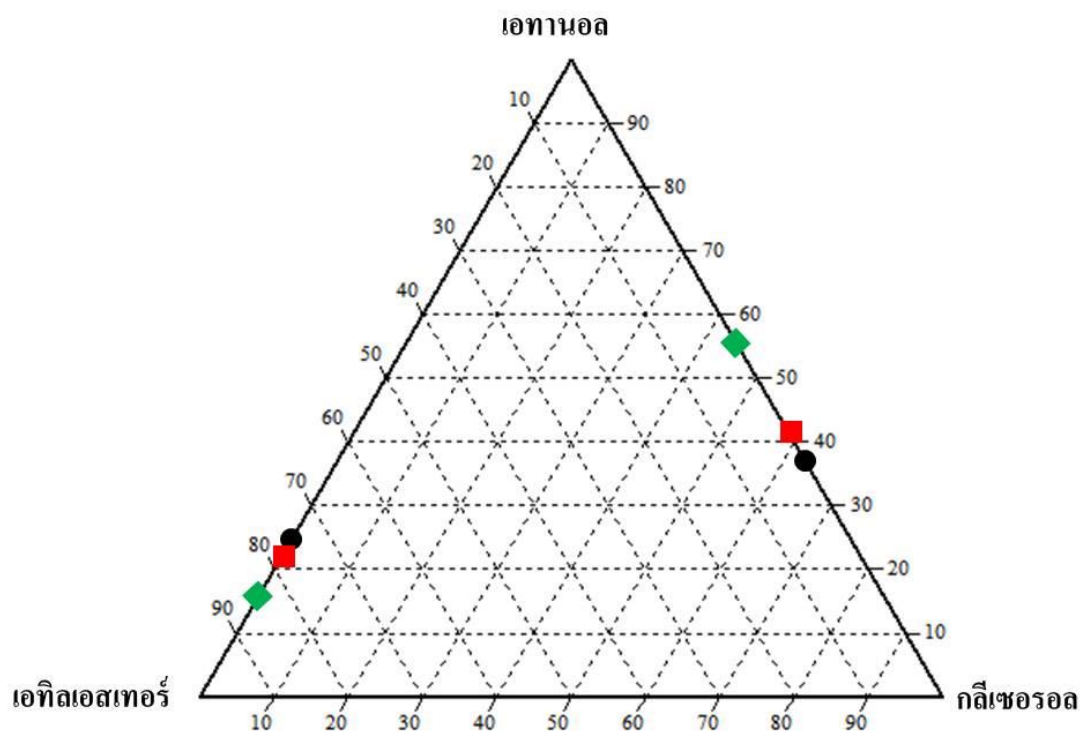
ภาพที่ 4-48 เส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ (●) ระบบ เอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล (■) ระบบ เมทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

การละลายของแอลกอฮอล์

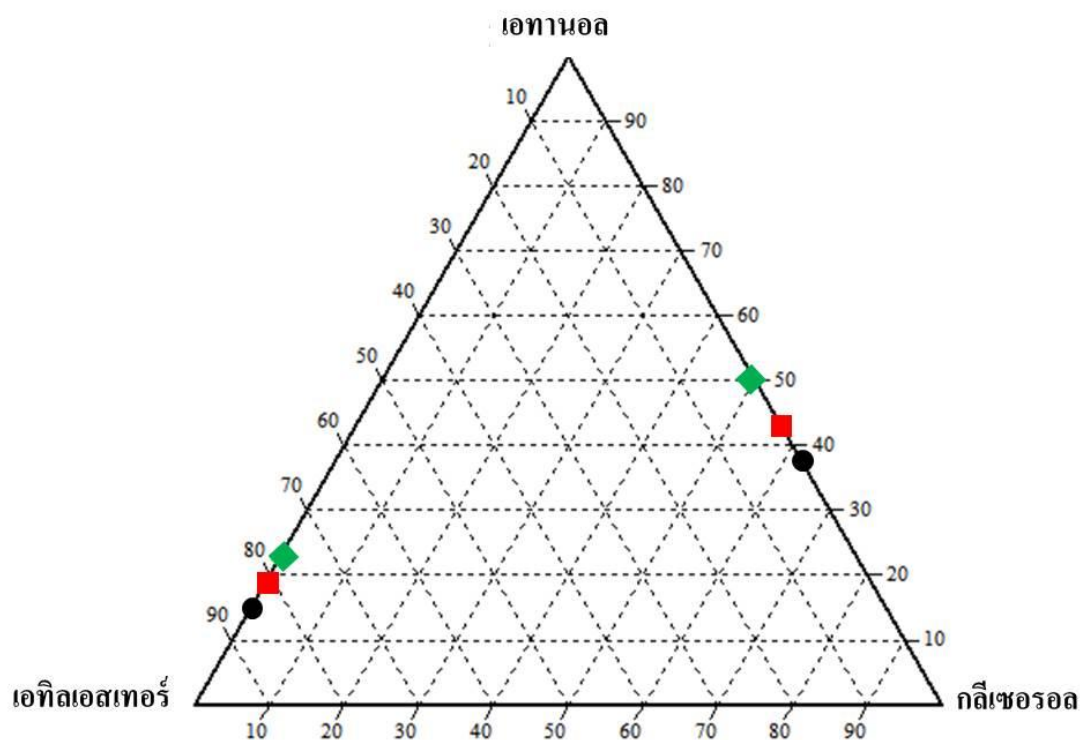
การละลายของแอลกอฮอล์ในวัฏภาคอัลคิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลเกิดจากการนำแอลกอฮอล์ อัลคิลเอสเทอร์และ กลีเซอรอลมาผสมกันในอัตราส่วนที่กำหนด กวนผสม 1 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้เพื่อรอแยกวัฏภาค 6 ชั่วโมง ผลการทดลองการละลายของเอทานอลในเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4-49 ถึง 4-52 ตามลำดับ พบว่าเอทานอลละลายในกลีเซอรอลได้ดีกว่าเอทิลเอสเทอร์ สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ Oliveira et. al., 2011 และ De Azevedo et. al., 2014



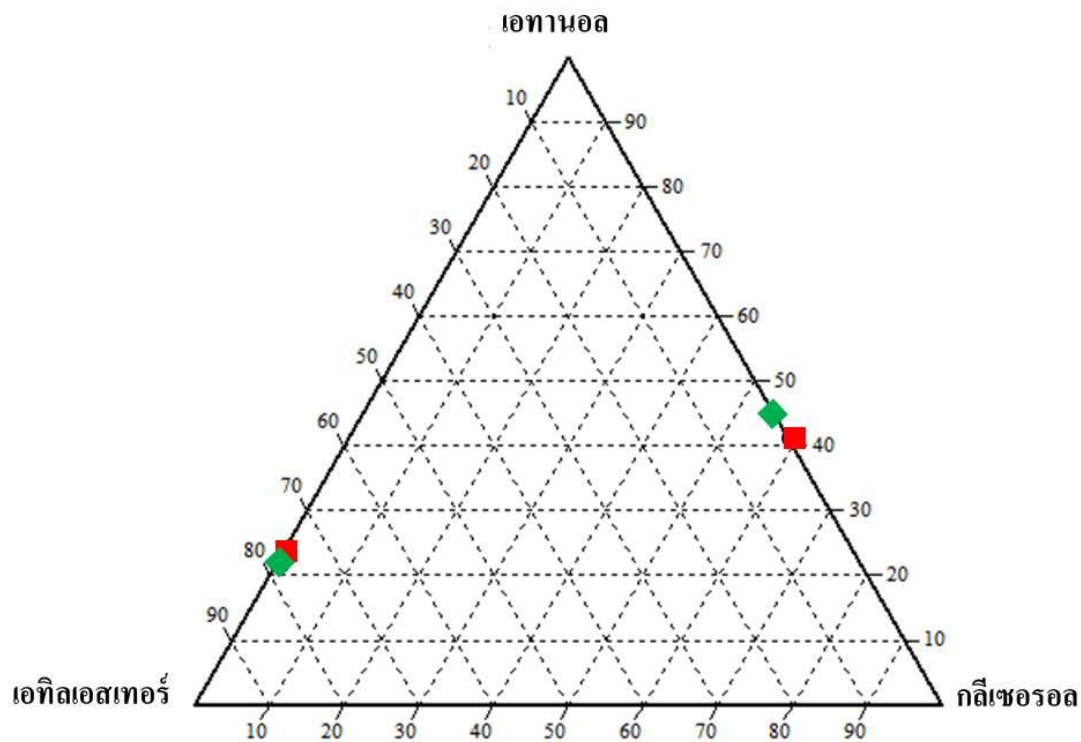
ภาพที่ 4-49 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และ
วัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-50 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และ
 วัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

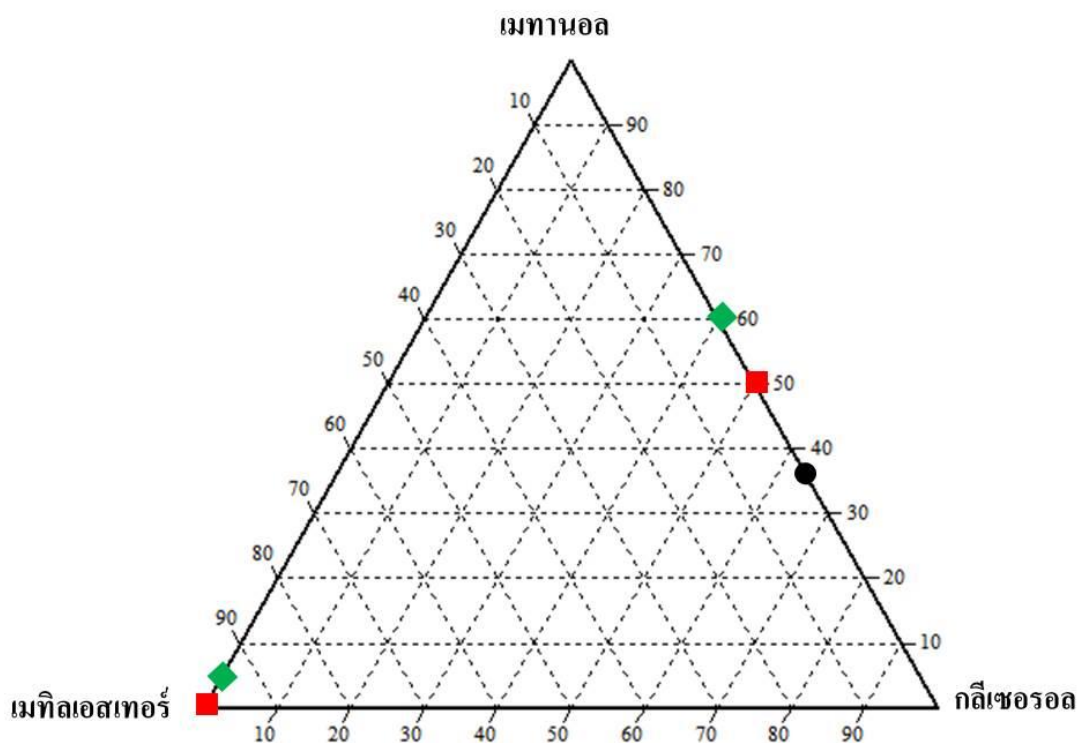


ภาพที่ 4-51 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และ
วัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

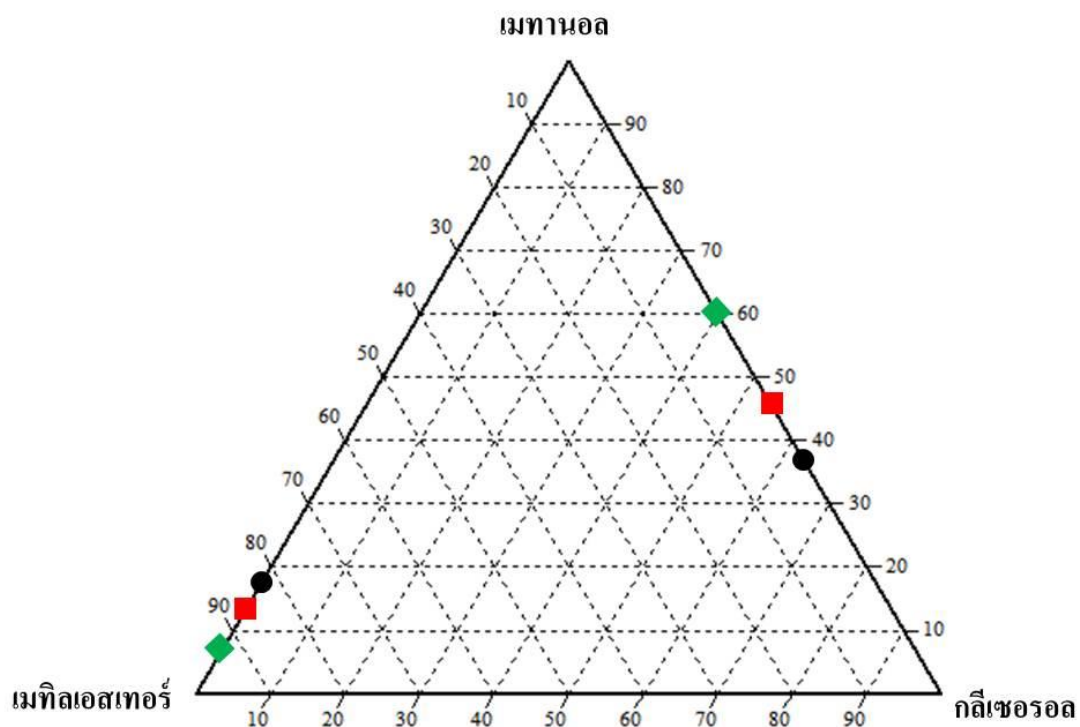


ภาพที่ 4-52 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และ
วัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

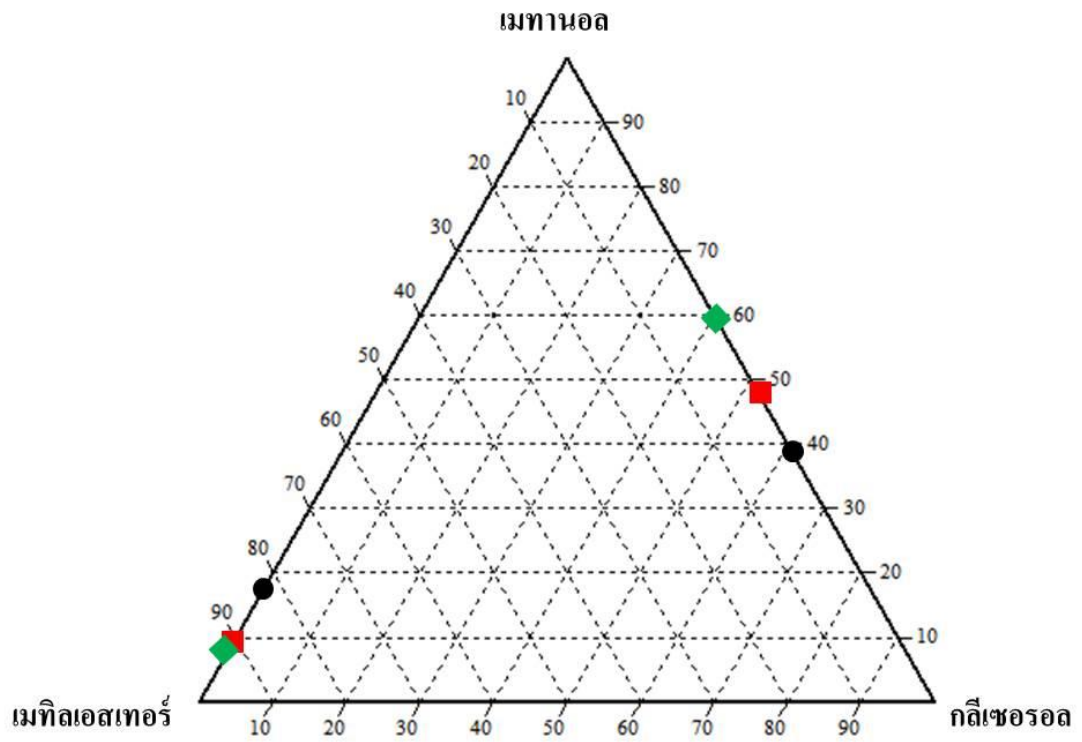
ภาพที่ 4-53 ถึง 4-56 การละลายของเมทานอลในวัฏภาคของเอทิลเอสเทอร์และ
กลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยผลการทดลองพบว่า
เมทานอลสามารถละลายในกลีเซอรอลได้ดีกว่าเมทิลเอสเทอร์



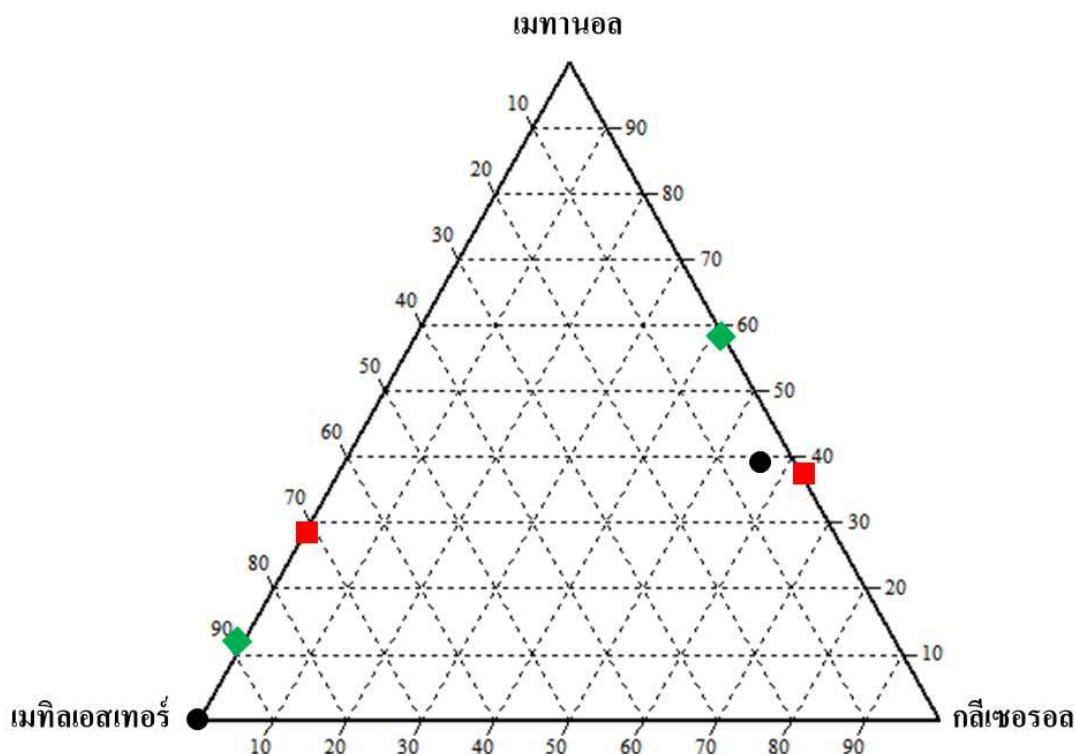
ภาพที่ 4-53 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-54 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-55 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

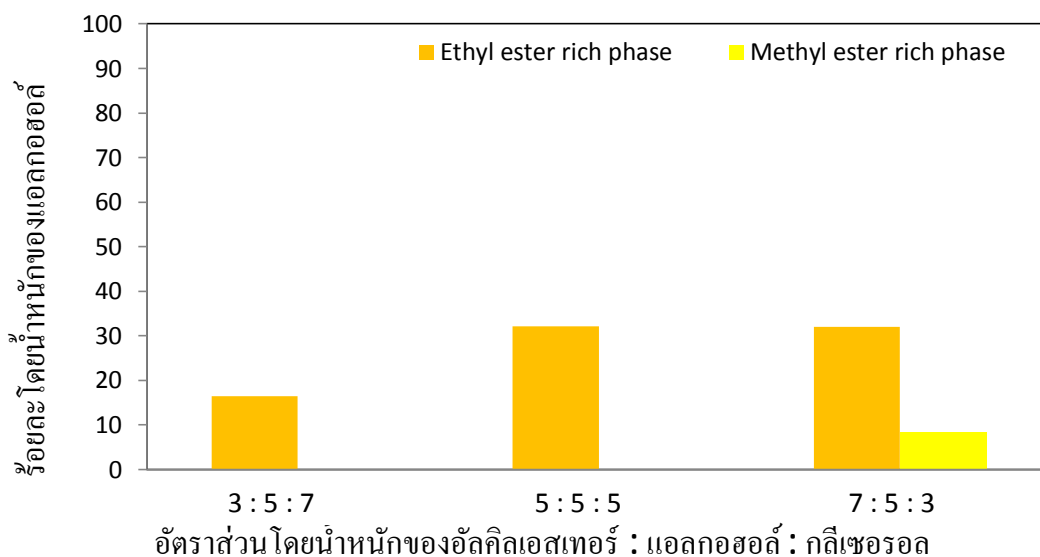


ภาพที่ 4-56 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

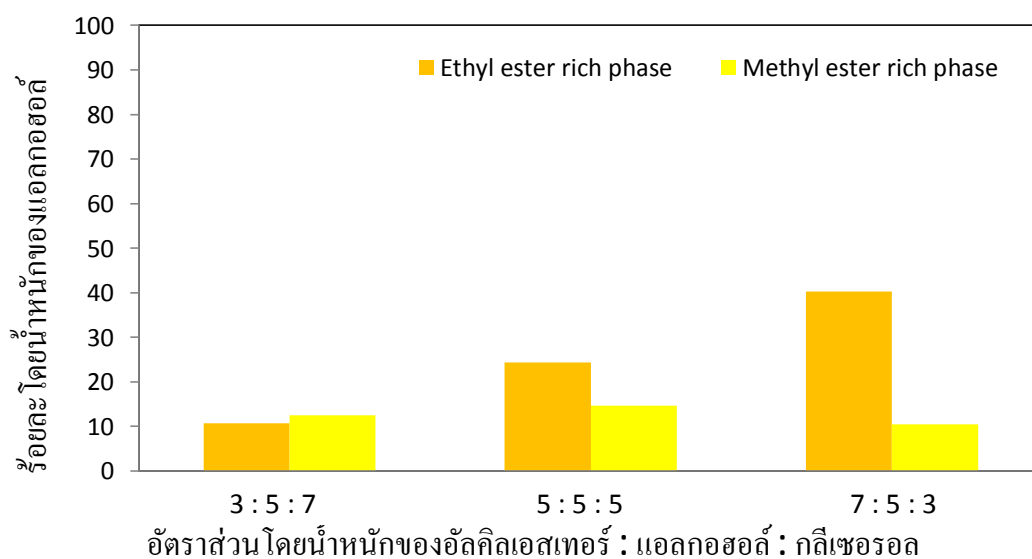
แอลกอฮอล์ละลายในกลีเซอรอลได้ดีกว่าในอัลคิลเอสเทอร์เนื่องจากค่าพารามิเตอร์การละลายของเอทานอลคือ $12.9 \text{ (cal/cm}^3)^{0.5}$ ค่าพารามิเตอร์การละลายของเอทานอล คือ $14.5 \text{ (cal/cm}^3)^{0.5}$ ใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์การละลายของกลีเซอรอล คือ $17.6 \text{ (cal/cm}^3)^{0.5}$ มากกว่าเอสเทอร์ โดยค่าพารามิเตอร์การละลายของเอทิลเอสเทอร์และเมทิลเอสเทอร์คือ 7.6 และ 8.4 $\text{(cal/cm}^3)^{0.5}$ ตามลำดับ เมื่อมีค่าพารามิเตอร์การละลายที่ใกล้เคียงกัน แทนค่าในสมการ (2-15) ผลต่างของค่าพารามิเตอร์การละลาย $(\delta_1 - \delta_2)^2$ ของสารทั้งสองจะส่งผลให้ $\Delta G_{\text{noncomb}}$ เข้าใกล้ศูนย์ หรือมีค่าน้อยกว่าศูนย์ การละลายเข้ากันของสารทั้งสองจะเกิดขึ้นเอง ทั้งนี้ยังสามารถกล่าวได้ว่า สารที่มีขั้วจะละลายในสารที่มีขั้ว สารที่ไม่มีขั้วจะละลายในสารที่ไม่มีขั้ว (Ye, Hao, Zhuhua & Dachuan, 2007)

เมื่อเปรียบเทียบเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคของเอทิลเอสเทอร์กับเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคของเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามภาพที่ 4-57 ถึง 4-60 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคของเอทิลเอสเทอร์มากกว่าร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคของเมทิลเอสเทอร์แม้ว่าปริมาณของ

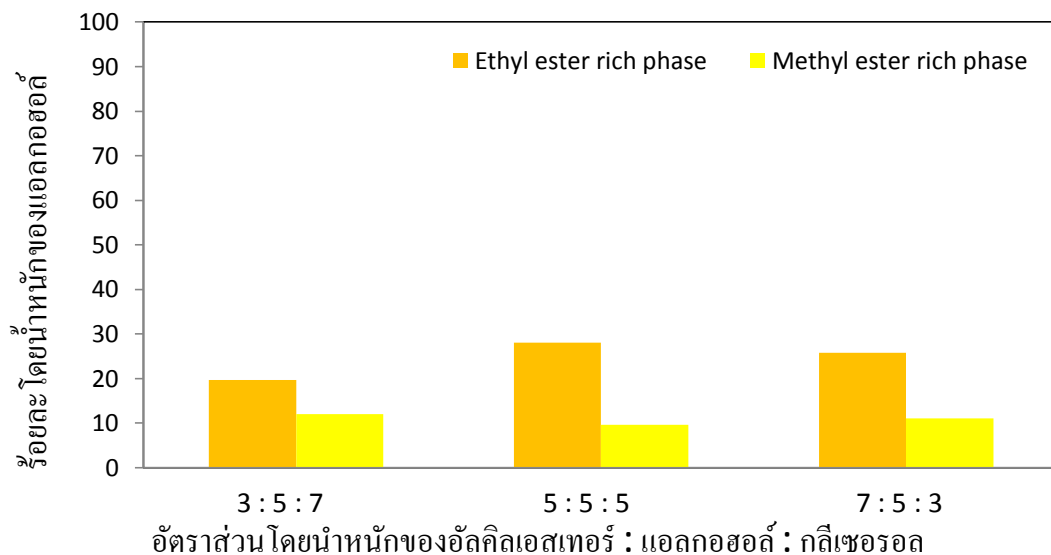
เมทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นก็ตาม ในทางกลับกันร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคของกลีเซอรอลน้อยกว่าเช่นกัน แสดงดังภาพที่ 4-61 ถึง 4-64



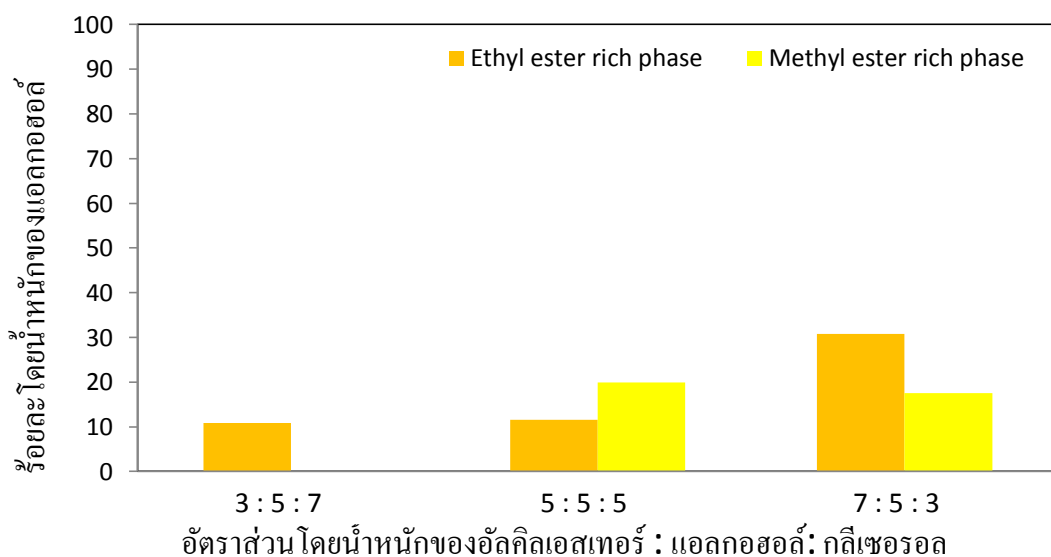
ภาพที่ 4-57 ร้อยละโดยน้ำหนักของแอลกอฮอล์ในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์ ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



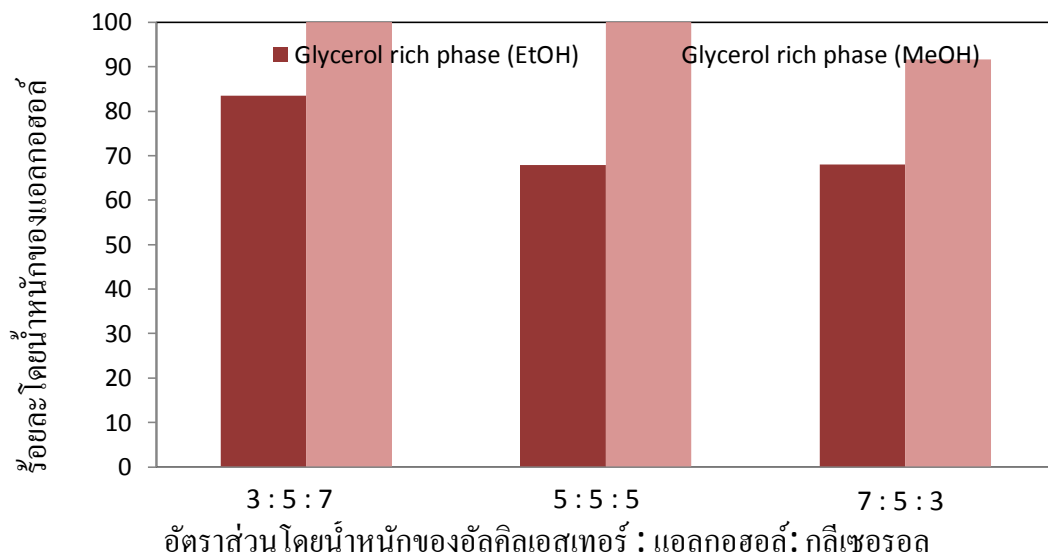
ภาพที่ 4-58 ร้อยละโดยน้ำหนักของแอลกอฮอล์ในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์ ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



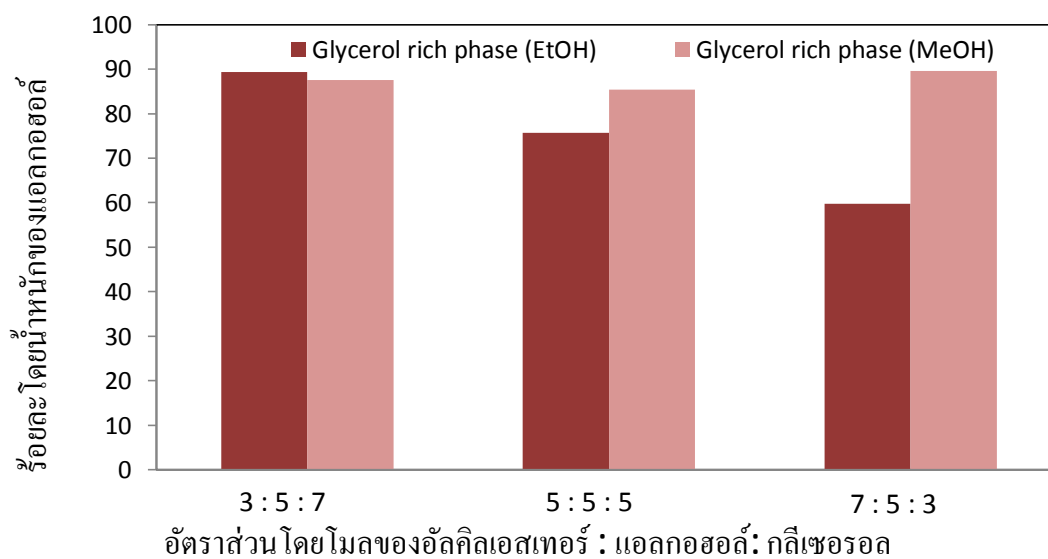
ภาพที่ 4-59 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทิลอะซิเตตในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลอะซิเตตและวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลอะซิเตต ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



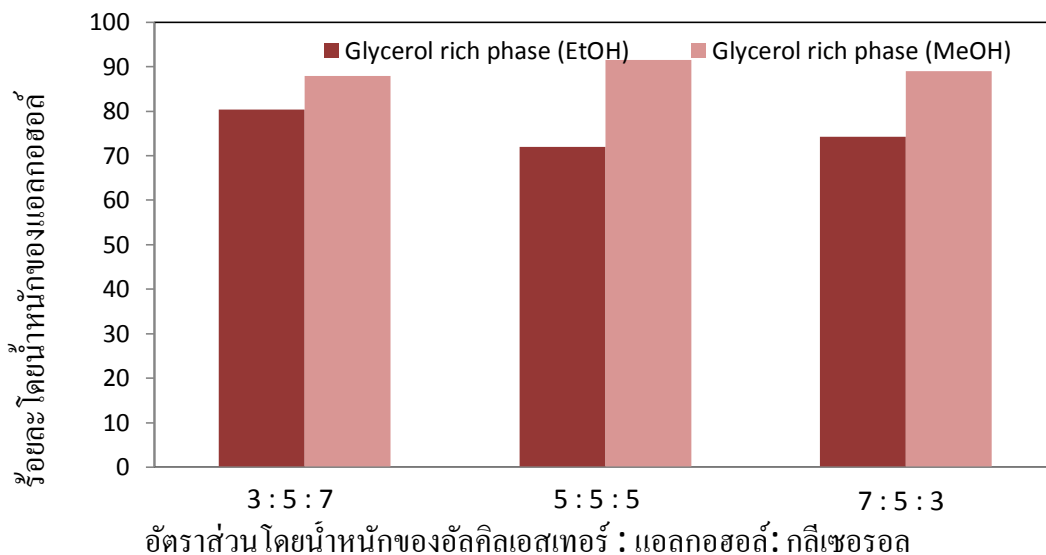
ภาพที่ 4-60 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทิลอะซิเตตในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลอะซิเตตและวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลอะซิเตต ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



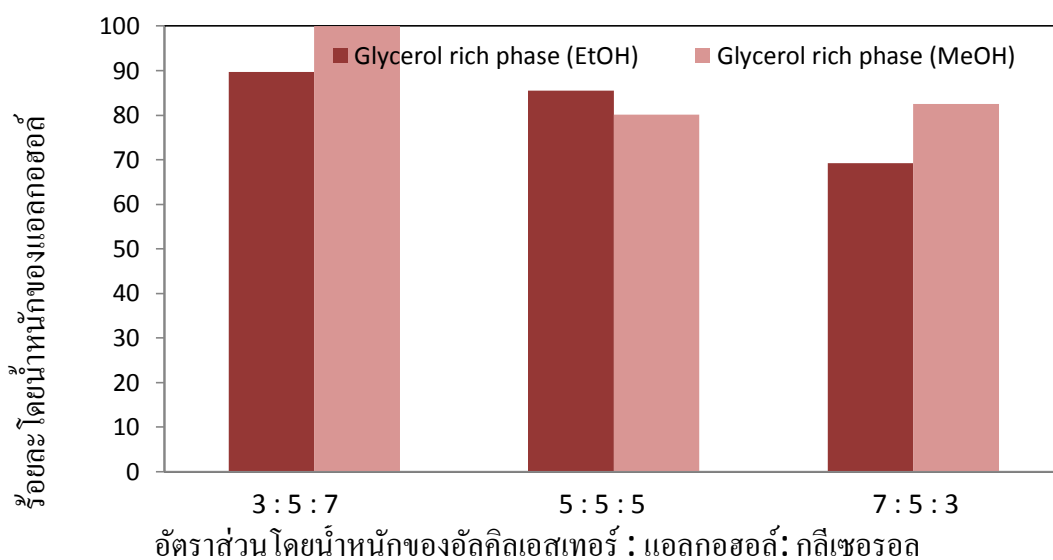
ภาพที่ 4-61 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลและเมทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-62 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลและเมทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

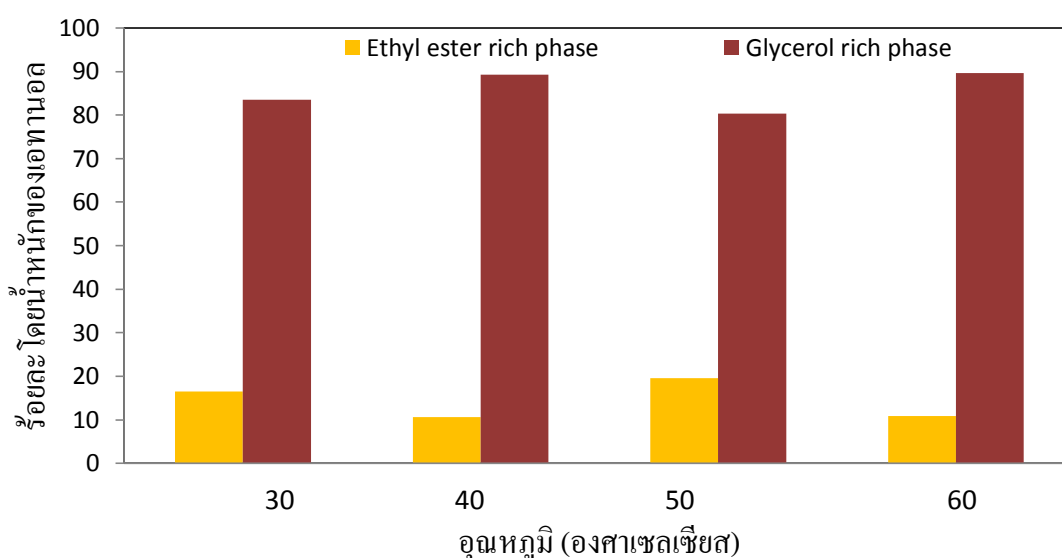


ภาพที่ 4-63 ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอลและเมทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

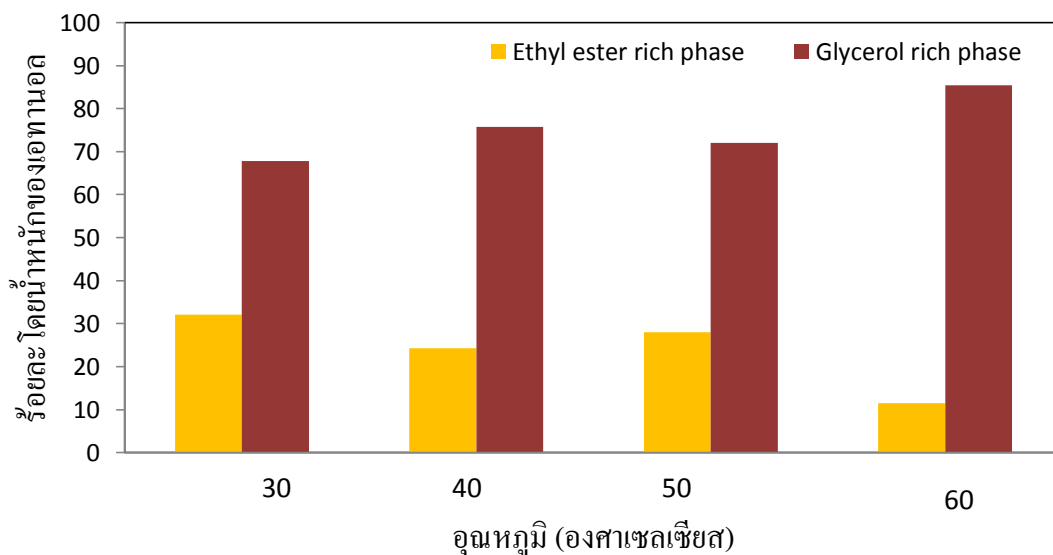


ภาพที่ 4-64 ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอลและเมทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปกลีเซอรอล ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

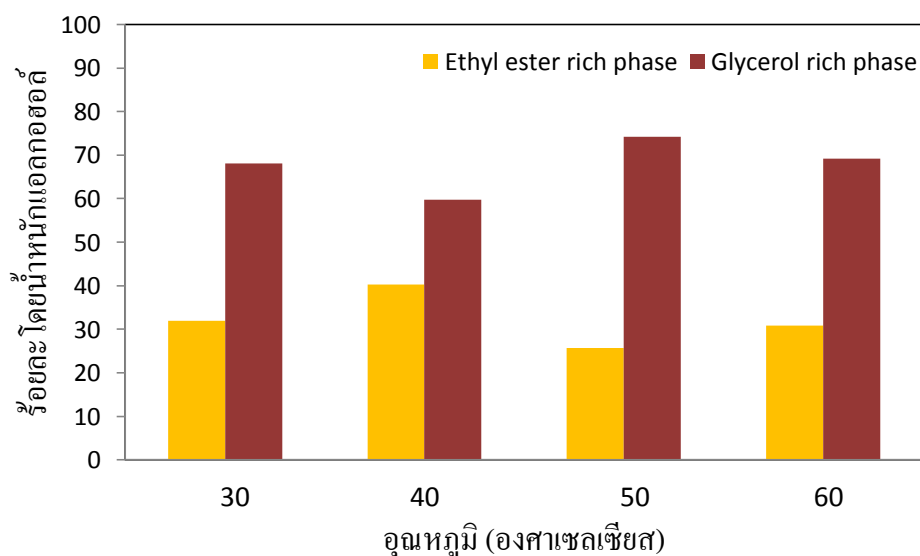
ข้อมูลของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลโดยใช้อัตราส่วนเอทิลเอสเทอร์ ต่อ เอทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 3 ต่อ 5 ต่อ 7 ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามภาพที่ 4-65 อัตราส่วนเอทิลเอสเทอร์ ต่อ เอทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 5 ต่อ 5 ต่อ 5 ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามภาพที่ 4-66 และอัตราส่วนเอทิลเอสเทอร์ ต่อ เอทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 7 ต่อ 5 ต่อ 3 ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามภาพที่ 4-67 เมื่อพิจารณากราฟผลการทดลองแล้วพบว่าอุณหภูมิมิมีผลเพียงเล็กน้อยในการละลายของเอทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล



ภาพที่ 4-65 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล อัตราส่วนเอทิลเอสเทอร์ ต่อ เอทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 3 ต่อ 5 ต่อ 7

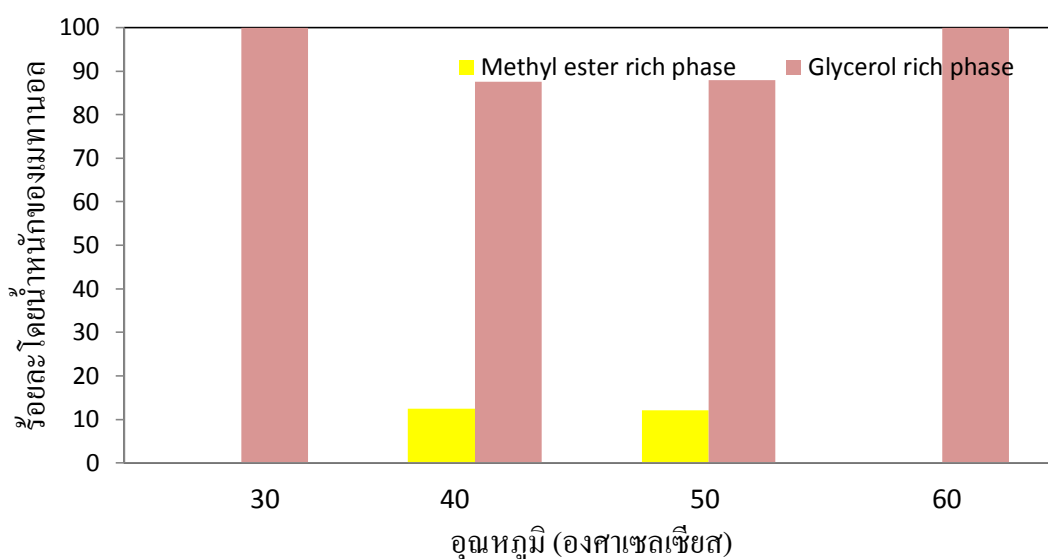


ภาพที่ 4-66 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์ และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล อัตราส่วนเอทิลเอสเทอร์ ต่อ เอทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 5 ต่อ 5 ต่อ 5

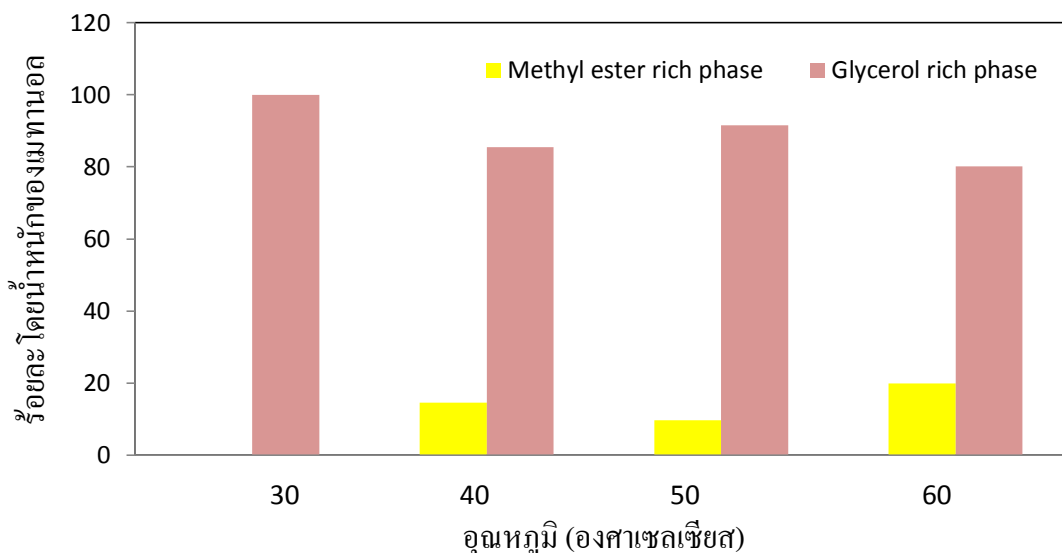


ภาพที่ 4-67 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์ และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล อัตราส่วนเอทิลเอสเทอร์ ต่อ เอทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 7 ต่อ 5 ต่อ 3

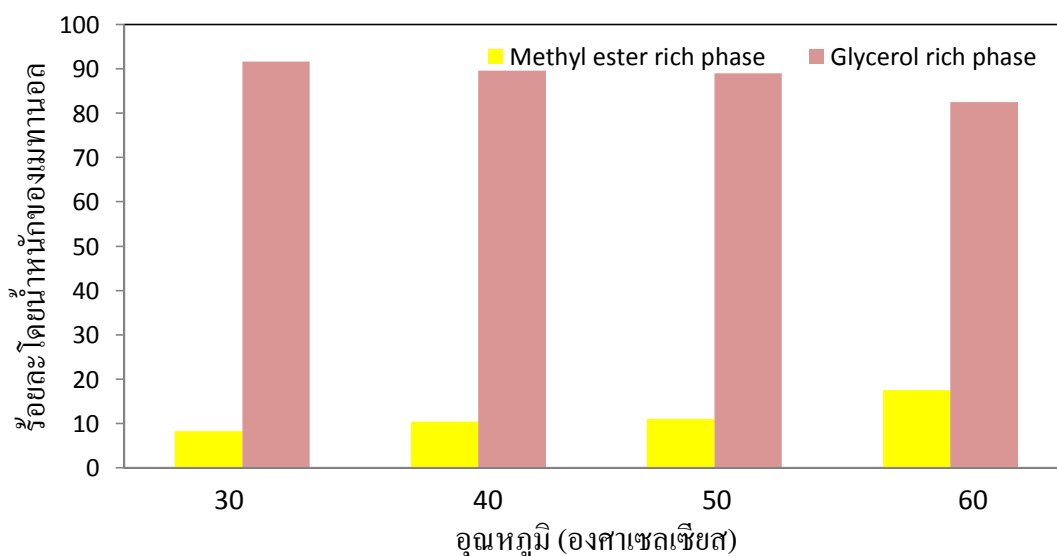
ในขณะที่เมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลโดยใช้อัตราส่วนเอทิลเอสเทอร์ ต่อ เมทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 3 ต่อ 5 ต่อ 7 ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามภาพที่ 4-68 อัตราส่วนเอทิลเอสเทอร์ ต่อ เมทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 5 ต่อ 5 ต่อ 5 ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามภาพที่ 4-69 และอัตราส่วนเอทิลเอสเทอร์ ต่อ เมทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 7 ต่อ 5 ต่อ 3 ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามภาพที่ 4-70 เมื่อพิจารณากราฟผลการทดลองแล้วพบว่าอุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อยในการละลายของเมทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 4-68 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล อัตราส่วนเมทิลเอสเทอร์ ต่อ เมทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 3 ต่อ 5 ต่อ 7

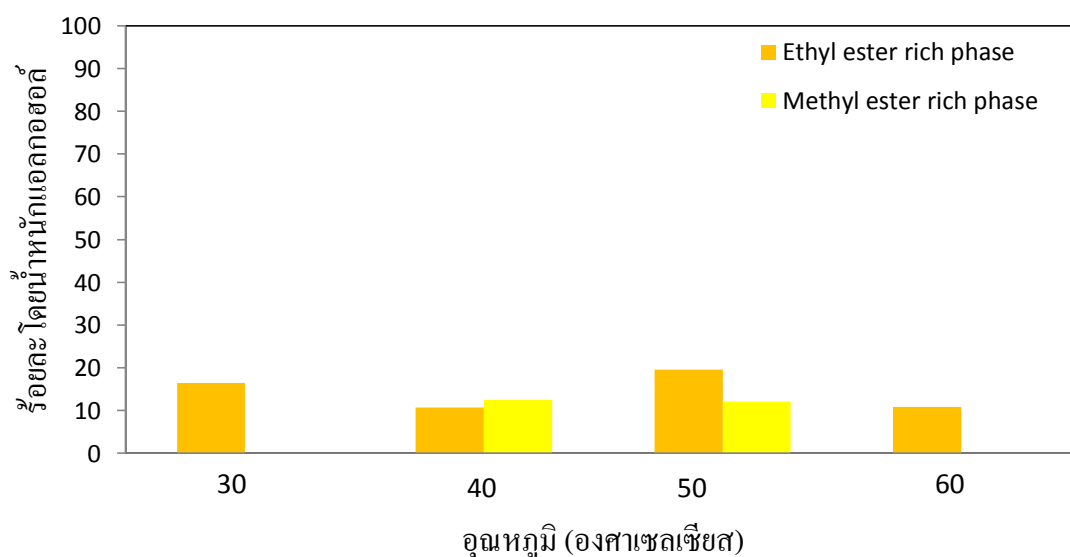


ภาพที่ 4-69 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์ และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล อัตราส่วนเมทิลเอสเทอร์ ต่อ เมทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 5 ต่อ 5 ต่อ 5

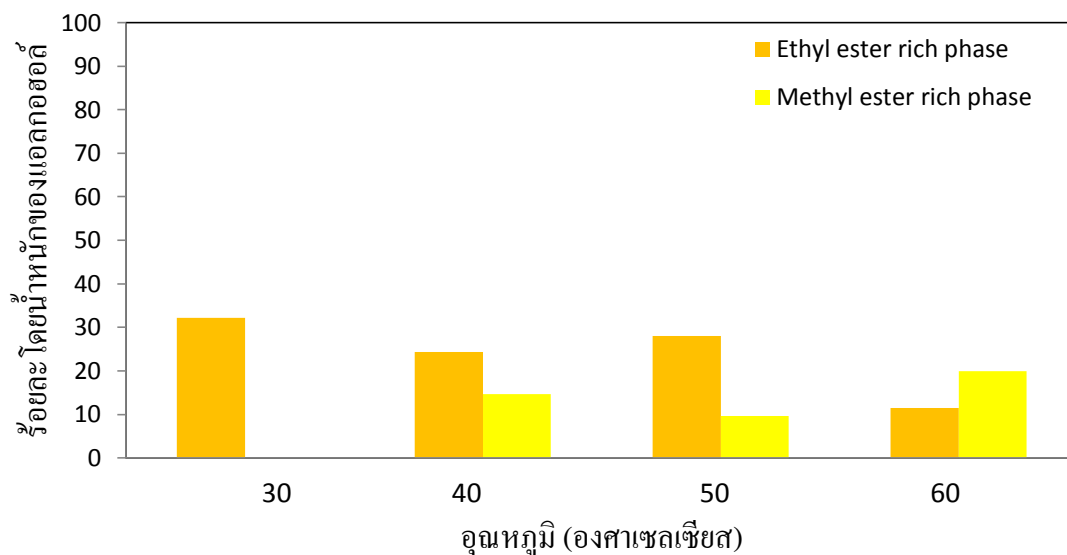


ภาพที่ 4-70 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์ และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอล อัตราส่วนเมทิลเอสเทอร์ ต่อ เมทานอล ต่อ กลีเซอรอล คือ 7 ต่อ 5 ต่อ 3

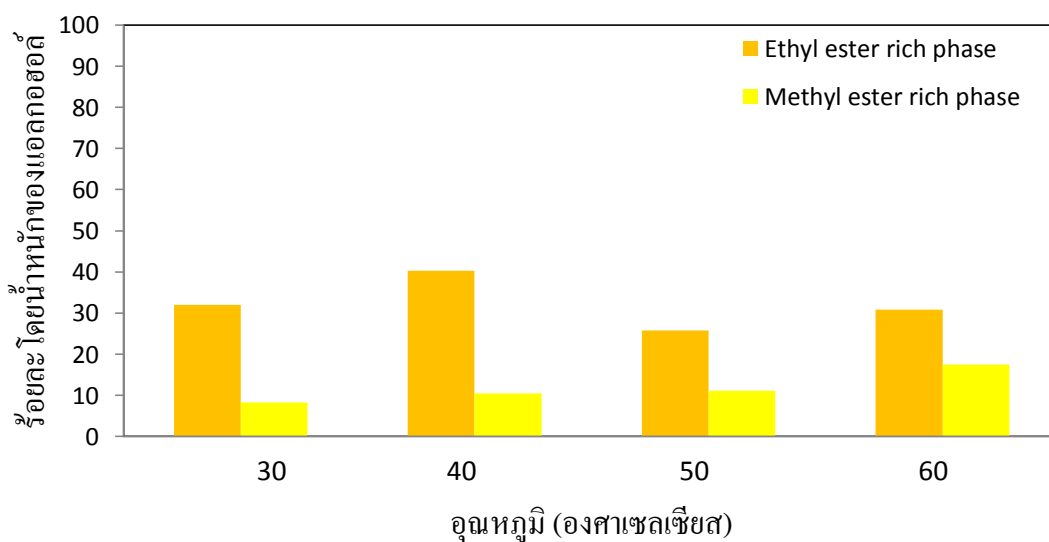
และเมื่อเปรียบเทียบการละลายของเอทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์กับ เมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์ที่ใช้อัตราส่วนออคทิลเอสเทอร์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 3 ต่อ 5 ต่อ 7 แสดงดังภาพที่ 4-71 อัตราส่วนออคทิลเอสเทอร์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 5 ต่อ 5 ต่อ 5 แสดงดังภาพที่ 4-72 และ อัตราส่วนออคทิลเอสเทอร์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 7 ต่อ 5 ต่อ 3 แสดงดังภาพที่ 4-73 จะพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลทำให้เมทานอลละลายในเมทิลเอสเทอร์ได้มากกว่าเอทานอลละลายในเอทิลเอสเทอร์



ภาพที่ 4-71 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และ เมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์อัตราส่วนออคทิลเอสเทอร์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 3 ต่อ 5 ต่อ 7

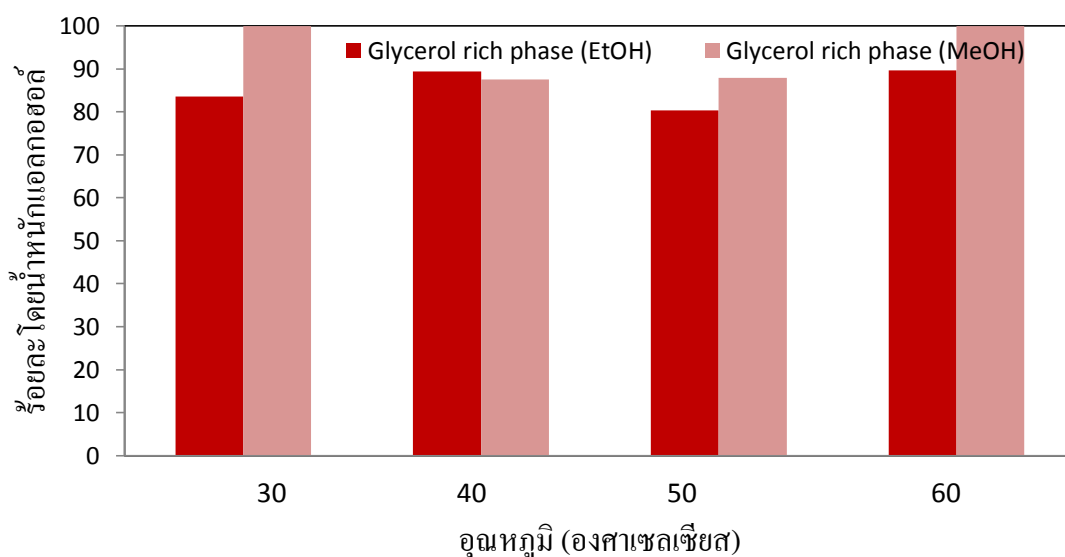


ภาพที่ 4-72 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์อัตราส่วนอัลคิลเอสเทอร์ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 5 ต่อ 5 ต่อ 5

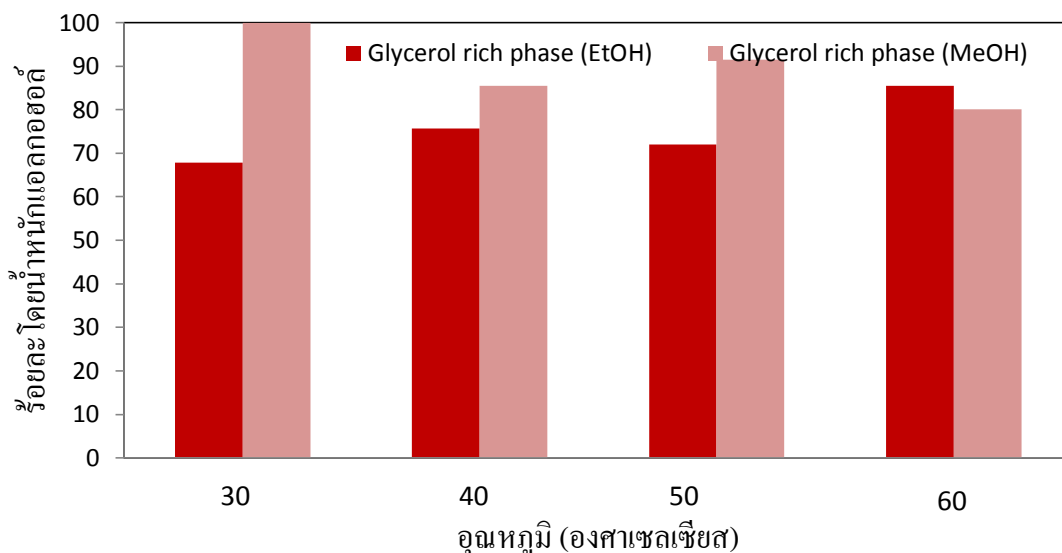


ภาพที่ 4-73 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเอทิลเอสเทอร์และเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยเมทิลเอสเทอร์อัตราส่วนอัลคิลเอสเทอร์ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 7 ต่อ 5 ต่อ 3

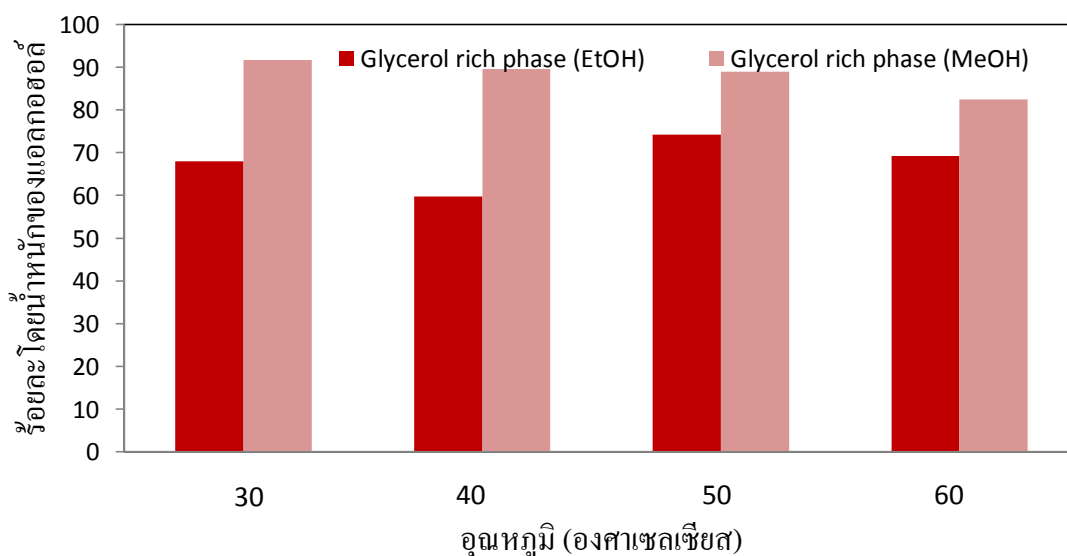
แม้กระทั่งเมื่อเปรียบเทียบการละลายของเอทานอลในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลกับเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลที่ใช้อัตราส่วนอัคริลเอสเทอร์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 3 ต่อ 5 ต่อ 7 แสดงดังภาพที่ 4-74 อัตราส่วนอัคริลเอสเทอร์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 5 ต่อ 5 ต่อ 5 แสดงดังภาพที่ 4-75 และ อัตราส่วนอัคริลเอสเทอร์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 7 ต่อ 5 ต่อ 3 แสดงดังภาพที่ 4-76 พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลทำให้เอทานอลละลายในกลีเซอรอลได้มากกว่าเมทานอลละลายในกลีเซอรอล



ภาพที่ 4-74 ร้อยละ โดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลและเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลอัตราส่วนอัคริลเอสเทอร์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 3 ต่อ 5 ต่อ 7



ภาพที่ 4-75 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลและเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลอัตราส่วนอัลคิลเอสเทอร์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 5 ต่อ 5 ต่อ 5



ภาพที่ 4-76 ร้อยละโดยน้ำหนักของเอทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลและเมทานอลที่ละลายในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลอัตราส่วนอัลคิลเอสเทอร์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ กลีเซอรอล คือ 7 ต่อ 5 ต่อ 3

จากข้อมูลการละลายของแอลกอฮอล์ในวัฏภาคของอัลคิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลพบว่า การละลายของเอทานอลในเอทิลเอสเทอร์มีมากกว่าเมทานอลละลายในเมทิลเอสเทอร์เพราะ เอทานอลมีส่วนที่มีขั้ว คือ หมู่ OH และส่วนที่ไม่มีขั้ว คือ CH_3CH_2 - อยู่ในโมเลกุลจึงทำให้ สามารถละลายในเอทิลเอสเทอร์ได้เหมือนกัน (Follegatti-Romero et. al., 2012; De Sousa Maia, Sousa & Stragevitch, 2013) เมื่อมีปริมาณเอทานอลอยู่เหลือในระบบมากจะทำให้เอทิลเอสเทอร์ซึ่งเป็น โมเลกุลไม่มีขั้วละลายในเอทานอลและกลีเซอรอลซึ่งเห็น โมเลกุลมีขั้วละลายใน เอทานอลด้วย

กราฟแผนภาพวัฏภาคการละลายของแอลกอฮอล์ในวัฏภาคที่อุดมไปด้วยอัลคิลเอสเทอร์ และวัฏภาคที่อุดมไปด้วยกลีเซอรอลสนับสนุนการแยกวัฏภาคของเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล สามารถอภิปรายว่าแอลกอฮอล์จะละลายในกลีเซอรอลได้ดีกว่าอัลคิลเอสเทอร์ ซึ่งเมทานอลนั้นมีความเป็นขั้วมากกว่าเอทานอล เมื่อใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจึงทำให้เกิดการแยก วัฏภาคระหว่างเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลเกิดขึ้นเร็วกว่า ผลการทดลองคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Nikhom และคณะ (Nikhom, Kungsanant, Ratanawilai, Nuthong & Tongurai, 2011) แม้ปริมาณเมทานอลจะมากกว่าหรือน้อยกว่ากลีเซอรอล ก็จะสามารถละลายเข้ากันได้หมด ในทางกลับกันการใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันการแยกวัฏภาคนั้นจะไม่เกิดการแยกวัฏภาค ถ้าภายในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีปริมาณของเอทานอลหรือ เมทานอลที่ใช้เป็นสารตั้งต้นเท่ากันเนื่องจากเหตุผลดังที่กล่าวมาข้างต้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การสังเคราะห์หา มอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การทดลองสังเคราะห์เพื่อหาปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ จากเอทานอลไอโซซิส และเมทานอลไอโซซิสพบว่า เมื่อเริ่มต้นทำปฏิกิริยามอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาเอทานอลไอโซซิสนั้นเกิดขึ้นเร็วกว่าเมทานอลไอโซซิสโดยการเกิด มอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวเกิดขึ้นเร็วกว่า ส่งผลให้เอทานอลไอโซซิสเข้าสู่อิมัลชันเร็วกว่าเมทานอลไอโซซิส

การหาเส้นโค้งการละลายของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบโดยการทดลองไทเทรต

หาจุดขุ่น

การศึกษาสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบของระบบเอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล และของระบบเมทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล พบว่าการใช้เมทานอลเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันส่งผลต่อการแยกวัฏภาคระหว่างเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลง่ายกว่าการใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยอุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการแยกวัฏภาคระหว่างอัลคิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล

การละลายของแอลกอฮอล์

การวิเคราะห์การละลายของแอลกอฮอล์เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์เส้นโค้งการละลายสมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบโดยการละลายของแอลกอฮอล์พบว่าเมื่อใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลเร็วกว่าเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลเพราะเอทานอลละลายในเอทิลเอสเทอร์ได้ดีกว่าเมทานอลละลายในเมทิลเอสเทอร์

ข้อเสนอแนะการนำผลวิจัยไปใช้

1. เลือกใช้อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ในระหว่าง 3 ต่อ 1 ถึง 12 ต่อ 1 เพื่อให้เกิดการแยกวัฏภาค ได้อีทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ที่มีร้อยละผลได้สูง
2. เลือกใช้สารตั้งต้นที่เหมาะสมเพื่อลดเวลาในการทำปฏิกิริยา

บรรณานุกรม

- คณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2555). *เคมีทั่วไป เล่ม 1*.
กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อริศรา แสนดำแย และ เจริญ ชินวานิชย์เจริญ. 2016. สมดุลของเหลว-ของเหลวสามองค์ประกอบ
ระบบแอลกอฮอล์-อัลคิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล. *การประชุมเชิงวิชาการเสนอผลงานวิจัย
ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 39*. 362-366
- Andreatta E. A., Arposio A., Ciparicci S., Longo B. M., Francescato F., Gavotti L. &
Fontanessi M. (2013). Liquid-liquid equilibrium in mixtures containing glycerol and
mixtures containing vegetable oils. *Asociación Argentina de Ingenieros Químicos-
CSPQ*.
- Atadashi I.M., Aroua M.K., Abdul Aziz A.R. & Sulaiman N.M.N. (2012). The effects of water
on biodiesel production and refining technologies: *A review, Renewable and
Sustainable Energy Reviews*, 5(16), 3456-3470.
- Attwood D. & Florence T. A. (2008), *Physical pharmacy* (2nd ed). United Kingdom:
Pharmaceutical Press.
- Barreau A., Brunella L., De Hemptinne C. J., Coupard V., Canet X. & Rivollet F. (2010).
Industrial & Engineering Chemistry Research, 49, 5800-5807.
- Bartan F. M. A. (1991). *Handbook of Solubility Parameters and Other Cohesion Parameters*
(2nd ed.,. CRC Press, 23-45.
- Batista M. M. (2013), Determination of the solubility parameters of biodiesel from vegetable oils,
Energy & Fuel, 12(27), 7497-7509.
- Clarke J. R. (1974). Tie line in phase diagrams for ternary liquid systems, *Journal of Chemical
Education*, 51(4), 255-256.
- Da Silva D. I. S., Mafra M. R., Da Silva F. R., Ndiaye P. M., Ramos L. P., Cardozo Filho L. &
Corazza M. L. (2013). Liquid-liquid and vapor-liquid equilibrium data for biodiesel
reaction-separation systems, *Fuel*, 108, 269-276.

- De Azevedo Rocha E. G., Follegatti Romero L. A., Duvoisin S. & Aznar M. (2014). Liquid-liquid equilibria for ternary systems containing ethylic palm oil biodiesel+ ethanol+ glycerol/water: Experimental data at 298.15 and 323.15 K and thermodynamic modeling. *Fuel*, 128, 356-365.
- De Sousa Maia C. A., Sousa e Silva I. & Stragevitch L. (2013). Liquid-liquid equilibrium of methyl ester of fatty acid/ methanol/ glycerol and fatty acid ethyl ester/ethanol/glycerol: A case for biodiesel Application. *International Journal of Chemical Engineering and Applications* 4(5), 285-286.
- Doell R., Konar K. S. & Boocock G. B. D. (2008). Kinetic parameters of a homogeneous transformation of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 85, 271-276.
- Doungsri S. & Sookkumnerd T. (2011). Solubility curves of FAME + methanol + glycerol. *TIChE International Conference 2011*.
- Encinar M. J., González F. J., Rodríguez J. J. & Tejedor A. (2002). Biodiesel fuels from vegetable oils: Transesterification of *Cynara Cardunculus L.* oil with ethanol. *Energy & Fuels*, 16, 443-450.
- Farn J. F. (2006). Chemistry and technology of surfactants. *India: Replika Press*.1-8.
- Feedman B., Pryde E.H. & Mounts T.L. (1984). Variables affecting the yield of fatty esters from transesterified vegetable oils, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 10(61), 1638-1643.
- Follegatti-Romero A. L., Oliveira B. M., Batista R.M. F., Batista A.C. E., Coutinho A.P. J. & Meirelles J. A. A. (2012). Liquid-liquid equilibria for ternary systems containing ethyl ester, ethanol and glycerol at 323.15 and 353.15 K. *Fuel*, 94, 386-394.
- Giovanilton F. S., Fernando L. C. & Andrea L.O. F. (2011). Application of response surface methodology for optimization of biodiesel production of transesterification of soybean oil with ethanol. *Fuel Processing Technology*, 92, 407-413.
- González B., Calvar N., Gómez E. & Domínguez A. (2007). Density, dynamic viscosity, and derived properties of binary mixtures of methanol or ethanol with water, ethyl acetate, and methyl acetate at T = (293.15, 298.15, and 303.15) K. *Journal Chemistry Thermodynamics*, 39, 1578-1588.

- Gülyurt Ö. M., Özçimen D. & İnan B. (2016). Biodiesel Production from *Chlorella Protothecoides* Oils by microwave-assisted transesterification. *International Journal Production from science*, 4(17), 579.
- Gunvachai K., Hassan G. M., Shama G. & Hellgardt K. (2007). A new solubility model to describe biodiesel formation kinetics. *Institution of Chemical Engineers*. 85(B5), 383-389.
- Hansen M. C. (1999). Hansen Solubility Parameters : a user's handbook. *United States of America: CRC Press*, Chapter 1.
- Issariyakul T. & Dalai K. A. (2014). Biodiesel from vegetable oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 446-471.
- Keszei E. (2012). Chemical thermodynamics: An introduction. *Springer Heidelberg Dordrecht London New York*, Chapter 8.
- King J.W. (1995). Determination of the solubility parameter of soybean oil by Inverse gas chromatography. *J.W. Lebensm-Wiss u.-Technol.*, 28, 190-195.
- Larsen R. M. (2009), Hansen solubility parameters and SWCNT composites. *Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials ICCM-17. Edinburg*.
- Lee M. J., Lo Y. C. & Lin H. (2010). Liquid-liquid equilibria for mixtures containing water, methanol, fatty acid methyl esters, and glycerol, *Fluid Phase Equilibria*, 299, 180-190.
- Liu X., Piao X., Wang X. & Zhu S. (2008). Liquid-liquid equilibrium for systems of (Fatty acid ethyl esters + ethanol +soybean oil and fatty acid ethyl esters + ethanol + glycerol). *Jounol of Chemical & Engineering Data*, 53, 359-362.
- Ma F. & Hanna A. M. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 70, 1-15.
- Mazutti A. M., Voll A.P. F., Cardozo-Filho L., Corazza L. M., Lanza M., Priamo L. W., J. Oliveira V. (2013). Thermophysical properties of biodiesel and related systems: (Liquid + liquid) equilibrium data for soybean biodiesel, *J Chem. Thermodynamics*, 58, 83-94
- Mittelbach M. & Remsechmidt C. (2004). Biodiesel The comprehensive handbook.
- Myers D. (1999). Surfaces, Interfaces, and colloids (2nd ed). John Wiley & Sons, Inc. pp. 1-5.
- Musa A. I. (2016).The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25, 21-25.

- Nakpong P. & Wootthikanokkhon S. (2010). Optimization of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. Oil via alkali-catalyzed methanolysis. *Journal of Sustainable Energy & Environment* 1, 105-109
- Nikhom R., Kungsanant S., Ratanawilai S., Nuthong P. & Tongurai C. (2011). Characterization of glycerol-ester emulsions from transesterification with different alcohols using the CLSM technique. *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(1), 245-251
- Niza M. N., Tan T. K., Leec T. K. & Ahmad Z. (2013). Influence of impurities on biodiesel production from *Jatropha curcas* L. by supercritical methyl acetate process. *J. of Supercritical fluids*, 79, 73-75.
- Noureddini H. & Zhu D. (1997). Kinetics of transesterification of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74(11), 1457-1463.
- Oliveira B. M., Barbedo S., Soletti J., Carvalho H.V. S., Queimada J. A. & Coutinho A.P. J. (2011). Liquid-liquid equilibria for the canola oil biodiesel + ethanol + glycerol system. *Fuel*, 90, 2738-2745.
- Otera J. (1993). Transesterification, *Chemical Reviews*, 93, 1449-1470.
- Rodrigue S., Mazzone C. A. L., Santos F. P. F., Cruz G. A. M. & Fernandes N. A. F. (2009), Optimization of the production of ethyl esters by Ultrasound assisted reaction of soybean oil and ethanol. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22(26), 361-366.
- Schramm L. L. (2005). Emulsion, Foams, and Suspensions. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim*. 1-12.
- Schramm L. L., Stasiuk N. E. & Marangoni G. D. (2003), Surfactants and their applications. *Annual Reports Section "C" (Physical Chemistry)*, 99, 3-48.
- Schuchard U., Sercheli R. & Vargas M. R. (1997). Transesterification of vegetable Oils: a review. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 1(9), 199-210.
- Segalen da Silva I. D., Mafra R. M., Rosa da Silva F., Ndiaye M. P., Ramos P. L., Filho C. L. & Corazza L. M. (2013). Liquid-liquid and vapor-liquid equilibrium data for biodiesel reaction-separation systems. *Fuel*, 108, 269-276.

- Siddique B. M., Ahmad A., Ibrahim H. M., Hena S., Rafatullah M. & AK M. O. (2010). Physico-Chemical properties of blends of palm olein with other vegetable oils. *Grasa Y Acetes*, 4(61), 423-429.
- Soares L. P. V., Lachter R. E., Rodrigues Jr. A. J., Batista N. L. & Nascimento S. V. R. (2011), Chapter 9. *Soybean-Applications and Technology*. Intechweb.org, (India). 5-7.
- Tadros F. T. (2005). Applied surfactants. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim*, 19-51.
- Tadros F. T. (2013). Emulsion formation and stability (1st ed). *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim*, 1-75.
- Vyas P. A., Verma L. J. & Subrahmanyam N. (2011). Effects of molar ratio, Alkali catalyst concentration and temperature on transesterification of Jatropha Oil with methanol under ultrasonic irradiation. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 1, 45-50.
- Weisz B. P., Haag O. W. & Rodewald G. P. (1979). Catalytic production of high-grade fuel (Gasoline) from biomass compounds by shape-selective catalysis. *Science*, 206, 57-58.
- Wright D. (1996), *Environmental stress cracking of plastics*, Lesson 3.
- Wypych G. (2012). Knovel solvents A properties data base, A comprehensive collection of property information for over 1600 different solvents.
- Xue D., Mu Y., Mao Y., Yang T. & Xiu Z. (2014). Kinetics of DBU-catalyzed transesterification for biodiesel in the DBU-ethanol switchable-polarity solvent. *Green Chemistry*. 16, 3218-3223.
- Ye L., Hao Y., Zhuhua S. & Dachuan L. (2007). Determination of phase diagram of reaction system of biodiesel. *Feed and Industrial Raw Material: Materials and Biofuel*, 5, 324-328.
- Yaws L. C. (2009). Thermophysical properties of chemicals and hydrocarbons. *William Andrew Applied Inc.*
- Yow C. J. & Liew Y. K. (1999). Hydrolysis of palm oil catalyzed by macroporous cation-exchanged resin. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(4), 529-533.
- Zhou W. & Boocock G. B. D. (2006). Phase behavior of the base-catalyzed transesterification of soybean oil. *American Oil Chemists' Society*, 12(83), 1041-1045.

Zhou W., Konar K. S. & Boocock G. B. D. (2003). Ethyl esters from the single-phase base-catalyzed ethanolysis of vegetable oils. *Journal of the American Oriental Society*, 4(80), 367-370.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางภาคผนวก ก-1 **น้ำหนักของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยา
เอทานอลไลซิสในสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ**

เวลา (วินาที)	30 องศาเซลเซียส			40 องศาเซลเซียส		
	MG	DG	TG	MG	DG	TG
0	0	0	100	0	0	100
30	90.5338	72.9029	76.9822	66.3444	92.2814	77.9572
60	78.0380	62.0402	42.6784	65.1695	86.9960	39.1769
90	84.2056	76.6662	84.7918	68.8117	63.4904	37.6978
120	82.4491	57.1206	34.8223	58.6752	62.4637	25.7826
150	81.7522	60.9204	30.9496	44.7331	60.7654	20.3507
180	61.9324	66.2803	20.7867	63.1459	26.8741	21.6795
210	91.6346	40.5391	15.2752	41.5774	46.0000	8.6542
240	54.8356	54.1081	13.8923	49.0871	20.2473	11.4734
270	70.5680	55.2226	24.7404	41.3581	50.1450	20.8695
300	26.3076	38.7823	10.4957	44.9353	22.5100	10.8879

หมายเหตุ MG= มอนอกลิเซอไรด์ DG=ไดกลีเซอไรด์ TG=ไตรกลีเซอไรด์

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	50 องศาเซลเซียส			60 องศาเซลเซียส		
	MG	DG	TG	MG	DG	TG
0	0	0	100	0	0	100
30	44.6886	76.4123	39.3135	62.8212	8.8003	1.2918
60	55.3879	38.8484	25.2585	56.6903	47.3999	24.8742
90	62.5847	45.3717	26.9634	49.3002	28.8499	18.0572
120	77.8104	63.4824	40.7021	42.0000	28.3040	9.6635
150	67.0460	45.1554	23.0721	36.8811	15.7750	6.4195
180	51.5105	25.7305	11.9081	39.8494	28.1735	9.0447
210	33.2581	54.4266	20.0886	41.3200	22.7764	9.2316
240	44.2135	21.7781	8.5004	47.0366	24.2816	9.1427
270	35.0527	31.0819	9.1154	26.9293	15.5881	4.5255
300	43.5394	23.9121	15.3316	35.9613	15.9445	6.1582

หมายเหตุ MG= มอนอกลิเซอไรด์ DG=ไดกลีเซอไรด์ TG=ไตรกลีเซอไรด์

ตารางภาคผนวก ก-2 **น้ำหนักของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยา
เมทานอลไลซิสในสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ**

เวลา (วินาที)	30 องศาเซลเซียส			40 องศาเซลเซียส		
	MG	DG	TG	MG	DG	TG
0	0	0	100	0	0	100
30	5.8453	47.8125	83.5910	17.2911	74.9563	42.6225
60	6.6849	64.3401	59.9826	22.0451	61.4238	48.3402
90	28.0273	91.4987	71.8674	16.8372	50.1276	44.0088
120	15.6966	53.9745	83.7871	19.6205	41.1595	28.9887
150	20.1686	51.0346	79.1348	15.8272	28.0543	20.2010
180	19.6970	40.2626	27.4064	11.8477	17.6270	12.0926
210	12.4433	47.2741	65.1072	20.3256	20.5473	18.1006
240	20.6472	69.4595	71.5806	17.1815	34.6478	21.8036
270	19.4153	44.5084	66.1374	14.8102	20.7635	12.2365
300	50.9209	46.8252	48.9449	8.8337	21.6746	9.9576

หมายเหตุ MG= มอนอกลิเซอไรด์ DG=ไดกลีเซอไรด์ TG=ไตรกลีเซอไรด์

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	50 องศาเซลเซียส			60 องศาเซลเซียส		
	MG	DG	TG	MG	DG	TG
0	0	0	100	0	0	100
30	2.5530	56.5866	90.0985	25.1765	48.2307	44.1623
60	25.4719	94.0957	99.4560	30.7725	62.9321	93.1627
90	22.6832	38.7352	37.8692	19.0246	22.4700	14.5954
120	18.5539	34.2571	31.5476	12.5133	12.9916	6.2173
150	12.3024	23.6109	14.1031	12.3447	10.6601	5.4391
180	13.1375	16.9320	14.1027	9.4004	13.5678	17.5202
210	11.3270	12.6536	8.8688	10.3096	8.2267	9.4693
240	7.9852	12.0705	6.7928	8.3833	8.7703	7.3791
270	14.4141	27.9053	20.1747	10.0059	10.1681	5.6154
300	12.0523	14.0255	9.9154	11.3406	9.4037	6.3309

หมายเหตุ MG= มอนอกลิเซอไรด์ DG=ไดกลีเซอไรด์ TG=ไตรกลีเซอไรด์

ตารางภาคผนวก ก-3 ข้อมูลการทดลองของเส้นโค้งการละลายสมมูลของเหลว-ของเหลว
 ตามองค์ประกอบระบบ เอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล

30 องศาเซลเซียส					40 องศาเซลเซียส						
FAEE	EtOH	G	G	EtOH	FAEE	FAEE	EtOH	G	G	EtOH	FAEE
10.00	0.00	0.001	20.38	0.00	0.002	20.01	0.00	0.003	19.99	0.00	0.002
9.02	1.01	0.020	18.01	2.02	0.010	18.07	2.08	0.040	18.06	2.02	0.010
8.03	2.02	0.050	16.02	4.04	0.020	16.04	4.01	0.150	16.04	4.06	0.020
7.05	3.13	0.100	14.02	6.02	0.040	14.02	6.02	0.290	14.07	6.04	0.100
6.03	4.00	0.340	12.62	8.01	0.100	12.02	8.01	0.380	12.03	8.05	0.140
5.04	5.01	0.690	10.03	10.02	0.150	10.01	10.01	0.450	10.02	10.01	0.280
4.01	6.00	1.300	8.02	12.03	0.170	8.02	12.01	2.000	8.04	12.01	0.420
3.05	7.01	1.580	6.03	14.00	0.400	6.00	14.01	2.610	6.06	14.02	0.480
2.09	8.35	2.400	4.04	16.02	16.800	4.09	16.00	4.990	4.03	16.06	20.600
1.01	9.02	3.300	2.02	18.00	61.030	2.08	18.02	6.000	2.00	18.06	88.650

50 องศาเซลเซียส					60 องศาเซลเซียส						
FAEE	EtOH	G	G	EtOH	FAEE	FAEE	EtOH	G	G	EtOH	FAEE
20.00	0.00	0.001	20.00	0.00	0.003	20.01	0.00	0.001	20.06	0.00	0.003
18.04	2.01	0.040	18.03	2.01	0.010	18.01	2.01	0.030	18.02	2.01	0.010
16.10	4.03	0.150	16.03	4.01	0.030	16.01	4.03	0.230	16.02	4.08	0.050
14.02	6.01	0.560	14.07	6.02	0.160	14.02	6.01	0.270	14.03	6.05	0.170
12.04	8.02	1.550	12.02	8.03	0.250	12.02	8.04	0.440	12.00	8.08	0.240
10.03	10.01	2.000	10.08	10.01	0.360	10.02	14.41	1.310	10.04	10.06	0.390
8.02	12.02	2.600	8.04	12.03	0.500	8.01	12.25	3.090	8.05	12.00	0.470
6.61	14.60	4.200	6.11	14.03	0.630	6.02	14.07	4.000	6.04	14.02	0.620
4.03	16.04	4.810	4.07	16.04	21.270	4.00	16.10	5.030	4.01	16.03	22.670
2.02	18.02	6.180	2.07	18.15	108.350	2.01	18.00	8.000	2.06	18.04	128.050

หมายเหตุ FAEE=กรดไขมันอิสระของเอทิลเอสเทอร์ EtOH=เอทานอล G=กลีเซอรอล

ตารางภาคผนวก ก-4 ข้อมูลการทดลองของเส้นโค้งการละลายสมมูลของเหลว-ของเหลว
 ตามองค์ประกอบระบบ เมทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล

30 องศาเซลเซียส					40 องศาเซลเซียส						
FAME	MtOH	G	G	MtOH	FAME	FAME	MtOH	G	G	MtOH	FAME
20.05	0.00	0.01	20.10	0.00	0.01	20.03	0.00	0.01	20.02	0.00	0.01
18.11	2.16	0.03	18.20	2.00	0.03	18.02	2.88	0.02	18.03	2.10	0.02
16.01	4.15	0.04	16.15	3.99	0.04	16.22	3.99	0.06	16.03	4.04	0.05
14.17	6.00	0.06	14.10	6.10	0.07	14.01	6.07	0.07	14.01	7.50	0.06
12.03	8.15	0.07	12.01	8.15	0.10	12.02	8.06	0.13	12.09	8.02	0.12
10.10	10.16	0.09	10.29	10.40	0.11	10.02	10.02	0.20	10.03	10.06	0.13
8.06	12.17	0.09	8.24	12.17	0.21	8.01	14.04	0.34	8.03	12.02	0.20
6.19	14.02	0.13	6.13	14.14	0.40	6.01	14.02	0.44	6.00	14.00	0.42
4.15	16.03	0.19	4.31	16.01	0.72	4.04	16.01	0.60	4.03	16.03	0.99
2.22	18.15	1.00	2.03	18.21	1.36	2.01	18.06	1.81	2.03	18.01	3.15

50 องศาเซลเซียส					60 องศาเซลเซียส						
FAME	MtOH	G	G	MtOH	FAME	FAME	MtOH	G	G	MtOH	FAME
20.13	0.00	0.01	19.99	0.00	0.01	20.19	0.00	0.03	20.28	0.00	0.01
18.02	2.04	0.05	18.03	2.01	0.02	18.30	2.03	0.08	18.40	2.00	0.02
16.01	4.02	0.06	16.03	4.27	0.04	16.09	4.06	0.09	16.06	4.15	0.05
14.04	6.05	0.08	14.03	6.04	0.13	14.19	6.06	0.14	14.06	6.01	0.17
12.02	8.02	0.12	12.05	8.03	0.21	12.00	8.04	0.18	12.27	8.21	0.30
10.03	10.00	0.15	10.02	10.05	0.31	10.03	10.10	0.30	10.24	10.14	0.33
8.03	12.02	0.20	8.02	12.04	0.40	8.00	12.01	0.46	8.36	12.08	0.38
6.00	14.00	0.42	6.08	14.07	0.48	6.00	14.21	0.64	6.21	14.08	0.50
4.03	16.03	0.99	4.80	16.07	0.70	4.01	16.03	0.95	4.11	16.04	0.79
2.03	18.01	3.15	2.40	18.04	1.75	2.04	18.07	1.90	2.15	18.02	1.30

หมายเหตุ FAME=กรดไขมันอิสระของเมทิลเอสเทอร์ EtOH=เอทานอล G=กลีเซอรอล

ตารางภาคผนวก ก-5 ข้อมูลการทดลองของเส้นเชื่อมวิถุภาคของสมดุลของเหลว-ของเหลว
 ตามองค์ประกอบระบบ เอทานอล-เอทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล

30 องศาเซลเซียส					
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (3 : 5 : 7)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	EtOH	FAEE	EtOH	FAEE
0.4197	1.5185	0.4197	1.5185	0.4197	1.5185
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (5 : 5 : 5)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	EtOH	FAEE	EtOH	FAEE
0.8113	2.5336	0.8113	2.5336	0.8113	2.5336
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (7 : 5 : 3)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	EtOH	FAEE	EtOH	FAEE
1.2463	4.5029	1.2463	4.5029	1.2463	4.5029
40 องศาเซลเซียส					
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (3 : 5 : 7)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	EtOH	FAEE	EtOH	FAEE
0.5341	3.0128	0.0000	4.4730	0.0000	7.5091
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (5 : 5 : 5)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	EtOH	FAEE	EtOH	FAEE
1.2156	4.9996	0.0000	3.7879	0.0000	5.0609
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (7 : 5 : 3)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	EtOH	FAEE	EtOH	FAEE
2.0230	7.0388	0.0000	3.0059	0.0000	3.0420

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

50 องศาเซลเซียส					
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (3 : 5 : 7)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	G	EtOH	FAEE	G
0.9864	3.0302	0.0000	4.0433	0.0000	7.0216
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (5 : 5 : 5)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	G	EtOH	FAEE	G
1.4085	5.0192	0.0000	3.6231	0.0000	5.1693
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (7 : 5 : 3)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	G	EtOH	FAEE	G
1.2880	7.0098	0.0000	3.7155	0.0000	3.0441
60 องศาเซลเซียส					
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (3 : 5 : 7)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	G	EtOH	FAEE	G
0.5190	3.0291	0.0000	4.4925	0.0000	7.0217
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (5 : 5 : 5)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	G	EtOH	FAEE	G
0.5178	5.0216	0.0000	4.4332	0.0000	5.0183
เอทานอล ต่อ เอทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (7 : 5 : 3)					
FAEE rich phase			Glycerol rich phase		
EtOH	FAEE	G	EtOH	FAEE	G
1.5532	7.0185	0.0000	3.4921	0.0000	3.1074

ตารางภาคผนวก ก-6 ข้อมูลการทดลองของเส้นเชื่อมวิถุภาคของสมดุลของเหลว-ของเหลว
ตามองค์ประกอบระบบ เมทานอล-เมทิลเอสเทอร์-กลีเซอรอล

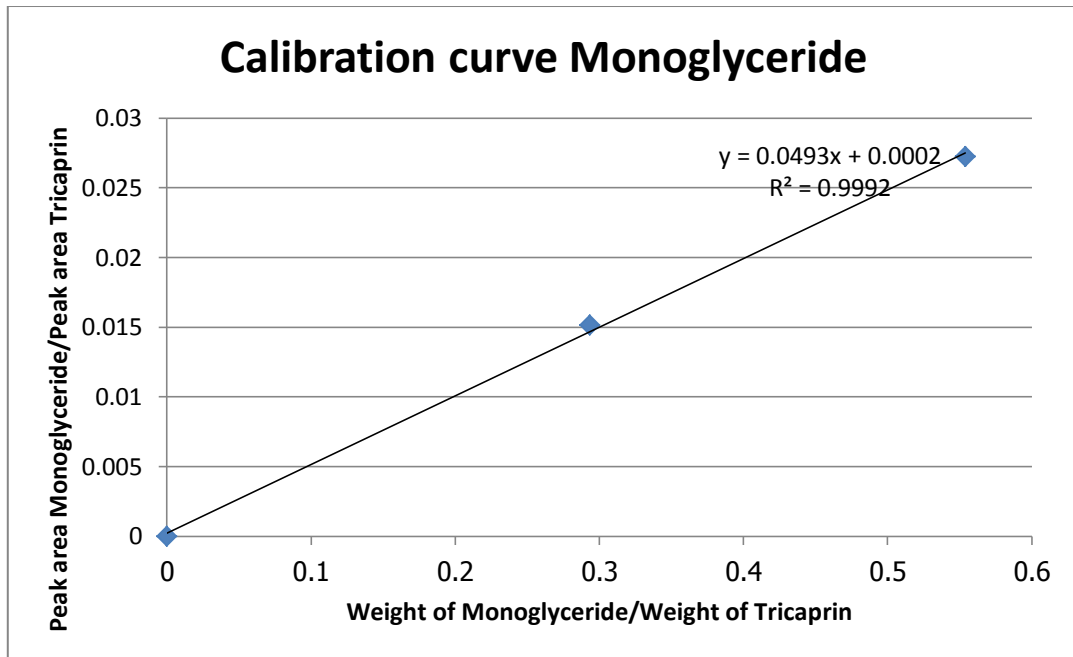
30 องศาเซลเซียส					
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (3 : 5 : 7)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.0000	1.5145	0.0000	2.5195	0.0000	4.586
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (5 : 5 : 5)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.0059	2.5356	0.0000	2.2597	0.0000	2.5643
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (7 : 5 : 3)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.2102	4.5029	0.0000	2.3201	0.0000	1.5257
40 องศาเซลเซียส					
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (3 : 5 : 7)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.6256	3.0128	0.0000	4.3815	0.0000	7.5091
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (5 : 5 : 5)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.7339	5.0254	0.0000	4.2915	0.0000	5.0136
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (7 : 5 : 3)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.5233	7.0388	0.0000	4.5048	0.0000	3.0420

ตารางภาคผนวก ก-6 (ต่อ)

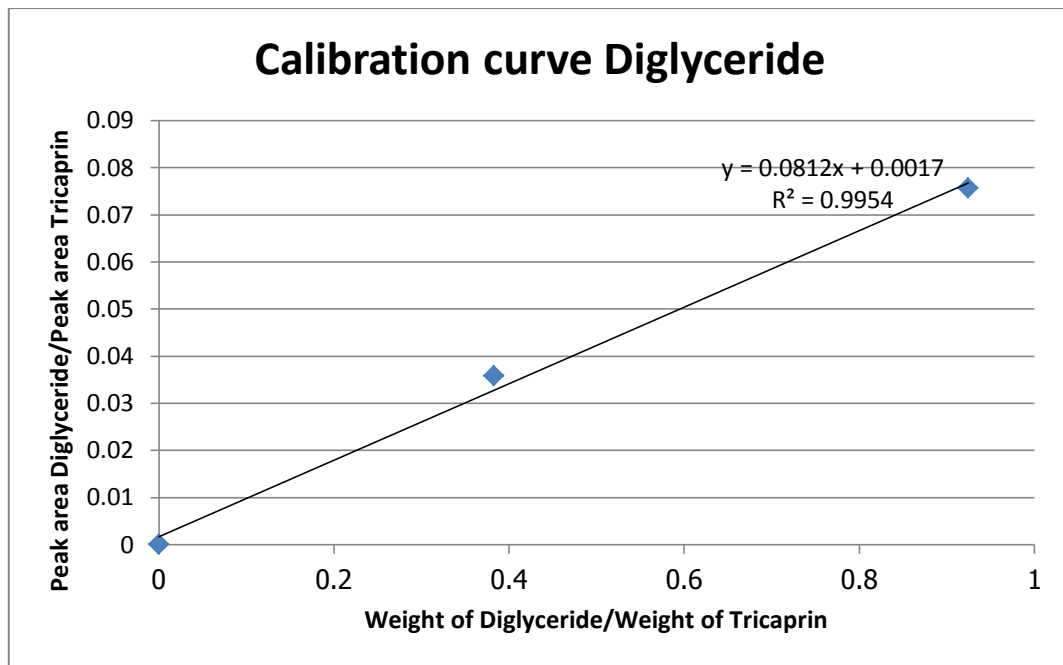
50 องศาเซลเซียส					
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (3 : 5 : 7)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.6060	3.0168	0.0000	4.4172	0.0000	7.0106
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (5 : 5 : 5)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.4867	5.0880	0.0000	4.6013	0.0000	5.0660
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (7 : 5 : 3)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.5562	7.0522	0.0000	4.4791	0.0000	3.0485
60 องศาเซลเซียส					
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (3 : 5 : 7)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.0000	2.5270	0.0000	4.9900	0.5228	7.0300
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (5 : 5 : 5)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
1.9834	5.0100	0.0000	2.9566	0.0000	5.0800
เมทานอล ต่อ เมทิลเอสเทอร์ ต่อ กลีเซอรอล (7 : 5 : 3)					
FAME rich phase			Glycerol rich phase		
MtOH	FAME	G	MtOH	FAME	G
0.8978	7.0200	0.0000	4.2322	0.0000	3.0400

ภาคผนวก ข

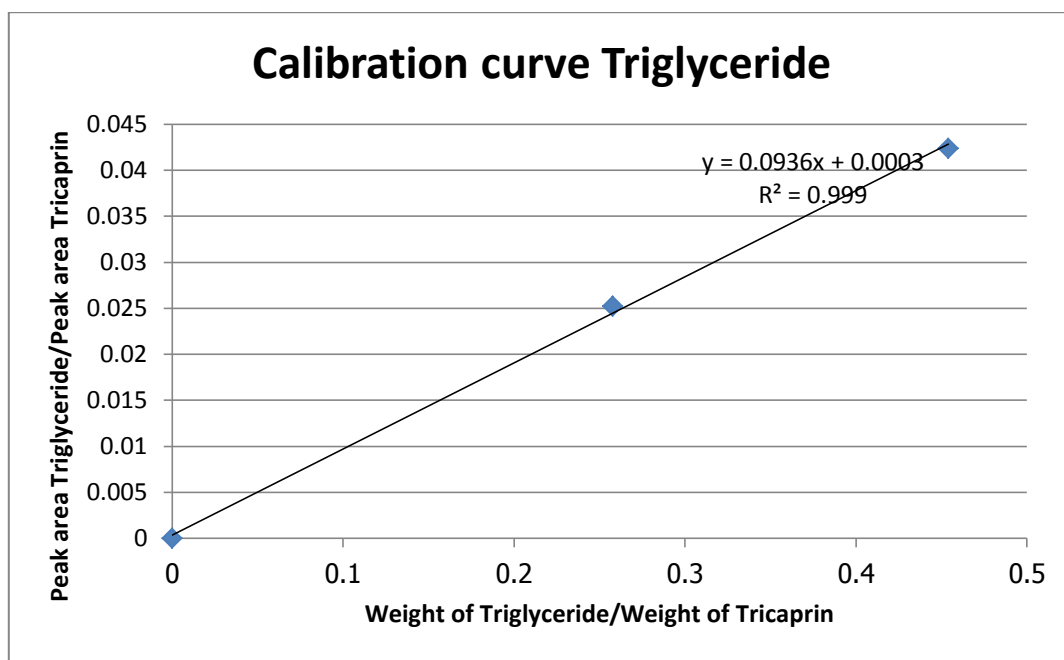
Calibration curve และการคำนวณ



ภาพภาคผนวก ข-1 Calibration curve ของ Monoglyceride



ภาพภาคผนวก ข-2 Calibration curve ของ Diglyceride



ภาพภาคผนวก ข-3 Calibration curve ของ Triglyceride

สูตรการคำนวณ กลีเซอรอลทั้งหมด

$$G = \left(\frac{a_g \times A_g}{A_{is2}} + b_g \right) \times \frac{W_{is2} \times 100}{W}$$

ซึ่ง G = ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของ กลีเซอไรด์ในสารตัวอย่าง

A_g = พื้นที่ใต้กราฟกลีเซอรอลทั้งหมด

A_{is2} = พื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐานตัวที่ 2

W_{is2} = น้ำหนักของสารมาตรฐานตัวที่ 2 หน่วย มิลลิกรัม

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง หน่วย มิลลิกรัม

a_g = ความชันของ Calibration function

b_g = จุดตัดแกนของ Calibration function

ยกตัวอย่างการคำนวณ

ตารางภาคผนวก ข-1 ค่าพื้นที่ใต้กราฟกลีเซอรอลทั้งหมดจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

น้ำหนักสาร มาตรฐาน (มิลลิกรัม)	พื้นที่ใต้กราฟ สารมาตรฐาน	น้ำหนักสาร ตัวอย่าง (มิลลิกรัม)	พื้นที่ใต้ กราฟ MG	พื้นที่ใต้ กราฟ DG	พื้นที่ใต้ กราฟ TG
0.8	217088	104.5	266008	299821	165251

คำนวณมอนอกลิเซอไรด์

$$MG = \frac{\left(\frac{266008}{217088} - 0.0002\right)}{0.0493} \times \frac{0.8}{104.5} \times 100$$

$$MG = 19.0249$$

คำนวณไดกลีเซอไรด์

$$DG = \frac{\left(\frac{299821}{217088} - 0.0017\right)}{0.0812} \times \frac{0.8}{104.5} \times 100$$

$$DG = 12.9916$$

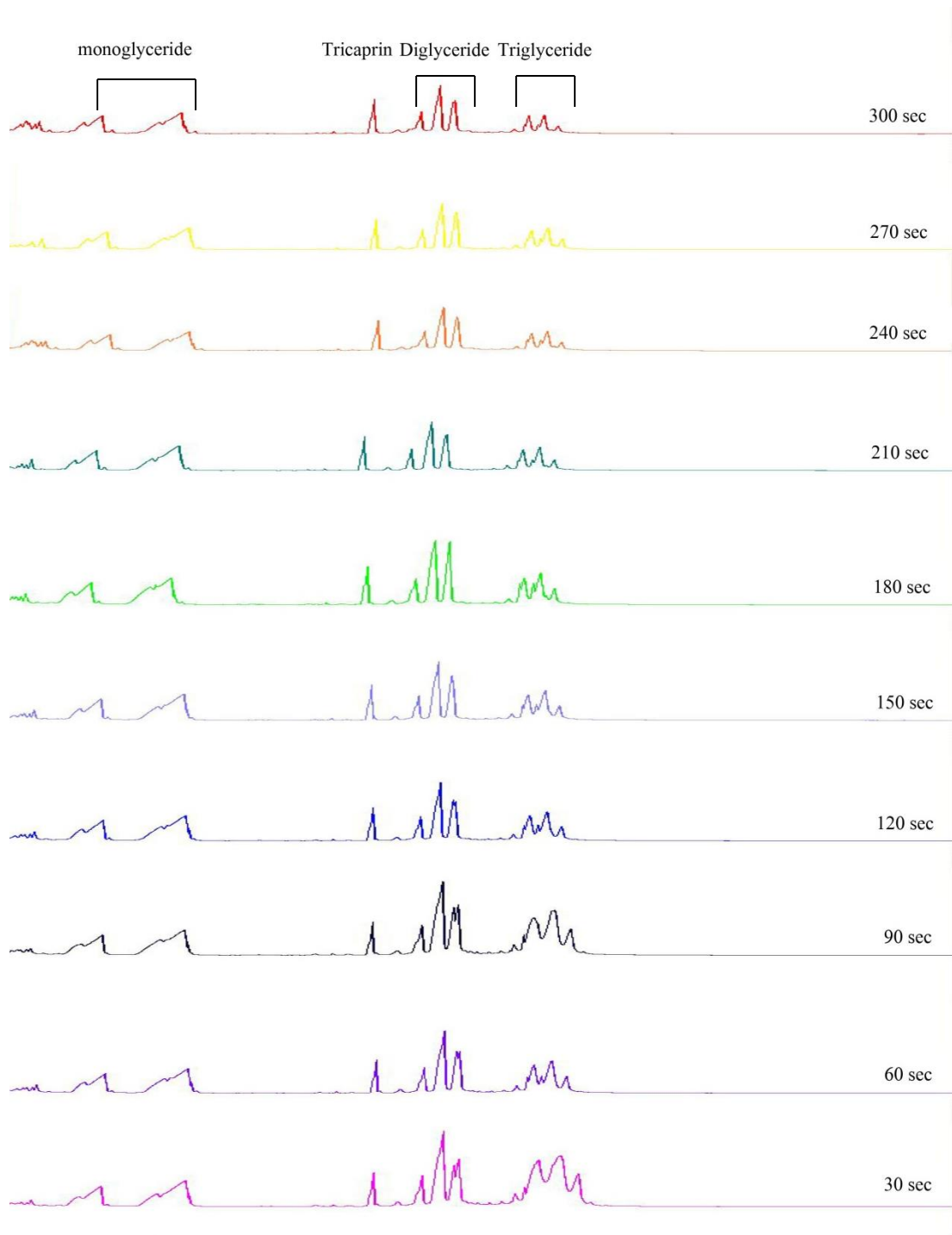
คำนวณไตรกลีเซอไรด์

$$TG = \frac{\left(\frac{165251}{217088} - 0.0003\right)}{0.0936} \times \frac{0.8}{104.5} \times 100$$

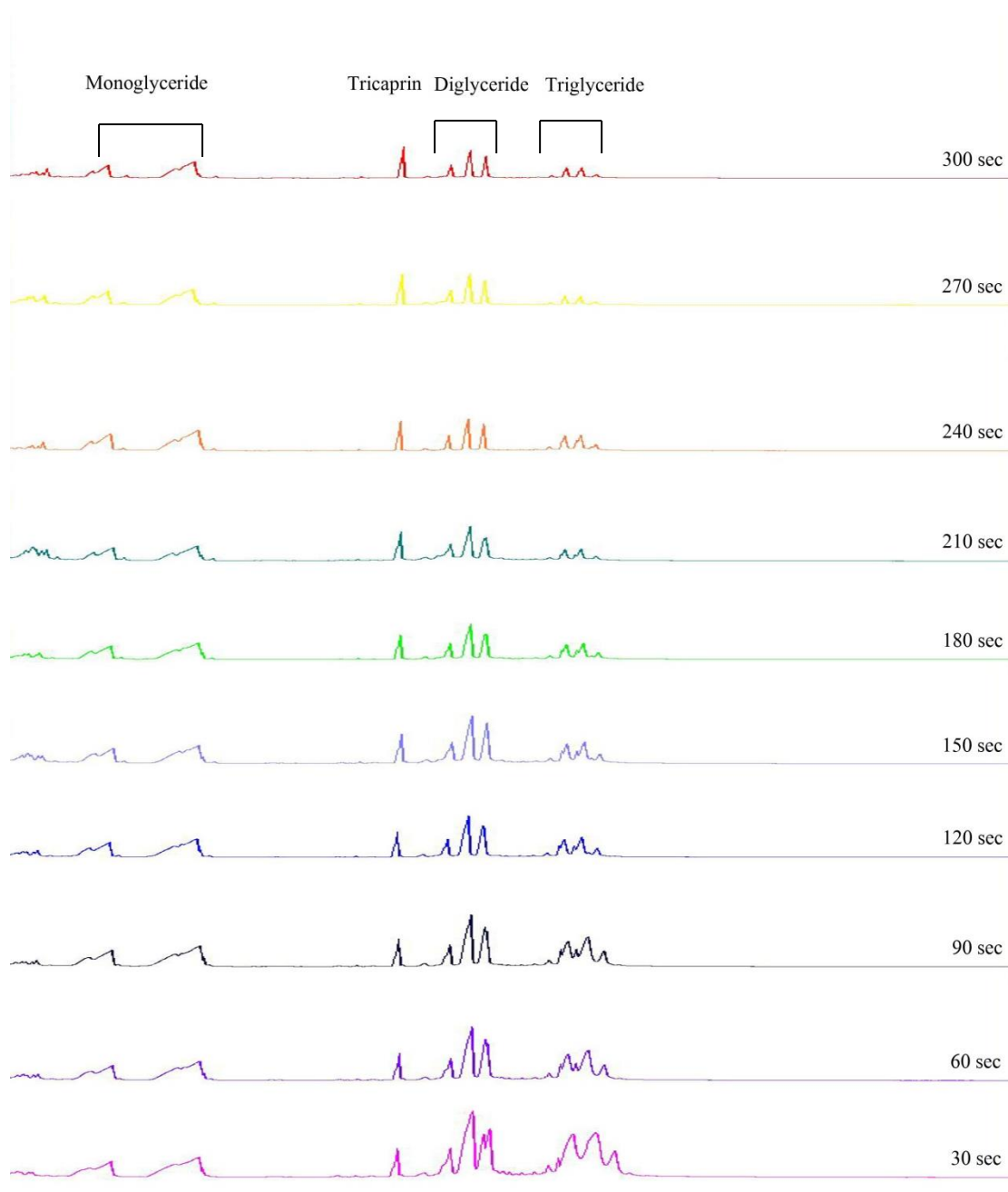
$$TG = 6.2173$$

ภาคผนวก ค

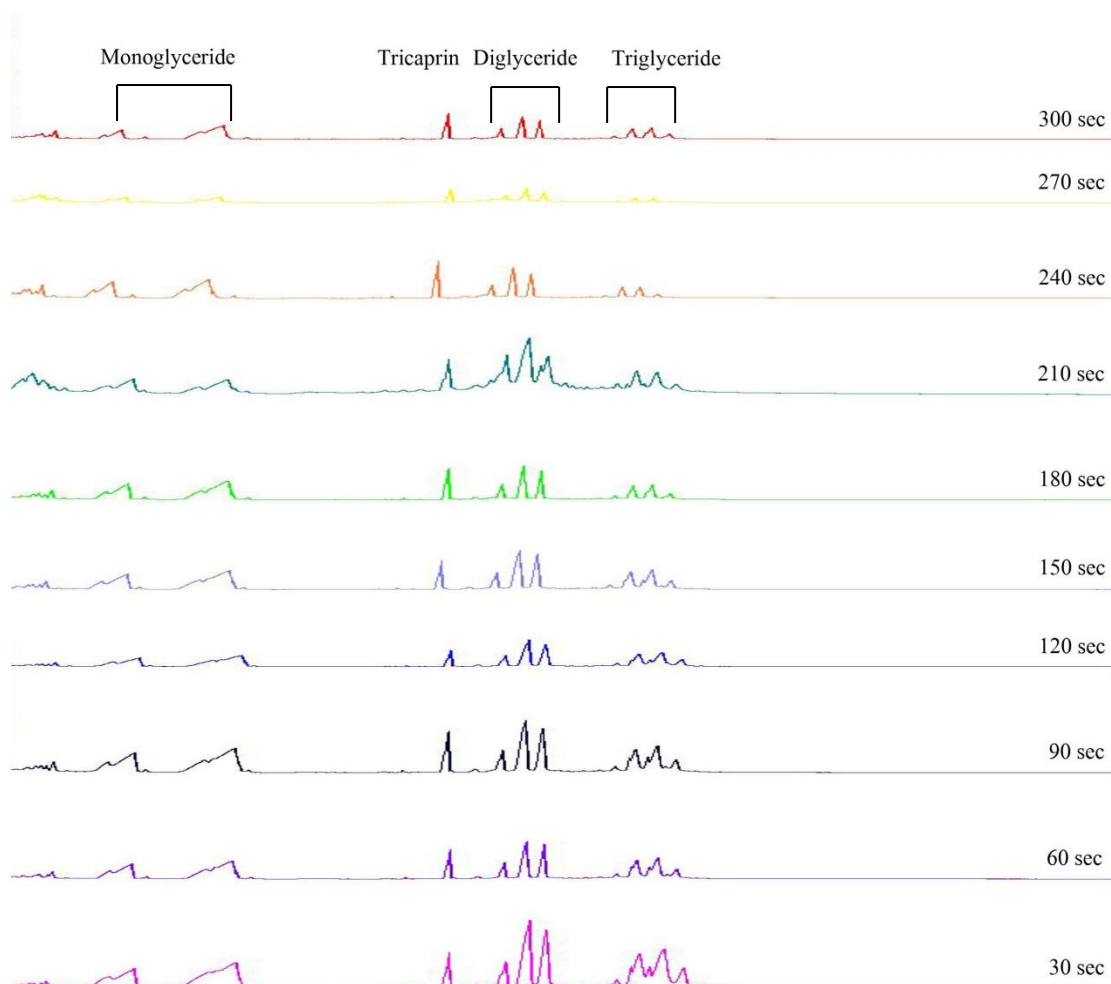
ภาพผลการทดลองจากเครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟี



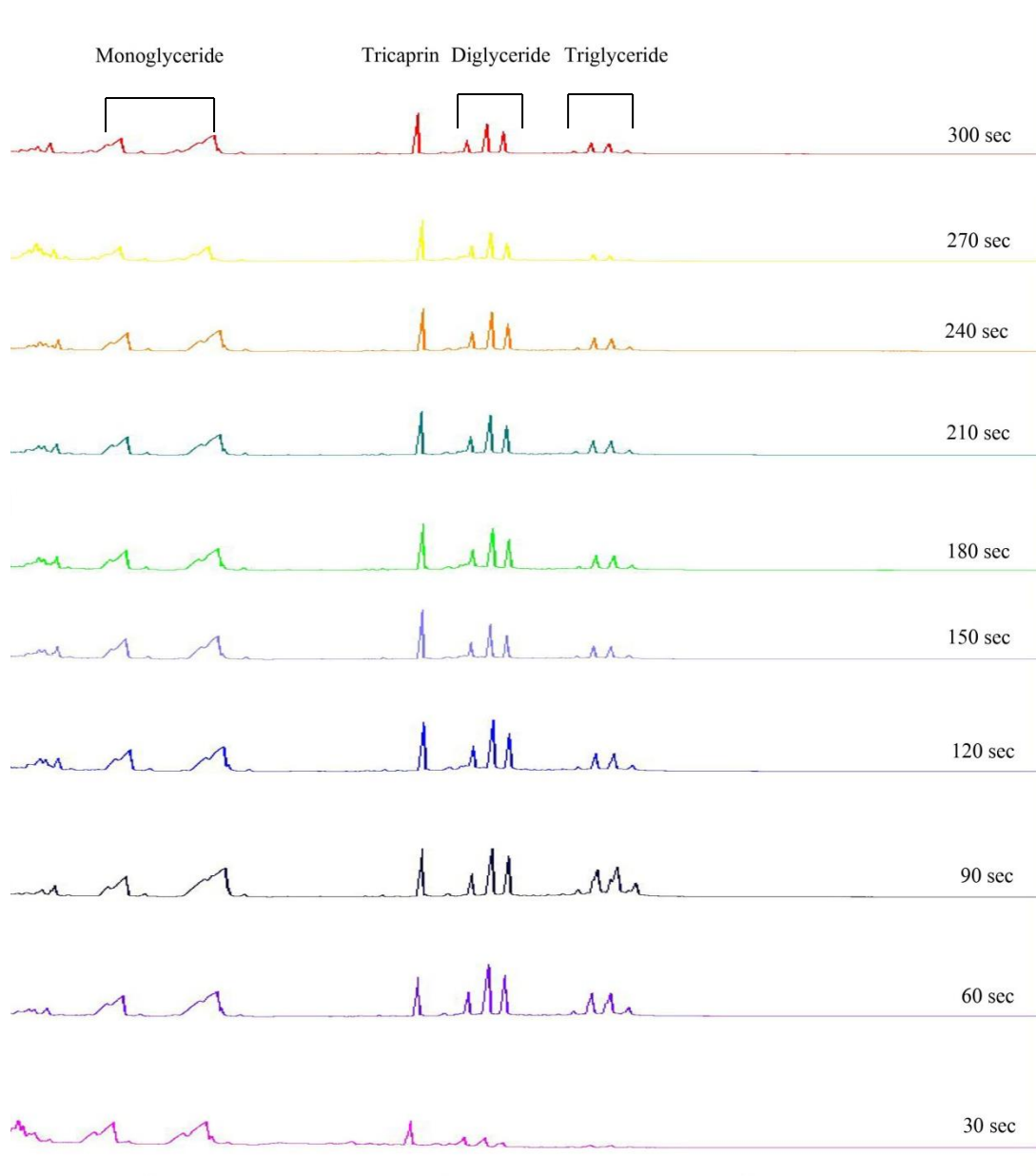
ภาพภาคผนวก ค-1 ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ จากเครื่อง
แก๊สโครมาโทกราฟีของปฏิกิริยาเอทานอลิซิส อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



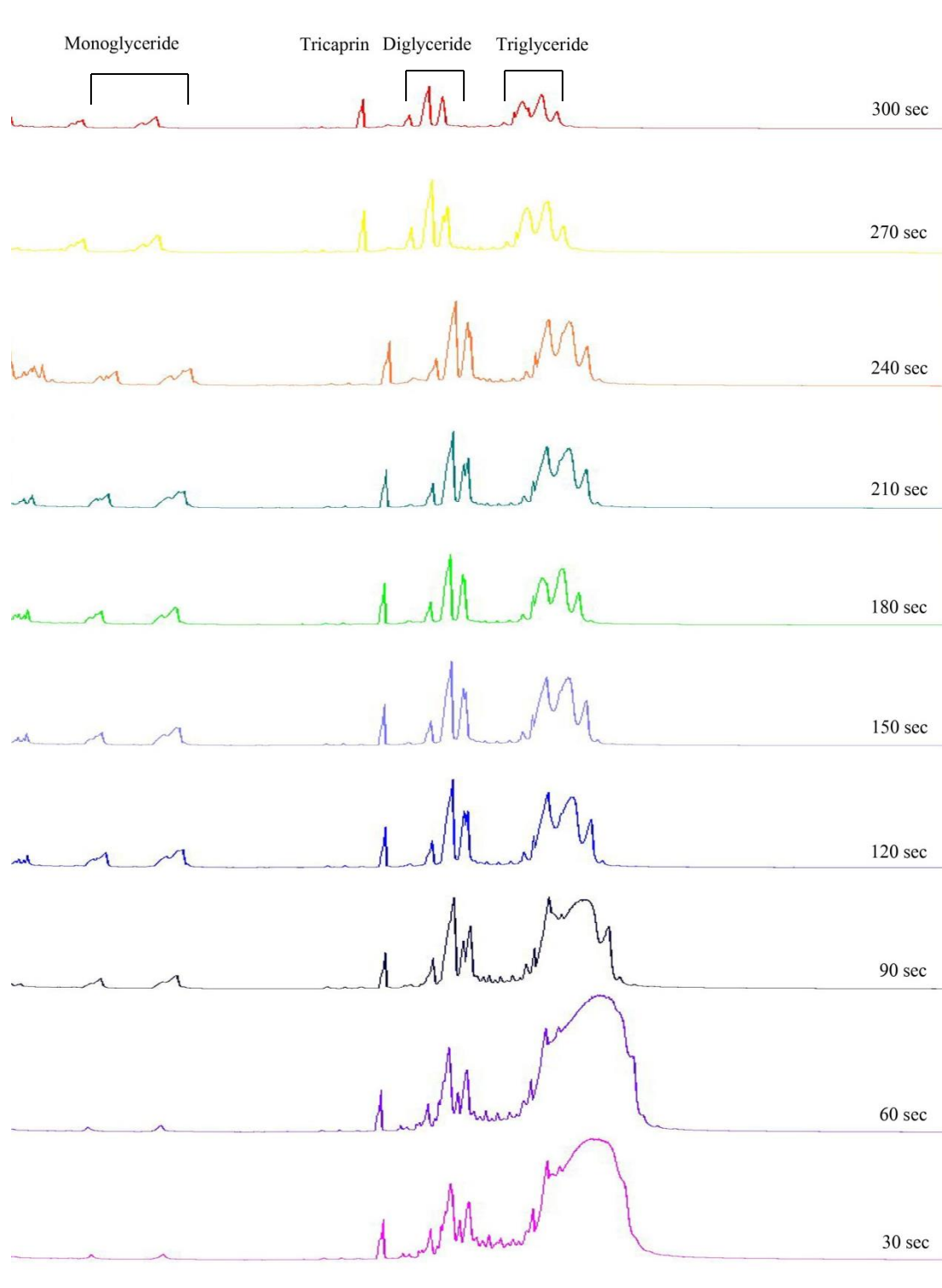
ภาพภาคผนวก ค-2 ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ จากเครื่อง
แก๊สโครมาโทกราฟีของปฏิกิริยาเอทานอลิซิส อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



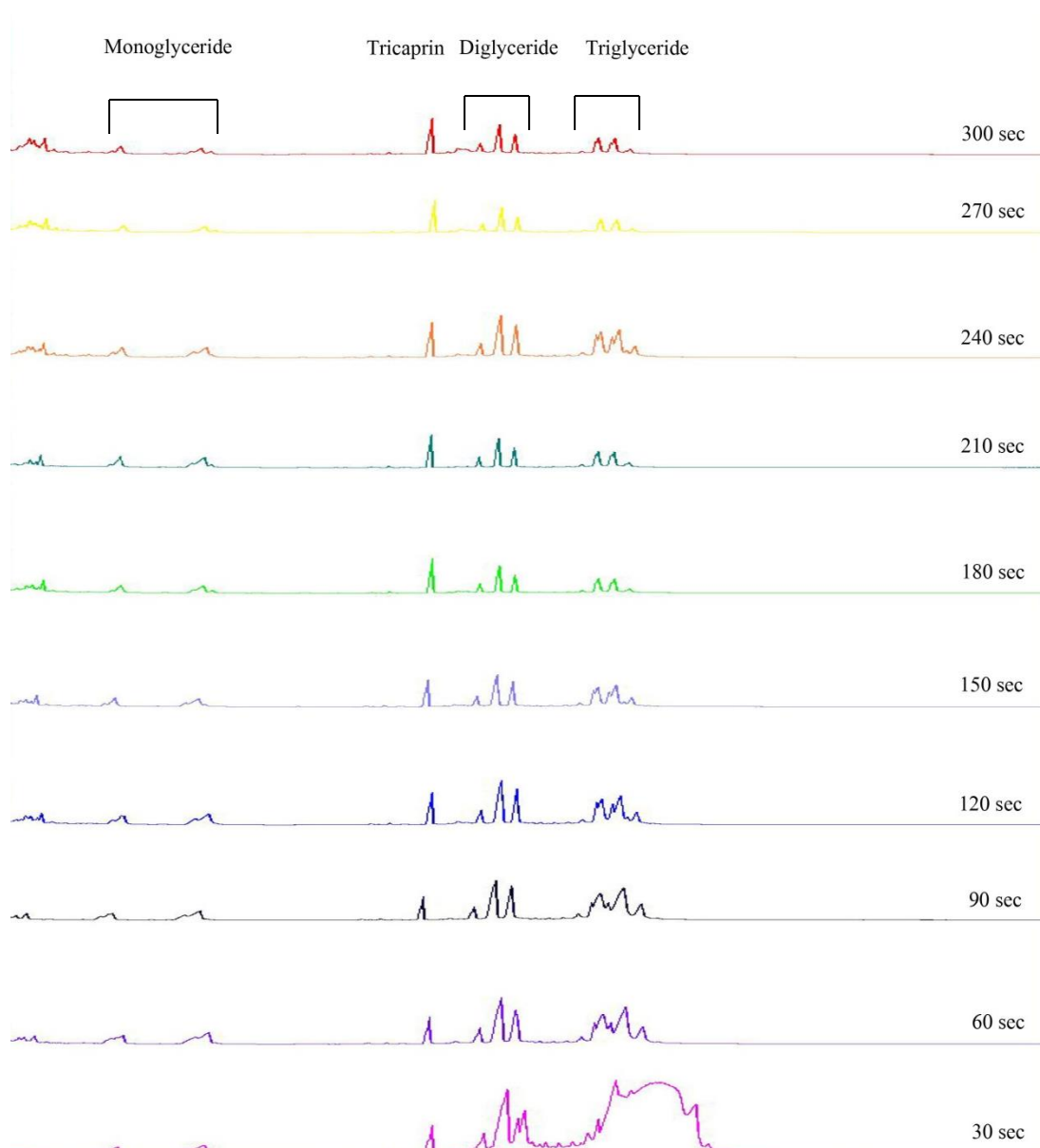
ภาพภาคผนวก ค-3 ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ จากเครื่อง
แก๊สโครมาโทกราฟีของปฏิกิริยาเอทานอลิซิส อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



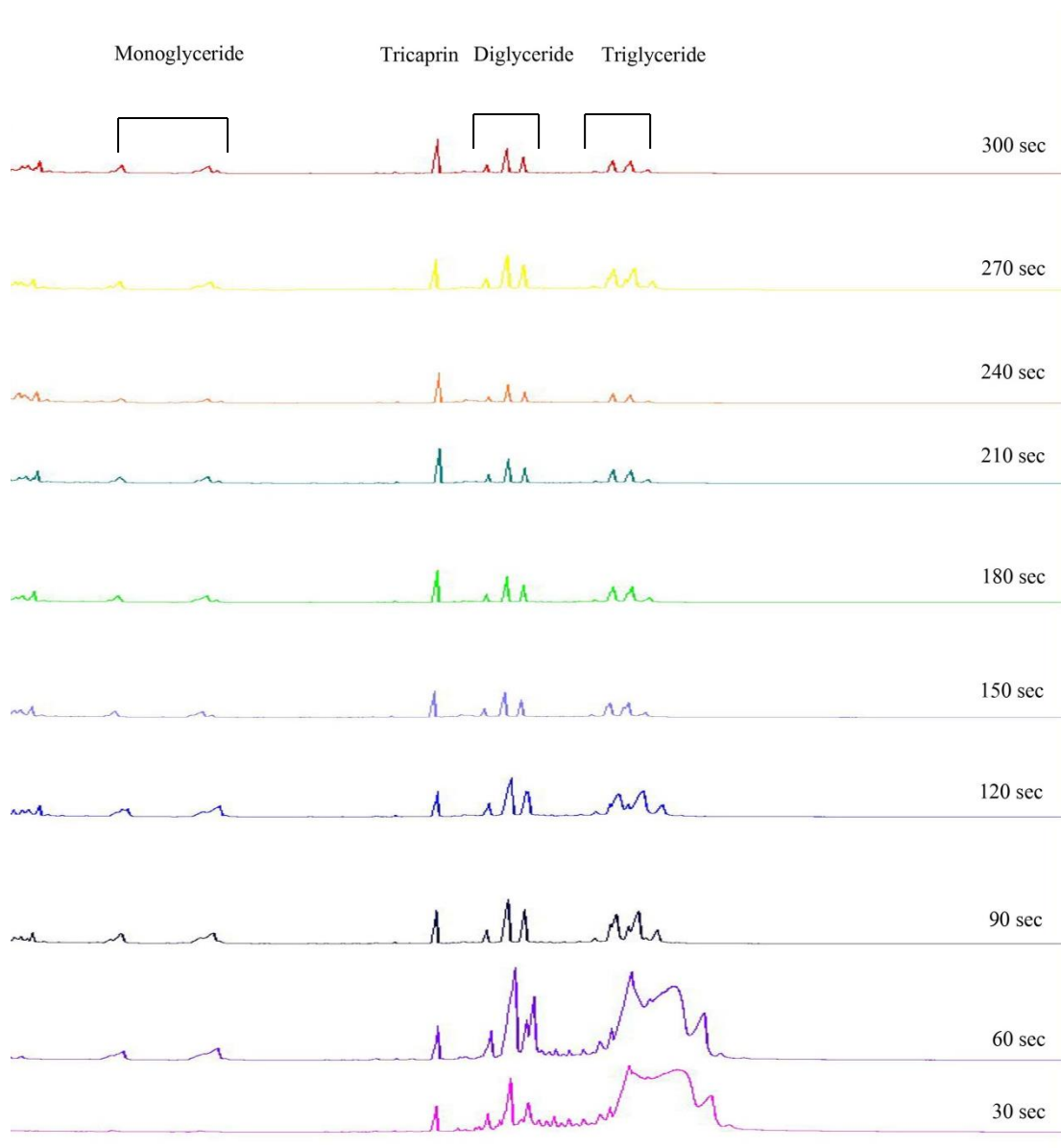
ภาพภาคผนวก ก-4 ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไลดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ จากเครื่อง
แก๊สโครมาโทกราฟีของปฏิกิริยาเอทานอลิซิส อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



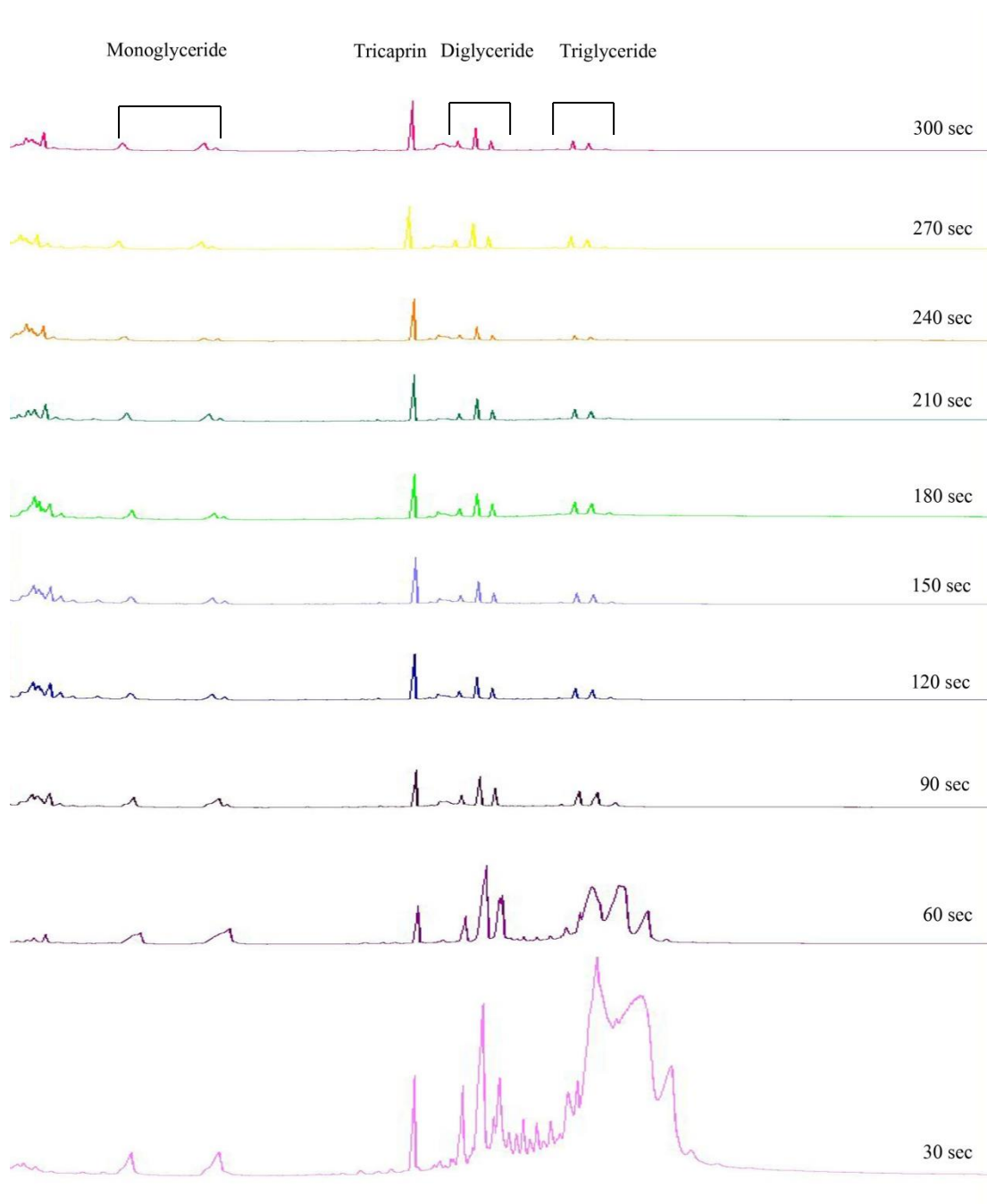
ภาพภาคผนวก ค-5 ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ จากเครื่อง
แก๊สโครมาโทกราฟีของปฏิกิริยามทาโนไลซิส อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพภาคผนวก ก-6 ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ จากเครื่อง
แก๊สโครมาโทกราฟีของปฏิบัติการเมทาโนไลซิส อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพภาคผนวก ค-7 ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ จากเครื่อง
แก๊สโครมาโทกราฟีของปฏิกิริยามทานอลิซิส อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพภาคผนวก ค-8 ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ ไตรกลิเซอไรด์ จากเครื่อง
แก๊สโครมาโทกราฟีของปฏิกิริยามาเทนอลิซิส อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส