



การศึกษาการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันโดยใช้กรดที่เหลือจาก
โรงงานผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

**Study on Diethyl Ether Produced from Dehydration Reaction by Using Acid
Residue from Biodiesel Plant as Catalyst**

ชัชวาล ชเลิศเพชร

Chatchawal Chalertphet

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน โดยใช้กรดที่ เหลือจากโรงงานผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ผู้เขียน	นายชัชวาล ชลเลิศเพ็ชร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันระหว่าง กรดไขมันอิสระจาก ส่วนกลั่นน้ำมันปาล์มและเมทานอล จะมีเมทานอลส่วนเกินเหลือซึ่งองค์ประกอบของเมทานอล ส่วนเกินจะประกอบด้วย น้ำ และกรดซัลฟิวริก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำกรดซัลฟิวริกที่เหลือจาก การผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ของเอทานอลเพื่อผลิตไดเอทิลอีเทอร์ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลถูกศึกษาในถึงปฏิกรณ์แบบ กะ ซึ่งศึกษาจากตัวแปร 3 ตัวแปร ที่มีผลต่อผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ได้แก่ อุณหภูมิสำหรับการทำ ปฏิกิริยาจาก 130 ถึง 170 องศาเซลเซียส ระยะเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาจาก 5 ถึง 60 นาที และ การผสมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์กับกรดที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลในอัตราส่วน 1:10.83 ถึง 1:65 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมพบว่าอุณหภูมิที่ เหมาะสมคือ 160 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาคือ 15 นาที จากผล การทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมพบว่า ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เป็น 0.44 และ 0.68 เมื่อใช้กรด ซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล และกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ นอกจากนี้อัตราการผสมกรดซัลฟิวริกกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล ที่อัตรา 1:16.22 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสามารถเพิ่มค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ถึง 0.7

Thesis Title Study on Diethyl Ether Produced from Dehydration Reaction by Using Acid Residue from Biodiesel Plant as Catalyst

Author Mr. Chatchawal Chalertphet

Major Program Chemical Engineering

Academic Year 2009

ABSTRACT

Biodiesel production via esterification reaction between palm fatty acid distillate (PFAD) and methanol induced a lot of excess methanol which contained water and sulfuric acid. This study used residual sulfuric acid from the esterification and pure sulfuric acid as catalyst for dehydration reaction of ethanol to diethyl ether. The dehydration of ethanol was taken place in batch reactor. Three reaction parameters were investigated concern yield of diethyl ether; temperature from 130 to 170 °C, reaction time from 5 to 60 minutes, and ratio of combination pure sulfuric acid with residual sulfuric acid from biodiesel production in range 1:10.83 to 1:65 by weight. The optimum conditions resulted of reaction were 160 °C, 15 minutes that yield of diethyl ether were 0.44 and 0.68 by using residual sulfuric acid from biodiesel production and pure sulfuric acid as catalyst, respectively. In addition, the combination pure sulfuric acid with residual sulfuric acid from biodiesel production at ratio of 1:16.22 by weight to be the optimum ratio that could increase yield of diethyl ether to 0.7

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	4
2.1 ไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether)	4
2.2 เอทานอล (Ethanol)	12
2.3 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid)	17
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst)	20
2.5 ไบโอดีเซล (Biodiesel)	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	29
3.1 วัสดุ	29
3.2 อุปกรณ์	29
3.3 วิธีการศึกษา	35
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์	40
4.1 ลักษณะและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา	40
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์	42
4.3 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์	51
4.4 ผลของการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ลงในกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์	59
4.5 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล	62

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.6 การประเมินค่าใช้จ่ายที่สามารถลดลงเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับ กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	64
บทที่ 5 สรุป	66
5.1 ข้อสรุปผลการวิจัย	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารอ้างอิง	70
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	75
ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำและสารละลาย ไดเอทิลอีเทอร์-เอทานอล	89
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบ	93
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ	123
ประวัติผู้แต่ง	126

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สมบัติทางกายภาพของไดเอทิลอีเทอร์	4
2 สมบัติทางกายภาพของเอทานอล	13
3 สมบัติทางกายภาพของกรดซัลฟิวริก	18
4 ปริมาณการเติมกรดบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิสำหรับการทดลอง 160 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์และปริมาณกรดบริสุทธิ์ที่สามารถประหยัดได้	62
5 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลหลังจากถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล	63
6 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์หลังจากถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล	63
7 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลผสมกับกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์หลังจากถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล	64
8 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของกรดซัลฟิวริกที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ 1 กิโลกรัม	65
ก.1 น้ำหนักของเอทานอลและน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐาน	75
ก.2 น้ำหนักของไดเอทิลอีเทอร์และน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐาน	76
ก.3 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	77
ข.1 อัตราส่วนพื้นที่เอทานอลต่อ 1-โพรพานอลที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายเอทานอล	89
ข.2 อัตราส่วนพื้นที่ไดเอทิลอีเทอร์ต่อ 1-โพรพานอลที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายไดเอทิลอีเทอร์	91
ค.1 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 130 °C เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	93

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.10 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 170 °C เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	111
ค.11 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 130 °C โดยเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ	113
ค.12 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 140 °C โดยเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ	115
ค.13 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 150 °C โดยเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ	117
ค.14 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 160 °C โดยเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ	119
ค.15 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 170 °C โดยเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ	121
ง.1 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากการทดลองครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	123

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1 การแตกตัวของเอทานอลซึ่งสามารถเกิดได้หลายรูปแบบที่ต่างกัน	9
2 กระบวนการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม	14
3 แผนภาพพลังงานศักย์ของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	20
4 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มาเกี่ยวข้อง	22
5 ระบบการผลิตไดเอทิลอีเทอร์	30
6 ถังปฏิกรณ์แบบกะสำหรับผลิตไดเอทิลอีเทอร์	31
7 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ	31
8 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K	32
9 ท่อแก้วคอนเดนเซอร์	33
10 อุปกรณ์สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์	33
11 ขวดแก้วก้นกลม	34
12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี SHIMADZU รุ่น 14B ดีเทคเตอร์แบบ FID	35
13 เมทานอลส่วนเกินที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล	35
ก. ก่อนผ่านการกลั่นแยกเมทานอล	
ข. หลังผ่านการกลั่นแยกเมทานอล	
14 เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน	36
15 ร้อยละโดยน้ำหนักองค์ประกอบของเมทานอลส่วนเกินที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันที่ไม่ได้ผ่านการกลั่นแยกเมทานอล	41
16 ร้อยละโดยน้ำหนักองค์ประกอบของเมทานอลส่วนเกินที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเมื่อผ่านการกลั่นแยกเมทานอล	42
17 ผลของอุณหภูมิต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	43
18 ผลของอุณหภูมิต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	44

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
19 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	46
20 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	47
21 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	48
22 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	49
23 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	52
24 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	53
25 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	54
26 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	55
27 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	57

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
28 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	58
29 ผลของการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ลงในกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา	60
30 ค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆเมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที	61
ก.1 เครื่อง Karl Fisher Coulometer ของบริษัท Mettler รุ่น DL39	78
ก.2 ส่วนประกอบของเครื่อง Karl Fisher Coulometer	80
ก.3 การจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการไทเทรตกรด	88
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของเอทานอลต่อพื้นที่ได้กราฟของ 1-โพรพานอล กับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล	90
ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของไดเอทิลอีเทอร์ต่อพื้นที่ได้กราฟของ 1-โพรพานอล กับความเข้มข้นของสารละลายไดเอทิลอีเทอร์	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

จากปัญหาวิกฤตเศรษฐกิจในปัจจุบันทำให้อุตสาหกรรมหลายๆ ด้านต้องปิดตัวลง ส่วนอุตสาหกรรมที่สามารถอยู่รอดได้ต้องพยายามดิ้นรนอย่างหนักเพื่อความอยู่รอด โดยใช้วิธีการต่างๆ มาช่วยให้ธุรกิจสามารถดำเนินกิจการต่อไปได้เช่น การลดกำลังการผลิตหรือแม้แต่การปลดพนักงานออกเพื่อแบ่งเบาภาระค่าใช้จ่ายและหนี้สิน ผลจากการลดกำลังการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆ ทำให้การใช้น้ำมันและเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ลดลงซึ่งส่งผลให้ราคาน้ำมันลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ในช่วงสิ้นปี 2551 ประชาชนผู้ใช้รถยนต์และรถจักรยานยนต์พอใจกับราคาน้ำมันที่ถูกลง เพราะจากราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกที่เคยสูงเกือบถึง 150 ดอลลาร์ต่อบาร์เรล เมื่อกลางปี 2551 ได้ลดลงต่ำกว่า 45 ดอลลาร์ต่อบาร์เรล และจากการเกิดวิกฤติเศรษฐกิจโลกในปี 2551 – 2552 อาจทำให้ความต้องการใช้น้ำมันในภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มลดลง โดยหลักการที่กล่าวว่ายิ่งน้ำมันมีราคาถูกลงยิ่งดี ซึ่งเป็นเพียงความคิดที่ถูกต้องในระยะสั้น เพราะในระยะยาวกลับเป็นเรื่องที่อันตรายสำหรับทุกฝ่าย ราคาน้ำมันที่ต่ำลงอาจจะทำให้การลงทุนในภาคอุตสาหกรรมน้ำมันลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปัญหาปริมาณน้ำมันไม่เพียงพอสำหรับใช้งานในอนาคต นอกจากนี้จากผลกระทบดังกล่าว ประชาชนอาจเกิดความชะล่าใจและละเลยนิสัยประหยัดพลังงาน ซึ่งผลที่ตามมาคือมีการใช้น้ำมันมากขึ้น โดยอาจส่งผลให้เสถียรภาพของประเทศที่พึ่งพาการส่งออกน้ำมันเป็นรายได้หลักลดลง โดยเฉพาะประเทศในตะวันออกกลางซึ่งผลที่จะตามมาก็คือราคาน้ำมันเกิดความผันผวนและหวนกลับมาแพงดังเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเศรษฐกิจโลกกลับมาฟื้นตัวใหม่ภายในปี 2555

ราคาน้ำมันที่ต่ำลงในเวลานี้ทำให้กลุ่มประเทศผู้ส่งออกน้ำมันหรือ “โอเปก” ไม่น่าจะนิ่งเฉยได้ จึงต้องเร่งหาวิธีการพยุงราคาน้ำมันเพื่อรักษาเสถียรภาพของราคาน้ำมัน ซึ่งที่ผ่านมาโอเปกได้ลดกำลังการผลิตน้ำมัน เพื่อหวังให้ราคาน้ำมันปรับตัวสูงขึ้นแต่ผลที่ได้รับก็ยังไม่ดีพอที่จะทำให้ราคาน้ำมันสูงขึ้น จึงได้มีการเสนอแนวทางสำหรับการแก้ปัญหาโดยการลดกำลังการผลิต ซึ่งจากข้อเสนอดังกล่าวทำให้สมาชิกโอเปกแบ่งออกเป็น 2 ฝ่ายโดยฝ่ายแรกประกอบด้วยประเทศลิเบีย

อิหร่าน และเวเนซุเอลา ที่ต่างก็ต้องการให้ลดกำลังการผลิต ส่วนอีกฝ่ายประกอบด้วยประเทศซาอุดีอาระเบียซึ่งได้คัดค้านและลงเลกกับการแก้ไขปัญหาโดยการลดกำลังการผลิตน้ำมัน

ปัญหาที่สำคัญที่สุดเมื่อราคาน้ำมันต่ำจนสามารถซื้อหาได้ง่าย คือการลงทุนและพัฒนา “พลังงานทางเลือก” เช่น พลังงานชีวภาพ เชื้อเพลิงชีวภาพ พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม เป็นต้น เกิดการหยุดชะงักลง ซึ่งจะส่งผลให้มนุษย์ต้องกลับมาพึ่งพาน้ำมันและพลังงานไฮโดรคาร์บอนเช่นเดิม ผลที่ตามมาคือเกิดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเพิ่มมากขึ้นจนทำให้เกิดภาวะโลกร้อนหนักกว่าเดิม จากปัญหาข้างต้นจึงทำให้เราไม่ควรมองข้ามการใช้พลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดวิกฤตพลังงานเมื่อเศรษฐกิจโลกฟื้นตัวกลับมาดีดังเดิม ดังนั้นทุกคนควรจะตระหนักและนึกถึงเรื่องการใช้งานพลังงานทางเลือกให้มากขึ้น (<http://www.thairath.co.th/news.php?section=international04&content=115135>)

พลังงานทางเลือกเป็นพลังงานที่สะอาด ซึ่งเมื่อนำมาใช้จะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณน้อยกว่าการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียม ในปัจจุบันพลังงานทางเลือกมีให้เลือกใช้หลากหลายชนิดได้แก่ แก๊สโซฮอลล์ ชีวมวล เชื้อเพลิงชีวภาพและไบโอดีเซล เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไบโอดีเซล ซึ่งได้รับความสนใจในขณะนี้ เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้สามารถหาได้ง่ายเช่น น้ำมันจากพืชน้ำมัน น้ำมันที่เหลือจากการทอดหรือไขมันจากสัตว์ เป็นต้น กระบวนการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันสามารถผลิตได้จาก 2 ปฏิกิริยา คือปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) และปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (ใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) สำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันจำเป็นต้องใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปจะใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก ในปริมาณร้อยละ 0 – 10 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันจะแยกชั้นเป็นของเหลว 2 ส่วน โดยส่วนล่างจะประกอบด้วยไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเตอร์ สำหรับส่วนบนเป็นเมทานอลส่วนเกินที่ประกอบด้วยเมทานอล น้ำและกรด ซึ่งเมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิตจะมีกรดเหลืออยู่ในส่วนเมทานอลส่วนเกิน กรดที่เหลือจะถูกกำจัดด้วยวิธีการล้างด้วยน้ำหรือการสะเทินด้วยด่างเพื่อลดความเป็นกรดก่อนที่จะนำไปทิ้ง การกำจัดกรดด้วยวิธีดังกล่าวเป็นการทิ้งกรดโดยเปล่าประโยชน์ในงานวิจัยนี้จึงได้พยายามหาวิธีการสำหรับนำกรดที่เหลือกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้นำกรดที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับผลิตไดเอทิลอีเทอร์ โดยกรดที่นำมาใช้ได้จากส่วนเมทานอลส่วนเกินที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งได้ผ่านการกลั่นแยกเมทานอล

การผลิตไดเอทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาดิไฮเดรชันของเอทานอลในปัจจุบัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งในรูปของแข็งและของเหลว การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของแข็งสำหรับการผลิต

ไดเอทิลอีเทอร์จะใช้สารประกอบประเภทอะลูมินา โดยบรรจุอยู่ในท่อตรงเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Haber และคณะ (2002) และ Zaki (2005) เมื่อทำการผลิต ไดเอทิลอีเทอร์ปฏิกิริยาจะเกิดในเฟสของแก๊ส ซึ่งข้อดีตัวเร่งของปฏิกิริยาชนิดของแข็งคือสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านกระบวนการฟื้นฟูสภาพ ข้อเสียคือต้องใช้ระยะเวลาในการผลิตนานเพื่อให้ได้ไดเอทิลอีเทอร์ปริมาณมากและสิ้นเปลืองพลังงาน ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของเหลวจำเป็นต้องใช้กรดความเข้มข้นสูง โดยผลิตในถังปฏิกรณ์แบบกะซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นในเฟสของเหลว ข้อดีตัวเร่งของปฏิกิริยาชนิดของเหลวคือ สามารถผลิตไดเอทิลอีเทอร์ได้ปริมาณมากกว่าเมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับการผลิตเท่ากับการผลิตที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็ง ส่วนข้อเสียคือในการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จะต้องเติมกรดซัลฟิวริกใหม่ในการผลิตแต่ละครั้ง จึงทำให้เป็นการสิ้นเปลืองปริมาณกรด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลกลับมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดิไฮเดรชันของเอทานอลสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายของกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาดิไฮเดรชันสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จากเอทานอลบริสุทธิ์ในปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) สามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน
- (2) สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาดิไฮเดรชันของเอทานอลในถังปฏิกรณ์แบบกะ
- (3) ทราบถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยาที่มีต่อผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์
- (4) เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether)

ไดเอทิลอีเทอร์เป็นที่รู้จักกันดีในชื่ออีเทอร์หรืออีทอกซีอีเทอร์ ไดเอทิลอีเทอร์เป็นสารเคมีที่ระเหยง่าย เป็นของเหลวไม่มีสีซึ่งมีความไวไฟสูงเนื่องจากมีจุดเดือดที่ต่ำและไดเอทิลอีเทอร์มีลักษณะเฉพาะของกลิ่นที่ค่อนข้างแรง ในปัจจุบันไดเอทิลอีเทอร์มักจะถูกนำไปใช้งานเป็นตัวทำละลายและยาสลบ สมบัติทางกายภาพต่างๆ ของไดเอทิลอีเทอร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของไดเอทิลอีเทอร์

Properties	Diethyl ether
Molecular formula	$C_4H_{10}O$ or $C_2H_5OC_2H_5$
Molar mass (g/mol)	74.12
Appearance	clear, colorless liquid
Density (g/ml@liquid)	0.7134
Melting point ($^{\circ}C$, K)	-116.3, 156.85
Boiling point ($^{\circ}C$, K)	34.6, 307.75
Solubility in water (g/100 ml@20 $^{\circ}C$)	6.9
Viscosity (cP@25 $^{\circ}C$)	0.224
Cetane number	85 - 96
Std enthalpy change of formation, $\Delta_f H^{\circ}_{liquid}$ (kJ/mol)	-271.2
Std enthalpy change of formation, $\Delta_f H^{\circ}_{gas}$ (kJ/mol)	-252.7
Enthalpy of combustion, $\Delta_c H^{\circ}$ (kJ/mol)	-2,726.3

ที่มา : http://en.wikipedia.org/wiki/Diethyl_ether

2.1.1 ประวัติไดเอทิลอีเทอร์

นักเล่นแร่แปรธาตุชื่อ **Raymundus Lullus** ได้รับการยกย่องว่าเป็นบุคคลแรกที่สามารถค้นพบไดเอทิลอีเทอร์โดยค้นพบไดเอทิลอีเทอร์ในปี ค.ศ. 1275 ต่อมาในปี ค.ศ. 1540 ไดเอทิลอีเทอร์ถูกสังเคราะห์เป็นครั้งแรกโดย **Valerius Cordus** โดยเรียกไดเอทิลอีเทอร์ว่า “Oil of Sweet Vitriol” ซึ่งเหตุผลที่เรียกไดเอทิลอีเทอร์ในชื่อดังกล่าว เนื่องจากในการค้นพบว่าเมื่อนำของผสมระหว่างเอทานอลกับกรดซัลฟิวริก (รู้จักกันในชื่อ “Oil of Vitriol”) กลั่นที่อุณหภูมิสูงจะเกิดเป็นไดเอทิลอีเทอร์และจากบางรายงานพบว่าไดเอทิลอีเทอร์มีคุณสมบัติในทางยา ซึ่งในยุคสมัยเดียวกัน **Philippus Theophrastus Aureolus Bombastus von Hohenheim** หรือที่รู้จักกันในชื่อ Paracelsus ซึ่งได้รับการยกย่องให้เป็นบิดาแห่งสาขาวิชาพิษวิทยาได้ค้นพบว่าไดเอทิลอีเทอร์มีคุณสมบัติบรรเทาอาการความเจ็บปวด และต่อมาในปี ค.ศ. 1730 คำว่าอีเทอร์ถูกบัญญัติให้เป็นชื่อทางเคมีโดย **August Siegmund Frobenius** (http://en.wikipedia.org/wiki/Diethyl_ether)

2.1.2 การเผาผลาญและสันดาปในร่างกาย

1. จากรายงานพบว่าเอนไซม์ที่อยู่ในร่างกายซึ่งมีชื่อว่า **Cytochrome P450** สามารถย่อยสลายไดเอทิลอีเทอร์ในร่างกายได้
2. ไดเอทิลอีเทอร์สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนของเอทานอลได้เนื่องจากไดเอทิลอีเทอร์จะยับยั้งการเผาผลาญเอทานอลในร่างกายให้ช้าลง
3. ไดเอทิลอีเทอร์สามารถยับยั้งการออกฤทธิ์ของยาได้ โดยไดเอทิลอีเทอร์จะยับยั้งออกซิเจนที่จะนำมาใช้เผาผลาญยาชนิดต่างๆ ในร่างกาย

2.1.3 ประโยชน์ของไดเอทิลอีเทอร์

โดยทั่วไปไดเอทิลอีเทอร์ถูกใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากไดเอทิลอีเทอร์มีความสามารถในการละลายน้ำอย่างจำกัด ดังนั้นจึงนิยมใช้ไดเอทิลอีเทอร์สำหรับการสกัดสารต่างๆ เมื่อนำไดเอทิลอีเทอร์ผสมกับน้ำพบว่าไดเอทิลอีเทอร์มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ โดยชั้นที่เป็นเฟสของอีเทอร์อยู่ชั้นบนและเฟสของน้ำอยู่ในชั้นล่าง สำหรับสารที่มีลักษณะเช่นเดียวกับไดเอทิลอีเทอร์คือ ไดคลอโรมีเทนซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้สามารถละลายน้ำได้อย่างจำกัด ซึ่งทำให้สามารถใช้ในการสกัดได้เช่นเดียวกับไดเอทิลอีเทอร์

ไดเอทิลอีเทอร์สามารถใช้เป็นเป็นตัวทำละลายสำหรับการทำปฏิกิริยา “Grignard” และปฏิกิริยาอื่นๆ อีกมากมายที่เกี่ยวข้องกับสารออร์แกนเมทัลลิก ไดเอทิลอีเทอร์เป็นตัวทำละลายที่สำคัญสำหรับการผลิตแผ่นพลาสติกจากเซลลูโลสเช่น แผ่นเซลลูโลสอะซิเตตเป็นต้น นอกจากนี้

ไคเอทิลอีเทอร์มีค่าซีเทนที่สูงโดยมีค่าสูงถึง 85 – 96 และมีค่าความสามารถในการระเหยสูง อีกทั้งมีค่าความสามารถในการจุดติดไฟด้วยตนเองที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้ไคเอทิลอีเทอร์สามารถนำมาใช้เป็นสารเติมในเชื้อเพลิงที่ใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซิน สำหรับในวงการแพทย์ได้ใช้ประโยชน์จากไคเอทิลอีเทอร์ดังนี้

(1) ใช้เป็นยาสลบ

เมื่อวันที่ 30 มีนาคม ค.ศ.1842 หมอชาวอเมริกันชื่อ **Crawford Williamson Long** เป็นศัลยแพทย์คนแรกที่ใช้ไคเอทิลอีเทอร์เป็นยาสลบ ต่อมาในวันที่ 16 ตุลาคม ค.ศ. 1846 **William T.G. Morton** ได้ใช้ไคเอทิลอีเทอร์เป็นยาสลบอย่างเป็นทางการเป็นครั้งแรก ณ อีเทอร์โคม ในเมืองบอสตัน รัฐแมสซาชูเซตส์ ถึงแม้ว่าก่อนหน้านี้ **Crawford Long** ได้นำไคเอทิลอีเทอร์ใช้งานจริงมาก่อนที่ประเทศจอร์เจีย

ไคเอทิลอีเทอร์ได้ถูกนำมาใช้แทนคลอโรฟอร์มเนื่องจากมีค่าดัชนีในการรักษา (Therapeutic Index) มากกว่าคลอโรฟอร์ม ซึ่งหมายถึงถ้าใช้ไคเอทิลอีเทอร์ในปริมาณที่เท่าคลอโรฟอร์ม การใช้ไคเอทิลอีเทอร์จะมีอันตรายต่อร่างกายน้อยกว่าคลอโรฟอร์ม และการนำไคเอทิลอีเทอร์ไปใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าการใช้คลอโรฟอร์ม ในปัจจุบันไคเอทิลอีเทอร์ยังเป็นที่นิยมสำหรับใช้เป็นยาสลบในประเทศที่กำลังพัฒนาเนื่องจากมีราคาถูก

สาเหตุในปัจจุบันที่ไม่นิยมนำไคเอทิลอีเทอร์ใช้งานเป็นยาสลบเนื่องจากมีความไวไฟสูง จึงทำให้มีการเลือกใช้สารชนิดอื่นแทน ซึ่งไม่มีความไวไฟเช่น ฮาโลเทน นอกจากนี้สาเหตุอีกประการที่ทำให้ในปัจจุบันไม่นิยมใช้ไคเอทิลอีเทอร์เป็นยาสลบ เนื่องจากไคเอทิลอีเทอร์จะเกิดผลข้างเคียงหลังใช้งานเช่น อาการคลื่นไส้และอาเจียน จึงทำให้มีการใช้สารเคมีชนิดอื่นเป็นส่วนผสมของยาสลบแทน เพื่อช่วยลดผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นเช่น สารเมทิลโปรพิลอีเทอร์เป็นต้น บางครั้งไคเอทิลอีเทอร์ถูกใช้สำหรับกำจัดเห็บและหมัดออกจากร่างกายของมนุษย์และสัตว์

(2) ใช้เป็นส่วนผสมของยากลายเครียด

ผลของไคเอทิลอีเทอร์ที่สามารถออกฤทธิ์เป็นยาสลบ จึงทำให้มีการนำไคเอทิลอีเทอร์เป็นส่วนผสมหนึ่งของยากลายเครียด ถึงแม้ว่าการใช้ไคเอทิลอีเทอร์เป็นส่วนผสมจะไม่นิยมนัก แต่เนื่องด้วยไคเอทิลอีเทอร์เป็นสารที่ไม่มีพิษและสามารถใช้เป็นตัวทำละลายที่ดี การนำไคเอทิลอีเทอร์ไปใช้มักจะถูกผสมกับเอทานอล โดยของผสมดังกล่าวถูกวางจำหน่ายเป็นครั้งแรกเมื่อศตวรรษที่ 19 เป็นยาอนาโปลีและยากลายเครียด ซึ่งในสมัยนั้นคนในสังคมตะวันตกค่อนข้างมีอาการแปรปรวนเนื่องมาจากปัญหาสังคมและสงคราม ในยุคเดียวกันยาแก้ไอชื่อ **Hoffmann's Drops** ได้ใช้ไคเอทิลอีเทอร์เป็นส่วนผสมของยา โดยบรรจุยาอยู่ในรูปของแคปซูลซึ่งมีส่วนประกอบของไคเอทิลอีเทอร์และเอทานอล การนำไคเอทิลอีเทอร์มารับประทานโดยตรงทำได้

ยาก จึงทำให้ต้องมีการผสมกับยาที่มีส่วนผสมของเอทานอลก่อนรับประทาน ไโดเอทิลอีเทอร์ สามารถใช้เป็นยาสูดดม และเป็นสารเคมีสำคัญสำหรับการผลิตโคเคนบริสุทธิ์จึงทำให้ ไโดเอทิลอีเทอร์เป็นสารเคมีที่ถูกควบคุมโดย **United Nations Convention Against Illicit Traffic and Psychotropic Substances**

2.1.4 การผลิตไโดเอทิลอีเทอร์

ไโดเอทิลอีเทอร์ไม่นิยมเตรียมในห้องปฏิบัติการเนื่องจากไโดเอทิลอีเทอร์มีความไวไฟสูง โดยส่วนใหญ่ไโดเอทิลอีเทอร์ที่ผลิตได้จากระดับอุตสาหกรรมเป็นผลิตภัณฑ์รองที่มาจาก การไฮเดรชันส่วนไอของเอทิลีนเพื่อผลิตเอทานอลและการผลิตไโดเอทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล ซึ่งการผลิตไโดเอทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลโดยทั่วไปสามารถผลิตได้ 2 วิธี

(1) การผลิตในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fix bed reactor)

ปฏิกรณ์ที่ใช้มีลักษณะเป็นท่อตรงภายในบรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดชนิดของแข็งซึ่งอาจรองรับด้วยสารชนิดอื่น เช่น $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, H-ZSM-5, Silica- Al_2O_3 , WO_3 , FePO_4 , ZnPO_3 และ TiO_2 เป็นต้น โดยสารตั้งต้นจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นไอก่อนถูกป้อนเข้าสู่ภายในปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง สารที่ถูกป้อนจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสุดท้ายผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของไอก่อนจะถูกส่งต่อไปหน่วยควบแน่นและหน่วยการแยกไโดเอทิลอีเทอร์ต่อไป เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ให้แก่ไโดเอทิลอีเทอร์ สำหรับข้อดีของการผลิตวิธีนี้คือให้ผลได้ของไโดเอทิลอีเทอร์สูงและประหยัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการสำหรับฟื้นฟูสภาพ (regeneration) ส่วนข้อเสียคือสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิต เนื่องจากต้องใช้ความร้อนเปลี่ยนรูปสารตั้งต้นให้เป็นไอก่อนถูกป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยาสูงซึ่งใช้อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส

(2) การผลิตในถังปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (semi batch reactor)

ปฏิกรณ์ที่ใช้มีลักษณะเป็นถังมีฝาปิดภายในบรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูงชนิดของเหลว ได้แก่กรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก เป็นต้น สารตั้งต้นที่ถูกป้อนจะอยู่ในรูปของเหลว โดยที่สภาวะเริ่มต้นจะมีกรดซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นผสมอยู่ภายในถัง และเมื่อเริ่มการทดลองจะเติมสารตั้งต้นลงไปอย่างต่อเนื่อง การผลิตวิธีนี้จะนิยมใช้ในระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของไอซึ่งจะต้องผ่านหน่วยการควบแน่นและหน่วยการแยกไโดเอทิลอีเทอร์ต่อไป สำหรับข้อดีของการผลิตโดยใช้วิธีนี้คือสามารถผลิตไโดเอทิลอีเทอร์ได้จำนวนมากกว่าเมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับการผลิตเท่ากับการผลิตวิธีแรกและ

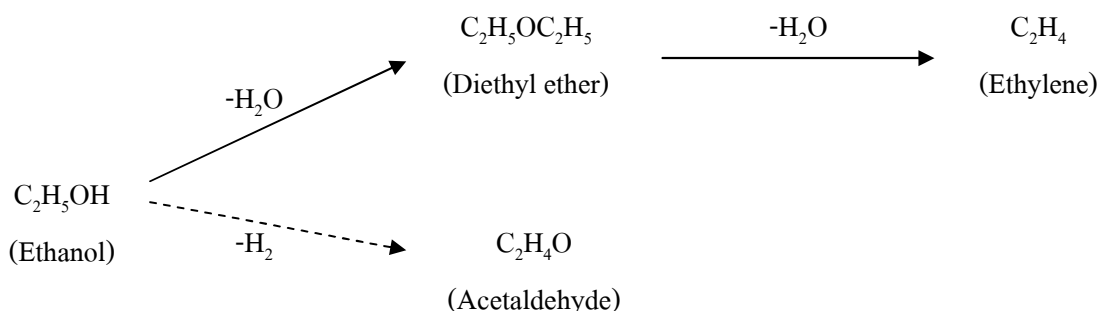
อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาค่ากว่าวิธีแรก (130 – 160 องศาเซลเซียส) ส่วนข้อเสียคือสิ้นเปลืองตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากจะต้องเติมกรดซัลฟิวริกใหม่ในการผลิตแต่ละครั้งจึงทำให้เป็นการสิ้นเปลืองปริมาณกรดซัลฟิวริก

สำหรับตัวอย่างการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จากบทความของ Metwurst (2004) เป็นการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาดิไฮเดรชันของเอทานอลบริสุทธิ์ โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองใช้เอทานอลบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้นซึ่งถูกบรรจุอยู่ในถังป้อนเพื่อเตรียมป้อนไปสู่ถังปฏิกรณ์ ส่วนภายในถังปฏิกรณ์จะมีกรดซัลฟิวริกที่บรรจุไว้ภายในถังป้อนเพื่อเตรียมป้อนไปสู่ถังปฏิกรณ์ 130 - 140 องศาเซลเซียส ก่อนการทดลองทุกครั้ง จากนั้นเมื่อเริ่มการทดลองเอทานอลจะถูกป้อนจากถังป้อนไปยังถังปฏิกรณ์ โดยภายในถังปฏิกรณ์จะถูกควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ช่วง 130 - 160 องศาเซลเซียส หลังจากเอทานอลเกิดปฏิกิริยาดิไฮเดรชันภายในถังปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไดเอทิลอีเทอร์และน้ำ โดยน้ำที่เกิดขึ้นจะเป็นสิ่งที่ไปเจือจางความเข้มข้นของไดเอทิลอีเทอร์และทำให้ปฏิกิริยาเกิดการย้อนกลับดังนั้นเพื่อให้การผลิตไดเอทิลอีเทอร์มีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องมีการกลั่นแยกน้ำและเอทานอลออกจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ โดยค่าการเปลี่ยนของเอทานอลที่ได้มีค่ามากกว่าร้อยละ 90

2.1.5 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์

2.1.5.1 ปฏิกิริยาดิไฮเดรชัน (Dehydration reaction)

ปฏิกิริยาดิไฮเดรชันถูกนิยามว่าเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียน้ำไปจากโมเลกุล โดยปฏิกิริยาดิไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาย่อยของปฏิกิริยาการกำจัด (Elimination Reactions) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เมื่อใช้กรดบรอนสเตด (Bronsted acid) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำหน้าที่ให้โปรตรอนแก่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) (อุณาโลม เวทย์วัฒน์นะ, 2545)



ภาพประกอบที่ 1 การแตกตัวของเอทานอลซึ่งสามารถเกิดได้หลายรูปแบบที่ต่างกัน
ที่มา : เจษฎา แซ่เล่า และคณะ (2548)

โดย -----> คือ สมการที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันซึ่งผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตได้คือ อะซีทัลดีไฮด์

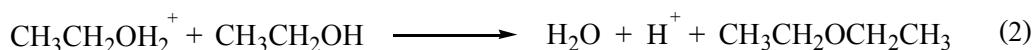
โดย —————> คือ สมการที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ต้องการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือสารไดเอทิลอีเทอร์ และปฏิกิริยาดีไฮเดรชันที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์มีดังนี้

(1) ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันสำหรับผลิตไดเอทิลอีเทอร์

สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีขั้นตอนคือเมื่อนำเอทานอลผสมกับกรดที่ค่อนข้างแรง ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กรดซัลฟิวริก ในปฏิกิริยากรดจะทำหน้าที่ให้ไฮโดรเจนไอออนแก่โมเลกุลเอทานอล ต่อจากนั้นไฮโดรเจนไอออนจะไปรวมตัวกับ โมเลกุลของเอทานอลซึ่งจะได้โมเลกุลของเอทานอลที่มีประจุบวก สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1



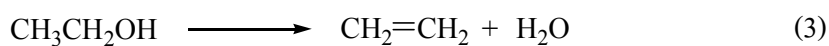
หลังจากนั้น โมเลกุลของเอทานอลที่ได้รับไฮโดรเจนไอออนและโมเลกุลของเอทานอลจะเกิดการรวมตัวกันอย่างละ 1 โมล โดยโมเลกุลของเอทานอลที่มีประจุบวกจะแตกตัวให้น้ำ 1 โมเลกุล และโมเลกุลเอทานอลจะแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนออกมา 1 โมล จากนั้น โมเลกุลที่เหลือจากการแตกตัวของโมเลกุลของเอทานอลที่มีประจุบวก และ โมเลกุลของเอทานอลเกิดการรวมตัวกันเป็น ไดเอทิลอีเทอร์ 1 โมล ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2



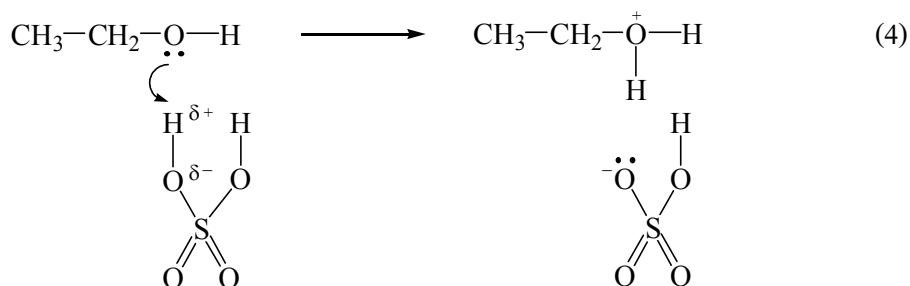
โดยปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จะต้องดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการผลิตเอทิลีน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการสำหรับการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทำปฏิกิริยาที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงเอทานอลจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเป็นเอทิลีน สำหรับปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไดเอทิลอีเทอร์เป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้เมื่อปฏิกิริยาดังกล่าวถึงจุดสมดุลระหว่างสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเพื่อให้ผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์มีค่าที่ดีจำเป็นต้องมีการกลั่นแยกไดเอทิลอีเทอร์ออกจากของผสมหลังการทำปฏิกิริยา ก่อนที่ปฏิกิริยาจะเกิดการย้อนกลับ นอกจากนี้ปฏิกิริยาอื่นๆ ที่สามารถใช้ในการผลิตไดเอทิลอีเทอร์คือ การสังเคราะห์อีเทอร์แบบวิลเลียมสัน ซึ่งเป็นการผลิตโดยนำโลหะอัลคาไลน์ละลายในแอลกอฮอล์

(2) ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันสำหรับผลิตเอทิลีน

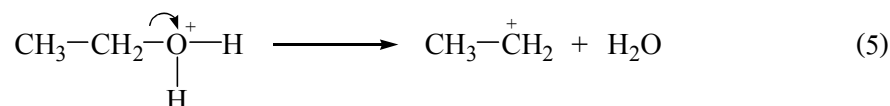
เอทิลีนเกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส โดยใช้กรดที่มีความเข้มข้นสูงเช่น กรดซัลฟิวริกหรือกรดฟอสฟอริกเป็นต้น ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลเพื่อผลิตเอทิลีนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3



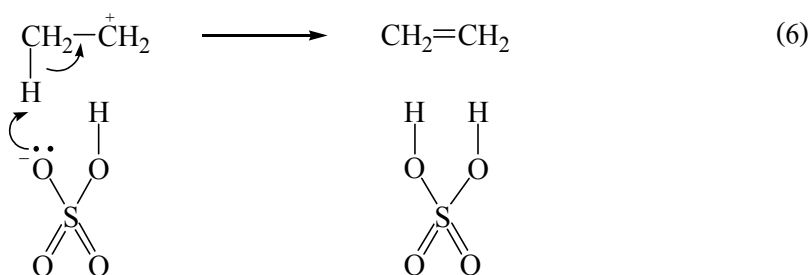
สำหรับกลไกการเกิดเอทิลีนจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันขั้นตอนแรกคือ อีเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวที่อยู่บนออกซิเจนของเอทานอล ได้รับไฮโดรเจนไอออนจากกรดซึ่งมีกลไกแสดงดังสมการที่ 4



จากนั้นเอทานอลที่ได้รับไฮโดรเจนไอออนเกิดการแยกตัวของโมเลกุลของน้ำ ซึ่งเรียกว่าสารคาร์โบแคชัน (carbocation) โดยเอทานอลที่ได้รับไฮโดรเจนไอออนจะเปลี่ยนรูปเป็นคาร์โบเนียมซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 5

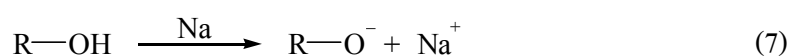


สุดท้ายไอออนของกรดซัลฟิวริกที่ให้ไฮโดรเจนไอออนแก่เอทานอลหรือไฮโดรเจนซัลเฟตไอออน จะไปดึงไฮโดรเจนไอออนจากโมเลกุลของคาร์โบแคชัน ทำให้ไฮโดรเจนซัลเฟตไอออนกลับไปเป็นโมเลกุลของกรดซัลฟิวริกเช่นเดิม และโมเลกุลของคาร์โบเนียมจะกลายเป็นเอทิลีนซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 6

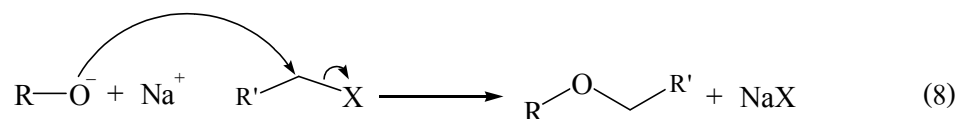


2.1.5.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์อีเทอร์แบบวิลเลียมสัน (Williamson ether synthesis)

การสังเคราะห์อีเทอร์แบบวิลเลียมสัน เป็นปฏิกิริยาซึ่งเปลี่ยนแอลกอฮอล์ (R-OH) ไปเป็นอีเทอร์ (R-O-R) โดยเป็นปฏิกิริยาการรวมตัวของแอลกอฮอล์กับโลหะอัลคาไลด์และอัลคิลเฮไลด์ ซึ่งจะได้สารอัลโคไซด์ (Alcoxide) ในปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม และเมื่อทำการผลิตอีเทอร์ด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องทำด้วยความระมัดระวัง โดยในขั้นตอนการเติมโลหะอัลคาไลด์ลงในแอลกอฮอล์ต้องทำด้วยความระมัดระวังเป็นพิเศษ ควรอยู่ให้ห่างจากแหล่งกำเนิดเปลวไฟ สำหรับตัวอย่างการสังเคราะห์อีเทอร์แบบวิลเลียมสัน ขั้นตอนแรกคือนำโลหะโซเดียมเติมลงในแอลกอฮอล์ซึ่งได้แก่เอทานอลและเมทานอลเป็นต้น (<http://www.chemhelper.com/williamsonether.html>) ซึ่งสามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ 7



อัลโคไซด์จะเกิดขึ้นได้เมื่อเติมสารอัลคิลเฮไลด์ชนิดที่เหมาะสม และเมื่อเติมสารอัลคิลเฮไลด์จะได้อัลโคไซด์และอีเทอร์อย่างละ 1 โมเลกุลซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 8



2.1.6 การป้องกันอันตรายจากไดเอทิลอีเทอร์

การเก็บไดเอทิลอีเทอร์ไว้เป็นเวลานาน ไดเอทิลอีเทอร์อาจเกิดการสัมผัสกับออกซิเจน ซึ่งทำให้ไดเอทิลอีเทอร์เปลี่ยนรูปเป็นผลึกของสารเปอร์ออกไซด์ได้ สารเปอร์ออกไซด์เป็นของแข็งมีลักษณะเป็นผลึกซึ่งจะตกผลึกอยู่บริเวณก้นขวดและเกาะติดบริเวณฝาขวดที่บรรจุไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อเกิดการเสียดสีจากการเปิดปิดฝาขวดอาจทำให้เกิดการระเบิดได้ การจัดเก็บที่ดีนั้นจะต้องนำไดเอทิลอีเทอร์เก็บไว้ร่วมกับสาร BHT (2, 6-di-tert-butyl-4-methylphenol) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไดเอทิลอีเทอร์ไม่ให้ไดเอทิลอีเทอร์เปลี่ยนสภาพเป็นเปอร์ออกไซด์

ไดเอทิลอีเทอร์เป็นสารไวไฟค่อนข้างสูงการนำไปใช้งานไม่ควรใช้งานใกล้อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของเปลวไฟและประกายไฟ และไดเอทิลอีเทอร์สามารถเกิดการจุดติดไฟได้เองที่อุณหภูมิสูงกว่า 170 องศาเซลเซียส ดังนั้นถ้าไดเอทิลอีเทอร์สัมผัสกับวัตถุหรือวัสดุที่มีความร้อนสูงกว่า 170 องศาเซลเซียส ก็จะสามารถติดไฟได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับเปลวไฟหรือประกายไฟ ดังนั้นจึงควรเก็บและใช้ไดเอทิลอีเทอร์ด้วยความระมัดระวัง

2.2 เอทานอล (Ethanol)

เอทานอล (ethanol) หรือเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งในกลุ่มแอลกอฮอล์เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ติดไฟง่าย มีกลิ่นเฉพาะตัว สำหรับเอทานอลที่มีความเจือจางจะมีรสหวาน แต่ถ้าเอทานอลมีความเข้มข้นสูงจะมีรสขม (สุภาพร ฉินฉิว, 2548)

2.2.1 องค์ประกอบของเอทานอล

เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง ที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน เอทานอลมีขนาดโมเลกุล 0.52 นาโนเมตร และเอทานอลเป็นสารประกอบมีขั้วจึงทำให้สามารถละลายในน้ำได้ โดยในโมเลกุลของเอทานอลจะประกอบด้วย

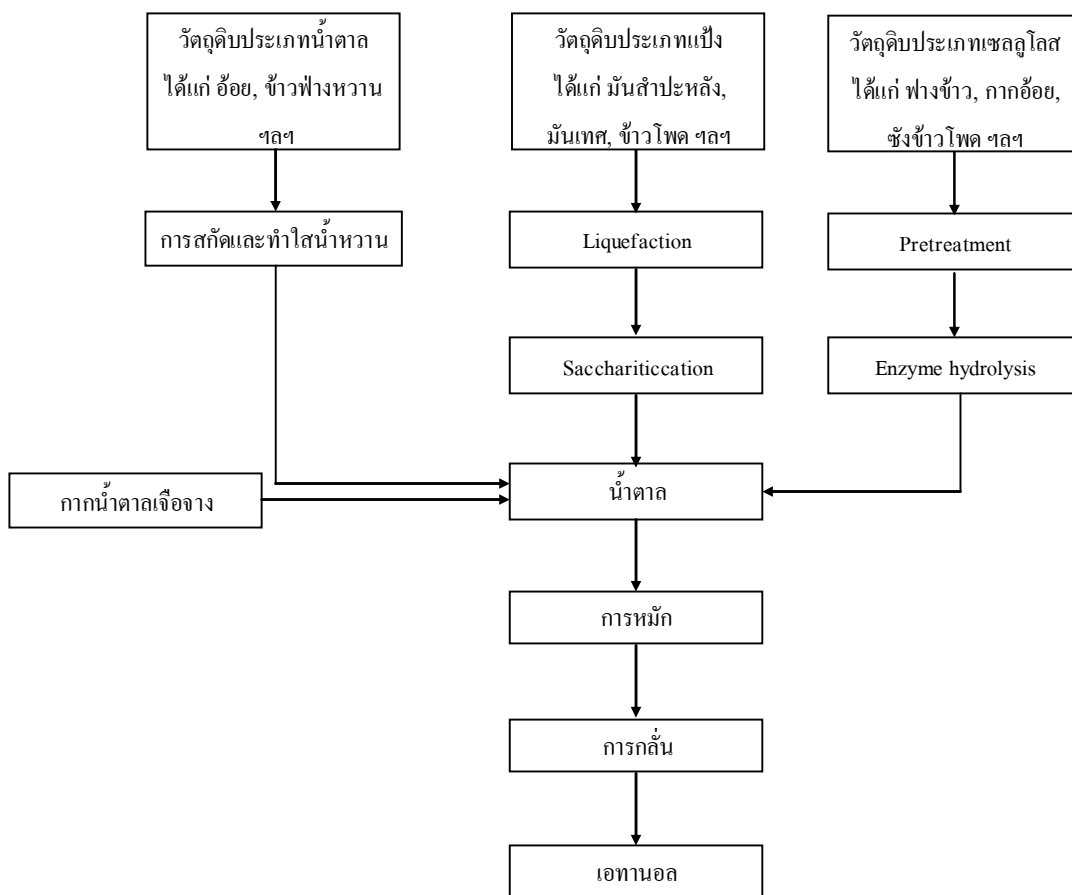
หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หนึ่งหมู่ สำหรับสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของเอทานอลสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของเอทานอล

Properties	Ethanol
Molecular formula	C ₂ H ₆ O
Molar mass (g/mol)	46.07
Appearance	colorless clear liquid
Density (g/ml@liquid)	0.789
Melting point (°C, K)	-114.3, 158.8
Boiling point (°C, K)	78.4, 352
Acidity (pK _a)	15.9
Viscosity (cP@20°C)	1.2

ที่มา : <http://en.wikipedia.org/wiki/Ethanol>

เอทานอลมีจุดหลอมเหลวซึ่งมีค่าต่ำถึง -114.3 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่ 78.4 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่น 0.789 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เนื่องจากคุณสมบัติของเอทานอลที่มีจุดเยือกแข็งที่ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ถูกนำมาใช้เป็นของไหลในเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเยือกแข็งของปรอท และสามารถนำมาใช้ประโยชน์สำหรับงานอื่นๆ อีกหลายอย่าง โดยเฉพาะงานที่ต้องใช้อุณหภูมิต่ำๆ เช่น antifreeze ใน automobile radiator นอกจากนี้ใช้เป็นตัวทำละลายสีเขียว และแลคเกอร์ ใช้เช็ดทำความสะอาด และใช้เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ (เหล้า ไวน์ และเบียร์) เป็นต้น และที่สำคัญเอทานอลเป็นส่วนผสมสำคัญในน้ำมันเบนซินซึ่งถูกนำมาใช้แทนสาร เอ็มทีบีอี (methyl tertiary butyl ether; MTBE) เพื่อช่วยเพิ่มค่าออกเทน โดยมีชื่อเรียกว่า “แก๊สโซฮอล์” สำหรับในประเทศไทยได้เริ่มใช้แก๊สโซฮอล์เป็นครั้งแรกคือสูตร E10 ซึ่งประกอบด้วยน้ำมันเบนซิน 91 (ร้อยละ 90) ผสมกับเอทานอล (ร้อยละ 10) โดยปริมาตร และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์ของรถจักรยานยนต์และรถยนต์ในประเทศไทย จนสามารถใช้งานกับแก๊สโซฮอล์สูตร E20 และ E85 ซึ่งในอนาคตประเทศไทยอาจมีการพัฒนาเครื่องยนต์จนสามารถใช้งานกับแก๊สโซฮอล์สูตร E98

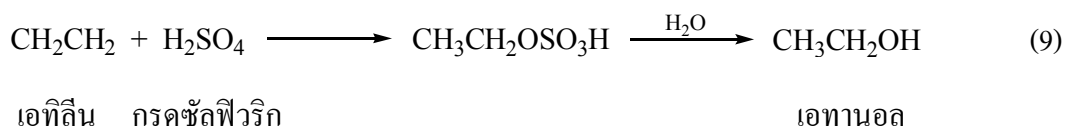


ภาพประกอบที่ 2 กระบวนการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม
ที่มา : Kazuhisa, 1997

2.2.2 กระบวนการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตเอทานอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

ก. เอทานอลที่ผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical Synthesis) เป็นการผลิตจากอนุพันธ์ของสารปิโตรเลียม เช่น เอทิลีนทำปฏิกิริยาระเหยน้ำ โดยเอทิลีนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์โดยใช้กรดซัลฟิวริกตามด้วยน้ำดังสมการที่ 9



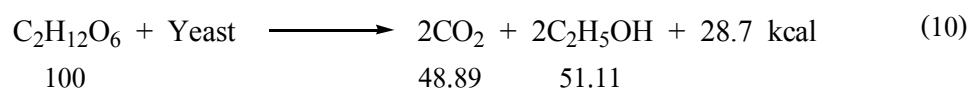
ข. กระบวนการหมัก (Fermentation Process)

ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมทั่วโลกประมาณ 93 % จะใช้กระบวนการหมัก ซึ่งวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเอทานอลจะเป็นสารประกอบจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังนี้

(1) วัตถุดิบประเภทน้ำตาล ได้แก่ น้ำอ้อย กากน้ำตาลและบีทน้ำตาล ยีสต์สามารถใช้วัตถุดิบประเภทนี้ได้โดยตรงและไม่ต้องผ่านกระบวนการใด

(2) วัตถุดิบประเภทแป้ง ได้แก่ ธัญพืช ข้าวโพด มันสำปะหลังและมันฝรั่ง ในการผลิตเอทานอลนั้น แป้งจะต้องถูกย่อย (Starch hydrolysis) โดยจะได้น้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเสียก่อน จึงจะสามารถเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลได้ ซึ่งการย่อยแป้งประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ การย่อยครั้งแรกหรือการทำให้เหลว (Liquefaction) การย่อยครั้งสุดท้ายหรือการทำให้หวาน (Saccharification)

(3) วัตถุดิบประเภทเซลลูโลส ได้แก่ ฟางข้าว กากอ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น ในกระบวนการผลิตหากใช้วัตถุดิบประเภทแป้งและเซลลูโลสจะต้องนำมาย่อยให้เป็นน้ำตาลก่อน โดยการใช้กรดแบคทีเรียหรือเอนไซม์ ส่วนวัตถุดิบที่เป็นน้ำตาลสามารถนำมาหมักกับเชื้อยีสต์ได้เลยซึ่งประกอบด้วยสองขั้นตอนดังนี้คือ ขั้นตอนแรกยีสต์จะใช้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) เป็นอาหารและเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลโดยกระบวนการ glycolysis ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 10



ตามทฤษฎีน้ำตาลกลูโคส 100 % จะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอทานอลร้อยละ 48.89 และ 51.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดการสูญเสียซึ่งได้เป็นสารประกอบชนิดอื่นๆ หรือถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ของยีสต์ทำให้เกิดเอทานอลเพียงร้อยละ 48 โดยน้ำหนัก เมื่อได้เอทานอลแล้ว ขั้นตอนที่สองเป็นการทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นและบริสุทธิ์สูงขึ้น (<http://www.ethanol-thailand.com>)

2.2.3 การเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้สูงขึ้น

ก. การกลั่นลำดับส่วน (fractional distillation) เหมาะสำหรับกลั่นแยกของเหลวที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน หรือแยกสารละลายที่ตัวทำละลายและตัวถูกละลายเป็นสารที่ระเหยง่ายทั้งคู่ ซึ่งถ้ากลั่นแบบธรรมดาเพียงครั้งเดียวจะได้สารที่ไม่บริสุทธิ์ เช่น การกลั่นน้ำผสมเอทานอลต้องกลั่นซ้ำหลายๆ ครั้ง จึงจะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นทุกครั้ง แต่ในทางปฏิบัติการนำของเหลวไปกลั่นซ้ำหลายๆ ครั้งจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและใช้เวลามาก จึงทำให้มีการนำไปกลั่นในคอลัมน์ลำดับส่วนหรือในหอกลั่นซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับเป็นการกลั่นซ้ำหลายๆ ครั้ง ซึ่งจะได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนักและมีน้ำร้อยละ 4.4 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเอทานอลและน้ำเป็นของผสมอะซิโโทรป โดยสารทั้งสองเป็นของผสมที่แยกได้อย่างมีข้อจำกัด ด้วยวิธีการกลั่นแยกแบบธรรมดาซึ่งของผสมเกิดอะซิโโทรปที่สัดส่วนเอทานอล 95.6 % โดยน้ำหนัก จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการอื่นช่วยเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้ได้มากกว่านี้

ข. การกลั่นแบบอะซิโโทรป (azeotropic distillation) ซึ่งเป็นวิธีการกลั่นแยกของผสมโดยใช้คุณสมบัติจุดเดือดร่วมของของผสม โดยโรงงานผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ในปัจจุบันไม่นิยมใช้วิธีการนี้ เนื่องจากจะต้องมีการเติมสารช่วยกลั่น ได้แก่ เบนซีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและติดไฟได้ง่าย รวมทั้งความซับซ้อนของการทำงาน ค่าก่อสร้างที่แพงและมีการใช้พลังงาน (ไอน้ำ) มากในการกลั่น

ค. การดูดซับ (adsorption) โดยใช้ molecular sieve dehydrator ซึ่งเป็นสารจำพวกซีโอไลต์ ที่เป็นตัวดูดความชื้นของอากาศดูดซับน้ำออกจากเอทานอลที่ได้จากการกลั่น ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีการกลั่นแบบอะซิโโทรป

ง. การแยกด้วยกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวกพอเรชัน ซึ่งจะใช้หลักการทำงานของเมมเบรน (permeate membrane) ร่วมกับการระเหย (evaporation) ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีการอื่นๆ คือ ประหยัดพลังงานเนื่องจากใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ ไม่ต้องใช้ตัวทำละลายดูดซับ จึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำที่จางจากกระบวนการมีน้อยมาก

2.2.4 การนำเอทานอลใช้เป็นเชื้อเพลิง

การนำเอทานอลผสมกับน้ำมัน (Fuel Alcohol) เอทานอลที่สามารถนำมาใช้ผสมได้ต้องเป็นแอลกอฮอล์ที่มีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ขึ้นไปซึ่งเอทานอลสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ใน 3 รูปแบบ คือ

แบบ 1 เป็นเอทานอลบริสุทธิ์ 95% สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงทดแทนน้ำมันเบนซิน และน้ำมันดีเซลใช้ได้กับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดสูง โดยบราซิลเป็นประเทศแรกที่ใช้

ทำการศึกษาวิจัยและเริ่มใช้เอทานอลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงมาตั้งแต่ปี 2516 โดยผลิตเอทานอลจากอ้อย และกากน้ำตาล ขานพาหนะที่ใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงมีมากถึงประมาณร้อยละ 41 สำหรับใน เครื่องยนต์ดีเซลสามารถใช้อเอทานอลบริสุทธิ์ 95% ผสมในน้ำมันดีเซลซึ่งเรียกว่า ดีโซฮอล (Diesohol) ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และมีการเพิ่มสารปรับปรุงสำหรับคุณสมบัติบางตัวในปริมาณ ร้อยละ 1-2

แบบที่ 2 ใช้เอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% โดยปริมาตร ผสมกับน้ำมันเบนซินซึ่ง เรียกว่า แก๊สโซฮอล (Gasohol) โดยทั่วไปแก๊สโซฮอลได้มาจากการผสมเอทานอลกับน้ำมันเบนซิน ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ในลักษณะเป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงค่าออกเทนของน้ำมันเบนซิน ซึ่ง สามารถนำมาใช้งานกับเครื่องยนต์โดยทั่วไปโดยไม่จำเป็นต้องดัดแปลงเครื่องยนต์แต่อย่างใด

แบบที่ 3 ใช้เป็นสารเคมีเพิ่มค่าออกเทน (Octane) แก่เครื่องยนต์ โดยการเปลี่ยนรูป เอทานอลมาเป็นสาร ETBE (Ethyl Tertiary Butyl Ether) สามารถใช้ทดแทนสาร MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether) ซึ่ง MTBE เป็นสารเติมแต่งในน้ำมันเบนซินที่หลายประเทศประกาศห้ามใช้ เนื่องจากก่อให้เกิดมลภาวะในอากาศที่สูงกว่าสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ แม้ว่าจะให้ค่าออกเทนสูงก็ตาม (http://www.alternative.in.th/index.php?option=com_content&view=article&id=238&Itemid102)

2.3 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid)

กรดซัลฟิวริกหรือกรดกำมะถันเป็นธาตุกรดแก่ ซึ่งสามารถละลายในน้ำได้ทั้งหมด ความเข้มข้น กรดซัลฟิวริกหรือรู้จักในอีกชื่อหนึ่งคือ น้ำมันของกรดกำมะถัน (oil of vitriol) กรดซัลฟิวริกถูกค้นพบเป็นครั้งแรกใน ศตวรรษที่ 8 โดยนักเล่นแร่แปรธาตุชาวมุสลิมชื่อ **Jabir ibn Hayyan (Geber)** ซึ่งหลังจากการค้นพบได้มีการนำกรดซัลฟิวริกไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย และกรดซัลฟิวริกเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีกำลังการผลิตเป็นลำดับแรกๆ ของอุตสาหกรรมเคมี ในปี ค.ศ. 2001 ทั่วทั้งโลกได้มีการผลิตกรดซัลฟิวริกสูงถึง 165 ล้านตัน เมื่อประมาณมูลค่าคิดเป็น 8 พันล้านดอลลาร์ ซึ่งกรดซัลฟิวริกโดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมถลุงแร่ การผลิตปุ๋ย การกลั่นน้ำมัน การบำบัดน้ำเสีย การสังเคราะห์สารเคมีและใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

โปรตีนหลายชนิดมีโครงสร้างของกรดอะมิโนที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์เช่น **Cysteine** และ **Methionine** ซึ่งกรดอะมิโนเหล่านี้เมื่อผ่านกระบวนการการเผาผลาญในร่างกายจะเกิดการผลิตกรดซัลฟิวริก สมบัติทางกายภาพต่างๆ ของกรดซัลฟิวริกสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

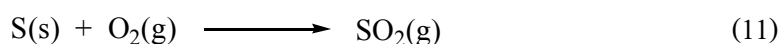
ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของกรดซัลฟิวริก

Properties	Sulfuric acid
Molecular formula	H ₂ SO ₄
Molar mass (g/mol)	98.08
Appearance	clear, colorless, odorless liquid
Density (cm ⁻³ @liquid)	1.84 g
Melting point (°C, K)	10, 283
Boiling point (°C, K)	290, 563
Acidity (pKa)	-3
Viscosity (cP@20°C)	26.7

ที่มา : http://en.wikipedia.org/wiki/Sulfuric_Acid

2.3.1 การผลิตกรดซัลฟิวริก

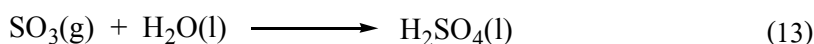
กรดซัลฟิวริกที่นำมาใช้งานโดยส่วนใหญ่ในปัจจุบัน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบ Contact Process ซึ่งเป็นกระบวนการสำหรับผลิตกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นสูง ซึ่งกรดซัลฟิวริกที่ผลิตได้จากกระบวนการดังกล่าวได้จากการนำซัลเฟอร์ ออกซิเจนและน้ำมาทำปฏิกิริยา โดยใช้วานาเดียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยขั้นตอนแรกนำซัลเฟอร์ไปเผาเพื่อผลิตซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 11



ต่อจากนั้นนำซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนซึ่งจะได้ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ โดยใช้วานาเดียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 12



จากนั้นนำแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ไปละลายในน้ำซึ่งจะได้กรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 98- 99 โดยน้ำหนัก ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 13



ซึ่งในทางปฏิบัติจริงการนำแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ละลายในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาความร้อนอย่างรุนแรงและเกิดไอของกรดซึ่งเป็นอันตรายสำหรับการผลิต จึงทำให้ต้องใช้วิธีการอื่นแทนเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยนำซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ละลายในกรดซัลฟิวริกเพื่อเปลี่ยนรูปแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์เป็น โอเลียม ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_7$) ซึ่งเป็นของเหลวโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 14



สุดท้ายนำโอเลียมที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นสูง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 15



2.3.2 การนำกรดซัลฟิวริกไปใช้งาน

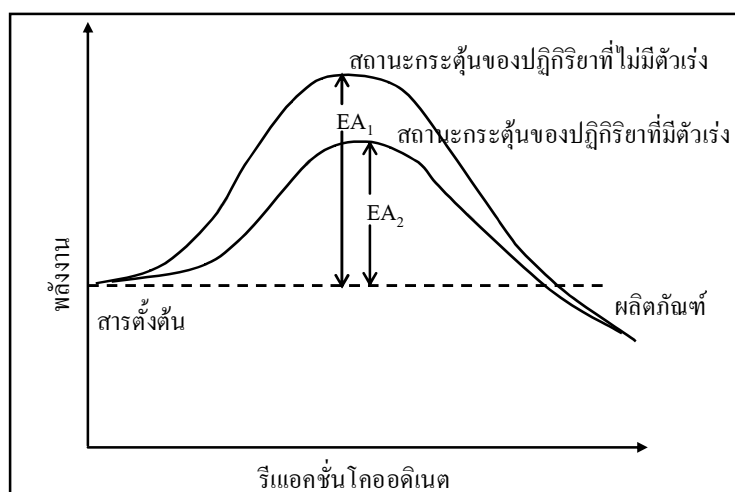
กรดซัลฟิวริกเป็นสินค้าทางเคมีที่มีความสำคัญมาก โดยปริมาณการผลิตกรดซัลฟิวริกเป็นตัวบ่งบอกถึงความแข็งแกร่งของอุตสาหกรรม การนำกรดซัลฟิวริกไปใช้งานส่วนใหญ่ (60 % จากการผลิตทั่วโลก) ใช้สำหรับกระบวนการแบบเปียก (wet method) เช่นการผลิตกรดฟอสฟอริก ใช้สำหรับการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต อุตสาหกรรมโลหะและเหล็กใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารสำหรับกำจัดกรเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในโลหะ

กรดซัลฟิวริกเป็นสารเคมีสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมทางเคมีเช่น ใช้เป็นสาร Cracking สำหรับการผลิตไนลอน ใช้ผลิตกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากเกลือ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมสำหรับผลิตไอโซออกเทนจากไอโซบิวเทนและไอโซบิวทิลีน ซึ่งไอโซออกเทนเป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับการเพิ่มค่าออกเทนให้แก่ น้ำมันเบนซิน นอกจากนี้กรดซัลฟิวริกเป็นสารที่มีความสามารถในการกำจัดโมเลกุลน้ำออกจากโมเลกุลสารชนิดอื่นๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการศึกษานานวิจัยในครั้งนี้

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst)

คำว่า “ ตัวเร่งปฏิกิริยา ” มาจากภาษากรีก 2 คำ ได้แก่คำว่า คะตะ (Cata) หมายถึง เล็กลง (Down) และ ไลไซน์ (Lysein) หมายถึง แยกหรือแตก (split or break) ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงหมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหรือแยกให้มีขนาดเล็กลงของแรงหรือพลังงานบนโมเลกุลตัวเร่ง ปฏิกิริยาเคมีมีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในการเลือกเร่ง เฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดขึ้นข้างเคียงการ เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้ยังคงต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก (สุรางคณา หัตถิ, 2546)

ความว่องไว และความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีอิทธิพล โดยตรงจากลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของ ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมองภาพว่า โมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้น หรือกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) หลายทฤษฎีได้พยายามอธิบาย ปรากฏการณ์ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ทฤษฎีสถานะทรานสิชัน (Transition – State – Theory) อธิบาย ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยลดพลังงานศักย์ขวางกั้น (Potential energy barrier) ซึ่งสารตั้งต้น ต้องมีเพื่อเปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์ คือ ลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาให้ต่ำลงนั่นเองแสดงดังรูปที่ 3



ภาพประกอบที่ 3 แผนภาพพลังงานศักย์ของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มี ตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา : สุรางคณา หัตถิ (2546)

ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีจะช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อสมดุลของปฏิกิริยาหรือเศษส่วนการเปลี่ยน ซึ่งถูกควบคุมโดยอุณหพลศาสตร์เพียงอย่างเดียว

2.4.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นสารช่วยควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา โดยไม่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาเคมี แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียวตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น โดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะของเหลว
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสมหรือตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะต่างกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะอยู่ในรูปแก๊สหรือของเหลว ซึ่งนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม

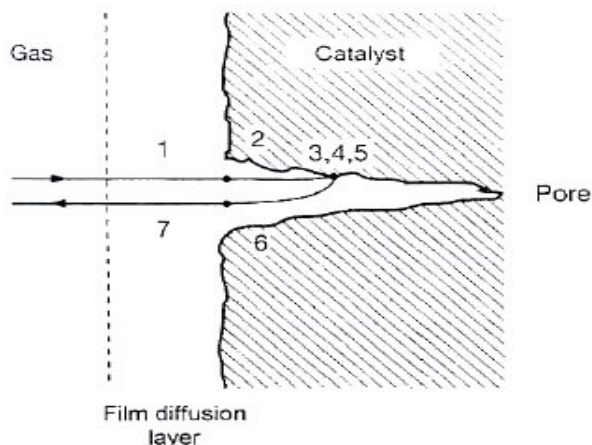
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสมประเภทที่เป็นของแข็ง สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิดตามชนิดของของแข็งหรือตามความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาคะตะไลซิส ปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและระบบของสารตั้งต้นกับสารผลิตภัณฑ์ต้องไม่เปลี่ยนแปลงธรรมชาติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา ยกเว้นที่บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่ผิว (surface interaction) จึงต้องไม่เกิดปฏิกิริยาทะลุเข้าไปในเนื้อชั้นในของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวต้องเป็นปฏิกิริยาดูดซับเท่านั้น (adsorption)

การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีแบบเนื้อผสมนี้ เนื่องจากความว่องไวและความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยามีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงควรมีพื้นผิวต่อปริมาตรมาก โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามาเคลือบบนวัสดุ (support) ที่มีรูพรุนสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากที่ใช้ไปช่วงระยะเวลาหนึ่งจะเสื่อมสภาพลง จะต้องมีการปรับสภาพเดิมอีกเป็นระยะ ๆ เรียกว่า activation

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่เคลือบบนวัสดุที่มีความพรุนสูง (high porosity) จะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ และสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 4

1. การถ่ายโอนมวลสารจากของไหลภายนอกไปยังผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา (Mass transfer through external boundary layer)
2. การแพร่มวลสารเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Diffusion into pores)
3. การดูดซับสารบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Chemisorption)
4. การเกิดปฏิกิริยาเคมีบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Reaction)

5. ผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลุดจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Desorption of products)
6. ผลิตภัณฑ์แพร่ออกจากรูพรุน (Diffusion of products out of pores)
7. การถ่ายโอนมวลสารของผลิตภัณฑ์ออกสู่ของไหล (Mass transfer back to bulk fluid)



ภาพประกอบที่ 4 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีวิหพันธุมาเกี่ยวข้อง
ที่มา : สุรางคณา หัตถิ (2546)

2.5 ไบโอดีเซล (Biodiesel)

ไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์คือน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ซึ่งแปรรูปเป็นอัลคิลเอสเทอร์กรดไขมัน ซึ่งได้มาจากการกระบวนการการเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์ระหว่างสารตั้งต้นไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้น (กิตติภูมิ, 2548)

เมทิลเอสเทอร์โดยทั่วไป มีองค์ประกอบที่มีลักษณะโมเลกุลใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลปิโตรเลียมซึ่งสามารถผลิตและพัฒนาได้จากไขมันหรือน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์ โดยส่วนใหญ่แล้วจะมุ่งไปที่เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์โดยใช้ไตรกลีเซอไรด์ในไขมันและน้ำมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์กับเมทานอลมากที่สุด โดยไบโอดีเซลสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

(1) น้ำมันพืชหรือสัตว์

ไบโอดีเซลชนิดนี้ได้มาจาก น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่ว น้ำมันหมู ซึ่งสามารถใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซล โดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นๆ หรือเปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติใดๆ น้ำมันพืชพันธุ์แท้จากธรรมชาตินี้อาจมีข้อจำกัดในการใช้บ้างเพราะคุณสมบัติต่างกับน้ำมันดีเซลค่อนข้างมาก เช่น การสันดาปไม่สมบูรณ์ เครื่องยนต์สะดุด มีตะกรัน ความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้การสตาร์ทไม่ค่อยติด แต่มีข้อดีคือราคาถูกและใช้งานดีกับเครื่องยนต์รอบต่ำ

(2) ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

ไบโอดีเซลชนิดนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์กับน้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล หรือผสมกับสารชนิดอื่นเพื่อให้ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล เช่น โคโคดีเซล (coco - diesel) ซึ่งเป็นการผสมระหว่างน้ำมันมะพร้าวกับน้ำมันก๊าดหรือปาล์มดีเซล (palm - diesel) เป็นการระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซลและต้องมีการผสมน้ำมันปิโตรเลียมเนื่องจากจะช่วยลดปัญหาความหนืด แต่ก็ยังมีปัญหาความหนืดในช่วงที่อากาศเย็น โดยจะเกิดการอุดตันของไส้กรอง น้ำมันชนิดนี้มีคุณสมบัติเหมือนน้ำมันดีเซลทั่วไปคือ เครื่องยนต์เดินเรียบ ไม่มีปัญหาเครื่องสะดุดและสตาร์ทติดง่าย

(3) ไบโอดีเซลแบบเอสเตอร์

ไบโอดีเซลแบบเอสเตอร์ต้องผ่านกระบวนการแปรสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยนำน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีกรดไขมันทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ซึ่งจะใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดเอสเตอร์ โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเตอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น ถ้าเป็นเมทิลแอลกอฮอล์ก็จะเรียกว่าเมทิลเอสเตอร์ นอกจากนี้จะได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ ซึ่งสามารถนำไปทำสบู่หรือเครื่องสำอาง ข้อดีของน้ำมันชนิดนี้คือ ค่าซีเทน (Cetane = ค่าดัชนีการจุดติดไฟ) สูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้การจุดระเบิดทำได้ดี การสันดาปสมบูรณ์ คาร์บอนมอนอกไซด์น้อย ไม่มีควันดำและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ความหนืดคงที่ ข้อเสียคือต้นทุนการผลิตสูงกว่าไบโอดีเซลชนิดอื่น เครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าดีเซล มีแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นและการเสื่อมสภาพได้ง่ายใน ส่วนประกอบที่เป็นยาง (<http://eco-town.dpim.go.th/article/download.php?id=1354>)

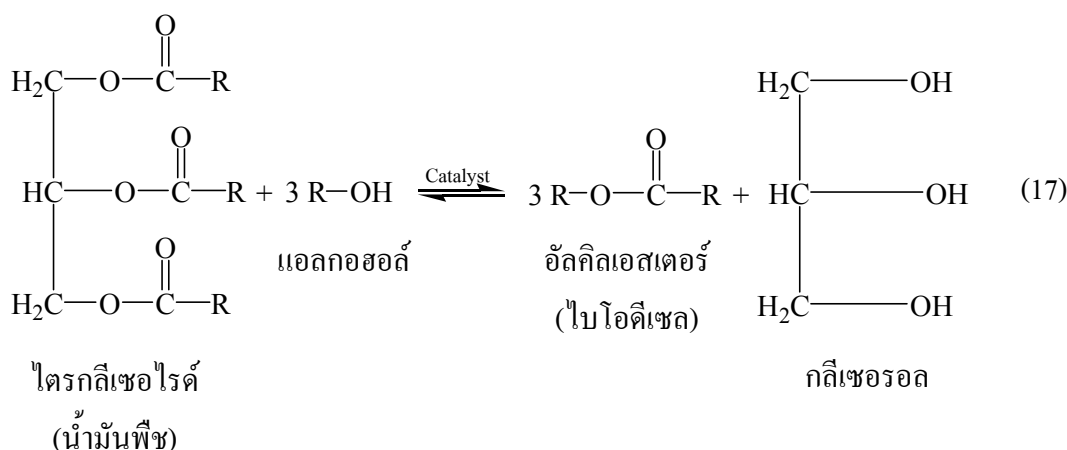
2.5.1 การผลิตเมทิลเอสเตอร์

เมทิลเอสเตอร์คือผลผลิตที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ชนิดเมทานอล เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ให้มีลักษณะโครงสร้างของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์คล้ายกับโครงสร้างของน้ำมันดีเซล ที่ได้จากปิโตรเลียม การผลิตเมทิลเอสเตอร์ด้วย ปฏิกิริยาทางเคมีแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) และปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification)

โดยทั่วไปปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันนิยมใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและส่วนใหญ่จะเลือกใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไม่เกินอุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้เมทิลเอสเตอร์ที่มีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ ดังนั้นต้องมีการดึงน้ำออกเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปทางด้านขวามือเพื่อเพิ่มผลได้ของเมทิลเอสเตอร์ โดยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 16



ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เอสเตอร์หรือคือการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ เพื่อให้เกิดเป็นเอสเตอร์ตัวใหม่หรือที่เรียกว่าการส่งผ่านเพื่อให้ทำปฏิกิริยา โดยนำเอาน้ำมันพืชหรือสัตว์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้เอสเตอร์ซึ่งจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเตอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ไบโอดีเซลชนิดเอสเตอร์มีคุณสมบัติที่คล้ายกับน้ำมันดีเซลมาก ผลผลิตของปฏิกิริยาที่กล่าวมาแล้วข้างต้นคือ อัลคิลเอสเตอร์และกลีเซอรอล โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 17



ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาสมดุล ถ้าต้องการให้ปฏิกิริยาดำเนินไปทางขวาทำได้โดยใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินไป ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาข้างต้นจะเป็นปฏิกิริยารวม ซึ่งจะประกอบด้วยปฏิกิริยาผันกลับต่อเนื่องคือ จากไตรกลีเซอไรด์กลายเป็นไดกลีเซอไรด์และเป็นโมโนกลีเซอไรด์ จากคุณมวลสารข้างต้น ต้องการ 3 โมลเมทานอล ต่อ 1 โมลไตรกลีเซอไรด์ จึงใช้

เมทานอลมากเกินพอร้อยละ 100 ซึ่งจะให้อัตราการเปลี่ยนที่สูง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง โดยทั่วไปจะนิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงของการทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามเมื่อให้เวลาที่เพียงพอสำหรับปฏิกิริยาที่จะสามารถดำเนินได้สมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้องเช่นเดียวกัน โดยทั่วไปปฏิกิริยาจะเกิดที่อุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล (กิตติศักดิ์ ทวีสิน โสภา, 2549)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Xu และคณะ (1997a) ทำการศึกษาปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเมทานอลเพื่อสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ บนระบบตัวเร่งปฏิกิริยา Pd / Cab - O - Silica ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบ plug-flow reactor โดยทำการศึกษาค่าการเปลี่ยนของเมทานอลเมื่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นเวลานาน และผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากการทดลองที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ Pd / Cab - O - Silica ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสและความดันรวม 1 บรรยากาศ (โดยความดันส่วนของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 0.85 บรรยากาศ ความดันส่วนของเมทานอล 0.14 บรรยากาศ) พบว่าเมื่อทำการทดลองเป็นเวลานาน ค่าการเปลี่ยนของเมทานอล และค่าการเลือกเกิดเป็นไดเมทิลอีเทอร์จะมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาจะมีการเปลี่ยนไปอยู่ในรูป carbonaceous species ซึ่งจะเกาะอยู่บนพื้นผิว Pd ทำให้ค่า activity ของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลงและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าการเปลี่ยนของเมทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าถ้ามีการเติมแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปพร้อมเมทานอลจะช่วยทำให้ activity ของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนจะช่วยทำให้ carbonaceous species ที่เกาะอยู่บนพื้นผิว Pd เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแทน ทำให้พื้นผิว Pd สะอาดขึ้นซึ่งเสมือนเป็นการ regenerate ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่แก๊สไฮโดรเจนที่ใส่เข้าไปจะเป็นตัวยับยั้งทำให้ค่า activity ของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลง

Xu และคณะ (1997b) ทำการศึกษากการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบ plug-flow reactor บนระบบตัวเร่งปฏิกิริยา solid-acid catalyst ซึ่งบรรจุปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.51 กรัม ไว้ภายในปฏิกรณ์และอัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 14 มิลลิลิตรต่อนาที โดยทำการศึกษาถึงอิทธิพลชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบต่างๆ ได้แก่ γ - Al_2O_3 , H-ZSM-5 และ Amorphous silica-alumina ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) และยังศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการใช้แบบ Amorphous silica - alumina ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่มีเปอร์เซ็นต์ซิลิกา ระหว่างร้อยละ 0 – 40 โดยน้ำหนัก พบว่าการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ปริมาณซิลิกาจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเมทานอลลดลง อุณหภูมิที่ใช้ในการ

ทดลอง คือที่ 140 – 350 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าการเปลี่ยนของเมทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น (เพิ่มเปอร์เซ็นต์ซิลิกา) พบว่าจะทำให้ค่าการเปลี่ยนของเมทานอลมีค่าลดลง โดยที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดันส่วนของเมทานอล เท่ากับ 116 ทอร์ บนระบบตัวเร่งปฏิกิริยา γ -Al₂O₃ ให้ค่าการเปลี่ยนของเมทานอลมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ผลดีกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น

Haber และคณะ (2002) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลเพื่อผลิตเอทิลีนใน flow-type reactor โดยใช้ซิลิกาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งถูกเคลือบด้วย $K_xH_{3-x}PW_{12}O_{40}$ และ $Ag_xH_{3-x}PW_{12}O_{40}$ ที่ได้จากการนำเกลือของโพแทสเซียม (K_x) และเกลือของเงิน (Ag_x) ผสมกับกรดฟอสโฟทังสติกที่มีความเข้มข้นต่างๆ เพื่อปรับค่าตัวแปร x ให้ได้ตามต้องการ โดยในการทดลอง x จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 3 สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทดลองที่สภาวะบรรยากาศและช่วงอุณหภูมิ 398 ถึง 773 องศาเซลเซียส จากการทดลองเมื่อใช้ $K_xH_{3-x}PW_{12}O_{40}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อ x เป็น 1, 2 และ 2.5 พบว่าค่าการเปลี่ยนของเอทานอลมีแนวโน้มเหมือนกันแต่เมื่อ x เท่ากับ 3 ทำให้ activity ของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเนื่องจาก K_3 เป็นเกลือที่เป็นกลางจึงทำให้การให้โปรตอนแก่เอทานอลน้อยลง โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทดลองเมื่อใช้ $K_xH_{3-x}PW_{12}O_{40}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นคือที่ 470 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่าการเปลี่ยนของเอทานอลถึง 100 % และเมื่อใช้ $Ag_xH_{3-x}PW_{12}O_{40}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อ x เป็น 1, 2 และ 3 พบว่าค่าการเปลี่ยนของเอทานอลมีแนวโน้มใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าสูงสุดถึง 100 % ที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส

Zaki (2005) ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโลหะทรานซิชันออกไซด์ชนิดต่างๆ โดยใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับงานวิจัยนี้ได้จากการเตรียมที่แตกต่างกัน โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งได้แก่ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) แมงกานีสออกไซด์ (Mn₂O₃) อะลูมินา (Al₂O₃) และซิลิกา (Si₂O₂) มาบดผสมที่อัตราส่วนต่างๆ ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ 6 อัตราส่วน ต่อจากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพต่างๆ ได้แก่ตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD วัดค่าความเป็นกรดและทดสอบคุณสมบัติการดูดซับ คายซับด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทดลองการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันกับเอทานอลในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองค่าร้อยละการเปลี่ยนทั้งหมด (total conversion) ของเอทานอลจะสูงขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ 5 ซึ่งมีส่วนผสมของ Mn₂O₃:Fe₂O₃:Al₂O₃:SiO₂ เป็น 45:45:0:10 จะให้ร้อยละการเปลี่ยนทั้งหมดสูงสุดถึง 71.4 และผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้เป็นเอทิลีนและไดเอทิลอีเทอร์

Chen และคณะ (2007) ทำการศึกษาการผลิตเอทิลีนจากไบโอเอทานอลโดยใช้ไทเทเนียม (TiO_2) เคลือบบน แกมมา-อะลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันซึ่งบรรจุอยู่ใน multi-microchannel reactor โดยก่อนการทดลองจะทำการตรวจสอบโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง XRD และ FT-IR spectrum ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ซึ่งได้แก่ความเข้มข้นของเอทานอลที่ป้อน อุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยาและ LHSV (liquid hourly space velocity) จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสำหรับการทดลองจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของเอทานอลสูงขึ้นและร้อยละการเลือกของเอทิลีนเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละการเลือกของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงโดยอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 500 องศาเซลเซียส ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบด้วยไทเทเนียมจะทำให้ร้อยละการเลือกของเอทิลีนสูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เคลือบไทเทเนียม โดยการเคลือบไทเทเนียมที่ความเข้มข้นสูงกว่าจะทำให้ร้อยละการเลือกของเอทิลีนที่สูงกว่า และเมื่อทดลองโดยเพิ่มค่า LHSV พบว่าร้อยละการเลือกของเอทิลีนลดลงแต่ร้อยละการเลือกของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้น

Chongkhong และคณะ (2007) ทำการศึกษาการผลิต fatty acid methyl ester (FAME) จาก palm fatty acid distillate (PFAD) ซึ่งมีองค์ประกอบของ free fatty acids (FFA) จำนวนมาก โดยทำการผลิต FAME จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในถังปฏิกรณ์แบบกะ ซึ่งศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ช่วง 70 ถึง 100 องศาเซลเซียส, อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อ PFAD ที่ 0.4:1 ถึง 12:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ร้อยละ 0 ถึง 5.502 (น้ำหนักกรดซัลฟิวริกต่อน้ำหนัก PFAD) ซึ่งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิต FAME คือโมลเรโซของเมทานอลต่อ PFAD เท่ากับ 8:1 และปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1.834 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

Varisli และคณะ (2007) ทำการศึกษาปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 250 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ heteropolyacid (HPA) จำนวน 3 ชนิดได้แก่ Tungstophosphoricacid (TPA), Silicotungsticacid (STA) และ Molybdophosphoricacid (MPA) ซึ่งจะได้ผลได้สูงสุดของเอทิลีนสูงถึง 0.75 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส โดยใช้ TPA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นคือ ไดเอทิลอีเทอร์ จากการทดลองน้ำที่เกิดขึ้นหลังการทดลองจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงและแนวโน้มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดเป็นดังนี้ STA > TPA > MPA

Ahmed และคณะ (2008) ได้ศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ZrO_2 เมื่อถูกเคลือบด้วย SO_4^{2-} ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ SO_4^{2-} (ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนัก) และศึกษาความ activity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของ

เอทานอลเพื่อผลิตเอทิลีน จากการทดลองที่อุณหภูมิสำหรับการทดลอง 380 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของการเคลือบ SO_4^{2-} จะช่วยเพิ่มความ activity ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเคลือบ SO_4^{2-} ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าการเปลี่ยนของเอทานอลสูงสุดซึ่งสูงถึง 100 % เนื่องจากการเคลือบที่ความเข้มข้นดังกล่าวทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่าสูงสุดแต่เมื่อเคลือบ SO_4^{2-} ที่ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ความ activity ของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงโดยทำให้ค่าการเปลี่ยนของเอทานอลจะลดลง

Zhang และคณะ (2008) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาคีไฮเดรชันของเอทานอลเพื่อผลิตเอทิลีน โดยทดลองและเปรียบเทียบความ activity และความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ได้แก่ $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$, HZSM-5 (Si/Al = 25), silicoaluminophosphate (SAPO-34) และ Ni-substituted SAPO-34 (NiAPSO-34) โดย $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ และ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงการค้า ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา SAPO-34 และ NiAPSO-34 ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ จากการทดลองพบว่าแนวโน้มของความ activity ของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นดังนี้ HZSM-5 > NiAPSO-34 > SAPO-34 > $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ และจากการศึกษาความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า NiAPSO-34 และ SAPO-34 มีความเสถียรเมื่อทดลองเป็นเวลานาน ส่วน HZSM-5 และ $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ เกิดการเสื่อมสภาพเมื่อทดลองเป็นเวลานาน จึงไม่เหมาะที่จะนำ ZSM-5 และ $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ ไปใช้งานเป็นเวลานาน ดังนั้นจากงานวิจัยทำให้สรุปได้ว่า NiAPSO-34 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเอทิลีนจากปฏิกิริยาคีไฮเดรชันของเอทานอลที่ระยะเวลาานาน

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 วัสดุ

3.1.1 วัตถุดิบ

เมทานอลส่วนเกินที่มีส่วนประกอบของกรดซัลฟิวริก ซึ่งเหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน (1.59 %โดยน้ำหนัก) โดยใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน

3.1.2 สารเคมี

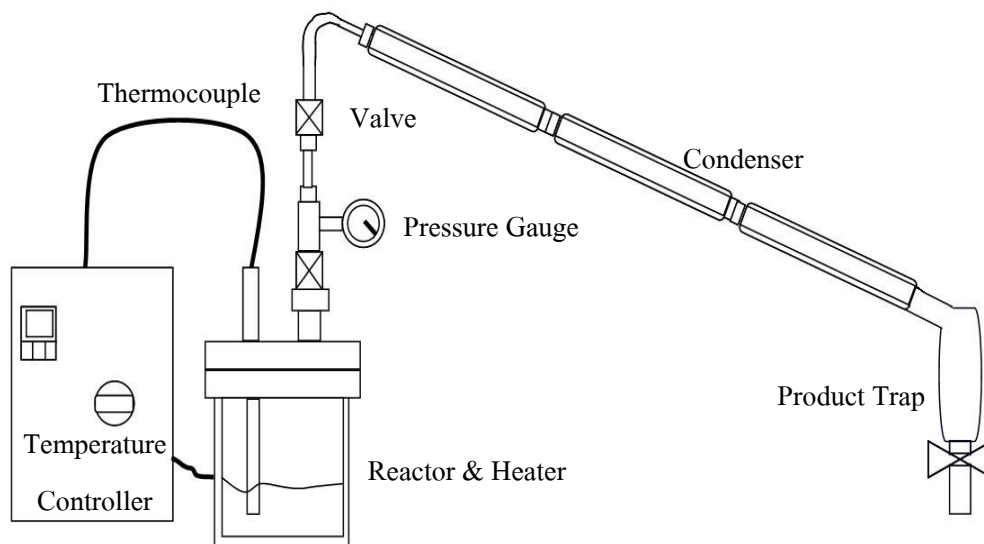
- (1) ไดเอทิลอีเทอร์ (AR Grade, 99.8 % โดยน้ำหนัก) บริษัทผู้ผลิต Merck KGaA
- (2) เอทานอล (AR Grade, 99.8 % โดยน้ำหนัก) บริษัทผู้ผลิต Merck KGaA
- (3) 1-โพรพานอล (AR Grade, 99.5 % โดยน้ำหนัก) บริษัทผู้ผลิต Lab Scan
- (4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (AR Grade) บริษัทผู้ผลิต Merck KGaA
- (5) กรดซัลฟิวริก (AR Grade, 98 % โดยน้ำหนัก) บริษัทผู้ผลิต Lab Scan
- (6) น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทั่วไป

- (1) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี บริษัท SHIMADZU รุ่น 14B ดีเทคเตอร์แบบ FID
- (2) เครื่อง Karl Fisher Coulometer
- (3) เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน
- (4) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- (5) ถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตไดเอทิลอีเทอร์
- (6) อุปกรณ์สำหรับควบแน่น
- (7) อุปกรณ์สำหรับควบคุมอุณหภูมิ

โดยลักษณะการทำงานจากระบบสำหรับผลิตไดเอทิลอีเทอร์แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 5



ภาพประกอบที่ 5 ระบบการผลิตไดเอทิลอีเทอร์

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์

(1) ถังปฏิกรณ์แบบกะสำหรับผลิตไดเอทิลอีเทอร์ โดยถังปฏิกรณ์แบบกะสำหรับผลิตไดเอทิลอีเทอร์ สร้างขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 (Stainless Steel Type 316) ถังมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของถัง 3 นิ้ว สูง 6 นิ้ว และภายในมีความหนา 0.5 นิ้ว เพื่อรองรับความดันสูงที่จะเกิดขึ้นในขณะที่ผลิตไดเอทิลอีเทอร์ โดยมีฝาปิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6 นิ้ว ฝาตั้งต้นจะถูกบรรจุไว้ในถังปฏิกรณ์พร้อมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งก่อนการทดลองทุกครั้งต้องปิดฝาทันทีให้สนิทเพื่อไม่ให้สารรั่วซึมออกมาภายนอกขณะทำการทดลอง



ภาพประกอบที่ 6 ถังปฏิกรณ์แบบกะสำหรับผลิตไดเอทิลอีเทอร์

(2) ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ โดยชุดควบคุมอุณหภูมิจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์แบบกะให้คงที่ ซึ่งตู้ควบคุมต่ออยู่กับชุดให้ความร้อนขนาด 1,000 วัตต์ และเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิชนิด K นอกจากนี้ตัวถังปฏิกรณ์ถูกหุ้มล้อมรอบด้วยชุดให้ความร้อนด้านข้าง



ภาพประกอบที่ 7 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

(3) ชุดให้ความร้อนแก่อัดปฏิกรณ์ ผลิตโดยบริษัท SL HEATER ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกโดยใช้เซรามิกเป็นตัวให้ความร้อนขนาด 1,000 วัตต์ ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ วิธีการใช้งานจะนำชุดให้ความร้อนสวมหุ้มรอบอัดปฏิกรณ์ โดยอัดปฏิกรณ์จะถูกหุ้มด้วยชุดให้ความร้อนด้านข้าง ชุดให้ความร้อนจะทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่อัดปฏิกรณ์ตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้จากชุดควบคุมอุณหภูมิ

(4) เทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิ โดยเทอร์โมคัปเปิลทำหน้าที่วัดอุณหภูมิภายในอัดปฏิกรณ์ ในงานวิจัยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งถูกแสดงดังภาพประกอบที่ 8

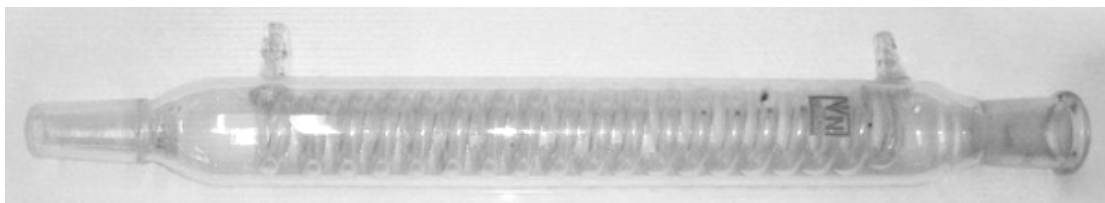


ภาพประกอบที่ 8 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 1300 องศาเซลเซียส โดยอาศัยหลักการทำงานของความต่างของค่าอุณหภูมิที่วัดได้ระหว่างขั้วทั้งสองเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิมากก็จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน สัญญาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ส่งมาจากเทอร์โมคัปเปิลจะเข้าเครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งจะขยายสัญญาณประมาณ 40 เท่า สัญญาณที่ถูกขยายจะถูกส่งเข้าไมโครคอมพิวเตอร์ จากนั้นไมโครคอมพิวเตอร์จะประมวลผลของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้เป็นค่าของอุณหภูมิเบค ซึ่งจะปรากฏให้เห็นบนเครื่องบันทึกผล (Recorder)

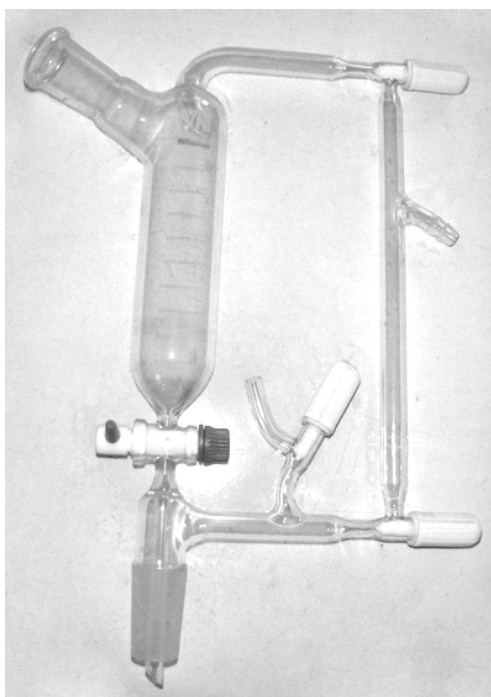
(5) ชุดควบคุมแรงผลิตกัมมันต์ซึ่งจะประกอบด้วยท่อแก้วคอนเดนเซอร์ลักษณะเป็นท่อแก้ว 2 ชั้น โดยมีน้ำหล่อเย็นไหลอยู่ภายในท่อชั้นนอกและส่วนที่เป็นผลิตกัมมันต์ไหลในท่อชั้นใน โดยไหลในทิศทางสวนทางกัน ซึ่งหลังจากทดลองจะเปิดบอลวาล์วให้อิของผลิตกัมมันต์ไหลไปยัง

คอนเดนเซอร์ 3 อัน ที่ช่วยควบแน่นไอให้เป็นของเหลว ส่วนของเหลวที่ได้ก็จะไหลตกลงสู่ที่เก็บผลิตภัณฑ์ ท่อแก้วคอนเดนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ดังภาพประกอบที่ 9



ภาพประกอบที่ 9 ท่อแก้วคอนเดนเซอร์

(6) อุปกรณ์สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์เป็นชุดเครื่องแก้วที่สั่งทำจากบริษัท AB GLASS ซึ่งอุปกรณ์ที่มาพร้อมกับคอนเดนเซอร์ โดยแสดงไว้ดังภาพประกอบที่ 10



ภาพประกอบที่ 10 อุปกรณ์สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์

ไอของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านคอนเดนเซอร์จะถูกควบแน่นให้เป็นของเหลวและไหลลงสู่อุปกรณ์สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์ ซึ่งอุปกรณ์สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์จะมีวาล์วสำหรับควบคุมไอของเหลวตกลงสู่ขวดแก้วก้นกลม



ภาพประกอบที่ 11 ขวดแก้วก้นกลม

(7) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph ; GC) เป็นเทคนิคสำหรับแยกสารตัวอย่างที่เป็นสารผสม โดยเปลี่ยนสารผสมให้เป็นไอที่อุณหภูมิหนึ่ง แล้วให้ไอของสารเหล่านั้นผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary Phase โดยอาศัยการพาไปของเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) โดยใช้แก๊สพา (Carrier Gas) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็น Chromatogram โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

ในการศึกษานี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีของ SHIMADZU รุ่น 14B ดีเทคเตอร์แบบ FID ซึ่งแสดงไว้ดังภาพประกอบที่ 12 โดยแก๊สโครมาโทกราฟีมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

1. แก๊สพา (Carrier Gas) ใช้แก๊สฮีเลียม
2. ตัวควบคุมการไหลแก๊ส (Flow Controller)
3. ระบบการฉีด (Injector Port)
4. คอลัมน์ (Column) บรรจุแบบ 1, 2, 3 TCEP
5. ดีเทคเตอร์ (Detector) แบบ FID
6. เครื่องบันทึก (Recorder)



ภาพประกอบที่ 12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น 14B ดีเทคเตอร์แบบ FID

3.3 วิธีการศึกษา

3.3.1 การเตรียมกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากผลิตไบโอดีเซล

ก่อนการนำกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากผลิตไบโอดีเซล ไปใช้งานต้องมีการวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆก่อน เช่น วิเคราะห์ปริมาณน้ำ ปริมาณเมทานอลและปริมาณกรดซัลฟิวริกที่เหลือเป็นต้น



ก.



ข.

ภาพประกอบที่ 13 เมทานอลส่วนเกินที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล

ก. ก่อนผ่านการกลั่นแยกเมทานอล

ข. หลังผ่านการกลั่นแยกเมทานอล

หลังจากนั้นนำกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากผลิตไบโอดีเซลไปกลั่นแยกเมทานอลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน โดยตั้งอุณหภูมิของเครื่องไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส นำกรดที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบและความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก



ภาพประกอบที่ 14 เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน

3.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.2.1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาดิไฮเดรชันของเอทานอล เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดเอทิลอีเทอร์และหาสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือ 130, 140, 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส

3.3.2.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาดิไฮเดรชันของเอทานอล เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดเอทิลอีเทอร์และหาสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอุณหภูมิที่ทำการศึกษา คือที่อุณหภูมิ 130, 140, 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส

3.3.2.3 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาดิไฮเดรชันของเอทานอล เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดเอทิลอีเทอร์และหาสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งระยะเวลาที่ทำการศึกษาคือ 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที

3.3.2.4 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาที่มีการเกิดปฏิกิริยาดิไฮเดรชันของเอทานอล เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดเอทิลอีเทอร์และหาสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้

กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งระยะเวลาที่ทำการศึกษาคือ 5, 8, 11, 14, 17 และ 20 นาที

3.3.2.5 ศึกษาปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่เติมผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากกระบวนการผลิต ไบโอดีเซล เพื่อช่วยเพิ่มผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ให้เท่ากับผลได้สูงสุดเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และวิเคราะห์หาปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่สามารถประหยัดลงได้ ซึ่งปริมาณกรดบริสุทธิ์ที่เติมลงไปคือ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 กรัม โดยขั้นตอนการทดลองมี 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมกรดโดยการนำเมทานอลส่วนเกินจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันไปกลั่นแยกเมทานอลด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกและนำกรดที่ได้ไปไทเทรตหาความเข้มข้นก่อนนำไปทดลองเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 2 นำกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล (ความเข้มข้นร้อยละ 11.34 โดยน้ำหนัก) ทดลองกับเอทานอลบริสุทธิ์ โดยผสมกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลปริมาณ 50 มิลลิลิตร (คิดเป็นน้ำหนัก 65 กรัม ซึ่งมีเนื้อกรดซัลฟิวริกผสมอยู่ 7.36 กรัม) กับเอทานอลบริสุทธิ์ 30 มิลลิลิตร (23.7 กรัม) ลงในปฏิกรณ์แบบกะ และทดลองหาระยะเวลาที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยทดลองที่ช่วงเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที โดยอุณหภูมิเริ่มต้นสำหรับทำปฏิกิริยาคือ 130 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 3 ทำการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทดลองเป็น 140, 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 4 นำกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ 4 มิลลิลิตร (7.36 กรัม) ผสมกับเอทานอลบริสุทธิ์ 30 มิลลิลิตร (23.7 กรัม) ทำการทดลองหาระยะเวลาที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยทดลองที่ช่วงเวลา 5, 8, 11, 14, 17 และ 20 นาที ตามลำดับที่อุณหภูมิเริ่มต้นสำหรับทำปฏิกิริยาคือ 130 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทดลองเป็น 140, 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส ตามลำดับเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับทำปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 5 ทำการทดลองที่สภาวะของระยะเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาที่ดีที่สุด และที่อุณหภูมิสำหรับการทำปฏิกิริยา 130, 140, 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแต่มีการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ โดยทำการทดลองหาปริมาณการเติมกรดบริสุทธิ์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งที่จะสามารถเพิ่มผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ให้ได้มากที่สุด หลังจากนั้นนำค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ที่ได้จาก

การทดลองที่สภาวะที่ดีที่สุด เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกเพียงอย่างเดียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ที่ได้จากการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่สามารถประหยัดได้

3.3.3 การดำเนินการทดลอง

3.3.3.1 การเตรียมสภาวะก่อนทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไดเอทิลอีเทอร์

- (1) นำกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลไปกลั่นแยกเมทานอล
- (2) นำกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านการกลั่นแยกเมทานอลใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 50 มิลลิลิตร (คิดเป็นน้ำหนัก 65 กรัม ซึ่งมีเนื้อกรดซัลฟิวริกผสมอยู่ 7.36 กรัม) และเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาณ 30 มิลลิลิตร (23.7 กรัม) ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อเตรียมสำหรับก่อนการทดลองทุกครั้ง
- (3) ปิดบอวลวาล์วให้สนิท เพื่อป้องกันไม่ให้ไอของสารไหลไปสู่คอนเดนเซอร์ก่อนเวลาที่กำหนดไว้
- (4) เตรียมน้ำหล่อเย็น โดยตั้งอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำหล่อเย็นให้อุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียส

3.3.3.2 การปฏิบัติขณะเกิดปฏิกิริยาเพื่อผลิตไดเอทิลอีเทอร์

- (1) นำกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านการกลั่นแยกเมทานอลผสมเอทานอลบริสุทธิ์จนเป็นเนื้อเดียว ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ปิดฝาถึงให้สนิท
- (2) ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการใช้ในการทดลอง โดยรองจนกว่าอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เข้าสู่สถานะคงที่ (steady state) ณ อุณหภูมิที่ต้องการ อ่านค่าอุณหภูมิจากตู้ควบคุมอุณหภูมิหลังจากนั้นเริ่มจับเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาตามที่กำหนดไว้ โดยเริ่มที่การทดลอง 5 นาที และการทดลองครั้งต่อไปให้เปลี่ยนเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาเป็น 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิที่ทำการทดลอง คือที่ 130, 140, 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส
- (3) เมื่อเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาถึงตามที่กำหนดไว้ค่อยๆเปิดวาล์วที่ฝาถังปฏิกรณ์ให้ไอของผลิตภัณฑ์ไหลขึ้นสู่ด้านบนไปยังคอนเดนเซอร์ เพื่อให้เกิดการควบแน่นเป็นของเหลวให้หมด โดยใช้เวลาในการควบแน่นประมาณ 10 - 15 นาที ซึ่งของเหลวทั้งหมดจะไหลลงสู่อุปกรณ์สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์เมื่อสังเกตว่าไม่มีของเหลวไหลลงสู่อุปกรณ์สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์ให้เปิดวาล์ว

ที่อุปกรณ์สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์เพื่อให้ของเหลวไหลลงไปยังขวดแก้วกันกลม
ทั้งหมด

- (4) นำผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของเหลวไปชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกปริมาณผลิตภัณฑ์ที่
ได้หลังการทดลอง ต่อจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำ ปริมาณ
เอทานอลที่เหลือและปริมาณไดเอทิลอีเทอร์ที่ผลิตได้ หลังการทดลองทุกครั้ง
นำกรดที่เหลือภายในถังปฏิกรณ์ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก
ที่เหลือ
- (5) เปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง โดยใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์แทนกรด
ซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ
เช่นเดียวกับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็น
ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เปลี่ยนช่วงเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาให้แคบลงเป็น 5 - 20
นาที
- (6) สูดท้ายทำการทดลองโดยใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล แต่
มีการเติมกรดบริสุทธิ์ที่ปริมาณ 1 – 6 กรัม โดยทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำ
ปฏิกิริยาที่ดีที่สุดซึ่งคือที่เวลา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับการทดลองคือที่
130, 140, 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ของเอทานอลเพื่อผลิตไดเอทิลอีเทอร์ โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน และกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชนิดกะ (Batch reactor) ตัวแปรที่ทำการศึกษาสำหรับกระบวนการ การเกิดปฏิกิริยา ได้แก่

1. อุณหภูมิสำหรับการเกิดปฏิกิริยา
2. ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา
3. ปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่เติมเพื่อเพิ่มผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์

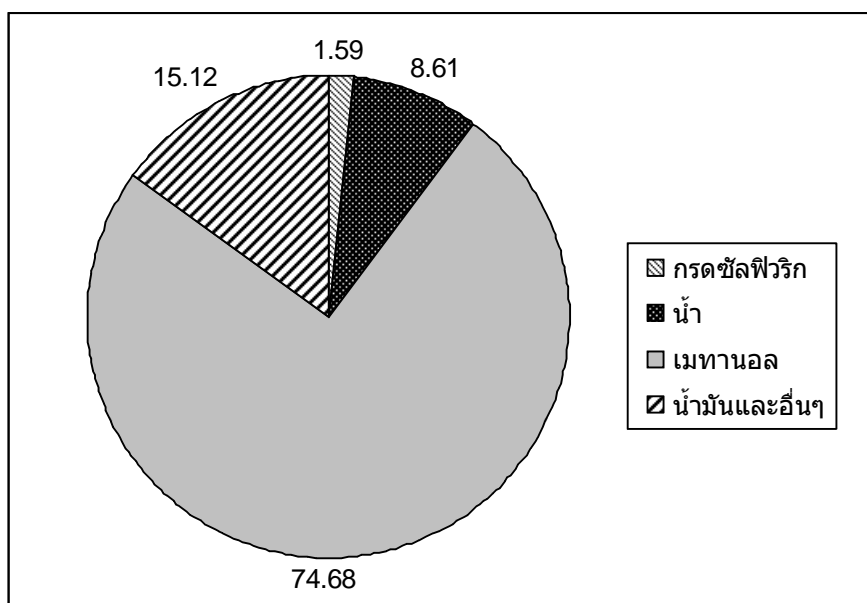
โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์ ไดเอทิลอีเทอร์และหาวิธีเพิ่มมูลค่าให้แก่กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล

4.1 ลักษณะและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและซัลฟิวริกบริสุทธิ์ โดยกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลได้จากการผลิตแบบปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน หลังจากสิ้นสุดกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะมีเมทานอลเหลือ ซึ่งเรียกว่าเมทานอลส่วนเกิน โดยในส่วนของเมทานอลส่วนเกินจะมีกรดซัลฟิวริกผสม ซึ่งก่อนการนำกรดซัลฟิวริกไปใช้งานทุกครั้งจะต้องกลั่นแยกเมทานอลออก ด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุนเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก

4.1.1 ลักษณะของเมทานอลที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล

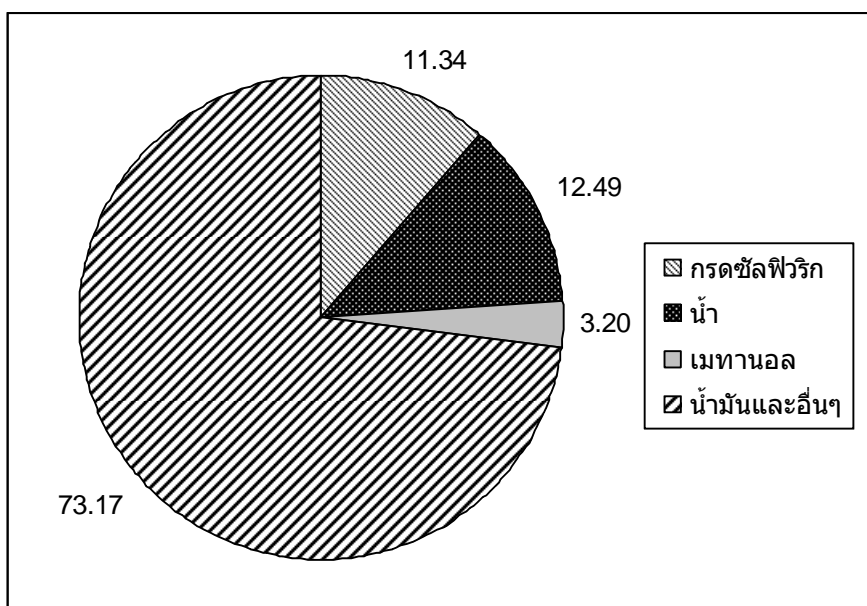
โดยลักษณะของเมทานอลส่วนเกินที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน ซึ่งยังไม่ผ่านการกลั่นแยกเมทานอลมีสีน้ำตาลใส มีน้ำมันแยกชั้นอยู่ปริมาณเล็กน้อยและมีกลิ่นเหม็น เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของเมทานอลส่วนเกินที่ไม่ผ่านการกลั่นแยกเมทานอลพบว่ามียังมีองค์ประกอบดังภาพประกอบที่ 15



ภาพประกอบที่ 15 ร้อยละโดยน้ำหนักองค์ประกอบของเมทานอลส่วนเกินที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่ได้ผ่านการกลั่นแยกเมทานอล

จากภาพประกอบที่ 15 พบว่าองค์ประกอบของเมทานอลส่วนเกินที่ยังไม่ผ่านการกลั่นแยกเมทานอลมีค่า pH เท่ากับ 5.78 ซึ่งมีปริมาณกรดซัลฟิวริกผสมอยู่เพียงร้อยละ 1.59 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ของเมทานอลส่วนเกินคือเมทานอล ซึ่งมีปริมาณมากถึงร้อยละ 74.68 โดยน้ำหนัก สำหรับองค์ประกอบที่เหลืออื่นๆ คือน้ำร้อยละ 8.61 โดยน้ำหนัก น้ำมันและสิ่งเจือปนอื่นๆ ร้อยละ 15.12 โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเมทานอลส่วนเกินที่ยังไม่ผ่านการกลั่นแยกเมทานอล ทำให้ทราบว่าปริมาณกรดซัลฟิวริกที่มีอยู่ในเมทานอลส่วนเกินมีปริมาณน้อย จึงทำให้จำเป็นต้องกลั่นแยกเมทานอลออก เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก สำหรับการกลั่นแยกเมทานอลจะกลั่นด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุนที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเมื่อนำเมทานอลส่วนเกินที่ผ่านการกลั่นแยกเมทานอลไปวิเคราะห์องค์ประกอบซึ่งจะมีองค์ประกอบดังภาพประกอบที่ 16



ภาพประกอบที่ 16 ร้อยละโดยน้ำหนักองค์ประกอบของเมทานอลส่วนเกินที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเมื่อผ่านการกลั่นแยกเมทานอล

องค์ประกอบของเมทานอลส่วนเกินที่ผ่านการกลั่นแยกเมทานอลสามารถมีค่า pH เท่ากับ 4.13 โดยสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 16 ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 11.34 โดยน้ำหนัก และสามารถลดปริมาณเมทานอลเหลืออยู่เพียงร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบที่เหลือส่วนใหญ่เป็นน้ำมันและสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่มีมากถึงร้อยละ 73.17 โดยน้ำหนัก จากการกลั่นแยกเมทานอลทำให้น้ำมันบางส่วนถูกกลั่นออกไปจึงทำให้ความเข้มข้นของน้ำที่วิเคราะห์ได้ สูงขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อยเพียงร้อยละ 12.49 โดยน้ำหนัก

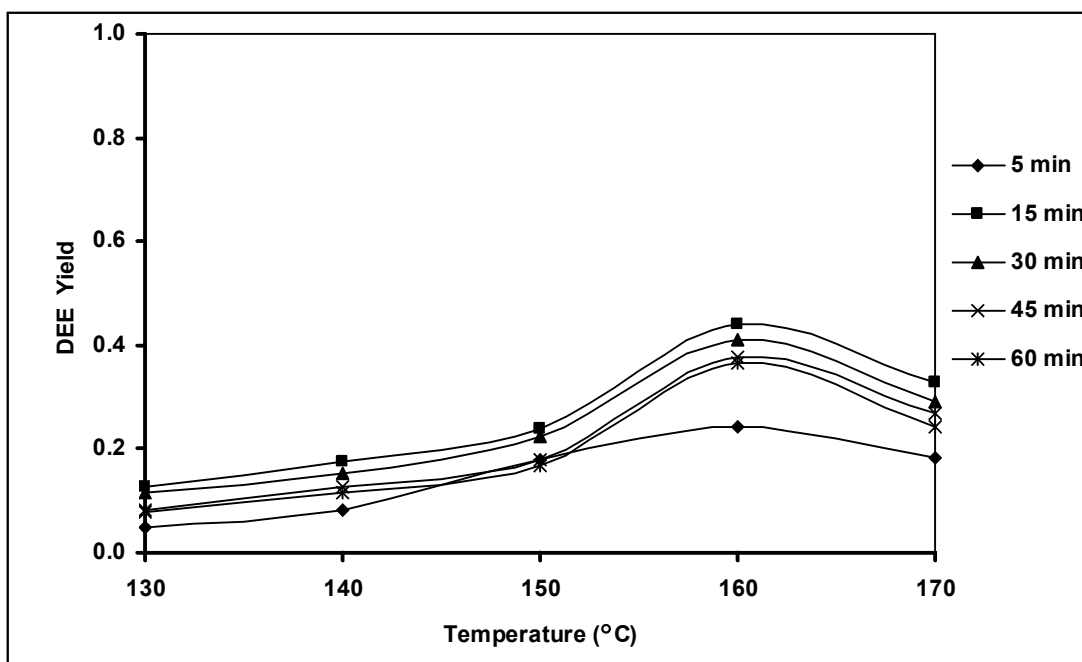
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์

การทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 130 ถึง 170 องศาเซลเซียส โดยสารตั้งต้นในที่นี้คือเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาณ 30 มิลลิลิตร และตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการทดลองมี 2 ชนิด คือกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งในทุกการทดลองจะใช้ปริมาณ 50 มิลลิลิตร และกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ใช้ปริมาณ 4 มิลลิลิตร โดยผสมสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนเริ่มการทดลองทุกครั้ง จากนั้นทำการทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที เมื่อใช้กรด

ซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5, 8, 12, 15, 17 และ 20 นาที เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

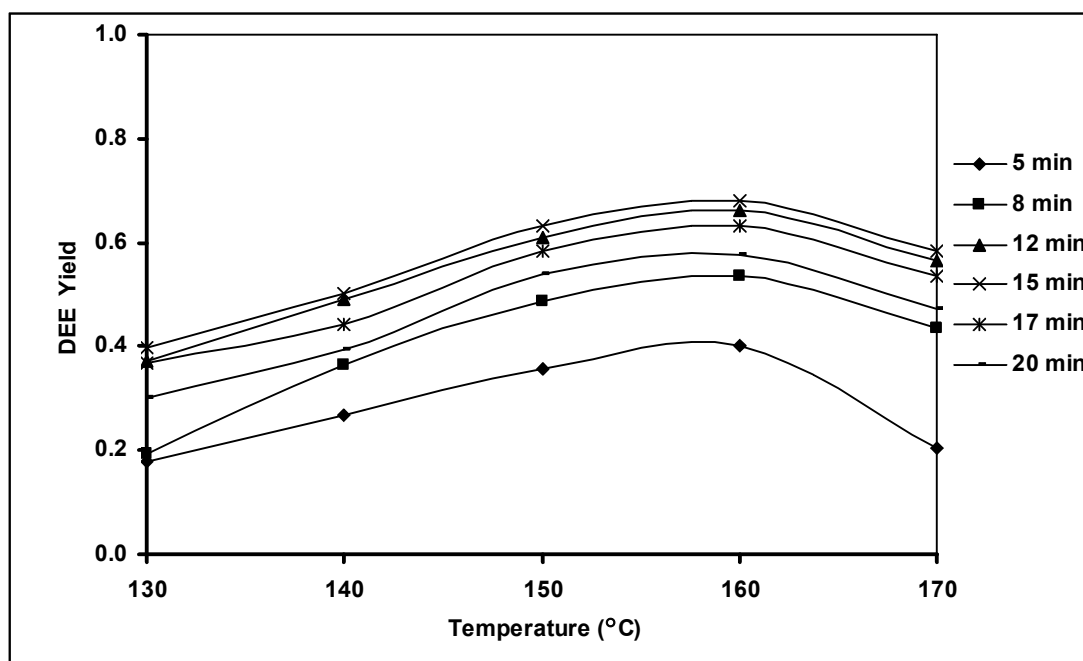
4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 17 และ 18 ตามลำดับ ซึ่งผลของกราฟที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งสองการทดลองคือ การทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 130 เป็น 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่จะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 160 องศาเซลเซียส ในทุกๆ ระยะเวลาที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยา



ภาพประกอบที่ 17 ผลของอุณหภูมิต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

จากภาพประกอบที่ 17 ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5 นาที ค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 0.24 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.18 ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที ค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.13 เป็น 0.44 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.33 ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 30 นาที ค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.12 เป็น 0.41 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.29 ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 45 นาที ค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.08 เป็น 0.38 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.27 และที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 60 นาที ค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.08 เป็น 0.37 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.24



ภาพประกอบที่ 18 ผลของอุณหภูมิต่อค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

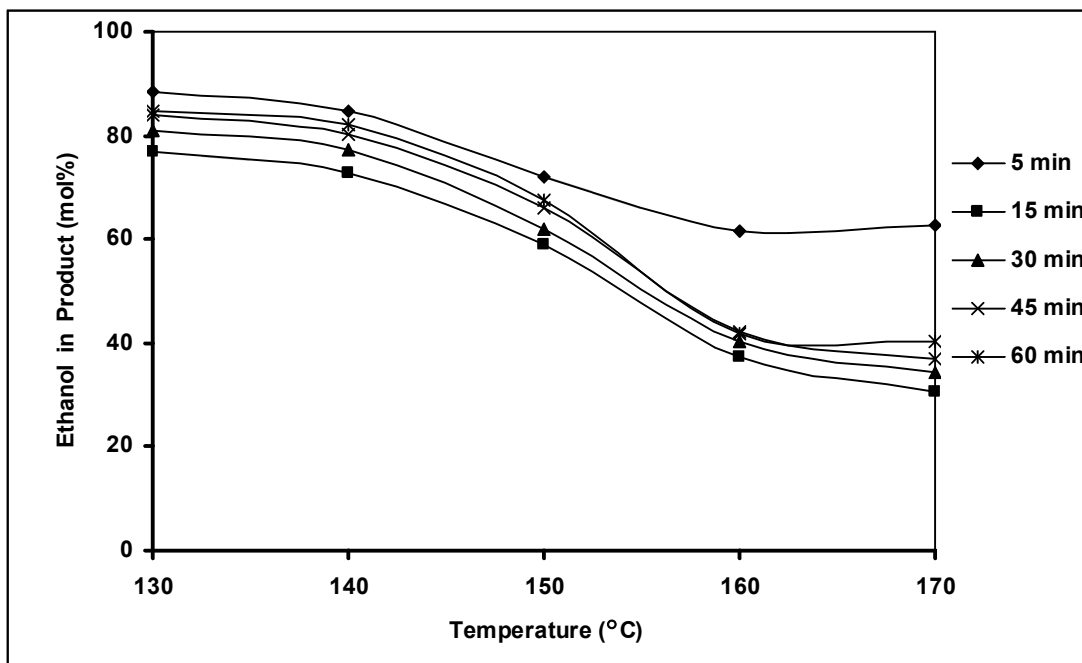
จากภาพประกอบที่ 18 การทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 130 ถึง 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์มีค่า

เพิ่มขึ้นโดยที่จะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 160 องศาเซลเซียส ในทุกๆ ระยะเวลาที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีค่าสูงกว่าการใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.18 เป็น 0.4 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.2 ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 8 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.19 เป็น 0.54 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.43 ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 12 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 0.66 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.56 ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.4 เป็น 0.68 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.58 ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 17 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.37 เป็น 0.63 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.54 และที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 20 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 0.3 เป็น 0.58 ซึ่งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ลดลงเหลือ 0.47

4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 19 และ 20 ตามลำดับ ซึ่งผลของกราฟที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งสองการทดลองคือ การทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเพิ่ม อุณหภูมิจาก 130 ถึง 170 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงในทุกๆ ระยะเวลาที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยา โดยที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5 นาที องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 88.3% เป็น 62.6% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 76.8% เป็น 30.5% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 30 นาที องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 80.8% เป็น 34.5% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 45 นาที องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 83.9% เป็น 37.0% และที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 60 นาที องค์ประกอบ

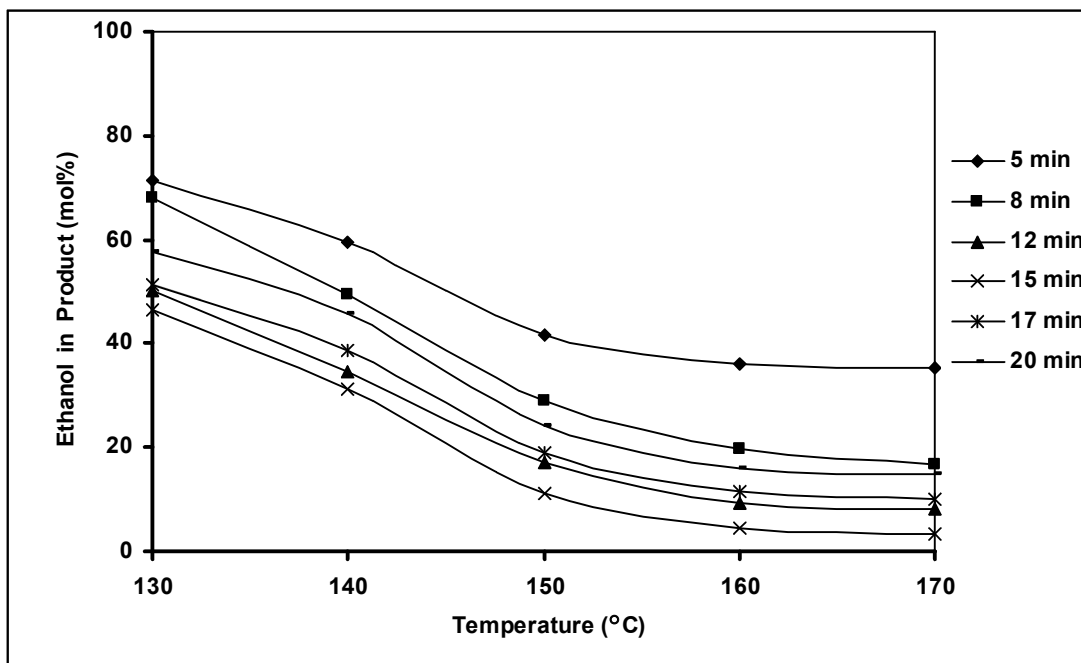
ของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 84.7% เป็น 40.1% โดยที่สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 19



ภาพประกอบที่ 19 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

สำหรับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 130 ถึง 170 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงที่ทุกๆ ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแต่องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่า โดยที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5 นาที องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 71.5% เป็น 35.4% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 8 นาที องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 68.1% เป็น 16.6% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 12 นาที องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 50.0% เป็น 8.0% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 46.5% เป็น 3.3% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 17 นาที องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 51.3%

เป็น 10.0% และที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 20 องค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ลดลง จาก 57.7% เป็น 16.1% ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 20

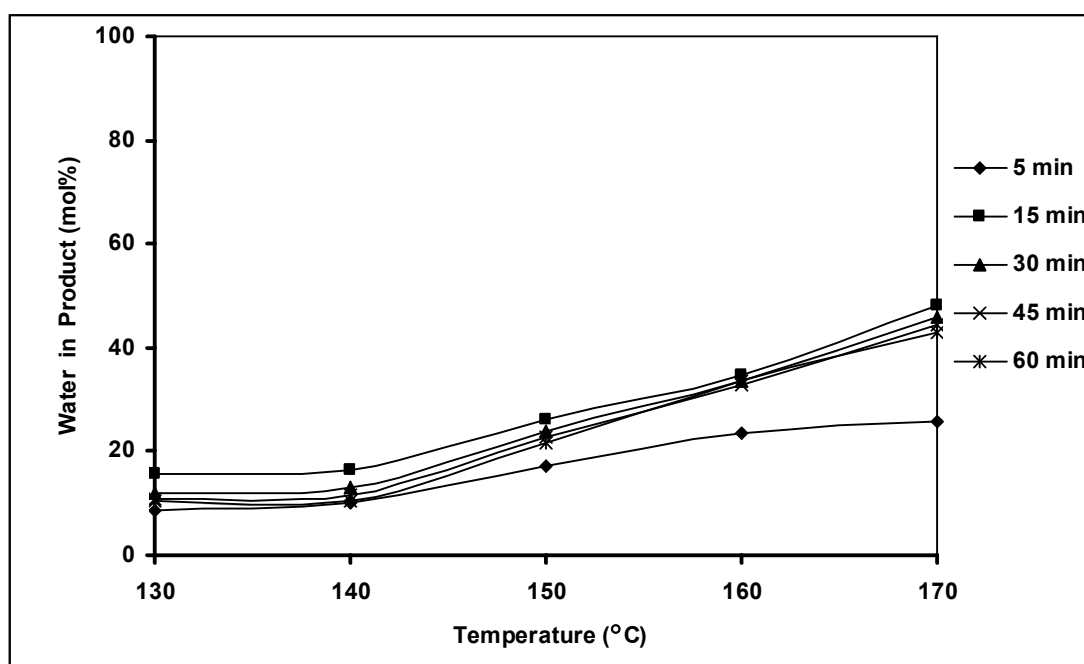


ภาพประกอบที่ 20 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

4.2.3 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอเอทานอลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 21 และ 22 ตามลำดับ ซึ่งผลของกราฟที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งสองการทดลองคือ การทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 130 ถึง 170 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกๆ ระยะเวลาที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยา โดยที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 8.5% เป็น 25.7% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 15.5% เป็น 48.1% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 12.1% เป็น 46.0% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณของน้ำที่

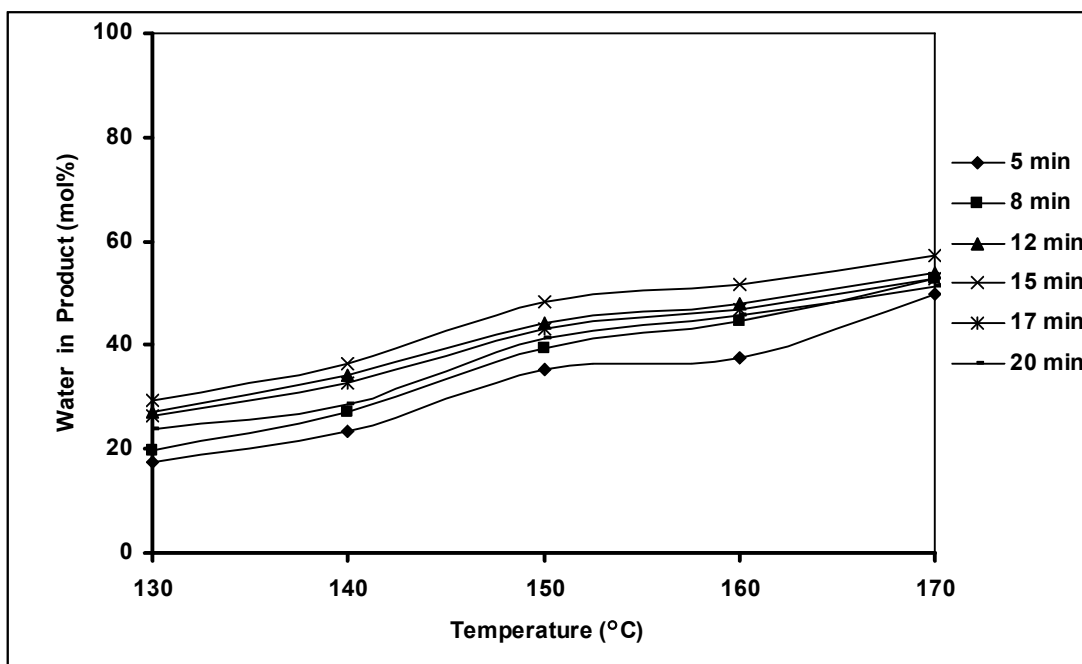
เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 10.9% เป็น 44.4% และที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 10.3% เป็น 42.9% โดยที่สามารถแสดงได้ดัง ภาพประกอบที่ 21



ภาพประกอบที่ 21 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยา เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

สำหรับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 130 ถึง 170 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นที่ทุกๆ ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามากกว่า โดยที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 17.6% เป็น 50.0% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 8 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 19.9% เป็น 52.9% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 12 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 27.2% เป็น 53.8% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 29.2% เป็น 57.2% ที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา

17 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 26.4% เป็น 52.7% และที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 20 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 23.7% เป็น 51.5% โดยที่สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 22



ภาพประกอบที่ 22 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยา เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

จากภาพประกอบที่ 17 – 22 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 130 – 170 องศาเซลเซียส พบว่าเพิ่มอุณหภูมิในการทดลอง ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์และปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นมากที่สุดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิในการทดลองมากกว่า 160 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลง ในขณะที่องค์ประกอบของเอทานอลในน้ำลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารตั้งต้นต้องการพลังงานจำนวนหนึ่งในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งต้องมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับพลังงานกระตุ้น (Activation Energy ; E_a) เพื่อให้โมเลกุลของสารตั้งต้นมีพลังงานเพียงพอ และเกิดการชนกัน ในทิศทางที่เหมาะสมจึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบจึงเป็นเหมือนกับการเพิ่มพลังงานให้กับสารตั้งต้นนั่นเอง จึงทำให้เอทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นสามารถ

เกิดปฏิกิริยาไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ไดเอทิลอีเทอร์และน้ำได้สูงขึ้น ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเช่นเดียวกับไดเอทิลอีเทอร์ จึงทำให้ปริมาณไดเอทิลอีเทอร์และน้ำที่ผลิตได้มีแนวโน้มเหมือนกัน โดยสามารถดูได้จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลซึ่งพบว่าเอทานอล 2 โมล สามารถผลิตไดเอทิลอีเทอร์ได้ 1 โมล และน้ำ 1 โมล ส่วนเอทานอลที่เหลือจากการทดลองจะลดลงนั่นคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์และปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนองค์ประกอบของเอทานอลในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์มีค่ามากสูงสุดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองมากกว่า 160 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของเอทิลอีเทอร์จะลดลง ซึ่งผลของอุณหภูมิสอดคล้องกับงานวิจัยของ Varisli และคณะ (2007) เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองมากกว่า 160 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาการผลิตเอทิลีนจากเอทานอล จึงทำให้ปริมาณไดเอทิลอีเทอร์ที่ผลิตได้ลดลงแต่ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นสูงขึ้น สาเหตุที่ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาการผลิตเอทิลีนจาก เอทานอล มีน้ำเกิดขึ้น 1 โมล เช่นเดียวกับปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล ทำให้น้ำที่ได้จึงมาจากทั้งสองปฏิกิริยาดังกล่าว ดังนั้นเมื่อยังเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองมากเท่าไรปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นก็ยิ่งสูงขึ้นตาม

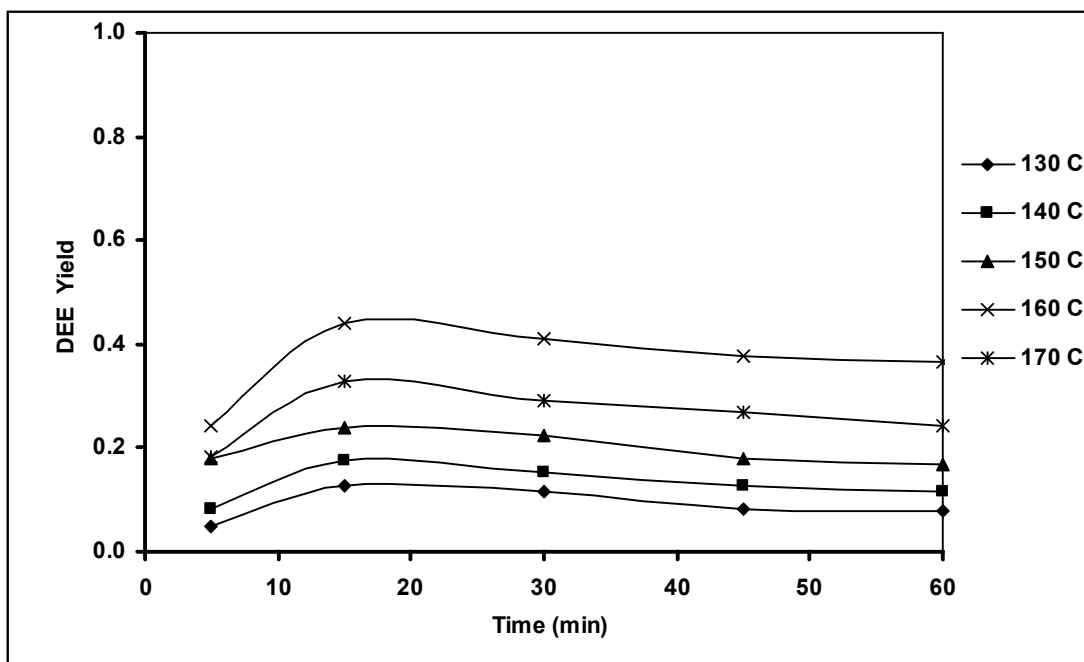
เมื่อนำผลการทดลองระหว่างการใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามาเปรียบเทียบ โดยเปรียบเทียบที่ระยะเวลาสำหรับปฏิกิริยาและอุณหภูมิเดียวกันพบว่าปฏิกิริยาการผลิตไดเอทิลอีเทอร์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแรงกว่า จึงทำให้ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์และปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ มีค่ามากกว่าการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งที่การทดลองทั้งสองใช้ปริมาณเนื้อกรดซัลฟิวริกในการทดลองเท่ากัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลมีส่วนประกอบของน้ำมันและสิ่งเจือปนอื่นๆ มากถึงร้อยละ 73.17 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสิ่งที่ไปรบกวนระบบจึงส่งผลให้กรดซัลฟิวริกเร่งปฏิกิริยาได้ไม่เต็มและทำให้ไดเอทิลอีเทอร์ที่ผลิตได้น้อยกว่าการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์

การทดลองการศึกษาผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์ในช่วงเวลา 5 – 60 นาที และ 5 – 20 นาที เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล 50 มิลลิลิตร (65 กรัม มีเนื้อกรดซัลฟิวริกอยู่ 7.36 กรัม) และกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 4 มิลลิลิตร (7.36 กรัม) ตามลำดับ ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ 30 มิลลิลิตร และอุณหภูมิในการทดลองคือ 130, 140, 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส โดยที่ผลการทดลองดังนี้

4.3.1 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์

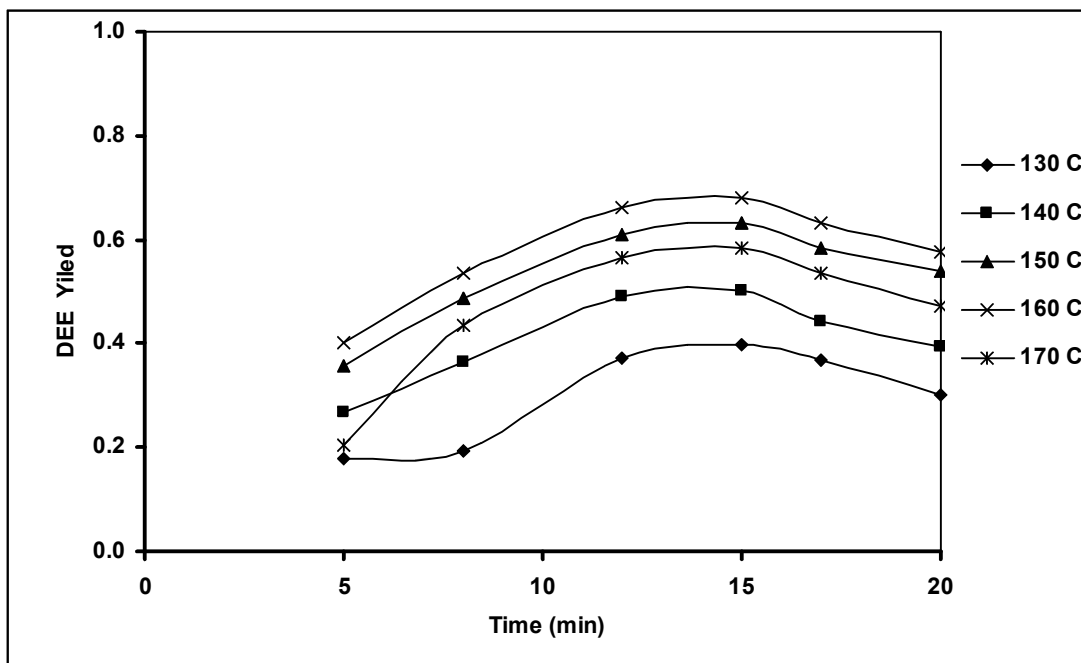
การศึกษาผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ (DEE yield) เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 23 และ 24 ตามลำดับ ซึ่งผลของกราฟที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งสองการทดลองคือ การทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มระยะเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาจาก 5 – 60 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นและจะมากที่สุดที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที แต่เมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ในทุกๆ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง โดยที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 0.13 แต่หลังจาก 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เหลือ 0.08 ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.08 เป็น 0.18 แต่หลังจาก 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เหลือ 0.12 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.18 เป็น 0.24 แต่หลังจาก 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เหลือ 0.17 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.24 เป็น 0.44 แต่หลังจาก 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เหลือ 0.37 และที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.18 เป็น 0.33 แต่หลังจาก 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เหลือ 0.24 โดยสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่



ภาพประกอบที่ 23 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

สำหรับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาจาก 5 – 20 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นและจะมากที่สุดที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที แต่เมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ในทุกๆ อุณหภูมิที่ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.18 เป็น 0.4 แต่หลังจาก 15 นาที ค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เหลือ 0.3 ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.27 เป็น 0.49 แต่หลังจาก 15 นาที ค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เหลือ 0.39 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.36 เป็น 0.63 แต่หลังจาก 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เหลือ 0.54 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.4 เป็น 0.68 แต่หลังจาก 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เหลือ 0.58 และที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์

เพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.58 แต่หลังจาก 15 นาที ค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เหลือ 0.47 โดยที่สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 24

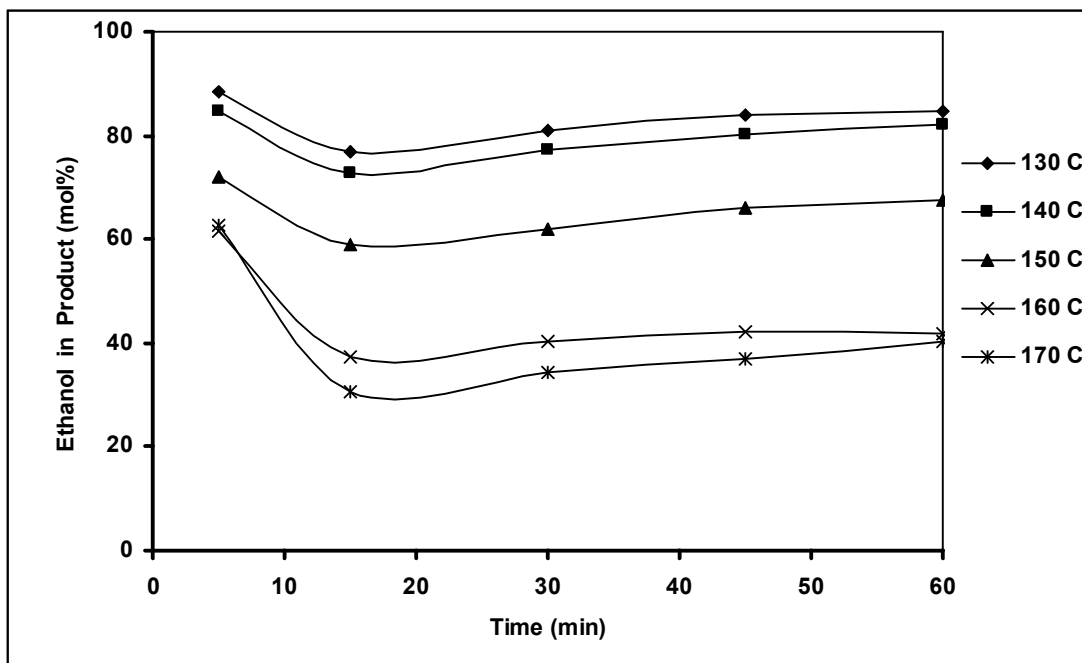


ภาพประกอบที่ 24 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อค่าผลได้ของ ไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

4.3.2 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์

การศึกษาผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 25 และ 26 ตามลำดับ ซึ่งผลของกราฟที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งสองการทดลองคือ การทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาจาก 5 – 60 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงและจะน้อยสุดที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที แต่เมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือ

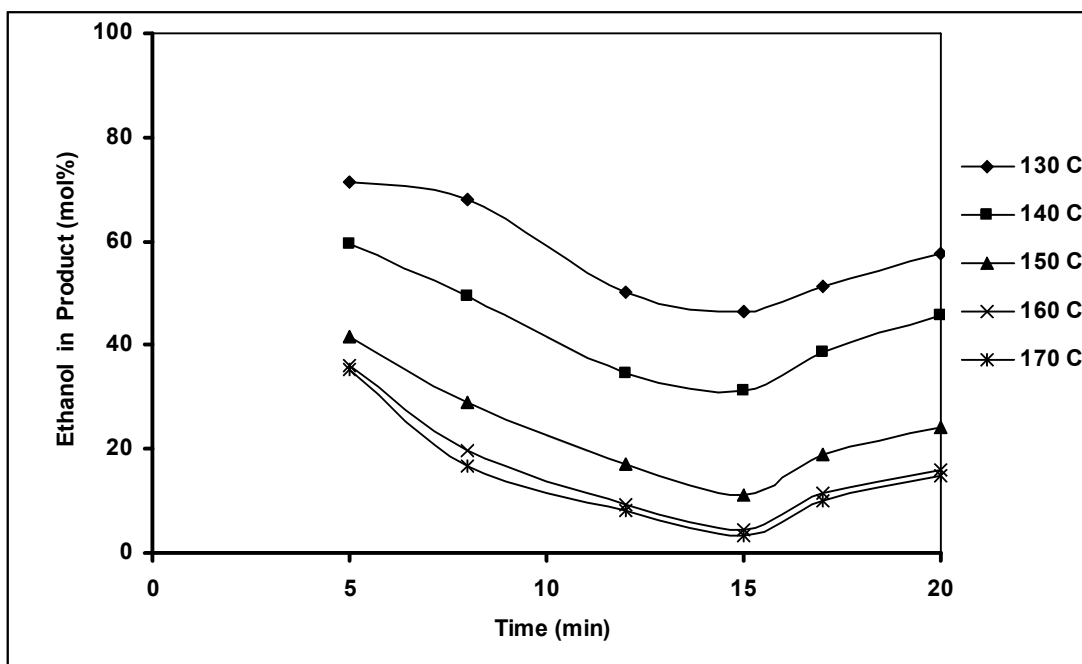
ในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในทุกๆ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง โดยที่สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 25



ภาพประกอบที่ 25 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

จากภาพประกอบที่ 25 ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 88.3% เป็น 76.8% แต่หลังจาก 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เพิ่มขึ้นเป็น 84.6% ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 84.9% เป็น 72.7% แต่หลังจาก 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เพิ่มขึ้นเป็น 81.9% ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 72.2% เป็น 59.1% แต่หลังจาก 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เพิ่มขึ้นเป็น 67.7% ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 61.7% เป็น 37.4% แต่หลังจาก 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เพิ่มขึ้นเป็น

41.9% และที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส องค์กรประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 62.7% เป็น 30.5% แต่หลังจาก 15 นาที องค์กรประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เป็น 40.1%



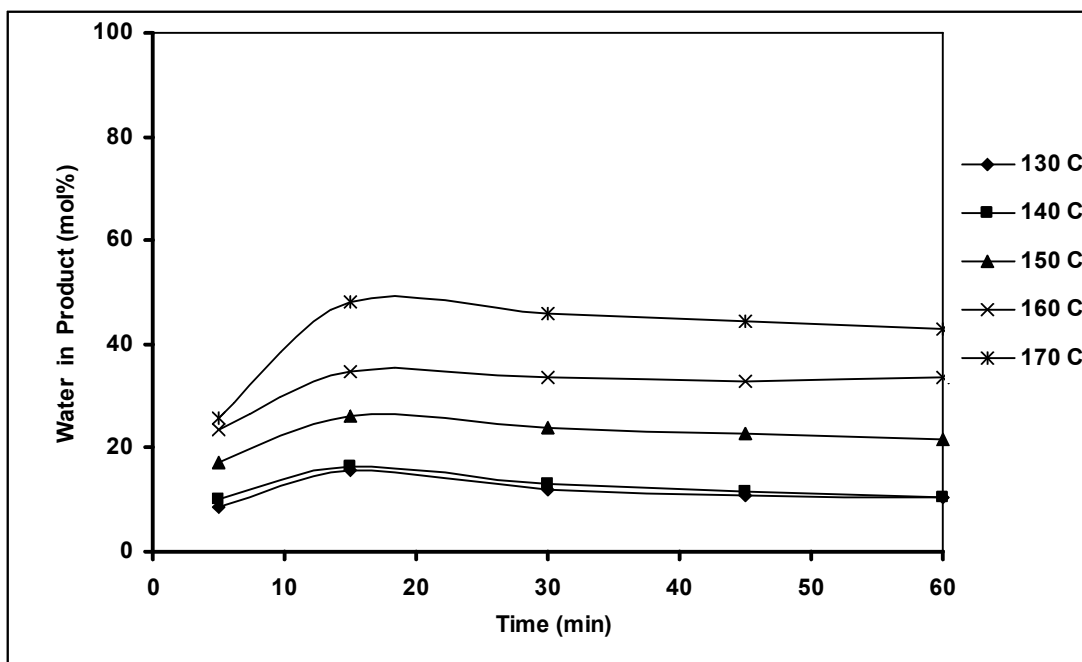
ภาพประกอบที่ 26 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อองค์กรประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

จากภาพประกอบที่ 26 สำหรับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาจาก 5 – 20 นาที องค์กรประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงและจะน้อยที่สุดที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที แต่เมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที องค์กรประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในทุกๆ อุณหภูมิที่ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส องค์กรประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 71.5% เพิ่มขึ้นเป็น 46.5% แต่หลังจาก 15 นาที องค์กรประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เพิ่มขึ้นเป็น 57.7% ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส องค์กรประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 59.4% เป็น 31.4%

แต่หลังจาก 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เพิ่มขึ้นเป็น 45.8% ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 41.6% เป็น 11.2% แต่หลังจาก 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เพิ่มขึ้นเป็น 24.3% ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 35.9% เป็น 4.4% แต่หลังจาก 15 นาที องค์ประกอบของ เอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เพิ่มขึ้นเป็น 16.1% และที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 35.4% เป็น 3.3% แต่หลังจาก 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เพิ่มขึ้นเป็น 14.8%

4.3.3 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์

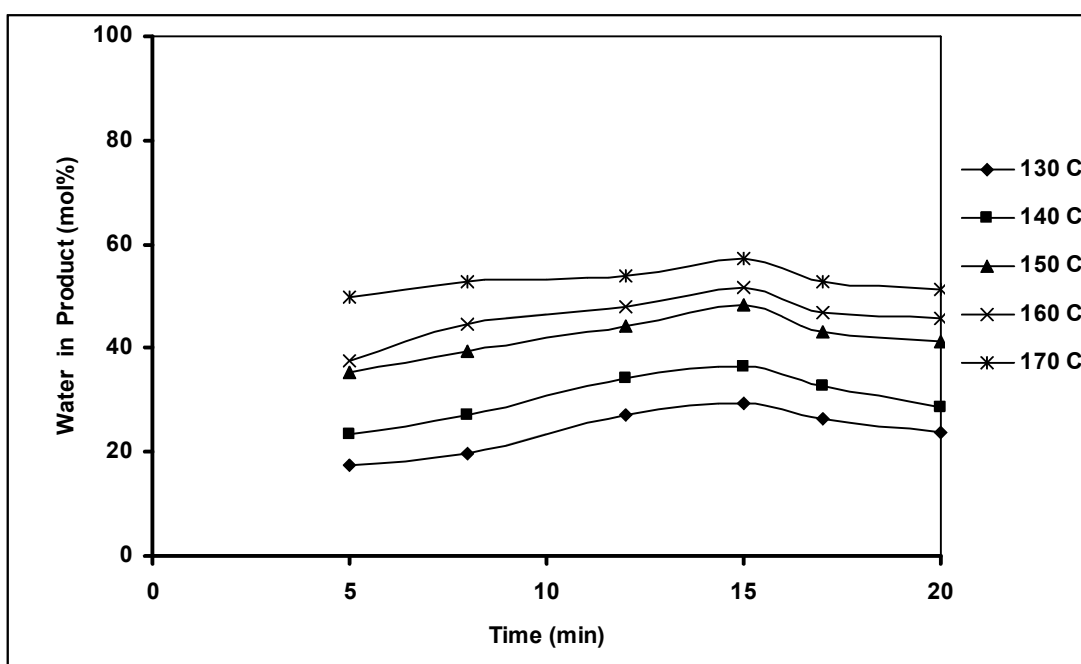
การศึกษาผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 27 และ 28 ตามลำดับ ซึ่งผลจากกราฟที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งสองการทดลองคือ การทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเพิ่มระยะเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาจาก 5 – 60 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นและจะมากที่สุดที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที แต่เมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ในทุกๆ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง โดยที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 8.5% เป็น 15.5% แต่หลังจาก 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เหลือ 10.3% ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 10.1% เป็น 16.4% แต่หลังจาก 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เหลือ 10.6% ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 17.0% เป็น 26.3% แต่หลังจาก 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เหลือ 21.62% ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 23.4% เป็น 34.6% แต่หลังจาก 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เหลือ 33.7% และที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 25.7% เป็น 48.1% แต่หลังจาก 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 60 นาที เหลือ 42.9% ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 27



ภาพประกอบที่ 27 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

สำหรับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาจาก 5 – 20 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นและจะมากที่สุดที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที แต่เมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ในทุกๆ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง เช่นเดียวกับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 17.6% เป็น 29.2% แต่หลังจาก 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เหลือ 23.6% ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 23.3% เป็น 36.4% แต่หลังจาก 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เหลือ 28.6% ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 35.3% เป็น 48.2% แต่หลังจาก 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เหลือ 41.4% ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 37.6% เป็น 51.6% แต่หลังจาก 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่

เวลา 20 นาที เหลือ 45.7% และที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 50.0% เป็น 57.2% แต่หลังจาก 15 นาที ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่เวลา 20 นาที เหลือ 51.5% โดยสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 28



ภาพประกอบที่ 28 ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

จากภาพประกอบที่ 23 – 28 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5 – 60 นาที และใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5 – 20 นาที โดยทดลองที่อุณหภูมิ 130, 140, 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาในการทดลอง ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์และปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 แต่เมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที พบว่าค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์และปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ซึ่งสอดคล้องกับบทความของ Metwurst (2004) เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาน้อยกว่า 15 นาที เป็นระยะเวลาที่ใช้ยังน้อยเกินไปจึง

ทำให้ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ และที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่นานจนถึงจุดสมดุลของปฏิกิริยาจึงทำให้น้ำและไดเอทิลอีเทอร์ที่อยู่ผลิตภัณฑ์เกิดการย้อนกลับของปฏิกิริยาไปเป็นเอทานอลดั้งเดิม โดยสามารถสังเกตได้จากองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์นั้นคือ เมื่อเพิ่มระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา ค่าองค์ประกอบของเอทานอลลดลง ซึ่งจะมีค่าน้อยที่สุดที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที แต่เมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ

4.4 ผลของการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ลงในกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิต ไบโอดีเซลต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์

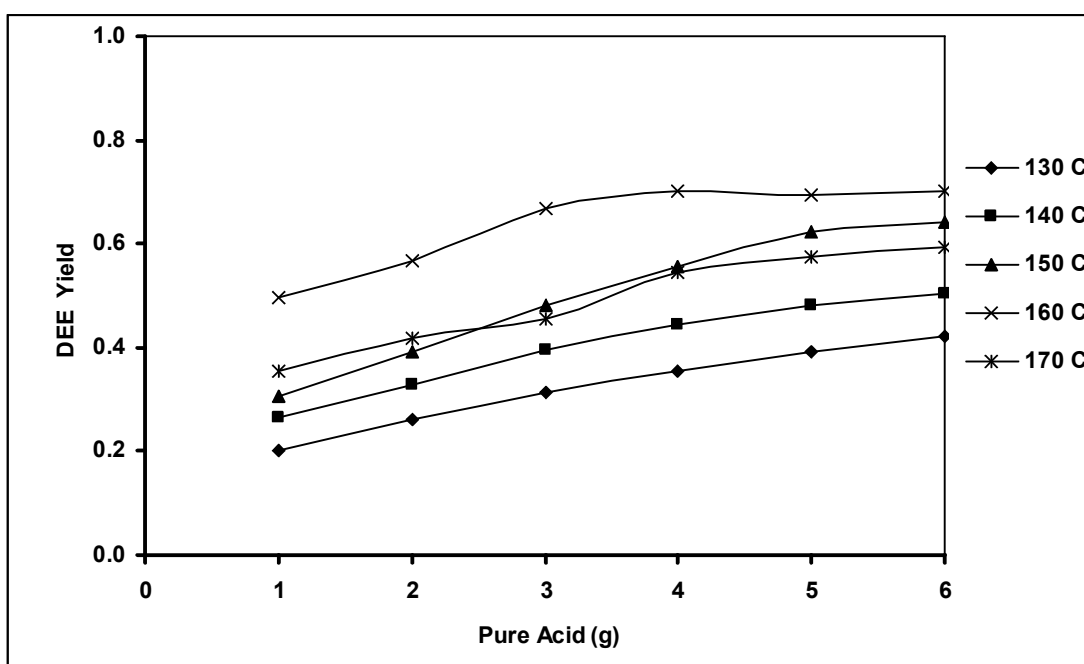
การศึกษาผลของการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ เพื่อเพิ่มผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ ถูกศึกษาโดยทำการทดลองที่สภาวะของอุณหภูมิและระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุด คือที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที สำหรับวิธีการทดลองทำเช่นเดียวกับการทดลองเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทดลองที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที แต่จะมีการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ลงในกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลที่ปริมาณตั้งแต่ 1 – 6 กรัม

4.4.1 ผลของการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์

การศึกษาผลของการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ปริมาณ 1 – 6 กรัม ลงในกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล เพื่อเพิ่มค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ในผลิตภัณฑ์ซึ่งทดลองที่อุณหภูมิ 130, 140, 150, 160 และ 170 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 29 ผลจากกราฟที่ได้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่เติมลงไปค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นในทุกๆ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง

จากภาพประกอบที่ 17 พบว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาที่ 15 นาที โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์เพียง 0.44 ซึ่งเป็นค่าน้อยเนื่องจากความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลมีความเข้มข้นน้อย จึงทำให้การให้ไฮโดรเจน

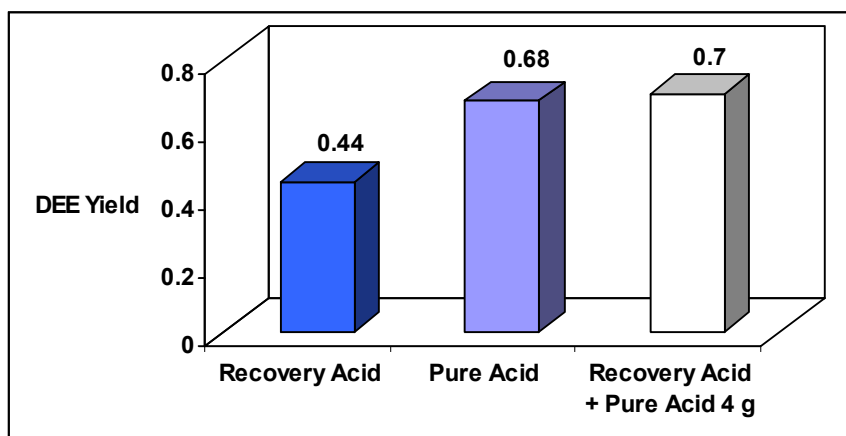
ไอออนแก๊มโมเลกุลของเอทานอลเกิดขึ้นน้อย ซึ่งส่งผลให้โมเลกุลของเอทานอลเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลของน้ำและไดเอทิลอีเทอร์ได้น้อย ดังนั้นจึงทำให้ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ต้องเติมลงไปเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อทดลองโดยเติมกรดบริสุทธิ์ลงไปผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกที่เติม ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.42 ซึ่งค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมมากกว่า 6 กรัม ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.26 เป็น 0.5 ซึ่งค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมมากกว่า 6 กรัม ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.26 เป็น 0.5 ซึ่งค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมมากกว่า 6 กรัม ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 0.7 ซึ่งค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์มีแนวโน้มคงที่เมื่อเติมมากกว่า 4 กรัม และที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.35 เป็น 0.59 ซึ่งค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมมากกว่า 6 กรัม



ภาพประกอบที่ 29 ผลของการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ลงในกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลต่อค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับทำปฏิกิริยา

จากภาพประกอบที่ 29 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิและปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่เติมลงไป พบว่าการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ให้ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์สูงสุดถึง 0.7 โดยใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่เติมเพียง 4 กรัม ซึ่งที่อุณหภูมิ 130, 140, 150 และ 170 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มที่ต้องเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์มากกว่า 6 กรัม จึงจะได้ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ที่มากกว่าหรือใกล้เคียงกับการทดลองที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ปริมาณ 4 กรัม ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด

เมื่อนำค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์จากการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ 4 กรัม ลงในกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที มาเปรียบเทียบกับค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียวและกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์เป็น 0.68 และการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ 4 กรัม ผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลจะให้ค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์เป็น 0.7 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 30



ภาพประกอบที่ 30 ค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ เมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที

ตารางที่ 4 ปริมาณการเติมกรดบรียูทรีที่อุณหภูมิสำหรับการทดลอง 160 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์และปริมาณกรดบรียูทรีที่สามารถประหยัดได้

ปริมาณกรดบรียูทรีที่เติม (g)	อัตราโดยน้ำหนักกรดบรียูทรีต่อกรดที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล	ผลได้ ไดเอทิลอีเทอร์	ปริมาณกรดบรียูทรีที่ประหยัด (g)	คิดเป็น (wt%)
1	1:65.00	0.40	6.36	86.41
2	1:32.50	0.57	5.36	72.83
3	1:21.66	0.67	4.36	59.24
4	1:16.25	0.70	3.36	45.65
5	1:13.00	0.69	2.36	32.06
6	1:10.83	0.70	1.36	18.48

จากการนำผลทดลองการเติมกรดบรียูทรีปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที เพื่อช่วยเพิ่มค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ มาวิเคราะห์หาปริมาณกรดซัลฟิวริกบรียูทรี ที่สามารถประหยัดลงได้ พบว่าจากตารางที่ 4 การเติมกรดบรียูทรีเพิ่ม 4 กรัม เป็นปริมาณการเติมที่เหมาะสมที่สุด โดยอัตราส่วนกรดซัลฟิวริกบรียูทรีที่เติมลงในกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลคิดเป็น 1:16.25 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถช่วยประหยัดปริมาณกรดบรียูทรีกว่าการใช้กรดซัลฟิวริกบรียูทรีเพียงอย่างเดียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาถึง 3.36 กรัม คิดเป็นร้อยละ 45.65 โดยน้ำหนัก

4.5 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล

หลังสิ้นสุดการทดลองการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล พบว่าภายในถังปฏิกรณ์จะมีกรดเหลืออยู่ซึ่งมีสีดำและกลิ่นค่อนข้างแรง เมื่อนำกรดที่เหลือดังกล่าวไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกด้วยวิธี potentiometer ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดบรียูทรีเมื่อผ่านการผลิตไดเอทิลอีเทอร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลหลังจากถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล

เวลา (min)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิต่างๆ (wt%)				
	130°C	140°C	150°C	160°C	170°C
5	1.24	1.25	1.25	1.23	1.25
15	1.23	1.26	1.24	1.24	1.23
30	1.21	1.20	1.25	1.23	1.27
45	1.18	1.23	1.21	1.25	1.20
60	1.24	1.19	1.22	1.28	1.23

จากตารางที่ 5 พบว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเมื่อผ่านการผลิตไดเอทิลอีเทอร์มีค่าลดลงจากร้อยละ 11.34 โดยน้ำหนัก เหลือประมาณร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ที่ทุกๆ ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา ซึ่งความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลที่เหลือน้อยน่าจะมีสาเหตุมาจาก กรดซัลฟิวริกตกค้างอยู่ภายในถังปฏิกรณ์และบางส่วนเกิดการระเหย

ตารางที่ 6 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์หลังจากถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล

เวลา (min)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิต่างๆ (wt%)				
	130°C	140°C	150°C	160°C	170°C
5	41.51	41.53	41.1	40.86	41.23
8	41.15	40.96	41.85	40.13	40.42
12	42.07	41.91	40.67	41.73	40.57
15	41.18	41.23	40.21	42.25	40.20
17	40.24	40.59	41.28	42.89	41.16
20	41.24	42.07	40.87	40.21	41.49

จากตารางที่ 6 พบว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ผ่านการผลิตไดเอทิลอีเทอร์มีค่าลดลงจากร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก เหลือประมาณร้อยละ 41 โดยน้ำหนัก ที่ทุกๆ ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่บริสุทธิ์ที่เหลือ พบว่าความเข้มข้นของกรดที่เหลือมีค่าสูง จึงนำที่จะสามารถนำกรดที่เหลือดังกล่าวกลับมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลเพื่อผลิตไดเอทิลอีเทอร์ได้อีกครั้ง เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับกรดซัลฟิวริกที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 7 ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลผสมกับกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์หลังจากถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล

กรดซัลฟิวริกที่เดิม (g)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิต่างๆ (wt%)				
	130°C	140°C	150°C	160°C	170°C
1	1.41	1.51	1.46	1.42	1.49
2	1.65	1.69	1.66	1.59	1.72
3	1.86	1.75	1.82	1.71	1.85
4	2.08	2.13	2.01	2.15	2.11
5	2.24	2.29	2.21	2.30	2.25
6	2.43	2.48	2.40	2.55	2.51

จากตารางที่ 7 พบว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเมื่อผ่านการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ผสมกับกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ มีความเข้มข้นเหลือประมาณร้อยละ 1.4 – 2.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งความเข้มข้นของกรดที่เหลือถือว่าน้อยจึงไม่เหมาะสมที่จะนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

4.6 การประเมินค่าใช้จ่ายที่สามารถลดลง เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดลองพบว่าเมื่อผลิตไดเอทิลอีเทอร์ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที โดยใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์

4 มิลลิลิตร (7.36 กรัม) และกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ 2.17 มิลลิลิตร (4 กรัม) ผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล 50 มิลลิลิตร (65 กรัม ซึ่งมีเนื้อกรดซัลฟิวริกผสมอยู่ 7.36 กรัม) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดจะให้ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ที่ใกล้เคียง 0.7 และเมื่อทำการประเมินค่าใช้จ่ายของปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์สามารถแสดงผลการประเมินได้ดังตารางที่ 8 โดยสมมติให้ต้องการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ 1 กิโลกรัม และใช้ระบบของงานวิจัยนี้เป็นหน่วยผลิต

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของกรดซัลฟิวริกที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ 1 กิโลกรัม

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	เอทานอลที่ป้อน กิโลกรัม	DEE ที่ผลิตได้ กิโลกรัม	กรดซัลฟิวริกที่ใช้ กิโลกรัม	ราคากรดซัลฟิวริก บาท
กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์	1.77	1	0.55	8.25
กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ ผสมกับกรดซัลฟิวริก ที่เหลือจากการผลิต ไบโอดีเซล	1.77	1	0.30	4.50

หมายเหตุ: ราคากรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก ที่ขายในท้องตลาดคือ 15 บาทต่อกิโลกรัม (<http://www.bornnet.com>)

จากตารางที่ 8 พบว่าการป้อนเอทานอล 1.77 กิโลกรัม (2.25 ลิตร) สามารถผลิตไดเอทิลอีเทอร์ได้ 1 กิโลกรัม (1.4 ลิตร) โดยที่ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์เป็น 0.7 เท่าเดิม ซึ่งในการผลิตต้องใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์อย่างเดียวนั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาถึง 0.55 กิโลกรัม โดยต้องเสียเงินค่ากรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ 8.25 บาท แต่เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับกรดที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลจะใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เพียง 0.3 กิโลกรัม โดยเสียเงินค่ากรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ 4.50 บาท ดังนั้นการใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับการซื้อกรดซัลฟิวริกมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ถึง 3.75 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 45.45 โดยที่การนำกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลมาใช้งาน จะไม่คิดค่าใช้จ่ายสำหรับการกลั่นแยกเมทานอลเนื่องจากกรดที่ได้ ได้จากเมทานอลส่วนเกินที่ผ่านหน่วยการกลั่นแยกเมทานอลของโรงงานผลิตไบโอดีเซล

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ข้อสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอล เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์แบบกะ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ คือลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา และการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์ พร้อมทั้งวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดที่ผ่านการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยคือกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ โดยกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเมื่อผ่านการกลั่นแยกเมทานอลซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นได้จากร้อยละ 1.59 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 11.34 โดยน้ำหนัก

5.1.2 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์

1. ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 130 - 170 องศาเซลเซียส ที่ทุกๆ ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาที่ใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์และปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น โดยค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมากกว่า 160 องศาเซลเซียส ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์จะลดลง สำหรับองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองพบว่ามีค่าลดลง ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์คือที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เพราะสามารถผลิตไดเอทิลอีเทอร์ได้มากที่สุด

2. ผลของระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ไดเอทิลอีเทอร์ โดยเพิ่มระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาจาก 5 – 60 นาที เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาจาก 5 – 20 นาที เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ ที่ทุกๆ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง พบว่าค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ และปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น โดยมีค่ามากที่สุดที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที แต่เมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์และปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ สำหรับองค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์เมื่อเพิ่มระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาพบว่ามียาลดลงโดยลดลงเหลือน้อยที่สุดที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที แต่เมื่อใช้ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยามากกว่า 15 นาที องค์ประกอบของเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์คือที่ระยะเวลา 15 นาที

3. ผลของการเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลในปริมาณที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 1:65.00, 1:32.50, 1:21.66, 1:16.25, 1:13.00, 1:10.83 โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ต่อน้ำหนักกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซล เพื่อช่วยเพิ่มค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ โดยทดลองในช่วงอุณหภูมิ 130 - 170 องศาเซลเซียส และที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที พบว่าการเติมกรดบริสุทธิ์ที่อัตราส่วน 1:16.25 โดยน้ำหนัก (เติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ 4 กรัม) ที่อุณหภูมิสำหรับการทดลอง 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที เป็นอัตราการเติมที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากจะให้ค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์มากที่สุดถึง 0.7 และเมื่อนำค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ที่ได้จากการเติมกรดบริสุทธิ์ที่อัตราส่วน 1:16.25 โดยน้ำหนัก (เติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ 4 กรัม) ไปเปรียบเทียบกับค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์เมื่อทดลองโดยใช้กรดบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิสำหรับการทดลอง 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งการทดลองที่ใช้กรดบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์เป็น 0.68

4. จากการประเมินความประหยัดปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์สำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ เมื่อเปรียบเทียบค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์จากผลการทดลองระหว่างการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิสำหรับการทดลอง 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที กับการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลที่อัตราส่วน 1:16.25 โดยน้ำหนัก (เติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ 4 กรัม) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสำหรับการทดลอง 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที พบว่าการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับกรด

ซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลที่อัตราส่วน 1:16.25 โดยน้ำหนัก (เติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ 4 กรัม) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถประหยัดปริมาณกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์กว่าการทดลองที่ใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาถึง 3.36 กรัม โดยที่ค่าผลได้สูงสุดของไดเอทิลอีเทอร์จากทั้งสองการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าประมาณ 0.7 และเมื่อประเมินค่าใช้จ่ายสำหรับการซื้อกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า การใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับการซื้อกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ลงได้ 45.45 เปอร์เซ็นต์

5. จากการศึกษาวิเคราะห์ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลและกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์หลังจากผ่านการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ พบว่าความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลลดลงจากร้อยละ 11.34 โดยน้ำหนัก เหลือประมาณร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ที่ทุกๆ ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยาสำหรับความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ลดลงจากร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก เหลือประมาณร้อยละ 41 โดยน้ำหนัก ที่ทุกๆ ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่บริสุทธิ์ที่เหลือพบว่าความเข้มข้นของกรดที่เหลือค่อนข้างสูง จึงน่าที่จะสามารถนำกรดที่เหลือดังกล่าว กลับมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลเพื่อผลิตไดเอทิลอีเทอร์ได้อีกครั้ง เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับกรดซัลฟิวริกที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการผลิตไดเอทิลอีเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นเช่นกรดฟอสฟอริก หรือเปลี่ยนสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตเช่น ใช้เอทานอลที่ได้จากการหมักหรือเอทานอลเกรดการค้าแทนเอทานอลบริสุทธิ์ เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของความเข้มข้นของเอทานอลที่มีต่อการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ นอกจากนี้ถ้ามี

2. การนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาเพิ่มเติม ควรมีการปรับปรุงระบบให้ดีขึ้น เนื่องจากเมื่อนำตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์พบว่ามีโมลหายไป 10 – 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสำหรับวิธีแก้ปัญหาดังกล่าวมีดังนี้ ควรต่อคอนเดนเซอร์ให้มีช่วงความยาวมากกว่าเดิม เพื่อให้ไอของผลิตภัณฑ์ควบแน่นเป็นของเหลวได้หมดก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะไหลลงสู่อุปกรณ์เก็บผลิตภัณฑ์ น้ำหล่อเย็นที่ใช้ควรมีอุณหภูมิต่ำมากๆ เพื่อให้ไอของผลิตภัณฑ์เกิดการควบแน่นอย่างรวดเร็วและเป็นการลดระยะเวลาสำหรับเก็บผลิตภัณฑ์

3. สำหรับ โรงงานผลิตไบโอ ดีเซลควรนำเมทานอลส่วนเกินที่เหลือจากผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน มาผลิตไดเมทิลอีเทอร์แทนการผลิตไดเอทิลอีเทอร์เพื่อ

เพิ่มมูลค่าให้แก่เมทานอลที่เหลือและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับการกลั่นเมทานอลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ แต่สำหรับการผลิตไดเมทิลอีเทอร์จะต้องมีการจัดระบบการเก็บผลิตภัณฑ์ให้ดี เนื่องจากไดเมทิลอีเทอร์มีจุดเดือดต่ำถึง -31 องศาเซลเซียส ทำให้การเก็บผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน . “พลังงานเอทานอล”. สืบค้นจาก:

http://www.alternative.in.th/index.php?option=com_content&view=article&id=238&Itemid102 (4 มีนาคม 2551).

กิตติภูมิ ศุภลักษณ์ปัญญา. 2548. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ โดยกรรมวิธีไอโซเนชันเชิงเร่งปฏิกิริยาซัลโฟเนตวานาเดียม-ไททานเนียม และแอมเบอร์ลิสต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

กิตติศักดิ์ ทวีสิน โสภากา. 2549. การผลิตเมทิลเอสเตอร์จากน้ำมันปาล์มหีบรวม โดยใช้กระบวนการผลิตแบบ Esterification และ Transesterification. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เจษฎา แซ่เล่า, ธวัชชัย ไกรศรีวรรณ และนายเอกพล ศรีลาภูมิ. 2548. การสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์จากเอทานอล. โครงการงานวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

บริษัท บอร์เน็ต คอร์ปอเรชั่นจำกัด. 2536. “ราคาสารเคมีสำหรับบำบัดน้ำเสีย”.

สืบค้นจาก: <http://www.bornnet.com> (2 มีนาคม 2552).

มูลนิธิสถาบันพลังงานทดแทนเอทานอล-ไบโอดีเซลแห่งประเทศไทย. 2000. “เชื้อเพลิงเอทานอล”.

สืบค้นจาก: <http://www.ethanol-thailand.com> (4 มีนาคม 2551).

เยี่ยมชมโรงงาน. 2543. โรงงานต้นแบบผลิตแอลกอฮอล์จากมันสำปะหลัง วท. วิศวกรรมสาร. 55-58.

สื่อส่งเสริมการแลกเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้. “เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล” จากน้ำมันพืชใช้แล้ว”.

สืบค้นจาก: <http://eco-town.dpim.go.th/article/download.php?id=1354> (10 พฤษภาคม 2551).

สุภาพร ฉิ่งฉิว. 2548. การแยกเอทานอล-น้ำโดยวิธีเพอแวนพอร์ชันและการดูดซับ. วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุรางคณา หัตถิ. 2546. การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนระบบตัวเร่งปฏิกิริยาแกมมา-
อะลูมินา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุณาโลม เวทย์วัฒนะ. 2545. การผลิตเอทิลีนจากเอทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดซีโอไลต์ ZSM-5
ชนิดดัดแปลง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

Ahmed, A.I., El-Hakam, S.A., Samra, S.E., El-Khouly, A.A. and Khder, A.S., 2008. Structural
characterization of sulfated zirconia and their catalytic activity in dehydration of ethanol.
Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 317(1-3): 62-70.

Chen, G., Li, S., Jiao, F. and Yuan, Q., 2007. Catalytic dehydration of bioethanol to ethylene over
 $\text{TiO}_2/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ catalysts in microchannel reactors. Catalysis Today, 125(1-2): 111-119.

Chiang Mai University. "Potentiometric Titration". Accessed on:

http://mail.chiangmai.ac.th/~scijjkmn/poten_titration.html Aug. 25, 2008.

Chongkhong, S., Tongurai, C., Chetpattananondh, P. and Bunyakan, C., 2007. Biodiesel
production by esterification of palm fatty acid distillate. Biomass and Bioenergy, 31(8):
563-568.

Haber, J., Pamin, K., Matachowski, L., Napruszewska, B. and Poltowicz, J., 2002. Potassium and
Silver Salts of Tungstophosphoric Acid as Catalysts in Dehydration of Ethanol and
Hydration of Ethylene. Journal of Catalysis, 207(2): 296-306.

Kazuhisa Miyamoto. 1997. "Production of fuel alcohol from cellulosic biomass". Accessed on:
<http://www.fao.org/docrep/W7241E/w7241e00.htm#Contents> Oct. 7, 08.

Metwurst. 2004. "Preparation of Diethyl ether". Accessed on:
<http://www.erowid.org/archive/rhodium/chemistry/ethyl.ether.html> Oct. 21, 08.

Organic Chemistry Help. "Williamson ether synthesis". Accessed on:
<http://www.chemhelper.com/williamsonether.html> Oct. 13, 08.

University College Cork Home Page. "Dehydration of Ethanol". Accessed on:
<http://www.ucc.ie/academic/chem/dolchem/html/comp/ethanol.html> Dec. 2, 07.

Varisli, D., Dogu, T. and Dogu, G., 2007. Ethylene and diethyl-ether production by dehydration reaction of ethanol over different heteropolyacid catalysts. *Chemical Engineering Science*, 62(18-20): 5349-5352.

Wikipedia, the free encyclopedia. "Diethyl Ether". Accessed on:
http://en.wikipedia.org/wiki/Diethyl_ether Nov. 9, 08.

Wikipedia, the free encyclopedia. "Ethanol". Accessed on:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Ethanol> Nov. 21, 08.

Wikipedia, the free encyclopedia. "Sulfuric Acid". Accessed on:
http://en.wikipedia.org/wiki/Sulfuric_Acid Nov. 9, 08.

Xu, M., Goodman, D.W. and Bhattacharyya, A., 1997a. Catalytic dehydration of methanol to dimethyl ether (DME) over Pd/Cab-O-Sil catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 149(2): 303-309.

- Xu, M., Lunsford, J.H., Goodman, D.W. and Bhattacharyya, A., 1997b. Synthesis of dimethyl ether (DME) from methanol over solid-acid catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 149(2): 289-301.
- Yaripour, F., Baghaei, F., Schmidt, I. and Perregaard, J., 2005. Catalytic dehydration of methanol to dimethyl ether (DME) over solid-acid catalysts. *Catalysis Communications*, 6(2): 147-152.
- Zaki, T., 2005. Catalytic dehydration of ethanol using transition metal oxide catalysts. *Journal of Colloid and Interface Science*, 284(2): 606-613.
- Zhang, X., Wang, R., Yang, X. and Zhang, F., 2008. Comparison of four catalysts in the catalytic dehydration of ethanol to ethylene. *Microporous and Mesoporous Materials*, 116(1-3): 210-215.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

1. แก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

1. การเตรียมกราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำโดยใช้ 1-โพรพานอลเป็น internal standard

1.1 การเตรียมสารละลายเอทานอล – น้ำ โดยเตรียมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 โดยน้ำหนัก โดยในแต่ละความเข้มข้น สารละลายจะมีน้ำหนักรวม 10 กรัม

วิธีการเตรียม

ซึ่งเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 99.8 โดยน้ำหนัก และเติมน้ำกลั่นจนสารละลายมีน้ำหนัก 10 กรัม ซึ่งน้ำหนักของเอทานอลและน้ำสำหรับแต่ละความเข้มข้นแสดงดังตาราง ก. 1

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักของเอทานอลและน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐาน

ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล (%โดยน้ำหนัก)	น้ำหนักของเอทานอล 99.8 % (กรัม)	น้ำหนักของน้ำ (กรัม)
10	1	9
20	2	8
30	3	7
40	4	6
50	5	5
60	6	4
70	7	3
80	8	2
90	9	1

1.2 การเตรียมสารละลายไดเอทิลอีเทอร์ – เอทานอล โดยเตรียมสารละลาย ไดเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 โดยน้ำหนัก โดยในแต่ละ ความเข้มข้นสารละลายจะมีน้ำหนักรวม 10 กรัม

วิธีการเตรียม

ซึ่งไดเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นร้อยละ 99.8 โดยน้ำหนัก และเติมเอทานอลความเข้มข้น 99.8 โดยน้ำหนัก จนสารละลายมีน้ำหนัก 10 กรัม ซึ่งน้ำหนักของไดเอทิลอีเทอร์และเอทานอลสำหรับแต่ละความเข้มข้นแสดงดังตาราง ก. 2

ตารางที่ ก.2 น้ำหนักของไดเอทิลอีเทอร์และน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐาน

ความเข้มข้นของสารละลายไดเอทิลอีเทอร์ (% โดยน้ำหนัก)	น้ำหนักของไดเอทิลอีเทอร์ 99.8 % (กรัม)	น้ำหนักของเอทานอล (กรัม)
10	1	9
20	2	8
30	3	7
40	4	6
50	5	5
60	6	4
70	7	3
80	8	2
90	9	1

1.3 การเตรียมสารละลายผสมระหว่างสารละลายตัวอย่างกับ Internal standard

Internal standard ที่ใช้คือ 1-โพรพานอล โดยใช้ ไมโครปิเปตดูดสารละลายเอทานอล-น้ำที่เตรียมได้จากข้อ 1.1 และสารละลายไดเอทิลอีเทอร์-เอทานอลจากข้อ 1.2 ผสมกับ 1-โพรพานอลความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก โดยผสมสารละลายที่เตรียมไว้กับ

1-โพรพานอลที่อัตราส่วนน้ำหนักผสมสารละลายที่เตรียมไว้ต่อน้ำหนัก 1-โพรพานอล 1:1 อย่างละ 200 ไมโครลิตร ลงในขวด vial

1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารละลายมาตรฐาน

โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีของบริษัท Shimadzu รุ่น 14B ดีเทคเตอร์แบบ FID ในการวิเคราะห์จะใช้ syringe คูดสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 1.3 ปริมาณ 0.3 ไมโครลิตร โดยสภาวะที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์แสดงในตาราง ก. 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.3 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

เครื่องตรวจวัด (detector)	ชนิด FID
คอลัมน์ (column)	ชนิด Pack 1, 2, 3 TCEP
อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิเครื่องตรวจวัด 130 °C อุณหภูมิหัวฉีด 130 °C อุณหภูมิตู้อบ 40 °C
อัตราเร็วของแก๊ส (ml/min)	แก๊สเชื้อเพลิง (fuel gas): H ₂ เท่ากับ 28.67 ml/min. แก๊สตัวพา (carrier gas): He ₂ เท่ากับ 13.46 ml/min. ออกซิแดนซ์ (oxidant): Air เท่ากับ 179.1 ml/min.

เมื่อเครื่องเสร็จสิ้นการวิเคราะห์ จะได้กราฟซึ่งแสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของเอทานอลและพื้นที่ใต้ของกราฟของ 1-โพรพานอล (internal standard) ออกมา หลังจากนั้นนำค่าอัตราส่วนระหว่างค่าพื้นที่ใต้กราฟของเอทานอลและ 1-โพรพานอลที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายเอทานอล-น้ำ ไปพล็อต กราฟมาตรฐาน ดังแสดงในภาพประกอบ ข. 1 (ภาคผนวก ข)

2. วิเคราะห์องค์ประกอบของไดเอทิลอีเทอร์ที่ผลิตได้และเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของไดเอทิลอีเทอร์ที่ผลิตได้และเอทานอลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ มีขั้นตอนเช่นเดียวกับการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานโดยก่อนทำการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างที่ได้จากการทดลองทุกครั้ง จะต้องนำผลิตภัณฑ์ตัวอย่างผสมกับ 1-โพรพานอล (internal standard) ที่อัตราส่วนน้ำหนัผสมสารละลายที่เตรียมไว้ต่อน้ำหนัก 1-โพรพานอล 1:1 อย่างละ 200 ไมโครลิตร ลงในขวด vial ก่อนนำไปวิเคราะห์ จากนั้นนำ Syringe คูดผลิตภัณฑ์ที่ผสม 1-โพรพานอล (internal standard) ปริมาณ 0.3 ไมโครลิตร แล้วลงไปในส่วน

หัวข้อของเครื่อง GC หลังจากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ คำนวณอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของ เอทานอลต่อพื้นที่ใต้กราฟของ 1-โพรพานอล และอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของ ไดเอทิลอีเทอร์ต่อ พื้นที่ใต้กราฟของ 1-โพรพานอล เมื่อทราบอัตราส่วนดังกล่าวก็จะนำไปเปรียบเทียบกับกราฟ มาตรฐาน ดังแสดงในภาพประกอบ ข.1 และ ข.2 (ภาคผนวก ข) เพื่อกำหนดความเข้มข้นของ เอทานอลที่เหลือ และ ไดเอทิลอีเทอร์ที่ผลิตได้ในผลิตภัณฑ์

2. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำในน้ำมันด้วยวิธี Karl Fisher Coulometer

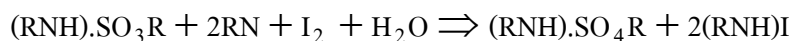
โดยใช้สำหรับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำในสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ เพื่อวิเคราะห์น้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่ง Karl Fisher เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำ (ในหน่วย ร้อยละโดยน้ำหนัก) ในสารตัวอย่าง โดยสารตัวอย่างจะต้องมีปริมาณน้ำน้อยกว่าร้อยละ 5 โดย น้ำหนักของสารตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์จึงจะมีความถูกต้อง แต่ถ้าสารตัวอย่างมีน้ำปริมาณมากกว่า ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของสารตัวอย่าง จะต้องเจือจางตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ ทุกตัวอย่างจะใช้ 1-โพรพานอล เจือจาง 20 เท่า (ตัวอย่าง 1 กรัม ผสมกับ 1-โพรพานอล 20 กรัม) และต้องวิเคราะห์หา ปริมาณน้ำใน 1-โพรพานอล ก่อนเสมอ โดยเครื่อง Karl Fisher Coulometer สามารถแสดงได้ดัง ภาพประกอบ ก.1



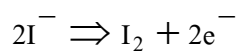
ภาพประกอบที่ ก.1 เครื่อง Karl Fisher Coulometer ของบริษัท Mettler รุ่น DL39

หลักการของเครื่อง

Karl Fisher Coulometer มีพื้นฐานมาจากสมการมาตรฐานของปฏิกิริยา Karl Fisher ดังนี้คือ

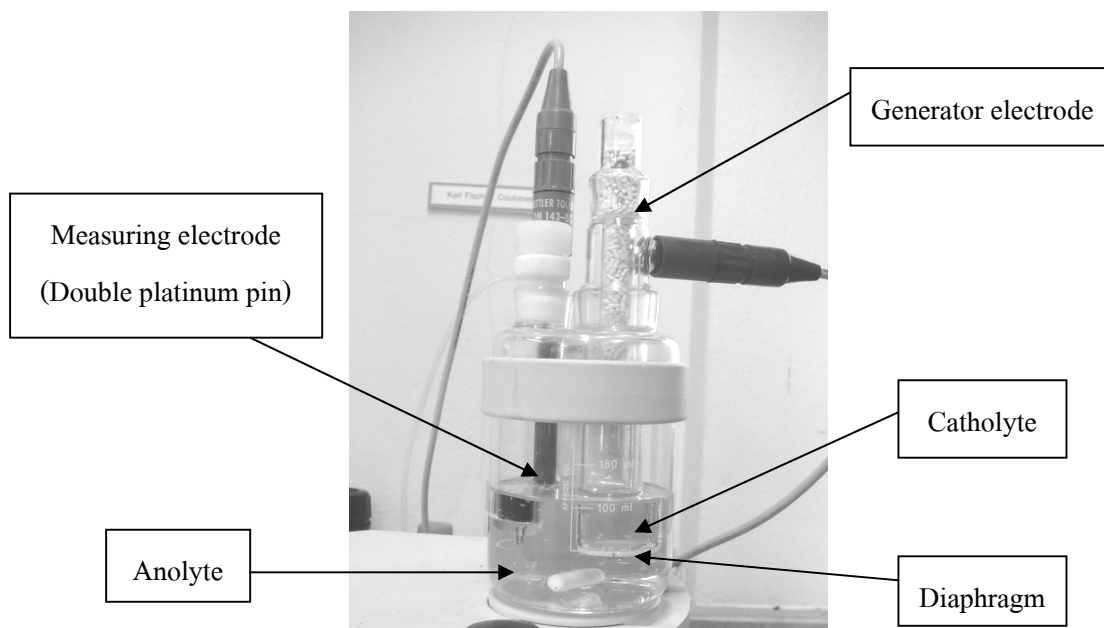


โดยที่ I_2 สามารถเกิดขึ้นจากแอนโนดิกออกซิเดชัน (anodic oxidation)



I_2 จะเกิดขึ้นที่ตัวกำเนิดขั้วไฟฟ้า (generator electrode) ซึ่งประกอบรวมอยู่ในเซลล์ ถัดจากตัววัดขั้วไฟฟ้า (measuring electrode) ซึ่งประกอบด้วยเข็มแพลตทินัมซึ่งมีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว สำหรับคำนวณหาจุดยุติ

เซลล์สำหรับการไทเทรต ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวก (anode) และขั้วไฟฟ้านลบ (cathode) ซึ่งแยกออกจากกันโดยไดอะแฟรม (diaphragm) แสดงดังภาพประกอบ ก.2



ภาพประกอบที่ ก.2 ส่วนประกอบของเครื่อง Karl Fisher Coulometer

- ส่วนขั้วไฟฟ้าบวก (anode) จะมี anolyte ซึ่งประกอบด้วย ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide) อีไมดาโซล (imidazole) และไอโอดีน (iodide) โดยใช้ เมทานอลหรือเอทานอลเป็นตัวทำละลาย
- ส่วนขั้วไฟฟ้าลบ (cathode) จะมี catholyte ซึ่งประกอบด้วยเกลือแอมโมเนียมที่หน้าที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าบวก (anode reaction)

I_2 จะเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าบวก โดยประจุลบจาก $2I^-$ จะปล่อยอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าบวกและเกิดเป็น I_2 ซึ่ง I_2 ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำในสารละลายตัวอย่าง โดยอัตราการทำปฏิกิริยาระหว่าง $[H_2O]: [I_2]$ คือ 1:1 สำหรับปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าลบ (cathode reaction)

H_2 จะถูกผลิตขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าลบ โดย H^+ จะถูกรีดิวส์ไปเป็น H_2 โดยจะต้องมีการเติมเกลือแอมโมเนียมลงไปใน catholyte เพื่อเป็นตัวเหนี่ยวนำให้ผลิต H_2

ขั้นตอนการทำงาน

1. การเตรียมสารละลายใน Titration Beaker

1.1 การเติมน้ำยา Karl Fischer ในส่วนที่เป็น Anolyte และ Catholyte

- ตวงน้ำยา Karl Fischer ที่ใช้สำหรับ Anode ลงในส่วนของ Vessel ภายนอกประมาณ 100 มิลลิลิตร
- ตวงน้ำยา Karl Fischer ที่ใช้สำหรับ Cathode ลงในส่วนของ Cell ภายในประมาณ 5 มิลลิลิตร
- ปิดช่องต่างๆให้สนิทด้วย Desiccator Tube หรือฝาจุกสำหรับใส่สารตัวอย่าง

1.2 ถ้าต้องการเอาสารละลายออกจาก Titration Beaker

- กด Pump Key
- เปิดฝาจุกที่ปิดบน Vessel ออก แล้วสอดสาย Suction Tube ลงไปใน Titration Beaker
- กด F3 เพื่อสั่งการทำงานของ Pump, เมื่อ Pump ดูดสารละลายออกจาก Titration Beaker หมดแล้ว ให้ดึงสาย Suction Tube ขึ้น แล้วกด F3 หยุดการทำงานของ Pump

2. เริ่มการไทเทรต

การหาปริมาณน้ำในตัวอย่างด้วยเทคนิค Karl Fischer มีขั้นตอนการทำงาน 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ

1. Pretitration เป็นการทำให้น้ำใน Titration Beaker หมดไป

2. การหาปริมาณน้ำในตัวอย่าง

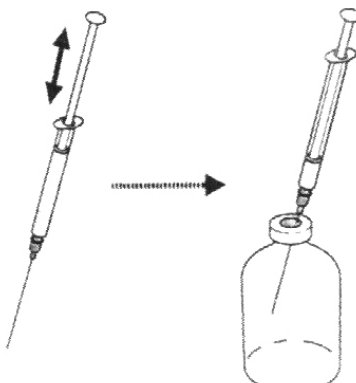
โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- กด RUN Key
- กด F3, OK เครื่องจะเริ่มทำ Pretitration โดยอัตโนมัติ สังเกตหน้าจอจะแสดง Bar Graph เมื่อ Bar Graph เข้าใกล้เส้นแบ่งที่กกลางหน้าจอ แสดงว่าน้ำที่มีอยู่ใน Titration Beaker หมดแล้ว และเครื่องจะเข้าสู่ Standby Mode และพร้อมทำงานในขั้นตอนอื่นต่อไป
- ในขณะที่เครื่องอยู่ใน Standby Mode เครื่องจะหาค่า Online Drift ตลอดเวลา โดยสามารถทราบค่า Drift จากด้านล่างของหน้าจอ จะแสดงค่า Drift ในหน่วย $\mu\text{g}/\text{min}$ โดยทั่วไป จะรอให้ค่า Drift คงที่ก่อน จึงจะเริ่มทำงานในขั้นตอนต่อไป
- สามารถสังเกตค่า Drift ว่าคงที่หรือไม่ ได้จากลูกศรที่อยู่ด้านล่างค่า Drift
- → แสดงว่าค่า Drift คงที่ สามารถเริ่มการทำงานขั้นตอนต่อไปได้

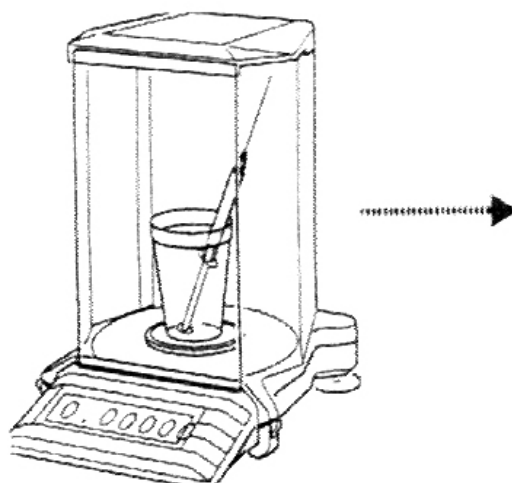
- ↘ แสดงว่าค่า Drift ไม่คงที่ และกำลังลดลง ไม่ควรเริ่มการทำงาน
ขั้นตอนต่อไป
- ↗ แสดงว่าค่า Drift ไม่คงที่ และกำลังเพิ่มขึ้น ไม่ควรเริ่มการทำงาน
ขั้นตอนต่อไป
- ขั้นตอนการหาค่าปริมาณน้ำในตัวอย่าง (Sample Mode)

(เครื่องจะต้องอยู่ใน Standby Mode เท่านั้น จึงจะทำงานใน Sample Mode ได้)

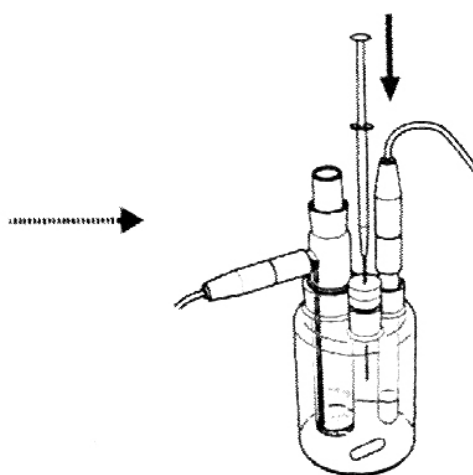
1. กด F3 Sample เลือกหาค่าปริมาณน้ำในตัวอย่าง
2. กด แป้นตัวเลข เพื่อเติมเวลา Mix Time ก่อนเริ่มไทเทรตเพื่อให้สาร
ตัวอย่างละลาย
3. กด F3 OK เพื่อยืนยันการเติมค่า Mix Time
4. กด F3 OK หน้าจอปรากฏข้อความ Please add sample min-
max g
5. เติมตัวอย่างลงใน Titration Beaker
- 5.1 ล้าง Syringe ด้วยตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ 2- 3 ครั้ง
- 5.2 ดูดตัวอย่างเข้า Syringe เช็ดปลายเข็มให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู



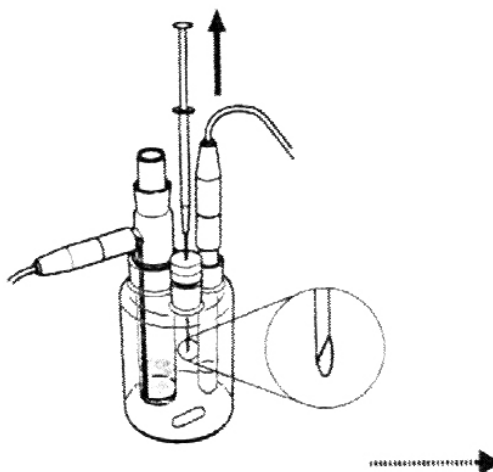
5.3 ชั่ง Syringe ในข้อ 5.2 ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง โดยการกลับด้านของ Syringe วางในปิ๊กเกอร์ ตามรูป แล้วกดปุ่ม Tare ที่เครื่องชั่ง ให้น้ำปัดเครื่องชั่งปรากฏเลข 0



5.4 นิดตัวอย่างลงใน Titration Cell ผ่าน Septum Stopper



5.5 ขณะฉีดสารตัวอย่าง พยายามอย่าให้มีหยดของตัวอย่างค้างที่ปลายเข็ม ถ้ามีหยดตัวอย่างค้างที่ปลายเข็มให้ฉีดลงใน Titration Cell ให้หมด แล้วดึงที่กดขึ้นมาเล็กน้อย ดูในรูป



5.6 ดึง Syringe ออก แล้วนำไปซึ่งใหม่จะได้น้ำหนักสารที่ฉีดลงใน Titration Cell

6. กด F3 OK เครื่องจะเริ่มไทเทรต เพื่อหาค่าน้ำ

7. กด F1 Sample

8. กด เป็นตัวเลข เพื่อใส่น้ำหนักตัวอย่างตามที่ซึ่งได้ในข้อ 5.6

9. กด F3 OK เพื่อ Confirm ค่าน้ำหนักของสารตัวอย่าง

เครื่องจะเริ่มไทเทรต ขณะที่เครื่องกำลังทำงานอยู่นั้น สามารถกดเป็น F1/F2 หรือ F3 เพื่อดูข้อมูลในการไทเทรตได้ เช่น ค่า Drift/ค่า mg น้ำ/เวลาที่ใช้ในการไทเทรต เป็นต้น

เมื่อเครื่องไทเทรตเสร็จ จะคำนวณค่าปริมาณน้ำในตัวอย่าง และแสดงผลที่หน้าจอ ถ้าต้องการหาค่าตัวอย่างต่อไป ให้กด F3 OK เครื่องจะกลับไป Standby Mode และสามารถเริ่มการหาค่าตัวอย่างต่อไปได้ทันที

3. การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดด้วยวิธี Potentiometry

Potentiometry เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตาม ionic activity ของสารละลาย แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. Direct potentiometry เป็นการวัดค่า ionic activity ของสารโดยตรง ค่าที่วัดได้ มีหน่วยเป็น millivolt (mV) หรือวัดออกมาเป็น pH
2. Potentiometric titration เป็นการวัดความเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็น millivolt (mV) หรือ pH ต่อหน่วยปริมาตรของ titrant ที่เติมลงไป เพื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายตัวอย่าง

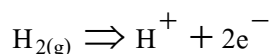
ปฏิกิริยาที่ใช้วิธีทาง Potentiometric titration ได้แก่

1. Neutralization reactions
2. Redox reactions
3. Precipitation reactions
4. Complexometric reactions

โพเทนไทโอมิเตอร์ (Potentiometer)

มีส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือ pH เป็น electrode สองชนิด electrode อันหนึ่งเป็น reference electrode มีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ ไม่ขึ้นกับสารละลายที่ต้องการวัด ส่วน electrode อีกอันจะเป็น indicator electrode มีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตาม ionic activity ของสารละลายที่ต้องการวัด สำหรับ reference electrode ที่นิยม ได้แก่

1. calomel electrode เป็น electrode ที่นิยมใช้มากที่สุด ประกอบด้วยโลหะ platinum แตะอยู่กับ mercury และ mercurous chloride (Hg_2Cl_2 หรือ calomel) ในสารละลาย potassium chloride half-cell formulation : $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl}(x\text{M})$ โดยที่ x คือ ความเข้มข้นของสารละลาย KCl ซึ่งใน standard calomel electrode (SCE) มีค่าเท่ากับ 4.2 M
2. Silver-Silver chloride electrode ประกอบด้วยลวดเงินที่เคลือบไว้ด้วยเกลือ silver chloride ซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลาย potassium chloride half-cell formulation : $\text{Ag}/\text{AgCl}_2/\text{KCl}(x\text{M})$
3. Hydrogen electrode ประกอบด้วย platinum foil ชิ้นเล็กๆ หุ้มด้วยผง platinum black ซึ่งเป็นตัวทำให้ผิวหน้าของ foil มีคุณสมบัติในการดูดซับกับ Hydrogen gas ที่บริสุทธิ์ ซึ่งจะถูกผ่านลงไปยังแท่ง electrode ที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่มีความดันคงที่ 1 บรรยากาศ ตลอดเวลา



Electrode ชนิดนี้ใช้เป็น standard electrode สำหรับตรวจสอบ accuracy ของ reference และ indicator electrode ชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้ยังใช้ตรวจสอบขนาดของ liquid-junction potential รวมทั้ง accuracy และ stability ของ reference electrode solution



Indicator electrode ที่นิยม ได้แก่

1. glass electrode ประกอบด้วย pH-sensitive glass membrane ทำเป็น bulb ภายในมีหลอดเงิน ซึ่งถูกเคลือบไว้ด้วยเกลือ silver chloride จุ่มอยู่ในสารละลายของ hydrochloric acid พบว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ electrode ขึ้นกับความเข้มข้นของ hydrogen ion ในสารละลายที่ต้องการวัด ดังนั้น electrode ชนิดนี้จึงมีประโยชน์มากในการวัดค่า pH ของสารละลาย

half-cell formulation : $\text{Ag}/\text{AgCl}(\text{s})/\text{KCl}(0.1\text{M})/\text{glass}$

2. metal electrode ได้แก่ platinum electrode, Silver electrode และ mercury electrode เป็นต้น
3. solid state and precipitate electrode เช่น Fluoride electrode, sulfide ion electrode เป็นต้น
4. Liquid-Liquid membrane electrode เช่น calcium selective electrode, nitrate electrode และ fluoroborate electrode
5. enzyme and gas-sensing electrode เช่น ammonia electrode, enzyme sensing electrode เป็นต้น

ประโยชน์ของเครื่อง Potentiometer ในด้านการวิเคราะห์ปริมาณสาร

ในการวิเคราะห์ปริมาณของสารโดยใช้ titration บางครั้ง การใช้ visible indicator เป็นตัวบอกจุดยุติ จะทำได้ยาก ไม่สะดวก และเกิดความผิดพลาดได้ง่าย จึงได้มีการประยุกต์ นำเอาเครื่อง potentiometer มาใช้เป็นตัวบอกจุดยุติแทน ซึ่งการหาจุดยุติของปฏิกิริยา ทำได้ 2 แบบ คือ

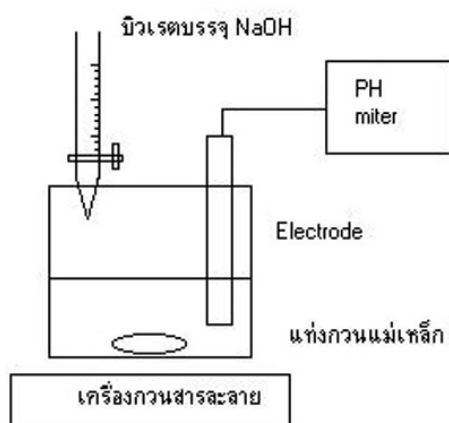
1. หาจุดยุติจากการไทเทรตสารตัวอย่างจนได้ค่า pH เท่ากับ 7 หรือค่า millivolt ของปฏิกิริยาถึงจุด equivalence point

2. หาจุดยุติจาก potentiographic titration ซึ่งทำได้หลายวิธี ได้แก่

- 2.1 graphical method เป็นการเขียนกราฟระหว่างค่าของ pH หรือ millivolt ที่วัดได้กับปริมาตรของ titrant ที่เติมลงไป กราฟที่ได้มีลักษณะเป็น s-shape จุดยุติจะเป็นจุดที่เส้นกราฟมีความชันมากที่สุด
- 2.2 first-derivative method เป็นการเขียนกราฟของค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH หรือ millivolt ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (pH/ v) กับค่าของปริมาตรของ titrant ที่เติมลงไป จุดยุติจะเป็นจุดที่มีค่าสูงที่สุดของเส้นกราฟ
- 2.3 second-derivative method เป็นการเขียนกราฟระหว่างค่าของ pH/ v² กับค่าของปริมาตรของ titrant ที่เติมลงไป จุดยุติจะเป็นจุดที่ second-derivative ของ pH หรือ millivolt มีค่าเป็น 0

วิธีการวิเคราะห์ความเข้มข้นของการซัลฟิวริก

1. นำกรดซัลฟิวริกที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาณ 5 มิลลิลิตรและแต่งกวนแม่เหล็ก (ขนาดเล็กสุด) ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นวางบีกเกอร์บนเครื่องกวนสารละลายพร้อมปรับความเร็วในการกวน
2. นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.2 นอร์มอล เติมลงในบิเรตเพื่อใช้สำหรับการไทเทรต
3. นำหัวอิเล็กโทรดของ pH meter จุ่มลงในบีกเกอร์ โดยให้หัวอิเล็กโทรดจุ่มจมลงในกรดที่นำมาวิเคราะห์ระวังไม่ให้หัวอิเล็กโทรดกระทบกับแต่งกวนแม่เหล็กที่กำลังกวน
4. ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.2 นอร์มอล ไทเทรตกรดที่ต้องการจนได้ค่า pH เท่ากับ 7
5. คำนวณหาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกโดยคำนวณจากความสมมูลของปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟิวริก



ภาพประกอบที่ ก.3 การจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการไทเทรตกรด

ภาคผนวก ข

กราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำและสารละลายไดเอทิลอีเทอร์-เอทานอล

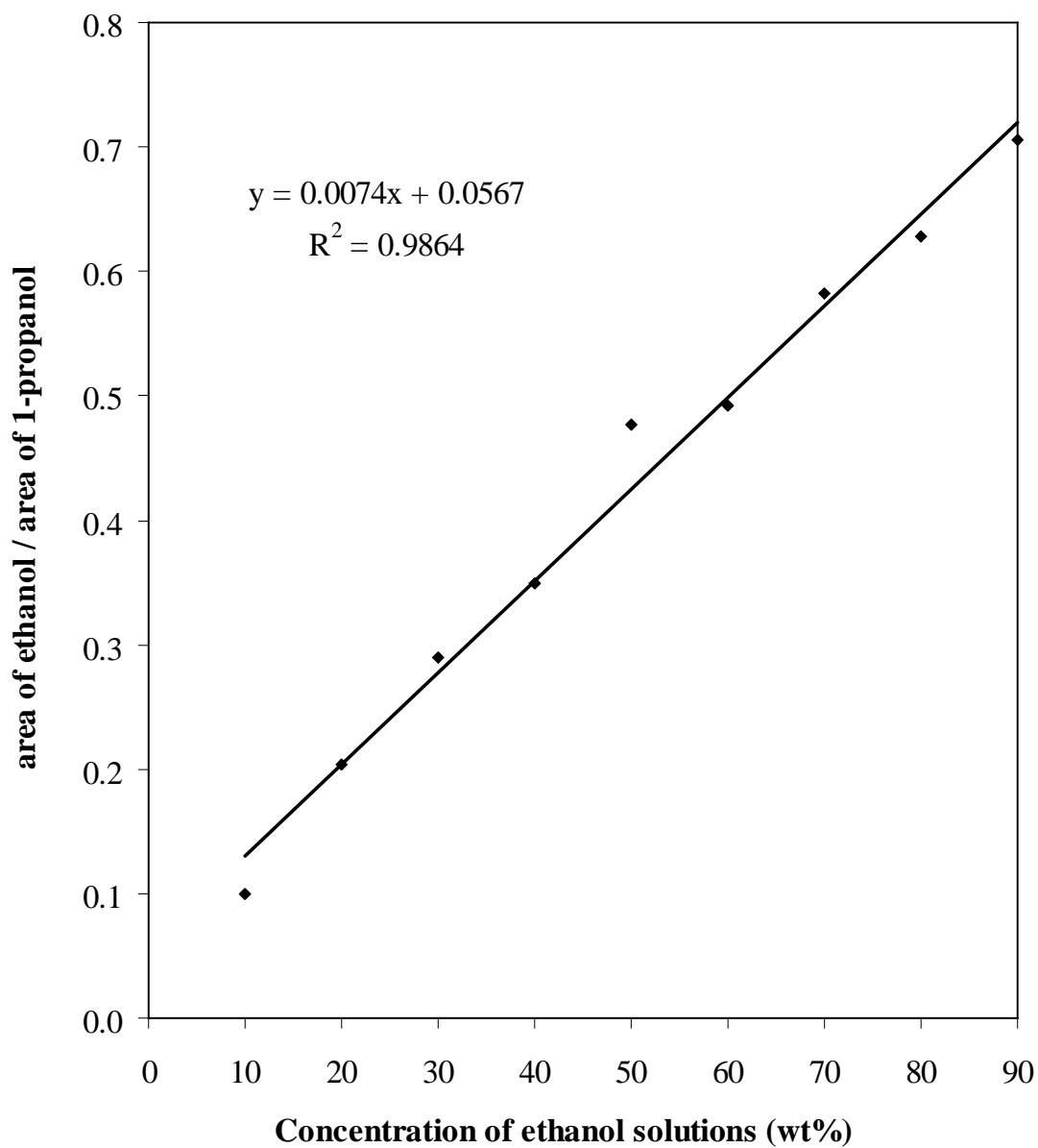
กราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำ โดยใช้ 1-โพรพานอล เป็นสารละลายมาตรฐานภายใน (internal standard) ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

สภาวะสำหรับเครื่อง GC

- Column 1, 2, 3, TCEP
- Oven : 40 °C
- Injector : 130 °C
- Detector : 130 °C

ตารางที่ ข.1 อัตราส่วนพื้นที่เอทานอลต่อ 1-โพรพานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายเอทานอล

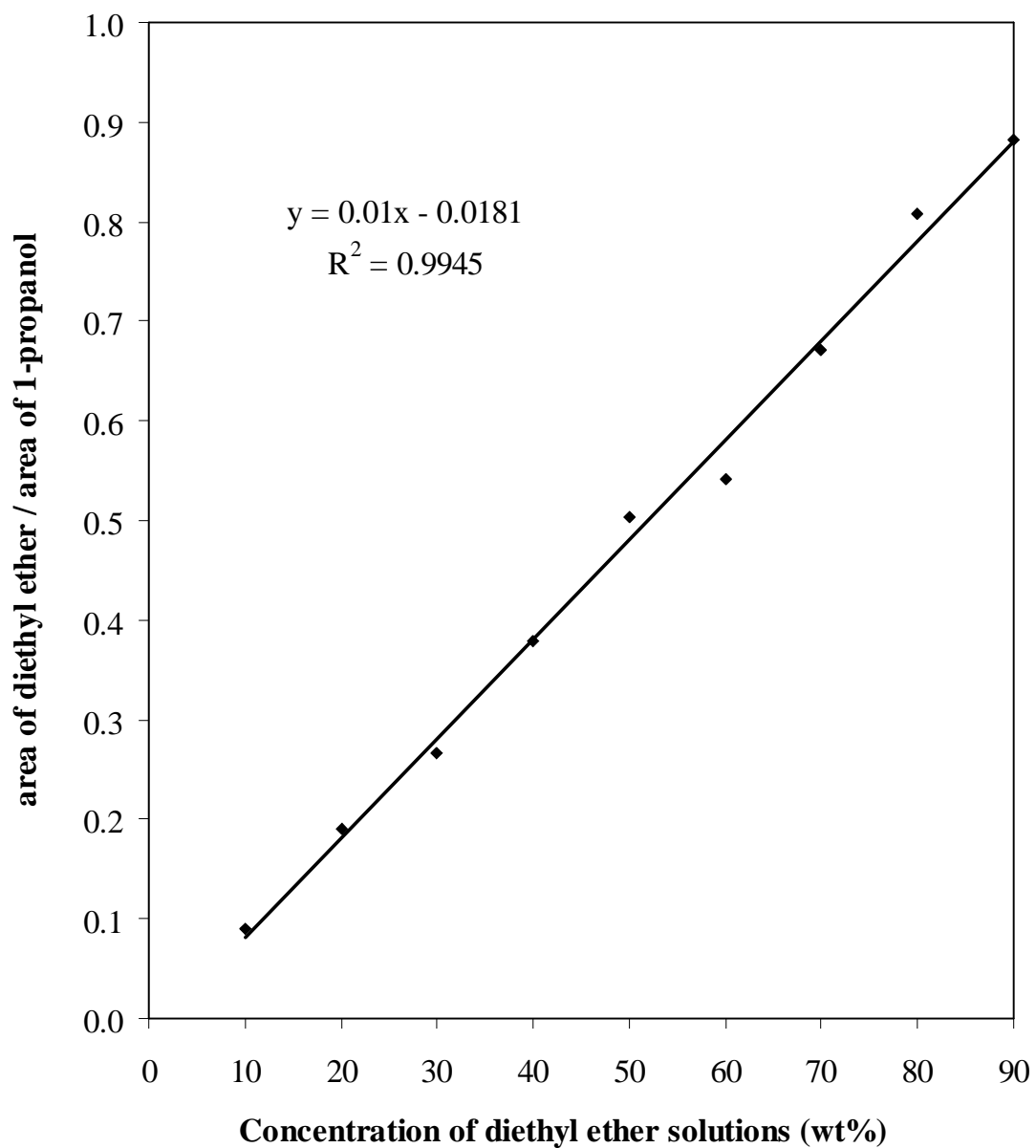
ร้อยละโดยน้ำหนักเอทานอล	อัตราพื้นที่เฉลี่ยเอทานอลต่อ1-โพรพานอล
10	0.0996
20	0.2032
30	0.2899
40	0.3500
50	0.4770
60	0.4928
70	0.5826
80	0.6276
90	0.7052



ภาพประกอบที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของเอทานอลต่อพื้นที่ใต้กราฟของ 1-โพรพานอล กับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล

ตารางที่ ข.2 อัตราส่วนพื้นที่ไคเอทิลอีเทอร์ต่อ 1-โพรพานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายไคเอทิลอีเทอร์

ร้อยละโดยน้ำหนักไคเอทิลอีเทอร์	อัตราพื้นที่เฉลี่ยของไคเอทิลอีเทอร์ต่อ1-โพรพานอล
10	0.0898
20	0.1900
30	0.2670
40	0.3793
50	0.5039
60	0.5413
70	0.6708
80	0.8082
90	0.8824



ภาพประกอบที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของ ไดเอทิลอีเทอร์ต่อพื้นที่ได้กราฟของ 1-โพรพานอล กับความเข้มข้นของสารละลายไดเอทิลอีเทอร์

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบ

1. ข้อมูลเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 130 °C

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.1292	0.3852	0.0141	0.0352	0.0799	15.53	0.05
	2	0.5144	0.1419	0.3725	0.0137	0.0375	0.0907	17.63	0.05
	3	0.5144	0.1312	0.3832	0.0133	0.0374	0.0805	15.65	0.05
15	1	0.5144	0.1869	0.3275	0.0318	0.0734	0.0817	15.88	0.12
	2	0.5144	0.172	0.3424	0.0332	0.0583	0.0805	15.65	0.13
	3	0.5144	0.1947	0.3197	0.0337	0.0683	0.0927	18.02	0.13

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
30	1	0.5144	0.1748	0.3396	0.0277	0.0573	0.0898	17.46	0.11
	2	0.5144	0.172	0.3424	0.0324	0.0459	0.0937	18.22	0.13
	3	0.5144	0.18	0.3344	0.0293	0.0489	0.1018	19.79	0.11
45	1	0.5144	0.1694	0.345	0.0226	0.0449	0.1019	19.81	0.09
	2	0.5144	0.1626	0.3518	0.0205	0.0464	0.0957	18.6	0.08
	3	0.5144	0.1639	0.3505	0.0217	0.0449	0.0973	18.92	0.08
60	1	0.5144	0.176	0.3384	0.0185	0.0436	0.1139	22.14	0.07
	2	0.5144	0.1641	0.3503	0.0207	0.0416	0.1018	19.79	0.08
	3	0.5144	0.166	0.3484	0.0229	0.0408	0.1023	19.89	0.09

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 140 °C

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.1649	0.3495	0.0228	0.0523	0.0898	17.46	0.09
	2	0.5144	0.1392	0.3752	0.0205	0.0362	0.0825	16.04	0.08
	3	0.5144	0.1414	0.373	0.0214	0.0420	0.078	15.16	0.08
15	1	0.5144	0.2019	0.3125	0.0476	0.0639	0.0905	17.59	0.18
	2	0.5144	0.2009	0.3135	0.0446	0.0760	0.0803	15.61	0.17
	3	0.5144	0.2108	0.3036	0.0464	0.0697	0.0947	18.41	0.18
30	1	0.5144	0.2057	0.3087	0.0408	0.0543	0.1106	21.5	0.16
	2	0.5144	0.1878	0.3266	0.0383	0.0497	0.0998	19.4	0.15
	3	0.5144	0.1915	0.3229	0.0397	0.0577	0.0941	18.29	0.15
45	1	0.5144	0.1979	0.3165	0.0321	0.0532	0.1126	21.89	0.12
	2	0.5144	0.1782	0.3362	0.0347	0.0383	0.1052	20.45	0.13
	3	0.5144	0.1852	0.3292	0.0346	0.0504	0.1002	19.48	0.13

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
60	1	0.5144	0.1736	0.3408	0.0294	0.0514	0.0928	18.04	0.11
	2	0.5144	0.1784	0.336	0.0311	0.0395	0.1078	20.96	0.12
	3	0.5144	0.1832	0.3312	0.0316	0.0399	0.1117	21.71	0.12

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 150 °C

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.1974	0.317	0.0431	0.0754	0.0789	15.34	0.17
	2	0.5144	0.2058	0.3086	0.0472	0.0730	0.0856	16.64	0.18
	3	0.5144	0.2061	0.3083	0.0498	0.0718	0.0845	16.43	0.19
15	1	0.5144	0.2724	0.242	0.0648	0.1056	0.1019	19.82	0.25
	2	0.5144	0.2624	0.252	0.0607	0.1163	0.0854	16.61	0.24
	3	0.5144	0.2596	0.2548	0.0593	0.1115	0.0889	17.28	0.23
30	1	0.5144	0.2564	0.258	0.0536	0.1072	0.0956	18.58	0.21
	2	0.5144	0.2669	0.2475	0.0618	0.0906	0.1145	22.26	0.24
	3	0.5144	0.263	0.2514	0.0568	0.0935	0.1127	21.91	0.22
45	1	0.5144	0.239	0.2754	0.0476	0.0884	0.103	20.02	0.19
	2	0.5144	0.2606	0.2538	0.0429	0.1074	0.1103	21.44	0.17
	3	0.5144	0.2453	0.2691	0.0463	0.0781	0.1209	23.5	0.18

ตารางที่ ๓.3 (ต่อ)

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
60	1	0.5144	0.2498	0.2646	0.0435	0.0944	0.1119	21.75	0.17
	2	0.5144	0.2303	0.2841	0.0418	0.0739	0.1146	22.28	0.16
	3	0.5144	0.2519	0.2625	0.0431	0.0909	0.1179	22.92	0.17

ตารางที่ ๓.4 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 160 °C

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.2501	0.2643	0.0613	0.0997	0.0891	17.32	0.24
	2	0.5144	0.2673	0.2471	0.0638	0.0974	0.1061	20.63	0.25
	3	0.5144	0.2491	0.2653	0.063	0.0974	0.0887	17.23	0.24
15	1	0.5144	0.3736	0.1408	0.1164	0.1435	0.1137	22.1	0.45
	2	0.5144	0.3459	0.1685	0.1136	0.1287	0.1036	20.14	0.44
	3	0.5144	0.3695	0.1449	0.1095	0.1475	0.1126	21.88	0.43
30	1	0.5144	0.3468	0.1676	0.1017	0.1453	0.0998	19.4	0.4
	2	0.5144	0.3595	0.1549	0.1104	0.1284	0.1207	23.46	0.43
	3	0.5144	0.3542	0.1602	0.1034	0.1301	0.1207	23.47	0.4
45	1	0.5144	0.3606	0.1538	0.0964	0.1364	0.1278	24.84	0.37
	2	0.5144	0.3384	0.176	0.0987	0.1194	0.1203	23.39	0.38
	3	0.5144	0.3482	0.1662	0.0979	0.1322	0.1181	22.96	0.38

ตารางที่ ๓.๔ (ต่อ)

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
60	1	0.5144	0.3607	0.1537	0.0924	0.1436	0.1247	24.24	0.36
	2	0.5144	0.3529	0.1615	0.0949	0.1272	0.1308	25.43	0.37
	3	0.5144	0.3446	0.1698	0.0942	0.1197	0.1306	25.39	0.37

ตารางที่ ๑.5 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 170 °C

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.2717	0.2427	0.0465	0.1175	0.1077	20.94	0.18
	2	0.5144	0.2675	0.2469	0.048	0.0965	0.123	23.91	0.19
	3	0.5144	0.2498	0.2646	0.0474	0.0956	0.1068	20.76	0.18
15	1	0.5144	0.3952	0.1192	0.0865	0.1884	0.1202	23.38	0.34
	2	0.5144	0.3965	0.1179	0.0828	0.1853	0.1284	24.96	0.32
	3	0.5144	0.3924	0.122	0.0828	0.1933	0.1162	22.6	0.32
30	1	0.5144	0.3706	0.1438	0.0757	0.1655	0.1294	25.16	0.29
	2	0.5144	0.388	0.1264	0.0736	0.1834	0.131	25.47	0.29
	3	0.5144	0.3874	0.127	0.0751	0.1812	0.1311	25.49	0.29
45	1	0.5144	0.3788	0.1356	0.0686	0.1745	0.1357	26.38	0.27
	2	0.5144	0.3657	0.1487	0.0705	0.1543	0.1409	27.39	0.27
	3	0.5144	0.385	0.1294	0.0682	0.1674	0.1494	29.04	0.27

ตารางที่ ๑.5 (ต่อ)

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
60	1	0.5144	0.3749	0.1395	0.0628	0.1725	0.1396	27.14	0.24
	2	0.5144	0.3606	0.1538	0.0646	0.1563	0.1397	27.16	0.25
	3	0.5144	0.3586	0.1558	0.0622	0.1521	0.1443	28.05	0.24

2. ข้อมูลเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 130 °C

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.2132	0.3012	0.0496	0.0752	0.0884	17.19	0.19
	2	0.5144	0.2253	0.2891	0.0428	0.0727	0.1098	21.35	0.17
	3	0.5144	0.2131	0.3013	0.0438	0.0711	0.0982	19.09	0.17
8	1	0.5144	0.2526	0.2618	0.048	0.0981	0.1065	20.7	0.19
	2	0.5144	0.2249	0.2895	0.0589	0.0874	0.0786	15.28	0.23
	3	0.5144	0.2362	0.2782	0.0404	0.0584	0.1374	26.71	0.16
12	1	0.5144	0.281	0.2334	0.0802	0.0953	0.1055	20.51	0.31
	2	0.5144	0.3257	0.1887	0.1032	0.1266	0.0959	18.64	0.4
	3	0.5144	0.3044	0.21	0.1058	0.1225	0.0761	14.79	0.41

ตารางที่ ๑.๖ (ต่อ)

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
15	1	0.5144	0.311	0.2034	0.0903	0.1176	0.1031	20.04	0.35
	2	0.5144	0.3243	0.1901	0.1132	0.1273	0.0838	16.29	0.44
	3	0.5144	0.3253	0.1891	0.1019	0.1220	0.1014	19.71	0.4
17	1	0.5144	0.2901	0.2243	0.0901	0.0921	0.1079	20.98	0.35
	2	0.5144	0.2772	0.2372	0.0972	0.1031	0.0769	14.95	0.38
	3	0.5144	0.3291	0.1853	0.0947	0.1378	0.0966	18.78	0.37
20	1	0.5144	0.2762	0.2382	0.0745	0.0844	0.1173	22.8	0.29
	2	0.5144	0.2723	0.2421	0.0802	0.1053	0.0868	16.87	0.31
	3	0.5144	0.2825	0.2319	0.0763	0.1031	0.1031	20.04	0.3

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 140 °C

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.2843	0.2301	0.068	0.0952	0.12109	23.54	0.26
	2	0.5144	0.2887	0.2257	0.0734	0.0962	0.1191	23.15	0.29
	3	0.5144	0.2586	0.2558	0.0647	0.0876	0.10631	20.67	0.25
8	1	0.5144	0.3301	0.1843	0.097	0.1209	0.1122	21.81	0.38
	2	0.5144	0.3096	0.2048	0.0884	0.0985	0.1227	23.85	0.34
	3	0.5144	0.3086	0.2058	0.0939	0.1085	0.1062	20.65	0.37
12	1	0.5144	0.3621	0.1523	0.1206	0.1324	0.1091	21.21	0.47
	2	0.5144	0.3747	0.1397	0.1276	0.1445	0.1026	19.95	0.5
	3	0.5144	0.3837	0.1307	0.1298	0.1398	0.1141	22.18	0.5
15	1	0.5144	0.3951	0.1193	0.1379	0.1421	0.1151	22.38	0.54
	2	0.5144	0.382	0.1324	0.1252	0.1532	0.1036	20.14	0.49
	3	0.5144	0.3896	0.1248	0.123	0.1415	0.1251	24.32	0.48

ตารางที่ ๓.๗ (ต่อ)

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
17	1	0.5144	0.354	0.1604	0.1115	0.1414	0.1011	19.65	0.43
	2	0.5144	0.3636	0.1508	0.1202	0.1304	0.113	21.97	0.47
	3	0.5144	0.3606	0.1538	0.1094	0.1212	0.13	25.27	0.43
20	1	0.5144	0.3362	0.1782	0.104	0.1164	0.1158	22.51	0.4
	2	0.5144	0.3471	0.1673	0.1084	0.1201	0.1186	23.06	0.42
	3	0.5144	0.3154	0.199	0.0924	0.1043	0.1187	23.08	0.36

ตารางที่ ๘.๘ ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 150 °C

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.3606	0.1538	0.09	0.1463	0.1243	24.16	0.35
	2	0.5144	0.3517	0.1627	0.0869	0.1287	0.1361	26.45	0.34
	3	0.5144	0.3365	0.1779	0.0982	0.1447	0.0936	18.2	0.38
8	1	0.5144	0.4069	0.1075	0.1376	0.1593	0.11	21.38	0.53
	2	0.5144	0.3857	0.1287	0.1294	0.1526	0.1037	20.16	0.5
	3	0.5144	0.4023	0.1121	0.1104	0.1609	0.131	25.47	0.43
12	1	0.5144	0.4573	0.0571	0.1642	0.1822	0.1109	21.56	0.64
	2	0.5144	0.4534	0.061	0.159	0.1904	0.104	20.22	0.62
	3	0.5144	0.4258	0.0886	0.1457	0.1653	0.1148	22.32	0.57
15	1	0.5144	0.4759	0.0385	0.1623	0.1901	0.1235	24.01	0.63
	2	0.5144	0.4642	0.0502	0.1572	0.1845	0.1225	23.81	0.61
	3	0.5144	0.4681	0.0463	0.1689	0.2053	0.0939	18.25	0.66

ตารางที่ ๘.๘ (ต่อ)

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
17	1	0.5144	0.4312	0.0832	0.1576	0.1634	0.1102	21.42	0.61
	2	0.5144	0.4467	0.0677	0.1435	0.1735	0.1297	25.21	0.56
	3	0.5144	0.4403	0.0741	0.1501	0.1755	0.1147	22.3	0.58
20	1	0.5144	0.4224	0.092	0.1431	0.1735	0.1058	20.57	0.56
	2	0.5144	0.4389	0.0755	0.1467	0.1828	0.1094	21.27	0.57
	3	0.5144	0.3894	0.125	0.1251	0.1453	0.119	23.13	0.49

ตารางที่ ๑.๑ ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 160 °C

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.3881	0.1263	0.1067	0.1570	0.1244	24.18	0.41
	2	0.5144	0.3692	0.1452	0.0945	0.1514	0.1233	23.97	0.37
	3	0.5144	0.3662	0.1482	0.1072	0.1314	0.1276	24.81	0.42
8	1	0.5144	0.429	0.0854	0.1321	0.1683	0.1286	25	0.51
	2	0.5144	0.451	0.0634	0.1402	0.1824	0.1284	24.96	0.55
	3	0.5144	0.4319	0.0825	0.1405	0.1713	0.1201	23.35	0.55
12	1	0.5144	0.4866	0.0278	0.1804	0.2085	0.0977	18.99	0.7
	2	0.5144	0.4702	0.0442	0.1635	0.1836	0.1231	23.93	0.64
	3	0.5144	0.4745	0.0399	0.1649	0.1821	0.1275	24.79	0.64
15	1	0.5144	0.4947	0.0197	0.1746	0.2168	0.1033	20.08	0.68
	2	0.5144	0.4917	0.0227	0.1813	0.1926	0.1178	22.9	0.7
	3	0.5144	0.5037	0.0107	0.1691	0.2080	0.1266	24.61	0.66

ตารางที่ ๑.๑ (ต่อ)

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
17	1	0.5144	0.4567	0.0577	0.1625	0.1734	0.1208	23.48	0.63
	2	0.5144	0.4915	0.0229	0.1637	0.1946	0.1332	25.89	0.64
	3	0.5144	0.4567	0.0577	0.1625	0.1819	0.1123	21.83	0.63
20	1	0.5144	0.4549	0.0595	0.1552	0.1644	0.1353	26.3	0.6
	2	0.5144	0.4415	0.0729	0.1379	0.1841	0.1195	23.23	0.54
	3	0.5144	0.4587	0.0557	0.1521	0.1858	0.1208	23.48	0.59

ตารางที่ ค.10 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยาต่างๆ และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 170 °C

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.3817	0.1327	0.0428	0.1635	0.1754	34.1	0.17
	2	0.5144	0.3981	0.1163	0.0684	0.1783	0.1514	29.43	0.27
	3	0.5144	0.3917	0.1227	0.0433	0.1838	0.1646	32	0.17
8	1	0.5144	0.439	0.0754	0.1046	0.2055	0.1289	25.06	0.41
	2	0.5144	0.4559	0.0585	0.1253	0.1839	0.1467	28.52	0.49
	3	0.5144	0.465	0.0494	0.1037	0.1905	0.1708	33.2	0.4
12	1	0.5144	0.4885	0.0259	0.1505	0.2196	0.1184	23.02	0.59
	2	0.5144	0.472	0.0424	0.132	0.1973	0.1427	27.74	0.51
	3	0.5144	0.4921	0.0223	0.1507	0.1939	0.1475	28.67	0.59
15	1	0.5144	0.4948	0.0196	0.1336	0.2285	0.1327	25.8	0.52
	2	0.5144	0.5048	0.0096	0.1594	0.2065	0.1389	27	0.62
	3	0.5144	0.5058	0.0086	0.1564	0.2154	0.134	26.05	0.61

ตารางที่ ค.10 (ต่อ)

Times (min)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
17	1	0.5144	0.4709	0.0435	0.1253	0.1853	0.1603	31.16	0.49
	2	0.5144	0.493	0.0214	0.149	0.2064	0.1376	26.75	0.58
	3	0.5144	0.4695	0.0449	0.1382	0.1897	0.1416	27.53	0.54
20	1	0.5144	0.472	0.0424	0.1356	0.1743	0.1621	31.51	0.53
	2	0.5144	0.4542	0.0602	0.119	0.1956	0.1396	27.14	0.46
	3	0.5144	0.4562	0.0582	0.1105	0.1884	0.1573	30.58	0.43

3. ข้อมูลเมื่อเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเพิ่มผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์

ตารางที่ ค.11 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 130 °C โดยเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ

Pure Acid (g)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
1	1	0.5144	0.211	0.3034	0.0441	0.0638	0.1031	20.04	0.17
	2	0.5144	0.2499	0.2645	0.0625	0.0846	0.1028	19.98	0.24
	3	0.5144	0.2213	0.2931	0.0515	0.0817	0.0881	17.13	0.2
2	1	0.5144	0.2597	0.2547	0.0601	0.1025	0.0971	18.88	0.23
	2	0.5144	0.2541	0.2603	0.0721	0.0942	0.0878	17.07	0.28
	3	0.5144	0.2536	0.2608	0.0697	0.0802	0.1037	20.16	0.27
3	1	0.5144	0.2597	0.2547	0.0754	0.0837	0.1006	19.56	0.29
	2	0.5144	0.3198	0.1946	0.0875	0.1238	0.1085	21.09	0.34
	3	0.5144	0.2929	0.2215	0.0798	0.1177	0.0954	18.55	0.31

ตารางที่ ค.11 (ต่อ)

Pure Acid (g)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
4	1	0.5144	0.3169	0.1975	0.09	0.1248	0.1021	19.85	0.35
	2	0.5144	0.2896	0.2248	0.0857	0.1058	0.0981	19.07	0.33
	3	0.5144	0.3136	0.2008	0.0982	0.1159	0.0995	19.34	0.38
5	1	0.5144	0.3348	0.1796	0.0977	0.1487	0.0884	17.19	0.38
	2	0.5144	0.3157	0.1987	0.1067	0.1263	0.0827	16.08	0.41
	3	0.5144	0.3497	0.1647	0.0998	0.1288	0.1211	23.54	0.39
6	1	0.5144	0.3419	0.1725	0.1103	0.1325	0.0991	19.27	0.43
	2	0.5144	0.356	0.1584	0.0924	0.1501	0.1135	22.06	0.36
	3	0.5144	0.3635	0.1509	0.1198	0.1446	0.0991	19.27	0.47

ตารางที่ ค.12 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 140 °C โดยเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ

Pure Acid (g)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
1	1	0.5144	0.2631	0.2513	0.0619	0.0961	0.1051	20.43	0.24
	2	0.5144	0.2354	0.279	0.0746	0.0792	0.0816	15.86	0.29
	3	0.5144	0.2488	0.2656	0.0657	0.0782	0.1049	20.39	0.26
2	1	0.5144	0.2966	0.2178	0.0924	0.1013	0.1029	20	0.36
	2	0.5144	0.2787	0.2357	0.0782	0.1115	0.089	17.3	0.3
	3	0.5144	0.2815	0.2329	0.0856	0.0911	0.1048	20.37	0.33
3	1	0.5144	0.3129	0.2015	0.1087	0.1107	0.0935	18.18	0.42
	2	0.5144	0.3282	0.1862	0.0974	0.1299	0.1009	19.62	0.38
	3	0.5144	0.3108	0.2036	0.0999	0.1050	0.1059	20.59	0.39
4	1	0.5144	0.3385	0.1759	0.1056	0.1468	0.0861	16.74	0.41
	2	0.5144	0.3586	0.1558	0.1272	0.1307	0.1007	19.58	0.49
	3	0.5144	0.3424	0.172	0.1101	0.1335	0.0988	19.21	0.43

ตารางที่ ค.12 (ต่อ)

Pure Acid (g)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.3596	0.1548	0.1194	0.1475	0.0927	18.02	0.46
	2	0.5144	0.374	0.1404	0.1298	0.1376	0.1066	20.72	0.5
	3	0.5144	0.3632	0.1512	0.1243	0.1334	0.1055	20.51	0.48
6	1	0.5144	0.3759	0.1385	0.1296	0.1396	0.1067	20.74	0.5
	2	0.5144	0.3845	0.1299	0.1263	0.1573	0.1009	19.62	0.49
	3	0.5144	0.3862	0.1282	0.1326	0.1513	0.1023	19.89	0.52

ตารางที่ ค.13 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 150 °C โดยเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ

Pure Acid (g)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
1	1	0.5144	0.2798	0.2346	0.0844	0.0899	0.1055	20.51	0.33
	2	0.5144	0.2597	0.2547	0.0757	0.0905	0.0935	18.18	0.29
	3	0.5144	0.2699	0.2445	0.0781	0.1025	0.0893	17.36	0.3
2	1	0.5144	0.3269	0.1875	0.0978	0.1358	0.0933	18.14	0.38
	2	0.5144	0.3204	0.194	0.1075	0.1189	0.094	18.27	0.42
	3	0.5144	0.3091	0.2053	0.0989	0.1167	0.0935	18.18	0.38
3	1	0.5144	0.3918	0.1226	0.1297	0.1589	0.1032	20.06	0.5
	2	0.5144	0.3533	0.1611	0.1245	0.1357	0.0931	18.1	0.48
	3	0.5144	0.3613	0.1531	0.1175	0.1329	0.1109	21.56	0.46
4	1	0.5144	0.4057	0.1087	0.1474	0.1508	0.1075	20.9	0.57
	2	0.5144	0.3937	0.1207	0.1387	0.1654	0.0896	17.42	0.54
	3	0.5144	0.4	0.1144	0.1444	0.1476	0.108	21	0.56

ตารางที่ ค.13 (ต่อ)

Pure Acid (g)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.4497	0.0647	0.1559	0.1954	0.0984	19.13	0.61
	2	0.5144	0.4288	0.0856	0.1637	0.1724	0.0927	18.02	0.64
	3	0.5144	0.4505	0.0639	0.1589	0.1728	0.1188	23.09	0.62
6	1	0.5144	0.4759	0.0385	0.1704	0.1873	0.1182	22.98	0.66
	2	0.5144	0.464	0.0504	0.1614	0.2036	0.099	19.25	0.63
	3	0.5144	0.4704	0.044	0.1656	0.2037	0.1011	19.65	0.64

ตารางที่ ค.14 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 160 °C โดยเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ

Pure Acid (g)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
1	1	0.5144	0.415	0.0994	0.1306	0.1645	0.1199	23.31	0.51
	2	0.5144	0.4039	0.1105	0.1309	0.1526	0.1204	23.41	0.51
	3	0.5144	0.3784	0.136	0.1204	0.1530	0.105	20.41	0.47
2	1	0.5144	0.446	0.0684	0.1504	0.1742	0.1214	23.6	0.58
	2	0.5144	0.4319	0.0825	0.1425	0.1637	0.1257	24.44	0.55
	3	0.5144	0.4271	0.0873	0.146	0.1667	0.1144	22.24	0.57
3	1	0.5144	0.4838	0.0306	0.1803	0.1860	0.1175	22.84	0.7
	2	0.5144	0.4731	0.0413	0.1731	0.1784	0.1216	23.64	0.67
	3	0.5144	0.466	0.0484	0.1611	0.1681	0.1368	26.59	0.63
4	1	0.5144	0.4989	0.0155	0.1837	0.2067	0.1085	21.09	0.71
	2	0.5144	0.4948	0.0196	0.1795	0.1835	0.1318	25.62	0.7
	3	0.5144	0.4976	0.0168	0.1786	0.1813	0.1377	26.77	0.69

ตารางที่ ค.14 (ต่อ)

Pure Acid (g)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.4989	0.0155	0.1794	0.1965	0.123	23.91	0.7
	2	0.5144	0.4938	0.0206	0.182	0.1894	0.1224	23.79	0.71
	3	0.5144	0.4959	0.0185	0.1711	0.1826	0.1422	27.64	0.67
6	1	0.5144	0.4919	0.0225	0.1782	0.1943	0.1194	23.21	0.69
	2	0.5144	0.49905	0.01535	0.1821	0.1862	0.13075	25.42	0.71
	3	0.5144	0.49465	0.0198	0.1827	0.1901	0.12185	23.69	0.71

ตารางที่ ค.15 ผลการทดลองขององค์ประกอบต่างๆ เมื่อทดลองที่ระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที และอุณหภูมิสำหรับทำปฏิกิริยา 170 °C โดยเติมกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ที่ปริมาณต่างๆ

Pure Acid (g)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
1	1	0.5144	0.3571	0.1573	0.0883	0.1035	0.1653	32.13	0.34
	2	0.5144	0.3457	0.1687	0.0957	0.1254	0.1246	24.22	0.37
	3	0.5144	0.3628	0.1516	0.0905	0.1212	0.1511	29.37	0.35
2	1	0.5144	0.3801	0.1343	0.1016	0.1367	0.1418	27.57	0.4
	2	0.5144	0.3641	0.1503	0.1134	0.1173	0.1334	25.93	0.44
	3	0.5144	0.373	0.1414	0.1045	0.1186	0.1499	29.14	0.41
3	1	0.5144	0.3857	0.1287	0.1155	0.1473	0.1229	23.89	0.45
	2	0.5144	0.399	0.1154	0.1124	0.1249	0.1617	31.43	0.44
	3	0.5144	0.3862	0.1282	0.1234	0.1247	0.1381	26.85	0.48
4	1	0.5144	0.4498	0.0646	0.1486	0.1534	0.1478	28.73	0.58
	2	0.5144	0.4379	0.0765	0.1455	0.1507	0.1417	27.55	0.57
	3	0.5144	0.3948	0.1196	0.1247	0.1381	0.132	25.66	0.48

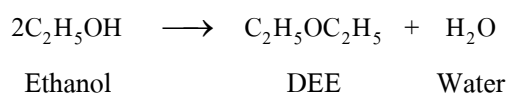
ตารางที่ ค.15 (ต่อ)

Pure Acid (g)	Exp. NO.	Ethanol (Initial) (mole)	Ethanol (Used) (mole)	Ethanol (Remain) (mole)	DEE (mole)	H ₂ O (mole)	Total Loss (mole)	Total Loss (% mole)	DEE Yield
5	1	0.5144	0.4606	0.0538	0.1503	0.1534	0.1569	30.5	0.58
	2	0.5144	0.4547	0.0597	0.1447	0.1793	0.1307	25.41	0.56
	3	0.5144	0.4746	0.0398	0.1496	0.1674	0.1576	30.64	0.58
6	1	0.5144	0.5028	0.0116	0.1472	0.1943	0.1613	31.36	0.57
	2	0.5144	0.4991	0.0153	0.1584	0.1862	0.1545	30.03	0.62
	3	0.5144	0.5017	0.0127	0.1507	0.1901	0.1609	31.28	0.59

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดเอทิลอีเทอร์



จะเห็นว่าจำนวนอะตอมคาร์บอนในองค์ประกอบของ DEE = 4 โมล C / 1 โมล DEE

จากองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย GC ของข้อมูลตาราง ก1.1 ในการทดลองครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผลเป็นดังนี้

ตารางที่ ง.1 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากการทดลองครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Ethanol Initial Mole (mole)	Product Composition (mol)		
	DEE	Ethanol	Water
0.5144	0.0337	0.3197	0.0683

1. การคำนวณค่าผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ ($\text{Yield}_{\text{DEE}}$)

ผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์คือ อัตราส่วนระหว่างโมลไดเอทิลอีเทอร์ที่สามารถผลิตได้จริงต่อโมลไดเอทิลอีเทอร์ที่สามารถผลิตได้ตามทฤษฎี หรือจากสมการการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ไดเอทิลอีเทอร์สามารถคำนวณหาผลได้ของไดเอทิลอีเทอร์ได้จากสูตร

$$\begin{aligned} \text{Yield}_{\text{DEE}} &= \frac{\text{จำนวนโมลไดเอทิลอีเทอร์} \times 2}{\text{จำนวนโมลเอทานอลเริ่มต้น}} \\ &= \frac{(0.0337 \times 2)}{(0.5144)} = 0.13 \end{aligned}$$

2. การคำนวณหาสมมูลมวลสารของปฏิกิริยาการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ (สมมูลโมล)

จากข้อมูลการทดลองในตาราง ค.1 สำหรับการทดลองครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส และระยะเวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

$$\begin{aligned} \text{โมลเอทานอลเริ่มต้น} &= (30 \text{ มล.})(0.79 \text{ กรัม / มล.}) / (46.07 \text{ กรัม / โมล}) \\ &= 0.5144 \text{ โมลเอทานอล} \end{aligned}$$

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์พบว่าประกอบด้วย

$$\begin{aligned} \text{ไดเอทิลอีเทอร์} &= 0.0337 \text{ โมล} \\ \text{เอทานอล} &= 0.3197 \text{ โมล} \\ \text{น้ำ} &= 0.0683 \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{โมลเอทานอลที่ถูกใช้หลังการทำปฏิกิริยา} &= \text{โมลเอทานอลเริ่มต้น} - \text{โมลเอทานอลในผลิตภัณฑ์} \\ &= 0.5144 - 0.3197 \\ &= 0.1947 \text{ โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{โมลทั้งหมดที่สูญหายไปจากระบบ} &= (\text{โมลเอทานอลเริ่มต้น} - \text{โมลเอทานอลในผลิตภัณฑ์}) \\ &\quad - \text{โมล DEE ในในผลิตภัณฑ์} - \text{โมลน้ำในผลิตภัณฑ์} \\ &= 0.5144 - 0.3197 - 0.0337 - 0.0683 = 0.0927 \end{aligned}$$

3. การคำนวณความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไดเอทิลอีเทอร์

เมื่อสิ้นสุดการผลิตไดเอทิลอีเทอร์จะมีกรดซัลฟิวริกที่ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเหลืออยู่ภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะนำกรดที่เหลือวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก โดยใช้วิธี potentiometry และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารไทเทรต ซึ่งตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ที่ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และระยะเวลา

สำหรับทำปฏิกิริยา 15 นาที โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ทำได้ดังนี้

1. ความหนาแน่นของกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการผลิตไดเอทิลอีเทอร์ (วัดด้วยพิคโนมิเตอร์) คือ 0.883 กรัม / มล.
2. ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตคือ 0.2 โมล/ลิตร
3. จากการไทเทรตพบว่าใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตคือ 22.3 มล. และเมื่อแปลงหน่วยให้อยู่ในรูปของโมลคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้} &= (0.2 \text{ โมล/ลิตร}) (22.3 \text{ มล.}) / (1000 \text{ มล./1 ลิตร}) \\ &= 0.0045 \text{ โมล}\end{aligned}$$

4. จากที่กรดซัลฟิวริก 1 โมล ทำปฏิกิริยาและสมดุลพอดีกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมล จึงทำให้ทราบว่ามีการซัลฟิวริกผสมอยู่ในสารที่เหลืออยู่ในถังปฏิกรณ์มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณกรดซัลฟิวริก} &= 0.0045 \text{ โมล} / 2 \\ &= 0.00225 \text{ โมลซัลฟิวริก}\end{aligned}$$

5. ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกแต่ละครั้งจะใช้ปริมาณกรดที่เหลือในถังปฏิกรณ์ครั้งละ 20 มล. ดังนั้นจึงให้ทราบความเข้มข้นที่แท้จริงของกรดซัลฟิวริกได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{มีกรดซัลฟิวริกมีความเข้มข้น} &= 0.00225 \text{ โมลซัลฟิวริก} / 20 \text{ มล.} \\ &= (0.00225 \text{ โมลซัลฟิวริก} / 20 \text{ มล.}) (98 \text{ กรัมซัลฟิวริก} / \text{โมลซัลฟิวริก}) / (0.883 \text{ กรัม/มล.}) \\ &= 0.01237 \text{ กรัมซัลฟิวริก} / \text{กรัมทั้งหมด}\end{aligned}$$

หรือคิดเป็น

$$\begin{aligned}&= (0.01237 \text{ กรัมซัลฟิวริก} / \text{กรัมทั้งหมด}) (100) \\ &= 1.24 \text{ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก}\end{aligned}$$