

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### 1. ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มมีต้นกำเนิดอยู่ทางตะวันตกและตอนกลางของทวีปอเมริกา ต่อมาได้แพร่เข้าไปในทวีปอเมริกาใต้โดยสันนิษฐานว่าเกิดขึ้นในยุคล่าอาณานิคม ปาล์มจัดอยู่ในตระกูล Palme หรือ Palmaceae เป็นตระกูลย่อยเดียวกันกับมะพร้าว คือ Eliaes ปาล์มแบ่งออกเป็น 3 สายพันธุ์ คือ Eliaes guineensis, Eliaes oleifera และ Eliaes odora สำหรับสองสายพันธุ์หลังไม่นิยมปลูก เนื่องจากเติบโตช้าและให้ผลเล็ก พันธุ์ที่นิยมปลูกเชิงเศรษฐกิจในปัจจุบัน คือ Eliaes guineensis

ปาล์มน้ำมันออกผลเป็นทลาย ส่วนของผลมีเปลือกชั้นนอก (Exocarp) และชั้นกลาง (Mesocarp) ที่ประกอบด้วย เนื้อเยื่อไขมัน ซึ่งเมื่อคั้นออกมาได้ผลผลิต เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil; CPO) โดยมีไขมันรวมประมาณ 73.2% โดยน้ำหนัก สำหรับชั้นในของผล (Endocarp) จะหุ้มด้วยกะลา ภายในประกอบด้วยเนื้อซึ่งสามารถนำมาผลิตน้ำมัน โดยมีคุณสมบัติแตกต่างจากน้ำมันที่ได้จากเปลือกนอก เมื่อคั้นออกมา เรียกผลผลิตส่วนนี้ว่า น้ำมันเมล็ดใน (Kernel oil)

##### 1.1 ความสำคัญทางเศรษฐกิจของปาล์มน้ำมัน

น้ำมันปาล์มในประเทศไทยมีการผลิตสูงเป็นอันดับ 4 ของโลก รองจากมาเลเซีย อินโดนีเซีย และไนจีเรีย ในปี 2003 ประเทศไทยสามารถผลิตน้ำมันปาล์มได้ 600,000 ตัน และคาดว่าในปี 2004 สามารถผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 655,000 ตัน เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เมื่อเทียบกับน้ำมันที่ใช้เพื่อการบริโภคอื่นๆ ดังนั้นมากกว่า 80% ของผลผลิต จึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น น้ำมันทอด น้ำมันปรุงอาหาร มาการีน ไอศกรีม ครีมเทียม เนยเทียม ขนมหั้ว ฯลฯ

เนื่องจากแหล่งพลังงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันดิบที่ได้จากฟอสซิลเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติของโลกที่มีปริมาณจำกัด จึงมีความพยายามค้นหาแหล่งพลังงานอื่นที่สามารถสร้างหรือเพาะปลูกขึ้นมาทดแทน ในการนี้น้ำมันปาล์มนับว่ามีศักยภาพสูงยิ่งที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุ

ดิบ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าด้วยเทคโนโลยีปัจจุบันสามารถนำน้ำมันปาล์มมาผลิตเมทิลเอสเทอร์ในระดับอุตสาหกรรม

นอกจากนี้ น้ำมันปาล์มยังสามารถนำไปเปลี่ยนเป็นอนุพันธ์อื่นอีกหลายชนิด เช่น กรดไขมันซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสบู่ Fatty acid และ Fatty alcohol ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผงซักฟอก Fatty acid amides ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสารลดแรงตึงผิวสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ การผลิตเยื่อกระดาษและไม้อัด Fatty amines ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต โพลีเมอร์ น้ำมันหล่อลื่น กลิเซอรอล ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอาง สำหรับเศษเหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ เช่น ทะลาย ใบ และกะลา สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบในระดับอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ ดำเนินการโดยนำผลปาล์มทั้งทะลายเข้าสู่หม้ออบความร้อนที่อุณหภูมิ 130 °C ความดัน 45 psi เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นจึงบีบน้ำมันออกมา

## 1.2 ส่วนประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil : CPO)

น้ำมันปาล์มดิบประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์มากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก กรดไขมันร้อยละ 3-5 โดยน้ำหนัก และกลีเซอไรด์ชนิดอื่น กรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบส่วนใหญ่ คือ กรด Palmitic และ กรด Oleic โดยตารางที่ 1 แสดงสูตร โครงสร้าง ชื่อทางวิทยาศาสตร์ของกรดไขมันทั่วไป ตารางที่ 2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช ซึ่งแสดงผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน และตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช ได้แก่ ค่าความหนืด ความหนาแน่น ค่าจุดขุ่น ค่าจุดไหลเท ค่าจุดวาบไฟ และค่าความของน้ำมันพืชทั่วไป

ตารางที่ 1 สูตรโครงสร้างของกรดไขมัน

Fatty acid	Systematic name	Structure <sup>a</sup>	Formula
Lauric	Dodecanoic	12:0	$C_{12}H_{24}O_2$
Myristic	Tetradecanoic	14:0	$C_{14}H_{28}O_2$
Palmitic	Hexadecanoic	16:0	$C_{16}H_{32}O_2$
Stearic	Octadecanoic	18:0	$C_{18}H_{36}O_2$
Arachidic	Eicosanoic	20:0	$C_{20}H_{40}O_2$
Behenic	Docosanoic	22:0	$C_{22}H_{44}O_2$
Lignoceric	Tetracosanoic	24:0	$C_{24}H_{48}O_2$
Oleic	cis-9-Octadecanoic	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoleic	cis-9,cis-12-Octadecadionoic	18:2	$C_{18}H_{32}O_2$
Linolenic	cis-9,cis-12,cis-15-Octadecatronic	18:3	$C_{18}H_{30}O_2$
Erucic	cis-13-docosenoic	22:1	$C_{22}H_{42}O_2$

<sup>a</sup> x:y x แทนด้วยจำนวนคาร์บอนในกรดไขมัน

y แทนด้วยจำนวนพันธะคู่ในกรดไขมัน

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน

ชนิดกรดไขมัน น้ำมันพืช	14:0	16:0	18:0	20:0	22:0	24:0	18:1	22:1	18:2	18:3
	ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน									
น้ำมันปาล์ม	0.2	45	4.5	0	0	0	40.2	0	10.1	0
น้ำมันข้าวโพด	0	12	2	0	0	0	45	0	41	0
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	0	28	1	0	0	0	13	0	58	0
น้ำมันลินซีด	0	5	2	0	0	0	20	0	18	55
น้ำมันถั่วลิสง	0	11	2	1	2	1	48	0	32	1
น้ำมันเมล็ดเรพ	0	3	1	0	0	0	64	0	22	8
น้ำมันเมล็ดทานตะวัน	0	6	3	0	0	0	17	0	74	0
น้ำมันงา	0	9	2	0	0	0	53	0	39	0
น้ำมันถั่วเหลือง	0	12	3	0	0	0	23	0	55	6

ที่มา Barnwal และ Sharma (2004)

จากตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช พบว่า องค์ประกอบหลักของน้ำมันปาล์ม คือ Palmitic acid ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก และ Oleic acid ร้อยละ 40.2 โดยน้ำหนักองค์ประกอบหลักของน้ำมันข้าวโพด คือ Oleic acid ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก และ Linoleic acid ร้อยละ 41 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบหลักของน้ำมันเมล็ดฝ้าย คือ Linoleic acid ร้อยละ 58 โดยน้ำหนัก Palmitic acid ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก และ Oleic acid ร้อยละ 13 โดยองค์ประกอบของกรดไขมันที่แตกต่างกันทำให้น้ำมันพืชแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงแตกต่างกัน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช

น้ำมันพืช	kinematic Viscosity at 38 °C (mm <sup>2</sup> /s)	Cetane no. (°C)	Heati ng value (MJ/k g)	Clou d point (°C)	Pour point (°C)	Flash point (°C)	Density (kg/l)
น้ำมันปาล์ม	39.6	42.0	-	31.0	-	267	0.9180
น้ำมันข้าวโพด	34.9	37.6	39.5	-1.1	-40.0	277	0.9095
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	33.5	41.8	39.5	1.7	-15.0	234	0.9148
น้ำมันลินซีด	27.2	34.6	39.3	1.7	-15.0	241	0.9236
น้ำมันถั่วลิสง	39.6	41.8	39.8	12.8	-6.7	271	0.9026
น้ำมันเมล็ดเรพ	37.0	37.6	39.7	-3.9	-31.7	246	0.9115
น้ำมันเมล็ดทานตะวัน	33.9	37.1	39.6	7.2	-15.0	274	0.9161
น้ำมันงา	35.5	40.2	39.3	-3.9	-9.4	260	0.9144
น้ำมันถั่วเหลือง	32.6	37.9	39.6	-3.9	-12.2	254	0.9138

ที่มา Barnwal และ Sharma (2004)

จากตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติของน้ำมันพืช โดยน้ำมันพืชแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงแตกต่างกันไป เป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของกรดไขมันของน้ำมันพืชแต่ละชนิด

## 2. ไบโอดีเซล (Biodiesel)

ไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ คือ น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ซึ่งแปรรูปเป็น อัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งได้จากกระบวนการเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์ระหว่างสารตั้งต้น ไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้นๆ

เมทิลเอสเทอร์โดยทั่วไป มีองค์ประกอบที่มีลักษณะโมเลกุลใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลปิโตรเลียมซึ่งสามารถผลิต และพัฒนาได้จากไขมันหรือน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์ โดยส่วนใหญ่แล้วจะมุ่งไปที่เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์โดยใช้ไตรกลีเซอไรด์ในไขมันและน้ำมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์กับเมทานอลมากที่สุด

## 2.1 วิธีการนำน้ำมันพืชมาใช้แทนน้ำมันดีเซล

### 2.1.1 การใช้น้ำมันพืชเสมือนเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลโดยตรง

การใช้ไขมันและน้ำมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์เป็นแหล่งทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลโดยตรงมักจะใช้น้ำมันพืชเท่านั้น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สัมพันธ์กับการเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่ดีและเหมาะสมกว่าไขมันสัตว์ มีประสิทธิภาพการใช้งานทดแทนสูงกว่า นอกจากนี้แล้วไขมันสัตว์มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าและมีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล เพราะจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการเตรียมไขมันสัตว์สำหรับการใช้งานโดยตรง

### 2.1.2 การเจือจางหรือการผสมตามส่วน

การเจือจางหรือการผสมตามส่วนของน้ำมันพืชสามารถนำมาละลายเข้ากันได้อย่างบริบูรณ์ในวัตถุเหลวบางชนิดเท่านั้น เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน และแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้นๆ ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเจือจางของน้ำมันเมล็ดทานตะวัน โดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเป็นตัวทำละลายในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยปริมาตร และผ่านการทดสอบโดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้สำเร็จ แต่สารผสมนี้ไม่เหมาะในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลประเภท Direct Injection ในช่วงระยะเวลายาวเพราะว่าเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเกิดโค้กที่ปลายกระบอกของระบบหัวฉีดอย่างรุนแรง

### 2.1.3 วิธีไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

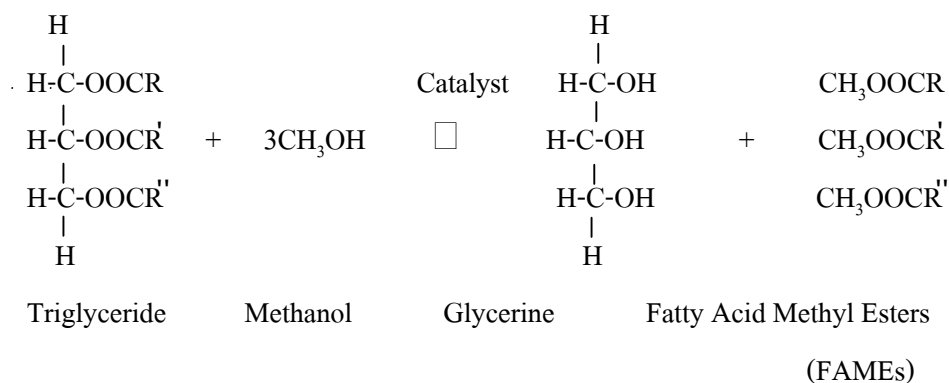
ไมโครอิมัลชันเป็นกระบวนการที่ทำให้ของเหลวมีสารแขวนลอยกระจายอยู่ เช่น การผสมน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ ซึ่งจะมีสภาพเป็นอิมัลชันและเมื่อนำไปใช้สามารถคิดให้เป็นฝอยได้

### 2.1.4 วิธีการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking)

วิธีการแตกตัวด้วยความร้อนเป็นการให้ความร้อนกับน้ำมันพืชในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อให้ไขมันแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมหรือใกล้เคียงสำหรับนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและโครงสร้างเนื่องจากความร้อนของไตรกลีเซอไรด์จะให้สารประกอบเคมีอินทรีย์หลายประเภท เช่น อัลเคน อัลคีน อัลคาไดอิน แอโรเมติก และกรดคาร์บอกซิลิก เป็นต้น

### 2.1.5 วิธีการเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์ (Transesterification)

กระบวนการเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์บางครั้งนิยม เรียกว่า แอลกอฮอล์ไลซิส หมายถึง ปฏิกิริยาเคมีระหว่างไตรกลีเซอไรด์ไขมันหรือน้ำมันกับแอลกอฮอล์เพื่อก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์อัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและกลีเซอริน กระบวนการนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางเชื้อเพลิงที่พัฒนาจากไตรกลีเซอไรด์ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะลดค่าความหนืดของเชื้อเพลิงลงในกระบวนการเคลื่อนย้ายเอสเทอร์ส่วนใหญ่จะใช้แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้นในการทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะเมทานอลซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่มีข้อได้เปรียบในเชิงพาณิชย์สูง เช่น มีราคาถูก และมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสม คือ เป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้นที่สุดและเป็นของเหลวมีจุดเดือดสูงซึ่งช่วยเพิ่มอัตราในการทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้มากที่สุด



ภาพประกอบที่ 1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

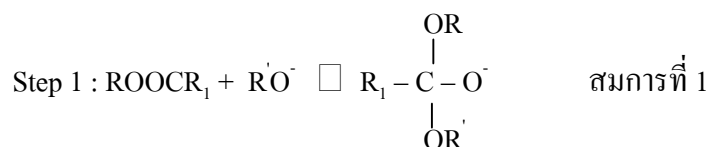
ที่มา : Srivastava A. and Prasad R. (1999)

โดยทางทฤษฎีแล้วปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric) ของปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์ที่บริบูรณ์ต้องประกอบด้วยอัตราส่วนเชิงโมลของสารตั้งต้น 3 ต่อ 1 ระหว่างแอลกอฮอล์ต่อกลีเซอไรด์ แต่ในทางปฏิบัติพบว่า ปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์สามารถผันกลับได้ ดังนั้นถ้า

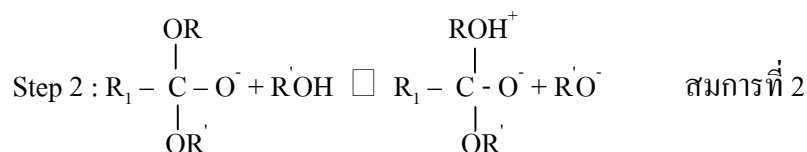
ต้องการผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันหรือน้ำมันดีเซลชีวภาพมากขึ้น ต้องเพิ่มจำนวนโมล แอลกอฮอล์มากขึ้นด้วยเพื่อขับเคลื่อนให้สภาวะสมดุลเคลื่อนเข้าใกล้ผลิตภัณฑ์มากที่สุด ปฏิริยาการเคลื่อนย้ายเอสเทอร์สามารถเพิ่มอัตราเร็วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาหลายชนิด เช่น เบส กรด หรือเอนไซม์ (วิภาวดี ปริพัฒน์ไพโรจน์, 2546)

## 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ โดยเปลี่ยนจาก ไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นไดกลีเซอไรด์ จากนั้นเปลี่ยนเป็นโมโนกลีเซอไรด์ และสุดท้ายก็คือกลีเซอริน ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน เมื่อใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ก็คือ

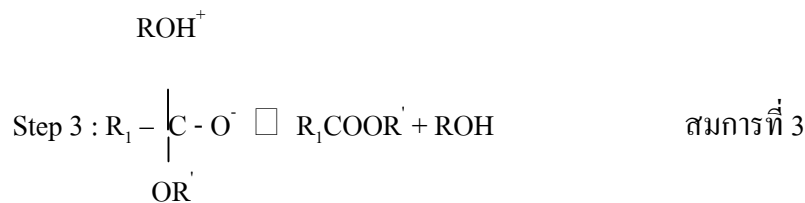


หมู่คาร์บอนิลอะตอมจากโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอนไอออนของแอลกอฮอล์เกิดเป็น Tetrahedral intermediate



Tetrahedral intermediate ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดการได้คืนแอนไอออนของแอลกอฮอล์ (Regenerate anion alcohol) และ Tetrahedral intermediate ตัวใหม่





Tetrahedral intermediate จากขั้นตอนที่ 2 แตกตัวเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับ ไตรกลีเซอไรด์

$\text{R} - \text{OH} = \text{Diglyceride}$

$\text{R}_1 = \text{Long Chain Alkyl Group}$

$\text{R} = \text{Short Alkyl Group}$

(Ma and Hanna, 1999)

## 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

### 2.3.1 ความชื้น (Moisture) และกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid)

วัตถุประสงค์เริ่มต้นใช้ไตรกลีเซอไรด์ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ซึ่งมีค่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 1% หากปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า 1% จำเป็นต้องกำจัดกรดไขมันอิสระออกโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาให้เป็นกลาง แต่ถ้าไม่กำจัดกรดไขมันอิสระออกจะทำให้เกิดสบู่ขึ้นซึ่งมีผลดังนี้

- มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา
- เพิ่มค่าความหนืดและเกิดเจล
- การแยกกลีเซอรินยากมากขึ้น

Ma และ Hanna (1999) ศึกษาปัจจัยของกรดไขมันอิสระและน้ำจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันด้วย Beef tallow พบว่า ปริมาณน้ำใน Beef tallow ต่ำกว่า 0.06% w/w และปริมาณกรดไขมันอิสระควรต่ำกว่า 0.5% w/w เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาดีที่สุด

### 2.3.2 สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเมทานอล (molar ratio)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจะเป็นไปตามปริมาณสัมพันธ์โดยใช้แอลกอฮอล์ 3 โมล ทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล เพื่อให้เกิดผลได้ คือ เอสเทอร์กรดไขมัน 3 โมล และกลี

เซอร์อิน 1 โมล สัดส่วนเชิงโมลขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ เช่น ในกรณีถ้าใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ต้องใช้สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันถั่วเหลืองและบิวทานอล เท่ากับ 1:30 แต่ในกรณีใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันถั่วเหลืองและบิวทานอล เท่ากับ 1:6 ผลได้ของ เอสเตอร์ไม่แตกต่างกัน (S. Vilas Ghadge และคณะ (2005))

S. Vilas Ghadge และคณะ (2005) พบว่า สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 เกิดการเปลี่ยนเป็นเอสเตอร์ดีที่สุดในปริมาณกรดไขมันในน้ำมันที่มากขึ้นจำเป็นต้องเพิ่มสัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:15 และใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ประกอบด้วย

ก. ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมเอไมด์ และโพแทสเซียมไฮไดรด์

ข. ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และกรดไฮโดรคลอริก

ค. ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์ เช่น เอนไซม์ไลเปส

ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทด่างในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน จะเกิดเร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด แต่น้ำมันมีปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณน้ำที่สูงตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดจะเหมาะสมกว่า (Ma และ Hanna, 1999)

### 2.3.4 เวลาการทำปฏิกิริยา (Reaction time)

อัตราการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นกับเวลาทำปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาทรานส์ เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดถั่วลิสง เมล็ดฝ้าย เมล็ดดอกทานตะวัน และเมล็ดถั่วเหลืองโดยใช้สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 1% ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่า น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ได้ % Yield เท่ากับ 80 หลังจาก 1 นาที แต่หลังจาก 1 ชั่วโมง การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันทั้ง 4 ชนิด เหมือนกันซึ่งมีค่า % Yield เท่ากับ 93 – 98 Galen J และคณะ (2003)

Galen J และคณะ (2003) ศึกษาปัจจัยเวลาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน จาก Beef tallow ด้วยเมทานอล พบว่า ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้ามากในช่วงนาทีแรกเพื่อที่จะเกิดการผสมและละลายของเมทานอลเข้าไปใน Beef tallow แต่หลังจากนาทีแรกผ่านไปถึง 5 นาที ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเร็วมากและจะเสร็จบริบูรณ์ภายใน 15 นาที ในช่วงการเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาจะมีไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์อยู่สูงแล้วจะค่อยลดลงเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น จนถึงที่สุดกระบวนการจะมีปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์อยู่เป็นปริมาณที่สูงกว่าไดกลีเซอไรด์

### 2.3.5 อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา (Reaction temperature)

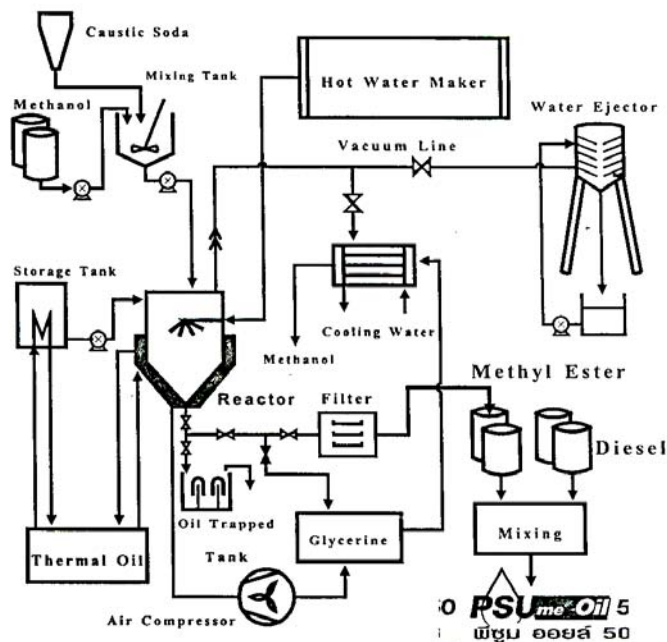
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดน้ำมันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เช่น เมทาโนไลซิสของน้ำมันละหุ่ง กับ Methyl ricinoleate อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาเหมาะสมที่ 20 – 35 °C สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันละหุ่งต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 – 1:12 ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 0.005 – 0.35 % โดยน้ำหนักน้ำมัน (Ma และ Hanna, 1999)

Ma และ Hanna (1999) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมัน ถั่วเหลืองบริสุทธิ์กับเมทานอล ในสัดส่วนเชิงโมลน้ำมันถั่วเหลืองต่อเมทานอล เท่ากับ 1:6 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 1% ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิ คือ 32, 45 และ 60 °C ได้ % Yield เท่ากับ 64, 87 และ 94 ตามลำดับ

## 3. กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ระดับโรงงานนำร่อง

### 3.1 กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

ชาคริต ทองอุไร และคณะ (2544) ทำการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากผลิตผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ น้ำมันทอดใช้แล้ว น้ำมันปาล์มดิบเกรดบี (หีบสกัดแบบรวมน้ำมันเปลือกและน้ำมันเมล็ดใน) ที่ผ่านกระบวนการแยกยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มรีไฟน์ ไชปาล์มสเตียรินทั้งชนิดปกติ (Iodine value 38) และชนิด Super hard (Iodine value 26) กระบวนการผลิตเมทิล- เอสเทอร์แสดงดังภาพประกอบที่ 2



ภาพประกอบที่ 2 กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน  
ที่มา : ชาคริต ทองอุไร และคณะ (2544)

### ขั้นตอนการผลิตมีดังนี้

#### 3.1.1 การเตรียมน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยา

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจะถูกเตรียมให้เหมาะสมก่อนเข้าทำปฏิกิริยา โดยหากเป็นน้ำมันปาล์มดิบจำเป็น ต้องผ่านกระบวนการแยกขางเหนียว และลดกรดให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ส่วนวัตถุดิบจากน้ำมันที่ใช้ทอดแล้วจะถูกนำมาขจัดโปรตีนออกโดยการทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกและล้างด้วยน้ำ วัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 1% แล้วจะถูกนำไปขจัดน้ำออกโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C ประมาณ 20 นาที โดยมีการกวนเพื่อให้การระเหยของน้ำเป็นไปได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น สำหรับไขปาล์มสเตียรีนชนิด Superhard ซึ่งผลิตที่โครงการส่งเสริมอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็ก ได้ถูกขจัดน้ำออกที่อุณหภูมิ 80 °C ภายใต้สภาวะสูญญากาศ 600 – 700 มิลลิเมตรปรอท

#### 3.1.2 การเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้เมทิลแอลกอฮอล์หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เมทานอล เข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมทานอลและโซเดียม-

ไฮดรอกไซด์ถูกเลือกใช้เพราะมีราคาถูก โดยเมทานอลต้องไม่มีน้ำเจือปนเกินกว่า 1% การเตรียมสารละลายกระทำโดยการนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 – 5 ส่วน ละลายในเมทานอล 100 ส่วนโดยน้ำหนัก ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เตรียมเป็นไปตามปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในวัตถุดิบ หากกรดไขมันอิสระมีปริมาณสูงก็ต้องใช้โซดาไฟในสัดส่วนที่สูง

### 3.1.3 การทำปฏิกิริยา

น้ำมันที่ถูกขจัดน้ำแล้วถูกทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 80 °C จากนั้นจึงเติมสารละลายแอลกอฮอล์ลงไปอย่างช้าๆ (เติมให้หมดภายใน 10 นาที) สัดส่วนน้ำมันต่อสารละลายแอลกอฮอล์โดยน้ำหนักเท่ากับ 5 ต่อ 1 ทำการกวนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึงเป็นเวลาประมาณ 15 นาที ด้วยอัตราการกวนปานกลาง (500 รอบ/นาที) อุณหภูมิในช่วงนี้ลดลงเหลือประมาณ 65 °C การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ได้เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอริน แต่ปฏิกิริยานี้ผันกลับได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหยุดกวนเพื่อแยกผลผลิตตัวใดตัวหนึ่งออก เมื่อหยุดกวนกลีเซอรินซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า (ประมาณ 1.26 กรัม/มิลลิลิตร) จะแยกชั้นออกจากชั้นเมทิลเอสเทอร์ โดยแยกตัวตกลงมาที่ก้นถัง ดังนั้นในชั้นเมทิลเอสเทอร์จะเหลือกลีเซอรินอยู่น้อย ปฏิกิริยาการเกิดเมทิลเอสเทอร์จะสามารถดำเนินต่อไปอย่างช้าๆ เมื่อทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 – 4 ชั่วโมง น้ำมันก็จะทำปฏิกิริยาไปมากกว่า 95%

### 3.1.4 การแยกกลีเซอริน

กลีเซอรินจะถูกถ่ายออกไปใส่ภาชนะโดยการถ่ายออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ในขณะที่ยังร้อนอยู่เพราะหากทิ้งไว้ให้เย็น ชั้นกลีเซอรินจะกลายเป็นของแข็ง

### 3.1.5 การล้างสิ่งปนเปื้อนออก

เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ยังปนเปื้อนด้วยสารอื่นๆ เช่น สบู่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไขมันอิสระหรือน้ำมัน กลีเซอรินที่ละลายอยู่ในชั้นเมทิลเอสเทอร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ดังนั้นจึงต้องทำการขจัดออกด้วยการล้างด้วยน้ำอุ่นหลายๆครั้ง ปริมาณน้ำที่ใช้แต่ละครั้งประมาณ 1 ต่อ 4 ของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ เมื่อเติมน้ำเพียงพอแล้วรอให้น้ำแยกชั้นจากเมทิลเอสเทอร์เป็นเวลาพอสมควร (ประมาณ 5 – 10 นาที) ก็ถ่ายน้ำออกด้านล่าง เติมน้ำอุ่นเพื่อล้างใหม่ การล้างจะกระทำ 4 – 5 ครั้ง และเพิ่มการกวนในการล้างครั้งหลังๆ

### 3.1.6 การขจัดน้ำออกขั้นสุดท้าย

เมื่อล้างสิ่งปนเปื้อนออกหมดแล้ว ขั้นตอนสุดท้าย คือ การขจัดน้ำที่หลงเหลือในชั้นเมทิลเอสเทอร์ออก ซึ่งกระทำโดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นก็สามารถนำไปเก็บเพื่อใช้งานต่อไป

เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากผลิตผลปาล์มน้ำมันต่างๆ เช่น น้ำมันทอดใช้แล้ว น้ำมันปาล์มดิบ (เกรคบี) น้ำมันปาล์มรีไฟน์ ไชปาล์มสเตียรีน และ Superhard stearin ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้เมทิลแอลกอฮอล์เป็นสารเข้าทำปฏิกิริยาและใช้โซดาไฟเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกรรมวิธีการผลิต 6 ขั้นตอน คือ การเตรียมน้ำมัน การเตรียมสารละลาย การทำปฏิกิริยา การแยกกลีเซอริน การล้าง และการขจัดน้ำ พบว่า เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์เกือบ 100% เมื่อทดสอบด้วยเทคนิค Thin Layer Chromatograph (TLC) สภาพการผลิตที่เหมาะสม ใช้สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทิลแอลกอฮอล์ คือ 1:6 หรือเมทิลแอลกอฮอล์ประมาณ 20% โดยน้ำหนัก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5–1% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60–80 °C โดยมีการกวนประมาณ 15–30 นาที และปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาต่อนาน 3–4 ชั่วโมง เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีสมบัติหลายประการใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ค่าความร้อน และช่วงอุณหภูมิการกลั่น แต่ จุดไหลเทมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ที่อิ่มตัวซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงในปริมาณที่สูง (ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2544)

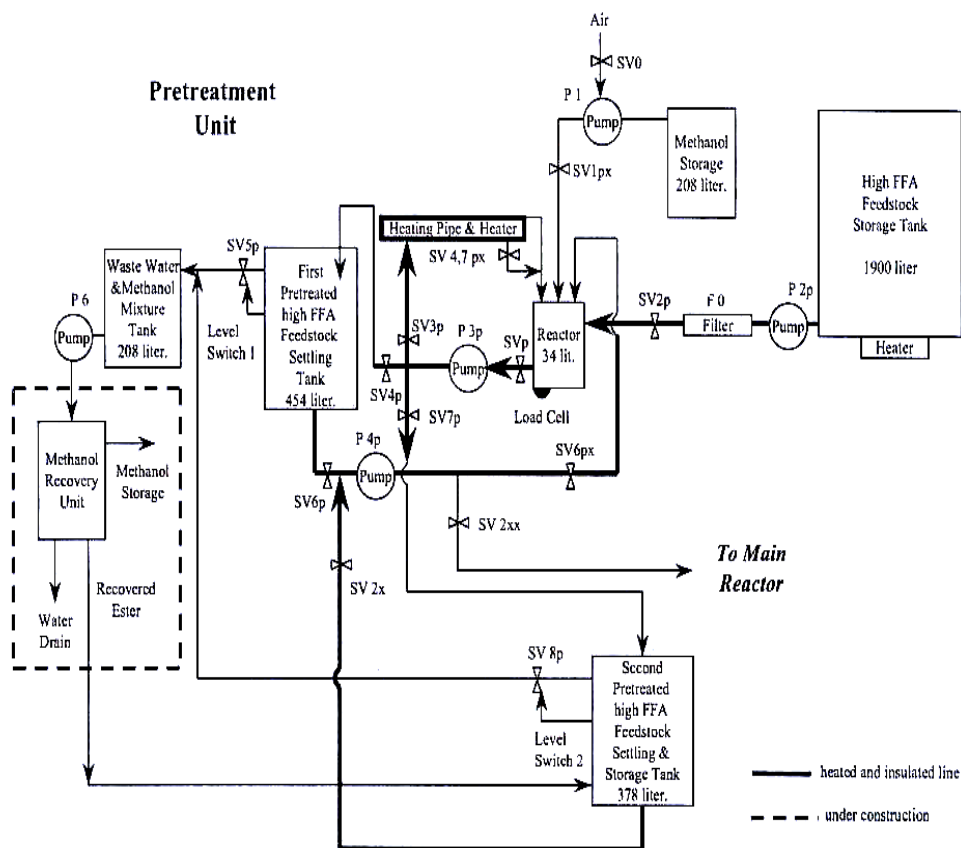
### 3.2 กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบ 2 ขั้นตอน

Canakci M. และ Van Gerpen (2001) ผลิตเมทิลเอสเทอร์จาก น้ำมันถั่วเหลือง yellow grease และ brown grease ด้วยกระบวนการผลิตที่ประกอบ 2 ขั้นตอนดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** กระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน เป็นการลดค่าของกรดไขมันอิสระให้น้อยกว่า 1% ซึ่งอุปกรณ์การผลิตแสดงดังภาพประกอบที่ 3 โดยมีวิธีการผลิตดังนี้

1. การให้ความร้อนแก่วัตถุดิบ ได้แก่ Yellow grease และ Brown grease ด้วยระบบให้ความร้อนขนาด 1.2 kW ซึ่งติดตั้งอยู่กับถังเก็บวัตถุดิบขนาด 1900 ลิตร เพื่อทำให้เกิดการละลาย

2. การกรอง เมื่อวัตถุดิบละลายแล้วจะถูกปั๊มผ่านตัวกรองขนาด 20 ไมครอน ซึ่งทำมาจากเซลลูโลสปั๊มด้วย P2p (ตามภาพประกอบที่ 3) เพื่อช่วยแยกสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ละลายออกจากวัตถุดิบ เช่น เศษเนื้อ เศษกระดูก



ภาพประกอบที่ 3 กระบวนการผลิตในขั้นตอนปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

ที่มา : Canakci M. and Van Gerpen (2001)

3. การทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน วัตถุดิบที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกเก็บอยู่ในถังปฏิกรณ์ขนาด 34 ลิตร ซึ่งทำด้วยเหล็กปลอดสนิมโดยจะมี Load cell ติดตั้งอยู่ที่ถังเพื่อชั่งน้ำหนักของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ เมื่อได้น้ำหนักตามที่ต้องการ ทำการเติมเมทานอลซึ่งบรรจุในถัง 208 ลิตร และตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันลงไปโดยอาศัยปั๊มลม P<sub>1</sub> ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. การแยกเมทานอลและน้ำขึ้นต้น จากการทำปฏิกิริยาขึ้นต้นทำให้กรดไขมันในวัตถุดิบเปลี่ยนเป็นเอสเตอร์และน้ำโดยต้องแยกน้ำออกจากสารผสมที่ได้เพราะจะมีผลต่อการทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป จากการเก็บสารผสมที่ได้จากการทำปฏิกิริยาขึ้นต้นในถังขนาด 454 ลิตร เพื่อแยกสารผสมระหว่างเมทานอลและน้ำออกจากวัตถุดิบที่เหลือโดยหลังจากปล่อยให้เกิดการแยกตัวเป็นเวลา

24 ชั่วโมง เมทานอลและน้ำจะลอยขึ้นมาอยู่ด้านบนของถัง สามารถแยกออกโดยใช้ระบบควบคุม โคลินอยด์ว่าล์ เข้าไปเก็บในถังขนาด 208 ลิตรเพื่อทำการแยกคืนเมทานอลต่อไป

5. การแยกคืนเมทานอล ซึ่งขั้นตอนนี้ยังไม่ได้ดำเนินการแต่สามารถติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม เพื่อแยกเมทานอลออกจากน้ำกลับมาใช้อีก (เส้นประตามภาพประกอบที่ 3)

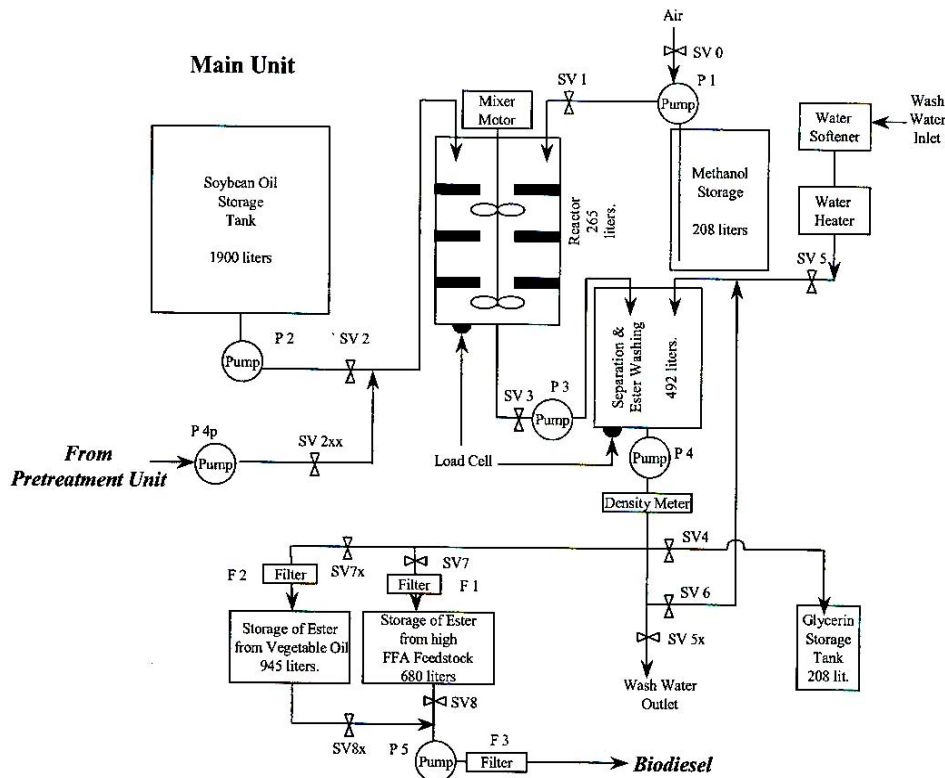
6. การทำปฏิกิริยาขั้นที่สอง วัตถุประสงค์ที่หลีกเลี่ยงการแยกเมทานอลและน้ำออกแล้วถูกบีบกลับมายังถังปฏิกรณ์ขนาด 34 ลิตรอีกครั้งด้วยปั๊ม P4p (ตามภาพประกอบที่ 3) เพื่อทำปฏิกิริยากับเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

7. การแยกเมทานอลและน้ำขั้นที่สอง จากการทำปฏิกิริยาขั้นที่สองวัตถุประสงค์ที่ได้จะถูกบีบเข้าสู่ถังขนาด 378 ลิตรด้วยปั๊ม P3p (ตามภาพประกอบที่ 3) เพื่อช่วยแยกสารผสมระหว่าง เมทานอล และน้ำออกจากวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยวัตถุประสงค์ที่ได้จะมีค่ากรดไขมันอิสระน้อยกว่า 1%

**ขั้นตอนที่ 2 :** กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน อุปกรณ์การผลิตแสดงดังภาพประกอบที่ 4

ในส่วนนี้หากวัตถุประสงค์ที่ใช้ทำการผลิตเป็นน้ำมันถั่วเหลืองในถังขนาด 1900 ลิตร จะถูกบีบเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ด้วยปั๊ม P2 (ตามภาพประกอบที่ 4) หรือหากเป็นวัตถุประสงค์จากขั้นตอนที่ 1 (กระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน) ปั๊มเข้ามาโดยอาศัยปั๊ม P4p (ตามรูปที่ 4) เข้าทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเตอริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ขนาด 265 ลิตร ที่มีใบกวนหมุนที่ความเร็วรอบ 1750 รอบ/นาที และติดตั้ง load cell ด้านล่างของถังเพื่อชั่งน้ำหนักสารเข้าทำปฏิกิริยาที่แน่นอน เติมนเมทานอลเข้าสู่ถังปฏิกรณ์โดยอาศัยปั๊ม P1 (ตามรูปที่ 4) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันกวนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นจึงปล่อยเข้าสู่ถังขนาด 492 ลิตร เพื่อแยกกลีเซอรินออกจากเมทิล-เอสเตอริฟิเคชัน และล้างน้ำ โดยด้านล่างของถังติดตั้ง Load cell เพื่อหาน้ำหนักของกลีเซอริน ปริมาณน้ำที่ล้าง และปริมาณเมทิลเอสเตอริฟิเคชันที่ได้ เมื่อกลิเซอรินแยกตัวออกมาจะถูกบีบเข้าไปเก็บในถังขนาด 208 ลิตร โดยอาศัยปั๊ม P4 (ตามภาพประกอบที่ 4) ทำการล้างเมทิลเอสเตอริฟิเคชันด้วยน้ำอุ่น (60°C) เพื่อแยกสบู่ และกลีเซอรินที่หลงเหลือในเมทิลเอสเตอริฟิเคชันโดยการพ่นน้ำอุ่น เป็นฝอยผ่านฝักบัว 4 ตัว ที่ติดอยู่ด้านบนของถังเพื่อช่วยให้เกิดการกระจายตัวได้ทั่วถึง น้ำอุ่นถูกบีบเข้ามาโดยอาศัยการบีบ P4 วนกลับเข้ามาส่วนน้ำที่จะถูกปล่อยแยกออกไป





ภาพประกอบที่ 4 กระบวนการผลิตในส่วน Main Unit

ที่มา : M. Canakci and Van Gerpen (2001)

เมทิลเอสเทอร์ที่ล้างน้ำเสร็จแล้วจะถูกกรองผ่านตัวกรองขนาด 20 ไมครอน ก่อนที่จะถูกเก็บในถังขนาด 945 ลิตร ซึ่งใช้เก็บเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันถั่วเหลือง ส่วนเมทิลเอสเทอร์จาก Yellow grease หรือ Brown grease จะเก็บในถังขนาด 680 ลิตร เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ยังคงมีส่วนประกอบของน้ำหลงเหลืออยู่และเตรียมการที่จะใช้ Flash type drying เพื่อจัดน้ำออกในอนาคต

กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบ 2 ขั้นตอน เป็นวิธีการผลิตที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระสูง โดย A.S. Ramadhas และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดขางพาราที่มีกรดไขมันอิสระสูง โดยกล่าวว่า กรดไขมันอิสระที่มีค่าสูงจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่าง เนื่องจากกรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างเกิดสบู่

เป็นผลิตภัณฑ์ และทำให้ไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรินและเมทิลเอสเทอร์ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ให้เป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน นำผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแรกเข้าสู่กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน พบว่า สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์มีค่าเท่ากับ 1:6 ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทด่าง ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยทำการทดลอง 30 นาที ที่อุณหภูมิ  $45 \pm 5$  °C โดยข้อดีของการผลิตเมทิลเอสเทอร์ให้เป็น 2 ขั้นตอน คือ สามารถลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่ใช้ไขมันที่มีกรดไขมันอิสระสูงเป็นวัตถุดิบ โดยเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนดแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 มาตรฐานเมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐาน ASTM D 6751

คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง	หน่วย	วิธีทดสอบ	เกณฑ์ต่ำ	เกณฑ์สูง
			สุด	สุด
จุดวาบไฟ	°C	ASTM D 93	130	-
น้ำและตะกอน	ร้อยละโดยปริมาตร	ASTM D 2709	-	0.05
		ASTM D 445	1.9	6.0
ค่าความหนืดที่ 40 °C	ตารางมิลลิเมตร/วินาที	ASTM D 874	-	0.02
เถ้าซัลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 5453	-	0.05
ปริมาณกำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 130	-	No.3
การกัดกร่อนทองแดง		ASTM D 613	-	-
ค่าซีเทน		ASTM D	รายงานผล	
จุดขุ่น	°C			

		2500		
		ASTM D		
กากถ่าน (ร้อยละ100ตัวอย่าง)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	4530	-	0.005
	มิลลิกรัมKOH/กรัมน้ำ	ASTM D		
ค่าของกรด	มัน	664	-	0.8
		ASTM D		
กลีเซอรอลอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	6584	-	0.02
		ASTM D		
กลีเซอรอลทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	6584	-	0.24
		ASTM D		
ปริมาณฟอสฟอรัส	ร้อยละโดยน้ำหนัก	4591	-	0.001
อุณหภูมิการกลั่น เทียบเท่าที่		ASTM D		
ความ	°C	1180	-	360
ดันบรรยากาศ กลั่นได้ร้อยละ				
90				

เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิง โดยค่าที่ได้ควรอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด เช่น จุดวาบไฟ มีค่ามากกว่า 130 °C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ทำให้น้ำมันติดไฟได้ น้ำมันที่มีจุดวาบไฟสูงทำให้ติดไฟได้ยากและมีความปลอดภัยในการขนส่ง

#### 4. คะตะลิสต์

##### 4.1 ความหมายกะตะลิสต์

กะตะไลซิส (Catalysis) มาจากภาษากรีกสองคำ ได้แก่ คะตะ (Cata) ซึ่งหมายถึงหัก และ ไลไซน์ (Lysein) ซึ่งหมายถึงแยก หรือแตก ดังนั้นกะตะลิสต์จึงหมายความว่า เป็นตัวทำให้เกิดการแตกหักของแรงที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล อย่างไรก็ตาม ความหมายที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ

ตำแหน่งการเกิดสมมูลทางเคมี ที่มีตัวคะตะลิสต์เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยา จะเป็นตำแหน่งเดียวกับสมมูลเคมีที่ไม่มีคะตะลิสต์

#### 4.2 การจำแนกคะตะลิสต์

คะตะลิสต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท โดยพิจารณาจากเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้น

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีเฟสแตกต่างจากสารตั้งต้นหรือไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธุ์ (Homogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีขอบเขตของเฟส โดยที่เฟสของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้นสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน
3. เอนไซม์ (Enzyme) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางชีวเคมี และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สามารถจัดรวมไว้กับ 2 กลุ่มแรกได้ เนื่องจากเอนไซม์เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน ที่มีขนาดใหญ่ โดยปกติแล้วจะเป็นสารประกอบโปรตีน ลักษณะของเอนไซม์จึงอยู่ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่รวมเป็นเนื้อเดียวกันและชนิดไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน

#### 4.3 ลักษณะทั่วไปของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเร่งปฏิกิริยา โดยเดินในเส้นทางที่มีค่าพลังงานกระตุ้นของแต่ละขั้นตอนของตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่าปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.2 สมดุลของปฏิกิริยาจะไม่เปลี่ยนแปลงเพียงแต่เร่งปฏิกิริยาไปข้างหน้าให้เร็วขึ้นสำหรับปฏิกิริยาที่มีการผันกลับ

4.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนเล็กน้อยเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว

4.3.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดแต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ได้

4.3.5 อุณหภูมิจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาน้อยมากเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วยในปฏิกิริยา

4.3.6 ตัวเร่งปฏิกิริยามีความจำเพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้

ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ต้องการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาซัลโฟเนตโททานเนียมไดออกไซด์ - วานาเดียมเพนออกไซด์และแอมเบอร์ลิสต์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มวิวิธพันธุ์ใช้เป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยา โดยมีข้อดีในการลดปัญหาสบู่ที่เกิดขึ้นและสะดวกในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

#### 4.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเตอริไฟเคชัน

สำหรับการผลิตเมทิลเอสเตอ์ โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริไฟเคชัน น้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบต้องมีกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามสำหรับน้ำมันที่มีกรดไขมันสูงกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สามารถใช้ปฏิกิริยาเอสเตอริไฟเคชัน เพื่อลดกรดไขมันอิสระให้ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นกรดหรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเตอริไฟเคชัน ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์ วานาเดียมเพนทอกไซด์ และ Amberlyst-15

##### 4.4.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )

มีลักษณะเป็นผลึกโดยทั่วไปจะพบอยู่ในรูปของ Anatase และ Rutile ในธรรมชาติจะไม่พบไททาเนียมไดออกไซด์ที่อยู่เป็นสารบริสุทธิ์ แต่จะได้มาจาก Imenite ซึ่งเป็นแร่สีดำชนิดหนึ่งประกอบด้วย Iron titanate หรือได้มาจาก Leucocene ores โดยแร่เหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตไททาเนียมไดออกไซด์ ไททาเนียมไดออกไซด์ถูกใช้อย่างกว้างขวาง โดยส่วนใหญ่นำมาใช้ในด้านการเป็นรงควัตถุ เนื่องจากเนื้อสารมีลักษณะเป็นผงสีขาว จึงนิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมของสีหรือสารเคลือบผิว, พลาสติก, กระจก, และอาหาร นอกจากนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ เช่น ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็น Photosensitiser ใน Photovoltaic cells ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ Photovoltaic cells และไททาเนียม ไดออกไซด์มีคุณสมบัติ สามารถป้องกันรังสี UV จึงนิยมใช้ในเครื่องสำอาง

##### 4.4.2 วานาเดียมเพนทอกไซด์ ( $\text{V}_2\text{O}_5$ )

วานาเดียมบริสุทธิ์ เป็นธาตุที่มีลักษณะสีขาวสว่าง มีความอ่อนทำให้ง่ายในการตีเป็นแผ่นบาง ทนต่อการกัดกร่อนสูง โดยทั่วไปจะพบในรูป Vanadinite ซึ่งทำปฏิกิริยากับโลหะแมกนีเซียมหรือของผสมของแมกนีเซียมและโซเดียมเกิดเป็น  $\text{V}_2\text{O}_5$  สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในโรงงานเซรามิก, โรงงานสีย้อม และโรงงานผลิตยา

จากงานวิจัยของ S.K. Samataray และคณะ (2001) ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จึงมีความเป็นไปได้ในการผลิตเมทิลเอสเตอ์ โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับวานาเดียมเพนทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเตอริไฟเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริไฟเคชัน

##### 4.4.3 Amberlyst-15

จัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มของโพลีเมอร์และ ion exchange resins ได้มีการใช้แอมเบอร์ลิสต์ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของกรดไขมัน ได้แก่ Caprylic acid, Capric acid, Lauric acid, Palmitic acid, Stearic acid, Oleic acid, Linoleic acid, และ Erucid acid, กระบวนการผลิต Phenol Alkylate และปฏิกิริยา Etherification

เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันจำเป็นต้องใช้กรดในการเกิดปฏิกิริยาและเมื่อนำแอมเบอร์ลิสต์แช่ในน้ำ ทำให้ pH ของน้ำลดลงเหลือ 3-5 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้แอมเบอร์ลิสต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการวางแผนการตลาดได้เลือกใช้ Sulfonated  $TiO_2/V_2O_5$  และ Amberlyst-15 ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตเมทิลเอสเตอ์ เนื่องจากการซัลโฟเนตจะเป็นการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามี pH เป็นกรดมากขึ้น ซึ่งจำเป็นในการเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตเมทิลเอสเตอ์ และต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเมทิลเอสเตอ์ และค่าใช้จ่ายของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยา

อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตเมทิลเอสเตอ์ในปัจจุบันมีต้นทุนสูง ทำให้ไม่มีความคุ้มค่าในการผลิตเมทิลเอสเตอ์ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการเพิ่มผลตอบแทนของการผลิตเมทิลเอสเตอ์ ด้วยการใช้ปฏิกิริยาไอโซเนชันกับเมทิลเอสเตอ์ เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งมีมูลค่าเพิ่มมากขึ้น

## 5. แก๊สไอโซน

ไอโซนเป็นอีกรูปหนึ่งของออกซิเจน มีความหนาแน่นเป็น 1-1.5 เท่า ของความหนาแน่นออกซิเจนมีน้ำหนักโมเลกุล 48.00 กรัมต่อโมล เป็นแก๊สที่ไม่เสถียรที่ความดันบรรยากาศอากาศที่มีแก๊สไอโซนผสมอยู่ (Ozonized air) จะมีกลิ่นฉุนแสบจมูก ลักษณะกลิ่นที่ฉุนนี้สามารถรู้สึกได้ในบรรยากาศหลังจากที่มีฟ้าแลบและรอบๆ การดีสชาร์จไฟอื่นๆ ไอโซนในปริมาณความเข้มข้นสูงๆที่ระดับอุณหภูมิปกติในสถานะแก๊สจะมีสีน้ำเงินอ่อน และหากความหนาแน่นในรูปของของเหลวมีสีน้ำเงินเข้มซึ่งไม่เสถียรอย่างมากและจะทำให้ระเบิดได้ ในช่วงอุณหภูมิ 0-30 °C แก๊สไอโซนละลายในน้ำได้ดีกว่าแก๊สออกซิเจนประมาณ 10 เท่า ในสารละลายน้ำกลั่นไอโซนจะมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 165 นาที

การใช้งานของโอโซนจะถูกนำไปใช้เป็นหลักในกระบวนการต่าง ๆ เช่น

- บำบัดน้ำในสระว่ายน้ำ
- บำบัดน้ำดื่มและน้ำที่ใช้งานในระบบต่าง ๆ
- บำบัดน้ำแร่
- ควบคุมกลิ่นเหม็น
- ใช้ในกระบวนการออกซิเดชันในอุตสาหกรรมเคมี
- การบำบัดน้ำสำหรับฟาร์มเลี้ยงปลา
- การบำบัดน้ำในอ่างเก็บน้ำ

แก๊สโอโซนมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในน้ำ สารละลายและอากาศ มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจากสารอื่นเพิ่มเข้ามาได้อีก ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวเองทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ (Oxidize) อย่างแรงในบรรดาตัวออกซิไดส์ทางเคมีที่มีอยู่มากมาย นับว่าโมเลกุลของโอโซนมีความสามารถสูงสุดเป็นอันดับสองรองลงมาจากโมเลกุลของแก๊สฟลูออรีน (Fluorine) และเป็นอันดับสี่ถ้านับรวมอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl-radical) และอะตอมเดี่ยวของออกซิเจน (Oxygen atom) โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้า 2.08 โวลต์ สูงกว่าแก๊สคลอรีน (Chlorine) 1.52 เท่า ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าความต่างศักย์รีดอกซ์ของตัวออกซิไดส์ต่าง ๆ

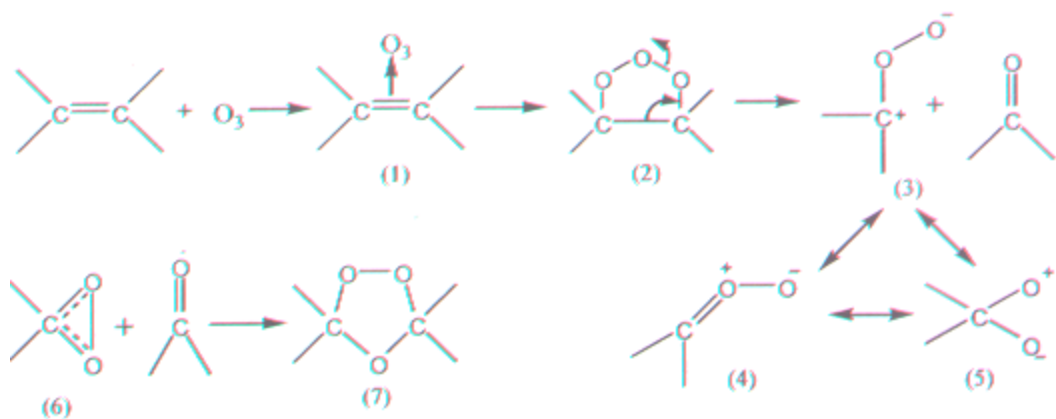
ตัวออกซิไดส์	อีโอพี* (โวลต์)	เทียบกับคลอรีน (เท่า)
แก๊สฟลูออรีน (F <sub>2</sub> )	3.06	2.25
อนุมูลไฮดรอกซิล (OH <sup>•</sup> )	2.8	2.05
อะตอมของออกซิเจน (O)	2.42	1.78
โอโซน (O <sub>3</sub> )	2.08	1.52
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	1.49	1.30
แก๊สคลอรีน (Cl <sub>2</sub> )	1.36	1.0

แก๊สออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	1.23	0.90
--------------------------------	------	------

(\*อีโอพี = EOP = Electrochemical oxidation potential = ค่าความต่างศักย์รีดอกซ์)

ที่มา : สุรพล, 2543

การทำปฏิกิริยาเคมีกับสารต่าง ๆ จะเกิดปรากฏการณ์ที่แตกต่างกันไปตามชนิดของสาร สภาพของแก๊สโอโซนที่อยู่ในอากาศหรือสารละลาย สารที่มีอิเล็กตรอนมากหรือตัวรีดิวซ์ เช่น ซัลไฟด์ (HS), ไนไตรต์ (NO<sub>2</sub>), โบรไมด์ (Br), ไอโอดีน (I), ไซยาไนด์ (CN), ไทโอ-ไซยาไนด์ (CNS) และธาตุทุกชนิด ยกเว้นฟลูออไรด์ในตารางธาตุก็จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างตรงไปตรงมา มีการเติมออกซิเจนเข้าไปและส่วนมากจะได้แก๊สออกซิเจนเกิดขึ้น ส่วนปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ที่มีโลหะ โดยเฉพาะโอโซนที่ละลายในน้ำอาจเกิด ปฏิกิริยาที่ไม่มีแก๊สออกซิเจนเหลืออยู่ เพราะโมเลกุลของแก๊สโอโซนจะเข้าร่วมตัวเป็นรูปร่างแหวน เรียกว่า ปฏิกิริยาไดโพลไซโคลแอดดิชัน (Dipolar cyclo-addition) ซึ่งมักเกิดขึ้นกับสารประกอบ อะโรมาติก (Aromatic compound) ถ้าเป็นพวกอัลคีน (Alkenes) จะเกิดปฏิกิริยาแทนที่อิเล็กโตรฟิลิก (Electrophilic Substitution Reaction) โดยเกิดขึ้นตรงพันธะคู่ของอะตอมของคาร์บอนซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่มาก (Langlais B. และคณะ, 1991) ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างกลาง (Intermediate) ที่ไม่คงตัวกลายเป็นโมลโซไซด์ (Molozonides) ซวิทเทอเรียน (Zwitterions) และ โอโซนไนด์ (Ozonides) ดังภาพประกอบที่ 5 ปฏิกิริยาทั้งสองนี้แตกต่างกับการเกิดออกซิเดชันธรรมดา เพราะแก๊สโอโซนไม่แตกตัวออกเป็นอะตอมเดี่ยวหรือโมเลกุลของออกซิเจนก่อน เนื่องจากการเข้าทำปฏิกิริยาเคมีของโอโซนกับสารอื่นเกิดขึ้นเร็วกว่าการแตกตัวของแก๊สโอโซน



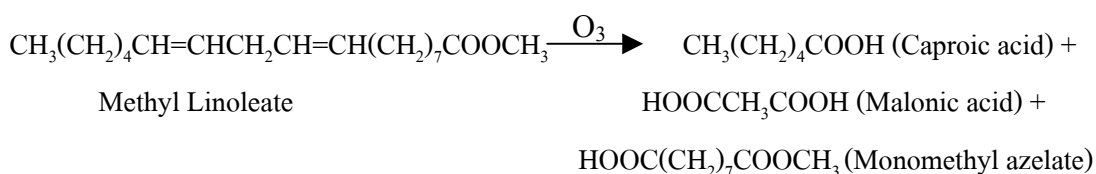
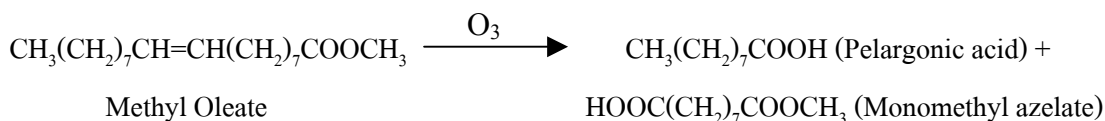


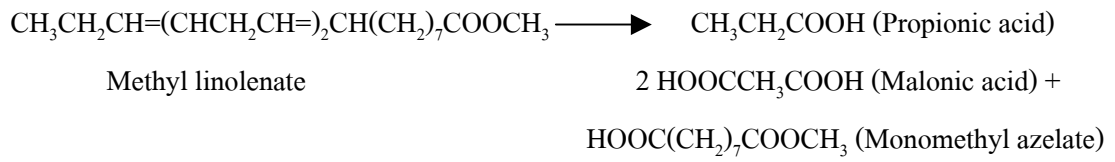
- (1) = อัลคีน      (2) = โมเลโซไนด์      (3), (4), (5) = เรโซแนนซ์ 3 รูปแบบของชีวิตเทอร์เรียน  
 (6) = แทนสูตร 3 รูปแบบของชีวิตเทอร์เรียน      (7) = โอโซไนด์

### ภาพประกอบที่ 5 แสดงการเกิดพันธะระหว่างพันธะคู่และโอโซน

สำหรับแก๊สโอโซนซึ่งละลายอยู่ในน้ำ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทางอ้อมจากอนุมูลอิสระ โดยโมเลกุลของน้ำบางส่วนแตกตัวออกเป็นอนุมูลไฮดรอกซี ( $\text{OH}^\bullet$ ) แล้วทำปฏิกิริยากับโอโซนกลายเป็นอนุมูลอิสระ พวกซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide radical) และ อนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงกว่าโอโซนแล้วจึงเข้าทำปฏิกิริยากับสารอื่นอีกที เห็นได้ว่าปฏิกิริยาเคมีของโอโซนถึงแม้ว่าโดยพื้นฐานจะอาศัยการออกซิเดชัน แต่บางครั้งการสิ้นสุดของกระบวนการอาจมีความซับซ้อนหลายขั้นตอน นอกจากจะขึ้นกับสารที่จะทำปฏิกิริยาอาจขึ้นกับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเข้มข้นระยะเวลาในการสัมผัส อุณหภูมิ และความชื้น การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโอโซนจึงต้องมีห้องปฏิบัติการที่ทันสมัย ซึ่งสามารถตรวจสอบและวิเคราะห์สารต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด เนื่องจากแก๊สโอโซนมีทั้งความว่องไวในการทำปฏิกิริยาและสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว จนนักวิทยาศาสตร์ยุคใหม่หลายคนถึงกับเสนอว่าแก๊สโอโซนน่าจะเป็นแก๊สในอุดมคติ (Ideal Gas) มากกว่าแก๊สที่จะอยู่อย่างอิสระหรือมีความบริสุทธิ์ได้อย่างแท้จริง

เนื่องจากการผลิตเมทิลเอสเทอร์มีต้นทุนสูงในกระบวนการผลิต ดังนั้น K. Gunvachai (1998) ได้ทำการผลิตสารที่มีมูลค่าจากเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ปฏิกิริยาโอโซนชัน ซึ่งทำการเติมก๊าซโอโซนลงในเมทิลเอสเทอร์ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ดังสมการ





โดยสามารถศึกษาข้อมูลทั่วไปของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ จุดเดือด จุดหลอม-  
เหลว ความหนาแน่น และความสามารถการละลายในตัวทำละลายชนิดต่าง ได้จากภาคผนวก ก