

## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

### เครื่องไตเตรตสูตรการผลิตไบโอดีเซลชุมชนชนิดอัตโนมัติเชิงปัญญา Intelligently-fully Automatic Titration for Bio-diesel Production

รศ. ดร. ปิติเขต สุรักษา  
รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา  
ผศ. กฤดากร กล่อมการ  
นายปรัชญา เครือเพชร

โครงการวิจัยนี้ได้รับการอุดหนุนโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ประจำปี (2551)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทคัดย่อ

การตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันในน้ำมันพืชใช้แล้วสำหรับการทำไบโอดีเซลแบบชุมชนนั้น ชาวบ้านทั่วไปที่ไม่ได้รับการอบรมหรือมีความรู้ในเรื่องการทำไบโอดีเซลจะวิเคราะห์สัดส่วนการผสมน้ำมันใช้แล้วกับเมทิลแอลกอฮอล์และค่าต่างไปจากความต้องการที่แท้จริง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดสบู่ในผลิตภัณฑ์ทำให้ไม่ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวคณะวิจัยจึงได้สร้างเครื่องไตเตรดไบโอดีเซลอัตโนมัติเชิงปัญญา ซึ่งก็คือเครื่องไตเตรดที่มีความฉลาดในการคำนวณสูตรการผลิตไบโอดีเซลออกมาได้จากการทำไตเตรดแบบอัตโนมัติโดยไม่ต้องอาศัยความรู้ทางวิศวกรรมเคมีขั้นสูง จากการตรวจสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าเครื่องไตเตรดอัตโนมัติที่คณะผู้วิจัยสร้างขึ้นมีสมรรถนะเทียบเท่ากับการทำไตเตรดโดยผู้เชี่ยวชาญทางวิศวกรรมเคมี

คำสำคัญ: การไตเตรด อุปกรณ์อัตโนมัติ กรดไขมัน การผลิตไบโอดีเซล

### Abstract

It is not easy for the laymen to calculate the fatty acid containing in used-oil for community bio-diesel production. Miscalculation resulting to incorrect proportion of methyl alcohol and base as ingredients would eventually lead to quality degradation of the product which may contain soap. To simplify the calculation while retain accuracy, the research team implements an intelligent-automatic titration for community bio-diesel production. From the laboratory tests, without the requirement of higher knowledge in Chemistry, the automatic titration apparatus possess capability equivalent to that of a human expert in chemical engineering.

Keywords: titration, automatic apparatus, fatty acid, bio-diesel production

## กิตติกรรมประกาศ

ไม่ว่าทุนอุดหนุนจะเป็นในปีใด ก็คงต้องขอกล่าวคำเดิม ว่างานวิจัยนี้ สำเร็จลงได้ ด้วยเงินอุดหนุนของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. เพื่อเสริมความแข็งแกร่งและความต่อเนื่องในงานวิชาการแก่อาจารย์ไม่ให้ “ไฟแห่งการค้นคว้า” มอดลงเสียก่อน คุณความดีจากงานวิจัยนี้มีอบแต่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. และเพื่อนร่วมวิชาชีพผู้ถ่ายทอดความรู้แต่เยาวชน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

## หน้า

บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4*
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย	6
บทที่ 4 อภิปรายผลการวิจัย สรุปผลและข้อเสนอแนะ	19
บรรณานุกรม	22
ภาคผนวก ก	โปรโตคอลและการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์
ภาคผนวก ข	วิธีการวิเคราะห์กรดไขมันเพื่อหาสูตรการทำไบโอดีเซล

\*หมายเหตุ สำหรับบทที่ 2 นอกจากหน้าเริ่ม หน้าถัดไปเรียงเลขหน้าให้ใช้หน้า 5 ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

รูปที่

หน้า

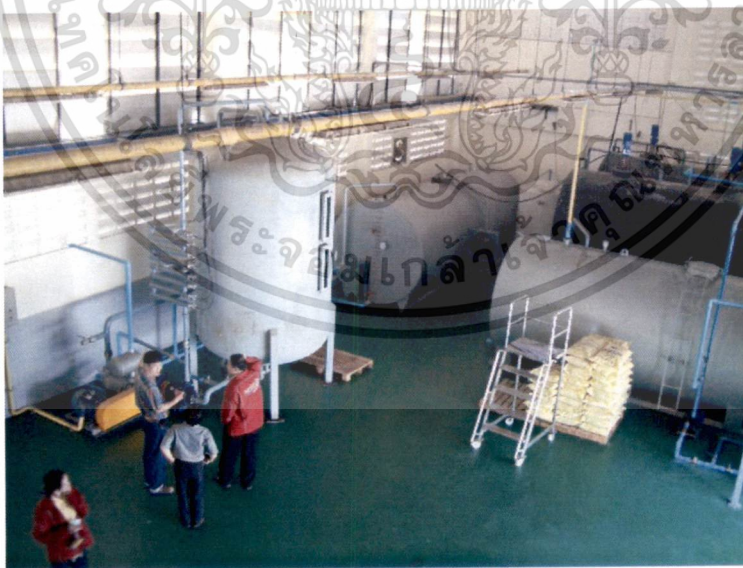
1 โรงงานไบโอดีเซลต้นแบบกำลังผลิต 60,000 ลิตรต่อวันที่ คณะผู้วิจัยแยกออกแบบและสร้าง.....	1
2 แผงวงจรของโมดูลกลิ้งที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
3 รูปด้านข้างของอุปกรณ์ที่สนใจ.....	8
4 โปรแกรมที่สร้างขึ้นจาก VB 6.0 เพื่อเชื่อมต่อผ่านพอร์ตอนุกรม.....	9
5 ลูกบาศก์ที่ใช้ในการทดลอง.....	10
6 สีส้มสำหรับของเหลวที่ใช้ในการทดลอง.....	11
7 หลอดบรรจุสารละลาย NaOH และระบบนับหยดอัตโนมัติ.....	12
8 ภาพมุมกว้างของหลอดบรรจุสารละลาย NaOH.....	13
9 ผลการทดลองเงื่อนไขที่ 1.....	14
10 ผลการทดลองเงื่อนไขที่ 2.....	14
11 ผลการทดลองเงื่อนไขที่ 3.....	15
12 ผลการทดลองเงื่อนไขที่ 1.....	15
13 น้ำมันใช้แล้วเป็นวัตถุดิบตั้งต้น.....	16
14 แอลกอฮอล์ตั้งต้นและฟินอล์ฟทาซิน.....	16
15 ด้านข้างเครื่องเขย่าอัตโนมัติ.....	17
16 เมื่อถึงจุดยุติสารละลายอินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนเป็นสีชมพู.....	18
17 ค่าสีชมพูที่ได้ระบุการยุติการทำไตเตรต ส่งผ่านค่าที่อ่านได้ จากกล้องมายังพอร์ต RS232.....	19

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าไบโอดีเซลเป็นน้ำมันพลังงานทดแทนใช้แทนดีเซลจากปิโตรเลียม น้ำมันไบโอดีเซลเป็นสารหล่อลื่นชั้นยอด และมีคุณสมบัติในการลดเขม่าควันดำจากท่อไอเสียรถยนต์ได้ดี ด้วยเหตุนี้ จึงมีการวิจัยการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลทั้งในและนอกประเทศอย่างแพร่หลายและต่อเนื่องนับเป็นเวลากว่า 10 ปี คณะผู้วิจัยได้ทำงานวิจัยทางด้านนี้ทั้งในเชิงวิชาการและในเชิงอุตสาหกรรมในเรื่องกระบวนการควบคุมการทำปฏิกิริยาเคมีและเชิงระบบ รวมทั้งมีประสบการณ์ในการสร้างโรงงานต้นแบบมูลค่ากว่า 10 ล้านบาทให้กับเอกชนเพื่อผลิตในเชิงพาณิชย์ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โรงงานไบโอดีเซลต้นแบบกำลังผลิต 60,000 ลิตรต่อวันที่คณะผู้วิจัยเคยออกแบบและสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทิศทางราคาปาล์มดิบและอนุพันธ์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ทำไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์ที่สูงที่สุดในรอบ 10 ปีที่ผ่านมาทำให้ การผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ในขนาดโรงงานระดับกลางไม่สามารถผลิตได้คุ้มทุนในเชิงพาณิชย์ ผู้ชนะในเกมส์คือผู้ที่มีโรงกลั่นน้ำมันซึ่งรัฐบาลออกนโยบายให้ความช่วยเหลือสำหรับโรงงานไบโอดีเซลที่มีโรงกลั่นน้ำมันลิตรละ 5 บาทดังปรากฏตาม พรบ. การผลิตไบโอดีเซลตามมาตรา 7 ส่งผลให้ผู้ผลิตน้ำมันรายใหญ่ในระดับมหาชนเท่านั้นที่สามารถอยู่รอดได้ด้วยนโยบายรัฐ โรงงานระดับกลางต่างพากันทยอยปิดตัวเองออกจากเกมส์ไปด้วยกลไกห่วงโซ่อุปทาน

ด้วยเหตุนี้ การผลิตไบโอดีเซลสำหรับโรงงานระดับกลางประสบทางตันเชิงเศรษฐศาสตร์และไม่อาจพิจารณาในเชิงพาณิชย์ได้ สำหรับโรงงานในระดับเล็กหรือระดับชุมชนซึ่งมีกำลังการผลิตไม่เกิน 500 ลิตรต่อวันนั้น แม้ว่าจะสามารถเก็บแยกน้ำมันใช้แล้วหรือไขมันสัตว์มาเป็นวัตถุดิบ แต่ปริมาณที่ได้ก็ไม่อาจทำให้เกิดส่วนต่างกำไรได้เพียงพอ ดังนั้น ประเด็นที่สำคัญที่เป็นปัจจัยหลักในการทำไบโอดีเซลชุมชนในประเทศไทยจึงไม่ใช่ประเด็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ ทว่าเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมโดยการนำน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่ใช้แล้วมาใช้ให้เกิดประโยชน์แทนการทิ้งลงน้ำหรือดินซึ่งทำให้เกิดปฏิกูลต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นการสร้างเสริมสุขภาพอนามัยที่ดีให้แก่ชุมชนโดยไม่นำน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่ใช้แล้วมาใช้อีกเพราะเนื่องจากการทอดอาหารจากน้ำมันใช้แล้วหลาย ๆ ครั้งทำให้น้ำมันดังกล่าวสูญเสียสภาพทางเคมีบางประการจากความร้อนและทำให้เกิดสารก่อมะเร็งอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ เครื่องผลิตไบโอดีเซลระดับชุมชนจึงมีนัยสำคัญในการกำเนิดคุณภาพการดังกล่าวและเหมาะสมในการพัฒนาให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้นไป

แม้ว่าจะมี การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลชุมชนในที่ต่าง ๆ ในประเทศไทยอยู่หลายแห่งด้วยกัน แต่คุณภาพของน้ำมันใช้แล้วในแต่ละแห่งนั้นมีคุณภาพไม่เท่ากัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการผลิตไม่เท่าเทียมกัน หากต้องการให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ขึ้นจึงจำเป็นต้องไตรเตรดน้ำมันที่ใช้แล้วเพื่อคำนวณสูตรก่อน อย่างไรก็ตามในระดับชุมชนหรือระดับชาวบ้านที่ทำน้ำมันใช้เอง การไตรเตรดยังขาดความชำนาญ และยังไม่มียุทธวิธีช่วยคำนวณแบบชาญฉลาดสามารถคำนวณ

สูตรการผลิตได้โดยอัตโนมัติโดยไม่ต้องใช้ผู้ควบคุม ในงานวิจัยนี้ จะใช้  
 ศิลปกรรมแห่งเทคโนโลยี (state-of-the-art) เพื่อสร้างเครื่องไตรเตรคแบบ  
 อัตโนมัติที่สามารถใช้งานได้ง่ายเพื่อหาสูตรการผลิตในการใส่สารตั้งต้นโดยไม่  
 ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเพื่อขยายองค์ความรู้ให้ประชาชนทั่วไปและเพื่อถ่ายทอด  
 เทคโนโลยีให้ชุมชนที่สนใจ อบต. อบจ. หรือ เทศบาลในระดับต่าง ๆ ทั่วประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิจัยสร้างเครื่องไตรเตรคแบบอัตโนมัติเพื่อหาสูตรการผลิตไบโอดีเซล  
 ชุมชนโดยไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ
2. เพื่อเผยแพร่เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นในวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 ให้เป็นองค์ความรู้  
 แก่หน่วยงานบริการชุมชนเช่น อบต. อบจ. หรือเทศบาลในระดับต่าง ๆ ทั่ว  
 ประเทศ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการใช้เครื่องไตรเตรคแบบอัตโนมัติเพื่อหาสูตรการผลิตไบโอดีเซลนี้ ผู้ใช้ต้อง  
 เตรียมสารตั้งต้นและอินดิเคเตอร์ ต้องเตรียมความเข้มข้นดังระบุกรรมวิธีตามข้อ  
 บ่งชี้ดังปรากฏในรายงานฉบับนี้ล่วงหน้าก่อนการทดสอบ ดังปรากฏในบท  
 ต่อไป

## บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วิธีการเตร็ดเตรดเพื่อทำไบโอดีเซล

#### ความหมายของการเตร็ดเตรด

การเตร็ดเตรด [1] คือ การหาปริมาณ หรือ ความเข้มข้นของ สารละลายที่ไม่ทราบค่า โดยเอาไปทำปฏิกิริยากับสารที่ทราบความเข้มข้น โดยทั่วไปจะเอากรดมาเตร็ดเตรดกับเบส ให้ทำปฏิกิริยาพอดีกัน โดยให้ดูจากอินดิเคเตอร์ที่ใส่ลงไป

#### วิธีหาปริมาณโซดาไฟที่ต้องใช้กับน้ำมันเก่าเพื่อผลิตไบโอดีเซล

วิธีการที่ปรากฏในหัวข้อย่อยนี้อ้างอิงจาก [2] ซึ่งได้จากประสบการณ์การทำวิจัยของ รศ. ดร. ชاکริต ทองอุไร แห่งสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืช มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งเป็นวิธีการเพื่อหาสูตรการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งควรจะรู้วิธีการวิเคราะห์ว่าน้ำมันเก่า/ใหม่ที่ใช้แล้วมีคุณภาพดีแค่ไหนเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการผสม เพื่อหาอัตราส่วนของแอลกอฮอล์กับตัวเร่งปฏิกิริยา(โซดาไฟ หรือ NaOH)ให้เหมาะสม โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

#### การวิเคราะห์กรดไขมันอิสระ

กรดไขมันอิสระที่หาไม่ได้บอกว่าน้ำมันหมดอายุ แต่เป็นการบอกคุณสมบัติ น้ำมันว่าเหมาะสม หรือต้องนำไปผ่านกระบวนการอะไรต่อไป ปกติน้ำมันบริโภคก็จะมีกรดไขมันอิสระต่ำ

ในการทำไบโอดีเซล กรดไขมันอิสระสูงทำให้เกิดสบู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาด่าง ดังนั้นมักวัดเพื่อตรวจสอบก่อนทำปฏิกิริยา คือถ้าต่ำกว่าขีดจำกัด ก็ทำทรานส์เอส

เตอริฟิเคชันได้เลย ถ้าสูงกว่า ก็ต้องหาทางขจัดกรดไขมันอิสระออกก่อน แล้วแต่จะเลือก การทำให้เป็นกลาง หรือ เอสเตอริฟิเคชัน

### สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ละลายในเอทิลแอลกอฮอล์) เข้มข้น 0.1 นอร์มอล สำหรับความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 4 กรัม ละลายใน น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร เก็บสารละลายต่าง ในขวดแก้ว
3. ฟีนอล์ฟทาลีนเข้มข้นร้อยละ 1

### วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแน่นอน 1-10 กรัม ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ให้เป็นกลาง โดยเติมฟีนอล์ฟทาลีน 5 หยด และปรับให้เป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล หยดค้างทีละหยด พร้อมทั้งเขย่าหรือคนจน ได้สีชมพูถาวร
3. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ที่เป็นกลาง 50 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่าง เขย่าอย่างแรงให้ตัวอย่างละลายในแอลกอฮอล์ ถ้าละลายได้ไม่ดีให้อุ่นที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส
4. ไตเตรทสารละลายตัวอย่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล ขณะไตเตรท ต้องเขย่าอย่างแรง จนกระทั่งได้สีชมพูคงที่อยู่ประมาณ 1 นาที
5. คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระจากสูตร

กรดไขมันอิสระร้อยละในรูปกรดโอเลอิก

$$= \text{ปริมาตรค้างที่ใช้ (มิลลิลิตร)} \times \text{ความเข้มข้นค้าง (นอร์มัล)} \times 28.2$$

$$\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}$$

หมายเหตุ นอร์มัล เป็นหน่วยความเข้มข้นครึ่ง หมายถึงสารละลาย 1 ลิตร มีตัวละลาย 1 กรัมสมมูล เช่น 1 โมล NaOH ก็เท่ากับ 1 กรัมสมมูล แต่ถ้าเป็น 1 โมล H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ก็เท่ากับ 2 กรัมสมมูล

ดังนั้น หากหาปริมาณกรดไขมันซึ่ง 1 โมล เท่ากับ 1 กรัมสมมูลเช่นกัน โดยใช้สารละลาย 0.1 N จำนวน 20 ml ก็เป็น ค่า NaOH เท่ากับ  $20/1000 \times 0.1$  เท่ากับ 0.002 กรัมสมมูล ซึ่งหมายถึงในตัวอย่างเรามีกรดไขมัน 0.002 กรัมสมมูล เช่นกัน ก็ต้องดูว่าตัวอย่างที่นำมาไตเตรทมีปริมาตรเท่าใด เช่นนำมา 10 ml ก็เทียบส่วนดูจะพบว่าถ้านำตัวอย่างมา 1000 ml ก็จะมีกรดไขมันเท่ากับ  $1000/10 \times 0.002 = 0.2$  กรัมสมมูล และหากมวลโมเลกุลกรดไขมันเท่ากับ 256 ก็จะมีกรดไขมันหนัก 51.2 กรัม ตัวอย่าง 1000 ml หนัก 910 กรัม ก็คิดเป็นกรดไขมัน  $51.2/910 \times 100 = 5.63\%$

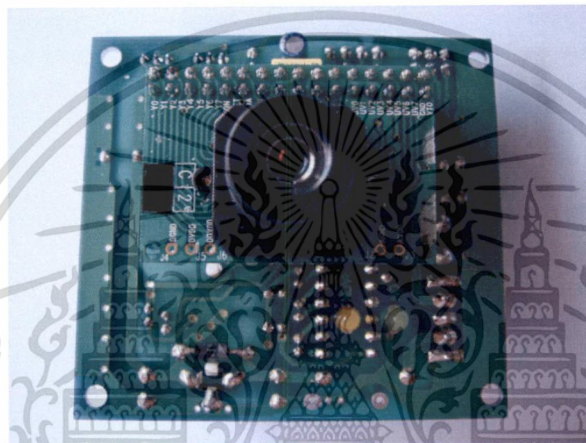
จากความรู้ทางด้านเคมีตามที่กล่าวมาแล้วในบทนี้ ในการหาสูตรการผลิตไบโอดีเซลนั้นพบว่า ไม่ง่ายต่อสมาชิกในชุมชนที่ไม่ได้มีพื้นฐานทางวิชาเคมีจะเข้าใจได้ ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงสร้างเครื่องมือการคำนวณสูตรดังกล่าวผ่านทัศนจักรอัตโนมัติเพื่อตรวจหาปริมาณกรดไขมัน เพียงแค่เขย่าแล้วนำมาเข้าเครื่องมือที่สร้างขึ้นเท่านั้น สำหรับสูตรการคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการทำไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้อ้างอิงจาก [3-5]

## 2.2 ระบบทัศนจักรช่วยไตเตรด

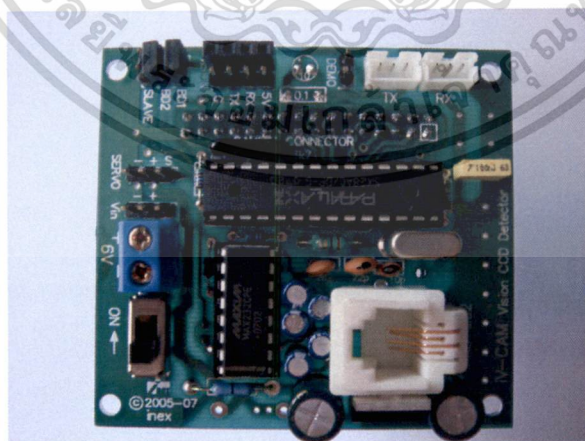
ส่วนประกอบที่สำคัญที่เป็นหัวใจหลักของงานวิจัยนี้คือ ระบบทัศนจักรที่แทนตามนุษย์โดยนำมาใช้สังเกตการณ์เปลี่ยนสีของสารละลายระหว่างการไตเตรด ซึ่งส่วนประกอบหลักก็คือ กล้องตรวจสอบสีซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยในการประมวลผลภาพสีของไมโครคอนโทรลเลอร์หรือคอมพิวเตอร์ ในการประมวลผลภาพนั้นต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถประมวลผลข้อมูลจำนวนมากได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภายในเวลาที่เร็วเพียงพอ ในรูปที่ 2 แสดงไดอะแกรมการทำงานของกล้องซึ่งมีอุปกรณ์หลักคือ โมดูลตรวจจับภาพสี ที่ให้ผลของการตรวจจับภาพและส่งออกมาเป็นข้อมูลดิจิทัลภายใต้การควบคุมผ่านระบบบัส I2C ข้อมูลจากโมดูลกล้องจะส่งมายังอุปกรณ์ประมวลผล ซึ่งก็คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ SX28AC ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ของ Ubicom ที่สามารถทำงานด้วยความถี่สูง ในโมดูลที่ใช้ ณ ที่นี้ มีความถี่สัญญาณนาฬิกาสูงถึง 75 MHz โดยมีโปรแกรมควบคุมการทำงานหรือเฟิร์มแวร์ (firmware) ลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ SX28AC



(ก)



(ข)

## รูปที่ 2 แผงวงจรของโมดูลกล้องที่ใช้ในงานวิจัย (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

# บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย

### 3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้มีระเบียบวิธีวิจัยดังต่อไปนี้

#### 3.1 ขั้นกำหนดคุณสมบัติพื้นฐานและฟังก์ชันพิเศษ

ในขั้นนี้ทีมวิจัยและนักศึกษาที่ปฏิบัติงานในส่วนหน้างาน และส่วนที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ตกลงวางแผนและกำหนดนิยามคุณสมบัติพื้นฐานและฟังก์ชันพิเศษร่วมกัน เพื่อให้ได้ระบบที่ตอบสนองตรงต่อความต้องการในการใช้งานบนพื้นฐานที่ถูกต้องและมีความเป็นไปได้ทางหลักทฤษฎีวิศวกรรม

#### 3.2 ขั้นศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในขั้นนี้เป็นการรวบรวมองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับระบบเพื่อทำการออกแบบเกี่ยวกับส่วนประกอบต่าง ๆ และการทำงานของเครื่อง

#### 3.3 ขั้นออกแบบ

ในขั้นนี้จะออกแบบระบบที่เกี่ยวข้อง

#### 3.4 ขั้นสร้างจริง

ขั้นนี้ลงมือทำการสร้างจริง

#### 3.5 ขั้นทดสอบ

ขั้นนี้ทดสอบการทำงานและประเมินผล

โดยอาศัยระเบียบวิธีวิจัยในเบื้องต้นของบทนี้นำไปสู่ผลที่ได้ในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การสร้างอุปกรณ์ผลการทดสอบเบื้องต้น

### การเขียนโปรแกรมเพื่อใช้งานพอร์ตอนุกรมโดยผ่านโปรแกรม Visual Basic 6.0

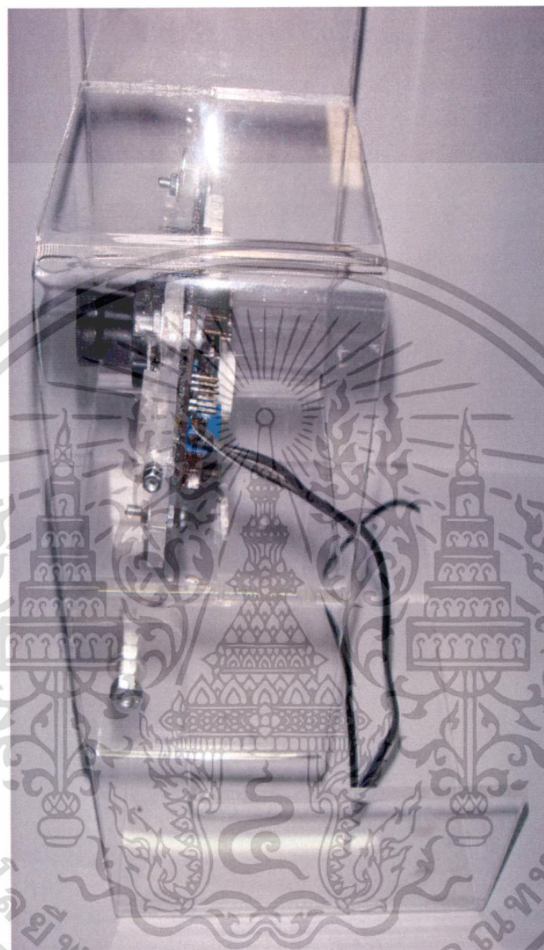
การเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อกับพอร์ตอนุกรม โดยใช้ Visual Basic 6.0 ผ่านการใช้คอนโทรล MSCOMM32.OCX

MSComm จัดเตรียมทางเลือกเอาไว้ 2 ทางเพื่อความสะดวกในการสื่อสารข้อมูล ทางแรก คือ การสื่อสารข้อมูลที่กระตุ้นด้วยเหตุการณ์ (event-driven communications) เป็นรูปแบบการใช้งานที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับการตอบสนองแบบทันทีทันใด เช่น เมื่อตัวอักษรถูกส่งมาที่พอร์ตอนุกรมหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขา Data Carrier Detect (DCD) หรือขา Request To Send (RTS) เหตุการณ์ Oncomm ของ MSComm จะสามารถตรวจจับสัญญาณนั้นได้ทันที ส่วนทางเลือกที่สองเป็นการคอยตรวจสอบค่าเหตุการณ์และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยการดูค่าที่เปลี่ยนแปลงภายในคุณสมบัติ CommEvent หลังจากให้โปรแกรมทำงานในฟังก์ชันต่างๆ ไปเรียบร้อยแล้ว ซึ่งวิธีนี้ใช้งานได้ดีในกรณีที่โปรแกรมมีขนาดเล็ก

คอนโทรล MSComm 1 ตัว สามารถควบคุมการทำงานของพอร์ตอนุกรมได้ 1 พอร์ต ถ้าในโปรแกรมที่ใช้งานต้องการติดต่อกับพอร์ตอนุกรมมากกว่า 1 พอร์ตจะต้องใช้คอนโทรล MSComm มากกว่า 1 ตัว เพื่อควบคุมพอร์ตอนุกรมในแต่ละพอร์ต แอคเตสของพอร์ตอนุกรมและแอคเตสของการเกิดอินเตอร์รัปต์สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการแก้ไขค่าที่ Control Panel

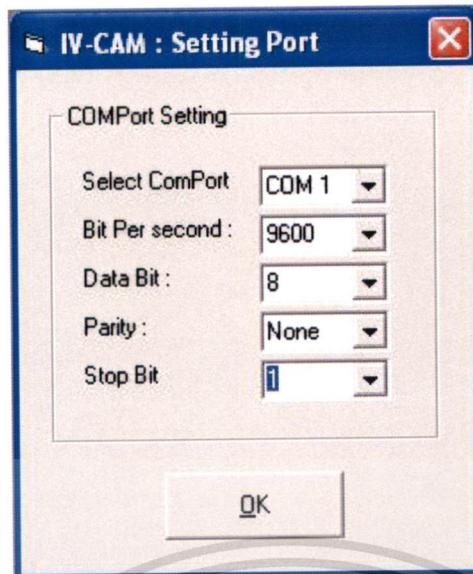
### การทดลองเพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ทัศนจักร

เมื่อนำโมดูล IV-CAM มาประกอบกับโครงสร้างของพลาสติกอะคริลิก จะมีรูปร่าง ดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนการเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อจะใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 เชื่อมต่อผ่านทางพอร์ตอนุกรม (RS-232) โดยใช้ผ่านคอนโทรล MSCOMM32.OCX ของโปรแกรม Visual Basic 6.0 ดังแสดงรูปที่ 4

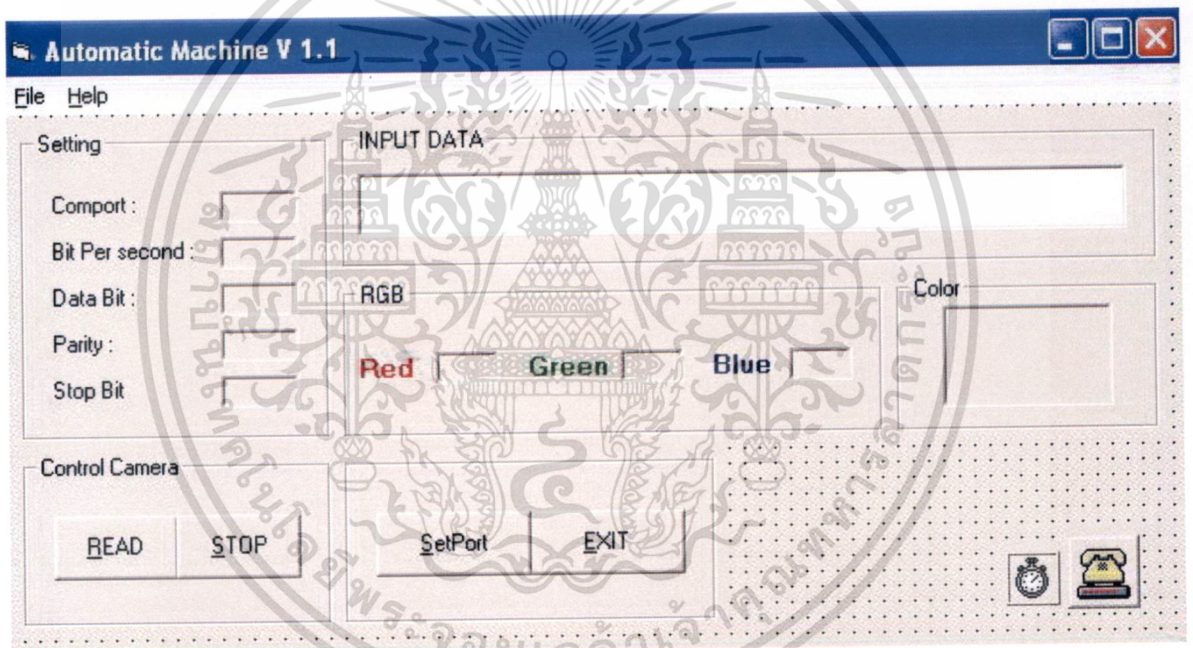


รูปที่ 3 รูปด้านข้างของอุปกรณ์ทัศนจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
**วิธีดำเนินการและผลการวิจัย**



(ก) หน้าแรกของโปรแกรมสำหรับการ Set Port



(ข) หน้าจอหลักของโปรแกรม

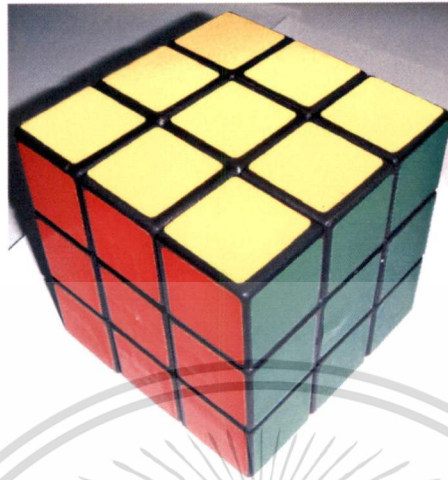
#### รูปที่ 4 โปรแกรมที่สร้างขึ้นจาก Visual Basic 6.0 เพื่อเชื่อมต่อผ่านพอร์ตอนุกรม

การทดลองของโมดูลกล้อง IV-CAM จะแบ่งการทดลองเป็น 2 แบบ คือ แบบแรกหรือการทดลองที่ 1 จะเป็นการทดลองโมดูลกล้อง IV-CAM ตรวจจับสี จากลูกบาศก์ของสีแต่ละด้านของลูกบาศก์ดังรูปที่ 5 เพื่อทดสอบความเที่ยงตรง ของค่าสี และแบบที่สองหรือการทดลองที่สองคือ การตรวจจับสีของโมดูลกล้อง IV-CAM ผ่านของเหลว นั่น ตัวอย่างของเหลวที่ได้นำมาทดลองคือ น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วิธีดำเนินการและผลการวิจัย**

**การทดลองที่ 1:** การตรวจจับสีของโมเดลลูกบาศก์ IV-CAM จากสีของลูกบาศก์แต่ละด้าน



รูปที่ 5 ลูกบาศก์สีที่ใช้ในการทดลอง

ผลการทดลองที่ 1

สีของลูกบาศก์ / ค่าสีที่กล้องจับได้	สีแดง (Red)			สีเขียว (Green)			สีน้ำเงิน (Blue)		
	ค่าน้อยสุด	ค่ามากที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าน้อยสุด	ค่ามากที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าน้อยสุด	ค่ามากที่สุด	ค่าเฉลี่ย
สีขาว	124	127	125.5	134	137	135.5	121	122	121.5
สีแดง	134	135	134.5	49	50	49.5	38	41	39.5
สีเขียว	34	35	34.5	89	90	89.5	54	55	54.5
สีน้ำเงิน	22	22	22	61	61	61	104	105	104.5
สีเหลือง	89	90	89.5	167	167	167	40	41	40.5
สีม่วง	83	84	83.5	41	42	41.5	43	44	43.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วิธีดำเนินการและผลการวิจัย**

## การทดลองที่ 2: การตรวจจับสีของเหลวโดยระบบทัศนจักร



รูปที่ 6 สีผสมสำหรับของเหลวที่ใช้ในการทดลอง

### ผลการทดลองที่ 2

สีของของเหลว / ค่าสีที่กล้องจับได้	สีแดง (Red)			สีเขียว (Green)			สีน้ำเงิน (Blue)		
	ค่าน้อยสุด	ค่ามากที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าน้อยสุด	ค่ามากที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าน้อยสุด	ค่ามากที่สุด	ค่าเฉลี่ย
สีขาว	95	96	95.5	191	192	191.5	134	135	134.5
สีแดง	139	140	139.5	53	53	53	29	29	29
สีเขียว	29	30	29.5	141	142	141.5	96	97	96.5
สีน้ำเงิน	38	39	38.5	37	38	37.5	103	104	103.5
สีเหลือง	89	91	90	151	152	151.5	46	47	46.5
สีม่วง	98	100	99	80	81	80.5	84	85	84.5
สีชมพู	157	158	157.5	121	122	121.5	77	78	77.5

จากการทดลองที่ 1 และ 2 สรุปได้ว่า การตรวจจับสีของโมดูลกล้อง IV-CAM สามารถตรวจจับสีของวัตถุที่นำมาทดลองในที่นี้ก็คือ สีของลูกบาศก์แต่ละด้านและสีของน้ำซึ่งเป็นของเหลว นำมาประมวลผ่านโปรแกรม Visual Basic ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีดำเนินการและผลการวิจัย

เขียนขึ้นได้อย่างถูกต้องและมีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นน้อย ซึ่งค่าของความผิดพลาดนั้นมาจากปัจจัยของเรื่องแสงที่ส่องเข้ามาในระหว่างการทดลองและระยะทางของกล้องกับวัตถุที่ต้องการตรวจจับสี รวมทั้งการปรับโฟกัสของกล้องด้วย จากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าส่วนประกอบของระบบทัศนจักรในส่วนของการมองเห็นนั้นสามารถนำมาใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนสีของสารละลายจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ในเบื้องต้นโดยอนุมานสีต่าง ๆ ประจุการแยกแยะสีของสารละลายในช่วงก่อนและหลังทำปฏิกิริยา ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบระบบอัตโนมัติเพื่อใช้นับหยดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลอินเพื่อตรวจหาจุดยุติของการทำไตเตรตหาจำนวนกรดไขมันสำหรับสารตั้งต้นของปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนน้ำมันพืชใช้แล้วให้เป็นน้ำมันไบโอดีเซล

### 3.3 ผลการทดสอบระบบหยดสารละลายอัตโนมัติ

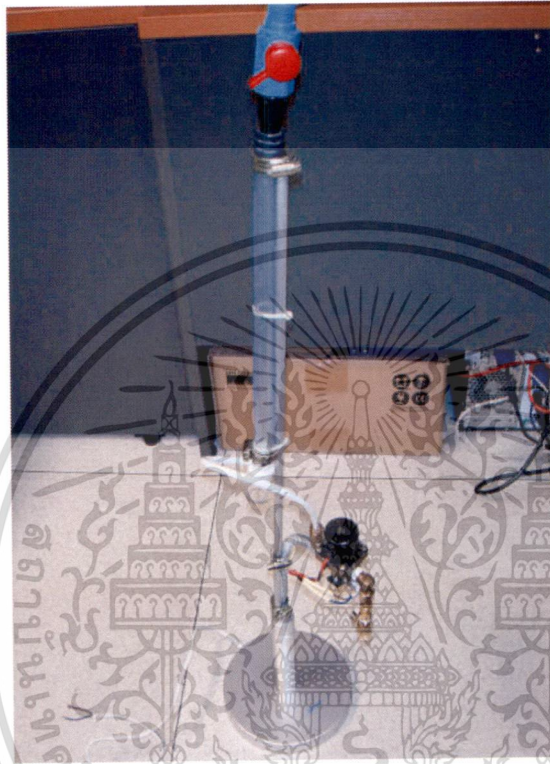
ในระบบหยดสารละลายโดยอัตโนมัติ ผู้วิจัยออกแบบวงจรควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมโซลินอยด์เพื่อเปิดปิดการปล่อยสารละลาย NaOH จากหลอดบรรจุที่สร้างขึ้นเอง โดยเลียนแบบการทำงานของปีเปตและเครื่องมือตรวจสอบมาตรฐานดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 หลอดบรรจุสารละลาย NaOH และระบบนับหยดอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วิธีดำเนินการและผลการวิจัย**



รูปที่ 8 ภาพมุมกว้างของหลอดบรรจุสารละลาย NaOH

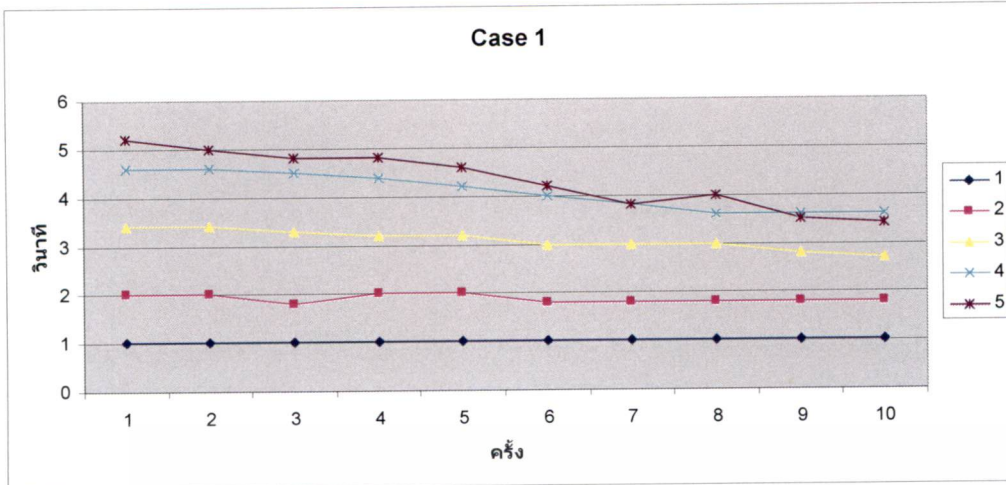
ผลการทดสอบโดยใช้การปิดฝาครอบด้วยวัสดุต่าง ๆ ให้ผลการปรับแต่งค่าตามการนับเวลาการหยด 1-5 วินาทีต่อครั้ง ดังกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- กรณีที่ 1 อุดท่อบรรจุสารละลายด้วยฟองน้ำ
- กรณีที่ 2 อุดท่อบรรจุสารละลายด้วยกระดาษพรอยด์
- กรณีที่ 3 ไม่อุด
- กรณีที่ 4 เปิดวาล์วโดยใช้วาล์วเสริมบังคับปิดที่ 45 องศา

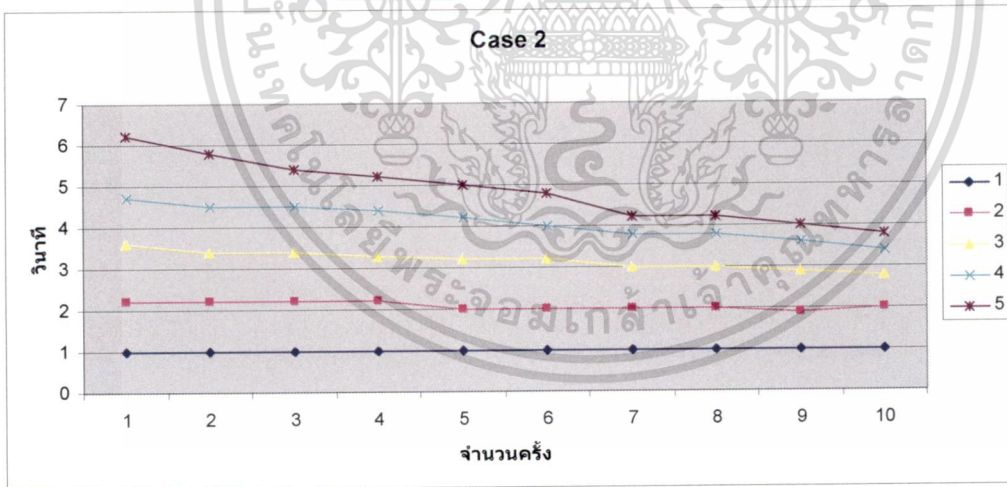
ผลการทดสอบแสดงดังกราฟตามรูปที่ 9-12 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธิดำเนินการและผลการวิจัย



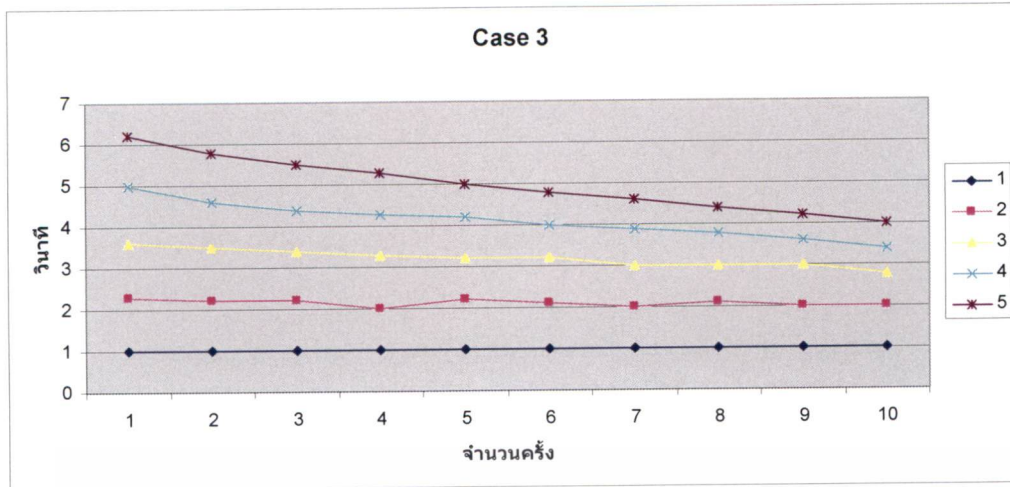
**รูปที่ 9** ผลการทดลองเงื่อนไขกรณีที่ 1 ตัวเลข 1-5 ระดับที่ต่างกันบอกถึงอัตราการหยุดของสารละลายในหน่วย วินาที/ครั้งที่ใช้ในการหยุด



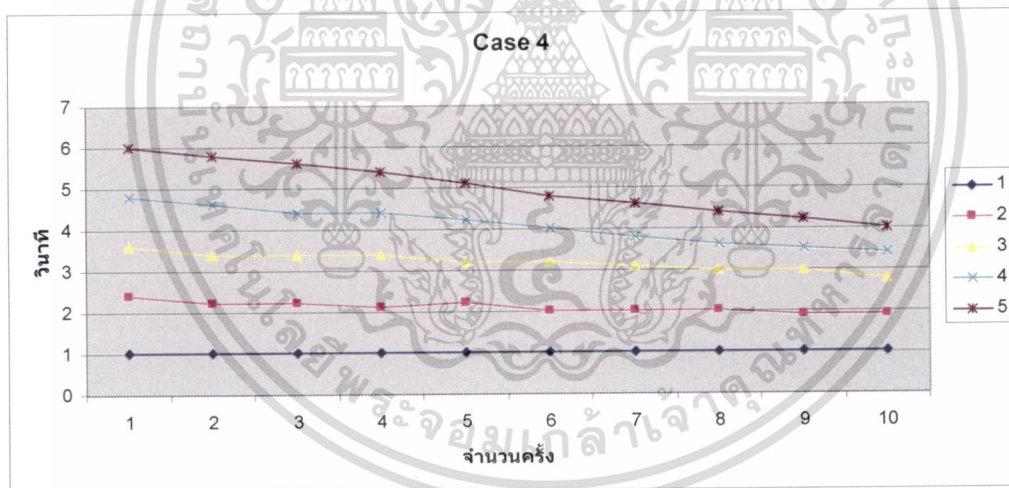
**รูปที่ 10** ผลการทดลองเงื่อนไขกรณีที่ 2 ตัวเลข 1-5 ระดับที่ต่างกันบอกถึงอัตราการหยุดของสารละลายในหน่วย วินาที/ครั้งที่ใช้ในการหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วิธีดำเนินการและผลการวิจัย**



รูปที่ 11 ผลการทดลองเงื่อนไขกรณีที่ 3 ตัวเลข 1-5 ระบุสีที่ต่างกันบอกถึงอัตราการหยุดของสารละลายในหน่วย วินาที/ครั้งที่ใช้ในการหยุด



รูปที่ 12 ผลการทดลองเงื่อนไขกรณีที่ 4 ตัวเลข 1-5 ระบุสีที่ต่างกันบอกถึงอัตราการหยุดของสารละลายในหน่วย วินาที/ครั้งที่ใช้ในการหยุด

จากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้โดยง่ายว่า การใช้กระดาษฟรอยด์ในการปิดปลายอีกด้านหนึ่งของหลอดบรรจุสารละลายต่างเพื่อใช้ในการคำนวณปริมาตรที่ใช้จนถึงจุดยุคนั้น เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดและปฏิบัติได้ง่าย จึงใช้กระบวนการนี้ตลอดไปในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

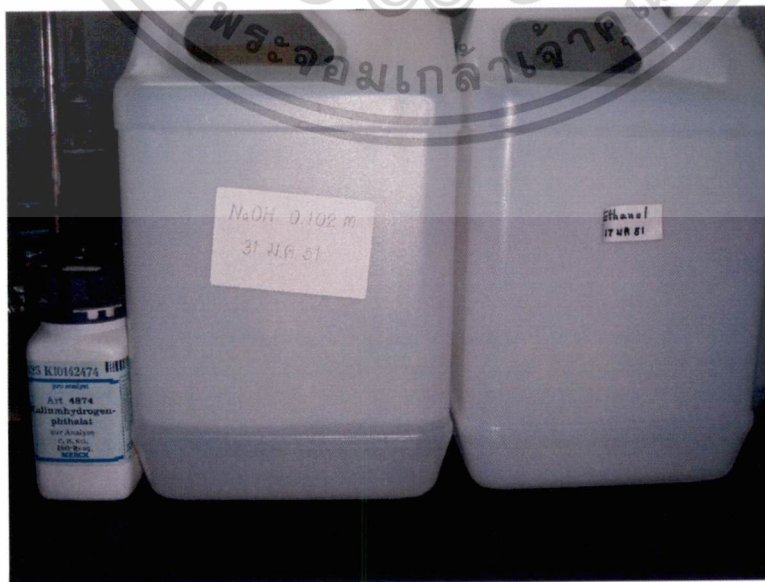
**วิธีดำเนินการและผลการวิจัย**

### 3.4 การทดสอบระบบไตเตรดไบโอดีเซลชุมชนอัตโนมัติ

การทำไตเตรดแบบอัตโนมัติใช้น้ำมันจากขั้นตอนดังแสดงในบทที่ 2 เพียงแต่เปลี่ยนขั้นตอนการทำโดยอาศัยผู้ที่ได้รับการฝึกฝนมาเป็นการใช้ระบบอัตโนมัติมาช่วยงาน น้ำมันใช้แล้วที่ผู้ใช้วิจัยหาได้ซื้อมาจากตามหมู่บ้านในเขตกรุงเทพมหานคร ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยเตรียมแอลกอฮอล์ตั้งต้นดังรูปที่ 14



รูปที่ 13 น้ำมันใช้แล้วเป็นวัตถุดิบตั้งต้นใช้ในการตรวจสอบเพื่อทำตรวจหากรดไขมันอิสระเพื่อใช้คำนวณสูตรการทำไบโอดีเซล



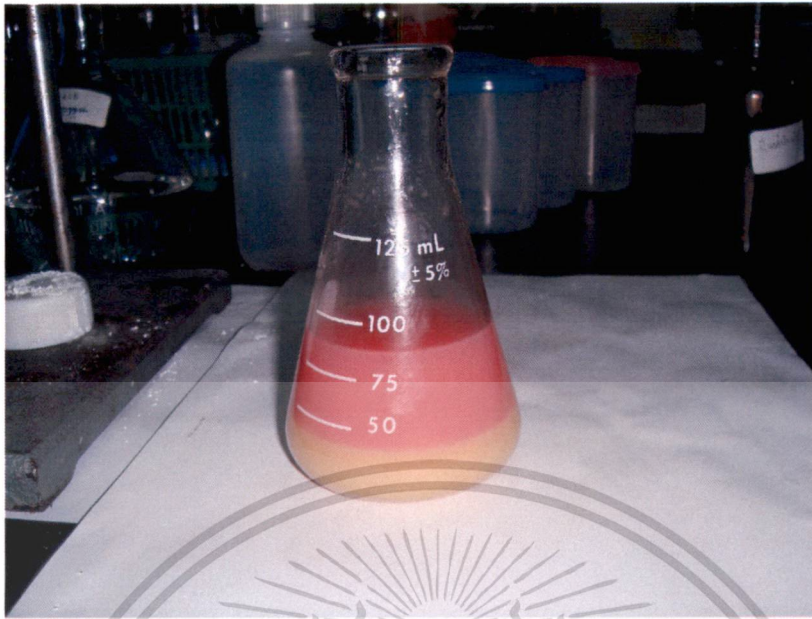
รูปที่ 14 แอลกอฮอล์ตั้งต้นและฟีนอล์ฟทาลินที่ใช้ในกระบวนการไตเตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงพาณิชย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วิธีดำเนินการและผลการวิจัย

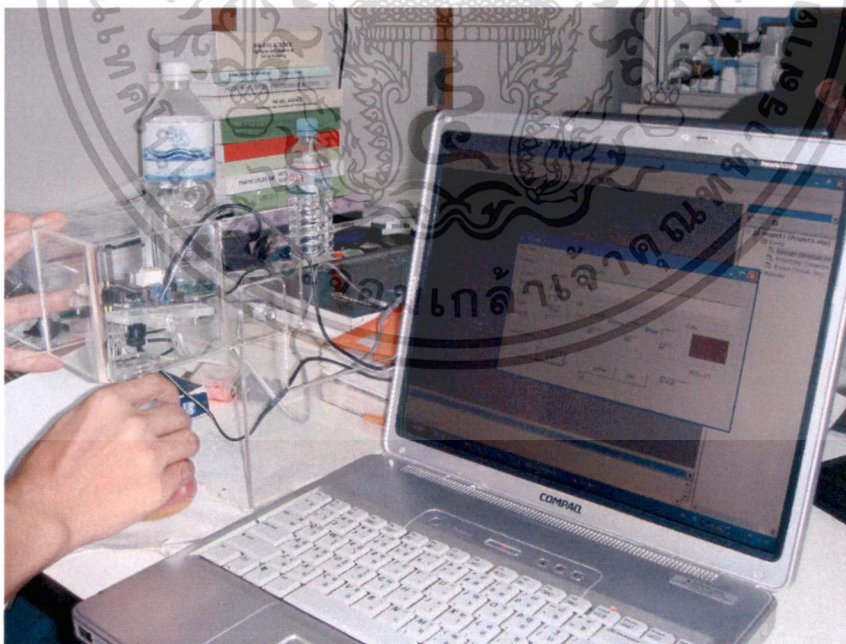
โดยปกติแล้วขั้นตอนการทำงานไตรเตรคจะเป็นแบบ “หยุดแล้วเขย่า” โดยใช้มือ (ดูหน้า 7 ของภาคผนวก ข) แต่ในงานวิจัยนี้การเขย่าจะใช้เครื่องเขย่าอัตโนมัติ เครื่องในรูปที่ 15 จะทำการเขย่าเพื่อให้สารละลายต่าง เป็นเนื้อเดียวกันกับสารละลายอินดิเคเตอร์ จนกว่าสีชมพูของจุดยุติจะปรากฏดังรูปที่ 16 เครื่องจะยุติต้นและคำนวณค่ากรดไขมัน โดยอัตโนมัติซึ่งค่าสีชมพูที่ได้นี้ส่งผ่านจากส่วนระบบทัศนจักรอันประกอบด้วยกล้องและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปยังคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 17 ซึ่งค่ากรดไขมันนี้ใช้ในการคำนวณค่าที่นำมาเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจากตัวอย่างในรูปนี้ค่ากรดไขมันเท่ากับ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีกรดไขมันต่ำเนื่องจากวัตถุดิบที่ได้มีคุณภาพดีเป็นน้ำมันเหลือทิ้งจากบ้านซึ่งเหมาะกับการทำไบโอดีเซล ผู้วิจัยขอสงวนสิทธิในการเผยแพร่ภาพการประดิษฐ์โดยละเอียดเนื่องจากอยู่ระหว่างการยื่นจดอนุสิทธิบัตรไทย



รูปที่ 15 ด้านข้างเครื่องเขย่าอัตโนมัติ



รูปที่ 16 เมื่อถึงจุดยุติสารละลายอินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนเป็นสีชมพู ทดลองจากห้องปฏิบัติการ รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา ชั้น 6 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สจล.



รูปที่ 17 ค่าสีชมพูที่ได้ระบุการยุติการทำไตเตรต ส่งผ่านค่าที่อ่านได้จากกล่องมายังพอร์ต RS232 ของคอมพิวเตอร์เพื่อกำหนดหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันเพื่อเข้าสู่สูตรการคำนวณ โดยอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วิธีดำเนินการและผลการวิจัย**

# บทที่ 4

## อภิปรายผลการวิจัย สรุปผลและ

### ข้อเสนอแนะ

#### 4.1 อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดสอบเบื้องต้นของระบบทัศนจักรที่ใช้แทนการมองการเปลี่ยนสีของสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน จากสีใสเป็นสีชมพูนั้น ในการทดลองที่ 1 เป็นการพิสูจน์การนำค่าสีที่ได้จากกล้องมาใช้ ซึ่งระบบทัศนจักรดังกล่าวสามารถหาวัสดุและกล้องที่เป็นส่วนประกอบมาสร้างตามหรือประยุกต์ใช้ได้จากชุมชนทั่วไป กล้อง จากผลการทดลองที่ 2 ดังแสดงในรูปตารางจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยสีของฟีนอล์ฟทาลีนที่ใสโดยมีพื้นขาวจากภาชนะรองแก้วมีค่าเท่ากับ 95.5 ซึ่งเป็นค่าที่กล้องส่งให้กับโปรแกรมที่เขียนขึ้น และเมื่อถึงจุดยุติฟีนอล์ฟทาลีนจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู มีค่าสีที่ค่าจากโปรแกรมรับมาเท่ากับ 157.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ต่างระหว่างค่าสีทั้งสองต่างกัน 69 หน่วย ซึ่งเพียงพอต่อการใช้ค่าสีนี้เป็นจุดสับเปลี่ยนเพื่อเริ่มโปรแกรมการคำนวณค่ากรดไขมันเพื่อใช้เป็นค่าตั้งต้นในการคำนวณสูตรการผลิตไบโอดีเซล

จากรูปที่ 9-12 หากไม่ได้ตรวจสอบรายละเอียดจะมองเห็นความสัมพันธ์ในแง่ของการเปรียบเทียบสมรรถนะได้ยาก เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูลจากกราฟสามารถนำมาย่อวิเคราะห์ได้ดังตารางเหล่านี้ในรูปค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง

วนาที/ครั้ง	ฟองน้ำ	ฟรอยด์	ไมปิด	เปิดวาล์ว 45 องศา
1	1	1	1	1
2	1.88	2.07	2.11	2.09
3	3.1	3.18	3.2	3.21
4	4.09	4.09	4.12	4.07
5	4.33	4.86	4.98	4.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางช่วยในการวิเคราะห์เมื่อตรวจสอบปริมาตรเทียบกับเวลาต่อครั้ง พบว่า การที่จะบังคับค่าจำนวนวินาทีต่อครั้งในการหยด 1 หยดให้ได้ 1 มิลลิลิตร นั้น การปิดโดยใช้ฟรอยด์จะให้ค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย ดังกล่าว ซึ่งจะเป็นได้ว่าค่าที่ถูกต้องจะต้องทำการตั้งค่าใหม่ในทุก ๆ 5 วินาที

หลังจากที่ได้ทำการปรับแต่งค่าจากการหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าว เมื่อทำการทดสอบทั้งระบบจะเห็นได้จากรูปที่ 16-17 จะพบว่าค่าที่ทำไต่เรตโดยวิธีใช้ผู้เชี่ยวชาญกับวิธีที่ใช้ระบบอัตโนมัติที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ให้ค่าได้ใกล้เคียงกัน

## 4.2 สรุปผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างเครื่องไต่เรตใบ โอติเซลอัตโนมัติเชิงปัญญา เพื่อใช้ในชุมชน ประโยชน์ที่ได้คือการทำไต่เรตน้ำมันพืชใช้แล้วซึ่งเป็นวัตถุดิบในการทำใบโอติเซลเชิงชุมชน เครื่องอัตโนมัติดังกล่าวใช้ระบบทัศนจักรอันประกอบด้วยกล้องและวงจรถ่ายภาพ ซึ่งทำงานร่วมกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งควบคุมการผสมละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับวัตถุดิบตั้งต้นให้เกิดความเที่ยงตรงในการอ่านค่าสี โดยกระบวนการเหล่านี้ทดแทนการใช้ผู้เชี่ยวชาญ การจับภาพของกระบวนการไต่เรตจะยุติเมื่อสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนเปลี่ยนเป็นสีชมพู ได้ผลเป็นที่น่าพอใจเนื่องจากการระบุค่าสีและย่านความถูกต้องมีความกว้างเพียงพอที่จะระบุจุดยุติได้อย่างถูกต้อง งานวิจัยนี้มีศักยภาพพัฒนาไปสู่การขยายผลในวงกว้างและสามารถพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์ได้ดังได้แสดงความสำเร็จเบื้องต้นจากงานวิจัยนำร่องครั้งนี้

## 4.3 ข้อเสนอแนะ

เพื่อพัฒนาระบบการไต่เรตใบ โอติเซลอัตโนมัติให้ดีขึ้น อาจทำการปรับปรุงระบบได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**อภิปรายผลการวิจัย สรุปผล และข้อเสนอแนะ**

(1) เพื่อกันการรบกวนของแสงจากสิ่งแวดล้อมอาจสร้างห้องถ่ายภาพเป็นแบบปิดครอบระบบทัศนจักรเพื่อป้องกันการคาดเคลื่อนหรือความเพี้ยนของสีที่ตรวจจับและส่งมาประมวลผลภาพ

(2) ระบบจุกพรอยด์ในส่วนการหยุดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อัตโนมัติอาจประยุกต์โดยใช้วัสดุที่หาได้จากในท้องถิ่นเพื่อทำการคำนวณแบบแต่ละหยดต่อมิลลิลิตร ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับการจัดเตรียมวัสดุในท้องถิ่นของชุมชนที่ผลิตไบโอดีเซลนั้น ๆ

(3) หากน้ำมันใช้แล้วสกปรกและปนเปื้อนมาก ควรมีการกรองน้ำมันก่อนนำมาทดสอบและก่อนการผลิต

(4) ระบบการเขย่าหรือระบบการสั่นควรติดตั้งระบบยางเพื่อลดคลื่นโหมดการสั่นที่อาจจะส่งกระตุ้นให้เกิดการสั่นพ้องหรือการอกินาของการสั่นซึ่งอาจส่งผลการกระเด็นของสารเคมีออกจากภาชนะ



## บรรณานุกรม

- [1] sudipan, “ความหมายของการไตรเตรต.” [Online]. Available :  
<http://www.sudipan.net/phpBB2/viewtopic.php?p=3155>
- [2] ชาคริต ทองอุไร  
<http://www.vcharkarn.com/include/vcafe/showkratoo.php?Pid=20969&page=7>
- [3] J. Van Gerpen, B. Shanks, and R. Pruszko, D. Clements, and G. Knothe, “Biodiesel Production Technology”, Report from Iowa State University for the National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-510-36244, July 2004.
- [4] J. Van Gerpen, “Business Management for Biodiesel Producers”, Report from Iowa State University for the National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-510-36242, July 2004.
- [5] S. Hobbs, “Bio-diesel, farming for the future”, Presentation to the 11<sup>th</sup> Australian Agronomy Conference, 2003.



**ภาคผนวก ก**

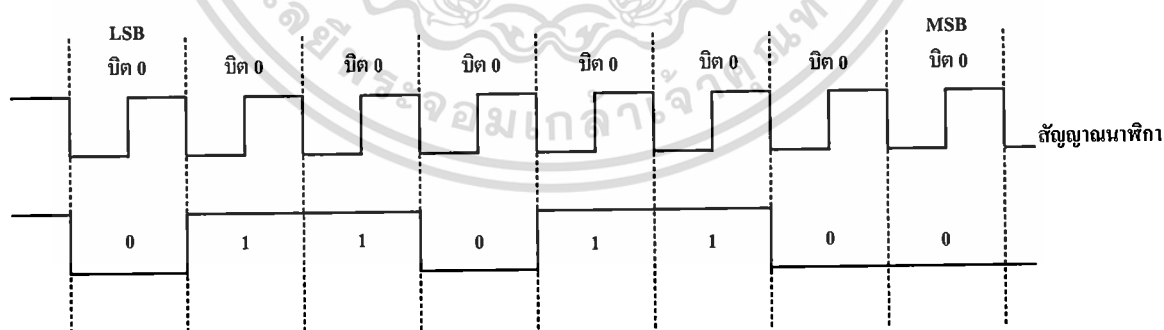
**โปรโตคอลและการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนี้ให้ไว้เพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้สื่อสารระหว่างอุปกรณ์ใดตรงกับส่วนประมวลผล  
ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ข้อเขียนในบทนี้อ้างอิงจากงานของ อรรถพล บุญยะ โภคาม  
, วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. “เรียนรู้และปฏิบัติการเชื่อมต่อ  
คอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตอนุกรม”, บริษัท อินโนเวทีฟ เอ็กเพอริ  
เมนต์ จำกัด แสดง ณ ที่นี้เพื่อความสะดวกและต่อเนื่องในการอ่านประกอบการ  
เรียนรู้ของผู้อ่านรายงานวิจัยเท่านั้น มิได้มีความมุ่งหวังทางการค้าหรือหา  
ผลประโยชน์ใด ๆ ผู้ที่สนใจสามารถศึกษาได้จากต้นฉบับ

### การสื่อสารแบบอนุกรม

การสื่อสารแบบอนุกรมนั้นจะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือการสื่อสาร  
อนุกรมแบบซิงโครนัสและการสื่อสารอนุกรมแบบอะซิงโครนัส การสื่อสารแบบ  
ซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิกา ร่วมอยู่กับการรับและส่งสัญญาณด้วย ตัวอย่างการ  
ส่งข้อมูลแบบซิงโครนัสก็คือคีย์บอร์ดของคอมพิวเตอร์ ซึ่งสายเส้นหนึ่งจะเป็นจะ  
เป็นสายสัญญาณนาฬิกา ส่วนสายอีกเส้นจะเป็นสายของข้อมูล ดังนั้นการ  
ติดต่อกันแบบซิงโครนัสนี้จะต้องใช้สายในการเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุด 3 เส้นคือ  
สัญญาณนาฬิกา ข้อมูลและกราวด์ รูปที่ ผ1 แสดงให้เห็นถึงไทม์มิ่งไคอะแกรมของ  
การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส



รูปที่ ผ1 รูปแบบอย่างง่ายสุดของข้อมูลอนุกรม

## การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส คือ การรับและส่งข้อมูลไปในสาย โดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณพิการ่วมด้วยเหมือนกับการรับส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส แต่จะใช้การกำหนดค่าสัญญาณพิกาทิ้งภาครับและภาคส่งให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งเรียกสัญญาณพิกาที่ใช้ในการกำหนดค่าให้ภาครับและภาคส่งนี้ว่า อัตราการถ่ายทอดข้อมูล หรือ บอดเรต (Baud rate) มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที (bit per secone : bps)

รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งแบบอะซิงโครนัสประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ

1. บิตเริ่มต้น (Start Bit) ซึ่งจะมีขนาด 1 บิต
2. บิตข้อมูลแบบอนุกรมจะมีขนาด 5,6,7 หรือ 8 บิต
3. บิตตรวจสอบพาริตี (Parity Bit) จะมีขนาด 1 บิตหรือไม่มี
4. บิตปิดท้าย (Stop Bit) จะมีขนาด 1,1.5 หรือ 2 บิต

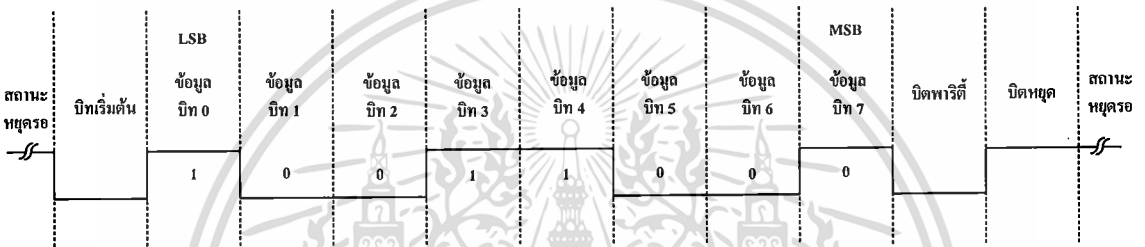
รูปที่ ๗2 แสดงรูปแบบของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส เมื่อไม่มีข้อมูลที่จะส่ง ขา DATA จะมี

สถานะลอจิก “1” ซึ่งจะเรียกสถานะนี้ว่า สถานะหยุดรอ (Waiting Stage) การเริ่มต้นส่งข้อมูลจะเริ่มจากการให้ขา DATA มีลอจิก “0” ด้วยช่วงระยะเวลา 1 บิตเรียกบิตนี้ว่า บิตเริ่มต้น จากนั้นบิตข้อมูลจะถูกส่งออกไป โดยเริ่มจากบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (LSB) ก่อน ซึ่งข้อมูลในไบต์ที่จะส่งอาจจะมีจำนวนบิต 5,6,7 หรือ 8 บิตก็ได้ จากนั้นตามด้วยบิตพาริตี ซึ่งใช้เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งข้อมูล บิตสุดท้ายที่ส่งคือ บิตปิดท้าย ซึ่งจะให้ขา DATA มีสถานะลอจิก “1” อีกครั้งด้วยระยะเวลาอย่างน้อย 1 บิต , 1.5 บิต หรือ 2 บิต เพื่อเป็นการแสดงว่าสิ้นสุดข้อมูลแล้ว

อุปกรณ์พิเศษที่ได้รับการออกแบบมาสำหรับการรับและส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสเรียกว่า Universal Asynchronous Receiver/Transmitter หรือ UART อัตราความเร็วในการรับและส่งข้อมูลของการรับส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสคือค่าบอดเรต ซึ่งก็คือค่าจำนวนบิตต่อวินาทีที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูล บอดเรตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพอร์ตอนุกรม RS-232 ได้แก่ 110, 150, 300, 600, 1200,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2400, 4800, 9600 และ 19200 บิตต่อวินาที และมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเทคโนโลยีของคอมพิวเตอร์ ซึ่งการรับส่งแบบอนุกรมโดยไม่ผ่านโมเด็มอาจจะสามารถกำหนดค่าบอดเรตได้สูงถึง 115200 บิตต่อวินาที เนื่องจากบอดเรต คือ จำนวนบิตของข้อมูลที่สามารถถ่ายทอดได้ภายใน 1 วินาที ยกตัวอย่าง ข้อมูลอนุกรมถูกส่งในลักษณะ 8 บิต ไม่มีการตรวจสอบพาริตี มีบิตเริ่มต้น 1 บิตและบิตปิดท้าย 1 บิต ความยาวของข้อมูลที่ได้รับส่งนี้เท่ากับ 10 บิต ถ้าใช้บอดเรตในการส่งข้อมูลเท่ากับ 9600 บิตต่อวินาที ก็จะสามารรับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 960 ไบต์ต่อวินาที และถ้ามีการใช้พาริตีความเร็วในการรับส่งข้อมูลจะเหลือเป็น 872 ไบต์ต่อวินาที



## รูปที่ ผ2 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส

การตรวจสอบพาริตีสามารถกำหนดให้เป็นแบบคี่ (Odd) ,แบบคู่ (even) หรือไม่มีการตรวจสอบพาริตีก็ได้ การตรวจสอบพาริตีเป็นการตรวจสอบจำนวนรวมของบิตที่เป็นลอจิก “1” ภายในข้อมูลที่ส่งไป 1 ไบต์ว่าจำนวนรวมเป็นเลขคู่หรือเลขคี่ โดยต้องรวมบิตพาริตีเข้าไปด้วย ยกตัวอย่าง ข้อมูลที่จะทำการส่งมีขนาด 8 บิตและมีค่าเท่ากับ 99 ฐานสิบหก หรือ 10011001 ฐานสอง จะเห็นว่าข้อมูลในไบต์นี้จำนวนลอจิก “1” จำนวน 4 ตัวซึ่งเป็นเลขคู่ ดังนั้นถ้ากำหนดค่าพาริตีเป็นเลขคู่ค่าในพาริตี จะต้องมิลอจิก “0” แต่ถ้าพาริตีเป็นคี่ ค่าพาริตีจะต้องเป็น “1” เพื่อให้ข้อมูล 1 ไบต์รวมทั้งบิตพาริตีจำนวนบิตที่เป็นลอจิก “1” รวมกันเป็นเลขคี่ ในตารางที่ ผ 1 แสดงตัวอย่างของบิตพาริตีในการรับส่งข้อมูลอนุกรม

ข้อมูล	บิตพาริตีคู่	บิตพาริตีคี่
00000000	0	1
00000001	1	0
00000010	1	0
00000011	0	1
00000100	1	0
11111110	1	0
11111111	0	1

ตารางที่ ผ1 บิตพาริตีของข้อมูล

บิตพาริตีถูกสร้างขึ้นจากภาคส่งข้อมูลของ UART โดยภาครับจะต้องกำหนดคุณสมบัติการตรวจสอบพาริตีให้ตรงกันว่า จะตรวจสอบพาริตีคี่หรือคู่ จากนั้นภาครับของ UART จะตรวจสอบค่าพาริตีที่เกิดขึ้นว่าเป็นคู่หรือเป็นคี่ โดยการนับจำนวนลอจิก “1” ทั้งหมดรวมทั้งบิตพาริตีด้วย ถ้ากำหนดพาริตีไว้เป็นคู่ แต่อ่านค่าตัวเลขในการนับออกมาได้ตัวเลขเป็นคี่ ทางภาครับจะแจ้งข้อผิดพลาดให้ผู้รับทราบ นับเป็นการตรวจสอบความผิดพลาดของการถ่ายทอดข้อมูลที่ง่ายที่สุด แต่จะเชื่อถือได้เมื่อมีบิตข้อมูลที่ทำการส่งผิดพลาดเพียงบิตเดียวเท่านั้น ถ้าข้อมูลที่ส่งมีบิตที่ผิดพลาดมากกว่า 1 บิต การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะไม่ได้ผล สำหรับการตั้งพาริตีบิตเป็น NONE นั้นทั้งภาครับและภาคส่ง จะไม่มีการตรวจสอบพาริตี

คอมพิวเตอร์ในรุ่น AT เกือบทั้งหมดจะใช้ UART เบอร์ 16450 และ 16550 ส่วนคอมพิวเตอร์ในรุ่น XT ใช้ UART เบอร์ 8250 UART ชิปเหล่านี้มีระดับแรงดันเป็นแบบทีทีแอล (0 และ +5V) แต่เพื่อให้มีแรงดันเป็นไปตามมาตรฐาน RS-232 และเพื่อให้มีการรับส่งข้อมูล สามารถทำได้ที่ระยะทางไกลมากขึ้น ระดับแรงดันทีทีแอลจะถูกแปลงเป็นระดับแรงดันที่สูงขึ้นโดยลอจิก “0” มีระดับแรงดัน +3V ถึง +12V ในขณะที่ลอจิก “1” มีระดับแรงดัน -3V ถึง -12V มาตรฐานพอร์ตอนุกรมแบบ RS-232

มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบอนุกรม RS-232 เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมที่ ออกแบบมาเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส 2 ทิศทาง โดย มาตรฐาน RS-232 ในอดีตนั้นถูกออกแบบมาเพื่อการส่งผ่านข้อมูลจาก คอมพิวเตอร์ไปยังโมเด็มเพียงอย่างเดียว เพื่อที่จะนำข้อมูลจากโมเด็มนี้สื่อสาร ผ่านสายโทรศัพท์ไปยังคอมพิวเตอร์อีกชุดซึ่งอยู่ห่างไกลกัน โดยคณะกรรมการที่ เรียกว่า สมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Industries Association: EIA) ได้วางมาตรฐานที่มีชื่อเรียกกันว่า EIA RS-232 มาตรฐานนี้ในช่วงแรกใช้ คอนเน็กเตอร์เป็นแบบ DB-25 โดยกำหนดความยาวสูงสุดของสายสัญญาณไว้ที่ 50 ฟุต มีระดับสัญญาณตั้งแต่ -3 ถึง -12V แสดงว่ามีข้อมูล (Mark) และ +3 ถึง +12V แสดงว่าเป็นช่องว่าง (Space)

มาตรฐาน RS-232 ได้กำหนดรูปแบบของอุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูล (Data Terminal Equipment: DTE) กับวงจรข้อมูลปลายทาง (Data Circuit Terminating: DCE) ไว้ว่า อุปกรณ์ DTE จะต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีการประมวลผลในตัว เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการสร้าง ข้อมูลอนุกรมได้ ส่วนอุปกรณ์ DCE จะทำหน้าที่เป็นเพียงตัวรับข้อมูลที่ส่งมาจาก DTE เท่านั้น โดยการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองจะกระทำผ่านมาตรฐาน RS-232

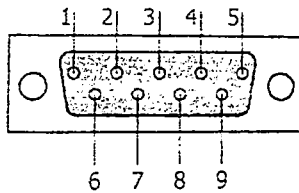
ข้อแตกต่างของอุปกรณ์ DTE และอุปกรณ์ DCE อย่างหนึ่งที่ได้สังเกตเห็นคือ คอนเน็กเตอร์ของ DTE จะเป็นตัวผู้ ส่วนคอนเน็กเตอร์ของ DCE จะเป็นตัวเมีย ซึ่งพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นแบบ DTE ส่วนคอน เน็กเตอร์อยู่ที่โมเด็มจะเป็นแบบ DCE

สำหรับการใช้งานบนคอมพิวเตอร์ พอร์ตอนุกรม RS-232 มักถูกใช้ เชื่อมต่อกับโมเด็มหรือเมาส์ โดยสามารถรับส่งข้อมูลได้ที่ความยาวของ สายสัญญาณสูงสุดถึง 20 เมตร

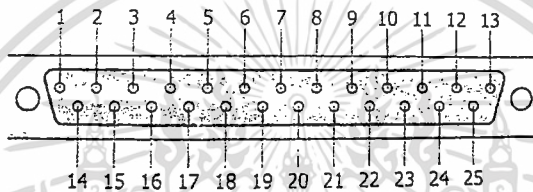
คอนเน็กเตอร์สำหรับพอร์ต RS-232 และการเชื่อมต่อ

มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ RS-232 จะใช้คอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 ตัวผู้ หรือ DB-9 ตัวผู้ ซึ่งคอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 จะมีขาต่อใช้งานเพียง 9 เส้น

เช่นเดียวกับคอนเน็กเตอร์แบบ DB-9 เนื่องจากขาอื่นๆที่ใช้งานในอดีต ปัจจุบันมีการใช้งานไม่มากนัก จึงถูกยกเลิกไป โดยแสดงรูปร่างและตำแหน่งขาในรูปแบบที่ ผ3



(ก) คอนเน็กเตอร์อนุกรม 9 ขาหรือแบบ DB-9 (มองจากด้านหลังคอมพิวเตอรื)



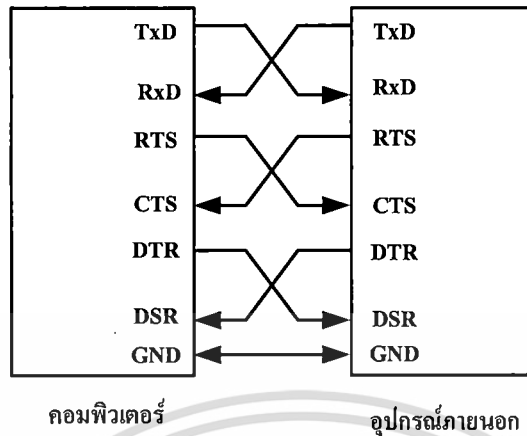
(ข) คอนเน็กเตอร์อนุกรม 25 ขาหรือแบบ DB-25 (มองจากด้านหลังคอมพิวเตอรื)

รูปที่ ผ3 การจัดขาของคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 ทั้งแบบ DB-9 และ DB-25

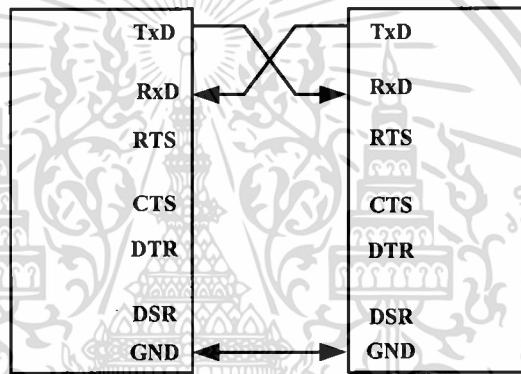
คอนเน็กเตอร์ DB-9	คอนเน็กเตอร์ DB-25	ชื่อของสายสัญญาณ	ชนิดของสายสัญญาณ
1	8	Data Carrier Detect : DCD	อินพุต
2	3	Received Data : RxD	อินพุต
3	2	Transmitted Data : TxD	เอาต์พุต
4	20	Data Terminal Ready : DTR	เอาต์พุต
5	7	Signal Ground : GND	-
6	6	Data Set Ready : DSR	อินพุต
7	4	Request To Send : RTS	เอาต์พุต
8	5	Clear To Send : CTS	อินพุต
9	22	Ring Indicator : RI	อินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ2 เปรียบเทียบขาของคอนเน็คเตอร์ DB-9 กับคอนเน็คเตอร์ DB-25



(ก) การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบ Null modem



(ข) การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบ RS-232 โดยใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้น

รูปที่ ผ4 การต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ในลักษณะต่างๆ

สำหรับการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกแสดงดังในรูป ลูกศรในรูปแสดงถึงทิศทางข้อมูล ในรูปที่ ผ4 (ก) เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null modem หรือการเชื่อมต่อโดยตรง โดยไม่ต้องผ่านโมเด็ม โดยมีการตรวจสอบหรือแฮนด์เช็กเต็มรูปแบบ ส่วนในรูปที่ ผ4 (ข) เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null modem ในลักษณะที่ใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้น โดยเส้นหนึ่งสำหรับส่งข้อมูล อีกเส้นสำหรับรับข้อมูล และเส้นสุดท้ายเป็นกราวด์ สำหรับรายละเอียดหน้าที่การทำงานในแต่ละขาของพอร์ตอนุกรม RS-232 มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก**

-Data Carrier Detect : DCD หรืออาจเรียกว่า Carrier Detect : CD ขานี้จะ แยกตีฟเมื่อมีการส่งสัญญาณพาห้จากอุปกรณ์สื่อสารข้อมูลเช่น โมเด็ม สำหรับ การใช้งานปกติ ขานี้จะไม่ได้ถูกใช้งานมากนัก

-Receive Data : RD หรือ RxD ขานี้ใช้เพื่อรับสัญญาณอนุกรมเข้ามายัง คอมพิวเตอร์ โดยนำข้อมูลทีอ่านได้เก็บไว้ในรีจิสเตอร์ บัฟเฟอร์

-Transmitted Data : TD หรือ TxD ใช้ส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์ โดย นำข้อมูลทีเก็บอยู่ในบัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูลส่งออกไป

-Data Terminal Ready : DTR เป็นขาสัญญาณที่ส่งออกจากคอมพิวเตอร์ เพื่อให้อุปกรณ์ปลายทางรับรู้ว่า ต้องการติดต่อด้วยโดยขา DTR นี้ต้องเชื่อมต่อกา DSR ของอุปกรณ์ปลายทาง และขา DTR ของอุปกรณ์ปลายทางต้องเชื่อมต่อกับ ขา DSR ของคอมพิวเตอร์ ถ้าใช้การเชื่อมต่อแบบ Null modem ซึ่งใช้สายในการ เชื่อมต่อเพียง 3 เส้น จะต้องต่อขา DTR และ DSR ของตัวมันเองเข้าด้วยกันและ ต้องต่อกับขา DCD ด้วยในกรณีทีโปรแกรมสื่อสารที่ใช้มีการตรวจจับสัญญาณ พาห้

-Signal Ground : GND กราวด์ของระบบ

-Data Set Ready : DSR ขานี้จะใช้คู่กับขา DTR เพื่อตรวจสอบการ เชื่อมต่อกันระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ปลายทาง ซึ่งขา DSR นี้จะเป็นขา สำหรับรับข้อมูลจากภายนอกซึ่งถูกส่งมาจากขา DTR

-Request To Send : RTS เป็นขาสำหรับส่งสัญญาณร้องขอให้ทางอุปกรณ์ ปลายทางส่งข้อมูลกลับมายังคอมพิวเตอร์ โดยขาที่รับสัญญาณ RTS ก็คือขา CTS ในกรณีทีใช้ในการเชื่อมต่อแบบ Null modem 3 สาย จะต้องเชื่อมต่อกา RTS และ CTS ของตัวมันเองเข้าด้วยกัน เพื่อให้การรับและส่งข้อมูลสามารถเกิดขึ้นได้ ตลอดเวลา

-Clear To Send : CTS ขานี้จะคอยรับสัญญาณจากขา RTS เมื่อรับ สัญญาณได้ ข้อมูลทีขา TxD จะถูกส่งออกไป ดังนั้นขานี้จึงถูกใช้เพื่อตรวจสอบ อุปกรณ์ต่อพ่วงว่าพร้อมทีจะรับข้อมูลหรือไม่

-Ring Indicator : RI ใช้แสดงสถานะสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์ ปกติในการสื่อสารโดยทั่วไปสายนี้จะไม่ถูกใช้งาน จะใช้งานก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับโมเด็มและโปรแกรมมีการตรวจสอบสัญญาณนี้เท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก**

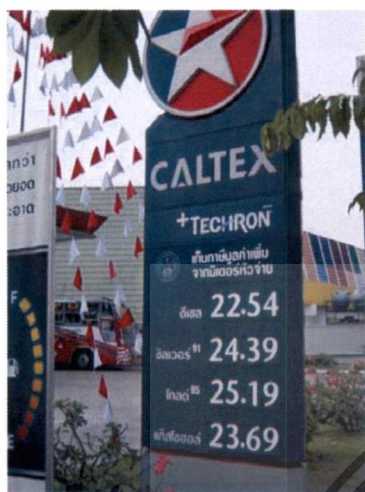
## ภาคผนวก ข

### วิธีการวิเคราะห์กรดไขมันเพื่อหาสูตรการทำไบโอดีเซล แหล่งข้อมูล การผลิตและการตรวจสอบมาตรฐาน ไบโอดีเซลเบื้องต้น\*\*

\*\* อ้างอิงเอกสารเผยแพร่สำหรับไบโอดีเซลชุมชน โดย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) จาก [www.tistr.or.th](http://www.tistr.or.th) ยกต้นฉบับที่เผยแพร่มาแสดง โดยมีได้ดัดแปลงเพื่อความสะดวกในการค้นคว้าและความต่อเนื่องของการอ่านและวิเคราะห์เอกสารแก่ผู้สนใจที่ไม่มีพื้นฐานความรู้ในการทำไบโอดีเซลเพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การผลิตและการตรวจสอบมาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น



ไบโอดีเซล

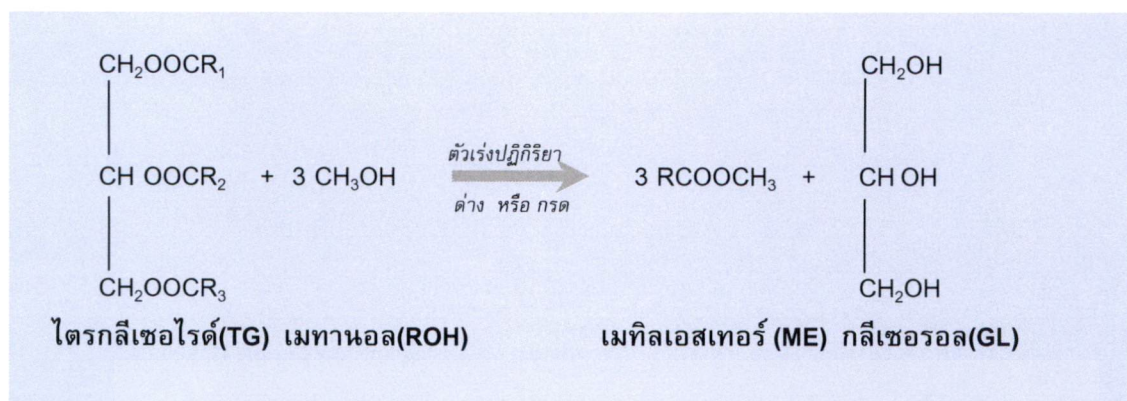
ทุกวันนี้ประเทศไทยประสบปัญหาราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และไม่มีท่าทีว่าจะลดลง รวมทั้งการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ในขณะที่ประเทศไทยยังมีปัญหาการผลิตทางการเกษตรตกต่ำ เนื่องจากผลผลิตล้นตลาด การนำพืชผลทางการเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทดแทน ซึ่งเป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยสร้างความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศ ลดการนำเข้าพลังงาน รวมทั้งรักษาปริมาณพืชผลการเกษตรให้เกิดสมดุล และลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้ในเวลาเดียวกัน

ไบโอดีเซล คือ เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ โดยผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์

กระบวนการผลิตไบโอดีเซล หรือการสังเคราะห์สารเอสเทอร์จากน้ำมันพืช/ไขมันสัตว์ ทำได้ 3 วิธี คือ

1. การทำปฏิกิริยาของน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ โดยใช้เบส หรือกรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยา หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)
2. การทำปฏิกิริยาของน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิและความดันสูงโดยไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยา หรือเรียกว่า Super Critical เช่น เทคโนโลยีของบริษัท Henkel
3. ปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำมันพืช/ไขมันให้เป็นกรดไขมัน และให้กรดไขมันทำปฏิกิริยาต่อกับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นเอสเทอร์ หรือเรียกว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification)

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ประกอบด้วย ปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก น้ำมันพืชหรือไตรกลีเซอไรด์ (TG) ทำปฏิกิริยากับเมทานอล (ROH) เกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์ (ME) หรือไบโอดีเซลกับไดกลีเซอไรด์ (DG) จากนั้นไดกลีเซอไรด์ (DG) ทำปฏิกิริยาต่อกับเมทานอลเกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์กับโมโนกลีเซอไรด์ ในขั้นตอนสุดท้าย โมโนกลีเซอไรด์ (MG) ทำปฏิกิริยาต่อกับเมทานอลเกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล



### รูปที่ 1. ปฏิกิริยารวมของการเกิดเมทิลเอสเทอร์

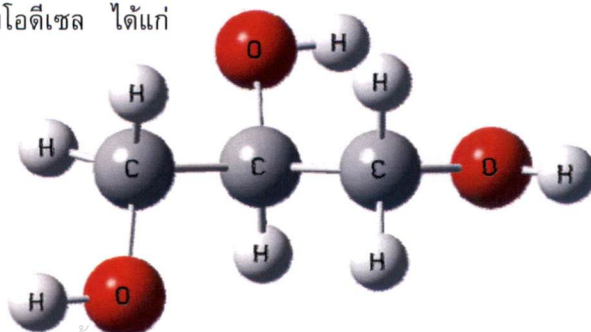
โดยทั่วไปแล้ว น้ำมันพืชในปริมาณ 100 ส่วน ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ 10 ส่วน โดยมีสารเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วย จะได้ไบโอดีเซลในปริมาณ 100 ส่วน และกลีเซอริน 10 ส่วน ในกระบวนการ ทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน นิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ส่วนกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน มักใช้กรดกำมะถัน หรือกรดฟอสฟอริก เป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยผสมสารเร่งปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ก่อนส่งเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืช

การผลิตไบโอดีเซลในเชิงอุตสาหกรรม อาจเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง หรือไม่ต่อเนื่องก็ได้ แต่มักเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีความคุ้มทางเศรษฐศาสตร์สูงสุด ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

- ❖ เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้สภาวะในการผลิตที่อุณหภูมิและความดันต่ำ และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้นกว่าการใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยา
- ❖ เป็นกระบวนการที่ให้ผลได้ หรือ yield สูง และควบคุมการผลิตได้ง่าย
- ❖ ไม่ต้องใช้วัสดุที่ต้องทนต่อความดันสูงในการสร้างอุปกรณ์การผลิต ทำให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์การผลิตต่ำลง

อย่างไรก็ตามในการผลิตต้องคำนึงถึงการทำให้ปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ เพื่อให้ได้ผลได้สูงสุด และเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด นอกจากนั้นแล้วยังต้องให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานที่กำหนดด้วย เพื่อให้ต้นทุนในการผลิตต่ำสุด มีราคาที่สามารถแข่งขันได้ และมีผลิตภัณฑ์ที่สามารถจำหน่ายได้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต่อผลได้ (yield) ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่

- ❖ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
- ❖ อัตราส่วนระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์
- ❖ ชนิดและความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา
- ❖ การผสมสารตั้งต้น
- ❖ ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น





ศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับผลิตพลังงานทดแทนโดยไม่ต้องเข้าไปแย่งพืชอาหาร ดังที่มีการถกเถียงกันถึงความคุ้มค่าในการนำพืชอาหารมาเป็นพลังงาน เหมือนน้ำมันพืชบริโภคอื่นๆ

### น้ำมันพืชและสัตว์ใช้แล้ว (Waste cooking oils)

น้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้แล้วเป็นแหล่งวัตถุดิบอีกแหล่งหนึ่งในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากน้ำมันบริโภคที่ใช้ทอดซ้ำหลายครั้งจะเกิดมีสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ และก่อภาวะระบบฮอร์โมน ทำให้เกิดผลกระทบและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ดังนั้นในต่างประเทศจึงมีการออกกฎหมายมิให้นำน้ำมันบริโภคที่ผ่านการทอดแล้วกลับมาใช้ในการบริโภคอีก

สำหรับประเทศไทย สถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ รายงานผลการสำรวจน้ำมันพืชใช้แล้ว ภายใต้โครงการการสำรวจน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเพื่อนำมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซล ในปี พ.ศ. 2548 พบว่าน้ำมันพืชที่เหลือจากแหล่งที่ใช้ น้ำมันทั้งหมดทั่วประเทศ มีปริมาณรวมปีละ 74.5 ล้านลิตร อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลมีปัญหาในการรวบรวม และปัญหาด้านคุณภาพน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันได้ผ่านการทอดที่อุณหภูมิสูงหลายครั้ง และมีการปนเปื้อนจากกระบวนการทำอาหาร ทำให้ต้องทำการควบคุมคุณภาพน้ำมันทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน จึงจะผลิตได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนด

### เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล

เทคโนโลยีที่ใช้การผลิตไบโอดีเซล แบ่งได้เป็น 3 กระบวนการ ได้แก่

#### 1. กระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification process)

ที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเมทานอลมีข้อดี คือ เป็นเทคโนโลยีที่มีการลงทุนไม่สูงนัก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำ และความดันต่ำกว่า 2 บรรยากาศ ผลได้ของปฏิกิริยาสูงถึง 98% แต่กระบวนการนี้จะไม่เหมาะกับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง เนื่องจากจะเกิดสบู่ และส่งผลให้ผลได้ (yield) ของกระบวนการผลิตลดลง

#### 2. กระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification process)

ที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเมทานอล จะสามารถใช้ได้กับวัตถุดิบทุกชนิด และค่ากรดไขมันอิสระทุกระดับ แต่ข้อด้อย คือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าการใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยสูงกว่า

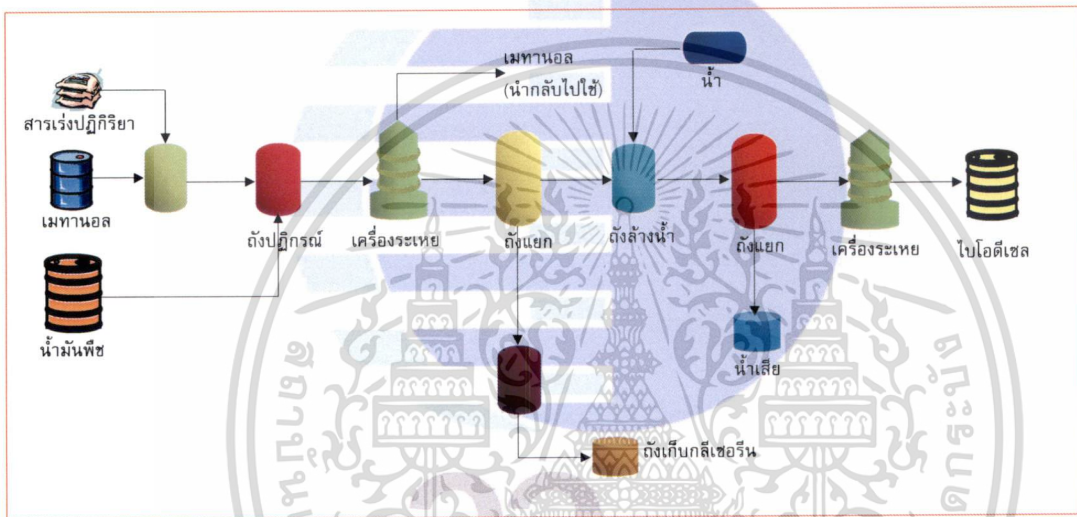
#### 3. กระบวนการ 2 ขั้นตอน (Two-stage process)

ขั้นตอนที่ 1 เป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และขั้นตอนที่ 2 เป็นปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นการแก้ปัญหาจุดด้อยของ 2 กระบวนการข้างต้น กล่าวคือ มีสามารถใช้ได้กับน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูง ในขณะเดียวกันก็มีการใช้พลังงานต่ำ โดยหลักการ คือ ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปลี่ยนกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันให้เป็นสารเอสเทอร์ก่อน ที่เป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน จากนั้นจึงใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใน

กระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะใช้พลังงานต่ำกว่ากระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนเดียว แต่หากวัตถุดิบมีค่ากรดสูงมากๆ กระบวนการในขั้นตอนแรกจะใช้เวลามากขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยของไบโอดีเซลสูงขึ้นตามไปด้วย

## ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล

โดยทั่วไป กระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังแผนผังการผลิตไบโอดีเซล แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้







รูปที่ 2. แผนผังการผลิตไบโอดีเซล

### ขั้นตอนที่ 1. การเตรียมวัตถุดิบน้ำมันพืช

ก่อนทำการป้อนน้ำมันพืชเข้าสู่ระบบการผลิต ต้องทำการวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด และปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันพืช น้ำมันพืชทั้งน้ำมันใหม่ หรือน้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว จะมีค่าความเป็นกรดในปริมาณที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดก่อนทำปฏิกิริยา จะทำให้ทราบถึงปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะส่งผลให้ได้ผลผลิตสูง เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ และลดสูญเสียน้ำมัน จากนั้นจึงป้อนน้ำมันเข้าสู่เตรียมวัตถุดิบ และควบคุมอุณหภูมิไว้ตามที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิการผลิตที่ 60-70°C

วิธีการวิเคราะห์ค่าของกรดในน้ำมันพืชมีดังนี้

1. คำนิยาม : ค่าของกรด คือ จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ทำปฏิกิริยาเป็นกลางกับกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันพืชหนักหนึ่งกรัม
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. ขวดรูปชมพู่		2. บีกเกอร์	
3. กระบอกลง		4. บิวเรต	  

### 3. สารละลายที่ใช้และวิธีเตรียม

- 3.1 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำกลั่น ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 5.61 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร
- 3.2 สารผสมโพพานอลกับโทลูอีนในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร และทำให้เป็น กลางต่อฟินอลส์ฟทาซีนด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
- 3.3 สารละลายฟินอลส์ฟทาซีนอินดิเคเตอร์ ละลายฟินอลส์ฟทาซีน 1 กรัม ในโพพานอล ทำให้เป็น 100 มิลลิลิตร

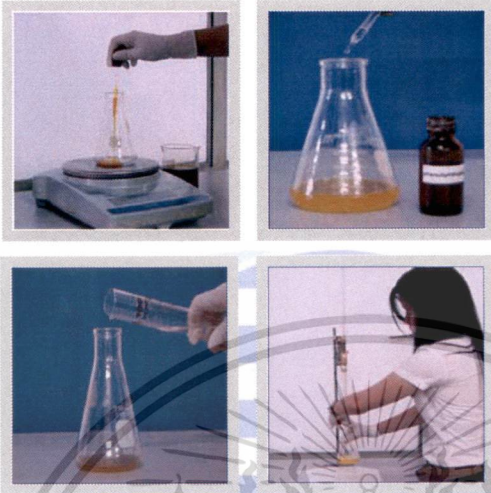
### 4. วิธีวิเคราะห์

- 4.1 ชั่งน้ำมันพืชที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียว ปริมาณดังแสดงในตารางด้านล่าง ให้น้ำมันหนักแน่นอน ใส่ในขวดรูปชมพู่ พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักน้ำมันพืช

ค่าของกรด	น้ำหนักน้ำมันพืช ( $\pm 10\%$ ) กรัม	ความละเอียดในการชั่ง $\pm$ กรัม
0-1	20	0.05
1-4	10	0.02
4-15	2.5	0.01
15-75	0.5	0.001
มากกว่า 75	0.1	0.0002

- 4.2 เติมสารผสมโพพานอลกับโทลูอีน (3.2) ปริมาณ 125 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกลง เขย่าให้น้ำมันพืชละลาย อาจใช้ความร้อนในกรณีที่น้ำมันไม่ละลายในสารละลาย
- 4.3 เติมสารละลายฟินอลส์ฟทาซีนอินดิเคเตอร์ ปริมาณ 2 มิลลิลิตร

4.4 ตีเตรตด้วย สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (3.1) จนสารละลายเริ่มเปลี่ยนสี เป็นสีชมพูอ่อน และคงตัวอยู่ 30 วินาที บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้



5. วิธีคำนวณ

5.1 ค่าของกรด

$$AV = \frac{56.1 \times N \times V}{m}$$

- เมื่อ AV = ค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมน้ำมัน  
 N = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ม นอร์มัล  
 V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการตีเตรต, มิลลิลิตร  
 m = น้ำหนักน้ำมันพืช, กรัม

5.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA = ปริมาณกรดไขมันอิสระ, ร้อยละโดยน้ำหนัก)

$$\%FFA \text{ (as palmitic acid)*} = \frac{AV}{2.19}$$

\* ปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์กรดไขมันปาล์มมิติก ใช้สำหรับน้ำมันพืชที่มีกรดปาล์มมิติกเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง เช่น น้ำมันปาล์มดิบ, น้ำมันปาล์มโอสลิน, ปาล์มสเตียร์น

$$\%FFA \text{ (as lauric acid)**} = \frac{AV}{2.81}$$

\*\*ปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์กรดลอริก ใช้สำหรับน้ำมันพืชที่มีกรดลอริกเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง เช่น น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันเมล็ดในปาล์ม

**ตัวอย่างการคำนวณค่าของกรดและปริมาณกรดไขมันอิสระ**

ซึ่งน้ำมันปาล์มดิบปริมาณ 2.50 กรัม ละลายในสารผสมโพพรานอลกับโทลูอีน ปริมาณ 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอลฟทาไลน์อินดิเคเตอร์ ปริมาณ 2 มิลลิลิตร นำไปไตเตรตด้วย สารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัลปริมาณที่ ใช้ไป 4.5 มิลลิลิตร ต้องการทราบว่า น้ำมันปาล์มดิบ มีค่าของกรด และปริมาณกรดไขมันอิสระเท่าไร

**การคำนวณค่าของกรด**

$$AV = \frac{56.1 \times N \times V}{m} = \frac{56.1 \times 0.1 \times 4.5}{2.50} = 10.10$$

ดังนั้น น้ำมันปาล์มดิบมีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 10.10 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมไขมัน

**การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์ปาล์มมิติก**

$$\% \text{ FFA (as palmitic acid)} = \frac{AV}{2.19} = \frac{10.10}{2.19} = 4.61$$

ดังนั้น น้ำมันปาล์มดิบมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (ในรูปกรดปาล์มมิติก) เท่ากับร้อยละ 4.61 โดยน้ำหนัก

**ขั้นตอนที่ 2. การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยา**

เตรียมสารเร่งปฏิกิริยา โดยผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยากับเมทานอลในสัดส่วนที่กำหนดและเหมาะสมให้เข้ากันดี ของผสมที่ได้เรียกว่า โซเดียมเมทอกไซด์ ในการผสมต้องระมัดระวังไม่ให้มีน้ำปะปนลงไป จากนั้นจึงป้อน โซเดียมเมทอกไซด์ เข้าถึงพัก เตรียมพร้อมในการป้อนเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืชต่อไป

ในการเตรียมสารละลายโซเดียมเมทอกไซด์นั้น จะต้องใช้ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับทำน้ำมันให้เป็นกลาง บวกกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการคำนวณมีดังนี้

1. NaOH Neutralization หรือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับทำน้ำมันให้เป็นกลาง, กรัมโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าดังนี้

$$\text{NaOH Neutralization} = \frac{40 \times A \times AV}{56.1 \times 1000}$$

- เมื่อ 40 = น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์, กรัม/โมล  
 56.1 = น้ำหนักโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, กรัม/โมล  
 A = ปริมาณน้ำมันพืช, กรัม  
 AV = ค่าของกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมไขมัน

2. NaOH Transesterification หรือปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา, กรัมโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าดังนี้

$$\text{NaOH Transesterification} = \frac{A \times B}{100}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

การผลิตและการตรวจสอบมาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนี้อยู่ **หน้าที่ 8**

- เมื่อ A = ปริมาณน้ำมันพืช, กรัม  
 B = ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา,  
 %โดยน้ำหนักน้ำมัน

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ต้องการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ จำนวน 100 กิโลกรัม โดยมีข้อมูลดังนี้  
 น้ำมันปาล์มดิบที่มีค่าของกรด 10.1 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมไขมัน  
 ต้องการใช้อัตราส่วนโดยมวลระหว่างน้ำมันปาล์มดิบต่อเมทานอล คือ 3:1

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน คือ ร้อยละ 0.5 โดย  
 น้ำหนักน้ำมัน

A = ปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ 100 กิโลกรัม = 100 x 1000 กรัม

$$\text{NaOH}_{\text{Neutralization}} = \frac{40 \times A \times AV}{56.1 \times 1000} = \frac{40 \times (100 \times 1000) \times 10.1}{56.1 \times 1000}$$

$$= 720 \text{ กรัมโซเดียมไฮดรอกไซด์}$$

$$\text{NaOH}_{\text{Transesterification}} = \frac{A \times B}{100} = \frac{(100 \times 1000) \times 0.5}{100}$$

$$= 500 \text{ กรัมโซเดียมไฮดรอกไซด์}$$

$$\text{NaOH}_{\text{total}} = \text{NaOH}_{\text{Neutralization}} + \text{NaOH}_{\text{Transesterification}}$$

$$= 720 + 500$$

$$= 1,220 \text{ กรัมโซเดียมไฮดรอกไซด์}$$

$\text{NaOH}_{\text{total}}$  หรือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั้งสิ้น มีค่าเท่ากับ  
 1,220 กรัมโซเดียมไฮดรอกไซด์

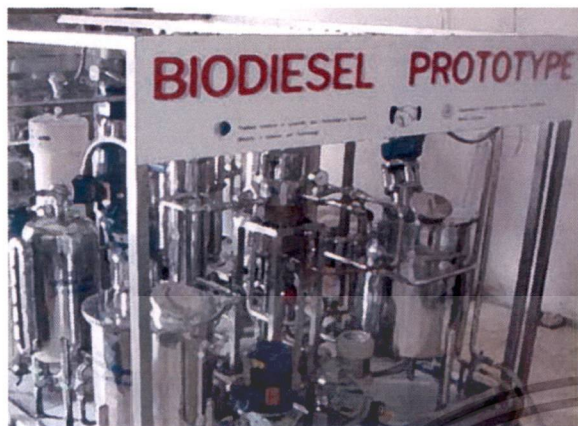
ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซลของน้ำมันปาล์มดิบ ที่มีคุณสมบัติข้างต้นคือ

1. ชั่งน้ำมันปาล์มดิบ 100 กิโลกรัม
2. ชั่งเมทานอล 33.3 กิโลกรัม (อัตราส่วนโดยมวลระหว่างน้ำมันปาล์มดิบต่อเมทานอล คือ 3:1)
3. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด ปริมาณ 1,220 กรัม
4. ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ข้อ 3) ในเมทานอล (ข้อ 2) จนเป็นเนื้อเดียว
5. เทสารละลาย ในข้อ 4 ลงในน้ำมันปาล์ม เริ่มทำปฏิกิริยาผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

การผลิตและการตรวจสอบมาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้นนี้ขอหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีหน้าที่ 9 ไปใช้

### ขั้นตอนที่ 3. การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล



ทุกครั้งที่ทำการผลิตจะต้องให้สารตั้งต้นมีเวลาในการผสมที่เพียงพอและมีสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ และมีการชกตัวอย่าง จากถังปฏิกรณ์เพื่อตรวจเช็คการเกิดปฏิกิริยาเป็นระยะๆ เพื่อให้แน่ใจว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ และได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ และได้มาตรฐาน

### ขั้นตอนที่ 4. การนำเมทานอลกลับคืน

โดยทั่วไปปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล มักใช้เมทานอลในปริมาณมากเกินไป เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ ดังนั้นหลังการทำปฏิกิริยาแล้ว จะมีเมทานอลเหลืออยู่ ซึ่งควรนำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ในการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่นั้น อาจทำการกลั่นเมทานอลกลับคืนจากส่วนก่อนการแยกส่วนผลิตภัณฑ์ หรือหลังการแยกส่วนเป็นไบโอดีเซล และกลีเซอรอลแล้วก็ได้ แต่ไม่ว่าจะกลั่นแยกจากส่วนใดก็ตาม ต้องระวังไม่ให้มีน้ำปะปนในส่วนของเมทานอลที่กลั่นได้ เพื่อให้การหมุนเวียนกลับไปใช้ใหม่เกิดประสิทธิภาพได้อย่างสูงสุด

### ขั้นตอนที่ 5. การแยกส่วนผลิตภัณฑ์

หลังจากการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันแล้ว จะเกิดผลผลิต 2 ชนิด คือ สารเอสเทอร์ และกลีเซอรอล โดยเมื่อทำการทิ้งให้แยกชั้น ไบโอดีเซลจะอยู่ส่วนบน และกลีเซอรอลจะอยู่ส่วนล่างของถัง ในการผลิตไบโอดีเซลกลีเซอรอลจะถูกแยกไปยังถังเก็บกลีเซอริน ส่วนไบโอดีเซลจากชั้นบนจะถูกส่งไปยังถังล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำต่อไป

### ขั้นตอนที่ 6. การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ

เมื่อไบโอดีเซลถูกส่งมายังถังล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ ทำการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำอุ่น เพื่อล้างสารเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากปฏิกิริยาและสารปนเปื้อนต่างๆ หลังจากล้างน้ำแล้ว ไบโอดีเซลยังคงมีน้ำเหลืออยู่เล็กน้อย ซึ่งสามารถกำจัดน้ำออกได้โดยผ่านเครื่องระเหยน้ำ และผ่านการกรองอีกครั้ง จึงส่งไบโอดีเซลเข้าถังเก็บไบโอดีเซลเพื่อรอการจำหน่ายต่อไป

วิธีการวิเคราะห์ค่ากลีเซอรินอิสระและกลีเซอรินทั้งหมดในน้ำมันไบโอดีเซล และการควบคุมคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

### ขั้นตอนที่ 7. การนำกลีเซอรินกลับคืน

กลีเซอรินดิบที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มักมีความบริสุทธิ์ต่ำประมาณ 60% นอกจากนี้มีน้ำปะปนอยู่จำนวนมากแล้ว ยังมีสารเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากการใช้ในปฏิกิริยา และมีสบู่ที่เกิดจาก

เอกลสารนี้เป็นเอกลสารที่ส่งมอบไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อลดการสิ้นเปลืองเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ที่นอกเหนือจากนี้

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันปะปนอยู่ด้วย จึงต้องทำการแยกออกเพื่อเพิ่มควมบริสุทธิ์ให้กับกลีเซอรินดิบ โดยทั่วไปมักใช้วิธีแยกออกด้วยการทำปฏิกิริยาด้วยกรด เช่น กรดเกลือ หรือกรดฟอสฟอริก ในปฏิกิริยานั้นสบู่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันและเกลือ เมื่อตั้งทิ้งไว้กรดไขมันจะแยกชั้นออกจากกลีเซอริน ทำให้ได้กลีเซอรินที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วกลีเซอรินที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ประมาณ 80-88%

## คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นผลผลิตที่ได้จากน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการทางเคมี ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล มีองค์ประกอบและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้ไบโอดีเซลยังคงมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล ซึ่งบางคุณสมบัติเป็นข้อได้เปรียบ และบางคุณสมบัติเป็นข้อเสียเปรียบ เมื่อนำไบโอดีเซลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล เช่น ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีความปลอดภัยในการขนส่งมากกว่า เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลได้ดังนี้

1. ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้แล้ว กำมะถันในน้ำมันดีเซล จะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดซัลฟิวริกหรือกรดกำมะถัน ตามลำดับ เกิดเป็นมลพิษทางอากาศ เมื่อฝนตกจะชะล้างมลพิษเหล่านี้เกิดเป็นฝนกรดได้
2. น้ำมันดีเซล ไม่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล และมีองค์ประกอบของสาร Aromatic compound ถึงร้อยละ 20-40 ขณะที่ไบโอดีเซลไม่มีสารประกอบประเภท Aromatic compound แต่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลถึงร้อยละ 10-12 ทำให้เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ไอเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก และมีควันดำต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล
3. ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล
4. น้ำมันดีเซลไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล ขณะที่ไบโอดีเซลมีพันธะคู่ในน้ำมันพืช ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันตามชนิดของน้ำมันพืช ทำให้ไบโอดีเซลไม่เสถียรตัว เกิดออกซิเดชันได้เร็วกว่าน้ำมันดีเซล และมีระยะเวลาเก็บรักษาหลังการผลิตสั้นกว่าน้ำมันดีเซล
5. ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี

ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชต่างชนิดกัน จะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ถึงร้อยละ 94-96% ของน้ำหนักโมเลกุล ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันมีคุณสมบัติทั้งทางเคมีและกายภาพเป็นไปตามกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ ดังนั้นเมื่อนำน้ำมันพืชชนิดนั้นๆ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะมีความสัมพันธ์ตามกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบนั้นๆ ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การผลิตและการตรวจสอบมาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น ขอหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งซึ่งหน้าที 11 ไปใช้

## มาตรฐานไบโอดีเซล

ตารางที่ 1. กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550  
ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน\*

ที่	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ*	
1.	เมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2.	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 <sup>o</sup> ซ	กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่า และไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
3.	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 <sup>o</sup> ซ	เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่า และไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D 445
4.	จุดวาบไฟ	° ซ	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5.	กำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622
6.	กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7.	จำนวนซีเทน		ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8.	เถ้าซัลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9.	น้ำ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.050	EN ISO 12937
10.	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0024	EN 12662
11.	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง		ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12.	เสถียรภาพต่อการเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 <sup>o</sup> ซ	ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า	6	EN 14112
13.	ค่าของกรด	มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14.	ค่าไอโอดีน	กรัมไอโอดีน/100 กรัม	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15.	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16.	เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17.	โมนอกลิเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
18.	ไดกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19.	ไตรกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20.	กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21.	กลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22.	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	prEN 14538
23.	ฟอสฟอรัส	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24.	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน			

## คุณภาพของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

## 1. ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเอสเทอร์น้อยกว่าที่กำหนด ซึ่งบอกถึงยังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณสูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง และเกี่ยวเนื่องกับการอุดตันในหัวฉีด หรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์

## 2. ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15<sup>o</sup>ซ

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามากก็จะให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำอีกด้วย

## 3. ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40<sup>o</sup>ซ

ความหนืดเกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบ ความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง

## 4. จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วทำให้น้ำมันติดไฟ มาตรฐานกำหนดให้มีค่าจุดวาบไฟมากกว่า 120<sup>o</sup>ซ ปริมาณเมทานอลที่หลงเหลือในไบโอดีเซลทำให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย และการจัดเก็บ ปริมาณเมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่า 0.2 % ส่งผลให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100<sup>o</sup>ซ

## 5. กำมะถัน

ไบโอดีเซล เป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชดิบที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน องค์ประกอบกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้ จะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

## 6. กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น)

ปริมาณกากถ่านมีความสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล หากมีปริมาณกากถ่านสูงกว่าข้อกำหนด ซึ่งบอกถึงยังคงมีสารต่างๆที่กล่าวข้างต้นหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณกากถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้

ในห้องเผาไหม้ กากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบ ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกและต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

#### 7. แก๊สซัลเฟต

แก๊สซัลเฟตเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณแก๊สซัลเฟตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์

#### 8. น้ำ

ปริมาณน้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนั้นน้ำในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

#### 9. สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด

สารปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน และปฏิกิริยาข้างเคียง เช่นปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารที่ไม่สะปอนิฟาย ได้แก่ ไขมันที่ไม่อยู่ในรูปของกลีเซอไรด์, กรดไขมันอิสระ, fatty alcohol, สารประกอบไฮโดรคาร์บอน, แอลกอฮอล์อย่างแข็ง, triterpene alcohol, สารประกอบแคโรทีน วิตามิน และอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันพืชเริ่มต้น โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ

สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลมีผลเสียต่อเครื่องยนต์หลายด้าน เช่น คุณสมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา เนื่องสารประกอบของสารที่ไม่สะปอนิฟาย เปลี่ยนสภาพกลายเป็นสารที่มีผลในการลดคุณสมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซล

#### 10. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง

การกัดกร่อนแผ่นทองแดง แสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากปริมาณกรดเช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ในน้ำมัน ซึ่งค่าการกัดกร่อนนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

#### 11. ค่าของกรด

แสดงความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซล เป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมันพืช และปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊ม และไส้กรองน้ำมันลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมัน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกจากปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันและผลของสภาวะในการจัดเก็บ

## 12. กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์

แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

## 13. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°ซ.

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการเกิดสารประเภทเพอร์ออกไซด์ (peroxide linkage) ขึ้นระหว่างพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่อยู่ในโครงสร้างของไบโอดีเซล ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดเมื่อน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โดยที่ความร้อนและแสงแดดมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่โลหะเช่นทองแดง และตะกั่ว ก็เป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดสารพอลิเมอร์ (oxidation polymerization) และเกิดของแข็งที่ไม่ละลายในไบโอดีเซล

เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากจะขึ้นกับประเภทและคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบแล้ว ยังขึ้นกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย โดยกระบวนการผลิตที่มีการให้ความร้อนสูงแก่ไบโอดีเซลเป็นระยะเวลาสั้น อาจส่งผลให้เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้มีค่าสูงกว่า 6 ชั่วโมง ที่ 110 องศาเซลเซียส

## 14. ค่าไอโอดีน

ค่าไอโอดีนแสดงพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่น ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไข หรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดขุ่นสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไอโอดีน 50-55 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กำหนดให้ ค่าไอโอดีนไม่สูงกว่า 120 กรัมไอโอดีน/100 กรัม

## 15. เมทานอล

เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไบโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณต่ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล จุดวาบไฟขั้นต่ำของไบโอดีเซลคือ 130 องศาเซลเซียส เมทานอลมีค่าจุดวาบไฟต่ำ ถ้ายังมีเมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่งและการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอลมีค่าความเข้มข้นมากกว่า 5% จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทน และความหล่อลื่นของน้ำมัน

## 16. โมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์

ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์แสดงถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์

## 17. กลีเซอรินอิสระ

ปริมาณกลีเซอรินที่ยังเหลืออยู่ในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ ทำให้มีปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน กลีเซอรินมีผลต่อการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

## 18. กลีเซอรินทั้งหมด

กลีเซอรินทั้งหมดคือปริมาณของกลีเซอรินอิสระ และปริมาณกลีเซอรินในโมเลกุลโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันไม่สมบูรณ์ มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรอง และปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศอากาศเย็น

## 19. โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม), โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียม และแมกนีเซียม)

เป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่ และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล แคลเซียมยังมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรซ์ของเอสเทอร์อีกด้วย ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กำหนดให้ ปริมาณโลหะกลุ่ม 1 และโลหะกลุ่ม 2 ไม่สูงกว่าอย่างละ 5.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

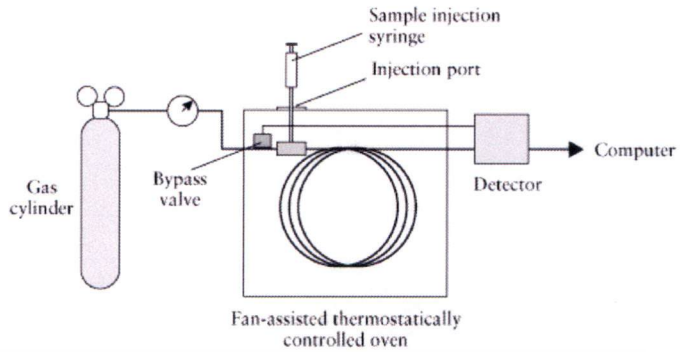
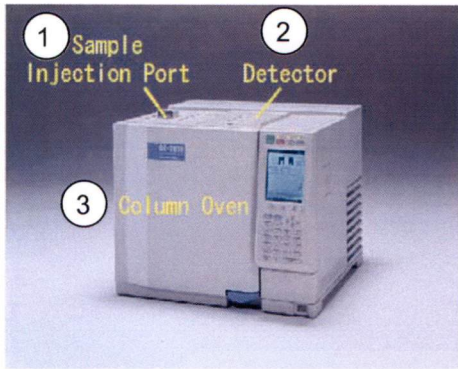
## 20. ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืชตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่ทำการกำจัดออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วย ซึ่งจะทำความเสียหายให้กับอุปกรณ์เครื่องยนต์ คอแวนเวอร์เตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่มลพิษจากการที่มาตรฐานของการแพร่มลพิษเป็นกฎข้อบังคับมากขึ้น อุปกรณ์ catalytic converter จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล

## วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

**1. เครื่อง Gas Chromatography (GC)** เป็นเครื่องวิเคราะห์สารเคมีที่ใช้เทคนิค การแยกสารผสมที่ระเหยได้ง่าย ที่เป็นทั้งของแข็งของเหลว และก๊าซ โดยมีก๊าซเฉื่อยเป็นตัวพา (Carrier gas) เข้า column ซึ่งสามารถแยกสารผสมมากกว่าหนึ่งชนิดให้ได้มาซึ่งสารประกอบเดี่ยวๆ ตามลำดับ ในสภาวะที่เหมาะสม และตรวจวัดสารตัวอย่าง ด้วย detector ตามคุณสมบัติเฉพาะทางเคมี พร้อมทั้งคำนวณหาชนิดและปริมาณของสารตัวอย่างเมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน (Standard samples)

โดยอัตโนมัติด้วยระบบคอมพิวเตอร์



องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ

1. Injector : ส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็น gas ก่อนที่จะเข้าสู่ column อุณหภูมิที่เหมาะสมของ injector ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารสามารถระเหยได้แต่ไม่ทำให้สารสลายตัว (decompose)
2. Oven : ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุ column และควบคุมอุณหภูมิของ column ให้เป็นไปตามที่กำหนด
3. Detector : ส่วนที่ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง (Flame Ionization Detector; FID)

การประยุกต์ใช้งานเครื่อง GC กับการวิเคราะห์ไบโอดีเซล

1. ตรวจวิเคราะห์ปริมาณ กลีเซอรอลอิสระ กลีเซอรอลทั้งหมด และปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ (EN 14105)
2. ตรวจวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทั้งหมด (EN14103)

มาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ไบโอดีเซล

**1. วิธีการวิเคราะห์ค่ากลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมด ในน้ำมันไบโอดีเซล ; EN14105**

เป็นการวิเคราะห์ค่ากลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมดในน้ำมันไบโอดีเซล ด้วยเครื่องแก๊สโคร มาโทกราฟี โดยจะวิเคราะห์ค่ากลีเซอรินอิสระในช่วง 0.005-0.05 ร้อยละโดย น้ำหนัก และค่ากลีเซอรินทั้งหมดในช่วง 0.05-0.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับ น้ำมันพืชที่มีเมทิลเอสเทอร์ที่มาจากลวก เช่น น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม เนื่องจากมีคาร์บอน 12 ในปริมาณมาก ซึ่งอาจเกิดการซ้อนทับกันของพีค เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอไรด์

**อุปกรณ์และสารเคมี**

**1. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี บริษัท SHIMADZU รุ่น GC 2010**

**1.1 คอลัมน์ บริษัท Agilent Technology รุ่น DB-5HT**

- stationary phase คือ 5% phenylpolydimethylsiloxane
- ความยาว 10-15 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตร และความหนา

**0.1 ไมโครเมตร**

## 1.2 ดีเทคเตอร์ เฟลมไอออไนเซชันดีเทคเตอร์

## ตารางที่ 1. สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

Injector		
ปริมาณตัวอย่างที่ฉีด	1 ไมโครลิตร	
Column Temperature Program		
Initial temperature	50 ° ซ	ทิ้งไว้ 1 นาที
Rate 1	15 ° ซ/นาที ถึง 180 ° ซ	
Rate 2	7 ° ซ/นาที ถึง 230 ° ซ	
Rate 3	30 ° ซ/นาที ถึง 380 ° ซ	ทิ้งไว้ 10 นาที
Detector		
ชนิด	เฟลมไอออไนเซชัน	
อุณหภูมิ	380 ° ซ	
Carrier Gas		
ชนิด	ฮีเลียม	
อัตราการไหลของแก๊ส	3 มล./นาที	

- ไมโครไซริง ขนาด 100 และ 250 ไมโครลิตร
- สารละลายเฮปเทน
- N-Methyl-N-trimethylsilyltrifluoroacetamide (MSTFA)
- สารละลายไพรีดีน
- ขวดทดลอง ขนาด 10 มล.

## วิธีการ

## 1. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับสอบเทียบ (Calibration standard) ตามตารางที่ 2. ละลายด้วยสารละลายไพรีดีน ในขวดทดลองและเก็บสารไว้ในตู้เย็น เพื่อรอการใช้

## ตารางที่ 2. ตารางสารมาตรฐาน

สารมาตรฐาน	ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน (มก./มล.)
กลีเซอรอล	0.5
โมนโอเลอิน	5
ไดโอเลอิน	5
ไตรโอเลอิน	5
ไตรคาพรีน (Tricaprin C10:0, Internal standard)	8

1.2 เตรียมสารละลายมาตรฐาน ตามตารางที่ 3. สำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน ในขวดทดลอง จากนั้นเติมสาร MSTFA ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ปิดฝาขวดและเขย่าอย่างแรง วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที แล้วเติมสารละลายเฮปแทน ปริมาตร 8 มล.

ตารางที่ 3. ปริมาณการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

Std. Solution number	1	2	3	4
กลีเซอรอล	10	40	70	100
โมนโอเลอิน	50	120	190	250
ไดโอเลอิน	10	40	70	100
ไตรโอเลอิน	10	30	60	80
ไตรคาพริน (Tricaprin C10:0, Internal standard)	100	100	100	100

## 2. การเตรียมตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล

ชั่งน้ำมันไบโอดีเซล น้ำหนัก 50 มก. โดยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ลงในขวดทดลอง เติมสารละลาย Internal standard ปริมาตร 100 ไมโครลิตร และสาร MSTFA ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ปิดฝาและเขย่าสารละลายอย่างแรงให้เข้ากัน วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเติมสารละลายเฮปแทน ปริมาตร 8 มล. นำสารตัวอย่าง ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ในการวิเคราะห์ต้องสร้างกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐาน กลีเซอรอล โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ เพื่อหาค่าความชันและจุดตัดแกน ซึ่งจะใช้ในการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมด

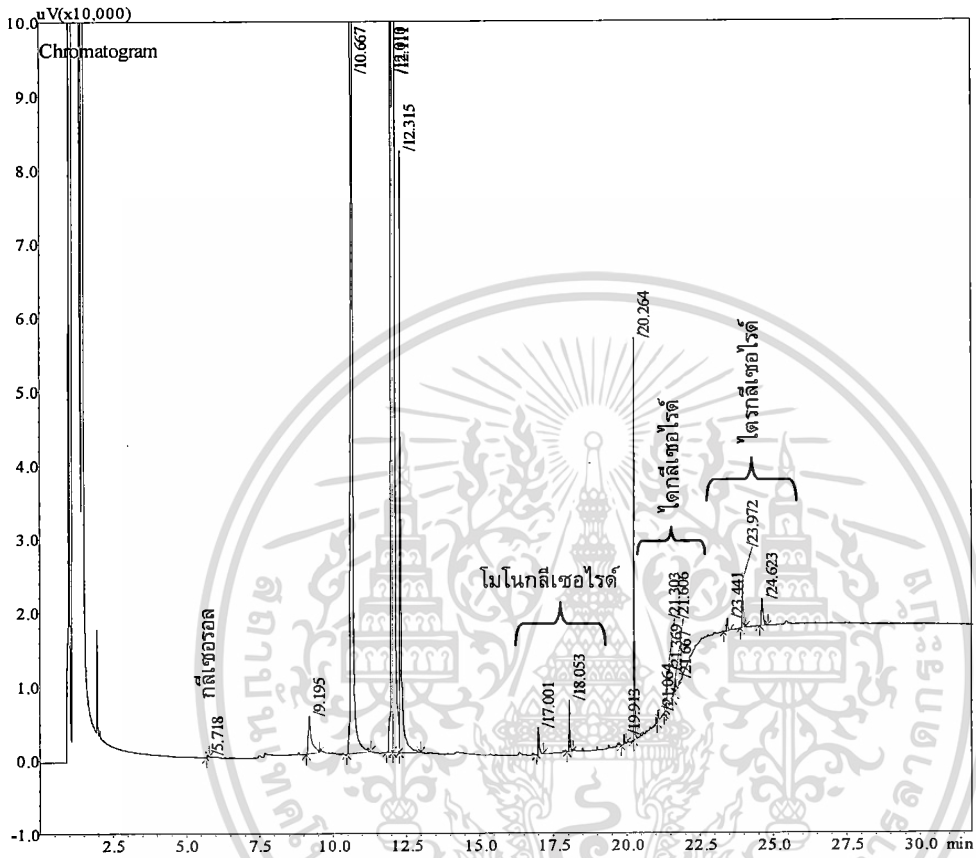
จากนั้นทำการศึกษาคูณภาพวิเคราะห์ของสารมาตรฐาน โดยการฉีดสารมาตรฐานโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ เพื่อดูว่าพีคของคาร์บอนต่าง ๆ ปรากฏที่เวลาใด พร้อมทั้งหาค่า Relative retention time (RRT) เพื่อตรวจสอบการซ้อนทับกันกับพีคของเมทิลเอสเทอร์ ในกรณีที่ใช้วิเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล

ในการวิเคราะห์ต้องสร้างกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐาน กลีเซอรอล โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ เพื่อหาค่าความชันและจุดตัดแกน ซึ่งจะใช้ในการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมด

ผลวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรินอิสระและกลีเซอรินทั้งหมด

ตัวอย่างที่ 1. น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ B 100 ครั้งที่ 1; TISTR

โครมาโทแกรมที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงดังรูป



## แสดงตารางค่า Area และ RT ของกลีเซอรอลแต่ละชนิด ของตัวอย่างที่ 1

Ret.Time	Area	Height	RRT	Component
5.718	583.8	311.3	0.28	พื้นที่พีคของกลีเซอรอล เท่ากับ 583.8
9.195	39276.8	5109.3	0.45	
10.667	2670416	940082.7	0.53	
12.01	429076.6	165106	0.59	
12.111	2411507	729730.8	0.60	
12.315	233654.9	80452	0.61	
17.001	9567.2	3543.8	0.84	พื้นที่พีคของโมโนกลีเซอรอล
18.053	14485.2	6901.8	0.89	เท่ากับ 24052.4
19.913	2207.6	1262	0.98	
20.264	75447.8	52209.3	1.00	พื้นที่พีคของ IS เท่ากับ 75447.8
Ret.Time	Area	Height	RRT	Component
21.064	2437.2	1516.5	1.04	พื้นที่พีคของไตรกลีเซอรอลเท่ากับ
21.303	3387.6	1955.6	1.05	20126.7
21.369	8431.2	5024.6	1.05	
21.606	2012.9	889.7	1.07	
21.667	3857.8	1880.7	1.07	
23.441	4571	1682.7	1.16	พื้นที่พีคของไตรกลีเซอรอลเท่ากับ
23.972	17291.8	6484.9	1.18	36470.5
24.623	14607.7	3601.9	1.22	

ตัวอย่างในการคำนวณ :

การวิเคราะห์นี้น้ำหนักสารตัวอย่าง เท่ากับ 50.1 มก. และความเข้มข้นของ Internal standard เท่ากับ 8.01 มก./มล. ( ใช้ 100 ไมโครลิตร คิดเป็น 0.801 มก.) นำไปคำนวณได้ผลดังนี้

- กลีเซอรอล

$$\begin{aligned}
 G \text{ (%w/w)} &= (a_g \times A_g/A_{IS} + b_g) \times W_{IS} \times 100/W \\
 &= [ 0.5396 \times (583.3/75447.8) + 0.0013 ] \times 0.801 \times 100/50.1 \\
 &= 0.0082
 \end{aligned}$$

- โมโนกลีเซอรอล

$$\begin{aligned}
 G_M \text{ (%w/w)} &= (a_m \times A_m/A_{IS} + b_m) \times W_{IS} \times 100/W \\
 &= [ 1.3694 \times (24052.4/75447.8) + (-0.0998) ] \times 0.801 \times 100/50.1 \\
 &= 0.5384
 \end{aligned}$$

$$G_{I_M} = 0.2591 \times 0.5384 = 0.140$$

## - ไตกลีเซอไรต์

$$\begin{aligned}
 G_D (\%w/w) &= (a_d \times A_d/A_{IS} + b_d) \times W_{IS} \times 100/W \\
 &= [ 1.2627 \times (20126.7/75447.8) + 0.0987 ] \times 0.801 \times 100/50.1 \\
 &= 0.6963
 \end{aligned}$$

$$GI_D = 0.1488 \times 0.6963 = 0.104$$

## - ไตรกลีเซอไรต์

$$\begin{aligned}
 G_T (\%w/w) &= (a_t \times A_t/A_{IS} + b_t) \times W_{IS} \times 100/W \\
 &= [ 1.0769 \times (36470.5/75447.8) + 0.0617 ] \times 0.801 \times 100/50.1 \\
 &= 0.9309
 \end{aligned}$$

$$GI_T = 0.1044 \times 0.9309 = 0.097$$

## - กลีเซอรินทั้งหมด

$$\begin{aligned}
 \text{Total Glycerin } (\%w/w) &= \text{Free glycerin} + \text{Bound glycerin} \\
 &= 0.0082 + (0.140 + 0.104 + 0.097) \\
 &= 0.35
 \end{aligned}$$

ความหมายของตัวแปรในสมการคำนวณ

$$G = (a_g \times A_g/A_{IS} + b_g) \times W_{IS} \times 100/W$$

โดย

G = ร้อยละโดยน้ำหนักของกลีเซอรินอิสระในสารตัวอย่าง

A<sub>g</sub> = พื้นที่พีคของกลีเซอรอลA<sub>IS</sub> = พื้นที่พีคของ Internal standardW<sub>IS</sub> = น้ำหนักของ Internal standard ในหน่วยมิลลิกรัม

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง ในหน่วยมิลลิกรัม

a<sub>g</sub> คือ ความชัน และ b<sub>g</sub> คือ จุดตัดแกน y ซึ่งได้มาจากการทำ Calibration curve

หมายเหตุ : (g = glycerol, m = mono - glycerides, d = di - glycerides, t = tri - glycerides)

## 2. วิธีการทดสอบหาค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ในน้ำมันไบโอดีเซล ; EN 14103

เป็นการวิเคราะห์ปริมาณเอสเทอร์ของ Fatty Acid Methyl Ester เหมาะสำหรับการหาปริมาณเอสเทอร์ของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืชที่มีมากกว่า 96.5% โดยน้ำหนัก โดยวิธีการนี้เหมาะสมกับ FAME ที่มีจำนวนเมทิลเอสเทอร์ระหว่าง C<sub>14</sub> – C<sub>24</sub>

### อุปกรณ์และสารเคมี

#### 1. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี บริษัท SHIMADZU รุ่น GC 2010

##### 1.1 คอลัมน์ บริษัท GC Science รุ่น Inert Cap WAX

- stationary phase คือ polyethylene glycol

- ความยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร และความหนา 1 ไมโครเมตร

##### 1.2 ดีเทคเตอร์ เฟลมไอออไนเซชันดีเทคเตอร์

#### ตารางที่ 1. สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

Injector		
ปริมาณตัวอย่างที่ฉีด	1 ไมโครลิตร	
Column Temperature Program		
Initial temperature	150 °ซ	ทิ้งไว้ 5 นาที
Rate 1	3 °ซ/นาที ถึง 190 °ซ	ทิ้งไว้ 5 นาที
Rate 2	3 °ซ/นาที ถึง 220 °ซ	ทิ้งไว้ 5 นาที
Detector		
ชนิด	เฟลมไอออไนเซชัน	
อุณหภูมิ	250 °ซ	
Carrier Gas		
ชนิด	ฮีเลียม	
อัตราการไหลของแก๊ส	3 มล./นาที	

#### 2. สารละลายเฮปเทน

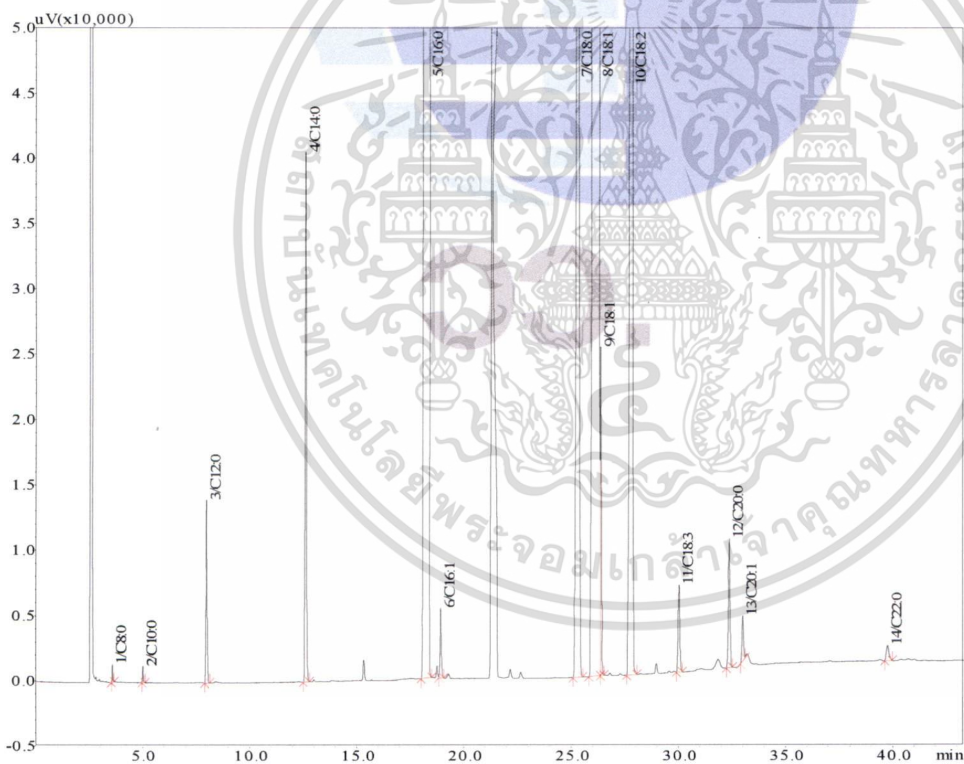
#### 3. ขวดทดลองขนาด 10 มล.

## วิธีการเตรียมตัวอย่าง

1. ชั่งสาร Internal std. น้ำหนัก  $0.050 \pm 0.0050$  กรัม โดยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในขวดทดลองขนาด 10 มล. บันทึกรหัสน้ำหนัก
2. ชั่งสารตัวอย่างไบโอดีเซล น้ำหนัก  $0.2500 \pm 0.0150$  กรัม โดยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในขวดเดิม พร้อมบันทึกน้ำหนัก
3. เติมน้ำมันละลายเฮปเทน ปริมาตร 5 มล. ปิดฝาเขย่าสารละลายให้เข้ากัน
4. นำตัวอย่าง ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

## ผลวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซล

ตัวอย่างที่ 2. น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ B-0 ครั้งที่ 1; TISTR  
โครมาโทแกรมที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงดังรูป



## แสดงตารางค่า Area และ RT ของตัวอย่างที่ 2.

Ret.Time	Area	Height	Name
2.574	300560869.2	141651761.1	HEPTANE
3.579	3181.6	1345.6	C8:0
5.006	3486.1	1270.7	C10:0
7.988	49307.9	13969.2	C12:0
12.628	176658.8	40471	C14:0
18.372	8689882.7	976021	C16:0
18.939	24126.8	5330.3	C16:1
21.513	3971183.7	458642.4	Internal standard
25.327	725619	85439.1	C18:0
26.293	7608150.4	669690.7	C18:1
26.391	100396.9	25060.5	C18:1
27.834	1748825.2	261534.2	C18:2
30.032	37706.9	6663.6	C18:3
32.375	53935.9	9882.5	C20:0
33.006	17230.6	3430.7	C20:1
39.771	9866.3	1160.3	C22:0
<b>Total area =</b>	<b>323780428</b>		

ตัวอย่างในการคำนวณ :

การวิเคราะห์น้ำหนักสารตัวอย่าง เท่ากับ 249.7 มก. และน้ำหนักของ Internal standard เท่ากับ 50.4 มก.นำไปคำนวณได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned}
 C (\%w/w) &= [(\sum A - A_{EI} - A_H) \times M_{EI} \times 100] / (A_{EI} \times M_{SAM}) \\
 &= [(323780428 - 3971183.7 - 300560869.2) \times 0.0504 \times 100] / (3971183.7 \times 0.2497) \\
 &= 97.83
 \end{aligned}$$

ความหมายของตัวแปรในสมการคำนวณ

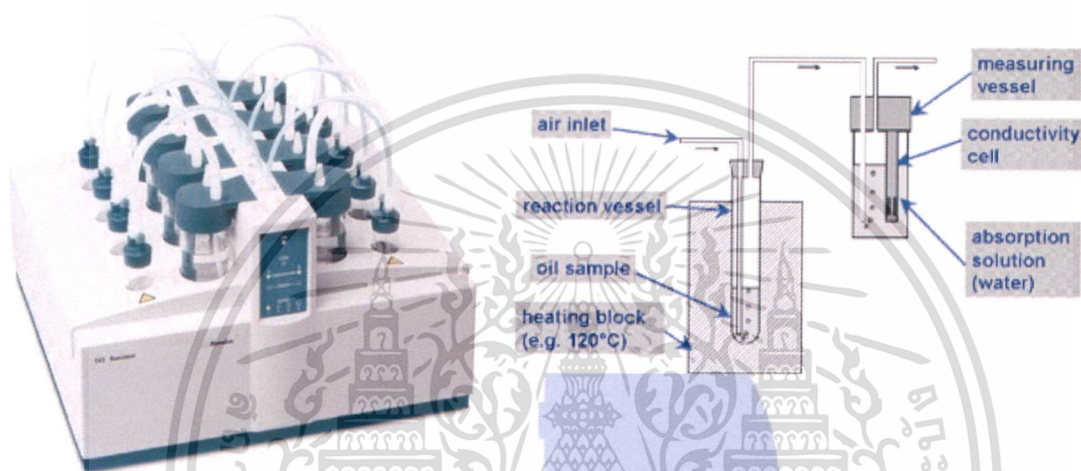
$$C = [(\sum A - A_{EI} - A_H) \times M_{EI} \times 100] / (A_{EI} \times M_{SAM})$$

- เมื่อ C ปริมาณเมทิลเอสเทอร์, ร้อยละโดยน้ำหนัก  
 $\sum A$  พื้นที่พีคทั้งหมด  
 $A_{EI}$  พื้นที่พีคของสาร Internal std.  
 $A_H$  พื้นที่พีคของสารละลายเฮปเทน

- M<sub>EI</sub>    น้ำหนักของสาร Internal std., มก.  
 M<sub>SAM</sub>    น้ำหนักของสารตัวอย่างไบโอดีเซล, มก.

## 2. เครื่อง RANCIMAT (oxidation stability)

เป็นเครื่องที่ใช้วิเคราะห์ค่าเสถียรภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ไบโอดีเซล ด้วยวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ EN 14112 ดังนี้



เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน :

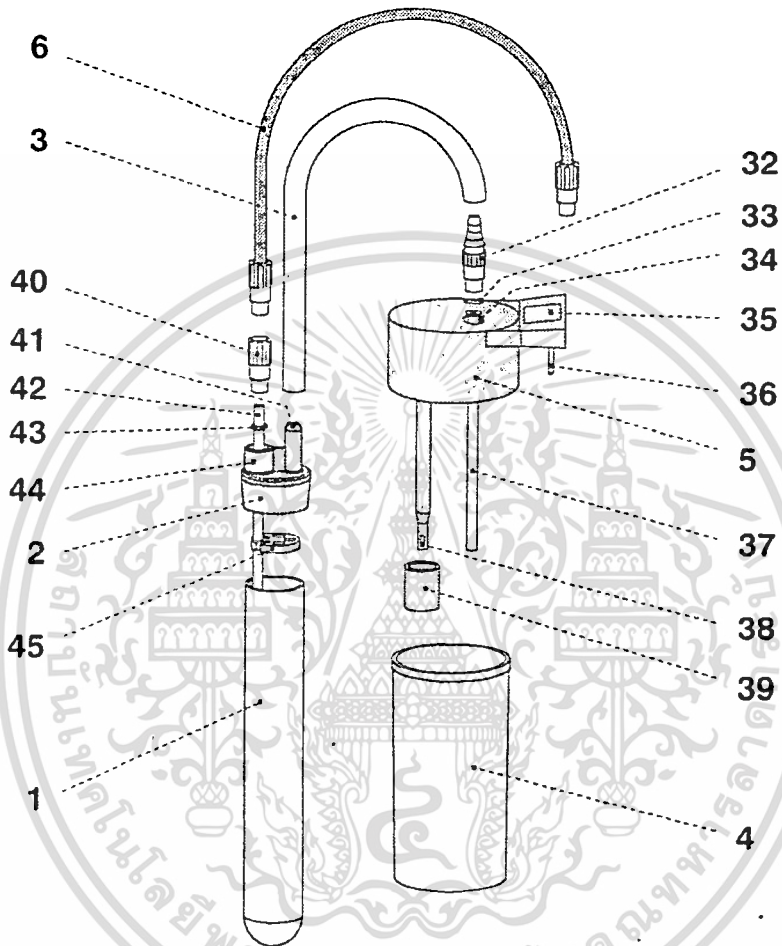
เป็นค่าที่บ่งถึงความสามารถของน้ำมันที่จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วได้ยางเหนียวและไบโอดีเซล ก็มีความไม่เสถียรเช่นเดียวกับน้ำมันตามธรรมชาติและไขมันจากสัตว์ ซึ่งเมื่อนำมาจัดเก็บไว้เป็นเวลานาน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น คือเกิดการแปรสภาพของน้ำมันอย่างช้าๆ ด้วยออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศ เกิดเป็นสารซึ่งถูกออกซิไดซ์ อยู่ในรูปของ aldehydes, alcohols และ carbonic acids ซึ่งมีผลกระทบต่อไอดี ห้องเผาไหม้และการเก็บสำรองน้ำมัน

ค่าความเสถียรของน้ำมันไบโอดีเซล จะต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือไม่ต่ำกว่า 6 ชั่วโมง และในปัจจุบันมีการเติมสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant substances) เพื่อช่วยให้ น้ำมันเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ช้าลงด้วย

วิธีมาตรฐานการวิเคราะห์ EN 14112 :

ให้ความร้อน อุณหภูมิ 110 ° ซ และเติมอากาศซึ่งมีอัตราการไหลของอากาศ 10 ลิตร/ชั่วโมง เข้าสู่ไบโอดีเซลน้ำหนัก 3.00 กรัมซึ่งบรรจุภายในหลอดทดลองแก้ว และอยู่ในระบบปิด ซึ่งมีการต่อสายท่ออากาศออกจากระบบปิด เพื่อนำอากาศส่วนที่อยู่ด้านบน ซึ่งคืออากาศส่วนที่ถูกออกซิไดซ์ออกมานั้นจุ่มลงในกระบอกแก้วซึ่งบรรจุน้ำ DI (deionization) ปริมาตร 80 มิลลิลิตร ที่ส่วนฝาของกระบอกแก้วนี้จะมีตัวโพรววด

ค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งจะส่งสัญญาณไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลเป็นกราฟ และรายงานค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันออกมาเป็นค่า IP (Induction period)



รูปที่ 1 แสดงชิ้นส่วนของอุปกรณ์และวิธีการประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับเครื่อง Rancimat

1 Reaction vessel	36 Connection plug
2 Reaction vessel cover	37 PTFE tube
3 Connecting tubing (white)	38 Electrodes
4 Measuring vessel	39 Protective ring
5 Measuring vessel cover	40 Connection nipple
6 Connecting tubing (green)	41 Connection สำหรับ connection tubing <sup>3</sup>
32 Connection piece	42 Air inlet tube
33 Opening " Out "	43 Sealing ring
34 Opening " In "	44 Connection สำหรับ connection nipple <sup>40</sup>
35 Marking field	45 Foam barrier

วิธีการวิเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยเครื่อง RANCIMAT

- ประกอบฝา Measuring vessel cover<sup>5</sup> โดย
  - ใส่หลอด PTFE tube<sup>37</sup> ใส่ลงไปในรูเปิด Opening "In"<sup>34</sup> ทางด้านบนของฝา
  - นำน็อตพลาสติก Connection piece<sup>32</sup> ชันลงไปในรูเปิด (IN) และสวมวงแหวนพลาสติกสีเขียว (Protective ring<sup>39</sup>) ลงไปที่ปลาย Electrodes<sup>38</sup>
- ใส่น้ำกลั่นลงไปในตัว Measuring vessel<sup>4</sup> ปริมาตร 80 มิลลิลิตร (สังเกตได้จากขีดภายในตัว)
- ประกอบฝา Measuring vessel cover<sup>5</sup> และตัว Measuring vessel<sup>4</sup> เข้าด้วยกัน จากนั้นนำไปใส่ในเครื่อง Rancimat
- ประกอบ Reaction vessel cover<sup>2</sup> โดย
  - นำยาง Sealing ring<sup>43</sup> สวมลงไปในแท่ง Air inlet tube<sup>45</sup> โดยให้ยางห่างจากปลายแท่งแก้ว ประมาณ 1 เซนติเมตร จากนั้นนำแท่ง Air inlet tube<sup>45</sup> ใส่ลงไปในรูเปิด Connection<sup>44</sup>
  - นำน็อตพลาสติก Connection nipple<sup>40</sup> ชันลงไปในรูเปิด Connection<sup>44</sup>
  - นำ Foam barrier เสียบลงไปบริเวณกึ่งกลางของแท่ง Air inlet tube<sup>45</sup>
- ใส่สารตัวอย่างลงไปในห้องทดลอง โดยชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างให้มีปริมาณ 3.00xx กรัม โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- ประกอบฝา Reaction vessel cover<sup>2</sup> กับห้องทดลองเข้าด้วยกัน โดยต้องแน่ใจแล้วว่าตัวฝากับห้องทดลองปิดสนิทแล้ว จากนั้นนำชุดทดลองใส่ลงไปในห้องเครื่อง Rancimat
- เชื่อมต่ออย่าง Connecting tubing<sup>3</sup> (สีขาว) ระหว่าง Measuring vessel<sup>4</sup> กับชุดทดลอง
- เชื่อมต่ออากาศ Connecting tubing<sup>3</sup> (สีเขียว) กับตัว Measuring vessel<sup>4</sup> เข้าด้วยกัน
- ผลการทดลองจะแสดงอัตโนมัติหลังจากที่ปฏิกิริยาสิ้นสุด