

## บทที่ 2

## ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



## 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

## 2.1.1 พืชพลังงานที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย

พืชน้ำมันที่นิยมปลูกเพื่อผลิตพลังงานในประเทศไทยได้แก่ ปาล์มน้ำมันและสบู่ดำ ซึ่งปัจจุบันพบว่า ยังไม่มีความเหมาะสมสำหรับประเทศไทย เนื่องจาก ปาล์มน้ำมันเป็นพืชอาหารทำให้ส่งผลกระทบต่อราคาวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการผลิตเป็นพลังงาน ส่วนสบู่ดำนั้นถึงแม้จะไม่ใช้พืชอาหารแต่ผลผลิตที่ได้ยังไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะแสวงหาพืชพลังงานตัวใหม่ที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล

มะเขือหินเป็นพืชน้ำมันที่ปลูกที่ประเทศลาว มีการนำเข้ามาในประเทศไทยโดยกลุ่มของนักวิจัยที่ไปประชุม ACMAX อันประกอบด้วยประเทศไทย ลาว พม่า กัมพูชา และเวียดนาม ซึ่งมะเขือหินเป็นไม้ยืนต้นอายุ 50-60 ปี มีดอกสวยงาม ไม่ผลัดใบ ดังนั้นนอกจากจะปลูกผลิตน้ำมันแล้วยังสามารถปลูกเพื่อแก้ปัญหาโลกร้อนได้อีก นอกจากนั้นแล้วยังมีผลผลิตสูงกว่าสบู่ดำ (ประเมินว่าน่าจะให้ผลผลิตสูงถึง 1,200-1,500 กิโลกรัมต่อไร่) ซึ่งถ้าปลูกแบบพืชเศรษฐกิจแล้วคาดว่าจะให้ผลผลิตที่สูงกว่านี้ ดังนั้นจึงมีความเหมาะสม ที่จะศึกษาและนำมาส่งเสริมการผลิตในประเทศไทย



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบพืชพลังงาน 3 ชนิด ปาล์มน้ำมัน สบู่ดำ และมะเขือหิน

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบผลผลิตและคุณสมบัติของพืชน้ำมันชนิดใหม่ (มะเขยาคิน) ปาล์มน้ำมัน และสบู่ดำ

ข้อมูลเปรียบเทียบ	พืชน้ำมันชนิดใหม่ (มะเขยาคิน)	สบู่ดำ	ปาล์มน้ำมัน
จำนวนเมล็ดต่อกิโลกรัม	400	1,200	-
ผลผลิตต่อต้น (อายุ 5 ปี) กิโลกรัม	22	1	-
ผลผลิตต่อไร่ (ปลูก 4 x 4 เมตร)	1,200-1,500	300-500	2,500-3,000 (ภาคใต้)
เปอร์เซ็นต์น้ำมัน (%)	> 30	> 30	18-20
ปริมาณน้ำมัน (ลิตร/ไร่/ปี)	300-400	100-120	400-500
ราคาน้ำมันที่ผลิตได้ (30 บาท/ลิตร)	9,000-12,000	3,000-3,600	12,000-15,000
ค่าความร้อน (MJ/kg)	38.9	38.2	36.5
ความถ่วงจำเพาะ	0.939	0.915	0.898

\* ข้อมูลมะเขยาคินได้จากการสำรวจและประเมินจากประเทศลาว

### 2.1.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากพืชน้ำมัน

ไบโอดีเซล คือ เชื้อเพลิงที่สังเคราะห์ได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ที่ผ่านกระบวนการทางเคมีกับแอลกอฮอล์ชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเพียงหมู่เดียว และมีคาร์บอนตั้งแต่ 1 ถึง 8 อะตอม เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอลบิวทานอล และเอมิลแอลกอฮอล์ โดยมีกรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ให้มีขนาดเล็กลง โดยทั่วไปกระบวนการผลิตไบโอดีเซลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการ ดังนี้

#### 2.1.2.1 กระบวนการผลิตแบบกะ (Batch Technology)

กระบวนการผลิตแบบกะเป็นกระบวนการผลิตที่นิยมมากที่สุด เพราะว่าเป็นกระบวนการที่ง่ายและลงทุนต่ำ โดยการผลิตส่วนใหญ่ใช้ถังผสมกวน สารตั้งต้นทั้งหมดจะถูกป้อนเข้าถังผสมพร้อมกัน เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จแล้วจะได้ผลผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรินซึ่งการผลิตแบบกะเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน แต่มีกำลังการผลิตในแต่ละครั้งไม่มากนัก คุณภาพของไบโอดีเซลอาจจะไม่สม่ำเสมอ และใช้ระยะเวลาในการผลิตค่อนข้างนาน โดยทั่วไปแล้วในเชิงพาณิชย์ จะใช้อัตราส่วนแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 (แอลกอฮอล์มากเกินไป) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามหนึ่ง ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 60-65 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตไบโอดีเซลประมาณ 85-94%

#### 2.1.2.2 กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Technology)

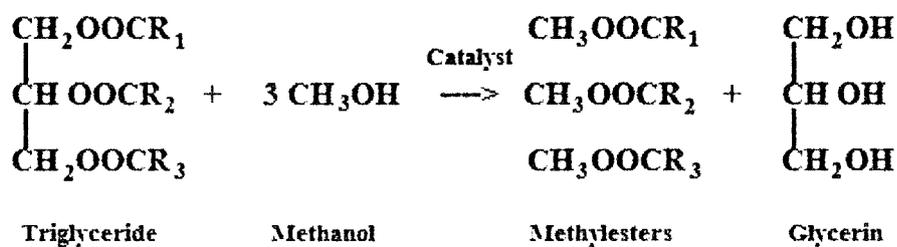
กระบวนการนี้เป็นกระบวนการผลิตที่ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ โดยการป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่เครื่องผสมกวนแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor, CSTR) โดยทั่วไปแล้วการผลิตในระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการผลผลิตจำนวนมาก มักจะนิยมใช้เครื่องผสมกวนแบบไหล

ต่อเรื่องนี้ เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นอยู่ในสถานะคงตัว ทำให้ควบคุมได้ง่าย ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสม่ำเสมอ นอกจากนี้กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ยังช่วยลดขั้นตอนการถ่ายเทสารเข้าออกถึงปฏิกรณ์โดยทั่วไปแล้วในการผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรมมีพื้นฐานมาจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันพืชสำหรับบริโภค การพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่สำคัญ ได้แก่

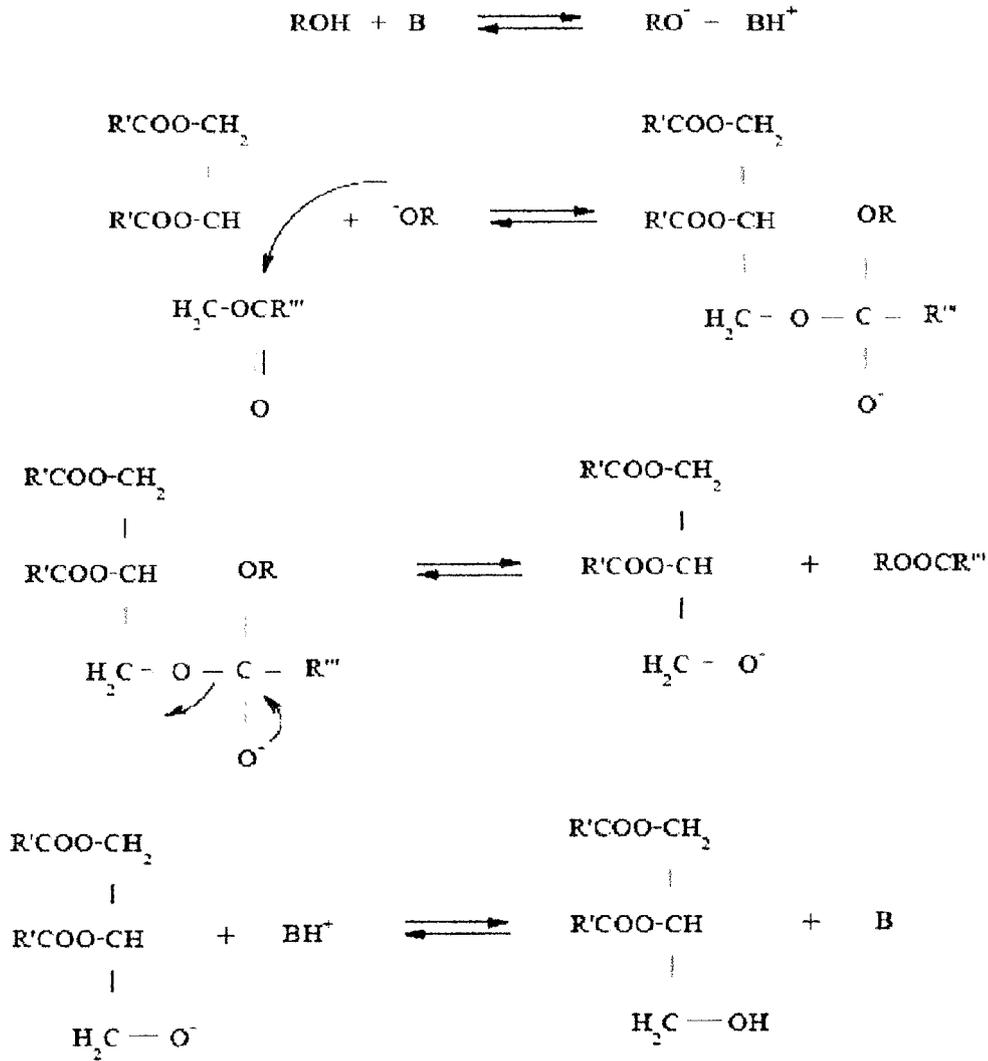
- กระบวนการแบบดั้งเดิม (Conventional process)
- กระบวนการแบบสองขั้นตอน (Two-stage acid and base catalyst process)
- กระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst process)
- เทคโนโลยีเอนไซม์ไลเปส (Lipase technology)
- กระบวนการสภาวะวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical process)
- เทคโนโลยีคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic technology)
- เทคโนโลยีคลื่นรังสีไมโครเวฟ (Microwave irradiation technology)

### กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบดั้งเดิม

กระบวนการนี้เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ (ไตรกลีเซอไรด์) กับ แอลกอฮอล์โดยมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิประมาณ 60-65°C เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเรียกกระบวนการนี้ว่า “ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน” กลไกการเกิดปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

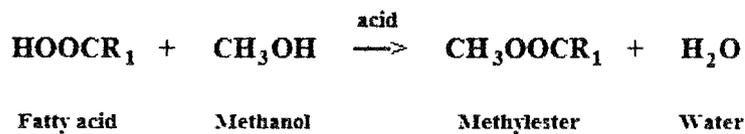
แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ เมทานอลและเอทานอล โดยเฉพาะเมทานอลเพราะมีราคาถูกและหาได้ง่าย อีกทั้งมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา โดยเมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้นที่สุดและโมเลกุลมีความเป็นขั้วสูง จึงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วเมื่อใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในส่วนของเอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถผลิตได้จากพืช เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นต้น ถือเป็นวัตถุดิบที่สามารถหมุนเวียนได้ ไบโอดีเซลที่ได้จากแอลกอฮอล์แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เว้นแต่มีสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืด จุดเกิดหมอก และจุดเทไหลเป็นต้นการใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือสารละลายเมทอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการนี้สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่าการใช้กรด และอาจจะเกิดการรบกวนจากกรดไขมันอิสระ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของปฏิกิริยาสaponification หรือเกิดสบู่ขึ้น

**กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน**

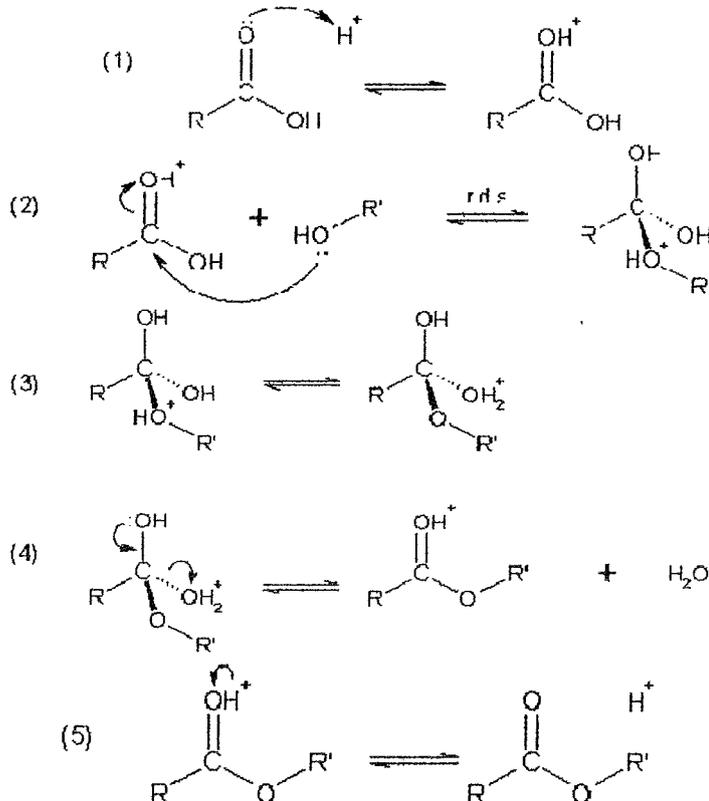
จากการศึกษาข้อมูลของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่มีปริมาณกรดไขมันสูงกว่า 2 mgKOH/g จำเป็นต้องใช้การผลิตแบบ 2 ขั้นตอน เพื่อให้ได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ดีที่สุด โดยผ่านกระบวนการแบบเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกรดเพื่อลดค่าความเป็นกรดให้เหลือน้อยที่สุด จากนั้นต้องใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยด่างเพื่อผลิตไบโอดีเซล กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนมีดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1. ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน**

ปฏิกริยานี้เป็นการเกิดปฏิกริยาทางเคมีของ “กรดไขมันกับแอลกอฮอล์” ให้กลายเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาที่เป็นกรดเช่น กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริก เป็นต้น โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมนิยมใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกริยาผลผลิตที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง แต่จะต้องใช้ระยะเวลาในการผลิตค่อนข้างนาน กระบวนการนี้สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง (มากกว่า 2mgKOH/g) อย่างไรก็ตามผลของตัวเร่งปฏิกริยาจะทำให้เกิดการกัดกร่อนภายในเครื่องยนตร์กลไกการเกิดปฏิกริยา ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน



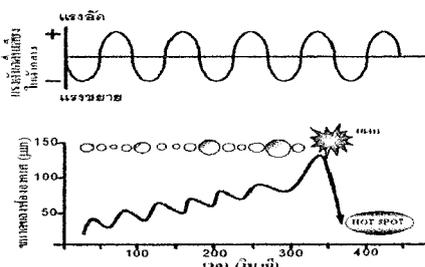
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยา

## ขั้นตอนที่ 2. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยานี้จะเป็นกระบวนการทางเคมีระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ ให้กลายเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันหรือไบโอดีเซล ดังที่กล่าวมาในข้างต้น โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง (B) เช่น NaOH, KOH, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ผสมกับแอลกอฮอล์ จะได้สารละลายที่เป็นหมู่แอลคอกไซด์ (-OR) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริง หลังจากนั้นเกิดปฏิกิริยาเป็น 3 ขั้นตอนขั้นแรก คือ อัลคอกไซด์จะเข้าชนหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของไตรกลีเซอไรด์ เพื่อจัดรูปที่เป็นอินเทอร์มีเดียท (Intermediate) ที่มีโครงสร้างเป็นทรงสี่เหลี่ยมหน้า (Tetrahedral) ขั้นสอง สารที่ไม่เสถียรนี้จะแตกตัว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันหรือไบโอดีเซล (ROOCR") และไดกลีเซอไรด์แอนไอออน (DG) ขั้นสาม ไดกลีเซอไรด์แอนไอออนได้รับโปรตอนจากต่าง ได้เป็นสารประกอบไดกลีเซอไรด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่างพร้อมจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นของแอลกอฮอล์ เพื่อเริ่มวัฏจักรการเร่งปฏิกิริยาต่อไป กลไกการเกิดปฏิกิริยาทั้งสามขั้นตอนจะได้เอสเทอร์ของกรดไขมันและกลีเซอรินในท้ายที่สุด

### เทคโนโลยีคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic technology)

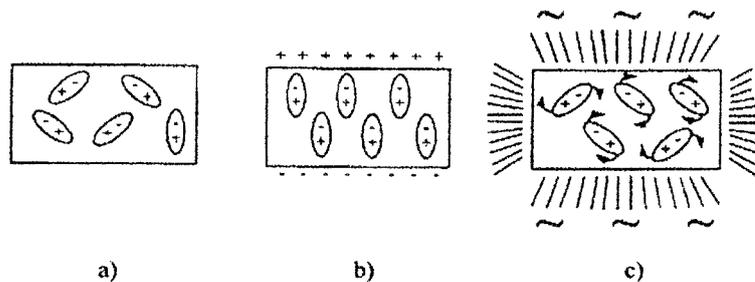
เป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้พลังงานจากคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง มากกว่า 20,000 รอบต่อวินาที หรือเทียบเท่ากับการสั่นของตัวกลางเท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ซึ่งความถี่นี้จะอยู่เหนือขอบเขตการได้ยินของมนุษย์ การผลิตไบโอดีเซลจากคลื่นอัลตราโซนิกนั้นอาศัยการเกิดปรากฏการณ์คาวิตาชัน (cavitations) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญที่เกิดขึ้นในตัวกลางหรือสารละลายเมื่อได้รับคลื่นอัลตราโซนิก เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมี เนื่องจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตราโซนิกจะถูกบีบอัด (compress) และคลายตัว (stretch) ซ้ำไปซ้ำมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นและฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในของเหลวนี้อาจสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นระยะๆ และเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกันเป็นผลทำให้ฟองอากาศใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งแตกออก และเกิดปฏิกิริยาในเวลาอันรวดเร็วโดยกระบวนการนี้สามารถลดระยะเวลาในการผลิตไบโอดีเซลลงเหลือ 5-10 นาที และได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงถึง 96-98 %



รูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์คาวิตาชันของคลื่นอัลตราโซนิก(พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล, 2550)  
 (ที่มา : [http://www.nstda.or.th/nac2007/images/stories/exhibit/food-agro/agro\\_6.1.pdf](http://www.nstda.or.th/nac2007/images/stories/exhibit/food-agro/agro_6.1.pdf))

**เทคโนโลยีคลื่นไมโครเวฟ (Microwave technology)**

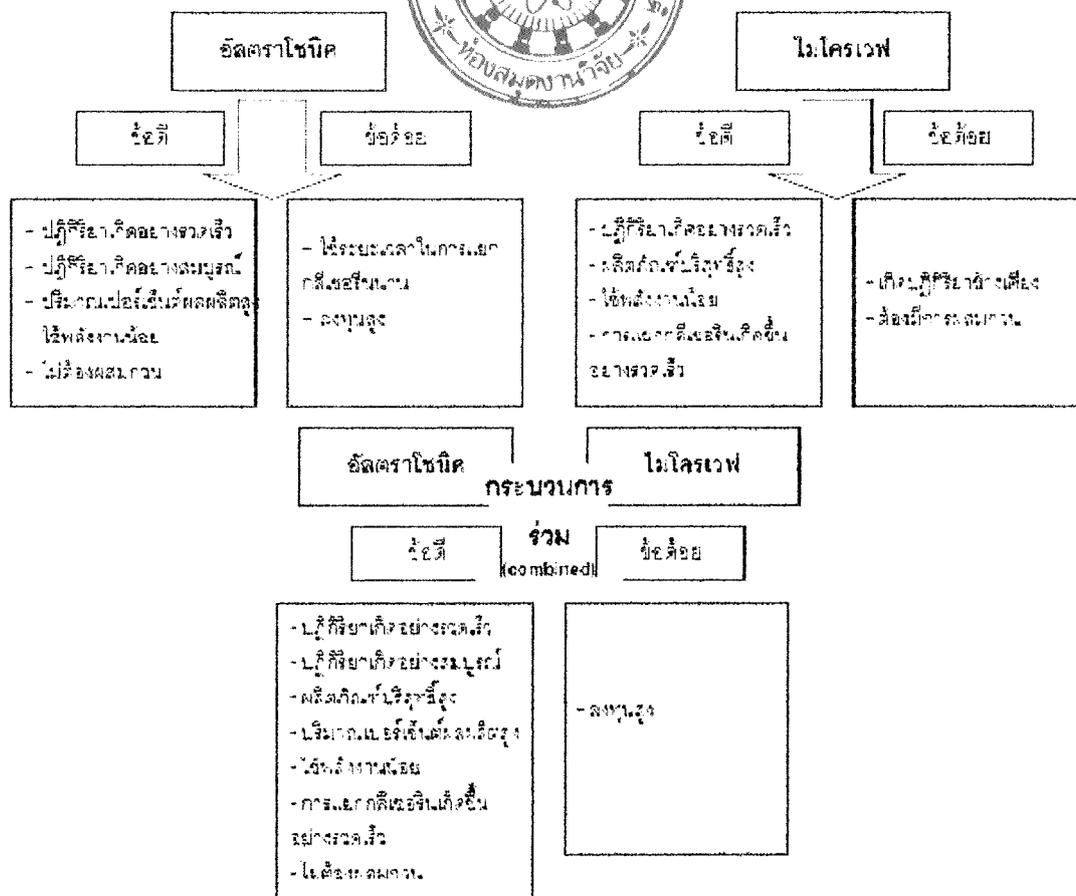
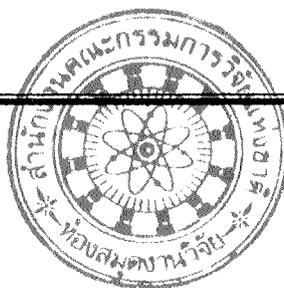
เป็นกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล โดยการใช้หลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ (Electromagnetic field) ในการเหนี่ยวนำโมเลกุลที่มีขั้วของสารละลาย ทำให้เกิดการสั่นสะท้อน กระแทกชนกันและเกิดปฏิกิริยาในที่สุด สามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันและเร่งการก่อตัวของตะกอนกลีเซอรินได้ในเวลาอันรวดเร็ว การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เตาไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 GHz พบว่าสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ในเวลาประมาณ 3-5 นาที โดยเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้สูงถึง 98-99%



รูปที่ 2.7 ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อพฤติกรรมของขั้วไฟฟ้า (PerreuxและLoupy, 2001)

- (a) ไม่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (b) ได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง
- (c) ได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง

คลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานที่มีค่าพลังงานค่อนข้างต่ำที่อยู่ในช่วงของแถบแม่เหล็กไฟฟ้า มีความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุ แต่มีความถี่ต่ำกว่าคลื่นรังสีเอกซ์เรย์ คลื่นอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นอื่นๆ ที่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้พันธะเคมีแตกตัว ขณะที่พลังงานของคลื่นรังสีไมโครเวฟจะไม่ทำให้พันธะเคมีแตกตัว แต่จะเกิดการสั่นภายในโมเลกุลจนทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งความร้อนจะทำหน้าที่ในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาและทำให้พันธะเคมีแตกตัว ทำให้ปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์ภายในระยะเวลาอันสั้น แทนที่การทำปฏิกิริยาเป็นชั่วโมงหรือเป็นวันของการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม จากเหตุผลดังกล่าว คลื่นรังสีไมโครเวฟได้รับการยอมรับและถูกนำไปใช้ในการทดลองทางวิทยาศาสตร์



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบกระบวนการผลิตร่วมอัลตราโซนิคร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

โดยสรุปการใช้กระบวนการร่วมจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม

### 2.1.3 มาตรฐานไบโอดีเซลและคุณสมบัติเชื้อเพลิง

มาตรฐานการทดสอบไบโอดีเซลของประเทศไทย แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ไบโอดีเซลชุมชนและไบโอดีเซลที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) และกลุ่มสหภาพยุโรป (EN) โดยการจัดจำหน่ายน้ำมันดีเซลประเภทเชื้อเพลิงผสมไบโอดีเซลต้องผ่านมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน ซึ่งกำหนดตามประเภทน้ำมัน เช่น น้ำมันบี5(B5) จะมีส่วนผสมของไบโอดีเซล 5 ส่วน น้ำมันดีเซล 95 ส่วน และสำหรับการใช้ไบโอดีเซล 100% หรือบี100 จำเป็นต้องมีการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ที่มีผลต่อเครื่องยนต์และสิ่งแวดล้อม ซึ่งมาตรฐานที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความหนืด (Kinematic Viscosity), ความหนาแน่น (Density), จุดวาบไฟ (Flash point), ถากถ่าน (Carbon residue), จำนวนซีเทน (Cetane number), ค่าความเป็นกรด (Acid value), อุณหภูมิการกลั่นตัว (อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรในอัตราร้อยละ 90) (Distillation

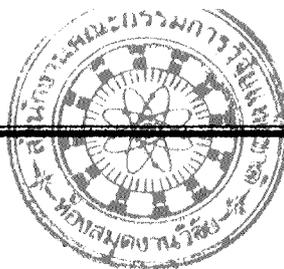
90%recovered), จุดเทไหล (Pour point), การกัดกร่อนทองแดง (Copper strip) และค่ากลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin) ดังตารางที่ 2.2

โดยที่ข้อกำหนดตามมาตรฐานตามที่กรมธุรกิจพลังงานเพื่อป้องกันผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์เมื่อนำไปใช้งาน ซึ่งคุณสมบัติบางประการของไบโอดีเซลที่อาจจะส่งผลต่อเครื่องยนต์มีดังต่อไปนี้

1. ค่าความเป็นกรด แสดงถึงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซล ซึ่งจะส่งผลต่อการกัดกร่อนชิ้นส่วนภายในของเครื่องยนต์
2. ปริมาณเมทานอล มีผลต่อความปลอดภัยในด้านการเก็บรักษาและการขนส่ง ยังมีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนหรือการบวมของชิ้นส่วนต่างๆ ภายในเครื่องยนต์
3. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลของปฏิกิริยาจะทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์และของแข็งที่ไม่ละลายในไบโอดีเซลทำให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบหรือวาล์ว
4. ปริมาณกลีเซอไรด์ ประกอบด้วยโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ หรือวาล์ว ส่งผลให้เกิดไอเสียที่มีมลพิษมากกว่าเดิม
5. ปริมาณน้ำ เป็นสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกกับไบโอดีเซล เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ส่งผลให้มีค่าความเป็นกรดสูง จนทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ และทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์
6. ปริมาณโลหะและฟอสฟอรัส ทำให้ระบบควบคุมไอเสียหลังการเผาไหม้เสื่อมสภาพลง
7. ค่าจุดขุ่น ทำให้เกิดปัญหาในการสตาร์ทเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์เบื้องต้นของคุณลักษณะและคุณภาพไบโอดีเซล (กรมธุรกิจพลังงาน, 2550)

คุณสมบัติ	ค่ามาตรฐาน		วิธีทดสอบ
	อัตราสูงค่า	ค่า	
ค่าความหนืด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (cSt)	ไม่ต่ำกว่า และไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D 445
ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (kg/m <sup>3</sup> )	ไม่ต่ำกว่า และไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
จุดวาบไฟ(°C)	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
กากถ่าน (% wt.)	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
จำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613 หรือ ASTM D 976
ค่าความเป็นกรด (mg.KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
การกลั่น(°C)	ไม่สูงกว่า	357	ASTM D 86
จุดเทไหล(°C)	ไม่สูงกว่า	10	ASTM D 97
การกัดกร่อนทองแดง	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
กลีเซอรินทั้งหมด(% wt.)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105



### 2.1.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเป็นการตรวจสอบการสลายตัวและการหืนของไขมันและน้ำมัน Acid Value ของไขมันหรือน้ำมัน คือ จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไขมันหรือน้ำมัน 1 กรัมเป็นกลางพอดี ผลการทดลองอาจจะนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระได้

ค่า Acid Value ที่วิเคราะห์ได้ใช้เป็นตัวบ่งว่าไตรเอซิลกลีเซอรอลที่มีอยู่ในไขมันหรือน้ำมัน ถูกทำลายด้วยเอนไซม์ไลเปสเป็นกรดไขมันอิสระมากน้อยเพียงใด ถ้าค่า A.V. สูง แสดงว่าโมเลกุลของไตรเอซิลกลีเซอรอลถูกสลายตัวได้เป็นกรดไขมันอิสระมาก แสดงว่ามี hydrolytic rancidity เกิดขึ้นที่ไขมันหรือน้ำมันนั้น ความร้อนและแสงช่วยเร่งให้เกิดการหืนได้เร็วขึ้น สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.1 ดังต่อไปนี้คือ

$$A.V. = \frac{56.1 \times N \times V}{m} \quad (2.1)$$

- เมื่อ *A.V.* คือค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมไขมัน  
*N* คือความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, นอร์มัล  
*V* คือปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรท, มิลลิลิตร  
*m* คือน้ำหนักน้ำมันจากพืช, กรัม

### 2.1.5 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

การคำนวณค่า Acid Value เป็นปริมาณของกรดไขมันอิสระในรูปที่ของเปอร์เซ็นต์ของกรดปาล์มิติก (ใช้กับน้ำมันปาล์ม) หรือกรดลอริก (ใช้กับน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์มเคอร์เนล) หรือกรดโอเลอิก (ใช้กับน้ำมันพืชอื่น ๆ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

จาก 1 มิลลิลิตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ทำปฏิกิริยาพอดีกับกรดโอเลอิก 0.0282 กรัม หรือ กรดปาล์มิติก 0.0256 กรัม หรือกรดลอริก 0.0200 กรัม จะได้

$$A.V. = 2.19 \times \%FFA \quad (\text{ในรูปที่กรดปาล์มิติก}) \quad (2.2)$$

$$= 2.81 \times \%FFA \quad (\text{ในรูปที่กรดลอริก}) \quad (2.3)$$

$$= 1.99 \times \%FFA \quad (\text{ในรูปที่กรดโอเลอิก), (มะเขยาคิน)} \quad (2.4)$$

น้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระประมาณ 0.5 – 1.5 % ในรูปที่กรดโอเลอิกจะเริ่มสังเกตการหืนได้ บางครั้งค่า Acid Value ของไขมันหรือน้ำมันสามารถรายงานเป็นมิลลิลิตรของสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 นอร์มัล ที่ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไขมันหรือน้ำมัน 100 กรัม เป็นกลางพอดี

กรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชยังสามารถวัดปริมาณได้โดยใช้ Colorimeter วิธีการทำใช้เบนซีนสกัดกรดไขมันอิสระออกมา แล้วนำมาเขย่ากับสารละลายคอปเปอร์แอสซีเตด กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์ได้เป็นสีน้ำเงินในชั้นของเบนซีน ซึ่งวัดความเข้มของสีได้ด้วยความยาวคลื่น 640 – 690 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานโดยใช้กรดโอเลอิกที่ทราบปริมาณแน่นอน

### 2.1.6 การคำนวณหาร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซล

การคำนวณหาปริมาณผลผลิตของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$\left[ \text{Yield of Biodiesel} = \frac{\text{Real Biodiesel}}{\text{Calculated Biodiesel}} \times 100 \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ	Yield of Biodiesel	คือปริมาณผลผลิตของไบโอดีเซล, %
	Real Biodiesel	คือผลผลิตที่ได้จากการทดลอง, กรัม
	Calculated Biodiesel	คือผลผลิตที่ได้จากการคำนวณ, กรัม

### 2.1.7 การประเมินสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล

การศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก เพื่อเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซลชุมชน และไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันมะเขือเทศซึ่งจะศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล โดยศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ กำลังเครื่องยนต์ และมลพิษจากเครื่องยนต์ ที่รอบและภาระงานค่าต่างๆ มีดังต่อไปนี้

#### 2.1.7.1 กำลังเพลา

การทดสอบเครื่องยนต์นิยมใช้ไดนาโมมิเตอร์ซึ่งมีขีดการวัดแรงบิดได้กว้างสามารถวัดแรงบิดที่เกิดขึ้นโดยการหมุนของเครื่องยนต์ แรงบิดที่เพิ่มขึ้นจากการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กระหว่างขดลวดอาเมเจอร์ (Armature) และสเตเตอร์(Stator) จะเท่ากับแรงบิดของเครื่องยนต์ที่จะทำการทดสอบ โดยวัดกำลังของไดนาโมมิเตอร์ ดังสมการที่ 2.6

$$BP = \frac{2\pi nT}{(60)(1000)} \quad (2.6)$$

เมื่อ	BP = กำลังเพลาเบรคของเครื่องยนต์ (kW)
	n = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)
	T = แรงบิด (Nm)

สำหรับไดนามิเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถหาได้จาก ค่ากระแส (I) และค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่จ่ายออกมาโดยเจนเนอเรเตอร์ เราสามารถนำมาประมาณการหาค่ากำลังเพลลาของเครื่องยนต์ได้ ดังสมการที่ 2.7

$$BP = \frac{\sqrt{3}VI\cos\phi}{1000} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $V$  = ค่าแรงดันไฟฟ้า (V)

$I$  = ค่ากระแสไฟฟ้า (Amp)

$\cos\phi = PF$  = แฟคเตอร์กำลัง (Power Factor)

### 2.1.7.2 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง สามารถหาได้โดยการวัดปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เข้าเครื่องยนต์ ในขณะที่เครื่องยนต์ทำงานภายใต้โหลดและความเร็วต่างๆต่อเวลา ดังสมการที่ 2.8

$$m_f = \frac{3600 \times V_f \times SG}{1000t} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $m_f$  = อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/h)

$V_f$  = ปริมาตรของน้ำมัน ( $\text{mm}^3$ )

$SG$  = ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิง

$t$  = เวลา (Sec)

### 2.1.7.3 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ คือการหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิงให้เป็นงานที่ทำได้

$$SFC = \frac{m_f}{BP} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $SFC$  = อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)

$BP$  = กำลังเพลลาเบรคของเครื่องยนต์ (kW)

$m_f$  = อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/h)

### 2.1.7.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ คือความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่เครื่องยนต์ส่งออกกับพลังงานที่เกิดจากการสันดาปน้ำมันเชื้อเพลิงตามสมการที่ 2.10

$$\eta_{bth} = \frac{BP \times 3600 \times 100}{m_f \times Q_h \times 1000} \quad (2.10)$$

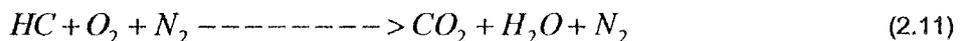
- เมื่อ  $\eta_{bth}$  = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน  
 $Q_h$  = ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง (MJ/kg)  
 $BP$  = กำลังเพลลาเบรคของเครื่องยนต์ (kW)  
 $m_f$  = อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/h)

### 2.1.8 การเผาไหม้และการเกิดมลพิษในเครื่องยนต์

#### 2.1.8.1 การเผาไหม้ของเครื่องยนต์

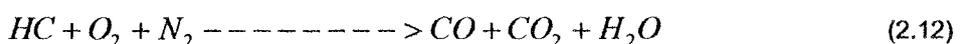
##### 1.) การเผาไหม้ที่สมบูรณ์

เชื้อเพลิง + อากาศ (ออกซิเจนและไนโตรเจน)  $\longrightarrow$  คาร์บอนไดออกไซด์ + น้ำ + ไนโตรเจน (ที่ไม่เปลี่ยนแปลง)



##### 2) การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

น้ำมันเชื้อเพลิง (HC) + อากาศ (ออกซิเจนและไนโตรเจน)  $\longrightarrow$  คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) + คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) + น้ำ



#### 2.1.8.2 การเกิดมลพิษในเครื่องยนต์

มลพิษที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์นั้น จะประกอบไปด้วยค่าดังต่อไปนี้คือ

##### 1) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ก๊าซดังกล่าวเกิดได้เนื่องจากการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ โดยทั่วไปเกิดจากมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าส่วนผสมหนา ซึ่งปกติแล้วจะไม่เกิดก๊าซนี้เมื่อส่วนผสมบาง แต่ในความเป็นจริงสามารถเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุแม้มีส่วนผสมบาง ดังนี้คือเกิดจากการดับของเปลวไฟขณะกระบวนการเผาไหม้ เนื่องจากไอตีที่อยู่บริเวณติดกับผนังห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิต่ำ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากการจ่ายน้ำมันเข้าห้องเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอหรือเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เมื่อเพิ่ม

ออกซิเจนเข้าไปในกระบวนการ แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้หมด

## 2) ไฮโดรคาร์บอน (HC)

ก๊าซไฮโดรคาร์บอนเป็นก๊าซที่สามารถติดไฟได้ เนื่องจากไฮโดรเจนและคาร์บอนเป็นธาตุที่ติดไฟ เมื่อเกิดการเผาไหม้ไม่หมดจึงเหลือเชื้อเพลิง (ไฮโดรคาร์บอน) ปนออกมา กับไอเสีย ซึ่งการเกิดก๊าซดังกล่าวมีหลายสาเหตุ คือเกิดจากอากาศมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการสันดาปเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์จึงเหลือเชื้อเพลิงบางส่วนที่ไม่เผาไหม้ เกิดจากสัดส่วนหรืออัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันกับอากาศไม่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นส่วนผสมหนาหรือส่วนผสมบางเพราะส่วนผสมหนาจะทำให้ออกซิเจนที่ใช้ในการสันดาปไม่เพียงพอ เชื้อเพลิงจึงเผาไหม้ไม่หมด ในขณะที่เดียวกันหากส่วนผสมบางจะทำให้การแพร่กระจายของเปลวไฟลดลง ทำให้ส่วนผสมบางส่วนเผาไหม้ไม่ทันและเหลือมากับไอเสีย อีกทั้งยังเกิดจากส่วนผสมบางส่วนหลุดปนออกไปกับไอเสียในจังหวะที่ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียเปิดเหลื่อมกัน (Overlap) หรืออาจเกิดจากไอดีที่ติดกับผนังกระบอกสูบ ทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์

## 3) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>)

เกิดจากการสันดาปในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง หมายความว่าถ้ามีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะเกิดไนโตรเจนออกไซด์มาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไนโตรเจนออกไซด์จะเกิดได้นั้นต้องมีปัจจัยอยู่ 2 อย่าง คืออุณหภูมิในห้องเผาไหม้และอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับอัตราส่วนผสมที่ระดับต่างๆ กัน จะมีผลทำให้เกิดก๊าซในปริมาณที่ต่างกัน

## 4) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>)

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มักเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันเจือปนสูง เมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แพร่กระจายเข้าสู่อากาศจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และกลายเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) กลายเป็นซัลเฟอร์(SO<sub>4</sub>) ได้ทั้ง SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>และ SO<sub>4</sub> มักเรียกรวมกันว่า ออกไซด์ของซัลเฟอร์ ในเครื่องยนต์จะมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกมาน้อย เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผสมอยู่เล็กน้อยเมื่อเทียบกับชนิดอื่น

## 5) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

เกิดจากกระบวนการสันดาปที่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ ในกระบวนการสันดาปที่สมบูรณ์ ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ที่ได้จากอากาศจะทำหน้าที่เปลี่ยนเป็นไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ในน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นน้ำและคาร์บอน (C) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

### 6) ควันขาว (White smoke)

เกิดจากกลุ่มละอองไอของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหรือน้ำมันเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด รวมทั้งละอองไอน้ำมันหล่อลื่น มักเกิดจากเครื่องยนต์ที่มีสภาพเก่าที่ไม่ได้รับการดูแลรักษา

### 7) ควันดำ (Black smoke)

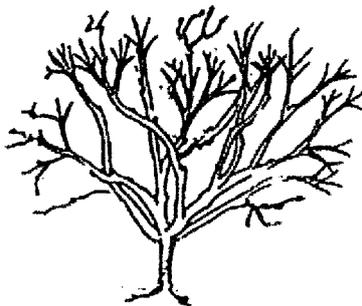
เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันในห้องสันดาปที่มีความร้อนไม่ทั่วถึง ทำให้ไม่สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงได้หมด สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ จะเกิดการคายไฮโดรเจน เนื่องจากในห้องสันดาปมีแรงดันและมีอุณหภูมิสูง ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิสระและรวมตัวกันกับเม็ดคาร์บอนออกมาในรูปที่ควันดำ การเกิดควันดำจากเครื่องยนต์ดีเซลมาก เนื่องจากน้ำมันดีเซลมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีไขน้ำมัน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงปนอยู่มากและห้องสันดาปของเครื่องยนต์ดีเซลมีแรงดันและมีอุณหภูมิสูงเหมาะแก่การเกิดปฏิกิริยาคายไฮโดรเจน

## 2.1.9 การประเมินศักยภาพการลดอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมจากการใช้น้ำของมะเขายหิน

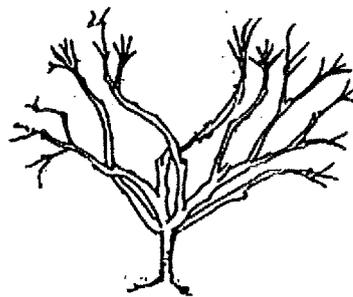
### 2.1.9.1 การประเมินปริมาณชีวมวลจากการตัดแต่งกิ่งต้นมะเขายหิน

การประเมินปริมาณชีวมวลจากการตัดแต่งกิ่งจะทำการตรวจวัดปัจจัยต่าง ๆ ประกอบด้วย ขนาดของทรงพุ่มของต้นไม้ ความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลาง ลักษณะทรงพุ่ม ระยะการปลูก อายุ และความถี่ของการตัดแต่งกิ่ง

1. ทำการตัดแต่งกิ่งต้นมะเขายหิน ในลักษณะรูปทรงต่าง ๆ ที่เหมาะสม ได้แก่



ก่อนการตัดแต่งกิ่ง



หลังการตัดแต่งกิ่ง

2. ทำการชั่งน้ำหนักปริมาณไม้เก็บตัวอย่างขนาดไม้ ไปหาวิเคราะห์ หาค่าความชื้น และค่าความร้อน
3. ทำการประเมินปริมาณชีวมวลที่ได้จากการตัดแต่งกิ่งไม้
  - ปริมาณชีวมวลที่ได้ต่อไร่ที่ความชื้น 25% และ 50%

### 2.1.9.2 การประเมินการลดความร้อนสภาวะอากาศ

ศักยภาพของการลดความร้อนอากาศแวดล้อมจากการใช้น้ำของพืช สามารถประเมินได้จาก ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ โดยขณะที่น้ำกลายเป็นไอจะดึงความร้อนจากอากาศแวดล้อมรอบๆ ต้นไม้ จึงทำให้อุณหภูมิหรือความร้อนรอบๆ ต้นไม้ลดลง สามารถเขียนเป็นสมการโดยเป็นค่าพลังงานที่เปรียบเทียบกับขนาดของพื้นที่ของบริเวณรากพืชรอบต้นไม้ซึ่งในที่นี้จะประเมินให้เท่ากับพื้นที่หน้าตัดของทรงพุ่มต้นไม้ได้ดังนี้

$$\dot{Q}_w = \frac{\dot{m}_w x h_{fg}}{A} \tag{2.13}$$

เมื่อความร้อนแฝงการระเหยน้ำและอัตราการใช้น้ำของพืชเท่ากับ

$$h_{fg} = 2502 - 2.386T_a \tag{2.14}$$

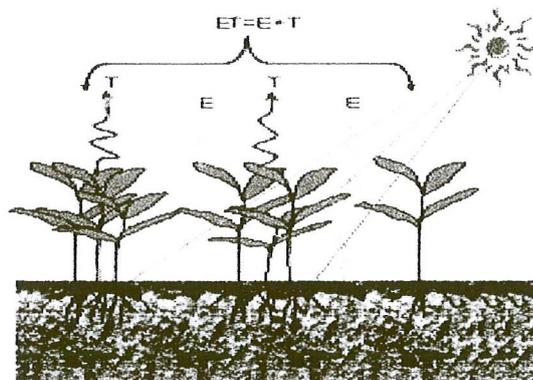
$$\dot{m}_w = \frac{ETx10^{-3} x \rho_w x A}{24x3600} \tag{2.15}$$

โดยที่	ET	คือ การใช้น้ำของพืช, มม/วัน
	$\dot{Q}_w$	คือ การลดความร้อนอากาศเนื่องจากการใช้น้ำ, วัตต์/ม <sup>2</sup>
	A	คือ พื้นที่ทรงพุ่ม, ม <sup>2</sup>
	$\dot{m}_w$	คือ อัตราการใช้น้ำของพืช, กก./วินาที
	$h_{fg}$	คือ ความร้อนแฝงการระเหยน้ำ, จูล/กก.
	Ta	คือ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย, องศาเซลเซียส
	$\rho_w$	คือ ความหนาแน่นของน้ำ, กก./ม <sup>3</sup>

ดังนั้นถ้าสามารถประเมินการใช้น้ำของพืชได้ก็จะสามารถประเมินศักยภาพในการลดอุณหภูมิ สภาวะแวดล้อมของพืชได้ โดยการใช้น้ำของพืชเป็นปัจจัยที่สำคัญในการที่จะคัดเลือกกว่าพืชชนิดใดควรที่จะส่งเสริมการปลูกในแหล่งใด เนื่องจากปริมาณฝนในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน การใช้น้ำของพืช (Consumption use) วิบูลย์ (2526) ได้ให้ความหมายไว้ว่าหมายถึงปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูญเสียไปจากพื้นที่เพาะปลูก ซึ่งประกอบด้วยน้ำที่พืชดูดไปจากดินเพื่อนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ และเนื้อเยื่อแล้วคายสู่บรรยากาศ (Transpiration) และปริมาณน้ำที่ระเหยจากผิวดินรอบๆ ต้นพืช (Evaporation) รวม

เรียกว่า การคายระเหย (Evapotranspiration) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และพบว่ามากกว่า 70% ของน้ำถูกดูดที่ระดับความลึกไม่เกิน ½ ของรากพืช (ดิเรก และคณะ, 2545)

การประเมินการใช้น้ำของพืชสามารถวัดได้จากการปลูกพืชในถังวัดอัตราการใช้น้ำของพืช (Lysimeters) ซึ่งทำจากภาชนะที่ด้านล่างของถังมีท่อสำหรับระบายน้ำที่ไหลผ่านเกินชั้นรากและพืชไม่สามารถดูดไปใช้ได้ ซึ่งปริมาณน้ำที่พืชใช้สามารถประเมินได้จากสมมูลน้ำดังนี้



รูปที่ 2.9 การใช้น้ำของพืช

ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET, mm/วัน) = ความลึกของน้ำในดินเริ่มต้น + ปริมาณน้ำฝน + ปริมาณน้ำที่ให้กับพืช  
 - ความลึกของน้ำในดินสุดท้าย - ปริมาณของน้ำที่ไหลออกถึงวัดอัตราการใช้น้ำ

ในกรณีที่เป็นต้นไม้ขนาดใหญ่ ไม่สามารถปลูกในถังวัดการใช้น้ำได้ก็สามารถทำสมมูลน้ำจากสภาพแวดล้อมจริงได้เช่นกัน ความลึกของน้ำในดิน สามารถหาได้จากการเจาะตัวอย่างดินในถังวัดอัตราการใช้น้ำของพืชที่ระดับความลึกต่างๆ แล้วนำไปอบเพื่อหาค่าความชื้นของดินโดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะของดิน ความชื้นของดินเชิงปริมาตร และนำมาหาความลึกของน้ำที่แยกออกจากชั้นดิน ดังแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

ความชื้นในดินเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

$$P_w = \frac{100 \times W_w}{W_s} \quad (2.16)$$

ความถ่วงจำเพาะปรากฏของดิน

$$A_s = \frac{W_s}{\gamma_w \times V} \quad (2.17)$$

ความชื้นในดินเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

$$P_v = A_s \times P_w \quad (2.18)$$

ความลึกของน้ำที่แยกออกจากดิน โดยพิจารณาแยกเป็นช่วงความลึก แล้วนำมารวมกันเป็นความลึกของน้ำทั้งหมดในดิน

$$d = \frac{P_v \times D}{100} \quad (2.19)$$

โดยที่	As	คือ	ความถ่วงจำเพาะปรากฏของดิน
	d	คือ	ความลึกของน้ำที่แยกออกจากดิน, มม.
	D	คือ	ความสูงของชั้นดิน, มม.
	Pv	คือ	ความชื้นในดินเชิงปริมาตร, %
	Pw	คือ	ความชื้นในดินเชิงน้ำหนัก, %
	V	คือ	ปริมาตรของตัวอย่างดิน, ซม <sup>3</sup>
	Ww	คือ	น้ำหนักของน้ำในดิน, กรัม
	Ws	คือ	น้ำหนักของดินแห้ง, กรัม
	$\gamma_w$	คือ	น้ำหนักจำเพาะของน้ำ, กรัม/ซม <sup>3</sup>

การใช้น้ำของพืชจะขึ้นอยู่กับชนิดของพืช อายุของพืช และสภาพแวดล้อมได้แก่ ชนิดของดิน อุณหภูมิแวดล้อม ความเร็วลม ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ดังนั้นถ้าจะนำค่าการใช้น้ำของพืชชนิดหนึ่งจากที่ปลูกหนึ่งๆ ไปใช้ทั่วไปที่สภาพแวดล้อมการปลูกไม่เหมือนกันไม่ได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำค่าการใช้น้ำของพืชชนิดเดียวกันไปใช้ในสภาพทั่วไปทุกที่ได้ จำเป็นต้องการแปลงค่าการใช้น้ำของพืชชนิดเดียวกันนี้ให้ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของพืชเท่านั้น โดยการนำค่าการใช้น้ำของพืชไปเปรียบเทียบกับค่าการระเหยน้ำจากถาดวัดอัตราการระเหยน้ำมาตรฐานแบบ A (Class A pan) ที่สภาพแวดล้อมเดียวกัน อัตราส่วนดังกล่าวเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ถาดวัดการระเหย (Kp) เมื่อต้องการหาค่าการใช้น้ำของพืชชนิดเดียวกัน อายุใกล้เคียงกัน ที่ปลูกในสถานที่ต่างกัน ก็สามารถประเมินได้เพียงทราบค่าปริมาณการระเหยน้ำจากถาดวัดการระเหยมาตรฐานแบบ A ดังนี้

$$ET = K_p \times E_{pan} \quad (2.20)$$

โดยที่	ET	คือ	การใช้น้ำของพืช, มม./วัน
	Kp	คือ	สัมประสิทธิ์ถาดวัดการระเหย
	E <sub>pan</sub>	คือ	อัตราการระเหยน้ำจากถาดแบบ A, มม./วัน

นอกจากนั้นแล้วสามารถนำค่าการใช้น้ำของพืชไปเปรียบเทียบกับค่าการใช้น้ำของพืชอ้างอิงที่ปลูกอยู่บริเวณเดียวกัน ( $ET_p$ ) ซึ่งจะใช้พืชที่เจริญเติบโตได้ดีตลอดปีเช่นหญ้าญี่ปุ่น และมีอัตราการเจริญเติบโตไม่ขึ้นกับอายุ และให้นำให้มีความชื้นสูงพอตลอดเวลา การเจริญเติบโตของหญ้าอ้างอิงจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมอย่างเดียว ซึ่งการใช้น้ำอ้างอิงจะมีค่าเท่ากับค่าการคายน้ำและการระเหยน้ำจากพื้นดิน ดังนั้นจึงสามารถหาค่าการใช้น้ำอ้างอิงที่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมอย่างเดียวได้ หรือกล่าวโดยสรุปว่าขึ้นอยู่กับ Location การปลูกอย่างเดียว ซึ่งจะเรียกค่าที่ได้ว่าจากการเปรียบเทียบนี้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) ดังนั้นจะสามารถหาค่าการใช้น้ำของพืชชนิดเดียวกัน อายุใกล้เคียงกันที่ปลูกที่สถานที่อื่น ๆ ได้เมื่อทราบค่าการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_p$ ) ของสถานที่ต้องการทราบการใช้น้ำของพืช ดังแสดงในสมการดังนี้

$$ET = K_c \times ET_p \quad (2.21)$$

โดยที่  $K_c$  คือสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

$ET_p$  คืออัตราการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, มม./วัน

เนื่องจากค่าอัตราการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_p$ ) ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมการปลูกอย่างเดียว ดังนั้นจึงสามารถพัฒนาเป็นสมการการใช้น้ำที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติอากาศสภาพแวดล้อมตำแหน่งที่ปลูกได้ ซึ่งสมการที่ใช้ได้แก่สมการของPenman (1948) ดังนี้(อ้างใน วิบูลย์ 2526)

$$ET_p = \frac{\Delta Q_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (2.22)$$

โดยที่  $ET_p$  คือ อัตราการใช้น้ำของพืชอ้างอิงที่เป็นหญ้า, มม./วัน

$\Delta$  คือ ความลาดเทของกราฟของความดันไอสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่จุดซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ย

$\gamma$  คือ Psychometric constant

$Q_n$  คือ รังสีสุทธิจากดวงอาทิตย์เทียบให้เป็นอัตราการระเหยน้ำ, มม./วัน

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

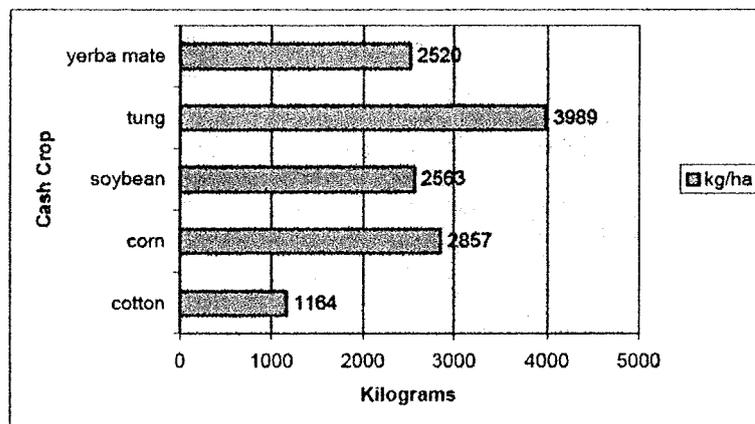
### 2.2.1 งานวิจัยการผลิตไบโอดีเซลจากพืชน้ำมัน

การพัฒนาพืชน้ำมันชนิดใหม่ (น้ำมันมะเขายาหิน) ให้เหมาะสมกับการใช้งานในด้านเชื้อเพลิง เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีในด้านค่าความร้อน จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขายาหิน มีดังต่อไปนี้

**R.S. McKinney and N.J. Halbrook. (1942)** ได้ทำการศึกษาน้ำมันจากเมล็ดมะเยาหิน พบว่า การสกัดน้ำมันมะเยาหินด้วยกระบวนการทางเคมี ภายในห้องปฏิบัติการได้ผลผลิตน้ำมันสูงถึง 50% และในขั้นตอนของการเตรียมเมล็ดมะเยาหินก่อนการสกัด โดยการอบด้วยลมที่มีส่วนผสมของก๊าซเอทิลีนกับอากาศในอัตราส่วน 1 ต่อ 1000 เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และใช้กระบวนการหีบสกัดด้วยเครื่องโม่ (Milling process) พบว่าได้ปริมาณน้ำมัน 27% และมีส่วนที่เหลืออยู่ในกากตะกอน (press cake) และได้ศึกษาน้ำมันที่มีอยู่ในเมล็ดมะเยาหินด้วยการหีบสกัดแบบไฮดรอลิก โดยศึกษาอุณหภูมิขณะหีบ ตั้งแต่ 100-105°C ด้วยกระบอกอัดขนาด 4 นิ้ว ความดัน 5,000 ปอนด์ต่อตารางที่นิ้ว เวลา 5 นาที และทิ้งไว้ 15 นาที จนกว่าน้ำมันจะหมด พบว่าปริมาณน้ำมันที่ได้จากเมล็ดมะเยาหินสูงสุด เท่ากับ 48.7% และมีหลงเหลืออยู่ในกากตะกอนประมาณ 4-10%

**Alec J. Jarvis. (2002)** ได้รายงานเกี่ยวกับการใช้น้ำมันมะเยาหินเป็นเชื้อเพลิง ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งประเทศจีนใช้น้ำมันมะเยาหินเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเครื่องยนต์ พบว่าเกิดยางเหนียวขึ้นในเครื่องยนต์ จึงได้มีการผสมน้ำมันมะเยาหินลงไป ในน้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงผสม

**James A. Duke. (1983)** ได้รายงานผลการศึกษากี่ยวกับการส่งเสริมการปลูกมะเยาหิน เปรียบเทียบการให้ผลผลิตและผลตอบแทนกับพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นในประเทศปารากวัย พบว่ามะเยาหินให้ผลผลิตและผลตอบแทนสูงกว่าพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นๆ เช่น ข้าวโพด และถั่วเหลือง เป็นต้น แสดงว่า ในประเทศปารากวัยมีความเป็นไปได้ที่จะส่งเสริมการปลูกมะเยาหินในเชิงพาณิชย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบผลผลิตต่อพื้นที่การเพาะปลูกในประเทศปารากวัย

**Ji-Yeon P. et al.(2009)** ได้ทำการศึกษาน้ำมันมะเยาหินและพบว่ามีการดัดไขมันที่เป็นองค์ประกอบสำคัญ คือ กรด  $\alpha$ -eleostearic ประมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีสายโซ่ยาว มีอะตอมคาร์บอน 18 ตัว และมีพันธะคู่ 3 ตำแหน่ง (Carbon bonds 9 cis, 11 trans, 13 trans) และไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันมะเยาหินมีคุณสมบัติที่ดีเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอน โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous) พบว่า อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของเมทา

โครงการศึกษาภาพในการปลูกมะเยาหินเพื่อควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมแบบครบวงจรและการผลิตไบโอดีเซลด้วย

นอลต่อน้ำมันมะเขยาคิน เท่ากับ 7.5:1 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Amberlyst-15 เท่ากับ 20.8เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน วิเคราะห์ด้วยวิธี Response surface methodology (RSM) ค่าความเป็นกรดมีค่าลดลงเป็น 0.72 mgKOH/g เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 4.1:1 และใช้Amberlyst-15 เท่ากับ 29.8เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันค่าความเป็นกรดจะมีค่าลดลงเป็น 0.85 mgKOH/g หลังจากนั้นทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์พบว่า ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด เท่ากับ 90.2%ค่าความหนืดที่ 40 °C เท่ากับ 9.8 mm<sup>2</sup>/s ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากผลของกรด  $\alpha$ -eleostearicและการทดสอบค่าการคงตัวของกาเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation stability)ด้วยวิธี Rancimatพบว่ามีความต่ำมาก (ประมาณ 0.5h) และทำให้จุดเทโหลมีค่าเท่ากับ -11 °C

**Qiong S. et al. (2010)** ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่มีพันธะคู่ในสายโซ่คาร์บอนของกรดไขมันหลายตำแหน่ง ที่คล้ายกับน้ำมันมะเขยาคิน พบว่า เกิดผลข้างเคียงของปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของกลีเซอไรด์ แต่ยังไม่มียางานเกี่ยวกับการให้ความร้อน ในการเปลี่ยนแปลงพันธะคู่ ภายในโครงสร้างของกรด  $\alpha$ -eleostearicระหว่างการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °Cและการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขยาคินด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 60°C ได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด 88.88% ค่าความเป็นกรดอยู่ในช่วง 0.11-0.18 mgKOH/g และมีค่าความหนืดที่ 40 °C สูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย

**Xu G. et al. (2006)** ได้ศึกษาสภาวะของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขยาคิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอ็นไซม์ไลเปส (NOVO435) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี RSM พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการนี้ คือ อัตราเร็วของการปั่นกวนที่ 200 รอบ/นาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันมะเขยาคินเท่ากับ 2.2:1 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 43 °C โดยใช้อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา 14เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน หลังจากทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง ได้ผลผลิตไบโอดีเซล เท่ากับ 67.5% และพบว่าเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอ็นไซม์กลับมาใช้ใหม่เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตจะลดลงประมาณ 6%

**Li Lianhua et al. (2010)** ได้ทำการศึกษาผลของสัดส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันมะเขยาคิน อุณหภูมิ และค่าอัตราการเร็วในการป้อนวัตถุดิบ (Space velocity) ของการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันมะเขยาคินด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรดตัว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดแข็ง (Solid acid catalyst) อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันมะเขยาคินที่ได้ผลผลิตไบโอดีเซล เท่ากับ 90.21% คือ อัตราส่วน 8:1 โดยความเป็นกรดมีค่าเท่ากับ 0.70 mgKOH/g และปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันจะสมดุลเมื่ออัตราเร็วในการป้อนวัตถุดิบ เท่ากับ 0.029 h<sup>-1</sup> นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นการช่วยให้ผลผลิตไบโอดีเซลมีค่าความเป็นกรดลดลง

**รวีวัฒน์ สิงห์คำ (2553)** ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของไขวัวที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อน การทดลองเริ่มจากหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับไขวัวที่ได้รับการกำจัดกรดไขมันอิสระแล้วจะอัตราส่วนเชิงโมลไขวัวต่อเมทานอล 1:6 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.75%wt อุณหภูมิใช้ 60°C ในการทำปฏิกิริยา และเวลา 10 นาที ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 102% จากการเปรียบเทียบปริมาณกลีเซอรินที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเมื่อศึกษาความสามารถในการทำปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์ 4 ชนิด ได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และบิวทานอล พบว่าเมทานอลมีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับใช้ทำปฏิกิริยา และจากการเปรียบเทียบการให้ความร้อนแสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟสามารถลดเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 20 นาทีในกรณีที่ให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อนเหลือ 10 นาทีเมื่อใช้ไมโครเวฟแต่ทั้ง 2 กรณีใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากัน หลังจากการวิเคราะห์ทางพลังงานพบว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลในการทดลองนี้เกิดการสูญเสียพลังงานทั้งหมด 6.216 MJ/kg ไบโอดีเซล โดยเกิดการสูญเสียพลังงานมากที่สุดในช่วงตอนการกำจัดกรดไขมันอิสระ คิดเป็น 49% และสามารถสรุปต้นทุนในส่วนของวัตถุดิบและพลังงานได้ 27.33 บาทต่อลิตร โดยไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองมีคุณสมบัติดังนี้ จุดชุนตัว 20°C จุดเทตัว 18.8°C ค่าความหนืด 5.9 cSt. และค่าความร้อน 37.1 kJ/g ซึ่งจากจุดชุนตัวของไบโอดีเซลจะทำให้ไม่สามารถใช้งานในสภาพภูมิประเทศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 20°C ได้เนื่องจากจะทำให้ระบบเชื้อเพลิงอุดตัน

**Azean and Danisman (2007)** ได้ใช้คลื่นไมโครเวฟในกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันจากเมล็ดฝ้ายกับเมทานอล ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองใช้อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 และศึกษาตัวแปรสามชนิด คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.5-1.5 %wt เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3-8 นาที สำหรับเครื่องไมโครเวฟ และ 30-75 นาที สำหรับเครื่องกำเนิดความร้อนและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เพื่อเปรียบเทียบระหว่างการให้ความร้อนแบบทั่วไปกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ผลการทดลองที่ใช้การให้ความร้อนด้วยเครื่องกำเนิดความร้อน มีสภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5% ที่อุณหภูมิ 333K ใช้เวลา 30 นาที ได้เอสเทอร์ 91.4% และผลการทดลองที่ใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อน มีสภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5% ที่อุณหภูมิ 333K ใช้เวลา 7 นาที ได้เอสเทอร์อยู่ในช่วง 89.5 – 92.7% ซึ่งผลการทดลองแสดงว่ากระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ไมโครเวฟให้ความร้อน สามารถลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาได้ ช่วยประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย

**Hernando et al. (2007)** ศึกษาการทำเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเรพซีด และน้ำมันถั่วเหลืองภายใต้คลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ โดยทำปฏิกิริยาในหลอดทดลองแบบปิดฝา CEM ขนาด 10 ml. ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟคือ ปริมาณน้ำมันถั่วเหลือง 2.3 g โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.03 g. เมทานอล 1.27 ml. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C เวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 1 นาที ให้เอสเทอร์ 97% เปรียบเทียบกับสภาวะของระบบที่ใช้เครื่องกำเนิดความร้อน คือ ปริมาณน้ำมันถั่วเหลือง 10 g. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.13g. เมทิลแอลกอฮอล์ 5.52 ml. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C เวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 5 นาที ให้เอสเทอร์ 84% และที่เวลา 30 นาที ให้เอสเทอร์ 87% หลังจากนั้นนำสภาวะที่ได้มาสร้างระบบต่อเนื่องแบบ Stop-flow อัตราการป้อน 50 ml. ด้วยปริมาณน้ำมันถั่วเหลือง 18.4 g. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.24 g. เมทิลแอลกอฮอล์ 10.16 ml. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C เวลาสำหรับทำปฏิกิริยา 1 นาที ให้เอสเทอร์ 96%

**Michael et al. (2004)** ทดลองผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดหลายชนิดคือ กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอร์มิกรดอะซิติก และกรดไนตริก ใช้ความเข้มข้นในช่วง 0.1-1.0%wt ที่อุณหภูมิ 100-120°C ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปร 4 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ 1 ชนิดของกรดพบว่า มีเพียงกรดซัลฟูริกเท่านั้นที่สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ โดยมีสภาวะเหมาะสมที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 100°C ความเข้มข้นของกรด 0.5%wt อัตราส่วนโดยโมล 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง ได้เมทิลเอสเทอร์ 99% และเวลาในการทำปฏิกิริยาจะลดลงเหลือ 4 ชั่วโมง เมื่อใช้น้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 0.8%wt ตัวแปรชนิดที่ 2 คือน้ำ พบว่าน้ำที่ปนอยู่จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากน้ำจะเป็นตัวแยกน้ำมัน แอลกอฮอล์ และกรดออกจากกัน ตัวแปรชนิดที่ 3 คืออากาศ ปฏิกิริยาที่สัมผัสกับอากาศนั้นจะทำให้ไบโอดีเซลมีสีเข้มขึ้น และตัวแปรสุดท้ายคือการปนเปื้อนด้วย Stainless steel ที่เกิดจากการกัดกร่อนภาชนะด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรด พบว่าหากปริมาณปนเปื้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลผลิตลดลง

## 2.2.2 งานวิจัยการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์จากพืชน้ำมัน

**แสนวสันต์ และคณะ (2551)** ได้ทำการศึกษสมรรถนะและการสึกหรอของเครื่องยนต์ดีเซลผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบแบบดิกัมมีผสมดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่สัดส่วนต่าง ๆ แล้วนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์ ซึ่งพบว่า การเพิ่มสัดส่วนน้ำมันปาล์มดิบในน้ำมันดีเซลจะทำให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงลดลง แต่มีผลให้ความหนาแน่นและความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มุมสเปรย์ของน้ำมันปาล์มดิบลดลงประมาณ 90.50% เมื่อเทียบกับมุมสเปรย์น้ำมันดีเซล ทำให้ความเป็นฝอยละอองต่ำลง เครื่องยนต์เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และมีคราบเขม่าตกค้างในห้องเผาไหม้ และยังพบว่า การใช้น้ำมันปาล์มดิบผสมกับน้ำมันดีเซลไม่ส่งผลต่อการสึกหรอชิ้นส่วนของเครื่องยนต์

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (2551) ได้ทำการศึกษาการใช้น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันพืชอื่น ๆ เป็นเชื้อเพลิงเดินเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้บนพื้นที่เกาะทดแทนน้ำมันดีเซล โดยการศึกษาใช้น้ำมันปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีเบื้องต้นด้วยการลดกรดตกกริม ซึ่งเรียกว่าน้ำมันปาล์มกึ่งบริสุทธิ์ (RBD) นำไปทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าที่ห่อ FORD ขนาด 25 kW ที่โหลดคงที่ 60% รอบเครื่องยนต์คงที่ 1,500 rpm และอุณหภูมิที่ 60°C พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของน้ำมัน RBD100% เพิ่มขึ้น 14.54% เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล และประมาณ 10.2% โดยมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะประมาณ 0.411 ลิตร/kWh สำหรับ RBD 70% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ลดลงเล็กน้อยตามสัดส่วน RBD ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 21.2-23.4% ในส่วนขององค์ประกอบของแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์ พบว่าเมื่อสัดส่วนของ RBD เพิ่มขึ้น ปริมาณแก๊ส CO มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดที่ทำให้การเกิดผลอะอองไม่ดีทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ส่วนปริมาณ NO<sub>x</sub>, HC และควันท้า มีค่าลดลง ส่วนปริมาณ CO<sub>2</sub> และระดับเสียงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย (2545) ได้ศึกษาการนำน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง ที่ปรับสภาพแล้วมาเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล โดยทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลจักรกลเกษตร 4 จังหวะ แบบสูบเดี่ยว โดยทดสอบน้ำมันพืชที่อุณหภูมิ 40 – 100 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิน้ำมันพืชเพิ่มขึ้นความหนืดจะลดลงแต่ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น โดยที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองมีความหนืดมากกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 5 – 6 เท่า ด้านการเผาไหม้ พบว่าอัตราการเผาไหม้เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ น้ำมันดีเซล น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม ส่วนการทดสอบหาสมรรถนะและไอเสียในเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าที่สภาวะความเร็วคงที่ โดยมีรอบระหว่าง 900 – 2,400 รอบต่อนาทีและที่ภาระ 0 – 50 % ของกำลังสูงสุด พบว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันพืชเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะต่อกำลังเบรคไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนไอเสีย พบว่าปริมาณ NO<sub>x</sub> ลดลงประมาณ 3 – 40 % ส่วนปริมาณ CO และควันท้าเพิ่มขึ้นประมาณ 5 – 123 % และ 3 – 84 % ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าน้ำมันพืชที่อุณหภูมิประมาณ 40 องศาเซลเซียส สามารถทำงานกับเครื่องยนต์ที่ความเร็วต่ำและภาระบางส่วนได้ดีและอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่เปลี่ยนแปลงขึ้นไม่มีผลต่อสมรรถนะและไอเสียของเครื่องยนต์

ยุทธนา ศรีอุดม (2546) ได้ศึกษาถึงปริมาณก๊าซไอเสียโดยการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ยี่ห้อมิตซูบิชิ แบบสูบนอน 4 จังหวะ ซึ่งทดสอบกับเชื้อเพลิง ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลชีวภาพและน้ำมันพืช ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 900 – 2,400 รอบต่อนาที จากการทดสอบ พบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ของน้ำมันดีเซล น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลชีวภาพ และน้ำมันพืช จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์ปรับตัวสูงขึ้น ที่ความเร็วรอบต่ำและสูงประมาณ 2 % และ 6% ตามลำดับและมีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ใน

ไอเสียเมื่อใช้น้ำมันพืชจะมีค่าสูงกว่าประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงดีเซลและดีเซลชีวภาพ ส่วนปริมาณฝุ่นละอองในไอเสียเมื่อใช้น้ำมันพืชที่ความเร็วรอบต่ำจะมีค่าสูงมากถึงเกือบ 6 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงดีเซลและดีเซลชีวภาพ สำหรับปริมาณฝุ่นละอองในไอเสีย เมื่อใช้เชื้อเพลิงดีเซลและดีเซลชีวภาพมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูงขึ้น สำหรับความเร็วรอบโดยเฉลี่ยที่ 2,000 – 2,400 รอบต่อนาที ปริมาณฝุ่นละอองมีค่าใกล้เคียงกัน

**S. Bariet.al. (2002)** ได้ทดสอบการเดินเครื่องยนต์ ยี่ห้อฮันมาร์ รุ่น L60AE – DTM แบบสูบเดี่ยว เครื่องยนต์ 4 จังหวะ Direct Injection ระบายความร้อนด้วยอากาศ กำลังงานสูงสุดของเครื่องยนต์ 4.4 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบ 3,600 รอบต่อนาที ด้วยน้ำมันปาล์มดิบ การทดสอบได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิน้ำมันปาล์มดิบต่อความหนืดและสมรรถนะของเครื่องยนต์ ได้แก่อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะต่อกำลังเบรคและประสิทธิภาพเชิงความร้อน รวมถึงผลที่มีต่อมลพิษที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับเครื่องยนต์ ในการทดลองได้วัดมลพิษที่เกิดขึ้นคือ CO และ NO จากการทดสอบ สรุปได้ว่าอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มดิบที่เหมาะสมสำหรับการเดินเครื่องยนต์อยู่ในช่วงระหว่าง 60 – 100 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 92 องศาเซลเซียสน้ำมันปาล์มดิบจะมีค่าความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ซึ่งมีผลต่อการประสิทธิภาพการฉีดน้ำมันในการเผาไหม้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ด้านการวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องยนต์ พบว่าอุณหภูมิน้ำมันปาล์มดิบในช่วง 60 – 100 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะต่อกำลังเบรคและประสิทธิภาพเชิงความร้อน

จากการสำรวจเอกสารพบว่าพืชพลังงานได้แก่ ปาล์ม น้ำมัน และสบู่ดำ มีศักยภาพสูงมากที่จะนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล แต่สำหรับมะเขือหินแล้วในประเทศไทยยังเป็นเรื่องใหม่มากยังไม่มียield ด้านการผลิต แต่อย่างไรก็ตามศูนย์วิจัยพลังงานและสหกรณ์ผู้ผลิตพลังงานทดแทนจำกัด ได้มีการสำรวจมะเขือหินเบื้องต้นที่ประเทศลาวและนำมาปลูกในประเทศไทย โดยมีอายุประมาณ 2-3 ปี และได้ส่งน้ำมันจากมะเขือหินไปให้ ปดท.ทดสอบแล้วพบว่ามีความสมบัติใกล้เคียงสบู่ดำ ดังนั้นจึงน่าจะมีศักยภาพในการนำมาผลิตไบโอดีเซลหรือส่งเสริมสำหรับงานวิจัยอื่นๆ จะใช้งานวิจัยของสบู่ดำและปาล์มน้ำมันในการเทียบเคียง สำหรับใช้น้ำมันจากพืชพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ โดยเฉพาะเครื่องยนต์เกษตร มีการใช้งานใน 2 รูปแบบคือ ใช้ในรูปของน้ำมันดิบโดยมีทั้งที่ผสมกับน้ำมันดีเซลและไม่ผสมน้ำมันดีเซล ซึ่งมีข้อดีคือต้นทุนต่ำ แต่มีข้อเสียทางด้านสมรรถนะและความทนทานของเครื่องยนต์เนื่องจากมีค่าความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 10 เท่า อีกรูปแบบหนึ่งใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อลดความหนืดและเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมัน ที่เรียกว่าน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งส่วนมากแล้วจะใช้น้ำมันพืชใช้แล้วเป็นวัตถุดิบ แต่สำหรับการใช้น้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบ ยังไม่มีรายงานการทดสอบความสมรรถนะและความทนทานของเครื่องยนต์ในภาคสนาม จะมีทดสอบอยู่บ้างจะเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้านประสิทธิภาพเครื่องยนต์ ซึ่งการทดสอบภาคสนามจะเป็นการสร้างความมั่นใจในการใช้งาน ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไป แต่อย่างไรก็ตามสำหรับมะเขือหินจะใช้การทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนในโครงการระยะแรกนี้