

**การศึกษาสมรรถนะของถังผสมแบบใบกวนสำหรับกระบวนการผลิต  
น้ำมันไบโอดีเซล**

**Investigation of Stirred Mixing Tank Performance for Bio-diesel processing**

พีชเรขา ต้วงสงค์ และ ไชยณรงค์ จักรธรานนท์\*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

\* ติดต่อ: โทรศัพท์: 02-5643001-9 ต่อ 3144, โทรสาร: ต่อ 3049

E-mail: cchainar@engr.tu.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะการผสมของน้ำมันพืชและเมทานอล และประเมินประสิทธิภาพการผสมของถังผสมแบบใช้ใบกวนสำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ผลของความเร็วยรอบของใบกวนและผลของการติดตั้งใบกวนแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรรอบแกนการหมุน ในการจำลองกำหนดให้ความเร็วยรอบของใบกวนมีค่า 10 - 40 รอบต่อชั่วโมง และใบกวนจำนวน 6 ใบถูกติดตั้งด้วยระยะห่างระหว่างใบที่เท่ากันในถังผสมที่มีขนาดความสูง 3 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ผลที่ได้จากการคำนวณพบว่า การผสมเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วยรอบของการหมุนเพิ่มขึ้น โดยความเร็วของของไหลบริเวณใกล้กับใบกวนมีความเร็วสูง ส่งผลให้ของไหลเกิดการผสมสูงกว่าบริเวณอื่น ในขณะที่ของไหลที่อยู่ระหว่างใบกวนมีความเร็วต่ำทำให้ของไหลบางส่วนไม่เกิดการผสมกัน การผสมของน้ำมันพืชและเมทานอลเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนปริมาตรของสารพบว่าที่ความเร็วยรอบ 40 รอบต่อชั่วโมง น้ำมันพืชสามารถเคลื่อนที่ไปผสมกับเมทานอลได้ ~30 % ส่วนการติดตั้งใบกวนแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรให้ลักษณะการผสมที่ไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ใบกวนแบบไม่สมมาตรทำให้ขนาดหมุนวนในของไหลสูงกว่าแบบสมมาตร ~70 %

**คำหลัก:** ประสิทธิภาพการผสม กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ถังผสมแบบใบกวน

**Abstract**

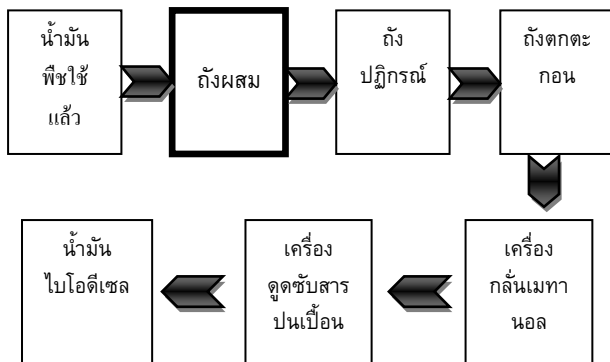
This research aims to numerically study the characteristics of mixing between vegetable oil and methanol fluids and to evaluate the performance of stirred tank for bio-diesel processing. Effects of rotating speed and stirring blades layout (symmetric and asymmetric types) are explored. In simulations, rotating speed is tested in the range of 10 – 40 rph, and six stirring blades with equal spacing are installed in mixing tank. Height and diameter of mixing tank are 3 m and 1.5 m, respectively. It is found from numerical results that mixing is enhanced when rotating speed increases. High fluid velocity takes place near the blades. Therefore, high mixing occurs in this region. While velocity of fluid flowing between blades is low, some parts of fluid are not mixed together. By measuring the volume fraction of two fluids, it is found that at rotating speed of 40 rph, vegetable oil fluid can mix with method fluid by 30 %.

Characteristics of mixing with symmetric and asymmetric blades are slightly different. In addition, swirling fluid strength by asymmetric blades is higher than that by symmetric blades around 70 %.

**Keywords:** Mixing performance, Bio-diesel processing, Stirred tank.

### 1. บทนำ

ด้วยวิกฤตการณ์พลังงานฟอสซิลที่กำลังหมดไปในอนาคต และความต้องการพลังงานที่เพิ่มมากขึ้น การผลิตน้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel) จึงถูกพัฒนาเพื่อเป็นนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

จากรูปที่ 1 เห็นว่าการพัฒนากระบวนการผสมระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลในถังผสมที่เป็นส่วนสำคัญในกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่ใช้งานได้สำหรับรถยนต์ อีกทั้งเป็นการประหยัดพลังงานสำหรับกระบวนการผสม

Choi [1] ศึกษาการวิเคราะห์การผสมเชิงปริมาณ (Quantitative mixing) ในถังผสมโดยวิธีการหาค่าการกระจายตัวของอนุภาคสมมติของของเหลวภายในถังผสม ณ เวลาต่างๆ จากการคำนวณพบว่าการหมุนวนของอนุภาคอยู่บริเวณด้านบน และด้านล่างของใบกวนโดยมีความเข้มข้นของอนุภาคมากกว่าบริเวณอื่นๆ

Rammohan [2] ศึกษาลักษณะการผสมของของไหลในถังผสมโดยใช้ใบกวนพบว่า ลักษณะการผสมอย่างมีประสิทธิภาพเกิดขึ้นบริเวณใกล้กับใบกวน ของไหลที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของใบกวนเกิดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ที่ห่างจากใบกวน

และเกิดการหมุนวนเป็นเหตุทำให้การผสมระหว่างของไหลเกิดขึ้น ส่วนที่อยู่ล่างของถังผสมซึ่งเป็นบริเวณที่อิทธิพลของใบกวนส่งผลต่อของไหลบริเวณดังกล่าว น้อยเป็นเหตุทำให้เกิดจุดอับ (Dead zone) ที่ของไหลไม่เกิดการผสมกัน

Kerdouss [3] ศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบกวนต่อการผสม ผลจากการคำนวณพบว่า ระยะห่างระหว่างใบกวนมีผลต่อการผสม ถ้าระยะห่างระหว่างใบกวนมีค่ามากเกินไปบริเวณแนวรอยต่อที่กระแสน้ำวนวน (หมุนทิศตรงข้ามกัน) มาบรรจบกันจะเกิดจุดอับของการผสมซึ่งทำให้เกิดการผสมที่ไม่ดี และในทางกลับกันหากระยะห่างระหว่างใบกวนมีค่าน้อยเกินไปส่งผลทำให้กระแสน้ำวนวนที่เกิดจากใบกวนด้านบนและด้านล่างเกิดการหักล้างกัน เป็นผลทำให้การผสมไม่ดีเช่นกัน

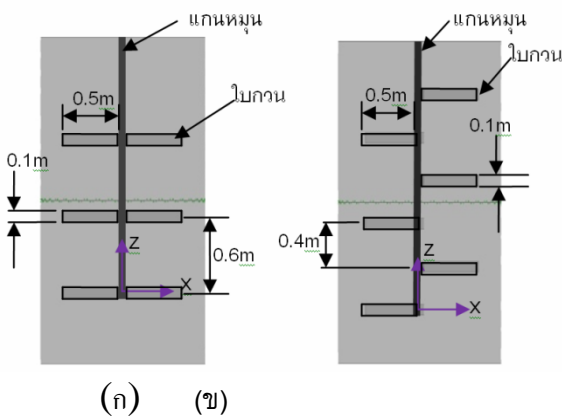
Zalc [4] ได้ศึกษาการไหลในถังกวน (Stirred tank) ประกอบด้วยใบกวนแบบสมมาตร จำนวน 3 ใบ โดยการไหลสมมติให้เป็นแบบราบเรียบ (Newtonian laminar) ที่ค่าเรย์โนลด์สต่ำ (Reynolds number, Re) 20-200 ผลที่ได้จากการคำนวณและการทดลองของ Zalc [4] มีความสอดคล้องกัน จากการวาดตำแหน่งของอนุภาค ณ เวลาต่างๆ ลงบนภาพเดียวกัน (Poincaré section) พบว่ามีบางตำแหน่งของไหลเกิดการเกาะเป็นกลุ่มรวมกัน แต่เมื่อ Re เพิ่มขึ้นพบว่าอนุภาคมีการกระจายตัวมากขึ้น

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นการศึกษาการผสมของของไหลเพียง 1 ชนิดเท่านั้น (Single fluid) ในงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาการผสมของของไหล 2 ชนิด (Double fluids) ในถังผสมสำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ของไหลคือน้ำมันพืชและเมทานอล ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขถูกนำมาใช้จำลองตำแหน่งการเคลื่อนที่ของของไหลและใช้ประเมินการผสม นอกจากนี้ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ผลของการติดตั้ง

ใบกวนแบบสมมาตรและไม่สมมาตรรอบแกนการหมุน รวมถึงผลของความเร็วยกวนในการกวนที่ 10 - 40 รอบต่อชั่วโมง

## 2. แบบจำลองการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้ถังผสมเป็นถังทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร และความสูง 3 เมตร ภายในถังประกอบด้วยใบกวน 6 ใบ แต่ละใบมีขนาด 0.1 เมตร (กว้าง) X 0.5 เมตร (ยาว) โดยการติดตั้งใบกวนแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ แบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การติดตั้งใบกวน (ก) แบบสมมาตร และ (ข) แบบไม่สมมาตร

รูปแบบของกริดที่ใช้เป็นแบบอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมจำนวน 169,785 อิลิเมนต์ 31,566 โหนด

### สมการควบคุม

การเคลื่อนที่ของน้ำมันพืชและเมทานอลภายในถังผสมถูกคำนวณผ่านสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และ สมการนาเวียร์-สโตก (Navier-Stokes equation) ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่น (kg/m<sup>3</sup>)  
 $t$  = เวลา (s)  
 $\vec{v}$  = ความเร็ว (m/s)

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \mu(\nabla^2 \vec{v}) + f \quad (2)$$

โดยที่  $p$  = ความดัน (Pa)  
 $\mu$  = ความหนืดพลศาสตร์ (Pa.s)  
 $f$  = Body force (N/m<sup>3</sup>)

ในการคำนวณ ของไหลทั้งสองถูกสมมติให้เป็นของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) และคุณสมบัติของของไหลทั้งสองมีค่าคงที่ตลอดการผสม การผสมถือว่าของไหลทั้งสองไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immersing fluids) และไม่ทำปฏิกิริยากัน (Non chemical reaction)

### 3.ดัชนีวัดการผสม

การตรวจสอบประสิทธิภาพของการผสมระหว่างสาร 2 ชนิดภายในถังผสมประกอบการวัดการผสมเชิงปริมาณ (Quantitative mixing) และ เชิงคุณภาพ (Qualitative mixing) โดยดัชนีเชิงคุณภาพวิเคราะห์จากลักษณะเวกเตอร์ความเร็ว ส่วนดัชนีเชิงปริมาณจะใช้การหาขนาดของการหมุน (Velocity swirling strength) ถูกคำนวณด้วยสมการที่ (3) และ Volume fraction ในระนาบ x-z ซึ่งแสดงปริมาณของของไหลในบริเวณนั้นๆ ถูกคำนวณด้วยสมการที่ (4)

$$\omega = \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} - \frac{\partial \vec{w}}{\partial x} \quad (3)$$

โดยที่  $\omega$  = ขนาดของการหมุน (1/s)  
 $\vec{u}$  = ความเร็วในระนาบแกน x (m/s)  
 $\vec{w}$  = ความเร็วในระนาบแกน z (m/s)

$$\text{Volume fraction} = \frac{V_{1,i}}{V_{1,i} + V_{2,i}} \quad (4)$$

โดยที่  $V_1$  = ปริมาตรของของไหลชนิดที่ 1 (m<sup>3</sup>)  
 $V_2$  = ปริมาตรของของไหลชนิดที่ 2 (m<sup>3</sup>)  
 และตัวห้อย  $i$  หมายถึงบริเวณที่พิจารณา

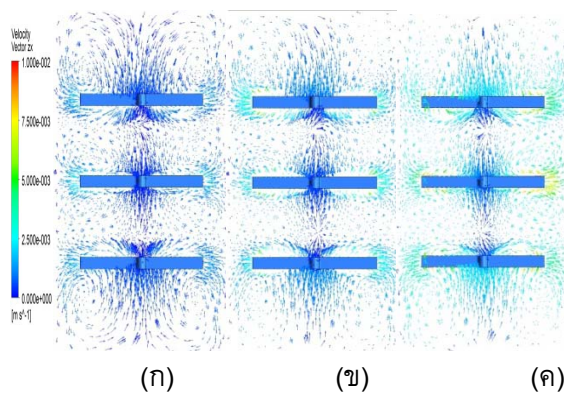
### 4.ผลการคำนวณและวิจารณ์

ในสภาวะเริ่มต้นที่เวลาเท่ากับ  $t = 0$  s ความเร็วเริ่มต้นของของไหลเท่ากับ 0 m/s โดยกำหนดให้เมทานอลอยู่ชั้นด้านบนและน้ำมันพืชอยู่ด้านล่างของถังด้วยปริมาตรที่เท่ากัน โดยน้ำมันพืชมีความหนาแน่น 920 kg/m<sup>3</sup> ความหนืด 61.14 × 10<sup>-3</sup> Pa.s ส่วนเมทา

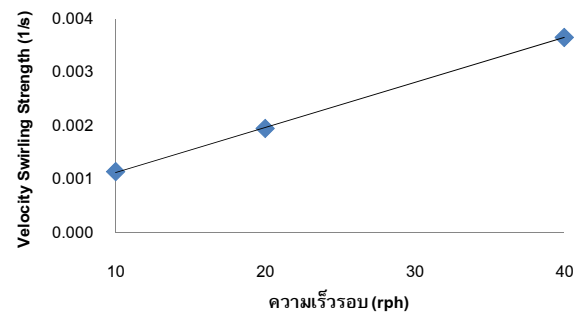
นอลมีความหนาแน่น  $786 \text{ kg/m}^3$  ความหนืด  $0.593 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$  ความเร็วรอบของใบกวนที่ใช้ 10, 20 และ 40 รอบต่อชั่วโมง ใช้ระยะเวลาในการผสม 1 ชั่วโมง

#### 4.1 ผลของความเร็วกการหมุน

พิจารณาลักษณะการกระจายตัวของเมทานอลในระนาบ x-z ณ กึ่งกลางของถัง จากเวกเตอร์ความเร็ว โดยทำการเปลี่ยนความเร็วรอบ และพิจารณาที่เวลา 1 ชั่วโมง พบว่าแรงเฉือนในตำแหน่งบริเวณใบกวนหมุนทำให้เกิดการหมุนวนบริเวณด้านบนและด้านล่างใบกวน ทำให้เกิดการผสมขึ้นดังรูปที่ 3 และพบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นทำให้แรงเฉือนมีค่ามากส่งผลให้ค่าขนาดของการหมุนเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงแปรผันตามความเร็วรอบ ดังนั้นจึงเกิดการผสมที่ดีขึ้นเมื่อความเร็วรอบมากขึ้นดังรูปที่ 4 แสดงขนาดของการหมุน ณ เวลาที่ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3 เวกเตอร์ความเร็วของเมทานอลในระนาบ x-z ที่ความเร็วรอบใบกวน (ก) 10 (ข) 20 และ (ค) 40 rpm



รูปที่ 4 ขนาดของการหมุนของเมทานอล ที่ความเร็วรอบใบกวนเท่ากับ 10, 20 และ 40 rpm

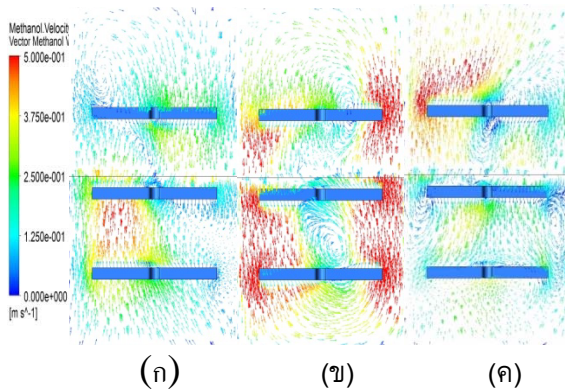
#### 4.2 การผสมในของไหล 2 ชนิด

พิจารณากรณีของไหล 2 ชนิด เมทานอล กำหนดให้อยู่ด้านบน และน้ำมันพืชอยู่ด้านล่าง ในระนาบ x-z ณ กึ่งกลางของถัง จากเวกเตอร์ความเร็วของน้ำมันพืชและเมทานอล พบว่า ที่เวลา 1 ชั่วโมง เมทานอลมีการกระจายลงด้านล่าง และน้ำมันพืชมีการกระจายขึ้นด้านบนดังรูปที่ 5 และ 6 เมื่อทำการเปลี่ยนความเร็วรอบ 10, 20 และ 40 รอบต่อชั่วโมง พบว่า ความเร็วของเมทานอลที่กระจายมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

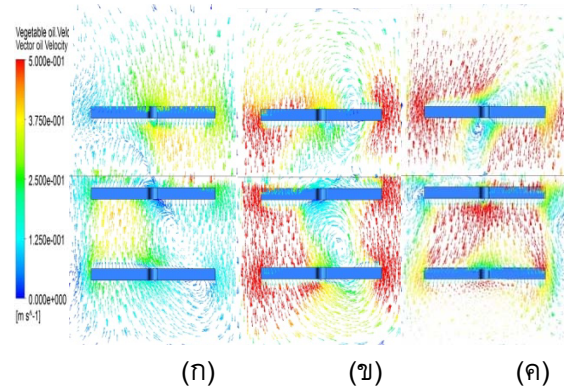
เมื่อพิจารณาขนาดของการหมุน ที่ความเร็วรอบ 20 และ 40 รอบต่อชั่วโมง มีขนาดใกล้เคียงกัน และสูงกว่าที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 7

เมื่อพิจารณา Volume fraction ของน้ำมันพืช พบว่า น้ำมันพืชที่เวลาเริ่มต้นอยู่ด้านล่าง เมื่อเวลาผ่านไปมีการกระจายของน้ำมันพืชขึ้นด้านบน ดังรูปที่ 8 และจากรูปที่ 9 เปรียบเทียบ Volume fraction พบว่า ที่ความเร็วรอบ 10, 20 และ 40 รอบต่อชั่วโมง มีการลดลงของ Volume fraction 27 % , 29 % และ 30 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบ 20 และ 40 รอบต่อชั่วโมง น้ำมันพืชสามารถเคลื่อนที่ไปผสมกับเมทานอลได้ 29 % และ 30 % ตามลำดับ ดังนั้น ที่ความเร็วรอบใบกวนเพิ่มมากขึ้นทำให้การกระจายตัวของน้ำมันดีขึ้น

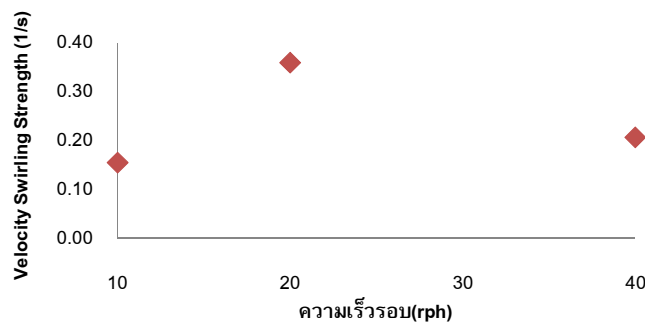




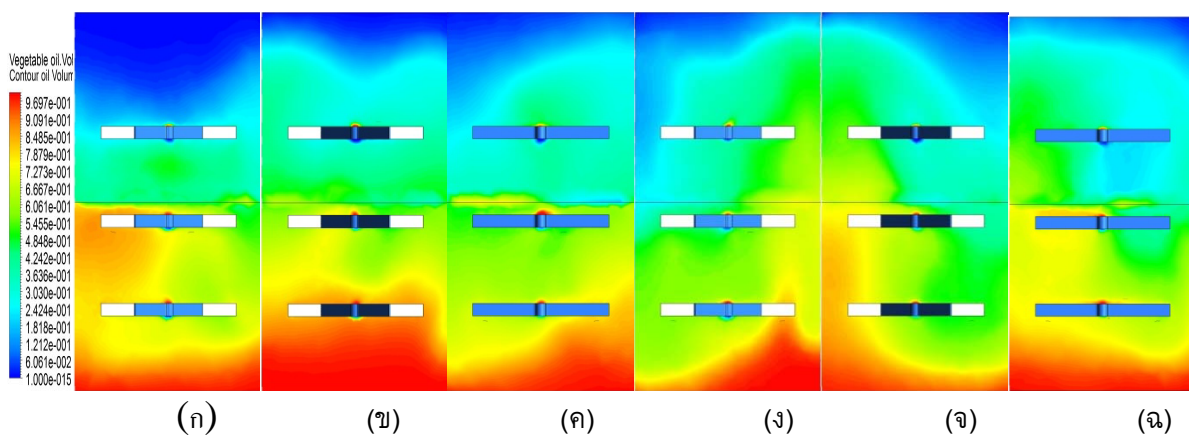
รูปที่ 5 เวกเตอร์ความเร็วของเมทานอลเมื่อผสมกับน้ำมันพืชในระนาบ x-z ที่ความเร็วรอบใบกวน (ก) 10 (ข) 20 และ (ค) 40 rph



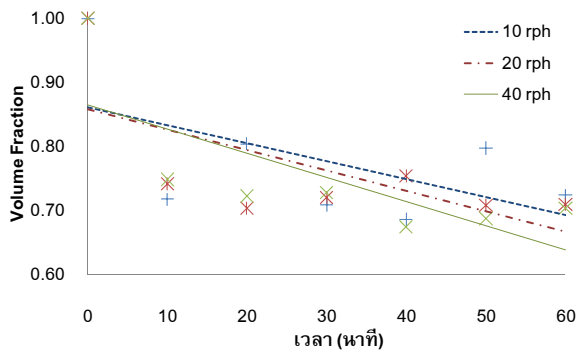
รูปที่ 6 เวกเตอร์ความเร็วของน้ำมันพืชเมื่อผสมกับเมทานอล ในระนาบ x-z ที่ความเร็วรอบใบกวน (ก) 10 (ข) 20 และ (ค) 40 rph



รูปที่ 7 กราฟขนาดการหมุนของน้ำมันที่ความเร็วรอบใบกวนเท่ากับ 10, 20 และ 40 rph



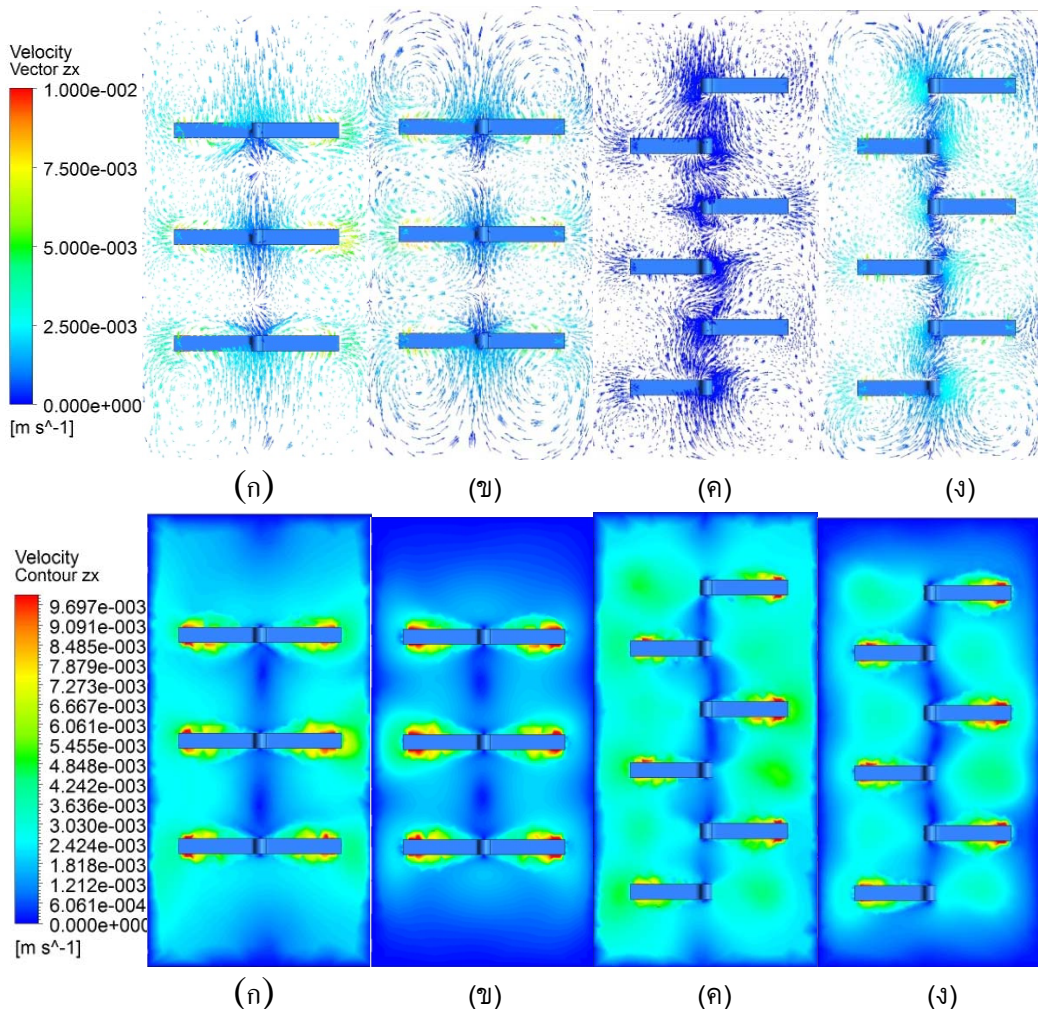
รูปที่ 8 Volume fraction ของน้ำมันพืช ที่เวลา (ก) 10 (ข) 20 (ค) 30 (ง) 40 (จ) 50 และ (ฉ) 60 นาที



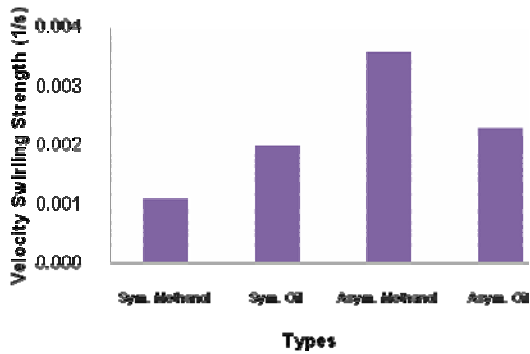
รูปที่ 9 เปรียบเทียบ Volume fraction ของน้ำมันพืชที่ความเร็วรอบ 10, 20 และ 40 rph ณ เวลาต่างๆ

### 4.3 ผลของตำแหน่งใบแบบสมมาตร และไม่สมมาตร

ผลที่ได้จากการจำลองพบว่าการผสมของการใช้ใบกวนแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อชั่วโมง ณ เวลาที่ 1 ชั่วโมง พบว่าลักษณะเวกเตอร์และคอนทัวร์ของความเร็วไม่แตกต่างกันมากนัก ของไหลเกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนบริเวณระหว่างใบกวน ทำให้ของไหลเกิดการผสมกันอย่างมากระหว่างใบกวน และทำให้ของไหลที่อยู่ระหว่างใบกวนบางส่วนไม่เกิดการผสมกัน ดังรูปที่ 10 นอกจากนี้ประสิทธิภาพการผสมเมื่อพิจารณาจากค่าขนาดการหมุน พบว่าตำแหน่งใบกวนแบบไม่สมมาตรให้ขนาดการหมุนวนดีกว่าแบบใบกวนสมมาตร 70 % ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 เวกเตอร์ (บน) และคอนทัวร์ (ล่าง) ความเร็วในแนวระนาบ x-z ที่ความเร็วรอบใบกวน 40 rph เมื่อ (ก) Sym. Methanol (ข) Sym. Oil (ค) Asym. Methanol (ง) Asym. Oil



รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าขนาดการหมุนที่ความเร็วรอบ  
ใบกวน 40 rph ของการผสมของไหล 1 ชนิด  
แบบต่างๆ

### 5.สรุป

งานวิจัยนี้ทำการจำลองการผสมของน้ำมันพืชและเมทานอล และประเมินประสิทธิภาพการผสมด้วยดัชนีเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของถังผสมแบบใช้ใบกวนสำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) เมื่อใบกวนหมุนทำให้เกิดการหมุนวนบริเวณด้านบนและด้านล่างใบกวนเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตำแหน่งบริเวณใบกวน จึงทำให้เกิดการผสมขึ้นและพบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นทำให้แรงเฉือนมีค่ามากส่งผลให้ค่าขนาดของการหมุนเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงแปรผันตามความเร็วรอบ ดังนั้นจึงเกิดการผสมที่ดีขึ้นเมื่อความเร็วรอบมากขึ้น

(2) การผสมในของไหล 2 ชนิด น้ำมันพืชที่เวลาเริ่มต้นอยู่ด้านล่างเมื่อเวลาผ่านไปมีการกระจายของน้ำมันพืชขึ้นด้านบนมากขึ้นตามความเร็วรอบของการหมุน และจากการเปรียบเทียบค่า Volume fraction พบว่า ที่ความเร็วรอบ 10, 20 และ 40 รอบต่อชั่วโมง มีการลดลงของ Volume fraction 27 % , 29 % และ 30 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบ 20 และ 40 รอบต่อชั่วโมง น้ำมันพืชสามารถเคลื่อนที่ไปผสมกับเมทานอลได้ 29 % และ 30 % ตามลำดับ ดังนั้นที่ความเร็วรอบใบกวนเพิ่มมากขึ้นทำให้การกระจายตัวของน้ำมันดีขึ้น

(3) ผลที่ได้จากการจำลองการผสมของการใช้ใบกวนแบบสมมาตรและไม่สมมาตรพบว่า ลักษณะการผสมเมื่อดูจากเวกเตอร์และคอนทัวร์ของความเร็วไม่แตกต่างกันมากนัก ของไหลเกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนบริเวณระหว่างใบกวน ทำให้ของไหลเกิดการผสมกันอย่างมากบริเวณใกล้กับใบกวน และทำให้ของไหลที่อยู่ระหว่างใบกวนบางส่วนไม่เกิดการผสมกัน นอกจากนี้ประสิทธิภาพการผสมเมื่อพิจารณาจากค่าขนาดการหมุนพบว่า ตำแหน่งในกวนแบบไม่สมมาตรให้ขนาดการหมุนวนดีกว่าแบบใบกวนสมมาตร 70 %

### 6.กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ โครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (Industrial Technology Assitant Program, iTAP) บริษัท อี-เอส เทอร์ (กรุงเทพ) จำกัด และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับงานวิจัย

### 7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Choi, B.S., Wan, B., Philyaw, S., Dhanasekharan, K., and Ring, T.A. 2004. *Residence time distributions in a stirred tank: comparison of CFD predictions with experiment*, Ind. Eng. Chem. Res., 43, pp. 6548-6556.
- [2] Rammohan, A.R., Kemoun, A., Al-Dahhan, M.H., and Dudukovic, M.P. 2001. *A Lagrangian description of flows in stirred tanks via computer-automated radioactive particle tracking (CARPT)*, Chem. Eng. Sci. 56, pp. 2629-2639
- [3] Kerdouss, F., Bannari, A., and Proulx, A. 2006. *CFD modeling of gas dispersion and bubble size in a double turbine stirred tank*, Chem.Eng.Sci. 61, pp. 3313-3322.
- [4] J. M. Zalc, M. M. Alvarez, and F. J. Muzzio. *Extensive Validation of Computed Laminar Flow in a Stirred Tank with Three Rushton*, pp. 2144-2154 October 2001 Vol. 47, No. 10 AIChE Journal.

