

อิทธิพลของการกวนผสมน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มต่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
ภายในถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Influence of Palm Oil Mill Effluent (POME) Mixing on Hydrogen Yield
in a Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) Using CFD

ธนวัฒน์ ศรีรักษา^{1*}, สุธีระ ประเสริฐสรรพ¹, ฐานันดรศักดิ์ เทพญา¹, อีระยุทธ หลีวิจิตร¹, พูนสุข ประเสริฐสรรพ²,
สมพงษ์ โอทอง³ และจิราวุฒิ สีเงินยวง³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

² ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

³ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ ต.บ้านพร้าว อ.ป่าพะยอม จ.พัทลุง 93110

*E-mail noom_amet@hotmail.com

บทคัดย่อ

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีหลายวิธี การใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Mill Effluent: POME) เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเพราะช่วยลดเวลาในการบำบัดและนำไฮโดรเจนมาใช้ประโยชน์ภายในโรงงานได้ เช่น เพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์หรือใช้ในกระบวนการไฮโดรจีเนชัน เป็นต้น การศึกษานี้เป็นการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจาก POME ใช้ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor: CSTR) ขนาด 5 ลิตร ใบกวนแบบ Rushton Turbine (RT) ใช้สภาวะอุณหภูมิสูง (thermophillic) พบว่าการกวนภายในถัง CSTR ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซไฮโดรเจน การกวน 10 50 และ 100RPM มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน 2.4 2.8 และ 3.4 l H₂/l_{POME} ตามลำดับ จากการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamics: CFD) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มรอบกวนส่งผลให้พื้นที่ในการผสมและอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดอยู่ที่ 100 RPM ที่รอบกวนสูงกว่านี้อัตราการผลิตก๊าซไม่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาและวิเคราะห์สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบถังปฏิกรณ์ CSTR เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนจาก POME ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

คำหลัก: ก๊าซชีวภาพ, ไบโอดีเจน, น้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม, ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง

Abstract

There are several methods to produced hydrogen gas. Palm oil mill effluent (POME) is one of the alternative choices decreasing the treatment time and producing the hydrogen usefully for improving the combustion efficiency in the internal combustion engine or it can be used in hydrogenation process. In this study, thermophilic anaerobic digestion of POME was experimented and simulated the flow patterns by using computational fluid dynamic (CFD) technique, in the continuous stirred tank reactor (CSTR). The CSTR has working volume of 5 liters and used the Rushton turbine (RT) as stirrer. The speeds of turbine were set at 10, 50 and 100 rpm, respectively. The results found that rotational speed of Rushton turbine is directly proportional to the yield of hydrogen. At turbine speeds of 10, 50 and 100 rpm obtained the hydrogen yield of 2.4, 2.8 and 3.4 l H₂/l_{POME}, respectively. The CFD results, in terms of mixing zone, can be explained that the greater of mixing zone, the more hydrogen production. The maximum hydrogen yield occurred at turbine speed of 100 rpm though the speed more than this was not increased the hydrogen production. The results of CFD

simulation and the experiments in this study are useful information for design a commercial CSTR to produce hydrogen from POME.

Keywords:CFD, hydrogen, POME, CSTR, Rushton Turbine

1. บทนำ

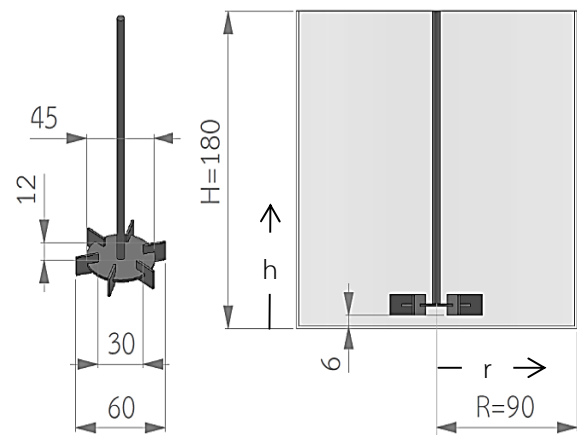
ในปี 2558 กำลังการผลิตน้ำมันปาล์มในประเทศไทยเป็นอันดับ 3 ของโลกประมาณ 2 ล้านตัน [1] กระบวนการผลิตมี POME ประมาณ 2-3 เท่าของน้ำมันปาล์ม [2] ส่วนประกอบของ POME มีสารอินทรีย์สูง น้ำมันและสีดำ[3] ก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติต้องมีการบำบัด ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการบำบัด[4] ดังนั้นจึงมีการนำ POME มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซไบโอมีเทนโดยกระบวนการหมักที่อุณหภูมิต่ำ (mesophilic) ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time: HRT) ประมาณ 27-30 วัน[5] นำก๊าซไบโอมีเทนใช้เป็นพลังงานในโรงงานหรือนำไปเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า[6] การพัฒนากระบวนการหมักก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิสูง (thermophilic) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการหมักก๊าซได้[7] โดยขั้นตอนแรก(HRT = 2 วัน) ใช้ถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 1 ลิตร และขั้นตอนที่สอง (HRT = 7 วัน) ในถังปฏิกรณ์ UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) ขนาด 5 ลิตรพบว่า HRT ลดลง 3 เท่า[7] ก๊าซไฮโดรเจนสามารถนำไปเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องยนต์ได้[6] และยังใช้ในกระบวนการไฮโดรจีเนชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลหรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ภายในโรงงานผลิตนั้นปาล์มได้ นอกจากนี้ POME effluent หลังจากหมักในถังปฏิกรณ์ CSTR เมื่อนำมาใช้ในถังปฏิกรณ์ UASB เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น [2] จากผลการทดลองถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 5 ลิตร หมักแบบ thermophilic พบว่าสามารถขยายเป็นระดับอุตสาหกรรมได้ ดังนั้นต้องมีการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในถังเมื่อมีการกวนผสมเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาดใหญ่ต่อไป

2. การทดลอง

2.1 สัดส่วนถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 5 ลิตร

ใน POME มีสารอินทรีย์สูงถังปฏิกรณ์ CSTR เป็นถังที่ถูกเลือกใช้งาน เนื่องจากจากการกวนช่วยป้องกันการ

ตกตะกอนและทำให้การกระจายตัวของสารอาหารกับเชื้อทั่วถึงกัน โดยเฉพาะใบกวนแบบ RT มีคุณสมบัติที่ดีในการการกวนผสมระหว่างบริเวณด้านล่างและตรงกลางถังปฏิกรณ์[8] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ใบกวนแบบ RT ในทุกสภาวะการทดลอง การกวนส่งผลต่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการขยายขนาดถังปฏิกรณ์จึงมีการศึกษาพฤติกรรมการกวนที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของของไหลภายในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 5 ลิตรแสดงในรูปที่ 1 นำข้อมูลไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในแต่ละสภาวะ เพื่อนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่



Unit : mm

รูปที่ 1 สัดส่วนถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 5 ลิตร

2.2 การหมักก๊าซไฮโดรเจน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของ POME

Parameters	POME
pH	4.56±0.01
COD	73,650±5 mg/l
Total carbohydrate	19,084 mg/l
Total solids	114.93±0.44 mg/l
Volatile solids (VS)	95.58±0.37 mg/l

ในงานวิจัยนี้เป็นการหมัก POME เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนในสภาวะอุณหภูมิสูง (thermophilic) ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (HRT) 2 วัน ดังนั้นก่อนทดลองหมักต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของ POME เพื่อที่จะปรับแต่ง

คุณสมบัติของ POME ให้เหมาะสมกับสภาวะการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ในตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของ POME ที่เก็บมาจากบ่อเก็บน้ำเสียรวมจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มของบริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด ตั้งอยู่ที่ อำเภอนงใหญ่ จังหวัดชลบุรี

การเก็บ POME ในงานวิจัยนี้เก็บขณะที่ POME ออกมาจากกระบวนการผลิตซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 70-85 องศาเซลเซียสนำตัวอย่างไปตรวจหาคุณสมบัติและเก็บไว้ในอุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นต้องมีการเก็บ POME ให้เพียงพอทุกสภาวะในการทดลอง การนำ POME มาใช้งานเมื่อนำออกมาจากตู้แช่เย็นทำการเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 55 - 60 องศาเซลเซียส นำน้ำจากถังปฏิกรณ์ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) มาผสมในอัตราส่วนประมาณ 50 ต่อ 50 โดยปริมาตรเพื่อปรับค่า COD และ pH ให้อยู่ประมาณ 30,000 mg/L และ 5-5.5 ตามลำดับ การทดลองหมัก POME ในถัง CSTR ใช้ความเร็วรอบใบกวน Ruston turbine 5 ความเร็วรอบ ตามตารางที่ 2



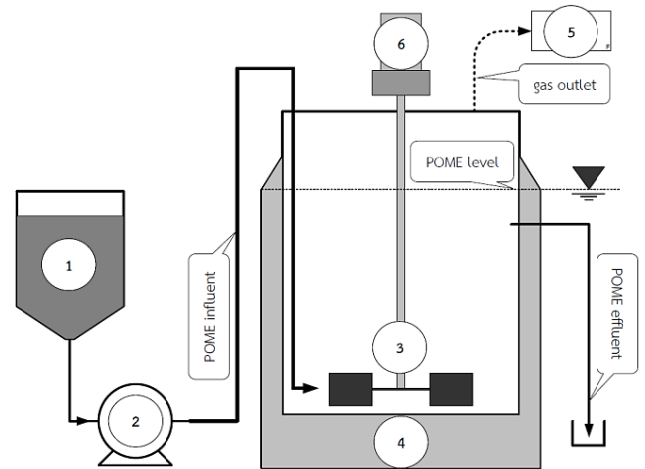
รูปที่ 2 การเก็บ POME ในตู้แช่เพื่อรักษาคุณสมบัติ

ตารางที่ 2 สภาวะในการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ

สภาวะ	RPM
1	0
2	10
3	50
4	100
5	150

รูปที่ 3 แสดงไดอะแกรมขั้นตอนการทดลอง ถึงหมายเลข (1) เป็นถังเตรียมมีการปรับอุณหภูมิ COD และ pH ใช้ปั๊มหมายเลข (2) ป้อน POME เข้าไปในถังหมัก การ

กวนและปรับรอบกวนมอเตอร์โดยหมายเลข (6) ควบคุมอุณหภูมิในการหมักของถังปฏิกรณ์โดยหมายเลข (4) และการวัดอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนหมายเลข (5)



รูปที่ 3 ไดอะแกรมการหมักก๊าซไฮโดรเจน (1) ถังเตรียม (2) peristaltic pump (3) ใบกวน RT (4) water jacket (5) gas flow meter (6) มอเตอร์กระแสตรง

2.3 สมการและการสร้าง mesh

สมการที่ใช้ในการจำลองแบบ CFD ในถัง CSTR คือ (1) สมการความต่อเนื่อง (2) - (4) Navier-Stokes equation

$$\text{โดยที่ } \rho = \text{ความหนาแน่น } F_r = \rho(\omega^2 r + 2\omega u_\theta)$$

$$F_\theta = -2\rho\omega u_r \text{ และ } F_z = -\rho g$$

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

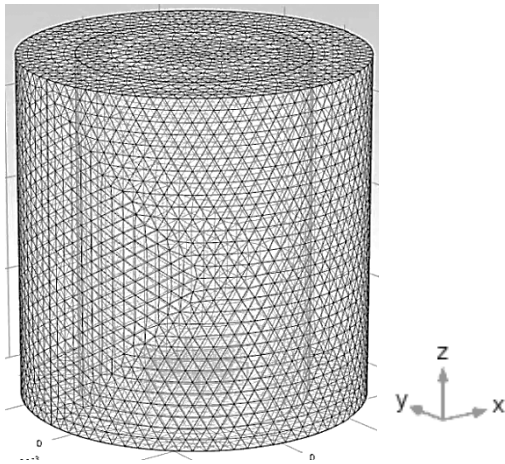
$$\frac{\partial (\rho u_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u_r) - \rho \frac{u_\theta^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \Delta(\tau_r) - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + F_r \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho u_\theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u_\theta) + \rho \frac{u_r u_\theta}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \Delta(\tau_\theta) - \frac{\tau_{r\theta}}{r} + F_\theta \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \Delta(\tau_z) + F_z \quad (4)$$

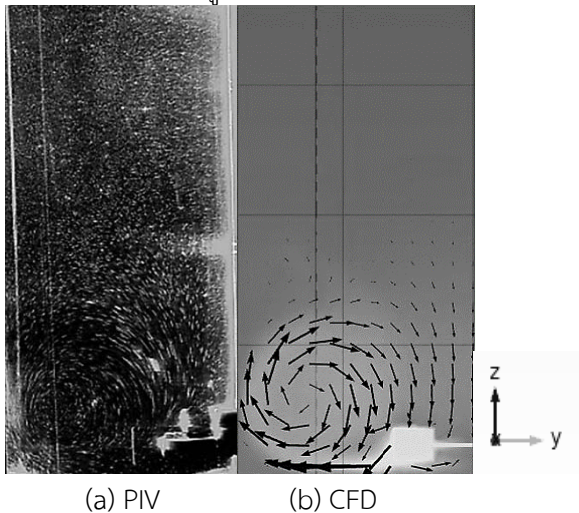
#

ใช้โปรแกรม Solidworks 2015 เขียนและออกแบบถังปฏิกรณ์ CSTR การคำนวณ CFD ใช้โปรแกรม Comsol MultiPhysics v.4.2 โดยกำหนดจำนวน tetrahedral elements ประมาณ 800,000 และ degree of freedom ประมาณ 500,000 การกำหนดช่วงเหล่านี้ใช้เหมือนกันทุกการทดลองเนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณไม่นานจนเกินไปและผลที่ได้ออกมาใกล้เคียงกับสภาวะจริง



รูปที่ 4 การสร้าง mesh ถึง CSTR

ผลที่ได้จาก CFD นี้ นำไปเปรียบเทียบกับของจริง (Particle Image Velocimetry: PIV) พบว่ามีความใกล้เคียงกันแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 PIV เปรียบเทียบกับ CFD

3. ผลการทดลอง

3.1 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

ผลการผลิตไฮโดรเจนจาก POME แสดงในตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบรอบการกวนกับการไม่กวน พบว่าที่รอบ 10 50 100 และ 150 ทำให้ yield เพิ่มขึ้นเป็น 40 65 100 และ 106 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากการกวนทำให้เกิดการกวนผสมและแลกเปลี่ยนสารอาหารกับเชื้อผลิตไฮโดรเจนบริเวณกลางและล่างถังดีขึ้น แต่การกวนที่รอบเกิน 100 RPM เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานเพราะ yield ของไฮโดรเจนไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณอาหาร

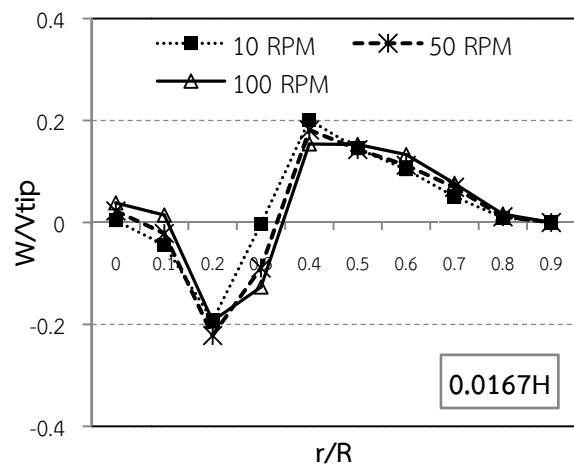
ของแบคทีเรียที่อยู่ใน POME ถูกย่อยจนไม่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้

ตารางที่ 3 yield การผลิตไฮโดรเจน ($l H_2/l_{POME}$)

RPM	Hydrogen yield
0	1.7
10	2.4
50	2.8
100	3.4
150	3.5

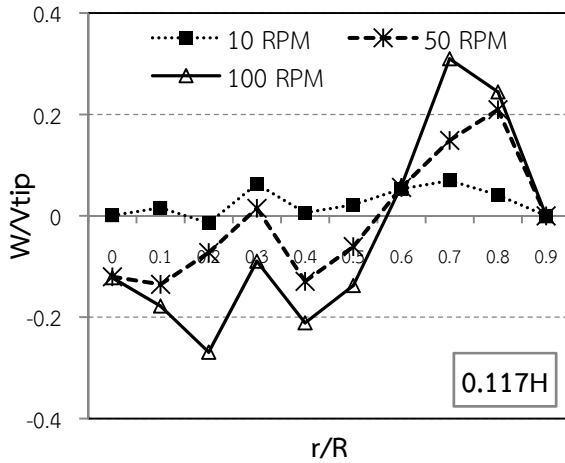
3.2 ความเร็วปลายใบกวน (V_{tip}) เทียบกับความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน Z (V_{tip}/W) ในระนาบ YZ

จากผล yield การผลิตก๊าซไฮโดรเจนตารางที่ 3 พบว่าความถี่ผลต่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เนื่องมาจากช่วยในการกระจายเชื้อและสารอาหารภายในถังปฏิกรณ์ได้ทั่วถึงกันโดยดูได้จากผล CFD ระบาย 0.0167H (ด้านล่างถึงกับใบกวน) 0.117H (ด้านบนใบกวน) และ 0.5H (กลางถัง) การกวนภายในถังปฏิกรณ์ต้องการให้เกิดการแลกเปลี่ยนของเหลวบริเวณด้านล่างและตรงกลางถึงส่วนของเหลวด้านบนของระบาย 0.5H ต้องมีการเคลื่อนที่น้อยที่สุดเพื่อป้องกันเชื้อและอาหารหลุดออกปาทาง POME effluent ซึ่งส่งผลต่อ yield ในการผลิตไฮโดรเจนความเร็วปลายใบกวน ($V_{tip} = 2\pi n$) ที่ 10 50 และ 100 RPM เป็น 0.0314 0.157 และ 0.314 m/s ตามลำดับ



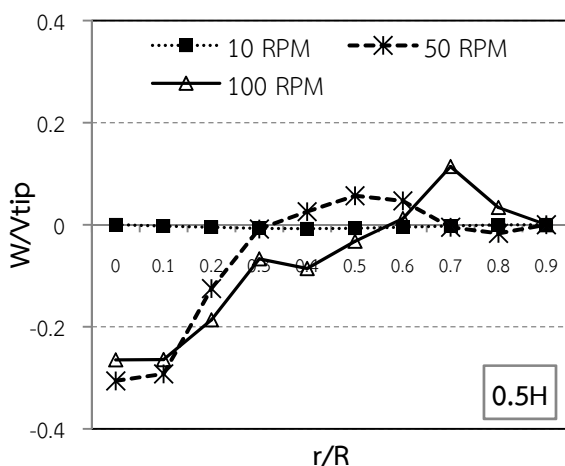
รูปที่ 6 W/V_{tip} at 0.0167H

ตำแหน่ง 0.0167H อยู่ระหว่างใบกวนและด้านล่างถังแสดง
ในรูปที่ 6 การเคลื่อนที่ของของเหลวที่ 100RPM มีการ
เคลื่อนที่สูงกว่า 10 และ 50 RPM เล็กน้อย



รูปที่ 7 W/V_{tip} at 0.117H

บริเวณด้านบนของใบกวนแสดงในรูปที่ 7 ตำแหน่ง
0.117H ปริมาณการผลิตไฮโดรเจนที่ 100RPM
เปรียบเทียบกับ 10 และ 50 RPM เพิ่มขึ้น 46% และ
21% ตามลำดับ เนื่องจากมีการเคลื่อนที่หมุนตัว (swirl)
ที่ดีขึ้นส่งผลให้เชื้อและสารอาหารมีการแลกเปลี่ยนที่
ทั่วถึงกันมากขึ้นรูปที่ 8 บริเวณกลางถังต้องมีการเคลื่อนที่
ของของเหลวภายในถังต่ำ เนื่องจากจากป้องกันเชื้อและ
สารอาหารชั้นสู่ด้านบนถึง ดังนั้นในตำแหน่ง 0.5H ที่ 10
RPM แทบไม่มีการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในถังแต่
บริเวณด้านล่างถังก็ไม่ได้มีการกวนผสมที่ดีส่งผลให้อัตรา
การผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่ำ ส่วนที่ 50 และ 100 RPM มี
ลักษณะและความเร็วที่ใกล้เคียงกัน แต่อัตราการผลิตก๊าซ
ไฮโดรเจนที่ 100 RPM มีค่าสูงกว่า 50 RPM ประมาณ
21%



รูปที่ 8 W/V_{tip} at 0.5H

4. สรุปผลการทดลอง

การทดลองหมัก POME ในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 5
ลิตร ใช้ใบกวนแบบ RT อัตราการผลิตไฮโดรเจนที่รอบ
กวน 10 50 100 และ 150 RPM เปรียบเทียบกับไม่ม
ีการกวนพบว่า yield ของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น 40 65 100
และ 106% ตามลำดับ การกวนที่ 100 RPM อัตราการ
ผลิตก๊าซไฮโดรเจน 3.4 l H₂/l_{POME} มีการย่อยสารอาหารที่
ป้อนไปภายในถังเกือบหมดดังนั้นการใช้รอบกวนที่สูงกว่า
นี้ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการผลิตไฮโดรเจนเพียงเล็กน้อย
การจำลองด้วยวิธี CFD เพื่ออธิบายพฤติกรรมเคลื่อนที่
ของของไหลภายในถังปฏิกรณ์ที่ 10 50 และ 100 RPM
ผลที่ได้พบว่าการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในถัง CSTR
ในระนาบ YZ ที่ตำแหน่ง 0.0167H 0.117H และ 0.5H ที่
รอบ 50 และ 100 RPM มีค่า W/V_{tip} ใกล้เคียงกันใน
ตำแหน่ง 0.0167H และ 0.5H แต่ที่ตำแหน่ง 0.117H
พบว่าค่า W/V_{tip} ของ 100RPM มีลักษณะการเคลื่อนที่
แบบหมุนตัว (swirl) ที่ดีกว่า 10 และ 50 RPM อย่างเห็น
ได้ชัดส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างเชื้อและ
สารอาหารได้เป็นอย่างดีทำให้ yield ของไฮโดรเจน
เพิ่มขึ้นการใช้รอบกวนที่สูงกว่า 100 RPM เป็นการ
สิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจาก yield แทบไม่เพิ่มขึ้น จาก
ข้อมูลที่ได้มานี้สามารถนำไปออกแบบถังปฏิกรณ์ขนาด
ใหญ่ที่มีประสิทธิภาพได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักพัฒนาการวิจัยการเกษตร (สวก.)
และ บริษัท สุขสมบูรณน้ำมันปาล์ม จำกัด ที่ให้การสนับ
งานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service, USA (2014). Commodity Intelligence Report, URL: www.usda.gov, access on 01/02/2016.
- [2] Poonsuk Prasertsan, Sompong O-Thongc, Nils-Kare Birkeland. (2009). Optimization and microbial community analysis for production of biohydrogen from palm oil mill effluent by thermophilic fermentative process. International

Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, April 2009, PP. 7448-7458.

[3] Lakhveer Singh, Muhammad Faisal Siddiqui, AnwerAhmadc, MohdHasbi. Rahim, Mimi Sakinah, Zularisam A. Wahid. (2013). Biohydrogen production from palm oil mill effluent using immobilized mixed culture. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 19, October 2012, PP. 659-664.

[4] กรมควบคุมมลพิษ. (2554). คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่มที่ 1, ISBN: 974-9558-55-3, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

[5] ChontichaMamimin, ApinyaSingkhala, PrawitKongjan, BenjapornSuraraksa, PoonsukPrasertsan, Tsuyoshi Imai f, Sompong O-Thong. (2015). Two-stage thermophilic fermentation and mesophilic methanogen process for biohythane production from palm oil mill effluent. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, April 2015, PP. 6319-6328.

[6] วชิราภรณ์ หงสวีนิตกุล, วิทยา ยงเจริญ. ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน. (2546). การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 17, ตุลาคม 2546.

[7] Sompong O-Thonga, PoonsukPrasertsan, NugulIntrasungkha, SrisudaDhamwichukorn, Nils-KAreBirkeland. Optimization of simultaneous thermophilic fermentative hydrogen production and COD reduction from palm oil mill effluent by Thermoanaerobacterium-rich sludge. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, February 2008, PP. 1221-1231.

[8] T. Srirugsa, S. Prasertsan, T. Theppaya, T. Leevijit and P. Prasertsan. CFD in Continuous Stirred Tank: Comparison between Rushton and Paddle Turbines. Advanced Materials Research, Vol. 931-932, May 2015, PP. 1139-1143.