



การผลิตໄใบໂອດີເຊລໂດຍໃຫ້ໂໂຣໂດຣໄດນ້ມີກສໍຄາວິທະໜ້ວຍໃນກະຕຸນປົງກິຣີຍາ

ຮນກຖຸຕ ນນກໍ່ຂນະ

ວິທະນານິພນ໌ຟີ້ເປັນສ່ວນໜຶ່ງຂອງການກຶ່າງຕາມທັກສູດປະລິມູນວິຄວາມຄາສຕຽມທ່ານບັນຫຼິດ
ສາຂາວິຊາວິຄວາມຄະດີ່ອງກລ ຄະວິຄວາມຄາສຕຽມ
ມາວິທະນາລັບອຸນດຣາຈຫານີ

ພ.ກ. 2555

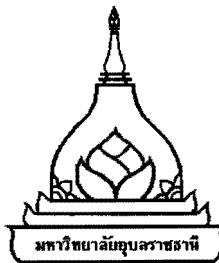
ລືບສິກທີ່ເປັນຂອງມາວິທະນາລັບອຸນດຣາຈຫານີ



**BIODIESEL PRODUCTION USING HYDRODYNAMIC
CAVITATION AS REACTION INTENSIFIER**

THANAKRIT NONCHANA

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
YEAR 2012
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY**



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญา วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การผลิตใบโอดีเซลโดยใช้ไอโอดีนамิกส์คาวเทชันช่วยกระตุ้นปฏิกิริยา

ผู้วิจัย นายธนกฤต นนท์ชนะ

ได้พิจารณาเพื่อน้อมโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชาสันติ ไถยสุทธิ์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฬาภรณ์ เบญจปิยะพร)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)

คำบดี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพ. แสงเทียน)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2555

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์ ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในบทความวิชาการและวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ด้วยดี

ขอบขอบคุณ ดร.อิทธิพล วรพันธ์ ในการให้คำแนะนำในการเขียนบทความวิชาการ และการออกแบบการทดลอง และตรวจทานบทความวิชาการ รวมทั้ง ดร.วิระพันธ์ สีหานาม ที่ให้คำแนะนำและสอนการใช้โปรแกรม Fluent® 6.3 เป็นอย่างดี

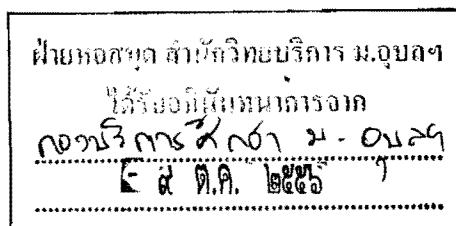
ขอบขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน (RSEC) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้

ท้ายสุดขอขอบขอบพระคุณ คุณพ่อสมนึก นนท์ชนะ และ คุณแม่อัมพร นนท์ชนะ ที่เคยให้กำลังใจและสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จ

จ. ๔๗๓

(นายชนกฤต นนท์ชนะ)

ผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ด
สารบัญภาพ	ช
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ใบໂອດືເຈດ	5
2.2 ค่าวิเทชั่น	11
2.3 งานวิจัยที่ใช้ค่าวิเทชั่นในกระบวนการเคมีอื่นๆ	17
2.4 งานวิจัยการใช้ค่าวิเทชั่นในการผลิตใบໂອດືເຈດ	18
2.5 พลศาสตร์ของไอลเซิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)	22
2.6 กฎอนุรักษ์ของการไอล (Conservation laws of fluid motion)	28
2.7 สมการควบคุม (Governing equation)	30
2.8 การวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เทคนิค ^1H NMR	32
2.9 แผนขอบเขต	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3 ระเบียบวิธีวิจัย	
3.1 วิธีการศึกษาโดยใช้พัฒนาศตร์ของให้เลเซิงคำนวณ	36
3.2 การทดลองผลิตใบโอดีเซลโดยเครื่องไชโตรไดนามิกส์คาวิเทชั่น	41
3.3 การเตรียมน้ำมันก่อนการทำปฏิกริยา	45
4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการจำลองการให้เลเซิงตัวเลข	51
4.2 ผลของ β ต่อปอร์เซ็นต์ Conversion ของใบโอดีเซล	56
4.3 ผลของจำนวนรูของแผ่นขอบคุณต่อ ปอร์เซ็นต์ Conversion ของใบโอดีเซล	59
4.4 การเพิ่มของอุณหภูมิของสารทำงานในการผลิตใบโอดีเซล	61
4.5 เปรียบเทียบการผลิตใบโอดีเซลจากเครื่องไชโตรไดนามิกส์ คาวิเทชั่นกับเทคนิคอื่นๆ	63
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการจำลองการให้เลเซิงตัวเลข	65
5.2 สรุปผลการทดลองผลิตใบโอดีเซลด้วยถังปฏิกรณ์ไชโตรไดนามิกส์ คาวิเทชั่น	65
เอกสารอ้างอิง	67
ภาคผนวก	
ก ผลงานทางวิชาการ	71
ข วิธีการใช้ Fluent 12 ในการจำลองการเกิดคาวิเทชั่น	73
ประวัติผู้วิจัย	84

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สรุปเปรียบเทียบระบบกำเนิดคาวิเทชั่นแบบ UC และ HC	2
2.1 คุณสมบัติของแหล่งออกซิเจน C1 –C4	7
2.2 เปรียบเทียบการนำบัดน้ำเสียโดยถังปฏิกรณ์แบบ HC แผ่นขอบคุณ กับระบบแบบอื่น	18
2.3 ค่าอัตราการสื้นเปลือยพลังงานจำเพาะของวิธีการผลิตไบโอดีเซลแบบต่างๆ	20
3.1 ขนาดทางกายภาพและจำนวนอิเลิมอนต์ของแต่ละ โมเดล	39
3.2 เสื่อนไขในการจำลองการไหลเชิงตัวเลข	40
3.3 จำนวนรูของแผ่นขอบคุณที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและ β ต่างๆ	43
4.1 ค่าเลขคาวิเทชั่นและค่าเรโนลินมบรอร์ที่ P_u ต่างๆ	53
4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับงานวิจัยอื่นๆ	63

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์อสเตอริฟิเคชัน แบบใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	6
2.2 ปฏิกิริยาแบบอสเทอริฟิเคชัน	7
2.3 ปฏิกิริยาแบบทรานส์อสเทอริฟิเคชัน	8
2.4 การแยกชั้นของน้ำมัน ใบโอดีเซล (ชั้นบน) กับ กดิเซอร์น (ชั้นล่าง)	9
2.5 ผลของความชื้นและร้อยละของกรดไขมันอิสระ ต่อปริมาณร้อยละผลได้ของ อสเทอร์จากไข้วว	10
2.6 เพสไซโคละแกรมของน้ำ	12
2.7 ชุดถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์แบบใช้หัวพ่นก๊าซขนาดเล็ก	17
2.8 ปริมาณ Yield เมทิลเอสตอร์จากการบวนการเมทานอลเนื้อวิกฤติ ที่เวลาต่างๆ	19
2.9 ผลิตภัณฑ์ใบโอดีเซลที่เวลาต่างๆ ในแต่ละวิธี	20
2.10 ชุดผลิตใบโอดีเซลแบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชัน	21
2.11 ผลิตภัณฑ์ใบโอดีเซลที่ได้ที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วน 宣告ขออัลต์ต่อน้ำมันที่ 1:4.5	22
2.12 สำหรับการคำนวณของระบุบีบีนแบบ Segregated solver	26
2.13 สำหรับการคำนวณของระบุบีบีนแบบ Coupled solver	27
2.14 รูปแบบการให้ผลของมวลผ่านเข้า - ออกอัลิเมนต์	28
2.15 รูปแบบของแรงที่กระทำกับอัลิเมนต์ของของไฮโล	29
2.16 รูปแบบของงานและพลังงานที่เกิดขึ้นบนอัลิเมนต์	29
2.17 การกำหนดปอร์ตันในกระบวนการทรานส์อสเทอริฟิเคชัน	32
2.18 ลักษณะแห่นของคอมแบบบาง	33
2.19 ลักษณะแห่นของคอมแบบเยื่องศูนย์	33
2.20 ลักษณะแห่นของคอมแบบซีก	34
3.1 เปรียบเทียบ Cd (Discharge Coefficient) จากการจำลองจาก Full cavitation model ที่ใช้กับผลจากงานวิจัยอื่นๆ	38
3.2 ภาพร่างและขนาดแบบจำลองที่ใช้แบบจำลอง A (บก) และแบบจำลอง B (ล่าง)	38
3.3 แบบจำลองและภาพขยายบริเวณแห่นของคอมของแบบจำลอง A	39
3.4 แบบจำลองและภาพขยายบริเวณแห่นของคอมของแบบจำลอง B	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 ผังชุดทดลอง Hydrodynamic cavitations	41
3.6 ชุดทดลอง Hydrodynamic cavitations	41
3.7 ชั้นน้ำมันพีชนต้าชั้งคิจิตอลให้ได้น้ำหนัก 1 กรัม	45
3.8 ดวงไอโซไฟฟานอลในระบบอุ่นความขนาดปริมาตร 10 ml	45
3.9 เทน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจำนวน 1 g ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุ ไอโซไฟฟานอล	46
3.10 หยดเตินฟีโนฟทาลีนลงในสารละลายไอโซไฟฟานอลกับน้ำมันตัวอย่าง	46
3.11 การไถเตรทเพื่อหาร้อยละของกรดไขมันอิสระ	47
3.12 สารละลายที่ค่า pH เข้าสู่สมดุล (เปลี่ยนเป็นสีเขียว)	47
4.1 Contour ของสัดส่วนไอ ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 5 bar	50
4.2 Contour ของสัดส่วนไอ ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 10 bar	51
4.3 Contour ของสัดส่วนไอ ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 15 bar	51
4.4 กราฟ P_{center} ของแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 ที่ P_u เท่ากับ 5 bar	52
4.5 กราฟ P_{center} ของแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 ที่ P_u เท่ากับ 10 bar	52
4.6 กราฟ P_{center} ของแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 ที่ P_u เท่ากับ 15 bar	53
4.7 ลักษณะความดันของของไหดที่ผ่านแผ่นขอบคอม	54
4.8 ส่วนต่างของระยะเวลาเกิดภาวะหักเหของทั้ง 2 แบบจำลอง	54
4.9 เปอร์เซ็นต์ Conversion ในช่วง $\beta < 0.04$	56
4.10 เปอร์เซ็นต์ Conversion ในช่วง $0.04 < \beta < 0.08$	56
4.11 เปอร์เซ็นต์ Conversion ในช่วง $0.08 < \beta < 0.12$	57
4.12 เปอร์เซ็นต์ Conversion ของแผ่นขอบขนาด $D = 2 \text{ mm.}$	58
4.13 เปอร์เซ็นต์ Conversion ของแผ่นขอบขนาด $D = 3 \text{ mm.}$	58
4.14 เปอร์เซ็นต์ Conversion ของแผ่นขอบขนาด $D = 4 \text{ mm.}$	59
4.15 เปอร์เซ็นต์ Conversion ของแผ่นขอบขนาด $D = 5 \text{ mm.}$	59
4.16 เปอร์เซ็นต์ Conversion ของ β ช่วงต่างๆ	60
4.17 การเพิ่มของอุณหภูมิสารทำงานในช่วง $\beta < 0.04$	61
4.18 การเพิ่มของอุณหภูมิสารทำงานในช่วง $0.04 < \beta < 0.08$	61
4.19 การเพิ่มของอุณหภูมิสารทำงานในช่วง $0.08 < \beta < 0.12$	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
๑.๑ หน้าต่างย่อของ การจำลองการไหลของโปรแกรม Fluent® 12	73
๑.๒ การสร้างภาพร่างของแบบจำลองในโปรแกรม Design Modeler	74
๑.๓ การสร้างพื้นผิวให้กับภาพร่าง	74
๑.๔ พื้นผิวของแบบจำลองที่ได้จากโปรแกรม Design Modeler	75
๑.๕ เมชที่สร้างจากโปรแกรม Mesh	76
๑.๖ การ Update เมชเข้าสู่กระบวนการประมวลผล	76
๑.๗ การตั้งค่าการประมวลผลของโปรแกรม	77
๑.๘ แบบจำลองที่โหลดเข้าสู่โปรแกรม Fluent® 12	78
๑.๙ การกำหนด scale ให้ เมช	78
๑.๑๐ หน้าต่างการตั้งค่าโมเดล (ในกรอบเส้นปะ)	79
๑.๑๑ หน้าต่างตั้งค่า Multiphase Model	79
๑.๑๒ หน้าต่างตั้งค่า Viscous model	80
๑.๑๓ หน้าต่างในการกำหนด Material	80
๑.๑๔ หน้าต่างการกำหนดค่า Primary Phase	81
๑.๑๕ หน้าต่างการกำหนดค่า Secondary Phase	81
๑.๑๖ การคำนวณของโปรแกรม Fluent® 12	82

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่นช่วยในการกระตุ้นปฏิกิริยา

โดย : ชนกฤต นันท์ชนะ

ชื่อปρิญญา : วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชาสันติ ไตรสุทธิ์

คัพท์สำคัญ : คาวิเทชั่น ไบโอดีเซล ไฮไดนามิกส์คาวิเทชั่น

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะการเกิดคาวิเทชั่นของแผ่นขอบคอม และผลของรูปแบบของแผ่นขอบคอมที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอเรฟิฟิเคนชั่น ในถังปฏิกิริยานี้แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่น ในเบื้องต้นผลการทดลองพลาสติร์ของไฮโลเชิงคำนวณ จากการพิจารณาจากภาพสั้นส่วนๆ พบว่าแผ่นขอบคอมแบบหลายรูมีระยะเวลาการเกิดคาวิเทชั่นสั้นกว่าแผ่นขอบคอม 1 รู โดยระยะเวลาการเกิดคาวิเทชั่นที่สั้นกว่าจะส่งผลดีต่อการเร่งการผลิตไบโอดีเซล และจากการทดสอบหาลักษณะแผ่นขอบคอมที่เหมาะสม สำหรับถังปฏิกิริยานี้มันพื้นที่ใช้แล้ว โดยพื้นที่รูของแผ่นขอบคอมต่อพื้นที่ของห้อง (β) อยู่ในช่วง 0 - 0.12 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูอยู่ในช่วง 2 - 5 มิลลิเมตร วัตถุคิดที่ใช้คือน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระร้อยละ 2.7 ทำปฏิกิริยากับเมทาโนลปริมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตร และใช้โพแทสเซียมไฮครอกไฮด์ปริมาณร้อยละ 1 โดยหนึ่งก้อน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันด้านทางเข้าแผ่นขอบคอม เท่ากับ 4.5 bar อุณหภูมิเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 45°C ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาทีเพื่อนำมาวิเคราะห์หาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกส์เรโซแนนซ์ จากการทดลองพบว่าเมื่อ β เพิ่มขึ้นปริมาณการเกิดเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่การไฮโลมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และที่ช่วง β ใกล้เคียงกันแผ่นขอบคอมที่มีจำนวนรูมากกว่า จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า และในกรณีที่แผ่นขอบคอมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน เมื่อจำนวนรูของแผ่นขอบคอมมากขึ้น จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น จากการศึกษานี้พบว่าแผ่นขอบคอมที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอเรฟิฟิเคนชั่น ได้ดีที่สุด เพื่อให้ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 96.5 ตามมาตรฐานของการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ คือแผ่นขอบคอมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร จำนวน 15 รู โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นที่สุดคือ 15 นาที

ABSTRACT

TITLE : BIODIESEL PRODUCTION USING HYDRODYNAMIC
CAVITATION AS REACTION INTENSIFIER
BY : THANAKRIT NONCHANA
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
MAJOR : MECHANICAL ENGINEERING
CHAIR : ASST. PROF. PRACHASANTI THAIYASUIT, Ph.D.

KEYWORDS : CAVITATION BIODIESEL HYDRODYNAMICS CAVITATION

This research aims to study cavitation characteristics of fluid flow through orifice plates, and effect of orifice plates pattern in hydrodynamics cavitation reactor to transesterification reaction rate. Preliminary result from the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique shows that the cavitation length of multiple holes orifice plate is shorter than the single hole orifice considered from the vapor fraction contour comparison. This shorter cavitation length affects to the better biodiesel production intensifier. From the verification test for orifice plate configuration of hydrodynamic cavitation biodiesel reactor, it is found that the optimum total area of orifice per overall pipe area (β) is in the ranges of 0 - 0.12, while the orifice hole diameters are between 2 - 5 mm. The number of holes is varied depending on the β value. The raw material used in this study is the wasted cooking oil having free fatty acid of 2.7 %. Methanol of 20 % v/v and the catalyst concentration of 1% w/w of potassium hydroxyl are used. The inlet pressure of the orifice plate is constantly maintained at 4.5 bars and the initial temperature is 45 °C. The reaction time is 60 minutes in each test. To analyze the percentage of methyl ester, using the NMR analyzer, the sample is collected every 5 minutes. From results, the increasing of β enhances the higher percentage of methyl ester conversion due to the higher flow area and hence the higher reaction rate. Moreover, at the same β range, orifice plate with more number of holes will provide better reaction rate. The optimum orifice plate for 96.5 % methyl ester according to the commercial standard is the 15 holes of 2 mm diameter, with 15 minutes of reaction time.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัจจัย

คาวิเทชั่น (Cavitation) อาจจะเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ในงานที่เกี่ยวกับของไหลส่วนใหญ่ เพราะจะทำให้เกิดการกัดกร่อนในจักร หรือสร้างความเสียหายให้ชิ้นส่วนต่างๆ ดังนั้นในการออกแบบหรือเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในงานด้านของไหล วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องหลีกเลี่ยงการเกิดคาวิเทชั่นไม่ให้เกิดขึ้นในระบบ แต่ก็มีการนำเอาเทคนิคคาวิเทชั่นที่เกิดขึ้นในของเหลวมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรม เช่นการใช้คาวิเทชั่นเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัว (Atomization) ของหัวฉีด (Tamaki, Shimizu, Nishida, & Hiroyasu, 1998) การใช้คาวิเทชั่นช่วยการบำบัดน้ำเสีย (Waste water treatment) (Gogate, Mujumdar, & Pandit, 2003) ซึ่งเราสามารถสร้างคาวิเทชั่นและควบคุมมันได้ จากข้อดีที่คาวิเทชั่นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี จึงมีการทดลองนำไปใช้กับการผลิตไบโอดีเซล โดยการผลิตไบโอดีเซลโดยส่วนมากจะนำมาใช้เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ และเพื่อลดระยะเวลาในการการทำปฏิกิริยา

คาวิเทชั่นสามารถทำให้เกิดได้ ทั้งในของเหลวที่มีการไหล (Hydrodynamics cavitation, HC) และเกิดขึ้นกับของเหลวที่อยู่นิ่ง หรือเก็บอบอยู่นิ่ง โดย (Ultrasonic cavitation, UC) หนี่ยวนำให้ของเหลวที่มีพื้นผิวอิสระ เกิดการสั่นด้วยค่าแอมปลิจูด ที่มากพอจะทำให้เกิดไอบริเวณไอกล้ากับสนามความดัน (Pressure field) ภายในของเหลวนี้ การเกิดปรากฏการณ์แบบนี้ หากนำมาใช้กับการผสมคุณภาพลักษณะ หรือ การเร่งการทำปฏิกิริยาเคมี จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วขึ้นมาก หลายเท่าตัว ซึ่งในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่เรียกว่า ปฏิกิริยาแบบ “ทราบส์อสเทอริฟิเคชั่น” นั้นก็ต้องการปรากฏการณ์แบบนี้ เช่นกัน โดยตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอีกอย่างคือ การผสมกันของน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ ดังนั้นการผสมกันอย่างดีและรวดเร็วจะช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยาและช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยใช้ระยะเวลาสั้นลง การทำให้เกิดคาวิเทชั่นส่วนใหญ่จะใช้วิธีการ UC และ HC ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบ ข้อดีและข้อเสียด้านต่างๆ ของการสร้างการเกิดคาวิเทชั่นทั้ง 2 แบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สรุปเปรียบเทียบระบบกำเนิดคาวิเทชั่นแบบ UC และ HC

ลำดับ	รายการ	Ultrasonic cavitation	Hydrodynamics cavitation
1	การเร่งการเกิดปฏิกิริยา	เร็วมาก	เร็ว
2	การขยายขนาด	มาก	ง่าย
3	ราคา	สูง	ไม่สูง
4	พลังงาน	ใช้พลังงานสูง	ใช้พลังงานน้อย

จากตารางที่ 1.1 ถึงแม้ว่าถังปฏิกิริณ์แบบ HC จะเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าถังปฏิกิริณ์แบบ UC แต่เมื่อเปรียบเทียบในด้านอื่นๆพบว่าถังปฏิกิริณ์แบบ HC มีความเหมาะสมในการขยายขนาด และราคาต่ำกว่าถังปฏิกิริณ์แบบ UC มาก และที่สำคัญที่สุดคือเมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในถังปฏิกิริณ์ทั้ง 2 แบบ จากผลการศึกษาของ Kelkar et al. (2008) พบว่าถังปฏิกิริณ์ทั้ง 2 แบบสามารถทำปฏิกิริยาได้มากกว่า 95% โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาทีที่อุณหภูมิห้อง (30°C) โดยที่ถ้าใช้การปั่นผสมแบบเดิม (Conventional stirring) ต้องใช้เวลามากถึง 6 - 9 ชั่วโมง ในการเปลี่ยนน้ำมันให้ถูกลายเป็น เมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 65°C และเมื่อเปรียบเทียบค่า C_y (Cavitation yield) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกถึงผลิตภัณฑ์ทางเคมีที่ได้ต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้ พบร่ว่าถังปฏิกิริณ์แบบ HC มีค่า C_y มากกว่าถังปฏิกิริณ์แบบ UC ถึง 10 เท่า ซึ่งหมายความว่า ถังปฏิกิริณ์แบบ HC จะสามารถเปลี่ยนน้ำมันเป็นเมทิลเอสเทอร์ได้มากกว่า ถังปฏิกิริณ์แบบ UC ถึง 10 เท่าโดยน้ำหนัก เมื่อใช้พลังงานเท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบในด้านการขยายขนาดและการใช้งาน ถังปฏิกิริณ์แบบ UC ซึ่งส่วนมากจะใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic wave) เป็นแหล่งพลังงานและส่งผ่านให้ของเหลว คลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้ที่ค่าความถี่แตกต่างกันออกไป และเมื่อมีการส่งผ่านคลื่นไปยังของเหลว ของเหลวจะส่งผ่านคลื่นดังกล่าวไปยังถังปฏิกิริณ์และอุปกรณ์ที่อยู่ในระบบ ถ้าถังปฏิกิริณ์และ อุปกรณ์ในระบบฯ ไม่ได้ออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นพ้อง (Resonance) ของคลื่นอัลตราโซนิก ถังปฏิกิริณ์ก็จะเกิดความเสียหาย ดังนี้ การขยายขนาด (Upscale) ถังปฏิกิริณ์แบบ UC จึงมีข้อจำกัด ส่วนถังปฏิกิริณ์แบบ HC นั้นสามารถขยาย และปรับเปลี่ยนรูปทรง (Geometry) ได้โดยไม่มีปัญหา เพราะใช้การไอลเพื่อทำให้เกิดคาวิเทชั่น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาลักษณะการเกิด คาวิเทชั่น ในถังปฏิกิริยาแบบ HC โดยใช้ แผ่นขอบคุณ (Orifice plate) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ลดความดัน (Throttling device) ที่นิยมใช้ในการสร้างถังปฏิกิริยาแบบ HC ซึ่งโดยทั่วไปแผ่นขอบคุณจะเป็นแบบรูเดียว แต่จากผลการทดลอง Moholkar et al. (1999) พบว่าแผ่นขอบคุณที่มีจำนวนรูมากกว่า จะสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า แผ่นขอบคุณแบบรูเดียว เนื่องจากขณะที่ไอเกิดการแตกตัวนั้น จะทำให้เกิด $T_{collapse}$ (อุณหภูมิแตกตัว) และ

$P_{collapese}$ (ความดันแตกตัว) ที่สูงมากซึ่งอุณหภูมิและความดันที่สูงมากนี้ จะเป็นตัวที่ช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้เร็วขึ้น นอกจากนี้พื้นที่ในการเกิดคาวิเทชั่นก็เป็นปัจจัยหนึ่ง ซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยแต่ทั้งนี้แนวทางการออกแบบถังปฏิกิริณ์ และเงื่อนไขการทำงานของถังปฏิกิริณ์ ที่เหมาะสม ยังไม่มีการนำเสนอผลการศึกษาที่ชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะนำเสนอในส่วนดังกล่าว ข้างต้น โดยใช้ CFD (Computational fluid dynamics) ร่วมกับการทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการใช้คาวิเทชั่นแบบ Hydrodynamics cavitation เพื่อเป็นตัวช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยา และลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตไปโดยใช้เวลา

1.2.2 เพื่อหาความดันใช้งาน และขนาดของแผ่นขอบคุณที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตไปโดยใช้เวลาจากน้ำมันพืชใช้แล้ว

1.2.3 เพื่อหาข้อมูลสำหรับออกแบบกระบวนการผลิตไปโดยใช้เวลาแบบ Hydrodynamic cavitation ที่มีประสิทธิภาพต่อไป

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ถังปฏิกิริณ์แบบไฮดรอลิกส์คาวิเทชั่นใช้แผ่นขอบคุณในการสร้างคาวิเทชั่น

1.3.2 ใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว กรดไขมันอิสระ(Free Fatty Acid, FFA) ไม่เกิน 3 % เป็นสารตั้งต้นในการทดลองผลิตไปโดยใช้เวลา

1.3.3 ใช้เมทานอล (CH_3OH) เป็นตัวทำปฏิกิริยา โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.4 ศึกษาผลของจำนวนรูของแผ่นขอบคุณ (n) ที่ค่าสัดส่วนพื้นที่หน้าตัดแผ่นขอบคุณรวมต่อพื้นที่หน้าตัดท่อ (β) เท่ากันในช่วง $0 < \beta < 0.12$

1.3.5 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาในช่วงเวลาไม่เกิน 60 นาที

1.3.6 ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเริ่มต้นที่ $40 - 45^{\circ}\text{C}$

1.3.7 ใช้สัดส่วน เมทานอล / น้ำมันในช่วง $10 - 20 \text{ v/v}$

1.3.8 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 % w/w

1.3.9 ศึกษาผลของความดันด้านต้นน้ำของแผ่นขอบคุณ (P_u) ในช่วงไม่เกิน 5 bar

1.3.10 ศึกษาผลของ ความดันท้ายน้ำของแผ่นขอบคุณ (P_d) ในช่วงไม่เกิน 1 bar

1.3.11 เปรียบเทียบผลของการผลิตไปโอดีเซล จากถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ คาวิเทชั่น กับแบบปั้นผสมและแบบอัลตราโซนิกคาวิเทชั่น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถผลิตไปโอดีเซล โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่นได้

1.4.2 ทราบถึงคุณภาพและระยะเวลาที่ใช้ในการ โอดีเซลจากถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่น

1.4.3 สามารถบอกความสัมพันธ์ของจำนวนรูของแผ่นขอบคุณต่อ ปริมาณผลิตภัณฑ์ (Yield) ของการผลิตไปโอดีเซลแบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่นได้

1.4.4 สามารถอธิบายแนวโน้มของปริมาณผลิตภัณฑ์ไปโอดีเซล ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดัน P_u และ P_d ได้

1.4.5 อธิบายถักข่ายและพฤติกรรมการ ไอลที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ไปโอดีเซล โดยใช้ผลจากโปรแกรม CFD เทียบเคียงกับผลการทดลอง เพื่อศึกษาแนวทางในการใช้แบบจำลอง การ ไอลเชิงตัวเลข มาช่วยออกแบบถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่นได้

1.4.6 สามารถนำเสนอแนวทางการออกแบบถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่น แบบแผ่นขอบคุณได้

บทที่ 2

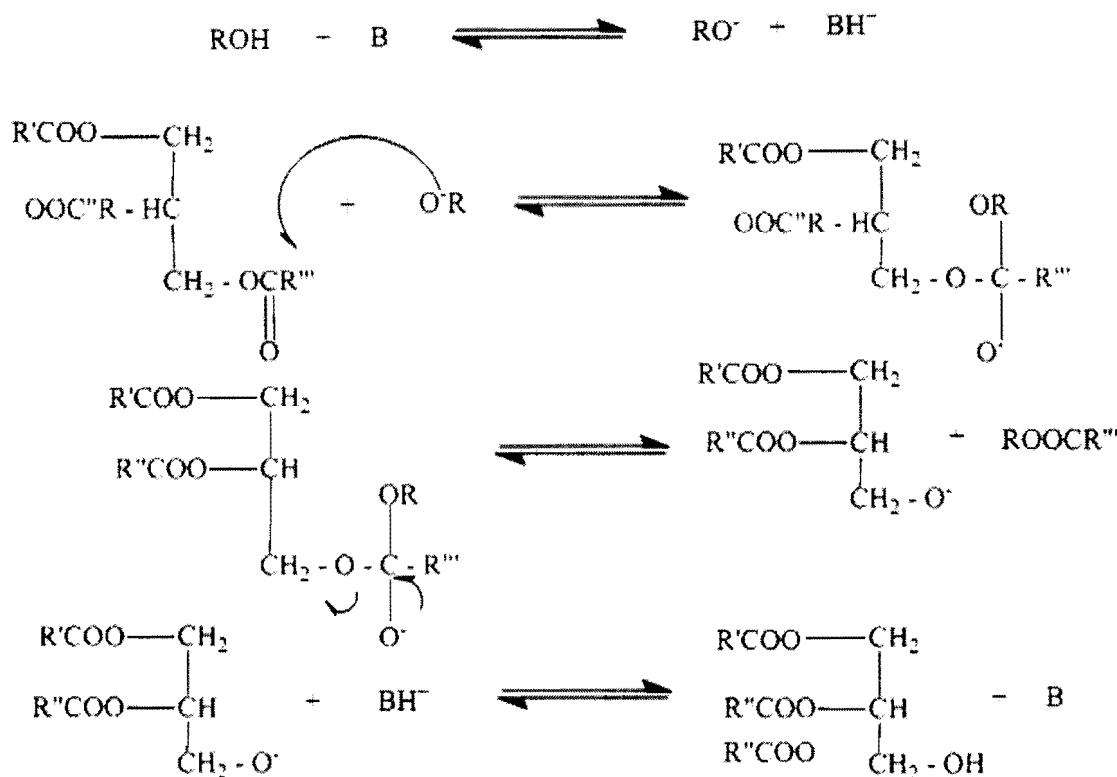
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ค่าวิเทชั่นเพื่อช่วยในการทำปฏิกริยาผลิตไบโอดีเซล โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาเบื้องต้นโดยการใช้การจำลองการไหลเชิงตัวเลข เป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษา และส่วนที่ 2 เป็นการทำทดลองเพื่อหาแบบของแผ่นขอบคอมและเงื่อนไขการทำปฏิกริยาที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์ค่าวิเทชั่น ซึ่งทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จะถูกนำเสนอในบทนี้

2.1 ไบโอดีเซล

2.1.1 นิยามของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้จากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ เช่น ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ถั่วเหลือง เมล็ดทานตะวัน เมล็ดเรพ (Rape seed) ถั่วคำ น้ำมันพืช หรือน้ำมันสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) โดยในทางเคมีไตรกลีเซอไรด์จะประกอบด้วยเอสเทอร์ของกรดไขมัน และกลีเซอโรลีนเมื่อนำมาทำปฏิกริยารานส์เอสเทอราฟิเคชั่น (Transesterification) กับแอลกอฮอล์ (เมทานอลหรือเอทานอล) สารเอสเทอร์ที่ได้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และได้กลีเซอโรลีนและกรดไขมัน เป็นผลผลิตที่ได้ซึ่งปฏิกริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอเรฟิเคชัน แบบใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

น้ำมันในโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าเลขตีแทน (Cetane number) สูงกว่าน้ำมันดีเซล เมื่อเกิดการเผาไหม้จะมีปริมาณควันดำ และคาร์บอนอนกอกไซด์ (CO) น้อยกว่าน้ำมันดีเซล (Ma & Hanna, 1999) แต่ในโอดีเซลก็มีข้อด้อยกว่าน้ำมันดีเซลหลายอย่าง เช่น ความหนืดสูงกว่า ค่าความร้อนต่ำกว่า จุดไฟต่ำกว่ารวม ทั้งมีปริมาณ NOx จากการเผาไหม้มากกว่าน้ำมันดีเซล (Ayhan, 2007)

2.1.2 การผลิตใบโอดีเซล

ใบโอดีเซลผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับ宣告油或甘油三酯。由植物油或動物脂肪與甘油三酯反應，產生生物柴油。

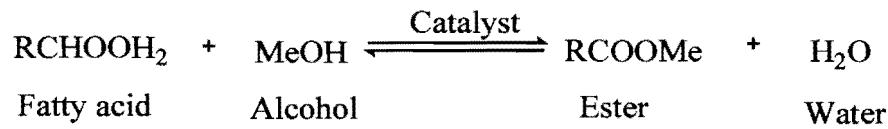
โดยคุณสมบัติของ宣告油或甘油三酯的結構，如圖 2.1 所示，為了改變宣告油或甘油三酯的結構，以達到生物柴油的性質，

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแอลกอฮอล์ C1 – C4 (Lide, 2007)

สาร	สูตร	มวล โมเลกุล	จุดเดือด (°C)	จุด หลอมเหลว (°C)	ความ หนาแน่น (g.mL) ^{20/4}
เมทานอล	CH ₃ OH	32.042	65	-93.9	0.7914 ^{20/4}
เอทานอล	C ₂ H ₅ OH	46.069	78.5	-177.3	0.7893 ^{20/4}
1- โพรพานอล	CH ₃ OH-CH ₂ -CH ₃	60.096	97.4	-126.5	0.8035 ^{20/4}
2- โพรพานอล (ไอโซ่โพรพานอล)	CH ₃ -CHOH-CH ₃	60.096	82.4	-89.5	0.7855 ^{20/4}
1-บิวทานอล(<i>n</i> - Butanol)	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -OH	74.123	117.2	-89.5	0.8098 ^{20/4}
2-บิวทานอล	CH ₃ -CHOH-CH ₂ -CH ₃	74.123	99.5	-	0.8080 ^{20/4}
2- เมทธิล-โพรพานอล(iso-butanol)	CH ₃ OH-CH(CH ₃)-CH ₂ -CH ₃	74.123	108	-	0.8018 ^{20/4}
2- เมทธิล-2-โพรพานอล(tert-butanol)	CH ₃ -CHOH-CH ₃ CH ₃	74.123	82.3	25.5	0.7887 ^{20/4}

โดยการผลิตไปโดยใช้ตัวบ่งปฏิกิริยาทางเคมีโดยหลักสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การทำปฏิกิริยาแบบเอสเทอริฟิเคชัน และปฏิกิริยาแบบทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ปฏิกิริยาทั้งสอง แบบมีรายละเอียดดังนี้

2.1.2.1 ปฏิกิริยาแบบเอสเทอริฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันกับ แอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อช่วยทำปฏิกิริยาให้กลাযเป็นเอสเทอร์ได้เร็วขึ้น โดยที่ กระบวนการนี้เป็นการทำปฏิกิริยาของกรดไขมันหรือหมู่ R ทำการทำปฏิกิริยาโดยตรง ผลผลิตที่ได้คือ เอสเทอร์กันน้ำ โดยมีสมการทั่วไปดังภาพที่ 2.2

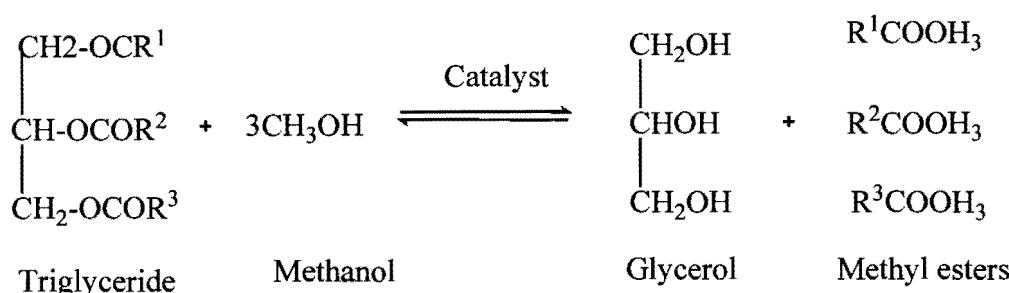


ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาแบบเอสเทอริฟิเคชัน

โดยทั่วไปนิยมใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตแบบ เอสเทอริฟิเคชัน ส่วนใหญ่เลือกใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาแบบเอสเทอริฟิเคชัน ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไม่เกินอุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล และต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานเพื่อให้ได้เมทธิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐาน หรือเปอร์เซ็นต์การเกิดเมทธิลเอสเทอร์ตามมาตรฐานที่กำหนด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ ดังนั้น

จึงต้องมีการดึงน้ำออก เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปทางด้านข้ามมือ ซึ่งจะทำให้ผลที่ได้ ของเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

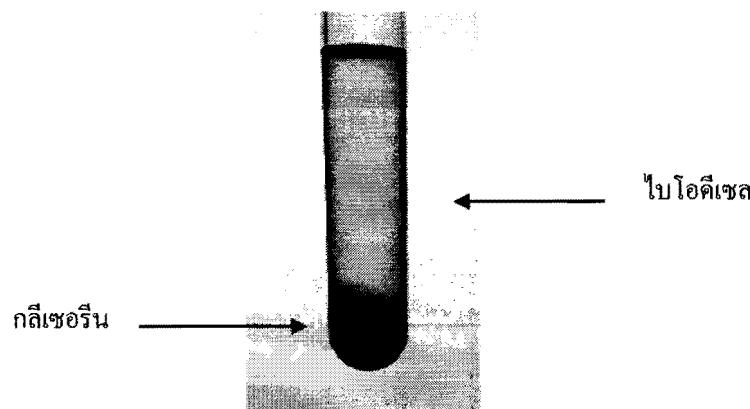
2.1.2.2 ปฏิกิริยาแบบทรานส์เอสเทอโรฟิเกชัน คือปฏิกิริยาเคมีของไตรกลีเซอไรด์ ในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ เพื่อให้เกิดเป็นเอสเทอร์ โดยใช้ด่างหรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะเรียกชนิดของไขมันว่าโอดีเซลแบบเอสเทอร์ ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น ถ้าใช้มethanol เป็นแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยา จะเรียกว่าเมทิลเอสเทอร์ แต่ถ้าใช้อทานอลเป็นแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยา ก็จะเรียกว่าเอทิลเอสเทอร์ สำหรับน้ำมันไขมัน โอดีเซลชนิดเอสเทอร์ จะมีสมบัติที่คล้ายกับน้ำมันดีเซลมาก ผลผลิตของปฏิกิริยาที่คือ เอสเทอร์กับกลีเซอรีน โดยมีสมการทั่วไปดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาแบบทรานส์เอสเทอโรฟิเกชัน

ปฏิกิริยาแบบทรานส์เอสเทอโรฟิเกชัน มีการนำใช้เพื่อการปรับปรุงคุณภาพทางเชื้อเพลิงจากไตรกลีเซอไรด์ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะการลดค่าความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้วปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอโรฟิเกชัน ของไตรกลีเซอไรด์ เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นได้ค่อนข้างช้า และเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อส่งเสริมให้มีอัตราเร็วของปฏิกิริยาไปข้าง (Forward Reaction Rate) และผลผลิตสูงขึ้น และควรเพิ่มปริมาณของแอลกอฮอล์ตั้งต้นให้เกินพอ เพื่อทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเดือนไปในทิศทางการสังเคราะห์ ผลิตภัณฑ์มากที่สุด จึงจะทำให้ได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสูงสุดด้วย โดยปกติแอลกอฮอล์ที่ใช้ได้แก่ เมทานอลหรือเอทานอล โดยเมทานอลมักจะนิยมใช้มากกว่า เนื่องจากเป็นแอลกอฮอล์ที่ไม่โนเกลูลเล็ก ทำให้สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไขมันหรือน้ำมันพืชได้ง่ายกว่า โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากเบสให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์ และให้ผลคือที่อุณหภูมิต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด อ่อน弱 ไร้คีการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะต้องให้แอลกอฮอล์ และน้ำมันหรือไขมันที่นำมาใช้นั้นไม่มีน้ำหรือความชื้นปนอยู่ เพราะจะทำให้

เกิดปฏิกิริยา ชาปอนิฟิเคชัน (Saponification) ซึ่งจะทำให้เกิดสบู่และทำให้ปริมาณของอสเทอร์น้อยลง รวมทั้งทำให้การแยกกลีเซอรีนออกจากอสเทอร์ทำได้ยาก แต่ถ้าแยกออกอย่างลึกแล่น้ำมันหรือไขมันมีน้ำปนอยู่มากก็อาจจะใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนค่าง กรดส่วนใหญ่ที่ใช้คือกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดลงผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกแยกเป็นสองชั้นดังแสดงในภาพที่ 2.4 โดยชั้นบนเป็นอสเทอร์ ส่วนชั้นล่างเป็นกลีเซอรีน ซึ่งจะถูกแยกออกจากสารละลายชั้นบน โดยวิธีปัลอยออกมาจากการน้ำ

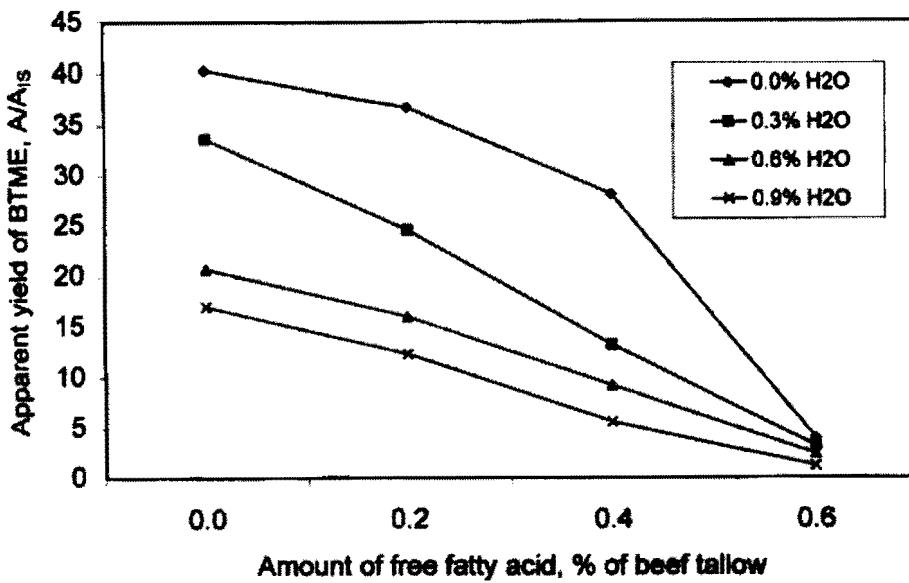


ภาพที่ 2.4 การแยกชั้นของน้ำมันไปโอดีเซล (ชั้นบน) กับ กลีเซอรีน (ชั้นล่าง)

2.1.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์อสเทอริฟิเคชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์อสเทอริฟิเคชันนี้ มีหลายปัจจัย ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการเกิดปฏิกิริยาโดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1.3.1 ผลของปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) และความชื้น ปริมาณกรดไขมันอิสระนี้เป็นตัวแปรหลักที่ต้องทำการหา ก่อนการทำปฏิกิริยาทรานส์อสเทอริฟิเคชัน โดยที่หากจะใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณกรดไขมันอิสระต้องน้อยกว่า ร้อยละ 3 ถ้ามากกว่านี้จะทำให้ร้อยละผลได้ของใบโอดีเซล (% Conversion) ต่ำและทำให้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปซึ่งเสียงดองน้ำมันโดยที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดสบู่ และสบู่ที่เกิดขึ้นจะปนกับอสเทอร์และกลีเซอรีนที่ได้ทำให้สารละลายผสมทั้งสองชนิดมีความหนืดสูงขึ้น ส่งผลให้การแยกกลีเซอรีนออกจากอสเทอร์ทำได้ยากขึ้น วิธีป้องกันคือ แยกออกอย่างลึก ไขมัน หรือน้ำมัน ควรมีน้ำหรือความชื้นปนอยู่น้อยที่สุด หรือไม่มีเลยเพื่อทำให้ปฏิกิริยาทรานส์อสเทอริฟิเคชันเกิดได้สมบูรณ์ ดังงานวิจัยของ Ma et al. (1998) ที่ทำการศึกษาผลกระทนจากตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละของกรดไขมันอิสระและน้ำที่มีผลต่อร้อยละที่ได้ของผลิตภัณฑ์อสเทอร์จากไขว้ โดยมีผลการทดลองดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ผลของความชื้นและร้อยละของกรดไขมันอิสระ ต่อปริมาณร้อยละผลได้ของเอสเทอร์จากไขวัว (Ma, et al., 1998)

จากการที่ 2.5 จะพบว่าปริมาณร้อยละผลได้ของเอสเทอร์จากไขวัว มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อความชื้นและร้อยละของกรดไขมันอิสระในไขวัวมีค่าสูงขึ้น

2.1.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยามีทั้งกรดและเบส แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสนึ่งจากเบสมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง และให้ผลิตีที่อุณหภูมิต่ำกว่าใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นเบส ควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สอดคล้องกับแอลกอฮอล์ เช่น ถ้าใช้ เอทานอลตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรเป็นโซเดียมเอ็อกไซด์ (NaOC_2H_5) หรือโซเดียมเมธอไอกไซด์ (NaOCH_3) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดพบว่ามีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ ภาชนะที่ใช้ต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ใช้ต้องสูง อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา

2.1.3.3 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าสูงในระยะแรกของปฏิกิริยา และจะลดลงเมื่อเวลามากขึ้น ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสม จึงจำเป็นในการผลิตใบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์

2.1.3.4 อุณหภูมิ ในปฏิกิริยารานส์เอสเทอร์ฟิเกชันน์ อุณหภูมิ (Temperature) มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก

อุณหภูมิที่สูงทำให้แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยาได้จำกัดแต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้สูงเกินจุดเดือดของแอลกอฮอล์จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียแอลกอฮอล์ในระหว่างการทำปฏิกิริยา

2.1.3.5 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ กล่าวคือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำและสูงเกินไป จะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่ำ ดังนั้นปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะมีค่าที่ค่าหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้ถ้าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามาก จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดมาไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันทำให้เกิดปฏิกิริยาชาปอนิฟิเคชั่น

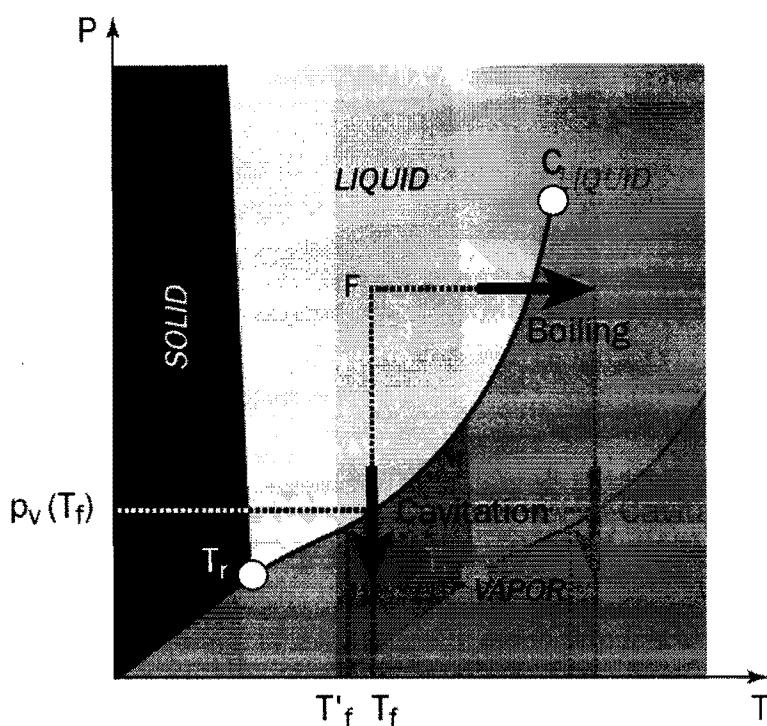
2.1.3.6 สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมีผลต่อปริมาณของเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น โดยตามทฤษฎีสัดส่วนโดยโน้มของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 3: 1 ในทางปฏิบัติจะต้องใช้ปริมาณของแอลกอฮอล์มากกว่าในทางทฤษฎี เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ความสามารถในการผสมกันระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน และพื้นที่ผิวในการสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทранส์ เอสเทอโรฟิเคชั่น โดยเทคนิคคาวิเทชั่นจะถูกนำมาช่วยในส่วนนี้

2.2 คาวิเทชั่น (France & Michel, 2004)

2.2.1 นิยามของคาวิเทชั่น

คาวิเทชั่น คือการเปลี่ยนสถานะของของเหลวไปเป็นไอ เนื่องจากความดันบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนสถานะนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความดันไอ (Vapor pressure) โดยความดันไอสามารถอธิบายได้โดยใช้เฟสไ/dozeแกรม (Phase diagram) ของน้ำ (ภาพที่ 2.6) โดยเส้นโถงจากจุด T_c ไปยังจุดวิกฤต (จุด C) เป็นเส้นที่แยกโดเมนของเหลวและไอ โดยการข้ามเส้นโถงนี้เป็นแสดงการเปลี่ยนแปลงขั้นกลับ ได้ภายในได้สภาวะสมดุลหรือสภาวะคงตัว ได้แก่ การระเหยหรือการกลับตัวของของเหลวที่ความดัน P_v (ความดันไอ) ซึ่งเป็นพิษชั้นของอุณหภูมิ T โดยต่อจากนี้การเกิดคาวิเทชั่นสามารถทำเกิดขึ้นโดยการลดความดันที่อุณหภูมิคงที่โดยประมาณที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการไหหลังการเกิดคาวิเทชั่นจะเป็นปรากฏการณ์ที่คล้ายกับการเดือด (Boiling) ยกเว้นว่ากลไกการขับเคลื่อนการเปลี่ยนสถานะไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แต่การเปลี่ยนแปลงความดันที่ควบคุมโดยพลศาสตร์ของการไหหลัง



ภาพที่ 2.6 เฟสไดอะแกรมของน้ำ (France & Michel, 2004)

ในบางกรณีในการระเหยเป็นไอกองของเหลว ในกระบวนการคาวิเทชั่น ก็ต้องการความร้อนเพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นการระเหยจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิของของเหลว T โดยค่าผลต่างของอุณหภูมิ $T - T'$ จะเรียกว่า เทอร์มอลเดล (Thermal delay) ของการเกิดคาวิเทชั่นโดย Lauterborn (1980) ได้จัดกลุ่มของไฮโครไดนามิกส์คาวิเทชั่น และอัลตราโซนิก เป็นคาวิเทชั่นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดันภายในกองของเหลว

2.2.2 รูปแบบหลักของการเกิดคาวิเทชั่น

การเกิดคาวิเทชั่นนี้มีรูปแบบของการเกิดที่หลากหลาย โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการให้เหลวในขณะที่ยังไม่เกิดคาวิเทชั่น แต่อย่างไรก็ตามการเกิดคาวิเทชั่นนี้จะส่งผลต่อการให้เหลวเดิมขณะที่ไม่เกิดคาวิเทชั่น โดยรูปแบบของการเกิดคาวิเทชั่นสามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้

2.2.2.1 การเกิดแบบคาวิเทชั่นแบบแยกตัวไม่คงที่ (Transient isolated bubbles) โดยจะมีการเกิดไอจำนวนมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ในกองของเหลวบริเวณของเหลวที่มีความดันต่ำ (ต่ำกว่า P_c) และจะคงสถานะของไอไปตามกระแสการให้เหลว จนกระทั่งเหลวไปถึงบริเวณที่มีความดันมากพอ ให้เกิดการแตกตัว (Collapse) ไอก็จะเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นกองของเหลวดังเดิม

2.2.2.2 การเกิดคาวิเทชั่นแบบบีดเกาะหรือแบบแผ่น (Attached/Sheet cavities)
ส่วนมากจะพบบริเวณขอบของวัตถุ เช่น ด้านความดันต่ำของไบพัคหรือของแผ่นฟอยล์ (foils)

2.2.2.3 การเกิดคาวิเทชั่นในแกนหมุน มักเกิดบริเวณพื้นผิวที่มีความดันต่ำในส่วนแกนกลางของกระแสการหมุน เช่น กระแสการไหลหลังไบพัคของกังหันน้ำ

2.2.3 การเกิดคาวิเทชั่นในของไอล

2.2.3.1 ระบบของการเกิดคาวิเทชั่น

ในทางปฏิบัติแล้วสิ่งที่มีความสำคัญในการเกิดคาวิเทชั่นที่ต้องพิจารณา มีดังต่อไปนี้

1) บริเวณเกิดคาวิเทชั่น ได้แก่ ขอบเขตของส่วนที่เกิดคาวิเทชั่นและส่วนที่ไม่มีการเกิดคาวิเทชั่น

2) ลักษณะการเกิดคาวิเทชั่น ซึ่งจะส่งผลต่อความรุนแรงและความเสถียรของการเกิดคาวิเทชั่น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลที่ลดลง

2.2.3.2 สาเหตุที่มักเกิดคาวิเทชั่น

ในส่วนนี้จะแสดงรายละเอียด ของสาเหตุที่มักจะพบการเกิดคาวิเทชั่นในกระแสการไหลซึ่งมีดังต่อไปนี้

1) เกิดจากการไหลผ่านอุปกรณ์ที่มีลักษณะปิดกั้นการไหล ส่งผลให้ความเร็วที่ผ่านส่วนนั้นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความดันสูญเสีย (Pressure drop) ขึ้นในสภาวะการไหลคงตัว ซึ่งมักจะพบในอุปกรณ์จำกัดพื้นที่การไหล เช่น แผ่นขอบคม (Orifice) ท่อเวนชูรี (Ventury tube) หัวฉีด (Nozzle) เป็นต้น หรือการไหลผ่านส่วนโค้งของเส้นการไหลเดิม เช่น การไหลผ่านห้องท่อที่คัดโค้ง การไหลผ่านข่องอ ฯลฯ

2) เกิดการไหลแบบเฉือน (Shear flows) ซึ่งทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) และเกิดความแปรปรวนของความดันอย่างสูง เช่น ลำพูงของของไหล (Liquid jet) คลื่นที่เกิดจากการพุ่งกระแทกวัตถุ (Wake) เป็นต้น

3) เกิดจากการไหลแบบไม่คงตัวของอย่างในธรรมชาติ เช่น ปรากฏการณ์ Water hammer ที่เกิดในอุปกรณ์ควบคุมการไหล ท่อน้ำในโรงไฟฟ้า ท่อจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล เป็นต้น โดยของไหลมักจะถูกเร่งด้วยความเร็วสูง ซึ่งส่งผลให้ความดันในบางจุดลดลงอย่างมากและทำให้เกิดคาวิเทชั่น

4) เกิดจากความชุกรอบของพื้นผิว เช่น การไหลของน้ำผ่านทางปล่อยน้ำ (Spillways) ของเขื่อนซึ่งทำให้เกิดการไหลกระแทบและทำให้เกิดคาวิเทชั่นขึ้น

5) เกิดจากการกระทบของผนังที่เกิดการสั่น เช่น หัวtranส์ดิวเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic transducers) นำหล่อเย็นของเครื่องยนต์ดีเซล เป็นต้น โดยส่วนของการสั่นนี้ จะทำให้เกิดสนามความดันที่มีภาพแบบคงตัว ซึ่งถ้าการสั่นมีแอมป์ลิจูด (Amplitude) ที่สูงมากพอ คาวิเทชั่นก็จะเกิดขึ้นบริเวณห้องคลื่นของสนามการสั่นนั้นๆ

6) เกิดจากรถีที่มีวัตถุพุ่งเข้ากระทบของไอลด้วยความเร็วสูง ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่น Shock wave ขึ้นในของไอลนั้น และของเหลวบริเวณไอลกับวัตถุที่ถูกเร่งจากวัตถุให้มีความเร็วสูงนั้น ความดันก็จะลดลงอย่างกะทันหันทำให้เกิดคาวิเทชั่นขึ้นในแนวของคลื่น shock นั้นๆ

2.2.4 การเกิดคาวิเทชั่นในของไอล

ในระบบของไอลที่มีใช้สารทำงานแบบของเหลวเนื้อเดียว (Homogeneous liquid) นั้น โครงสร้างของสถานะ ไอของของเหลว จะสามารถหาได้โดยการวิเคราะห์ระบบทางกล พองไอในระบบล่วงมากนักจะไม่เสถียร และเมื่อฟองไอเหล่านี้ไอลเข้าไปสู่บริเวณที่มีความดัน สูงขึ้น ก็จะเกิดการแตกตัว (Collapse) อย่างรุนแรง โดยความดันที่เกิดขึ้นจะมีความแปรผันสูงมาก จนกระทั่งเข้าใกล้กับความดันไอ โดยการแตกตัวนี้คล้ายคลึงกับการสั่นสะเทือนในเครื่องจ กรกล ซึ่งจะส่งผลดังต่อไปนี้

2.2.4.1 สมรรถนะของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ใบจักรมีแรงยก (Lift) ลดลงและมีแรงดึง (Drag) เพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลของไอลลดลง ปริมาณการระบายน้ำของทางปล่องน้ำของเขื่อนลดลง อัตราการสั่นเปลือยพลังงานสูงขึ้น ฯลฯ

2.2.4.2 เกิดแรงกระทำต่อโครงสร้างที่เป็นของแข็งเพิ่มขึ้น

2.2.4.3 เกิดเสียงดัง และการสั่นสะเทือน

2.2.4.4 เกิดการกัดกร่อนบริเวณผนัง ในการณ์ที่ความเร็วแตกต่างระหว่างของไอล และผนังที่เป็นของแข็งมีค่ามากพอให้เกิดคาวิเทชั่น

2.2.5 อินเตอร์เฟซของเหลวและไอ

การไอลแบบคาวิเทชั่น นั้นมีลักษณะคล้ายๆกับการไอลแบบสองสถานะ (Two phase flow) ของไอผสมของเหลว (Gas-liquid flow) ซึ่งจะมีอินเตอร์เฟซระหว่างของเหลวกับไอ จำนวนมาก แต่การไอลแบบคาวิเทชั่นนี้จะอ่อนไหวต่อสิ่งกระทบภายนอกมากกว่า เช่น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ลักษณะการไอลก็จะมีความแตกต่างไปจากการไอลของไอผสมของเหลวอย่างมาก ทั้งนี้ เนื่องจากการไอลแบบสองสถานะจะมีฟองไออยู่ในกระแสการไอลจำนวนมาก ซึ่งลักษณะแบบนี้จะส่งผลให้ความหนาแน่นเฉลี่ยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (ยกเว้นในกรณีของคลื่น Shock wave) เพราะฉะนั้นไม่สามารถควบคุมแน่นໄດ້ (Non - condensable gases, NCG) ซึ่งคล้ายอยู่ใน

ของเหลวด้วยจำนวนที่คงที่ จะช่วยรักษาสมดุลการไอล แต่ในการไอลแบบคาวิเทชันนี้ อินเตอร์เฟซจะของของเหลวและไออกซิเจนให้ความดันคงที่ ซึ่งในทางปฏิบัติเท่ากับความดันไออกซ์เจนเมื่อ มีการเพิ่มหรือลดความดันภายนอกอย่างรวดเร็ว ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อลักษณะการเกิด คาวิเทชัน และขนาดไออกซ์เจนมาก ซึ่งกลุ่มของฟองไออกซ์จะเกิดสภาวะที่ไม่เสถียรอย่างมาก และในทาง ปฏิบัติแล้วเป็นไปไม่ได้ที่จะสามารถใช้หัวฉีด สอดเข้าไปในกระแสการไอลของคาวิเทชันเพื่อทำการวัด เพราะหัวฉีดก็สามารถทำให้เกิดคาวิเทชันขึ้นได้

2.2.6 การประยุกต์ใช้คาวิเทชัน

งานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดคาวิเทชันที่เหนี่ยวนำโดยการไอลของเหลว โดยที่มีตัว แปร ไวร์มิติที่ใช้ในการศึกษาการเกิดคาวิเทชันคือ คาวิเทชันนัมเบอร์ (Cavitation number, σ) เรโนลัมเบอร์ (Reynolds number, Re) สัดส่วนของความหนาแน่นของเหลวต่อไออกซ์เจน (Liquid to vapor density ratio, λ) และสัดส่วนของค่าความหนืดของของเหลวต่อไออกซ์เจน (Liquid to vapor viscosity ratio, η) ดังสมการที่ 2.1–2.4

$$\sigma = \frac{P_u - P_d}{P_d - P_v} \quad (2.1)$$

$$Re = \frac{\rho_{liquid} UD}{\mu_{liquid}} \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{\rho_{liquid}}{\rho_{vapor}} \quad (2.3)$$

$$\eta = \frac{\mu_{liquid}}{\mu_{vapor}} \quad (2.4)$$

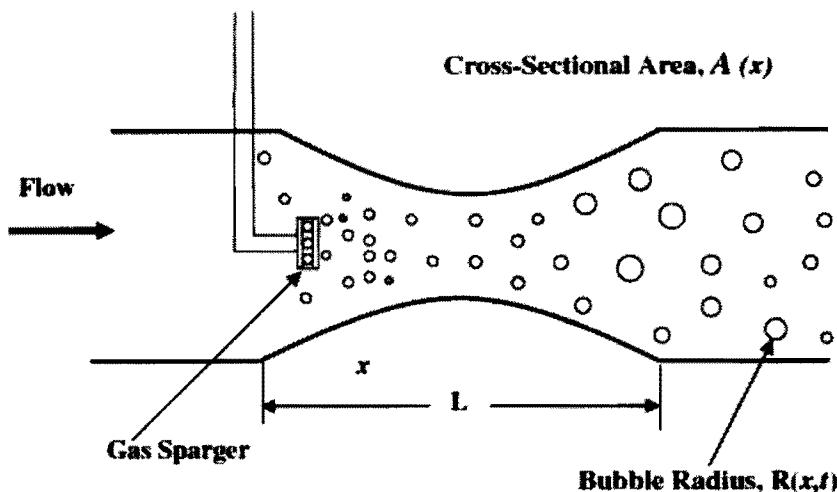
โดยที่ σ คือ คาวิเทชันนัมเบอร์ U คือ ค่าความเร็วเจ็ททางทฤษฎีของเบอร์นูลลี่ (Theoretical Bernoulli velocity of jet) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของความดันด้านด้านหน้า และความดัน ด้านท้ายน้ำเกิดลำпу่กับความหนาแน่นของของเหลว ดังสมการที่ 2.5

$$U = \sqrt{\frac{2(P_u - P_d)}{\rho_{liquid}}} \quad (2.5)$$

2.2.7 กลไกของควิเทชั่นในการเร่งปฏิกิริยา

ในขณะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากฟองไออกสับเข้ามาสู่สถานะของเหลวหนึ่น มีการปลดปล่อยความดันและอุณหภูมิอุกมาซึ่งส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาเคมี แต่ข้อจำกัดของเครื่องมือวัดที่ไม่สามารถวัด ค่าความดันและอุณหภูมิจากการแตกตัวนี้ได้โดยตรง จึงต้องมีการหาค่าเหล่านี้โดยทางอ้อม เช่น ใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของฟองไอก (Bubble dynamics model) (Brennen, 1995) ซึ่งโดยส่วนมากแล้วจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกลไกของควิเทชั่นกับปฏิกิริยาเคมีดังนี้

โดยเริ่มจากปี ค.ศ.1993 Kamath et al. (1993) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองของการเกิด OH⁻ radical ระหว่างที่เกิดควิเทชั่นโดยใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่เชิงมุมของฟองไออก แต่ไม่ได้รวมผลของการเคลื่อนที่ของฟองไออกร่วม กับการใช้สมมติฐานของฟินน์ (Flynn's assumption) (1964) โดยให้ฟองไออกอยู่ในระบบปิดตลอดการแตกตัว กำหนดค่าความดันย่อของก๊าซมีค่าเท่ากับความดันไออกของเหลว กระบวนการรักษาตัวของฟองไออกเกิดขึ้นในภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal) และกระบวนการแตกตัวเกิดขึ้นในกระบวนการอะเดียบติก (Adiabatic) ซึ่งเหมือนกับงานวิจัยของ Sochard et al.(1997) และงานวิจัยของ Gong และ Hart (1998) และจากนั้น Yasui (1997) ทำการสร้างแบบจำลองการเปลี่ยนเฟสแบบไม่สมดุล และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการแตกตัวของฟองไออกโดยใช้สมการ Reyleigh-Plesset ในกระบวนการคำนวณหารัศมีของฟองไออกร่วมกับการเปลี่ยนถ่ายมวลของไอน้ำโดยการควบแน่นและการระเหย และจากการศึกษาของ Kumar et al. (2007) ที่ทำการสร้างแบบจำลองถังปฏิกิริยาไครโตรไดนามิกส์ควิเทชั่น ชนิด Converging-diverging nozzle เพื่อสร้างลักษณะความดันที่ทำให้ฟองไออกเกิดการเคลื่อนที่เชิงมุม โดยใช้น้ำเป็นสารตัวกลาง โดยใช้หัวพ่นขนาดเล็กพ่นก๊าซาร์กอนและอากาศจากภายนอกเข้าสู่กระแสการไอลดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ชุดถังปฏิกิริยาไอโอด์ ไคนามิกส์แบบใช้หัวพ่นก๊าซขนาดเล็ก (Sampath Kumar & Moholkar, 2007)

ผลการจำลองพบว่าปฏิกิริยาเคมีแปรผันกับเงื่อนไขการทำงานของถังปฏิกิริยาโดยมีรายละเอียดดังนี้

- (1) เมื่อความดันต้นน้ำเพิ่มขึ้นผลของปฏิกิริยาเคมีจะเพิ่มขึ้น แต่ก็ทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่ม เพราะปั๊มต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น
- (2) การใช้ก๊าซอะตอมเดี่ยว (Monatomic gas) เช่น ก๊าซ氩กอน สามารถเพิ่มปฏิกิริยาเคมีได้ แต่การใช้ก๊าซาร์กอนก็เป็นการเพิ่มต้นทุน
- (3) การลดขนาดของฟอง ไอเริ่มต้น (Initial size) สามารถเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้

2.3 งานวิจัยที่ใช้ค่าวิเทชั่นในกระบวนการเคมีอื่นๆ

Gogate (2002) ศึกษาการนำเทคนิคค่าวิเทชั่นมาช่วยในการบำบัดน้ำเสีย โดยเปรียบเทียบทั้งแบบ UC และแบบ HC พบว่าถังปฏิกิริยาแบบ HC มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบ UC มาก และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียอื่นๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบการนำบัดน้ำเสียโดยถังปฏิกิริย়แผ่นขอบคุณ กับระบบแบบอื่นๆ
(Gogate., 2002)

เครื่องมือ	ความเข้มข้นของไอโอดีนหลังจาก หยุดปฏิกิริยา (g)	Cavitation yield (g/J)
Dakshin horn	1.02 E-5	3.53 E-9
Dashing bath	8.4 E-5	5.83 E-9
ACE horn	5.9 E-5	5.48 E-9
Flow cell	1. 31 E-4	9.12 E-7
High pressure homogenizer	6.63 E-5	7.38 E-5
High speed homogenizer	1.83 E-4	6.645 E-7
Orifice plate	7.5 E-2	1.90-4

Arrojo et al. (2008) ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* (*E. coli*) โดยใช้ถังปฏิกิริย়แบบ HC โดยใช้ปั๊มขนาด 5 kW ใช้แผ่นขอบคุณที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันคือ $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ โดยการการเปลี่ยนเส้นผ่าศูนย์กลางและจำนวนรูดังนี้

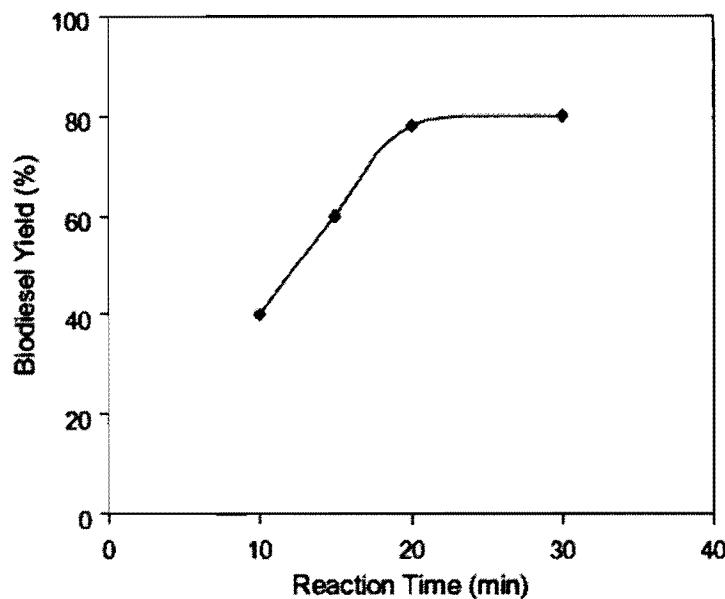
- (1) เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร จำนวน 1 รู
- (2) เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร จำนวน 6 รู
- (3) เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จำนวน 25 รู

และการเปรียบเทียบกับท่อเวนจูรี (Ventury tube) ขนาดคือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุดเท่ากับ $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ และ $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ โดยมีมุมไควาเรนซ์ (Divergence angle) เท่ากันคือ 10 องศา พบว่าการฆ่าเชื้อ *E. coli* ต้องใช้การเกิดฟองไอที่ขาวและรุนแรง โดยการใช้ท่อเวนจูรีนั้นให้อัตราการฆ่าเชื้อสูงกว่าแผ่นขอบคุณ และเมื่อเพิ่มจำนวนรูของแผ่นขอบคุณขึ้น แนวโน้มอัตราการฆ่าเชื้อจะสูงขึ้นด้วย

2.4 งานวิจัยการใช้ค่าวิทยุชั้นในการผลิตไบโอดีเซล

Patil et al. (2010) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซล จากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เทคนิค เมทานอลเนื้อวิกฤติ (Super Critical methanol) โดยทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนโดยขั้นตอนแรกเป็นการลดปริมาณของกรดไขมันอิสระ โดยใช้กรดซัลฟูริก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และอีกขั้นตอนคือ

กระบวนการทรานส์อสเทอร์ฟิเคนชั่น ที่ใช้ความดันประมาณ 100 bar และอุณหภูมิ 350 °C โดยมีความสัมพันธ์ของ Yield ที่เวลาการทำปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.8



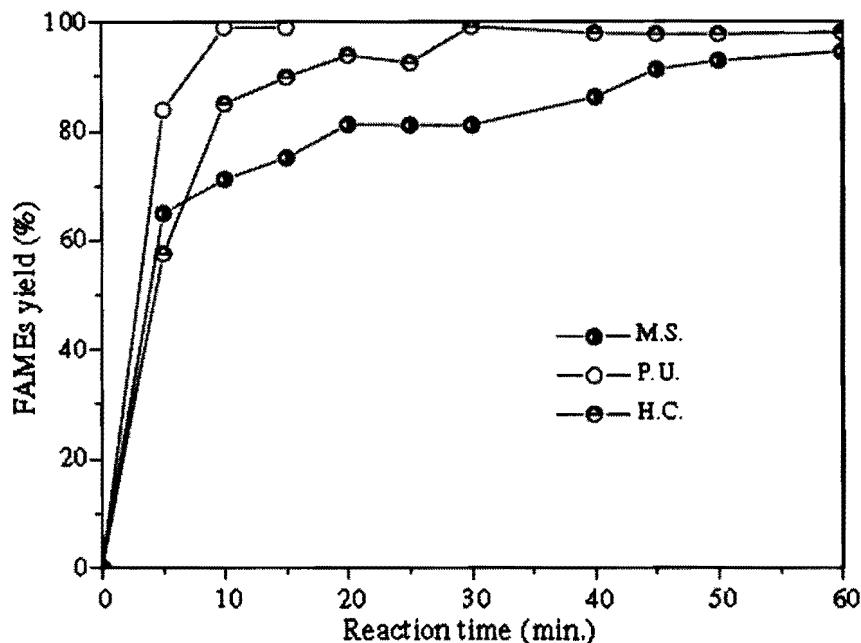
ภาพที่ 2.8 ปริมาณ Yield เมทิลเอสตอร์จากกระบวนการเมทานอลหนีอวิกฤติ ที่เวลาต่างๆ (Patil, et al., 2010)

จากการที่ 2.8 จะพบว่า ค่า Yield จะมีค่า 50 – 60 % โดยใช้เวลาทำปฏิกิริยา 15 นาที และมีค่ามากกว่า 80% เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

Hanh et al. (2009) ทำการศึกษาผลของชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ทรานส์อสเทอร์ฟิเคนชั่น โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (40 kHz) ในการสร้าง cavitation เพื่อช่วยในการทำปฏิกิริยา เทียบกับแบบปั่นผสมที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที โดยใช้สัดส่วนโดยไมลของ แอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 โดยใช้ KOH 1% w/w เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พนวณการใช้อัลตราโซนิก ให้อัตราการเกิดอัลกอฮอล์ที่สูงกว่าแบบปั่นผสม และเมื่อจำนวนการบูนของ แอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ Yield ลงที่สภาวะการทำปฏิกิริยาเดียวกัน

Ji et al. (2006) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตใบโอดีเซลแบบปั่นผสม (Mechanical stirring, MS) แบบไชโตรไดนามิกส์คาวิเทชั่น และแบบพาวเวอร์อัลตราโซนิก (Power Ultrasonic Cavitation, PU) ที่อุณหภูมิปฏิกิริยาเท่ากับ 45° C สัดส่วนโดยไมลของ แอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 1:6 และใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1 % w/w โดยใช้การปั่นผสมที่ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที PU ที่ความถี่ 19.7 MHz กำลัง 150 W และ HC ทำงานที่ความ

ดัน 0.7 MPa เป็นถังปฏิกิริย়แผ่นขอบคณรูเดียว โดยผลิตกัมที่ใบโอดีเซล (FAMEs) ที่ได้ในแต่ละนาทีในการทำปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ผลิตกัมที่ใบโอดีเซลที่เวลาต่างๆ ในแต่ละวิธี (Ji, et al., 2006)

และเมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการเกิดใบโอดีเซล 1 กิโลกรัมของแต่ละวิธีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าอัตราการสื้นเปลี่ยนพลังงานจำเพาะของวิธีการผลิตใบโอดีเซลแบบต่างๆ
(Ji, et al., 2006)

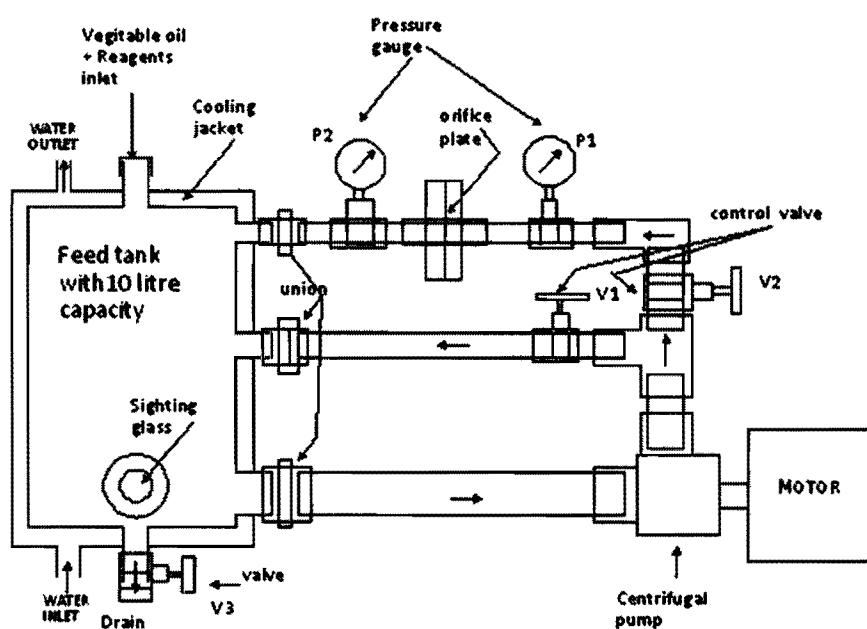
วิธีการ	MS	PU	HC
พลังงานที่ใช้(W-h/kg)	500	250	183

จากภาพที่ 2.9 และตารางที่ 2.3 พบว่าวิธีการ PU มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด และมีอัตราการสื้นเปลี่ยนพลังงานจำเพาะอยู่ระหว่างการผลิตใบโอดีเซลด้วยวิธี MS และ การผลิตใบโอดีเซลด้วยเทคนิค HC นอกจากนี้การผลิตใบโอดีเซลด้วยเทคนิค HC มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า

การผลิตด้วยเทคนิค PU เก็บน้อย แต่มีค่าอัตราการสื้นเปลี่ยนพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด ส่วนการผลิตในโอดีเซลจากเทคนิค MS มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำและสื้นเปลี่ยนพลังงานมากที่สุด

Kelkar et al. (2008) ทำการศึกษาการผลิตในโอดีเซลจากถังปฏิกิริณ์แบบ HC เปรียบเทียบกับ แบบ C โดยใช้กรดซัลฟูริก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 28°C พนบว่าค่า ผลิตภัณฑ์ จากถังปฏิกิริณ์ต่อพลังงานที่ใช้ หรือ C_y ของถังปฏิกิริณ์แบบ HC อยู่ในช่วง $1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-4}$ g/J และของถังปฏิกิริณ์แบบ UC อยู่ในช่วง $5 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$ g/J

Pal et al.(2010) ทำการศึกษาการผลิตในโอดีเซลจาก Thumba oil (*C.colocynthis*) ซึ่งในโอดีเซลจาก Thumba oil มีความหนืด 5.86 centistokes ซึ่งมีคุณสมบัติดีกว่าในโอดีเซลจากสนุ่วคำ ซึ่งมีความหนืด 7.2 centistokes โดยใช้ชุดการทดลองดังภาพที่ 2.10

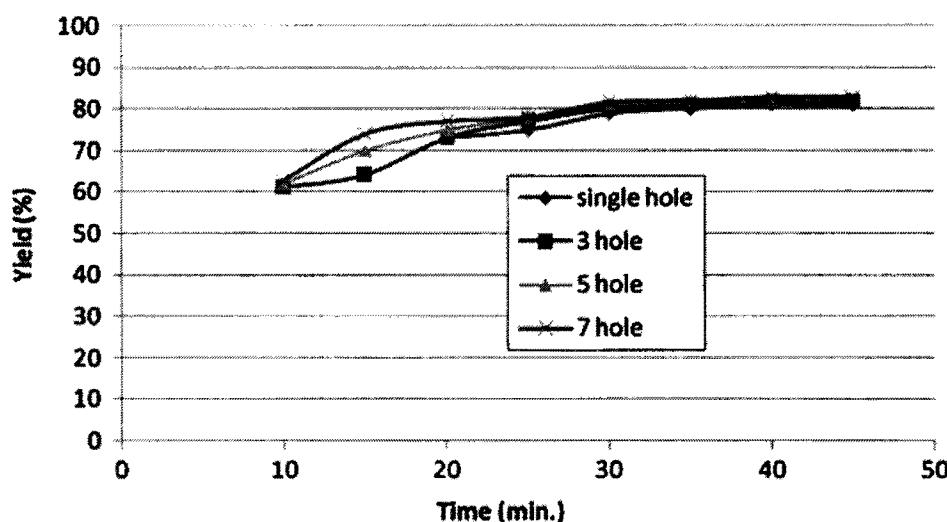


ภาพที่ 2.10 ชุดผลิตในโอดีเซลแบบไฮโดรไคนามิกส์คาวิเทชั่น (Pal, et al., 2010)

จากภาพที่ 2.10 ชุดผลิตในโอดีเซลแบบไฮโดรไคนามิกส์คาวิเทชั่นจะประกอบไปด้วย ส่วนประกอบหลักคือ

- (1) ถังพักและควบคุมอุณหภูมิ
- (2) ปั๊มและมอเตอร์
- (3) ชุดถังปฏิกิริณ์แบบแผ่นขอบคม
- (4) วาล์วควบคุมอัตราการไหล
- (5) เครื่องมือวัด

โดยทำการศึกษาโดยใช้แผ่นขอบคุณเด็นผ่าสูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร จำนวน 1, 3, 5 และ 7 รู ตามลำดับ โดยใช้สัดส่วนโดยโน้ม ของเมทานอล ต่อน้ำมันที่ค่า 1: 4.5 และ 1:6 โดยมีผลของผลิตภัณฑ์ที่เวลาต่างๆดังภาพที่ 2.11 โดยจะพบว่าเมื่อจำนวนรูมากขึ้นอัตราผลิตภัณฑ์ในโอดีเซลที่ได้จะเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 2.11 ผลิตภัณฑ์ในโอดีเซลที่ได้ที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ 1:4.5
(Pal, et al., 2010)

2.5 พลศาสตร์ของไหหลังคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) (Anderson, 1995)

เป็นการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหหล (Fluid Dynamics) โดยมีพื้นฐานในการพิจารณาของไหหลที่มีความต่อเนื่องให้อยู่ในสภาพของลักษณะเป็นช่วงโดยวิธีการส่วนใหญ่ที่มักจะใช้กันก็คือการแบ่งช่วงของโดเมนปริภูมิ (Spatial Domain) ให้เป็นเซลล์เล็กๆเพื่อก่อให้เกิดโครงตาข่ายเชิงปริมาตร (Volume Mesh) หรือกริด (Grid) แล้วใช้อัลกอริธึม (Algorithm) ที่เหมาะสมในการแก้สมการของการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นสมการออยเลอร์ (Euler Equation) สำหรับการไหแบบไม่หนึด (Inviscid Flow) และสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) สำหรับการไหแบบหนึด (Viscid Flow) นอกจากนี้โครงตาข่ายอาจจะมีลักษณะภาพทรงแบบไม่มีโครงสร้างที่แน่นอน (Unstructured Mesh) เท่านั้นที่ลักษณะเป็นสามเหลี่ยมใน 2 มิติหรือมีลักษณะเป็นภาพทรงปริมิติกใน 3 มิติหรืออาจจะมีลักษณะภาพทรงแบบมีโครงสร้างแน่นอน (Structured Mesh) ที่ได้โดยถูกกำหนดให้มีพลวัต (Dynamic) สูงและมีสเกลขนาดใหญ่ ตัวกริ化的จะถูกคัดแปลงให้มีการเปลี่ยนแปลง ขึ้นกับเวลาดังระเบียบวิธีการปรับความละเอียดของ

โครงการข่ายแบบอะแดปทีฟ (Adaptive Mesh Refinement Methods) ในกรณีที่แก้ปัญหา CFD โดยไม่อาศัยฐานความรู้ของระเบียบวิธีแบบโครงตัวข่าย (Mesh-Based Method) เราอาจจะใช้ระเบียบวิธีต่างๆดังนี้

- (1) ระเบียบวิธีลาการานจ์ (Lagrangian Method)
- (2) ระเบียบวิธีสเปกตรัม (Spectral Method)
- (3) ระเบียบวิธีแลตติซ-โบลท์มันน์ (Lattice-Boltzmann Method)

โดยปกติเราสามารถแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ได้โดยตรงเมื่อสเกลความยาวมีความเหมาะสม โดยการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหามีขั้นตอนของการคำนวณ ที่สามารถจำแนกออกเป็น 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.5.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Preprocessing process)

เป็นขั้นตอนในการกำหนดค่าเริ่มต้นและขอบเขตต่างๆ เช่น การกำหนดขนาดและหน่วยความยาวทางการภาพของแบบจำลอง กำหนดคุณสมบัติของไหลและวัสดุ กำหนดวิธีในการคำนวณ กำหนดสภาพการทำงาน กำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับจุดเชื่อมต่อต่างๆ ที่อยู่ในขอบเขตของปัญหา กำหนดเงื่อนไขการถูกรักษาของของผลเฉลย และค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณ

2.5.2 ขั้นตอนการคำนวณ (Solver)

เป็นขั้นตอนในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหา ซึ่งวิธีการที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยมีหลายวิธีดังนี้

2.5.2.1 วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method)

เป็นวิธีหาผลเฉลยของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในจุดต่อต่างๆ บนเส้นกริด โดยเทอมของสมการการไหล จะอยู่ในรูปของสมการอนุกรมเทเลอร์ ให้อยู่ในรูปของผลต่างโดยประมาณบนจุดต่อต่างๆ ซึ่งจะทำให้สมการของระบบ ซึ่งอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อขนาดส่วน กลายเป็นสมการผลต่าง (Difference equation) ของตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อต่างๆ

2.5.2.2 วิธีการไฟไนต์อเลิมเม้นต์ (Finite element method)

เป็นวิธีการแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นอิลิเม้นต์ ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน จากนั้นพิจารณาอิลิเม้นต์ที่ละอิลิเม้นต์ โดยการสร้างสมการสำหรับแต่ละอิลิเม้นต์ที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่เรียกว่า สมการที่สร้างขึ้นนั้นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่จากนั้น ปัญหาทั้งหมด เมื่อทำการประยุกต์เข้ากับเงื่อนไขที่ขอบเขตแล้ว ทำการแก้ชุดสมการดังกล่าวก็จะได้ค่าผลเฉลยโดยประมาณของค่าที่ต้องการที่ตำแหน่งจุดต่อต่างๆ ความแม่นยำของผลเฉลยนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของอิลิเม้นต์ที่ใช้ ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถประยุกต์เข้ากับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี

2.5.2.3 วิธีสเปคตรัล (Spectral method)

เป็นวิธีการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยใช้พื้นฐานของอนุกรมฟูเรียร์ซึ่งจะไม่เหมือนวิธีผลต่างสีบเนื่องและวิธีไฟโนต์อิลิเมนต์ที่ให้ค่าผลเฉลยที่ถูกต่อต่างๆ แต่วิธีการนี้จะให้ค่าผลเฉลยตลอดทั้งโดเมนของปัญหา

2.5.2.4 วิธีปริมาตรสีบเนื่อง (Finite volume method)

เป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนามาจากวิธีผลต่างสีบเนื่อง ขั้นตอนของกระบวนการเป็นดังนี้

1) ทำการอินทิเกรตสมการของปัญหาตามด้วยปริมาตรควบคุมที่พิจารณาในโดเมนของปัญหา

2) เขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาให้อยู่ในรูปของสมการผลต่าง

3) หาค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำแห่งต่างๆ โดยใช้วิธีทำแท่น

การอินทิเกรตบนปริมาตรควบคุมนั้น เป็นวิธีที่ทำให้วิธีการนี้แตกต่างจากวิธีการอย่างอื่น การอินทิเกรตปริมาณใดๆ ตามด้วยปริมาตรควบคุมนั้น เป็นขั้นตอนพื้นฐานของการพิจารณากฎการอนุรักษ์ปริมาณ ที่ให้ผลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุมนั้น วิธีการนี้เป็นวิธีการพื้นฐานที่สามารถทำความเข้าใจได้่ายกว่าวิธีไฟโนต์อิลิเมนต์และวิธีสเปคตรัล การใช้กฎการอนุรักษ์คุณสมบัติใดๆ ซึ่งอาจเป็นความเร็ว เอนทาล皮 ที่ให้ผลผ่านปริมาตรควบคุมนั้น พิจารณาได้จากสมดุลของสมการเปลี่ยนแปลงซึ่งก็คือการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาตรนั้น เมื่อให้ผลผ่านปริมาตรควบคุม

2.5.3 ขั้นตอนการแสดงผล (Post-processor)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับคำนวณ โดยขั้นตอนนี้จะต้องได้ค่าผลเฉลยโดยประมาณจากขั้นตอนการคำนวณเรียบร้อยแล้ว การแสดงผลของโปรแกรมนั้นจะออกแบบรูปแบบต่อไปนี้

2.5.3.1 แสดงรูปร่างของปัญหาและกริด

2.5.3.2 เอกสารภาพแบบเวคเตอร์

2.5.3.3 เอกสารภาพคอนทัวร์

2.5.3.4 เอกสารภาพพื้นผิวใน 2 หรือ 3 มิติ

2.5.3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง เช่น การเคลื่อนไหว การหมุน

2.5.4 ระเบียบขั้นการแก้ปัญหา

การคำนวณของไอลพลศาสตร์ ประกอบด้วยการคำนวณหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุรักษ์ทั้งสามสมการและสมการอื่นๆ เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน สมการชนิดของไอล (กรณีของไอลมีหลายชนิด) และสมการสเกลาร์อื่นๆ ซึ่งลำดับการหาคำตอบของสมการแต่ละอย่างนี้

ผลการคุ้ยเข้าของคำตอนและค่าผลเฉลย โดยทั่วไประบุวิธีเชิงตัวเลขจะมีระเบียบของลำดับขั้น การแก้ปัญหาอยู่ 2 แบบ (Fluent Inc., 1998) ตามแต่ลักษณะของปัญหาดังนี้

2.5.4.1 ระเบียบขั้น Segregated solver เป็นระเบียบขั้นที่จะแก้สมการอนุรักษ์ไมemen ต้มก่อนสมการอื่น ทั้งนี้การแก้ปัญหาชุดสมการจะกระทำเป็นรอบและแก้ซ้ำ เนื่องจากสมการอนุรักษ์ไมemen ต้มจะอยู่ในรูปไม่เชิงเส้น ขั้นตอนการแก้ปัญหาตามระเบียบนี้ Segregated solver แสดงดังภาพที่ 2.11 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

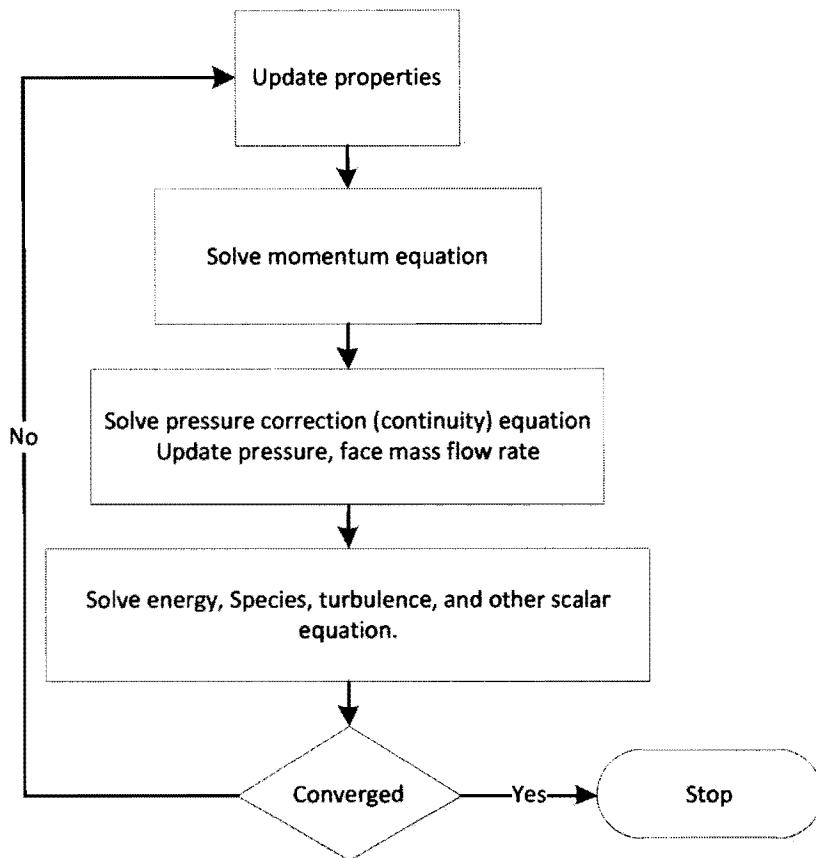
1) สมบัติของสารจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่ใช้ คือ ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุกๆรอบของการคำนวณ

2) คำนวณสมการอนุรักษ์ไมemen ต้ม เพื่อคำนวณหาค่าความดันและอัตราการไหล ซึ่งจะได้ความเร็วของการไหล

3) เนื่องจากค่าความเร็วที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 อาจเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมกับสมการอนุรักษ์มวล ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่าที่ได้ ด้วยสมการปรับแก้ความดัน (Pressure correction equation) ประดิษฐ์จากสมการอนุรักษ์มวลกับไมemen ต้ม โดยค่าความดัน อัตราการไหล และความเร็วที่ได้จะมีค่าเหมาะสมมากขึ้น

4) ขั้นตอนนี้เป็นการแก้สมการอื่นที่เพิ่มเข้ามา สำหรับแต่ละปัญหา เช่น สมการพลังงาน แบบจำลองความปั่นป่วน และสมการสเกลาร์อื่นๆ โดยใช้ค่าจากขั้นตอนที่ 3

5) การยอมรับค่าที่ได้จากการคำนวณ จะถูกกำหนดขึ้น จากผลต่างของเศษเหลือในแต่ละรอบของการคำนวณ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับ ได้ต้องทำการคำนวณซ้ำ (กลับไปที่ขั้นตอนที่ 1) จนกว่าจะได้ค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้

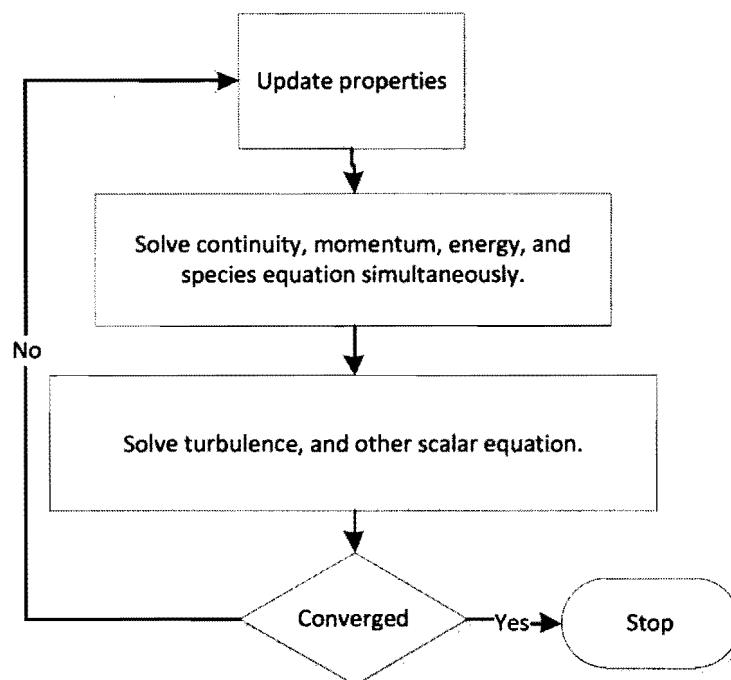


ภาพที่ 2.12 ลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นแบบ Segregated solver

2.5.4.2 ระเบียบขั้น Coupled solver เป็นระเบียบขั้นที่ค่อนข้างใหม่สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข เป็นวิธีที่ความสามารถอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และสมการชนิดของไอล (เมื่อกรณีของไอลมีหลายชนิด) แก้สมการพร้อมกันก่อนจะแก้สมการสเกลาร์อื่นๆ การคำนวณสมการเหล่านี้ขึ้นต้องทำเป็นรอบ เช่นเดียวกับระเบียบขั้นตอนแรก ซึ่งมีขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 2.13 ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ระเบียบขั้นตอนแรก สมมติของสารถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่ใช้ คือ ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหาและจะมีการปรับปรุงค่าทุกรอบของการคำนวณ
- 2) ขั้นตอนต่อมา คำนวณสมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และสมการชนิดของของไอล (กรณีของไอลมีหลายชนิด)
- 3) คำนวณสมการแบบจำลองความปั่นป่วนและสมการสเกลาร์อื่นๆ โดยค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

4) ประเมินผลต่างๆ เช่น เหลือของรอบว่า ยอมรับได้หรือไม่ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้จะต้องทำการคำนวณกลับไปที่ขั้นตอนที่ 1 และวนซ้ำจนกว่าจะได้ค่าเท่ากันหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้



ภาพที่ 2.13 ลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นแบบ Coupled solver

2.5.5 ระเบียบวิธีคำนวณ

การคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบของวิธีการเชิงตัวเลขนี้มี 2 ระเบียบวิธีคือ ระเบียบวิธีแบบชักแจง (Explicit method) และระเบียบวิธีแบบปริยาย (Implicit method) ความแตกต่างของระเบียบวิธีทั้งสองคือ การสร้างสมการเชิงตัวเลขที่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างโหนดหรืออิลิเมนต์ เพื่อแทนความสัมพันธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ ก้าวคือ ระเบียบวิธีแบบชักแจง ตัวรู้ค่าถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เพื่อหาตัวไม่รู้ค่าหนึ่งตัวของอิลิเมนต์ต่อไป แต่ระเบียบวิธีแบบปริยาย สมการหนึ่งสมการจะประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าหนึ่งตัว ของอิลิเมนต์ต่อไปมากกว่านึง ตัว ระเบียบวิธีแบบปริยายจะใช้กับการคำนวณ Segregated solver เพราะการคำนวณแบบ Segregated solver จะคำนวณหาค่าตัวแปรเดียวของทุกอิลิเมนต์พร้อมกันที่เวลาเดียวกัน ก่อนคำนวณ

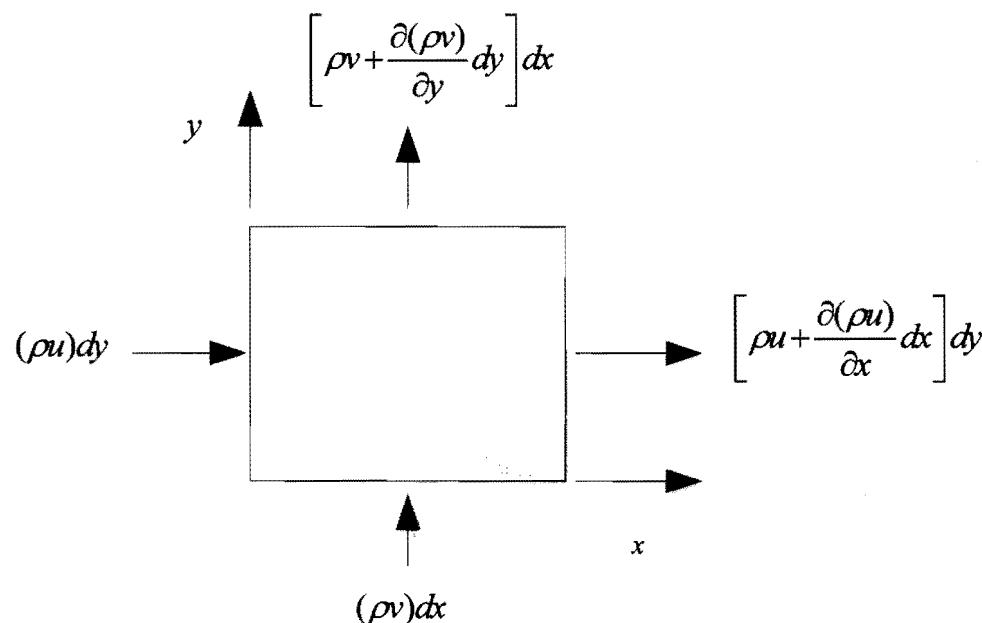
ตัวแปรอื่นๆที่จะตัวแปร ทั้งนี้จะเป็นขั้น Coupled solver สามารถเลือกใช้ทั้งสองระบบที่วิธีเพื่อการแก้ปัญหาได้

2.6 กฎอนุรักษ์ของการไหล (Conservation laws of fluid motion)

สมการหลักของปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่มีรูปแบบเป็นสมการทางคณิตศาสตร์นั้น เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของของไหลที่เกิดขึ้นจริงในการไหล (ปราโมทย์ เศษช่อง, 2545) ซึ่งแสดงในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติที่เกิดขึ้น ถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐานของกฎอนุรักษ์ 3 ข้อประกอบไปด้วยกฎอนุรักษ์มวล กฎอนุรักษ์โมเมนตัมและกฎอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 กฎอนุรักษ์มวล (Conservation of mass)

เมื่อพิจารณาการไหลของมวลสุทธิผ่านออกจากปริมาตรควบคุม ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอัตราการลดของมวลภายในปริมาตรควบคุม แสดงดังภาพที่ 2.14 ซึ่งมวลจะไม่หายไปไหน ขอกล่าวนี้เป็นหลักการหนึ่งที่นำไปสู่กฎการอนุรักษ์หรือสมดุลของมวลภายในอิลิเมนต์ ดังนี้

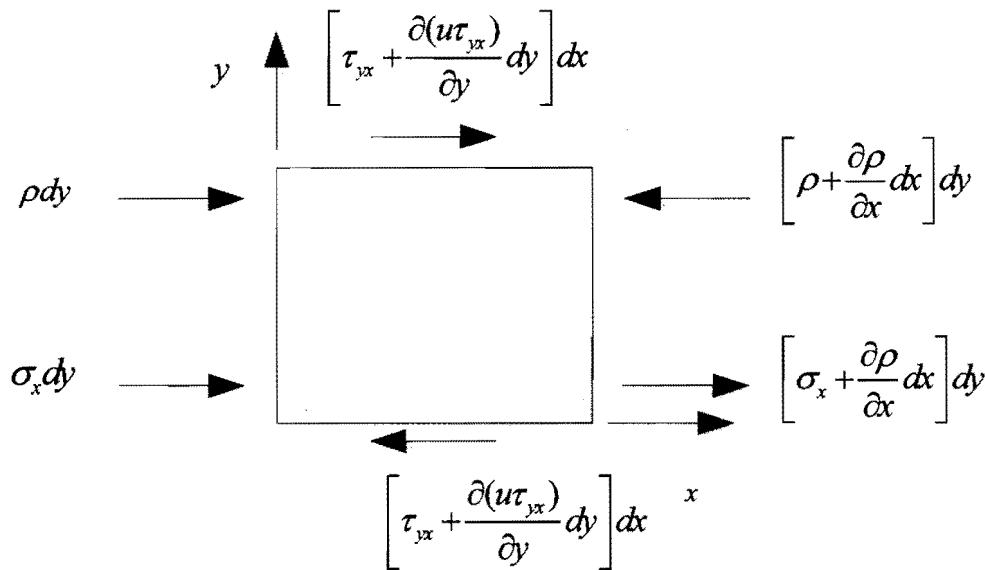


ภาพที่ 2.14 รูปแบบการไหลของมวลผ่าน เข้า - ออก อิลิเมนต์

$$\text{อัตราการเพิ่มของมวลในอิลิเมนต์ของของไหล} = \text{อัตราของมวลสุทธิที่ไหลเข้าสู่อิลิเมนต์} \quad (2.6)$$

2.6.2 กฎอนรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum)

กล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่อของไอลในปริมาตรควบคุมที่พิจารณา แสดงดังภาพที่ 2.15 ซึ่งก็คือตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน ดังนี้

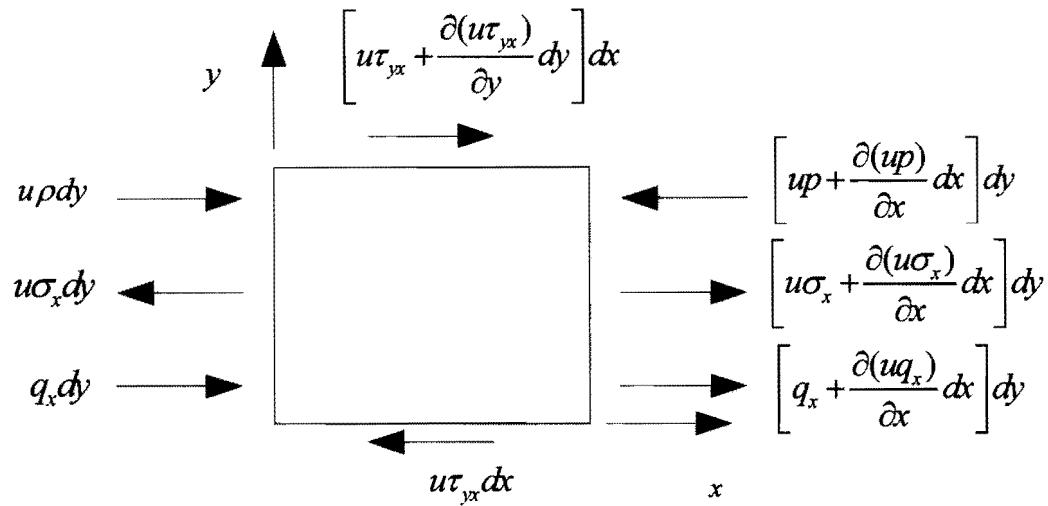


ภาพที่ 2.15 รูปแบบของแรงที่กระทำกับอิลิเมนต์ของไอล

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม} = \text{ผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาค} \quad (2.7)$$

2.6.3 กฎอนรักษ์พลังงาน (Conservation of energy)

กล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลอัตราความร้อนที่ให้ กับอัตราของงานที่กระทำกับอนุภาคของไอล แสดงดังภาพที่ 2.16 ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โนไคดามิกส์



ภาพที่ 2.16 รูปแบบของงานและพลังงานที่เกิดขึ้นบนอิเลเม้นต์

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงาน} &= \text{อัตราความร้อนสุทธิที่ให้กับอนุภาค} \\ &+ \text{อัตรางานสุทธิที่กระทำต่ออนุภาค } (2.8) \end{aligned}$$

2.7 สมการควบคุม (Governing equation)

สมการพื้นฐานที่ใช้สำหรับวิธีการคำนวณของไอลเซิงพลศาสตร์ สำหรับการไอลแบบ 2 มิติ ประกอบไปด้วยสมการหลักๆ 3 สมการคือ สมการต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน

2.7.1 สมการต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.9)$$

2.7.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

$$\frac{dv_x}{dt} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = g_x \beta(T - T_\infty) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \left(v \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right), \text{x direction} \quad (2.10)$$

$$\frac{dv_y}{dt} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = g_y \beta(T - T_\infty) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \left(\nu \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right), \text{y direction}$$

(2.11)

2.7.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

(2.12)

โดยที่ v_x คือ ความเร็วของการไหลในทิศทาง x, (m/s)

v_y คือ ความเร็วของการไหลในทิศทาง y, (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของ流體 (kg/m³)

g คือ ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (m/s²)

β คือ สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงความร้อน, (1K)

T คือ อุณหภูมิ, (K)

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหล, (K)

P คือ ความดัน, (Pa)

t คือ เวลาใดๆ, (s)

ปัจจุบันนี้ CFD เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการวิจัยอย่างกว้างขวาง เนื่องจากปัจจุบัน เทคโนโลยีมีการพัฒนาอย่างมาก และการใช้ CFD ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดทดลองและเวลา ได้อย่างมาก โดยงานวิจัยที่ใช้ CFD เพื่อช่วยออกแบบถังปฏิกิริยามีดังนี้

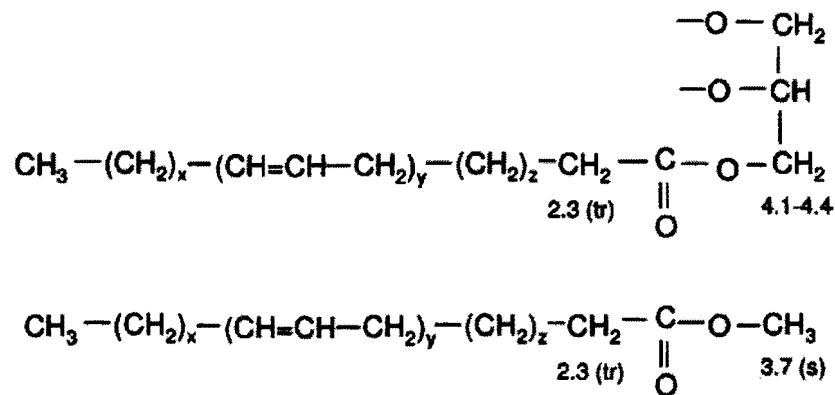
Kasat et al. (2001) ได้นำเอา CFD มาใช้เพื่อจำลองการผสมกันของของแข็ง (Solid) และ ของเหลว (Liquid) ในถังปฏิกิริยแบบปั่นผสม โดยใช้ Two fluid model และ $k - \varepsilon$ model โดยผล การจำลองพบว่าสามารถให้ผลที่ใกล้เคียงกับการปั่นผสมจริง และสามารถนำผลมาอธิบาย พฤติกรรมของการผสมกันแบบเขวนตอน (Suspension) ได้

2.8 การวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เทคนิค ^1H NMR

เทคนิคการหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ ^1H NMR ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Gelbard et al. (1995) โดยใช้สัญญาณของ โปรตอนของเมทีลีน (Methylene protons) ที่อยู่ในกลุ่มของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งจะตรวจพบที่ปริมาณ 2.3 ppm และหลังจากการเกิดปฏิกิริยา โปรตอนของ เมทอกซี (Methoxy protons) ซึ่งจะอยู่ในเมทิลเอสเทอร์ซึ่งจะตรวจพบที่ปริมาณ 3.7 ppm ดังภาพที่ 2.16 และได้ใช้พื้นที่ใต้กราฟสัญญาณของ โปรตอนของเมทีลีนและเมทอกซี เพื่อใช้บวกปริมาณ เมทิลเอสเทอร์ โดยใช้สมการที่ 2.13

$$C = 100 \times \frac{3A_{ME}}{2A_{CH_2}} \quad (2.13)$$

โดยที่ C คือ เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ A_{ME} คือ พื้นที่ใต้กราฟของ โปรตอนของเมทิลเอสเทอร์ A_{CH_2} คือ พื้นที่ใต้กราฟของ โปรตอนของเมทีลีน ทั้งนี้ค่าคงที่ 2 และ 3 ได้มาจากการที่ เมทิลลีนควรบอน มีจำนวน โปรตอนจำนวน 2 ตัว และเมทานอลมี โปรตอนจำนวน 3 ตัวดังภาพที่ 2.17



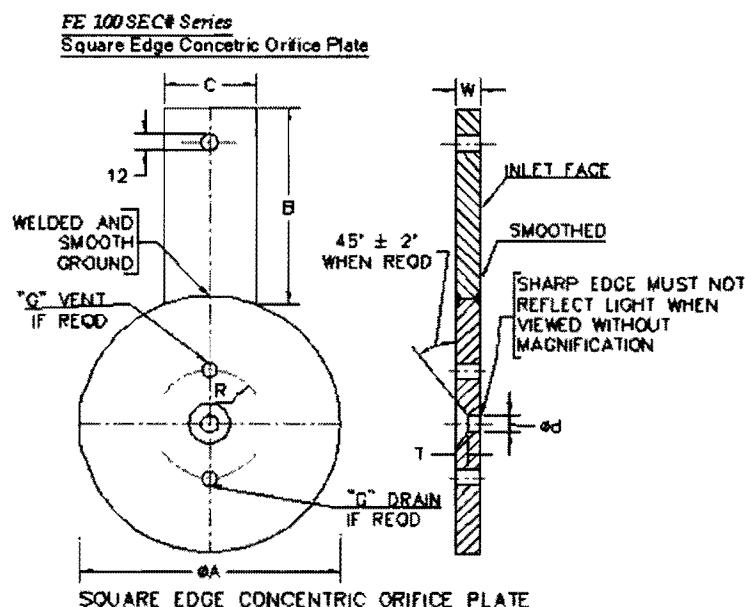
ภาพที่ 2.17 การกำหนด โปรตอน ในกระบวนการทราบส์เอสเทอเรชัน (Gelbard, et al., 1995)

2.9 แผ่นขوبคณ

แผ่นขوبคณเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการลดความดัน ส่วนมากถูกนำมาใช้กับงานเครื่องมือวัด โดยใช้ในการวัดอัตราการไหล โดยอาศัยการคำนวณจากผลต่างของความดันด้านดันน้ำ และด้านท้ายน้ำ โดยรูปแบบของแผ่นขوبคณนั้นสามารถสร้างขึ้นได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้ ในที่สุดการจัดจำแนกแผ่นขوبคณออกตามงานเครื่องมือวัดได้ดังนี้ (Emerson, 2010)

2.9.1 แผ่นขوبคณแบบบาง หรือแบบร่วมศูนย์

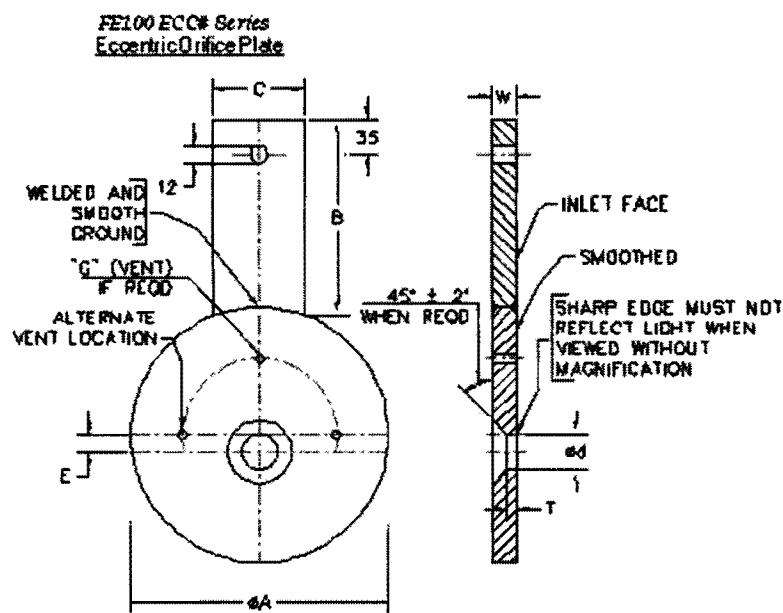
เป็นแผ่นขوبคณที่ใช้กับงานวัดอัตราการไหลทั่วไป ในการออกแบบและการนำเสนอไปใช้งานจะมีตามหลักการออกแบบดังนี้ ด้านดันน้ำของแผ่นขوبคณ จะเป็นรูปกลมหรือรูปเหลี่ยมที่มีความคม โดยความหนาของแผ่นขوبคณจะขึ้นอยู่กับขนาดเดินผ่านศูนย์กลางของห่อ (I.D.) และขนาดรูของแผ่นขوبคณ (Bore) โดยมีลักษณะดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ลักษณะแผ่นขوبคณแบบบาง (Hydropneumatics Pvt. Ltd., 2013)

2.9.2 แผ่นขوبคณแบบเยื่องศูนย์

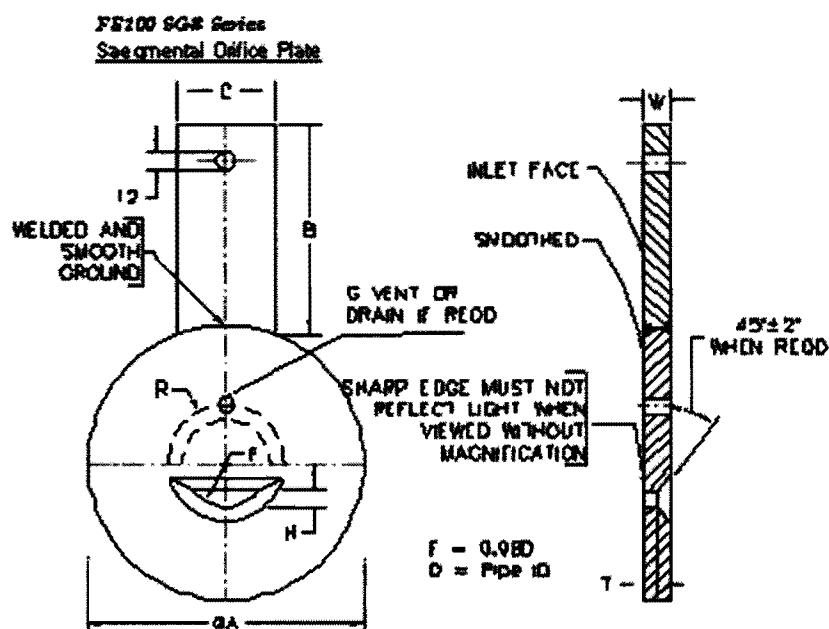
แผ่นขوبคณแบบเยื่องศูนย์ จะมีรูของแผ่นขوبคณซิดกับผนังของห่อ โดยแผ่นขوبคณชนิดนี้นิยมใช้ในกับของเหลวที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ที่ไม่ขัดต่อกับห่อและแผ่นขوبคณ หรือกรณีที่มีก๊าซปนอยู่กับของเหลว โดยมีลักษณะดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ลักษณะแผ่นขอบคุณแบบเยื่องศูนย์ (Hydropneumatics Pvt. Ltd., 2013)

2.9.3 แผ่นขอบคุณแบบซีก

เป็นแผ่นขอบคุณที่เป็นวงกลมบางส่วน เหนืออกับประตูน้ำที่เปิดเพียงบางส่วน โดยแผ่นขอบคุณแบบนี้ส่วนมากจะใช้ในงานวัดของเหลวหรือก๊าซ ที่มีสิ่งเจือปนที่ไม่มีการขัดสี เช่น น้ำส่า ก๊าซที่สกปรก เป็นต้น แต่ความแม่นยำของแผ่นขอบคุณแบบซีกและแบบเยื่องศูนย์จะมีความแม่นยำต่ำกว่าแผ่นขอบคุณแบบบาง โดยมีลักษณะดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 ลักษณะแผ่นขบคณแบบซีก (Hydropneumatics Pvt. Ltd., 2013)

แผ่นขบคณที่มีการนำมาใช้ในงานด้านการสร้างค่าวิเทชั่น จะเป็นแผ่นขบคณที่สร้างแบบง่ายโดยการเจาะค่าวิธีที่เป็นลักษณะตรง (Gogate & Pandit, 2005) และเป็นแผ่นขบคณแบบหลาบๆซึ่งจะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

การออกแบบทดลองในการวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาโดยการใช้การคำนวณเชิงตัวเลข และการทดลองผลิตไบโอดีเซลโดยเครื่องไอโคร ไดนามิกส์คาวิเทชั่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วิธีการศึกษาโดยใช้พอกศาสตร์ของไอลเชิงคำนวณ

การจำลองการไอลเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นเครื่องมือทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญ เพราะใช้ในการลดค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดทดลอง และสามารถคำนวณเพื่อออกแบบการทดลองที่เหมาะสมได้โดยเป็นเครื่องมือที่มีการนำมามิใช้ช่วยในการจำลอง และช่วยออกแบบถังปฏิกรณ์อย่างกว้างขวาง (X.-Z. Chen, Shi, Gao, & Luo, 2011; Y. Chen, Lu, & Wu, 2006; Duran, Mohseni, & Taghipour, 2010; Milewska & Molga) โดยในงานวิจัยนี้จะนำเอา CFD มาใช้คำนวณหาลักษณะการเกิดคาวิเทชั่นของถังปฏิกรณ์แบบ 1 รู และแบบ 2 รู เพื่อศึกษาความแตกต่างของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 แบบ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น เพื่อประกอบการออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลต่อไปในส่วนนี้เป็นการศึกษาเพื่อเน้นการอธิบายลักษณะการเปลี่ยนสถานะ สักส่วน โดยปริมาตรของไอล ความเร็ว ความดัน คาวิเทชั่นนัมเบอร์ ฯลฯ ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์แบบ ไอโคร ไดนามิกส์คาวิเทชั่น โดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน เมื่อจากเป็นของเหลวที่มีคุณสมบัติค่อนข้างคงตัว และเป็นสารทำงานที่นิยมใช้ในการศึกษาทางลักษณะการเกิดคาวิเทชั่นของไอล โดยมีรายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

3.1.1 สมการควบคุม (Governing equation)

สมการควบคุมในสำหรับการไอลแบบ Two – phase flow ในงานวิจัยนี้อธิบาย พื้นฐานของของเหลวชนิดเดียว ซึ่งในโปรแกรม Fluent ไม่เคลื่อนที่ Mixture model ซึ่งจะคำนวณสนามการไอล (Flow field) โดยใช้สมการ mixture continuity และสมการ momentum equation ดังสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \quad (3.2)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในสถานะของผสม (Mixture density, ρ_m) และค่าสัดส่วนของสถานะไอโดยปริมาตร (α) นิยามโดยสมการที่ 3.3

$$\rho_m = \alpha \rho_v + (1-\alpha) \rho_l \quad (3.3)$$

3.1.2 แบบจำลองการเกิดคาวิเทชัน (Cavitation model)

ในการจำลองการเกิดคาวิเทชัน จะใช้ แบบจำลองคาวิเทชันเต็มภาพ (Full cavitation model) (Singhal, M, Huiying, & Jiang, 2002) โดยมีรายละเอียดการทดสอบแบบจำลอง ในหัวข้อ 3.1.4 และเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST k - ε model ซึ่งพื้นฐานของโมเดลนี้ จะประกอบไปด้วย สมการ standard viscous flow (สมการ Navier-Stokes) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นของของเหลวและสัดส่วนโดยมวลของไอ (f) ดังสมการที่ 3.4

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f}{\rho_v} = \frac{1-f}{\rho_l} \quad (3.4)$$

และค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของไอ (α) สามารถหาได้จากค่าสัดส่วนโดยมวลของไอ จากสมการที่ 3.5

$$\alpha \equiv f \frac{\rho}{\rho_v} \quad (3.5)$$

และใช้ Conventional turbulence model (k- ε model) ซึ่งกำหนดค่าสมการ vapor transport equation สมการที่ 3.6

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha P_v) + (\nabla \cdot \alpha P_v \vec{V}_v) = R_e - R_c \quad (3.6)$$

โดยที่ α คือสัดส่วนของไอต่อของเหลว ดังสมการที่ 3.7 R_e และ R_c คือมวลที่ถ่ายเทษณะเกิดการเปลี่ยนสถานะและขณะเกิดการแตกตัวของฟองไอตามลำดับ

$$\alpha = n \times \left(\frac{4}{3} \pi R_B^3 \right) \quad (3.7)$$

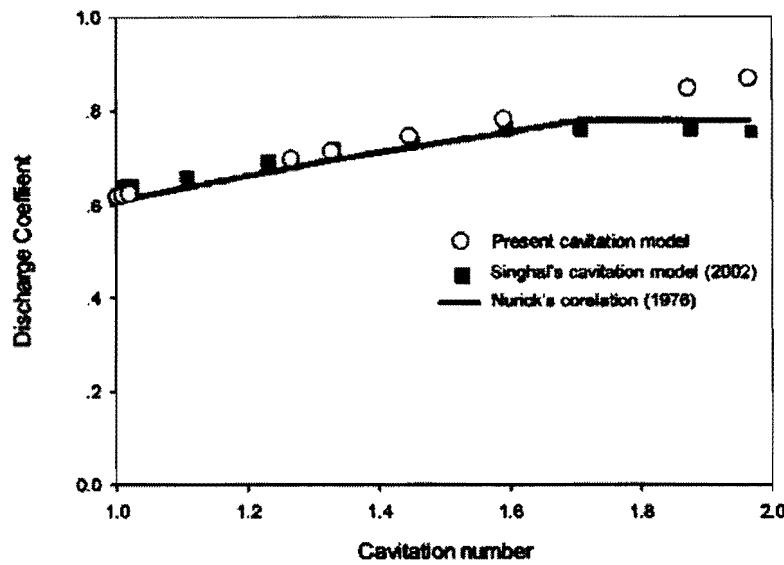
โดยที่ n คือ Bubble density number, R_B คือรัศมีของฟองไออก็อกซิเจน (ดังสมการที่ 3.8) และในงานทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ จะมีจำนวนฟองไออก็อกซิเจนจำนวนมาก ลักษณะการเกิดคาวิเทชัน และการแตกตัวของฟองไออก็อกซิเจนที่ไม่คิดค่า Slip velocity ระหว่างของเหลวและฟองไออก็อกซิเจน พลศาสตร์ของฟองไออก็อกซิเจนจะสามารถคำนวณได้จากสมการของ Rayleigh-Plesset equation ดังสมการที่ 3.9

$$R = n \times \left(4\pi R_B^2 P_c \frac{D R_B}{Dt} \right) \quad (3.8)$$

$$R_B \frac{D^2 R_B}{Dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{DR_B}{Dt} \right)^2 = \left(\frac{P_B - P}{P_l} \right) - \frac{4\nu_l}{R_B} R_B - \frac{2S}{P_l R_B} \quad (3.9)$$

3.1.3 การทดสอบแบบจำลองการเกิดคาวิเทชัน (Cavitation model validation)

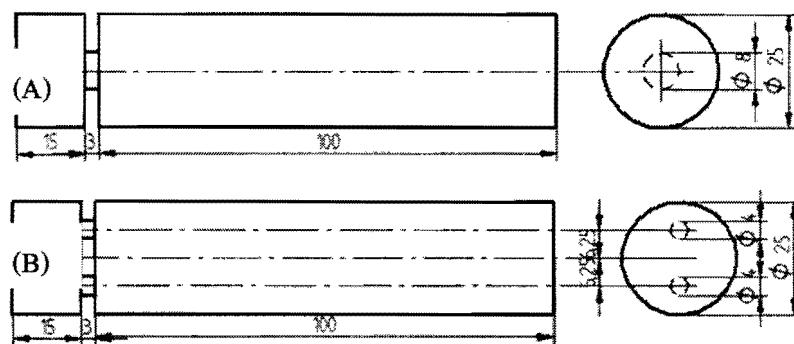
เพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงได้นำทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลของ Singhal et al. (2002) ซึ่งทำการเทียบผลของ Full cavitation model กับผลของ Nurick (1976) ซึ่งระบุร่างของแบบจำลองเป็นแผ่นขอบคุณที่มี $D/d = 2.88$ และ $L/d = 5$ โดยที่ D , d , และ L คือ เส้นผ่าศูนย์กลางห้องท่อทางเข้า, เส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นขอบคุณ และความยาวของแผ่นขอบคุณตามลำดับ โดยทำการจำลองโดยใช้ค่าความดันด้านด้านหน้าในช่วง $1.9 - 2,500$ bar โดยที่ค่าความดันด้านท้ายน้ำมีค่าเท่ากับ 0.95 bar ใช้แบบจำลองแบบสมมาตรในแนวแกน (Axisymmetric 2-D) โดยมีผลการจำลองดังภาพที่ 3.1



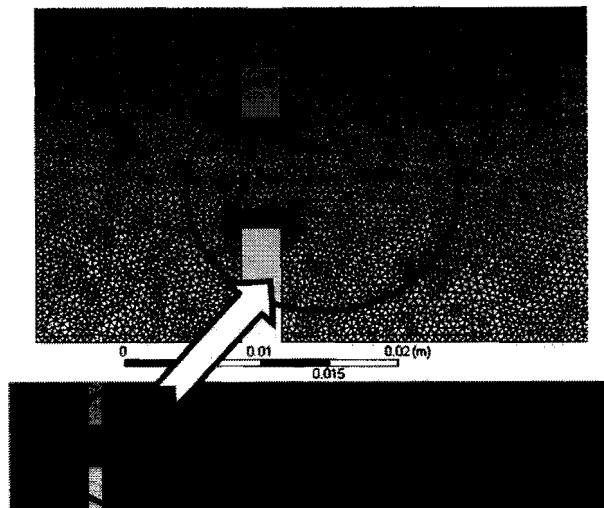
ภาพที่ 3.1 เปรียบเทียบ C_d (Discharge Coefficient) จากการจำลองจาก Full cavitation model ที่ใช้กับผลจากงานวิจัยอื่นๆ

3.1.4 วิธีการจำลองการแบบจำลองและไฟล์เริ่มต้นเลข

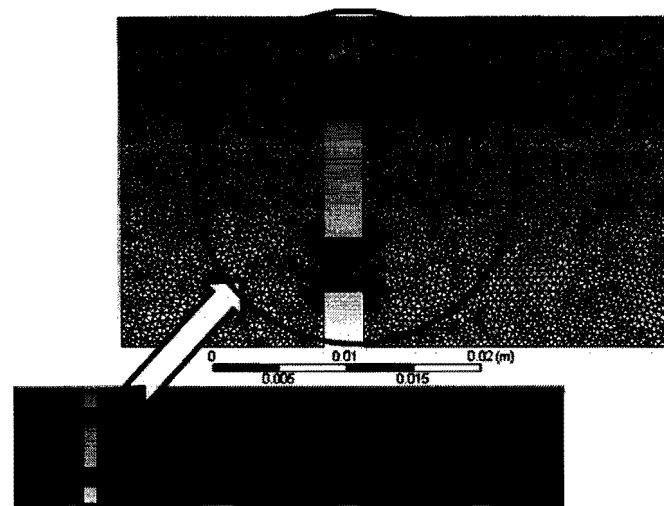
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Fluent® Version.12.1 ในการจำลองการไฟล์โดยแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยจะเป็นแบบจำลองแบบเต็มภาพ (Planar) 2 มิติ (2D) ดังภาพที่ 3.2 โดยที่ model A ใช้แทนแผ่นขอบคนชิด 1 รู และ model B ใช้แทนแผ่นขอบคนที่มี 2 รู โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นขอบคนทั้งแบบ A และ B เท่ากับ 8 mm. และ 4 mm. ตามลำดับ โดยใช้เมช (Mesh)ชนิด 3 เหลี่ยม (Triangle mesh) โดยมีภาพร่างและขนาดเมชของแบบจำลอง A และแบบจำลองที่ B ดังภาพที่ 3.3 และภาพที่ 3.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.2 ภาพร่างและขนาดแบบจำลองที่ใช้ แบบจำลอง A (บน) และแบบจำลอง B (ล่าง)



ภาพที่ 3.3 แบบจำลองและภาพขยายบริเวณแผ่นขอบคุณแบบจำลอง A



ภาพที่ 3.4 แบบจำลองและภาพขยายบริเวณแผ่นขอบคุณแบบจำลอง B

โดยรายละเอียดของถังปฏิกิริณ์และ จำนวนของเม็ด ของแบบจำลองดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดทางกายภาพและจำนวนอิลิเมนต์ของแต่ละโมเดล

แบบจำลอง	ขนาดรู (ม.ม.)	จำนวนรู	จำนวนอิลิเมนต์
A	8	1	25,088
B	4	2	27,790

โดยทำการจำลองการไหลเชิงตัวเลขที่เงื่อนไขดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการจำลองการไหลเชิงตัวเลข

ลำดับที่	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
1	ของไหล	น้ำ	-
2	ค่าความหนาแน่น	998.2	kg/m ³
3	ความดันไอ	3,540	Pa
4	λ	1,813.23	-
5	η	71.64	-
6	P _u	5,10,15	bar
7	อุณหภูมิ	27	°C
8	ปริมาณก๊าซที่ไม่ควบแน่น	15	ppm

ทั้งนี้ไม่เดลที่เลือกใช้มีดังนี้

(1) Multiphase model ใช้ Mixture model

(2) Viscous model ใช้ Standard $k-\varepsilon$ model

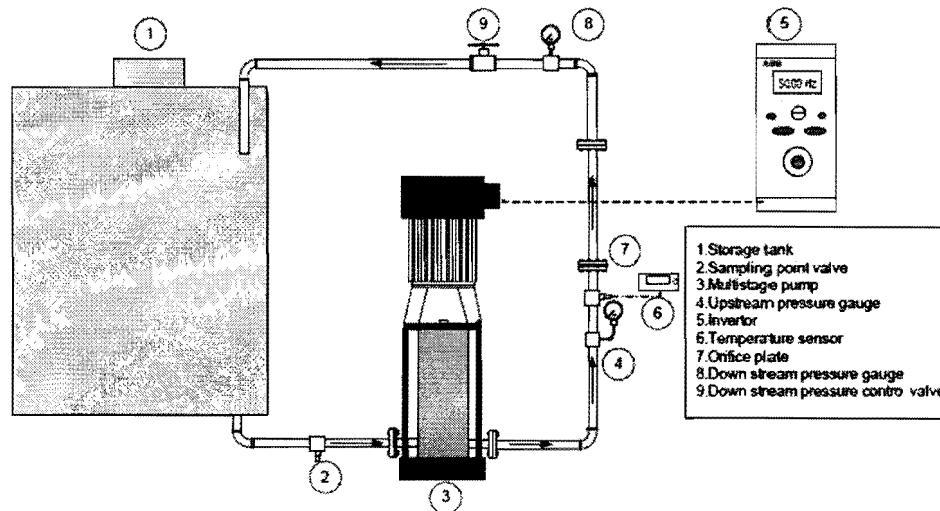
(3) กำหนดให้ทำงานที่สภาวะ อุณหภูมิกคงที่ (Isothermal)

โดยทำการจำลองที่ค่าความดัน P_uเท่ากับ 5 bar, 10 bar และ 15 bar ตามลำดับ โดยใช้ค่า P_d (ความดันด้านท้ายน้ำ) เท่ากับ 980 kPa โดยมีรายละเอียดในภาคผนวก ฯ

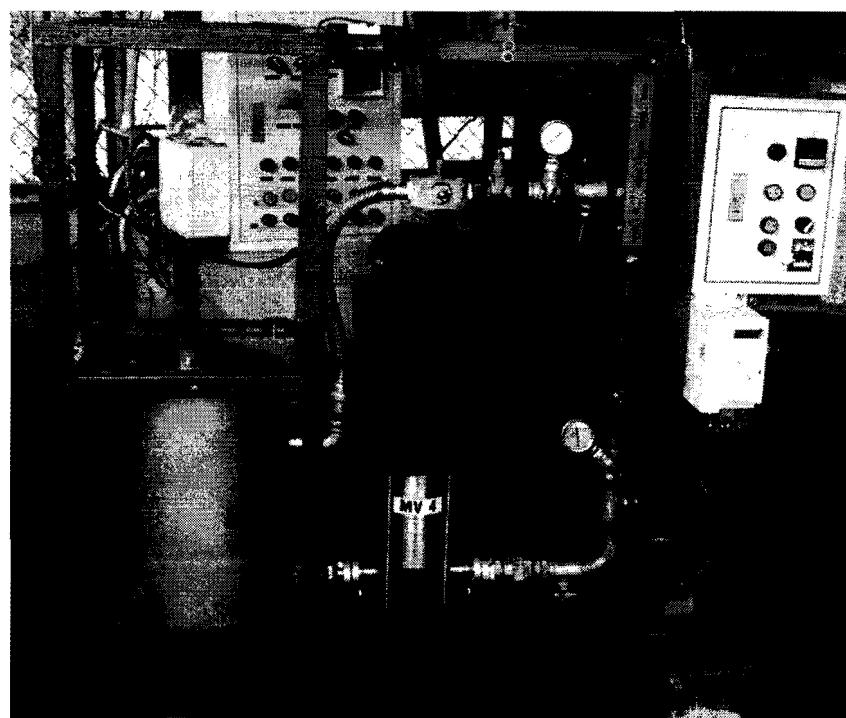
3.2 การทดลองผลิตไบโอดีเซลโดยเครื่องไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่น

เครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ถูกออกแบบและประกอบสร้างขึ้นมา เพื่อใช้ในการสร้างการเกิดคาวิเทชั่น โดยแผ่นขอบคุณ โดยใช้ปืนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพิ่มความดันให้ของไหล ก่อนที่จะให้ของไหลไหลผ่านแผ่นขอบคุณและไหลย้อนกลับเข้าสู่ถังพัก โดยสามารถปรับความดันของของเหลวที่ออกจากปืนได้โดย การปรับความเร็วรอบของปืน แทนที่จะทำการใช้วาล์วบายพาส (By-pass valve) ในการปรับความดันเหมือนชุดในงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมา (Gogate, et al., 2003; Ji, et al., 2006; Pal, et al., 2010) ทั้งนี้เพื่อการปรับความดันโดยวิธีปรับความเร็วรอบ ทำให้ลดการสึกหรอและลดภาระการทำงานของชิ้นส่วนต่างๆในระบบ (Hellmann, et al., 2001) และสามารถลดผลกระทบจากการเกิดคาวิเทชั่นในวาล์วบายพาส

ซึ่งจะส่งผลให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน โดยมีแผนผังอุปกรณ์และภาพเครื่องไฮโดรไดนาไมก์สำหรับทั้งภาพที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.5 ผังชุดทดลอง Hydrodynamic cavitations



ภาพที่ 3.6 ชุดทดลอง Hydrodynamic cavitations

จากภาพที่ 3.5 และ 3.6 ส่วนประกอบหลักของชุดทดลองได้แก่

(1) ปั๊มหอยโข่งแรงดันสูง (Multistage centrifugal pump) เป็นอุปกรณ์เพิ่มแรงดันให้กับของเหลวก่อนเข้าถังปฏิกิริย โดยปั๊มที่ใช้เป็นแบบ Vertical multistage pump MV-8 โดยมีแรงดันใช้งานสูงสุด 8 Bar

(2) อินเวอร์เตอร์ (Invertors) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ของปั๊ม โดยใช้การควบคุมความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ใช้ในการปรับความดันและอัตราไหลโดยไม่ต้องวัดควบคุม

(3) ถังพักเป็นถังสแตนเลส SUS 304 ปริมาตร 50 ลิตรทำหน้าที่ในการพักของเหลว ก่อนเข้าปั๊ม และรองรับของเหลวที่ออกมากจากถังปฏิกิริย รวมทั้งเป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของเหลว

(4) ชุดถังปฏิกิริยไฮโดรไดนามิกส์แบบแผ่นขอบคม เป็นส่วนที่สร้างการเกิดควาเที้ยน ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นห่อที่ติดตั้งแผ่นขอบคม

(5) วาล์วควบคุมแรงดันทำหน้าที่ในการควบคุม ความดัน P_d โดยการควบคุมอัตราการไหลของของเหลวที่ก่อนเข้าสู่ถังพัก

3.2.1 การทำงานของแผ่นขอบคมที่เหมาะสม

เป็นการทดลองผลิตไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องปฏิกิริยไฮโดรไดนามิกส์ควาเที้ยนแบบแผ่นขอบคม เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ Yield ของเมทิลเอสเทอร์ กับขนาดและจำนวนรูของแผ่นขอบคม โดยทำการกำหนดค่าตัวแปรอื่นๆ ให้คงที่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) ใช้สัดส่วนของ Methanol / oil ในสัดส่วน 20 % v/v

(2) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือ KOH ปริมาณ 1 % w/w

(3) ความดัน P_d ท่ากับ 4.5 bar

(4) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาระมัด단 45°C

(5) ใช้น้ำมันพืชใช้แล้วจำนวน 10 ลิตรต่อรอบ ในการทดลอง

โดยในการออกแบบการทดลองจะทำการอ้างอิง โดยใช้ค่า β (สัดส่วนของพื้นที่รวมของแผ่นขอบคมต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อ) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.10 – 3.13

$$\beta = \frac{A_{orifice}}{A_{pipe}} \quad (3.10)$$

โดยที่

$$A_{orifice} = \frac{\pi D_{orifice}^2}{4} \times n \quad (3.11)$$

และ

$$A_{pipe} = \frac{\pi D_{pipe}^2}{4} \quad (3.12)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\beta = \left(\frac{D_{orifice}}{D_{pipe}} \right)^2 \times n \quad (3.13)$$

ทั้งนี้ในการศึกษานี้จะทำการทดลองโดยแบ่งช่วงค่า β ออกเป็น 3 ช่วงคือ $\beta < 0.04$, $0.04 < \beta < 0.08$ และ $0.08 < \beta < 0.12$ และค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของแผ่นขอบคุณเท่ากับ 2 mm, 3 mm, 4 mm และ 5 mm ตามลำดับ โดยมีจำนวนรู (n) ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 จำนวนรูของแผ่นขอบคุณที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและ β ต่างๆ

ช่วง β	$D = 5\text{mm.}$	$D = 4\text{mm.}$	$D = 3\text{mm.}$	$D = 2\text{mm.}$
$\beta < 0.04$	1	1	2	6
$0.04 < \beta < 0.08$	2	3	5	12
$0.08 < \beta < 0.12$	3	5	8	15

ในขั้นตอนการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากเครื่องไส้โครงนิกส์คาวิเทชั่นเพื่อหาขนาดแผ่นขอบคุณที่เหมาะสมนี้ขั้นตอนดังนี้

- (1) เตรียมน้ำมันพืชใช้แล้วจำนวน 10 ลิตรนำไปต้มไถ่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C จนกระทั้งไม่เมื่อยน้ำมันจะเข้มข้นมากและอุ่นตัวลงที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คือ 45 °C
- (2) ติดตั้งแผ่นขอบคุณที่จะใช้บนหน้าแปลนของชุดถังปฏิกิริณ์
- (3) ปล่อยให้น้ำมันเย็นตัวลงที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คือ 45 °C
- (4) ผสม เมทานอล กับ โพแทสเซียมไไฮดรอกไซด์ ให้เข้ากัน
- (5) เทน้ำมันลงถังพัก จากนั้นเทสารสารละลาย เมทานอล กับ โพแทสเซียมไไฮดรอกไซด์ ตามลงไป

- (6) เปิดระบบปืน ปรับตั้งค่าความดัน ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้
- (7) เก็บตัวอย่างน้ำมัน 10 ml ที่ 5 นาทีแรกและทุกๆ 5 นาทีลงในหลอดเก็บตัวอย่าง และนำไปเชื่อมต่อในอ่างน้ำแข็ง
- (8) หยุดการทำปฏิกิริยาที่เวลา 60 นาที
- (9) ส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไบโอดีเซลที่มีในแต่ละตัวอย่าง

3.3 การเตรียมน้ำมันก่อนการทำปฏิกิริยา

เนื่องจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจะมีเศษอาหารหรือสิ่งสกปรกติดมาด้วย นอกจากราบเรื้อรังมีความชื้นอยู่ซึ่งต้องมีการทำจัดสิ่งเหล่านี้ออกจากน้ำมันพืชก่อน โดยมีขั้นตอนการเตรียมน้ำมันดังนี้

3.3.1 การกรองน้ำมัน

น้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่รวบรวมมาจากแหล่งต่างๆ จะถูกนำมาแพร่กระจายให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อน จากนั้นก็ปล่อยผ่านผ้ากรอง เพื่อกำจัดเศษอาหารออกจากน้ำมันโดยในขั้นตอนการกรองนี้สามารถทำการกรองได้หลายครั้ง โดยใช้ผ้ากรองที่มีขนาดแตกต่างกันเพื่อประสิทธิภาพในการกรองที่ดีขึ้น

3.3.2 การกำจัดความชื้น

ความชื้นที่มีอยู่ในน้ำมันพืชใช้แล้วจะอยู่ในรูปของน้ำ สำหรับน้ำมีอยู่ในน้ำมันจำนวนมากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอโรฟิเคลชันจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดสนิมขึ้นได้ดังนั้น ต้องกำจัดความชื้นให้หมดเสียก่อน โดยนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลาประมาณ 30 นาที หรือจนกระทั่งไม่มีไอน้ำพุคออกจากน้ำมันเพื่อได้ความชื้นออกจากน้ำมัน

3.3.3 การไตเตอร์เพื่อหาร้อยละของกรดไขมันอิสระ

เมื่อทำการกรองและได้ความชื้นออกจากน้ำมันแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการไตเตอร์เพื่อหาค่าร้อยละของกรดไขมันอิสระ ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณภาพของวัตถุคุณิต โดยค่าร้อยละของกรดไขมันอิสระในวัตถุคุณิตนี้จะต้องไม่เกินร้อยละ 3 เพื่อที่จะสามารถนำไปเข้าสู่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอโรฟิเคลชันได้โดย โดยการไตเตอร์นั้นเป็นวิธีการหาปริมาณของสารละลายนามารฐาน (Standard solution) สารที่ทราบค่าความเข้มข้นที่แน่นอนโดยให้ทำปฏิกิริยาที่พอติกับสารละลายที่ไม่ทราบความเข้มข้นแต่ทราบปริมาตร (Unknown sample) และใช้การเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์ (Indicator) เป็นเกณฑ์ในการบอกจุดหยุด (End point) เมื่อกรดและค่างทำปฏิกิริยากันพอติกับสารละลายที่มีความเข้มข้นเท่าๆ กัน ได้ซึ่งการไตเตอร์ที่มีขั้นตอนดังนี้

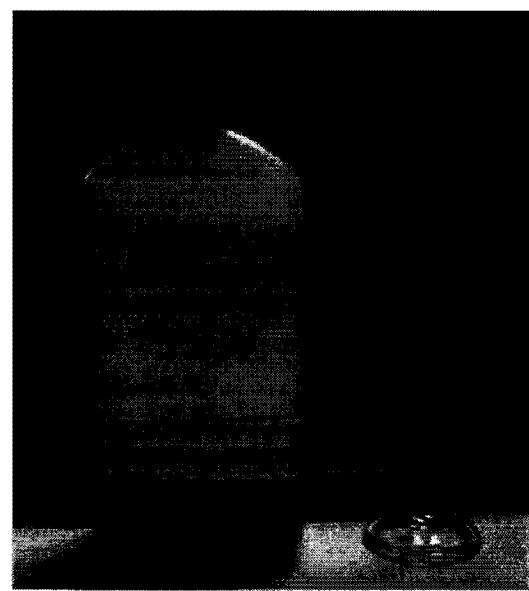
3.3.3.1 เตรียมสารละลาย KOH ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล(ชั้ง KOH จำนวน 5.61 กรัมในละลายในน้ำกลั่นจำนวน 1 ลิตร)

3.3.3.2 ชั้นน้ำมันพีซใช้แล้วจำนวน 1 g ในบีกเกอร์ขนาด 40 ml บนตาชั่งดิจิตอลที่สามารถชั้นน้ำหนักที่มีความละเอียดขนาด 1 g ได้ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ชั้นน้ำมันพีซบนตาชั่งดิจิตอลให้ได้น้ำหนัก 1 กรัม

3.3.3.3 ตวง ไอโซโพพานอล (C_3H_8O) ปริมาตร 10 ml ในระบบอุกตวงดังภาพที่ 3.8



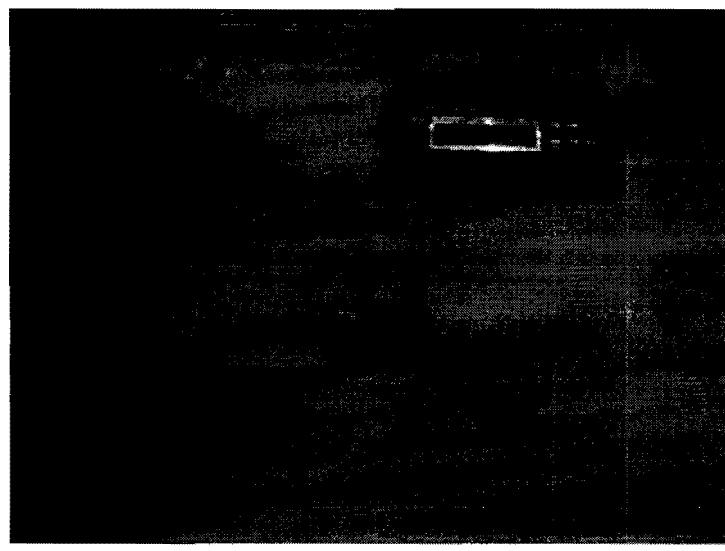
ภาพที่ 3.8 ตวง ไอโซโพพานอลในระบบอุกตวงขนาดปริมาตร 10 ml

3.3.3.4 เทน้ำมันพีชใช้แล้วจำนวน 1 g ลงใน ไอโซโพพานอล (C_3H_8O) 10 ml ในบีกเกอร์ขนาด 40 ml ดังภาพที่ 3.9



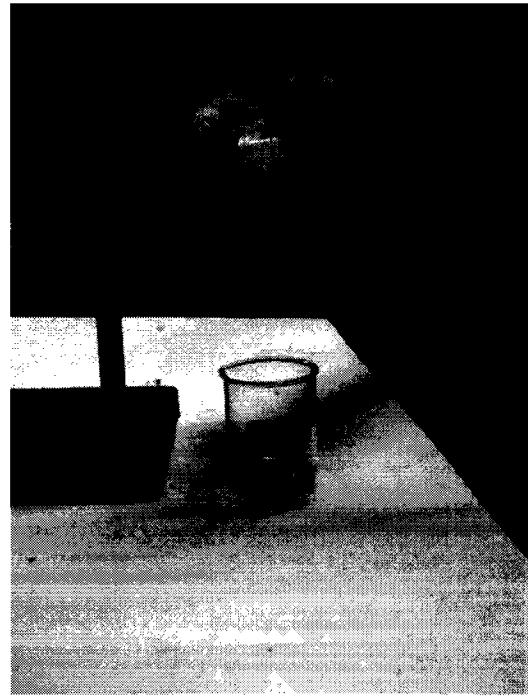
ภาพที่ 3.9 เทน้ำมันพีชที่ใช้แล้วจำนวน 1 g ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุ ไอโซโพพานอล

3.3.3.5 ใช้หลอดหยดเติมสาร ฟินอล์ฟทาลีน ($C_{20}H_{14}O_4$) จำนวน 3 – 4 หยด ซึ่งจะถูกใช้เป็นอินดิกेटอร์ในการไถเตรท โดยคุณสมบัติของ ฟินอล์ฟทาลีน คือเมื่อสารละลายมี pH ต่ำกว่า 8.3 จะไม่มีสี แต่เมื่อสารละลายที่มี pH สูงกว่า 10.4 จะมีสีชมพูแก่ โดยหยดลงในบีกเกอร์ที่ผสมน้ำมันกับ ไอโซโพพานอล แล้วเขย่าให้เข้ากันดังภาพที่ 3.10

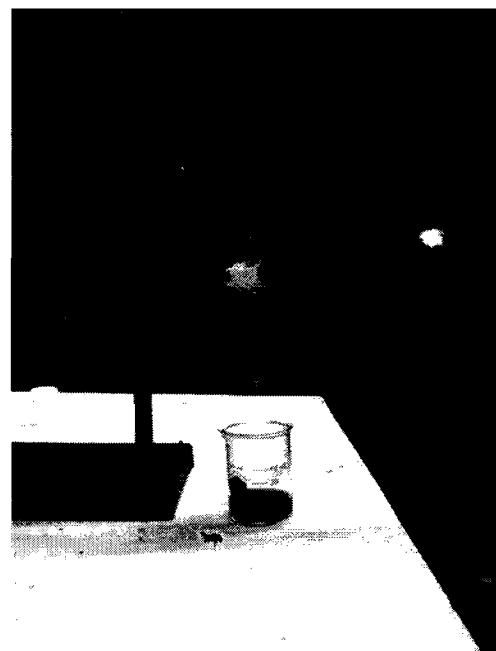


ภาพที่ 3.10 หยดเติมฟินอล์ฟทาลีน ลงในสารละลาย ไอโซโพพานอลกับน้ำมันด้วยayer

3.3.3.6 หลังจากนั้นทำการไตเตอร์ทกับสารละลายน KOH ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ดังภาพที่ 3.11 จนกระทั่งสารละลายนเป็นสีชนพู ไม่มีการเปลี่ยนสีอีกดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.11 การไตเตอร์เพื่อหาร้อยละของกรดไขมันอิสระ



ภาพที่ 3.12 สารละลายนที่ค่า pH เข้าสู่สมดุล (เปลี่ยนเป็นสีชนพู)

3.3.3. คำนวณหาร้อยละของกรดไฮมันอิสระ

การคำนวณหาร้อยละของกรดไฮมันอิสระสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.14

$$\% FFA = \frac{X \times 5.61}{Y \times 2.19} \quad (3.14)$$

โดยที่ X คือปริมาณของสารคล้ายโปรแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป (ml)

Y คือจำนวนกรัมของน้ำมัน 1 ที่ใช้ในการตรวจ

3.3.4 การทำปฏิกิริยา

ในการผลิตเริ่มแรกจะนำน้ำมันมาอุ่นให้ได้อุณหภูมิ 40-45 °C พร้อมกับเปิดปืนเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้น้ำมันได้รับความร้อนทั่วถึง หลังจากนั้นเติมเมทานอลที่ผสม KOH 1% w/w ลงในน้ำมันที่อุ่นไว้และเปิดปืนผสมจนครบ 1 ชั่วโมงจากนั้นเปิดปืนถ่ายไปทึบไว้ที่ถังแยกกลีเซอรีนภายในถังแยกกลีเซอรีนจะเกิดการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอโรลดอกกลีเซอรีน โดยที่เมทิลเอสเทอโรที่มีน้ำหนักเบากว่าจะอยู่ข้างบนส่วนกีดลีเซอรีนจะอยู่ข้างล่าง

3.3.5 การแยกกลีเซอรีน

กลีเซอรีนจะถูกถ่ายออกทางด้านล่างของถังแยกกลีเซอรีน เมื่อปล่อยไว้ประมาณ 8 ชั่วโมงจะทำให้เมทิลเอสเทอโรกับกลีเซอรีนแยกชั้นกันได้หมด จากนั้นถ่ายกลีเซอรีน (สีน้ำตาลเข้ม) ลงในถังเก็บจนหมด

3.3.6 การล้างด้วยน้ำ

การล้างเมทิลเอสเทอโร มีจุดประสงค์เพื่อกำจัดสิ่งปื้นและน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด เพื่อให้ได้เมทิลเอสเทอโรที่บริสุทธิ์และมีค่า pH เป็นกลางจึงจำเป็นต้องมีการล้างซ้ำหลายครั้งประมาณ 4-5 ครั้ง โดยการเติมน้ำอ่อนย่างช้าๆ และให้ประทับเมทิลเอสเทอโรเบาๆ เนื่องจากการเติมลงแรงเกินไปจะทำให้เมทิลเอสเทอรอรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นสารอิมัลชัน และรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันทำให้แยกยากกัน ได้ยาก เมทิลเอสเทอโรที่ล้างแล้วจะลอกอยู่ชั้นบนและอยู่ด้านล่าง แล้วแยกน้ำอออกทางด้านล่างของถังน้ำในการล้างครั้งต่อไป ให้ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่า pH ของเมทิลเอสเทอรมีค่าเท่ากับ 7 สุดท้ายจะได้เมทิลเอสเทอโรที่มีความบริสุทธิ์และพร้อมที่จะนำไปใช้งานได้

3.3.7 การໄລ່ຄວາມชິນຄັ້ງສຸດທ້າຍ

หลังจากการล้างน้ำแล้วก่อนนำไปໂອດີເໜລໄປໃຊ້ຈານ ທາກຍັງມີນໍາອູ່ໃນໄປໂອດີເໜລ ມາກອາຈະໄລ່ຄວາມชິນໂດຍກາຣດັ່ນທີ່ອຸນຫວຸນປະມາມ 105°C ໃຫ້ນໍາຮະເໝອອກຫົວອາຈໃຊ້ເກລືອແກງ ເປັນຕົວດຸດຄວາມชິນອອກກີ່ໄດ້

3.3.8 ກາຣກອງ

ກ່ອນນຳເອາໄປໂອດີເໜລໄປໃຊ້ຈານຈົງກັບເຄື່ອງຍັນຕົວກາຣກອງໄປໂອດີເໜລກ່ອນ ເພື່ອກຳຈັດຜູນລະອອງ ແລະສິ່ງຕົກຄ້າງໂດຍໃຊ້ກາຣກອງຂາດ 3-5 ໄມຄຣອນ ເພື່ອໄມ່ໃຫ້ກາຣກອງເຫັນເພີ້ມຂອງເຄື່ອງຍັນຕົນເຮົວ ເກີນໄປ

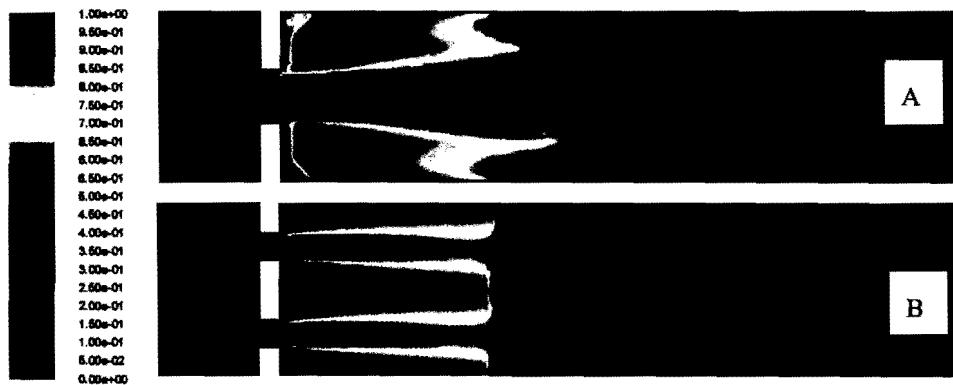
บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

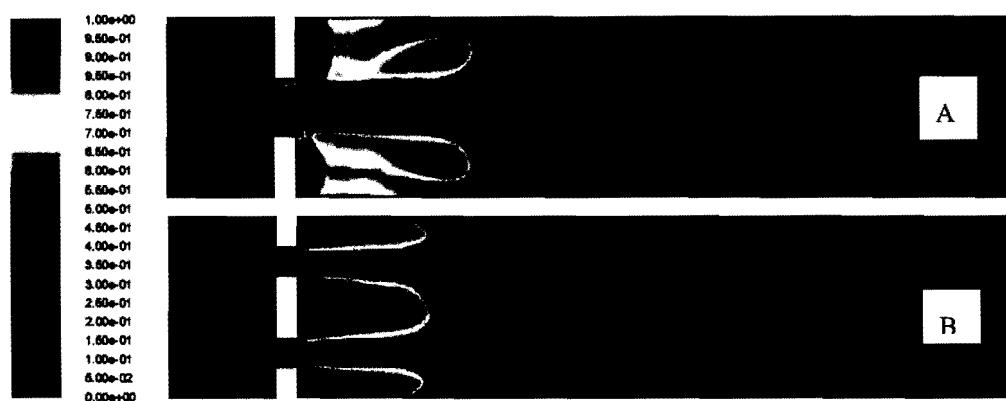
4.1 ผลของ CFD เพื่อช่วยออกแบบถังปฏิกิริย์แบบแผ่นขอบคุณเบื้องต้น

4.1.1 ผลการจำลองการไหลเชิงตัวเลข

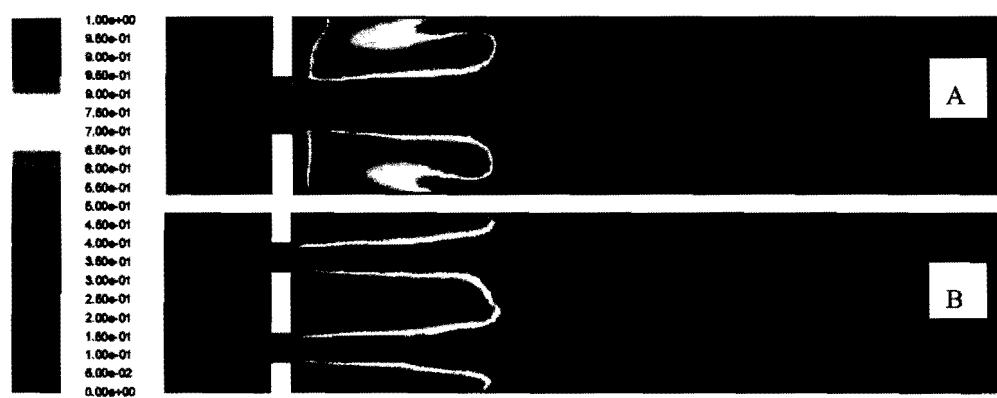
จากภาพที่ 4.1 – 4.3 เป็น Contour ของสัดส่วนโดยปริมาตรของไอ (α) ที่ความดัน P_u เท่ากับ 5 bar 10 bar และ 15 bar ตามลำดับ โดยจะพบว่าแบบจำลองถังปฏิกิริย์แบบ 2 ระบบนี้ สัดส่วน α ที่มีค่าสูงมากกว่าแบบจำลองถังปฏิกิริย์แบบบูเดีย รวมทั้งระยะของการเกิดคาวิเทชั่นของแบบจำลองถังปฏิกิริย์แบบ 2 ระบบนี้สั้นกว่า แบบจำลองแบบบูเดียหากเว้นจีโนน ไว้ $P_u = 15$ bar ซึ่งระยะการเกิดคาวิเทชั่นใกล้เคียงกันทั้ง 2 แบบจำลอง ซึ่งค่า α จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของปริมาตรของสถานะไอ ที่เกิดขึ้นต่อของปริมาตรของสถานะเหลวในถังปฏิกิริย์ ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 ซึ่งบริเวณนี้มีปริมาตรของสถานะไออยู่สูงสุด และระยะการเกิดคาวิเทชั่นของแบบจำลองทั้ง 2 แบบมีแนวโน้มสั้นลงเมื่อค่าความดัน P_u สูงขึ้น โดยในแต่ละค่าความดันจะพบว่าสัดส่วนของ $\alpha=1$ ของแบบจำลองแบบสองระบบนี้สัดส่วนมากกว่าแบบจำลองแบบบูเดีย ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการความดันสูญเสีย (Pressure drop) บริเวณด้านท้ายน้ำ (Downstream) มากกว่าแบบจำลองบูเดียและเมื่อพิจารณาความขาวของการเกิดคาวิเทชั่นที่แบบจำลอง 2 ความขาวของการเกิดสั้นกว่าแบบจำลองแบบบูเดีย เพราะแบบจำลองแบบ 2 มีการไหลแบบเฉือน (Shear flow) มากกว่าแบบจำลองแบบบูเดีย



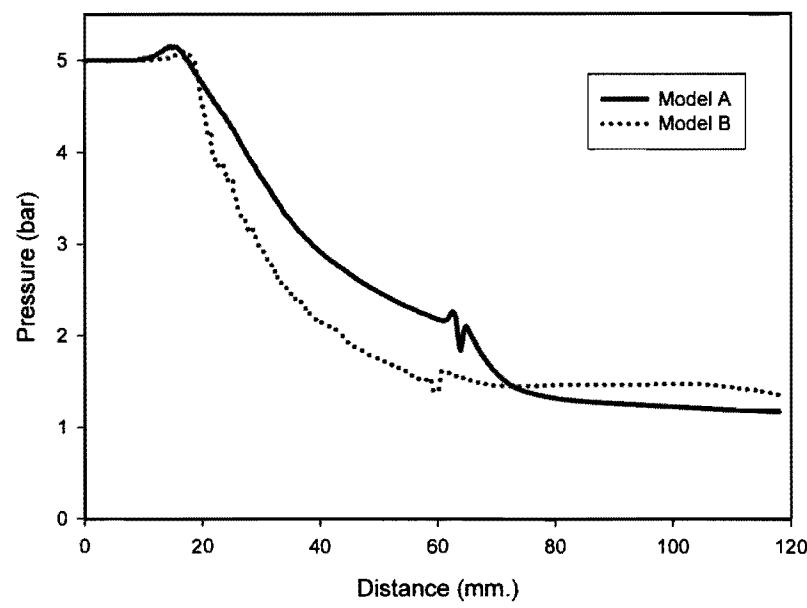
ภาพที่ 4.1 Contour ของสัดส่วนไอของแบบจำลอง A และ แบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 5 bar



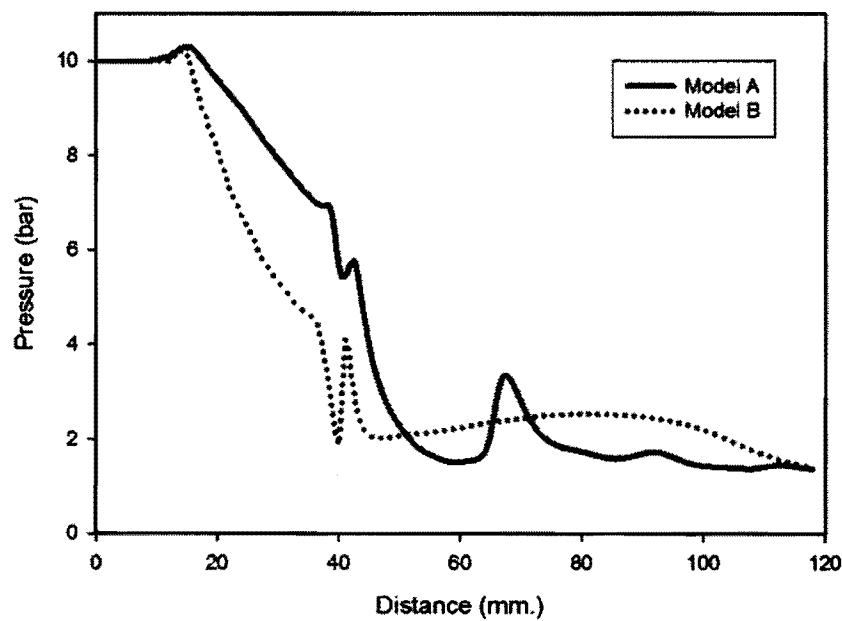
ภาพที่ 4.2 Contour ของสัดส่วนไออกของแบบจำลอง A และ แบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 10 bar



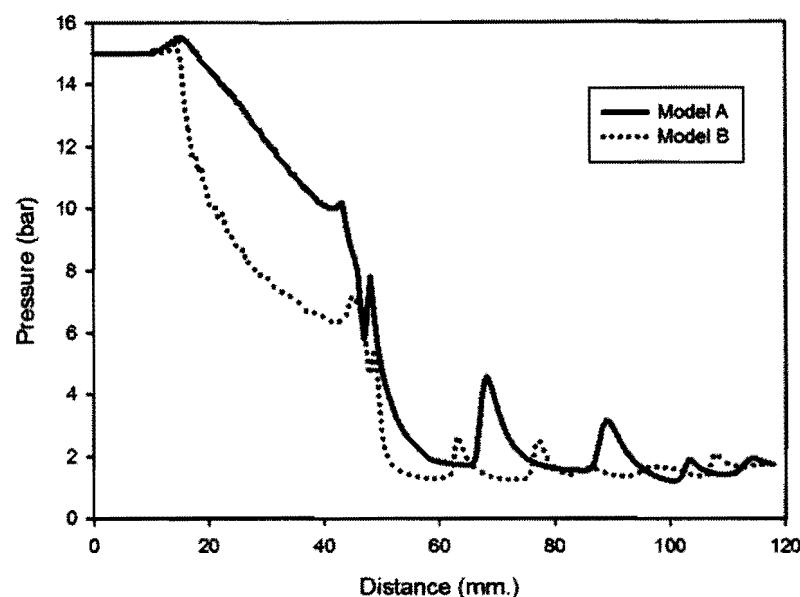
ภาพที่ 4.3 Contour ของสัดส่วนไออก ของแบบจำลองA และ แบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 15 bar



ภาพที่ 4.4 กราฟ P_{center} ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 5 bar



ภาพที่ 4.5 กราฟ P_{center} ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 10 bar



ภาพที่ 4.6 กราฟ P_{center} ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 15 bar

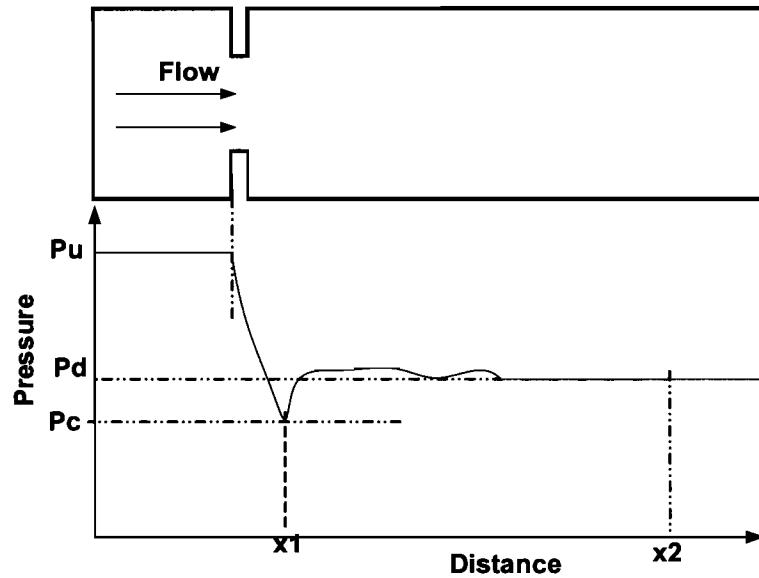
เมื่อพิจารณาความคู่กับกราฟเปรียบเทียบ P_{center} (ความดันที่พลีอตบนเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นขบคณ) ดังภาพที่ 4.4 – 4.6 เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความดันของ ไอล เมื่อไอลผ่านแผ่นขบคณ พบร้าความชันของกราฟความดันในช่วงที่ผ่านแผ่นขบคณ ของแบบจำลอง A จะมีความชันน้อยกว่า ของแบบจำลอง B ในทุกๆค่าความดัน P_u และความชันของกราฟความดันของแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ P_u เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความดันสูญเสียที่มากกว่า และความดัน P_{center} ของแบบจำลองแบบ 2 รู เมื่อผ่านแผ่นขบคณ จะมีการลดลงและเข้าสู่ความดัน P_u ได้เร็วกว่าแบบจำลองรูเดียว เนื่องมีจากการไอลแบบเลื่อนมากกว่า

จากการจำลองการไอลสามารถคำนวณค่า σ และค่า Re ของแบบจำลองทั้ง 2 แบบที่เงื่อนไขต่างๆได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าเลขค่าวิทธิ์และค่าเร อินดิคเตอร์ที่ P_u ต่างๆ

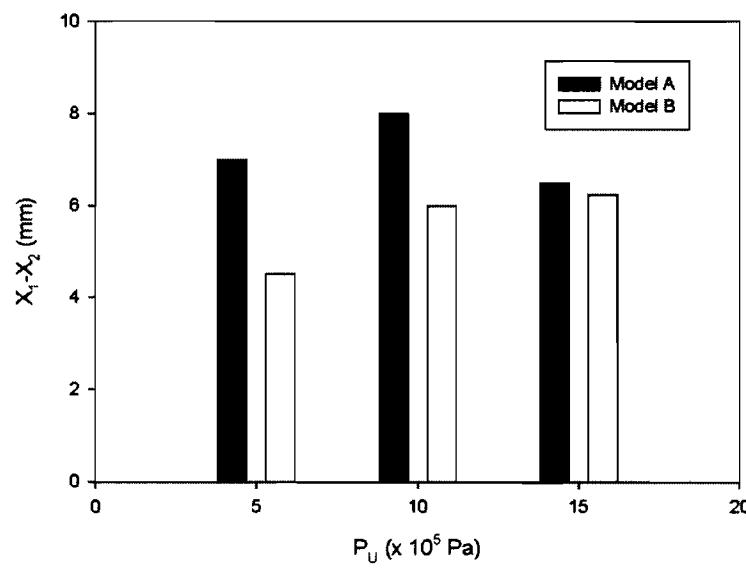
P_u (bar)	σ		Re	
	Model A	Model B	Model A	Model B
5	1.30	1.32	220,063	109,316
10	1.60	1.19	330,272	163,100
15	1.12	1.13	205,043	205,043

เมื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างจุด X_1 และ X_2 ซึ่งเป็นความยาวของระบบการเกิดคาวิเทชั่น (ในภาพที่ 4.7)



ภาพที่ 4.7 ลักษณะความคันของของไหลที่ผ่านแผ่นขอบคุณ

โดยเปรียบเทียบความยาวของการเกิดคาวิเทชั่น 2 แบบจำลอง ที่ 2 แบบจำลองจะพบว่าความยาวของการเกิดคาวิเทชั่นมีค่าดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ส่วนต่างของระบบการเกิดคาวิเทชั่นของที่ 2 แบบจำลอง

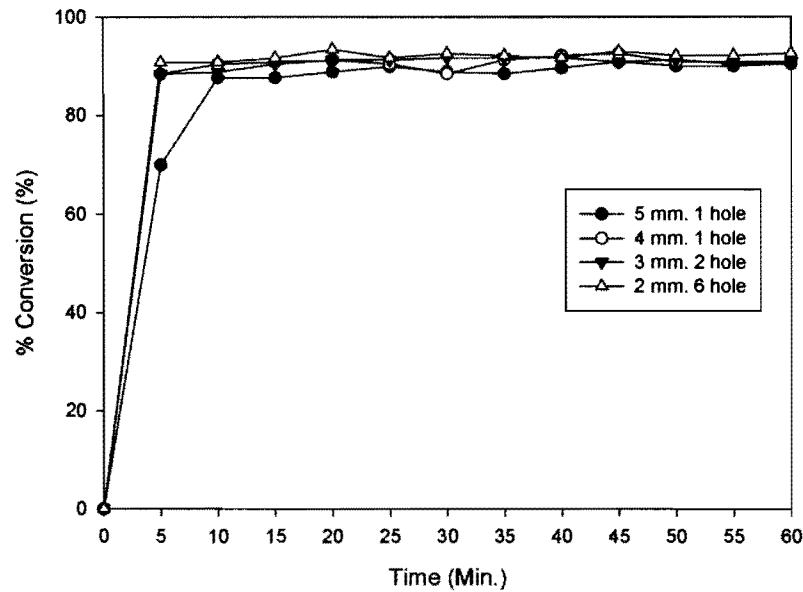
จากภาพที่ 4.8 ซึ่งเป็นรูปการเกิดคาวิเทชั่นของแบบจำลอง A (X_A) และของแบบจำลอง B (X_B) ที่ความดันต้นน้ำต่างๆ พบร่วมจะ X_B น้อยกว่า X_A ทุกค่าความดัน และเมื่อความดันต้นน้ำเพิ่มขึ้นรูปจะ X_A และรูป X_B มีแนวโน้มใกล้กันมากขึ้น และเมื่อความดัน P_u เพิ่มขึ้น ความยาวของการเกิดคาวิเทชั่นของแบบจำลอง A เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ความดัน 10 bar และลดลงเมื่อแนวโน้มลดลงที่ความดัน 15 bar ส่วนแบบจำลอง B มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น

จากผลการจำลองกราฟความดันของแบบจำลอง B จะมีความซับซ้อนกว่าแบบจำลอง A ประกอบกับ contour ของ α ที่มีรูบที่สันกว่า ทำให้สรุปได้ว่าฟองไอที่เกิดจากแบบจำลอง B จะมีช่วงระยะเวลาจากการก่อตัวจนกระทั่งแตกตัวที่สันกว่า รวมทั้งเมื่อเปรียบเทียบเลขคาวิเทชั่นของแบบจำลอง B พบร่วมกับแบบจำลอง A ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่า $P_{collapse}$ และ $T_{collapse}$ ของแบบจำลอง B สูงกว่าแบบจำลอง A

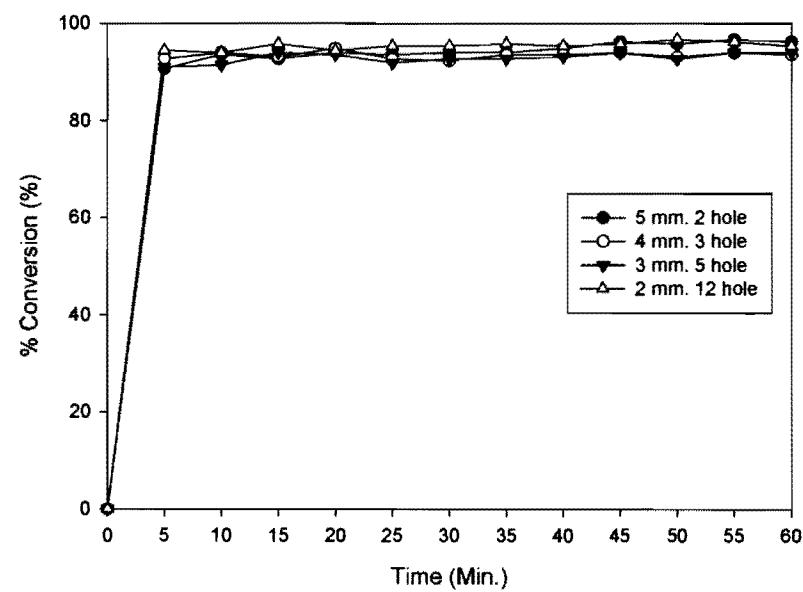
สามารถสรุปได้ว่า ถังปฏิกรณ์แบบแผ่นขอบค 2 รู จะสามารถเร่งการเกิดปฏิกรณ์ ทราบส์ເອສເທອຣີໂຄ່ນໍ หรือปฏิกรณ์ເຄມືອ໌ນໍ ໄດ້ດີກວ່າถังปฏิกรณ์แบบแผ่นขอบค 1 รู ທີ່ເຈື້ອໄຫວ່າກັນ รวมທັງພລຕ່າງຂອງຮະຍາການເກີດຄາວິທີ່ນໍ ຂອງถังปฏิกรณ์ທີ່ 2 ແບບຈະลดลงເມື່ອເພີ່ມຄວາມດັນ P_u ໂດຍອາศີພລກາຮົກມາຂອງ Parage et al. (2005) ຊຶ່ງພບວ່າຄ່າ $P_{collapse}$ และ $T_{collapse}$ ຈະບື້ນອູ້ກັບຮະຍາເວລາທີ່ຝອງໄອເກີດແລະເກີດກາເຕັກຕົວ ແລະເລຂຄາວິທີ່ນໍຂອງถังปฏิกรณ์ ຊຶ່ງສ້າງຍະເວລາແລະຮະຍາໃນການເກີດຄາວິທີ່ນໍທີ່ສັ່ນ รวมທັງເລຂຄາວິທີ່ນໍທີ່ຕໍ່າ ຈະສ່າງຜລໃຫ້ເຮັ່ງປຸກີກີຍາເຄມື ຊຶ່ງສອຄຄລື້ອງກັບຈານວິຈີຂອງ Amit Pal et al. (2010) ແລະສາມາດສຽບໄດ້ວ່າເຫັນວຽກມານີກສໍຄາວິທີ່ນໍໄດ້ດີ ທັງນີ້ກ່ຽວມືກາຮົກມາລັກມະຂອງถังปฏิกรณ์ແບ່ນແພ່ນຂອບຄມທີ່ມີຈຳນວນຮູມາກັບພື້ນທະນາ ເພົ່າຈັດການກົດກັນມາໃຫ້ມີແນວໃນນີ້ເມື່ອເພີ່ມຈຳນວນຮູມາກັບພື້ນທະນາ ຈະສ່າງຜລໃຫ້ເກີດຄາວິທີ່ນໍໃນລັກມະທີ່ສ່າງຜລດີຕ່ອງການເຮັ່ງປຸກີກີຍາເຄມື

4.2 ຜລຂອງ β ຕ່ອ ເປົອຮັ້ນຕໍ່ Conversion ຂອງໄໄນໂອດີເຊລ

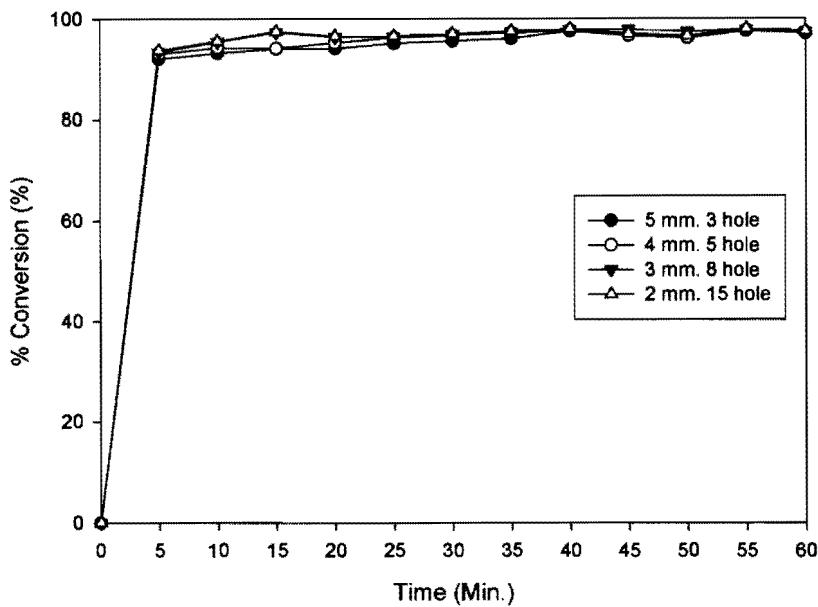
จากการทดลองตามหัวข้อ 3.2.1 ເມື່ອນຳຕ້ວຍຢ່າງພລິຕັກນີ້ທີ່ໄດ້ໄປວິເຄາະທີ່ວ່າຍເກນີກ NMR ເພື່ອຕຽບທາງເປົອຮັ້ນຕໍ່ Conversion ຂອງໄໄນໂອດີເຊລໃນແຕ່ລະຫວ່າງ β ສາມາດແສດງຄວາມສັນພັນຮູ້ຂອງ ເປົອຮັ້ນຕໍ່ Conversion ໃນແຕ່ລະຫວ່າງເວລາຂອງການທຳປຸກີກີຍາໄດ້ดັ່ງການທີ່ 4.9 – 4.11



ภาพที่ 4.9 เปลอร์เซ็นต์ Conversion ในช่วง $\beta < 0.04$



ภาพที่ 4.10 เปลอร์เซ็นต์ Conversion ในช่วง $0.04 < \beta < 0.08$



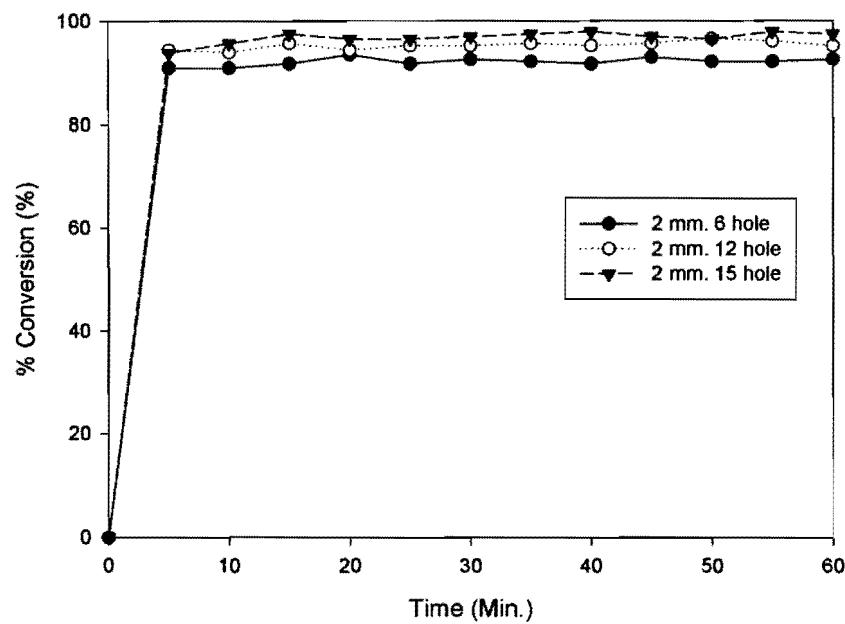
ภาพที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์ Conversion ในช่วง $0.08 < \beta < 0.12$

พบว่าเปอร์เซ็นต์ Conversion ของไบโอดีเซลในช่วง $\beta < 0.04$ (ภาพที่ 4.9) มีเปอร์เซ็นต์ Conversion สูงสุดประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์แม้จะใช้เวลาถึง 60 นาทีก็ตาม ส่วนเปอร์เซ็นต์ Conversion ของไบโอดีเซลในช่วง $0.04 < \beta < 0.08$ (ภาพที่ 4.10) สูงสุดประมาณ 96.6 เปอร์เซ็นต์ จากแผ่นขอบคุณ แบบ 2 mm. 12 รู ที่เวลาทำปฏิกิริยา 45 นาที และ เปอร์เซ็นต์ Conversion ของไบโอดีเซลในช่วง $0.08 < \beta < 0.12$ (ภาพที่ 4.11) พบว่ามีค่ามากกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์ในทุกๆ แผ่นขอบคุณ แต่แผ่นขอบคุณแบบ 2 mm. 15 รู ใช้เวลาสั้นที่สุดคือ 15 นาที สรุปได้ว่าเมื่อเพิ่ม β มากขึ้น เปอร์เซ็นต์ Conversion ของไบโอดีเซลมีแนวโน้มสูงขึ้น และในช่วง β เดียวกันพบว่าแผ่นขอบคุณที่มีจำนวนรูมากกว่า จะมีเปอร์เซ็นต์ Conversion ที่สูงกว่าแผ่นขอบคุณที่มีจำนวนรูน้อยกว่า และพบว่า เปอร์เซ็นต์ Conversion เข้าสู่ภาวะสมดุลนารยะเวลา 15 – 20 นาที

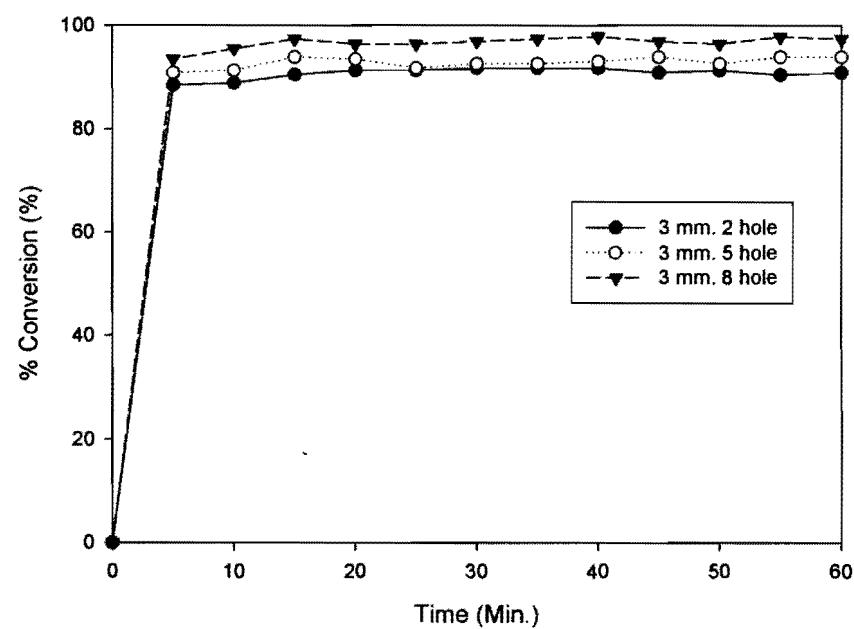
ทั้งนี้สาเหตุที่แผ่นขอบคุณที่มี β ใกล้เคียงกัน แต่มีจำนวนรูมากกว่า มีอัตราการเกิดปฏิกิริยามากกว่านั้น เพราะว่าสำหรับไบโอดีเซลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า มีโมเมนตัมน้อยกว่าจึงทำให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า รวมทั้งจำนวนรูที่มากกว่าทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาที่มีการกระจายตัวที่ดีกว่า ทำให้สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า โดยที่พื้นที่การไหดใกล้เคียงกัน

4.3 ผลของจำนวนรูของแผ่นขอบคุณต่อ เปอร์เซ็นต์ Conversion ของไบโอดีเซล

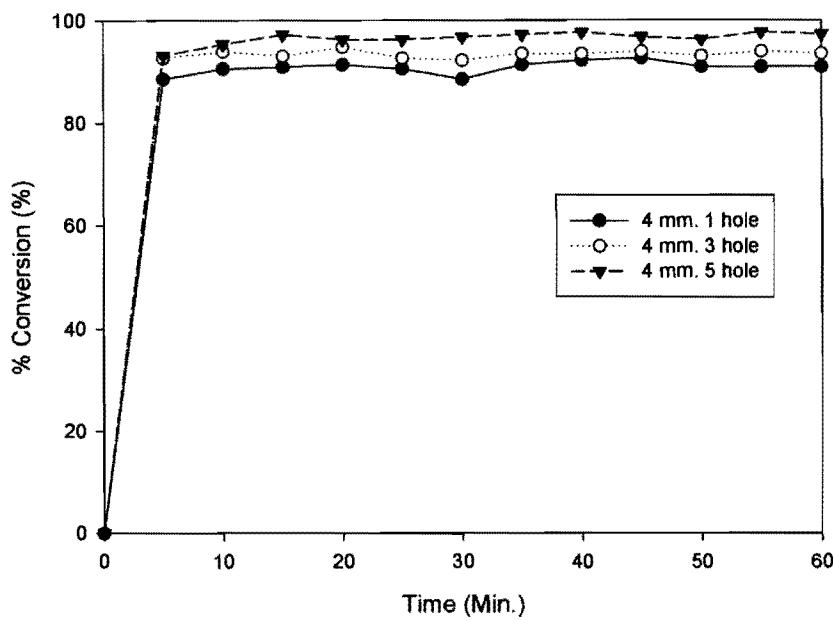
จากผลเปอร์เซ็นต์ Conversion ของไบโอดีเซลข้างต้น เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ กับจำนวนรูของแผ่นขอบคุณแต่ละขนาด จะได้ดังภาพที่ 4.12 – ภาพที่ 4.15



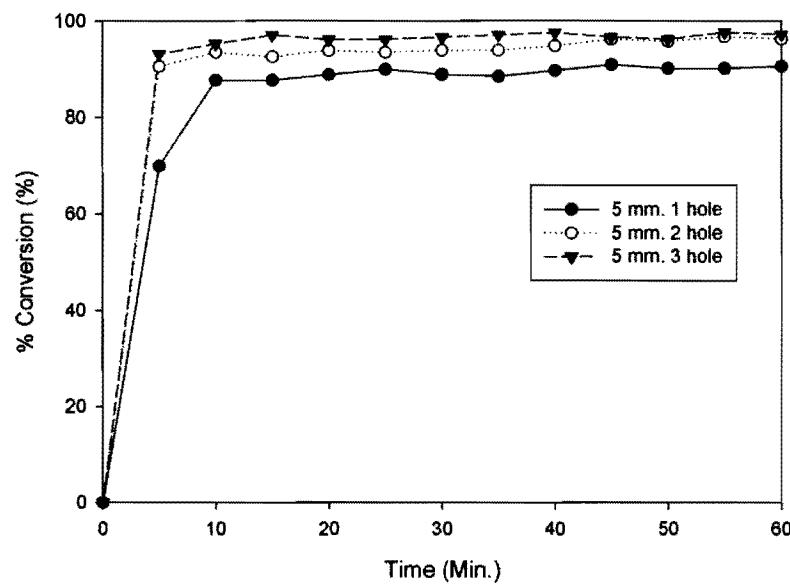
ภาพที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์ Conversion ของแผ่นขอบคุณขนาด $D = 2 \text{ mm.}$



ภาพที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์ Conversion ของแผ่นขอบคุณขนาด $D = 3 \text{ mm.}$



ภาพที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์ Conversionของแผ่นขอบคุณขนาด $D = 4\text{ mm.}$

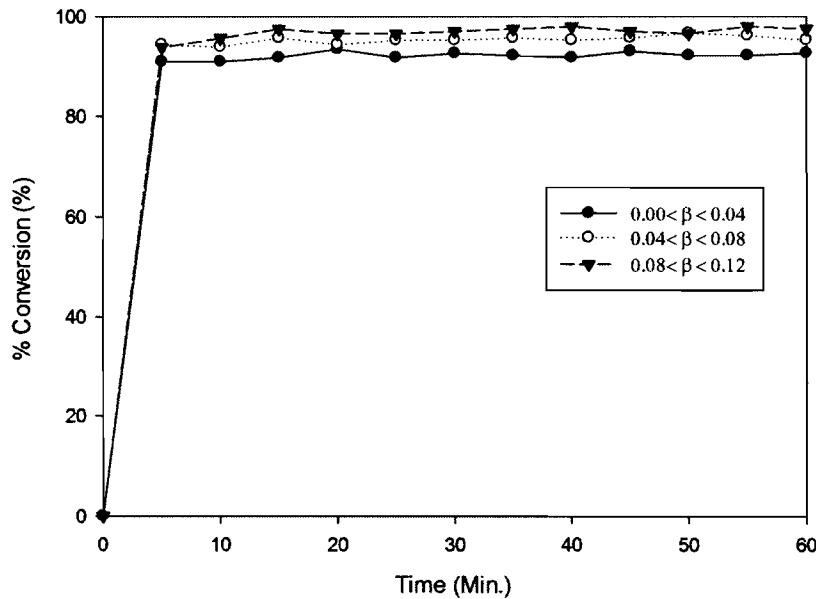


ภาพที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์ Conversionของแผ่นขอบคุณขนาด $D = 5\text{ mm.}$

จากภาพที่ 4.12 – ภาพที่ 4.15 จะพบว่าในแผ่นขอบคุณที่มีขนาดเด็นเพียงผ้าศูนย์กลางเท่ากัน เมื่อเพิ่มจำนวนรูให้มากขึ้นจะให้เปอร์เซ็นต์ Conversion สูงขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มจำนวนรู พื้นที่

การไหลของแพ่นขอบจะมากขึ้น จึงทำให้ของไอลในระบบฯ เกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากขึ้นในระยะเวลาเท่ากัน เมื่อเทียบกับแพ่นขอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันแต่มีจำนวนรูน้อยกว่า

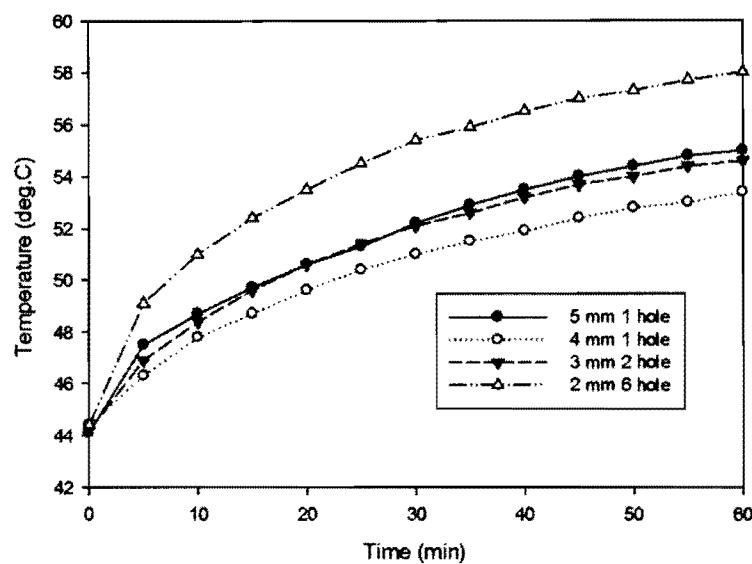
และเมื่อนำเอาผลที่คือสัดของแต่ละ β มาพิจฉา จะพบว่าเมื่อช่วงของ β สูงขึ้น % conversion ที่เวลาต่างๆจะสูงขึ้น โดย $0.08 < \beta < 0.12$ สามารถให้ % conversion สูงที่สุด ดังภาพที่ 4.16



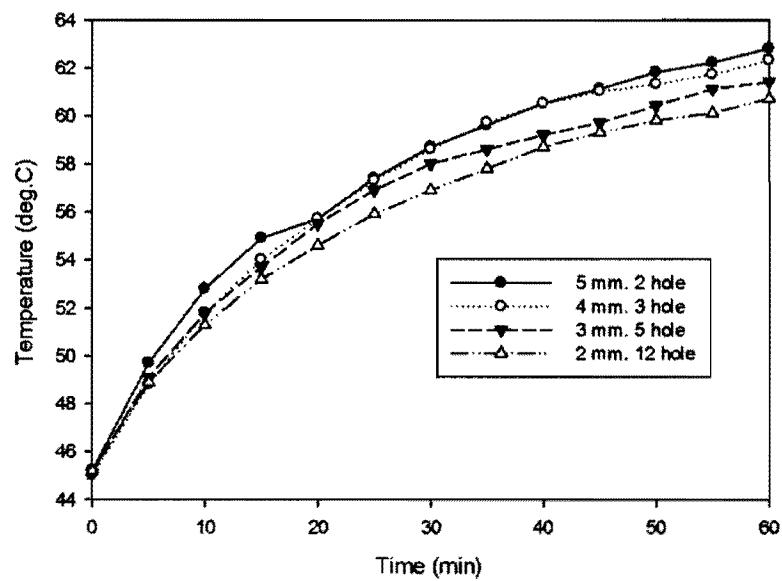
ภาพที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ Conversion ของ β ช่วงต่างๆ

4.4 การเพิ่มของอุณหภูมิของสารทำงานในการผลิตไบโอดีเซล

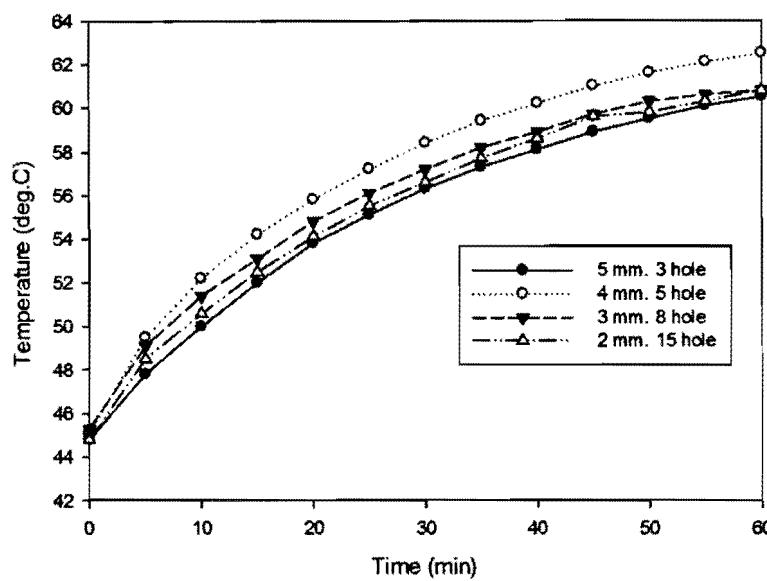
นอกจากการเก็บตัวอย่างของน้ำมันที่ผลิต ได้ไปทำการวิเคราะห์หาร้อยละของ FAMEs และยังได้มีบันทึกการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารทำงานภายในระบบ ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 5 นาที โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 4.17 – 4.19 ที่จะแสดงการเพิ่มของอุณหภูมิของสารทำงานในการผลิตไบโอดีเซลในช่วง $\beta < 0.04$, ช่วง $0.04 < \beta < 0.08$ และช่วง $0.08 < \beta < 0.12$ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.17 การเพิ่มของอุณหภูมิสารทำงานในช่วง $\beta < 0.04$



ภาพที่ 4.18 การเพิ่มของอุณหภูมิสารทำงานในช่วง $0.04 < \beta < 0.08$



ภาพที่ 4.19 การเพิ่มของอุณหภูมิสารทำงานในช่วง $0.08 < \beta < 0.12$

จากภาพที่ 4.17 – 4.19 จะพบว่าในต่อต่อการทำปฏิกิริยาในช่วงเวลา 60 นาทีนี้ จะมีการเพิ่มขึ้นต่อต่อการทำปฏิกิริยา จากรูปที่ 4.17 เป็นการเพิ่มของอุณหภูมิสารทำงานในช่วง $\beta < 0.04$ ในเวลา 60 นาทีนี้จะมีค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 58 °C และจากรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นการเพิ่มของอุณหภูมิสารทำงานในช่วง $0.04 < \beta < 0.08$ และการเพิ่มของอุณหภูมิสารทำงานในช่วง $0.08 < \beta < 0.12$ พบว่าเมื่อใช้แผ่นขอบคู่ที่มีช่วง β สูงขึ้นความชันของกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

4.5 เปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากเครื่องไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่นกับเทคนิคอื่นๆ

จากการทดลองผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่นจากงานวิจัยสามารถเปรียบกับผลการผลิตไบโอดีเซลจากงานวิจัยอื่นๆ ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับงานวิจัยอื่นๆ

เทคนิคที่ใช้	รายละเอียด	ผลที่ได้	Ref.
HC	ทดสอบกับแผ่นขอบคม 12 แบบ	<ul style="list-style-type: none"> - มากขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น - ที่ช่วง β ใกล้เคียงกัน แผ่นขอบคมที่มีจำนวนรูมากกว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า - แผ่นขอบคมที่ดีที่สุดในช่วง $\beta < 0.12$ คือ แผ่นขอบคมขนาด 2 mm. 15 รู โดยได้เปอร์เซ็นต์ conversion ของ FAMEs ได้มากกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์โดยใช้เวลา 15 นาที 	งานวิจัยนี้
HC	ทดสอบกับแผ่นขอบคมเด็นผ่าศูนย์กลาง 3 มม. มีจำนวนรูจำนวน 1, 3, 5 และ 7 รู ตามลำดับ	พบว่าเมื่อจำนวนรูมากขึ้นอัตราผลิตภัณฑ์ใบโซเดียมที่ได้ จะเพิ่มสูงขึ้น	(Pal, et al., 2010)
HC AC MS	แผ่นขอบคม 1 รูที่ความดัน 0.7 Mpa $f = 19.7 \text{ Hz}$, $P = 170 \text{ W}$ ปั่นผสมที่ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที	<ul style="list-style-type: none"> ได้ % FAMEs เกิน 96.5 ที่เวลา 25 นาที ได้ % FAMEs เกิน 96.5 ที่เวลา 10 นาที ไม่สามารถได้ % FAMEs เกิน 96.5 ภายในเวลาเวลา 60 นาที 	(Ji, et al., 2006)

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการจำลองการไฟลเชิงตัวเลข

จากการจำลองการเกิดความเที่ยงสสารณ์สามารถสรุปได้ว่า ถังปฏิกรณ์แบบแผ่นขอบคุณ 2 รู จะสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานส์อสเทอโรฟิเคลชั่น หรือปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ ได้ดีกว่าถังปฏิกรณ์แบบแผ่นขอบคุณ 1 รู ที่เงื่อนไขเดียวกัน รวมทั้งผลต่างของระบบการเกิดความเที่ยงสสารณ์ ของถังปฏิกรณ์จะคล่องเมื่อเพิ่มความดัน P_u โดยอาศัยผลการศึกษาของ Parage et al.(2005) ซึ่งพบว่าค่า $P_{collapse}$ และ $T_{collapse}$ จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ฟองไออกิดและเกิดการแตกตัว และเลขค่าวิเทชั่นของถังปฏิกรณ์ ซึ่งถ้าระยะเวลาและระยะในการเกิดความเที่ยงสสารณ์ที่สั้น รวมทั้งเลขค่าวิเทชั่นที่ต่ำ จะส่งผลให้เร่งปฏิกิริยาเคมีได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pal et al. (2010) และสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคการจำลองการไฟลเชิงตัวเลขสามารถออกแบบโน้ม ของการเกิดความเที่ยงสสารณ์ ในถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่น ได้ดี ทั้งนี้ควรมีการศึกษาถักยัณะของถังปฏิกรณ์แบบแผ่นขอบคุณที่มีจำนวนรูมากขึ้น เพราะจากผลการศึกษานี้มีแนวโน้มที่ เมื่อเพิ่มจำนวนรูมากขึ้น จะส่งผลให้เกิดความเที่ยงสสารณ์ที่สั่งผลดีต่อการเร่งปฏิกิริยาเคมี

5.2 สรุปผลการทดลองผลิตไฮโดรเจลด้วยถังปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่น

จากการทดลองที่ได้สามารถสรุปผลการศึกษาการผลิตไฮโดรเจลด แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่น ได้เป็น 4 ขั้นตอนนี้

5.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชั่นสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์อสเทอโรฟิเคลชั่น ของน้ำมันพืชใช้แล้วได้ดี โดยสามารถทำให้ เปอร์เซ็นต์ conversion ของ FAMEs ได้มากกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์โดยใช้เวลา 15 นาที

5.2.2 แผ่นขอบคุณที่มีมีขนาดพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกัน เมื่อมีจำนวนจำนวนรูมากกว่า จะสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์อสเทอโรฟิเคลชั่นได้ดีกว่า

5.2.3 แผ่นขอบคุณที่มีมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน เมื่อเพิ่มจำนวนรูของแผ่นขอบคุณ จะสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์อสเทอโรฟิเคลชั่นได้ดีกว่า

5.2.4 แผ่นขอบคุมที่มีค่า β มากกว่าจะสามารถเร่งปฏิกิริยาหวานส์เอกสาริฟิเคชั่นได้ดีกว่า

และการทดลองนี้พบว่าแผ่นขอบคุมที่มีความหนาแน่นในการนำมาสร้างถังปฏิกิริยาไฮโคลaic acid ใหม่ในช่วง $\beta < 0.12$ คือ แผ่นขอบคุมขนาด 2 mm. 15 รูทึ่งถ้าเพิ่มช่วงของ β ขึ้นไปอีกอัตราการเร่งปฏิกิริยาเคมีอาจสูงขึ้น จนกระทั่งแผ่นขอบคุมอยู่ในช่วงที่ไม่เกิดปฏิกิริยา เช่น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- ปราโมทย์ เศษอ้อไฟ. ระเบียบวิธีไฟน์ต์โซลิเมนต์ : เพื่อการคำนวณผลศาสตร์ของไฮโล. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- Anderson, J. D. Computational fluid dynamics: the basics with applications: McGraw-Hill, 1995.
- Arrojo, S.and et al. "A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation", Ultrasonics Sonochemistry, 15(5): 903-908, 2008.
- Ayhan, D. "Importance of biodiesel as transportation fuel", Energy Policy, 35(9): 4661-4670, 2007.
- Brennen, C. E. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- Chen, X.-Z.and et al. "A fundamental CFD study of the gas–solid flow field in fluidized bed polymerization reactors", Powder Technology, 205(1-3): 276-288, 2011.
- Chen, Y.and et al. "Modelling and computation of unsteady turbulent cavitation flows", Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 18(5): 559-566, 2006.
- Dorado, M. P.and et al. "An alkali-catalyzed transesterification process for high free fatty acid oils", Transactions of the ASABE, 45(3): 525-529, 2002.
- Duran, J. E.and et al. "Modeling of annular reactors with surface reaction using computational fluid dynamics (CFD)", Chemical Engineering Science, 65(3): 1201-1211, 2010.
- Emerson, P. M. Fundamental of Orifice Meter Measurement. USA: Daniel Measurement and Control Inc., 2010.
- Fluent Inc. Fluent 6.0.12 User's guide. USA: Fluent Inc., 1998.
- Flynn, H. G. "Physics of acoustic cavitation in liquids", Physical acoustics, IB: 157, 1964.
- France, J.-P., & Michel, J.-M. Fundamentals of Cavitation. USA: Kluwer Academic Publishers, 76, 2004
- Gelbard, G.and et al. "1H nuclear magnetic resonance determination of the yield of the transesterification of rapeseed oil with methanol", Journal of the American Oil Chemists' Society, 72(10): 1239-1241, 1995.
- Gogate, P. R.and et al. "Sonochemical reactors for waste water treatment: comparison using formic acid degradation as a model reaction", Advances in Environmental Research, 7(2): 283-299, 2003.

ເອກສາຣ໌ອ້າງອີງ (ຕ່ອ)

- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. "A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future", Ultrasonics Sonochemistry, 12(1-2): 21-27, 2005.
- Gogate., P. R. "Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes", Advance in Environmental Research, 6: 335-358, 2002.
- Gong, C., & Hart, D. P. "Ultrasound induced cavitation and sonochemical yields", The Journal of the Acoustical Society of America, 104(5): 2675-2682, 1998.
- Hanh, H. D.and et al. "Biodiesel production through transesterification of triolein with various alcohols in an ultrasonic field", Renewable Energy, 34(3): 766-768, 2009.
- Hellmann, D. H.and et al. "Saving of energy and cost in seawater desalination with speed controlled pumps", Desalination, 139(1-3): 7-19, 2001.
- Hydropneumatics Pvt. Ltd. "Orifice Plate", Product orifice plate. :
http://www.hydropneumatics.co.in\products_orifice_plates.html. March 11, 2013
- Ji, J.and et al. "Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation", Ultrasonics, 44, Supplement(0): e411-e414, 2006.
- Kamath, V.and et al. "A theoretical study of sonoluminescence", The Journal of the Acoustical Society of America, 94(1): 248-260, 1993.
- Kelkar, M. A.and et al. "Intensification of esterification of acids for synthesis of biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation", Ultrasonics Sonochemistry, 15(3): 188-194, 2008.
- Lauterborn, W. Cavitation and inhomogeneities in underwater acoustics : proceedings of the first international conference, Gottingen, Fed. Rep. of Germany, July 9-11, 1979 / editor, W. Lauterborn. Berlin: Springer-Verlag, 1980.
- Lide, D. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 88th Edition (CRC Handbook of Chemistry & Physics). London: CRC Press, 2007.
- Ma, F.and et al. "The effect of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow", Transactions of the ASAE, 41(5): 1261-2364, 1998.
- Ma, F., & Hanna, M. A. "Biodiesel production: a review", Bioresource Technology, 70(1): 1-15, 1999.

ເອກສາຣອ້າງອີງ (ຕອ)

- Milewska, A., & Molga, E. J. "CFD simulation of accidents in industrial batch stirred tank reactors", Chemical Engineering Science, 62(18-20): 4920-4925,
- Moholkar, V. S. and et al. "Hydrodynamic cavitation for sonochemical effects", Ultrasonics Sonochemistry, 6(1-2): 53-65, 1999.
- Naidu, D. V. P. and et al. "Modelling of a batch sonochemical reactor", Chemical Engineering Science, 49(6): 877-888, 1994.
- Nurick, W. H. "Orifice Cavitation and Its Effect on Spray Mixing", Journal of Fluids Engineering, 98(4): 681-687, 1976.
- Pal, A. and et al. "Biodiesel production through hydrodynamic cavitation and performance testing", Renewable Energy, 35(3): 619-624, 2010.
- Patil, P. and et al. "Conversion of waste cooking oil to biodiesel using ferric sulfate and supercritical methanol processes", Fuel, 89(2): 360-364, 2010.
- Sampath Kumar, K., & Moholkar, V. S. "Conceptual design of a novel hydrodynamic cavitation reactor", Chemical Engineering Science, 62(10): 2698-2711, 2007.
- Singhal, A. and et al. "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model.", Journal of Fluids Engineering, 124: 617 - 624., 2002.
- Sochard, S. and et al. "Modelling of free radicals production in a collapsing gas-vapour bubble", Ultrasonics Sonochemistry, 4(2): 77-84, 1997.
- Tamaki, N. and et al. "Effect of cavitation and internal flow on atomization of liquid jet", Atomization and Sprays, 8(2): 179-197, 1998.
- Yasui, K. "Chemical Reactions in a Sonoluminescing Bubble", Journal of the Physical Society of Japan, 66(9), 1997.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลงานทางวิชาการ

รายการบทความทางวิชาการ

ประชุมวิชาการระดับชาติ

วีระยุทธ นนท์ชนะ, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และ อิทธิพล วรพันธ์. “การเกิดค่าวิเทชั่นจากแผ่นขอบคุณเพื่อช่วยออกแบบถังปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซล” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, ประจำปี, 2555.

วีระยุทธ นนท์ชนะ, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, ประชาสันติ ไตรสุทธิ์ และ อิทธิพล วรพันธ์ “การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยเครื่องปฏิกรณ์ไโซโตรไดนามิกส์คาวิเทชั่น” การประชุมวิชาการ มอบ.วิจัยครั้งที่ 6, โรงแรมสุนីย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ จ. อุบลราชธานี. 2555

วารสารวิชาการในประเทศ

วีระยุทธ นนท์ชนะ, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, ประชาสันติ ไตรสุทธิ์ และ อิทธิพล วรพันธ์. “การจำลองการเกิดค่าวิเทชั่นจากแผ่นขอบคุณเพื่อช่วยออกแบบถังปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซล” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒ, ปีที่ 7 ฉบับที่ 2. เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม 2555

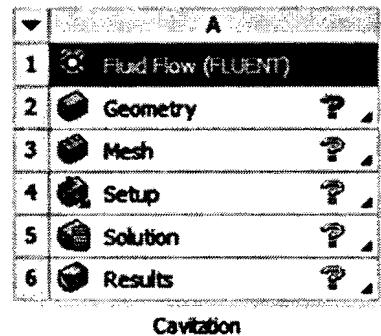
วีระยุทธ นนท์ชนะ, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, ประชาสันติ ไตรสุทธิ์ และ อิทธิพล วรพันธ์. (2556). “การทดสอบหาแผ่นขอบคุณที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อผลิตไบโอดีเซลแบบไโซโตรไดนามิกส์คาวิเทชั่น”. วารสารวิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 40 ฉบับที่ 2.

ภาคผนวก ข

วิธีการใช้โปรแกรม Fluent 12 ในการจำลองการเกิดความเสียหาย

วิธีการใช้โปรแกรม Fluent 12 ในการจำลองการเกิดคavitaiton

โปรแกรม Fluent[®] 12 จะเป็นโปรแกรมย่อยของ Ansys[®] 12 ซึ่งในส่วนของการจำลองการไหลเชิงตัวเลขจะมีหน้าต่างที่ประกอบด้วยโปรแกรมย่อยซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกันดังภาพที่ ข.1

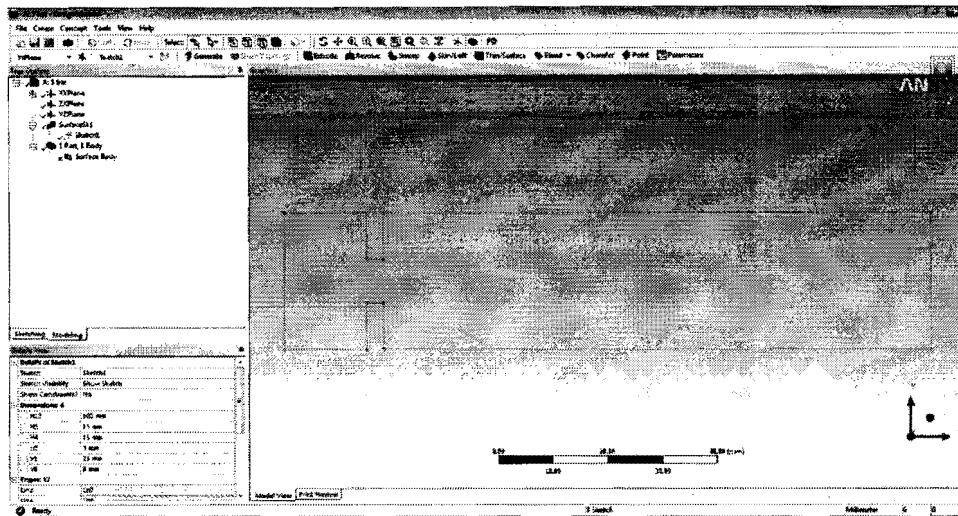


ภาพที่ ข.1 หน้าต่างย่อยของการจำลองการไหลของโปรแกรม Fluent[®] 12

จากภาพที่ ข.1 การจำลองการไหลของโปรแกรม Fluent[®] 12 จะต้องทำตามขั้นตอนหลักจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

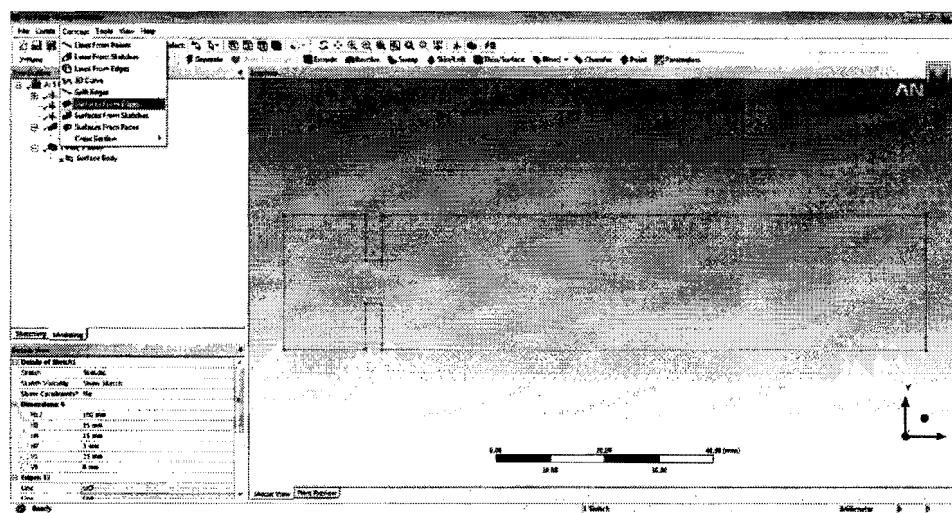
1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processing)

เป็นขั้นตอนในการกำหนดรูปร่างของแบบจำลองที่จะใช้ในการคำนวณ และรูปร่างขนาด และจำนวนของอลิเมนต์ ที่จะให้มีการประมวลผลด้วยวิธีปริมาตรสีนีอง (Finite volume method) :ซึ่งได้แก่ส่วนที่เป็น Geometry และ Mesh . ในภาพที่ ข.1 โดยจะเริ่มจากการเปิดส่วน Geometry ใช้ Ansys[®] 12 จะทำการเรียกโปรแกรม Design Modeler ซึ่งจะเป็นโปรแกรมที่ทำหน้าที่ในการเขียนรูปร่างของแบบจำลองที่จะใช้ในการคำนวณ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นรูปร่างแบบจำลองที่เป็น 2 มิติ (2D) จะเริ่มด้วยการสร้างเส้นร่างของแบบจำลอง (Sketch) ขึ้นมา ก่อนดังภาพที่ ข.2



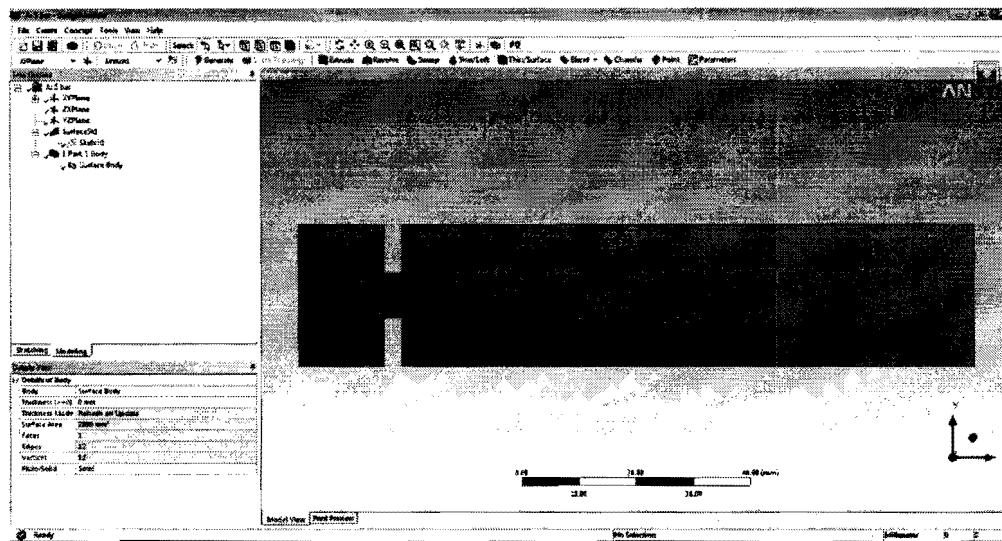
ภาพที่ บ.2 การสร้างภาพร่างของแบบจำลองในโปรแกรม DesignModeler

โดยโปรแกรม Design Modeler จะมีเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนแบบ แก้ไข และออกขนาดได้เช่นเดียวกับ โปรแกรมเขียนแบบ (Cad Software) แต่จะมีความพิเศษคือ โปรแกรมนี้คือจะสามารถตรวจสอบว่ารูปร่างแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา สามารถนำไปใช้ในการทำเมชได้หรือไม่ โดยจะแสดงผลที่หน้าต่างหลักเป็นเครื่องหมายถูกในกรณีที่สามารถใช้รูปร่างนั้นไปสร้างเมชได้ ซึ่ง โปรแกรม Mesh มีข้อกำหนดว่ารูปร่างแบบจำลองที่เป็น 2 มิติ ต้องเป็นพื้นผิว (Surface) ดังนั้นจากภาพร่างในภาพที่ บ.2 สามารถทำให้เป็นพื้นผิวได้โดย เข้าไปที่เมนู Concept และคลิกที่ Surface from edge ดังภาพที่ บ.3



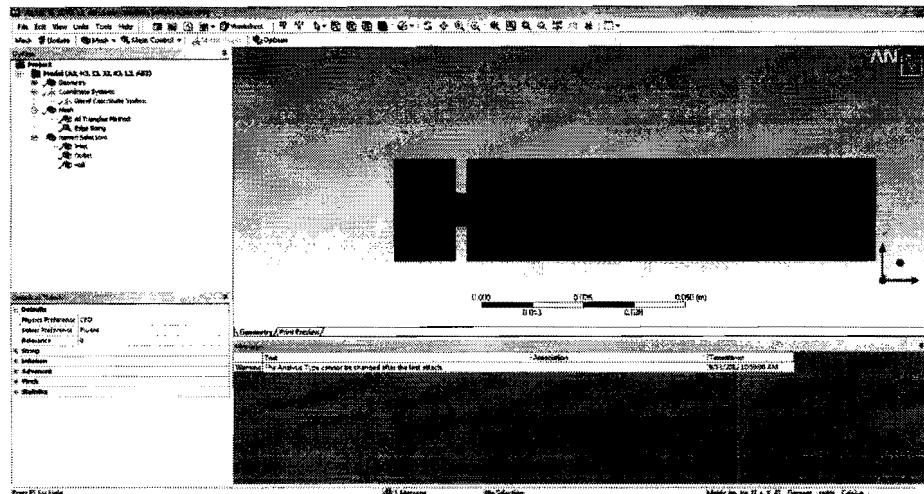
ภาพที่ บ.3 การสร้างพื้นผิวให้กับภาพร่าง

จากนั้นทำการเลือกไปยังภาพร่างที่ได้เตรียมไว้ และคลิกที่ปุ่ม Generate โปรแกรมจะทำการสร้างพื้นผิวขึ้นมาจากการร่างที่เลือก โดยมีลักษณะดังภาพที่ ฯ.4



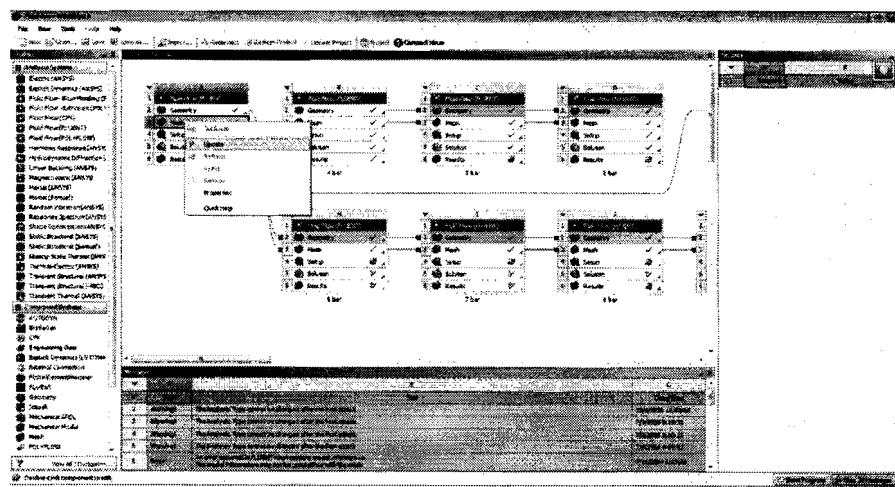
ภาพที่ ฯ.4 พื้นผิวของแบบจำลองที่ได้จากโปรแกรม Design Modeler

จากภาพที่ ฯ.4 โปรแกรม Design Modeler จะทำการสร้างพื้นผิวที่เป็นขอบเขต (Boundary) ของของไอล์ชิ้นมาซึ่งจะต้องนำสู่กระบวนการสร้างメชต่อไป ทำการบันทึกโดยไปที่ เมนู File เลือก Save Project เพื่อทำการบันทึกข้อมูล และเลือก Close Design Modeler เพื่อทำการปิด โปรแกรม จากนั้นทำการเปิดโปรแกรม Mesh . ในหน้าต่างย่อยในภาพที่ ฯ.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมในการสร้างเมช โปรแกรมจะทำการโหลดพื้นผิวจากโปรแกรม Design Modeler เพื่อเข้าไปประมวลผล โดยโปรแกรมนี้จะทำหน้าที่กำหนดค่าตาม รูปร่าง ของเมชที่จะสร้างขึ้น รวมทั้งการกำหนดขอบเขต (Boundary condition) ของรูปร่างก่อนที่จะเข้าสู่การประมวลผล โดยเมษที่สร้างเสร็จแล้วจะมีลักษณะดังภาพที่ ฯ.5



ภาพที่ ข.5 เมชที่สร้างจากโปรแกรม Mesh

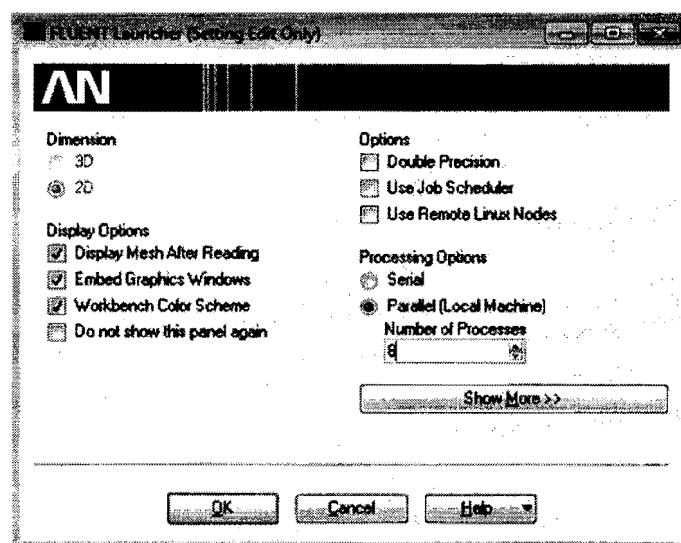
ทำการบันทึกและปิดโปรแกรม Mesh จะกลับมาสู่หน้าต่างหลักของโปรแกรม Ansys®12 ตรงแถบสถานะของโปรแกรม Mesh จะขึ้นสถานะให้อัพเดต (รูปสายฟ้า) คลิกขวาและเลือก Update ดังภาพที่ ข.6 เมื่อเมชที่จะใช้ในการประมวลผลถูกต้องในแถบสถานะของโปรแกรม Mesh จะขึ้นเครื่องหมายถูกต้องเขียว



ภาพที่ ข.6 การ Update เมชเข้าสู่กระบวนการประมวลผล

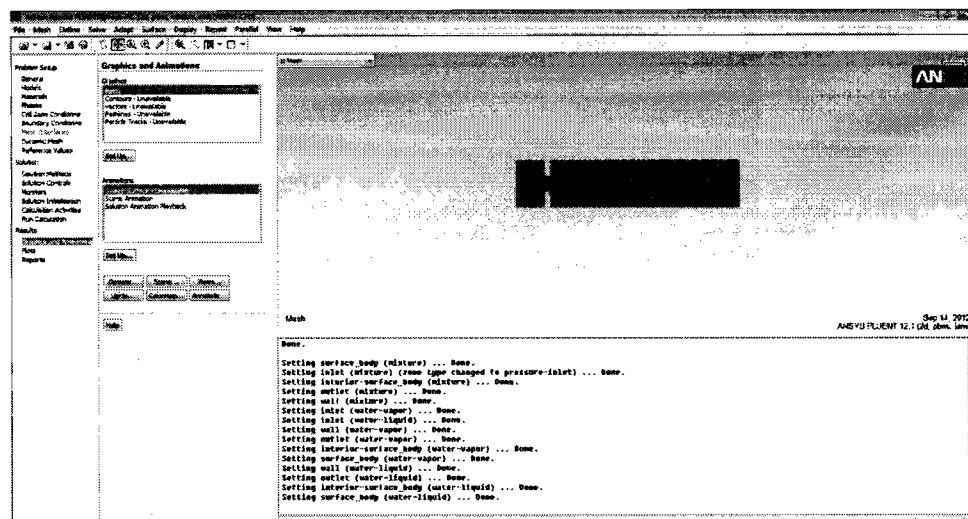
2. ขั้นตอนการประมาณผล (Solver)

เป็นขั้นตอนในการหาผลเฉลยของปัญหา โดย จะทำการ โหลดเมษและเงื่อนไขของเขตของแบบจำลอง เข้าไปสู่โปรแกรม Fluent 12 ซึ่งจะสามารถกำหนดเงื่อนไข และเลือกแบบจำลองรวมทั้งรูปแบบของการคำนวณ ได้โดยการเปิดส่วน Setup ในหน้าต่างย่อย โดยก่อนการประมาณผล จะสามารถเลือกโหมดของการประมาณผล ได้ โดยสามารถเลือกการประมาณผลแบบอนุกรม (Serial) และแบบขนาน (Parallel) ได้โดยการประมาณผลแบบขนานจะเหมาะสมสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่มีหน่วยประมวลผล (CPU) แบบหลายแกน (Multiple Core) หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มี Main board ที่รองรับ CPU หลายตัวได้ซึ่งจะทำให้การประมาณผลรวดเร็วขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องเลือกให้สอดคล้องกับ CPU ที่ใช้ด้วย โดยในที่นี้เลือกใช้การประมาณผลแบบขนาน 8 ช่อง เมื่อจากใช้คอมพิวเตอร์ที่ใช้ CPU Intel Core® i7 ที่มีหน่วยประมวลผลถึง 8 แกนดังภาพที่ ข.7



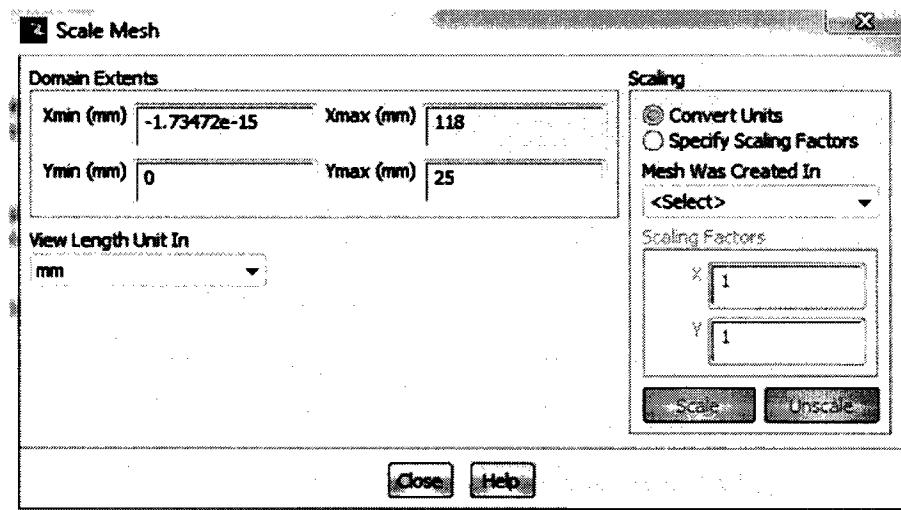
ภาพที่ ข.7 การตั้งค่าการประมาณผลของโปรแกรม

นอกจากการตั้งค่าการประมาณผลแล้ว ยังสามารถตั้งค่าเริ่มต้นอื่นๆ ของโปรแกรม เช่น ให้แสดงเมษทันทีหลังจากโปรแกรมทำการอ่านเมษแล้ว เป็นต้น หลังจากเลือกตัวเลือกในการตั้งค่าต่างๆ แล้ว โปรแกรม Fluent จะรันขึ้นมาพร้อมกับแสดงผลลูปร่างแบบจำลองที่ได้ดังรูปที่ ข.8



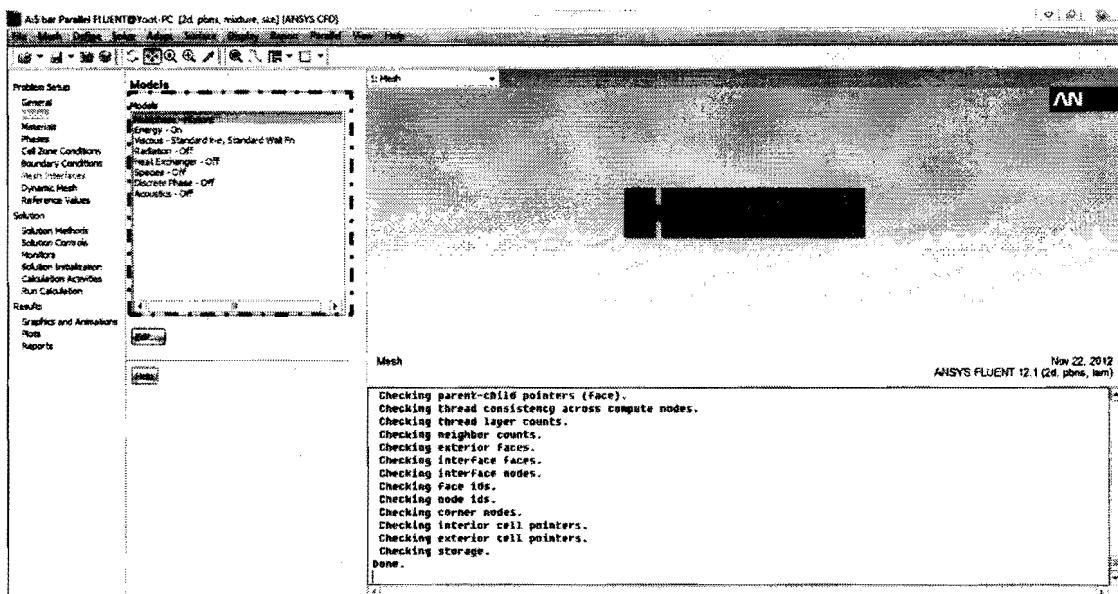
ภาพที่ ข.8 แบบจำลองที่โหลดเข้าสู่โปรแกรม Fluent® 12

จากนั้นทำการตั้งค่าค่าสเกลของเมช โดยคลิกเลือกที่ปุ่ม Scale ในแท็บ General โดยในส่วนนี้จะเป็นการกำหนดว่าเมชที่ใช้ในการประมวลผลจะให้อยู่ในหน่วยใด ดังภาพที่ ข.9 โดยในที่นี้จะกำหนดให้อยู่ในหน่วยของ mm.



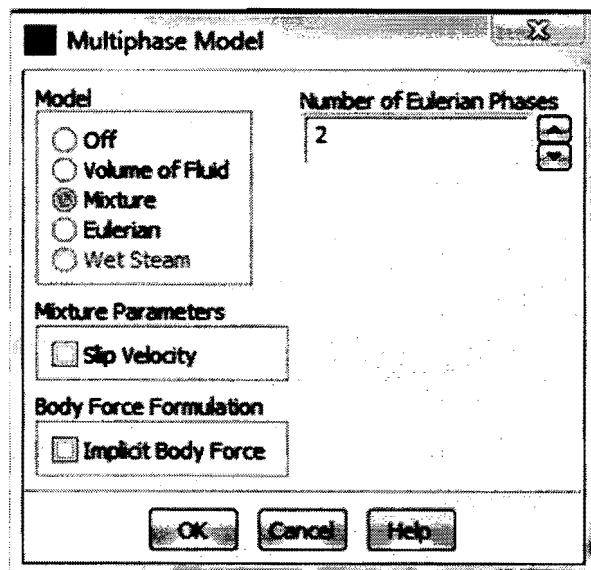
ภาพที่ ข.9 การกำหนด scale ให้ เมช

จากนั้นขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดโมเดล (Model) โดยคลิกเลือกที่โมเดลในแท็บ คำสั่งค้าน้ำมือ โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างของการตั้งค่าโมเดลที่จะใช้ในการคำนวณดังภาพที่ ข.10



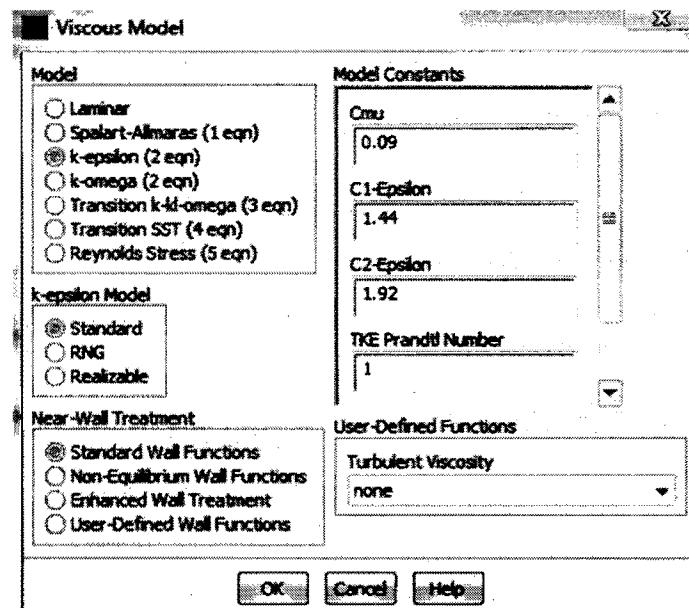
ภาพที่ ข.10 หน้าต่างการตั้งค่าโมเดล (ในการอบเส็นปะ)

จากภาพที่ ข.10 คลิกเดือกที่ Model ซึ่งจะเป็นในส่วนการตั้งค่าโมเดลที่ใช้สำหรับการจำลองการไหล จากนั้นเดือก Multiphase Model จะมีหน้าต่างการตั้งค่า Multiphase Model ดังภาพที่ ข.11 จากนั้นคลิกเดือก Mixture model เมื่อเสร็จแล้วเดือกปุ่ม OK



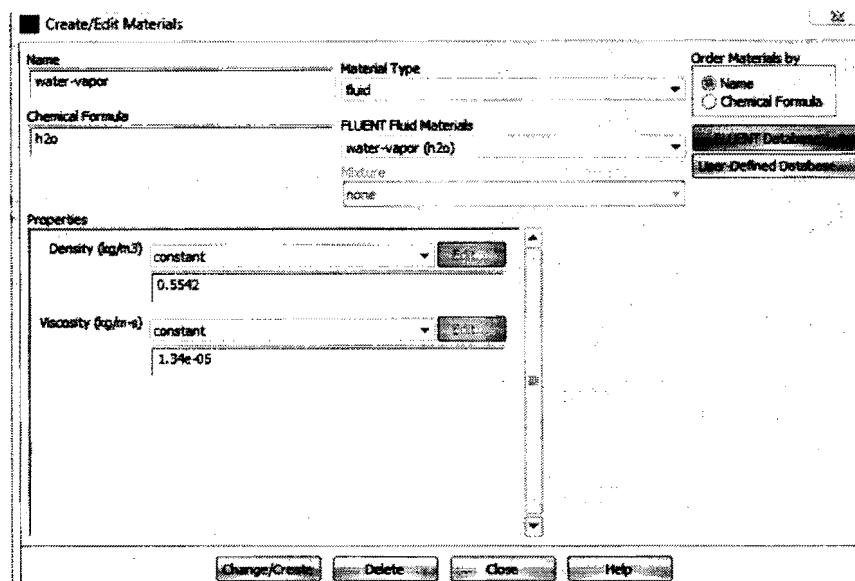
ภาพที่ ข.11 หน้าต่างตั้งค่าMultiphase Model

จากนั้นเลือก Viscous model เพื่อทำการเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) โดยหน้าต่างในการตั้งค่าจะมีลักษณะดังภาพที่ ข.12 เลือก k-epsilon (2 eqn) ในส่วน Model และในส่วนอื่นๆให้คงค่าเริ่มต้น (Default) ไว้คือ k-epsilon เป็น Standard และในส่วน Near wall treatment เป็น Standard wall functionดังภาพที่ ข.12



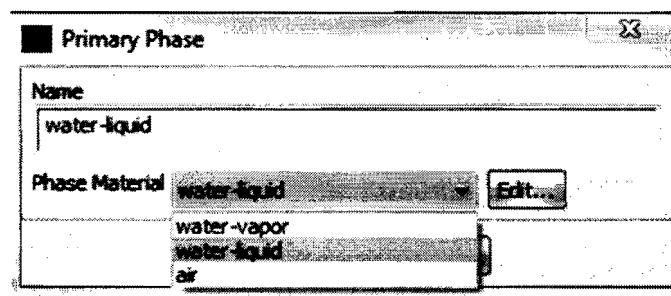
ภาพที่ ข.12 หน้าต่างตั้งค่า Viscous model

ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดวัสดุสำหรับการประมวลผล โดยการเลือกที่เมนู Material จากนั้น Double click ที่ Fluid เพื่อกำหนดชนิดของสารทำงานที่จะใช้ในการคำนวณ จากนั้นหน้าต่าง Material จะแสดงขึ้นมาดังภาพที่ ข.13

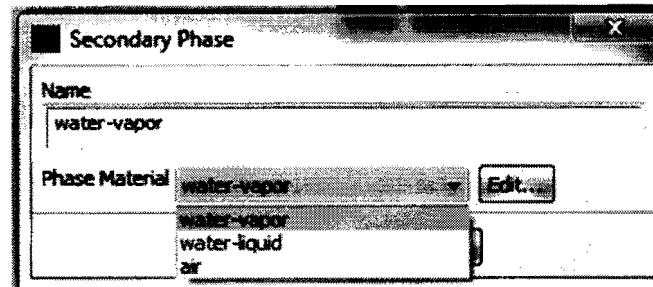


ภาพที่ ข.13 หน้าต่างในการกำหนด Material

จากนั้นคลิกที่ปุ่ม Fluent database เพื่อใช้วัสดุที่มีในฐานข้อมูลของโปรแกรม ซึ่งในที่นี้จะเลือก Water และ Water vapor เพื่อใช้ในการจำลองการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเสร็จแล้วให้ปิดหน้าต่าง Material ลง จากนั้นขั้นตอนต่อไปจะเป็นการกำหนดสถานะให้กับของไหล โดยดับเบิลคลิกที่เมนู Phase ในหน้าต่างด้านซ้ายมือจากนั้นกำหนดชื่อให้ Primary phase เป็น water-liquid และในส่วน Phase material เลือกวัสดุเป็น Water ที่ได้ทำการโหลดเข้ามาในโปรแกรมตั้งแต่ขั้นตอนการกำหนด Material และ Secondary phase เป็น water-vapor และในส่วน Phase material เลือกวัสดุเป็น Water vapor ดังภาพที่ ข.14 และภาพที่ ข.15 ตามลำดับ

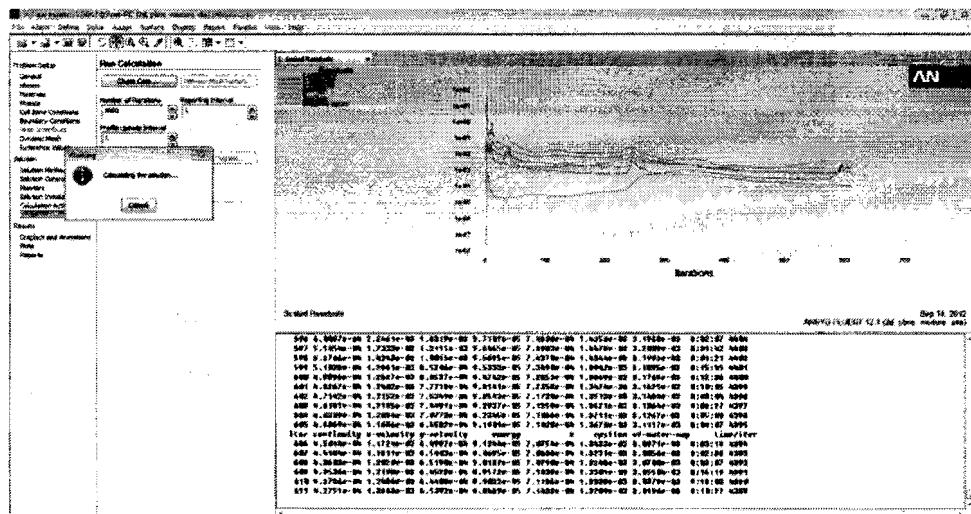


ภาพที่ ข.14 หน้าต่างการกำหนดค่า Primary Phase



ภาพที่ ข.15 หน้าต่างการกำหนดค่า Secondary Phase

ได้แก่ แบบจำลองความปั่นป่วน แบบจำลองการเกิดดาวเทียม วัสดุ รูปแบบการคำนวณ และรูปแบบการคำนวณ และสิ่งที่โปรแกรมทำการคำนวณ โดยขณะการคำนวณ โปรแกรมจะทำการแสดงเศษจากการคำนวณ และพล็อตเทียบกันแกนจำนวนครั้งการคำนวณ (Iteration) ดังรูปที่ ข.16



ภาพที่ ข.16 การคำนวณของโปรแกรม Fluent[®] 12

3. ขั้นตอนการแสดงผล (Post - processing)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายโดยจะนำเอาข้อมูลดินที่ได้จากการคำนวณ มาแสดงผลเป็นรูปแบบ contour และ กราฟ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป โดยสามารถนำข้อมูลออกได้ทั้งรูปแบบตาราง, กราฟ, Contour ฯลฯ

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายธนกฤต นนท์ชนะ
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีพ.ศ. 2545 - 2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เครื่องกล) (เกียรตินิยมอันดับ 1) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีพ.ศ. 2553 – 2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เครื่องกล)
ประวัติการวิจัย	ทุนสนับสนุนงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ทุนสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ โครงการการใช้ค่าวิเทชั่นกระดุnnปฎิกริยาเพื่อพัฒนา วิธีการสังเคราะห์ใบโพดเชลแบบต่อเนื่อง พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน
ประวัติการทำงาน	วิศวกร โครงการ ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน	วิศวกร โครงการ ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี