

การจำลองการเกิดคาวิเทชันจากแผ่นขอบคมเพื่อช่วยออกแบบถังปฏิกรณ์ ผลิตไบโอดีเซล

Simulation of Cavitation Induced by Orifice Plate for Biodiesel Reactor Design

วีระยุทธ นนท์ชนะ¹, กุลเชษฐ เพียรทอง¹, ประชาสันติ ไตยสุทธิ์¹ และ อธิธิพล วรพันธ์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี 34190

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: v.nonchana@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดคาวิเทชัน ของของไหลที่ไหลผ่านแผ่นขอบคม เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชัน สำหรับผลิตไบโอดีเซล ในการศึกษาใช้วิธีการคำนวณของไหลเชิงพลศาสตร์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดคาวิเทชัน การจำลองการไหลกำหนดให้แผ่นขอบคมมีรูปร่างเป็น 2 มิติ การไหลเป็นแบบคงตัว แบบจำลองความปั่นป่วนเป็นแบบ $k - \epsilon$ model และใช้แบบจำลองการเกิดคาวิเทชันเต็มรูปโดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน แผ่นขอบคมเป็นแบบ 1 รู และ 2 รู ที่มีพื้นที่การไหลเท่ากัน ความดันด้านต้นน้ำ (P_u) เท่ากับ 5 bar 10 bar และ 15 bar โดยค่าความดันท้ายน้ำคงที่เท่ากับ 0.98 bar จากผลการจำลองพบว่าจำนวนรูของแผ่นขอบคม และความดันด้านต้นน้ำมีอิทธิพลต่อการเกิดคาวิเทชัน โดยแผ่นขอบคม 2 รูจะมีระยะการเกิดคาวิเทชันสั้นกว่าการเกิดคาวิเทชันในแผ่นขอบคม 1 รู และเมื่อทำงานที่ความดัน P_u มากขึ้นความยาวของการเกิดคาวิเทชันของแผ่นขอบคมทั้ง 2 แบบมีแนวโน้มที่สั้นลง และมีเลขคาวิเทชันลดลง ดังนั้นถังปฏิกรณ์แบบหลายรูจึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นถังปฏิกรณ์ในการผลิตไบโอดีเซล

คำสำคัญ คาวิเทชัน, ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชัน, การจำลองการไหลเชิงตัวเลข, ไบโอดีเซล

Abstract

This research aims to study cavitation characteristics of fluid flow through orifice plates. This is to apply to the design of hydrodynamics cavitation reactor for biodiesel production. In this study, the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique was applied to analyze the cavitation behaviors. The orifice plate is modeled as 2 dimensional, while the flow is steady flow and the turbulent model is $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$). The simulated fluid is water coupled with full cavitation model. The orifice plates are 1 and 2-holes which have equal flow areas. The upstream pressures (P_u) are 5, 10, and 15 bars, while the downstream pressure is fixed at 0.98 bars. From CFD results, number of orifice hole and upstream pressure significantly affect to cavitation phenomena. The cavitation length of 2-holes orifice plate is shorter than that of 1-hole orifice plate. The increase of P_u shortens the cavitation length and also lowers the cavitation

number. Therefore, the multiple holes orifice reactor is more suitable to use in a hydrodynamic cavitation reactor for biodiesel production.

Keywords: Cavitation, Hydrodynamics cavitation reactor, Computational fluid dynamics (CFD), Biodiesel

1. บทนำ

ในงานที่เกี่ยวข้องกับของไหลโดยเฉพาะในเครื่องสูบน้ำ การเกิดคาวิเทชัน (Cavitation) เป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ เพราะจะทำให้เกิดการกัดกร่อนใบจักร หรือสร้างความเสียหายให้ชิ้นส่วนต่างๆได้ การออกแบบหรือเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในงานด้านของไหล วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องหลีกเลี่ยงการเกิดคาวิเทชันขึ้นในระบบ แต่ก็มี การนำเอาคาวิเทชันที่เกิดขึ้นในของเหลวมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น การใช้คาวิเทชันเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของหัวฉีด (Atomization) [1] การใช้คาวิเทชันช่วยการบำบัดน้ำเสีย (Waste water treatment) [2] โดยการเกิดคาวิเทชันที่เกิดขึ้นนั้น เราสามารถที่จะสร้างขึ้นมาและควบคุมมันได้ จากข้อดีดังกล่าวจึงได้มีการทดลองนำคาวิเทชันมาใช้กับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ และเพื่อลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา [3-5]

คาวิเทชันสามารถทำให้เกิดได้ ทั้งในของเหลวที่มีการไหล (Hydrodynamics cavitation, HC) และของเหลวที่อยู่นิ่งหรือเกือบอยู่นิ่ง (Acoustic cavitation, AC) โดยการเหนี่ยวนำให้ของเหลวที่มีพื้นผิวอิสระเกิดการสั่นด้วยค่าแอมพลิจูด ที่มากพอที่จะทำให้เกิดไอบริเวณใกล้ๆกับสนามความดัน (Pressure field) โดยงานวิจัยภายในประเทศมีการนำเอา AC มาใช้เพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน จากวัตถุดิบน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันจากสบู่ดำ [6-8] และจากงานวิจัยของ Kelkar *et al.* [9] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้คาวิเทชันแบบ Hydrodynamic และ Ultrasonic cavitation เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาพบว่าคาวิเทชันทั้ง 2 แบบ สามารถให้ปริมาณไบโอดีเซล (Yield) ได้มากกว่า 95% โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ที่อุณหภูมิห้อง (30°C) เมื่อ

เปรียบเทียบกับวิธีการผลิตไบโอดีเซลแบบดั้งเดิม คือ การบั่นผสม (Conventional method) ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 6 - 9 ชั่วโมงในการเปลี่ยนน้ำมันให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 65 °C และเมื่อเปรียบเทียบค่า C_y (Cavitation yield) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้ พบว่าถึงปฏิกรณ์แบบ HC มีค่า C_y มากกว่าถึงปฏิกรณ์แบบ AC ถึง 10 เท่า [5] และเมื่อเปรียบเทียบในด้านการขยายขนาดและการใช้งาน ถึงปฏิกรณ์แบบ AC ซึ่งส่วนมากจะใช้คลื่นอัลตราโซนิค เป็นแหล่งพลังงานและส่งผ่านให้ของเหลว ซึ่งคลื่นอัลตราโซนิคที่ใช้ จะใช้ที่ค่าความถี่แตกต่างกันออกไป และเมื่อมีการส่งผ่านคลื่นไปยังของเหลวของเหลวจะส่งผ่านคลื่นดังกล่าวไปยังถึงปฏิกรณ์ แต่ถ้าถึงปฏิกรณ์ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นพ้อง (Resonance) ของคลื่นอัลตราโซนิค ถึงปฏิกรณ์ก็จะเกิดความเสียหาย ดังนั้นการขยายขนาด ถึงปฏิกรณ์แบบ AC จึงมีข้อจำกัด ส่วนถึงปฏิกรณ์แบบ HC นั้นสามารถขยายและปรับเปลี่ยนรูปทรง ได้โดยไม่มีปัญหาเพราะใช้การไหลเพื่อให้เกิดคาวิเทชัน

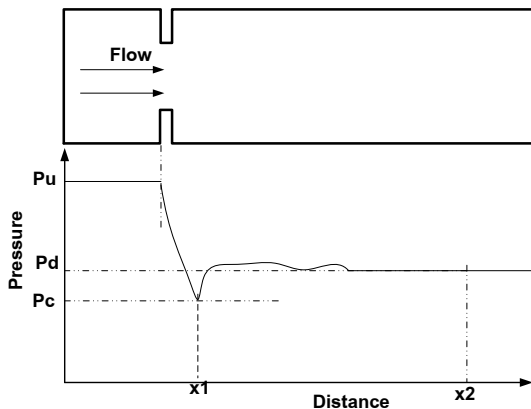
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาลักษณะการเกิดคาวิเทชันในถึงปฏิกรณ์แบบ HC โดยใช้แผ่นขอบคม (Orifice plate) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ลดความดัน ที่ใช้ทั่วไปในงานด้านวิศวกรรม และเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการสร้างถึงปฏิกรณ์แบบ HC เนื่องจากขณะที่ฟองไอเกิดการแตกตัวนั้น จะทำให้เกิด อุณหภูมิแตกตัว ($T_{collapse}$) และความดันแตกตัว ($P_{collapse}$) ที่สูงมาก ซึ่งอุณหภูมิและความดันที่สูงมากนี้ จะเป็นตัวที่ช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้เร็วมากขึ้น นอกจากนี้พื้นที่ในการเกิดคาวิเทชันก็เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผล ต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วย ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการใช้ การจำลองการไหลเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นเครื่องมือทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญ เพราะ ใช้ในการลดค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดทดลอง

และสามารถคำนวณเพื่อออกแบบการทดลองที่เหมาะสมได้ โดยเป็นเครื่องมือที่มีการนำมาใช้ช่วยในการจำลองและช่วยออกแบบถึงปฏิกรณ์อย่างกว้างขวาง [10-13] โดยในงานวิจัยจะใช้คำนวณหาลักษณะการเกิดคาวิเทชันของถังปฏิกรณ์แบบ 1 รู และแบบ 2 รู เพื่อศึกษาความแตกต่างของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 แบบ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น เพื่อประกอบการออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลต่อไป

2. คาวิเทชันและการใช้แผ่นขอบคมในการผลิตไบโอดีเซล

2.1 คาวิเทชัน [14]

คาวิเทชัน เป็นปรากฏการณ์ที่จะพบในบริเวณที่ของไหลมีความดันวิกฤติ (P_c) ซึ่งจะต่ำกว่าความดันไอ (Vapor pressure) ของของไหลชนิดนั้น ซึ่งส่งผลให้แรงดึงดูดไม่สามารถที่จะดึงโมเลกุลของของไหลนั้นให้อยู่ในรูปของเหลวได้ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะความดันของของไหลที่ผ่านแผ่นขอบคม

ซึ่งเมื่อความดันลดลงจนถึงระดับ P_c ที่ตำแหน่ง X_1 จะมีการก่อตัวของฟองไอ (Bubble) และความดันจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเท่ากับความดันด้านท้ายน้ำ (P_d) ที่ตำแหน่ง X_2 ฟองไอทั้งหมดจึงจะแตกตัวและกลับคืนสู่สถานะของเหลว นอกจากนี้ยังมีผลกระทบจากก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non - condensable gases, NCG) ซึ่งในส่วนใหญ่ของเหลวที่ใช้เป็นสารทำงานจะมีก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้นี้ ละลายอยู่ในของเหลวในปริมาณที่น้อยมาก ประมาณ 15 ppm. [15] แต่อย่างไรก็ตามปริมาณก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ที่น้อยมากนี้ มีผลกระทบต่อลักษณะการเกิดคาวิเทชันอย่างมาก

ภายใต้สภาวะที่ความดันของของไหลต่ำ ซึ่งลักษณะของการเกิดฟองไอ ก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ตามลักษณะของการไหล และคุณสมบัติของของไหลนั้น

งานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดคาวิเทชันโดยของเหลวที่มีการไหล ตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการศึกษาการเกิดคาวิเทชันคือ เลขคาวิเทชัน (Cavitation number, σ) เรย์โนลด์สเบอร์ (Reynolds number, Re) สัดส่วนของความหนาแน่นของของเหลวต่อไอ (Liquid to vapor density ratio, λ) และสัดส่วนของค่าความหนืดของของเหลวต่อไอ (Liquid to vapor viscosity ratio, η) ดังสมการที่ 1- 4

$$\sigma = \frac{P_u - P_d}{P_d - P_v} \tag{1}$$

$$Re = \frac{\rho_{liquid}UD}{\mu_{liquid}} \tag{2}$$

$$\lambda = \frac{\rho_{liquid}}{\rho_{vapor}} \tag{3}$$

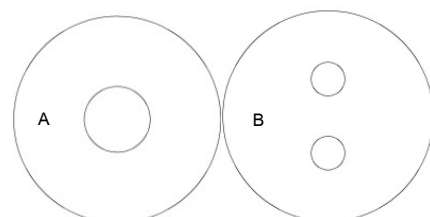
$$\eta = \frac{\mu_{liquid}}{\mu_{vapor}} \tag{4}$$

โดยที่ σ คือ เลขคาวิเทชันนัมเบอร์ P_u คือ ความดันทางด้านต้นน้ำ P_d คือค่าความดันทางด้านท้ายน้ำ และ P_v คือ ค่าความดันไอของของเหลว (bar) U คือ ค่าความเร็วเชิงทางทฤษฎีของเบอร์นูลลี (Theoretical Bernoulli velocity of jet) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5 และ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของรูแผ่นขอบคม (m)

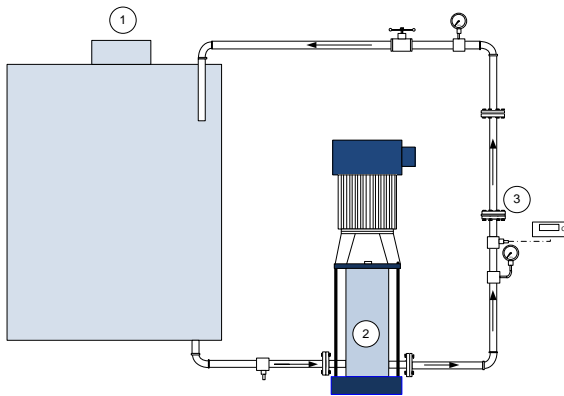
$$U = \sqrt{\frac{2(P_u - P_d)}{\rho_{liquid}}} \tag{5}$$

2.2 การใช้แผ่นขอบคมในการผลิตไบโอดีเซล

จากความสามารถในการทำให้เกิดคาวิเทชันของแผ่นขอบคม จึงได้นำเอาแผ่นขอบคมมาใช้เป็นอุปกรณ์ในการสร้างคาวิเทชัน โดยลักษณะของแผ่นขอบคมดังรูปที่ 2 และผังชุดถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชันที่ติดตั้งแผ่นขอบคม เพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซลดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ลักษณะของแผ่นขอบคม 1 รูและ 2 รู



รูปที่ 3 ผังชุดถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ควิเทชั่น
และแผ่นขอบคม

โดยปั๊ม (หมายเลข 2) จะดูดสารทำงานจากถังพัก (หมายเลข 1) และเพิ่มความดันเพื่อให้ไหลผ่านแผ่นขอบคม (หมายเลข 3) เพื่อให้เกิดควิเทชั่น และเป็นส่วนที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1 สมการควบคุม (Governing equation)

สมการควบคุมในสำหรับการไหลแบบ Two - phase flow ในงานวิจัยนี้อยู่บนพื้นฐานของของเหลวชนิดเดียว ซึ่งในโปรแกรม Fluent โมเดลนี้คือ Mixture model ซึ่งจะคำนวณสนามการไหล โดยใช้สมการ mixture continuity และสมการ momentum equation ดังสมการที่ 6 และสมการที่ 7 ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \quad (7)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในสถานะของผสม (Mixture density, ρ_m) และค่าสัดส่วนของสถานะไอโดยปริมาตร (α) นิยามโดยสมการที่ 8

$$\rho_m = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l \quad (8)$$

3.2 แบบจำลองการเกิดควิเทชั่น (Cavitation model)

ในการจำลองการเกิดควิเทชั่นจะใช้ แบบจำลองควิเทชั่นเต็มรูป (Full cavitation model) และเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k - \epsilon$ model ซึ่งพื้นฐานของโมเดลนี้จะประกอบไปด้วย สมการ standard viscous flow (สมการ Navier-Stokes) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นของของไหลและสัดส่วนโดยมวลของไอ (f) ดังสมการที่ 9

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f}{\rho_v} = \frac{1-f}{\rho_l} \quad (9)$$

และค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของไอ (α) สามารถหาได้จากค่าสัดส่วนโดยมวลของไอ จากสมการที่ (10)

$$\alpha \equiv f \frac{\rho}{\rho_v} \quad (10)$$

และใช้ Conventional turbulence model ($k - \epsilon$ model) ซึ่งกำหนดด้วยสมการ vapor transport equation สมการที่ 11

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_v) + (\nabla \cdot \alpha \rho_v \vec{v}) = R_g - R_c \quad (11)$$

โดยที่ R_g และ R_c คือมวลที่ถ่ายเทขณะเกิดการเปลี่ยนสถานะและขณะเกิดการแตกตัวของฟองไอลตามลำดับ

$$\alpha = n \times \left(\frac{4}{3} \pi \mathcal{N}_b^3 \right) \quad (12)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ของ α กับ n คือ Bubble density number และ \mathcal{N}_b คือรัศมีของฟองไอที่เกิดขึ้น (ตั้งสมการที่ 12) และสมการที่ 13 คือความสัมพันธ์ของ R (รัศมีฟองไอ) กับความดัน P_c และ \mathcal{N}_b โดยทั่วไปจะมีจำนวนฟองไอที่เกิดขึ้นจำนวนมาก (ลักษณะการเกิดควิเทชั่น และการแตกตัวของฟองไอโดยที่ไม่คิดค่า Slip velocity ระหว่างของเหลวและฟองไอที่เกิดขึ้น พลศาสตร์ของฟองไอที่เกิดขึ้น จะสามารถคำนวณได้จากสมการของ Rayleigh-Plesset equation ตั้งสมการที่ 14

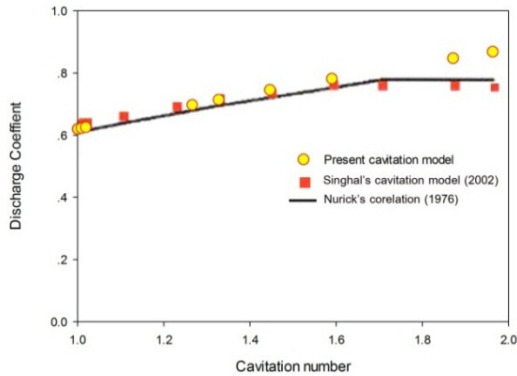
$$R = n \times \left(4 \pi \mathcal{N}_b^2 P_c \frac{D \mathcal{N}_b}{Dt} \right) \quad (13)$$

$$\mathcal{N}_b \frac{D^2 \mathcal{N}_b}{Dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{D \mathcal{N}_b}{Dt} \right)^2 = \left(\frac{P_b - P}{P_l} \right) - \frac{4 \nu_l}{\mathcal{N}_b} - \frac{2 \sigma}{P_l \mathcal{N}_b} \quad (14)$$

3.3 การทดสอบแบบจำลองการเกิดควิเทชั่น (Cavitation model validation)

เพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงได้มีเปรียบเทียบกับผลของ Singhal *et al.* [15] ซึ่งทำการเทียบผลของ Full cavitation model กับผลของ Nurick [16] ซึ่งรูปร่างของแบบจำลองเป็นแผ่นขอบคมที่มี $D/d = 2.88$ และ $L/d = 5$ โดยที่ D , d , และ L คือ เส้นผ่าศูนย์กลางท่อทางเข้า, เส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นขอบคม และความยาวของแผ่นขอบคมตามลำดับ โดยทำการจำลองโดยใช้ค่าความดันด้านต้นน้ำในช่วง 1.9 - 2,500 bar โดยที่ค่า

ความดันด้านท้ายน้ำมีค่าเท่ากับ 0.95 bar ใช้แบบจำลองแบบสมมาตรในแนวแกน (Axisymmetric 2-D) โดยมีผลการจำลองดังรูปที่ 4

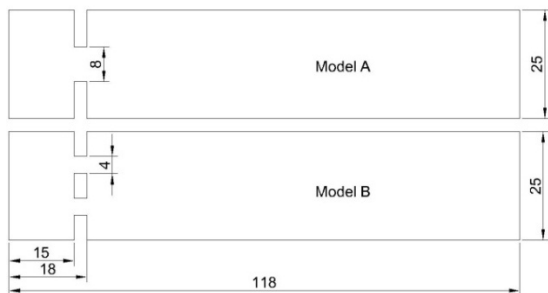


รูปที่ 4 เปรียบเทียบ C_d (Discharge Coefficient) จากการจำลองจาก Full cavitation model ที่ใช้กับผลจากงานวิจัยอื่นๆ

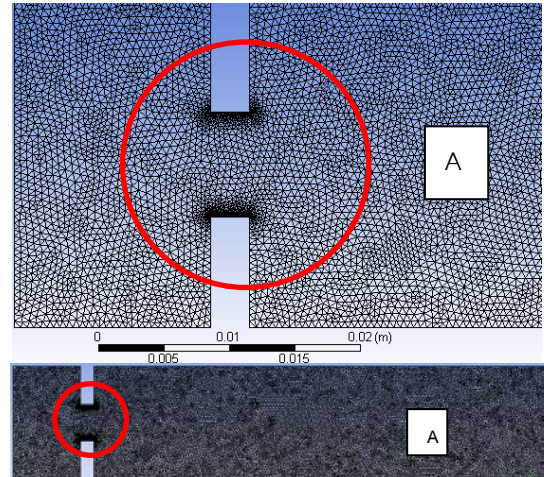
จากรูปที่ 4 พบว่าค่า σ กับ C_d ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลองของ Nurick [16] และของ Singhal *et al.* [15] โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3 % ในช่วง $1.0 \leq \sigma \leq 1.6$

4. วิธีการจำลองการแบบจำลองและไหลเชิงตัวเลข

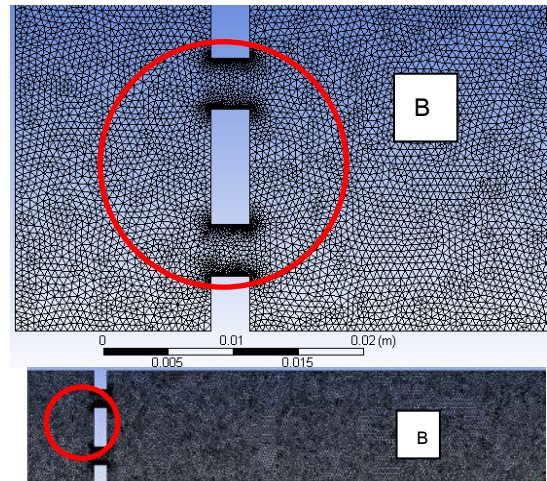
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Fluent[®] Version 12.1 ในการจำลองการไหล โดยแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยจะเป็นแบบจำลองแบบเต็มรูป 2 มิติ (2D) ดังรูปที่ 5 โดยที่ model A ใช้แทนแผ่นขอบคมชนิด 1 รู และ model B ใช้แทนแผ่นขอบคมที่มี 2 รู โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นขอบคมทั้งแบบ A และ B เท่ากับ 8 mm. และ 4 mm. ตามลำดับ โดยใช้ เมช (Mesh) ชนิดสามเหลี่ยม (Triangle mesh) โดยมีรูปร่างและขนาดเมชของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 5 รูปร่างและขนาดแบบจำลองที่ใช้ แบบจำลอง A และแบบจำลอง B



รูปที่ 6 แสดงแบบจำลองและภาพขยายบริเวณแผ่นขอบคมของแบบจำลอง A



รูปที่ 7 แสดงแบบจำลองและภาพขยายบริเวณแผ่นขอบคมของแบบจำลอง B

จากการทดสอบจำนวนของเมช (Mesh sensitivity) ในช่วงระหว่าง 7,564 – 97,920 อิลิเมนต์ พบว่าจำนวนเมชที่เหมาะสมสำหรับ แบบจำลอง A และแบบจำลอง B รวมทั้งรายละเอียดของถึงปฏิกรณ์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของแบบจำลองและ จำนวนของอิลิเมนต์ (Element) ในแต่ละแบบจำลอง

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

ทั้งนี้โมเดลที่เลือกใช้มีดังนี้

1. Multiphase model ใช้ Mixture model
2. Viscous model ใช้ Standard k - ϵ model
3. กำหนดให้ทำงานที่สภาวะ อุณหภูมิคงที่

(Isothermal)

โดยทำการจำลองการไหลเชิงตัวเลขที่เงื่อนไขดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขในการจำลองการไหลเชิงตัวเลข

ลำดับที่	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
1	ของไหล	น้ำ	-
2	ค่าความหนาแน่น	998.2	kg/m ³
3	ความดันไอ	0.0354	bar
4	λ	1,813.23	-
5	η	71.64	-
6	P_u	5,10,15	bar
7	อุณหภูมิ	27	°C
8	ปริมาณก๊าซที่ไม่ควบแน่น	15	ppm

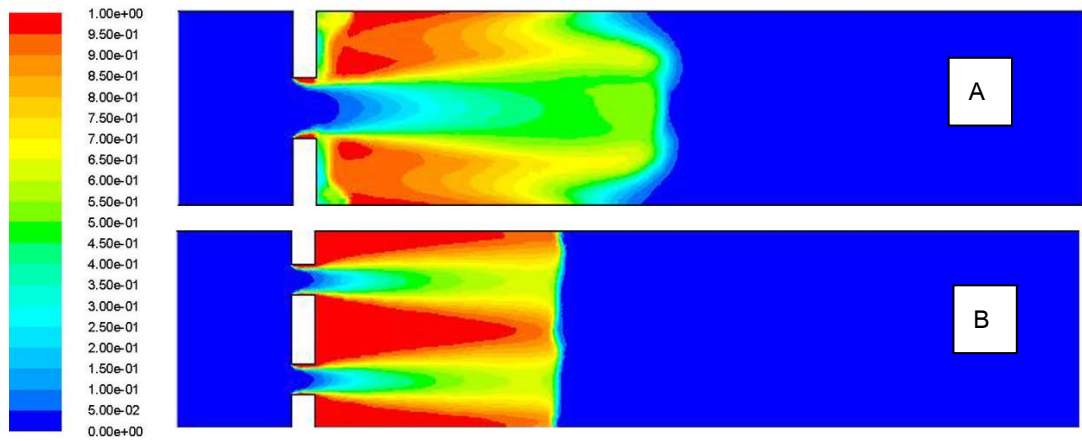
โดยทำการจำลองที่ค่าความดัน P_u เท่ากับ 5, 10 และ 15 bar ตามลำดับ โดยใช้ค่า P_d เท่ากับ 0.98 bar

5. ผลการจำลองการไหลเชิงตัวเลข

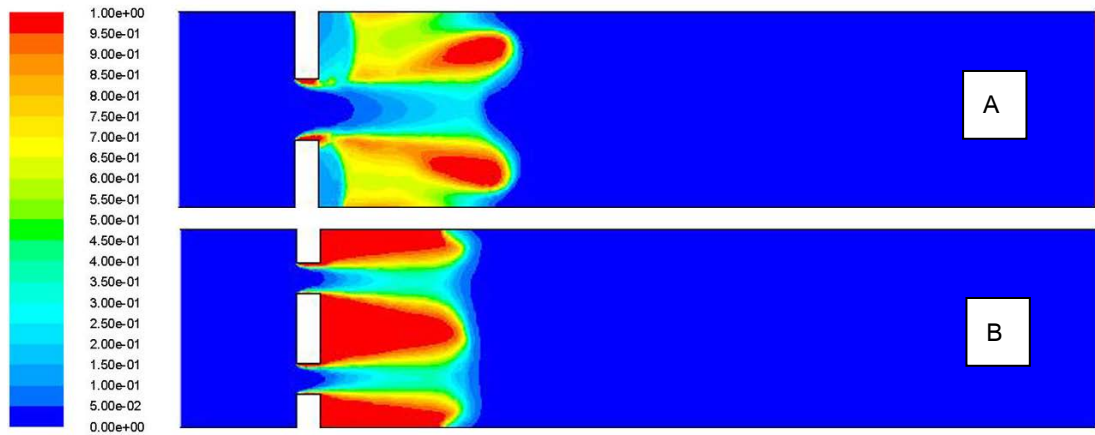
จากรูปที่ 8 - 10 เป็นของสัดส่วนโดยปริมาตรของของไอ (α) ที่ความดัน P_u เท่ากับ 5 bar 10 bar และ 15 bar ตามลำดับ โดยจะพบว่าแบบจำลอง B จะมีสัดส่วน α ที่มีค่าสูงกว่าแบบจำลอง A รวมทั้งระยะของการเกิดควิเทชั่นของแบบจำลอง B จะสั้นกว่าแบบจำลอง A ยกเว้นเงื่อนไข $P_u = 15$ bar ซึ่งระยะการเกิดควิเทชั่นใกล้เคียงกันทั้ง 2 แบบจำลอง ซึ่งค่า α จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของปริมาตรของสถานะไอ

ที่เกิดขึ้นต่อปริมาตรของสถานะเหลวในถังปฏิกรณ์ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 ซึ่งบริเวณนั้นมีปริมาตรของสถานะไออยู่สูงสุด และระยะการเกิดควิเทชั่นของแบบจำลองทั้ง 2 แบบมีแนวโน้มสั้นลงเมื่อค่าความดัน P_u สูงขึ้น โดยในแต่ละค่าความดันจะพบว่าสัดส่วนของ $\alpha = 1$ ของแบบจำลอง B จะมีสัดส่วนมากกว่าแบบจำลอง A ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการความดันตกคร่อม (Pressure drop) บริเวณด้านท้ายน้ำ (Downstream) มากกว่าแบบจำลอง A และเมื่อพิจารณาความยาวของการเกิดควิเทชั่นที่แบบจำลอง B ความยาวของการเกิดสั้นกว่าของแบบจำลอง A เพราะแบบจำลอง B มีการไหลแบบเฉือน (Shear flow) มากกว่า เนื่องจากลำของของไหลที่ผ่านแผ่นขอบคมมีขนาดเล็กกว่า จึงมีโมเมนตัมน้อยกว่าแบบจำลอง A ที่มีลำของไหลที่มีขนาดใหญ่กว่า จึงทำให้ระยะที่มีการเกิดฟองไอมีระยะที่แตกต่างกัน

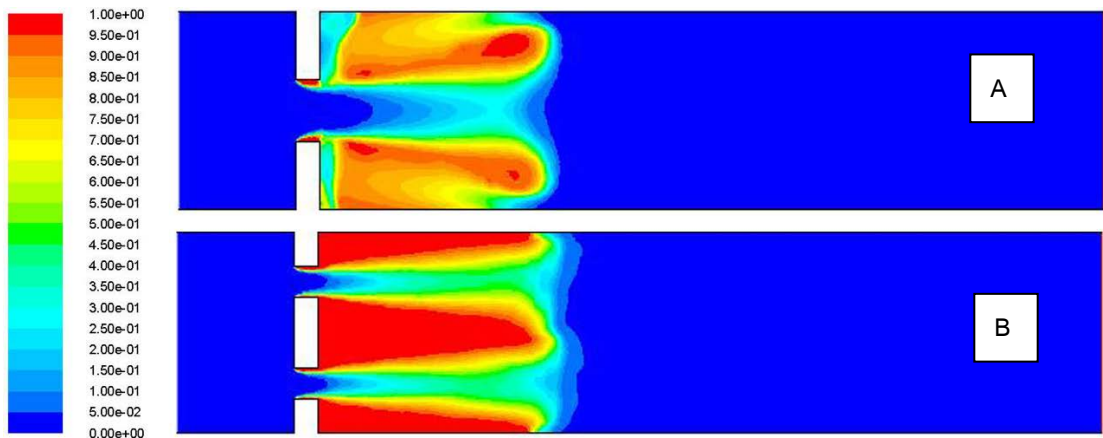
เมื่อพิจารณาควบคู่กับกราฟเปรียบเทียบ P_{center} (ความดันบนเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นขอบคม) ดังรูปที่ 11 - 13 เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความดันของของไหลเมื่อไหลผ่านแผ่นขอบคม พบว่าความชันของกราฟความดันในช่วงที่ผ่านแผ่นขอบคม ของแบบจำลอง A จะมีความชันน้อยกว่า ของแบบจำลอง B ในทุกๆค่าความดัน P_u และความชันของกราฟความดันของแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ P_u เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความดันสูญเสียที่มากกว่าและความดัน P_{center} ของแบบจำลองแบบ 2 รู เมื่อผ่านแผ่นขอบคม จะมีการลดลงและเข้าสู่ความดัน P_d ได้เร็วกว่าแบบจำลองรูเดียว เนื่องมีจากการไหลแบบเฉือนมากกว่า ฟองไวจึงแตกตัวและกลับเข้าสู่สถานะของเหลวเร็วกว่า ซึ่งสามารถบอกได้ว่าฟองไอที่เกิดจากแผ่นขอบคม 2 รู มีอายุ (Bubble life) สั้นกว่าฟองไอที่เกิดจากแผ่นขอบคม 1 รู รวมทั้งยังพบว่าความดันของแบบจำลอง B มีการแกว่งตัวมากกว่าแบบจำลอง A



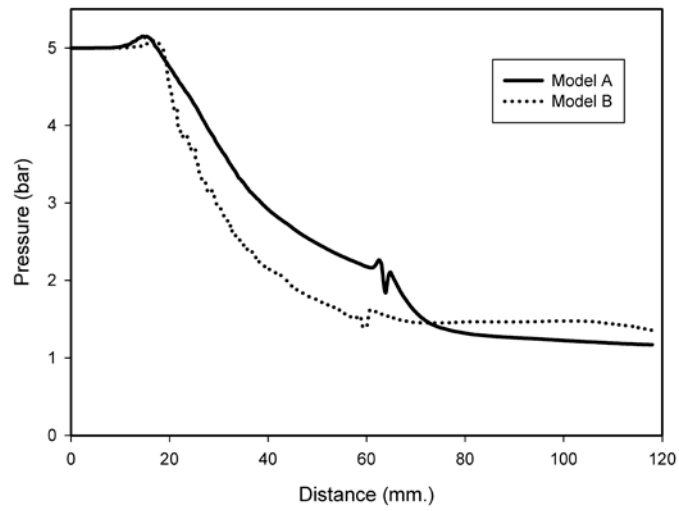
รูปที่ 8 Contour ของสัดส่วนโดยปริมาตรของของไอ ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ความดันด้านต้นน้ำเท่ากับ 5 bar



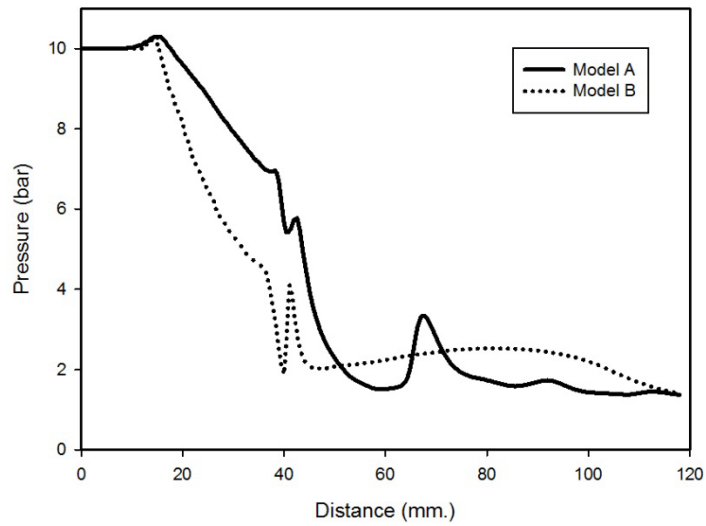
รูปที่ 9 Contour ของสัดส่วนโดยปริมาตรของของไอ ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ความดันด้านต้นน้ำเท่ากับ 10 bar



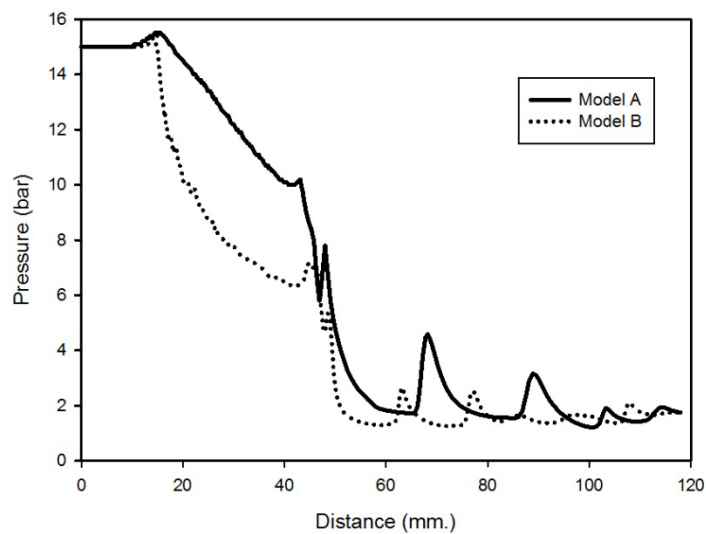
รูปที่ 10 Contour ของสัดส่วนโดยปริมาตรของของไอ ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ความดันด้านต้นน้ำเท่ากับ 15 bar



รูปที่ 11 ความดัน P_{center} ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 5 bar



รูปที่ 12 ความดัน P_{center} ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 10 bar



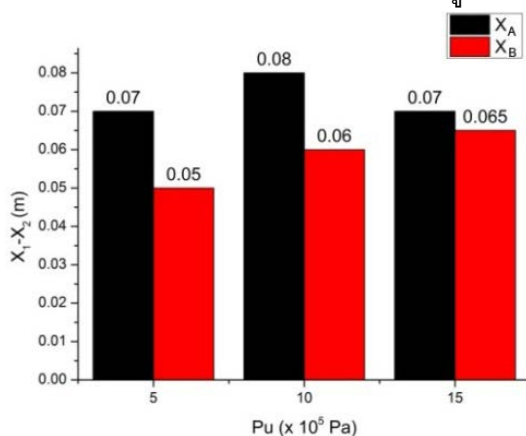
รูปที่ 13 ความดัน P_{center} ของแบบจำลอง A และแบบจำลอง B ที่ P_u เท่ากับ 15 bar

จากผลการจำลองการไหลสามารถคำนวณค่า σ และค่า Re ของแบบจำลองทั้ง 2 แบบ ที่เงื่อนไขต่างๆมีค่าดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเลขคาวิตีเทชั่นและค่าเรโนลด์นัมเบอร์ที่ P_u ต่างๆ

P_u (bar)	σ		Re	
	Model	Model	Model	Model
	A	B	A	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 ซึ่งเป็นความยาวของระยะการเกิดคาวิตีเทชั่น (ในรูปที่ 1) และระยะเวลาจากการเกิดจนกระทั่งฟองไอแตกตัว เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 แบบจำลองจะได้ค่าดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงส่วนต่างของระยะการเกิดคาวิตีเทชั่นของทั้ง 2 แบบจำลอง

จากรูปที่ 14 ซึ่งเป็นระยะการเกิดคาวิตีเทชั่นของแบบจำลอง A (X_A) และของแบบจำลอง B (X_B) ที่ความดันต้นน้ำต่างๆ พบว่าระยะ X_B น้อยกว่า X_A ทุกค่าความดัน และเมื่อความดันต้นน้ำเพิ่มขึ้นระยะ X_A และระยะ X_B มีแนวโน้มใกล้เคียงกันมากขึ้น อีกทั้งเมื่อความดัน P_u เพิ่มขึ้น ความยาวของการเกิดคาวิตีเทชั่นของแบบจำลอง A เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ความดัน 10 bar และลดลงมีแนวโน้มลดลงที่ความดัน 15 bar ส่วนแบบจำลอง B มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น

จากผลการจำลองกราฟความดันของแบบจำลอง B จะมีความชันมากกว่าแบบจำลอง A ประกอบกับ contour ของ α ที่มีระยะที่สั้นกว่า ทำให้สรุปได้ว่าฟองไอที่เกิดจากแบบจำลอง B จะมีช่วงระยะเวลาจากการก่อตัวจนกระทั่งแตกตัวที่สั้นกว่า รวมทั้งเมื่อเปรียบเทียบเลขคาวิตีเทชั่นของแบบจำลอง B พบว่ามีค่าน้อยกว่าแบบจำลอง A ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่า $P_{collapse}$ และ $T_{collapse}$ ของแบบจำลอง B สูงกว่าแบบจำลอง A

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการจำลองสามารถสรุปได้ว่า ถึงปฏิกรณ์แบบแผ่นขอบคม 2 รู จะสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชั่น หรือปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ ได้ดีกว่าถึงปฏิกรณ์แบบแผ่นขอบคม 1 รู ที่เงื่อนไขเดียวกัน รวมทั้งผลต่างของระยะการเกิดคาวิตีเทชั่น ของถึงปฏิกรณ์ทั้ง 2 แบบจะลดลงเมื่อเพิ่มความดัน P_u โดยอาศัยผลการศึกษาของ Parage *et al.* [17] ซึ่งพบว่าค่า $P_{collapse}$ และ $T_{collapse}$ จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ฟองไอเกิดและเกิดการแตกตัว และเลขคาวิตีเทชั่นของถึงปฏิกรณ์ซึ่งถ้าระยะเวลาและระยะในการเกิดคาวิตีเทชั่นที่สั้นรวมทั้งเลขคาวิตีเทชั่นที่ต่ำ จะส่งผลให้เร่งปฏิกิริยาเคมีได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amit Pal *et al.* [4] และสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคการจำลองการไหลเชิงตัวเลขสามารถบอกแนวโน้ม ของการเกิดคาวิตีเทชั่น ในถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตีเทชั่นได้ดี ทั้งนี้ควรมีการศึกษาลักษณะของถึงปฏิกรณ์แบบแผ่นขอบคมที่มีจำนวนรูมากขึ้น เพราะจากผลการศึกษาที่มีแนวโน้มที่เมื่อเพิ่มจำนวนรูมากขึ้น จะส่งผลให้เกิดคาวิตีเทชั่นในลักษณะที่ส่งผลดีต่อการเร่งปฏิกิริยาเคมี

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน (RSEC) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Tamaki, M. Shimizu, K. Nishida, and H. Hiroyasu, "Effect of cavitation and internal flow on atomization of aliquid jet," vol. 8, pp. 179-197, 1998-04-01 1998.
- [2] P. R. Gogate., "Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes," *Advance in Environmental Research*, vol. 6, pp. 335-358, 2002.
- [3] A.Singh, "Biodiesel production through ultrasonic cavitation process and performance testing," Master of Engineering, Mechanical engineering, Univerisy of Delhi, Delhi, 2007.
- [4] A. Pal, A. Verma, S. S. Kachhwaha, and S. Maji, "Biodiesel production through hydrodynamic cavitation and performance testing," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 619-624, 2010.
- [5] M. A. Kelkar, P. R. Gogate, and A. B. Pandit, "Intensification of esterification of acids for synthesis of biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation.," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 8, pp. 188-194 2008.
- [6] I. Worapun, K. Pianthong, and P. Thaiyasuit, "Optimization of biodiesel production from crude palm oil using ultrasonic irradiation assistance and response surface methodology," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 87, pp. 189-197, 2012.
- [7] I. Worapun, K. Pianthong, and P. Thaiyasuit, "Two step biodiesel Production from Crude *Jatropha curcas* L.Oil using Ultrasonic Irradiation Assisited," *Journal of Oleo Science* vol. 61, 2012.
- [8] I. Worapun, P. Thaiyasuit, and K. Pianthong, "Ultrasonic Irradiation Assisted Synthesis of Biodiesel from Crude Palm Oil Using Response Surface Methodology," *SWU Engineering Journal*, vol. 6, pp. 16-13, 2011.
- [9] V. S. Moholkar, P. Senthil Kumar, and A. B. Pandit, "Hydrodynamic cavitation for sonochemical effects," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 6, pp. 53-65, 1999.
- [10] J. E. Duran, M. Mohseni, and F. Taghipour, "Modeling of annular reactors with surface reaction using computational fluid dynamics (CFD)," *Chemical Engineering Science*, vol. 65, pp. 1201-1211, 2010.
- [11] Y. Chen, C.-j. Lu, and L. Wu, "Modelling and computation of unsteady turbulent cavitation flows," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 18, pp. 559-566, 2006.
- [12] X.-Z. Chen, D.-P. Shi, X. Gao, and Z.-H. Luo, "A fundamental CFD study of the gas–solid flow field in fluidized bed polymerization reactors," *Powder Technology*, vol. 205, pp. 276-288, 2011.
- [13] A. Milewska and E. J. Molga, "CFD simulation of accidents in industrial batch stirred tank reactors," *Chemical Engineering Science*, vol. 62, pp. 4920-4925.
- [14] F. Jean-Pierre, *Fundamentals of Cavitation*. New York Kluwer academic Publisher, 2004.

- [15] A. Singhal, M. M, A. Huiying, and L. Y. Jiang, "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model.," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 124, pp. 617 - 624., 2002.
- [16] W. H. Nurick, "Orifice Cavitation and Its Effect on Spray Mixing," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 98, pp. 681-687, 1976.
- [17] P. R. Gogate and A. B. Pandit, "A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 12, pp. 21-27, 2005.