



การศึกษาผลของแผ่นออร์ฟิซต่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ ควิเตชันภายในถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชัน

อิทธิพล วรพันธุ์^{1*} และ อภิเดช บุญเจือ²

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
อีสาน

² สาขาวิศวกรรมกระบวนการทำความเย็นและการปรับอากาศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: i.worapun@gmail.com

วันที่รับบทความ: 11 ธันวาคม 2562; วันที่ทบทวนบทความ: 22 มกราคม 2562; วันที่ตอบรับบทความ: 27 มกราคม 2562

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 มีนาคม 2563

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแผ่นออร์ฟิซที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชันภายในถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชัน โดยการทดลองได้มุ่งเน้นไปที่การเปรียบเทียบแผ่นออร์ฟิซจำนวน 5 แบบที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน คือ ขนาด, จำนวน และรูปร่างของรู ในส่วนของตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ สภาวะในการทำงาน (ความดันทางด้านเข้า) และรูปร่างทางเรขาคณิตของแผ่นออร์ฟิซ (ผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมด, ตัวแปร α และ β) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความดันทางด้านเข้าส่งผลอย่างมากต่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควิเตชัน กล่าวคือเมื่อค่าความดันทางด้านเข้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวเลขควิเตชันมีค่าลดลง โดยค่าความดันทางด้านเข้าที่เหมาะสมคือที่ 4 บาร์ ซึ่งจะมีตัวเลขควิเตชันต่ำที่สุดที่ทุกแบบของแผ่นออร์ฟิซที่ใช้ในการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่ารูปร่างทางเรขาคณิตของแผ่นออร์ฟิซมีบทบาทสำคัญต่อตัวเลขควิเตชันเช่นกัน โดยตัวเลขควิเตชันจะมีค่าลดลงเมื่อค่าตัวแปร α และ β มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควิเตชันภายในถังปฏิกรณ์ที่ความดันทางด้านเข้า 4 บาร์ ผลการทดลองยืนยันได้ว่า แผ่นออร์ฟิซแบบ OP-3 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 2 มิลลิเมตร จำนวนรู 24 รู และมีตัวเลขควิเตชันเท่ากับ 0.52 ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นออร์ฟิซแบบ OP-2, OP-1, OP-4 และ OP-5 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแผ่นออร์ฟิซแบบ OP-3 มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะนำมาเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชันภายในถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชันสำหรับประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

คำสำคัญ: ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชัน; แผ่นออร์ฟิซ; ตัวเลขควิเตชัน

The Study Effect of Orifice Plates on Intensifies Degree of Cavitation Phenomenon Inside Hydrodynamic Cavitation Reactor

Ittipon Worapun^{1*} and Apidat Boonjaei²

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

² Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding author, E-mail: i.worapun@gmail.com

Received: 11 December 2019; Revised 22 January 2019; Accepted: 27 January 2019

Online Published: 21 March 2020

Abstract: The objectives of this research were determined to optimize orifice plates for applying to use as a cavitation inducer device inside the hydrodynamic cavitation reactor. In this experiment, we focused on the comparison between five orifice plates with different configurations i.e., size, number, and shape of holds. The effect of different parameters such as operating condition (inlet pressure) and geometrical of the orifice plates (total perimeter holds, α and β) have been studied. The experimental results showed that the inlet pressure considerably affects the degree of cavitation phenomenon when inlet pressure increases with decreasing cavitation number. Optimum inlet pressure of 4 bar gives a minimum value of cavitation number for all orifice plates. In addition, it was found that the geometry of the orifice plates plays an important role in the value of the cavitation number. The value of the cavitation number decreased with increasing parameter α and β . At the inlet pressure 4 bar, the results obtained confirmed that orifice plates OP-3 with the configuration of holes diameter was 2 mm and 24 holes performed better with cavitation number of 0.52 as compared to orifice plate OP-2, OP-1, OP-4, and OP-5, respectively when considered degree of cavitation phenomenon inside the reactor. In conclusion, the orifice plates OP-3 was more suitable for cavitation inducer devices in the hydrodynamics cavitation reactor for the biodiesel production process.

Keywords: Hydrodynamic cavitation reactor; Orifice plates; Cavitation number



1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชัน (Hydrodynamic Cavitation Reactor) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น ด้านการสังเคราะห์ทางเคมี และการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น [1-4] ในส่วนของการสังเคราะห์ทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลก็พบว่าได้มีการนำเอาถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชันมาใช้ในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้น [5-9] ทั้งนี้ถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชันถือได้ว่าเป็นถึงปฏิกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการผสมสารละลายที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าถึงปฏิกรณ์แบบใช้ใบกวน (Mechanical Stirring Reactor) ประมาณ 160 - 400 เท่า ในขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานใช้เพียงครึ่งหนึ่งของที่ถึงปฏิกรณ์แบบใบกวนใช้เท่านั้น [10]

โดยทั่วไปการทำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน (Cavitation Phenomenon) ภายในถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชันนั้นจะอาศัยหลักของการเปลี่ยนแปลงความดันของของเหลวโดยการส่งของเหลวผ่านอุปกรณ์กีดขวางการไหล (Construction Device) เพื่อทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก (Micro Bubbles) ขึ้นภายในของเหลว ซึ่งในเวลาต่อมาฟองอากาศขนาดเล็กดังกล่าวจะเกิดการขยายขนาดแล้วยุบแตกตัวอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความดันภายในของของเหลว ทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาจำนวนมาก โดยการยุบแตกตัวของฟองอากาศขนาดเล็กจะเกิดขึ้นพร้อมกันเป็นล้าน ๆ จุดภายในถึงปฏิกรณ์จึงทำให้ ณ จุดที่เกิดการ

ยุบแตกตัวมีพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาสูง ส่งผลให้ของเหลวมีความดันและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้มีการประมาณการว่าความดันและอุณหภูมิของของเหลว ณ จุดยุบแตกตัวจะมีค่าสูงถึง 100 - 1,000 บาร์ และ 1,000 - 10,000 เคลวิน ตามลำดับ [2] จากลักษณะของปรากฏการณ์คาวิเทชันภายในถึงปฏิกรณ์เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะไปช่วยเร่งให้การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification Reaction) มีความสมบูรณ์และเกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่ได้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากงานวิจัยของผู้วิจัยเอง [11, 12] และ Ghayal และคณะ [7] พบว่าการนำเอาถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชันมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนอกจากจะช่วยเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลที่ได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นแล้วยังทำให้เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลงอีกด้วย รวมไปถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตก็ลดลงด้วยเช่นกัน จากผลการวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการนำเอาถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชันมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาเป็นถึงปฏิกรณ์ทดแทนถึงปฏิกรณ์แบบใช้ใบกวน นอกจากนี้ถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชันยังมีข้อดีอื่น ๆ อีกนอกจากที่กล่าวมา เช่น ง่ายต่อการสร้าง มีราคาถูก และที่สำคัญคือสามารถขยายขนาดไปสู่การผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ จึงทำให้ถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเทชันได้รับความสนใจและนิยมนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลกันมากขึ้นในปัจจุบัน



อย่างไรก็ตามการนำถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตेशनมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล สิ่งหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือต้องใช้อุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตेशनที่สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิตेशनภายในถึงปฏิกรณ์ที่มีระดับความรุนแรงเพียงพอสำหรับทำให้อัตราการส่งถ่ายมวลระหว่างน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์เพิ่มมากขึ้นและไปช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการให้เกิดได้เร็วขึ้น ที่ผ่านมามีการวัดระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตेशनที่ระบบสร้างได้ภายในถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตेशनยังมีค่าระดับความรุนแรงต่ำเมื่อเทียบกับถึงปฏิกรณ์แบบคูลดิกคาวิตेशन (Acoustic Cavitation) [13] ทั้งนี้ระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตेशनที่เกิดขึ้นภายในถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตेशनจะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ส่งผลต่อสภาวะการปั่นป่วนและจำนวนของฟองอากาศที่เกิดในของเหลว โดยตัวแปรที่สำคัญประกอบไปด้วย ลักษณะทางโครงสร้างของถึงปฏิกรณ์ ขนาด และรูปทรงทางเรขาคณิตของอุปกรณ์เหนี่ยวนำ สภาวะในการทำงานและสมบัติของของเหลว จากตัวแปรข้างต้นได้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามปรับปรุงและเพิ่มระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตेशनที่เกิดขึ้นภายในถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตेशन ด้วยการหาขนาดและรูปทรงทางเรขาคณิตของอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตेशनที่เหมาะสม รวมไปถึงค่าความดันทางด้านเข้าด้วย

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบของอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตेशनที่เหมาะสมอยู่พอสมควร อาทิเช่น งานวิจัยของ Ozonek และ Lenik ที่ได้ทำการศึกษารูปแบบของแผ่นออริฟิซ (Orifice Plate)

ที่แตกต่างกันต่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตेशन เช่น ลักษณะ จำนวน ขนาด และการจัดเรียงของรูบนแผ่นออริฟิซ จากผลการศึกษาพบว่า รูปร่าง จำนวน ขนาดและการจัดเรียงของรูบนแผ่นออริฟิซมีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์คาวิตेशनภายในถึงปฏิกรณ์ [14] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Carpenter และคณะ ที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าของอุปกรณ์เหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ ต่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตेशनโดยพบว่าชนิดของอุปกรณ์เหนี่ยวนำที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตेशनที่เกิดขึ้นภายในถึงปฏิกรณ์ [15] ในปัจจุบันอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตेशनสำหรับถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตेशनที่นิยมใช้กันโดยส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด เช่น แผ่นออริฟิซ ท่อเวนจูร์และวาล์วทรอตหลัง เป็นต้น ซึ่งหากพิจารณาที่ข้อดีของอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตेशनชนิดต่าง ๆ จากที่กล่าวมาเมื่อเปรียบเทียบกับจะพบว่าแผ่นออริฟิซมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดกะทัดรัดเหมาะแก่การใช้งาน รวมไปถึงการสร้างและการติดตั้งทำได้ง่ายและที่สำคัญคือมีราคาถูก [3,13] จึงได้รับความนิยมนำมาเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตेशनในถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตेशनมากที่สุด

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำเอาแผ่นออริฟิซมาเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตेशनภายในถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตेशन โดยทำการศึกษาผลของรูปทรงทางเรขาคณิตของแผ่นออริฟิซและตัวแปรที่มีผลต่อสภาวะการไหลของของเหลวต่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตेशनภายในถึงปฏิกรณ์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบ

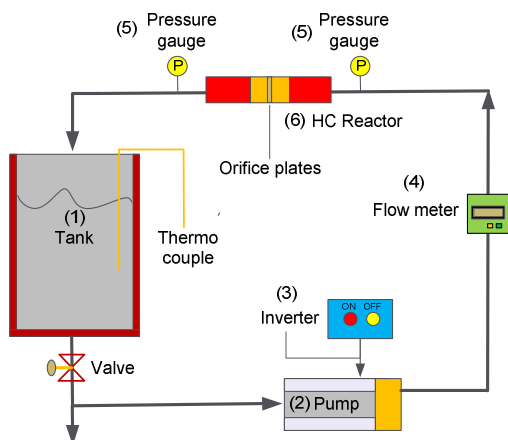


ของแผ่นออริฟิซที่เหมาะสมที่สุดในการเหนี่ยวนำให้เกิดควาวิตะชันภายในถังปฏิกรณ์สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการผลิตไบโอดีเซลต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

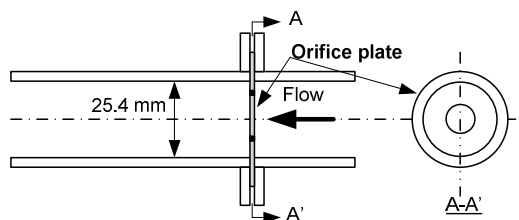
ชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชุดทดลองการเกิดปรากฏการณ์ควาวิตะชันแบบไฮโดรไดนามิกส์ควาวิตะชันโดยใช้แผ่นออริฟิซเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำให้เกิดควาวิตะชันภายในถังปฏิกรณ์ รายละเอียดของชุดทดลองแสดงดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ควาวิตะชัน

ชุดทดลองดังกล่าวประกอบด้วยอุปกรณ์หลักดังต่อไปนี้ (1) ถัง (Tank) ขนาด 50 ลิตร ทำจากเหล็กสแตนเลส (Stainless Steel) เกรด 301 โดยภายในถังติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) ชนิด K ตรงบริเวณจุดกึ่งกลางของถังเพื่อวัดอุณหภูมิของ

ของเหลวภายในถังที่กั้นถึงต่อท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ไปยัง (2) เครื่องสูบลของเหลว (Pump) แบบ Multi-Stage ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ 2 แรงม้า ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับทำหน้าที่สร้างความดันให้แก่ของเหลว โดยมี (3) อินเวอร์เตอร์ (Inverters) ทำหน้าที่ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ของเครื่องสูบลของเหลวเพื่อช่วยในการควบคุมความดันทางด้านเข้าของของเหลว และ (4) เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Meter) สำหรับวัดปริมาณของของเหลวที่ไหลเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (5) เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) แบบ Bourdon Pressure Gauge จำนวน 2 ตัวใช้วัดความดันที่ทางเข้าและทางออกจากถังปฏิกรณ์และ (6) ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ควาวิตะชัน (HC Reactor) โดยภายในถังปฏิกรณ์จะมีจุดสำหรับติดตั้งและเปลี่ยนแผ่นออริฟิซดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การติดตั้งแผ่นออริฟิซภายในถังปฏิกรณ์ [12]

2.2 แผ่นออริฟิซ

แผ่นออริฟิซที่ใช้เป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควาวิตะชันภายในถังปฏิกรณ์เป็นแผ่นออริฟิซแบบหลายรู (Multiple Holds Orifice) ทำมาจากเหล็กสแตนเลสเกรด 301 มีจำนวนทั้งสิ้น 5 แบบ ได้แก่ แบบ OP-1, OP-2, OP-3, OP-4 และ OP-5 โดยแต่ละแบบมีองค์ประกอบแตกต่างกัน เช่น ขนาด จำนวน รูปร่าง และรูปแบบของการจัดเรียงของรูบนแผ่นออริฟิซ



รายละเอียดต่าง ๆ ของแผ่นอริฟิซแต่ละแบบแสดงไว้ดังในตารางที่ 1

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในขั้นตอนของการทดลองเริ่มแรกแผ่นอริฟิซจะถูกนำมาติดตั้งเข้าไปในถังปฏิกรณ์ เมื่อติดตั้งแผ่นอริฟิซเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก่อนจะเริ่มทำการทดลองจะเติมของเหลวเข้าไปพักไว้ที่ถังบรรจุของเหลวจำนวน 30 ลิตร โดยของเหลวที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ น้ำ จากนั้นเปิดสวิตช์ที่กล่องควบคุมสำหรับจ่ายไฟให้กับเครื่องสูบลของเหลวและอินเวอร์เตอร์ ถัดมาเปิดเครื่องสูบลของเหลวเป็นเวลา 3 นาทีเพื่อให้น้ำเกิดการหมุนวนภายในระบบและเริ่มทำการทดลองโดยปรับอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องสูบลของเหลวเพื่อให้ น้ำมีความดันทางด้านเข้า (Inlet Pressure) เท่ากับ 1 บาร์ เมื่อได้ความดันตามที่ต้องการแล้วปล่อยให้ระบบทำงานเป็นเวลา 5 นาทีจึงเริ่มบันทึกค่าผลการทดลองต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) ของน้ำภายในถังบรรจุของเหลวความดันทางด้านออก (Upstream Pressure) และอัตราการไหล (Flow Rate) ของน้ำ หลังจากเก็บผลการทดลองเสร็จสิ้นแล้วให้ทำการทดลองเงื่อนไขต่อไป โดยการปรับเปลี่ยนค่าความดันทางด้านเข้าเป็น 2, 3 และ 4 บาร์ ตามลำดับ แล้วบันทึกผลการทดลอง ซึ่งผลการทดลองที่บันทึกจะถูกนำไปคำนวณหาตัวเลขคาวิเตชัน (Cavitation Number, C_v) ต่อไป จากนั้นทำการเปลี่ยนแผ่นอริฟิซเป็นแบบใหม่และทำการทดลองตามขั้นตอนต่าง ๆ ตามที่กล่าวมาในข้างต้น โดยในการศึกษาค้าง

นี้จะทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองเพื่อความถูกต้องของผลการทดลองที่ได้

2.4 การคำนวณตัวเลขคาวิเตชัน

ตัวเลขคาวิเตชัน (C_v) เป็นเทอมไร้มิติ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงสภาวะและระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิเตชันที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ โดยสามารถคำนวณหาได้ตามสมการที่ (1)

$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (1)$$

เมื่อ

C_v คือ ตัวเลขคาวิเตชัน

P_2 คือ ความดันทางด้านออกของแผ่นอริฟิซ (Pa)

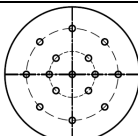
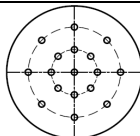
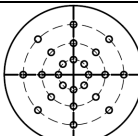
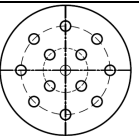
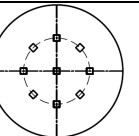
P_v คือ ความดันไอของของเหลว (Pa)

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

V_0 คือ ความเร็วของของเหลวที่ไหลผ่านแผ่นอริฟิซ (m/s)

ในการพิจารณาตัวเลขคาวิเตชันถ้าตัวเลขคาวิเตชันที่มีค่าต่ำแสดงว่ามีพลังงานสูงนั้นหมายความว่า จะมีระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิเตชันมาก โดยในทางทฤษฎี $C_v \leq 1$ แต่ในหลาย ๆ กรณีกลับพบว่า $C_v \geq 1$ ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น การมีก๊าซที่ไม่ละลายในของเหลวหรือความไม่บริสุทธิ์ของสารตัวกลาง อย่างไรก็ตามตัวเลขคาวิเตชันที่อยู่ระหว่างช่วง 0.05 - 1.5 ก็แสดงให้เห็นว่าสามารถเกิดปรากฏการณ์คาวิเตชันภายในถังปฏิกรณ์แล้ว [2]

ตารางที่ 1 ลักษณะของแผ่นอริฟิซแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์					
	OP-1	OP-2	OP-3	OP-4	OP-5
ขนาดของรู (mm)	2	2	2	3	2×2
จำนวนรู	15	17	24	13	9
พื้นที่การไหล (mm ²)	47.12	53.40	75.39	91.84	36
α (mm ⁻¹)	1.95	2	2	1.33	2
β (-)	0.093	0.105	0.148	0.181	0.007
ผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมด (mm)	94.24	106.81	150.79	122.46	72
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (mm)	25.4				
พื้นที่หน้าตัดของท่อ (mm ²)	506.45				

หมายเหตุ: α คือ อัตราส่วนของผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมด (mm) ต่อพื้นที่การไหล (mm²)

β คือ อัตราส่วนของพื้นที่การไหล (mm²) ต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อ (mm²)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 อุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนไป

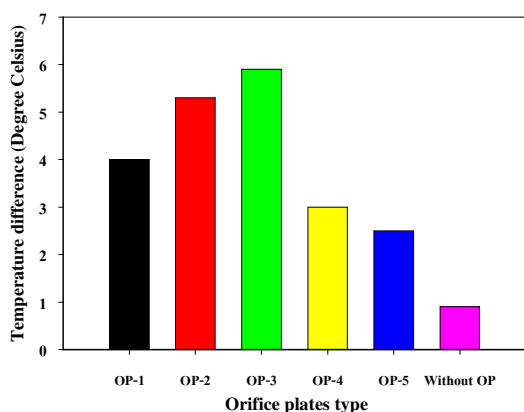
เนื่องจากปรากฏการณ์ควิเตชันที่เกิดขึ้นภายในถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์ควิเตชันไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นในเบื้องต้นจึงได้ทำการประเมินผลของการเกิดปรากฏการณ์ควิเตชันจากการพิจารณาค่าผลต่างของอุณหภูมิของน้ำ (Temperature Difference) เมื่อใช้แผ่นอริฟิซแบบต่าง ๆ เป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าการใช้แผ่นอริฟิซเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเตชันภายในถึงปฏิกรณ์สามารถทำให้เกิด

ปรากฏการณ์ควิเตชันได้เช่นเดียวกันกับกรณีของการใช้อุปกรณ์เหนี่ยวนำชนิดอื่น ๆ เช่น ท่อเวนจูรีและวาล์วทรอตทลิง เป็นต้น

รูปที่ 3 นำเสนอผลต่างของอุณหภูมิของน้ำจากสภาวะเริ่มต้นกับสภาวะสุดท้ายที่ใช้แผ่นอริฟิซแบบต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่าความดันทางดันทันเข้า 4 บาร์และเวลาในการทำให้เกิดปรากฏการณ์ควิเตชันผ่านไป 25 นาที ผลการทดลองพบว่าที่ทุกแบบของแผ่นอริฟิซที่ใช้ในการทดลองทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น โดยในกรณีของแผ่นอริฟิซแบบ OP-3 จะให้ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นอริฟิซแบบอื่น ๆ โดยมีผลต่างของอุณหภูมิของ



น้ำเท่ากับ 5.9 °C รองลงมาเป็นแผ่นออริฟิซแบบ OP-2, OP-1, OP-4 และ OP-5 ตามลำดับ นอกจากนี้ในการทดลองยังได้ทำการศึกษาในกรณีที่ไม่มีแผ่นออริฟิซ (Without OP) เป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำค่าวิตซ์อีกด้วยโดยพบว่าผลต่างของอุณหภูมิของน้ำมีค่าเท่ากับ 0.9 °C



รูปที่ 3 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิของน้ำเมื่อใช้แผ่นออริฟิซแบบต่าง ๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการที่อุณหภูมิของน้ำในสภาวะเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเมื่อมีการสูบน้ำหมุนวนในระบบเป็นเวลา 25 นาทีเป็นผลมาจากการเหนี่ยวนำให้เกิดปรากฏการณ์ค่าวิตซ์ของแผ่นออริฟิซ ไม่ได้เกิดจากการผสมกันของน้ำและการก่อวนในเครื่องสูบน้ำของเหลวแต่อย่างใด จึงเป็นการยืนยันได้ว่าแผ่นออริฟิซที่ใช้เป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำค่าวิตซ์ในงานวิจัยนี้สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ค่าวิตซ์ภายในถังปฏิกรณ์ได้และแผ่นออริฟิซที่ให้ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำสูงที่สุดเชื่อได้ว่าทำให้เกิดปรากฏการณ์ค่าวิตซ์ภายในถังปฏิกรณ์ที่มีระดับความรุนแรงมากที่สุดด้วยเช่นกันหากยังไม่พิจารณาที่

ค่าตัวเลขค่าวิตซ์ขึ้นทั้งนี้การที่อุณหภูมิของน้ำที่สภาวะเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความดันภายในของน้ำ ซึ่งเกิดจากการส่งของไหลผ่านแผ่นออริฟิซทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากมาย ต่อมาฟองอากาศจะมีการหดและขยายตัวจนสุดท้ายเกิดการระเบิดตัวของฟองอากาศโดยการระเบิดตัวดังกล่าวจะทำให้เกิดจุดความร้อน (Hot Spot) จำนวนมหาศาลภายในน้ำ จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์ในลักษณะดังกล่าวจะเป็นผลดีเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเพราะปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้องแต่ถ้าเป็นการใช้ถังปฏิกรณ์แบบไบกวนในขั้นตอนของการทำปฏิกิริยาจะต้องมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ก่อนเพื่อให้สารตั้งต้นทั้งสองมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะไปเกินค่าอุณหภูมิการระเหยตัวของแอลกอฮอล์ ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนในขั้นตอนของการทำปฏิกิริยาเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลลงได้

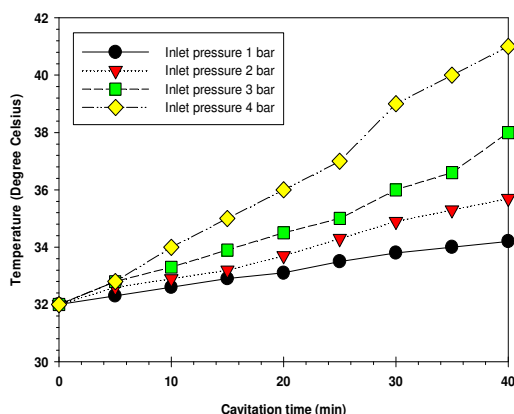
3.2 ผลของความดันทางด้านเข้าต่อตัวเลขค่าวิตซ์

ความดันทางด้านเข้าเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อสภาวะการไหลของของไหลและส่งผลกระทบต่อความรุนแรงของปรากฏการณ์ค่าวิตซ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่ค่าความดันทางด้านเข้า 1, 2, 3 และ 4 บาร์



โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกแผ่นออร์ฟิซที่เหมาะสมมากที่สุดสำหรับเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควาเฒันจากค่าตัวเลขควาเฒันที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (1)

รูปที่ 4 นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความดันทางด้านเข้ากับอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนไปเมื่อใช้แผ่นออร์ฟิซแบบ OP-3 เป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำให้เกิดควาเฒันภายในถังปฏิกรณ์



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของน้ำที่ความดันทางด้านเข้าต่าง ๆ เมื่อใช้แผ่นออร์ฟิซแบบ OP-3 เป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควาเฒัน

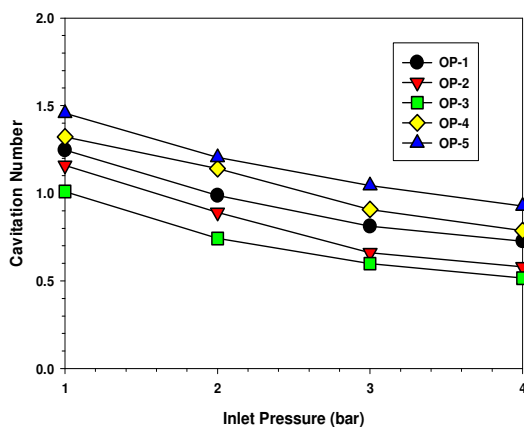
โดยในการทดลองได้เลือกแผ่นออร์ฟิซแบบ OP-3 เนื่องจากเป็นแผ่นออร์ฟิซที่ให้ระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาเฒันสูงที่สุดเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองในรูปที่ 3 ในขณะที่ผลการทดลองในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันทางด้านเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ค่าความดันทางด้านเข้า 4 บาร์ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำสูงกว่าที่ได้จากค่าความ

ดันทางด้านเข้าค่าอื่น ๆ ที่ทุกช่วงเวลาของการเกิดปรากฏการณ์ควาเฒัน ในทางตรงกันข้ามที่ความดันทางด้านเข้า 1 บาร์ กลับทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวทำให้เราทราบว่าค่าความดันทางด้านเข้ามีผลอย่างมากต่อค่าอุณหภูมิของน้ำซึ่งใช้เป็นตัววัดค่าระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาเฒันภายในถังปฏิกรณ์ในเบื้องต้น โดยผลการทดลองที่ได้ให้ผลการทดลองสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Manickam และ Pandit และ Bis และคณะ ที่พบว่าเมื่อค่าความดันทางด้านเข้าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิของของเหลวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [4, 16]

รูปที่ 5 แสดงผลของความดันทางด้านเข้าต่อตัวเลขค่าควาเฒันเมื่อใช้แผ่นออร์ฟิซแบบต่าง ๆ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความดันทางด้านเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวเลขควาเฒันมีค่าลดลงที่ทุกแบบของแผ่นออร์ฟิซ โดยที่ความดันทางด้านเข้า 4 บาร์ แผ่นออร์ฟิซแบบ OP-3 ให้ตัวเลขควาเฒันต่ำที่สุดซึ่งหมายความว่ามีความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาเฒันสูงที่สุดนั่นเอง รองลงมาเป็นแผ่นออร์ฟิซแบบ OP-2, OP-1, OP-4 และ OP-5 ตามลำดับ ในกรณีของแผ่นออร์ฟิซแบบ OP-3 ตัวเลขควาเฒันลดลงจาก 1.01 เป็น 0.52 เมื่อค่าความดันทางด้านเข้าเพิ่มขึ้นจาก 1 บาร์เป็น 4 บาร์ทั้งนี้การที่ความดันทางด้านเข้าเพิ่มขึ้นทำให้ตัวเลขควาเฒันลดลงเนื่องมาจากเมื่อความดันทางด้านเข้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วและอัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านแผ่นออร์ฟิซเพิ่มสูงขึ้นจึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความดันตกคร่อม (Pressure Drop) และจำนวนของไหลที่ถูกส่งผ่านเข้าไป จึงทำให้ตัวเลขควาเฒันมีค่า



ลดต่ำลง นอกจากนี้การลดลงของตัวเลขคาวิตีเซชันในกรณีที่ความดันทางด้านเข้าเพิ่มขึ้นยังเกิดจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนและอัตราการระเบิดตัวต่อเวลาของโพรงอากาศในของเหลวที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของแผ่นออร์ฟิซด้วย

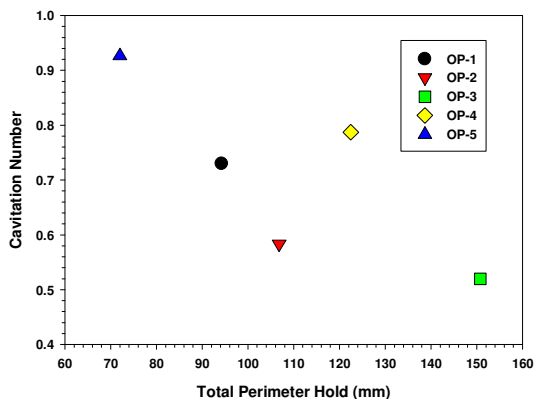


รูปที่ 5 ผลของความดันทางด้านเข้าต่อตัวเลขคาวิตีเซชันเมื่อใช้แผ่นออร์ฟิซแบบต่าง ๆ เป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตีเซชันภายในถังปฏิกรณ์

โดยผลการทดลองที่ได้ตามรูปที่ 5 มีความคล้ายคลึงกันกับผลการทดลองของ Chuah และคณะที่พบว่าเมื่อความดันทางด้านเข้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวเลขคาวิตีเซชันลดต่ำลง [17] และสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานที่ว่าถ้าผลต่างหรืออุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้นหมายถึงจะมีระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีเซชันสูงเป็นไปตามผลการทดลองในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความดันทางด้านเข้าที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือที่ความดันทางด้านเข้า 4 บาร์โดยให้ตัวเลขคาวิตีเซชันต่ำที่สุดที่ทุกแบบของแผ่นออร์ฟิซที่ใช้ในการทดลอง

3.3 ผลของรูปทรงทางเรขาคณิตของแผ่นออร์ฟิซต่อตัวเลขคาวิตีเซชัน

ผลของผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมด (Total Perimeter Hold) ต่อตัวเลขคาวิตีเซชันที่ความดันทางด้านเข้า 4 บาร์เมื่อใช้แผ่นออร์ฟิซแบบต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 6 ซึ่งในการทดลองนี้แผ่นออร์ฟิซมีค่าผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมดอยู่ระหว่าง 72 - 150.79 มิลลิเมตร โดยผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมดของแผ่นออร์ฟิซแบบ OP-1, OP-2, OP-3, OP-4 และ OP-5 มีค่า 94.24, 106.81, 150.79, 122.46 และ 72 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 6 ผลของผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมดต่อตัวเลขคาวิตีเซชันทดลองที่ความดันทางด้านเข้า 4 บาร์

จากผลการทดลองพบว่าแผ่นออร์ฟิซแบบ OP-3 ที่มีค่าผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมดมากที่สุด (150.79 มิลลิเมตร) ให้ตัวเลขคาวิตีเซชันต่ำที่สุดในขณะที่แผ่นออร์ฟิซแบบ OP-5 ที่มีค่าผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมดน้อยที่สุด (72 มิลลิเมตร) จะให้ตัวเลขคาวิตีเซชันสูงที่สุด หากพิจารณาระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีเซชันในกรณีของแผ่น

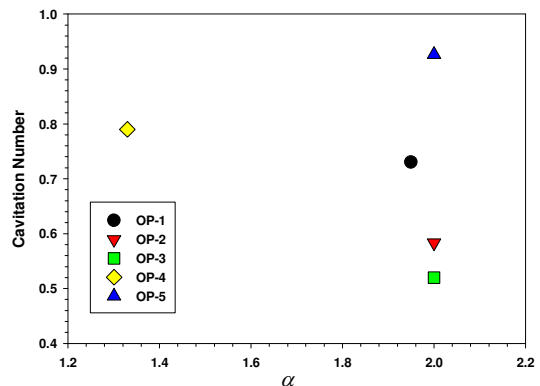


ออร์ฟิชที่มีรูปร่างเป็นวงกลม (แผ่นออร์ฟิชแบบ OP-1, OP-2, OP-3 และ OP-4) จะพบว่าแผ่นออร์ฟิชแบบที่มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร (แบบ OP-1, OP-2 และ OP-3) ให้ตัวเลขคาวิตีเตชันต่ำกว่าแผ่นออร์ฟิชแบบที่มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร (แบบ OP-4) นั้นหมายความว่าแผ่นออร์ฟิชที่มีรูปร่างวงกลมที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีเตชันมากกว่าแผ่นออร์ฟิชที่มีรูปร่างวงกลมที่มีขนาดใหญ่ ในขณะที่หากพิจารณาเฉพาะกลุ่มของแผ่นออร์ฟิชแบบที่มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร จะเห็นว่าตัวเลขคาวิตีเตชันมีแนวโน้มลดลงเมื่อผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามค่าผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับ รูปร่าง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและจำนวนของรูบนแผ่นออร์ฟิชด้วย ดังนั้นถึงแม้แผ่นออร์ฟิชที่มีค่าผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมดมากก็ไม่ชัดเจนว่าจะสามารถเหนี่ยวนำให้มีระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีเตชันสูงเสมอไปได้ จึงต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ประกอบด้วย

รูปที่ 7 แสดงผลของค่าตัวแปร α ต่อตัวเลขคาวิตีเตชันที่ความดันทางด้านเข้า 4 บาร์ โดยทดลองที่ค่าตัวแปร α มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.33 - 2 mm⁻¹ จากผลการทดลองพบว่าแผ่นออร์ฟิชกลุ่มที่มีรูปร่างแบบวงกลม (OP-1, OP-2, OP-3 และ OP-4) จะทำให้ตัวเลขคาวิตีเตชันมีค่าลดลง เมื่อค่าตัวแปร α มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กรณีแผ่นออร์ฟิชที่มีรูปร่างเป็นแบบสี่เหลี่ยม (OP-5) ถึงแม้ค่าตัวแปร α จะมีค่าสูง ($\alpha = 2$ mm⁻¹) แต่ก็ไม่ได้ส่งผลต่อการลดลงของตัวเลขคาวิตีเตชันเลย อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่

แผ่นออร์ฟิชส่วนใหญ่ที่ใช้ในการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าค่าตัวแปร α มีผลต่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีเตชันอยู่ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ozonak และ Lenik [14]



รูปที่ 7 ผลของตัวแปร α ต่อตัวเลขคาวิตีเตชันทดลองที่ความดันทางด้านเข้า 4 บาร์

ทั้งนี้จากรูปที่ 7 แผ่นออร์ฟิชแบบ OP-3 ($\alpha = 2$ mm⁻¹) จะให้ตัวเลขคาวิตีเตชันต่ำที่สุด รองลงมาเป็นแผ่นออร์ฟิชแบบ OP-2 ($\alpha = 2$ mm⁻¹), OP-1 ($\alpha = 1.95$ mm⁻¹), OP-4 ($\alpha = 1.33$ mm⁻¹) และ OP-5 ($\alpha = 2$ mm⁻¹) ตามลำดับ นั้นหมายความว่าแผ่นออร์ฟิชแบบ OP-3 จะเหนี่ยวนำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิตีเตชันที่ระดับความรุนแรงมากที่สุดนั่นเอง อย่างไรก็ตามถ้าหากพิจารณาแผ่นออร์ฟิชที่มีค่าตัวแปร α เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน (OP-1, OP-2, OP-3 และ OP-5) จะเห็นว่าแผ่นออร์ฟิชที่มีจำนวนรูมากและขนาดรูที่เล็กกว่าจะให้ตัวเลขคาวิตีเตชันต่ำที่สุดทั้งนี้ค่าตัวแปร α เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับจำนวนและขนาดของรู [7] ดังนั้นในกรณีนี้แผ่นออร์ฟิชที่มีจำนวนรูและมีขนาดของรูเล็ก (ค่าตัวแปร α สูง) จึงให้ตัวเลข

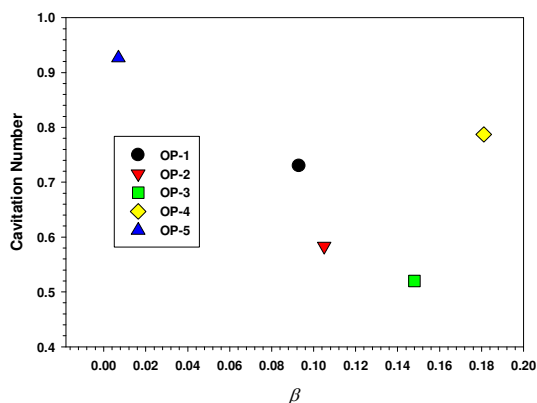


คาวิตีชันต่ำ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซจะทำให้จำนวนของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นนั่นเอง [6]

ค่าตัวแปร β เป็นค่าที่มีผลต่อความถี่ของการปั่นป่วนและขนาดของการเปลี่ยนแปลงความดันที่ก่อให้เกิดการปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์ ในการทดลองเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นออริฟิซที่มีค่าตัวแปร β แตกต่างกันอยู่ในช่วงระหว่าง 0.007 - 0.181 จากรูปที่ 8 นำเสนอผลของค่าตัวแปร β ต่อตัวเลขคาวิตีชันที่ความดันทางด้านเข้า 4 บาร์ จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าตัวแปร β มีผลทำให้ตัวเลขคาวิตีชันลดต่ำลงในช่วงของค่าตัวแปร β เท่ากับ 0.007 (OP-5) จนถึงค่าตัวแปร β เท่ากับ 0.148 (OP-3) จากนั้นตัวเลขคาวิตีชันจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.79 เมื่อใช้แผ่นออริฟิซแบบ OP-4 ($\beta = 0.181$) ทั้งนี้จะเห็นว่าแผ่นออริฟิซแบบ OP-3 จะให้ตัวเลขคาวิตีชันต่ำสุดคือ 0.52 ในขณะที่แผ่นออริฟิซแบบ OP-5 ซึ่งเป็นแผ่นออริฟิซที่มีค่าตัวแปร β ต่ำที่สุดจะให้ตัวเลขคาวิตีชันสูงที่สุดเท่ากับ 0.93 ซึ่งหมายความว่ามึระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีชันน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้แผ่นออริฟิซแบบ OP-4 ($\beta = 0.181$), OP-1 ($\beta = 0.093$), OP-2 ($\beta = 0.105$) และ OP-3 ($\beta = 0.148$) ตามลำดับ โดยผลการทดลองที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Carpenter และคณะ [15]

อย่างไรก็ตาม ค่าตัวแปร β จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของรูบนแผ่นออริฟิซ แต่ทั้งนี้จะต้องพิจารณาที่จำนวนของรูประกอบด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีแผ่นออริฟิซแบบ OP-3 ถึงแม้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูน้อยกว่าแผ่นออริฟิซแบบ OP-4 แต่กลับพบว่า

จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซมากกว่าจึงทำให้การเหนี่ยวนำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิตีชันมีระดับความรุนแรงมากกว่า เนื่องมาจากการที่มีจำนวนรูมากจะทำให้พื้นที่ชั้นเฉือน (Shear Layer Area) มีค่ามากและผลที่ได้คือการทำให้เกิดโพรงอากาศในของเหลวมีจำนวนมากขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดการระเบิดตัวของโพรงอากาศในหลาย ๆ จุดพร้อมกันระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีชันจึงมีระดับความรุนแรงมากกว่านั่นเอง ดังนั้นการเลือกแผ่นออริฟิซที่มีค่าตัวแปร β สูงไปเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตีชันในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอาจจะต้องดูที่จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซประกอบด้วยเพื่อให้ได้ปรากฏการณ์คาวิตีชันที่มีระดับความรุนแรงสูงสำหรับไปช่วยในการผสมกันของสารละลายที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทำได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 8 ผลของตัวแปร β ต่อตัวเลขคาวิตีชันทดลองที่ความดันทางด้านเข้า 4 บาร์



4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้แผ่นออริฟิซเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตีชันภายในถังปฏิกรณ์ จากผลการทดลองยืนยันได้ว่าแผ่นออริฟิซที่นำมาทดลองสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิตีชันภายในถังปฏิกรณ์และมีระดับความรุนแรงเพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้ โดยมีตัวเลขคาวิตีชันที่ได้อยู่ในช่วงระหว่าง 0.52-1.46 ในส่วนของผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีชัน พบว่าความดันทางด้านเข้ามีผลอย่างมากต่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีชัน โดยพบว่าเมื่อความดันทางด้านเข้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีชันสูงขึ้นตามไปด้วยที่ค่าความดันทางด้านเข้า 4 บาร์จะทำให้เกิดความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีชันสูงที่สุดที่ทุก ๆ แบบของแผ่นออริฟิซ ในขณะที่ตัวแปรที่เกี่ยวข้องรูปทรงทางเรขาคณิตของแผ่นออริฟิซ ได้แก่ ผลรวมเส้นรอบรูปของรูทั้งหมด, ค่าตัวแปร α และค่าตัวแปร β ก็มีผลต่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิตีชันเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าแผ่นออริฟิซที่เหมาะสมสำหรับนำมาเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิตีชันภายในถังปฏิกรณ์คือแผ่นออริฟิซแบบ OP-3 ที่มีรูปร่างแบบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร มีจำนวนรูทั้งสิ้น 24 รู ให้ตัวเลขคาวิตีชันต่ำที่สุดเท่ากับ 0.52

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาบันวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชวงศ์สเปนที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ภายใต้โครงการทุนวิจัยประเภทอุดหนุนทั่วไป ประจำปีงบประมาณ 2559 และขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร. กุลเชษฐ เพียรทอง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่กรุณาให้คำแนะนำในการทำการทดลองและให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Rajoriya, J. Carpenter, V. Saharan, and A. Pandit, Hydrodynamic Cavitation: An Advanced Oxidation Process for The Degradation of Bio-Refractory Pollutants, Reviews in Chemical Engineering, 2016, 32(4), 379 – 411.
- [2] P.R. Gogate, Cavitation Reactors for Process Intensification of Chemical Processing Applications: A Critical Review, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, 47, 515 – 527.
- [3] P.R. Gogate and A.B. Pandit, A Review and Assessment of Hydrodynamic Cavitation as A Technology for The Future, Ultrasonics Sonochemistry, 2005, 12, 21 – 27.
- [4] S. Manickam and A. Pandit, Wastewater Treatment: A Novel Energy Efficient Hydrodynamic Cavitation Technique, Ultrasonics Sonochemistry, 2002, 9(3), 123 - 131.



- [5] L.F. Chuah, S. Yusup, A.R. Abd Aziz, A. Bokhari, and M.Z. Abdullah, Cleaner Production of Methyl Ester Using Waste Cooking Oil Derived from Palm Olein Using A Hydrodynamic Cavitation Reactor, *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112, 4505 – 4514.
- [6] J. Carpenter, M. Badve, S. Rajoriya, S. George, V. Saharan, and A. Pandit, Hydrodynamic Cavitation: An Emerging Technology for The Intensification of Various Chemical and Physical Processes in A Chemical Process Industry, *Reviews in Chemical Engineering*, 2016, 33(5), 433 – 468.
- [7] D. Ghayal, A.B. Pandit, and V.K. Rathod, Optimization of Biodiesel Production in a Hydrodynamic Cavitation Reactor Using Used Frying Oil, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20, 322 – 328.
- [8] G.L. Maddikeri, P.R. Gogate, and A.B. Pandit, Intensified Synthesis of Biodiesel Using Hydrodynamic Cavitation Reactors Based on The Interesterification of Waste Cooking Oil, *Fuel*, 2014, 137, 285 – 292.
- [9] 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*, 2008, 15, 188 – 194.
- [10] A. Pal, A. Verma, S.S. Kachhwaha, and S. Maji, Biodiesel Production Through Hydrodynamic Cavitation and Performance Testing, *Renewable Energy*, 2010, 35, 619 – 624.
- [11] I. Worapun and N. Amattirat, Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Hydrodynamic Cavitation Reactor, *The Journal of Industrial Technology*, 2019, 15(2), 55 – 69. (in Thai)
- [12] I. Worapun, K. Pianthong, and P. Thaiyasuit, Influence of Orifice Plates on Percentage of Methyl Ester in Synthesis Biodiesel Process Under Hydrodynamic Cavitation Conditions, *SWU Engineering Journal*, 2014, 9(2), 1 – 11. (in Thai)
- [13] L. Amin, P. Gogate, A. Burgess, and D. Bremner, Optimization of A Hydrodynamic Cavitation Reactor Using Salicylic Acid Dosimetry, *Chemical Engineering Journal*, 2010, 156, 165 – 169.
- [14] J. Ozonik and K. Lenik, Effect of Different Design Features of The Reactor on Hydrodynamic Cavitation Process, *Archives of Materials Science and Engineering*, 2011, 52, 112 – 117.
- [15] J. Carpenter, S. George, and V. K. Saharan, Low Pressure Hydrodynamic Cavitating Device for Producing Highly Stable Oil in Water Emulsion: Effect of Geometry and



Cavitation Number, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2017, 116, 97 – 104.

- [16] M. Bis, A. Montusiewicz, J. Ozoněk, and S. Pasieczna-Patkowska, Application of Hydrodynamic Cavitation to Improve The Biodegradability of Mature Landfill Leachate, Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 26, 378 – 387.
- [17] L.F. Chuah, J.J. Klemeš, S. Yusup, A. Bokhari, and M. M. Akbar, A Review of Cleaner Intensification Technologies in Biodiesel Production, Journal of Cleaner Production, 2017, 146, 181 – 193.