



การพัฒนาเทคนิคการวัดสำหรับการไหลสองเฟส
ระหว่างของเหลวและก๊าซ

**Development of Measurement Techniques
for Liquid-Gas Bubbly Flows**

โดย

อลงกรณ์ พิมพ์พิน
ณัฐเดช เพ็ญวรวงค์

โครงการวิจัยเลขที่ 113G-ME-2553
ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

มิถุนายน 2554

การพัฒนาเทคนิคการวัดสำหรับการไหลสองเฟส
ระหว่างของเหลวและก๊าซ

Development of Measurement Techniques
for Liquid-Gas Bubbly Flows

โดย

อลงกรณ์ พิมพ์พิน D.Eng. (The University of Tokyo)
ณัฐเดช เพ็องวรวงส์ D.Eng. (Tokyo Institute of Technology)

โครงการวิจัยเลขที่ 113-G-ME-2553
ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

มิถุนายน 2554

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปของรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2553 ในการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มนักวิจัยจาก Tokyo Institute of Technology ในการให้คำแนะนำและความร่วมมือในการสร้างอุปกรณ์ทดลองและการทำการทดลองบางส่วน ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยโดยเฉพาะในส่วนของการตั้งปัญหางานวิจัยซึ่งมีความสำคัญอย่างมาก ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร. ศุภวุฒิ จันทร์านวัฒน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อในการให้ยืมอุปกรณ์การทดลอง รวมทั้งนิสิตในระดับปริญญาโทและปริญญาตรีของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยเหลือในส่วนต่าง ๆ และทำให้การดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จผลดีเป็นอย่างดี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาอุปกรณ์วัดสำหรับการไหลแบบสองเฟสระหว่างของเหลวและก๊าซ โดยแบ่งเป็นสองส่วนคือ การศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับสำหรับการไหลสองเฟสในรูปแบบต่าง ๆ และการศึกษาผลของความเร็วและความเร่งของฟองอากาศต่อลักษณะสัญญาณของอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด ในงานวิจัยส่วนแรกได้ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับในการไหลรูปแบบต่าง ๆ ของฟองก๊าซในของเหลวได้แก่ การไหลแบบ wall-peak bubbly flow, core-peak bubbly flow และ flat-profile bubbly flow โดยใช้ transducer ท้ามุม 45 องศากับการไหลและใช้เทคนิคการวัดแบบ Wire Mesh Tomography เพื่อวัดสอบเทียบพารามิเตอร์ของของไหล จากผลการทดลองพบว่าพฤติกรรมของคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับมีความแตกต่างกันสำหรับการไหลในรูปแบบต่าง ๆ และมีลักษณะที่สอดคล้องกับข้อมูลที่วัดได้จากเทคนิค Wire Mesh Tomography ดังนั้นการใช้คลื่นเหนือเสียงจึงมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเพื่อวัดพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟสได้ สำหรับการศึกษาในส่วนที่สองเป็นการใช้ระบบเลเซอร์ไดโอดควบคู่กับกล้องวีดีโอเพื่อวัดสอบเทียบความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศรูปครึ่งทรงกลม ซึ่งมีขนาดรัศมีความโค้งเท่ากับ 3.25, 4.75, 7.5, 8.25, และ 11 mm ชุดแบบจำลองฟองอากาศที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าได้ถูกใช้สำหรับการสอบเทียบในการทดลองที่เป็นการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งมีความเร็วในช่วงประมาณ 0.3-1 m/s ผลการทดลองแสดงว่าลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction ของทุกขนาดของแบบจำลองฟองอากาศและความเร็วของการเคลื่อนที่จะมีแนวโน้มเดียวกัน ซึ่งค่า Normalized voltage จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและอัตราการลดลงนี้จะเริ่มช้าลงในช่วงท้าย นอกจากนี้แบบจำลองที่มีขนาดรัศมีความโค้งเล็กจะมีลักษณะการลดลงของ Normalized voltage ช้ากว่าแบบ Normalized time เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดสอดคล้องกับผลการสอบเทียบแบบสถิตในปีแรก ชุดทดลองที่ขับเคลื่อนด้วยสปริงได้ถูกใช้เพื่อสอบเทียบในการทดลองที่เป็นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง โดยความเร่งที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วงระหว่าง 10-20 m/s² ผลการทดลองแสดงว่าความเร่งของการเคลื่อนที่ต้องมีค่ามากถึงระดับหนึ่งจึงจะสามารถตรวจวัดได้ โดย Normalized voltage จะลดลงช้ากว่าแบบ Normalized time เมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในตอนท้ายได้นำอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดไปวัดการไหลแบบสองเฟสจริง จากผลการศึกษาทั้งหมดได้แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้อุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดที่พัฒนาขึ้นเพื่อตรวจสอบว่าฟองอากาศกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ได้

Abstract

This study aims to develop the measurement techniques for liquid-gas bubbly flows. Two experiments are set up in order to investigate the effects of two phase gas-liquid flow patterns on the reflected ultrasonic wave characteristics and the effect of speed and acceleration of air bubble motion on the laser-diode system's output signals. In the first experiment, Wire mesh tomography technique is employed as the calibrator for 45° inclined ultrasonic transducer in wall-peak bubbly flow, core-peak bubbly flow, and flat-profile bubbly flow. The results show that the reflected patterns of ultrasonic waves are varied for different flow patterns that imply the feasibility of use of the ultrasonic wave technique as the measuring device for examining characteristics of two phase gas-liquid flows. In the second experiment, the velocity and acceleration of semi-spherical air bubble model motion are calibrated with laser-diode system and video camera. The radius of curvature of the bubble model is varied as 3.25, 4.75, 7.5, 8.25 and 11 mm. The constant velocity is created in the range of 0.3-1 m/s using DC motor driven setup, and the laser-diode system's output signal is obtained. The results show that the relationship between Normalized voltage and Time fraction are the same for all bubble models and velocities. In addition, the decrement of the Normalized voltage first occurs rapidly along the increment of Time fraction, and becomes more slowly at the end. In addition, the relationship between Normalized voltage and Normalized time indicates that the decrement of the Normalized voltage for smaller bubble is slower than that of larger bubble. All results are agreed well with the static calibration in previous study. After that, the spring and translating cart setup is used to create the acceleration motion of the bubble models as well as the signal of laser-diode system is examined in the range of acceleration between 10-20 m/s². From our experiments, it shows that the acceleration must be high enough in order to extinguish the effects of accelerated motion from the constant speed motion, and the results show that the Normalized voltage decrement slightly retards along the increment of Time fraction for the accelerated motion. At the end, the laser-diode system is employed to examine the signals from real bubbly flows. It shows the feasibility of use of the laser-diode system for examining whether the bubble motion is a constant speed or acceleration motion.

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 Wire Mesh Topography.....	1
1.2 เลเซอร์ไดโอด.....	3
1.3 แนวทางของการทำงานวิจัยและวัตถุประสงค์.....	5
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	5
1.5 หลักการของเทคนิคการวัด.....	5
1.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่ นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	8
1.8 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย.....	8
1.9 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล.....	8
บทที่ 2 Wire Mesh Topography	9
2.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	9
2.2 ผลการทดลอง.....	12
2.3 สรุปผลการวิจัย	24
บทที่ 3 เลเซอร์ไดโอด	25
3.1 การสอบเทียบเครื่องมือวัดกับแบบจำลองฟองอากาศ.....	25
3.2 การศึกษาอัตราการไหลของฟองอากาศจริง.....	47
3.3 สรุปผลการวิจัย.....	50
บทที่ 4 สรุปผลการศึกษา	52
บรรณานุกรม	55
ประวัตินักวิจัย	58

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อมูล Transducer.....	12
ตารางที่ 2.2 ข้อมูล Pulser.....	12
ตารางที่ 2.3 ข้อมูล Receiver.....	12
ตารางที่ 2.4 ข้อมูล digital oscilloscope.....	12
ตารางที่ 2.5 เงื่อนไขการไหลในการทดลอง.....	13
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอดที่ใช้สำหรับการทดลอง (EPIGAP).....	29
ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองและรูปร่างฟองอากาศที่เกิดขึ้น.....	48

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของชุดทดลองที่ใช้จำลองการไหล; (ก) ชุดทดลองโดยรวม (ข) ส่วนควบคุมขนาดฟองอากาศ.....	10
รูปที่ 2.2	รูปถ่าย Wire Mesh Sensor (WMS); (ก) ภาพหน้าตัดแสดง ชุดเส้นลวดเซนเซอร์ (ข) ภาพด้านข้างแสดงสัดส่วนของชุดเซนเซอร์	10
รูปที่ 2.3	ภาพถ่ายอุปกรณ์ทดลอง; (ก) เซนเซอร์สำหรับคลื่นเหนือ เสียง (ข) ultrasonic pulse/receiver (ค) ออสซิลอสโคป.....	11
รูปที่ 2.4	ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองเซนเซอร์และคลื่น เหนือเสียง.....	11
รูปที่ 2.5	รูปถ่ายลักษณะการไหลของกรณี $Re_{main}=4000$ $Re_{sub}=4000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s.....	14
รูปที่ 2.6	Local void fraction ของ $Re_{main} = 4000$ $Re_{sub} = 4000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s.....	14
รูปที่ 2.7	ตัวอย่างของข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่เวลาต่างๆในเงื่อนไขการไหลแบบ $Re_{main}=4000$ $Re_{sub}=4000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s.....	15
รูปที่ 2.8	ตัวอย่างของ Spatio-temporal reflected ultrasonic ในเงื่อนไขการไหลแบบ $Re_{main}=4000$ $Re_{sub}=4000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s; (ก)-(ข) สัญญาณของการ ไหลสองเฟส (ค) สัญญาณของการไหลเฟสเดียว.....	16
รูปที่ 2.9	รูปถ่ายแสดงลักษณะการไหลของกรณี $Re_{main}=8000$ $Re_{sub}=0$ และ $J_G = 0.00219$ m/s.....	17
รูปที่ 2.10	Local void fraction ของ $Re_{main} = 8000$ $Re_{sub} = 0$ และ $J_G = 0.00219$ m/s.....	17
รูปที่ 2.11	ตัวอย่างของข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่เวลาต่าง ๆ ในเงื่อนไขการไหลแบบ $Re_{main}=8000$ $Re_{sub}=0$ และ $J_G = 0.00219$ m/s.....	18
รูปที่ 2.12	ตัวอย่างของ Spatio-temporal reflected ultrasonic ในเงื่อนไขการไหลแบบ $Re_{main}=8000$ $Re_{sub}=0$ และ $J_G = 0.00219$ m/s; (ก) – (ข)สัญญาณของการไหล สองเฟส (ค) สัญญาณของการไหลเฟสเดียว.....	19
รูปที่ 2.13	รูปถ่ายแสดงลักษณะการไหลของกรณี $Re_{main}=7000$ $Re_{sub}=1000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s.....	20
รูปที่ 2.14	Local void fraction ของ $Re_{main} = 7000$ $Re_{sub} = 1000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s.....	20

รูปที่ 2.15 ตัวอย่างของข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่เวลาต่าง ๆ ในเงื่อนไขการไหลแบบ Re _{main} =7000 Re _{sub} =1000 และ J _G = 0.00219 m/s.....	21
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของ Spatio-temporal reflected ultrasonic ในเงื่อนไขการไหลแบบ Re _{main} =7000 Re _{sub} =1000 และ J _G = 0.00219 m/s; (ก)-(ข) สัญญาณของการ ไหล สองเฟส (ค) สัญญาณของการไหลเฟสเดียว.....	22
รูปที่ 2.17 ผลของ Spatio-temporal reflected ultrasonic of bubbly flow; (ก) wall peak (ข) flat profile (ค) core peak (ง) การไหลเฟสเดียว (สีแสดงความ เข้มของสัญญาณ).....	23
รูปที่ 3.1 ชุดลองสำหรับการสอบเทียบที่ความเร็วและความเร่งต่าง ๆ ของการเคลื่อนที่ ของฟองอากาศจำลอง; (ก) การทดลองด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและ สายพาน (ข) การทดลองด้วยระบบสปริง.....	26
รูปที่ 3.2 ลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอด เมื่อฟอง อากาศเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ.....	27
รูปที่ 3.3 แผ่นผังของวงจรโฟโตไดโอดที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยโฟโตไดโอด ตัวต้านทาน และแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง.....	29
รูปที่ 3.4 แบบจำลองของฟองอากาศที่ใช้ในการทดลอง; (ก)-(ข) ลักษณะโครงสร้าง แบบจำลองฟองอากาศ (ค)-(ง) การติดตั้งแบบจำลองฟองอากาศในการ ทดลองสอบเทียบ.....	31
รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายอุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยแบบจำลองฟองอากาศ เลเซอร์ และ โฟโตไดโอด และฐานรางเลื่อนที่ควบคุมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า	31
รูปที่ 3.6 ความเร็วของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศของทุกกรณี ความต่างศักย์ต่าง ๆ.....	33
รูปที่ 3.7 ลำดับภาพถ่ายการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศจากด้านบน (30 เฟรมต่อวินาที).....	34
รูปที่ 3.8 การลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากอุปกรณ์วัดเมื่อป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้า ขนาดต่าง ๆ ไปสู่มอเตอร์ สำหรับแบบจำลองฟองอากาศ ที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm.....	34
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction สำหรับ แบบจำลองฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm.....	35
รูปที่ 3.10 ผลการทดลองจากการสอบเทียบแบบสถิตจากการศึกษาในปีที่หนึ่ง; (ก) Normalized voltage VS Normalized distance ด้วยระยะทางจน ความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงเป็นศูนย์ (ข) Normalized voltage VS Normalized distance ด้วยขนาดของรัศมีความโค้ง.....	36
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time สำหรับแบบจำลองฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm.....	37

รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction สำหรับ ทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ต่าง ๆ (Variation ของ Normalized voltage = ± 0.1).....	38
รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time สำหรับทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศและการเคลื่อน ที่ด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ.....	39
รูปที่ 3.14 Normalized voltage และ Time fraction สำหรับแบบจำลองฟอง อากาศขนาด 3.25 mm ที่ควบคุมด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ เปรียบเทียบกับกรณีที่เปลี่ยนแปลง ± 1 และ ± 2 Volt/s.....	41
รูปที่ 3.15 ลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จำลองขึ้นมาสำหรับการเคลื่อนที่ ด้วยความเร่ง เปรียบเทียบกับสัญญาณเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ จากการทดลอง.....	42
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction ของสัญญาณที่ จำลองขึ้นมาสำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เปรียบเทียบกับกรณีที่ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่จากการทดลอง.....	43
รูปที่ 3.17 สปริงขนาดและแบบต่าง ๆ และผลการทดลองวัดค่าคงที่สปริง (Spring stiffness, k).....	44
รูปที่ 3.18 ภาพแสดงลำดับการเคลื่อนที่ของล้อย่นที่บรรทุกแบบจำลองฟองอากาศ มีขนาดรัศมีความโค้ง 11 mm.....	45
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction สำหรับ การเคลื่อนที่ด้วยความเร่งโดยมีขนาดของรัศมีความโค้งเท่ากับ 3.25 mm เปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบที่ความเร็วคงที่.....	46
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction สำหรับ การเคลื่อนที่ด้วยความเร่งโดยมีขนาดของรัศมีความโค้งเท่ากับ 11 mm เปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบที่ความเร็วคงที่.....	47
รูปที่ 3.21 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ; (บน) วงรีอัตราส่วนน้อย (ล่าง) วงรีและ ทรงกลม.....	49
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ Normalized voltage และ Time fraction สำหรับ การทดลองต่าง ๆ	49

บทที่ 1

บทนำ

การไหลสองเฟสในท่อที่มีทั้งฟองก๊าซและของเหลวสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในกระบวนการผลิตและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในหลายภาคส่วนของอุตสาหกรรม เช่น การเปลี่ยนเฟสของน้ำหล่อเย็นใน nuclear reactor การเปลี่ยนเฟสใน absorption refrigeration การเกิดก๊าซใน chemical reactor และการเปลี่ยนเฟสของสารทำความเย็นในฮีวโปเรเตอร์ของเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น โดยนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรต้องมีความรู้ความเข้าใจพื้นฐานสำหรับการไหลแบบสองเฟสเพื่อช่วยในการออกแบบระบบต่าง ๆ รวมทั้งปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

ความรู้ความเข้าใจของการไหลสองเฟสนี้สามารถศึกษาวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการไหลและทำความเข้าใจฟิสิกส์ของการไหล โดยมีข้อจำกัดตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และความสามารถในการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งต้องมีสมรรถนะสูงเพียงพอ สำหรับการศึกษากฎวิธีการหนึ่งคือ การจำลองการไหลขึ้นมาในห้องปฏิบัติการและทำการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการไหลที่สนใจโดยตรงเพื่อสังเกตพฤติกรรมและพยายามทำความเข้าใจฟิสิกส์ของการไหล โดยวิธีการนี้มีข้อจำกัดในเรื่องเทคนิคการวัดและความสามารถในการจำลองการไหลที่จะสร้างขึ้นมาได้ ถึงแม้ว่าการศึกษาดูด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะดูเหมือนว่ามีความสะดวกและทำได้รวดเร็วกว่า แต่ก่อนที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจะสามารถเชื่อมั่นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้นั้น ผลการคำนวณจะต้องถูกนำไปเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ของการไหลที่วัดได้มาจากการทำการทดลอง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นเสียก่อน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่างานทั้งสองส่วนมีความสำคัญเท่า ๆ กันและมีความเกี่ยวข้องแยกจากกันไม่ได้ ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการวัดใหม่ ๆ สำหรับวัดพารามิเตอร์ของการไหลให้ได้หลากหลายและมีความแม่นยำดีขึ้นจึงได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรมาอย่างต่อเนื่อง

พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญเพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการไหลนี้มีจำนวนมาก เช่น อัตราส่วนปริมาตรฟองก๊าซต่อของเหลว ขนาดฟองก๊าซ ความเร็วของของไหลทั้งสองเฟส และพื้นที่ผิวของฟองก๊าซ เป็นต้น โดยที่ผ่านมามีเทคนิคการวัดหลายแบบได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวัดและศึกษาพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟสเหล่านี้ เทคนิคเหล่านั้นได้แก่ optical method, probe method, X-ray method, PIV, PTV รวมถึง Wire Mesh Tomography โดยแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียและความสามารถในการวัดพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้ในเบื้องต้นจะมุ่งเน้นพัฒนาเทคนิค Wire Mesh Tomography และเลเซอร์ไดโอด โดยมีรายละเอียดของแต่ละหลักการดังนี้

1.1 Wire Mesh Tomography

สำหรับเทคนิคการวัดแบบวิธี Wire Mesh Tomography (WMT) เป็นเทคนิคการวัดที่ได้เริ่มทำการศึกษาและพัฒนาในโครงการวิจัยนี้ไปบ้างแล้ว (อลงกรณ์ และ ญัฐเดช 2553) ซึ่งเทคนิคการวัดนี้ใช้หลักการของการวัดความแตกต่างของการนำไฟฟ้าของของเหลวและก๊าซแต่ละชนิดที่มีค่าไม่เท่ากัน

ดังนั้นเมื่อขดลวดที่เป็นขั้วคาโทดและแอโนดถูกสร้างให้ซ้อนกันด้วยความละเอียดสูงในลักษณะที่คล้ายกับตาข่ายและนำไปวางขวางการไหล จะทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่าการไหลแบบสองเฟสนั้นมีส่วนไหนในหน้าตัดการไหลบ้างที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ และจากข้อมูลที่ได้ ผู้ทดลองจะสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการไหลได้ โดยที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรได้พัฒนาเทคนิคการคำนวณค่าอัตราส่วนปริมาตรฟองก๊าซต่อของเหลว ขนาดฟองก๊าซ และความเร็วของฟองก๊าซในการไหลแบบสองเฟสและทดสอบความถูกต้องอย่างต่อเนื่อง และในโครงการวิจัยนี้ในปี 2552 ก็ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์รวมทั้งความรู้ในเรื่องเทคนิคการวัดและพัฒนาโปรแกรมการคำนวณหาพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟสนี้ไปแล้วเช่นเดียวกัน

ผลการศึกษาในโครงการปี 2552 เป็นดังนี้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณพารามิเตอร์จากข้อมูลที่บันทึกได้จาก WMT ได้ถูกพัฒนาขึ้น และนำผลคำนวณไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพโดยพารามิเตอร์ที่ศึกษานั้นประกอบด้วย local void fraction ความเร็วของฟองก๊าซ และขนาดฟองก๊าซ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่า ข้อมูล void fraction เฉลี่ยทั้งปริมาตรที่สนใจในช่วง void fraction ไม่เกิน 9% มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง $\pm 20\%$ ความเร็วฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งปริมาตรที่สนใจในช่วงระหว่าง 250-350 mm/s มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง $\pm 10\%$ และขนาดฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งปริมาตรที่สนใจในช่วงขนาดฟองก๊าซระหว่าง 2-8 mm มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง $\pm 20\%$ นอกจากนี้ การกระจายตัวของขนาดฟองก๊าซระหว่างวิธีการทั้งสองก็ถูกนำมาเปรียบเทียบกันอีกด้วย ซึ่งการกระจายตัวของขนาดฟองก๊าซจะมีความแตกต่างกันพอสมควรในบางสภาวะการไหล

ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล void fraction ขนาดฟองก๊าซ และการกระจายตัวของฟองก๊าซที่ได้จากวิธีการวัดนั้นมีสาเหตุหนึ่งมาจากปัญหาของค่า threshold ที่เหมาะสมในการแบ่งระหว่างฟองก๊าซและของเหลวในโปรแกรมการคำนวณ และการสมมติรูปร่างฟองก๊าซให้เป็นทรงกลมในการคำนวณซึ่งต่างกับรูปร่างในการไหลจริง จึงทำให้เกิดความแตกต่างของข้อมูลฟองก๊าซระหว่างการคำนวณและการวัด และจะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้น

นอกจากนั้น ผลกระทบของเครื่องมือวัดที่มีลักษณะขวางการไหลได้ถูกศึกษาในเบื้องต้น โดยผลกระทบที่เห็นเด่นชัด คือ การลดลงของความเร็วของฟองก๊าซ และการแตกออกของฟองก๊าซหลังจากผ่านลวดเซนเซอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสัญญาณที่ WMT พบว่าการแตกของฟองก๊าซและการลดลงของความเร็วฟองก๊าซนั้นไม่มีผลกับสัญญาณที่บันทึกได้มากนักในช่วงคุณสมบัติของการไหลที่พิจารณาอยู่

ถึงแม้ว่าเทคนิคการวัดแบบวิธี WMT เป็นเทคนิคการวัดที่ให้ข้อมูลได้หลายอย่างและบอกลักษณะการไหลบนตำแหน่งใด ๆ ในหน้าตัดการไหลได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ต้องมีการใส่อุปกรณ์วัดเข้าไปขวางการไหล มีการสร้างความปั่นป่วนให้กับการไหล และมีความยุ่งยากในการใช้งานโดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากต้องมีการเจาะท่อสำเลียงของไหลเพื่อสอดอุปกรณ์วัดเข้าไป และเซนเซอร์เองก็เปราะบางทำให้อาจจะไม่เหมาะสมกับสภาวะการไหลที่มีความดันและอุณหภูมิสูง ประกอบกับอุปกรณ์ประมวลผลที่ใช้ในเทคนิคการวัดแบบวิธี WMT นี้ยังมีราคาสูง เพราะต้องใช้ระบบประมวลผลความเร็วสูงเนื่องจากต้องประมวลผลที่รับจากเซนเซอร์ซึ่งมีเป็นจำนวนมาก

เมื่อพิจารณาจากความต้องการเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมที่ต้องหลีกเลี่ยงการใช้ อุปกรณ์วัดที่รบกวนการไหล เทคนิคการวัดแบบอื่น ๆ ที่ไม่รบกวนการไหล อุปกรณ์การวัดไม่ซับซ้อนและ มีความคงทนต่อการใช้งานที่สภาวะที่มีความดันและอุณหภูมิสูง จึงน่าจะมีความเหมาะสมมากกว่า ยกตัวอย่างเช่น เทคนิคการวัดอัตราการไหลโดยใช้หลักการความแตกต่างของความดันตกคร่อม วิธีการนี้เป็นเทคนิคการวัดซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการใช้งานในสภาวะที่มีความดันและอุณหภูมิสูง ตัวอย่างของ เครื่องมือวัดคือ venturi flow meter หรือ orifice flow meter เทคนิคการวัดเหล่านี้ไม่ซับซ้อน อุปกรณ์ ที่ใช้มีความทนทาน ไม่ต้องการซ่อมบำรุง อย่างไรก็ตามเทคนิคการวัดแบบนี้นิยมใช้กับของไหลเฟส เดียว สำหรับของไหลสองเฟสมีนักวิจัยได้ศึกษาการใช้เทคนิคการวัดแบบความดันตกคร่อมควบคู่กับการ ใช้เทคนิคการวัดแบบใช้รังสี เช่น การใช้รังสีแกมมา เป็นต้น เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลของ ของไหลสองเฟส อย่างไรก็ตามเทคนิคการวัดแบบใช้รังสีเป็นเทคนิคการวัดที่มีอันตรายต่อสุขภาพของ ผู้ใช้งาน จึงมีความพยายามในการใช้เทคนิคการวัดอื่น ๆ มาทดแทนข้อด้อยของเทคนิคการวัดแบบใช้ รังสี หนึ่งในหลายเทคนิคการวัดนั้นคือเทคนิคการวัดโดยใช้คลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic technique) ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเนื่องจากมีความปลอดภัย ไม่ต้องใส่อุปกรณ์วัดขวาง การไหล และราคาไม่แพง

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือการพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการไหลของของไหลสองเฟส โดยใช้เทคนิคแบบความดันตกคร่อมควบคู่กับเทคนิคการวัดโดยใช้คลื่นเหนือเสียง อย่างไรก็ตาม เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์หลัก จึงได้มีการแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอนประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟสกับพฤติกรรมของคลื่นเหนือเสียง ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟสกับพฤติกรรมของความดันตก คร่อมและคลื่นเหนือเสียง ขั้นตอนที่ 3 พัฒนาเทคนิคการวัดอัตราการไหลของไหลสองเฟสโดยการวัด ความดันตกคร่อมร่วมกับเทคนิคการวัดแบบคลื่นเหนือเสียงและเปรียบเทียบกับเทคนิคการวัดแบบวิธี WMT ในส่วนขั้นตอนสุดท้ายคือ การทดลองใช้เทคนิคการวัดแบบนี้กับลักษณะการไหลแบบต่าง ๆ เพื่อ ศึกษาความถูกต้องและเสถียรภาพ

เนื่องจากข้อจำกัดของระยะเวลา โครงการในปีนี้จะมุ่งเน้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการศึกษา ขั้นตอนที่ 1 เป็นหลักคือ การศึกษาความสัมพันธ์ของผลของพฤติกรรมของของไหลสองเฟสและคลื่น เหนือเสียงในเบื้องต้น

1.2 เลเซอร์ไดโอด

เทคนิคการวัดที่ไม่ต้องรบกวนการไหลอีกแบบหนึ่งที่ได้มีการศึกษาไปแล้วในปีแรกคือ การใช้เทคนิค ทางแสงโดยเป็นระบบที่ประกอบด้วยเลเซอร์และไดโอด ซึ่งได้ถูกพัฒนาเพื่อวัดรัศมีความโค้งของฟอง ก๊าซโดยอาศัยคุณสมบัติของการหักเหของเลเซอร์บนผิวรอยต่อระหว่างเฟสของของเหลวและก๊าซที่ไม่ เหมือนกันสำหรับรัศมีความโค้งของฟองก๊าซที่แตกต่างกัน โดยเทคนิคเลเซอร์ไดโอดนี้จะเหมาะสมกับ การไหลที่มีฟองก๊าซจำนวนน้อย

ผลการศึกษาแบบสถิตในปีแรกสามารถสรุปได้ดังนี้ แบบจำลองฟองอากาศที่ทำจาก โพลีเมอร์ Polydimethylsiloxane (PDMS) และมีขนาดรัศมีความโค้งต่าง ๆ ได้ถูกสร้างขึ้นและทำการทดสอบแบบ สถิตเพื่อหาการตอบสนองของอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดต่อรัศมีความโค้ง จากผลการสอบเทียบเมื่อทำการ

เลื่อนเลเซอร์ไดโอดเริ่มจากปลายยอดฟองอากาศไปยังตำแหน่งต่าง ๆ แล้วตรวจสอบสัญญาณของวงจรถ่วงเลเซอร์ไดโอด ทำให้ทราบว่าจะระยะจากปลายยอดฟองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงจนใกล้ศูนย์จะแปรผกผันกับขนาดของรัศมีความโค้งของผิวฟองอากาศ ซึ่งสามารถสร้างเป็นสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างระยะดังกล่าวและรัศมีความโค้งของผิวฟองอากาศได้ หลังจากนั้นหากนำเอากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะจากยอดฟองต่าง ๆ มาทำ normalization ด้วยความต่างศักย์ขาออกจากวงจรเมื่อลำเลเซอร์อยู่เหนือยอดฟอง และทำ normalization ระยะทางด้วยระยะทั้งหมดที่ความต่างศักย์ลดลงจนเป็นศูนย์แล้ว ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้ของทุกขนาดฟองอากาศจะสอดคล้องกันหมด ดังนั้นหากนำเอาอุปกรณ์ไปวัดในการไหลจริง ๆ สำหรับกรณีที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ลักษณะการลดลงของสัญญาณของทุกขนาดฟองอากาศก็จะสอดคล้องกันหมด (จากผลการทดลองจริงที่ไม่มีกรวัดตำแหน่งเปรียบเทียบ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลา ซึ่งหากความเร็วคงที่จะทำให้เวลาและระยะทางแปรผันโดยตรง)

ดังนั้นในเมืองต้นนี้ ผู้วิจัยคิดว่าจะสามารถใช้อุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดแบบลำแสงเดี่ยวในการวัดการไหลจริงได้ 4 แนวทางดังนี้คือ การตรวจสอบว่าขนาดฟอง (อัตราส่วนระหว่างขนาดฟองอากาศต่อขนาดลำแสงเลเซอร์) อยู่ในช่วงที่ทำการสอบเทียบหรือไม่ โดยดูจากข้อมูลความต่างศักย์ที่ลดลงตามเวลาที่ถูก normalization ด้วยช่วงเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์ว่าสอดคล้องเป็นแนวโน้มเดียวกันหรือไม่ หากผลการวัดสอดคล้องแล้ว จะสามารถใช้ตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับการไหลได้ หากแนวโน้มการลดลงของค่าความต่างศักย์มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามก็อาจจะเป็นไปได้ 2 ลักษณะคือ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดฟองหรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลในลักษณะที่มีความเร่งไม่เท่ากับศูนย์ หรือมีการเปลี่ยนแปลงทั้งสองอย่างพร้อมกัน

นอกจากนั้นสำหรับการไหลที่รู้ขนาดฟองค่อนข้างแน่นอน เช่น การไหลของฟองอากาศแบบ slug flow ในท่อ ซึ่งการไหลแบบนี้จะมีรัศมีความโค้งของฟองใกล้เคียงกับขนาดรัศมีของท่อ เมื่อใช้เลเซอร์ลำเดี่ยววัดอาจจะทราบความเร็วของไหลได้โดยดูจากเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ และสำหรับการไหลที่รู้ความเร็วฟองแน่นอน จะสามารถทราบขนาดของฟองอากาศได้ด้วยหลักการเดียวกัน อย่างไรก็ตามข้อสันนิษฐานเหล่านี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขว่าความเร็วของการไหลของฟองอากาศต้องมีค่าคงที่

ในส่วนของการศึกษาว่าเหตุใดการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์จึงมีแนวโน้มตามที่ได้จากการทดลอง ผู้วิจัยจึงพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับเรื่องแสงขึ้นมา และทำการเปรียบเทียบผลจากการศึกษาทั้งสองส่วน จากผลการเปรียบเทียบพบว่ากลไกหนึ่งที่น่าจะมีผลโดยตรงคือการที่ปลายยอดของฟองอากาศเคลื่อนที่บ่งลำเลเซอร์ที่ไปตกกระทบบนไดโอด สำหรับเลเซอร์ที่ไปตกกระทบที่ผิวฟองจะสะท้อนออกไปในทิศทางอื่น และมีพื้นที่ของลำเลเซอร์ส่วนหนึ่งที่ยังพุ่งไปตกบนโพโต้ไดโอด โดยลักษณะการลดลงของพื้นที่ส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานที่ไดโอดได้รับ และแนวโน้มของการลดลงของพื้นที่นี้จะแตกต่างกันสำหรับฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้งต่างๆ และมีลักษณะการลดลงสอดคล้องกับลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์จากการทดลอง

ในส่วนสุดท้าย ผู้วิจัยได้ลองสร้างการไหลของฟองอากาศจริงขึ้นมา แล้วใช้อุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดวัดเพื่อพิสูจน์แนวคิดเกี่ยวกับการใช้การวัดรัศมีความโค้งรวมทั้งความเร็วของการไหล หากทราบ

พารามิเตอร์อีกอันหนึ่งอยู่แล้ว ผลการทดลองพบว่าผลการวัดผิดไปจากพารามิเตอร์ของการไหลจริงมาก อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวอาจจะต้องควบคุมขนาดของฟองอากาศได้ไม่ตึงนัก และการไหลอาจจะมี ความเร็วค่อนข้างสูงมาก จากผลการศึกษาที่ผ่านมาแนวคิดที่ว่า ลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเป็นฟังก์ชันทั้งขนาดฟองอากาศและความเร็วของการไหล รวมทั้งความเร็วด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาในกรณีที่การเคลื่อนที่ของฟองอากาศมีความเร็วคงที่ เช่น การไหลในท่อที่มีความยาวมาก หากผู้ทดลองสามารถวัดความเร็วของฟองอากาศไปพร้อม ๆ กับการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ก็อาจจะทำให้อุปกรณ์นี้สามารถวัดขนาดฟองอากาศได้เลย

1.3 แนวทางของการทำงานวิจัยและวัตถุประสงค์

เนื่องจากความต้องการเครื่องมือวัดที่มีความเหมาะสมในการใช้งานในอุตสาหกรรมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการไหลของการไหลทั้งสองเฟสโดยใช้เทคนิคหลายแบบที่ไม่มีการรบกวนการไหลควบคู่กัน อาจเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาเครื่องมือวัดสำหรับการไหลสองเฟสให้มีความแม่นยำและเหมาะสมมากขึ้นได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเป้าหมายในระยะยาวไปที่การใช้เทคนิคการวัดความดันตกคร่อมควบคู่กันเทคนิคการวัดแบบวิธีใช้คลื่นเหนือเสียง และเทคนิคเลเซอร์ไดโอด โดยใช้เทคนิค Wire Mesh Tomography และกล้องวีดีโอเป็นอุปกรณ์วัดสอบเทียบ

เทคนิคที่กล่าวมานั้นยังพัฒนาได้ไม่สมบูรณ์และยังต้องการการพัฒนาต่อไปอีก โดยที่เทคนิค Wire Mesh Tomography จะต้องพัฒนาเทคนิคการคำนวณให้มีความแม่นยำมากขึ้น สำหรับเทคนิคเลเซอร์ไดโอด จะต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาแนวทางให้สามารถวัดความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซได้ และเทคนิคการวัดความดันตกคร่อมควบคู่กับเทคนิคการวัดแบบวิธีใช้คลื่นเหนือเสียงจะต้องศึกษาความสัมพันธ์ของสัญญาณของเทคนิคคลื่นเหนือเสียงกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการไหลในเบื้องต้นก่อน โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์ในปีนี้ดังนี้

1.3.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้อุปกรณ์คลื่นเหนือเสียงศึกษาผลของพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟส โดยอาศัยการวัดแบบ Wire Mesh Tomography เป็นอุปกรณ์สอบเทียบ

1.3.2 พัฒนาเทคนิคเลเซอร์ไดโอดเพื่อศึกษาผลของความเร็วและความเร่งของการไหลของฟองก๊าซต่อลักษณะของสัญญาณ และหาแนวทางในการนำอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดไปใช้งานจริง

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1.4.1 พัฒนาเทคนิคการวัดแบบ Wire Mesh Tomography ในส่วนของโปรแกรมที่ใช้สำหรับคำนวณขนาดฟองก๊าซ ความเร็วฟองก๊าซ และอัตราส่วนปริมาตรฟองก๊าซต่อปริมาตรการไหล และใช้เป็นอุปกรณ์สอบเทียบเพื่อหาสัญญาณของคลื่นเหนือเสียงต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการไหลสองเฟส

1.4.2 พัฒนาเทคนิคเลเซอร์ไดโอด โดยศึกษาผลของความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศต่อลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าของวงจรวัดไดโอด

1.5 หลักการของเทคนิคการวัด

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้จะใช้ 4 เทคนิคการวัดดังที่กล่าวไว้ตอนต้น อย่างไรก็ตามในส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะหลักการที่เพิ่มเติมขึ้นมาจากการศึกษาในปีแรก ได้แก่ หลักการวัดความดันตกคร่อมและหลักการคลื่นเหนือเสียง สำหรับเทคนิคการวัดความดันตกคร่อมมีหลักการดังนี้ สำหรับพื้นที่หน้าตัดใน

ระบบการไหลที่ไม่เท่ากันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันสถิต โดยอัตราการไหลจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่เป็นฟังก์ชันของความดันตกคร่อม สัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงไป และค่าคงที่ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ทางกลศาสตร์การไหล โดยทั่วไปแล้วเทคนิคการวัดวิธีความดันตกคร่อมจะใช้อุปกรณ์ venturi เนื่องจากมีความดันตกคร่อมน้อย ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ระยะของทางเข้าและทางออก ขนาดของส่วนที่แคบที่สุดของ venturi ความหยาบของผิว และความดันตกคร่อม อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาหลักการวัดความดันตกคร่อมนี้จะไม่นำมาศึกษาในโครงการวิจัยนี้

หลักการของเทคนิคการวัดแบบวิธีใช้คลื่นเหนือเสียงคือ หลักการวัดตามกฎของการเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงในของไหลสองเฟส โดยวัดการส่งคลื่นเหนือเสียงผ่านของไหลสองเฟส เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งหน้าตัด และขนาดฟองก๊าซ เทคนิคการวัดแบบนี้ใช้อุปกรณ์ 2 ตัว ประกอบด้วย อุปกรณ์ส่งคลื่นเหนือเสียงและเซนเซอร์ที่รับคลื่นเหนือเสียง นอกจากนั้นยังต้องใช้ pulser-receiver เป็นอุปกรณ์กำหนดพลังงานคลื่นเหนือเสียงและรับสัญญาณที่จะนำไปบันทึกค่าสำหรับการวิเคราะห์ หลักการวัดตามกฎของการเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงในของไหลสองเฟสอาศัยการวัดการสะท้อนกลับของคลื่นเหนือเสียงผ่านเฟสของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป เทคนิคนี้มีการใช้งานแพร่หลายเช่น การวัดโพรงอากาศในของแข็ง (ตัวอย่าง เช่น Moussatov et al., 2001) หรือใช้ในการรักษาโรคบางชนิด (ตัวอย่าง เช่น Simon et al., 1993) เป็นต้น วิธีการนี้ค่อนข้างเป็นที่นิยมเนื่องจากอุปกรณ์ส่งและรับคลื่นเหนือเสียงสามารถประกอบด้วยกันในอุปกรณ์ตัวเดียวทำให้มีขนาดโดยรวมของอุปกรณ์วัดค่อนข้างเล็ก

เมื่อใช้เทคนิคเหล่านี้ร่วมกัน ความสามารถในการตรวจวัดพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟสจะมากขึ้น โดยแต่ละเทคนิคจะเหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมที่แตกต่างกัน ดังนั้นถ้าความรู้พื้นฐานสำหรับหลากหลายเทคนิคการวัดได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในกลุ่มวิจัยเดียวกันแล้ว เทคนิคการตรวจสอบการไหลแบบสองเฟสก็จะถูกพัฒนาขึ้นมาให้เหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมต่าง ๆ ได้ในอนาคต

1.6 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การทำความเข้าใจปรากฏการณ์ที่มีการไหลแบบสองเฟสมาเกี่ยวข้องนั้น จะต้องทราบพารามิเตอร์เป็นจำนวนมาก เช่น รูปแบบการไหล การกระจายของเฟสต่าง ๆ อัตราส่วนของปริมาณฟองก๊าซ พฤติกรรมการผสม ความเร็ว ตลอดจนขนาดและรูปร่างของฟองก๊าซ โดยที่รูปแบบการไหลของการไหลสองเฟสระหว่างของเหลวและก๊าซได้มีการรวบรวมไว้โดย Hewitt (1978) เป็นต้น นอกจากนั้นแล้ว ยังมีการศึกษาอีกจำนวนมากที่อธิบายกลไกที่สำคัญต่าง ๆ รวมทั้งการพัฒนาเทคนิคการวัดสำหรับงานทางวิศวกรรมในรูปแบบใหม่ ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของฟองก๊าซจะมีผลต่อความดันตกคร่อมในระบบท่อ โดย Tomiyama et al. (2002) การพัฒนาการของการไหลมีความสัมพันธ์กับการรวมกันและการแตกตัวของฟองก๊าซโดย Hibiki and Ishii (1999) การศึกษาผลของขนาดฟองก๊าซต่อความเป็นเทอเบิลเลนซ์ของการไหลโดย Kanshinsky et al. (1993) การศึกษาผลของพฤติกรรมของฟองก๊าซที่มีขนาดต่างกันต่อความเร็วในการลอยตัวโดย Prasser et al. (2002) ความเร็วในการลอยตัวของฟองก๊าซในของเหลวต่างชนิดโดย Acuña and Finch (2010) ความเร็วเชิงมุมของฟองก๊าซโดย Hoppe et al. (2010) รวมทั้งเทคนิคการวัดแบบใหม่เช่น การตรวจสอบขนาดฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในหัวฉีดของ

เครื่องพิมพ์ (printer) ด้วย Synchrotron X-ray โดย Kim et al. (2009) การวัดด้วยหลักการความจุไฟฟ้าสำหรับของเหลวที่ไม่นำไฟฟ้าโดย Hamidipour and Larachi (2010) และ Da Silva et al. (2010) และการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซด้วยกล้องความเร็วสูงแบบจมในของเหลวโดย Honkanen et al. (2010) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณา 4 เทคนิคคือ เทคนิค Wire Mesh Tomography เทคนิคการใช้คลื่นเหนือเสียง เทคนิควัดความดันตกคร่อม และเทคนิคเลเซอร์ไดโอด

วรรณกรรมที่สำหรับเกี่ยวข้องกับเทคนิคการวัดแบบวิธี Wire Mesh Tomography เริ่มจากการอธิบายส่วนประกอบและหลักการของเซนเซอร์ของ Prasser (1998) โดยใช้หลักการวัดความแตกต่างของความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันของก๊าซและของเหลว โดยก๊าซเกือบจะเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ของเหลวจะเป็นตัวกลางในการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า สำหรับเทคนิคนี้เซนเซอร์จะบันทึกค่าความแตกต่างของการนำไฟฟ้าแต่ละจุดทั้งพื้นที่หน้าตัดการไหลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แล้วข้อมูลจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แปลงสัญญาณดังกล่าวเป็นอัตราส่วนฟองก๊าซแต่ละจุดในพื้นที่หน้าตัดการไหลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ตัวอย่างงานวิจัยที่แสดงวิธีการคำนวณคือ Prasser (2002) นอกจากนี้ยังมีการอภิปรายเรื่องความแม่นยำของการวัดข้อมูลอัตราส่วนฟองก๊าซและวิธีการคำนวณความเร็วของฟองก๊าซในงานของ Prasser (2005) โดยการวัดความเร็วนี้ใช้หลักการของ cross-correlation ของสัญญาณของเซนเซอร์สองอันที่วางติดกัน และวิธีการคำนวณขนาดฟองก๊าซได้อธิบายไว้ใน Prasser (2001) สำหรับวิธีการคำนวณอัตราส่วนพื้นที่ฟองก๊าซได้อธิบายไว้ใน Prasser (2007) โดยที่วิธีการคำนวณพื้นที่ฟองก๊าซจะคล้ายคลึงกับหลักการที่ใช้ในการคำนวณขนาดและรูปร่างฟองก๊าซ

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการวัดแบบวิธีความดันตกคร่อมเริ่มต้นจาก Lockhart et al. (1944) ได้ศึกษาวัดความดันตกคร่อมในท่อแนวนอนของการไหลสองเฟส และได้พัฒนาสมการที่ทำนายความดันตกคร่อมในท่อ แต่สมการดังกล่าวสามารถทำนายได้ไม่ดีนักโดยมีความผิดพลาดประมาณ 30% Lockhart และ Martinelli (1949) ได้เสนอสมการโดยรวมผลกระทบจากหลาย ๆ ปัจจัยเพื่อใช้ในการทำนายความดันตกคร่อมในการไหลสองเฟส ต่อมา Murdock (1962) ได้ทดลองใช้ orifice plate ในการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการวัดอัตราการไหลของการไหลสองเฟสและความดันตกคร่อม หลังจากนั้น Chisholm (1977) พัฒนาสมการที่ทำนายความสัมพันธ์ระหว่างการไหลสองเฟสและความดันตกคร่อม orifice plate ในภายหลัง Fincke et al. (1999) พัฒนาการวัดการไหลสองเฟสโดยใช้ venturi และเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างการไหลสองเฟสและความดันตกคร่อมขึ้นมา ในภายหลังยังมีการศึกษาถึงผลของการไหลสองเฟสต่อความแปรปรวนของความดันตกคร่อมท่อ venturi โดย Xu et al. (2003) นอกจากนี้ยังมีการใช้ท่อ venturi ร่วมกับเซนเซอร์ที่ใช้วัดการนำไฟฟ้าซึ่งฝังอยู่บนผนังของท่อเพื่อวัดอัตราการไหลของการไหลสองเฟสระหว่างอากาศและน้ำโดย Meng et al. (2010) ซึ่งพบว่ามีความแม่นยำค่อนข้างสูงโดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10% สำหรับการไหลในรูปแบบต่าง ๆ

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการวัดแบบวิธีใช้คลื่นเหนือเสียงมีดังนี้ Warsito et al. (1999) ได้เสนอเทคนิคการวัดอัตราส่วนฟองก๊าซและอัตราส่วนของแข็งที่แต่ละจุดในพื้นที่หน้าตัดการไหลโดยใช้เทคนิคคลื่นเหนือเสียง หลังจากนั้น Marsudi et al. (2001 & 2002) และ Supardan et al. (2003 & 2004) ได้ทดลองส่งสัญญาณคลื่นเหนือเสียงเพื่อใช้ในการวัดอัตราส่วนฟองก๊าซเฉลี่ย และขนาดฟอง

ก๊าซในการไหลสองเฟส โดยใช้เทคนิค neural network ในการวิเคราะห์ข้อมูลและ Supardan et al. (2007) ได้ทำการทดลองส่งคลื่นเหนือเสียงเพื่อใช้ในการวัดอัตราสวนฟองก๊าซเฉลี่ยและการถ่ายเทมวล ในการไหลสองเฟสโดยใช้ neural network เช่นเดียวกัน

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคเลเซอร์และไดโอดเริ่มจาก Mori et al. (1977) ได้นำเทคนิคนี้มา ศึกษาความเร็วและขนาดของฟองก๊าซ หลังจากนั้นมีการเป็นจำนวนมากใช้เทคนิคนี้ในการวัดความเร็ว การไหลของฟองก๊าซ รวมถึงโครงสร้างด้านหลังฟองก๊าซในท่อขนาดเล็กระดับมิลลิเมตรจนถึง ไมโครเมตร ตัวอย่างเช่น งานของ Colin and Synovec (2002), Ravellin et al. (2006), Ravellin et al. (2008) รวมทั้งงานของ Santos et al. (2008)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำ ผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.7.1 ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการวัดการไหลแบบสองเฟสระหว่างของเหลวและก๊าซ

1.7.2 ต้นแบบเครื่องมือวัดสำหรับงานวิจัยในสถาบันต่าง ๆ และสำหรับงานตรวจวัดในโรงงาน อุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม

1.8 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

การนำเสนอผลงานในงานสัมมนาทางวิชาการ เช่น การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเครื่องกล และ งานประชุมวิชาการทางด้านพลังงาน เป็นต้น การเผยแพร่ผลงานในรูปแบบวารสารวิชาการทั้งภายในและ ภายนอกประเทศ ตลอดจนเผยแพร่ความรู้ผ่านโครงการอื่น ๆ ที่มีกลุ่มเป้าหมายมาเข้าร่วม เช่น โครงการ เทคโนโลยีสะอาด เป็นต้น

1.9 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1.9.1 ศึกษาหลักการพื้นฐานและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.9.2 ออกแบบและดัดแปลงชุดทดลองในส่วนอุปกรณ์สร้างการไหลแบบสองเฟส ประสานงานเรื่องการ ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดทั้งเทคนิค Wire Mesh Tomography และการติดตั้งระบบคลื่นเหนือเสียง และชุดทดลอง รวมทั้งออกแบบและสร้างชุดสอบเทียบสำหรับเทคนิคเลเซอร์ไดโอด

1.9.3 ทำการสอบเทียบเครื่องมือตามพารามิเตอร์ที่ระบุในวัตถุประสงค์

1.9.4 วิเคราะห์ผลสอบเทียบ และศึกษาหาความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออกของอุปกรณ์วัดกับ พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการไหลสองเฟส

1.9.5 สรุปผลการทำทดลอง แล้วจัดทำรายงานและเอกสารเผยแพร่ความรู้

บทที่ 2

Wire Mesh Topography และเทคนิคคลื่นเหนือเสียง

งานวิจัยในส่วนนี้ได้มีความร่วมมือกับสถาบันเทคโนโลยีแห่งโตเกียวในการดำเนินงานวิจัยร่วมกัน โดยการทดลองสวนของการใช้เทคนิคคลื่นเหนือเสียงสำหรับการไหลสองเฟส และ Wire Mesh Tomography ได้ทดลองที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งโตเกียว และการวิเคราะห์ข้อมูลและการทำโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ได้ดำเนินการที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ ซึ่งเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงชุดทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้อุปกรณ์คลื่นเหนือเสียงวัดการไหลสองเฟสในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

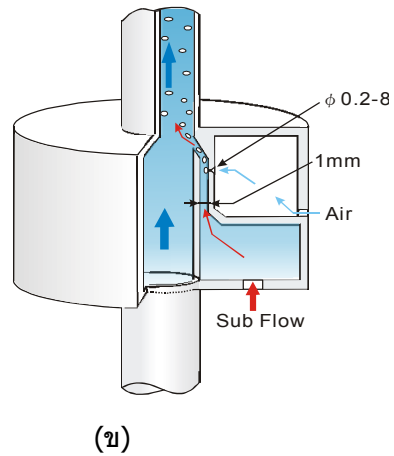
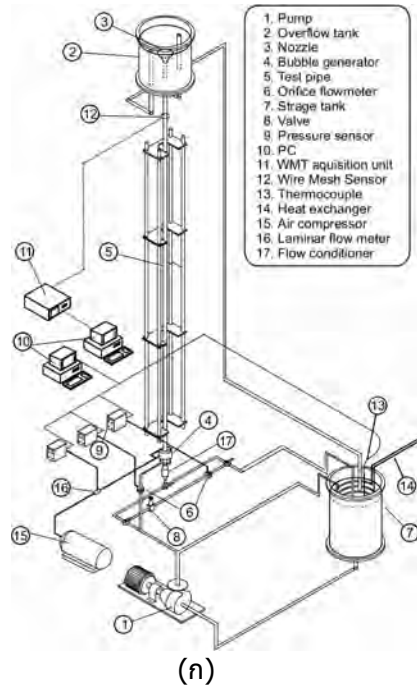
2.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองประกอบด้วยส่วนของการไหลและเครื่องมือวัด ในส่วนการไหลจะประกอบด้วยระบบท่ออะคริลิกแนวตั้งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขนาด 50 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.1k ความสูงทั้งหมดของอุปกรณ์เท่ากับ 7 เมตร ($L/D \sim 140$) เมื่อ L คือความยาวของท่อที่ใช้ทำทดลองและ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ โดยน้ำจะถูกปั๊มจากถังเก็บ (อุปกรณ์หมายเลข 7) และส่งไปผสมกับอากาศที่อุปกรณ์กำเนิดฟองอากาศ (อุปกรณ์หมายเลข 4) โดยแสดงลักษณะของบริเวณที่ทำการผสมในรูปที่ 2.1ข ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำจะใช้วาล์วควบคุม (อุปกรณ์หมายเลข 8) และตรวจสอบอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์วัดการไหลแบบ orifice (อุปกรณ์หมายเลข 6)

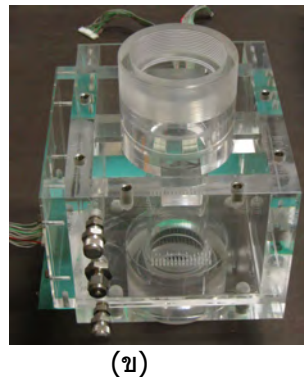
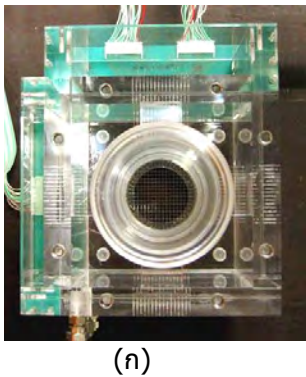
เนื่องจากการทดลองของโครงการนี้ต้องการเปลี่ยนแปลงขนาดของฟองก๊าซโดยจะทำการควบคุมขนาดฟองก๊าซเพื่อสร้างรูปแบบการไหลแบบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย รูปแบบการไหลแบบ core-peak bubbly flow รูปแบบการไหลแบบ wall-peak bubbly flow และรูปแบบการไหลแบบ flat bubbly flow ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์กำเนิดฟองก๊าซที่สามารถควบคุมขนาดฟองก๊าซดังที่กล่าวไว้แล้ว โดยอุปกรณ์กำเนิดฟองก๊าซประกอบด้วยของไหล 3 ส่วน คือ ส่วนแรกคือน้ำในท่อหลัก (Main water flow) ส่วนที่สองคือน้ำในท่อย่อย (Sub flow) ทำหน้าที่ควบคุมขนาดของฟองก๊าซ และส่วนสุดท้ายคืออากาศในการควบคุมขนาดของฟองก๊าซจะควบคุมสัดส่วนของน้ำในท่อย่อยกับอากาศให้เหมาะสม ถ้าต้องการเพิ่มขนาดฟองก๊าซจะปรับได้โดยเพิ่มปริมาณการไหลของอากาศ แต่ถ้าต้องการลดขนาดฟองก๊าซจะปรับได้โดยเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในท่อย่อย

สำหรับอุปกรณ์สอบเทียบใช้ Wire Mesh Sensor, WMS (อุปกรณ์หมายเลข 12) ซึ่งเป็นลักษณะวงกลมตามรูปร่างของท่อ ซึ่งแตกต่างไปจากการทดลองในปีแรกที่ใช้อุปกรณ์หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่สำหรับส่วนประกอบของเซนเซอร์จะเหมือนกับเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองปีแรก และมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยเซนเซอร์ประกอบด้วยตาข่ายลวด 3 ชั้น โดยชั้นของตาข่ายลวดตรงกลางจะทำหน้าที่เป็น transmitter plane ชั้นของตาข่ายลวดบนและชั้นของตาข่ายลวดล่างทำหน้าที่เป็น receiver plane ซึ่งเส้นลวดของตาข่ายลวดทั้ง 3 ชั้นจะวางตั้งฉากกันโดยมีระยะห่าง 1.5 mm ตามทิศทางของการไหล ลักษณะสามชั้นของตาข่ายลวดทำให้เกิดชั้น measuring volume 2 ชั้น ประกอบด้วย upstream

measuring plane ซึ่งวัดก่อนกึ่งกลาง WMS และ downstream measuring plane ซึ่งวัดหลังกึ่งกลาง WMS จากจำนวนเส้นลวดทั้ง 3 ชั้น ตามทิศทางการไหลของของไหล



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของชุดทดลองที่ใช้จำลองการไหล; (ก) ชุดทดลองโดยรวม (ข) ส่วนควบคุมขนาดฟองอากาศ



รูปที่ 2.2 รูปถ่าย Wire Mesh Sensor (WMS); (ก) ภาพหน้าตัดแสดงชุดเส้นลวดเซนเซอร์ (ข) ภาพด้านข้างแสดงสัดส่วนของชุดเซนเซอร์

ในส่วนของอุปกรณ์วัดคลื่นเหนือเสียงจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ transducer, ultrasonic pulser/receiver และ digital oscilloscope โดยลักษณะ transducer เป็นแท่งทรงกระบอกและใช้ออสซิลโลสโคปยี่ห้อ LeCroy Inc. รุ่น C574L เป็นอุปกรณ์เก็บสัญญาณจากตัว receiver ดังแสดงส่วนประกอบทั้งหมดในรูปที่ 2.3 สำหรับรูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการต่ออุปกรณ์ทดลองเซนเซอร์และคลื่นเหนือเสียงเข้ากับชุดทดลอง



(ก)

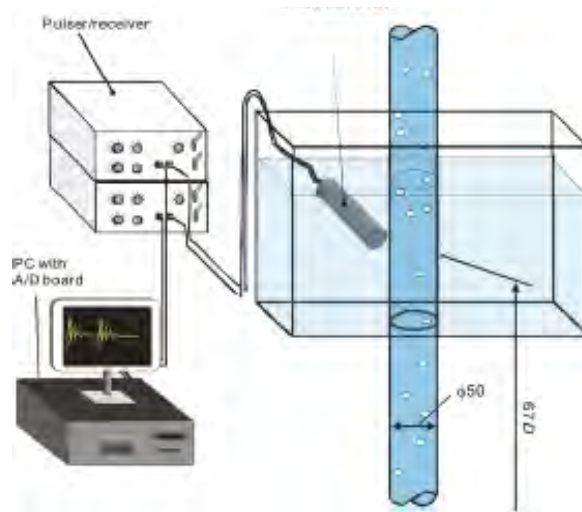


(ข)



(ค)

รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายอุปกรณ์ทดลอง; (ก) อุปกรณ์ส่งและเซนเซอร์รับคลื่นเหนือเสียง (ข) ultrasonic pulse/receiver (ค) ออสซิลโลสโคป



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองเซนเซอร์และคลื่นเหนือเสียง

ในการทดลองนี้ได้ใช้ transducer ที่มีความถี่ 4 MHz ขนาดของลำคลื่นเท่ากับ 8 mm และทำมุมกับการไหลเท่ากับ 45 องศา สำหรับข้อมูลทางเทคนิคของ transducer, ultrasonic pulser/receiver และ digital oscilloscope ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1 ถึง 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ข้อมูล Transducer

Basic frequency	4 MHz
Beam diameter	8 mm
Incident angle	45 degrees

ตารางที่ 2.2 ข้อมูล Pulser

Pulse type	Negative spike
Initial transition (Fall time)	< 5 ns
Input voltage : V_{input}	150 V
Pulse energy	3.49 μ J
Damping impedance	331 Ω
PRF : FPRF	400 Hz

ตารางที่ 2.3 ข้อมูล Receiver

Gain : GR	38 dB
Bandwidth	0.001 to 35 MHz
High pass filter	1.0 MHz
Low pass filter	7.5 MHz

ตารางที่ 2.4 ข้อมูล digital oscilloscope

Sample rate	25 MS/sec
Resolution of ADC	8 bit
Memory	4 MB
Clock accuracy	≤ 10 ppm
DC accuracy	$\pm 1\%$

2.2 ผลการทดลอง

การทดลองได้ลองปล่อยคลื่นเหนือเสียงเข้าไปสู่ระบบท่อที่มีของไหลสองเฟสอยู่ และบันทึกสัญญาณสะท้อนกลับออกมา และในขณะเดียวกันก็ใช้ WMS วัด local void fraction ด้วยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของคลื่นเหนือเสียงและ local void fraction ของรูปแบบการไหลแบบต่าง ๆ โดยเงื่อนไขการไหลที่ทำการทดลองแต่ละเงื่อนไขจะประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์หลัก คือ (1) อัตราการไหลของน้ำในท่อหลัก (Main water flow) โดยคิดเทียบเป็น Reynolds number ที่ขนาดท่อของชุดทดลองเรียกว่า Re_{main} (2) อัตราการไหลของน้ำในท่อย่อย (Sub flow) โดยคิดเทียบเป็น Reynolds number ที่ขนาดท่อของชุดทดลองเรียกว่า Re_{sub} และ (3) อัตราการไหลของอากาศ (J_G , m/s) เงื่อนไขการไหลที่ทำการทดลองได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เงื่อนไขการไหลในการทดลอง

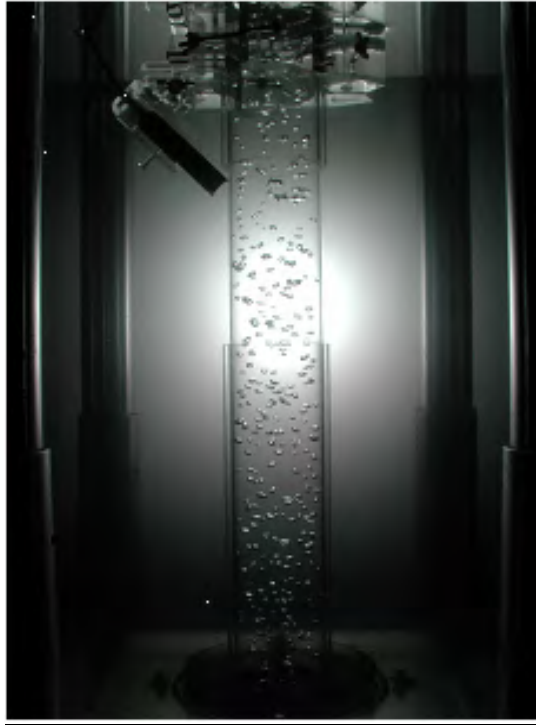
เงื่อนไขการไหล	Re _{main}	Re _{sub}	อัตราการไหลของอากาศ (J _G ,m/s)	รูปแบบการไหลที่ต้องการ
1	4000	4000	0.00219	Wall-peak profile
2	8000	0	0.00219	Core-peak profile
3	7000	1000	0.00219	flat-profile

ข้อมูลที่ได้จากทดลองประกอบด้วย (1) ข้อมูลรูปถ่ายเงื่อนไขการไหล (2) ข้อมูล local void fraction ซึ่งได้จาก WMS และ (3) ข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับในเวลาขณะใดขณะหนึ่ง ข้อมูลที่บันทึกได้เป็นสัญญาณสะท้อนที่แต่ละตำแหน่งของท่อ หลังจากนั้นจึงสร้างข้อมูล Spatio-temporal ของคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับในเงื่อนไขการไหลหนึ่งๆ โดยข้อมูลนี้เป็นการนำข้อมูลขนาดของสัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับในเวลาขณะใดขณะหนึ่งมาเรียงต่อกันใน 1 วินาที เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของสัญญาณกับรูปแบบการไหล

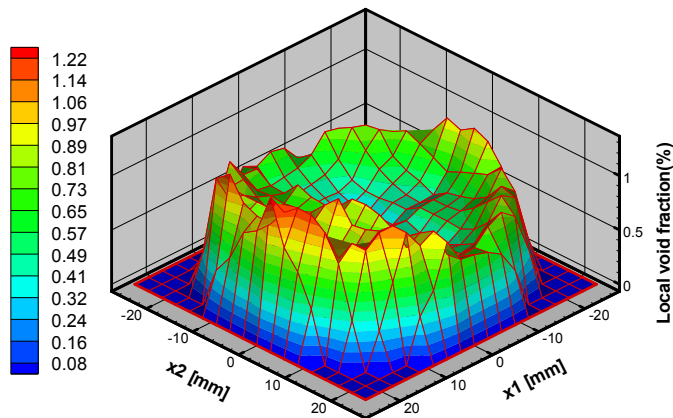
2.2.1 ข้อมูลคลื่นเหนือเสียงและ local void fraction ของเงื่อนไขการไหล Re_{main} =4000 Re_{sub} =4000 และ J_G = 0.00219 m/s

ข้อมูลที่จะแสดงประกอบด้วย (1) ข้อมูลรูปถ่ายการไหลดังแสดงในรูปที่ 2.5 (2) ข้อมูล local void fraction จาก WMS ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าเป็นรูปแบบการไหลแบบ wall-peak bubbly flow (3) ข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับในเวลาขณะใดขณะหนึ่ง ข้อมูลที่บันทึกได้เป็นสัญญาณสะท้อนที่แต่ละตำแหน่งของท่อ โดยแกน x ของกราฟแสดงเวลาซึ่งสามารถแปลงเป็นระยะทางของตำแหน่งต่าง ๆ ในท่อได้เนื่องจากทราบความถี่ของคลื่นเหนือเสียง ส่วนแกน y คือขนาดของสัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สามารถบันทึกได้ โดยฟองขนาดใหญ่จะสร้างสัญญาณที่มีค่าสูงกว่าฟองขนาดเล็ก และฟองที่อยู่ใกล้ผนังท่อจะแสดงให้เห็นในระยะเวลาที่ใกล้จุด 0,0 มากกว่าฟองอากาศที่อยู่ไกลกว่าจากผนังท่อ โดยข้อมูลคลื่นเหนือเสียงนี้แสดงในรูปที่ 2.7ก-ค ที่เวลาต่างๆ (4) ข้อมูล Spatio-temporal ของคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับในเงื่อนไขการไหลหนึ่งๆ โดยข้อมูลนี้เป็นการนำข้อมูลขนาดของสัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับในเวลาขณะใดขณะหนึ่งในเวลา 100 ไมโครวินาทีมาเรียงต่อกันเป็นเวลา 1 วินาที โดยแกน x ของกราฟแสดงเวลาใน 1 วินาที ส่วนแกน y คือขนาดของท่อที่ใช้ในการทดลอง และสัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สามารถบันทึกได้ โดยความเข้มของพลังงานจะแสดงเป็นความเข้มของสี ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.8

ข้อมูลคลื่นเหนือเสียงแบบ Spatio-temporal reflected ultrasonic signal ของ wall-peak bubbly flow ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 (ก)-(ข) ส่วน Spatio-temporal reflected ultrasonic signal ของ single phase ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 2.8 (ค) เพื่อใช้เป็นข้อมูลแบ็กกราวด์ เมื่อพิจารณารูปภาพทั้งสามจะเห็นว่าคลื่นสะท้อนของ wall-peak bubbly flow จะมีสัญญาณคลื่นสะท้อนมีค่ามากและเกิดบ่อยครั้งบริเวณใกล้ผนังท่อ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลรูปแบบการไหลแบบ wall-peak bubbly flow

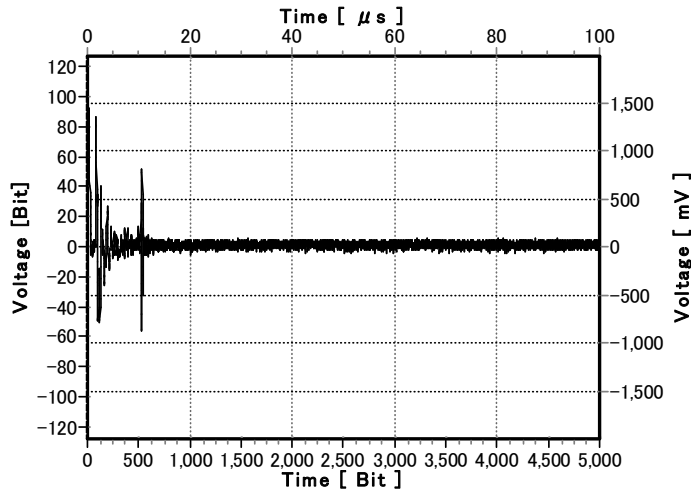


รูปที่ 2.5 รูปถ่ายลักษณะการไหลของกรณี $Re_{main}=4000$ $Re_{sub}= 4000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s

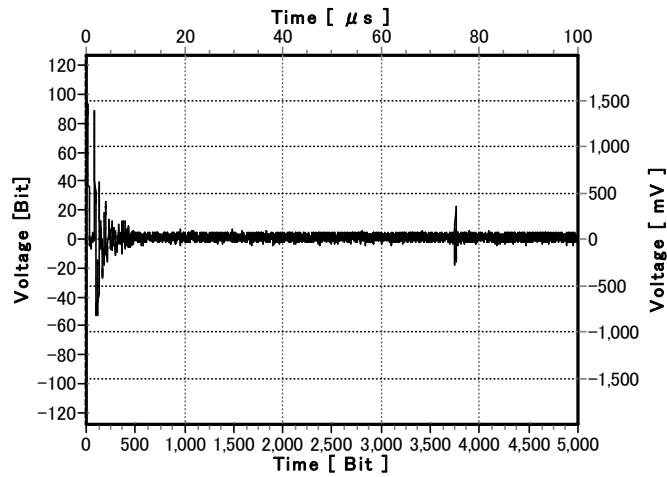


$Re_{main} = 4000$
 $Re_{sub} = 4000$
 $J_G = 0.00219$ m/s

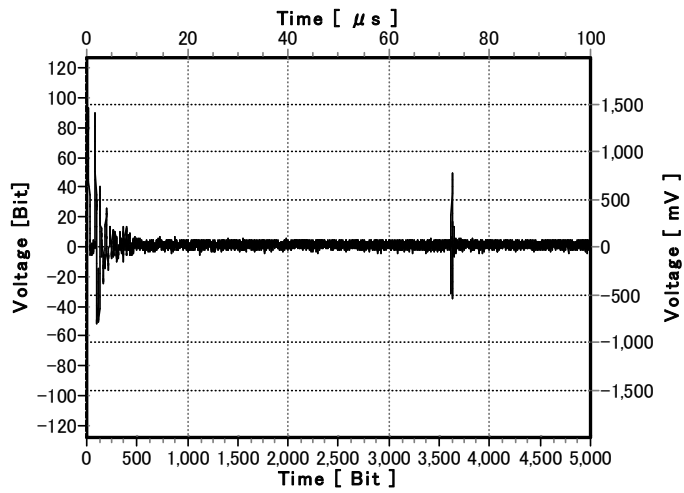
รูปที่ 2.6 Local void fraction ของ $Re_{main} = 4000$ $Re_{sub} = 4000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s



(ก)

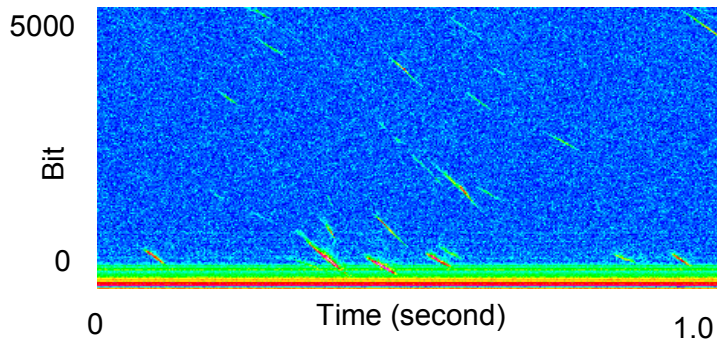


(ข)

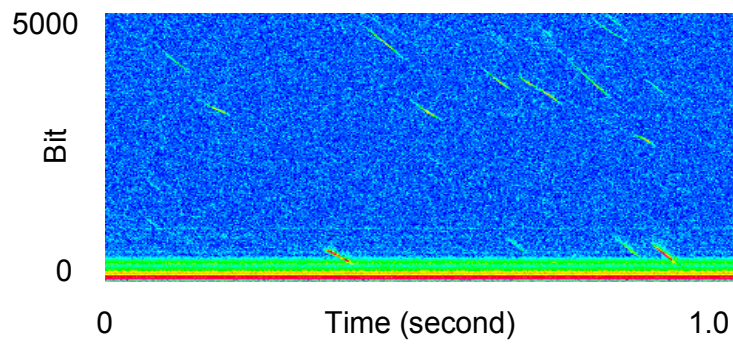


(ค)

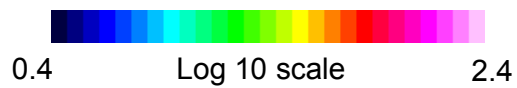
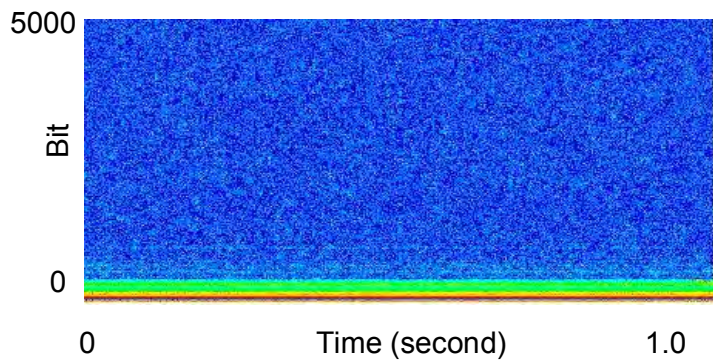
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่เวลาต่าง ๆ ในเงื่อนไขการไหลแบบ $Re_{main}=4000$ $Re_{sub}=4000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s



(ก)



(ข)



(ค)

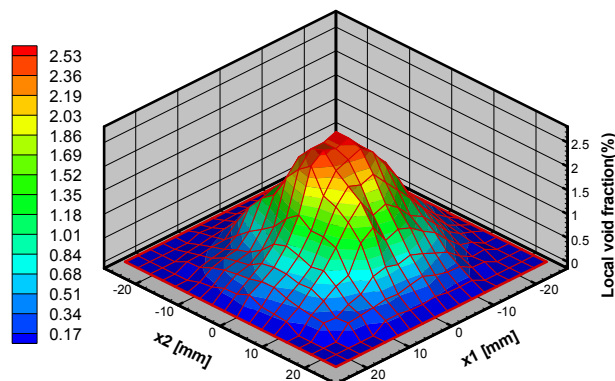
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของ Spatio-temporal reflected ultrasonic ในเงื่อนไขการไหลแบบ $Re_{main}=4000$ $Re_{sub}=4000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s; (ก)-(ข) สัญญาณของการไหลสองเฟส (ค) สัญญาณของการไหลเฟสเดียว

2.2.2 ข้อมูลคลื่นเหนือเสียงและ local void fraction ของเงื่อนไขการไหล $Re_{main}=8000$ $Re_{sub}=0$ และ $J_G = 0.00219$ m/s

ข้อมูลที่จะแสดงประกอบด้วยข้อมูลเกี่ยวกับการไหลในกรณีแรกดังแสดงในรูปที่ 2.9-2.12 แต่เป็นการทดลองสำหรับการไหลแบบ core-peak bubbly flow ซึ่งในท้ายที่สุดจะพบว่าสัญญาณคลื่นสะท้อนมีค่ามากและเกิดบ่อยครั้งบริเวณกลางท่อทดลอง นอกจากนี้จะพบว่าข้อมูลการสะท้อนของคลื่นเหนือเสียงสอดคล้องกับข้อมูลรูปแบบการไหลแบบ core-peak bubbly flow ที่มีฟองก๊าซมากในบริเวณกลางท่อทดลองซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายและข้อมูลที่วัดจากเทคนิค Wire Mesh Tomography

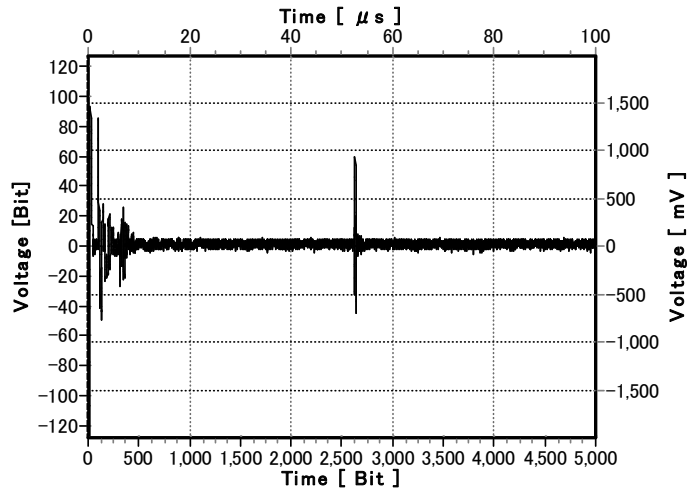


รูปที่ 2.9 รูปถ่ายแสดงลักษณะการไหลของกรณี $Re_{main}=8000$ $Re_{sub}=0$ และ $J_G = 0.00219$ m/s

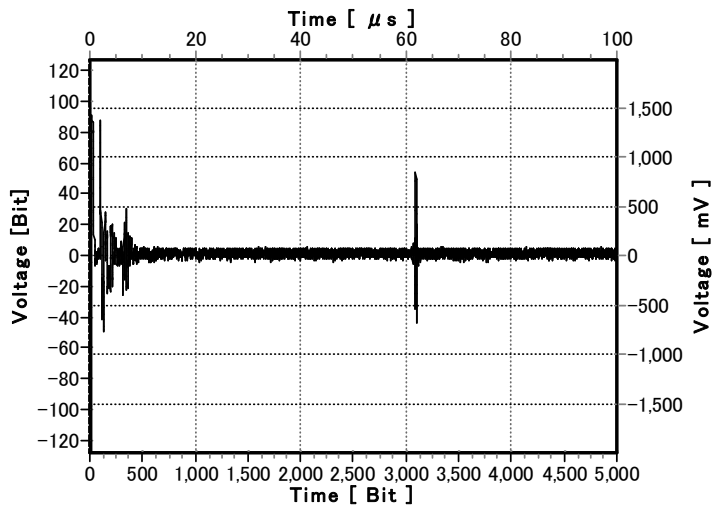


$Re_{main} = 8000$
 $Re_{sub} = 0$
 $J_G = 0.00219$ m/s

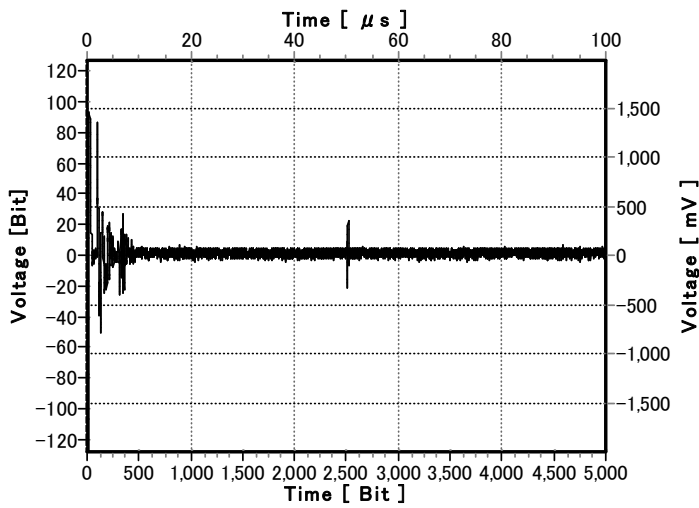
รูปที่ 2.10 Local void fraction ของ $Re_{main} = 8000$ $Re_{sub} = 0$ และ $J_G = 0.00219$ m/s



(ก)

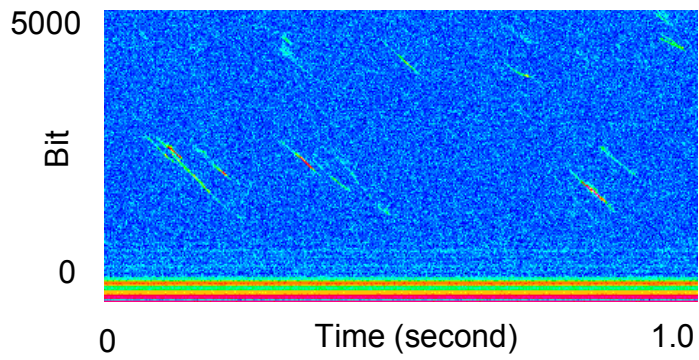


(ข)

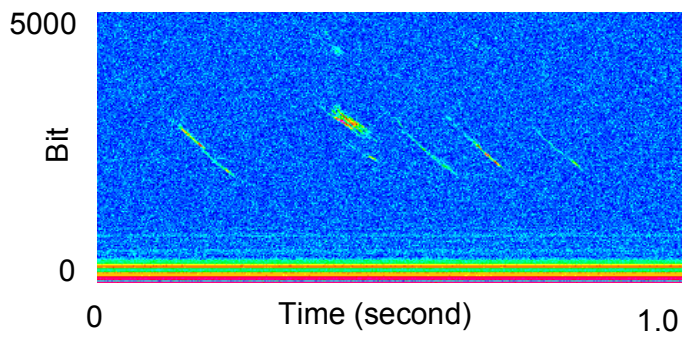


(ค)

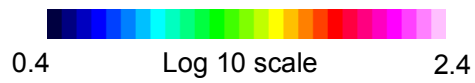
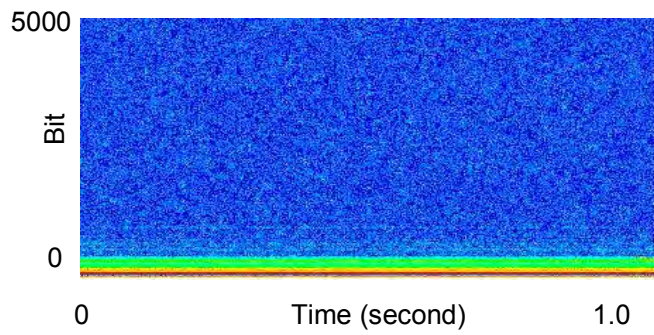
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่เวลาต่าง ๆ ในเงื่อนไขการไหลแบบ $Re_{main}=8000$ $Re_{sub}=0$ และ $J_G = 0.00219$ m/s



(ก)



(ข)

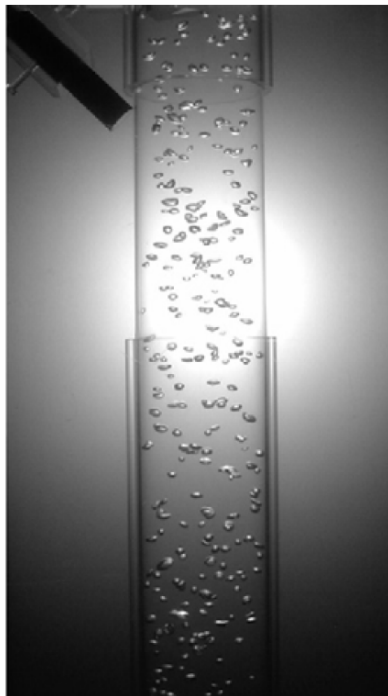


(ค)

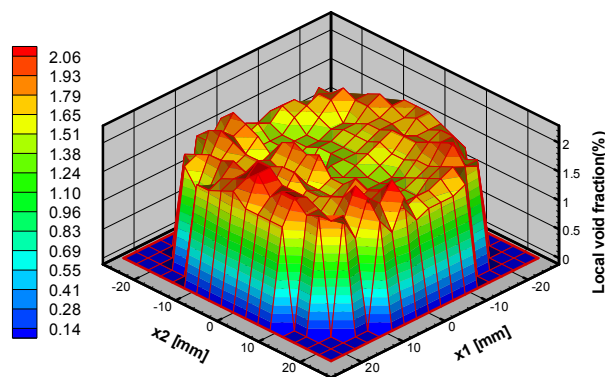
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างของ Spatio-temporal reflected ultrasonic ในเงื่อนไขการไหลแบบ $Re_{main}=8000$ $Re_{sub}=0$ และ $J_G = 0.00219$ m/s; (ก)-(ข) สัญญาณของการไหลสองเฟส (ค) สัญญาณของการไหลเฟสเดียว

2.2.3 ข้อมูลคลื่นเหนือเสียงและ local void fraction ของเงื่อนไขการไหล $Re_{main} = 7000$ $Re_{sub} = 1000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s

ข้อมูลที่จะแสดงประกอบด้วยข้อมูลเดียวกับการไหลทั้งสองกรณีแรกดังแสดงในรูปที่ 2.13-2.16 แต่เป็นการจำลองการไหลแบบ flat-profile bubbly flow ซึ่งจะพบสัญญาณคลื่นสะท้อนมีค่ามากและเกิดขึ้นบ่อยครั้งกระจายทั่วทั้งท่อทดลอง และพบว่าข้อมูลการสะท้อนของคลื่นเหนือเสียงสอดคล้องกับข้อมูลรูปแบบการไหลแบบ flat-profile bubbly flow ที่มีฟองก๊าซกระจายทั้งบริเวณหน้าตัดของท่อทดลอง

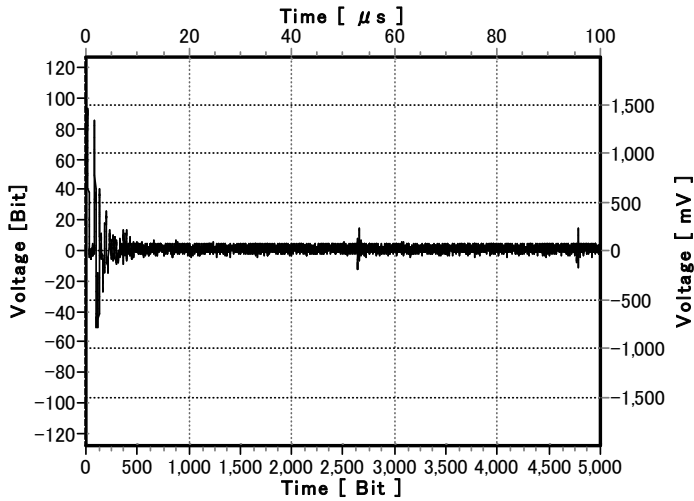


รูปที่ 2.13 รูปถ่ายแสดงลักษณะการไหลของกรณี $Re_{main} = 7000$ $Re_{sub} = 1000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s

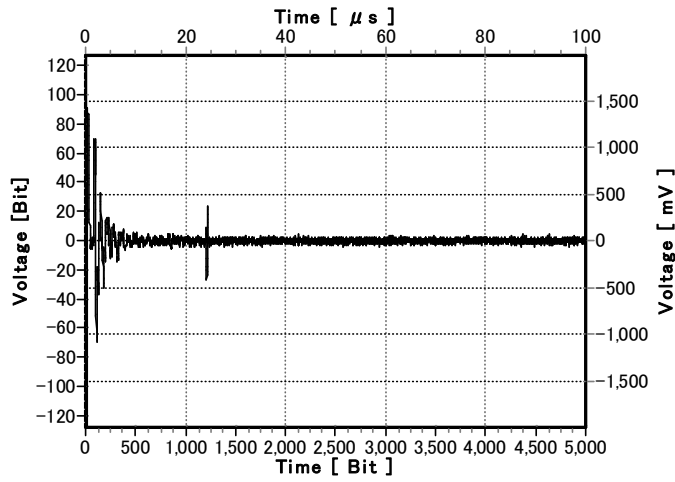


$Re_{main} = 7000$
 $Re_{sub} = 1000$
 $J_G = 0.00219$ m/s

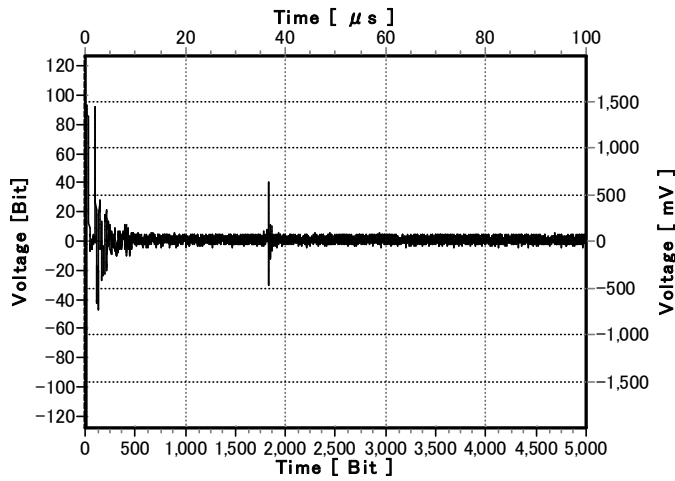
รูปที่ 2.14 Local void fraction ของ $Re_{main} = 7000$ $Re_{sub} = 1000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s



(ก)

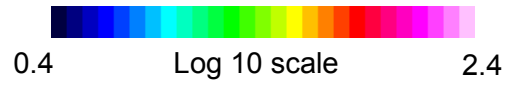
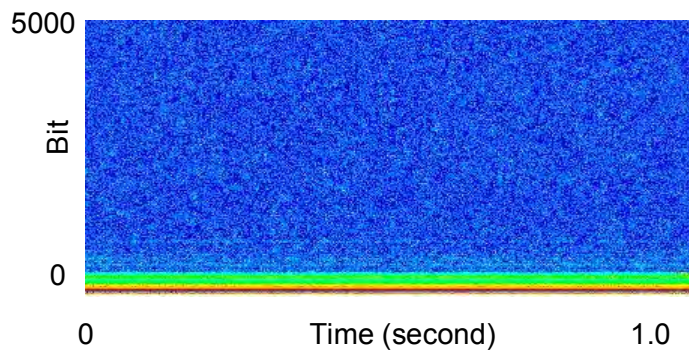
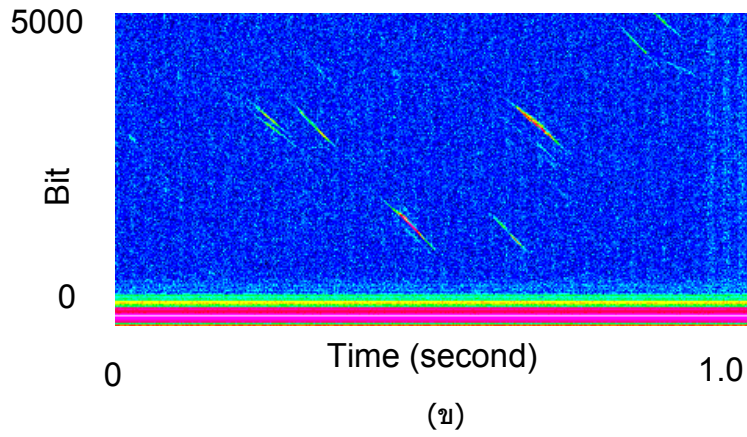
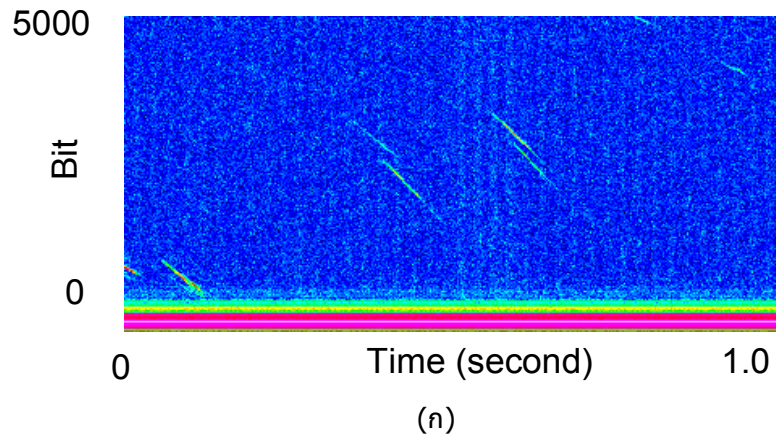


(ข)



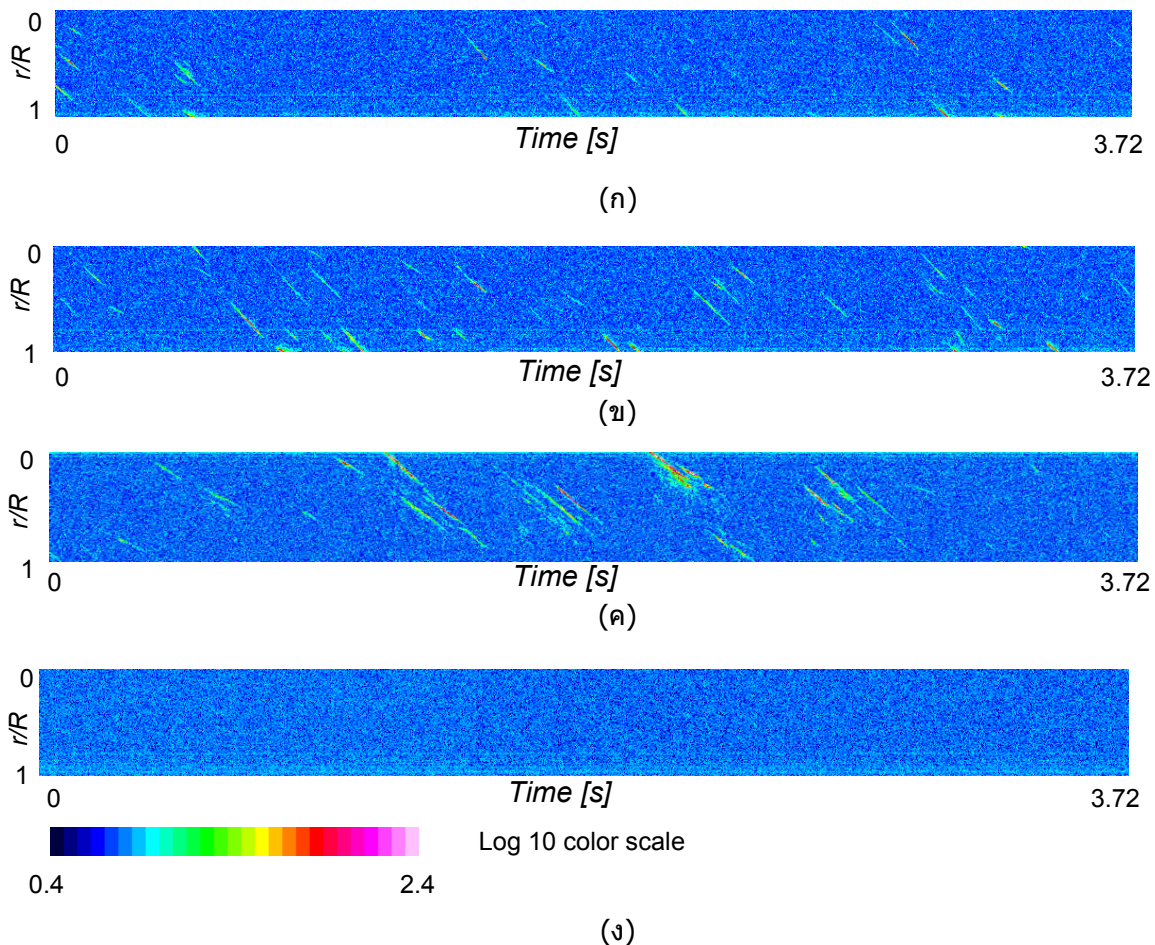
(ค)

รูปที่ 2.15 ตัวอย่างของข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่เวลาต่าง ๆ ในเงื่อนไขการไหลแบบ $Re_{main}=7000$ $Re_{sub}=1000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของ Spatio-temporal reflected ultrasonic ในเงื่อนไขการไหลแบบ $Re_{main}=7000$ $Re_{sub}=1000$ และ $J_G = 0.00219$ m/s; (ก)-(ข) สัญญาณของการไหลสองเฟส (ค) สัญญาณของการไหลเฟสเดียว

จากข้อมูลข้างต้น เมื่อนำข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนจากของไหลสองเฟสด้วยข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนจากของไหลเฟสเดียวแล้วนำมาแสดงตามเวลาในช่วงเวลา 3.72 วินาทีของรูปแบบการไหลต่างๆ ผลการวิเคราะห์ในลักษณะนี้ได้แสดงในรูปที่ 2.17 โดยแกน y เป็นระยะจากจุดศูนย์กลางของท่อ สำหรับกรณี wall-peak bubbly flow จะพบสัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนมีค่าสูงและเกิดขึ้นบ่อยครั้งบริเวณใกล้ผนังท่อ ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลการสะท้อนของคลื่นเหนือเสียงสอดคล้องกับข้อมูลรูปแบบการไหลแบบ wall-peak bubbly flow ดังแสดงในรูปที่ 2.17ก สำหรับกรณี flat-profile bubbly flow จะพบสัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนมีค่าสูงและเกิดขึ้นบ่อยครั้งกระจายทั่วทั้งท่อตลอด ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลการสะท้อนของคลื่นเหนือเสียงสอดคล้องกับข้อมูลรูปแบบการไหลแบบ flat-profile bubbly flow ดังแสดงในรูปที่ 2.17ข สำหรับกรณีของ core-peak bubbly flow จะพบสัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนมีค่าสูงและเกิดขึ้นบ่อยครั้งบริเวณตรงกลางของท่อตลอด ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลการสะท้อนของคลื่นเหนือเสียงสอดคล้องกับข้อมูลรูปแบบการไหลแบบ core-peak bubbly flow ดังแสดงในรูปที่ 2.17ค สำหรับรูปที่ 2.17ง แสดงสัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนของ single phase flow ซึ่งไม่พบว่ามีสัญญาณที่มีค่าสูงปรากฏให้เห็นแต่อย่างใด



รูปที่ 2.17 ผลของ Spatio-temporal reflected ultrasonic of bubbly flow; (ก) wall peak (ข) flat profile (ค) core peak (ง) การไหลเฟสเดียว (สีแสดงความเข้มของสัญญาณ)

ด้วยข้อมูลทั้งสองส่วนจากอุปกรณ์คลื่นเหนือเสียงและการวัดด้วย Wire Mesh Tomography แสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณของคลื่นที่สะท้อนกลับมาและค่าของ local void fraction สำหรับการไหลแบบต่างๆ ดังนั้นในอนาคตก็ย่อมมีความเป็นไปได้ในการใช้ข้อมูลของคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับมาเพียงอุปกรณ์เดียวตรวจสอบคุณสมบัติการไหลแบบสองเฟสนี้ อย่างไรก็ตามก็ต้องมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อหาพารามิเตอร์จากสัญญาณของอุปกรณ์คลื่นเหนือเสียงที่เหมาะสมที่ใช้แสดงความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของการไหลต่อไป รวมถึงหาข้อจำกัดของอุปกรณ์วัดเพิ่มเติมด้วย

2.3 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้จำลองลักษณะการไหลขึ้นในชุดทดลองโดยมีลักษณะ wall-peak bubbly flow, core-peak bubbly flow และ flat-profile bubbly flow โดยการตรวจสอบรูปแบบการไหลด้วยการถ่ายภาพและการใช้อุปกรณ์ Wire Mesh Tomography ควบคู่กัน หลังจากนั้นจึงลองใช้อุปกรณ์คลื่นเหนือเสียงตรวจสอบว่าลักษณะของสัญญาณสะท้อนกลับมาจากการไหลจะมีลักษณะอย่างไร จากข้อมูลการทดลองปล่อยคลื่นเหนือเสียงเข้าไปในระบบของไหลสองเฟสในแต่ละรูปแบบการไหล แสดงให้เห็นว่าการสะท้อนของคลื่นเหนือเสียงในแต่ละตำแหน่งของท่อทดลองมีความสัมพันธ์กับข้อมูล local void fraction ซึ่งได้จาก Wire Mesh Tomography โดยรูปแบบการไหล wall-peak bubbly flow จะมีคลื่นเหนือเสียงสะท้อนบ่อยครั้งที่ผนังของท่อทดลอง รูปแบบการไหล core-peak bubbly flow จะมีคลื่นเหนือเสียงสะท้อนบ่อยครั้งที่ตรงกลางของท่อทดลองและ รูปแบบการไหล flat-profile bubbly flow จะมีคลื่นเหนือเสียงสะท้อนบ่อยครั้งกระจายทั่วทั้งท่อทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการนำเอาอุปกรณ์คลื่นเหนือเสียงไปใช้ตรวจสอบลักษณะของการไหลแทนการใช้ Wire Mesh Tomography ได้ อย่างไรก็ตามจำเป็นจะต้องทำการทดลองให้ครอบคลุมช่วงของ void fraction ต่าง ๆ เพื่อจะหาข้อจำกัดของการใช้อุปกรณ์คลื่นเหนือเสียงต่อไป

บทที่ 3

เลเซอร์ไดโอด

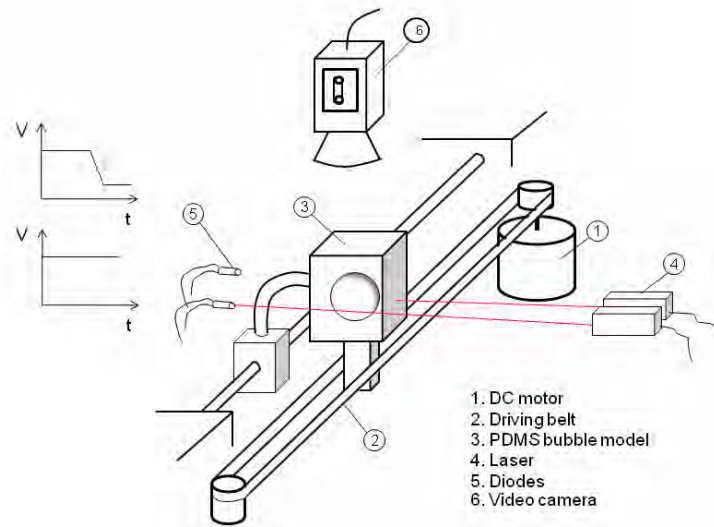
ในการศึกษานี้ได้พยายามพัฒนาเครื่องมือเลเซอร์ไดโอดให้สามารถวัดพารามิเตอร์ของฟองอากาศที่กำลังเคลื่อนที่ได้ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การสอบเทียบอุปกรณ์กับการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วและความเร่งต่าง ๆ และการทดลองวัดกับการไหลฟองอากาศจริง ๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การสอบเทียบเครื่องมือวัดกับแบบจำลองฟองอากาศ

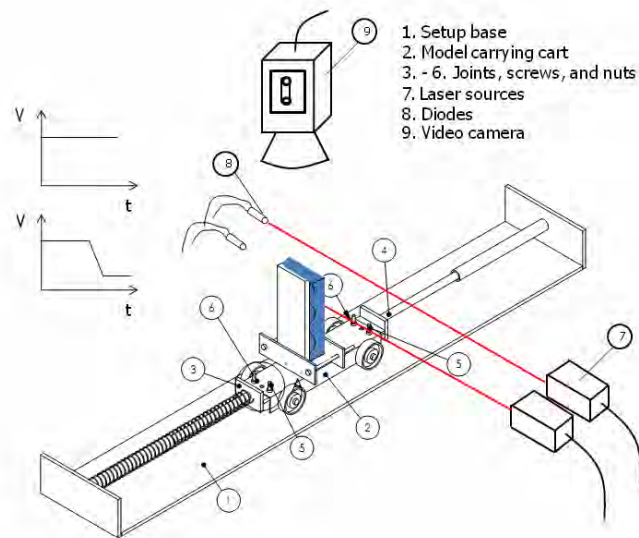
การศึกษาในปีนี้ได้พัฒนาและปรับปรุงชุดทดลองให้สามารถเคลื่อนที่แบบจำลองฟองอากาศที่เป็นรูปครึ่งทรงกลมด้วยความเร็วต่าง ๆ ได้ โดยใช้หลักการของการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) และหลักการของรถเลื่อนบนรางสปริงดังแสดงในรูปที่ 3.1 ก-ข ตามลำดับ โดยชุดทดลองดังกล่าวออกแบบเพื่อศึกษาเบื้องต้นถึงผลกระทบของความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ต่อลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากระบบเลเซอร์ไดโอด

ระบบแรกเป็นการขับเคลื่อนแบบจำลองด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการสร้างแบบจำลองฟองอากาศบนระบบรางเลื่อน และเลื่อนแบบจำลองฟองอากาศให้เคลื่อนที่ไปด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า สำหรับระบบที่สองเป็นชุดทดลองที่ประกอบด้วยฐานรางเลื่อน รถที่บรรทุกแบบจำลองฟองอากาศและระบบสปริง การเคลื่อนที่แบบจำลองฟองอากาศใช้สปริงเป็นตัวขับเคลื่อน โดยระบบทั้งสองมีระบบเลเซอร์และวงจรไดโอดรวมทั้งกล้องวีดีโอเพื่อทำการสอบเทียบความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศ

อุปกรณ์ทดลองทั้งสองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศให้มีความเร็วต่าง ๆ กัน โดยจากการศึกษาในปีแรก ซึ่งเป็นการสอบเทียบแบบสถิตและมีผลการสอบเทียบที่แสดงว่า หากสามารถวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศไปพร้อมกับการตรวจสอบการลดลงของความเข้มเลเซอร์ที่ตกกระทบบนไดโอดได้ น่าจะทำให้ระบบเลเซอร์ไดโอดที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถวัดรัศมีความโค้งของฟองอากาศที่เคลื่อนที่อยู่ได้เลย ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีแนวคิดในการวัดความเร็วของการเคลื่อนที่โดยใช้ระบบเลเซอร์ไดโอดเลย ซึ่งหลักการที่ใช้ไม่ซับซ้อนเพียงแค่การเพิ่มระบบเลเซอร์ไดโอดเข้าไปอีกหนึ่งชุด และวางชุดเลเซอร์ทั้งสองเรียงอนุกรมไปตามทิศการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศ ซึ่งเมื่อมีการกำหนดระยะห่างระหว่างลำเลเซอร์ทั้งสองแน่นอนแล้ว หากวัดเวลาที่แบบจำลองเคลื่อนที่ตัดผ่านลำเลเซอร์ทั้งสองได้ผู้วัดจะสามารถหาค่าความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศได้ โดยระยะห่างระหว่างเลเซอร์ทั้งสองควรจะมีระยะห่างไม่มากนัก เช่น ระยะไม่เกิน 0.5 เท่าของรัศมีฟองเป็นต้น เพื่อจะทำให้ได้ความเร็วเฉลี่ยที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับความเร็วของการเคลื่อนที่จริง ซึ่งเป็นการวัดความเร็วของฟองอากาศในลักษณะเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งกล่าวถึงในบทนำ



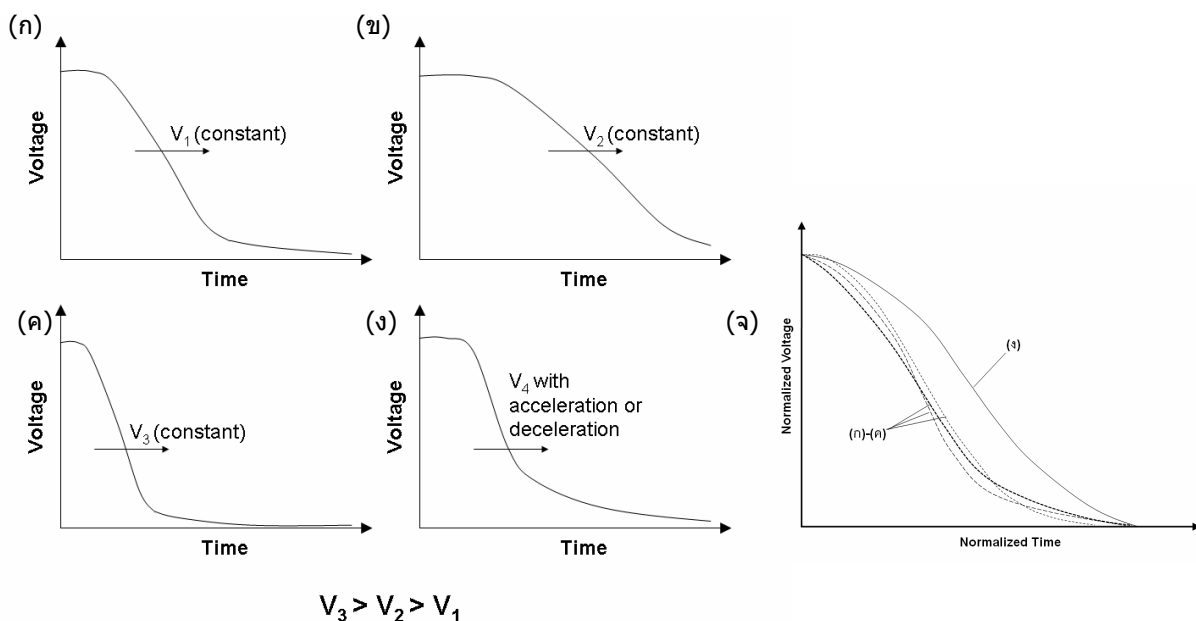
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ชุดลองสำหรับการสอบเทียบที่ความเร็วและความเร่งต่าง ๆ ของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศจำลอง; (ก) การทดลองด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและสายพาน (ข) การทดลองด้วยระบบสปริง

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดหนึ่งของวิธีการนี้คือ ความเร่งของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศต้องไม่สูงนัก เพราะอาจจะทำให้แนวโน้มของการลดลงของปริมาณเลเซอร์ที่ตกกระทบบนโฟโตรีโอดมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป และส่งผลทำให้การลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงลักษณะของการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผู้วิจัยนำเอาข้อมูลจากการศึกษาแบบสถิตมาวิเคราะห์และมีสมมติฐานว่าน่าจะเกิดขึ้นเมื่อฟองอากาศขนาดรัศมีความโค้งคงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ (รูปที่ 3.2 ก-ค) และการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขนาดเท่าเดิมที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่คงที่หรือมีความเร่ง (รูปที่ 3.2ง) สำหรับการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขนาดเดียวกันด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ กัน จะมีลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีความคล้ายคลึงกันเมื่อทำการ normalization เวลาด้วยเวลาทั้งหมดของความต่างศักย์ลดลงจนเป็นศูนย์ แต่สำหรับการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขนาดเดิมที่มีความเร่งจะทำให้ลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปและเมื่อทำการ normalization แล้วจะมีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากกรณีความเร็วคงที่ที่แสดงในรูปที่ 3.2 จ และหากความเร่งมีค่าเพิ่มขึ้นความแตกต่างนี้ก็ น่าจะเด่นชัดขึ้น



รูปที่ 3.2 ลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตรีโอด เมื่อฟองอากาศเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ

ดังนั้นผลของความเร็วและความเร่งต่อความแม่นยำในการวัดรัศมีความโค้งของฟองอากาศด้วยระบบเลเซอร์ไดโอดจึงเป็นประเด็นที่สำคัญ และในการศึกษานี้ได้เลือกออกแบบระบบสอบเทียบที่สามารถสร้างขนาดความเร็วและความเร่งต่าง ๆ ได้ โดยมีรายละเอียดสำหรับการทดลองที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่และการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ดังต่อไปนี้

3.1.1 การสอบเทียบด้วยการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วคงที่

ส่วนประกอบที่สำคัญของชุดทดลองในส่วนนี้ได้แก่ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง วงจรโฟโตไดโอด 1 ชุดและแบบจำลองฟองอากาศ โดยรายละเอียดที่สำคัญของแต่ละส่วนประกอบจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

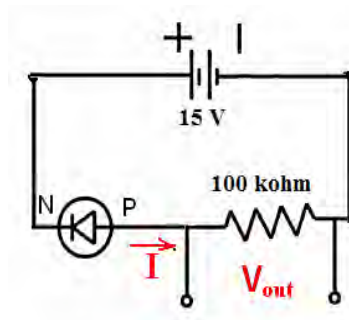
3.1.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในส่วนของชุดทดลองที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขับเคลื่อนจะสามารถควบคุมความเร็วและความเร่งได้สะดวกโดยการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ อย่างไรก็ตามหากต้องการจะเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ป้อนสู่มอเตอร์ในขณะที่ทำการเลื่อนแบบจำลองฟองอากาศ ซึ่งจำเป็นจะต้องมี DC supply ที่สามารถรับสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า (Function generator) ได้ ซึ่งคณะวิจัยไม่สามารถหาเครื่องมือดังกล่าวได้ในขณะนี้ ดังนั้นจึงมีแนวคิดว่าจะใช้ชุดทดลองแรกนี้ในการเคลื่อนที่แบบจำลองด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ เท่านั้น โดยในการทดลองเบื้องต้นได้ประยุกต์ระบบขับเคลื่อนขึ้นมาโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 35 วัตต์ และความต่างศักย์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนในช่วง 5-24 โวลต์ (แหล่งข้อมูล: <http://www.datasheetarchive.com/mitsumi%20dc%20motor-datasheet.html> : หาข้อมูล 20 พ.ค. 2553) และระบบสายพานตามแสดงในรูปที่ 3.1ก ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศประมาณ 30 เซนติเมตร

3.1.1.2 วงจรโฟโตไดโอด

สำหรับวงจรไดโอดได้มีการเปลี่ยนมาใช้โฟโตไดโอดตัวใหม่เนื่องจากความสะดวกในการสั่งซื้อซึ่งทำให้มีคุณสมบัติบางอย่างแตกต่างไปจากการทดลองในปีแรก โดยวงจรไดโอดมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ โฟโตไดโอด เครื่อง DC regulator และตัวต้านทาน ซึ่งมีแผนผังของของอุปกรณ์ต่างๆตามวงจรในรูปที่ 3.3

การเลือกโฟโตไดโอดสำหรับการทดลองนั้นมีหลักเกณฑ์สำคัญ 2 อย่างคือ หลักเกณฑ์แรกคือช่วงความยาวคลื่นของแสงที่มีการตอบสนองสูงสุด (peak sensitivity) โดยเลือกให้ตรงกับความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลองมากที่สุด ซึ่งเลเซอร์ในการทดลองนี้มีความยาวคลื่นของแสงสีแดงประมาณ 630 nm (10 mW, diameter 0.65 mm) สำหรับหลักเกณฑ์ที่สองนั้นก็คือ มุมรับแสงที่จะทำให้การตอบสนองลดลงครึ่งหนึ่ง (acceptance angle at 50%) โดยเลือกโฟโตไดโอดที่มี acceptance angle เล็กเพื่อที่จะสามารถตรวจสอบแสงที่ถูกหักเหออกไปได้เร็วขึ้น จากหลักเกณฑ์ที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้เลือกโฟโตไดโอดยี่ห้อ EPIGAP รุ่น EPD-660-5 ซึ่งมี peak sensitivity อยู่ที่ 660 nm และมีมุมรับแสงที่จะทำให้การตอบสนองลดลงครึ่งหนึ่งอยู่ที่ 40 องศา และมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังตารางที่ 3.1 โดยมีพารามิเตอร์ที่น่าสนใจได้แก่ ขนาด Active area ประมาณ 0.13 mm^2 ทำให้เกิดความลำบากในการวางตำแหน่งให้ตรงกับลำเลเซอร์ ค่า Reverse voltage เท่ากับ 10 โวลต์หมายความว่าต้องมีอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงกว่า 10 โวลต์ รวมถึง Rise time และ Fall time ประมาณ 15-30 ns แสดงให้เห็นว่าระบบวงจรไดโอดนี้สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วในระดับ 1 MHz



รูปที่ 3.3 แผนผังของวงจรโฟโตไดโอดที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยโฟโตไดโอด ตัวต้านทาน และแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอดที่ใช้สำหรับการทดลอง (EPICAP)

Parameter	Test conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Active area		A		0.13		mm ²
Peak sensitivity		λ_{Smax}	620	660	700	nm
Spectral bandwidth at 50%		$\Delta\lambda_{0,5}$		25		nm
Acceptance angle at 50% S_e				40		deg.
Responsivity at 660 nm	$V_R = 0 \text{ V}$	S_e		0.42		A/W
Short-circuit current*	$V_R = 0, E_e = 1 \text{ mW/cm}^2$	I_{sc}		0.85		μA
Dark current	$V_R = 5 \text{ V}, E_e = 0$	I_D		40	200	pA
Reverse voltage	$I_R = 10 \mu\text{A}$	V_R		10		V
Junction capacitance	$V_R = 0, E_e = 0$	\dot{N}		40		pF
Rise time	$R_L = 50 \text{ } ,$	t_r		15		ns
Fall time	$V_R = 5 \text{ V}$	t_f		30		

ในส่วน of เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองก็คือความต่างศักย์สำหรับไบแอสยอนโฟโตไดโอด การเลือกความต่างศักย์สำหรับไบแอสยอนโฟโตไดโอดนั้นจะต้องมีค่าสูงพอที่จะทำให้โฟโตไดโอดอยู่ในภาวะที่กระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับ ความเข้มแสงได้ และจะต้องไม่สูงเกินค่าความต่างศักย์สูงสุดที่โฟโตไดโอดรับได้ซึ่งไม่ได้มีการระบุไว้ ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงได้เลือกความต่างศักย์จากเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลองเป็น 15 โวลต์ ในส่วน of ตัวต้านทานนั้นได้เลือกใช้ตัวต้านทานที่มีความต้านทานขนาด 100 กิโลโอห์ม ซึ่งจะทำให้ค่าความต่างศักย์ที่วัดคร่อมตัวต้านทานในระหว่างการทดลองมีค่าสูงทำให้สัญญาณรบกวนเป็นสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ต้องการวัด แต่ในขณะเดียวกันความต้านทานต้องมีค่าไม่สูงเกินไปจนความต่างศักย์คร่อมโฟโตไดโอดไม่สูงเพียงพอสำหรับการไบแอสยอน นอกจากนี้ในการทำการทดลองได้เลือกใช้ sampling frequency เพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรเท่ากับ 50 kHz และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากวงจรโฟโตไดโอดเมื่อมีลำแสงเลเซอร์มาตกกระทบเท่ากับ 15-16 โวลต์ในทุกการทดลอง

3.1.1.3 แบบจำลองฟองอากาศ

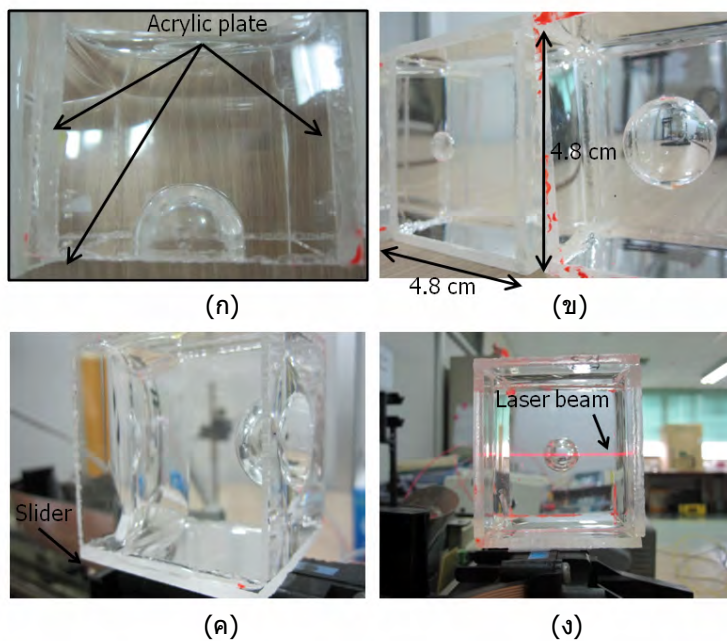
สำหรับแบบจำลองฟองอากาศเลือกใช้วัสดุคือ Polydimethylsiloxane (PDMS) เนื่องจาก PDMS หรือมีชื่อสินค้าว่า Sylgard 184 นั้นเป็นโพลีเมอร์ที่มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับกลีเซอริน คือมีค่าประมาณ 1.430 ในขณะที่กลีเซอรินนั้นมีค่าดัชนีหักเหอยู่ที่ 1.47 (กลีเซอริน 100% วัดที่อุณหภูมิ 20°C) ในการทดลองนี้ได้แยกแม่พิมพ์ของแต่ละขนาดฟองอากาศออกจากกัน โดยแม่พิมพ์ของแบบจำลองฟองอากาศมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ขนาด คือ 6, 8, 13, 16, และ 22 mm ซึ่งมีรัศมีความโค้ง (R) 3, 4, 6.5, 8, และ 11 mm ตามลำดับ โดยแม่พิมพ์ทำจากลูกบิดทรงกลมแล้วนำมาผ่าและขัดให้เป็นรูปครึ่งทรงกลม ซึ่งเป็นขึ้นเดียวกับการทดลองในปีแรก อย่างไรก็ตามตามปัญหาหนึ่งคือลูกบิดอาจจะไม่กลมอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงเลือกรัศมีความโค้งของแต่ละกรณีให้มีระยะห่างกัน (> 1 mm) ระดับหนึ่ง

ส่วนตัวโครงของแม่พิมพ์นั้นมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 4.8 cm ยาว 5.6 cm และสูง 4.8 cm โดยผาด้านข้างทั้ง 4 ด้านและผาด้านล่างนั้นทำจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 3 mm ผาด้านข้างทั้ง 4 ด้านถูกยึดติดกันด้วยกาวอีพอกซี ส่วนผาด้านล่างนั้นใช้ดินน้ำมันเป็นตัวยึดไว้ในระหว่างการขึ้นรูปแบบจำลองฟองอากาศเพื่อให้ง่ายต่อการนำลูกบิดออกจากแบบจำลองฟองอากาศในภายหลัง

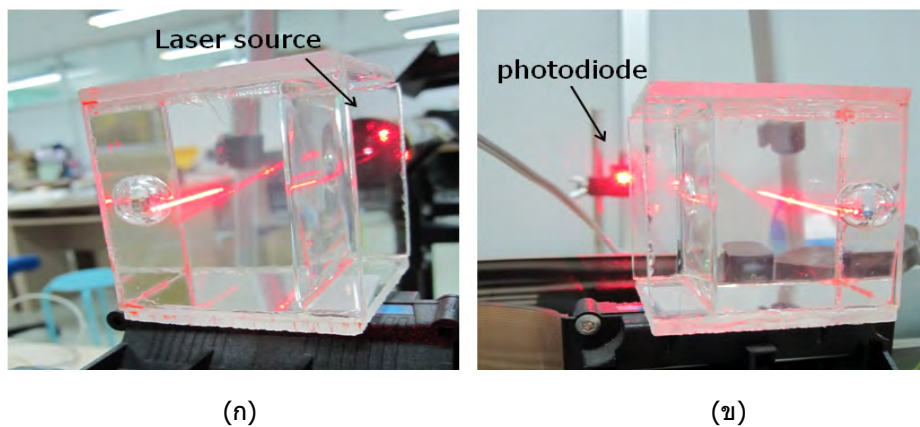
หลังจากนั้น จึงทำการผสม PDMS ด้วยอัตราส่วนระหว่างมวลของ monomer และ catalyst เท่ากับ 10:1 คนในเข้ากันที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะทำให้มีฟองอากาศขนาดใหญ่จำนวนมากแทรกเข้าไปในเนื้อวัสดุ ดังนั้นจึงต้องนำไปใส่ในตู้สุญญากาศเพื่อดูดเอาอากาศที่แทรกออกจนหมดก่อน หลังจากนั้นจึงนำ PDMS ไปเทใส่แม่พิมพ์และอบภายในเตาอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แบบจำลองฟองอากาศที่ทำออกมานั้นมีความสูงเฉพาะส่วนที่เป็นวัสดุ PDMS ไม่เท่ากัน โดยจะมีความสูงอยู่ในช่วง 3-4 cm ซึ่งทำให้น้ำหนักรวมของแบบจำลองแต่ละขนาดไม่เท่ากันด้วย โดยลักษณะของแบบจำลองฟองอากาศแสดงดังรูปที่ 3.4 จากการวัดขนาดรัศมีความโค้งของแบบจำลองฟองอากาศด้วยวิธีการถ่ายภาพได้ขนาดรัศมีความโค้งที่ปลายฟองเท่ากับ 3.25, 4.75, 7.5, 8.25, และ 11 mm ตามลำดับ สำหรับขนาดของลูกบิดที่เป็นแม่พิมพ์ดังกล่าวข้างต้น

3.1.1.4 การดำเนินการทดลองและวิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทำการทดลอง จะเริ่มจากการติดตั้งแบบจำลองฟองอากาศบนฐานรางเลื่อนโดยปรับให้ลำเลเซอร์เคลื่อนที่ผ่านตรงกลางยอดของแบบจำลองฟองอากาศพอดี และทำการติดตั้งกล้องบันทึกวีดีโอที่มีความเร็ว 30 เฟรมต่อวินาที หลังจากนั้นทำการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ให้ได้ค่าที่ต้องการ เมื่อเลื่อนแบบจำลองฟองอากาศออกไปตัดกับลำเลเซอร์ให้บันทึกวีดีโอและค่าความต่างศักย์จากวงจรโฟโตไดโอดไปพร้อมกัน จะทำให้สามารถทราบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเลเซอร์ที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้า และความเร็วของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศไปพร้อม ๆ กันได้ รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์วัดและแบบจำลองฟองอากาศซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3.1 (ก) เพียงแต่ใช้เลเซอร์เพียงชุดเดียวในการทำการสอบเทียบ



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของฟองอากาศที่ใช้ในการทดลอง; (ก)-(ข) ลักษณะโครงสร้างแบบจำลองฟองอากาศ, (ค)-(ง) การติดตั้งแบบจำลองฟองอากาศในการทดลองสอบเทียบ



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายอุปกรณ์การทดลองซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองฟองอากาศ เลเซอร์และโฟโตไดโอด และฐานวางเลื่อนที่ควบคุมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า

ในเบื้องต้นความเร็วของการเคลื่อนที่สำหรับแต่ละขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนไปสู่มอเตอร์เมื่อติดตั้งแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดต่างกันได้ทำการสอบเทียบก่อน ผลการสอบเทียบที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 6, 9, 12, และ 16 โวลต์แสดงในรูปที่ 3.6 โดยขนาดความเร็วหาจากการหารระยะห่างระหว่างจุดเดียวกันของแบบจำลองฟองอากาศบนรูปภาพสองรูปที่ต่อเนื่องกันที่ถูกรับที่กด้วยอัตราเร็ว 30 เฟรมต่อวินาที ซึ่งจะทำให้คำนวณหาขนาดความเร็วได้ ภาพถ่ายในรูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายที่แสดงลำดับของการเคลื่อนที่ที่ต่อเนื่องกันของแบบจำลองฟองอากาศ สำหรับกรณีที่ป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 6 โวลต์ โดยเรียงลำดับจาก ก-ฉ โดยแต่ละรูปจะมีเวลาต่างกัน $1/30$ วินาที วิธีการวัดความเร็วดังกล่าวมีความผิดพลาดไม่เกิน 9% สำหรับทุกกรณีที่ทำการทดลอง โดยความผิดพลาดนั้นพิจารณาจากความแปรปรวนของขนาดความเร็วที่คำนวณได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ต่อเนื่องกันโดยส่วนใหญ่ความแปรปรวนนี้มีค่าไม่เกิน 5% ยกเว้นกรณีที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 โวลต์ซึ่งมีความเร็วในการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศสูงและมีผลทำให้กล้องไม่สามารถบันทึกภาพได้ทัน

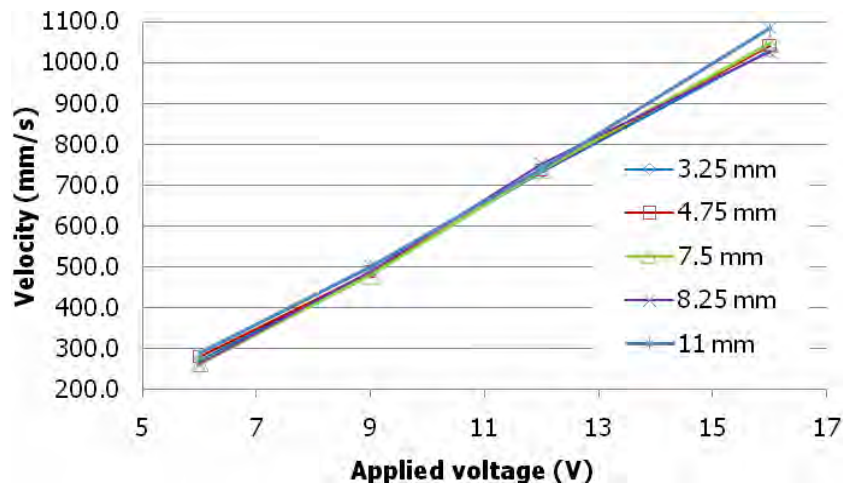
จากผลการทดลองของทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศ พบว่าความเร็ว (V) เพิ่มขึ้นจากประมาณ 270, 490, 740 ไปถึง 1045 mm/s ในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า 6, 9, 12 และ 16 โวลต์ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วค่อนข้างจะแปรผันตามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนสู่มอเตอร์เป็นเชิงเส้นตรง โดยแต่ละขนาดแบบจำลองฟองอากาศจะมีความเร็วต่างกันเพียงเล็กน้อย จากการทดลองพบว่าความเร็วแตกต่างกันไม่เกิน 4% ซึ่งความแตกต่างนี้น้อยมาก

หลังจากนั้นจึงทำการทดลองโดยใช้เลเซอร์ไดโอดไปตรวจสอบลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรโฟโตไดโอดในแต่ละกรณี โดยนำแบบจำลองไปติดตั้งและเลื่อนแบบจำลองให้ตัดกับลำเลเซอร์ด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ กัน เมื่อแบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ตัดกับลำเลเซอร์จะทำให้ทิศทางของเลเซอร์เปลี่ยนแปลงออกไปจากแนวที่จะกระทบกับเซนเซอร์ของโฟโตไดโอด โดยทำให้ขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้ามีขนาดลดลงดังแสดงตัวอย่างของกรณีแบบจำลองฟองอากาศขนาดรัศมีมีความโค้ง 3.25 mm เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ กันตัดลำแสงเลเซอร์ในรูปที่ 3.8 โดยแกนนอนแสดงเวลาและแกนตั้งแสดง Normalized voltage จากตำแหน่งปลายยอดฟองไปถึงตำแหน่งที่ทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอดลดลงเป็นศูนย์ โดย Normalized voltage สามารถคำนวณได้จากการนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งใด ๆ หารด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนที่เลเซอร์จะตัดผ่านฟองอากาศ สำหรับการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าได้คิดไว้ที่ 2% ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดหรือคิดเป็น 4 เท่าของ noise ในการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งค่า noise มีค่าประมาณ 0.5%

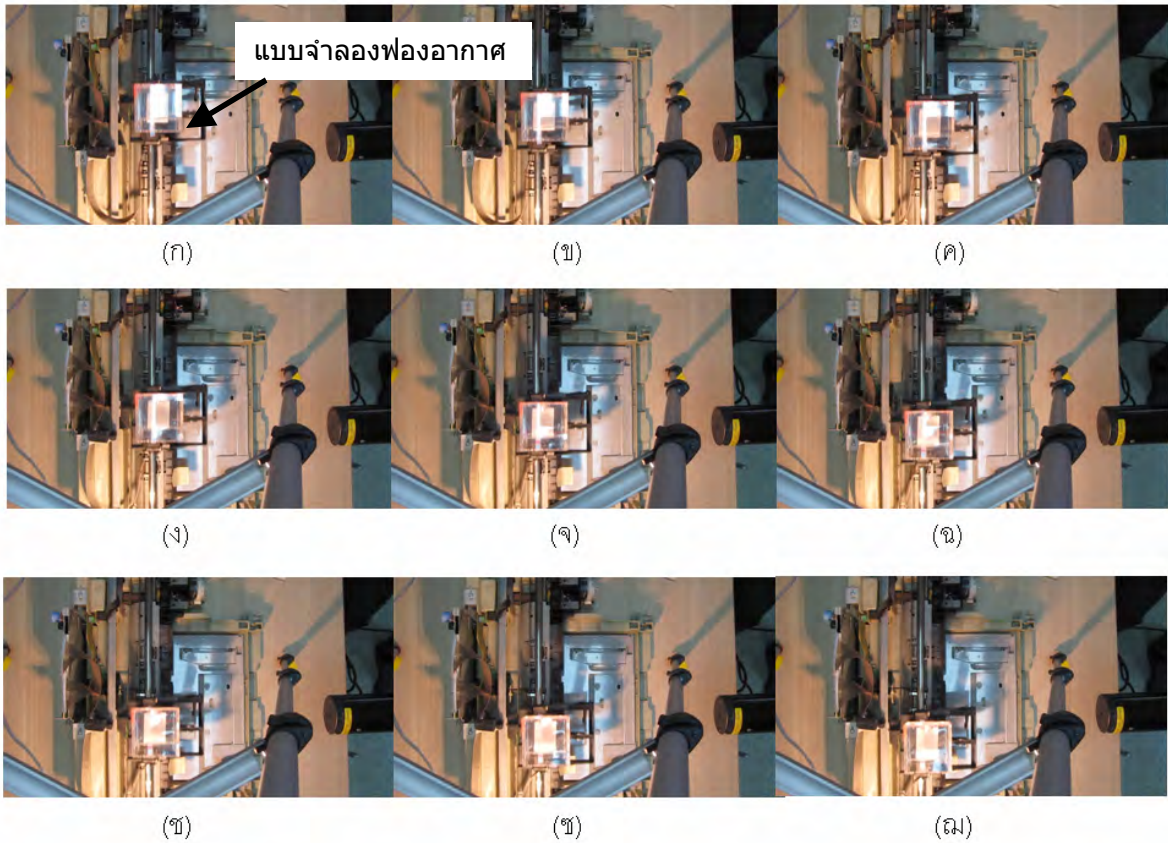
จากผลการทดลองพบว่า การลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอดจะลดลงค่อนข้างเร็วในช่วงต้นและจะค่อย ๆ ช้าลงในช่วงท้ายสำหรับทุกความเร็วของการเคลื่อนที่ เมื่อความต่างศักย์ที่ใช้ขับเคลื่อนสูงขึ้นแบบจำลองฟองอากาศก็เคลื่อนที่เร็วขึ้น ส่งผลทำให้ความต่างศักย์ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ในเวลา (T_0) ที่สั้นลงด้วย

รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ที่ใช้ช่วงเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนเป็นศูนย์ไปหารเวลาแต่ละช่วง โดยจะเรียกเทอมนี้ว่า "Time fraction" หรือ T/T_0 จากกราฟพบว่าความต่างศักย์ไฟฟาลดลงค่อนข้างเร็วในช่วงต้นและลดลงอย่างช้า ๆ ในช่วงหลัง โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะลดลงถึง 50% ในช่วงเพียง

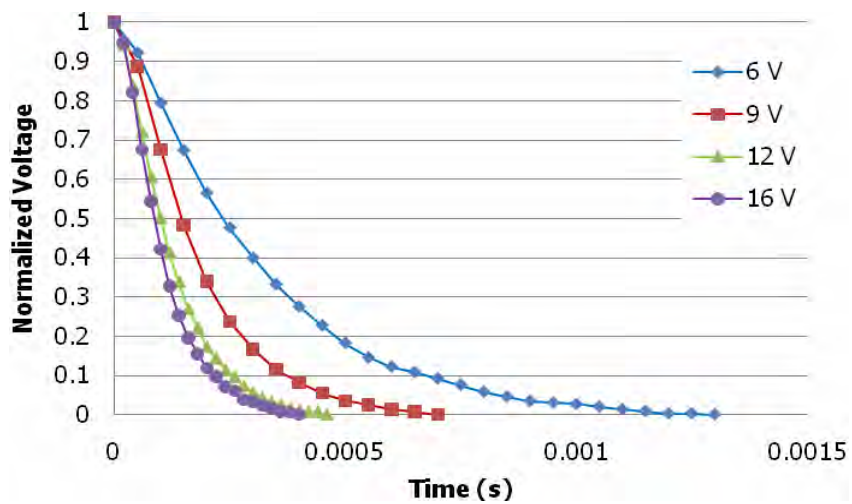
20% ของช่วงเวลาทั้งหมดในตอนต้น และในตอนท้ายจะเห็นว่าการลดลงของค่าความต่างศักย์เพียง 10% กลับต้องใช้ระยะเวลาถึงประมาณ 60% ของช่วงเวลาทั้งหมด โดยผลการทดลองในส่วนนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองแบบสถิตในปีแรก (รูปที่ 3.10ก นามาจากกราฟรูปที่ 3.20 ในรายงานปีแรก) ซึ่งบ่งชี้ว่าที่ทุก ๆ ความเร็วของการเคลื่อนที่ที่คงที่นี้ การหักเหของลำเลเซอร์บนตำแหน่งต่าง ๆ บนแบบจำลองฟองอากาศจะสอดคล้องกันหมดทำให้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์นี้ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction สอดคล้องกันหมดสำหรับทุกขนาดความเร็ว



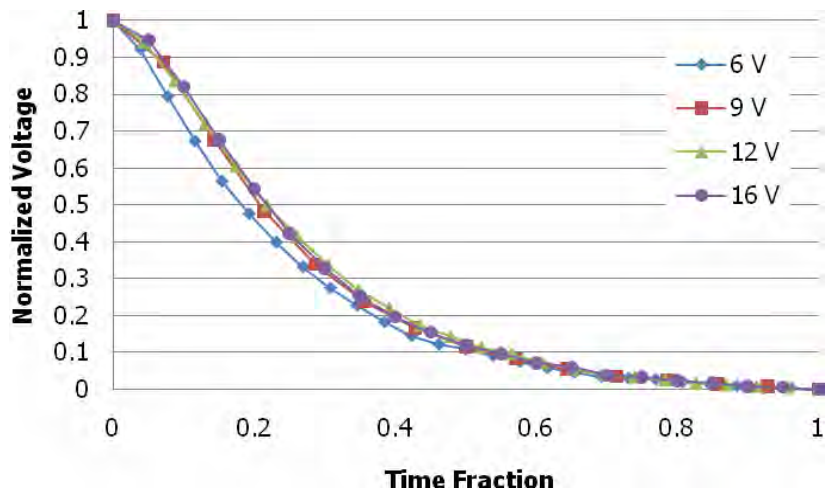
รูปที่ 3.6 ความเร็วของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศของทุกกรณีที่มีความต่างศักย์ต่าง ๆ



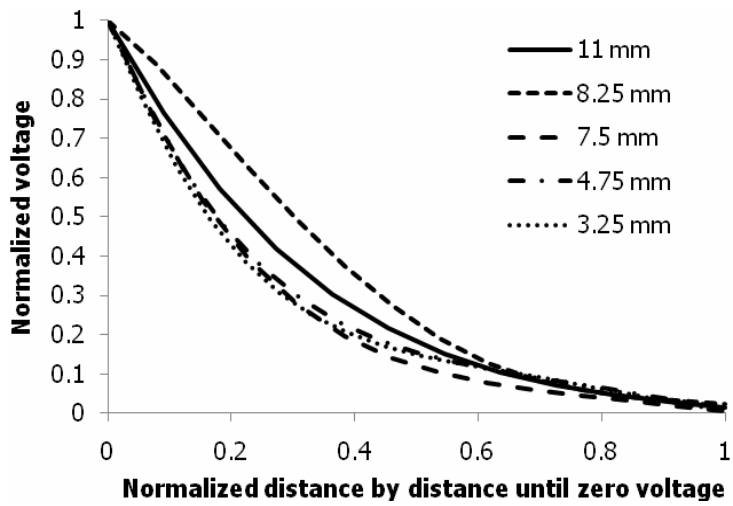
รูปที่ 3.7 ลำดับภาพถ่ายการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศจากด้านบน (30 เฟรมต่อวินาที)



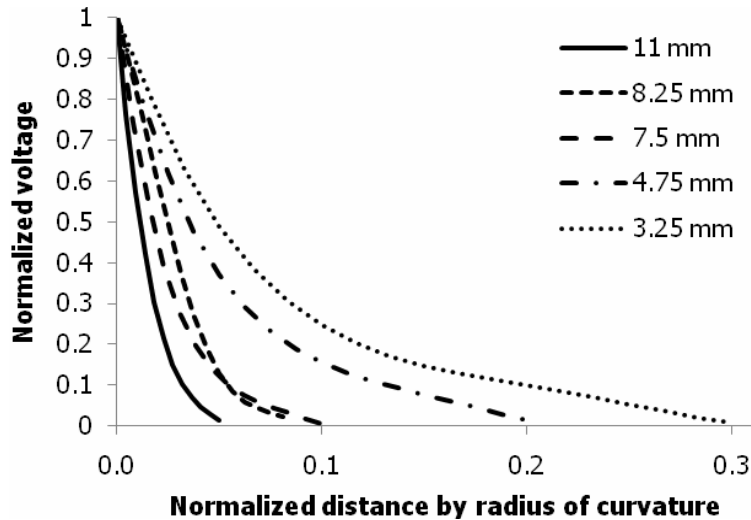
รูปที่ 3.8 การลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากอุปกรณ์วัดเมื่อป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาดต่างๆไปสู่มอเตอร์ สำหรับแบบจำลองฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction สำหรับแบบจำลองฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.10 ผลการทดลองจากการสอบเทียบแบบสถิตจากการศึกษาในปีที่หนึ่ง; (ก) Normalized voltage VS Normalized distance ด้วยระยะทางจนความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงเป็นศูนย์, (ข) Normalized voltage VS Normalized distance ด้วยขนาดของรัศมีมีความโค้ง

หากนำเอาข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าของกรณีรัศมีมีความโค้งเท่ากับ 3.25 mm มาวิเคราะห์ในอีกลักษณะหนึ่งคือ นำเวลามาคูณด้วยความเร็วของการเคลื่อนที่และหารด้วยขนาดของรัศมีมีความโค้ง โดยเรียกเทอมนี้ว่า "Normalized time" หรือ $(T \times V)/R$ โดยแสดงผลในรูปที่ 3.11 พารามิเตอร์นี้จะเป็นการบ่งชี้ถึงระยะทางที่ลำแสงเลเซอร์หักเหออกไปจากทิศทางเดิมจนทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอดลดลงจนเป็นศูนย์ โดยระยะทางนี้แสดงเป็นอัตราส่วนกับระยะรัศมีมีความโค้งของแบบจำลองฟองอากาศ ในการศึกษาที่ระยะที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอดลดลงจนเป็นศูนย์จะเป็นระยะประมาณ 0.1-0.12 เท่าของรัศมีมีความโค้ง ซึ่งจะสั้นกว่าผลการศึกษาแบบสถิตในปีแรก (รูปที่ 3.10 ข) นำมาจากกราฟรูปที่ 3.19 ในรายงานปีแรก) ที่มีระยะประมาณ 0.3 เท่า ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนชนิดโฟโตไดโอดใหม่ โดยโฟโตไดโอดตัวใหม่มิมีมุมที่สามารถรับแสงได้แคบว่าประมาณ 2 เท่า ซึ่งก็ทำให้ระยะทางดังกล่าวสั้นลงประมาณ 2 เท่าเช่นเดียวกัน

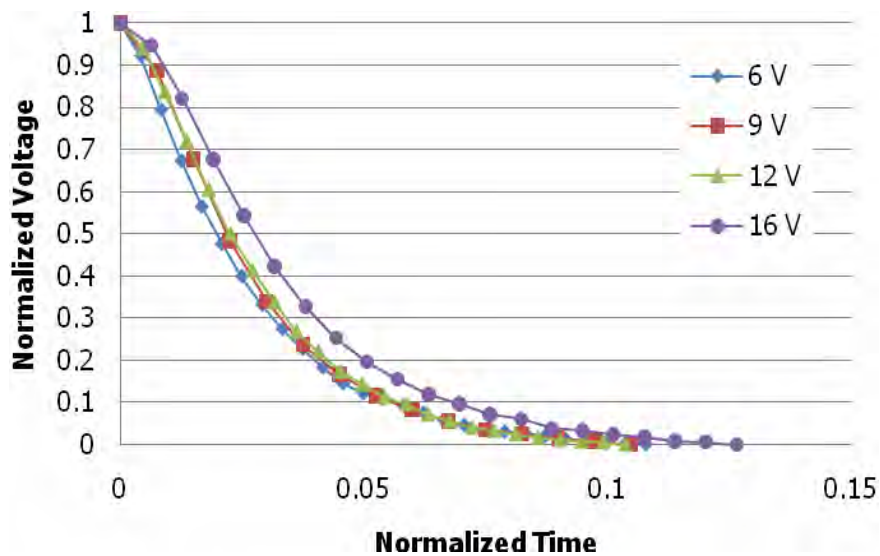
3.1.1.5 ผลการทดลองสำหรับแบบจำลองฟองอากาศในทุกกรณี

หลังจากนั้น การทดลองทุกกรณีได้ถูกวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันนี้และนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดลองทุกกรณี ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์สำหรับ Normalized voltage และ Time fraction และความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

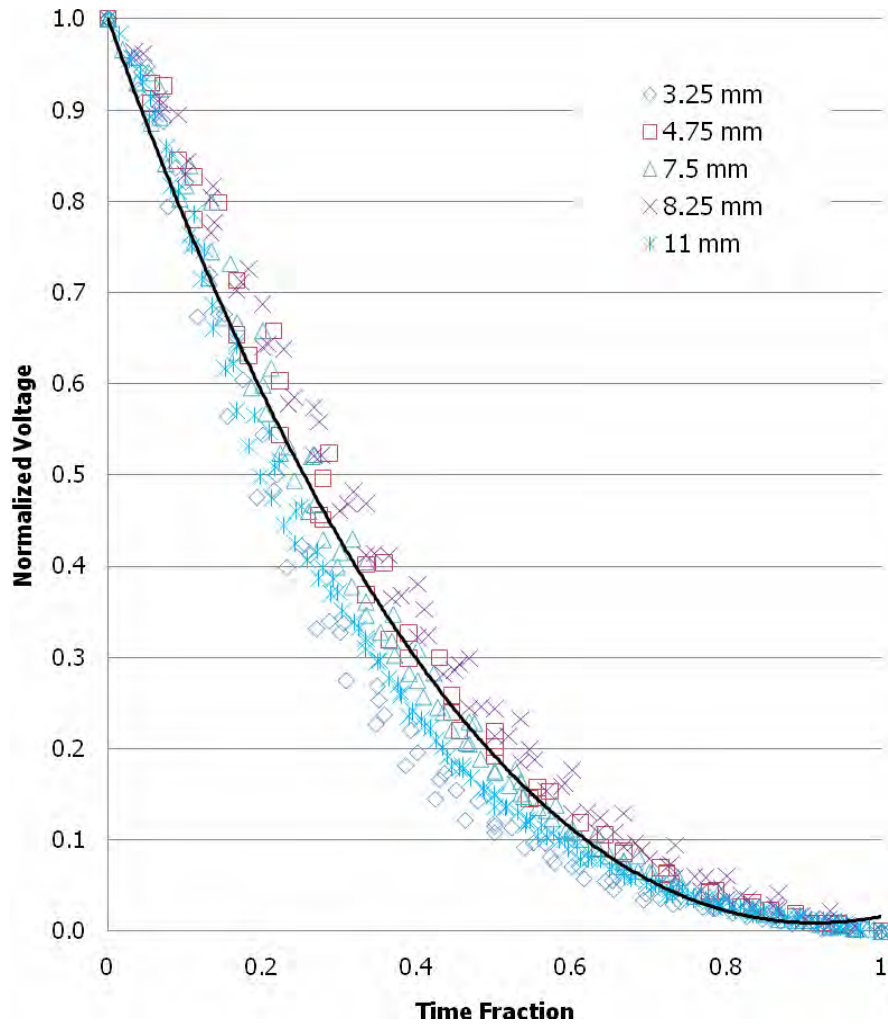
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction (รูปที่ 3.12) พบว่าลักษณะความสัมพันธ์ของทุกขนาดของแบบจำลองฟองอากาศจะให้ลักษณะแนวโน้มเดียวกัน โดยเส้นที่บแสดง

แนวโน้มเฉลี่ยของทุกกรณี ซึ่งค่า Normalized voltage ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและจะเริ่มช้าลงในช่วงท้าย โดยความต่างศักย์ลดลงประมาณ 50% ตั้งแต่ช่วงเวลาเพียง 20% ของเวลาทั้งหมด ในขณะที่ความต่างศักย์ลดลงถึง 10% ที่ช่วงเวลาประมาณ 60% ของช่วงเวลาทั้งหมด โดยความสัมพันธ์นี้ หากนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองแบบสถิตในปีแรก (รูปที่ 3.10ก) จะมีลักษณะที่สอดคล้องกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าการหักเหของแสงบนผิวโค้งของฟองอากาศไม่ขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ลำเลเซอร์ตกกระทบบนผิวโค้งเท่านั้น

ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่า เมื่อนำอุปกรณ์วัดไปวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่แล้ว ลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอดเมื่อนำมาวิเคราะห์แบบ normalization นี้ (สำหรับอัตราส่วนระหว่างรัศมีของลำเลเซอร์และฟองอากาศในช่วงของการทดลองนี้) จะมีลักษณะเดียวกันหมด และไม่สามารถแยกความแตกต่างของแต่ละกรณีทั้งขนาดของฟองอากาศและความเร็วของการเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time สำหรับแบบจำลองฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm

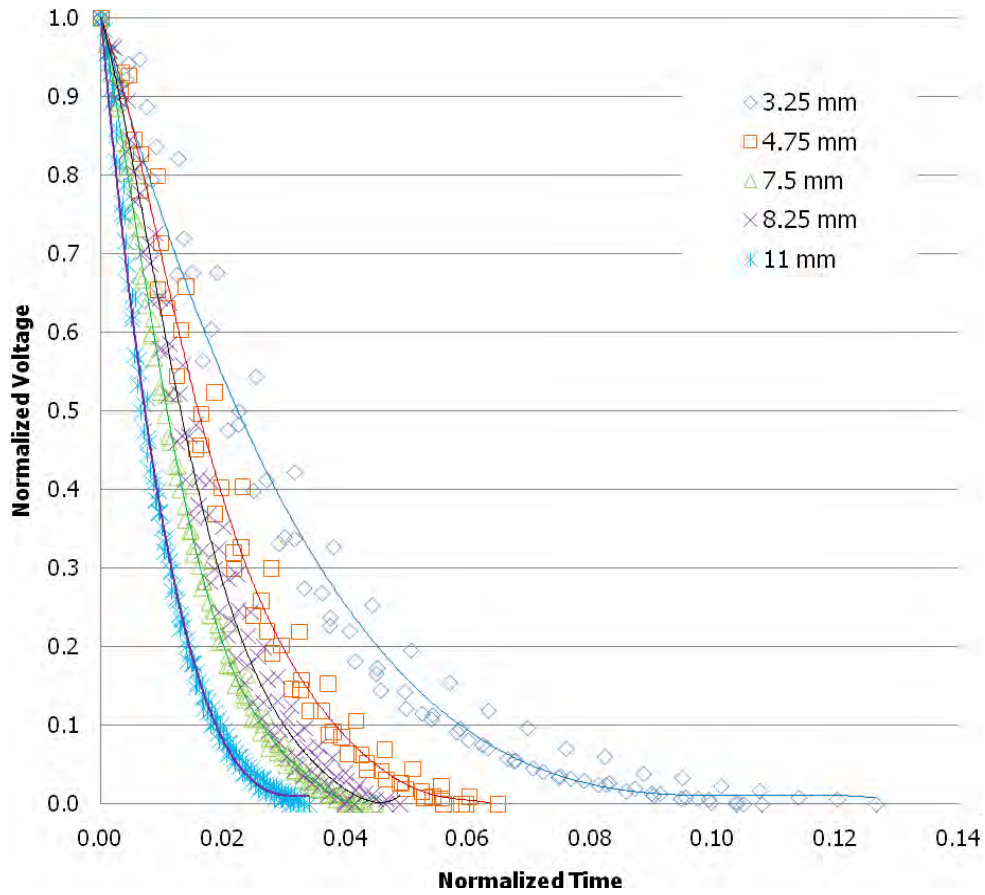


รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction สำหรับทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ (variation ของ Normalized voltage = ± 0.1)

อย่างไรก็ตามจากความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time ในรูปที่ 3.13 บ่งชี้ว่าแบบจำลองที่มีขนาดรัศมีความโค้งเล็กจะมีลักษณะการลดลงของ Normalized voltage ช้ากว่าบนแกน Normalized time ในขณะที่ Normalized voltage ของแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่จะลดลงบนแกน Normalized time เร็วกว่า ซึ่งผลการทดลองจะสอดคล้องกับการสอบเทียบแบบสถิตในปีแรกซึ่งบ่งชี้ว่าล้าเลเซอร์จะหักเหบนผิวโค้งของแบบจำลองขนาดเล็กที่ตำแหน่งจากปลายยอดฟองได้ลึกกว่าจนถึงตำแหน่งที่ล้าเลเซอร์ถูกหักเหเปลี่ยนทิศทางไปและมีทิศทางออกไปจากโฟโต้ไดโอดจนหมด ซึ่งผลการทดลองนี้สนับสนุนสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ในปีแรกเกี่ยวกับวิธีการนำอุปกรณ์วัดไปใช้งานซึ่งหากทราบรัศมีความโค้งของฟองอากาศแล้วอาจจะสามารถนำอุปกรณ์ไปวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ได้

หรือในทางกลับกัน หากทราบความเร็วของการไหลแล้วอาจจะนำอุปกรณ์ไปใช้วัดขนาดของฟองอากาศได้เช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าผลการทดลองดังกล่าวอาจจะไม่สามารถอธิบายผลการทดลองของกรณีที่มีความโค้งของฟองอากาศขนาด 7.5 และ 8.25 mm ได้ ซึ่งผลการทดลองนี้ก็มีลักษณะเดียวกันในการทดลองแบบสถิตคือแบบจำลองขนาด 8.25 mm กลับมีการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าช้ากว่าขนาด 7.5 mm ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่แบบจำลองฟองอากาศมีรัศมีความโค้งไม่สม่ำเสมอจนเกินไปในท่อนต้น หรือลักษณะของสัญญาณต่างกันน้อยมากและน้อยกว่า uncertainty ของการทดลอง



รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time สำหรับทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศและการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ

3.1.2 การสอบเทียบด้วยการเคลื่อนที่ที่มีความเร่ง

การศึกษาในส่วนนี้ใช้ตรวจสอบผลของความเร่งของการเคลื่อนที่โดยการสร้างการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งขึ้นมาและศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอด โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือชุดทดลองที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้วปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลา และชุดทดลองที่ใช้สปริงบนรางเลื่อนสร้างการเคลื่อนที่ โดยรายละเอียดของทั้งสองการทดลองมีดังนี้

3.1.2.1 การควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าของมอเตอร์เพื่อสร้างความเร่งของการเคลื่อนที่

ชุดทดลองในส่วนนี้เป็นชุดเดียวกับการทดลองด้วยความเร็วคงที่ที่กล่าวไปแล้ว แต่ในระหว่างทำการทดลองจะปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยการหมุนปุ่มปรับแรงดันไฟฟ้าในขณะที่แบบจำลองเคลื่อนที่อยู่ และทำการบันทึกสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอด พร้อมกับทำการบันทึกความต่างศักย์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ (แยกกราวด์ระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับออสซิลอสโคป) จะทำให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจากวงจรโฟโตไดโอดนั้นเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วและความเร่งอย่างไรโดยดูจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า (ความเร็วของการเคลื่อนที่แปรผันตรงตามความต่างศักย์ไฟฟ้า) อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ไม่สามารถปรับการเปลี่ยนสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติได้จึงใช้การปรับด้วยมือหมุนปุ่มปรับและทำการทดลองหลายครั้งเพื่อให้ได้การทดลองหลายกรณี ซึ่งวิธีการนี้จะมีข้อจำกัดคือความเร่งที่สร้างได้ในขณะที่แบบจำลองเคลื่อนที่ตัดลำเลเซอร์มีขนาดที่ไม่สูงนัก

ในการทำการทดลอง ได้ศึกษากับแบบจำลองขนาด 3.25 และ 11 mm โดยได้ทำการทดลองหลายครั้งและนำค่าความต่างศักย์มาเปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองที่มีความเร็วของการเคลื่อนที่คงที่และการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งแบบต่าง ๆ รูปที่ 3.14 แสดงผลการทดลองของกรณีรัศมีความโค้งแบบจำลองฟองอากาศเท่ากับ 3.25 mm สำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วคงที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าป้อนมอเตอร์เท่ากับ 9 โวลต์ สำหรับผลการทดลองที่มีความเร่งมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ ± 1 และ ± 2 โวลต์ต่อวินาที หรือคิดเป็นค่าความเร่งประมาณ ± 0.1 และ $\pm 0.2 \text{ m/s}^2$ ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นขนาดของความเร่งที่น้อยมาก

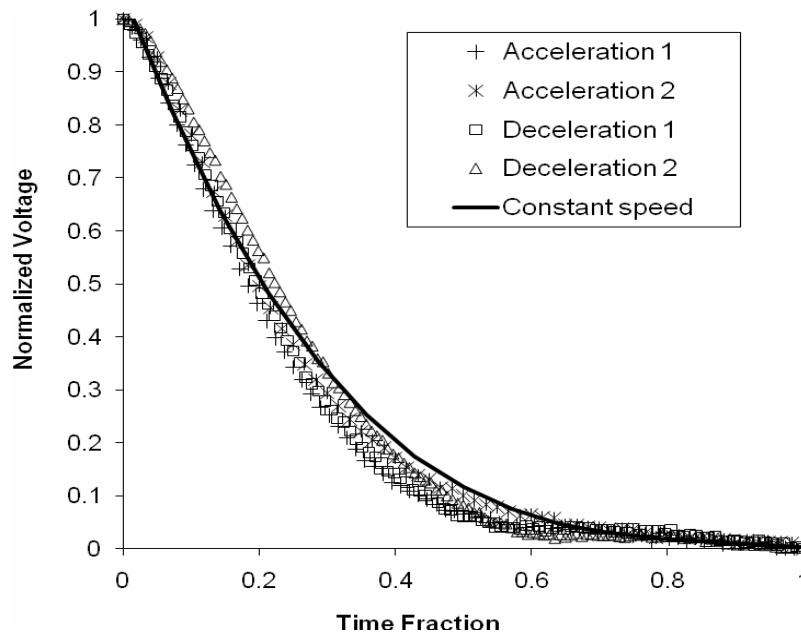
จากผลการทดลองทั้งสองพบว่าการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งจะมีลักษณะความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction คล้ายกับกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่โดยมีความแตกต่างของค่า Normalized voltage ประมาณ ± 0.05 ซึ่งผลการทดลองนี้แสดงความแตกต่างไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากความเร่งที่สร้างได้มีค่าไม่สูง และความเร่งดังกล่าวก็ไม่สามารถควบคุมให้สม่ำเสมอได้ส่งผลทำให้ลักษณะสัญญาณมีความแตกต่างกันในแต่ละการทดลอง

3.1.2.2 แบบจำลองสัญญาณจากวงจรโฟโตไดโอดสำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร่ง

ดังนั้นในการศึกษาส่วนนี้จึงลองจำลองสัญญาณขึ้นมาเพื่อหาแนวโน้มของผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของความเร่งของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอด ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณเลเซอร์ที่ตกกระทบบน

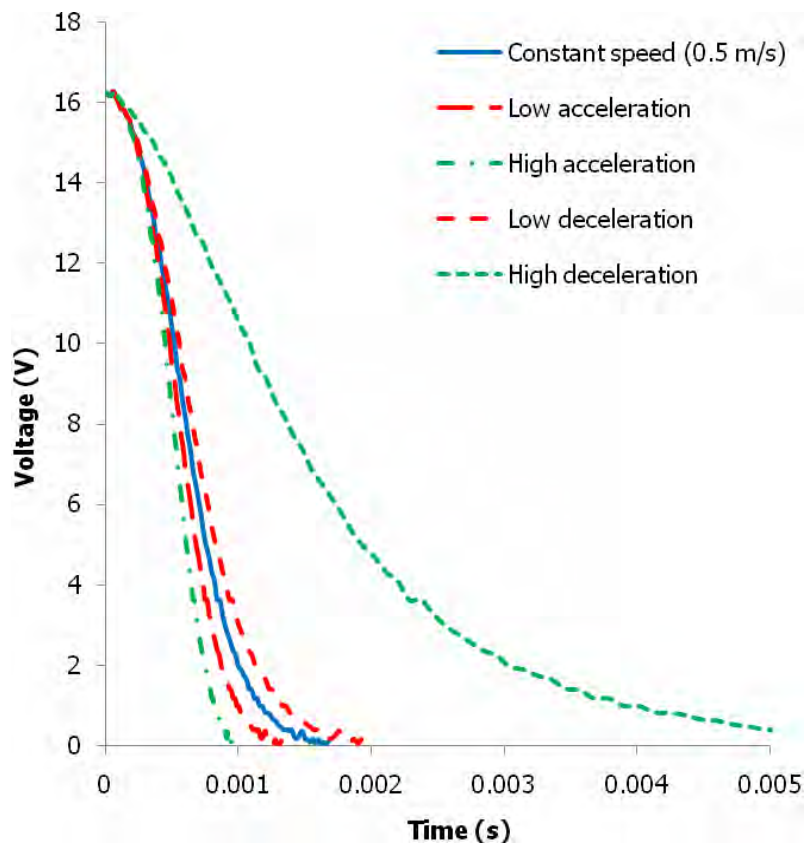
เซนเซอร์ของโฟโตไดโอด ในการศึกษาส่วนนี้ได้เลือกลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เก็บมาจากการทดลองที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ของแบบจำลองที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm ก่อนหน้านี้ แล้วนำมาเปลี่ยนแปลงเวลาของสัญญาณเพื่อจำลองลักษณะของสัญญาณสำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งขึ้น โดยสัญญาณที่จำลองขึ้นมาแสดงในรูปที่ 3.15 หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ให้เป็น Normalized voltage และ Time fraction ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยสัญญาณที่จำลองขึ้นมา มีขนาดความเร่งสองช่วงคือความเร่งและความหน่วงมีขนาดต่ำและสูง

จากการศึกษาพบว่าหากความเร่งและความหน่วงมีค่าต่ำกว่า 1 m/s^2 (low acceleration/deceleration) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ Normalized voltage และ Time fraction มีความใกล้เคียงกันกับสัญญาณของการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่มากซึ่งมีความแตกต่างโดยประมาณของค่า Normalized voltage น้อยกว่า 0.1 ส่งผลทำให้แยกความแตกต่างนี้ได้ยาก โดยเฉพาะหากเป็นสัญญาณที่เกิดจากการวัดจริงซึ่งมี noise อยู่ด้วย (variation ประมาณ ± 0.1 จากรูปที่ 3.12) อย่างไรก็ตามหากความเร่งและความหน่วงมีค่าสูงกว่า 10 m/s^2 (high acceleration/deceleration) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า จะมีความแตกต่างของสัญญาณ Normalized voltage จากกรณีที่แบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่สูงขึ้น โดยมีความแตกต่างมากกว่า 0.3 ซึ่งในการทดลองจริงผู้ทดลองจะสังเกตเห็นความแตกต่างของสัญญาณได้ง่ายขึ้น

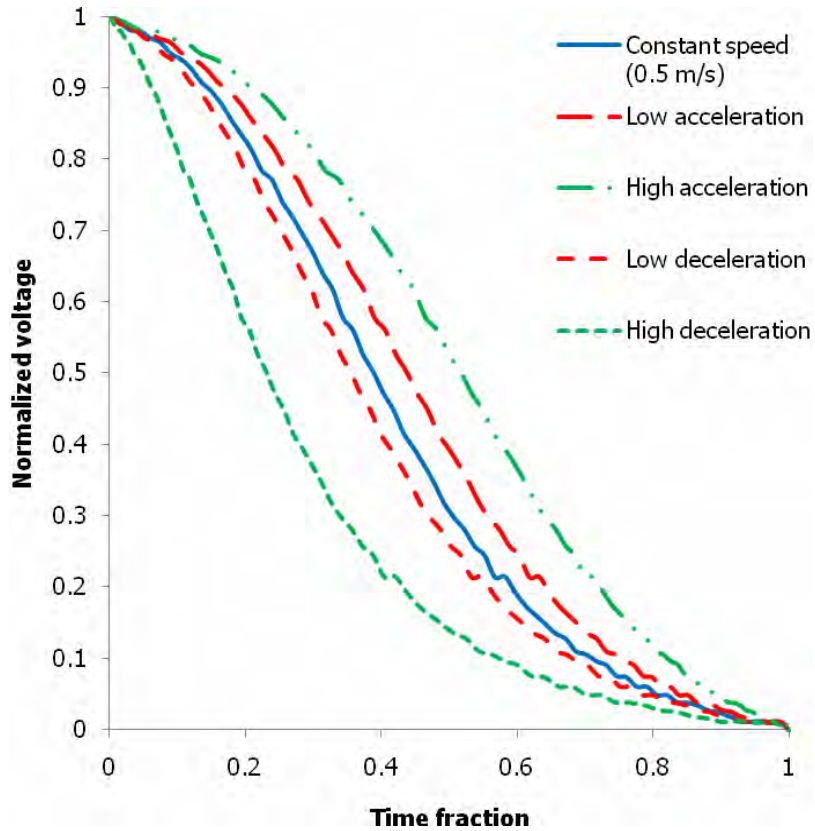


รูปที่ 3.14 Normalized voltage และ Time fraction สำหรับแบบจำลองฟองอากาศขนาด 3.25 mm ที่ควบคุมด้วยความความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่เปรียบเทียบกับกรณีที่เปลี่ยนแปลง ± 1 และ ± 2 Volt/s

ผลของการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสัญญาณดังกล่าวพบว่า การลดลงของสัญญาณของ Normalized voltage ต่อ Time fraction สำหรับกรณีเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจะช้ากว่ากรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในทางกลับกันสำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความหน่วงการลดลงของสัญญาณจะเร็วกว่าเมื่อความเร่งและความหน่วงมีขนาดมากขึ้นก็จะทำให้ความแตกต่างจากกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่มากขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อนำอุปกรณ์ไปใช้วัดการไหลแล้วอุปกรณ์จะตรวจจับได้ว่าการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งหรือความหน่วงหรือไม่ รวมถึงความเร่งหรือความหน่วงดังกล่าวมีค่ามากหรือน้อยได้



รูปที่ 3.15 ลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จำลองขึ้นมาสำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เปรียบเทียบกับสัญญาณเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่จากการทดลอง



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction ของสัญญาณที่จำลองขึ้นมา สำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เปรียบเทียบกับกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่จากการทดลอง

3.1.2.3 การใช้ระบบสปริง

ในการศึกษานี้จึงจำเป็นต้องหาวิธีสร้างการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งสูงขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนความเร่งของการเคลื่อนที่จากชุดทดลองที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนที่ผ่านมาทำได้ลำบาก ถึงแม้จะมีเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าและ DC supply ที่ดีกว่านี้ก็อาจจะสร้างความเร่งที่มีขนาดสูงกว่า 10 m/s^2 ไม่ได้ เพราะว่าการเคลื่อนที่ของแบบจำลองอยู่ในช่วงเวลาเพียง 0.2 วินาทีในระยะทาง 30 cm และขนาดมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างเล็ก โดยหลักการหนึ่งที่สามารถสร้างการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งค่อนข้างสูงคือการใช้ระบบสปริงและมวลบนรางเลื่อนซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

หลักการในการเลือกสปริงมาใช้งานให้ได้ความเร็วและความเร่งที่ต้องการนั้นได้พิจารณาสมการ Hook's law สมการพลังงานศักย์ของสปริง และสมการการเคลื่อนที่ของนิวตันร่วมกับสมมติฐานว่าแรงเสียดทานระหว่างล้อและพื้นน้อยมาก ในการออกแบบชุดทดลองได้เปรียบเทียบสปริง 4 ลักษณะที่มี

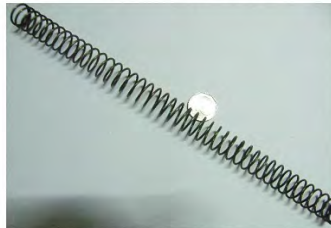
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.17 แล้วทำการทดลองหาค่า stiffness ของสปริงทั้งหมดเพื่อประมาณค่าความเร็วและความเร่งที่จะเกิดขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า สปริงทั้งสี่ ลักษณะสามารถสร้างการเคลื่อนที่ในช่วงความเร็ว 0.5-2 m/s และความเร่งในช่วงสูงกว่า 10 m/s² ได้ (ภายใต้สภาวะที่กำหนด) ดังนั้นการเลือกใช้สปริงจึงยึดหลักกว่าใช้สปริงที่มีความสะดวกในการใช้งานมากที่สุด เมื่อพิจารณาความเหมาะสมในการใช้งาน จึงเลือกใช้สปริงแบบที่สาม (รูปที่ 3.17 ค) ซึ่งสามารถนำมาใช้สร้างเงื่อนไขของการทดลองตามที่ต้องการได้



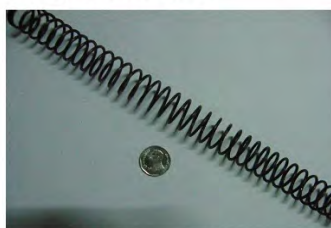
(ก) $k=69$ N/m (ทิศทางเดียว), ยาว 28.5 ซม., เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม.



(ข) $k=170$ N/m, ยาว 30 ซม., เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 ซม.



(ค) $k=230$ N/m, ยาว 30 ซม., เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 ซม.



(ง) $k=400$ N/m, ยาว 30 ซม., เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 ซม.

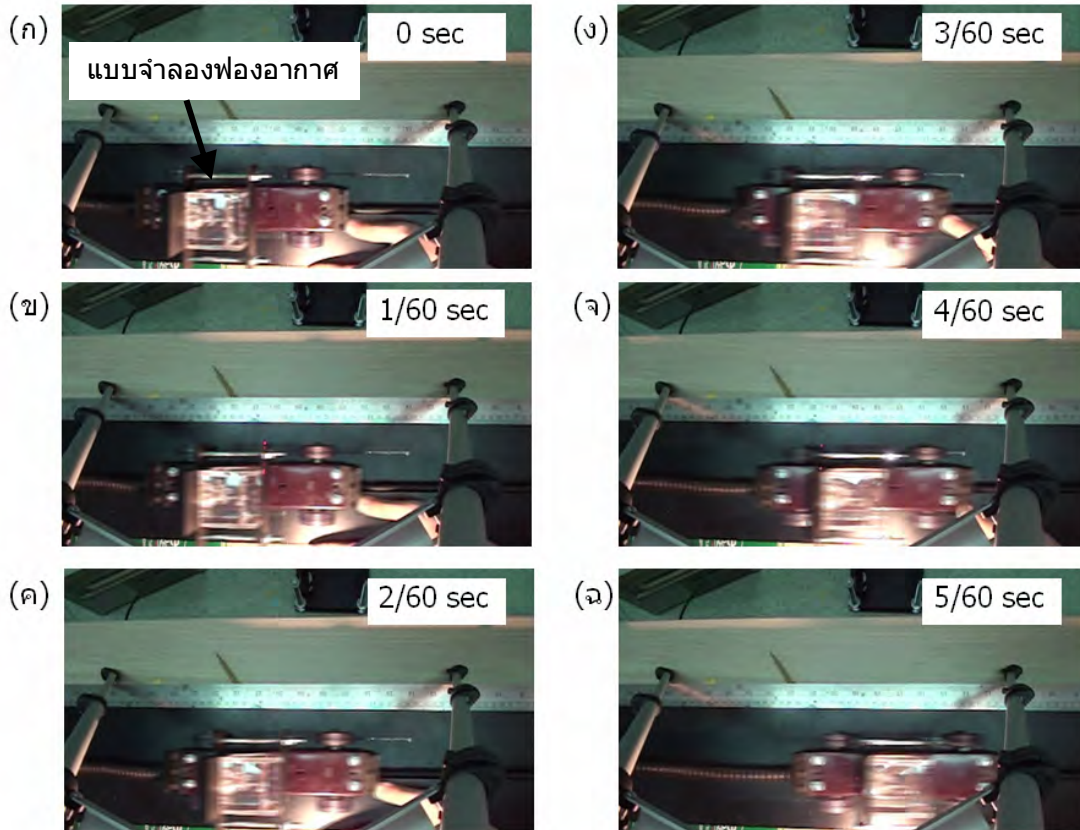
รูปที่ 3.17 สปริงขนาดและแบบต่าง ๆ และผลการทดลองวัดค่าคงที่สปริง (Spring stiffness, k)

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาผลของความเร่งต่อลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์จากวงจรไฟโตไดโอดสำหรับขนาดของฟองอากาศที่รัศมีมีความโค้ง 3.25 และ 11 mm โดยชุดทดลองมีหลักการที่กล่าวไว้ตอนต้นและแสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 ข ชุดทดลองจะเคลื่อนที่ได้ในระยะทางประมาณ 20 cm และมีฐานล้อเลื่อนที่สามารถติดตั้งแบบจำลองฟองอากาศได้ซึ่งเมื่อกดสปริงและปล่อยให้แบบจำลองเคลื่อนที่ออกมา ความเร่งของการเคลื่อนที่จะลดลงตามระยะการเคลื่อนที่ในลักษณะที่มีการลดลงอย่างคงที่

ในการทดลองนี้ได้ติดตั้งแบบจำลองอากาศและวัดการเคลื่อนที่ด้วยชุดเลเซอร์ที่ตำแหน่งตรงกลางของระยะเคลื่อนที่ (ระยะ 10 cm) พร้อมกับการบันทึกวีดิโอการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศเพื่อวัดความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 60 เฟรมต่อวินาที (กล้องคนละตัวกับการทดลองในส่วนแรก) หลังจากนั้นจะสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตามจากการทดลองเบื้องต้นพบว่ากล้องวีดิโอที่อัตราเฟรม 60 เฟรมต่อวินาทียังไม่สามารถบันทึกได้อย่างเหมาะสมโดยในช่วงการเคลื่อนที่ดังกล่าวแบบจำลอง

ฟองอากาศใช้เวลาเคลื่อนที่เพียงประมาณ 0.2 วินาทีเท่านั้น ทำให้ภาพที่บันทึกได้มีประมาณ 10 รูปใน
 ระยะเวลาเคลื่อนที่ดังกล่าวส่งผลให้การคำนวณขนาดความเร็วและความเร่งทำได้อย่างหยาบ ๆ เท่านั้น

ภาพตัวอย่างของการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.18 ซึ่งแสดงภาพต่อเนื่องของการทดลองสำหรับ
 แบบจำลองฟองขนาดรัศมีมีความโค้ง 11 mm โดยแต่ละเฟรมมีระยะเวลาห่างกัน 1/60 วินาที หลังจากนั้น
 จึงทำการหาค่าความเร็วและความเร่งโดยประมาณ ซึ่งพบว่ามีความเร่งเท่ากับ 10-20 m/s² ในทุก
 กรณีที่ทำการทดลอง

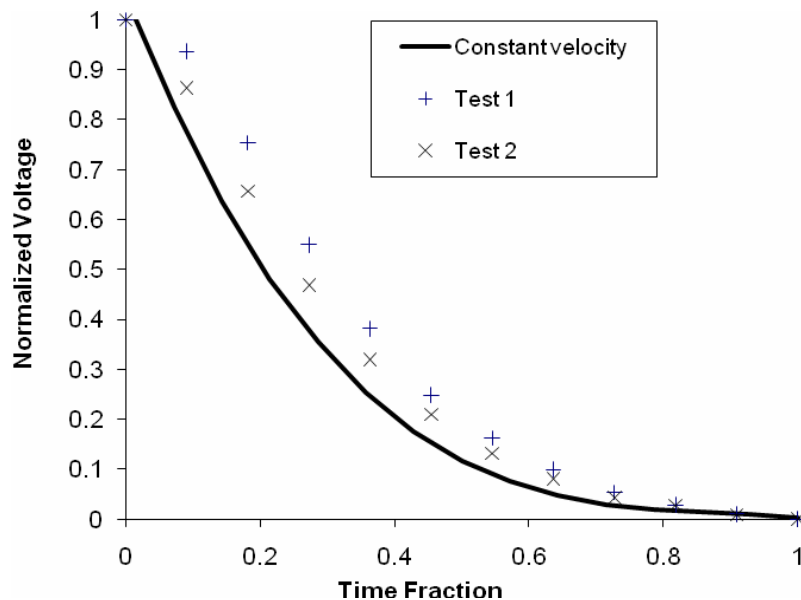


รูปที่ 3.18 ภาพแสดงลำดับการเคลื่อนที่ของล่อเลื่อนที่บรรจุทุกแบบจำลองฟองอากาศมีขนาดรัศมี
 ความโค้ง 11 mm

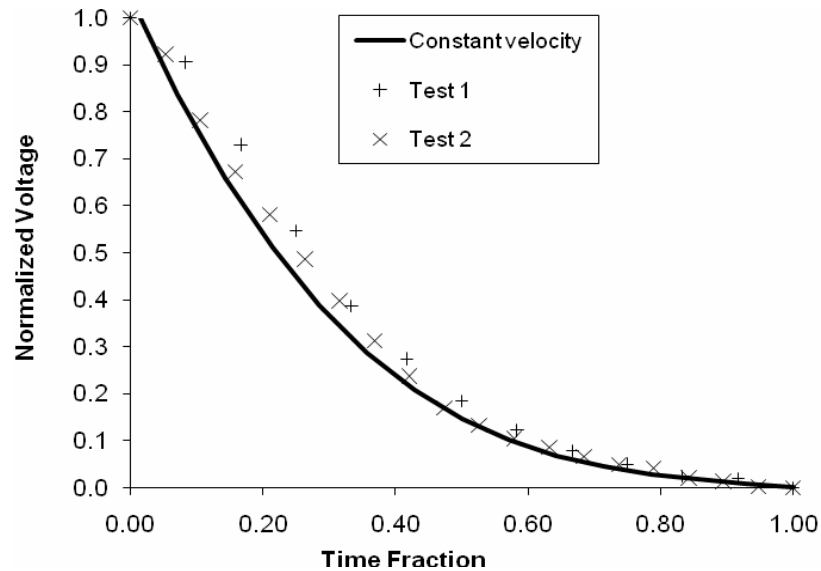
ผลการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19 และ 3.20 โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า
 Normalized voltage และ Time fraction ซึ่งจากกราฟทั้งสองจะเห็นว่าเมื่อแบบจำลองฟองอากาศ
 เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ลักษณะกราฟจะมีแนวโน้มต่างออกไปจากกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่
 เล็กน้อย โดยที่ค่า Time fraction เดียวกันค่า Normalized voltage จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเป็นการเคลื่อนที่
 ด้วยความเร่ง และลักษณะแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับแบบจำลองที่แสดงไว้ในส่วนที่แล้ว ดังนั้นการ
 วัดด้วยระบบเลเซอร์ไดโอดนี้มีความเป็นไปได้สำหรับใช้วัดความเร่งของการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง
 ฟองอากาศได้หากทำการสอบเทียบได้ละเอียดพอ ในทางตรงกันข้ามการสอบเทียบในขณะนี้ยังทำได้ไม่

ดีนิก เช่น ความสม่ำเสมอของรัศมีความโค้งของแบบจำลองอาจจะไม่ดีนิก การควบคุมความเร่งของการเคลื่อนที่ที่ยังสร้างแรงขนาดสูงมากไม่ได้ และการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของกล่องวีดีโอที่ไม่แม่นยำ เป็นต้น ซึ่งส่งผลทำให้ระบบในปัจจุบันอาจจะยังไม่สามารถวัดความเร่งของฟองอากาศที่แม่นยำได้ แต่ในเบื้องต้นระบบเลเซอร์ไดโอดนี้ยังใช้วัดตรวจสอบได้ว่าการเคลื่อนที่ของฟองอากาศเป็นการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งหรือความหน่วงหรือความเร็วคงที่ (ความเร่งหรือความหน่วงต่ำมาก ๆ) ได้

แนวทางที่จำเป็นสำหรับเพิ่มความแม่นยำในการสอบเทียบคือ การเพิ่มความสม่ำเสมอของรัศมีความโค้งของแบบจำลองฟองอากาศซึ่งอาจจะต้องเลือกใช้แม่พิมพ์ที่มีมาตรฐานสูงขึ้นรวมถึงการอบโพลีเมอร์ อาจจะต้องเลือกอุณหภูมิให้ต่ำลงเพื่อลดความเค้น (stress) จากผลของอุณหภูมิ การปรับปรุงระบบขับเคลื่อนแบบจำลองฟองอากาศให้สามารถสร้างแรงของการเคลื่อนที่สูง ๆ ได้ โดยการใช้รางของการเคลื่อนที่ให้ยาวขึ้นและขนาดของมอเตอร์ใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดความเร่งควรมีค่าสูงกว่า 10 m/s^2 และในส่วนสุดท้ายคือการสอบเทียบความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ด้วยการบันทึกวีดีโอด้วยกล้องความเร็วสูงซึ่งอาจจะต้องมีความเร็วในการบันทึกเร็วกว่า 1,000 เฟรมต่อวินาที



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction สำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งโดยมีขนาดของรัศมีความโค้งเท่ากับ 3.25 mm เปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบที่ความเร็วคงที่



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction สำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วโดยมีขนาดของรัศมีความโค้งเท่ากับ 11 mm เปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบที่ความเร็วคงที่

3.2 การศึกษาวิธีการไหลของฟองอากาศจริง

การศึกษาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเอาอุปกรณ์วัดที่ได้พัฒนาขึ้นมาลองใช้วัดการเคลื่อนที่ของฟองอากาศจริง โดยของเหลวที่ใช้คือกลีเซอรินซึ่งมีค่า reflective index เท่ากับ PDMS ที่เป็นโพลีเมอร์ที่ใช้ทำแบบจำลองฟองอากาศ โดยอากาศจากคอมเพรสเซอร์ถูกปล่อยออกจากท่อนอสซิลที่เอียงทำมุม 45 องศา กับแนวระดับและปล่อยให้ลอยขึ้นในแนวตั้ง สำหรับเหตุผลของการใช้กลีเซอรินเพราะกลีเซอรินเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง และส่งผลทำให้การเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่สร้างขึ้นไม่เร็วเกินกว่าความสามารถของกล้องวีดีโอแบบธรรมดาจะจับการเคลื่อนที่ได้ทัน

ชุดทดลองประกอบไปด้วยอ่างของเหลวทำจากกระจกหนา 4 mm มีขนาดภายในเป็น $10.3 \times 20.5 \times 17.0 \text{ cm}^3$ ท่อนอสซิลทำจากสแตนเลสมีช่องอ 90 องศา และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 mm โดยจะจุ่มให้ปลายของนอสซิลต่ำกว่าระดับผิวของเหลว 6 cm อีกด้านหนึ่งของท่อนอสซิลต่อกับสายอากาศที่ต่อกับคอมเพรสเซอร์ มีวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ในการทดลองนี้ได้จัดให้ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดกับเลเซอร์ห่างกัน 20 cm ชุดทดลองได้จัดให้ลำเลเซอร์อยู่เหนือกว่าปากนอสซิลเท่ากับ 6.7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในนอสซิล โดยรายละเอียดของชุดทดลองอ่านได้จากรายงานในปีแรก

นอกเหนือจากการใช้ระบบเลเซอร์ไดโอดวัดการไหลแล้ว ยังมีกล้องวีดีโอ และแหล่งกำเนิดแสงเพื่อใช้ในการถ่ายภาพ ซึ่งใช้เทคนิค back-light illumination ด้วยอัตราความเร็ว 25 เฟรมต่อวินาที โดยการ

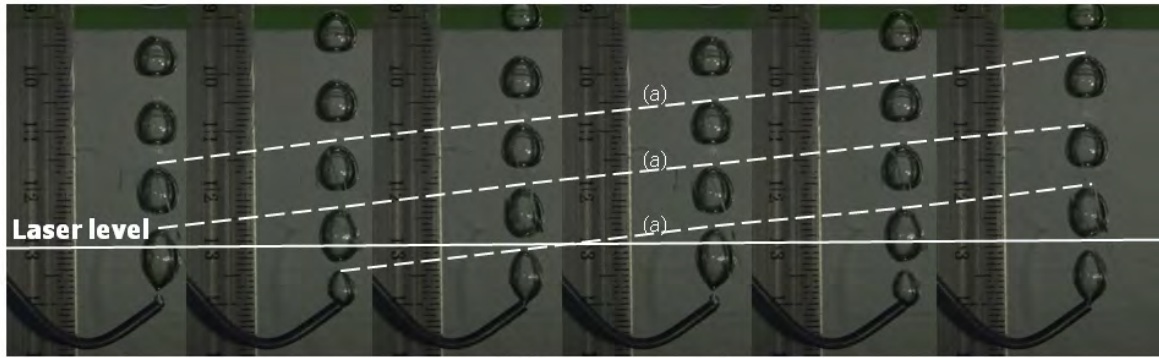
อาศัยภาพถ่ายนี้จะได้ข้อมูลของความเร็วและความเร่งเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศด้วยการวัดระยะของฟองเดียวกันในคนละเฟรมที่ต่อเนื่องกันและหารด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการถ่ายรูปทั้งสอง (0.04 วินาที) อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของการทดลองนี้จะค่อนข้างต่ำเพราะความเร็วของการถ่ายรูปไม่เร็วพอเมื่อเทียบกับความเร็วของการไหล โดยฟองอากาศที่ไหลออกมาจะมีลักษณะเป็นวงรี (ลูกรีกบี้) วงรีที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างน้อย และทรงกลมเท่านั้น ซึ่งเกิดจากสภาวะการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2

รูปที่ 3.21 แสดงภาพถ่ายจากกล้องวีดีโอที่แสดงภาพต่อเนื่องของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่เกิดจากการปล่อยอากาศจากปากกานอสเซิลด้วยอัตราเร็วต่าง ๆ กัน จากรูปจะเห็นได้ชัดสำหรับฟองอากาศลักษณะเป็นวงรี (ลูกรีกบี้) และวงรีที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างน้อย เมื่อลากเส้นเชื่อมระหว่างปลายยอดฟองที่เวลาถัดไป (เส้น a และ b) สำหรับฟองอากาศถัดไปจะขนานกันซึ่งแสดงถึงกรณีที่ความเร็วค่อนข้างจะไม่เปลี่ยนแปลงหรือมีความเร็วคงที่ ในถ้ากลับกันเส้นดังกล่าวจะเอียงออกจากกันเล็กน้อยสำหรับกรณีที่ฟองทรงกลม (เส้น c) ซึ่งแสดงว่าเป็นการเคลื่อนที่ที่มีความเร่ง เมื่อลองคำนวณความเร่งของการเคลื่อนที่ในกรณีฟองอากาศแบบทรงกลมจากภาพถ่ายที่บันทึกไว้จะมีค่าความเร่งประมาณ (การประมาณค่าค่อนข้างหยาบเนื่องจากความเร็วในการบันทึกภาพค่อนข้างช้า) 4 m/s^2 โดยอีกสองกรณีจะมีความเร่งประมาณ 0 m/s^2

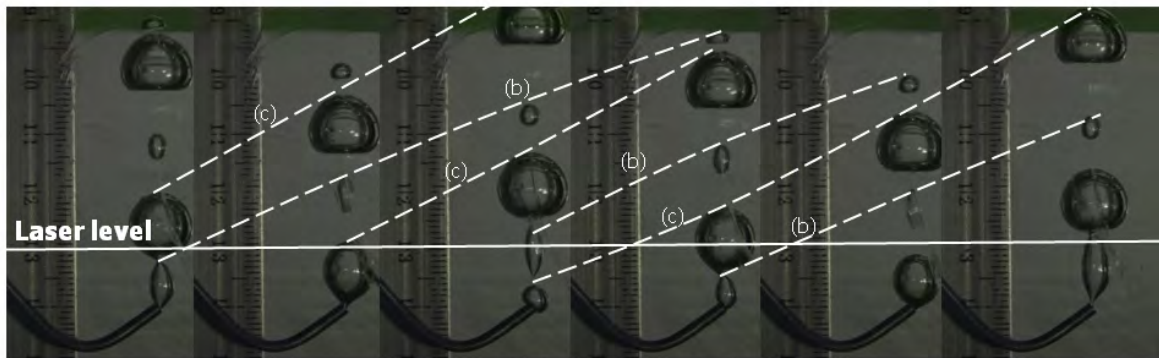
เมื่อนำเอาสัญญาณจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดมาวิเคราะห์และแสดงความสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction และเปรียบเทียบกับผลที่ได้สอบเทียบด้วยความเร็วคงที่จากแบบจำลองฟองอากาศ ซึ่งกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้แสดงไว้รูปที่ 3.22 โดยข้อมูลจากการทดลองมี variation ประมาณ ± 0.1 ซึ่งจะเห็นว่าผลของกรณีของฟองอากาศแบบทรงกลมจะมีความแตกต่างจากผลการสอบเทียบอย่างชัดเจน ในขณะที่ผลของสัญญาณจากกรณีฟองอากาศรูปร่างวงรี และวงรีที่มีอัตราส่วนน้อยจะใกล้เคียงกับผลการสอบเทียบด้วยความเร็วของการเคลื่อนที่คงที่ ซึ่งผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดนี้สามารถใช้ระบุได้ว่าฟองอากาศมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือความเร็วคงที่ได้ อย่างไรก็ตามความเร่งนี้จะต้องมีขนาดค่อนข้างสูงโดยเฉพาะกรณีที่ noise ของอุปกรณ์และการสอบเทียบยังค่อนข้างมากอยู่

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองและรูปร่างฟองอากาศที่เกิดขึ้น

สภาวะที่	อัตราการไหลของอากาศ (l/m)	รูปร่างฟอง
1	0.24	วงรีที่มีอัตราส่วนน้อย
2	0.44	วงรี
3	0.44	ทรงกลม

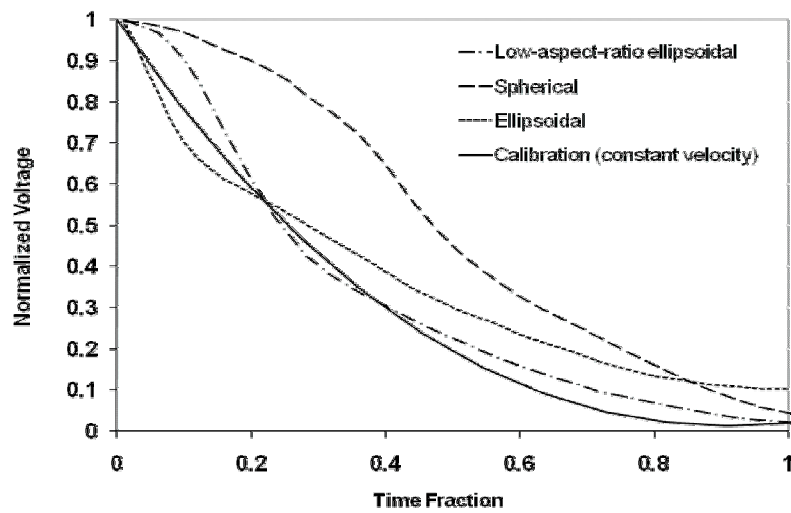


25 frame per second
→



25 frame per second
→

รูปที่ 3.21 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ; (บน) วงรีอัตราส่วนน้อย, (ล่าง) วงรีและทรงกลม



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ Normalized voltage และ Time fraction สำหรับการทดลองต่าง ๆ

3.3 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาในปีนี้ได้เพิ่มเติมการสอบเทียบแบบพลวัตเพื่อตรวจสอบผลของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วและความเร่งขนาดต่างๆ ต่อรูปร่างของสัญญาณจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด ในการศึกษาได้จำลองฟองอากาศแบบครึ่งทรงกลมด้วยขนาดรัศมีความโค้งเท่ากับ 3.25, 4.75, 7.5, 8.25, และ 11 mm และจำลองความเร็วของการเคลื่อนที่มีค่าในช่วงประมาณ 0.3-1 m/s และมีค่าความเร่งที่จำลองขึ้นมาอยู่ในสองช่วงคือ ค่าความเร่งมีค่าต่ำซึ่งน้อยกว่า 1 m/s² และมีค่าสูงอยู่ในช่วง 10-20 m/s² โดยใช้กล้องวีดีโอบันทึกการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศจริง อย่างไรก็ตามกล้องวีดีโอดังกล่าวไม่สามารถวัดได้แม่นยำนัก เนื่องจากความเร็วในการบันทึกภาพค่อนข้างช้า

ผลการสอบเทียบสำหรับกรณีที่เป็นแบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งกระทำโดยการเลื่อนแบบจำลองด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า พบว่าลักษณะผลการทดลองของทุกขนาดของแบบจำลองฟองอากาศจะให้ลักษณะแนวโน้มเดียวกัน ซึ่งค่า Normalized voltage ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและอัตราการลดลงจะต่ำลงในช่วงท้าย โดยความต่างศักย์ลดลงประมาณ 50% ตั้งแต่ช่วงเวลาเพียง 20% ของเวลาทั้งหมดในขณะที่ความต่างศักย์ลดลงถึง 10% ที่ช่วงเวลาประมาณ 60% ของช่วงเวลาทั้งหมด โดยความสัมพันธ์นี้สอดคล้องกับผลการทดลองแบบสถิตในปีแรก ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่าการหักเหของแสงบนผิวโค้งของฟองอากาศไม่ขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ลำเลเซอร์ตกกระทบบนผิวโค้งเท่านั้น สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time พบว่าแบบจำลองที่มีขนาดรัศมีความโค้งเล็กจะมีลักษณะการลดลงของ Normalized voltage ช้ากว่าบนแกน Normalized time เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการสอบเทียบแบบสถิตในปีแรกเช่นกัน และบ่งชี้ว่าลำเลเซอร์จะหักเหบนผิวโค้งของแบบจำลองที่ตำแหน่งจากปลายยอดฟองได้ลึกกว่าจนถึงตำแหน่งที่ลำเลเซอร์ถูกหักเหเปลี่ยนทิศทางไปและมีทิศทางออกไปจากโฟโตไดโอดจนหมด

ผลการทดลองทั้งหมดนี้สนับสนุนสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ในปีแรกเกี่ยวกับวิธีการนำอุปกรณ์วัดไปใช้งาน ซึ่งหากทราบรัศมีความโค้งของฟองอากาศแล้ว อาจจะสามารถนำอุปกรณ์ไปวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ได้ หรือในทางกลับกันหากทราบความเร็วของการไหลแล้ว อาจจะสามารถนำอุปกรณ์ไปใช้วัดขนาดรัศมีความโค้งของฟองอากาศได้

สำหรับการสอบเทียบความเร่งของการเคลื่อนที่ด้วยการใช้ระบบสปริงและรางเลื่อนพบว่า เมื่อแบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ลักษณะผลการทดลองจะมีแนวโน้มต่างออกไปจากกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เล็กน้อย โดยที่ค่า Time fraction เดียวกันค่า Normalized voltage จะมีค่าสูงขึ้นสำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ในการศึกษาแบบจำลองสัญญาณจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด สำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งและความหน่วงพบว่า สำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจะลดลงช้ากว่ากรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในทางกลับกันเมื่อแบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจะลดลงเร็วกว่า อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาของแบบจำลองสัญญาณและผลการสอบเทียบจริงพบว่า ขนาดของ

ความเร่งจะต้องมีขนาดค่อนข้างสูงจึงจะสามารถถูกตรวจสอบความเร่งนี้ด้วยอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดได้ และขนาดความเร่งของการฟองอากาศควรจะมีค่าสูงกว่า 10 m/s^2

ในที่สุดท้ายได้นำเอาอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดมาวัดการไหลของฟองอากาศจริงซึ่งเป็นการสร้างการไหลจากการอัดอากาศและปล่อยผ่านหัวนอสเซิลในภาชนะที่บรรจุกลีเซอรีน พบว่าอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ตรวจสอบว่า ฟองอากาศกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ได้ ในการศึกษาเบื้องต้นนี้มีแนวทางเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการสอบเทียบ ดังนี้ ส่วนแรกคือการเพิ่มความสม่ำเสมอของรัศมีความโค้งของแบบจำลองฟองอากาศซึ่งอาจจะต้องเลือกแบบหล่อที่มีมาตรฐานสูงขึ้นรวมถึงการอบโพลีเมอร์อาจจะต้องเลือกอุณหภูมิให้ต่ำลงเพื่อลดความเค้น (stress) จากผลของอุณหภูมิเพื่อทำให้รัศมีความโค้งสม่ำเสมอขึ้น การปรับปรุงระบบขับเคลื่อนแบบจำลองฟองอากาศให้สามารถสร้างความเร่งของการเคลื่อนที่ให้สูงกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบันได้ โดยการใช้รางของการเคลื่อนที่ให้ยาวขึ้นและขนาดของมอเตอร์ใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดความเร่งของการเคลื่อนที่นั้นควรจะมีค่าสูงกว่า 10 m/s^2 และในที่สุดท้ายคือการสอบเทียบความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ด้วยการบันทึกวิดีโอด้วยกล้องความเร็วสูงซึ่งอาจจะต้องมีความเร็วในการบันทึกเร็วกว่า 1,000 เฟรมต่อวินาที

บทที่ 4

สรุปผลของการศึกษา

เนื่องจากความต้องการเครื่องมือวัดที่มีความเหมาะสมในอุตสาหกรรมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการไหลของการไหลทั้งสองเฟสโดยใช้เทคนิคหลายแบบที่ไม่มีการรบกวนการไหลควบคู่กัน อาจเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาเครื่องมือวัดสำหรับการไหลสองสถานะให้มีความแม่นยำและเหมาะสมมากขึ้นได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเป้าในระยะยาวไปที่การใช้เทคนิคการวัดความดันตกคร่อมควบคู่กันเทคนิคการวัดแบบวิธีใช้คลื่นเหนือเสียง และเทคนิคเลเซอร์ไดโอด โดยใช้เทคนิค Wire Mesh Tomography และกล้องวีดีโอเป็นอุปกรณ์วัดสอบเทียบ

เทคนิคที่กล่าวมานั้นยังต้องการการพัฒนาให้มีสมรรถนะสูงขึ้น โดยที่เทคนิค Wire Mesh Tomography จะต้องพัฒนาต่อเนื่องให้การคำนวณมีความแม่นยำมากขึ้น สำหรับเทคนิคเลเซอร์ไดโอดจะต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาแนวทางให้สามารถวัดความเร็วและความแรงของฟองก๊าซได้ และเทคนิคการวัดความดันตกคร่อมควบคู่กันเทคนิคการวัดแบบวิธีใช้คลื่นเหนือเสียงจะต้องศึกษาความสัมพันธ์ของสัญญาณของเทคนิคคลื่นเหนือเสียงกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการไหลในเบื้องต้นก่อน โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์ดังนี้ การหาความเป็นไปได้ในการใช้อุปกรณ์คลื่นเหนือเสียงศึกษาผลของพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟสโดยใช้ Wire Mesh Tomography ในการสอบเทียบ และการพัฒนาเทคนิคเลเซอร์ไดโอดเพื่อศึกษาผลของความเร็วและความแรงของการไหลของฟองก๊าซต่อลักษณะของสัญญาณ และหาแนวทางในการนำอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดไปใช้งานจริง

งานวิจัยในส่วนแรกได้มีความร่วมมือกับสถาบันเทคโนโลยีแห่งโตเกียว (Tokyo Institute of Technology) ในการดำเนินงานวิจัยร่วมกัน โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองประกอบด้วยสวนของการไหลและเครื่องมือวัด ในส่วนการไหลจะประกอบด้วยระบบท่ออะคริลิกแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขนาด 50 mm ความสูงทั้งหมดของอุปกรณ์เท่ากับ 7 m ($L/D \sim 140$) เมื่อ L คือความยาวของท่อทดลอง และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เนื่องจากในการทดลองของโครงการนี้ต้องการเปลี่ยนแปลงขนาดของฟองก๊าซโดยการควบคุมขนาดของฟองก๊าซ เพื่อให้เกิดรูปแบบการไหลแบบต่างๆ ประกอบด้วยรูปแบบการไหลแบบ core-peak bubbly flow รูปแบบการไหลแบบ wall-peak bubbly flow และรูปแบบการไหลแบบ flat bubbly flow ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์กำเนิดฟองก๊าซที่สามารถควบคุมขนาดฟองก๊าซ โดยอุปกรณ์กำเนิดฟองก๊าซประกอบด้วยของไหล 3 ส่วน คือ การไหลของน้ำในท่อหลัก การไหลของน้ำในท่อย่อยซึ่งทำหน้าที่ควบคุมขนาดของฟองก๊าซ และการฉีดอากาศ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสถานะทั้งสามสามารถควบคุมขนาดของฟองก๊าซและลักษณะการไหลได้ โดยการควบคุมสัดส่วนของน้ำในท่อย่อยกับอากาศให้เหมาะสม สำหรับอุปกรณ์สอบเทียบใช้ Wire Mesh Sensor ซึ่งเป็นลักษณะวงกลมตามรูปร่างของท่อ ในการศึกษานี้ได้ลองใช้อุปกรณ์คลื่นเหนือเสียงที่ประกอบด้วย transducer, ultrasonic pulser/receiver และ digital oscilloscope สำหรับ transducer ใช้ความถี่ 4 MHz เส้นผ่านศูนย์กลางของ transducer มีขนาด 8 mm ติดตั้งท่ามุม 45 องศากับท่อโดยมี ultrasonic pulser/receiver เป็นอุปกรณ์ปล่อยและรับสัญญาณ และใช้ digital oscilloscope เป็นอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ

การทดลองได้ลองทำการทดลองปล่อยคลื่นเหนือเสียงเข้าไปสู่ระบบท่อที่มีของไหลสองเฟสอยู่ และบันทึกสัญญาณสะท้อนกลับออกมา และในขณะเดียวกันก็ได้ใช้ Wire Mesh Sensor วัด local void fraction ด้วยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของคลื่นเหนือเสียงและ local void fraction ของรูปแบบการไหลแบบต่างๆ โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะทำการบันทึกซึ่งประกอบด้วยข้อมูลรูปถ่ายเงื่อนไขการไหล ข้อมูล local void fraction ซึ่งได้มาจาก Wire Mesh Sensor ข้อมูลคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับในเวลาขณะใดขณะหนึ่งและข้อมูล Spatio-temporal ของคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับในเงื่อนไขการไหลหนึ่งๆ โดยข้อมูลนี้เป็นการนำข้อมูลขนาดของสัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับในเวลาขณะใดขณะหนึ่งมาเรียงต่อกันใน 1 วินาที เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกับรูปแบบการไหล จากผลการทดลองพบว่า สำหรับรูปแบบการไหลแบบ wall-peak bubbly flow สัญญาณคลื่นสะท้อนมีค่ามากและมีบ่อยครั้งบริเวณใกล้ผนังท่อ สำหรับรูปแบบการไหลแบบ core-peak bubbly flow จะพบสัญญาณคลื่นสะท้อนมีค่ามากและมีบ่อยครั้งบริเวณกลางท่อทดลอง สำหรับรูปแบบการไหลแบบ flat-profile bubbly flow จะพบสัญญาณคลื่นสะท้อนมีค่ามากและมีบ่อยครั้งกระจายทั่วท่อทดลอง ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลการสะท้อนของคลื่นเหนือเสียงสอดคล้องกับข้อมูลรูปแบบการไหลแบบต่างๆที่สอบเทียบด้วยเทคนิค Wire Mesh Tomography จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้อุปกรณ์คลื่นเหนือเสียงมีความเป็นไปได้ในการใช้เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของการไหลแบบสองเฟสระหว่างของเหลวและก๊าซได้แต่ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาข้อจำกัดต่อไป

ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดเพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำไปตรวจสอบความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ การศึกษาในปีนี้ได้เพิ่มเติมการสอบเทียบแบบไดนามิกส์เพื่อตรวจสอบผลของการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วและความเร่งขนาดต่างๆ ต่อรูปร่างของสัญญาณจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด ในการศึกษาได้จำลองฟองอากาศเป็นลักษณะครึ่งทรงกลมด้วยขนาดรัศมีมีความโค้งเท่ากับ 3.25, 4.75, 7.5, 8.25, และ 11 mm และมีความเร็วขนาดในช่วงประมาณ 0.3-1 m/s และขนาดความเร่งมีค่าน้อยต่ำกว่า 1 m/s² และอยู่ในช่วงระหว่าง 10-20 m/s² อย่างไรก็ตามขนาดความเร็วและความเร่งดังกล่าวไม่สามารถวัดได้แม่นยำนักเนื่องจากความเร็วในการบันทึกภาพค่อนข้างช้า

ผลการสอบเทียบสำหรับกรณีที่เป็นจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ด้วยการเลื่อนแบบจำลองไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า พบว่าลักษณะความสัมพันธ์ของทุกขนาดของแบบจำลองฟองอากาศจะให้ลักษณะแนวโน้มเดียวกัน ซึ่งค่า Normalized voltage จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของเวลาทั้งหมดที่สัญญาณลดลงจนเท่ากับศูนย์ (Time fraction) และจะเริ่มช้าลงในช่วงท้าย โดยความต่างศักย์ลดลงประมาณ 50% ตั้งแต่ช่วงเวลาเพียง 20% ของเวลาทั้งหมดในขณะที่ความต่างศักย์ลดลงถึง 10% ที่ช่วงเวลาประมาณ 60% ของช่วงเวลาทั้งหมด โดยความสัมพันธ์นี้สอดคล้องกับผลการทดลองแบบสตาติคส์ในปีแรก ซึ่งบ่งชี้ว่าการหักเหของแสงบนผิวโค้งของฟองอากาศไม่ขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เลเซอร์ตกกระทบบนผิวโค้งเท่านั้น สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time (อัตราส่วนระหว่าง ผลคูณของเวลาและความเร็วของการเคลื่อนที่ และขนาดรัศมีมีความโค้งของฟองอากาศ) บ่งชี้ว่าแบบจำลองที่มีขนาดรัศมีมีความโค้งเล็กจะมีลักษณะการลดลงของ Normalized voltage ช้ากว่าบนแกน Normalized time เมื่อเปรียบเทียบ

กับแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดลองจะสอดคล้องกับการสอบเทียบแบบสตาดิกส์ ในปีแรกเช่นกันและบ่งชี้ว่าเลเซอร์จะหักเหเบนผิวโค้งของแบบจำลองที่ตำแหน่งจากปลายยอดฟองได้ ลึกกว่าจนถึงตำแหน่งที่เลเซอร์ถูกหักเหเปลี่ยนทิศทางไปและมีทิศทางออกไปจากโฟโตไดโอดจนหมด โดยผลการทดลองนี้สนับสนุนสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ในปีแรกเกี่ยวกับวิธีการนำอุปกรณ์วัดไปใช้งาน ซึ่งหากทราบรัศมีความโค้งของฟองอากาศแล้วอาจจะสามารถนำอุปกรณ์ไปวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ได้หรือในทางกลับกัน หากทราบความเร็วของการไหลแล้วอาจจะนำอุปกรณ์ไปใช้วัดขนาดของฟองอากาศได้

สำหรับการสอบเทียบความเร่งของการเคลื่อนที่ด้วยการใช้ระบบสปริงก์และรางเลื่อน พบว่าเมื่อแบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ลักษณะกราฟจะมีแนวโน้มต่างออกไปเล็กน้อยโดยที่ค่า Time fraction เดียวกันค่า Normalized voltage จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเป็นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ใน การศึกษาส่วนนี้ได้ทำแบบจำลองสัญญาณจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดพบว่า หากการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจะลดลงช้ากว่ากรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในทางกลับกันเมื่อแบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงลักษณะของสัญญาณความต่าง ศักย์ไฟฟ้าจะลดลงเร็วกว่า อย่างไรก็ตามจากผลการสอบเทียบพบว่าขนาดของแรงต้องค่อนข้างสูงจึงจะ สามารถตรวจสอบการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งนี้ได้ และขนาดความเร่งควรจะมากกว่า 10 m/s^2 ในส่วน สุดท้ายได้นำเอาอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดมาวัดการไหลของฟองอากาศจริงซึ่งเป็นการสร้างการไหลจาก การอัดอากาศและปล่อยผ่านหัวนอสเชิลในภาชนะที่บรรจุกลีเซอรีน พบว่าอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดที่ พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ตรวจสอบว่า ฟองอากาศกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ได้

บรรณานุกรม

- Acuña, C.A., and Finch, J.A., (2010), "Tracking velocity of multiple bubbles in a swarm," *Int. J. Mineral Processing*, 94, pp. 147-158.
- Chishlom, D., (1977), "Two-phase flow through sharp-edged orifice," *Journal of Mechanical Eng. Sci.*, pp.128-130.
- Colin, D.C., and Synovec, R.E., (2002), "Measuring the transverse concentration gradient between adjacent laminar flows in a microfluidic device by a laser-based refractive index gradient detector," *Talanta*, vol. 58, pp. 551-560.
- Da Silva, M.J., Thiele, S., Abdulkareem, L., Azzopardi, B.J., and Hampel, U., (2010), "High-resolution gas-oil two-phase flow visualization with a capacitance wire-mesh sensor," *Flow Measurement and Instrumentation*, 21, pp.191-197.
- Fincke, J.R., Rommenkamp, C., Kruse, D., Krogue, J., and Householder, D., (1999), "Performance characteristics of an extended throat flow nozzle for the measurement of high void fraction multiphase flow," 4th Int. Sym. On Fluid flow measurement.
- Hamidipour, M., and Larachi, F., (2010), "Characterizing the liquid dynamics in concurrent gas-liquid flows in porous media using twin-plane electrical capacitance tomography," *Chemical Eng J.*, 165, pp.310-323.
- Hewitt, G.F., (1978), Measurement of two phase flow parameter, *Academic Press*, London, 1st edition, 1978.
- Hibiki, T., and Ishii, M., (1999), "Experimental study on interfacial area transport in bubbly two-phase flows," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 42, pp.3019-3035.
- Honkanen, M., Eloranta, H., and Saarenrinne, P., (2010), "Digital imaging measurement of dense multiphase flows in industrial processes," *Flow Measurement and Instrumentation*, 21, pp.25-32.
- Hoppe, D., Grahn, A., and Schütz, P., (2010), "Determination of velocity and angular displacement of bubbly flows by means of wire-mesh sensors and correlation analysis," *Flow Measurement and Instrumentation*, 21, pp.48-53.
- Kanshinsky, O.N., Timkin, L.S., and Cartellier, A., (1993), "Experimental study on laminar bubbly flows in a vertical pipe," *Exp. in Fluid*, vol.14, pp.308-314.
- Kim, B.-H., Kim, T.-G., Lee, T.-K., Kim, S., Shin, S.-J., Kim, S.J., and Lee, S.J., (2009), "Effects of trapped air bubbles on frequency responses of the piezo-driven inkjet printheads and visualization of bubbles using synchrotron X-ray," *Sensors Actuators A*, 154, pp.132-139.

Lockhart, R.W., Boelter, M.K., Taylor, T.H.M., Thomsen, E.G., and Morrin, E.H., (1994), "Isothermal pressure drop for two phase two component in a horizontal pipe," *Transactions ASME*, pp.139-151.

Lockhart, R.W., Martinelli, R.C., (1949), "Proposed correlation of data for isothermal two-phase,two-component flow in pipes," *Chemical Eng. Prog.*, 45, pp. 39-48.

Marsudi, B., Utomo, T., Sakai, S., and Uchida, S., (2002), "Use of Neural Network-Ultrasonic Technique for Measuring Gas and Solid Hold-ups in a Slurry Bubble Column", *Chem.Eng.Technology*, Vol. 25, No.3, pp. 293-299.

Marsudi, B., Utomo, T., Sakai, S., Uchida, S., and Maezawa, A., (2001), "Simultaneous Measurement of Mean Bubble Diameter and Local Gas Holdup Using Ultrasonic Method with Neural Network", *Chem.Eng.Technology*, Vol. 24, No.5, pp. 493-500.

Meng, Z., Huang, Z., Wang, B., Ji, H., Li, H., and Yan, Y., (2010), "Air-water two-phase flow measurement using a Venturi meter and an electrical resistance tomography sensor," *Flow Meas. Inst.*, 21, pp. 268-276.

Mori, Y., Hijikata, K., and Kuriyama, I., (1977), "Experimental study of bubble motion in mercury with and without a magnetic field," *J. Heat Transfer*, vol.99, no.3, pp.404-410.

Moussatov, A., Ayrault, C., and Castagnède, B., (2001), "Porous material characterization – ultrasonic method for estimation of tortuosity and characteristic length using a barometric chamber," *Ultrasonics*, 39, pp.195-202.

Murdock, J.W., (1962), "Two phase flow through sharp-edged orifice," *Journal of Mechanical Eng. Sci.*, pp.419-433.

Prasser, H.M., (2007), "Evolution of interfacial area concentration in a vertical air-water flow measured by wire-mesh sensor," *Nuclear Eng. and Design*, pp.608-1617.

Prasser, H.M., Bottger, A., and Zschau, J., (1998), "A new electrode mesh tomography for gas-liquid flows," *Flow Meas. Inst.*, vol.9, pp.111-119.

Prasser, H.M., Misawa, M., and Tiseanu, I., (2005), "Comparison between wire-mesh sensor and ultra-fast X-ray tomography for an air-water flow in a vertical pipe," *Flow measurement and Instrumentation*, vol.16, pp. 73-83.

Prasser, H.M., Scholz, D., Zippe, C., (2001), "Bubble size measurement using wire-mesh sensor," *Flow Means. Insturm*, pp.299-312.

Prasser, H.M., Zshau, J., and Peters, D., (2002), "Fast wire-mesh sensors for gas-liquid flows visualization with upto 10,000 frames per second," *Proc. Int. Cong. on Advance Nuclear Power Plants*, Hollywood Florida, USA, June 9-13.

Revellin, R., Dupont, V., Ursenbacher, T., Thome, J.R., and Zun, I., (2006), "Characterization of diabatic two-phase flows in microchannels: Flow parameter results for R-134a in a 0.5 mm channel," *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 32, pp.755–774.

Revellin, R., Agostini, B., and Thome, J.R., (2008), "Elongated bubbles in microchannels Part II : Experimental study and modeling of bubble collisions," *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 34, pp. 602-613.

Santos, L.M.T., Sena Esteves, M.T.M., and Coelho Pinheiro, M.N., (2008), "Effect of gas expansion on the velocity of individual Taylor bubbles rising in vertical columns with water : Experimental studies at atmospheric pressure and under vacuum," *Chemical Eng. Sci.*, 63, pp.4464-4474.

Simon, R.H., Ho, S.-Y., Lange, S.C., Uphoff, D.F., and D'Arrigo, J.S., (1993), "Applications of lipid-coated microbubble ultrasonic contrast to tumor therapy," *Ultrasound in Med. & Biol.*, Vol.19, No.2, pp.123-125.

Supardan, M.D., Maezawa, A., and Uchida, S., (2003), "Determination of Local Gas Holdup and Volumetric Mass Transfer Coefficient in a Bubble Column by Means of an Ultrasonic Method and Neural Network", *Chem.Eng.Technology*, Vol. 26, No.10, pp. 1080-1083.

Supardan, M.D., Masada, Y., Maezawa, Y. and Uchida, S., (2004), "Local Gas Holdup and Mass Transfer in a Bubble Column Using an Ultrasonic Technique and Neural Network", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 27, No.8, pp. 927-932.

Supardan, M.D., Masuda, Y., Maezawa, A. and Uchida, S., (2007), "The investigation of gas holdup in a two-phase bubble column using ultrasonic computed tomography," *Chemical Eng. Journal*, 130, pp.125-133.

Tomiyama, A., Celata, G.P., Hosokawa, S., and Yoshida, S., (2002), "Terminal velocity of single bubble in surface tension force dominant regime," *Int. J. Multiphase Flow*, vol.28, pp. 1497-1519.

Warsito, M., Ohkawa, N., Kawata, S., and Uchida, S., (1999), "Cross-sectional distributions of gas and solid holdups in slurry bubble column investigated by ultrasonic computed tomography", *Chemical Engineering Science*, Vol. 54, pp. 4711-4728.

Xu, L., Xu, J., Dong, F., and Zhang, T., (2003), "On fluctuation of the dynamic differential pressure signal of venturi meter for wet gas metering," *Flow Measurement Instrumentation*, 14, pp.211-217.

อลงกรณ์ พิมพ์พิณ และ ญัฐเดช เพ็องวรวงค์, (2553), "การพัฒนาเทคนิคการวัดสำหรับการไหลสองเฟสระหว่างของเหลวและก๊าซ," รายงานการวิจัยทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2552 โครงการวิจัยเลขที่ 111G-ME-2552

ประวัตินักวิจัย

นาย อลงกรณ์ พิมพ์พิณ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีและปริญญาโท จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2539 และ พ.ศ. 2542 ตามลำดับ หลังจากนั้น เขาได้ไปศึกษาปริญญาเอกในสาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น และจบการศึกษาในปี พ.ศ. 2548 หลังจากจบการศึกษา เขาได้ทำงานเป็นอาจารย์ประจำที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจนถึงปัจจุบัน เขามีความสนใจในการประยุกต์ความรู้ทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ การถ่ายเทความร้อน กลศาสตร์ของแข็งและของไหลสำหรับระบบขนาดเล็กในระดับไมโครสเกล ผลงานวิจัยของเขาเกี่ยวกับการพัฒนาไมโครเซนเซอร์และไมโครแอกชูเอเตอร์สำหรับงานทางวิศวกรรมต่างๆ เทคนิค micro fabrication แบบใหม่ และเทคนิคการวัดการไหลสองเฟสด้วยเลเซอร์ นอกจากนี้เขายังทำหน้าที่เป็นกรรมการหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล กรรมการหลักสูตรวิศวกรรมอากาศยานนานาชาติ รวมทั้งรองหัวหน้าภาควิชาการภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอีกด้วย

นาย ณัฐเดช เพ็ญจรวงศ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีและปริญญาโท จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2540 และ พ.ศ. 2542 ตามลำดับ หลังจากนั้นได้ทำงานเป็นอาจารย์และนักวิจัยในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นเวลา 1 ปี และ 3 ปี ตามลำดับ เขาได้ไปศึกษาปริญญาเอกที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีแห่งโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2546 และจบการศึกษาในปี พ.ศ. 2549 หลังจากจบการศึกษาเขาได้เริ่มทำงานเป็นอาจารย์ประจำที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจนถึงปัจจุบัน เขามีความสนใจและสร้างผลงานวิจัยทางด้านเทคนิคการวัดการไหลสองเฟสและการประยุกต์ความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในงานด้านการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม