



การพัฒนาเทคนิคการวัดสำหรับการไหลสองเฟส  
ระหว่างของเหลวและก๊าซ

Development of Measurement Techniques  
for Liquid-Gas Bubbly Flows

โดย

อลงกรณ์ พิมพ์พิณ  
ณัฐเดช เพ็องวรวงค์

โครงการวิจัยเลขที่ 111G-ME-2552

ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ

เมษายน 2553

การพัฒนาเทคนิคการวัดสำหรับการไหลสองเฟส  
ระหว่างของเหลวและก๊าซ

Development of Measurement Techniques  
for Liquid-Gas Bubbly Flows

โดย

อลงกรณ์ พิมพ์พิณ D.Eng. (The University of Tokyo)  
ณัฐเดช เพ็องวรวงษ์ D.Eng. (Tokyo Institute of Technology)

โครงการวิจัยเลขที่ 111G-ME-2552  
ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ

เมษายน 2553

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2552 นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มนักวิจัยจาก Tokyo Institute of Technology ในการให้คำแนะนำและความร่วมมือในการสร้างอุปกรณ์ทดลองบางส่วน นักวิจัยต้องขอขอบคุณ รศ.ดร. อติ บุญจิตราดลย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยโดยเฉพาะในส่วนของการตั้งปัญหางานวิจัยซึ่งมีความสำคัญอย่างมาก รวมทั้งนิสิตทั้งในระดับปริญญาบัณฑิตและปริญามหาบัณฑิตของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยเหลือให้การดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จผลได้เป็นอย่างดี

เลขหมู่

เลขทะเบียน 014680

วัน, เดือน, ปี 27 ส.ค. 53

## บทคัดย่อ

การไหลแบบสองเฟสเป็นการไหลที่สามารถพบได้ทั่วไปในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ซึ่งนักวิจัยและวิศวกรออกแบบต้องเข้าใจถึงความรู้พื้นฐานของการไหลสองเฟสอย่างลึกซึ้งเพื่อการออกแบบ การควบคุม รวมถึงการปรับปรุงสมรรถนะในระบบต่าง ๆ เหล่านั้นเพื่อทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงได้พยายามพัฒนาเทคนิคการวัด 2 แบบคือ เทคนิค Wire Mesh Tomography (WMT) และเทคนิคเลเซอร์ไดโอด

สำหรับเทคนิค WMT ใช้หลักการของการวัดความแตกต่างการนำไฟฟ้าของของไหลทั้งหน้าตัดการไหล ในงานวิจัยนี้ เราได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ที่สำคัญจากข้อมูลที่บันทึกได้จาก WMT เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพ โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ประกอบด้วย Local void fraction ความเร็วของฟองก๊าซและขนาดฟองก๊าซ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว พบว่าข้อมูล Void fraction เฉลี่ยทั้งปริมาตรที่สนใจในช่วง Void fraction ไม่เกิน 9% มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง  $\pm 20\%$  ความเร็วฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งปริมาตรที่สนใจในช่วงระหว่าง 250-350 mm/s มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง  $\pm 10\%$  และขนาดฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งปริมาตรที่สนใจในช่วงขนาดฟองก๊าซระหว่าง 2-8 mm มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง  $\pm 20\%$

สำหรับเทคนิคเลเซอร์ไดโอดอาศัยหลักการที่แสงจะหักเหไปเมื่อผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางคนละชนิดที่มีดัชนีหักเหทางแสงไม่เท่ากัน และความต่างศักย์จากวงจรโฟโตไดโอดจะแปรผันตามปริมาณพลังงานของเลเซอร์ที่มาตกกระทบไดโอด ซึ่งเราได้ทำการสอบเทียบอุปกรณ์กับรัศมี ความโค้งของฟองอากาศขนาดต่างๆ โดยการสร้างแบบจำลองฟองอากาศขึ้นมาจาก Polydimethylsiloxane (PDMS) ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ของการสอบเทียบแบบหนึ่ง จากผลการสอบเทียบเราทราบระยะจากปลายยอดฟองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงจนใกล้ศูนย์ โดยระยะดังกล่าวจะแปรผกผันกับขนาดของรัศมีความโค้งของผิวฟองอากาศซึ่งสามารถสร้างเป็นสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างระยะดังกล่าวและรัศมีความโค้งของผิวฟองอากาศได้ หลังจากนั้นหากนำเอาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะจากยอดฟองต่าง ๆ มาทำ normalization ด้วยความต่างศักย์เมื่อลำเลเซอร์อยู่ที่ยอดฟองสำหรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และด้วยระยะทั้งหมดที่ความต่างศักย์ลดลงจนเป็นศูนย์สำหรับระยะทางแล้ว ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้ของทุกขนาดฟองอากาศจะสอดคล้องกัน ดังนั้นหากนำเอาอุปกรณ์ไปวัดในการไหลจริง ๆ สำหรับกรณีที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ลักษณะการลดลงของสัญญาณของทุกขนาดฟองอากาศตามเวลา (กรณีความเร็วคงที่ ระยะทางและเวลาจะสัมพันธ์กันโดยตรง) ก็จะสอดคล้องกันหมด อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้ลองนำเอาอุปกรณ์ไปวัดการไหลของฟองอากาศในของเหลวจริงด้วย แต่ผลที่ได้มีความผิดพลาดมากซึ่งอาจจะเกิดจากการควบคุมการทดลองที่ยังทำไม่ได้รวมทั้งความเร่งของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่อาจจะมีค่าค่อนข้างสูง

## Abstract

Two-phase flow is important phenomena in various industries. The knowledge of its flow characteristics is crucial for designing, operating, and improving two-phase liquid equipments to enhance their efficiency. This study aims to develop two measurement techniques for air-liquid flow, and they are Wire Mesh Tomography (WMT) and laser-diode based system.

The principle of WMT is measuring electrical conductivity of flow that is different for liquid and gas between a pair of crossing wires. In this study, the computer programming based on DELPHI is developed to calculate local void fraction, bubble size and bubble diameter. After that, the quantities taken from WMT are verified with those taken from photographing technique. It is found that the accuracy of cross-sectional void fraction in the range less than 9% is within  $\pm 20\%$ , the accuracy of bubble velocity in the range of 250-350 mm/s is within  $\pm 10\%$ , and the accuracy of bubble size in the range of 2-8 mm is within  $\pm 20\%$ .

Laser-diode based system is operated based on the principle that light refracts at contact surface between two mediums that have different refractive indices, and an amount of voltage induced in a diode circuit varies with an amount of laser falling on a photodiode. This study aims to calibrate the system for measuring a curvature of single air bubble rising in liquid. Various sizes of air bubble model are developed from Polydimethylsiloxane (PDMS) polymer which technique is new in this research field. From the calibration, it is found that the distance which voltage dropped to zero was varied with the radius of curvature of bubble, and the smaller radius of curvature has longer distance. When the voltage is normalized with that when the laser beam is above the bubble and the distance is normalized with that voltage drops to zero, the normalized relationship for all experimented bubble sizes becomes similar. Thus, if the laser-diode based system is employed to measure a constant speed bubble, the normalized relationship between voltage and time will be similar as well. In addition, the real employment of this laser-diode based system for the real bubbly flow is also tried, and the results of radius of curvature and bubble speed are compared with those taken from photographing technique. However, the results are not agreed and have large deviation. This might happen due to the experiment is not well controlled and the bubbles may rise up with high acceleration.

# สารบัญ

หน้า

<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาในการทำวิจัย.....	1
1.2 Wire Mesh Topography.....	3
1.3 ระบบเลเซอร์ไดโอด.....	4
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัยและส่วนประกอบของรายงาน.....	5
<b>บทที่ 2 Wire Mesh Topography</b> .....	<b>6</b>
2.1 Wire Mesh Sensor (WMS) และ Data Acquisition.....	7
2.2 การคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ.....	10
2.3 ชุดทดลองและผลการทดลอง.....	15
2.4 สรุปผลการวิจัย.....	25
<b>บทที่ 3 เลเซอร์ไดโอด</b> .....	<b>27</b>
3.1 ความรู้พื้นฐาน.....	27
3.2 การหาความสัมพันธ์ด้วยการสอบเทียบกับแบบจำลองฟองอากาศ.....	31
3.3 การหาความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	49
3.4 ผลการทดลองกับการไหลสองเฟส.....	55
3.5 สรุปผลการวิจัย.....	59
<b>บทที่ 4 สรุปผลการศึกษา</b> .....	<b>61</b>
<b>บรรณานุกรม</b> .....	<b>64</b>
<b>ประวัตินักวิจัย</b> .....	<b>66</b>

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของ Data acquisition unit .....	10
ตารางที่ 3-1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนของแหล่งกำเนิดสัญญาณต่างๆ.....	36
ตารางที่ 3-2 ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยต่อ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการใช้ตัวต้านทานขนาดต่างๆ.....	38
ตารางที่ 3-3 ความต่างศักย์ไฟฟ้า(กรณีที่ 1 ไฟฟลูออเรสเซนต์, กรณีที่ 2 ไฟจากภายนอก อาคารเวลา 18.00 น., กรณีที่ 3 เลเซอร์พอยเตอร์,กรณีที่ 4 He-Ne เลเซอร์ขนาด 10 mW .....	43
ตารางที่ 3-4 ผลการทดลองแสดงระยะทางที่สัญญาณความต่างศักย์ลดลงใกล้เคียงศูนย์....	45
ตารางที่ 3-5 ตำแหน่งที่เลเซอร์หักเหไป 90 องศาจากผลการทดลอง .....	52
ตารางที่ 3-6 สภาวะการทดลองและรูปร่างฟองอากาศที่เกิดขึ้น .....	56
ตารางที่ 3-7 ผลเปรียบเทียบค่าความเร็วของฟองอากาศระหว่างวิธีการวัดความต่างศักย์ ไฟฟ้าและวิธีถ่ายภาพ.....	59

## สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 Wire Mesh Sensor (WMS).....	6
รูปที่ 2-2 Data acquisition .....	6
รูปที่ 2-3 ลักษณะทางกายภาพของ เซนเซอร์; (ก) โครงสร้างของ WMS, (ข) ลักษณะทางกายภาพของ measuring plane.....	7
รูปที่ 2-4 วงจรทางไฟฟ้าอย่างง่ายของ WMT.....	9
รูปที่ 2-5 การควบคุมลำดับการทำงานของ WMT.....	9
รูปที่ 2-6 โครงสร้างอย่างง่ายของการประมวลผลของ WMT.....	10
รูปที่ 2-7 ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ของ WMS และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	11
รูปที่ 2-8 ลักษณะสัญญาณที่แปลงเป็น local time dependent void fraction ที่ได้จาก upstream plane และ downstream plane.....	13
รูปที่ 2-9 Measured PDF และ redistributed PDF ของความเร็วฟองก๊าซ.....	14
รูปที่ 2-10 Bubble projection บน WMS และการอินทิเกรตปริมาตรของฟองก๊าซ.....	14
รูปที่ 2-11 ชุด WMS ที่มีโครงสร้างแบบใส.....	15
รูปที่ 2-12 ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของ WMS.....	15
รูปที่ 2-13 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดฟองก๊าซในของไหลสองเฟส โดยใช้การถ่ายภาพและ WMT ในขณะเดียวกัน.....	15
รูปที่ 2-14 กรณีความเร็วของอากาศ = 1.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s.....	16
รูปที่ 2-15 กรณีความเร็วของอากาศ = 2.5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s.....	16
รูปที่ 2-16 กรณีความเร็วของอากาศ = 5.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s.....	17
รูปที่ 2-17 ตัวอย่างรูปถ่ายฟองก๊าซ.....	17
รูปที่ 2-18 ตัวอย่างรูปที่ได้กำหนดตำแหน่งฟองก๊าซแล้ว.....	17
รูปที่ 2-19 ตัวอย่างการหาขนาดของฟองก๊าซโดยการหาความยาวของแกนหลักทั้งสอง....	18



รูปที่ 2-20 แสดงการเฉลี่ยข้อมูลของฟองก๊าซหลายฟอง เพื่อให้ค่าเฉลี่ยมี ความแปรปรวนต่ำกว่าค่าที่กำหนด.....	18
รูปที่ 2-21 เปรียบเทียบข้อมูลของ void fraction เฉลี่ยระหว่าง WMT และการถ่ายภาพ.....	18
รูปที่ 2-22 เปรียบเทียบข้อมูลของความเร็วฟองก๊าซระหว่าง WMT และการถ่ายภาพ.....	19
รูปที่ 2-23 เปรียบเทียบข้อมูลของขนาดฟองก๊าซระหว่าง WMT และการถ่ายภาพ.....	19
รูปที่ 2-24 การกระจายตัวของฟองก๊าซ ของสภาวะการไหลที่ ความเร็วของอากาศ = 1.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s.....	20
รูปที่ 2-25 การกระจายตัวของฟองก๊าซ ของสภาวะการไหลที่ ความเร็วของอากาศ = 2.5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s.....	20
รูปที่ 2-26 การกระจายตัวของฟองก๊าซของสภาวะการไหลที่ ความเร็วของอากาศ = 5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s.....	20
รูปที่ 2-27 Local void fraction ของสภาวะการไหลที่ ความเร็วของอากาศ = 1.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s.....	21
รูปที่ 2-28 Local void fraction ของสภาวะการไหลที่ ความเร็วของอากาศ = 2.5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s.....	21
รูปที่ 2-29 Local void fraction ของสภาวะการไหลที่ ความเร็วของอากาศ = 5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s.....	21
รูปที่ 2-30 ความเร็วของฟองก๊าซเมื่อไหลผ่านเส้นลวดเซนเซอร์ .....	22
รูปที่ 2-31 ค่า Normalized bubble velocity เมื่อไหลผ่านเส้นลวดเซนเซอร์.....	22
รูปที่ 2-32 ลักษณะของฟองก๊าซเมื่อไหลผ่านเส้นลวดเซนเซอร์.....	23
รูปที่ 2-33 สัญญาณที่ได้จาก upstream plane และ downstream plane ของ WMS ในกรณีที่มีการลดลงของความเร็วฟองก๊าซ.....	23
รูปที่ 2-34 จำนวนฟองก๊าซที่เพิ่มขึ้นสำหรับความเร็วของฟองก๊าซต่างๆ.....	24
รูปที่ 2-35 ค่า Normalized bubble number เมื่อไหลผ่านเส้นลวด.....	24
รูปที่ 2-36 ลักษณะการแตกของฟองก๊าซ.....	25
รูปที่ 2-37 สัญญาณที่ได้จาก upstream plane และ downstream plane ของ WMS ในกรณีของฟองก๊าซแตก.....	25
รูปที่ 3-1 โฟโตไดโอดที่เลือกมาใช้สำหรับการทดลอง.....	29

	หน้า
รูปที่ 3-2 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดเมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเหมาะสม มาตกกระทบ จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้น.....	30
รูปที่ 3-3 ส่วนประกอบของชุดทดลองสำหรับการสอบเทียบซึ่งประกอบด้วยระบบเลเซอร์ ไดโอด เครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรไดโอด ออสซิลโลสโคปสำหรับ การบันทึกค่าเอาพุทจากวงจรไดโอด แบบจำลองฟองอากาศ และระบบขับเคลื่อนแบบจำลอง .....	31
รูปที่ 3-4 วงจรโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายความดันไฟฟ้า โฟโตไดโอด ตัวต้านทาน และออสซิลโลสโคป.....	32
รูปที่ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reverse light current กับ Reverse voltage ที่อัตราส่วนระหว่างพลังงานแสงที่ตกกระทบบนไดโอดต่อหน่วยพื้นที่ค่าต่าง ๆ กันของโฟโตไดโอด (ก) รุ่น BPW34, (ข) รุ่น BPV10 (ข้อมูลจากแคตตาล็อกของบริษัท Vishay).....	33
รูปที่ 3-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Relative sensitivity กับความยาวคลื่นแสง ที่ตกกระทบของ (ก) โฟโตไดโอด รุ่น BPW34, (ข) โฟโตไดโอด รุ่น BPV10 (ข้อมูลจากแคตตาล็อกจากบริษัท Vishay).....	34
รูปที่ 3-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Relative sensitivity กับมุมที่แสงตกกระทบของ โฟโตไดโอด (ก) โฟโตไดโอดรุ่น BPW34, (ข) โฟโตไดโอดรุ่น BPV10 (ข้อมูลจากแคตตาล็อกของบริษัท Vishay).....	35
รูปที่ 3-8 สัญญาณรบกวนที่ได้จากการวัดสัญญาณขาออกของวงจรในสภาวะการทดลอง มีดสนิท โดยเปรียบเทียบระหว่าง DC regulator และแหล่งจ่ายไฟสำหรับ แผงวงจรในเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอส ย่อนโฟโตไดโอดในวงจร.....	35
รูปที่ 3-9 ความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้จากวงจรใน สภาวะการทดลองมีดสนิท เมื่อเพิ่มค่า Bias voltage .....	36
รูปที่ 3-10 สัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรกับเวลาเมื่อยิงเลเซอร์ผ่านอากาศ สู่โฟโตไดโอด ที่ค่าความต้านทานของวงจรต่าง ๆ.....	37
รูปที่ 3-11 ลูกบิดผ้าครึ่งและชุดเรียบ ขนาดรัศมีต่าง ๆ.....	39
รูปที่ 3-12 แผนภาพของแม่พิมพ์ที่ใช้ทำแบบจำลองฟองอากาศ โดยลูกบิดถูกยึดกับ ฐานด้วยกาว และผนังแต่ละด้านถูกยึดกับฐานด้วยสกรู และใช้ซิลิโคนในการ อุดรอยรั่วระหว่างผนังแต่ละด้าน.....	39

รูปที่ 3-13 แม่พิมพ์ก่อนและหลังใช้งาน (ก) มุมมองด้านข้าง – ด้านซ้ายคือแม่พิมพ์ก่อนใช้งาน, (ข) มุมมองด้านบน, (ค) ภาพระยะใกล้ของฟองอากาศขนาดต่าง ๆ ใน PDMS .....	40
รูปที่ 3-14 ก่อน PDMS ที่มีฟองอากาศอยู่ด้านใน .....	41
รูปที่ 3-15 สัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรในการทดลองเพื่อหาผลกระทบของแสงจากภายนอกต่อผลของสัญญาณขาออกของวงจร.....	43
รูปที่ 3-16 ชุดทดลองที่พร้อมทำการทดสอบ.....	44
รูปที่ 3-17 ผลการทดลองทั้งหมดของแบบจำลองฟองอากาศขนาด 22 ม.ม.....	46
รูปที่ 3-18 แนวโน้มเฉลี่ยของสัญญาณความต่างศักย์ที่ลดลง ตามระยะทางจากปลายยอดฟองอากาศ สำหรับทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศ.....	46
รูปที่ 3-19 แนวโน้มเฉลี่ยของสัญญาณความต่างศักย์ที่ลดลง ตามระยะทางจากปลายยอดฟองที่ถูก normalized ด้วยรัศมีความโค้งของฟองอากาศ.....	47
รูปที่ 3-20 แนวโน้มเฉลี่ยของสัญญาณความต่างศักย์ที่ลดลง ตามระยะทางจากปลายยอดฟองที่ถูก normalized ด้วยระยะจากปลายยอดฟองจนถึงระยะที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์.....	47
รูปที่ 3-21 ระยะที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์ สำหรับแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดรัศมีความโค้งต่าง ๆ.....	49
รูปที่ 3-22 ลำแสงเลเซอร์หักเหเมื่อเคลื่อนที่ผ่านฟองอากาศ 2 มิติที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากของเหลวโดยรอบ.....	50
รูปที่ 3-23 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่ลำเลเซอร์ทะลุผ่านฟองอากาศกระทำกับลำเลเซอร์ที่ตกกระทบฟองอากาศ และตำแหน่งสัมพัทธ์บนฟองอากาศขนาดต่าง ๆ.....	51
รูปที่ 3-24 ภาพแสดงทิศทางของลำเลเซอร์ที่สะท้อนบนแบบจำลองฟองอากาศขนาด 22 ม.ม. โดยระยะที่ 0 ม.ม. แสดงตำแหน่งของลำเลเซอร์ที่ตัดปลายยอดฟองอากาศเล็กน้อยแล้ว (ระยะในภาพถ่ายเป็นระยะที่ไม่สอดคล้องกับค่าในตารางที่ 3.5 เป็นการแสดงระยะคร่าว ๆ เท่านั้น).....	52
รูปที่ 3-25 หลักการของแบบจำลองที่คำนวณพื้นที่ของลำเลเซอร์ในส่วนที่ไม่ถูกบังด้วยฟองอากาศและพุ่งไปตกกระทบเซนเซอร์ของโฟโตไดโอด.....	53
รูปที่ 3-26 อัตราส่วนพื้นที่ที่เหลืออยู่ต่อพื้นที่ทั้งหมดของลำเลเซอร์ เมื่อขอบล่างของลำเลเซอร์อยู่บนตำแหน่งต่าง ๆ บนของฟองอากาศ (รัศมี 1 หน่วย) สำหรับแต่ละขนาดของลำเลเซอร์.....	54

	หน้า
รูปที่ 3-27 อัตราส่วนพื้นที่ที่เหลืออยู่ต่อพื้นที่ทั้งหมดของลำเลเซอร์ เมื่อแสดงตำแหน่ง ขบกลางของลำเลเซอร์เป็นอัตราส่วนกับระยะที่พื้นที่ลดลงจนเป็นศูนย์ สำหรับแต่ละขนาดของลำเลเซอร์.....	54
รูปที่ 3-28 แผนภาพแสดงชุดทดลองที่ประกอบด้วยชุดกำเนิดฟองอากาศ และ โฟโต้ไดโอด .....	56
รูปที่ 3-29 ภาพถ่ายลักษณะของฟองอากาศ (ก) วงรีที่มีอัตราส่วนน้อย, (ข) วงรีและทรงกลม .....	56
รูปที่ 3-30 ผลการทดลองวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบตามเวลา สำหรับการทดลอง.....	57
รูปที่ 3-31 ผลการทดลองแสดงแนวโน้มของค่า Normalized voltage ที่ลดลงไปตาม Normalized time (สำหรับการสอบเทียบคิดว่าเป็นกรณีความเร็วคงที่ ดังนั้น Normalized time จะเท่ากับ Normalized distance) .....	58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาในการทำวิจัย

การไหลแบบสองเฟส คือ การไหลที่ประกอบด้วยของไหลสองสถานะที่อาจจะประกอบด้วยของเหลวกับก๊าซ ของแข็งกับก๊าซ หรือ ของเหลวกับของแข็ง โดยของไหลสถานะหนึ่งอาจไหลอยู่ในของไหลอีกสถานะหนึ่งหรือไหลไปพร้อมกันก็ได้ (Levy,1999) การไหลแบบสองเฟสเป็นการไหลที่สามารถพบได้ทั่วไปในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เช่น การไหลของสารทำความเย็นที่ไหลภายในระบบทำความเย็นตามอาคารบ้านเรือนหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำความเย็น, การไหลของน้ำมันดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม, การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น ดังนั้นหากมีความเข้าใจคุณสมบัติหรือปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบสองเฟสแล้ว เช่น การเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณที่ของเหลวมีความเร็วสูง ส่งผลให้ของเหลวมีความดันสถิตต่ำกว่าความดันไอของของเหลวดังกล่าว ซึ่งจะทำให้ของเหลวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอจำนวนมาก เมื่อฟองก๊าซเหล่านี้เคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีความดันสูง ฟองก๊าซจะแตกออกและของเหลวที่อยู่รอบ ๆ จะเข้ามาแทนที่ช่องว่างอย่างฉับพลันทำให้เกิดการกระแทกและกัดกร่อนผิวโลหะในบริเวณนั้น ซึ่งมักจะเกิดที่ปากทางเข้าใบพัดของเครื่องสูบน้ำ (Tong and Tang,1997) ดังนั้นหากเราเข้าใจพฤติกรรมของปรากฏการณ์ดังกล่าวแล้วว่ามีสาเหตุจากอะไร หรือสามารถตรวจพบได้ที่บริเวณไหน เราอาจป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้ เป็นต้น

การออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่ต้องการความรู้พื้นฐานที่ลึกซึ้งมากขึ้นกว่าในอดีต งานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการไหลแบบสองเฟสเองก็มีความซับซ้อนและยังขาดความเข้าใจอย่างลึกซึ้ง ด้วยสาเหตุนี้ นักวิจัยและวิศวกรออกแบบต้องการความรู้พื้นฐานของการไหลสองเฟสที่มีความลึกซึ้งมากขึ้นเพื่อการออกแบบ การควบคุม รวมถึงการปรับปรุงสมรรถนะในระบบต่าง ๆ เหล่านั้นเพื่อทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ที่ผ่านมามีการพยายามศึกษาเพื่อทำให้เกิดความเข้าใจฟิสิกส์ของการไหล และผลกระทบจากการไหลประเภทนี้เป็นจำนวนมาก เช่น การศึกษารูปแบบการไหลและรูปร่างของฟองก๊าซในท่อขนาดเล็กต่อผลการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมในท่อ การศึกษาปริมาณอัตราส่วนก๊าซและขนาดฟองก๊าซต่อการลดแรงเสียดทานในบริเวณใกล้กับผนังยานพาหนะทางน้ำ เป็นต้น

องค์ความรู้ของการไหลสองเฟสสามารถศึกษาได้ทั้งการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการไหลและการใช้เทคนิคการวัดแบบต่างๆ เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมของการไหลโดยตรง อย่างไรก็ตาม การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องนำความรู้ที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบเพื่อทดสอบและปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความแม่นยำในเงื่อนไขต่าง ๆ มากขึ้น ถึงแม้ว่างานทั้งสองส่วนจะมีความสำคัญเท่า ๆ กันและมีความเกี่ยวข้องกันแยกจากกันไม่ได้ การประสบความสำเร็จในการวัดการไหลที่เกิดขึ้น

จริงจะเป็นส่วนขับเคลื่อนที่สำคัญมากในการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ตลอดจนการประดิษฐ์เทคโนโลยีใหม่ที่มีความเกี่ยวข้องกับการไหลแบบสองเฟสนี้

การทำความเข้าใจพฤติกรรมการไหลแบบสองเฟสนั้น จะต้องมีการวัดเป็นจำนวนมากที่เกี่ยวข้อง เช่น รูปแบบการไหล การกระจายของเฟสต่างๆ อัตราส่วนของปริมาณฟองก๊าซ พฤติกรรมการผสม ความเร็ว ตลอดจนขนาดและรูปร่างของฟองก๊าซ ในอดีตที่ผ่านมา ได้มีเทคนิคการวัดเป็นจำนวนมากได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวัดและศึกษาพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟสนี้ เช่น การวัดการดูดซับแสงโดย Serizawa et al. (1975) การวัดค่าการนำไฟฟ้าของการไหลโดย Jones and Delhaye (1976) และการใช้แสงเอกซเรย์โดย Misawa et al. (1999) เพื่อวัดการกระจายของฟองก๊าซโดยเฉลี่ยของการไหล

อย่างไรก็ตาม การทำความเข้าใจพฤติกรรมบางอย่าง เช่น การเคลื่อนที่ของฟองก๊าซแต่ละฟอง การผสมระหว่างของเหลวสองเฟส การแตกและรวมกันของฟองก๊าซแต่ละฟองนั้น การวัดคุณสมบัติที่จุดใด ๆ ของการไหลจะเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก ในอดีตมีงานเป็นจำนวนมากซึ่งใช้เทคนิคแตกต่างกัน เช่น การใช้เซนเซอร์ทางแสงหลายตัวที่พัฒนาโดย Mori et al. (1977) ทำให้สามารถวัดความเร็วและขนาดของฟองก๊าซแต่ละฟองได้ การใช้เทคนิค PIV ในงานของ Hassan (2002) เพื่อวัดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเฟสทั้งสอง เป็นต้น โดยแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียและความสามารถในการวัดที่แตกต่างกัน

ในปัจจุบัน การพัฒนาเทคโนโลยีของกล้องวีดีโอ CCD ความเร็วสูงได้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และทำให้การวัดการไหลแบบสองเฟสสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วมากขึ้น แต่ราคาของกล้องแบบนี้ยังมีราคาในระดับหนึ่งล้านบาทขึ้นไป ดังนั้นการตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้จึงไม่แพร่หลายและอาจจะไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานตรวจวัดและควบคุมการไหลในภาคอุตสาหกรรมหรือภาคเกษตรกรรม

ในงานวิจัยนี้จึงมีการพัฒนาเทคนิคการวัด 2 แบบคือ เทคนิคการวัดแบบวิธี Wire Mesh Tomography (WMT) โดยใช้หลักการของการวัดความแตกต่างของการนำไฟฟ้าของของไหลทั้งหน้าตัดการไหล แล้วนำไปประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการไหลได้จากการวัดเพียงครั้งเดียวคือ อัตราส่วนของปริมาณฟองก๊าซ ขนาดฟองก๊าซ และความเร็วของฟองก๊าซ วิธีการนี้ได้รับการพัฒนาและทดสอบความถูกต้องไปบางส่วนแล้ว (Prasser et al. (1998), Richter et al. (2002), Wangjiraniran et al. (2005) และ Fuangworawong et al. (2007)) ในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาอุปกรณ์ขึ้นมาและมุ่งเน้นในการหาพารามิเตอร์ของฟองก๊าซให้มีความแม่นยำสูงขึ้น

เทคนิคการวัดแบบที่สองของงานวิจัยนี้คือ การใช้เลเซอร์และไดโอด วิธีการนี้จะคล้ายคลึงกับงานของ Mori et al. (1977) ที่เป็นการศึกษาเรื่องความเร็วและขนาดของฟองก๊าซ งานของ Colin and Synovec (2002) และงานของ Ravellin et al. (2006) ที่ใช้ในการวัดการไหลรูปแบบหนึ่งคือ slug flow ในท่อขนาดไมโครสเกล สำหรับงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาจะนำมาใช้วัดรัศมีความโค้งของฟองก๊าซที่ไหลไปพร้อมกับเฟสของเหลว ซึ่งยังไม่มีการศึกษามากนัก

วิธีการทั้งสองเป็นวิธีการที่สามารถพัฒนาขึ้นมาได้เองด้วยงบประมาณซึ่งไม่สูงนักเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ และยังสามารถวัดพารามิเตอร์ของการไหลแบบสองเฟสได้หลายตัวเมื่อนำวิธีการทั้งสองมาใช้ประกอบกัน โดยเทคนิค WMT จะทำให้ทราบพารามิเตอร์ของการไหลเป็นจำนวนมาก

จากการวัดครั้งเดียว และสามารถวัดฟองก๊าซที่มีความซับซ้อนมากได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะมีเซนเซอร์สัมผัสกับการไหลโดยตรง ดังนั้นลักษณะของการไหลจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อชนกับเซนเซอร์ สำหรับเทคนิคเลเซอร์ไดโอด เป็นการวัดที่เซนเซอร์ไม่สัมผัสกับการไหลโดยตรง แต่วิธีการนี้จะต้องใช้เซนเซอร์หลายตัวหากต้องการวัดพารามิเตอร์หลายตัว และยังมีจำกัดเฉพาะฟองก๊าซที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนมากนัก ซึ่งหากทั้งสองเทคนิคการวัดได้รับการพัฒนาขึ้นมาในกลุ่มวิจัยเดียวกันแล้ว ผลการวัดทั้งในเรื่องของความเร็วและขนาดฟองก๊าซ รัศมีความโค้งของฟองก๊าซ และอัตราส่วนฟองก๊าซจะถูกนำมาประกอบกันนอกจากข้อมูลที่ได้จะมากขึ้นแล้ว ผลการศึกษานี้ อาจจะนำมาสู่องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการไหลแบบสองเฟส ที่จะมีประโยชน์ในการนำไปใช้ออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในงานวิศวกรรม เช่น การทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น การผสมระหว่างมวลที่รวดเร็วขึ้น หรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ดีขึ้นได้

## 1.2 Wire Mesh Topography

เทคนิคการวัดแบบ Wire Mesh Tomography (WMT) มีหลักการคือการวัดค่าการนำไฟฟ้าระหว่างคู่ของเส้นลวดที่วางขวางกัน หากมีค่าการนำไฟฟ้าของหลายคู่ของเส้นลวดที่วางขวางกันในพื้นที่หน้าตัดของระบบของไหลสองเฟส เราจะสามารถแปลงข้อมูลทางไฟฟ้าเป็นข้อมูลปริมาตรของฟองก๊าซในปริมาตรของเหลวใด ๆ ที่แต่ละตำแหน่งในพื้นที่หน้าตัดของระบบการไหลสองเฟส โดยเทคนิคการวัดนี้พัฒนาโดย Prasser et al. (1998) นอกจากนั้นด้วยการประมวลผลข้อมูล WMT จะสามารถวัดข้อมูลอัตราส่วนปริมาตรฟองก๊าซและปริมาตรของเหลว ขนาดฟองก๊าซ และความเร็วของฟองก๊าซได้ ซึ่งมีอยู่หลายวิธี หนึ่งในวิธีประมวลผลนั้น Richter et al. (2002) ได้นำเสนอวิธีการและมีการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการนั้นในการวัดอัตราส่วนของปริมาณฟองก๊าซขนาดฟองก๊าซ และความเร็วของฟองก๊าซ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดจาก ultra-fast X-ray tomography โดย Prasser et al. (2005)

ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการวัด WMT จะต้องมีการพัฒนา 2 ส่วนหลัก ๆ ประกอบกัน คือ การพัฒนาอุปกรณ์การวัดและการพัฒนาโปรแกรมการประมวลผล เนื่องจากการพัฒนาอุปกรณ์การวัดมีการพัฒนาโดยผู้ผลิตอุปกรณ์ คือ FZR Research Center Rossendorf, Institute of Safety Analysis, Dresden, Germany ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพยายามจะพัฒนาโปรแกรมการประมวลผลเพื่อให้สามารถนำข้อมูลที่ได้จาก Wire Mesh Sensor (WMS) มาคำนวณหาอัตราส่วนของปริมาณฟองก๊าซ ขนาดฟองก๊าซ และความเร็วของฟองก๊าซได้

### 1.3 ระบบเลเซอร์ไดโอด

เนื่องจากการไหลแบบสองเฟสเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการศึกษาควรจะต้องใช้เทคนิคที่มีผลการตอบสนองที่ค่อนข้างเร็ว จึงเกิดแนวคิดเกี่ยวกับเทคนิคแบบเลเซอร์ไดโอด เพราะว่าเทคนิคดังกล่าวมีจุดเด่นคือ มีผลการตอบสนองที่ค่อนข้างเร็ว ราคาถูก อีกทั้งเครื่องมือวัดก็ไม่ได้ไปรบกวนการไหล แต่จุดด้อยของเทคนิคนี้ คือ อุปกรณ์หนึ่งชุดจะสามารถเก็บข้อมูลได้ในทิศทางเดียวเท่านั้น หากต้องการเก็บข้อมูลในหลายทิศทางจะต้องใช้อุปกรณ์หลายชุดประกอบกัน

งานของ Ong and Thome (2009) ใช้ระบบเลเซอร์ไดโอดที่พัฒนาโดย Ravellin et al. (2006) ในการศึกษาเกี่ยวกับการเกิด boiling ในท่อขนาดเล็ก เพื่อตรวจสอบลักษณะของการไหลสองเฟสและความเร็วของฟองอากาศที่ไหลในชุดทดลองนั้น โดยหลักการพื้นฐานคือ เมื่อมีระบบเลเซอร์ไดโอด 2 ชุดที่มีระยะห่างระหว่างทั้งสองชุดคงที่ เมื่อฟองอากาศเคลื่อนที่มาตัดกับลำแสงเลเซอร์จะทำให้ลำเลเซอร์เบี่ยงไปและไม่ตกกระทบบนเซนเซอร์ของไดโอด ทำให้รู้ว่าเมื่อไรที่ฟองอากาศเคลื่อนที่มาตัดลำเลเซอร์ ดังนั้นหากสามารถวัดเวลาที่ฟองอากาศเคลื่อนที่จากจุดแรกมาจุดหลังได้ก็จะสามารถคำนวณหาความเร็วของฟองอากาศได้

Hu et al. (2007) พัฒนา flying optical probe ที่ประกอบด้วย LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงและ photodiode เป็นตัวรับสัญญาณที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เพื่อวัดขนาดฟองอากาศที่เคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ ในการไหลที่มีความเป็นเทอเรนูล์สูง ๆ ซึ่งในการศึกษาไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดของเครื่องมือวัดนักแต่ขนาดของฟองอากาศที่วัดได้อยู่ในช่วง 2-30 mm

Kikutani et al. (2008) เสนอวิธีการใหม่ในการวัดความเร็วของการไหลเฟสเดียวในท่อขนาดเล็ก ซึ่งเป็นหลักการที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของของเหลวด้วยการให้ความร้อนแก่ของเหลวในบริเวณเล็ก ๆ ด้วยลำแสงเลเซอร์แบบไม่ต่อเนื่อง (pulse laser) และจะเรียกของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นนี้ว่า "thermal lens" ซึ่งเมื่อเลนส์นี้เคลื่อนที่ไปตัดกับระบบเลเซอร์ไดโอดที่ตำแหน่ง downstream แล้ว เลเซอร์ที่เคลื่อนที่ผ่านเลนส์จะถูกหักเหออกไปจากแนวทางเดิมและไม่ตกลงบนเซนเซอร์ของไดโอด ดังนั้นถ้ากำหนดให้ระยะระหว่างจุดที่ให้ความร้อนและจุดของเลเซอร์ไดโอดคงที่แล้ว แล้ววัดระยะเวลาดังแต่ที่เลนส์ไหลจากจุดแรกไปจุดที่สองได้ เราก็จะทราบความเร็วของการไหลได้ ซึ่งวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ฟองก๊าซ หรือผงโลหะขนาดเล็กผสมไปกับของเหลวก็ยังสามารถวัดความเร็วของการไหลในท่อขนาดไมครอนได้

จากงานวิจัยเหล่านี้ การใช้งานเลเซอร์ไดโอดยังจำกัดอยู่เฉพาะในเรื่องการตรวจสอบว่ามีฟองอากาศไหลตัดผ่านแนวเลเซอร์และขวางไม่ให้ลำเลเซอร์ไปตกกระทบกับไดโอดเท่านั้น โดยสังเกตจากการลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขาออกของระบบเลเซอร์ไดโอด และไม่ได้สนใจลักษณะการลดลงของสัญญาณดังกล่าวเลย

อย่างไรก็ตามกลไกที่ทำให้เลเซอร์เปลี่ยนแปลงทิศทางไปคือการหักเหของแสงและการสะท้อนกลับหมดเมื่อลำเลเซอร์เคลื่อนผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน ดังนั้นหากมีฟองอากาศที่มีรูปร่างความโค้งแตกต่างกันอยู่หนึ่งกับที่ แล้วลำเลเซอร์ถูกยิงไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนผิวโค้ง มุมที่ลำเลเซอร์เคลื่อนที่หักเหออกไปย่อมจะขึ้นกับมุมเอียงของผิวโค้งที่กระทำกับลำเลเซอร์อยู่ ด้วยแนวคิดนี้ หากนำเลเซอร์ไปตัดผ่านฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้ง หรือรูปร่างผิวโค้ง



ที่ต่างกันที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากันในของเหลวชนิดเดียวกันแล้ว จึงเกิดคำถามว่า ลักษณะการลดลงของปริมาณเลเซอร์ที่ตกกระทบบนไดโอดซึ่งทำให้สัญญาณความต่างศักย์ลดลง นั้นจะเหมือนกันหรือไม่ อย่างไร ด้วยเหตุผลดังกล่าวในโครงการนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาเทคนิคการ วัดสำหรับการวัดรัศมีความโค้งเป็นการศึกษาเบื้องต้นก่อน โดยมุ่งเน้นไปที่การสอบเทียบโดยใช้ แบบจำลองฟองอากาศที่เรารู้รัศมีความโค้ง เพื่อนำระบบการวัดดังกล่าวมาทดลองใช้วัดรัศมี ความโค้งฟองอากาศต่อไป

#### **1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย**

1.4.1 พัฒนาเทคนิค Wire Mesh Tomography และโปรแกรมการคำนวณเพื่อวัดอัตราส่วน ฟองก๊าซ ความเร็วฟองก๊าซ และขนาดฟองก๊าซ

1.4.2 พัฒนาเทคนิคเลเซอร์ไดโอด เพื่อวัดรัศมีความโค้งที่ตำแหน่งปลายยอดของฟอง ก๊าซ

#### **1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัยและส่วนประกอบของรายงาน**

1.5.1 พัฒนาออกแบบและสร้างอุปกรณ์ Wire Mesh Tomography และทำการสอบเทียบ โดยรายละเอียดทั้งในส่วนของความรู้พื้นฐาน หลักการของเครื่องมือวัด ส่วนประกอบที่สำคัญของ เครื่องมือวัด และผลการสอบเทียบจะแสดงไว้ในบทที่ 2 ของรายงานฉบับนี้

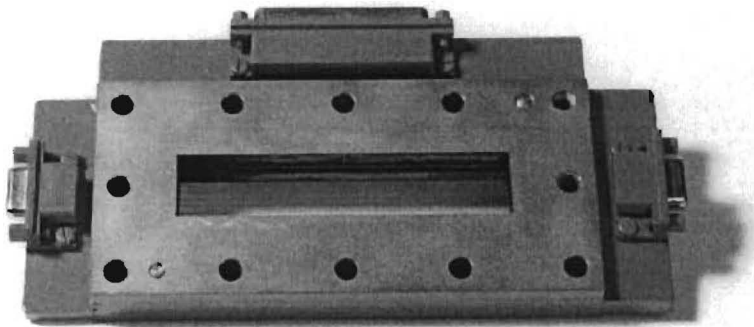
1.5.2 พัฒนาออกแบบและสร้างอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด และทำการสอบเทียบ ซึ่ง รายละเอียดทั้งในส่วนของความรู้พื้นฐาน หลักการของเครื่องมือวัด ส่วนประกอบที่สำคัญของ เครื่องมือวัด และผลการสอบเทียบจะแสดงไว้ในบทที่ 3 ของรายงานฉบับนี้

## บทที่ 2

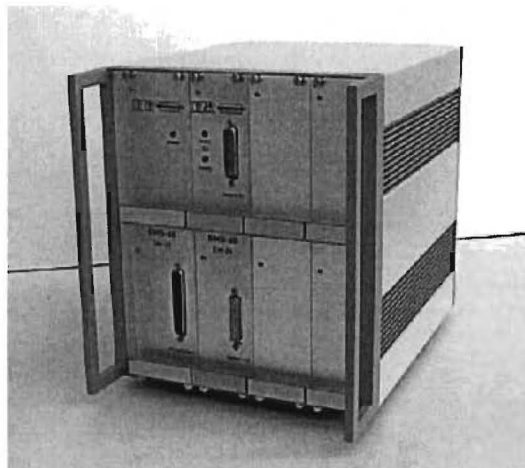
### Wire Mesh Topography

Wire Mesh Tomography (WMT) เป็นเทคนิคการวัดที่พัฒนาโดยใช้หลักการวัดแบบเดียวกับเทคนิคการวัดแบบ needle probes เนื่องจากเทคนิคการวัดแบบ needle probes มีข้อด้อยประการสำคัญ คือ ไม่สามารถวัดพารามิเตอร์ของของไหลสองเฟสที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลาตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อในเวลาเดียวกัน นอกจากนั้นเวลาที่ใช้ในการวัดให้ได้ข้อมูลของของไหลสองเฟสใช้เวลานานอีกด้วย เพื่อลดข้อด้อยเหล่านั้น จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนา WMT โดยใช้ดาข่ายลวดขนาดเล็กเพื่อทำหน้าที่เป็น needle probes หลาย ๆ อัน ติดตั้งครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดของพื้นที่การวัด เพื่อให้สามารถวัดพารามิเตอร์ของของไหลสองเฟสได้ตลอดพื้นที่หน้าตัดท่อในช่วงเวลาขณะใดขณะหนึ่ง

เทคนิคการวัด WMT นี้ประกอบด้วย WMS (Wire Mesh Sensor) ดังแสดงในรูปที่ 2-1 และ Data acquisition unit ดังแสดงในรูปที่ 2-2 โดยทั้ง WMS และ Data acquisition unit ได้พัฒนาขึ้นที่ FZR Research Center Rossendorf, Institute of Safety Analysis, Dresden, Germany และมีการเผยแพร่ครั้งแรกโดย Prasser et al. (1998)



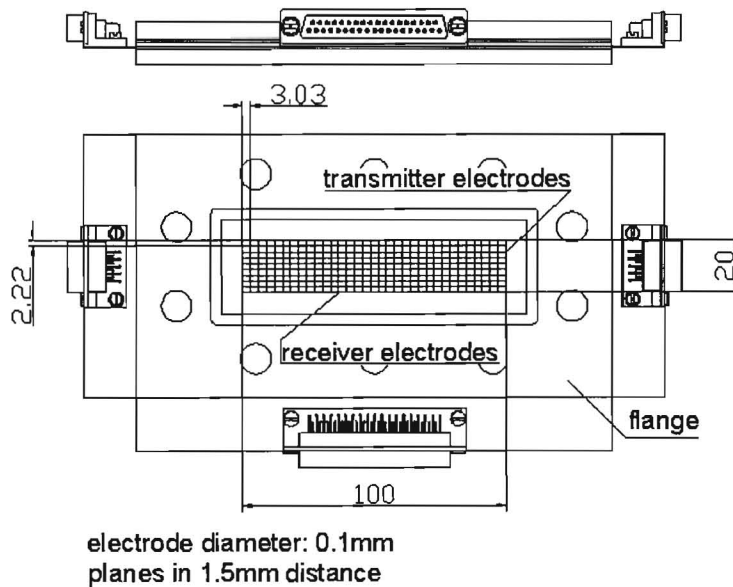
รูปที่ 2-1 WMS (Wire Mesh Sensor)



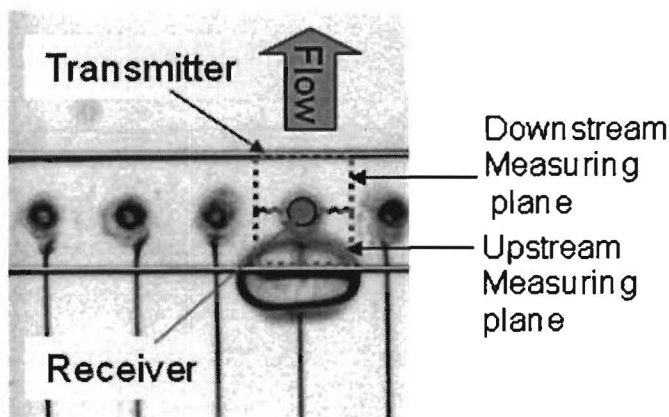
รูปที่ 2-2 Data Acquisition

## 2.1 Wire Mesh Sensor (WMS) และ Data Acquisition

ในหัวข้อนี้จะอธิบายลักษณะทางกายภาพของ WMS โดย WMS มีขนาดหน้าตัด  $20 \times 100 \text{ mm}^2$  ประกอบด้วยตาข่ายลวด 3 ชั้น โดยชั้นของตาข่ายลวดตรงกลางจะทำหน้าที่เป็น transmitter plane ประกอบด้วยเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มม. จำนวน 8 เส้นขนานกัน ชั้นของตาข่ายลวดบนและชั้นของตาข่ายลวดล่างทำหน้าที่เป็น receiver plane ประกอบด้วยเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มม. จำนวน 32 เส้นขนานกันดังแสดงในรูปที่ 2-3ก โดยเส้นลวดของตาข่ายลวดทั้ง 3 ชั้นจะวางตั้งฉากกัน โดยมีระยะห่าง 1.5 มม. ตามทิศทางของการไหล ลักษณะการวางตัวของชั้นตาข่ายลวดแบบนี้ทำให้เกิดชั้น measuring volume 2 ชั้น ประกอบด้วย upstream measuring plane ซึ่งวัดก่อนกึ่งกลาง WMS และ downstream measuring plane ซึ่งวัดหลังกึ่งกลาง WMS และจะมี spatial resolution ของ WMS เท่ากับ  $2.22 \times 3.03 \times 1.5 \text{ mm}^3$  หรือประมาณขนาดของฟองก๊าซที่เป็นทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.68 มม ดังแสดงในรูปที่ 2-3ข



(ก) โครงสร้างของ WMS (ภาพในทิศขวางการไหล)



(ข) ลักษณะทางกายภาพของ measuring plane (ภาพด้านข้างของการไหล)

รูปที่ 2-3 เช่นเซอร์; (ก) โครงสร้างของ WMS, (ข) ลักษณะทางกายภาพของ measuring plane

การทำ Data Acquisition ของ WMT สามารถอธิบายได้จากตัวอย่างของวงจรควบคุมของ WMT ในรูปที่ 2-4 โดยตาข่ายลวดซึ่งเป็น WMS จะอยู่ในท่อสี่เหลี่ยม (กรอบสี่เหลี่ยม) เป็นส่วนที่สัมผัส ฟองก๊าซ สำหรับส่วน supply voltage, excitation electrode, sample/hold circuits และ operational amplifiers เป็นอุปกรณ์ควบคุม ในการอธิบายนี้จะสมมติว่า WMS ประกอบด้วย transmitter 4 เส้นและ receive 4 เส้น และมีการกระตุ้นที่ transmitter เส้นที่ 2 และส่งสัญญาณไปที่ receiver เส้นที่ 3

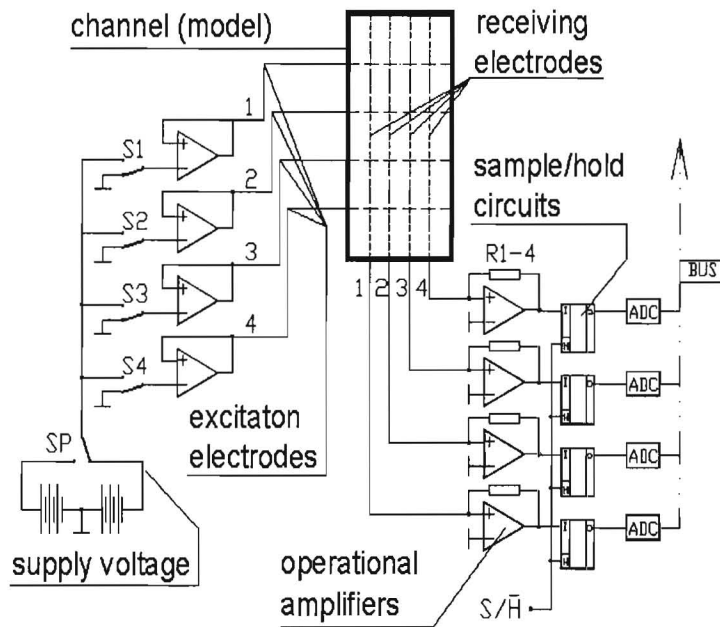
ขั้นตอนการควบคุมเริ่มจากการกระตุ้น transmitter wire เมื่อ SP และ S2 ปิดแล้วจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ transmitter เส้นที่ 2 ( $U_{T2}$ ) การกระตุ้นนี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ receiver wire เส้นที่ 3 ( $I_{R3}$ ) โดยกระแสไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตามสภาพการนำไฟฟ้าของของไหลที่อยู่ตรงกลาง ระหว่างลวดทั้งสองซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันระหว่างของเหลวและก๊าซ หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะถูกแปลงเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยตัวต้านทานไฟฟ้า  $R_2$  และสัญญาณความต่างศักย์จะโดยสุ่มและขยายโดย sample and hold circuit (S/H) หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิตอลด้วย A/D converter และจะบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์ ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2-5

สำหรับรูปที่ 2-6 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานและความเชื่อมโยงของสัญญาณ โดยเริ่มจาก control unit เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมลำดับในการทำงานของการเปิดปิดสวิตช์ ซึ่งควบคุมด้วยสัญญาณ กระตุ้นทางไฟฟ้าที่ส่งมาจาก excitation pulse generation เมื่อสวิตช์ทำงานแล้ว ความต่างศักย์ไฟฟ้า จะส่งไปยังเซนเซอร์ สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์จะนำไปขยายสัญญาณที่ pre-amplifier และถูกสุ่ม บันทึกและขยายสัญญาณที่สุ่มบันทึกอีกครั้งที่ sample & hold amplifier หลังจากนั้นสัญญาณจะแปลง เป็นสัญญาณดิจิตอลที่ A/D convert และ parallel data interface และบันทึกส่งคอมพิวเตอร์ตามลำดับ หลังจากนั้นสัญญาณส่วนหนึ่งจะส่งกลับไปยัง control unit เพื่อเป็น feedback signal สำหรับข้อมูล คุณสมบัติพื้นฐานของ Data Acquisition ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2-1 โดยความถี่สูงสุดของ Data Acquisition อยู่ที่ 12,000 frames/s

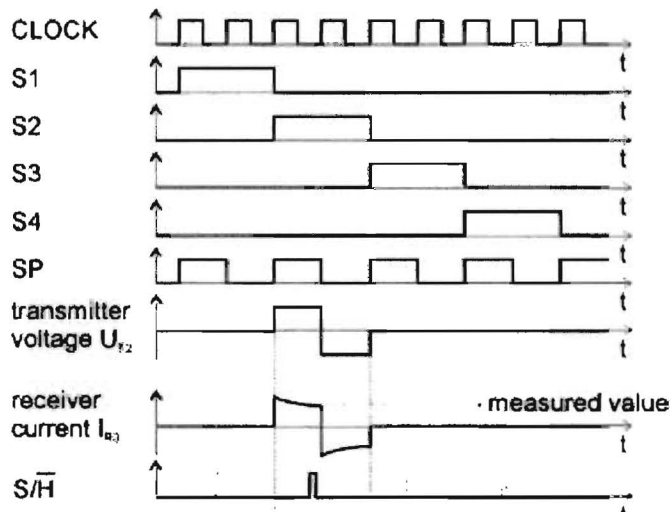
การเปลี่ยนจากสัญญาณทางไฟฟ้ามาเป็นค่าอัตราส่วนปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรของไหลสองเฟส (void fraction) จะคำนวณแยกกันแต่ละจุดการวัดโดยจะแสดงค่า void fraction ของแต่ละจุดในของไหลสองเฟส โดยค่าอัตราส่วนปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรของไหลสองเฟสเฉพาะที่ในช่วงขณะใดขณะหนึ่ง หรือ local time-dependent void fraction,  $\varepsilon(x_1, x_2, t)$  ที่จุดใดๆ  $(x_1, x_2)$  ที่เวลา  $t$  ใด ๆ สามารถหาได้จากสมการอย่างง่าย ดังสมการ (2-1)

$$\varepsilon(x_1, x_2, t) = \frac{U(x_1, x_2, t) - U^L(x_1, x_2)}{U^G(x_1, x_2) - U^L(x_1, x_2)} \quad (2-1)$$

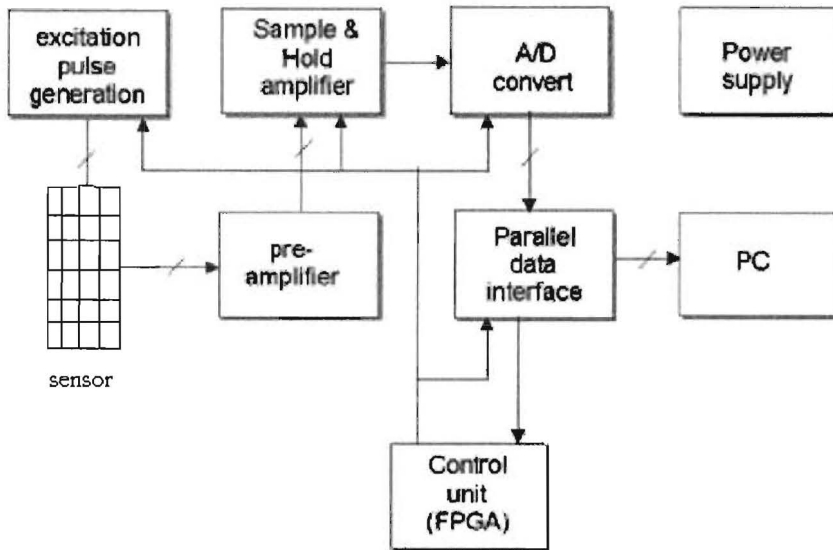
โดย  $U^G(x_1, x_2)$  คือค่าการนำไฟฟ้าของก๊าซ ซึ่งมี  $\varepsilon = 100\%$  และ  $U^L(x_1, x_2)$  คือค่าการนำไฟฟ้าของของเหลว ซึ่งมี  $\varepsilon = 0\%$  และค่า  $U^G$  และ  $U^L$  จะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซและของเหลว โดยมีสมมติฐานว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้าและ void fraction เป็นแบบเชิงเส้นตรง



รูปที่ 2-4 วงจรทางไฟฟ้าอย่างง่ายของ WMT



รูปที่ 2-5 การควบคุมลำดับการทำงานของ WMT



รูปที่ 2-6 โครงสร้างอย่างง่ายของการประมวลผลของ WMT

ตารางที่ 2 – 1 คุณสมบัติของ Data Acquisition Unit

<b>Control module</b>	field programmable gate array (FPGA)
<b>Excitation time</b>	3-19 $\mu$ s
<b>Capacity</b>	12,000 frames
<b>S/H circuit</b>	Activated at the end of first half period
<b>Cable</b>	Directly connect between acquisition unit and PC
<b>Separated function unit</b>	None
<b>Data storage</b>	Data stored through PC

## 2.2 การคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ

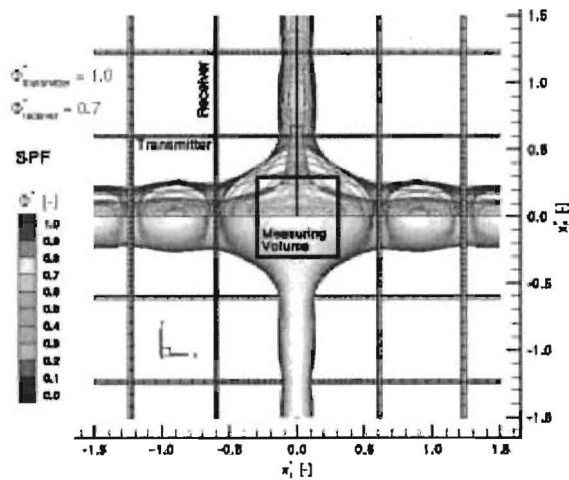
ในส่วนนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับจากเซนเซอร์มาเป็นข้อมูลของการไหลสองเฟส โดยข้อมูลที่จะกล่าวถึงในรายงานฉบับนี้ คือ ค่าอัตราส่วนปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรของไหลสองเฟสเฉพาะที่ ความเร็วฟองก๊าซ และปริมาตรฟองก๊าซ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

### 2.2.1 วิธีการเฉลี่ยค่าอัตราส่วนปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรของไหลสองเฟสเฉพาะที่ (Local time-independent void fraction)

ขนาดของปริมาตรการวัดของ WMS คือ ระยะห่างระหว่างจุดที่ transmitter wire ดัดกับ receiver wire และระยะห่างระหว่างชั้นดาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2-7 โดยแสดงตัวแปรเป็น  $x_1$ ,  $x_2$  โดย  $x_1$  กับ  $x_2$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดดัดของ transmitter wire ดัดกับ receiver wire ( $2.22 \times 3.03 \text{ mm}^2$ ) และระยะห่าง

ระหว่าง transmitter plane ดัดกับ receiver plane (1.5 mm) ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าคงที่ ทำให้การศึกษาครั้งนี้มีค่าปริมาตรการวัด (measuring volume) เท่ากับ  $2.22 \times 3.03 \times 1.5 \text{ mm}^3$

รูปที่ 2-7 แสดงให้เห็นลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่าง transmitter wire ดัดกับ receiver wire ที่อยู่กึ่งกลางของรูปภาพทั้งสองแนว เนื่องจากไม่สามารถวัดลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยตรงจึงต้องคำนวณจากทางทฤษฎีเพื่อประมาณขนาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองขนาดของความต่างศักย์ไฟฟ้าจะถูกปรับจนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าครอบคลุมทั้งปริมาตรการวัด (ทางทฤษฎี) สำหรับระยะห่างระหว่าง transmitter wire กับ receiver wire ของอุปกรณ์วัดนี้ เพื่อให้ผลการวัดมีความแม่นยำสูงเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2-7 ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ของ WMS และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ค่า  $\varepsilon(x_1, x_2, t)$  จะถูกวัดในช่วงเวลาหนึ่งขณะใดขณะหนึ่งดังแสดงในสมการที่ (2-1) ดังนั้นหากทำการวัดเป็นช่วงเวลา  $T_w$  หนึ่ง ๆ แล้วจะนำค่าที่วัดได้ในช่วงเวลาดังกล่าวมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดความไม่แน่นอนของข้อมูล ดังนั้นสมการที่แสดงค่า local time-independent void fraction จะนิยามได้ดังนี้

$$\bar{\varepsilon}(x_1, x_2) = \frac{1}{T_w} \int_{t=0}^{T_w} \varepsilon(x_1, x_2, t) dt \quad (2-2)$$

### 2.2.2 วิธีการคำนวณหาความเร็วฟองก๊าซ (Bubble Velocity)

การคำนวณหาความเร็วฟองก๊าซจะใช้วิธี Delay time evaluation method โดยมีพื้นฐานจากการจับเวลาที่ฟองอากาศเคลื่อนที่จากจุดใด ๆ ใน upstream plane ไปยังจุดใด ๆ ใน downstream plane ซึ่งระยะห่างระหว่าง plane ทั้งสองถูกกำหนดไว้แล้ว (ดังแสดงในรูปที่ 2-3ข) ดังนั้นความเร็วของฟองก๊าซจะสามารถคำนวณได้โดยตรง ซึ่งวิธีนี้มีความเหมาะสมกับ WMS ที่ประกอบด้วย 2 measuring plane โดยขั้นตอนของการคำนวณมีดังนี้

- (1) หาขอบบนและขอบล่างของฟองก๊าซที่เคลื่อนที่ผ่าน WMS โดยสมมติว่าฟองก๊าซเคลื่อนที่ขึ้นอย่างเดียว (มีทิศทางการไหลไปทางเดียว) ซึ่ง WMT จะรู้ขอบบนและขอบล่างของฟองก๊าซได้โดยอาศัย local time-dependent void fraction  $\varepsilon(x_1, x_2, t)$  โดยค่า  $\varepsilon(x_1, x_2, t)$  จะแสดงเป็นค่าของไหลสองเฟสครั้งแรก คือขอบบนของฟองก๊าซ และเมื่อเวลาผ่านไป  $\Delta t$  จะได้ค่า  $\varepsilon(x_1, x_2, \Delta t)$  โดยมีค่าเท่ากับ  $\varepsilon(x_1, x_2, t)$  ซึ่งแสดงเป็นของไหลสองเฟสครั้งสุดท้าย คือขอบล่างของฟองก๊าซ ซึ่งการหาขอบของฟองก๊าซนี้จะกระทำทั้งบน upstream และ downstream plane
- (2) เวลาการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซผ่าน WMS จะใช้เงื่อนไขของระยะเวลาที่เท่ากันสำหรับฟองไหลผ่าน measuring plane ใด ๆ (ทั้ง upstream plane และ downstream plane) เพื่อกำหนดว่าฟองที่ตรวจสอบอยู่บน measuring plane ทั้งสองเป็นฟองเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ทราบได้ว่าขอบบนของฟองฟองนั้นเคลื่อนที่จาก upstream ไปสู่ downstream ใช้เวลาเท่าใด
- (3) ในขั้นตอนสุดท้าย ความเร็วของฟองก๊าซ คือ ระยะทางระหว่าง upstream plane และ downstream planeหารด้วยเวลาที่หาได้จากข้อ (2)

ลักษณะสัญญาณ local time-dependent void fraction ที่วัดได้จากเซนเซอร์บนทั้งสอง measuring plane แสดงในรูปที่ 2-8 เมื่อ ค่า threshold คือค่า void fraction ที่ใช้ในการแบ่งขอบเขตเพื่อผู้วิจัยจะใช้ตัดสินใจในการแยกแยะของเหลวที่ผ่านระหว่างขดลวดทั้งสองในขณะนั้นควรจะเป็นก๊าซหรือของเหลว โดยค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับลักษณะของของไหลสองเฟส และจากงานของ Prasser et al. (2001) ได้แนะนำว่าค่า threshold ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 8-15% ดังนั้นในการศึกษานี้จะใช้ค่าเฉลี่ยในช่วงดังกล่าวและกำหนดให้มีค่าคงที่ที่ 10%

อย่างไรก็ตามค่าความเร็วสูงที่สุดที่เครื่องมือวัดได้จะขึ้นกับระยะห่างระหว่าง measuring plane และความเร็วในการวัดสัญญาณ (sampling frequency) โดยค่าความเร็วฟองก๊าซสูงที่สุด ( $U_{GG,max}$ ) ที่สามารถวัดได้ที่สามารถแสดงได้โดยสมการ

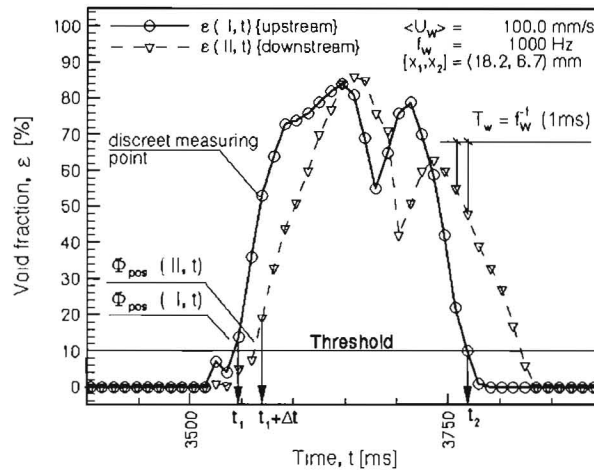
$$U_{GG,max} = \Delta_w \cdot f_w \quad (2-3)$$

ความเร็วของฟองก๊าซสามารถหาได้โดยการนับจำนวนครั้งของสัญญาณ, counting number ( $d$ ) โดยค่าความเร็วฟองก๊าซ ( $U_{GG,d}$ ) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$U_{GG,d} = \frac{\Delta_w \cdot f_w}{d} \quad (2-4)$$



โดย  $f_w$  = Sampling frequency ,  $\Delta_w$  = ระยะห่างระหว่าง planes และ  $d$  คือจำนวนครั้งของความถี่ที่นับได้ระหว่างที่ฟองก๊าซเคลื่อนที่จาก upstream plane ไปยังจุดใด ๆ ใน downstream plane



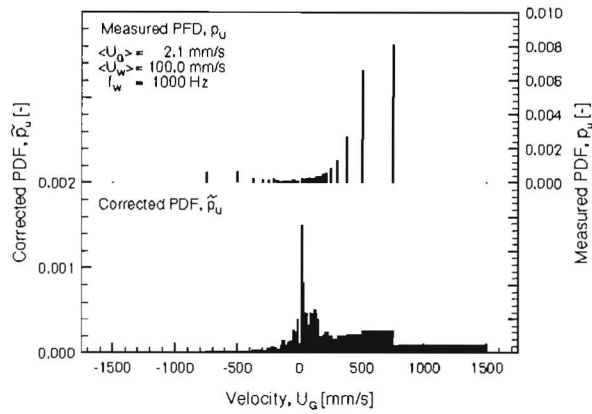
รูปที่ 2-8 ลักษณะสัญญาณที่แปลงเป็น local time dependent void fraction ที่ได้จาก upstream plane และ down stream plane

อย่างไรก็ตามค่าความเร็วฟองก๊าซที่วัดได้จาก WMT จะมีค่าเป็นจำนวนเต็ม (จำนวนเท่าของระยะห่างระหว่าง plane และความถี่ที่ใช้) เท่านั้น เนื่องจาก  $f_w$  ที่ใช้มีค่าเพียง 1,000 Hz ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อวัดความเร็วฟองก๊าซ และนำมาแสดงในรูปของ probability density function (PDF) ดังแสดงในรูปที่ 2-9 ซึ่งจะเห็นว่า measured PDF,  $P_u$  มีค่าไม่ต่อเนื่องโดยเฉพาะที่ความเร็วของฟองก๊าซที่มีความเร็วสูงซึ่งผิดกับลักษณะทางกายภาพของการไหลของฟองก๊าซ เนื่องจากการไหลของฟองก๊าซควรจะมีความเร็วแบบต่อเนื่อง

ปัญหานี้จึงถูกปรับปรุงโดยการจัดการกระจายตัวใหม่เพื่อทำให้การกระจายตัวมีความต่อเนื่อง คล้ายคลึงกับลักษณะทางกายภาพ โดยใช้หลักการการกระจายตัวของ  $P_u$  ภายในช่วงของความเร็วมืดความไม่แน่นอน ซึ่งช่วงของความเร็วมืดความไม่แน่นอนนี้คือ ค่า uncertainty ของความเร็วฟองก๊าซ โดยอาศัย re-distribution function ( $\tilde{p}_u$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{\{s\}} p_u U_{CG} = \sum_{\{U\}} \tilde{p}_u U_{CG} \quad (2-5)$$

ด้วยวิธีการนี้ จะทำให้ได้กราฟของ PDF ของความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2-9 โดยความเร็วฟองก๊าซที่ฟองก๊าซส่วนใหญ่ไหลในการไหลคือ ความเร็วค่าที่มี PDF สูงสุด

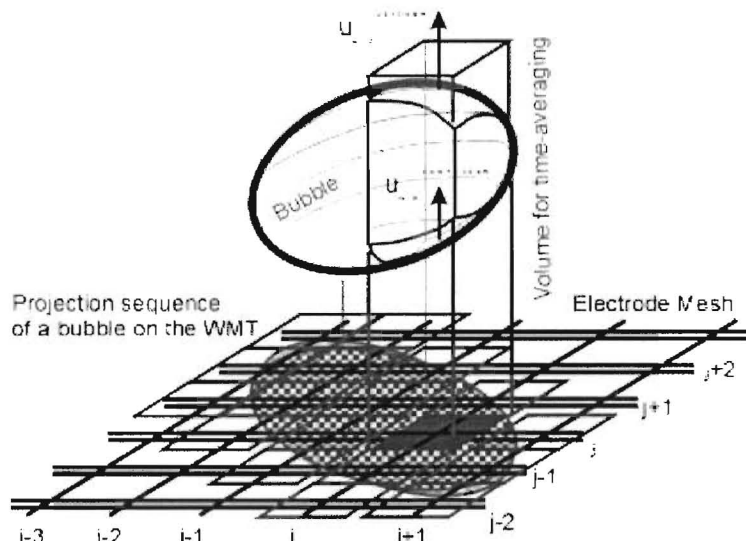


รูปที่ 2-9 Measured PDF และ re-distributed PDF ของความเร็วฟองก๊าซ

### 2.2.3 การคำนวณปริมาตรฟองก๊าซ (Bubble volume) และขนาดฟองก๊าซ (Bubble size)

การคำนวณหาปริมาตรฟองก๊าซ สามารถคำนวณได้จากการผลรวมของ local time-dependent void fraction  $\varepsilon(x_1, x_2, t)$  ที่มีความต่อเนื่องกันตามเวลาใด ๆ โดยพื้นที่ของฟองก๊าซบน WMS สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2-10 การคำนวณปริมาตรฟองก๊าซและขนาดฟองก๊าซสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนอย่างง่ายได้ 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย

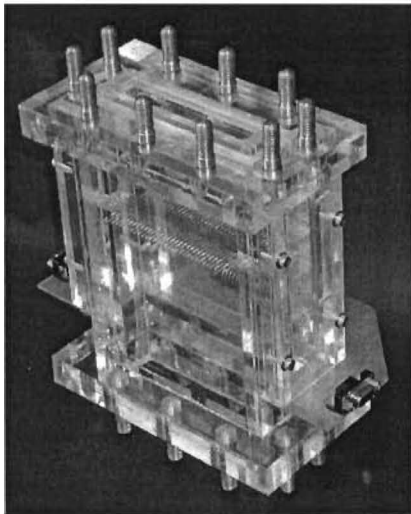
- (1) เริ่มจากเก็บข้อมูลของ time-dependent void fraction ที่ตำแหน่งและเวลาใด ๆ
- (2) คำนวณปริมาตรของฟองก๊าซ โดยอินทิเกรตปริมาตรของฟองก๊าซในส่วนที่ local time-dependent void fraction  $\varepsilon(x_1, x_2, t)$  มีความต่อเนื่องกัน ตามเวลาใด ๆ โดยวิธีการคำนวณนี้จะใช้ fill algorithm ที่เสนอโดย Prasser et al (2001) อย่างไรก็ตาม ปริมาตรของฟองก๊าซจะขึ้นอยู่กับการใช้ threshold ที่เหมาะสมในการแบ่งระหว่างฟองก๊าซและของเหลวด้วย
- (3) ขนาดฟองก๊าซจะคำนวณจากข้อมูลปริมาตรของฟองก๊าซที่ได้จากข้อ (2) โดยสมมติให้รูปทรงฟองก๊าซเป็นรูปทรงกลม



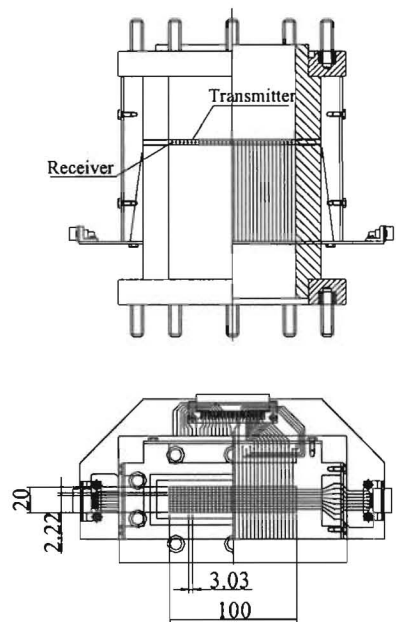
รูปที่ 2-10 Bubble projection บน WMS และการอินทิเกรตปริมาตรของฟองก๊าซ

## 2.3 ชุดทดลองและผลการทดลอง

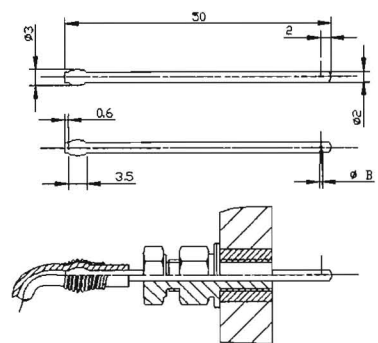
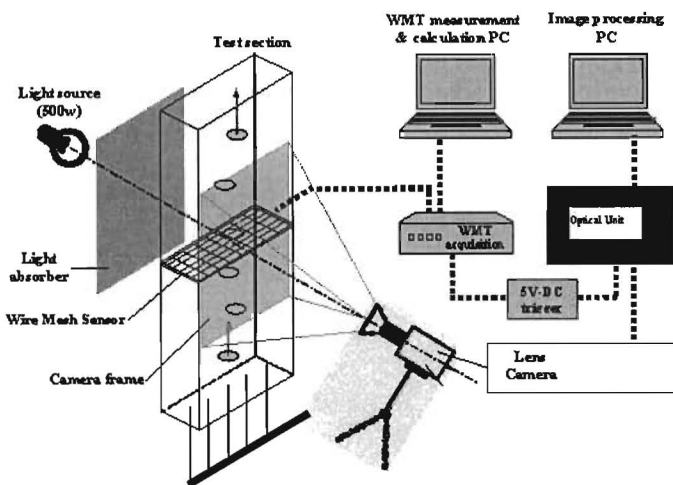
ในการทดลองนี้ ใช้ชุด WMS ที่มีโครงสร้างแบบใสซึ่งพัฒนาขึ้นมาเองดังแสดงในรูปที่ 2-11 และ รูปที่ 2-12 โดยได้รับความร่วมมือจากนักวิจัยของ Tokyo Institute of Technology ส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่วัดได้จาก WMT จะเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดโดยใช้การถ่ายภาพ โดยส่วนประกอบที่สำคัญของชุดทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-13 ซึ่งเป็นการวัดข้อมูลของฟองก๊าซโดยใช้คนละเทคนิคสำหรับการวัดการไหลที่เวลาเดียวกัน



รูปที่ 2-11 ชุด WMS ที่มีโครงสร้างแบบใส



รูปที่ 2-12 ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบ

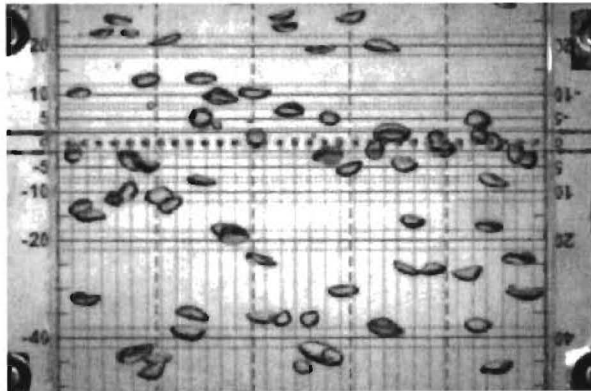


อุปกรณ์สร้างฟองก๊าซ

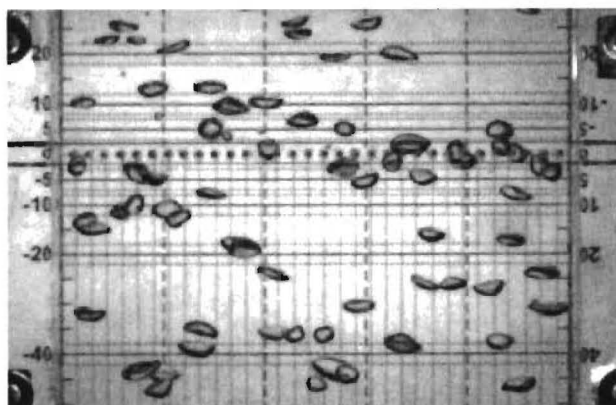
รูปที่ 2-13 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดฟองก๊าซในของไหลสองเฟส โดยใช้การถ่ายภาพและ WMT ในขณะเดียวกัน

การถ่ายภาพในการทดลองนี้ใช้กล้อง high-speed CCD camera (HSC) ที่มีความสามารถในการถ่ายภาพได้ที่ 1,000 เฟรมต่อวินาที (HSC-Fast Cam-Net 500/1000/Max) ร่วมกับเลนส์ NIKON 100 mm ในการทดลองนี้ การไหลของฟองก๊าซจะถูกบันทึกเป็นวิดีโอในเวลา 1 วินาที หลังจากนั้น ข้อมูลวิดีโอจะเปลี่ยนเป็นภาพถ่าย 1,000 ภาพ และใช้โปรแกรม Image Pro เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของฟองก๊าซที่ต้องการนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดจาก WMT โดยคุณสมบัติเหล่านั้นคือ void fraction, ขนาดฟองก๊าซ และความเร็วฟองก๊าซ

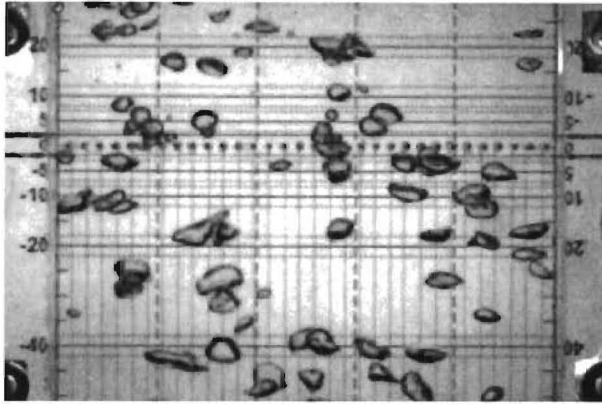
ชุดทดลองที่ใช้มีขนาดความกว้าง 100 ม.ม. และท่อที่ฟองก๊าซไหลผ่านมีความยาวประมาณ 80 ม.ม. สำหรับภาพถ่ายฟองก๊าซสำหรับความเร็วต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-14 ถึงรูปที่ 2-16 โดยมีสภาวะการไหล 3 สภาวะคือ รูปที่ 2-14 แสดงภาพถ่ายที่ความเร็วของอากาศ = 1.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s รูปที่ 2-15 แสดงภาพถ่ายที่ความเร็วของอากาศ = 2.5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s และรูปที่ 2-16 แสดงภาพถ่ายที่ความเร็วของอากาศ = 5.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s โดยค่าความเร็วของอากาศดังกล่าวเป็นการคำนวณมาจากอัตราการไหลของอากาศที่วัดด้วย rotameter ซึ่งมีความแม่นยำที่  $\pm 2.5\%$  ในส่วนของฟองก๊าซ จะสร้างมาจากการใช้ลมความดันสูงจากเครื่องอัดอากาศ ไหลผ่านเข็มฉีดยาที่ใช้เป็นอุปกรณ์ฉีดสร้างฟองก๊าซจำนวน 5 เข็มที่ติดตั้งอยู่ด้านล่างของชุดทดลอง ลักษณะของเข็มฉีดยาแสดงในรูปที่ 2-13



รูปที่ 2-14 กรณีความเร็วของอากาศ = 1.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s



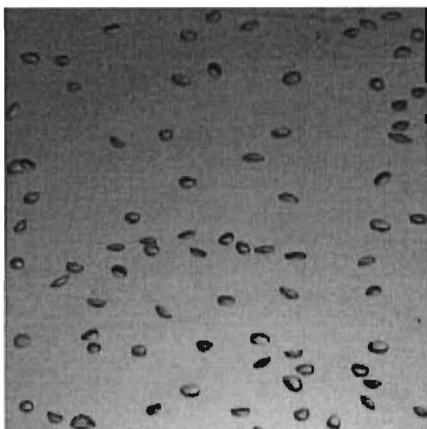
รูปที่ 2-15 กรณีความเร็วของอากาศ = 2.5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s



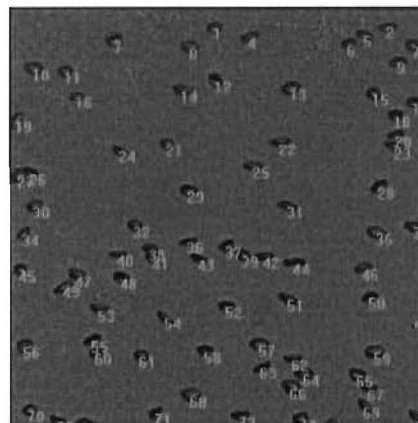
รูปที่ 2-16 กรณีความเร็วของอากาศ = 5.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s

หลังจากได้ภาพถ่ายฟองก๊าซดังกล่าวแล้ว นำฟองก๊าซแต่ละฟองมาคำนวณปริมาตรฟองก๊าซแต่ละฟองโดยสมมติว่าฟองก๊าซเป็นรูปรีกัณฑ์ ที่มีความยาวของแกนเท่ากับ  $L_B$  และ  $W_B$  โดยค่าทั้งสองจะหามาจากภาพถ่าย เมื่อได้ปริมาตรของฟองก๊าซของแต่ละฟองก๊าซ ก็จะสามารถหา void fraction เฉลี่ยของปริมาตรของไหลสองเฟสใด ๆ ได้ โดยปริมาตรก๊าซในของไหลสองเฟส คือผลรวมของปริมาตรฟองก๊าซทั้งหมดในภาพถ่าย ส่วนปริมาตรของของไหลสองเฟส คือ ปริมาตรของของเหลวและก๊าซในปริมาตรควบคุมที่สนใจ

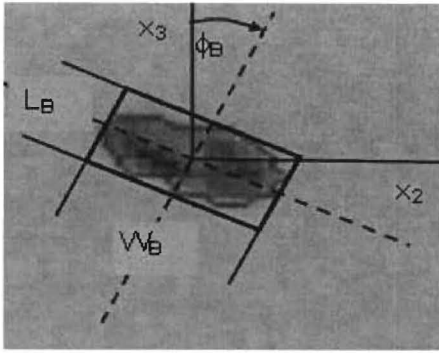
ส่วนการคำนวณความเร็วฟองก๊าซ ใช้วิธีการวัดระยะทางที่ฟองก๊าซเคลื่อนที่ในช่วงเวลาหนึ่งจากข้อมูลวิดีโอ (เวลาระหว่างสองเฟรม) ความเร็วฟองก๊าซเฉลี่ยจึงสามารถคำนวณได้จากระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซหารด้วยเวลาระหว่างเฟรม หลังจากนั้นจึงทำการเฉลี่ยความเร็วของหลายฟองก๊าซในสถานะการไหลเดียวกัน จนกระทั่งความแปรปรวนของความเร็วเฉลี่ยน้อยกว่า 1% รูปที่ 2-17 ถึงรูปที่ 2-20 แสดงการคำนวณปริมาตรและความเร็วของฟองก๊าซ



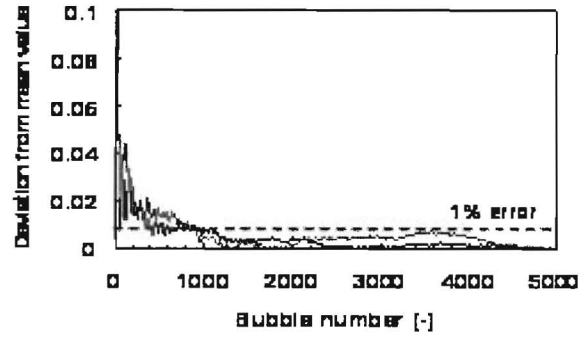
รูปที่ 2-17 ตัวอย่างรูปถ่ายฟองก๊าซ



รูปที่ 2-18 ตัวอย่างรูปที่ได้กำหนดตำแหน่งฟองก๊าซแล้ว



รูปที่ 2-19 ตัวอย่างการหาขนาดของฟองก๊าซ โดยการหาความยาวของแกนหลักทั้งสอง

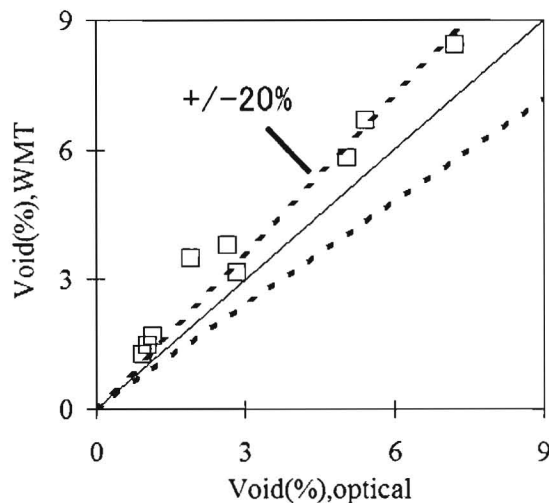


รูปที่ 2-20 แสดงการเฉลี่ยข้อมูลของฟองก๊าซ หลายฟอง เพื่อให้ค่าเฉลี่ยมีความแปรปรวนต่ำกว่าค่าที่กำหนด

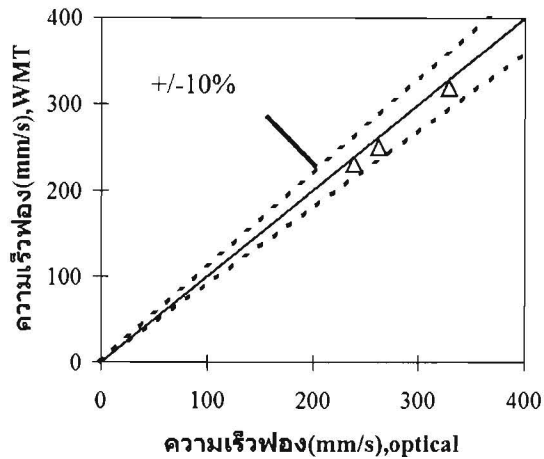
หลังจากนั้นได้คำนวณ void fraction เฉลี่ย, ความเร็วฟองก๊าซ, ขนาดฟองก๊าซในทั้งปริมาตรที่สนใจสำหรับแต่ละวิธีการวัดทั้งวิธี WMT และวิธีการถ่ายภาพเรียบร้อยแล้ว จึงนำค่าเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกันระหว่างผลการวัดด้วยวิธีการทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2-21 ถึงรูปที่ 2-23

รูปที่ 2-21 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูล void fraction เฉลี่ยเฉพาะในช่วง void fraction ไม่เกิน 9% (การทดลองนี้สนใจเฉพาะการไหลที่ void fraction เฉลี่ยไม่สูงนัก) จากกราฟจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างวิธีการทั้งสองอยู่ในช่วงระหว่าง ±20%

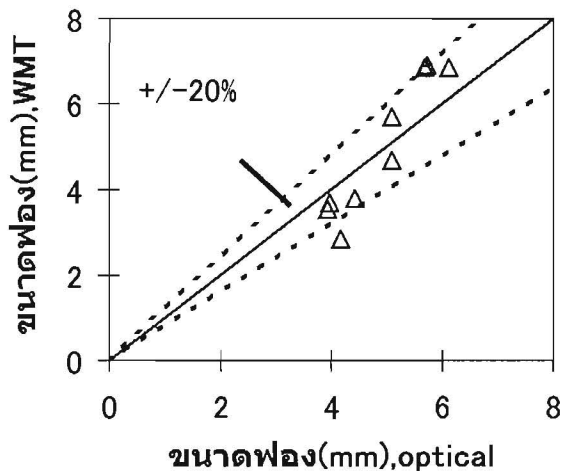
รูปที่ 2-22 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลความเร็วฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งหมดในปริมาตรที่สนใจ ในช่วงความเร็วฟองก๊าซระหว่าง 250-350 mm/s จากกราฟจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง ±10% ส่วนรูปที่ 2-23 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลขนาดฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งหมดในปริมาตรที่สนใจ ในช่วงขนาดฟองก๊าซระหว่าง 2-8 mm จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง ±20%



รูปที่ 2-21 เปรียบเทียบข้อมูลของ void fraction เฉลี่ยระหว่าง WMT และการถ่ายภาพ



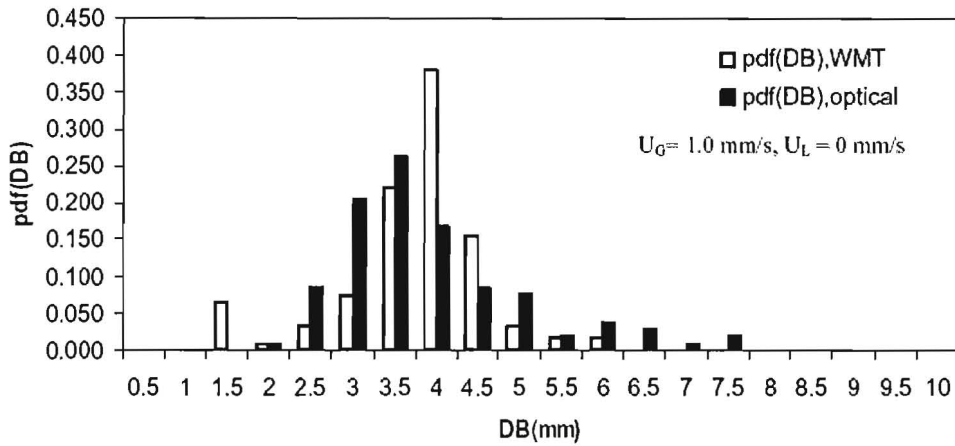
รูปที่ 2-22 การเปรียบเทียบข้อมูลของความเร็วฟองก๊าซระหว่าง WMT และการถ่ายภาพ



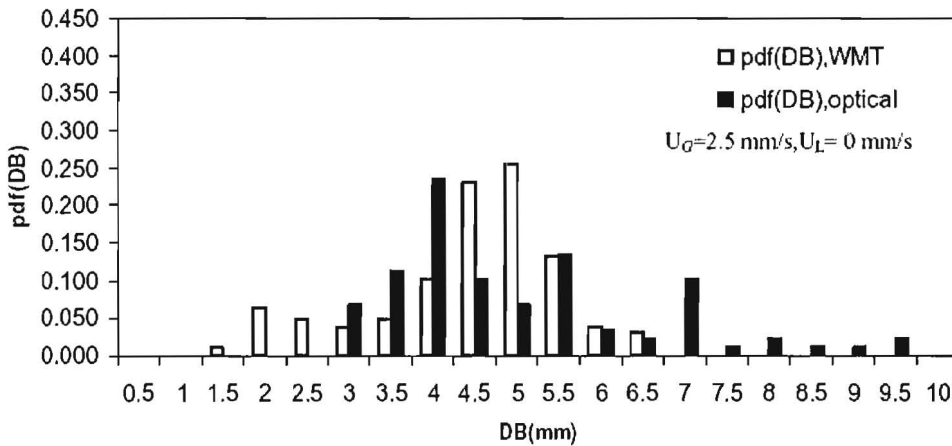
รูปที่ 2-23 การเปรียบเทียบข้อมูลของขนาดฟองก๊าซระหว่าง WMT และการถ่ายภาพ

นอกจากข้อมูลค่าเฉลี่ยของ void fraction ความเร็วฟองก๊าซและขนาดฟองก๊าซแล้ว ยังได้เปรียบเทียบการกระจายตัวของขนาดฟองก๊าซระหว่างข้อมูลของ WMT และการถ่ายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2-24 ถึงรูปที่ 2-26 ซึ่งจะเห็นว่า การกระจายตัวของก๊าซจะมีความแตกต่างกันพอสมควรในบางสภาวะการไหล เนื่องจากปัญหาของ threshold ที่ไม่รู้ว่าจะค่าใดจะเหมาะสมสำหรับการแบ่งระหว่างฟองก๊าซและของเหลว ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว threshold ที่เหมาะสม จะมีค่าแปรผันกับหลาย ๆ ปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น ขนาดของฟองก๊าซ, flow regime ของของไหลสองเฟส เป็นต้น ซึ่งปัญหานี้ก็ได้มีการเขียนไว้ในงานของ Prasser et al (2001)

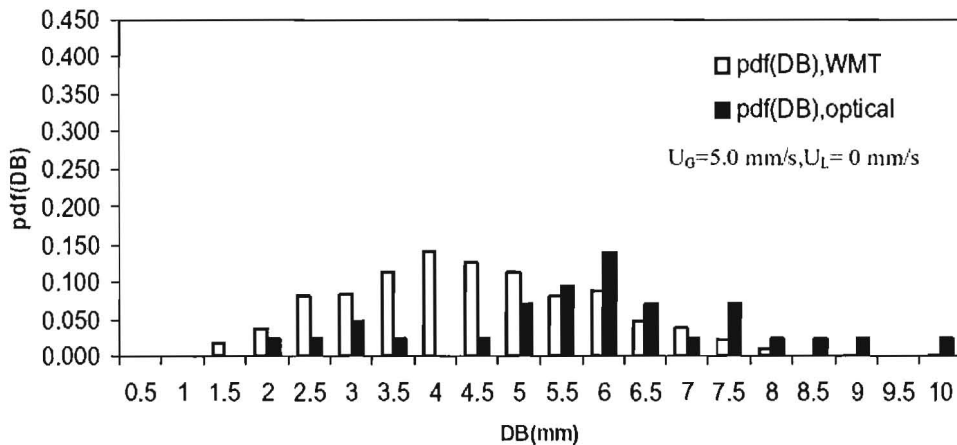
แต่อย่างไรก็ตาม ค่า threshold ที่เหมาะสมยังไม่สามารถหาได้ในขณะนี้ ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้ค่าคงที่ไปก่อน ซึ่งการกำหนดให้มีค่าดังกล่าวก็จะส่งผลทำให้ WMT อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดของการใช้ threshold ที่ไม่เหมาะสมในการหาข้อมูลขนาดฟองก๊าซ นอกจากนั้นยังมีการสมมติรูปร่างฟองก๊าซในการคำนวณระหว่างวิธีการวัดทั้งสองที่แตกต่างกัน (โดยวิธีการวัดแบบ WMT สมมติรูปร่างฟองก๊าซเป็นทรงกลม แต่วิธีการวัดแบบการถ่ายภาพสมมติรูปร่างฟองก๊าซเป็นทรงลูกรี) ก็อาจทำให้เกิดความแตกต่างของข้อมูล void fraction ขนาดฟองก๊าซ และการกระจายตัวของฟองก๊าซที่ได้จากวิธีการวัดทั้งสองได้ด้วย



รูปที่ 2-24 การกระจายตัวของฟองก๊าซ ของสภาวะการไหลที่ ความเร็วของอากาศ = 1.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s



รูปที่ 2-25 การกระจายตัวของฟองก๊าซ ของสภาวะการไหลที่ ความเร็วของอากาศ = 2.5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s

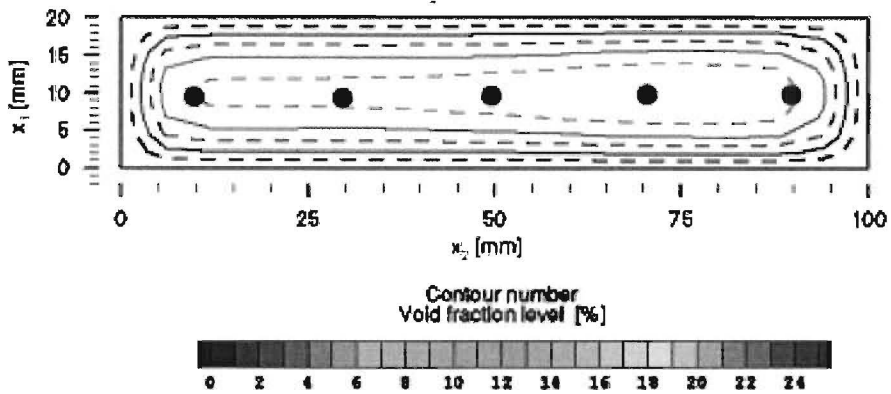


เมื่อ  $U_G$  คือ ความเร็วของก๊าซ และ  $U_L$  คือ ความเร็วของของไหล

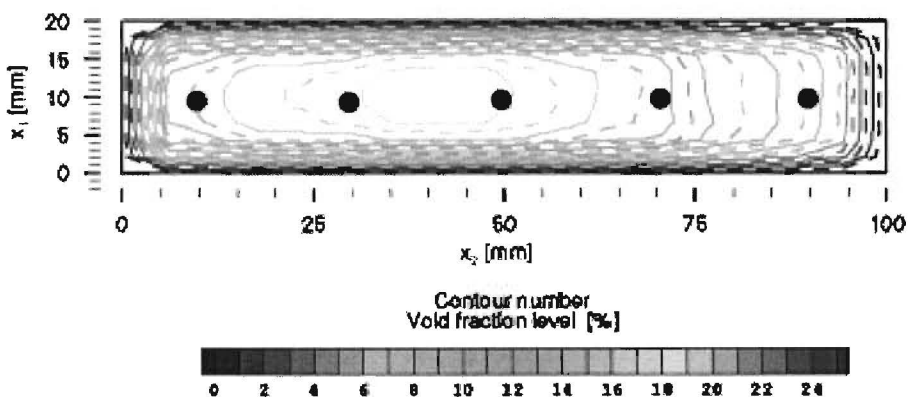
รูปที่ 2-26 การกระจายตัวของฟองก๊าซของสภาวะการไหลที่ ความเร็วของอากาศ = 5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s



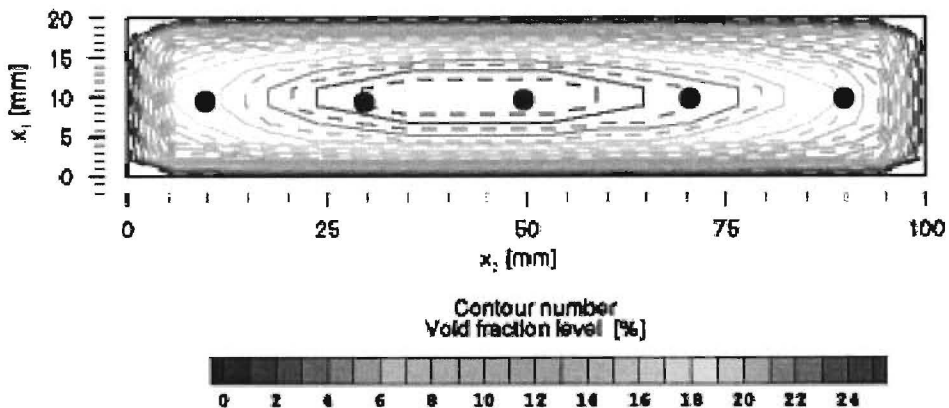
อย่างไรก็ตาม วิธีการ WMT ก็ยังได้เปรียบวิธีการวัดแบบอื่น ๆ คือสามารถวัดข้อมูลอัตราส่วนปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรของไหลสองเฟสเฉพาะที่ (local void fraction) ได้โดยตรง โดยข้อมูล local void fraction เฉลี่ยของสภาวะการไหลทั้ง 3 การทดลอง ได้แสดงในรูปที่ 2-27 ถึงรูปที่ 2-29 (จุดดำในรูปแสดงตำแหน่งของเข็มฉีดยาที่เป็นจุดกำเนิดฟองก๊าซ และกรอบสี่เหลี่ยมแสดงท่อสี่เหลี่ยมที่ของไหลสองเฟสไหลอยู่)



รูปที่ 2-27 Local void fraction ของสภาวะการไหลที่  
ความเร็วของอากาศ = 1.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s



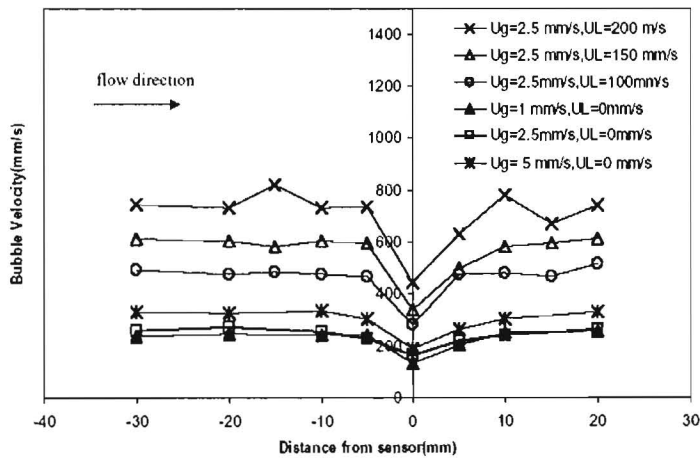
รูปที่ 2-28 Local void fraction ของสภาวะการไหลที่  
ความเร็วของอากาศ = 2.5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s



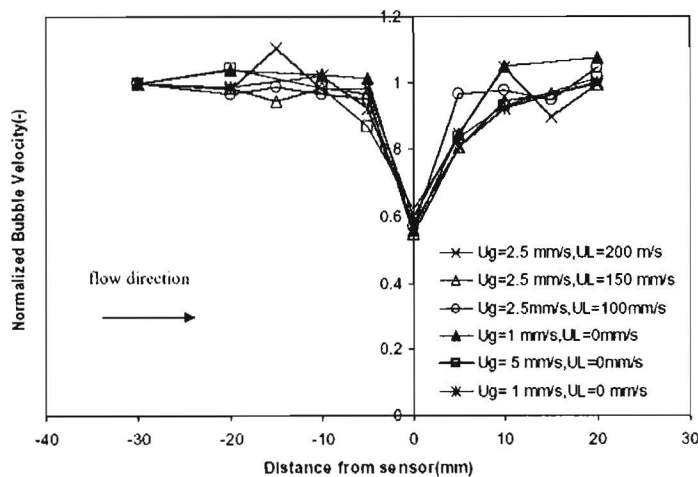
รูปที่ 2-29 Local void fraction ของสภาวะการไหลที่  
ความเร็วของอากาศ = 5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s

จากรูปที่ 2-27 ถึงรูปที่ 2-29 แสดงร้อยละของ local void fraction ที่ตำแหน่งต่างๆในท่อสี่เหลี่ยม โดยแสดงในลักษณะ contour ซึ่งสเกลได้แสดงไว้ด้านล่างของแต่ละรูป จากรูปข้างต้นแสดงให้เห็นว่า local void fraction ที่ตรงกลางท่อสี่เหลี่ยมมีค่าสูงกว่าบริเวณขอบของท่อสี่เหลี่ยม โดยปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นทุกสภาวะการไหล และจะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในสภาวะการไหลที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ 5 mm/s และความเร็วของน้ำเท่ากับ 0 mm/s

อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก WMS เป็นเครื่องมือที่ต้องใส่ขวางเข้าไปในการไหลสองเฟส ตัวเครื่องมือวัดเองจึงมีผลกระทบกับฟองก๊าซได้ โดยผลกระทบที่เห็นเด่นชัดคือทำให้ความเร็วของฟองก๊าซลดลงเมื่อไหลผ่าน WMS โดยหลังจากนั้นฟองก๊าซก็จะกลับไปไหลที่ความเร็วเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2-30 และรูปที่ 2-31 โดยเฉพาะในรูปที่ 2-31 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของความเร็วฟองก๊าซมีค่าไม่แปรผันกับสภาวะการไหล โดยทุกสภาวะการไหลมีสัดส่วนการลดลงของความเร็วฟองก๊าซเท่ากัน ซึ่งค่า normalized bubble velocity เป็นค่าของสัดส่วนความเร็วของฟองก๊าซที่ตำแหน่งใด ๆ ต่อความเร็วฟองก๊าซเริ่มต้น



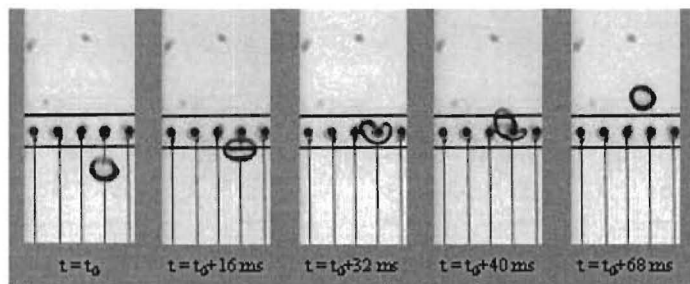
หมายเหตุ  $U_g$  คือ ความเร็วของก๊าซ และ  $U_L$  คือ ความเร็วของของไหล  
รูปที่ 2-30 ความเร็วของฟองก๊าซเมื่อไหลผ่านเส้นลวดเซนเซอร์



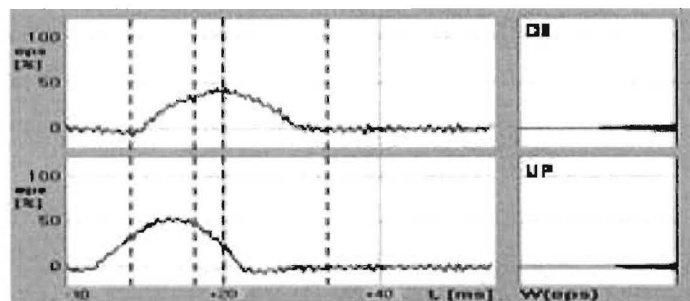
หมายเหตุ เมื่อ  $U_g$  คือ ความเร็วของก๊าซ และ  $U_L$  คือ ความเร็วของของไหล

รูปที่ 2-31 ค่า Normalized bubble velocity เมื่อไหลผ่านเส้นลวดเซนเซอร์

รูปที่ 2-32 แสดงภาพถ่ายในขณะที่ฟองก๊าซไหลผ่านเซนเซอร์และทำให้เกิดการลดลงของความเร็วฟองก๊าซดังนี้ จากรูปที่เวลา  $t_0$  และ  $t_0+16$  ms แสดงฟองก๊าซที่กำลังไหลไปยังเส้นลวดเซนเซอร์ สำหรับรูปที่เวลา  $t_0+32$  ms เป็นเวลาที่ฟองก๊าซกำลังไหลผ่าน up stream plane และถูกขวางโดยเซนเซอร์ทำให้ความเร็วของฟองก๊าซลดลง สำหรับเวลา  $t_0+40$  ms และเวลา  $t_0+68$  ms แสดงช่วงเวลาฟองก๊าซไหลผ่านเซนเซอร์แล้วและความเร็วของฟองก๊าซค่อย ๆ เพิ่มกลับมาเท่าเดิม แต่อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 2-33 ซึ่งแสดงคาร์ยอลของ void fraction ตามแกนเวลา เราพบว่าสัญญาณที่ได้จาก upstream plane (ภาพล่าง) และ downstream plane (ภาพบน) มีลักษณะที่ค่อนข้างเหมือนกันโดยมีลักษณะของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่าการลดลงของความเร็วฟองก๊าซไม่ส่งผลต่อสัญญาณที่ WMT วัดได้มากนัก

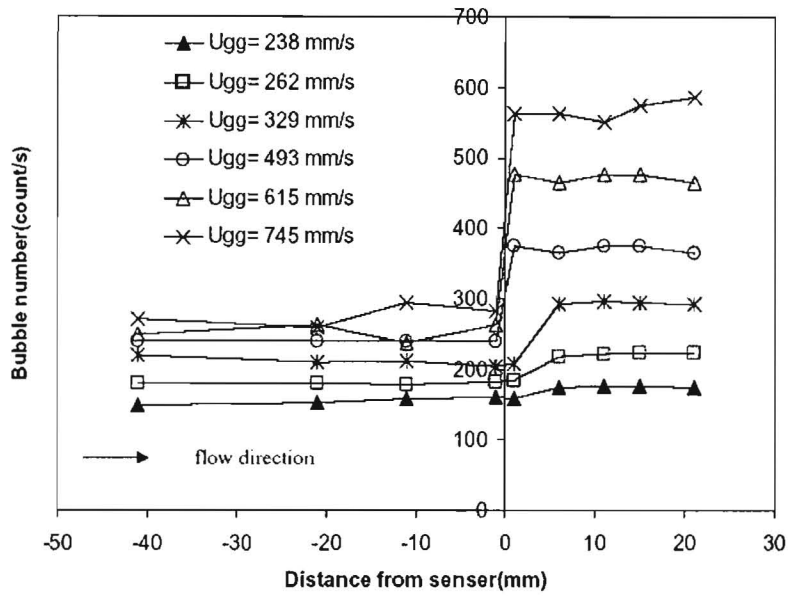


รูปที่ 2-32 ลักษณะของฟองก๊าซเมื่อไหลผ่านเส้นลวดเซนเซอร์

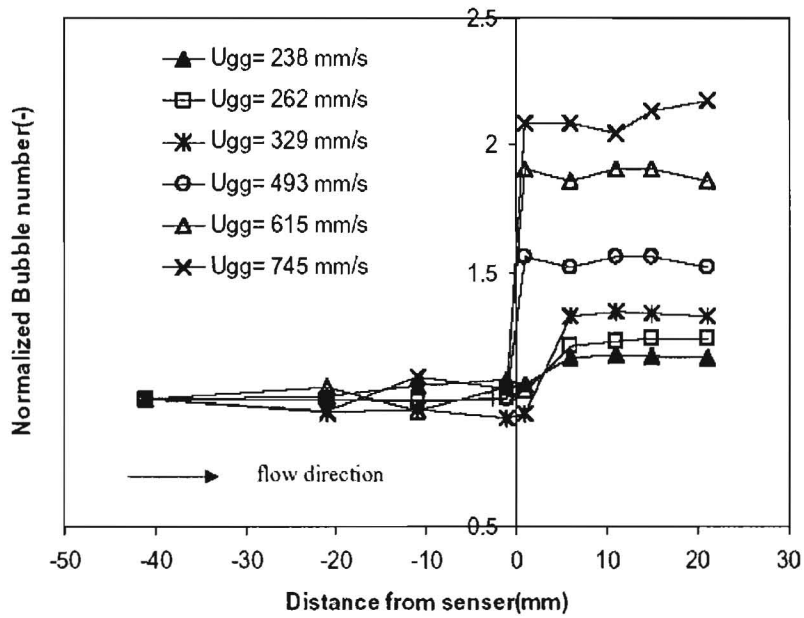


รูปที่ 2-33 สัญญาณที่ได้จาก upstream plane และ down stream plane ของ WMS ในกรณีที่มีการลดลงของความเร็วฟองก๊าซ

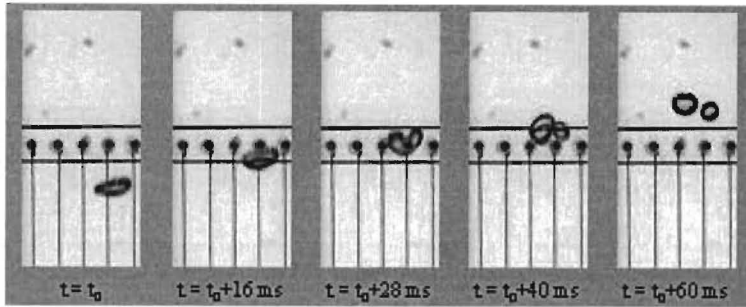
อีกผลกระทบหนึ่งของ WMS ต่อฟองก๊าซ คือ เซนเซอร์ของอุปกรณ์วัดจะทำให้ฟองก๊าซแตกได้เมื่อฟองก๊าซไหลผ่าน WMS ดังแสดงในรูปที่ 2-34 จะเห็นว่าจำนวนฟองก๊าซเพิ่มมากขึ้น โดยจำนวนฟองก๊าซหาจากการนับจำนวนฟองก๊าซที่ผ่านจุดนั้นในช่วงเวลาที่กำหนด หลังจากผ่าน WMS แสดงว่าเกิดการแตกของฟองก๊าซขึ้นอย่างแน่นอน และเมื่อพิจารณารูปที่ 2-35 ซึ่งค่า normalized bubble number เป็นค่าของสัดส่วนจำนวนของฟองก๊าซที่ตำแหน่งใด ๆ ต่อจำนวนของฟองก๊าซเริ่มต้น พบว่าการแตกของฟองก๊าซแปรผันกับความเร็วของฟองก๊าซโดยยิ่งฟองก๊าซมีความเร็วสูงก็จะทำให้โอกาสที่ฟองก๊าซแตกเพิ่มมากขึ้น โดยภาพถ่ายแสดงลักษณะการแตกของฟองก๊าซในลำดับภาพที่ถูกถ่ายต่อเนื่องกันเมื่อไหลผ่านลวดเซนเซอร์ได้ถูกแสดงในรูปที่ 2-36 และเมื่อพิจารณาสัญญาณจาก WMT พบว่าสัญญาณที่ได้จาก upstream plane และ downstream plane มีลักษณะที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2-37 ซึ่งแสดงว่าการแตกของฟองก๊าซไม่ส่งผลต่อสัญญาณที่ WMT วัดได้ในช่วงของคุณสมบัติการไหลในการทดลองนี้



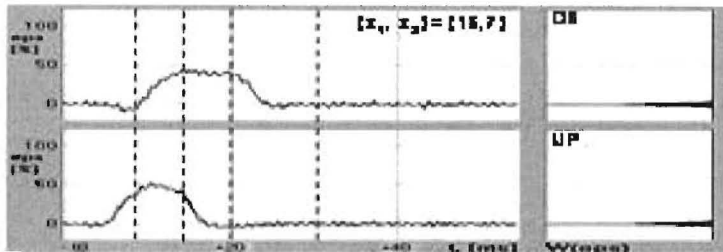
รูปที่ 2-34 จำนวนฟองก๊าซ (Bubble number) ที่เพิ่มขึ้นสำหรับความเร็วของฟองก๊าซต่างๆ



รูปที่ 2-35 ค่า Normalized bubble number เมื่อไหลผ่านเส้นลวด



รูปที่ 2-36 ลักษณะการแตกของฟองก๊าซ



รูปที่ 2-37 สัญญาณที่ได้จาก upstream plane และ downstream plane ของ WMS ในกรณีของฟองก๊าซแตก

จากการพิจารณาผลกระทบของ WMS ต่อฟองก๊าซพบว่า WMS มีผลกระทบกับฟองก๊าซโดยทำให้ฟองก๊าซไหลด้วยความเร็วลดลงและอาจจะแตกได้ โดยการลดลงของความเร็วฟองก๊าซจะไม่แปรผันกับสถานะการไหลแต่การแตกของฟองก๊าซจะแปรผันตามความเร็วของฟองก๊าซ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสัญญาณที่ WMT พบว่าสัญญาณที่บันทึกได้จาก upstream plane และ downstream plane มีลักษณะเหมือนกันทั้งสองกรณี จึงสามารถสรุปได้ว่าการแตกและความเร็วลดลงของฟองก๊าซไม่มีผลต่อสัญญาณที่บันทึกได้

## 2.4 สรุปผลการวิจัย

Wire Mesh Tomography (WMT) เป็นเทคนิคการวัดที่พัฒนาโดยใช้หลักการวัดแบบเดียวกับเทคนิคการวัดแบบ needle probes เพื่อลดข้อด้อยที่ needle probes ไม่สามารถวัดพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟสที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลาทั้งพื้นที่หน้าตัดในเวลาเดียวกันได้ อุปกรณ์การวัด WMT นี้ประกอบด้วย 2 ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ WMS (Wire Mesh Sensor) และ Data acquisition

เซนเซอร์ WMS มีขนาดหน้าตัด  $20 \times 100 \text{ mm}^2$  ประกอบด้วยตาข่ายลวด 3 ชั้น โดยชั้นของตาข่ายลวดตรงกลางจะทำหน้าที่เป็น transmitter plane ซึ่งประกอบด้วยเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มม. จำนวน 8 เส้นขนานกัน ชั้นของตาข่ายลวดบนและชั้นของตาข่ายลวดล่างทำหน้าที่เป็น receiver plane ซึ่งประกอบด้วยเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มม. จำนวน 32 เส้นขนานกัน โดยเส้นลวดของตาข่ายลวดทั้ง 3 ชั้นจะวางตั้งฉากกัน โดยมีระยะห่าง 1.5 mm ตามทิศทางของการไหล ลักษณะ 3 ชั้นของตาข่ายลวดทำให้เกิดชั้น measuring volume 2 ชั้น ประกอบด้วย upstream measuring plane ซึ่งวัดก่อนกึ่งกลาง WMS และ downstream measuring plane ซึ่งวัดหลังกึ่งกลาง

WMS และมี spatial resolution ของ WMS มีค่า  $2.22 \times 3.03 \times 1.5 \text{ mm}^3$  หรือประมาณฟองก๊าซที่เป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.68 mm

ในงานวิจัยนี้ เราได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ที่สำคัญจากข้อมูลที่บันทึกได้จาก WMT เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพ โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญประกอบด้วย 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  $\pm 20\%$

นอกจากนั้น การกระจายตัวของขนาดฟองก๊าซระหว่างวิธีการทั้งสองก็ถูกนำมาเปรียบเทียบกันอีกด้วย ซึ่งการกระจายตัวของขนาดฟองก๊าซจะมีความแตกต่างกันพอสมควรในบางสภาวะการไหล

ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล void fraction ขนาดฟองก๊าซ และการกระจายตัวของฟองก๊าซที่ได้จากวิธีการวัดมีสาเหตุหนึ่งมาจากปัญหาของค่า threshold ที่เหมาะสมในการแบ่งระหว่างฟองก๊าซและของเหลว และการสมมติรูปร่างฟองก๊าซในการคำนวณที่ต่างกับการไหลจริง จึงทำให้เกิดความแตกต่างของข้อมูลฟองก๊าซส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ที่กล่าวข้างต้น

นอกจากนั้น WMS ยังเป็นเครื่องมือที่ใส่ขวางเข้าไปในการไหลสองเฟส จึงมีผลกระทบกับฟองก๊าซอย่างแน่นอน โดยผลกระทบที่เห็นเด่นชัด คือ การลดลงของความเร็วของฟองก๊าซ และการแตกของฟองก๊าซหลังจากผ่าน WMS อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสัญญาณที่ WMT พบว่าการแตกของฟองก๊าซและการลดลงของความเร็วฟองก๊าซนั้นไม่มีผลกับสัญญาณที่บันทึกได้มากนักในช่วงคุณสมบัติของการไหลที่พิจารณาอยู่

## บทที่ 3

### เลเซอร์ไดโอด

การศึกษาในส่วนนี้จะประกอบด้วยการสร้างชุดเครื่องมือวัดเลเซอร์และวงจรไดโอด และชุดทดลองในส่วนของการสร้างการไหลของอากาศและแบบจำลองของอากาศสำหรับการทดสอบเทียบ เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณที่ออกมาจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดและขนาดของรัศมี ความโค้งที่ปลายยอดของอากาศ ซึ่งเนื้อหาจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ การหาความสัมพันธ์ ด้วยการทดลองใช้อุปกรณ์วัดกับแบบจำลองของอากาศ การหาความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และในส่วนสุดท้ายเป็นการทดลองนำอุปกรณ์วัดไปใช้ทดลองจริง

หลักการของเครื่องมือวัดเลเซอร์ไดโอดคือ วงจรไดโอดจะยอมให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เมื่อมีแสงเลเซอร์ตกกระทบบนเซนเซอร์ของไดโอด และกระแสไฟฟ้านั้นเมื่อไหลผ่านตัวต้านทานในวงจรจะทำให้มีความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทานขึ้น สำหรับการใช้งานทั่วไปจะยิงแสงเลเซอร์ทะลุชุดทดลองที่มีผนังโปร่งใส ในฝั่งตรงกันข้ามของชุดทดลองจะมีไดโอดตั้งรับแสงเลเซอร์ไว้ เมื่อมีฟองก๊าซไหลมาขวางการไหลลำแสงเลเซอร์จะเบี่ยงเบนทิศทางไปและทำให้กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถตรวจสอบว่ามีฟองก๊าซไหลมาตำแหน่งที่ติดตั้งเลเซอร์ไดโอดไว้ได้ซึ่งเป็นหลักการของงานวิจัยใน Kikutani et al. (2008) และ Ong and Thome (2009) ในการศึกษาี้ มีความสนใจว่าการลดลงของความเข้มแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ ไดโอดซึ่งเป็นฟังก์ชันของการหักเหของแสงจะมีความสัมพันธ์อย่างไรกับรัศมีความโค้งของฟอง ก๊าซ

#### 3.1 ความรู้พื้นฐาน

ในการทำงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานหลายด้าน เช่น ปรากฏการณ์ของแสงที่เกี่ยวข้อง การหักเหของแสงในกรณีที่แสงเคลื่อนผ่านตัวกลางที่ดัชนีหักเหต่างกัน การสะท้อนและการดูดกลืนของแสงขณะผ่านตัวกลาง และในส่วนสุดท้ายก็จะกล่าวถึงคุณสมบัติของโฟโตนิกไดโอด ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ใช้ว่ามีคุณสมบัติอย่างไรบ้างและมีพารามิเตอร์ใดที่ควรพิจารณาก่อนเลือกโฟโตนิกไดโอดให้เหมาะสมกับการทดลอง โดยรายละเอียดต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 ปรากฏการณ์ของแสงขณะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

การเคลื่อนที่ของแสงผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกันจะมีปรากฏการณ์ทางแสงหลายอย่างเกิดขึ้น ซึ่งตัวอย่างดังต่อไปนี้เป็นส่วนหนึ่งของปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นได้

- การสะท้อน (reflection) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งอาจจะเกิดขึ้นทั้งหมดหรือบางส่วนขึ้นอยู่กับลักษณะตัวกลางที่แสงเคลื่อนที่ผ่าน การสะท้อนแบ่งออกเป็นสองประเภทตามการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง คือ Specular reflection เป็นการสะท้อนที่สามารถคำนวณหาทิศทางของการสะท้อนได้อย่างแน่นอน เช่น การสะท้อนของรังสีของแสงบน

กระจก สำหรับอีกประเภทหนึ่งคือ Diffusion reflection เป็นการสะท้อนที่ไม่สามารถคำนวณทิศทาง การสะท้อนได้ไม่แน่นอน เช่น การสะท้อนของรังสีของแสงบนตัวกลางขรุขระ

- การหักเห (refraction) ถูกนิยามเป็นการเบี่ยงเบนไปของรังสีของแสงไปจากทิศทางเดิม หลังจากเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน ซึ่งมุมที่ลำแสงเบี่ยงเบนไปขึ้นกับค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงเคลื่อนที่ผ่าน และค่าดัชนีหักเหเป็นฟังก์ชันทั้งความยาวคลื่นแสง และอุณหภูมิ

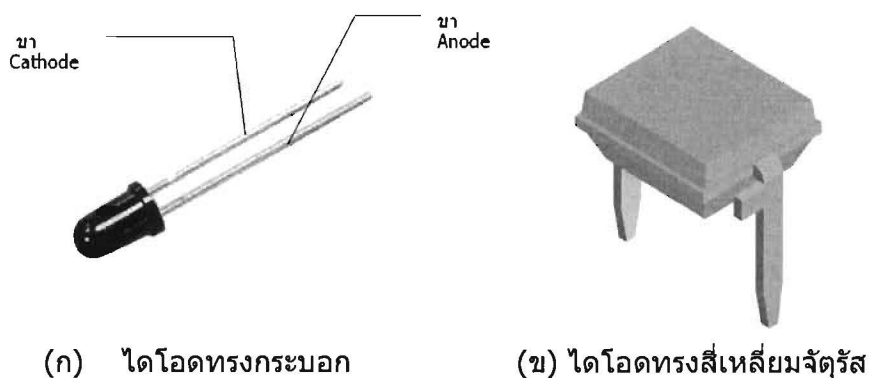
- การดูดกลืนของแสง (absorption) เป็นปรากฏการณ์ของแสงสังเกตได้จากสีของวัตถุที่ แสงตกกระทบ เช่น การที่ใบไม้เป็นสีเขียวนั้นก็เพราะว่าวัตถุดูดกลืนแสงสีแดงไป หรือการที่เห็น วัตถุเป็นสีดำ คือ วัตถุดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ไปหมด ซึ่งการดูดกลืนจะเกี่ยวข้องกับการ ดูดกลืนพลังงานของแสงหลังจากที่แสงเคลื่อนผ่านตัวกลางด้วย

ในโครงการนี้เมื่อทำการฉายเลเซอร์ผ่านแบบจำลองก็จะพบกับปรากฏการณ์ของแสง ตามที่กล่าวมาข้างต้น เช่น การสะท้อนแบบ diffusion ออกจากแบบจำลอง, การหักเหของลำ เลเซอร์เมื่อฉายผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหไม่เท่ากันซึ่งในที่นี้คือส่วนที่เป็นอากาศและส่วนที่เป็น ของเหลว รวมถึงการดูดกลืนของแสงเลเซอร์หลังจากฉายผ่านแบบจำลองแล้ว โดยพบว่าความ เข้มของเลเซอร์ที่ตกกระทบไดโอดจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการฉายเลเซอร์ไปที่ไดโอด โดยตรงโดยไม่ผ่านแบบจำลอง

### 3.1.2 โฟโอดีโอด

โฟโอดีโอดคืออุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ ถ้าถูกกระตุ้นด้วยแสงก็จะ ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของโฟโอดีโอดประกอบด้วยสาร กึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N ต่อชนกัน เช่นเดียวกับไดโอดธรรมดา อาจจะผลิตขึ้นได้จากสารกึ่ง ตัวนำหลายชนิด เช่น ซิลิคอน (Si) เจอร์เมเนียม (Ge) หรือ เซเลเนียม (Se) เป็นต้น สารกึ่งตัวนำ ดังกล่าวอาจจะถูกบรรจุในกระเปาะโลหะหรือพลาสติกที่บดแสง มีส่วนบนหรือส่วนด้านหน้าเป็นเลนส์ นูนรวมแสง มีจุดโฟกัสของแสงตกกระทบที่รอยต่อ PN มีขาต่อออกมาใช้งาน 2 ขา คือ ขาแอนโนด และขาแคโทดดังรูปที่ 3-1 ก และ ข หรืออาจมีลักษณะอย่างอื่นตามการออกแบบเพื่อให้มีความ เหมาะสมในการนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ และหากแบ่งตามโครงสร้างภายในและการนำไปใช้งานจะ แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ PN โฟโอดีโอด, PIN โฟโอดีโอด, Schottky type โฟโอดีโอด, APD avalanche โฟโอดีโอด โดยทั่วไปโฟโอดีโอดทั้ง 4 ชนิดจะถูกนำไปใช้เพื่อตรวจจับ ตำแหน่ง สี การตรวจจับวัตถุ หรือ ความเข้มของแสง





รูปที่ 3-1 โฟโตไดโอดที่เลือกมาใช้ในการทดลอง

การทำงานของโฟโตไดโอดเริ่มต้นเมื่อมีแสงตกกระทบบนที่โฟโตไดโอด โดยแสงที่ตกกระทบบนจะมีพลังงานโฟตอนไปกระตุ้นบริเวณ depletion region ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไปที่แคโทด ส่วนโฮลจะวิ่งไปที่แอโนดเกิดเป็นกระแสไบแอสย้อน โดยกระแสไบแอสย้อนจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสง โดยสังเกตได้ว่าหากเพิ่มค่าความเข้มของแสงขึ้นแล้วกระแสไบแอสย้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (Rozzoni, 1993) รูปที่ 3-2 แสดงหลักการทำงานของโฟโตไดโอด สำหรับการเลือกโฟโตไดโอดเพื่อที่จะใช้งานต่าง ๆ ให้เหมาะสม จะต้องพิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

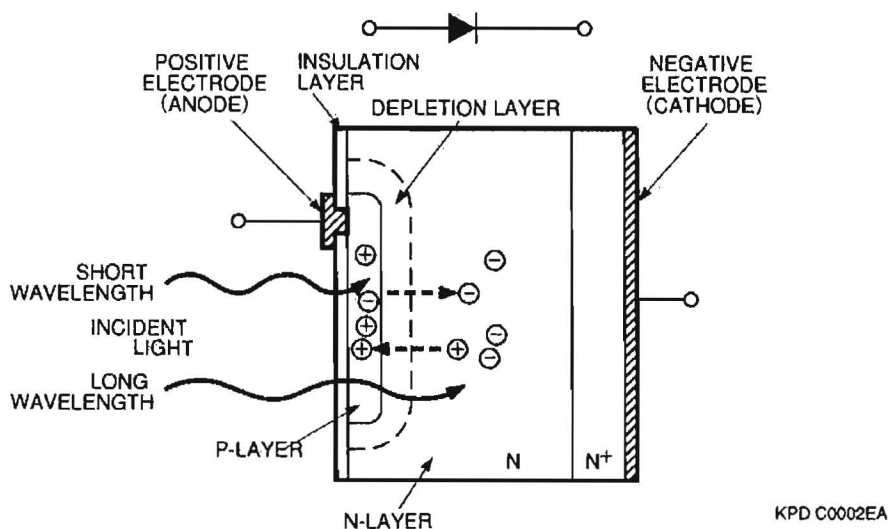
- Photo sensitivity (S) คืออัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหลังจากถูกกระตุ้นต่อพลังงานแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอด มีหน่วยเป็น A/W ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า relative sensitivity กับความยาวคลื่นแสง โดย relative sensitivity คือการนำค่า sensitivity ที่ความยาวคลื่นใดๆ ไปเทียบกับค่า sensitivity ณ ความยาวคลื่นที่ให้ค่า sensitivity สูงสุด

- Dark current ( $I_D$ ) คือกระแสไฟฟ้าที่มีค่าน้อยมาก เกิดขึ้นเมื่อมีการทำการไบแอสย้อนในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบบน ซึ่งกระแสดังกล่าวเป็นสัญญาณรบกวนขณะทำการไบแอสย้อน

- Noise equivalent power (NEP) คือ พลังงานของแสงน้อยที่สุดที่โฟโตไดโอดสามารถตรวจจับได้ การทราบค่าดังกล่าวทำให้สามารถเลือกโฟโตไดโอดให้เหมาะสมกับพลังงานที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้งานได้ ซึ่งสามารถคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกระแสไฟฟ้ารบกวน (noise current) ที่ bandwidth เท่ากับ 1 Hz กับค่า photo sensitivity ณ ความยาวคลื่นที่ให้ค่า sensitivity สูงสุด ดังแสดงในสมการที่ 3-1

$$NEP [W/Hz^{1/2}] = \text{Noise current} [A/Hz^{1/2}] / \text{Photo sensitivity at } \lambda_p [A/W] \quad (3-1)$$

- Reverse voltage ( $V_R$ ) คือ ค่าความต่างศักย์ที่มากที่สุดที่สามารถทำการไบแอสย้อนให้แก่โฟโตไดโอดได้ก่อนที่จะไหม้



รูปที่ 3-2 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเหมาะสม มาตกกระทบ จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้น

### 3.1.3 เลเซอร์

เลเซอร์เป็นแสงที่แตกต่างจากแสงอื่น ๆ คือ เป็นแสงสีเดียว (Monochromaticity) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญประการหนึ่งของเลเซอร์ ซึ่งหมายถึงแสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว หากพิจารณาแสงที่ปล่อยจากต้นกำเนิดแสงที่พบโดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้า และดวงอาทิตย์ แสงจากหลอดไฟฟ้าและดวงอาทิตย์จะเป็นแสงสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวนี้ผ่านปริซึมจะเห็นแถบสีต่าง ๆ เรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดง เรียกว่าแถบสเปกตรัมของแสง ในกรณีของแสงเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน เมื่อให้แสงสีแดงของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนผ่านปริซึม จะไม่มีการแยกเป็นหลายเส้น แต่ยังคงมีเพียง 1 เส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร

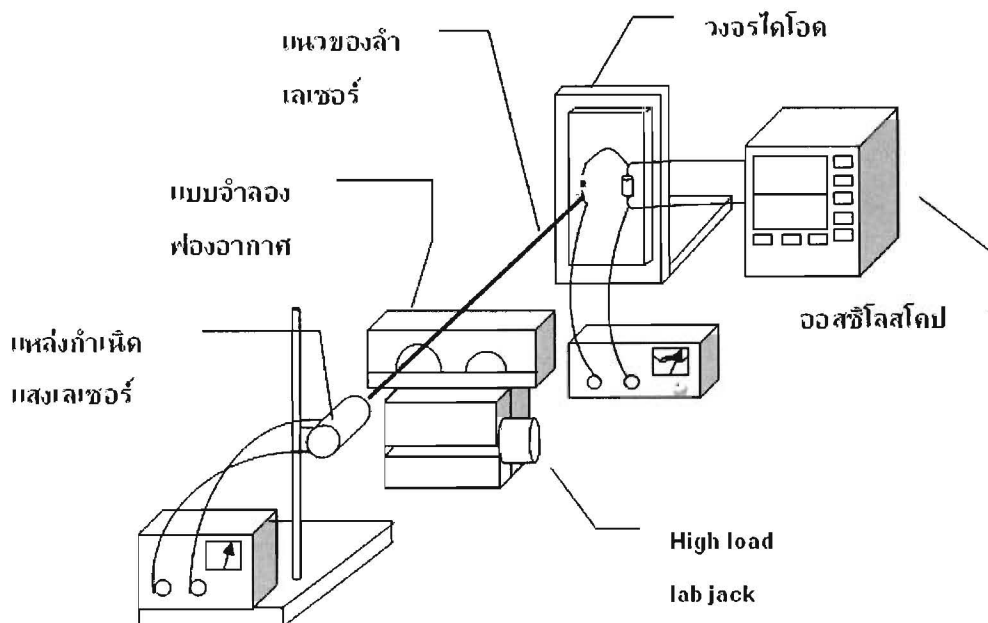
นอกจากนั้น เลเซอร์ยังมีลักษณะที่เหมือนกันทุก ๆ ลำเลเซอร์ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยการเปรียบเทียบกับแสงจากหลอดไฟได้ดังนี้ ใสหลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟฟ้าจึงมีเฟสและความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน (random) ในทางตรงกันข้ามกับต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์ที่จะให้แสงสีเดียว และทุก ๆ ลำแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด สมบัติที่เด่นชัดของแสงเลเซอร์อีกประการหนึ่งคือ ลำแสงของเลเซอร์ไม่กระจายออกเหมือนแสงจากไฟฉาย หรือต้นกำเนิดแสงอื่น ๆ แสงที่ออกจากเลเซอร์มีการบานออกค่อนข้างน้อย (divergence) โดยทุกระยะทาง 1 เมตรที่ลำแสงเลเซอร์เคลื่อนที่ เส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงจะโตขึ้นประมาณ 1 มิลลิเมตร

แสงเลเซอร์ยังมีลักษณะเด่นกว่าแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นอีกประการคือมีความเข้มสูง และเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุก็จะเกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อวัตถุนั้นมีความ

หยาบ หรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอย เนื่องจากเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาคหรือความหยาบนั้น และเกิดการแทรกสอดขึ้น

### 3.2 การหาความสัมพันธ์ด้วยการสอบเทียบกับแบบจำลองฟองอากาศ

การดำเนินงานจะเริ่มจากการสร้างระบบเลเซอร์ไดโอดและทดสอบวัดค่าสัญญาณรบกวนจากระบบที่ได้ออกแบบมา หลังจากนั้นจึงนำไปสอบเทียบโดยใช้แบบจำลองฟองอากาศทรงกลมที่ทำจากวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับของเหลวที่จะใช้ในการทดลองจริง ซึ่งในการทดลองวัดการไหลจริงจะต้องใช้ของเหลวที่มีความหนืดสูงกว่าน้ำเพื่อให้สามารถใช้กล้องวีดีโอแบบธรรมดาถ่ายรูปได้ทัน โดยในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้เลือกของเหลวดังกล่าวคือกรีเซอริน ซึ่งจากการศึกษาค่าของดัชนีหักเหของวัสดุหลาย ๆ ชนิดแล้วพบว่าวัสดุประเภทโพลีเมอร์ที่มีชื่อว่า Polymethylsiloxane (PDMS) มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับกรีเซอรินมาก ดังนั้นแบบจำลองฟองอากาศในการศึกษานี้จะทำจากวัสดุดังกล่าว สำหรับรูปที่ 3-3 แสดงส่วนประกอบหลักของชุดทดลองคือ ระบบเลเซอร์ไดโอด เครื่องมือเก็บสัญญาณ แบบจำลองฟองอากาศ และระบบเลื่อนตำแหน่งแบบจำลอง โดยวิธีการสร้างแบบจำลองพร้อมทั้งปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จะกล่าวถึงในส่วนต่อไป



รูปที่ 3-3 ส่วนประกอบของชุดทดลองสำหรับการสอบเทียบซึ่งประกอบด้วยระบบเลเซอร์ไดโอด เครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรไดโอด ออสซิลโลสโคปสำหรับการบันทึกค่าเอาพุทจากวงจรไดโอด แบบจำลองฟองอากาศ และระบบขับเคลื่อนแบบจำลอง

### 3.2.1 ระบบเลเซอร์ไดโอด

ในขั้นตอนแรก ผู้วิจัยจะทำการสร้างชุดอุปกรณ์การวัดขึ้นมาก่อนซึ่งประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และวงจรไดโอด ซึ่งหลักการในการออกแบบเป็นดังนี้

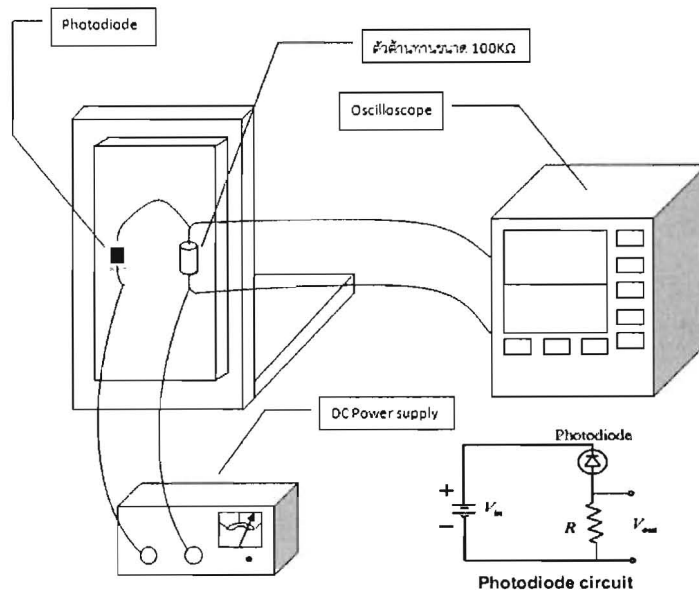
#### 3.2.1.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่นำมาใช้ในการทดลองควรมีกำลังสูงอยู่ในช่วง 1 mW – 50 mW เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดลำแสงประมาณ 0.6–1.0 mm และมีแสงเป็นสีแดง มีความยาวคลื่นประมาณ 650 nm สามารถเปิดทิ้งไว้เป็นเวลานาน ๆ ได้ โดยกำลังไม่ตก

ในช่วงต้นของการทดลอง ผู้วิจัยได้นำเลเซอร์พอยเตอร์มาดัดแปลงต่อเข้ากับวงจร DC power supply เพื่อใช้ทดสอบวงจรไดโอดและสอบเทียบชุดทดลอง และเมื่อทำการทดสอบชุดทดลองในส่วนต่าง ๆ เสร็จแล้ว การทดลองในส่วนถัดมาจะใช้เลเซอร์ He-Ne ขนาด 10 mW ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 mm และความยาวคลื่นของแสงสีแดงประมาณ 630 nm เพื่อใช้ในการวัดจริง โดยสาเหตุที่ต้องการความเข้มแสงสูงเพื่อทำให้มี signal to noise ratio ในการวัดสูง

#### 3.2.1.2 วงจรไดโอด

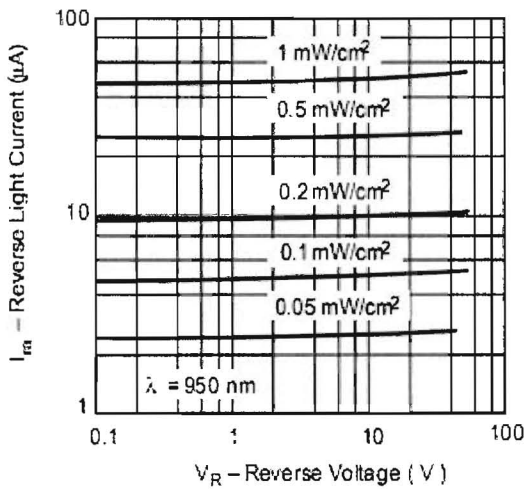
วงจรไดโอด คือ วงจรที่ใช้ในการรับลำแสงเลเซอร์หลังจากที่ลำแสงผ่านแบบจำลอง ฟองอากาศมาแล้ว เพื่อนำสัญญาณความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนวงจรไปวิเคราะห์ต่อไป วงจรไดโอดมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ โฟโอดีไดโอด เครื่อง DC regulator และตัวต้านทาน แสดงตามรูปที่ 3-4 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



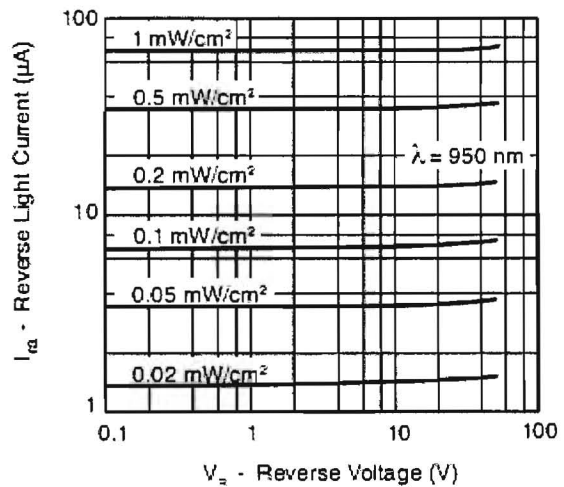
รูปที่ 3-4 วงจรโฟโอดีไดโอดที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายความดันไฟฟ้า โฟโอดีไดโอด ตัวต้านทาน และออสซิลอสโคป

- โฟโตไดโอด

ในส่วนของโฟโตไดโอด ผู้วิจัยได้พิจารณาเปรียบเทียบโฟโตไดโอดยี่ห้อ Vishay รุ่น BPW34 (แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส) และ ยี่ห้อ Vishay รุ่น BPV10 (แบบทรงกระบอก) เป็นหลักในการนำมาใช้ในการทดลอง เนื่องด้วยประสิทธิภาพของตัวไดโอดและเหตุผลที่เกี่ยวข้องกับความสะดวกในการสั่งซื้อ โดยขั้นแรกผู้วิจัยจะพิจารณาความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดมาเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรของทั้งสองแบบ โดยจะพิจารณา ณ ความยาวคลื่นที่ 950 nm (ไม่มีข้อมูลในความยาวคลื่นแสงอื่น) ซึ่งทั้งสองแบบจะมีค่า relative sensitivity ใกล้เคียงกันและสามารถป้อนความต่างศักย์ในการไบแอสย้อนเท่ากับ 1 - 15 V ได้ และจากรูปที่ 3-5 ก และ ข พบว่า หากค่า Irradiance ( $E_a$ ) หรือปริมาณของพลังงานแสงที่ตกกระทบต่อหน่วยพื้นที่มีค่าเท่ากันแล้ว ค่ากระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอดรุ่น BPV10 จะมีค่าสูงกว่า รุ่น BPW34 เพียงเล็กน้อย



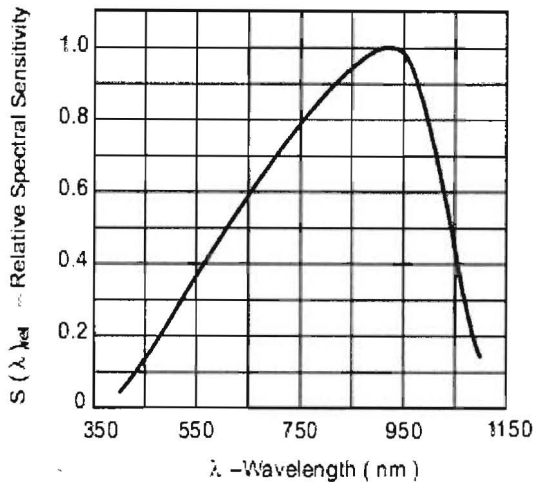
(ก)



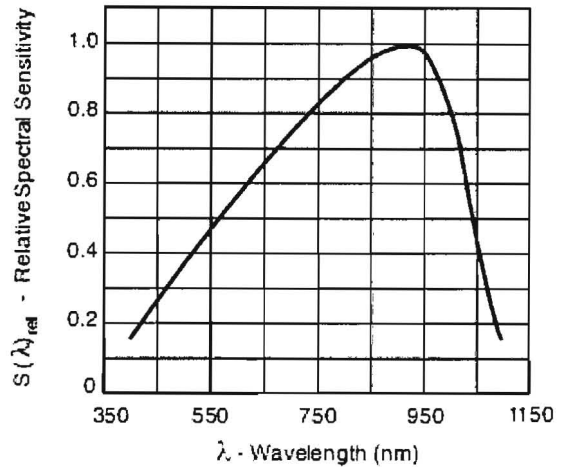
(ข)

รูปที่ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reverse light current กับ Reverse voltage ที่อัตราส่วนระหว่างพลังงานแสงที่ตกกระทบบนไดโอดต่อหน่วยพื้นที่ค่าต่าง ๆ กัน ของโฟโตไดโอด (ก) รุ่น BPW34, (ข) รุ่น BPV10 (ข้อมูลจากเอกสารของบริษัท Vishay)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง relative sensitivity กับ wavelength ของไดโอดทั้งสองรุ่น ตามรูปที่ 3-6 ก และ ข พบว่า ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 650 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง รุ่น BPV10 มีค่า relative sensitivity ประมาณ 0.65 และ รุ่น BPW34 มีค่า relative sensitivity ประมาณ 0.6 ซึ่งแตกต่างกันเพียง 5% เท่านั้น ดังนั้นสรุปได้ว่าในแง่ของประสิทธิภาพโฟโตไดโอดทั้งสองรุ่นมีความใกล้เคียงกัน



(ก)



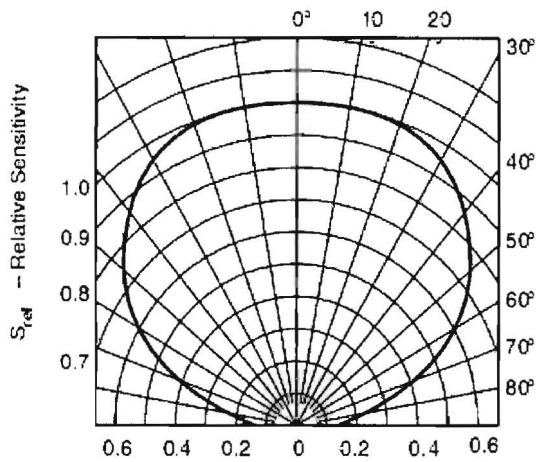
(ข)

รูปที่ 3-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Relative sensitivity กับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบของ (ก) โฟโอดีไดโอด รุ่น BPW34, (ข) โฟโอดีไดโอด รุ่น BPV10 (ข้อมูลจากเอกสารของบริษัท Vishav)

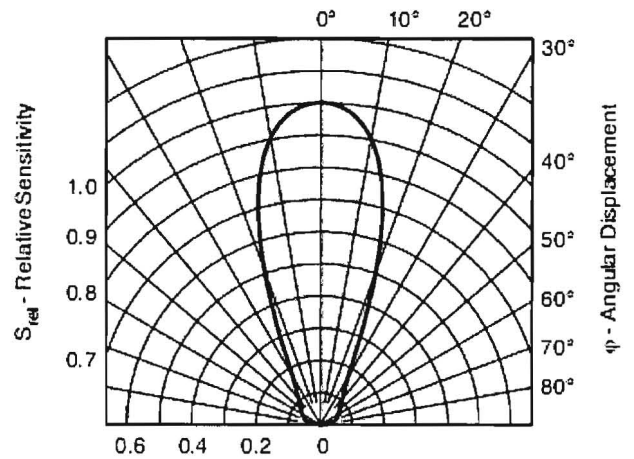
ขั้นตอนต่อมาจะมาพิจารณาลักษณะทางกายภาพของโฟโอดีไดโอดทั้งสองรุ่นสำหรับรุ่น BPV10 จะมีลักษณะตามรูปที่ 3-1ก คือจะมีกระเปาะพลาสติกสีดำครอบบริเวณ sensitive area ของไดโอดด้านบนมีลักษณะโค้งมนช่วยในการรวมแสงให้ตกลงบน sensitive area โดย sensitive area ของรุ่นดังกล่าวมีขนาด  $0.78 \text{ mm}^2$  และรูปร่างของโฟโอดีไดโอดรุ่น BPW34 แสดงดังรูปที่ 3-1ข ซึ่งจะมีบริเวณ sensitive area ขนาดใหญ่กว่าโฟโอดีไดโอดทั่วไป คือมีขนาดถึง  $7.5 \text{ mm}^2$  ทำให้การติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์เพื่อให้ลำแสงวิ่งไปกระทบที่บริเวณ sensitive area ขณะทำการทดลองทำได้ง่ายและสะดวก โดยสามารถสังเกตได้จากสายตาได้เลยว่าลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนโฟโอดีไดโอดทั้งหมดหรือไม่

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของโฟโอดีไดโอดทั้งสองรุ่นที่เกี่ยวข้องกับความความสัมพันธ์ระหว่าง relative sensitivity กับ มุมที่ลำแสงตกกระทบตามรูปที่ 3-7 ก และ ข พบว่าโฟโอดีไดโอดรุ่น BPW34 จะมีข้อดีในแง่ของการติดตั้งเพื่อใช้ในการทดลองมากกว่ารุ่น BPV10 เพราะแม้กระทั่งมุมที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบโฟโอดีไดโอดมีการเบี่ยงเบนไปจากเส้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ค่า relative sensitivity ของรุ่น BPW34 จะมีแนวโน้มลดลงค่อนข้างช้า เช่น มุมมีค่าสูงถึง  $20^\circ$  ค่า relative sensitivity ของโฟโอดีไดโอดก็ยังคงมีเป็น 1 เท่าเดิม เป็นต้น ซึ่งถือว่าเป็นช่วงมุมทำงานที่กว้างมาก ในทางตรงกันข้าม ถ้าพิจารณาโฟโอดีไดโอดรุ่น BPV10 จะพบว่าหากมุมมีการเบี่ยงเบนไปจากเส้นตั้งฉากเพียง  $10^\circ$  จะทำให้ค่า relative sensitivity ลดลงถึง 10% แต่ถ้ามุมมีค่า  $20^\circ$  จะทำให้ค่า relative sensitivity ลดลงไปถึง 45 %

อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ ผู้วิจัยต้องการให้ชุดทดลองมีการตอบสนองต่อมุมของเลเซอร์ที่มาตกกระทบโฟโอดีไดโอดที่ค่อนข้างสูง เพื่อที่จะสามารถแยกความแตกต่างของ input ได้ง่าย ดังนั้นผู้วิจัยจะเลือกใช้โฟโอดีไดโอดรุ่น BPV10 เพราะมี sensitivity กับทิศทางเลเซอร์สูงกว่า และมีคุณสมบัติอื่น ๆ ระหว่างโฟโอดีไดโอดทั้งสองแตกต่างกันไม่มากนัก



(ก)

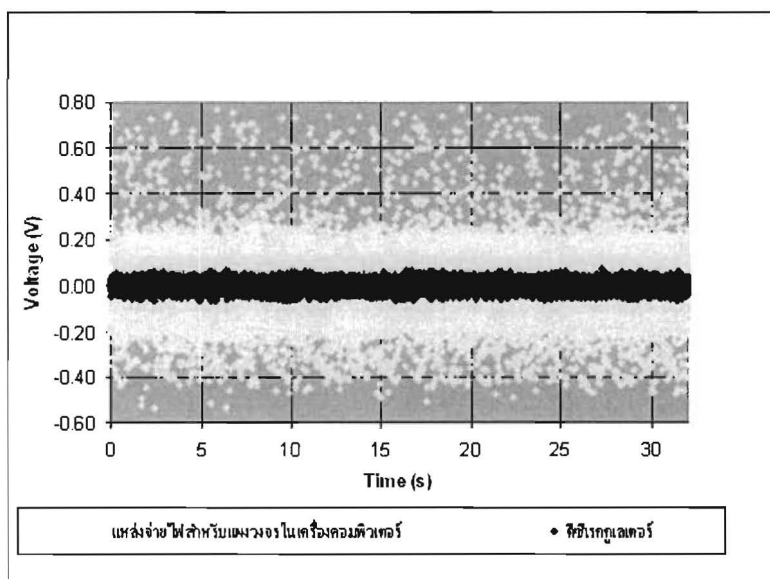


(ข)

รูปที่ 3-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Relative sensitivity กับมุมที่แสงตกกระทบของโฟโตไดโอด (ก) โฟโตไดโอดรุ่น BPW34, (ข) โฟโตไดโอดรุ่น BPV10 (ข้อมูลจากเอกสารของบริษัท Vishay)

- DC regulator

ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอนโฟโตไดโอดนั้นควรจะต้องเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในวงจรน้อยที่สุด โดยทางนักวิจัยได้เลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้า 2 แบบคือ DC regulator และแหล่งจ่ายไฟสำหรับแผงวงจรในเครื่องคอมพิวเตอร์มาทำการทดลองใช้จ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอนโฟโตไดโอดในวงจรด้วยความต่างศักย์ 5 โวลต์ ใช้ตัวต้านทานในวงจร 100 กิโลโอห์ม แล้ววัดสัญญาณขาออกของวงจรในสภาวะที่มีดิสทริบิวชันด้วยอัตราการเก็บสัญญาณ 1,000 ครั้งต่อวินาที เป็นเวลา 32 วินาที ซึ่งสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรจะเป็นดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 สัญญาณรบกวนที่ได้จากการวัดสัญญาณขาออกของวงจรในสภาวะการทดลองมีดิสทริบิวชัน โดยเปรียบเทียบระหว่าง DC regulator และแหล่งจ่ายไฟสำหรับแผงวงจรในเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอนโฟโตไดโอดในวงจร

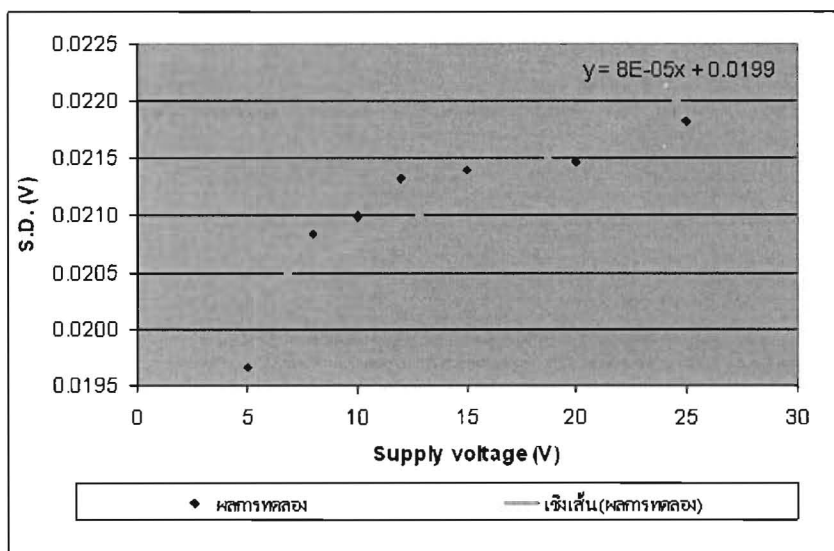
จากนั้นจึงนำสัญญาณมาทำการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งได้เลือกใช้เกณฑ์ในการเลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอน โฟโอดีโอดี ในวงจรด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณขาออกของวงจรในขณะที่มีตสสนิท ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ DC Regulator ซึ่งให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณขาออกของวงจรในขณะที่มีตสสนิทที่น้อยกว่าตามข้อมูลในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนของแหล่งกำเนิดสัญญาณต่างๆ

	DC regulator	แหล่งจ่ายไฟของเครื่องคอมพิวเตอร์
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (โวลต์)	0.020	0.146

หลังจากที่เลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอนโฟโอดีโอดีในวงจรได้แล้ว ลำดับต่อไปจะต้องเลือกใช้ความต่างศักย์สำหรับไบแอสยอนโฟโอดีโอดี การเลือกความต่างศักย์สำหรับไบแอสยอนโฟโอดีโอดีนั้นจะต้องสูงพอที่จะทำให้โฟโอดีโอดีอยู่ในภาวะที่กระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับความเข้มแสงได้ และจะต้องไม่เกินค่าความต่างศักย์สูงสุดที่โฟโอดีโอดีรับได้ซึ่งเท่ากับ 60 โวลต์ และความต่างศักย์นั้นควรจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในวงจรมีน้อยที่สุด ทางนักวิจัยจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาว่าที่ความต่างศักย์ในการไบแอสยอนต่าง ๆ กัน จะมีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนในวงจรที่เกิดขึ้นต่างกันหรือไม่

การทดลองนี้ทำโดยการจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอนโฟโอดีโอดีในวงจรด้วยความต่างศักย์ 5, 8, 10, 12, 15, 20 และ 25 โวลต์ ใช้ตัวต้านทานในวงจร 100 กิโลโห์ม แล้ววัดสัญญาณขาออกของวงจรในสภาวะที่มีตสสนิท ด้วยอัตราการเก็บสัญญาณ 1,000 ครั้งต่อวินาที เป็นเวลา 32 วินาที แล้วนำสัญญาณที่ได้มาทำการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้ในแต่ละค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการไบแอสยอนโฟโอดีโอดีนั้นมีค่าใกล้เคียงกันแต่มีแนวโน้มที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้จะสูงขึ้นเมื่อใช้ความต่างศักย์ในการไบแอสยอนโฟโอดีโอดีสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 ความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้จากวงจรในสภาวะการทดลองมีตสสนิท เมื่อเพิ่มค่า Bias voltage

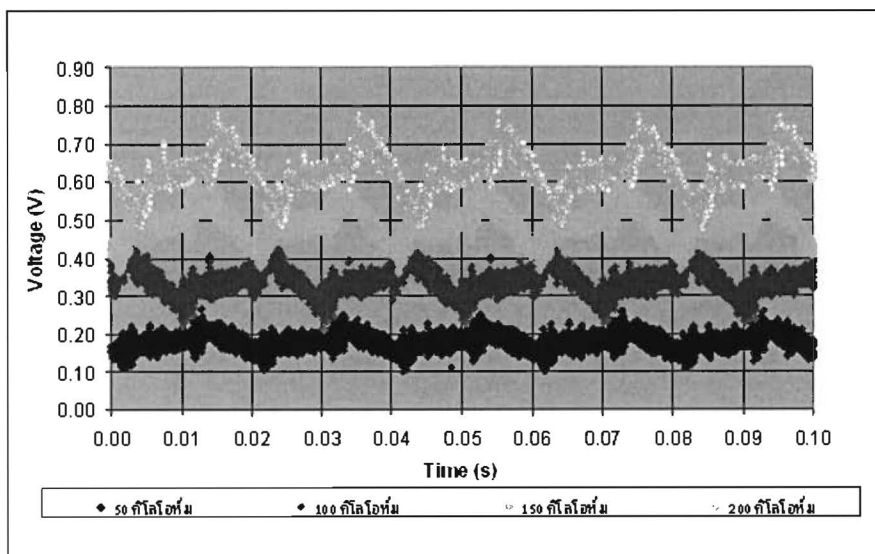


จากกราฟจะพบว่าความต่างศักย์ในการไบแอสยอนโฟโตนิก 5 โวลต์มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุดและมีแนวโน้มที่สัญญาณรบกวนจะมากขึ้นที่ความต่างศักย์ในการไบแอสยอนโฟโตนิกที่สูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกความต่างศักย์ในการไบแอสยอนโฟโตนิกเป็น 10-12 โวลต์ เพื่อเพื่อให้สัญญาณความต่างศักย์ขาออกมีค่าสูง

- ตัวต้านทานในวงจรไดโอด

หลังจากที่ได้ทำการเลือกชนิดและความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟที่ใช้ทำการไบแอสยอนแล้ว ส่วนประกอบในวงจรที่จะทำการเลือกต่อไปก็คือตัวต้านทาน สำหรับตัวต้านทานนั้นยังใช้ความต้านทานที่มีค่าสูงมากขึ้น สัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรมันก็จะยังมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการสังเกตและวิเคราะห์ แต่ในขณะเดียวกันความต้านทานที่มากขึ้นนั้น ก็อาจจะไปขยายสัญญาณรบกวนในวงจรให้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทางนักวิจัยจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจร เมื่อมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อสัญญาณรบกวนในวงจรหรือไม่อย่างไร การทดลองนี้ทำโดยการจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอนโฟโตนิกในวงจรด้วยความต่างศักย์ 5 โวลต์ ใช้ตัวต้านทานในวงจร 50, 100, 150 และ 200 กิโลโอห์ม และยิงเลเซอร์ (เลเซอร์พอยเตอร์) ตรงผ่านอากาศไปที่กลางโฟโตนิก แล้ววัดสัญญาณขาออกของวงจร ด้วยอัตราการเก็บสัญญาณ 100,000 ครั้งต่อวินาที เป็นเวลา 0.1 วินาที ซึ่งสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรจะเป็นลักษณะคล้ายรูป Sine wave ที่ความถี่ประมาณ 50 Hz และมีการแกว่งขึ้นลงเล็กน้อยด้วยความถี่สูงพร้อมๆกันไปด้วยดังรูปที่ 3-10

หลังจากนั้น จะนำสัญญาณในรูปที่ 3-10 มาทำการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ย และอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้จะป็นค่าบ่งชี้ว่าสัญญาณนั้นมีความชัดเจนมากหรือน้อย



รูปที่ 3-10 สัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรกับเวลาเมื่อยิงเลเซอร์ผ่านอากาศสู่โฟโตนิก ที่ค่าความต้านทานของวงจรต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในตารางที่ 3-2 พบว่าเมื่อใช้ความต้านทาน 150 และ 200 กิโลโอห์ม สัญญาณจะมีความชัดเจนสูง แต่เนื่องจากสัญญาณมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงด้วย จะทำให้ยากต่อการสังเกตความต่างศักย์ขาออกบนหน้าจอของเครื่องมือวัดในระหว่างการทดลองต่อ ๆ ไป ดังนั้นจึงเลือกใช้ความต้านทาน 100 กิโลโอห์ม ซึ่งมีค่าอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงกว่าเมื่อใช้ความต้านทานที่ 50 กิโลโอห์ม และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่สูงจนเกินไป

ตารางที่ 3-2 ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการใช้ตัวต้านทานขนาดต่างๆ

พารามิเตอร์	50 kΩ	100 kΩ	150 kΩ	200 kΩ
ค่าเฉลี่ย (โวลต์)	0.021	0.034	0.041	0.052
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (โวลต์)	0.181	0.341	0.493	0.629
อัตราส่วนค่าเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	8.597	10.034	12.103	11.937

- ออสซิลอสโคป

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บค่าสัญญาณความต่างศักย์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ ออสซิลอสโคปยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL716 อุปกรณ์นี้สามารถทำการวัดค่าแล้วแสดงผลบนจอแสดงผลได้ และยังสามารถเก็บข้อมูลที่ทำกรวัดเป็นไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel ในรูปแบบของสมุดขังซึ่งทำให้สะดวกต่อการนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป โดยทุกการทดลองจะทำการวัดในโหมด DC ซึ่งจะเป็นการวัดรวมทั้งสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์นี้มี resolution ละเอียดถึง 0.00001 โวลต์ และสามารถเก็บข้อมูลได้ถึงตั้งแต่ 1 ครั้งต่อวินาทีถึง 10 ล้านครั้งต่อวินาที และสามารถเก็บจำนวนตัวอย่างต่อหนึ่งครั้งการทดลองได้มากถึง 1 ตัวอย่างถึง 1 ล้านตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีขีดความสามารถในการเก็บข้อมูลที่สูง แต่ขีดจำกัดของการใช้เครื่องมือนี้อยู่กับการถ่ายเทข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์จะต้องใช้แผ่น diskette ซึ่งมีหน่วยความจำที่น้อยทำให้ไม่สามารถเก็บจำนวนตัวอย่างมาก ๆ ได้

3.2.2 อุปกรณ์สำหรับการสอบเทียบเครื่องมือวัด

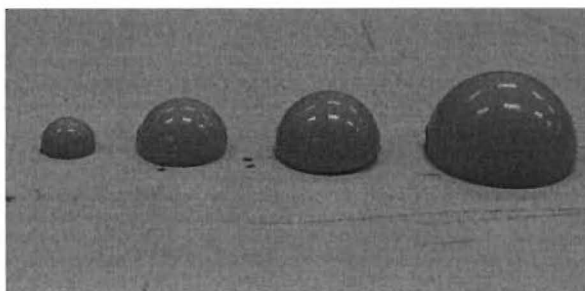
หลังจากได้ออกแบบและประกอบระบบเลขเซอร์ไดโอดแล้ว จึงทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นโดยใช้แบบจำลองฟองอากาศ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

3.2.2.1 แบบจำลองฟองอากาศ

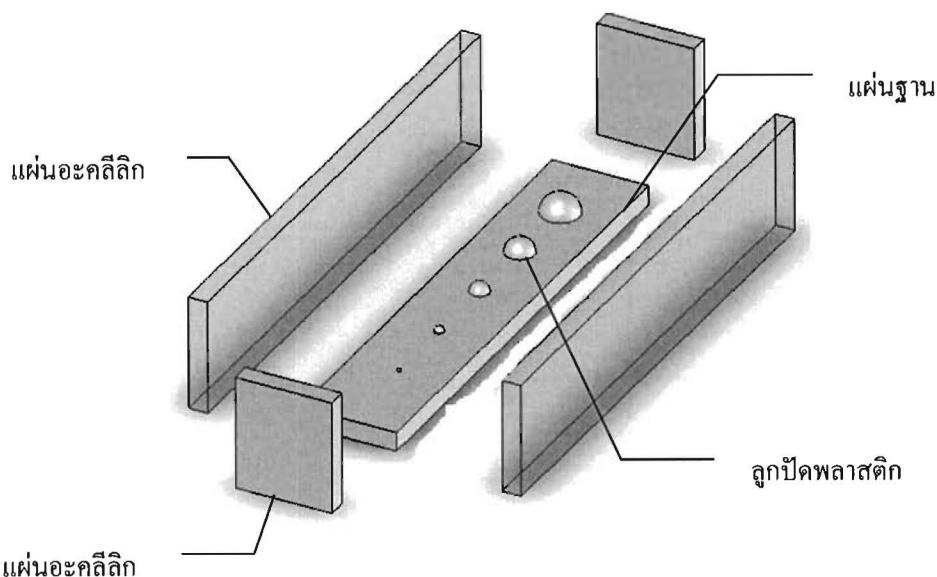
สำหรับวัสดุที่ใช้ทำแบบจำลองนี้คือ Polydimethylsiloxane (PDMS) เนื่องจาก PDMS หรือมีชื่อเรียกสินค้าว่า Sylgard 184 นั้นเป็น โพลีเมอร์ที่มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับกลีเซอริน คือมีค่าประมาณ 1.430 ในขณะที่กลีเซอรินนั้นมีค่าดัชนีหักเหอยู่ที่ 1.47 (กลีเซอริน 100%

วัดที่อุณหภูมิ 20°C) นอกจากนั้น วัสดุชนิดนี้เป็นที่รู้จักแพร่หลายมากในปัจจุบันเนื่องจากมีการนำมาใช้งานในการสร้าง "Lab on chip" เพื่อศึกษาการไหลในท่อขนาดเล็กเหล่านี้

แม่พิมพ์ของแบบจำลองฟองอากาศทำจากลูกปัดครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ขนาด คือ 6, 8, 13, 16, และ 22 มม. โดยรูป 3-11 แสดงลักษณะของลูกปัดขนาดต่าง ๆ ที่นำมาขัดจนถึงกึ่งกลางของลูกปัด โดยมีขั้นตอนการสร้างแบบจำลองดังต่อไปนี้ เริ่มต้นการสร้างฐานแบบจำลองจากแผ่นอลูมิเนียมขัดผิวให้เรียบ แล้วนำลูกปัดตามขนาดที่ต้องการมาผ่าและขัดให้เป็นรูปครึ่งทรงกลม ทำการแปะลงบนฐานอลูมิเนียมที่เตรียมไว้ จากนั้นใช้แผ่นอะคริลิกหนา 4 มม. มาประกอบเป็นฝาทั้ง 4 ด้าน โดยยึดแผ่นอะคริลิกเข้ากับฐานด้วยสกรูแล้วอุดรอยรั่วที่มุมทั้ง 4 ด้านด้วยซิลิโคน จากนั้นทดลองใส่น้ำลงไปเพื่อทดสอบการรั่วซึม รูปที่ 3-12 แสดงลักษณะการประกอบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน



รูปที่ 3-11 ลูกปัดผ่าครึ่งและขัดเรียบ ขนาดรัศมีต่าง ๆ



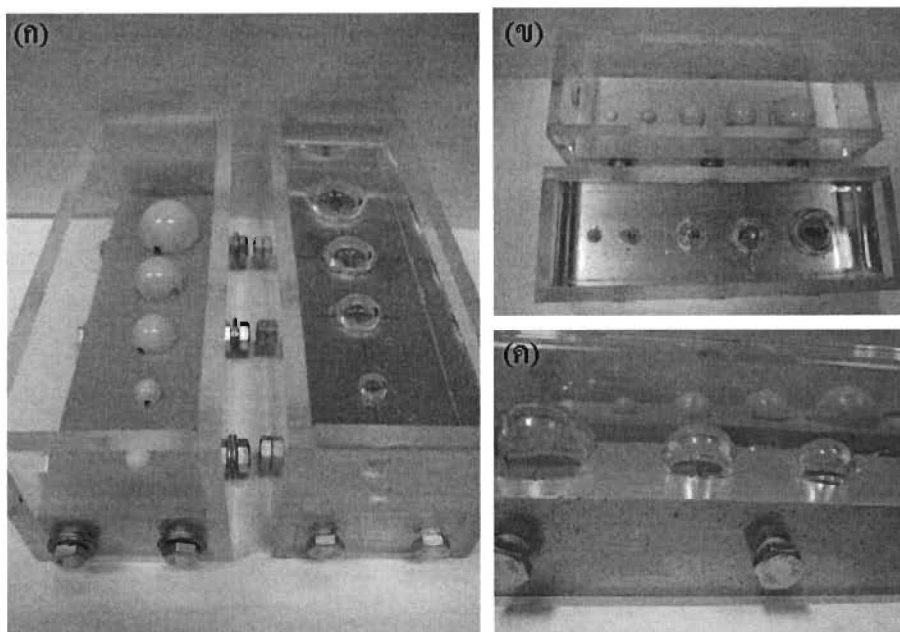
รูปที่ 3-12 แผนภาพของแม่พิมพ์ที่ใช้ทำแบบจำลองฟองอากาศ โดยลูกปัดถูกยึดกับฐานด้วยกาว และผนังแต่ละด้านถูกยึดกับฐานด้วยสกรู และใช้ซิลิโคนในการอุดรอยรั่วระหว่างผนังแต่ละด้าน

หลังจากนั้น จึงทำการผสม PDMS ด้วยอัตราส่วนระหว่างมวลของ monomer และ catalyst เท่ากับ 10:1 คนในเข้ากันที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะทำให้มีฟองอากาศขนาดใหญ่จำนวนมาก แทรกเข้าไปในเนื้อวัสดุ ดังนั้นจึงต้องนำไปใส่ใน vacuum chamber เพื่อดูดเอาอากาศที่แทรกออกจนหมดก่อน เมื่อดึงอากาศออกแล้วจึงนำ PDMS ไปเทใส่แม่พิมพ์และอบภายในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ฟองอากาศขนาดเล็ก (เล็กมากจนเกือบมองไม่เห็น) จะค่อย ๆ ลอยออกมาจาก PDMS เอง (ค่า reflective index และความโปร่งใสของ PDMS จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยไปกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ) หลังจากนั้น จึงทำการถอดแบบ PDMS ออกจากแม่พิมพ์และนำลูกบิดออกจากฐาน จากนั้นจึงประกอบก้อน PDMS กลับเข้ากับแม่พิมพ์อีกครั้งเพื่อนำมาใช้ในการทดลอง

สำหรับการทำแม่พิมพ์นี้ ในครั้งแรกได้ลองใช้ฐานแม่พิมพ์ที่ทำจากไม้ ผู้วิจัยพบว่าเป็นวัสดุที่ไม่เหมาะสมอย่างยิ่ง เนื่องจากมีรูพรุนทำให้เก็บอากาศไว้ในเนื้อไม้ได้มาก เวลานำไปอบในเตาอบจะทำให้อากาศที่แทรกซึมอยู่ออกมา และทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อ PDMS นอกจากนั้นเวลาลอกออกจากฐานก็ยิ่งทำได้ไม่สะดวก เพราะผิวไม้ค่อนข้างหยาบ ทำให้ต้องใช้แรงค่อนข้างมากและใช้ใบมีดตัดซึ่งจะทำให้ผิวงานเสียหายได้

นอกจากนั้นแล้ว ความสะอาดของแม่พิมพ์ก็เป็นสิ่งสำคัญ เวลาจับชิ้นงานควรสวมถุงมือเพื่อป้องกันไม่ให้รอยนิ้วมือปรากฏบนผนังแม่พิมพ์ซึ่งอาจจะทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้ ในการทดลองเบื้องต้นมีคราบขาวไปเลอะบนผนังบริเวณใกล้กับฟองอากาศ ก็ทำให้เกิดการหักเหของเลเซอร์บริเวณคราบสกปรกดังกล่าวอย่างชัดเจน

รูปที่ 3-13 แสดงแม่พิมพ์ก่อนและหลังการหล่อ PDMS (เป็นชุดทดลองที่พร้อมสำหรับการทดลอง) โดยแบบจำลองฟองอากาศนี้สามารถถอดออกมาจากแม่พิมพ์ได้ เนื่องจาก PDMS มีโครงสร้างที่แข็งแรงสามารถใช้มือจับได้ ดังแสดงในรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-13 แม่พิมพ์ก่อนและหลังใช้งาน (ก) มุมมองด้านข้าง - ด้านซ้ายคือแม่พิมพ์ก่อนใช้งาน, (ข) มุมมองด้านบน, (ค) ภาพระยะใกล้ของฟองอากาศขนาดต่าง ๆ ใน PDMS



รูปที่ 3-14 ก้อน PDMS ที่มีฟองอากาศอยู่ด้านใน

### 3.2.2.2 ระบบการเลื่อนตำแหน่งแบบจำลองของฟองอากาศ

งานวิจัยนี้มีความประสงค์ที่จะวัดสัญญาณขาออกของวงจรมือถือผ่านแบบจำลองของฟองที่มีรัศมีความโค้งต่าง ๆ ที่กำลังเคลื่อนที่ ดังนั้นระบบการเลื่อนตำแหน่งแบบจำลองเพื่อวัดสัญญาณขาออกของวงจรถ้าตำแหน่งความสูงตั้งแต่ปลายยอดฟองและต่ำลงไปยังตำแหน่งด้านในฟองจึงมีความสำคัญ

เครื่องมือที่ใช้ในการเลื่อนตำแหน่งแบบจำลองของฟองคือ โต๊ะทดลองที่สามารถปรับระดับได้ (lab jack) ยี่ห้อ Newport รุ่น 271 มีช่วงพิสัยความสูงตั้งแต่ 2.5 นิ้ว ถึง 4.25 นิ้ว ซึ่งการทำงานของเครื่องนี้จะใช้วิธีหมุนลูกบิดให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งซึ่งแผ่นวางงานข้างบนจะถูกยกสูงขึ้นไป และเพื่อให้ง่ายต่อการปรับระยะความสูงของแผ่นวางงานจึงได้เลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของแผ่นวางงานกับจำนวนรอบการหมุนลูกบิดเป็นเชิงเส้นซึ่งก็คือในช่วง 2.5 ถึง 3.5 นิ้ว

สำหรับ resolution ของเครื่องมือนี้จะมีค่าคงที่ในช่วงความสูง 2.5 ถึง 3.5 นิ้วต้องหมุนลูกบิดไป 10 รอบดังนั้น 1 รอบจะทำให้เกิดระยะการเคลื่อนที่ 0.1 นิ้ว หรือเท่ากับ 2.54 มิลลิเมตร และเนื่องจากใช้การสังเกตการหมุนด้วยแฉกของลูกบิดซึ่งมี 8 แฉก และระหว่างแฉกต่อแฉกสามารถมองเห็นและแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้ด้วยสายตา ดังนั้นจะทำให้เครื่องมือนี้มี resolution ในพิสัยที่ทำการทดลองเท่ากับ 0.08 มิลลิเมตร

สำหรับลักษณะของการทดลองโดยสังเขปจะเป็นดังนี้ อุปกรณ์วัดจะติดตั้งโดยปรับให้ลำเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดไปกระทบตั้งฉากกับโพโต้ไดโอดในวงจรถัดไป แล้วทำการเคลื่อนแบบจำลองฟองอากาศผ่านลำเลเซอร์ในแนวตั้ง เมื่อลำเลเซอร์วิ่งผ่านแบบจำลองในส่วนที่แทนกลีเซอริน ลำเลเซอร์ก็ยังคงตกลงบนโพโต้ไดโอด แต่เมื่อเคลื่อนแบบจำลองขึ้นไปอีก ลำเลเซอร์ก็เริ่มวิ่งผ่านจุดยอดของฟองอากาศ สัญญาณความต่างศักย์จะเริ่มมีแนวโน้มลดลงเพราะว่าลำเลเซอร์วิ่งตัดผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน ทำให้มีการสะท้อนและหักเหของลำเลเซอร์ออกไปแนวเดิม ความเข้มแสงที่ตกลงบนโพโต้ไดโอดจึงน่าจะมีค่าลดลง

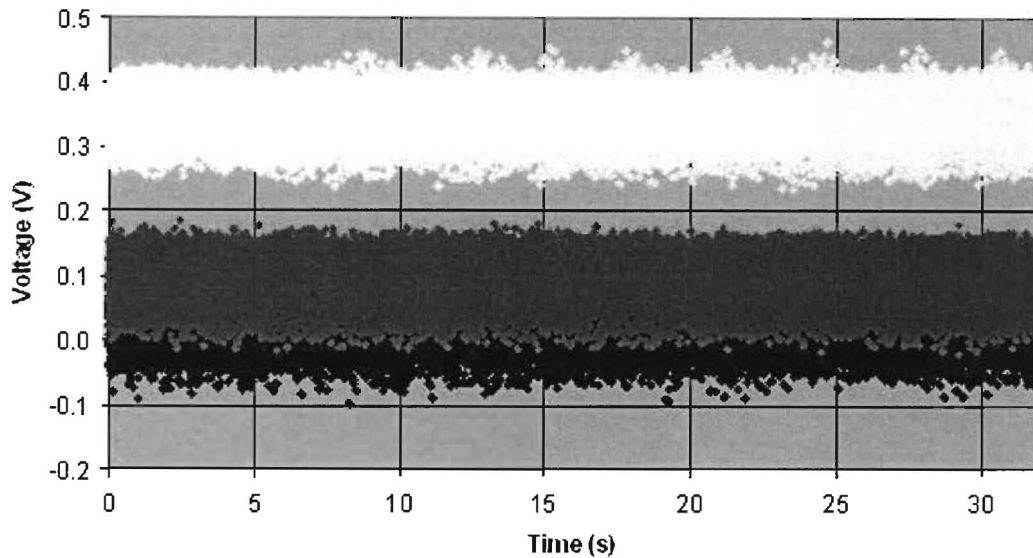
ข้อเสียของการใช้โต๊ะปรับระดับที่ปรับด้วยมือนี้ คือขนาด resolution ประมาณ 0.08 มม. ก็ยังไม่สูงพอเมื่อเทียบกับสิ่งที่กำลังศึกษาอยู่ ซึ่งปัญหานี้อาจจะแก้ไขได้โดยเปลี่ยนไปใช้ชุดเลื่อนตำแหน่ง (traverse) ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าและควบคุมผ่านระบบคอมพิวเตอร์แทน โดยการเลื่อนแบบจำลองฟองอากาศตัดกับลำแสงเลเซอร์ที่ได้เซ็ทอัพไว้ก่อนล่วงหน้าแล้วเมื่อใช้ sampling frequency ที่ค่อนข้างสูงและความเร็วของชุดเลื่อนตำแหน่งที่คงที่แล้ว ผู้ทดลองจะสามารถย้อนกลับไปหาตำแหน่งของแสงเลเซอร์บนฟองอากาศได้ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่ทราบค่าความเร็วที่แน่นอนได้และถึงแม้จะทำการสอบเทียบความเร็วไว้ก่อนได้ ค่าความเร็วที่หามาได้ก็เป็นเพียงความเร็วเฉลี่ยเท่านั้นทำให้การย้อนกลับไปหาตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนฟองอากาศอาจจะไม่แม่นยำนัก

อย่างไรก็ตาม การทดลองด้วยวิธีการทั้งสองแบบได้ถูกจัดเตรียมขึ้น และทำการทดลองในเบื้องต้นแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน พบว่าลักษณะสัญญาณจากทั้งสองการทดลองมีลักษณะแนวโน้มน่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการทดลองนี้จะใช้โต๊ะปรับระดับในการเลื่อนตำแหน่งฟองอากาศเพื่อจะทำให้ทราบตำแหน่งของการวัดที่แน่นอน

### 3.2.3 การดำเนินการสอบเทียบและสภาวะการทดลอง

ปัจจัยที่จะมีผลต่อการทดลองได้แก่ อุณหภูมิซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้า สนามแม่เหล็กต่าง ๆ ที่จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในวงจร และแสงไฟในบริเวณที่ทำการทดลอง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้สัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรรบกวน โดยทางนักวิจัยได้ทำการทดลองเพื่อทราบถึงผลกระทบของแสงภายนอกที่จะมีผลต่อสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจร โดยทดสอบทั้งสองแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์คือ เลเซอร์พอยเตอร์และ He-Ne เลเซอร์

การทดลองนี้ทำโดยการเปรียบเทียบสัญญาณขาออกของวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นตอนใน 3 สภาวะคือ สภาวะแรกเป็นการวัดสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรในเวลากลางคืน ณ สถานที่ทำการทดลองโดยเปิดหลอดไฟลูออเรสเซนต์ (ทำการทดลองในห้องโถง ชั้น 3 ตึกวิศวกรรม 5) สภาวะที่สองเป็นการวัดสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรในช่วงเวลา 18.00 น. ณ สถานที่ทำการทดลองโดยให้แสงภายนอกอาคารตกกระทบโฟโตไดโอด และสภาวะที่สามเป็นการวัดสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรในช่วงเวลากลางคืน ณ สถานที่ทำการทดลอง โดยยิงเลเซอร์ผ่านอากาศสู่โฟโตไดโอดและปิดไฟในสถานที่ทำการทดลองซึ่งจะได้สัญญาณออกมาดังรูปที่ 3-15 จะเห็นว่าสัญญาณความต่างศักย์ทั้งสามกรณีสามารถมองเห็นได้ชัดเจนบนมาตราส่วนความต่างศักย์เดียวกัน และจากสัญญาณนั้นได้นำมาหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และอัตราส่วนค่าเฉลี่ยต่อค่าเฉลี่ยในกรณีที่ 3 จะได้ค่าออกมาดังตารางที่ 3-3 ซึ่งจะพบว่าค่าเฉลี่ยต่อค่าเฉลี่ยในกรณีที่ 3 อยู่ในเกณฑ์ที่มากพอที่จะเปลี่ยนแปลงสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแสงไฟภายนอก ดังนั้นในการทดลองทางนักวิจัยจึงกำหนดการทดลองขึ้นในช่วงเวลากลางคืนตั้งแต่เวลา 20.00 น. จนถึง 24.00 น. เพื่อให้สัญญาณขาออกของวงจรไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของแสงภายนอก



- กรณีที่ 1 แสงภายนอกเวลา 18.00 น.
- กรณีที่ 2 เปิดไฟฟลูออเรสเซนต์ในคอนกลางคืน
- กรณีที่ 3 ยังเลเซอร์ห่านอากาศสู่ไฟโอดีโอดในตอนกลางคืนและเปิดไฟ

รูปที่ 3-15 สัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรในการทดลองเพื่อหาผลกระทบของแสงจากภายนอกต่อผลของสัญญาณขาออกของวงจร

สำหรับผลการทดลองด้วย He-Ne เลเซอร์ขนาด 10 mW ได้แสดงไว้ในคอลัมน์สุดท้ายของตารางที่ 3-3 เป็นกรณีที่ 4 พบว่าค่าความต่างศักย์มีค่าสูงถึงประมาณ 15.3 โวลต์หรือคิดเป็น 30.3 เท่า ของกรณีที่ใช้เลเซอร์พอยเตอร์ ดังนั้นในการทดลองที่ใช้ He-Ne เลเซอร์จะมีค่า signal-to-noise ratio ประมาณ 190 เท่า ซึ่งมีค่าสูงมาก

ตารางที่ 3-3 ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กรณีที่ 1 ไฟฟลูออเรสเซนต์, กรณีที่ 2 ไฟจากภายนอกอาคาร เวลา 18.00 น., กรณีที่ 3 เลเซอร์พอยเตอร์, กรณีที่ 4 He-Ne เลเซอร์ขนาด 10 mW)

พารามิเตอร์	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
ค่าเฉลี่ย (โวลต์)	0.022	0.098	0.346	15.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (โวลต์)	0.032	0.031	0.031	0.08
อัตราส่วนค่าเฉลี่ยต่อค่าเฉลี่ยของกรณีที่ 3	0.06	0.28	1.00	44.22

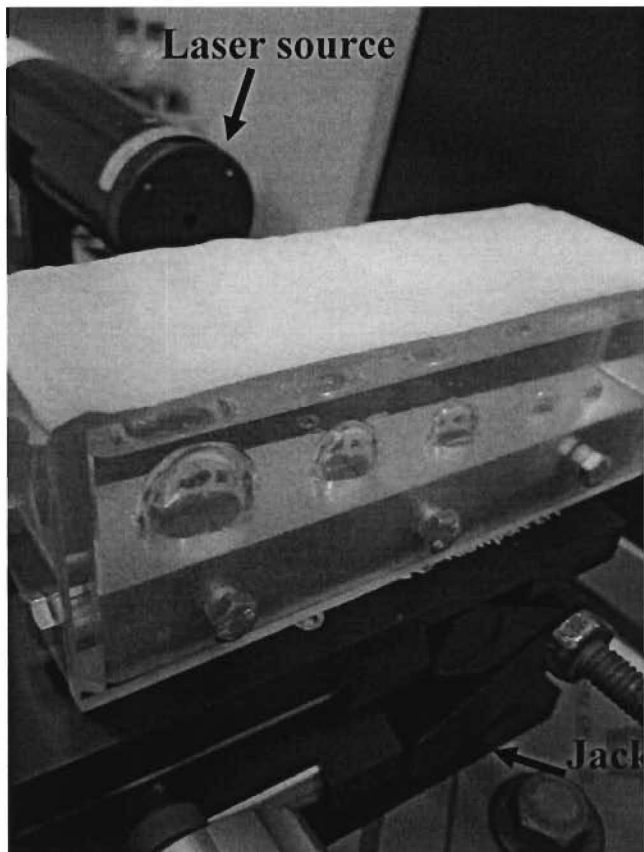
จะเห็นได้ว่าการออกแบบการทดลองข้างต้นที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ ทางผู้วิจัยได้พยายามออกแบบส่วนประกอบและสภาวะการทดลองให้มีสัญญาณการรบกวนน้อยที่สุด ตามหลักการทำงานของโฟโตไดโอดนั้นถ้าไม่มีแสงตกกระทบโฟโตไดโอดเลย จะมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร (dark current) น้อยมากโดยสำหรับโฟโตไดโอดที่ใช้ในการทดลองนี้ จะมีค่า dark current ไม่เกิน 30 นาโนแอมแปร์ ซึ่งน้อยจนออสซิลอสโคปที่ใช้ในการทดลองไม่สามารถตรวจวัดได้ แต่ใน

การทดลองจริงถึงแม้จะเป็นช่วงเวลากลางคืนก็ยังมีแสงอื่นนอกเหนือจากแสงเลเซอร์อยู่บ้างเล็กน้อย

ในส่วนของอุณหภูมินั้น เนื่องจากได้เลือกใช้ช่วงเวลาในทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ และทุกการทดลองจะทำในช่วงเวลากลางคืนตั้งแต่เวลา 20.00 น. จนถึง 24.00 น. ซึ่งอุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งจะประมาณได้ว่าอุณหภูมิที่ต่างกันในการทดลองแต่ละครั้งน้อยและไม่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง ส่วนสนามแม่เหล็กต่างๆ นั้นได้หลีกเลี่ยงโดยพยายามนำอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการทดลองได้แก่แหล่งจ่ายไฟฟ้าและออสซิลโลสโคปวางให้ห่างจากตัววงจรในระหว่างทำการทดลอง

### 3.2.4 ผลการทดลอง

การทดลองได้ดำเนินการด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ ใช้โฟโตรีโอดทรงกระบอก มีค่าความต้านทานในวงจร  $10\text{ k}\Omega$  มีค่าความต่างศักย์ย้อนกลับ 10-12 โวลต์ ใช้เลเซอร์สีแดงขนาด 10 mW และระยะห่างระหว่างเลเซอร์และโฟโตรีโอดคงที่เท่ากับ 20 ซม. ทำให้มีระยะระหว่างแบบจำลองฟองอากาศกับโฟโตรีโอดเท่ากับ 10-12 ซม. (ขึ้นกับขนาดฟองอากาศ) และใช้ sampling frequency เท่ากับ 200 Hz โดยชุดทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3-16



รูปที่ 3-16 ชุดทดลองที่พร้อมทำการทดสอบ



ในการทดลองนี้ ได้ทำการฉายแสงเลเซอร์ผ่านแบบจำลองในสภาวะที่ค่อนข้างมืดโดยจะทำการปิดไฟในบริเวณที่ทำการทดลองและทำการทดลองในเวลากลางคืน เพื่อให้ผลกระทบจากแสงภายนอกน้อยที่สุด และทำการทดลองสำหรับแต่ละขนาดฟองอากาศเป็นจำนวน 5 ครั้ง

การทดลองจะเริ่มจากการยิงเลเซอร์ผ่านแบบจำลองในส่วนที่ไม่ได้เป็นฟองอากาศแล้วทำการเก็บค่าสัญญาณความต่างศักย์ของวงจรถอดโอดไว้ โดยปกติแล้วค่าความต่างศักย์ที่บริเวณนี้จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งอื่น ๆ และจะมีค่าประมาณ 14-15 โวลต์ แล้วเลื่อนแบบจำลองขึ้นทีละ 80  $\mu\text{m}$  ( $\pm 10 \mu\text{m}$ ) และบันทึกค่าสัญญาณความต่างศักย์ทีละตำแหน่งจนสัญญาณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวนจึงหยุดการเก็บค่า โดยเก็บสัญญาณที่ตำแหน่งละ 1,000 ค่า แล้วจึงนำค่าสัญญาณดังกล่าวมาทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนที่แต่ละตำแหน่งซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่าความแปรปรวนจะมีค่าประมาณ 0.06 - 0.08 โวลต์ทุกการทดลอง โดยมีวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

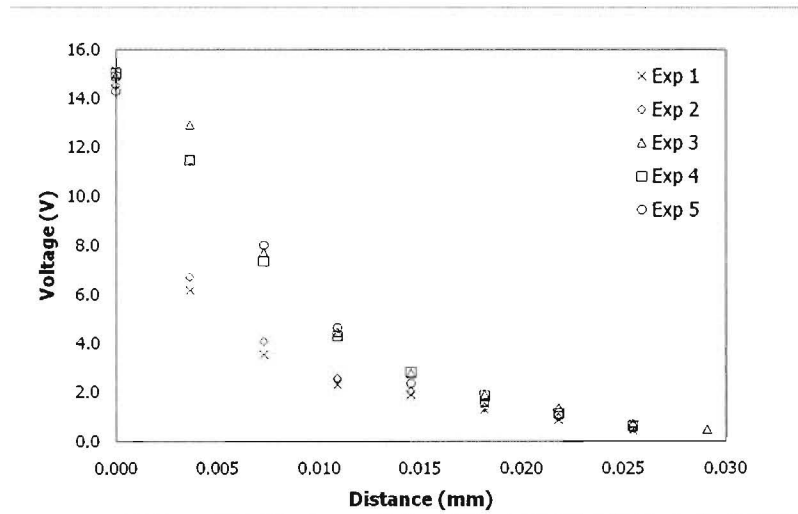
- (1) หาค่าจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของข้อมูล ซึ่งจุดเริ่มต้นเป็นจุดทดลอง (มีความต่างศักย์ประมาณ 14-15 V) ก่อนที่ขนาดความต่างศักย์จะลดต่ำลง (ลดต่ำลงมากกว่า 0.4 โวลต์) และจุดสุดท้ายเป็นจุดทดลอง (มีความต่างศักย์ประมาณ 0.4 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าค่าความแปรปรวนประมาณ 5 เท่า)
- (2) นำเอาค่าความต่างศักย์ที่จุดเริ่มต้นไปหารค่าความต่างศักย์ที่ตำแหน่งอื่นๆ (normalized voltage จะมีค่า 0-1)
- (3) นำเอาค่าระยะทางของจุดสุดท้ายไปหารระยะทางของจุดอื่น ๆ (normalized distance จะมีค่า 0-1)

จากผลการทดลองพบข้อสังเกตว่าระยะห่างจากฟองที่จะทำให้สัญญาณในวงจรมีค่าเท่ากับสัญญาณรบกวนในวงจรมีค่าไม่เกิน 1 มม. สำหรับทุกกรณี ซึ่งเป็นระยะทางที่สั้นมากเมื่อเทียบกับขนาดรัศมีของแบบจำลองฟอง โดยยิ่งฟองมีขนาดเล็กระยะดังกล่าวจะยาวมากขึ้น และตารางที่ 3-4 แสดงระยะทางเฉลี่ย และอัตราส่วนของขนาดของฟองอากาศ

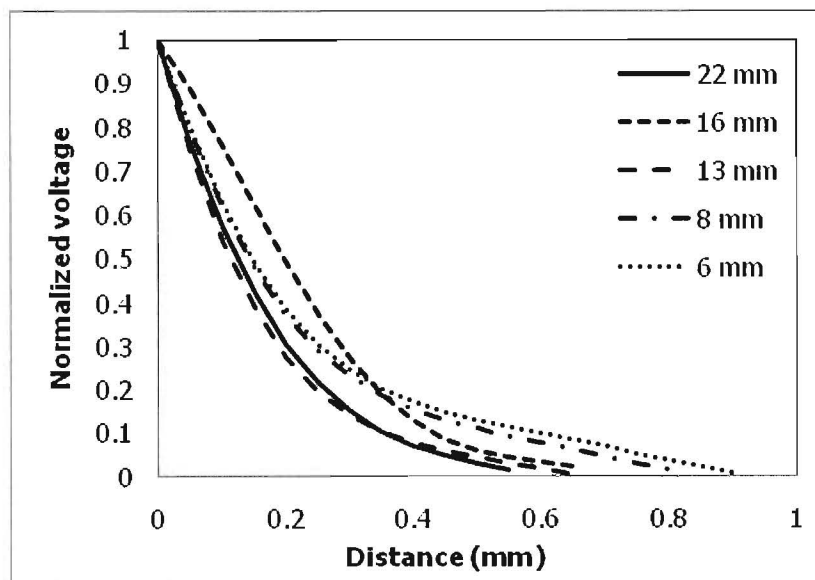
ตารางที่ 3-4 ผลการทดลองแสดงระยะทางที่สัญญาณความต่างศักย์ลดลงใกล้เคียงศูนย์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศ (ม.ม.)	รัศมีความโค้ง (ม.ม.)	ระยะทางที่สัญญาณความต่างศักย์ลดลงใกล้เคียงศูนย์ (ม.ม.)	อัตราส่วนกับขนาดของรัศมีฟองอากาศ
22	11	0.58	0.05
16	8	0.67	0.08
13	6.5	0.66	0.10
8	4	0.85	0.21
6	3	0.94	0.31

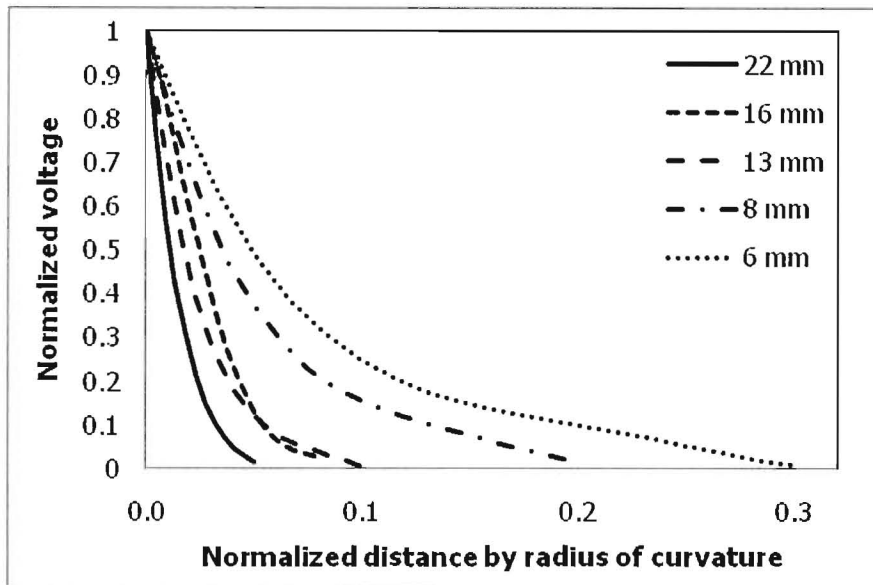
ตัวอย่างผลการทดลองของแต่ละขนาดฟองอากาศได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-17 ซึ่งแสดงผลการทดลองทั้ง 5 ครั้งของฟองอากาศขนาด 22 ม.ม. จะเห็นว่าลักษณะของสัญญาณจะมีแนวโน้มสองแบบค่อนข้างชัดเจนในช่วงแรก (แนวด้านบนและล่าง) ซึ่งน่าจะเกิดจากมี resolution ของการเลื่อนตำแหน่งที่ค่อนข้างหยาบอยู่ หลังจากนั้นเมื่อหาค่าเฉลี่ยของทั้งห้าการทดลองสำหรับแต่ละฟองอากาศแล้ว ผลการทดลองได้นำมาเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 3-18 ถึง 3-20 โดยรูปที่ 3-18 แสดงผลการทดลองของค่า normalized voltage ที่นิยามด้วยการหารค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งใด ๆ ด้วยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อลำเลเซอร์อยู่ที่ตำแหน่งก่อนผ่านฟองอากาศกับระยะจากปลายยอดฟอง สำหรับรูปที่ 3-19 แสดงผลการทดลองที่ normalized ระยะจากปลายยอดฟองด้วยขนาดรัศมีของฟองอากาศ และรูปที่ 3-20 แสดงการ normalized ระยะจากปลายยอดฟองด้วยระยะทางที่ความต่างศักย์ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์



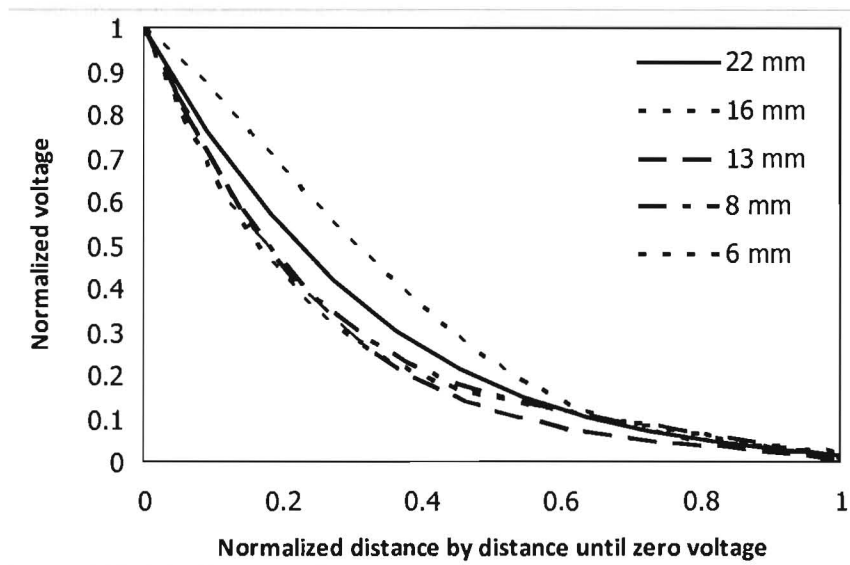
รูปที่ 3-17 ผลการทดลองทั้งหมดของแบบจำลองฟองอากาศขนาด 22 ม.ม.



รูปที่ 3-18 แนวโน้มเฉลี่ยของสัญญาณความต่างศักย์ที่ลดลง ตามระยะทางจากปลายยอดฟองอากาศ สำหรับทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศ



รูปที่ 3-19 แนวโน้มเฉลี่ยของสัญญาณความต่างศักย์ที่ลดลง ตามระยะทางจากปลายยอดฟองที่ถูก normalized ด้วยรัศมีความโค้งของฟองอากาศ



รูปที่ 3-20 แนวโน้มเฉลี่ยของสัญญาณความต่างศักย์ที่ลดลง ตามระยะทางจากปลายยอดฟองที่ถูก normalized ด้วยระยะจากปลายยอดฟองจนถึงระยะที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์

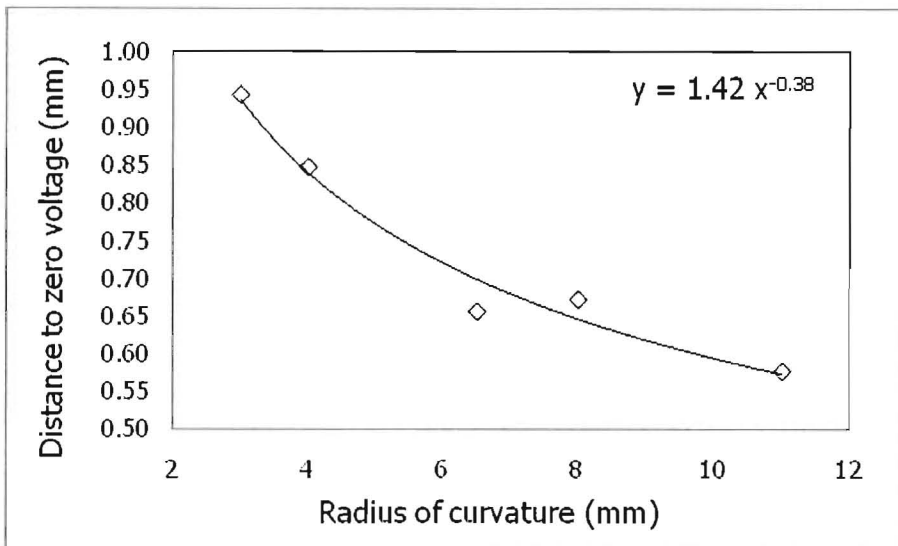
จากรูปที่ 3-19 เป็นกราฟเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองทุกกรณีด้วยการพล็อตเปรียบเทียบระหว่าง normalized voltage และ normalized distance ที่ใช้รัศมีความโค้งของฟองอากาศเป็นตัวหาร จะพบว่า ลักษณะการลดลงของค่า normalized voltage จะเกิดขึ้นอย่างมากในช่วงแรก โดยทุกกรณีความต่างศักย์จะลดลงครึ่งหนึ่งภายในระยะทางเพียง 10% ของรัศมีความโค้ง อย่างไรก็ตาม สำหรับฟองอากาศขนาดเล็กลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์จะเกิดช้ากว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ไปตามระยะ normalized distance นี้ นอกจากนั้นแล้ว สำหรับฟองอากาศทุกขนาดจะมีระยะที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์ภายในระยะเพียง 30% ของรัศมี

ความโค้ง โดยที่ฟองอากาศขนาด 22, 16, และ 13 ม.ม. จะมีระยะนี้ไม่ถึง 10% ของรัศมีมีความโค้ง สำหรับฟองอากาศขนาด 8 ม.ม. มีระยะประมาณ 20% และฟองอากาศขนาด 6 ม.ม. มีระยะนี้ประมาณ 30%

จากรูปที่ 3-20 เป็นผลการทดลองสำหรับทุกกรณีเมื่อเปรียบเทียบกับ normalized distance ด้วยระยะทางที่สัญญาณลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ พบว่าทุกขนาดฟองอากาศจะมีแนวโน้มการลดลงของสัญญาณที่ทำ normalized แล้วคล้าย ๆ กัน โดยสัญญาณจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและค่อย ๆ ข้างลงในช่วงหลัง และเพียงแค่ครึ่งหนึ่งของระยะการลดลงของสัญญาณทั้งหมด ขนาดสัญญาณความต่างศักย์ก็จะลดลงจนเหลือเพียง 10-20% ของสัญญาณตั้งต้นแล้ว

จากข้อมูลผลการสอบเทียบที่ได้อธิบายไปในนั้น หากนำเอาเลเซอร์ลำเดียวไปใช้งานวัดฟอง โดยติดตั้งให้ยอดฟองเคลื่อนที่ผ่านลำเลเซอร์เหมือนกับการสอบเทียบแล้ว จะมีแนวทางในการนำเอาระบบเลเซอร์ไดโอดไปใช้งานใน 4 ลักษณะดังนี้

- (1) ใช้ตรวจสอบว่าขนาดฟอง (อัตราส่วนระหว่างขนาดฟองอากาศต่อขนาดลำแสงเลเซอร์) อยู่ในช่วงที่ทำการสอบเทียบได้ โดยดูจากข้อมูลความต่างศักย์ที่ลดลงตามเวลาที่ถูก normalized ด้วยช่วงเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์ (คล้ายกับกราฟในรูปที่ 3-20 แต่แกนนอนเป็นเวลา) ว่าสอดคล้องเป็นแนวโน้มเดียวกันหรือไม่ โดยในการวัดจริง จะทราบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลา หากความเร็วของการไหลคงที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเปลี่ยนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะทางได้
- (2) หากผลการวัดสอดคล้องกับข้อที่ (1) แล้ว ใช้ตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับการไหลได้ หากแนวโน้มการลดลงของค่าความต่างศักย์มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามก็อาจจะเป็นไปได้ 2 ลักษณะคือ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดฟองหรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลในลักษณะที่มีความเร่งไม่เท่ากับศูนย์ (ตอนทำการสอบเทียบเปรียบเสมือนว่าไม่มีความเร่ง) หรือมีการเปลี่ยนแปลงทั้งสองอย่างพร้อมกัน
- (3) การไหลที่รู้ขนาดฟองแน่นอน เช่น การไหลในท่อ เมื่อใช้เลเซอร์ลำเดียววัด ผู้ทดลองอาจจะทราบความเร็วของไหลได้โดยดูจากเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ จากตารางที่ 3-4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์กับขนาดของฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3-21 ดังนั้นเมื่อทราบขนาดฟองอากาศที่แน่นอนจะทำให้ทราบวาระยะเท่าใดความต่างศักย์จะลดลงจนใกล้ศูนย์ (ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างลำเลเซอร์และขนาดฟองอากาศด้วย) และจากการวัดจะทำให้ทราบเวลา ทำให้สามารถคำนวณหาความเร็วของฟองก๊าซได้
- (4) การไหลที่รู้ความเร็วฟองแน่นอน ผู้ทดลองจะสามารถทราบขนาดของฟองอากาศได้เมื่อสังเกตดูเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนค่าใกล้ศูนย์ โดยอาศัยข้อมูลแบบเดียวกับข้อ (3)



รูปที่ 3-21 ระยะที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์ สำหรับแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดรัศมีความโค้งต่าง ๆ

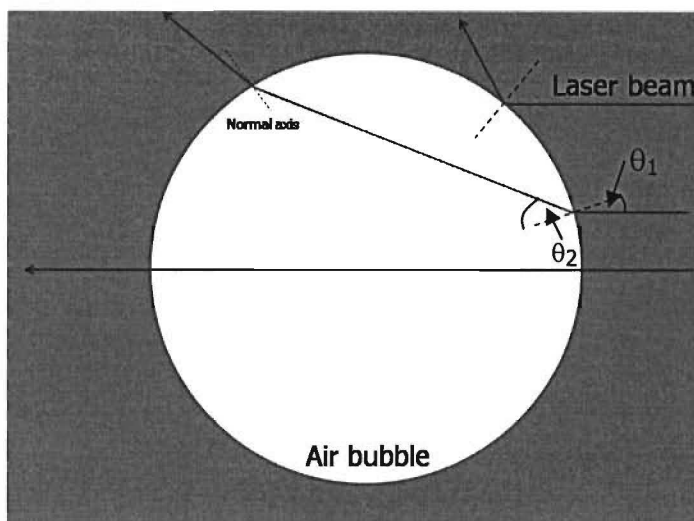
### 3.3 การหาความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำไปใช้เพื่อการวิเคราะห์ผลการทดลองในส่วนที่ผ่านมา ในรายงานฉบับนี้แบบจำลองจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ แบบจำลองเพื่อหามุมของลำแสงเลเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านฟองอากาศ และแบบจำลองเพื่อหาพื้นที่ที่ฟองอากาศบังลำแสงเลเซอร์ไม่ให้ผ่านไปตกกระทบไดโอด โดยเงื่อนไขและวิธีการของแต่ละแบบจำลองจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

#### 3.3.1 แบบจำลองเพื่อหามุมของลำแสงเลเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป

ในส่วนแรกที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองด้วยสมมติฐานว่าเลเซอร์เป็นลำแสง (light ray) ขนาดเล็กมากเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง 2 ชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน จะเกิดการหักเหหรือสะท้อนกลับหมดขึ้นกับมุมตกกระทบที่กระทำต่อเส้นตั้งฉากพื้นผิวรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง ซึ่งการศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่ผลของขนาดรัศมีความโค้งของฟองอากาศทรงกลมในของเหลว และเพื่อความสะดวกจะกำหนดให้ตัวกลางทั้งสองเป็นอากาศและกรีเซอิลินให้สอดคล้องกับงานในส่วนต่อไป สำหรับปรากฏการณ์ reflection และ absorption จะมีค่าน้อยมากในการศึกษาในส่วนที่ผ่านมา เพราะเมื่อเปรียบเทียบความสัญญาณความต่างศักย์ของวงจรระหว่างกรณีที่มีโมเดล PDMS กับกรณีที่ไม่มีโมเดล PDMS พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1 % สำหรับกรณีที่ใช้ He-Ne เลเซอร์ 10 mW แต่จะมีค่ามากขึ้นสำหรับกรณีที่ใช้เลเซอร์พอยเตอร์ (ประมาณ 20%)

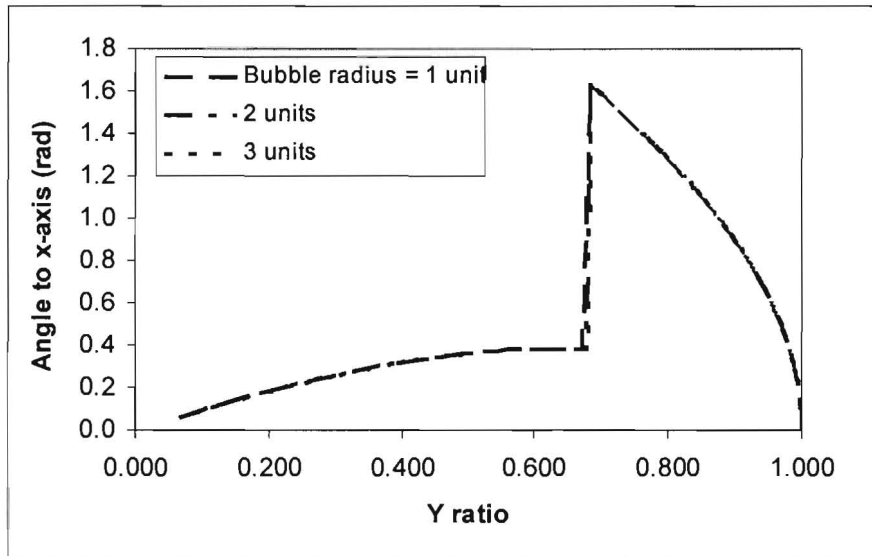
แบบจำลอง 2 มิติถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3-22 มีฟองอากาศวงกลมและลำแสงเลเซอร์ที่สมมติว่ามีขนาดเล็กมาก เมื่อลำแสงตกกระทบที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวสองชนิด จะเกิดการหักเหซึ่งมุมที่หักเหไปจะขึ้นกับมุมที่ตกกระทบตาม Law of refraction ( $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ) โดยที่  $n_1$  และ  $n_2$  คือค่า refractive index ของตัวกลางที่แสงตกกระทบและสะท้อนตามลำดับ ซึ่งปกติจะขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงด้วย



รูปที่ 3-22 ลำแสงเลเซอร์หักเหเมื่อเคลื่อนที่ผ่านฟองอากาศ 2 มิติที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากของเหลวโดยรอบ

ในการศึกษาที่ใช้แสงเลเซอร์ซึ่งมีความยาวคลื่นและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไม่เปลี่ยนแปลงนัก จึงถือได้ว่าคุณค่า refractive index มีค่าคงที่ สำหรับ  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่กระทำต่อแนวตั้งฉากของผิวสัมผัสระหว่างตัวกลางทั้งสอง เมื่อแสงที่หักเหจากผิวสัมผัสแรกไปตกกระทบที่ผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งก็จะเกิดการหักเหเช่นกัน

ในการศึกษาเบื้องต้นนี้จะวิเคราะห์เรื่องมุมที่ลำแสงเลเซอร์เปลี่ยนทิศไปเมื่อเคลื่อนที่ผ่านฟองอากาศ โดยจะพิจารณาสำหรับกรณีที่ฟองอากาศวงกลมที่มีขนาดรัศมีมีความโค้งต่าง ๆ กัน และสมมติแสงเป็นลำแสงและมีขนาดเล็กมาก ซึ่งกราฟในรูปที่ 3-23 แสดงมุมของลำแสงที่พุ่งออกจากฟองอากาศ โดยมุมดังกล่าวคือมุมที่กระทำต่อแนวเส้นทางเดิมของเลเซอร์ก่อนตกกระทบฟองอากาศ โดยแกนนอนแสดงถึงระยะจากยอดฟองที่แสดงเป็นอัตราส่วนกับรัศมีมีความโค้งของฟองอากาศ สำหรับทุกกรณีนั้นค่าในแกนนอนเท่ากับ 1 หมายถึงที่ตำแหน่งปลายยอดของฟองและค่าเท่ากับศูนย์หมายถึงตำแหน่งที่กึ่งกลางฟองอากาศ จากผลการคำนวณ พบว่าถ้ามุมของลำแสงเลเซอร์ที่เคลื่อนที่ผ่านฟองอากาศจะมีลักษณะที่เหมือนกันทุกขนาดฟอง เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกบนฟองอากาศที่ตำแหน่งสัมผัสของขนาดฟองที่เดียวกัน



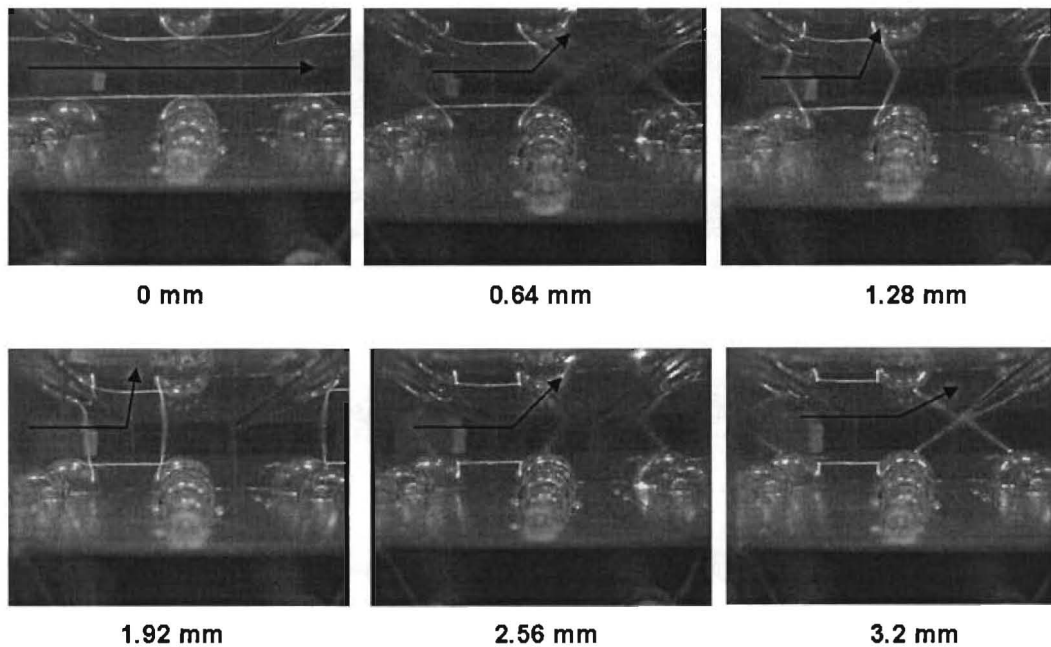
รูปที่ 3-23 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่ลำเลเซอร์ทะลุผ่านฟองอากาศกระทำกับลำเลเซอร์ที่ตกกระทบฟองอากาศ และตำแหน่งสัมผัสบนฟองอากาศขนาดต่าง ๆ

สำหรับทุกกรณี เมื่อลำเลเซอร์เริ่มตกกระทบบนฟองอากาศที่บริเวณปลายยอดของฟอง ลำเลเซอร์จะเกิดการสะท้อนกลับหมด (0 องศา) เนื่องจากมุมตกกระทบมากกว่า "critical angle" และเมื่อลำเลเซอร์เคลื่อนลงไปพื้นฐานฟองอากาศมากขึ้นเลเซอร์จะเกิดการหักเหเข้าไปภายในฟองอากาศและทะลุผ่านฟองอากาศออกมาจากผนังของฟองอีกด้านหนึ่งโดยมีมุมของการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปจากตอนก่อนที่จะมากระทบกับฟองและมุมดังกล่าวมีขนาดค่อย ๆ ใหญ่ขึ้น และทำมุม  $90^\circ$  ประมาณที่ระยะ 0.6-0.7 เท่าของระยะรัศมีของฟองอากาศ หลังจากนั้น เมื่อเลเซอร์เลื่อนตำแหน่งเข้ามาถึงกลางฟองมากขึ้นอีก มุมสะท้อนนี้ก็กลับมีขนาดเล็กลงและค่อย ๆ ลดลงเข้าใกล้ศูนย์

ผลการคำนวณในส่วนนี้ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยรูปถ่าย และพบว่าลำดับการหักเหของแสงเลเซอร์สอดคล้องกันดี ดังแสดงในรูปที่ 3-24 โดยมีลักษณะการสะท้อนดังนี้ ก่อนลำเลเซอร์จะตัดผ่านยอดฟองจะมีทิศทางเป็นแนวตรง หลังจากลำเลเซอร์ตัดยอดฟองอากาศจะมีทิศทางหักขึ้นโดยมุมที่ลำเลเซอร์หักเหไปจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งเมื่อลำเลเซอร์ตัดเข้าไปในแบบจำลองฟองอากาศมากขึ้นถึงระยะหนึ่ง ลำเลเซอร์จะหักเหทำมุม  $90^\circ$  องศา และเมื่อเลยตำแหน่งนั้นไปแล้ว ลำเลเซอร์จะค่อย ๆ หักเหกลับไปในทิศทางเดิมที่ทำให้ลำเลเซอร์กลับมามีแนวตรงอีกครั้ง

ผลจากแบบจำลองนี้จะช่วยอธิบายผลการทดลองจริงได้ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ของวงจรไดโอดจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบโฟโตนิกไดโอด และจะสอดคล้องกับมุมสะท้อนออกที่คำนวณจากโมเดลด้วย กล่าวคือ หากมุมที่สะท้อนเปลี่ยนไปจากแนวเดิมมาก จะทำให้ลำเลเซอร์ไม่ตกกระทบที่โฟโตนิกไดโอด และทำให้ความเข้มเลเซอร์ที่โฟโตนิกไดโอดตรวจสอบได้มีความเข้มน้อยลง และส่งผลทำให้ค่าความต่างศักย์จากวงจรไดโอดต่ำลง

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของการวัดความต่างศักย์ในส่วนแรก พบว่าไม่สอดคล้องกันนัก โดยจากผลการสอบเทียบสำหรับขนาดฟองต่าง ๆ กันจะมีตำแหน่งสัมพันธ์กับขนาดฟองที่ต่างกัน ที่ทำให้ความเข้มเปลี่ยนแปลงไป และในการทดลองความต่างศักย์จะลดลงเข้าใกล้ศูนย์ตั้งแต่ระยะใกล้กับปลายฟองอากาศดังแสดงผลในตารางที่ 3-4 แล้ว ซึ่งความแตกต่างนี้น่าจะเกิดจากความเปราะ 3 มิติในการทดลองจริงทำให้เลเซอร์หักเหไปบนอีกระนาบหนึ่งด้วยการหักเหของแสงมากกว่าค่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ตารางที่ 3-5 จะแสดงตำแหน่งที่แสงเลเซอร์มีการสะท้อนออกที่มุมประมาณ 90° ในการทำทดลองจริงซึ่งพบว่าจะเกิดในช่วงประมาณ 0.09-0.13 เท่าของรัศมีความโค้งในทุกกรณี



รูปที่ 3-24 ภาพแสดงทิศทางของลำเลเซอร์ที่สะท้อนบนแบบจำลองฟองอากาศขนาด 22 ม.ม. โดยระยะที่ 0 ม.ม. แสดงตำแหน่งของลำเลเซอร์ที่ตัดปลายยอดฟองอากาศเล็กน้อยแล้ว (ระยะในภาพถ่ายเป็นระยะที่ไม่สอดคล้องกับค่าในตารางที่ 3.5 เป็นการแสดงระยะคร่าว ๆ เท่านั้น)

ตารางที่ 3-5 ตำแหน่งที่เลเซอร์หักเหไป 90 องศาจากผลการทดลอง

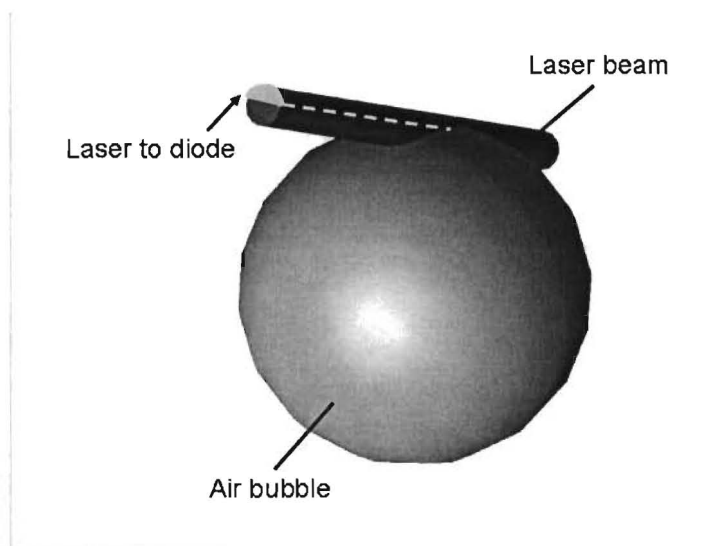
เส้นผ่านศูนย์กลางของฟอง (ม.ม.)	ตำแหน่งจากปลายฟอง (ม.ม.)	อัตราส่วนกับรัศมีของฟอง
22	1.04 ± 0.02	~0.09
16	0.88 ± 0.02	~0.11
13	0.64 ± 0.02	~0.10
8	0.48 ± 0.02	~0.12
6	0.40 ± 0.02	~0.13



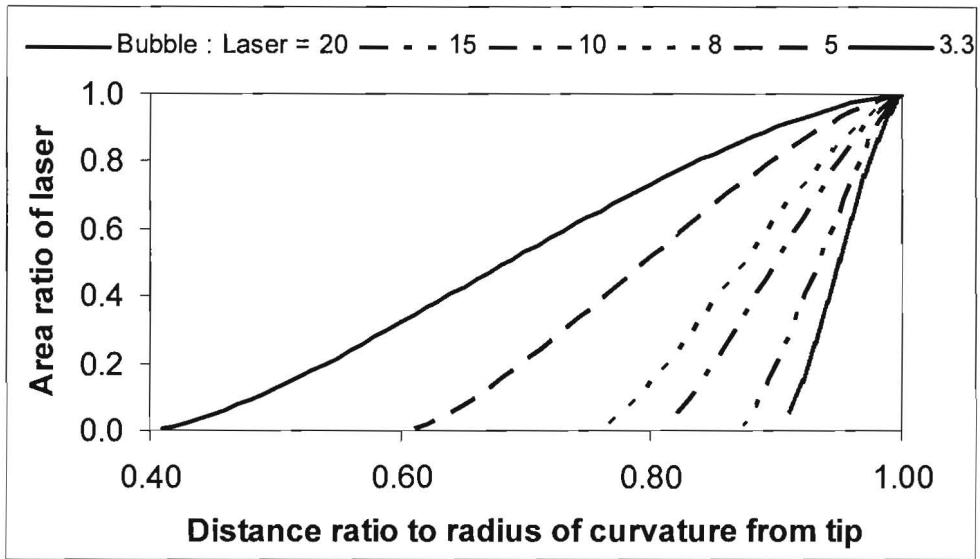
### 3.3.2 แบบจำลองเพื่อหาพื้นที่ของลำแสงเลเซอร์ที่ไม่ถูกบังด้วยฟองอากาศ

จากแนวคิดที่ว่าความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนไดโอดที่ลดลง อาจเกิดจากปรากฏการณ์อื่นที่ไม่ใช่การหักเหของแสงเท่านั้น ในส่วนนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดเพิ่มเติมจากแบบจำลองในส่วนแรกที่ไม่คิดขนาดของลำเลเซอร์ว่าลำเลเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.65 มม. ในความเป็นจริง เมื่อฟองอากาศเคลื่อนที่เริ่มมาตัดลำแสงเลเซอร์ พื้นที่ส่วนหนึ่งของลำเลเซอร์จะเกิดการสะท้อนและไม่ตกกระทบไดโอดตามแบบจำลองแรก ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะยังไม่กระทบฟองอากาศและจะพุ่งไปตกกระทบโฟโตนิกไดโอด ซึ่งในแบบจำลองนี้จะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของการลดลงของพื้นที่ส่วนที่ลำเลเซอร์ไม่ถูกฟองอากาศบังกับตำแหน่งที่เลเซอร์ไปตกกระทบบนฟองอากาศที่ส่วนต่าง ๆ โดยจะหาความสัมพันธ์นี้สำหรับกรณีที่อัตราส่วนของขนาดฟองอากาศและเลเซอร์ต่าง ๆ กัน โดยในเบื้องต้น ผู้วิจัยจะละทิ้งผลการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ (น่าจะมียุทธน้อย) และคิดว่าพื้นที่หน้าตัดของฟองอากาศและลำเลเซอร์มีรูปร่างเป็นวงกลม ดังแสดงหลักการในรูปที่ 3-25

กราฟในรูปที่ 3-26 แสดงการลดลงของพื้นที่เลเซอร์ส่วนที่ไม่ถูกบังเป็นอัตราส่วนกับพื้นที่เลเซอร์ทั้งหมด สำหรับกรณีต่าง ๆ ซึ่งจะพบว่าระยะจากยอดฟองอากาศที่คิดเป็นอัตราส่วนกับรัศมีของฟองอากาศ ที่ลำเลเซอร์ถูกบังหมดสำหรับอัตราส่วนของขนาดเลเซอร์และฟองอากาศต่าง ๆ จะไม่เท่ากัน โดยสำหรับกรณีที่ฟองอากาศมีขนาดเท่ากันและเปลี่ยนขนาดของลำเลเซอร์ไปนั้น กรณีที่ลำเลเซอร์มีขนาดใหญ่กว่า ระยะทางดังกล่าวจะยาวกว่า หรือในทางกลับกันสำหรับกรณีที่ลำเลเซอร์มีขนาดคงที่และเปลี่ยนแปลงขนาดของฟองอากาศไปนั้น กรณีที่ฟองอากาศเล็กกว่า ระยะทางดังกล่าวจะยาวกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยที่อัตราส่วนของขนาดเป็น 20:1 นั้น (เทียบได้กับแบบจำลองฟองอากาศขนาด 13 มม.) พื้นที่ของเลเซอร์หรือเทียบได้กับความเข้มของเลเซอร์ที่จะตกกระทบกับโฟโตนิกไดโอดและความต่างศักย์ไฟฟ้าตามลำดับ ที่มีค่าลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ 0.9 เท่าของรัศมีฟองอากาศ ซึ่งมากกว่าผลการทดลองที่แสดงในตาราง 3-4 เล็กน้อย

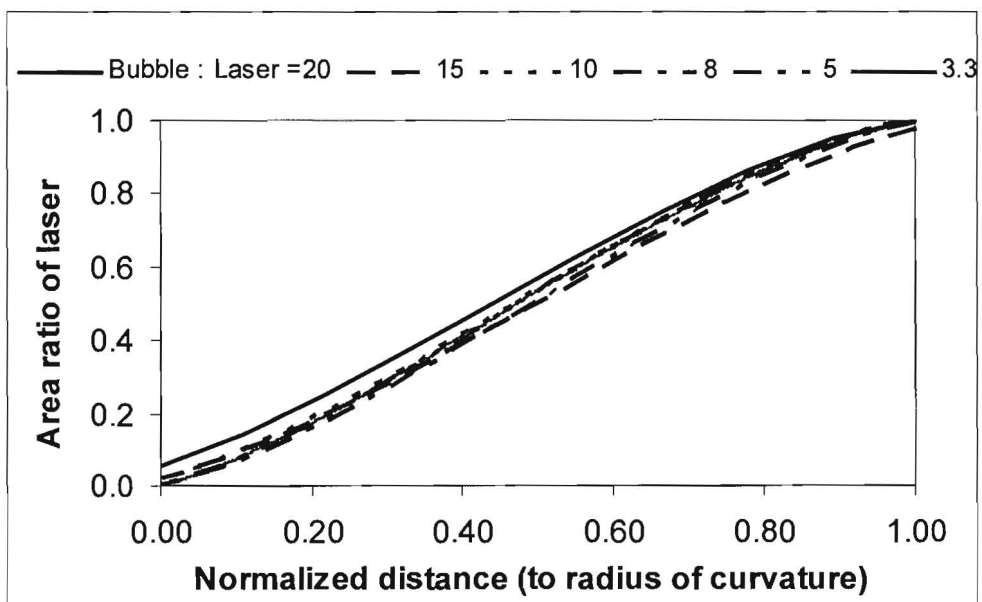


รูปที่ 3-25 หลักการของแบบจำลองที่คำนวณพื้นที่ของลำเลเซอร์ในส่วนที่ไม่ถูกบังด้วยฟองอากาศและพุ่งไปตกกระทบเซนเซอร์ของโฟโตนิกไดโอด



รูปที่ 3-26 อัตราส่วนพื้นที่ที่เหลืออยู่ต่อพื้นที่ทั้งหมดของลำเลเซอร์ เมื่อขอบล่างของลำเลเซอร์อยู่บนตำแหน่งต่าง ๆ บนของฟองอากาศ (รัศมี 1 หน่วย) สำหรับแต่ละขนาดของลำเลเซอร์

เมื่อนำผลดังกล่าวมาแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะที่ทำ normalization ด้วยระยะที่อัตราส่วนดังกล่าวลดลงแล้ว ผลได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-27 โดยที่ผลจะคล้ายคลึงกับผลการทดลอง หากสมมติให้อัตราส่วนของสัญญาณความต่างศักย์แปรผันไปกับอัตราส่วนของลำเลเซอร์ที่ตกกระทบโฟโตไดโอด คือ ทุกขนาดอัตราส่วนของขนาดลำเลเซอร์และฟองอากาศจะมีความคล้ายคลึงกัน โดยสัญญาณจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง และที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของระยะการลดลงของสัญญาณทั้งหมด ขนาดสัญญาณก็จะลดลงเหลือประมาณ 50% ของสัญญาณตั้งต้น



รูปที่ 3-27 อัตราส่วนพื้นที่ที่เหลืออยู่ต่อพื้นที่ทั้งหมดของลำเลเซอร์ เมื่อแสดงตำแหน่งขอบล่างของลำเลเซอร์เป็นอัตราส่วนกับระยะที่พื้นที่ลดลงจนเป็นศูนย์ สำหรับแต่ละขนาดของลำเลเซอร์

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์นี้กับผลการทดลองแล้ว อาจจะสรุปได้ว่าผลของการบังลำเลเซอร์ไม่ให้เกิดกระทบโฟโต้ไดโอดของฟองอากาศ น่าจะเป็นต้นเหตุหลักที่ส่งผลทำให้ความเข้มของเลเซอร์ที่ตกกระทบไดโอดลดลง และท้ายที่สุดทำให้สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรไฟฟาลดลง อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันสมมติฐานนี้ อาจจะต้องนำปรากฏการณ์ของแสงที่ซับซ้อนมากขึ้น รวมถึงออกแบบการทดลองที่มีความละเอียดมากขึ้นมาช่วยวิเคราะห์ในอนาคต

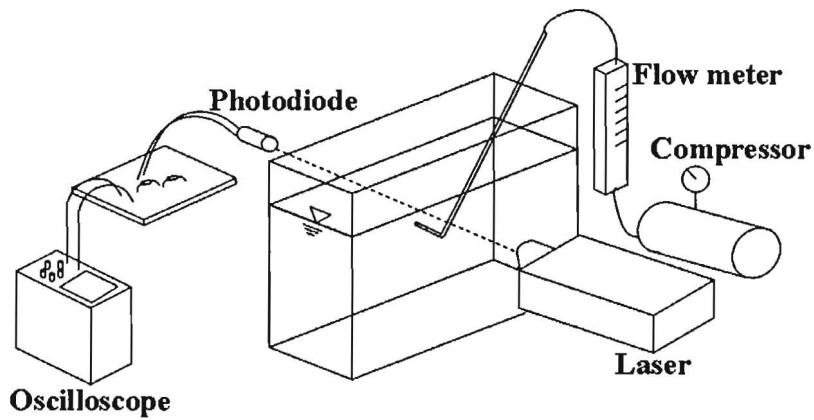
### 3.4 ผลการทดลองกับการไหลสองเฟส

การศึกษาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเอาระบบวัดที่ได้พัฒนาขึ้นมาลองใช้วัดรัศมีความโค้งของฟองอากาศจริง โดยของเหลวที่ใช้คือกลีเซอรินซึ่งมีค่า reflective index เท่ากับ PDMS ที่เป็นโพลีเมอร์ที่ใช้ทำแบบจำลองฟองอากาศ โดยอากาศจากคอมเพรสเซอร์ถูกปล่อยออกจากท่อนอสซิลที่เอียงทำมุม 45 องศากับแนวระดับ และปล่อยให้ลอยขึ้นในแนวตั้ง สำหรับเหตุผลของการใช้กลีเซอรินเพราะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง และทำให้การเคลื่อนที่ของฟองอากาศไม่เร็วเกินกว่าความสามารถของกล้องวีดีโอแบบธรรมดาจะจับการเคลื่อนที่ได้ทัน

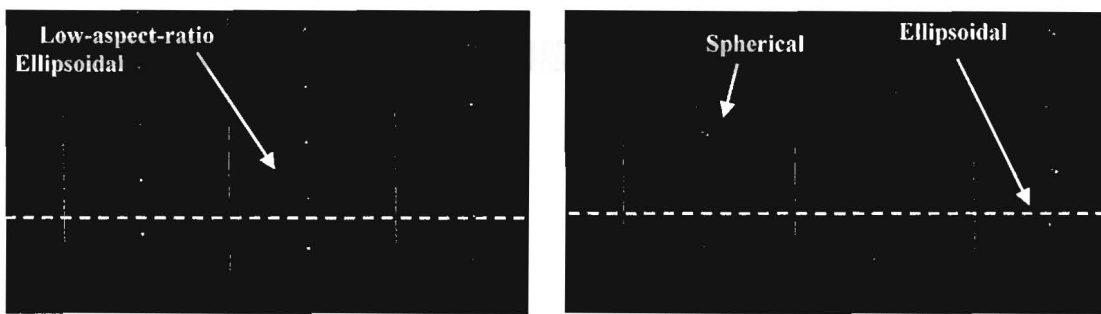
ชุดทดลองประกอบไปด้วยอ่างของเหลวทำจากกระจกหนา 4 ม.ม. มีขนาดภายในเป็น 10.3 x 20.5 x 17.0 ล.บ. เซนติเมตร ท่อนอสซิลทำจากสแตนเลสมีข้องอ 90 องศา และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 ม.ม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 ม.ม. โดยจะจุ่มให้ปลายของนอสซิลต่ำกว่าระดับผิวของเหลว 6 เซนติเมตร จากอีกด้านหนึ่งของนอสซิลต่อด้วยสายอากาศที่ต่อกับคอมเพรสเซอร์ มีวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ในการทดลองนี้ได้จัดให้ระยะห่างระหว่างโฟโต้ไดโอดกับเลเซอร์ห่างกัน 20 ซม. ผู้ทดลองได้จัดให้ลำเลเซอร์อยู่เหนือกว่าปากนอสซิลเท่ากับ 6.7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในนอสซิล โดยแผนภาพของชุดทดลองที่ใช้โฟโต้ไดโอดได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-28

นอกเหนือจากการใช้ระบบเลเซอร์ไดโอดวัดการไหลแล้ว ยังมีกล้องวีดีโอ และแหล่งกำเนิดแสงเพื่อใช้ในการถ่ายภาพ ซึ่งใช้เทคนิค back-light illumination ด้วยอัตราความเร็ว 25 เฟรมต่อวินาที ด้วยการอาศัยภาพถ่ายนี้ จะได้ข้อมูลของความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ ด้วยโดยการวัดระยะของฟองเดียวกันในคนละเฟรมที่ต่อเนื่องกันและหารด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการถ่ายรูปทั้งสอง (0.04 วินาที) อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของการทดลองนี้จะค่อนข้างต่ำเพราะความเร็วของการถ่ายรูปไม่เร็วพอเมื่อเทียบกับความเร็วของการไหล

การทดลองนี้ใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงรัศมีของฟองอากาศด้วยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศจากปากนอสซิล อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัด 2 ประการคือ ฟองที่ไหลออกมามีลักษณะเป็นวงรี และรัศมีความโค้งของฟองอากาศก็เปลี่ยนแปลงได้ลำบาก ดังแสดงในรูปที่ 3-29 ซึ่งประกอบด้วยฟองอากาศที่มีรูปร่างทรงวงรี (ลูกรี) วงรีที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างน้อย และทรงกลม โดยแต่ละรูปแบบการไหลเกิดจากสภาวะการทดลอง และมีขนาดของฟองอากาศรัศมีความโค้ง และความเร็วของการไหลของฟอง ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 3-6



รูปที่ 3-28 แผนภาพแสดงชุดทดลองที่ประกอบด้วยชุดกำเนิดฟองอากาศ และโฟโต้ไดโอด



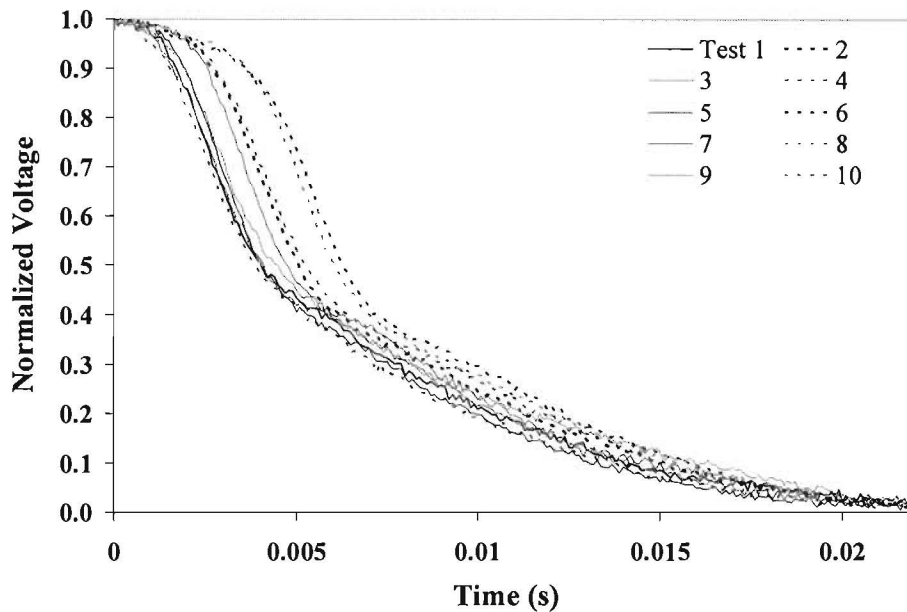
รูปที่ 3-29 ภาพถ่ายลักษณะของฟองอากาศ (ก) วงรีที่มีอัตราส่วนน้อย, (ข) วงรีและทรงกลม

ตารางที่ 3-6 สภาวะการทดลองและรูปร่างฟองอากาศที่เกิดขึ้น

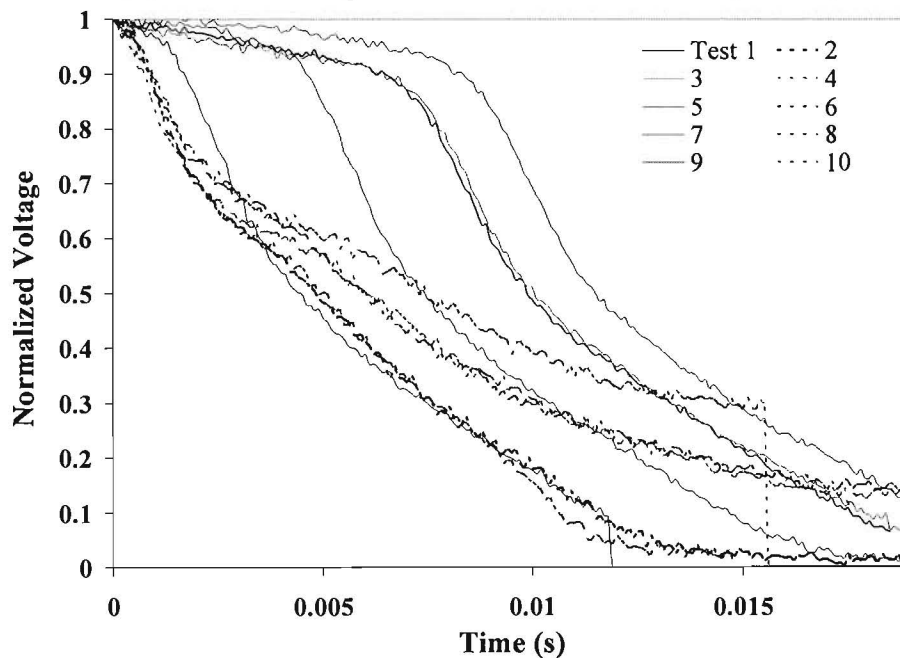
สภาวะที่	อัตราการไหลของอากาศ (l/m)	ความเร็วฟองเฉลี่ย (m/s)	รูปร่างฟอง	รัศมีความโค้งที่ปลายยอดของฟอง (ม.ม.)
1	0.24	0.18	วงรีที่มีอัตราส่วนน้อย	2.5
2	0.44	0.20	วงรี	0.8
3	0.44	0.19	ทรงกลม	6.2

รูปที่ 3-30 ก และ ข แสดงสัญญาณความต่างศักย์ที่วัดด้วยความถี่ 10 kHz ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อฟองอากาศเคลื่อนผ่านลำเลเซอร์เทียบกับเวลาสำหรับทั้งสามกรณี และในแต่ละกรณีแสดงผลการทดลองสำหรับ 10 ฟองอากาศ โดยค่าความต่างศักย์นี้จะแสดงเป็นอัตราส่วนกับค่าความต่างศักย์ของวงจรก่อนที่ฟองจะเคลื่อนที่ตัดลำเลเซอร์ ดังนั้นจากกราฟค่าเท่ากับ 1 หมายถึงไม่มีฟองอากาศ และเมื่อค่าเริ่มลดลงหมายถึงฟองอากาศเริ่มเคลื่อนที่ตัดลำเลเซอร์ สำหรับจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายจะนิยามคล้ายคลึงกับการสอบเทียบแต่เปลี่ยนค่าขอบเขตให้มากขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากสัญญาณที่อ่านได้มีความแปรปรวนมากกว่า โดยจุดเริ่มต้นจะดูจากการเปลี่ยนแปลงที่มีมากกว่า 5% ของสัญญาณเริ่มต้น และสำหรับจุดสิ้นสุดก็คิดเป็น 5% ของสัญญาณเริ่มต้นเช่นกัน

รูปที่ 3-30 ก แสดงสัญญาณความต่างศักย์จากการไหลตามลักษณะในรูปที่ 3-29ก ซึ่ง ฟองอากาศแต่ละลูกจะแยกออกจากกันชัดเจนและแต่ละลูกก็มีลักษณะเหมือนกันคือเป็นฟอง อากาศแบบวงรีที่มีอัตราส่วนน้อย และลักษณะสัญญาณความต่างศักย์ก็ไม่ค่อยแปรปรวนมากนัก



(ก) ฟองอากาศที่มีรูปร่างแบบวงรีที่มีอัตราส่วนน้อย (ทั้งเลขคู่และคี่)



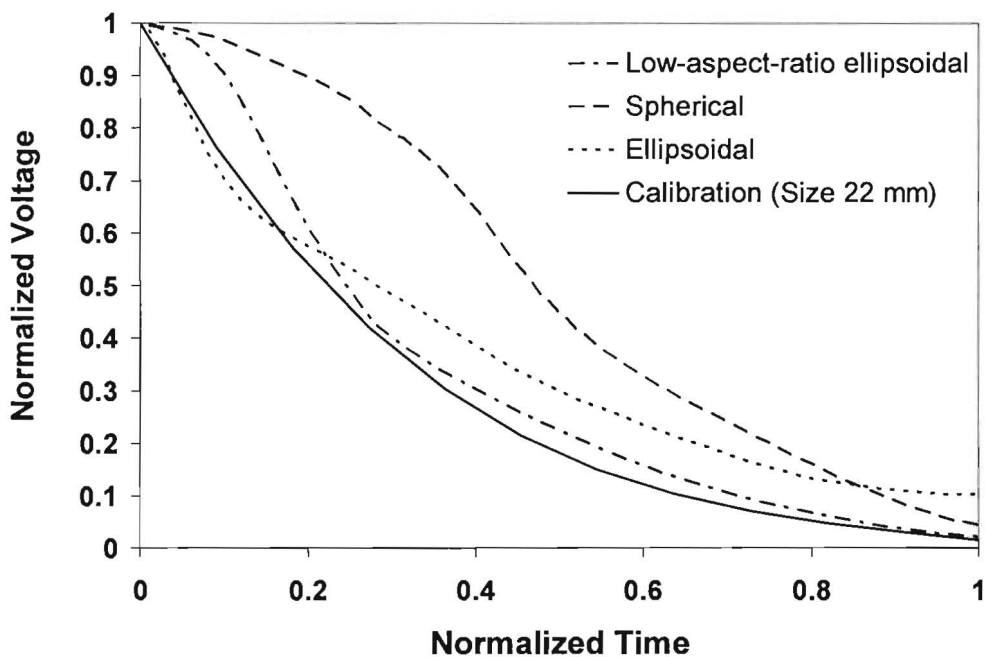
(ข) ฟองอากาศที่มีรูปร่างแบบวงรี (เลขคู่) และแบบทรงกลม (เลขคี่)

รูปที่ 3-30 ผลการทดลองวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบตามเวลาสำหรับการทดลอง

เมื่อพิจารณาสัญญาณความต่างศักย์ของการไหลในรูปที่ 3-30ข จะพบว่าการสลับ ลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ซึ่งก็สอดคล้องกับรูปถ่ายที่จะเกิดฟองอากาศแบบวงรีและ วงกลมสลับกัน (ตามรูปที่ 3-29ข) โดยมีความแปรปรวนระหว่างแต่ละฟองค่อนข้างมาก

นอกจากนั้น สัญญาณความต่างศักย์จะไม่ลดลงจนใกล้ศูนย์ในบางกรณีซึ่งอาจจะเกิดจากการที่ฟองอากาศเคลื่อนที่เบี่ยงออกไปจากแนวของลำเลเซอร์

รูปที่ 3-31 แสดงผลของการนำสัญญาณในกราฟรูปที่ 3-30 มาหาค่าเฉลี่ย และนำสัญญาณความต่างศักย์มาเทียบกับ normalized time ของทุกกรณี และนำไปเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบกรณีฟองอากาศขนาด 22 ม.ม. (รัศมีความโค้ง 11 ม.ม.) กรณีการสอบเทียบถือว่าความเร็วคงที่ดังนั้น ค่า normalized distance จะแปรตามค่า normalized time โดยตรง จึงนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของการไหลจริงได้ จากกราฟพบว่ามีความแตกต่างเล็กน้อย ยกเว้นกรณีที่เป็นฟองอากาศแบบทรงกลมที่มีความแตกต่างค่อนข้างมากกว่ากรณีอื่น ๆ ซึ่งอาจจะเกิดจากการไหลจริงมีความเร็วของการเคลื่อนที่อยู่ด้วย โดยเฉพาะช่วงที่ฟองอากาศเริ่มลอยตัวขึ้น น่าจะมีความเร็วค่อนข้างสูงมาก



รูปที่ 3-31 ผลการทดลองแสดงแนวโน้มของค่า Normalized voltage ที่ลดลงไปตาม Normalized time (สำหรับการสอบเทียบคิดว่าเป็นกรณีความเร็วคงที่ ดังนั้น Normalized time จะเท่ากับ Normalized distance)

ในส่วนต่อไปจะแสดงให้เห็นข้อจำกัดของการนำอุปกรณ์ไปวัดการไหลจริง โดยเริ่มจากวิธีการหาค่าความเร็วจากผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการไหลจริง โดยมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากการหาค่าระยะเวลาที่สัญญาณความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์จากผลการทดลองวัดสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า หลังจากนั้นหารรัศมีความโค้งของยอดฟองอากาศจากการถ่ายรูปขนาดของฟองอากาศแล้วนำมาคำนวณหาระยะที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์จากผลการสอบเทียบ (รูปที่ 3-21) แล้วนำมาคำนวณหาความเร็วของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ

สำหรับการวัดรัศมีความโค้งก็นำเอาค่าความเร็วฟองอากาศจากการถ่ายรูปมาใช้ประกอบ ซึ่งด้วยหลักการเดียวกันกับที่ได้กล่าวไปแล้วจะสามารถคำนวณหารัศมีความโค้งของฟองอากาศ

ได้ หลังจากลองทำทั้งสองวิธีแล้วจึงนำผลมาเปรียบเทียบกับความเร็วและรัศมีความโค้งของ ฟองอากาศที่ได้จากการบันทึกภาพถ่าย และผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ในตารางที่ 3-7

อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบนี้ก็ค่อนข้างจะหยاب เพราะการประมาณค่าความเร็วของการไหลและขนาดของฟองที่ได้จากการทดลองก็มีความผิดพลาด โดยค่าความเร็วจะเป็นความเร็วเฉลี่ยในช่วง 0.04 วินาที และขนาดของรัศมีฟองอากาศที่วัดจากภาพถ่ายก็อาจจะไม่ใช่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ฟองอากาศติดกับล้าเลเซอร์

ตารางที่ 3-7 การเปรียบเทียบความเร็วฟองระหว่างการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าและการถ่ายภาพ

สภาวะที่	ความเร็วจากการถ่ายภาพ (m/s)	รัศมีความโค้งจากการถ่ายภาพ (ม.ม.)	เวลาที่ความต่างศักย์ลดลงใกล้ศูนย์ (วินาที)	ความเร็วจากการวัดความต่างศักย์ (m/s)	รัศมีความโค้งจากการวัดความต่างศักย์ (ม.ม.)
1	0.18	2.5	0.02	0.05	0.09
2	0.20	0.8	0.012	0.13	0.25
3	0.19	6.2	0.018	0.04	0.1

จากการทดลอง พบว่าค่าความเร็วของฟองอากาศที่ได้มาจากการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า จะมีความแตกต่าง 4 - 5 เท่าจากค่าความเร็วที่มาจากภาพถ่าย ในขณะที่รัศมีความโค้งของฟองอากาศจะแตกต่างกันหลายเท่า โดยความแตกต่างจะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นกับกรณีไป ซึ่งการทดลองนี้เป็นเพียงการแสดงให้เห็นหลักการพื้นฐานในการวัดค่าความเร็วของฟองอากาศ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วรูปร่างฟองอากาศอาจจะไม่ได้เป็นทรงกลมและอาจมีการเปลี่ยนแปลงรัศมีความโค้งที่ยอดฟองอยู่ตลอดเวลา รวมทั้งการไหลยังมีความเร็วไม่คงที่ ดังนั้นการออกแบบการทดลองสำหรับการพิสูจน์หลักการวัดที่เหมาะสมมากขึ้นจึงมีความจำเป็น เช่น รูปร่างฟองที่ควบคุมได้ และการวัดความเร็วที่แม่นยำขึ้น เพื่อที่จะศึกษาผลในส่วนเหล่านั้นต่อไป

### 3.5 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด และทำการสอบเทียบกับรัศมีความโค้งของฟองอากาศขนาดต่าง ๆ ซึ่งในการสอบเทียบนี้จะต้องสร้างแบบจำลองฟองอากาศขึ้นมาจาก PDMS ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ของการสอบเทียบแบบหนึ่ง หลังจากนั้น จึงทำการทดสอบหาการตอบสนองของอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดสำหรับรัศมีความโค้งต่าง ๆ โดยในการทดลองนี้เลือกใช้เลเซอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 ม.ม. และฟองอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22, 16, 13, 8, และ 6 ม.ม.

จากผลการสอบเทียบ ทำให้ทราบว่าทราบระยะจากปลายยอดฟองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงจนใกล้ศูนย์ โดยในการศึกษานี้ ระยะดังกล่าวจะแปรผกผันกับขนาดของรัศมีความโค้งของผิวฟองอากาศซึ่งสามารถสร้างเป็นสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างระยะดังกล่าวและรัศมีความโค้งของผิวฟองอากาศได้ หลังจากนั้นหากนำเอากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่าง

ศักย์ไฟฟ้าที่ระยะจากยอดฟองต่าง ๆ มาทำ normalization ด้วยความต่างศักย์ขาออกจากวงจร เมื่อลำเลเซอร์อยู่เหนือยอดฟองสำหรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และด้วยระยะทั้งหมดที่ความต่างศักย์ลดลงจนเป็นศูนย์สำหรับระยะทางแล้ว ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้ของทุกขนาดฟองอากาศจะสอดคล้องกัน ดังนั้นหากนำเอาอุปกรณ์ไปวัดในการไหลจริง ๆ สำหรับกรณีที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ลักษณะการลดลงของสัญญาณของทุกขนาดฟองอากาศก็จะสอดคล้องกันหมด (จากผลการทดลองจริง ที่ไม่มีการวัดตำแหน่งเปรียบเทียบ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลา ซึ่งหากความเร็วคงที่จะทำให้เวลาและระยะทางแปรผันโดยตรง)

ดังนั้นในเบื้องต้นนี้ ผู้วิจัยคิดว่าจะสามารถใช้อุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดแบบลำแสงเดี่ยวในการวัดการไหลจริงได้ดังนี้คือ การตรวจสอบว่าขนาดฟอง (อัตราส่วนระหว่างขนาดฟองอากาศต่อขนาดลำแสงเลเซอร์) อยู่ในช่วงที่ทำการสอบเทียบได้ โดยดูจากข้อมูลความต่างศักย์ที่ลดลงตามเวลาที่ถูก normalized ด้วยช่วงเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์ ว่าสอดคล้องเป็นแนวโน้มเดียวกันหรือไม่ หากผลการวัดสอดคล้องแล้ว จะสามารถใช้ตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับการไหลได้ หากแนวโน้มการลดลงของค่าความต่างศักย์มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามก็อาจจะเป็นไปได้ 2 ลักษณะคือ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดฟองหรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลในลักษณะที่มีความเร่งไม่เท่ากับศูนย์ หรือมีการเปลี่ยนแปลงทั้งสองอย่างพร้อมกัน

นอกจากนั้น สำหรับการไหลที่รูขนาดฟองแน่นอน เช่น การไหลในท่อ เมื่อใช้เลเซอร์ลำเดี่ยววัด อาจจะทราบความเร็วของไหลได้โดยดูจากเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ และสำหรับการไหลที่รูความเร็วฟองแน่นอน จะสามารถทราบขนาดของฟองอากาศได้ด้วยหลักการเดียวกัน อย่างไรก็ตามข้อสันนิษฐานเหล่านี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขว่าความเร็วของการไหลของฟองอากาศต้องคงที่

ในส่วนการอธิบายว่าเหตุใดการลดลงของของสัญญาณความต่างศักย์จึงมีแนวโน้มตามที่ได้จากการทดลอง ผู้วิจัยจึงทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับเรื่องแสงขึ้นมา และลองเปรียบเทียบผลจากการศึกษาทั้งสองส่วน จากผลการเปรียบเทียบพบว่ากลไกหนึ่งที่น่าจะมีผลโดยตรงคือการที่ปลายยอดของฟองอากาศเคลื่อนที่บังลำเลเซอร์ที่ไปตกกระทบบนไดโอด สำหรับเลเซอร์ที่ไปตกกระทบที่ผิวฟองจะสะท้อนออกไปในทิศทางอื่น และมีพื้นที่ของเลเซอร์ส่วนหนึ่งที่ยังพุ่งไปตกบนโฟโตไดโอด โดยลักษณะการลดลงของพื้นที่ส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานที่ไดโอดได้รับ และแนวโน้มของการลดลงของพื้นที่นี้จะแตกต่างกันสำหรับฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้งต่างๆ และมีลักษณะการลดลงสอดคล้องกับลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์จากผลการทดลอง

ในส่วนสุดท้าย ผู้วิจัยได้ลองสร้างการไหลของฟองอากาศจริงขึ้นมา แล้วลองใช้อุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดวัดเพื่อพิสูจน์แนวคิดเกี่ยวกับการใช้วัดรัศมีความโค้งรวมทั้งความเร็วของการไหล หากทราบพารามิเตอร์อีกอันหนึ่งอยู่แล้ว ผลการทดลองพบว่าผลการวัดผิดไปจากพารามิเตอร์ของการไหลจริงมาก อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวอาจจะยังควบคุมขนาดของฟองและความเร็วได้ไม่ดีนัก



## บทที่ 4

### สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการพัฒนาอุปกรณ์วัดสำหรับการตรวจสอบคุณสมบัติของการไหลสองเฟส โดยเทคนิคทั้งสองคือ Wire Mesh Tomography และเลเซอร์ไดโอด ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือ การพัฒนาเทคนิค Wire Mesh Tomography และโปรแกรมการคำนวณประมวลผล เพื่อวัดอัตราสวนฟองก๊าซ ความเร็วฟองก๊าซ และขนาดฟองก๊าซ และการพัฒนาเทคนิคเลเซอร์ไดโอดเพื่อวัดรัศมีความโค้งที่ตำแหน่งปลายยอดของฟองก๊าซ

อุปกรณ์วัดแบบแรกคือ Wire Mesh Tomography (WMT) ที่สามารถวัดพารามิเตอร์ของการไหลสองเฟสที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลาทั้งพื้นที่หน้าตัดในเวลาเดียวกันได้ โดยเซนเซอร์อาศัยหลักการที่การนำไฟฟ้าของเหลวและก๊าซไม่เท่ากัน ทำให้สามารถแยกได้ว่ามีของเหลวหรือก๊าซอยู่ในบริเวณการวัดเป็นสัดส่วนอย่างไร อุปกรณ์การวัด WMT นี้ประกอบด้วย 2 ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ WMS (Wire mesh sensor) และ data acquisition ลักษณะทางกายภาพของ WMS มีขนาดหน้าตัด  $20 \times 100 \text{ mm}^2$  ประกอบด้วย 3 ชั้นของตาข่ายลวด โดยชั้นตรงกลางจะทำหน้าที่เป็น transmitter plane ประกอบด้วย เส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.1 \text{ mm}$  จำนวน 8 เส้นขนานกัน ชั้นบนและชั้นล่างทำหน้าที่เป็น receiver plane ประกอบด้วยเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.1 \text{ mm}$  จำนวน 32 เส้นขนานกัน ทั้ง 3 ชั้นของตาข่ายจะวางตั้งฉากกัน โดยมีระยะห่าง  $1.5 \text{ mm}$  ตามทิศทางของการไหล ลักษณะ 3 ชั้นของตาข่ายลวดทำให้เกิดชั้น measuring volume 2 ชั้น ประกอบด้วย upstream measuring plane ซึ่งวัดก่อนกึ่งกลาง WMS และ downstream measuring plane ซึ่งการวัดหลังกึ่งกลาง WMS จากจำนวนเส้นลวดทั้ง 3 ชั้น ตามทิศทางของการไหลของของไหลจะได้ว่า spatial resolution ของ WMS มีค่า  $2.22 \times 3.03 \times 1.5 \text{ mm}^3$  หรือคิดเป็นฟองก๊าซทรงกลมขนาดเล็กที่สุดที่วัดได้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2.68 \text{ mm}$

ในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ที่สำคัญจากข้อมูลที่บันทึกได้จาก WMT และเปรียบเทียบผลกับข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพสำหรับสภาวะการไหลต่าง ๆ โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญประกอบด้วย local void fraction ความเร็วของฟองก๊าซและขนาดฟองก๊าซ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว พบว่า ข้อมูล void fraction เฉลี่ยทั้งปริมาตรที่สนใจในช่วง void fraction ไม่เกิน 9% มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง  $\pm 20\%$  ความเร็วฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งปริมาตรที่สนใจในช่วงระหว่าง  $250\text{-}350 \text{ mm/s}$  มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง  $\pm 10\%$  และขนาดฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งปริมาตรที่สนใจในช่วงขนาดฟองก๊าซระหว่าง  $2\text{-}8 \text{ mm}$  มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง  $\pm 20\%$

นอกจากนั้น การกระจายตัวของขนาดฟองก๊าซระหว่างวิธีการทั้งสองก็ถูกนำมาเปรียบเทียบกันอีกด้วย ซึ่งการกระจายตัวของขนาดฟองก๊าซจะมีความแตกต่างกันพอสมควรในบางสภาวะการไหล ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล void fraction ขนาดฟองก๊าซ และการกระจายตัวของฟองก๊าซที่ได้จากวิธีการวัดมีสาเหตุหนึ่งมาจากปัญหาของการเลือกค่า threshold ที่เหมาะสมในการแบ่งระหว่างฟองก๊าซและของเหลว และการสมมติรูปร่างฟองก๊าซในการคำนวณที่

ต่างกับการไหลจริง จึงทำให้เกิดความแตกต่างของข้อมูลฟองก๊าซส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ที่กล่าวข้างต้น

นอกจากนั้น WMS ยังเป็นเครื่องมือที่ขวางเข้าไปในการไหลสองเฟส จึงมีผลกระทบกับฟองก๊าซอย่างแน่นอน ในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาผลกระทบที่เห็นเด่นชัด คือการลดลงของความเร็วของฟองก๊าซ และการแตกของฟองก๊าซหลังจากผ่าน WMS อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสัญญาณที่ WMT พบว่าการแตกของฟองก๊าซและการลดลงของความเร็วฟองก๊าซนั้นไม่มีผลกับสัญญาณที่บันทึกได้มากนักในช่วงคุณสมบัติของการไหลที่พิจารณาอยู่

สำหรับอุปกรณ์วัดตัวที่สองคือ เลเซอร์ไดโอด โดยอาศัยหลักการที่แสงจะหักเหไปเมื่อผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางคนละชนิดที่มีดัชนีหักเหทางแสงไม่เท่ากันและปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้า ขาออกจากวงจรวัดไดโอดจะแปรผันตามปริมาณพลังงานของเลเซอร์ที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดพร้อมกับทดสอบให้ทราบถึงผลของส่วนประกอบต่าง ๆ ต่อสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ และทำการสอบเทียบอุปกรณ์กับรัศมีความโค้งของฟองอากาศขนาดต่าง ๆ ซึ่งในการสอบเทียบนี้ได้สร้างแบบจำลองฟองอากาศขึ้นมาจาก Polydimethylsiloxane (PDMS) ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ของการสอบเทียบแบบหนึ่ง หลังจากนั้น จึงทำการทดสอบหาการตอบสนองของอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดสำหรับรัศมีความโค้งต่าง ๆ โดยในการทดลองนี้เลือกใช้เลเซอร์ขนาด 10 mW ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มม. และฟองอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22, 16, 13, 8, และ 6 มม. และมี spatial resolution ของการตรวจสอบตำแหน่งประมาณ 0.08 มม. และขนาดสัญญาณไฟฟ้าต่อสัญญาณรบกวนประมาณ 190 เท่า

จากผลการสอบเทียบ ทำให้ทราบวาระยะจากปลายยอดฟองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงจนใกล้ศูนย์ โดยในการศึกษานี้ระยะดังกล่าวจะแปรผกผันกับขนาดของรัศมีความโค้งของผิวฟองอากาศซึ่งสามารถสร้างเป็นสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างระยะดังกล่าวและรัศมีความโค้งของผิวฟองอากาศได้ หลังจากนั้นหากนำเอากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะจากยอดฟองต่าง ๆ มาทำ normalization ด้วยความต่างศักย์ขณะที่เราเลเซอร์อยู่เหนือยอดฟองสำหรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และด้วยระยะทั้งหมดที่ความต่างศักย์ลดลงจนเป็นศูนย์สำหรับระยะทางแล้ว ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้ของทุกขนาดฟองอากาศจะสอดคล้องกัน ดังนั้นหากนำเอาอุปกรณ์ไปวัดในการไหลจริง ๆ สำหรับกรณีที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ลักษณะการลดลงของสัญญาณของทุกขนาดฟองอากาศก็จะสอดคล้องกันหมด (จากผลการทดลองจริง ที่ไม่มีการวัดตำแหน่งเปรียบเทียบ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลา ซึ่งหากความเร็วคงที่จะทำให้เวลาและระยะทางแปรผันโดยตรง)

ในส่วนการอธิบายว่าเหตุใดการลดลงของของสัญญาณความต่างศักย์จึงมีแนวโน้มตามที่ได้จากการทดลอง งานวิจัยนี้จึงทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับเรื่องแสงขึ้นมา และลองเปรียบเทียบผลจากการศึกษาทั้งจากการทดลองสอบเทียบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้อาจจะสรุปได้ว่ากลไกหนึ่งที่น่าจะมีผลโดยตรงคือการที่ปลายยอดของฟองอากาศเคลื่อนที่บ่งล้าเลเซอร์ที่ไปตกกระทบบนไดโอด และเลเซอร์ที่ไปตกกระทบที่ผิวฟองจะสะท้อนออกไปในทิศทางอื่น โดยมีเลเซอร์ที่ยังไม่ถูกฟองอากาศบังอยู่บริเวณหนึ่งที่ไม่ตกกระทบบนโฟโตไดโอด เมื่อรัศมี

ความโค้งของฟองอากาศไม่เท่ากันสำหรับขนาดเลเซอร์หนึ่งๆแล้ว จะมีแนวโน้มของการลดลงของพื้นที่ในบริเวณที่เลเซอร์ไม่ถูกบังสอดคล้องกับลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ที่ได้จากผลการทดลอง

ในส่วนสุดท้าย การไหลของฟองอากาศจริงถูกจำลองขึ้นและตรวจสอบโดยใช้เทคนิคในการถ่ายภาพในการตรวจสอบทั้งรัศมีความโค้งและความเร็วของการไหลของฟองอากาศไว้ แล้วลองใช้อุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดวัดเพื่อพิสูจน์แนวคิดเกี่ยวกับการใช้รัศมีความโค้งรวมทั้งความเร็วของการไหลหากทราบพารามิเตอร์อีกอันหนึ่งอยู่แล้ว พบว่าผลการวัดผิดไปจากพารามิเตอร์ของการไหลจริงที่ตรวจสอบจากการถ่ายภาพมาก อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวอาจจะยังควบคุมขนาดของฟองให้คงที่และวัดความเร็วได้ไม่ได้นัก

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้มีความก้าวหน้าในระดับหนึ่ง ถึงแม้จะทำให้ทราบเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่สำคัญของอุปกรณ์วัดทั้งสองแบบที่อาจจะส่งผลต่อผลการวัดได้ รวมทั้งความรู้เกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการไหลเองในบางส่วนก็สามารถสรุปได้จากผลการทดลองในเบื้องต้นนี้ อย่างไรก็ตาม การไหลสองเฟสเป็นการไหลที่ซับซ้อนมาก การศึกษาเพิ่มเติมและการพัฒนาการวัดและการสอบเทียบให้มีความแม่นยำสูงขึ้นก็ยังคงมีความจำเป็นอยู่ ซึ่งเป็นสิ่งที่ท้าทายต่อไปในอนาคต

## เอกสารอ้างอิง

D.C. Colin, and R.E. Synovec, "Measuring the transverse concentration gradient between adjacent laminar flows in a microfluidic device by a laser-based refractive index gradient detector," *Talanta* 58, pp. 551-560 (2002).

N. Fuangworawong, H. Kikura, M. Aritomi, and T. Komeno, "Tomographic imaging of counter-current bubbly flow by wire mesh tomography," *J. Chemical Engineering* 130, no. 2-3, pp. 111-118 (2007).

Y. Hassan, "PIV measurements and analysis of multiphase bubbly flows," *10<sup>th</sup> Int. Sym. on Flow Visualization*, Kyoto, Paper No. F0455 (2002).

B., Hu, H.M., Yang, and G.F., Hewitt, "Measurement of bubble size distribution using a flying optical probe technique : Application in the highly turbulent region above a distillation plate," *Chemical Engineering Sci.*, Vol. 62, pp.2652 – 2662 (2007).

O.C. Jones, and J.M. Delhaye, "Transient and statistical measurement methods for two-phase flows," *Int. J. Multiphase Flow* 3, pp.89-116 (1976).

Y., Kikutani, K., Mawatari, K., Katayama, M., Tokeshi, T., Fukuzawa, M., Kitaoka, T., and Kitamori, "Flowing thermal lens micro-flow velocimeter," *Sensors and Actuators B* Vol.133, pp.91-96 (2008).

S. Levy, "Two phase flow in complex system," *McGraw-Hill* (1999).

M. Misawa, N. Ichikawa, and M. Akai, "Measurement of dynamic interface structure of slug flow in simplified rod bundles using a fast X-ray CT scanner," *7<sup>th</sup> Proc. Int. Conf. on Nuclear Engineering*, Tokyo, Paper No.7099 (1999).

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

C.L., Ong, J.R., and Thome, "Flow boiling heat transfer of R134a, R236fa and R245fa in a horizontal 1.030 mm circular channel," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 33, pp.651-663 (2009).

H.M. Prasser, M. Misawa, and I. Tiseanu, "Comparison between wire-mesh sensor and ultra-fast X-ray tomography for air-water flow in a vertical pipe," *Flow Measurement and Instrumentation* 16, No.2-3, pp.73-83 (2005).

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

H.M. Prasser, D. Scholz, and C. Zippe, "Bubble size measurement using wire-mesh sensors," *Flow Measurement and Instrumentation* 12, 299-312 (2001).

R. Revellin, V. Dupont, T. Ursenbacher, J.R. Thome, and I. Zun, "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* 32, pp.755-774 (2006).

S. Richter, M. Aritomi, H.M. Prasser, and R. Hample, "Approach towards spatial phase reconstruction in transient bubble flow using wire mesh sensor," *Int. J. Heat and Mass transfer* 45, pp.1063-1075 (2002).

G. Rozzoni, "Principles and Applications of electrical engineering," *McGraw-hill*.

A. Serizawa, I. Kataoka, Michiyoski, "Turbulent structure of air-water bubbly flow I: Measuring techniques," *Int. J. Multiphase Flow* 2, no.3, pp.221-223 (1975).

Tong and Tang, "Boiling Heat Transfer and Two-phase flow 2 edition," *Taylor & Francis* (1997).

W. Wangjiraniran, M. Aritomi, H. Kikura, Y. Motegi, and H.M. Prasser, "A study of non-symmetric air water flow using wire mesh sensor," *Exp. Thermal Fluid Sci.* 29, pp.315-322 (2005).

## ประวัตินักวิจัย

นาย อลงกรณ์ พิมพ์พิณ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีและปริญญาโท จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2539 และ พ.ศ. 2542 ตามลำดับ หลังจากนั้น เขาได้ไปศึกษาปริญญาเอกที่มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น และจบการศึกษาในปี พ.ศ. 2548 หลังจากจบการศึกษาได้กลับมาทำงานเป็นอาจารย์ประจำที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจนถึงปัจจุบัน เขามีผลงานวิจัยทางด้านไมโครเซนเซอร์และแอคชูเอเตอร์ และเทคนิคการวัดการไหลสองเฟสอย่างต่อเนื่อง

นาย ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์ 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 หลังจากจบการศึกษาเขาได้กลับมาทำงานเป็นอาจารย์ประจำที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจนถึงปัจจุบัน เขามีความสนใจและสร้างผลงานวิจัยทางด้านเทคนิคการวัดการไหลสองเฟส และการประยุกต์ความรู้ทางเทอโมไดนามิกส์ในงานด้านการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก