

## บทที่ 3

### เลเซอร์ไดโอด

การศึกษาในส่วนนี้จะประกอบด้วยการสร้างชุดเครื่องมือวัดเลเซอร์และวงจรไดโอด และชุดทดลองในส่วนของการสร้างการไหลของอากาศและแบบจำลองของอากาศสำหรับการทดสอบเทียบ เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณที่ออกมาจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดและขนาดของรัศมี ความโค้งที่ปลายยอดของอากาศ ซึ่งเนื้อหาจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ การหาความสัมพันธ์ ด้วยการทดลองใช้อุปกรณ์วัดกับแบบจำลองของอากาศ การหาความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ และในส่วนสุดท้ายเป็นการทดลองนำอุปกรณ์วัดไปใช้ทดลองจริง

หลักการของเครื่องมือวัดเลเซอร์ไดโอดคือ วงจรไดโอดจะยอมให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เมื่อมีแสงเลเซอร์ตกกระทบบนเซนเซอร์ของไดโอด และกระแสไฟฟ้านั้นเมื่อไหลผ่านตัวต้านทาน ในวงจรจะทำให้มีความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทานขึ้น สำหรับการใช้งานทั่วไปจะยิงแสงเลเซอร์ ทะลุชุดทดลองที่มีผนังโปร่งใส ในฝั่งตรงกันข้ามของชุดทดลองจะมีไดโอดตั้งรับแสงเลเซอร์ไว้ เมื่อมีฟองก๊าซไหลมาขวางการไหลลำแสงเลเซอร์จะเบี่ยงเบนทิศทางไปและทำให้กระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถตรวจสอบว่ามีฟองก๊าซไหลมาตำแหน่ง ที่ติดตั้งเลเซอร์ไดโอดไว้ได้ซึ่งเป็นหลักการของงานวิจัยใน Kikutani et al. (2008) และ Ong and Thome (2009) ในการศึกษาี้ มีความสนใจว่าการลดลงของความเข้มแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบน ไดโอดซึ่งเป็นฟังก์ชันของการหักเหของแสงจะมีความสัมพันธ์อย่างไรกับรัศมีความโค้งของฟอง ก๊าซ

#### 3.1 ความรู้พื้นฐาน

ในการทำงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานหลายด้าน เช่น ปรากฏการณ์ของแสงที่เกี่ยวข้อง การหักเหของแสงในกรณีที่แสงเคลื่อนผ่านตัวกลางที่ดัชนีหักเหต่างกัน การสะท้อนและการดูดกลืนของแสงขณะผ่านตัวกลาง และในส่วนสุดท้ายก็จะกล่าวถึงคุณสมบัติของโฟโต้ไดโอด ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ใช้ว่ามีคุณสมบัติอย่างไรบ้างและมีพารามิเตอร์ใดที่ควรพิจารณา ก่อนเลือกโฟโต้ไดโอดให้เหมาะสมกับการทดลอง โดยรายละเอียดต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 ปรากฏการณ์ของแสงขณะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

การเคลื่อนที่ของแสงผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกันจะมีปรากฏการณ์ทางแสงหลายอย่างเกิดขึ้น ซึ่งตัวอย่างดังต่อไปนี้นี้เป็นแค่ส่วนหนึ่งของปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นได้

- การสะท้อน (reflection) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นทั้งหมดหรือบางส่วนขึ้นอยู่กับลักษณะตัวกลางที่แสงเคลื่อนที่ผ่าน การสะท้อนแบ่งออกเป็นสองประเภทตามการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง คือ Specular reflection เป็นการสะท้อนที่สามารถคำนวณหาทิศทางของการสะท้อนได้อย่างแน่นอน เช่น การสะท้อนของรังสีของแสงบน

กระจก สำหรับอีกประเภทหนึ่งคือ Diffusion reflection เป็นการสะท้อนที่ไม่สามารถคำนวณทิศทางการสะท้อนได้ไม่แน่นอน เช่น การสะท้อนของรังสีของแสงบนตัวกลางขรุขระ

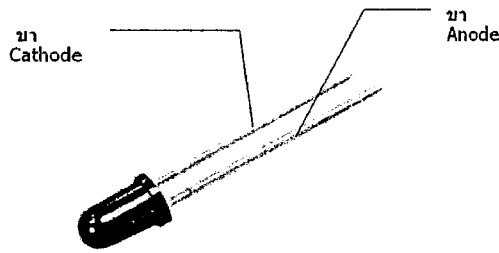
- การหักเห (refraction) ถูกนิยามเป็นการเบี่ยงเบนไปของรังสีของแสงไปจากทิศทางเดิม หลังจากเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน ซึ่งมุมที่ลำแสงเบี่ยงเบนไปขึ้นกับค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงเคลื่อนที่ผ่าน และค่าดัชนีหักเหนี้เป็นฟังก์ชันทั้งความยาวคลื่นแสงและอุณหภูมิ

- การดูดกลืนของแสง (absorption) เป็นปรากฏการณ์ของแสงสังเกตได้จากสีของวัตถุที่แสงตกกระทบ เช่น การที่ใบไม้เป็นสีเขียวนั้นก็เพราะว่าวัตถุดูดกลืนแสงสีแดงไป หรือการที่เห็นวัตถุเป็นสีดำ คือ วัตถุดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ไปหมด ซึ่งการดูดกลืนจะเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนพลังงานของแสงหลังจากที่แสงเคลื่อนผ่านตัวกลางด้วย

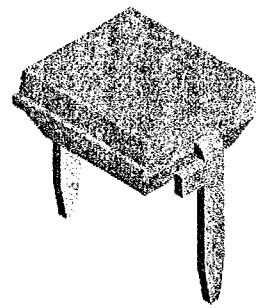
ในโครงการนี้เมื่อทำการฉายเลเซอร์ผ่านแบบจำลองก็จะพบกับปรากฏการณ์ของแสงตามที่กล่าวมาข้างต้น เช่น การสะท้อนแบบ diffusion ออกจากแบบจำลอง, การหักเหของลำเลเซอร์เมื่อฉายผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหไม่เท่ากันซึ่งในที่นี้คือส่วนที่เป็นอากาศและส่วนที่เป็นของเหลว รวมถึงการดูดกลืนของแสงเลเซอร์หลังจากฉายผ่านแบบจำลองแล้ว โดยพบว่าความเข้มของเลเซอร์ที่ตกกระทบไดโอดจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการฉายเลเซอร์ไปที่ไดโอดโดยตรงโดยไม่ผ่านแบบจำลอง

### 3.1.2 โฟโตนิกไดโอด

โฟโตนิกไดโอดคืออุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ ถ้าถูกกระตุ้นด้วยแสงก็จะก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของโฟโตนิกไดโอดประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N ต่อชนกัน เช่นเดียวกับไดโอดธรรมดา อาจจะผลิตขึ้นได้จากสารกึ่งตัวนำหลายชนิด เช่น ซิลิคอน (Si) เจอร์เมเนียม (Ge) หรือ เซเลเนียม (Se) เป็นต้น สารกึ่งตัวนำดังกล่าวอาจจะถูกบรรจุในกระเปาะโลหะหรือพลาสติกทึบแสง มีส่วนบนหรือส่วนด้านหน้าเป็นเลนส์บูรณรวมแสง มีจุดโฟกัสของแสงตกกระทบที่รอยต่อ PN มีขาต่อออกมาใช้งาน 2 ขา คือ ขาแอโนดและขาแคโทดดังรูปที่ 3-1 ก และ ข หรืออาจมีลักษณะอย่างอื่นตามการออกแบบเพื่อให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ และหากแบ่งตามโครงสร้างภายในและการนำไปใช้งานจะแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ PN โฟโตนิกไดโอด, PIN โฟโตนิกไดโอด, Schottky type โฟโตนิกไดโอด, APD avalanche โฟโตนิกไดโอด โดยทั่วไปโฟโตนิกไดโอดทั้ง 4 ชนิดจะถูกนำไปใช้เพื่อตรวจจับตำแหน่ง สี การตรวจจับวัตถุ หรือ ความเข้มของแสง



(ก) ไดโอดทรงกระบอก



(ข) ไดโอดทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 3-1 โฟโตไดโอดที่เลือกมาใช้ในการทดลอง

การทำงานของโฟโตไดโอดเริ่มต้นเมื่อมีแสงตกกระทบบนโฟโตไดโอด โดยแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดจะมีพลังงานโฟตอนไปกระตุ้นบริเวณ depletion region ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไปที่แคโทด ส่วนโฮลจะวิ่งไปที่แอโนด เกิดเป็นกระแสไบแอสยอน โดยกระแสไบแอสยอนจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสง โดยสังเกตได้ว่าหากเพิ่มความเข้มของแสงขึ้นแล้ว กระแสไบแอสยอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (Rozzoni, 1993) รูปที่ 3-2 แสดงหลักการทำงานของโฟโตไดโอด สำหรับการเลือกโฟโตไดโอดเพื่อที่จะใช้งานต่าง ๆ ให้เหมาะสม จะต้องพิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

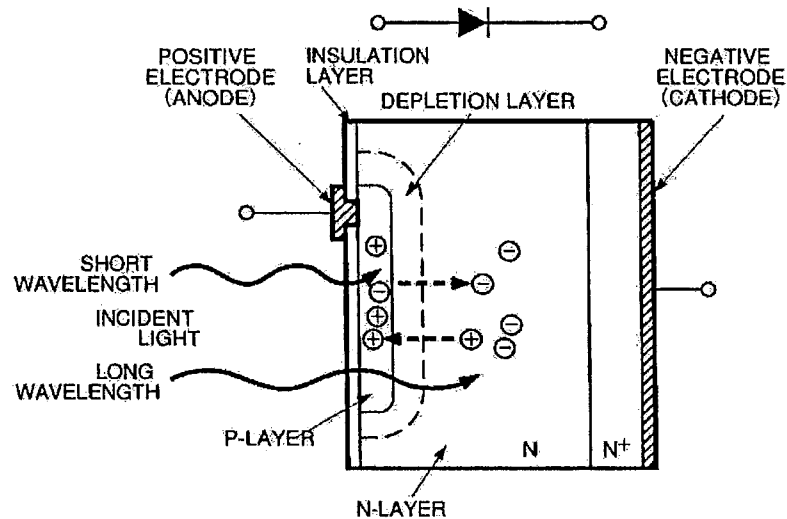
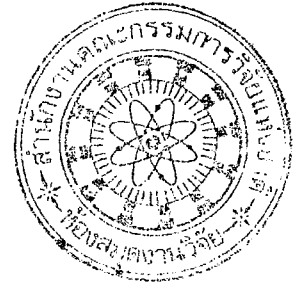
- Photo sensitivity (S) คือ อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหลังจากถูกกระตุ้นต่อพลังงานแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอด มีหน่วยเป็น A/W ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า relative sensitivity กับความยาวคลื่นแสง โดย relative sensitivity คือ การนำค่า sensitivity ที่ความยาวคลื่นใดๆ ไปเทียบกับค่า sensitivity ณ ความยาวคลื่นที่ให้ค่า sensitivity สูงสุด

- Dark current ( $I_D$ ) คือ กระแสไฟฟ้าที่มีค่าน้อยมาก เกิดขึ้นเมื่อมีการทำการไบแอสยอนในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบบนโฟโตไดโอด ซึ่งกระแสดังกล่าวเป็นสัญญาณรบกวนขณะทำการไบแอสยอน

- 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 ค่าความต่างศักย์ที่มากที่สุดที่สามารถทำการไบแอสยอนให้แก่โฟโตไดโอดได้ก่อนที่จะไหม้



KPD C0002EA

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 ถ้าหลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟฟ้าจึงมีเฟสและความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน (random) ในทางตรงกันข้ามกับต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์ที่จะให้แสงสีเดียว และทุก ๆ ลำแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด สมบัติที่เด่นชัดของแสงเลเซอร์อีกประการหนึ่งคือ ลำแสงของเลเซอร์ไม่กระจายออกเหมือนแสงจากไฟฉาย หรือต้นกำเนิดแสงอื่น ๆ แสงที่ออกจากเลเซอร์มีการบานออกค่อนข้างน้อย (divergence) โดยทุกระยะทาง 1 เมตรที่ลำแสงเลเซอร์เคลื่อนที่ เส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงจะโตขึ้นประมาณ 1 มิลลิเมตร

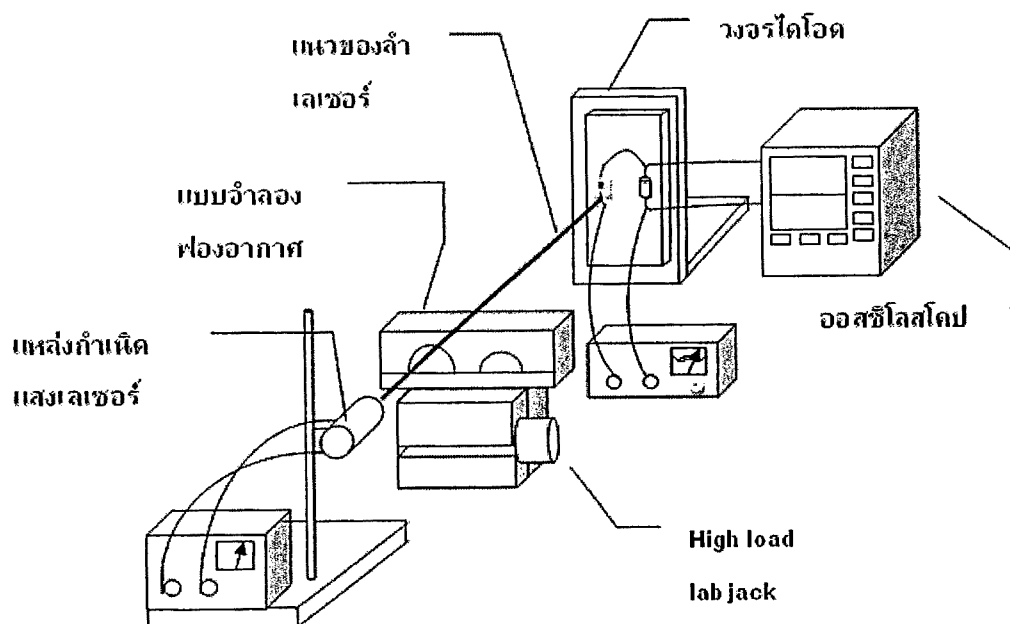
แสงเลเซอร์ยังมีลักษณะเด่นกว่าแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นอีกประการคือมีความเข้มสูง และเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุก็จะเกิดความร้อนระบือของลำแสงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อวัตถุนั้นมีความ



หยาบ หรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอย เนื่องจากเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาคหรือความหยাবนั้น และเกิดการแทรกสอดขึ้น

### 3.2 การหาความสัมพันธ์ด้วยการสอบเทียบกับแบบจำลองฟองอากาศ

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



รูปที่ 3-3 ส่วนประกอบของชุดทดลองสำหรับการสอบเทียบซึ่งประกอบด้วยระบบเลเซอร์ไดโอด เครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรวัดไดโอด ออสซิลโลสโคปสำหรับการบันทึกค่าเอาพุทจากวงจรวัดไดโอด แบบจำลองฟองอากาศ และระบบขับเคลื่อนแบบจำลอง

### 3.2.1 ระบบเลเซอร์ไดโอด

ในขั้นตอนแรก ผู้วิจัยจะทำการสร้างชุดอุปกรณ์การวัดขึ้นมาก่อนซึ่งประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และวงจรไดโอด ซึ่งหลักการในการออกแบบเป็นดังนี้

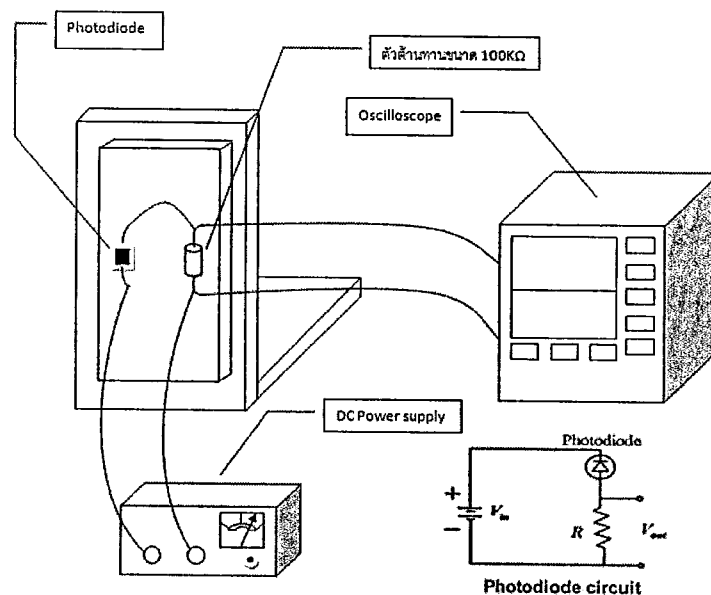
#### 3.2.1.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่นำมาใช้ในการทดลองควรมีกำลังสูงอยู่ในช่วง  $1\text{ mW} - 50\text{ mW}$  เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดลำแสงประมาณ  $0.6-1.0\text{ mm}$  และมีแสงเป็นสีแดง มีความยาวคลื่นประมาณ  $650\text{ nm}$  สามารถเปิดทิ้งไว้เป็นเวลานาน ๆ ได้ โดยกำลังไม่ตก

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

#### 3.2.1.2 วงจรไดโอด

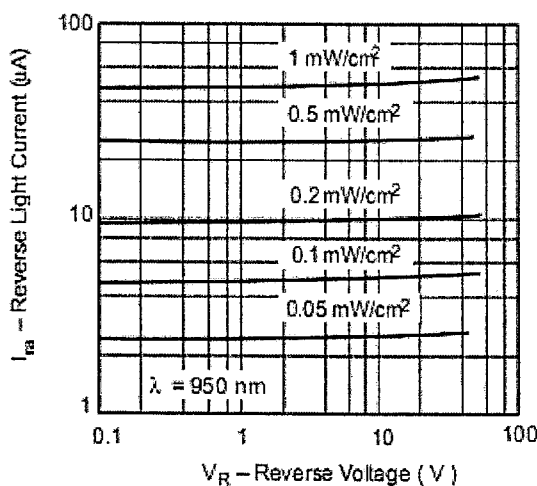
วงจรไดโอด คือ วงจรที่ใช้ในการรับลำแสงเลเซอร์หลังจากที่ลำแสงผ่านแบบจำลอง ฟองอากาศมาแล้ว เพื่อนำสัญญาณความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนวงจรไปวิเคราะห์ต่อไป วงจรไดโอดมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ โฟโตไดโอด เครื่อง DC regulator และตัวต้านทาน แสดงตามรูปที่ 3-4 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



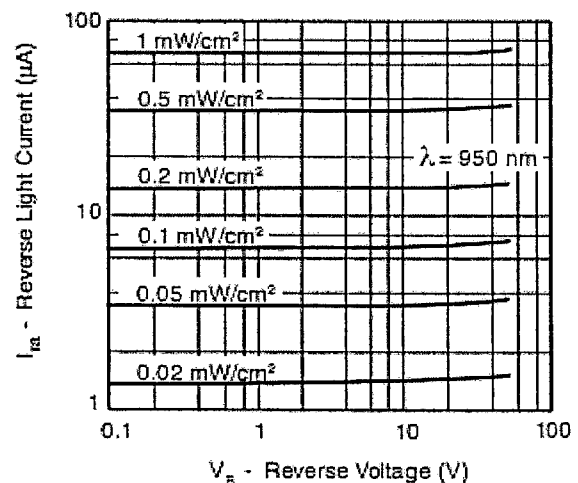
รูปที่ 3-4 วงจรโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายความดันไฟฟ้า โฟโตไดโอด ตัวต้านทาน และออสซิลโลสโคป

### - 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 จะมีค่าสูงกว่ารุ่น BPW34 เพียงเล็กน้อย



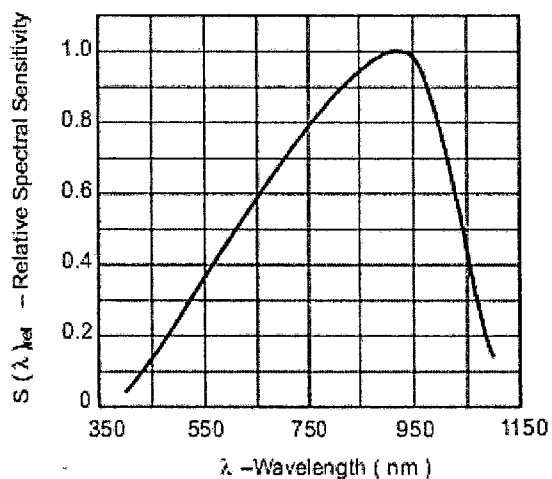
(ก)



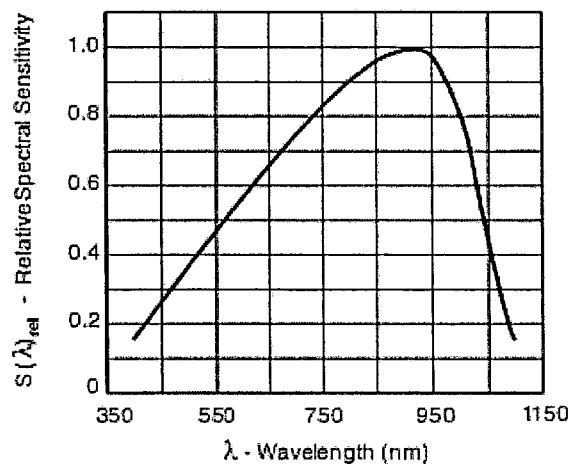
(ข)

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)



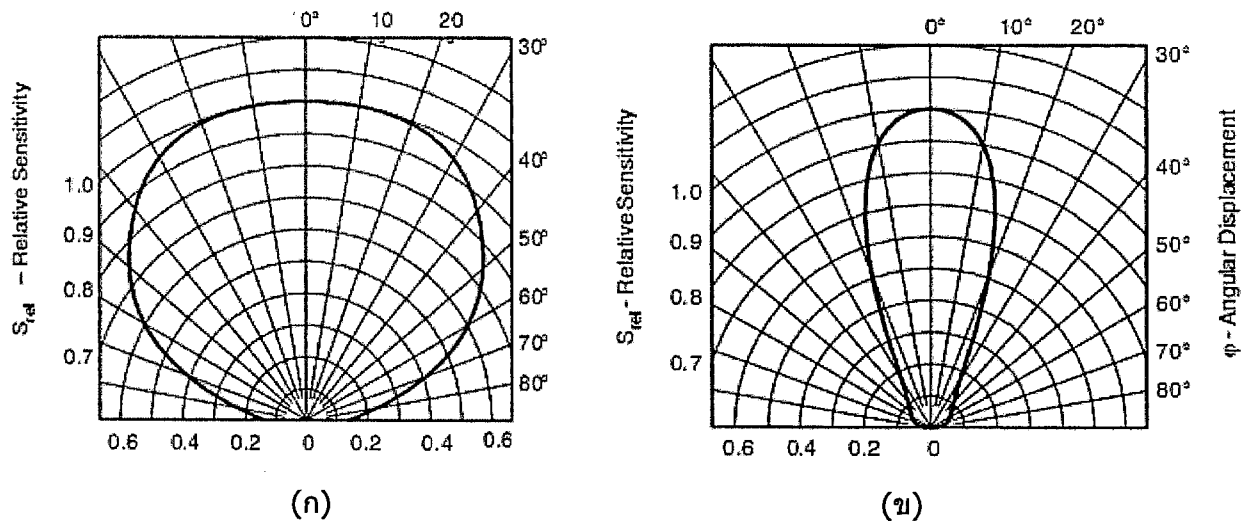
(ข)

รูปที่ 3-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Relative sensitivity กับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบบนของ (ก) โฟโตนิกไดโอด รุ่น BPW34, (ข) โฟโตนิกไดโอด รุ่น BPV10 (ข้อมูลจากเอกสารของบริษัท Vishay)

ขั้นต่อไปจะมาพิจารณาลักษณะทางกายภาพของโฟโตนิกไดโอดทั้งสองรุ่นสำหรับรุ่น BPV10 จะมีลักษณะตามรูปที่ 3-1ก คือจะมีกระเปาะพลาสติกสีดำครอบบริเวณ sensitive area ของไดโอดด้านบนมีลักษณะโค้งมนช่วยในการรวมแสงให้ตกลงบน sensitive area โดย sensitive area ของรุ่นดังกล่าวมีขนาด  $0.78 \text{ mm}^2$  และรูปร่างของโฟโตนิกไดโอดรุ่น BPW34 แสดงดังรูปที่ 3-1ข ซึ่งจะมีบริเวณ sensitive area ขนาดใหญ่กว่าโฟโตนิกไดโอดทั่วไป คือมีขนาดถึง  $7.5 \text{ mm}^2$  ทำให้การติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์เพื่อให้ลำแสงวิ่งไปกระทบบนบริเวณ sensitive area ขณะทำการทดลองทำได้ง่ายและสะดวก โดยสามารถสังเกตได้จากสายตาได้เลยว่าลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนโฟโตนิกไดโอดทั้งหมดหรือไม่

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของโฟโตนิกไดโอดทั้งสองรุ่นที่เกี่ยวข้องกับความสัมพัทธ์ระหว่าง relative sensitivity กับ มุมที่ลำแสงตกกระทบบนตามรูปที่ 3-7 ก และ ข พบว่าโฟโตนิกไดโอดรุ่น BPW34 จะมีข้อดีในแง่ของการติดตั้งเพื่อใช้ในการทดลองมากกว่ารุ่น BPV10 เพราะแม้กระทั่งมุมที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนโฟโตนิกไดโอดมีการเบี่ยงเบนไปจากเส้นตั้งฉากมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ค่า relative sensitivity ของรุ่น BPW34 จะมีแนวโน้มลดลงค่อนข้างช้า เช่น มุมมีค่าสูงถึง  $20^\circ$  ค่า relative sensitivity ของโฟโตนิกไดโอดก็ยังคงมีเป็น 1 เท่าเดิม เป็นต้น ซึ่งถือว่าเป็นช่วงมุมทำงานที่กว้างมาก ในทางตรงกันข้าม ถ้าพิจารณาโฟโตนิกไดโอดรุ่น BPV10 จะพบว่าหากมุมมีการเบี่ยงเบนไปจากเส้นตั้งฉากเพียง  $10^\circ$  จะทำให้ค่า relative sensitivity ลดลงถึง 10% แต่ถ้ามุมมีค่า  $20^\circ$  จะทำให้ค่า relative sensitivity ลดลงไปถึง 45 %

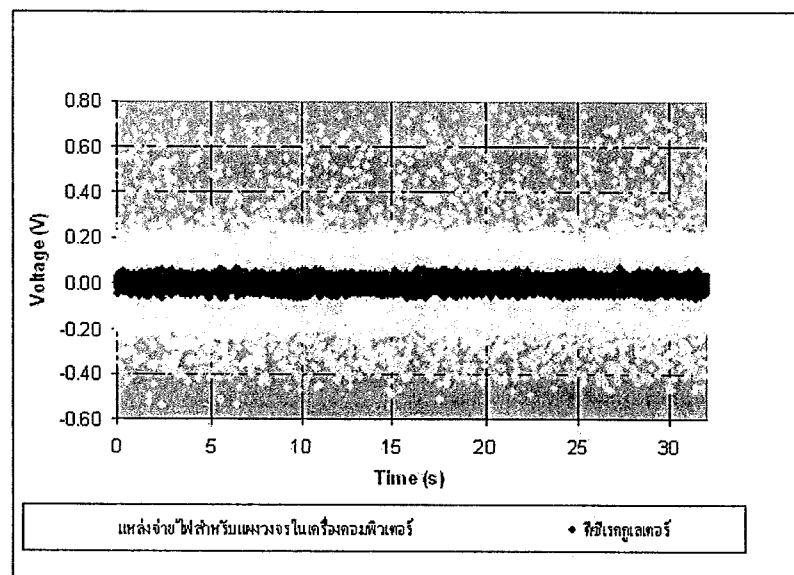
อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ ผู้วิจัยต้องการให้ชุดทดลองมีการตอบสนองต่อมุมของเลเซอร์ที่มาตกกระทบบนโฟโตนิกไดโอดที่ค่อนข้างสูง เพื่อที่จะสามารถแยกความแตกต่างของ input ได้ง่าย ดังนั้นผู้วิจัยจะเลือกใช้โฟโตนิกไดโอดรุ่น BPV10 เพราะมี sensitivity กับทิศทางเลเซอร์สูงกว่า และมีคุณสมบัติอื่น ๆ ระหว่างโฟโตนิกไดโอดทั้งสองแตกต่างกันไม่มากนัก



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

- DC regulator

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



รูปที่ 3-8 สัญญาณรบกวนที่ได้จากการวัดสัญญาณขาออกของวงจรในสภาวะการทดลองมีดิสทอร์ชัน โดยเปรียบเทียบระหว่าง DC regulator และแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับแผงวงจรในเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอนโฟโตไดโอดในวงจร

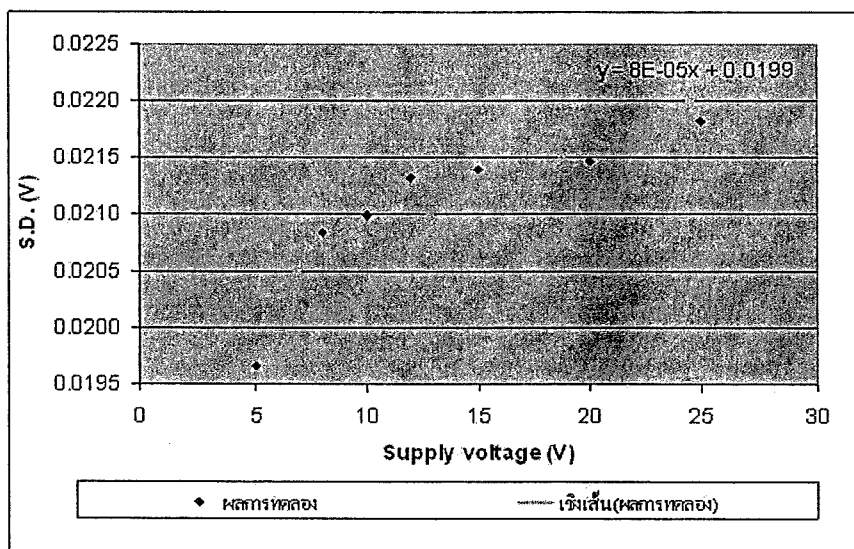
จากนั้นจึงนำสัญญาณมาทำการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งได้เลือกใช้เกณฑ์ในการเลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอน โฟโตนิกไดโอด ในวงจรด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณขาออกของวงจรในขณะที่มีดสนิท ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ DC Regulator ซึ่งให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณขาออกของวงจรในขณะที่มีดสนิทที่น้อยกว่าตามข้อมูลในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนของแหล่งกำเนิดสัญญาณต่างๆ

|                             | DC regulator | แหล่งจ่ายไฟของเครื่องคอมพิวเตอร์ |
|-----------------------------|--------------|----------------------------------|
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (โวลต์) | 0.020        | 0.146                            |

หลังจากที่เลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอนโฟโตนิกไดโอดในวงจรได้แล้ว ลำดับต่อไปจะต้องเลือกใช้ความต่างศักย์สำหรับไบแอสยอนโฟโตนิกไดโอด การเลือกความต่างศักย์สำหรับไบแอสยอนโฟโตนิกไดโอดนั้นจะต้องสูงพอที่จะทำให้โฟโตนิกไดโอดอยู่ในภาวะที่กระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับความเข้มแสงได้ และจะต้องไม่เกินค่าความต่างศักย์สูงสุดที่โฟโตนิกไดโอดรับได้ซึ่งเท่ากับ 60 โวลต์ และความต่างศักย์นั้นควรจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในวงจรมีน้อยที่สุด ทางนักวิจัยจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาว่าความต่างศักย์ในการไบแอสยอนต่าง ๆ กัน จะมีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนในวงจรที่เกิดขึ้นต่างกันหรือไม่

การทดลองนี้ทำโดยการจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอนโฟโตนิกไดโอดในวงจรด้วยความต่างศักย์ 5, 8, 10, 12, 15, 20 และ 25 โวลต์ ใช้ตัวต้านทานในวงจร 100 กิโลโอห์ม แล้ววัดสัญญาณขาออกของวงจรในสภาวะที่มีดสนิท ด้วยอัตราการเก็บสัญญาณ 1,000 ครั้งต่อวินาที เป็นเวลา 32 วินาที แล้วนำสัญญาณที่ได้มาทำการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้ในแต่ละค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการไบแอสยอนโฟโตนิกไดโอดนั้นมีค่าใกล้เคียงกันแต่มีแนวโน้มที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้จะสูงขึ้นเมื่อใช้ความต่างศักย์ในการไบแอสยอนโฟโตนิกไดโอดสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3-9



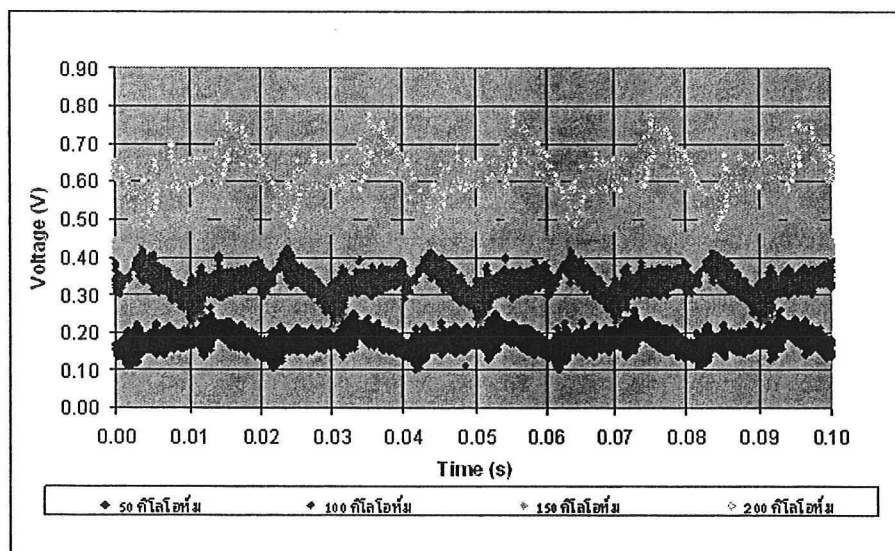
รูปที่ 3-9 ความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้จากวงจรในสภาวะการทดลองมีดสนิท เมื่อเพิ่มค่า Bias voltage

จากกราฟจะพบว่าความต่างศักย์ในการไบแอสยอนโฟโตไดโอด 5 โวลต์มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุดและมีแนวโน้มที่สัญญาณรบกวนจะมากขึ้นที่ความต่างศักย์ในการไบแอสยอนโฟโตไดโอดสูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกความต่างศักย์ในการไบแอสยอนโฟโตไดโอดเป็น 10-12 โวลต์ เพื่อให้ได้สัญญาณความต่างศักย์ขาออกมีค่าสูง

- ตัวต้านทานในวงจรไดโอด

หลังจากที่ได้ทำการเลือกชนิดและความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟที่ใช้ทำการไบแอสยอนแล้ว ส่วนประกอบในวงจรที่จะทำการเลือกต่อไปก็คือตัวต้านทาน สำหรับตัวต้านทานนั้นยิ่งใช้ความต้านทานที่มีค่าสูงมากขึ้น สัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรนั้นก็จะยิ่งมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการสังเกตและวิเคราะห์ แต่ในขณะเดียวกันความต้านทานที่มากขึ้นนั้น ก็อาจจะไปขยายสัญญาณรบกวนในวงจรให้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทางนักวิจัยจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาว่าค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจร เมื่อมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อสัญญาณรบกวนในวงจรหรือไม่อย่างไร การทดลองนี้ทำโดยการจ่ายไฟฟ้าสำหรับการไบแอสยอนโฟโตไดโอดในวงจรด้วยความต่างศักย์ 5 โวลต์ ใช้ตัวต้านทานในวงจร 50, 100, 150 และ 200 กิโลโอห์ม และยิงเลเซอร์ (เลเซอร์พอยเตอร์) ตรงผ่านอากาศไปที่กลางโฟโตไดโอด แล้ววัดสัญญาณขาออกของวงจร ด้วยอัตราการเก็บสัญญาณ 100,000 ครั้งต่อวินาที เป็นเวลา 0.1 วินาที ซึ่งสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรจะเป็นลักษณะคล้ายรูป Sine wave ที่ความถี่ประมาณ 50 Hz และมีการแกว่งขึ้นลงเล็กน้อยด้วยความถี่สูงพร้อมๆกันไปดังรูปที่ 3-10

หลังจากนั้น จะนำสัญญาณในรูปที่ 3-10 มาทำการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ย และอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยอัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้จะบ่งชี้ว่าสัญญาณนั้นมีความชัดเจนมากหรือน้อย



รูปที่ 3-10 สัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรกับเวลาเมื่อยิงเลเซอร์ผ่านอากาศสู่โฟโตไดโอด 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 k $\Omega$ | 100 k $\Omega$ | 150 k $\Omega$ | 200 k $\Omega$ |
|------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 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 ออสซิลอสโคป ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL716 อุปกรณ์นี้สามารถทำการวัดค่าแล้วแสดงผลบนจอแสดงผลได้ และยังสามารถเก็บข้อมูลที่ทำกรวัดเป็นไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel ในรูปแบบของสดมภ์ซึ่งทำให้สะดวกต่อการนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป โดยทุกการทดลองจะทำการวัดในโหมด DC ซึ่งจะเป็นการวัดรวมทั้งสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์นี้มี resolution ละเอียดถึง 0.00001 โวลต์ และสามารถเก็บข้อมูลได้ถี่ตั้งแต่ 1 ครั้งต่อวินาทีถึง 10 ล้านครั้งต่อวินาที และสามารถเก็บจำนวนตัวอย่างต่อหนึ่งครั้งการทดลองได้มากถึง 1 ตัวอย่างถึง 1 ล้านตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีขีดความสามารถในการเก็บข้อมูลที่สูง แต่ขีดจำกัดของการใช้เครื่องมือนี้อยู่ที่การถ่ายเทข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์จะต้องใช้แผ่น diskette ซึ่งมีหน่วยความจำที่น้อยทำให้ไม่สามารถเก็บจำนวนตัวอย่างมาก ๆ ได้

### 3.2.2 อุปกรณ์สำหรับการสอบเทียบเครื่องมือวัด

หลังจากได้ออกแบบและประกอบระบบเลเซอร์ไดโอดแล้ว จึงทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นโดยใช้แบบจำลองฟองอากาศ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

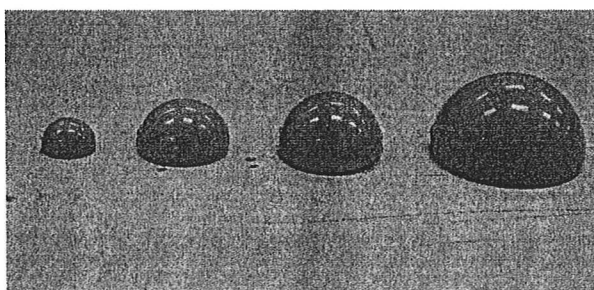
#### 3.2.2.1 แบบจำลองฟองอากาศ

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

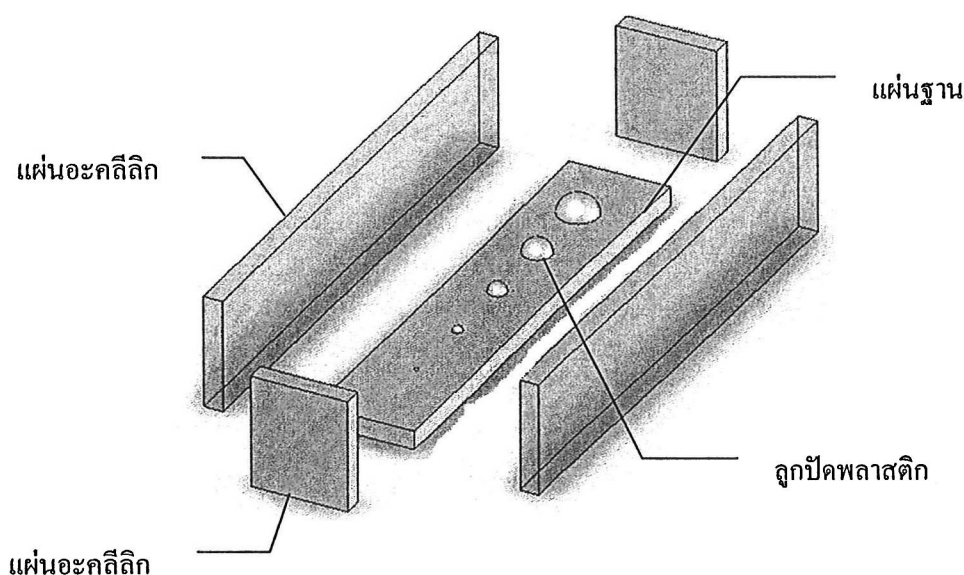


วัดที่อุณหภูมิ 20°C) นอกจากนั้น วัสดุชนิดนี้เป็นที่รู้จักแพร่หลายมากในปัจจุบันเนื่องจากมีการนำมาใช้งานในการสร้าง "Lab on chip" เพื่อศึกษาการไหลในท่อขนาดเล็กเหล่านี้

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



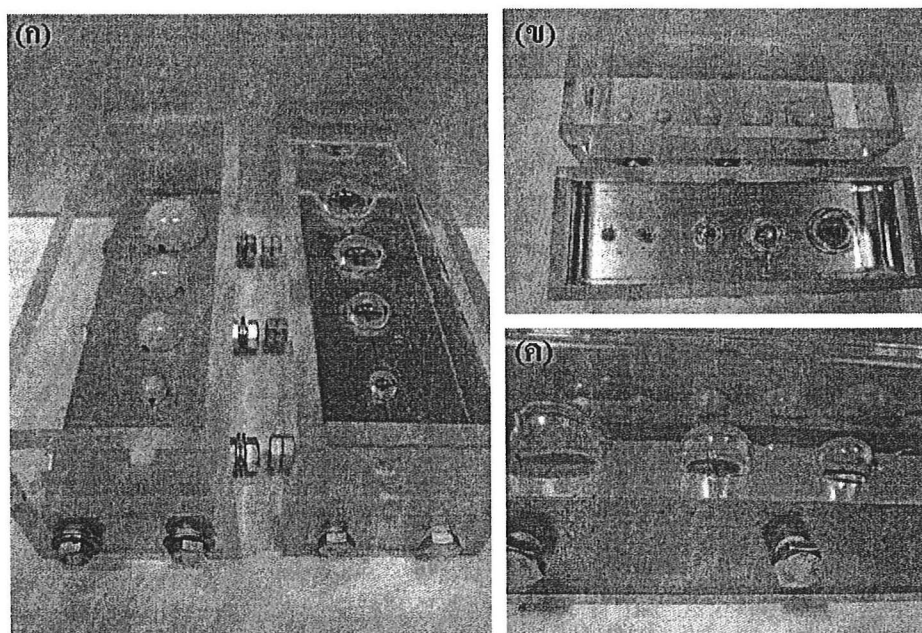
รูปที่ 3-12 แผนภาพของแม่พิมพ์ที่ใช้ทำแบบจำลองฟองอากาศ โดยลูกปัดถูกยึดกับฐานด้วยกาว และผนังแต่ละด้านถูกยึดกับฐานด้วยสกรู และใช้ซิลิโคนในการอุดรอยรั่วระหว่างผนังแต่ละด้าน

หลังจากนั้น จึงทำการผสม PDMS ด้วยอัตราส่วนระหว่างมวลของ monomer และ catalyst เท่ากับ 10:1 คนในเข้ากันที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะทำให้มีฟองอากาศขนาดใหญ่จำนวนมากแทรกเข้าไปในเนื้อวัสดุ 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

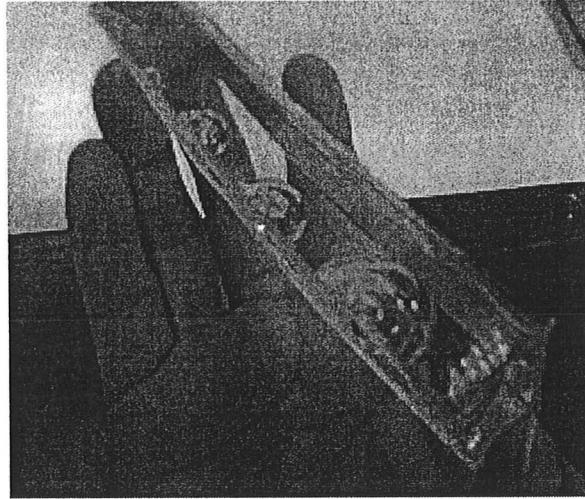
สำหรับการทำแม่พิมพ์นี้ ในครั้งแรกได้ลองใช้ฐานแม่พิมพ์ที่ทำจากไม้ ผู้วิจัยพบว่าเป็นวัสดุที่ไม่เหมาะสมอย่างยิ่ง เนื่องจากมีรูพรุนทำให้เก็บอากาศไว้ในเนื้อไม้ได้มาก เวลานำไปอบในเตาอบจะทำให้อากาศที่แทรกซึมอยู่ออกมา และทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อ PDMS นอกจากนั้นเวลาลอกออกจากฐานก็ยิ่งทำได้ไม่สะดวก เพราะผิวไม้ค่อนข้างหยาบ ทำให้ต้องใช้แรงค่อนข้างมากและใช้ใบมีดตัดซึ่งจะทำให้ผิวงานเสียหายได้

นอกจากนั้นแล้ว ความสะอาดของแม่พิมพ์ก็เป็นสิ่งสำคัญ เวลาจับชิ้นงานควรสวมถุงมือเพื่อป้องกันไม่ให้รอยนิ้วมือปรากฏบนผนังแม่พิมพ์ซึ่งอาจจะทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้ ในการทดลองเบื้องต้นมีคราบขาวไปและบนผนังบริเวณใกล้กับฟองอากาศ 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

งานวิจัยนี้มีความประสงค์ที่จะวัดสัญญาณขาออกของวงจรเมื่อยิงผ่านแบบจำลองของฟองที่มีรัศมีความโค้งต่าง ๆ ที่กำลังเคลื่อนที่ ดังนั้นระบบการเลื่อนตำแหน่งแบบจำลองเพื่อวัดสัญญาณขาออกของวงจรที่ตำแหน่งความสูงตั้งแต่ปลายยอดฟองและต่ำลงไปยังตำแหน่งด้านในฟองจึงมีความสำคัญ

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 อุปกรณ์วัดจะติดตั้งโดยปรับให้ลำเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดไปกระทบตั้งฉากกับโฟโตไดโอดในวงจร แล้วทำการเคลื่อนแบบจำลองฟองอากาศผ่านลำเลเซอร์ในแนวตั้ง เมื่อลำเลเซอร์วิ่งผ่านแบบจำลองในส่วนที่แทนกลีเซอริน ลำเลเซอร์ก็ยังคงตกลงบนโฟโตไดโอด แต่เมื่อเคลื่อนแบบจำลองขึ้นไปอีก ลำเลเซอร์ก็เริ่มวิ่งผ่านจุดยอดของฟองอากาศ สัญญาณความต่างศักย์จะเริ่มมีแนวโน้มลดลงเพราะว่าลำเลเซอร์วิ่งตัดผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน ทำให้มีการสะท้อนและหักเหของลำเลเซอร์ออกไปแนวเดิม ความเข้มแสงที่ตกลงบนโฟโตไดโอดจึงน่าจะมีค่าลดลง

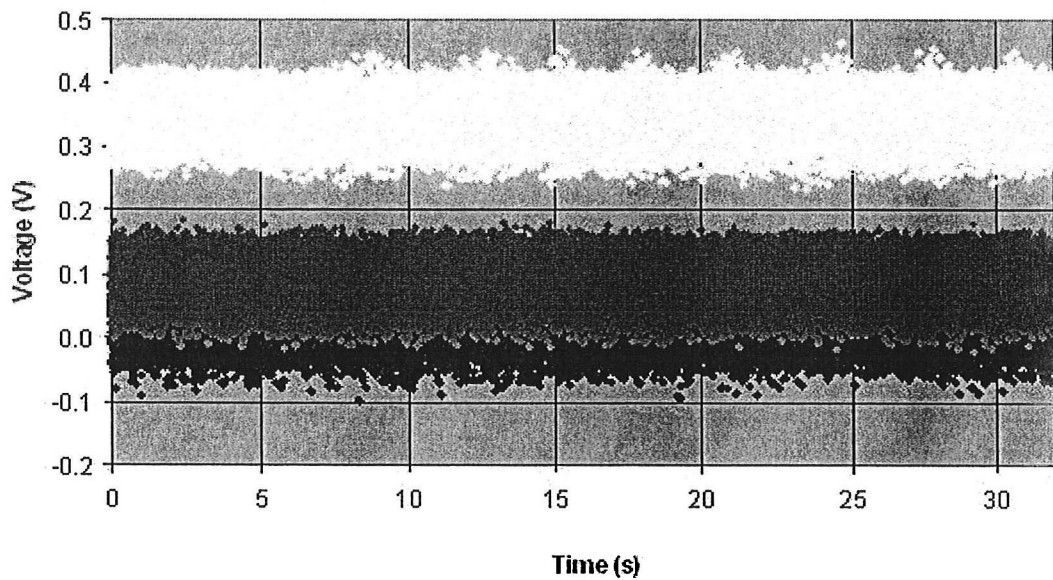
ข้อเสียของการใช้โต๊ะปรับระดับที่ปรับด้วยมือนี้ คือขนาด resolution ประมาณ 0.08 มม. ก็ยังไม่สูงพอเมื่อเทียบกับสิ่งที่กำลังศึกษาอยู่ ซึ่งปัญหานี้อาจจะแก้ไขได้โดยเปลี่ยนไปใช้ชุดเลื่อนตำแหน่ง (traverse) ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าและควบคุมผ่านระบบคอมพิวเตอร์แทน โดยการเลื่อนแบบจำลองฟองอากาศตัดกับลำแสงเลเซอร์ที่ได้เซ็ทอัพไว้ก่อนล่วงหน้าแล้วเมื่อใช้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

อย่างไรก็ตาม การทดลองด้วยวิธีการทั้งสองแบบได้ถูกจัดเตรียมขึ้น และทำการทดลองในเบื้องต้นแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน พบว่าลักษณะสัญญาณจากทั้งสองการทดลองมีลักษณะแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการทดลองนี้จะใช้โต๊ะปรับระดับในการเลื่อนตำแหน่งฟองอากาศเพื่อจะทำให้ทราบตำแหน่งของการวัดที่แน่นอน

### 3.2.3 การดำเนินการสอบเทียบและสภาวะการทดลอง

ปัจจัยที่จะมีผลต่อการทดลองได้แก่ อุณหภูมิซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้า สนามแม่เหล็กต่าง ๆ ที่จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในวงจร และแสงไฟในบริเวณที่ทำการทดลอง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้สัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรถูกรบกวน โดยทางนักวิจัยได้ทำการทดลองเพื่อทราบถึงผลกระทบของแสงภายนอกที่จะมีผลต่อสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจร โดยทดสอบทั้งสองแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์คือ เลเซอร์พวยเดอร์และ He-Ne เลเซอร์

การทดลองนี้ทำโดยการเปรียบเทียบสัญญาณขาออกของวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นตอนใน 3 สภาวะคือ สภาวะแรกเป็นการวัดสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรในเวลากลางคืน ณ สถานที่ทำการทดลองโดยเปิดหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ (ทำการทดลองในห้องโถง ชั้น 3 ตึกวิศวกรรม 5) สภาวะที่สองเป็นการวัดสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรในช่วงเวลา 18.00 น. ณ สถานที่ทำการทดลองโดยให้แสงภายนอกอาคารตกกระทบโฟโตไดโอด และสภาวะที่สามเป็นการวัดสัญญาณความต่างศักย์ขาออกของวงจรในช่วงเวลากลางคืน ณ สถานที่ทำการทดลองโดยยิงเลเซอร์ผ่านอากาศสู่โฟโตไดโอดและปิดไฟในสถานที่ทำการทดลองซึ่งจะได้สัญญาณออกมาดังรูปที่ 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 ยังแสงธรรมชาติจากหลอดไฟโคโคโคในคอนกลางคืนและปิดไฟ

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 ซึ่งน้อยจนออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการทดลองไม่สามารถตรวจวัดได้ แต่ใน

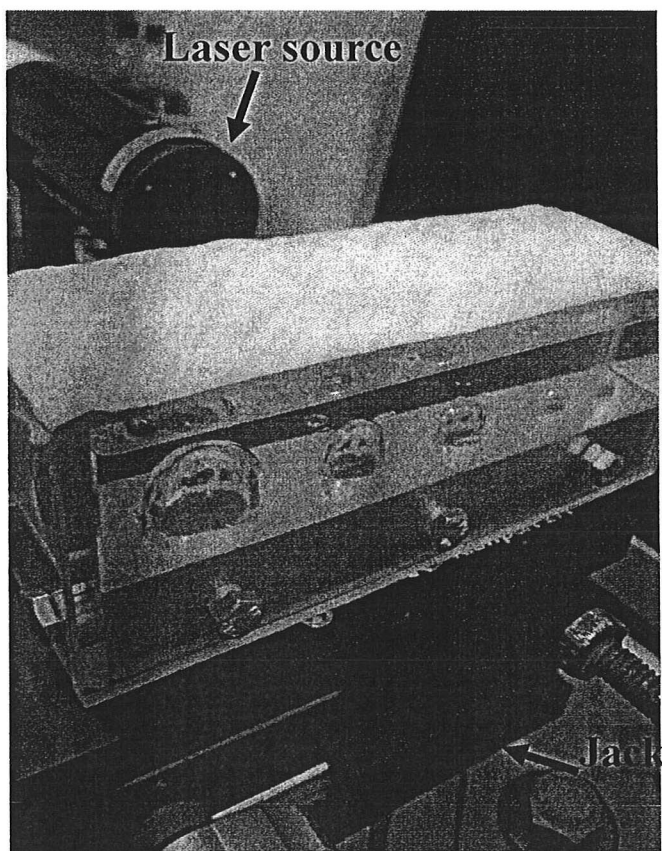


การทดลองจริงถึงแม้จะเป็นช่วงเวลากลางคืนก็ยังมีแสงอื่นนอกเหนือจากแสงเลเซอร์อยู่บ้างเล็กน้อย

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

### 3.2.4 ผลการทดลอง

การทดลองได้ดำเนินการด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ ใช้โฟโตไดโอดทรงกระบอก มีค่าความต้านทานในวงจร 10 k $\Omega$  มีค่าความต่างศักย์ย้อนกลับ 10-12 โวลต์ ใช้เลเซอร์สีแดงขนาด 10 mW และระยะห่างระหว่างเลเซอร์และโฟโตไดโอดคงที่เท่ากับ 20 ซม. ทำให้มีระยะระหว่างแบบจำลองฟองอากาศกับโฟโตไดโอดเท่ากับ 10-12 ซม. (ขึ้นกับขนาดฟองอากาศ) และใช้ sampling frequency เท่ากับ 200 Hz โดยชุดทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3-16



รูปที่ 3-16 ชุดทดลองที่พร้อมทำการทดสอบ

ในการทดลองนี้ ได้ทำการฉายแสงเลเซอร์ผ่านแบบจำลองในสภาวะที่ค่อนข้างมืดโดยจะทำการปิดไฟในบริเวณที่ทำการทดลองและทำการทดลองในเวลากลางคืน เพื่อให้ได้ผลกระทบจากแสงภายนอกน้อยที่สุด และทำการทดลองสำหรับแต่ละขนาดฟองอากาศเป็นจำนวน 5 ครั้ง

การทดลองจะเริ่มจากการยิงเลเซอร์ผ่านแบบจำลองในส่วนที่ไม่ได้เป็นฟองอากาศแล้วทำการเก็บค่าสัญญาณความต่างศักย์ของวงจรไดโอดไว้ 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)

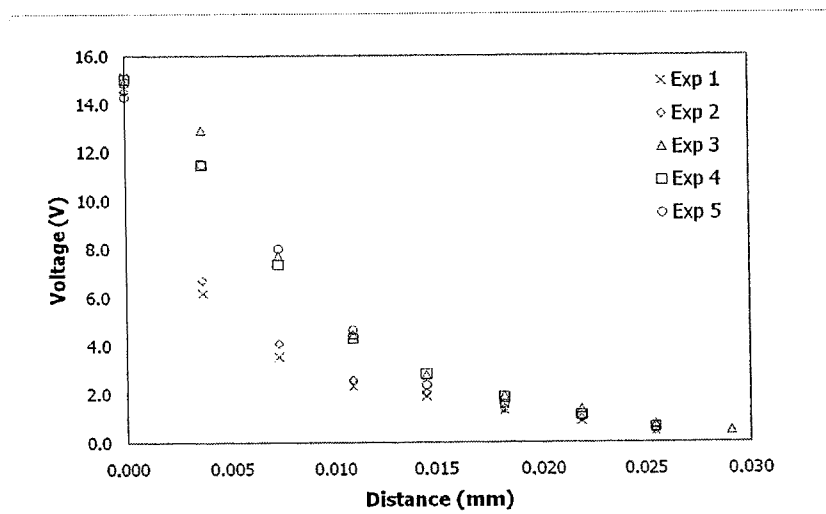
จากผลการทดลองพบข้อสังเกตว่าระยะห่างจากฟองที่จะทำให้สัญญาณในวงจรนั้นมีค่าเท่ากับสัญญาณรบกวนในวงจรนั้นมีค่าไม่เกิน 1 มม. สำหรับทุกกรณี ซึ่งเป็นระยะทางที่สั้นมากเมื่อเทียบกับขนาดรัศมีของแบบจำลองฟอง โดยยิ่งฟองมีขนาดเล็กระยะดังกล่าวจะยาวมากขึ้น และตารางที่ 3-4 แสดงระยะทางเฉลี่ย และอัตราส่วนของขนาดของฟองอากาศ

ตารางที่ 3-4 ผลการทดลองแสดงระยะทางที่สัญญาณความต่างศักย์ลดลงใกล้เคียงศูนย์

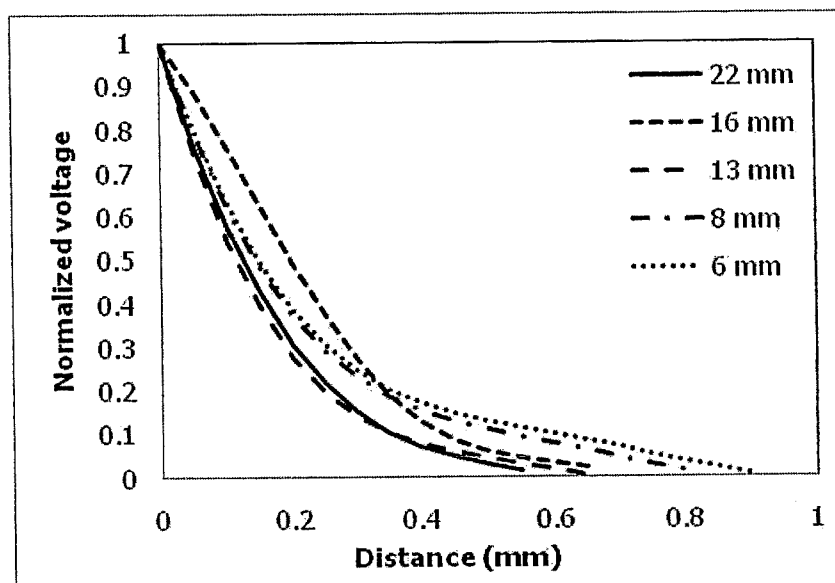
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศ (ม.ม.) | รัศมีความโค้ง (ม.ม.) | ระยะทางที่สัญญาณความต่างศักย์ลดลงใกล้เคียงศูนย์ (ม.ม.) | อัตราส่วนกับขนาดของรัศมีฟองอากาศ |
|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 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 มม. 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

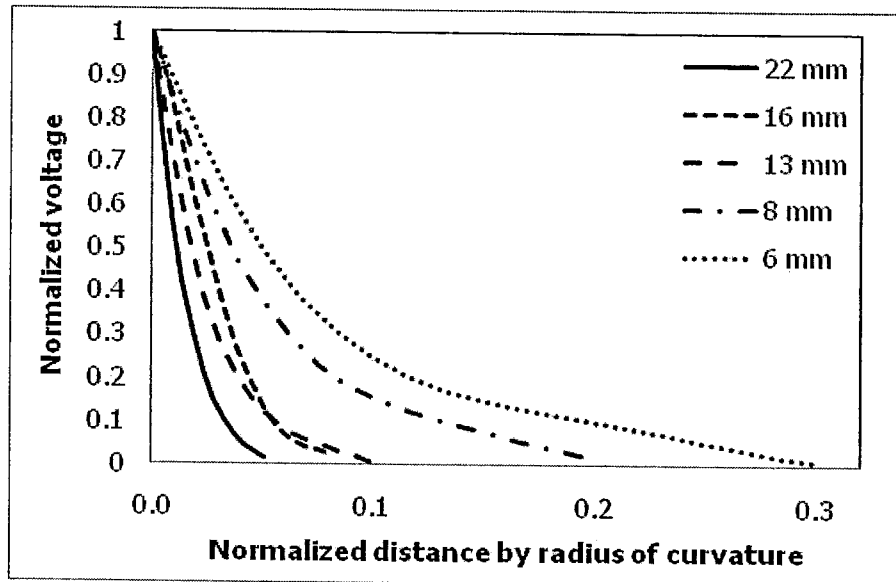


รูปที่ 3-17 ผลการทดลองทั้งหมดของแบบจำลองฟองอากาศขนาด 22 มม.

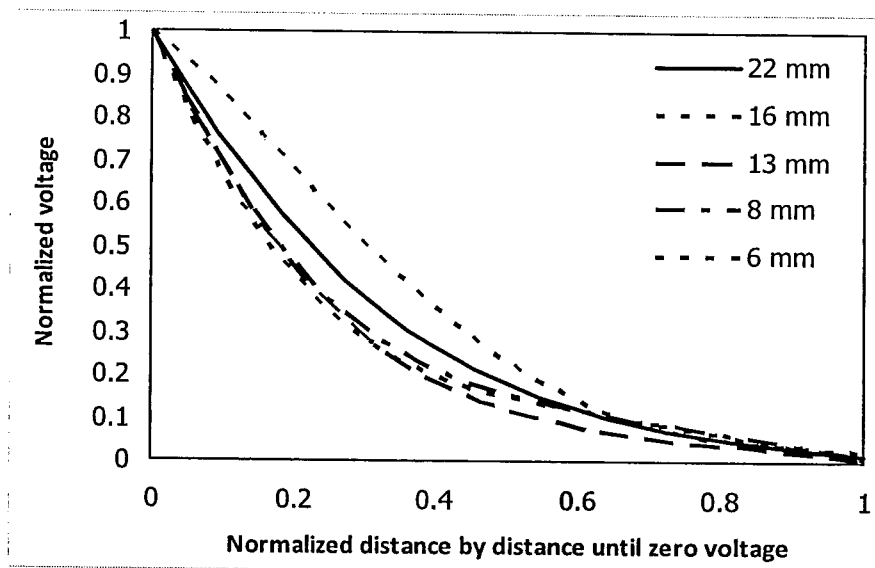


รูปที่ 3-18 แนวโน้มเฉลี่ยของสัญญาณความต่างศักย์ที่ลดลง ตามระยะทางจากปลายยอดฟองอากาศ สำหรับทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศ





รูปที่ 3-19 แนวโน้มเฉลี่ยของสัญญาณความต่างศักย์ที่ลดลง ตามระยะทางจากปลายยอดฟองที่ถูก normalized ด้วยรัศมีความโค้งของฟองอากาศ



รูปที่ 3-20 แนวโน้มเฉลี่ยของสัญญาณความต่างศักย์ที่ลดลง ตามระยะทางจากปลายยอดฟองที่ถูก normalized ด้วยระยะจากปลายยอดฟองจนถึงระยะที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์

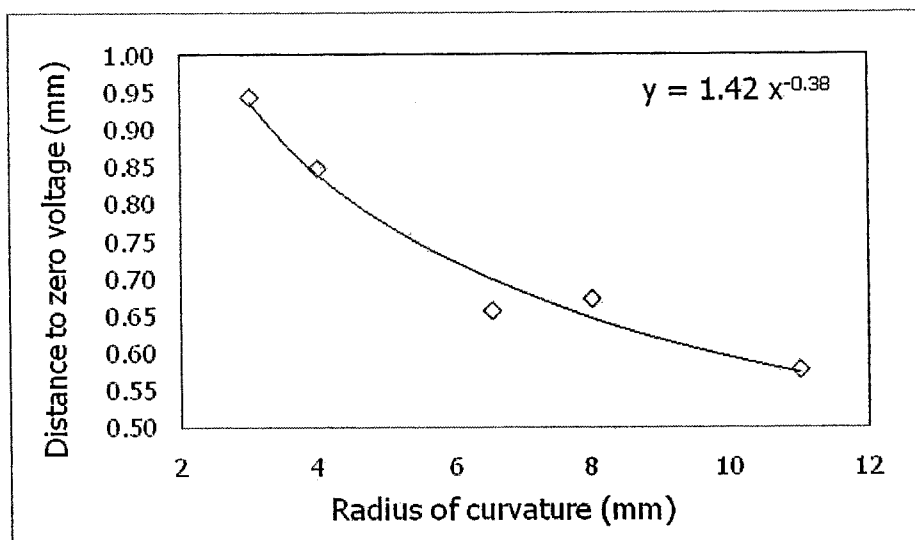
จากรูปที่ 3-19 เป็นกราฟเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองทุกกรณีด้วยการพล็อตเปรียบเทียบระหว่าง normalized voltage และ normalized distance ที่ใช้รัศมีความโค้งของฟองอากาศเป็นตัวหาร จะพบว่า ลักษณะการลดลงของค่า normalized voltage จะเกิดขึ้นอย่างมากในช่วงแรก โดยทุกกรณีความต่างศักย์จะลดลงครึ่งหนึ่งภายในระยะทางเพียง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

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

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

จากข้อมูลผลการสอบเทียบที่ได้อธิบายไปนั้น หากนำเอาเลเซอร์ลำเดียวไปใช้งานวัดฟอง โดยติดตั้งให้ยอดฟองเคลื่อนที่ผ่านลำเลเซอร์เหมือนกับการสอบเทียบแล้ว จะมีแนวทางในการนำเอาระบบเลเซอร์ไดโอดไปใช้งานใน 4 ลักษณะดังนี้

- (1) ใช้ตรวจสอบว่าขนาดฟอง (อัตราส่วนระหว่างขนาดฟองอากาศต่อขนาดลำแสงเลเซอร์) อยู่ในช่วงที่ทำการสอบเทียบได้ โดยดูจากข้อมูลความต่างศักย์ที่ลดลงตามเวลาที่ถูก normalized ด้วยช่วงเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์ (คล้ายกับกราฟในรูปที่ 3-20 แต่แกนนอนเป็นเวลา) ว่าสอดคล้องเป็นแนวโน้มเดียวกันหรือไม่ โดยในการวัดจริงจะทราบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลา 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 สำหรับแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดรัศมีมีความโค้งต่าง ๆ

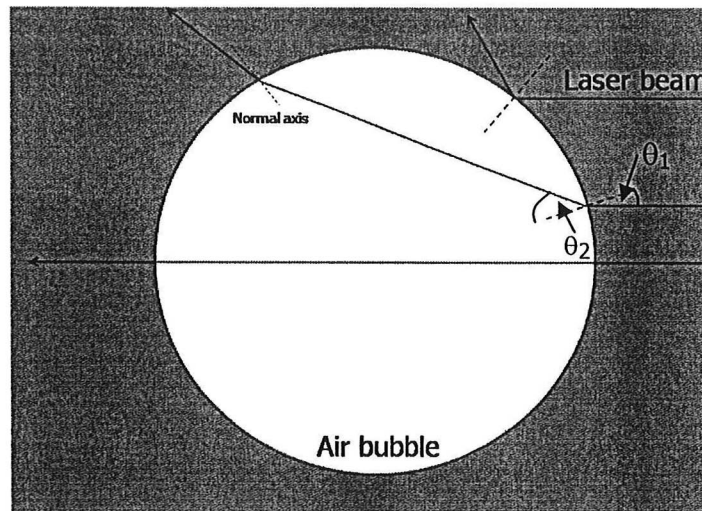
### 3.3 การหาความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำใช้เพื่อการวิเคราะห์ผลการทดลองในส่วนที่ผ่านมา ในรายงานฉบับนี้แบบจำลองจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ แบบจำลองเพื่อหามุมของลำแสงเลเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านฟองอากาศ และแบบจำลองเพื่อหาพื้นที่ที่ฟองอากาศบังลำแสงเลเซอร์ไม่ให้ผ่านไปตกกระทบไดโอด โดยเงื่อนไขและวิธีการของแต่ละแบบจำลองจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

#### 3.3.1 แบบจำลองเพื่อหามุมของลำแสงเลเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป

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

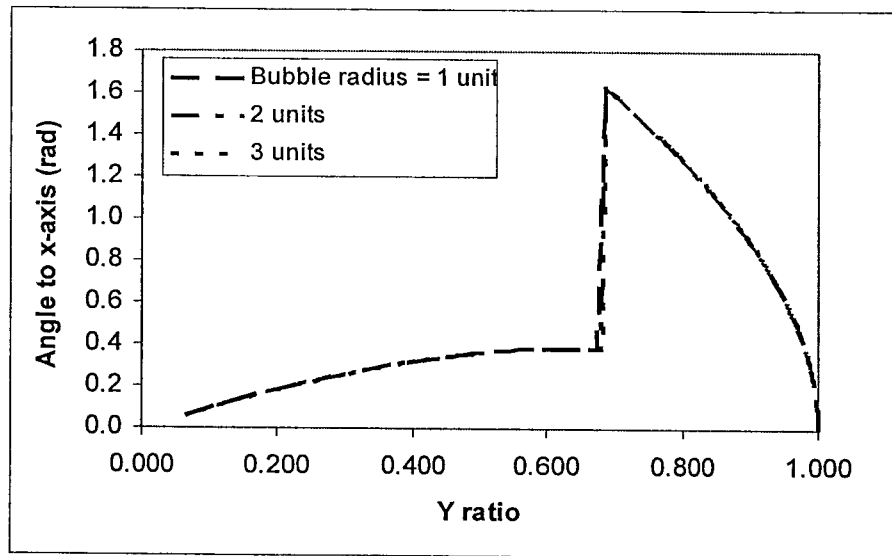
แบบจำลอง 2 มิติถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3-22 มีฟองอากาศทรงกลมและลำแสงเลเซอร์ที่สมมติว่ามีขนาดเล็กมาก เมื่อลำแสงตกกระทบที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวสองชนิด จะเกิดการหักเหซึ่งมุมที่หักเหไปจะขึ้นกับมุมที่ตกกระทบตาม Law of refraction ( $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ) โดยที่  $n_1$  และ  $n_2$  คือค่า refractive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



รูปที่ 3-22 ลำแสงเลเซอร์หักเหเมื่อเคลื่อนที่ผ่านฟองอากาศ 2 มิติที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากของเหลวโดยรอบ

ในการศึกษานี้ใช้แสงเลเซอร์ซึ่งมีความยาวคลื่นและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไม่เปลี่ยนแปลงนัก จึงถือได้ว่าค่า refractive index มีค่าคงที่ สำหรับ  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่กระทำต่อแนวตั้งฉากของผิวสัมผัสระหว่างตัวกลางทั้งสอง เมื่อแสงที่หักเหจากผิวสัมผัสแรกไปตกกระทบที่ผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งก็จะเกิดการหักเหเช่นกัน

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



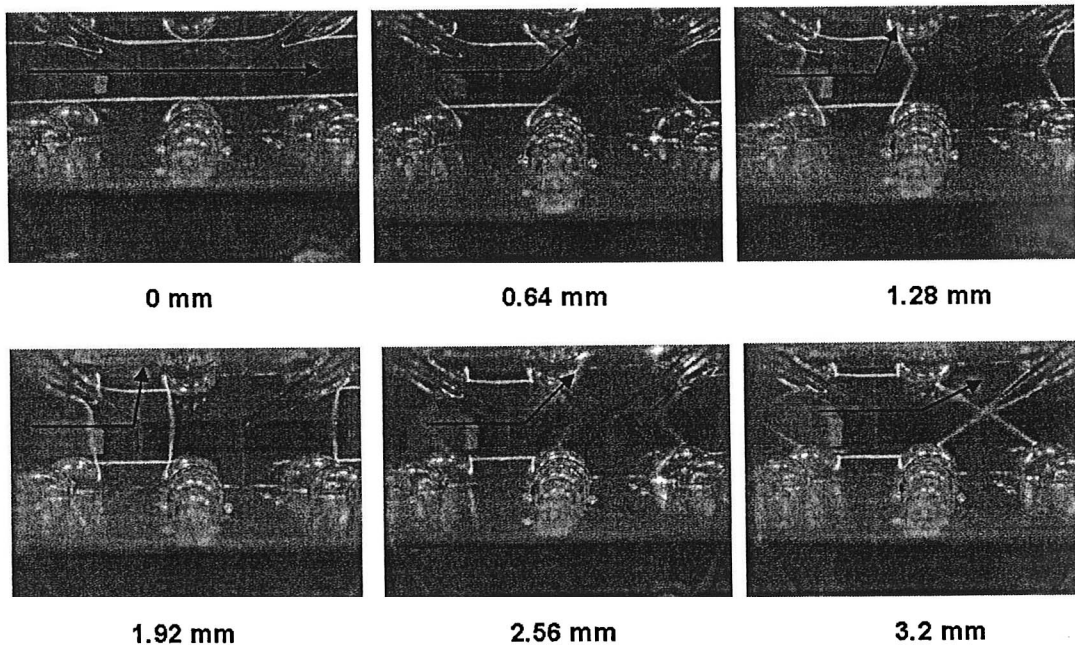
รูปที่ 3-23 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่ลำเลเซอร์ทะลุผ่านฟองอากาศกระทำกับลำเลเซอร์ที่ตกกระทบฟองอากาศ และตำแหน่งสัมผัสบนฟองอากาศขนาดต่าง ๆ

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

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

ผลจากแบบจำลองนี้จะช่วยอธิบายผลการทดลองจริงได้ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ของวงจรไดโอดจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบโฟโต้ไดโอด และจะสอดคล้องกับมุมสะท้อนออกที่คำนวณจากโมเดลด้วย กล่าวคือ หากมุมที่สะท้อนเปลี่ยนไปจากแนวเดิมมาก จะทำให้ลำเลเซอร์ไม่ตกกระทบที่โฟโต้ไดโอด และทำให้ความเข้มเลเซอร์ที่โฟโต้ไดโอดตรวจสอบได้มีความเข้มน้อยลง และส่งผลทำให้ค่าความต่างศักย์จากวงจรไดโอดต่ำลง

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของการวัดความต่างศักย์ในส่วนแรก พบว่าไม่สอดคล้องกันนัก โดยจากผลการสอบเทียบสำหรับขนาดฟองต่าง ๆ กันจะมีตำแหน่งสัมพันธ์กับขนาดฟองที่ต่างกัน ที่ทำให้ความเข้มเปลี่ยนแปลงไป และในการทดลองความต่างศักย์จะลดลงเข้าใกล้ศูนย์ตั้งแต่ระยะใกล้กับปลายฟองอากาศดังแสดงผลในตารางที่ 3-4 แล้ว ซึ่งความแตกต่างนี้น่าจะเกิดจากความเป็นฟอง 3 มิติในการทดลองจริงทำให้เลเซอร์หักเหไปบนอีกระนาบหนึ่งด้วยการหักเหของแสงมากกว่าค่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ตารางที่ 3-5 จะแสดงตำแหน่งที่แสงเลเซอร์มีการสะท้อนออกที่มุมประมาณ  $90^\circ$  ในการทำทดลองจริงซึ่งพบว่าจะเกิดในช่วงประมาณ 0.09-0.13 เท่าของรัศมีความโค้งในทุกกรณี



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

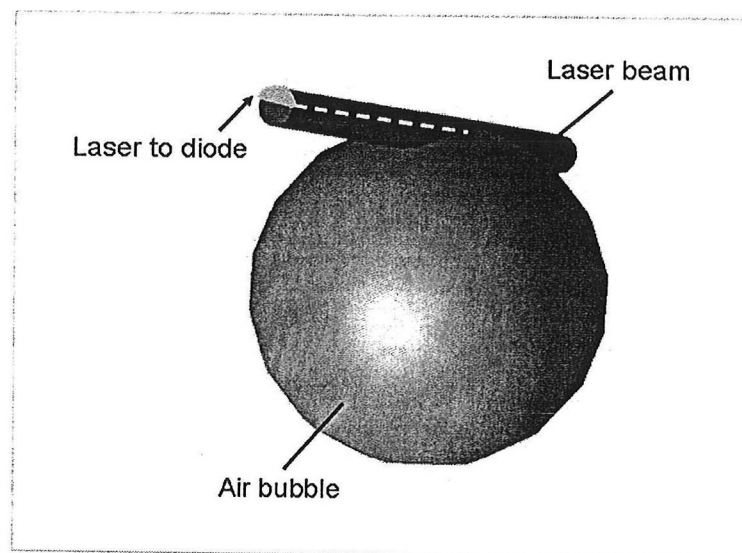
ตารางที่ 3-5 ตำแหน่งที่เลเซอร์หักเหไป  $90^\circ$  องศาจากผลการทดลอง

| เส้นผ่านศูนย์กลางของฟอง (ม.ม.) | ตำแหน่งจากปลายฟอง (ม.ม.) | อัตราส่วนกับรัศมีของฟอง |
|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 22                             | $1.04 \pm 0.02$          | $\sim 0.09$             |
| 16                             | $0.88 \pm 0.02$          | $\sim 0.11$             |
| 13                             | $0.64 \pm 0.02$          | $\sim 0.10$             |
| 8                              | $0.48 \pm 0.02$          | $\sim 0.12$             |
| 6                              | $0.40 \pm 0.02$          | $\sim 0.13$             |

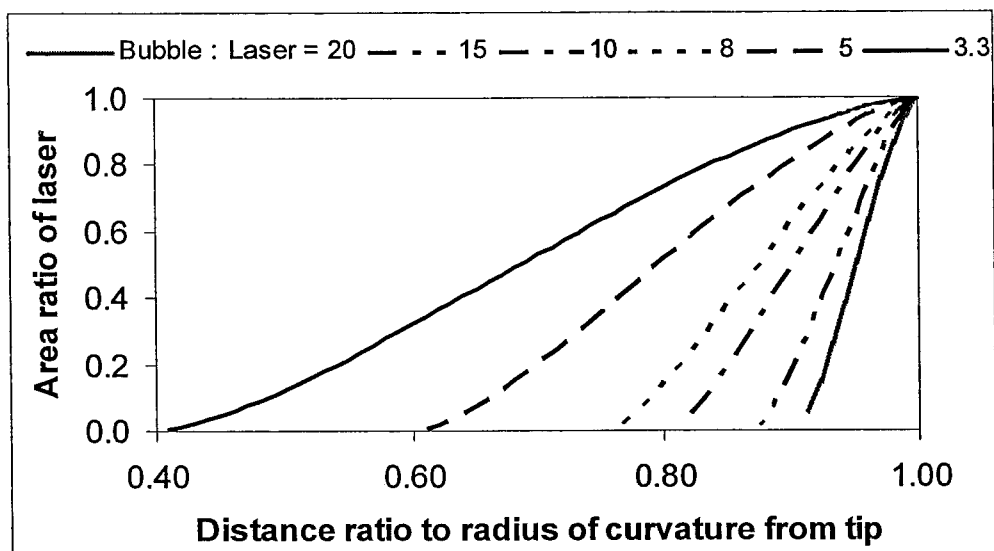
### 3.3.2 แบบจำลองเพื่อหาพื้นที่ของลำแสงเลเซอร์ที่ไม่ถูกบังด้วยฟองอากาศ

จากแนวคิดที่ว่าความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนไดโอดที่ลดลง อาจเกิดจากปรากฏการณ์อื่นที่ไม่ใช่การหักเหของแสงเท่านั้น ในส่วนนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดเพิ่มเติมจากแบบจำลองในส่วนแรกที่ไม่คิดขนาดของลำเลเซอร์ว่าลำเลเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.65 มม. ในความเป็นจริง เมื่อฟองอากาศเคลื่อนที่เริ่มมาดัดลำแสงเลเซอร์ พื้นที่ส่วนหนึ่งของลำเลเซอร์จะเกิดการสะท้อนและไม่ตกกระทบไดโอดตามแบบจำลองแรก ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะยังไม่กระทบฟองอากาศและจะพุ่งไปตกกระทบโฟโตนิกไดโอด ซึ่งในแบบจำลองนี้จะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของการลดลงของพื้นที่ส่วนที่ลำเลเซอร์ไม่ถูกฟองอากาศบังกับตำแหน่งที่เลเซอร์ไปตกกระทบบนฟองอากาศที่ส่วนต่าง ๆ โดยจะหาความสัมพันธ์นี้สำหรับกรณีที่อัตราส่วนของขนาดฟองอากาศและเลเซอร์ต่าง ๆ กัน โดยในเบื้องต้น ผู้วิจัยจะละทิ้งผลการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ (น่าจะมีผลน้อย) 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

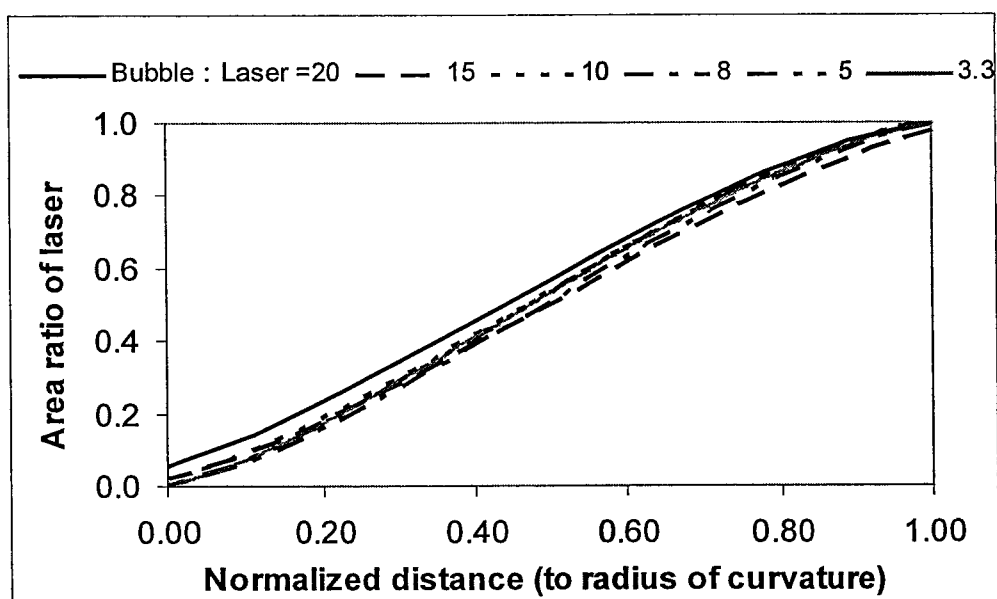


รูปที่ 3-25 หลักการของแบบจำลองที่คำนวณพื้นที่ของลำเลเซอร์ในส่วนที่ไม่ถูกบังด้วยฟองอากาศและพุ่งไปตกกระทบเซนเซอร์ของโฟโตนิกไดโอด



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

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



รูปที่ 3-27 อัตราส่วนพื้นที่ที่เหลืออยู่ต่อพื้นที่ทั้งหมดของลำเลเซอร์ เมื่อแสดงตำแหน่งขอบล่างของลำเลเซอร์เป็นอัตราส่วนกับระยะที่พื้นที่ลดลงจนเป็นศูนย์ สำหรับแต่ละขนาดของลำเลเซอร์



ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์นี้กับผลการทดลองแล้ว อาจจะสรุปได้ว่าผลของการบังsaleเซอร์ไม่ให้เกิดกระทบโฟโต้ไดโอดของฟองอากาศ น่าจะเป็นต้นเหตุหลักที่ส่งผลทำให้ความเข้มของเลเซอร์ที่ตกกระทบไดโอดลดลง และท้ายที่สุดทำให้สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรไฟฟาลดลง อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันสมมติฐานนี้ อาจจะต้องนำปรากฏการณ์ของแสงที่ซับซ้อนมากขึ้น รวมถึงออกแบบการทดลองที่มีความละเอียดมากขึ้นมาช่วยวิเคราะห์ในอนาคต

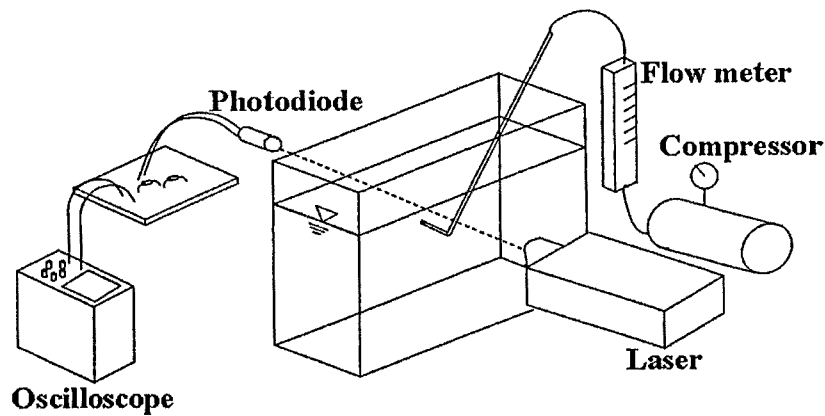
### 3.4 ผลการทดลองกับการไหลสองเฟส

การศึกษาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเอาระบบวัดที่ได้พัฒนาขึ้นมาลองใช้วัดรัศมีความโค้งของฟองอากาศจริง โดยของเหลวที่ใช้คือกลีเซอรินซึ่งมีค่า reflective index เท่ากับ PDMS ที่เป็นโพลีเมอร์ที่ใช้ทำแบบจำลองฟองอากาศ โดยอากาศจากคอมเพรสเซอร์ถูกปล่อยออกจากท่อนอสเชิลที่เอียงทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ และปล่อยให้ลอยขึ้นในแนวดิ่ง สำหรับเหตุผลของการใช้กลีเซอรินเพราะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง และทำให้การเคลื่อนที่ของฟองอากาศไม่เร็วเกินกว่าความสามารถของกล้องวีดีโอแบบธรรมดาจะจับการเคลื่อนที่ได้ทัน

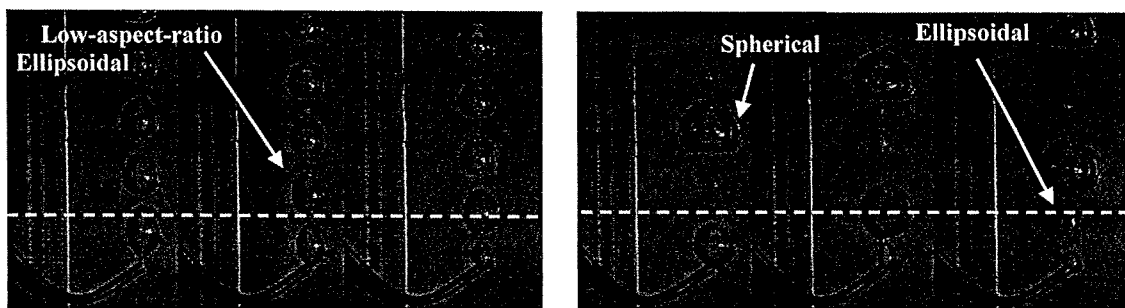
ชุดทดลองประกอบไปด้วยอ่างของเหลวทำจากกระจกหนา 4 ม.ม. มีขนาดภายในเป็น 10.3 x 20.5 x 17.0 ล.บ. เซนติเมตร ท่อนอสเชิลทำจากสแตนเลสมีช่อง 90 องศา และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 ม.ม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 ม.ม. โดยจะจุ่มให้ปลายของนอสเชิลต่ำกว่าระดับผิวของเหลว 6 เซนติเมตร จากอีกด้านหนึ่งของนอสเชิลต่อด้วยสายอากาศที่ต่อกับคอมเพรสเซอร์ มีวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ในการทดลองนี้ได้จัดให้ระยะห่างระหว่างโฟโต้ไดโอดกับเลเซอร์ห่างกัน 20 ซม. ผู้ทดลองได้จัดให้saleเซอร์อยู่เหนือกว่าปากนอสเชิลเท่ากับ 6.7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในนอสเชิล โดยแผนภาพของชุดทดลองที่ใช้โฟโต้ไดโอดได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-28

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

การทดลองนี้ใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงรัศมีของฟองอากาศด้วยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศจากปากนอสเชิล อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัด 2 ประการคือ ฟองที่ไหลออกมาจะมีลักษณะเป็นวงรี และรัศมีความโค้งของฟองอากาศก็เปลี่ยนได้ลำบาก ดังแสดงในรูปที่ 3-29 ซึ่งประกอบด้วยฟองอากาศที่มีรูปร่างทรงวงรี (ลูกรีบี้) วงรีที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างน้อยและทรงกลม โดยแต่ละรูปแบบการไหลเกิดจากสภาวะการทดลอง และมีขนาดของฟองอากาศรัศมีความโค้ง และความเร็วของการไหลของฟอง ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 3-6



รูปที่ 3-28 แผนภาพแสดงชุดทดลองที่ประกอบด้วยชุดกำเนิดฟองอากาศ และโฟโต้ไดโอด



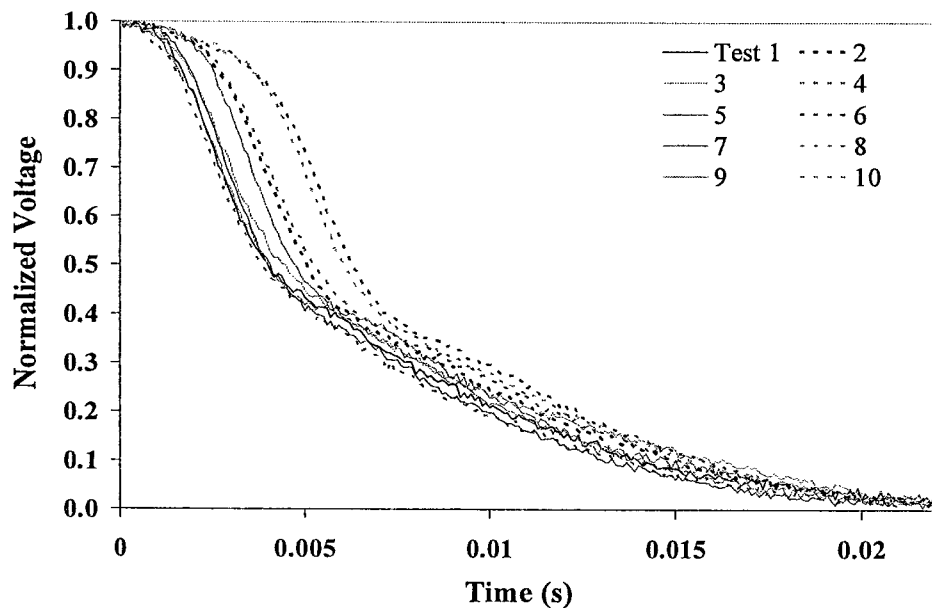
รูปที่ 3-29 ภาพถ่ายลักษณะของฟองอากาศ (ก) วงรีที่มีอัตราส่วนน้อย, (ข) วงรีและทรงกลม

ตารางที่ 3-6 สภาวะการทดลองและรูปร่างฟองอากาศที่เกิดขึ้น

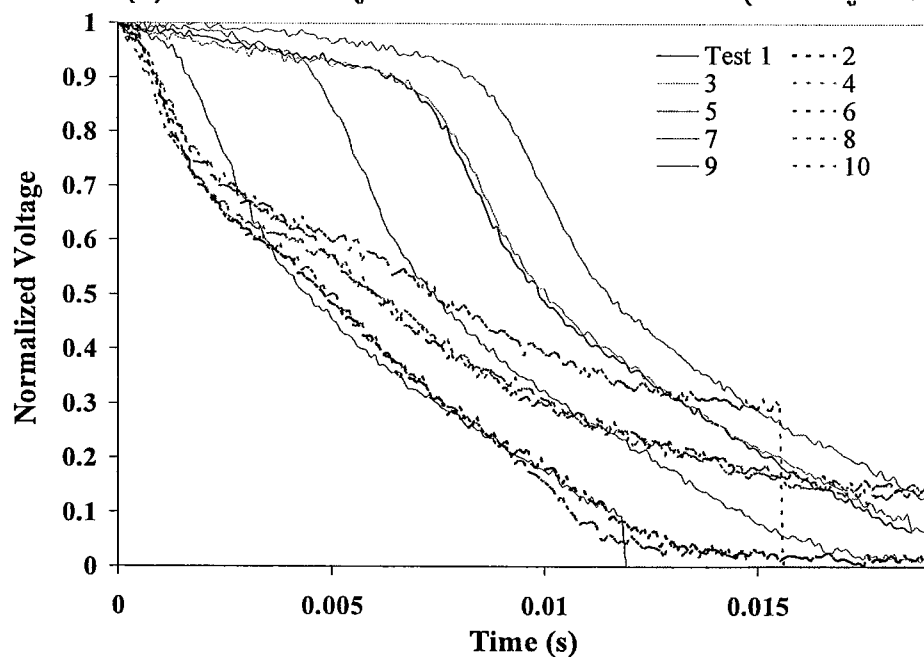
| สภาวะที่ | อัตราการไหลของอากาศ (l/m) | ความเร็วฟองเฉลี่ย (m/s) | รูปร่างฟอง             | รัศมีความโค้งที่ปลายยอดของฟอง (ม.ม.) |
|----------|---------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 1        | 0.24                     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

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

รูปที่ 3-30 ก แสดงสัญญาณความต่างศักย์จากการไหลตามลักษณะในรูปที่ 3-29ก ซึ่งฟองอากาศแต่ละลูกจะแยกออกจากกันชัดเจนและแต่ละลูกก็มีลักษณะเหมือนกันคือเป็นฟองอากาศแบบวงรีที่มีอัตราส่วนน้อย และลักษณะสัญญาณความต่างศักย์ก็ไม่ค่อยแปรปรวนมากนัก



(ก) ฟองอากาศที่มีรูปร่างแบบวงรีที่มีอัตราส่วนน้อย (ทั้งเลขคู่และคี่)



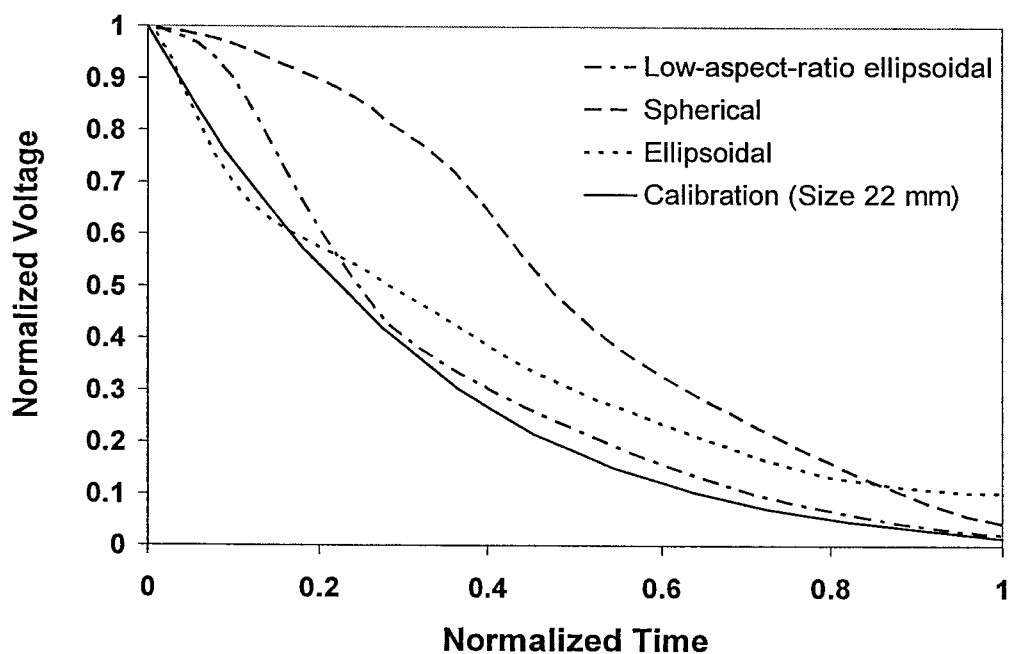
(ข) ฟองอากาศที่มีรูปร่างแบบวงรี (เลขคู่) และแบบทรงกลม (เลขคี่)

รูปที่ 3-30 ผลการทดลองวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาสำหรับการทดลอง

เมื่อพิจารณาสัญญาณความต่างศักย์ของการไหลในรูปที่ 3-30ข จะพบว่าการสลับลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ซึ่งก็สอดคล้องกับรูปถ่ายที่จะเกิดฟองอากาศแบบวงรีและทรงกลมสลับกัน (ตามรูปที่ 3-29ข) โดยมีความแปรปรวนระหว่างแต่ละฟองค่อนข้างมาก

นอกจากนั้น สัญญาณความต่างศักย์จะไม่ลดลงจนใกล้ศูนย์ในบางกรณีซึ่งอาจจะเกิดจากการที่ฟองอากาศเคลื่อนที่เบี่ยงออกไปจากแนวของลำเลเซอร์

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



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

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

สำหรับการวัดรัศมีความโค้งก็นำเอาค่าความเร็วฟองอากาศจากการถ่ายรูปมาใช้ประกอบ ซึ่งด้วยหลักการเดียวกันกับที่ได้กล่าวไปแล้วจะสามารถคำนวณหารัศมีความโค้งของฟองอากาศ

ได้ หลังจากลองทำทั้งสองวิธีแล้วจึงนำผลมาเปรียบเทียบกับความเร็วและรัศมีความโค้งของฟองอากาศที่ได้จากการบันทึกภาพถ่าย และผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ในตารางที่ 3-7

อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบนี้ก็ค่อนข้างจะหยาบ เพราะการประมาณค่าความเร็วของการไหลและขนาดของฟองที่ได้จากการทดลองก็就会有ความผิดพลาด โดยค่าความเร็วจะเป็นความเร็วเฉลี่ยในช่วง 0.04 วินาที และขนาดของรัศมีฟองอากาศที่วัดจากภาพถ่ายก็อาจจะไม่ใช่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ฟองอากาศติดกับลากลูเชอร์

ตารางที่ 3-7 การเปรียบเทียบความเร็วฟองระหว่างการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าและการถ่ายภาพ

| สถานะที่ | 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 พบว่าค่าความเร็วของฟองอากาศที่ได้มาจากการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีความแตกต่าง 4 - 5 เท่าจากค่าความเร็วที่ได้มาจากการถ่ายภาพ 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 ผู้วิจัยคิดว่าจะสามารถใช้อุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดแบบลำแสงเดียวในการวัดการไหลจริงได้ดังนี้คือ การตรวจสอบว่าขนาดฟอง (อัตราส่วนระหว่างขนาดฟองอากาศต่อขนาดลำแสงเลเซอร์) อยู่ในช่วงที่ทำการสอบเทียบได้ โดยดูจากข้อมูลความต่างศักย์ที่ลดลงตามเวลาที่ถูก normalized ด้วยช่วงเวลาที่มีความต่างศักย์ลดลงจนใกล้ศูนย์ ว่าสอดคล้องเป็นแนวโน้มเดียวกันหรือไม่ หากผลการวัดสอดคล้องแล้ว จะสามารถใช้ตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับการไหลได้ หากแนวโน้มการลดลงของค่าความต่างศักย์มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามก็อาจจะเป็นไปได้ 2 ลักษณะคือ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดฟองหรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลในลักษณะที่มีความเร่งไม่เท่ากับศูนย์ หรือมีการเปลี่ยนแปลงทั้งสองอย่างพร้อมกัน

นอกจากนั้น สำหรับการไหลที่รู้ขนาดฟองแน่นอน เช่น การไหลในท่อ เมื่อใช้เลเซอร์ลำเดียววัด อาจจะทราบความเร็วของไหลได้โดยดูจากเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ และสำหรับการไหลที่รู้ความเร็วฟองแน่นอน จะสามารถทราบขนาดของฟองอากาศได้ด้วยหลักการเดียวกัน อย่างไรก็ตามข้อสันนิษฐานเหล่านี้ยังอยู่ภายใต้เงื่อนไขว่าความเร็วของการไหลของฟองอากาศต้องคงที่

ในส่วนการอธิบายว่าเหตุใดการลดลงของของสัญญาณความต่างศักย์จึงมีแนวโน้มตามที่ได้จากการทดลอง ผู้วิจัยจึงทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับเรื่องแสงขึ้นมา และลองเปรียบเทียบผลจากการศึกษาทั้งสองส่วน จากผลการเปรียบเทียบพบว่ากลไกหนึ่งที่น่าจะมีผลโดยตรงคือการที่ปลายยอดของฟองอากาศเคลื่อนที่บังลำเลเซอร์ที่ไปตกกระทบบนไดโอด สำหรับเลเซอร์ที่ไปตกกระทบที่ผิวฟองจะสะท้อนออกไปในทิศทางอื่น และมีพื้นที่ของเลเซอร์ส่วนหนึ่งที่ยังพุ่งไปตกบนโฟโตไดโอด โดยลักษณะการลดลงของพื้นที่ส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานที่ไดโอดได้รับ และแนวโน้มของการลดลงของพื้นที่นี้จะแตกต่างกันสำหรับฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้งต่างๆ และมีลักษณะการลดลงสอดคล้องกับลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์จากการทดลอง

ในส่วนสุดท้าย ผู้วิจัยได้ลองสร้างการไหลของฟองอากาศจริงขึ้นมา แล้วลองใช้อุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดวัดเพื่อพิสูจน์แนวคิดเกี่ยวกับการใช้รัศมีความโค้งรวมทั้งความเร็วของการไหล หากทราบพารามิเตอร์อีกอันหนึ่งอยู่แล้ว ผลการทดลองพบว่าผลการวัดผิดไปจากพารามิเตอร์ของการไหลจริงมาก อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวอาจจะต้องควบคุมขนาดของฟองและความเร็วได้ไม่มากนัก