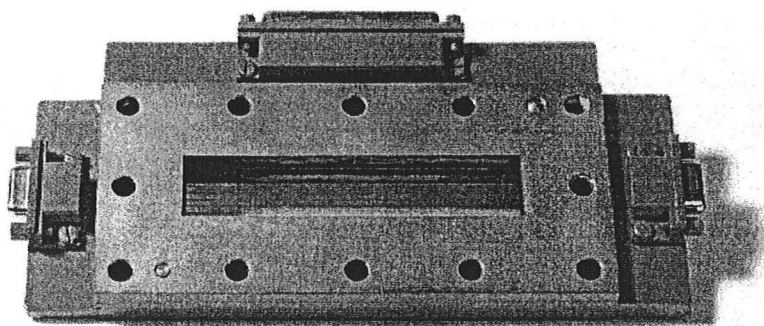


## บทที่ 2

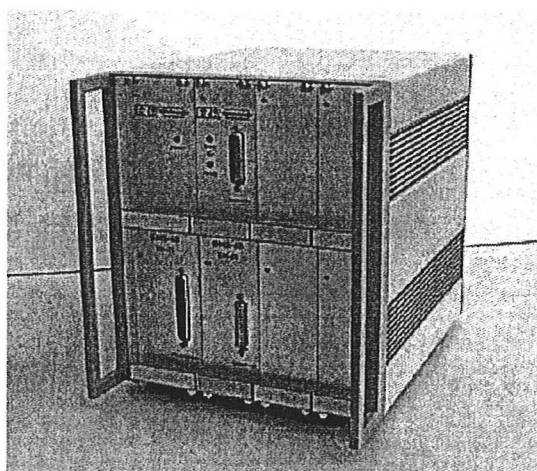
### Wire Mesh Topography

Wire Mesh Tomography (WMT) เป็นเทคนิคการวัดที่พัฒนาโดยใช้หลักการวัดแบบเดียวกับเทคนิคการวัดแบบ needle probes เนื่องจากเทคนิคการวัดแบบ needle probes มีข้อด้อยประการสำคัญ คือ ไม่สามารถวัดพารามิเตอร์ของของไหลสองเฟสที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลาตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อในเวลาเดียวกัน นอกจากนั้นเวลาที่ใช้ในการวัดให้ได้ข้อมูลของของไหลสองเฟสใช้เวลานานอีกด้วย เพื่อลดข้อด้อยเหล่านั้น จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนา WMT โดยใช้ตาข่ายลวดขนาดเล็กเพื่อทำหน้าที่เป็น needle probes หลาย ๆ อัน ติดตั้งครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดของพื้นที่การวัดเพื่อให้สามารถวัดพารามิเตอร์ของของไหลสองเฟสได้ตลอดพื้นที่หน้าตัดท่อในช่วงเวลาขณะใดขณะหนึ่ง

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)



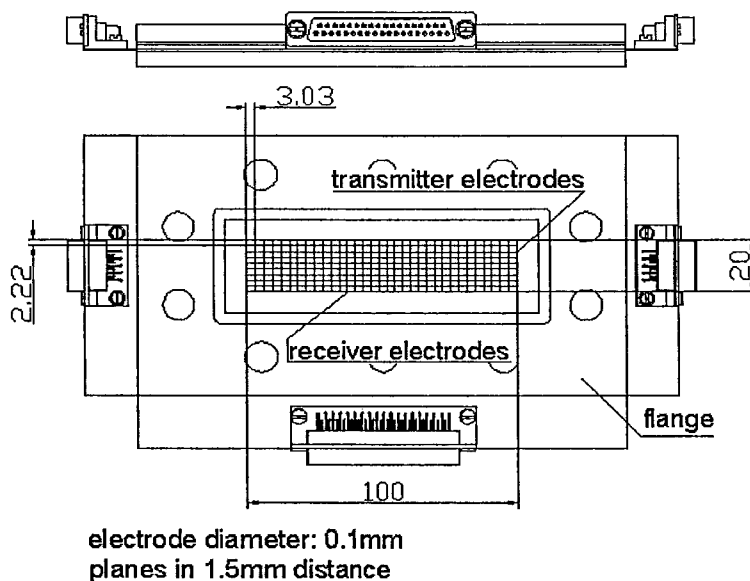
รูปที่ 2-1 WMS (Wire Mesh Sensor)



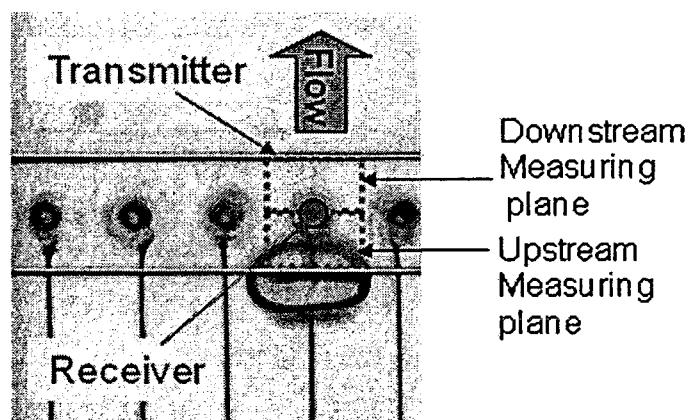
รูปที่ 2-2 Data Acquisition

## 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 ลักษณะการวางตัวของชั้นตาข่ายลวดแบบนี้ทำให้เกิดขึ้น measuring volume 2 ชั้น ประกอบด้วย upstream measuring plane ซึ่งวัดก่อนถึงกลาง WMS และ downstream measuring plane ซึ่งวัดหลังถึงกลาง WMS และจะมี spatial resolution ของ WMS เท่ากับ  $2.22 \times 3.03 \times 1.5 \text{ mm}^3$  หรือประมาณขนาดของฟองก๊าซที่เป็นทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.68 มม ดังแสดงในรูปที่ 2-3ข



(ก) โครงสร้างของ WMS (ภาพในทิศขวางการไหล)



(ข) ลักษณะทางกายภาพของ measuring plane (ภาพด้านข้างของการไหล)

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

การทำ Data Acquisition ของ WMT สามารถอธิบายได้จากตัวอย่างของวงจรควบคุมของ WMT ในรูปที่ 2-4 โดยตาข่ายลวดซึ่งเป็น WMS จะอยู่ในท่อสี่เหลี่ยม (กรอบสี่เหลี่ยม) เป็นส่วนที่สัมผัสฟองก๊าซ 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

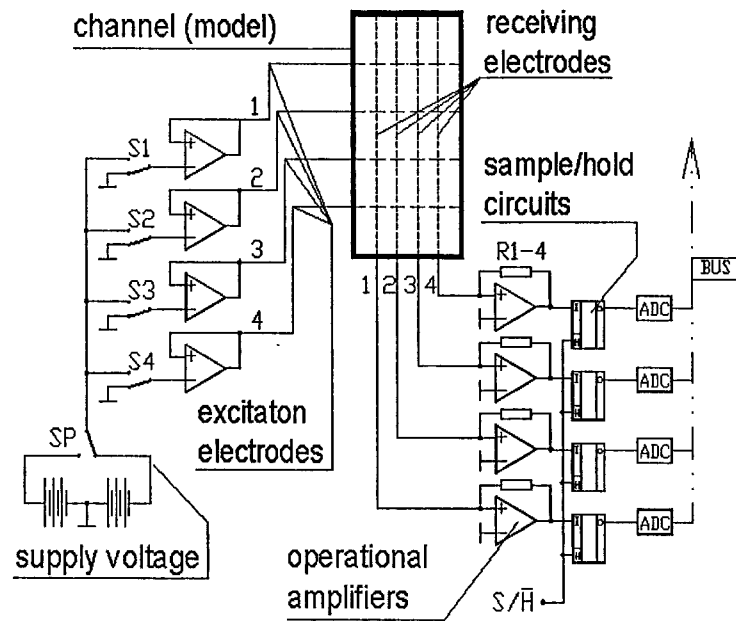
ขั้นตอนการควบคุมเริ่มจากการกระตุ้น transmitter wire เมื่อ SP และ S2 ปิดแล้วจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ transmitter เส้นที่ 2 ( $U_{T2}$ ) การกระตุ้นนี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ receiver wire เส้นที่ 3 ( $I_{R3}$ ) โดยกระแสไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตามสภาพการนำไฟฟ้าของของไหลที่อยู่ตรงกลางระหว่างลวดทั้งสองซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันระหว่างของเหลวและก๊าซ หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะถูกแปลงเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยตัวต้านทานไฟฟ้า R2 และสัญญาณความต่างศักย์จะโดยสุ่มและขยายโดย sample and hold circuit (S/H) หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิตอลด้วย A/D converter และจะบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์ ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2-5

สำหรับรูปที่ 2-6 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานและความเชื่อมโยงของสัญญาณ โดยเริ่มจาก control unit เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมลำดับในการทำงานของการเปิดปิดสวิตช์ ซึ่งควบคุมด้วยสัญญาณกระตุ้นทางไฟฟ้าที่ส่งมาจาก excitation pulse generation เมื่อสวิตช์ทำงานแล้ว ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะส่งไปยังเซนเซอร์ สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์จะนำไปขยายสัญญาณที่ pre-amplifier และถูกสุ่มบันทึกและขยายสัญญาณที่สุ่มบันทึกอีกครั้งที่ sample & hold amplifier หลังจากนั้นสัญญาณจะแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลที่ A/D convert และ parallel data interface และบันทึกส่งคอมพิวเตอร์ตามลำดับ หลังจากนั้นสัญญาณส่วนหนึ่งจะส่งกลับไปยัง control unit เพื่อเป็น feedback signal สำหรับข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของ Data Acquisition ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2-1 โดยความถี่สูงสุดของ Data Acquisition อยู่ที่ 12,000 frames/s

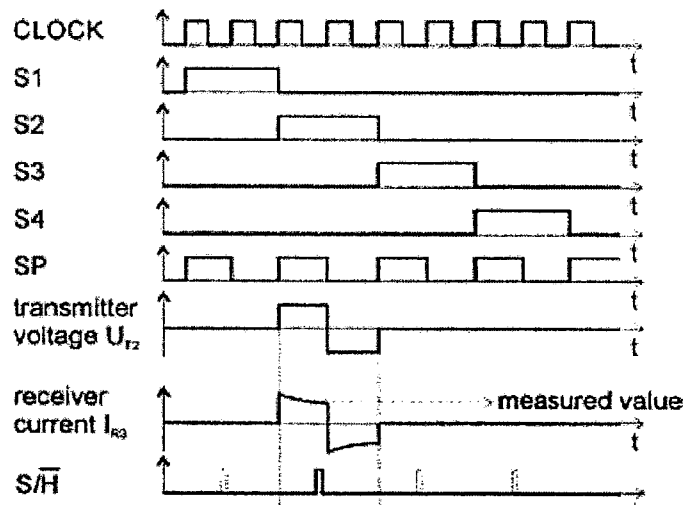
การเปลี่ยนจากสัญญาณทางไฟฟ้ามาเป็นค่าอัตราส่วนปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรของไหลสองเฟส (void fraction) จะคำนวณแยกกันแต่ละจุดการวัดโดยจะแสดงค่า void fraction ของแต่ละจุดในของไหลสองเฟส โดยค่าอัตราส่วนปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรของไหลสองเฟสเฉพาะที่ในช่วงขณะใดขณะหนึ่ง หรือ local time-dependent void fraction,  $\varepsilon(x_1, x_2, t)$  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 โดยมีสมมติฐานว่าความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้าและ void fraction เป็นแบบเชิงเส้นตรง

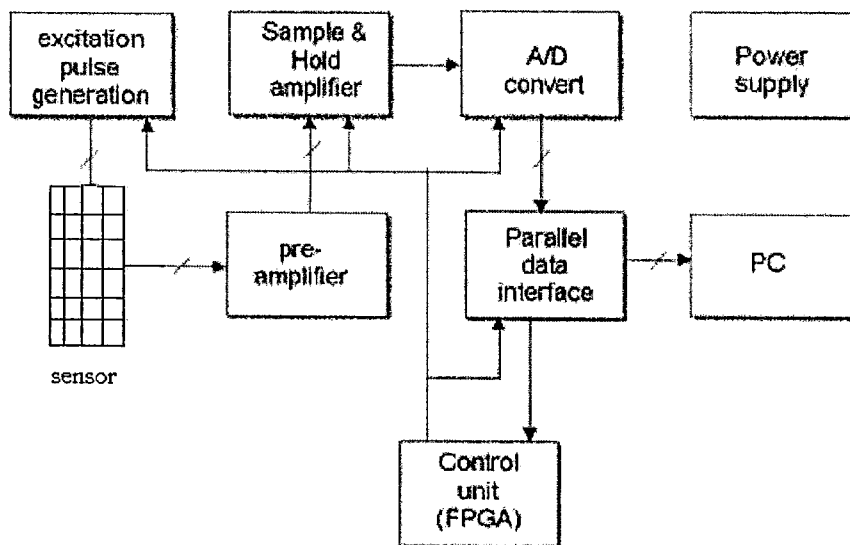


รูปที่ 2-4 วงจรทางไฟฟ้าอย่างง่ายของ WMT



รูปที่ 2-5 การควบคุมลำดับการทำงานของ WMT





รูปที่ 2-6 โครงสร้างอย่างง่ายของการประมวลผลของ WMT

ตารางที่ 2 – 1 คุณสมบัติของ Data Acquisition Unit

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

## 2.2 การคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ

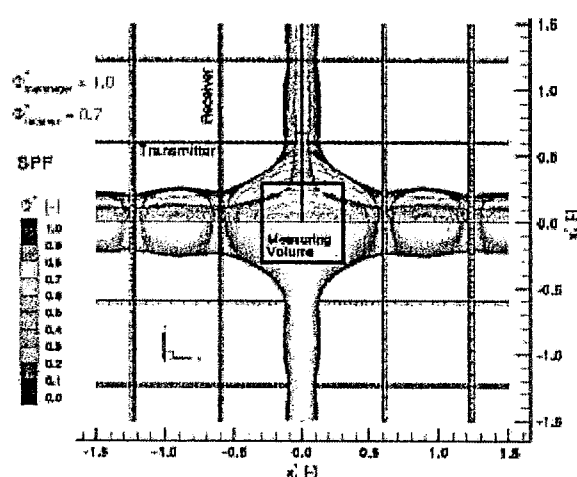
ในส่วนนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับจากเซนเซอร์มาเป็นข้อมูลของการไหลสองเฟส โดยข้อมูลที่จะกล่าวถึงในรายงานฉบับนี้ คือ ค่าอัตราส่วนปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรของไหลสองเฟสเฉพาะที่ ความเร็วฟองก๊าซ และปริมาตรฟองก๊าซ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

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

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

ระหว่าง transmitter plane ตัดกับ 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 ตัดกับ 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) ดังนั้นหากทำการวัดเป็นเวลา  $T_w$  หนึ่ง ๆ แล้วจะนำค่าที่วัดได้ในช่วงเวลาดังกล่าวมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดความไม่แน่นอนของข้อมูล ดังนั้นสมการที่แสดงค่า local time-independent void fraction จะนิยามได้ดังนี้

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

## 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 plane หารด้วยเวลาที่หาได้จากข้อ (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 ( $U_{GG,Max}$ ) ที่สามารถวัดได้ที่ สามารถแสดงได้โดยสมการ

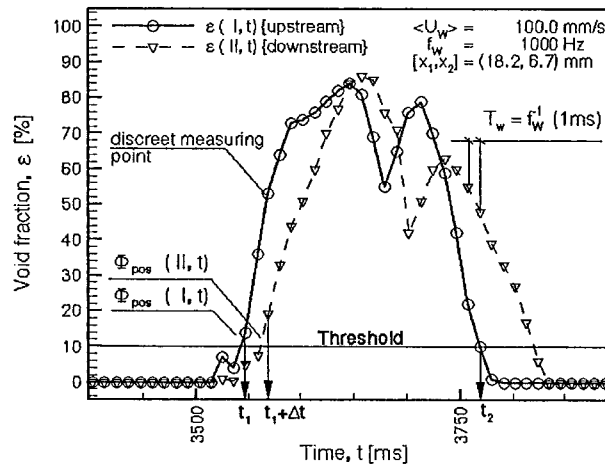
$$U_{GG,max} = \Delta_w \cdot f_w \quad (2-3)$$

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  $d$  คือจำนวนครั้งของความถี่นั้น  
ได้ระหว่างที่ฟองก๊าซเคลื่อนที่จาก upstream plane ไปถึงจุดใด ๆ ใน downstream plane



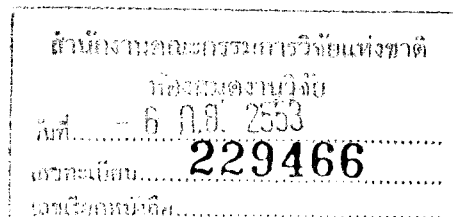
รูปที่ 2-8 ลักษณะสัญญาณที่แปลงเป็น local time dependent void fraction  
ที่ได้จาก upstream plane และ down stream plane

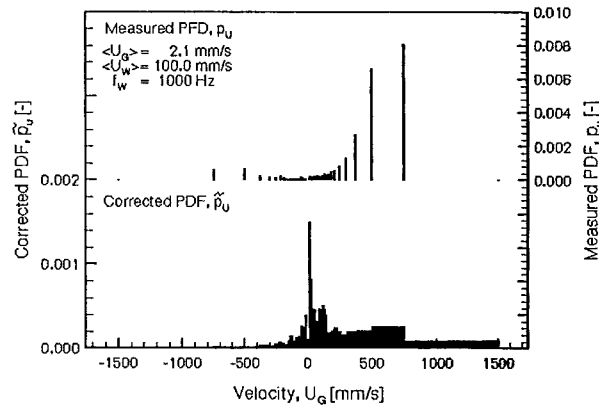
อย่างไรก็ตามค่าความเร็วฟองก๊าซที่วัดได้จาก WMT จะมีค่าเป็นจำนวนเต็ม (จำนวนเท่าของระยะห่างระหว่าง plane และความถี่ที่ใช้) เท่านั้น เนื่องจาก  $f_w$  ที่ใช้มีค่าเพียง 1,000 Hz ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อวัดความเร็วฟองก๊าซ และนำมาแสดงในรูปของ probability density function (PDF) ดังแสดงในรูปที่ 2-9 ซึ่งจะเห็นว่า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

ปัญหานี้จึงถูกปรับปรุงโดยการจัดการกระจายตัวใหม่เพื่อให้การกระจายตัวมีความต่อเนื่อง คล้ายคลึงกับลักษณะทางกายภาพ โดยใช้หลักการการกระจายตัวของ  $P_u$  ภายในช่วงของความเร็วที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งช่วงของความเร็วที่ไม่แน่นอนนี้คือ ค่า uncertainty ของความเร็วฟองก๊าซ โดยอาศัย re-distribution function ( $\tilde{p}_u$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{\{i\}} p_u U_{GG} = \sum_{\{j\}} \tilde{p}_u U_{GG} \quad (2-5)$$

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



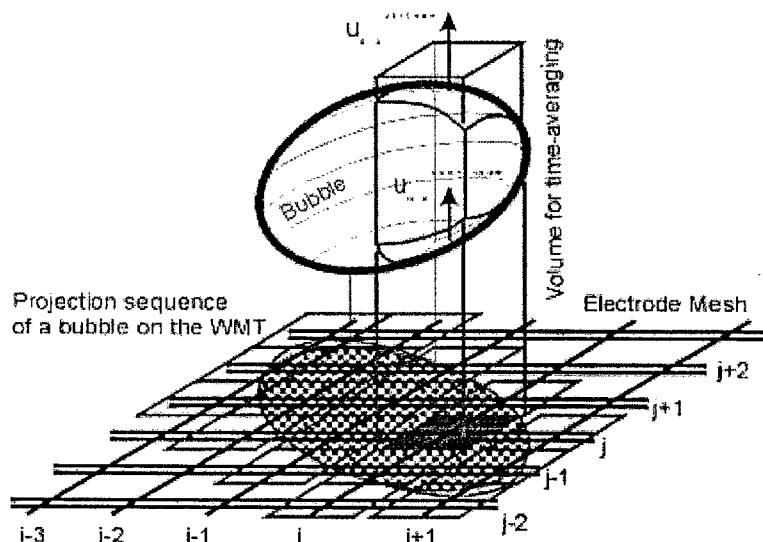


รูปที่ 2-9 Measured PDF และ re-distributed PDF ของความเร็วฟองก๊าซ

### 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

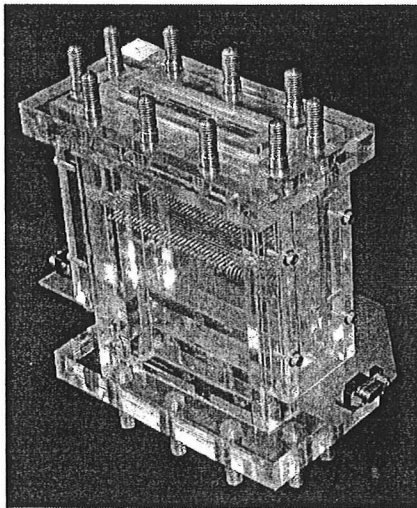
- (1) เริ่มจากเก็บข้อมูลของ time-dependent void fraction ที่ตำแหน่งและเวลาใด ๆ
- (2) คำนวณปริมาตรของฟองก๊าซ โดยอินทิเกรตปริมาตรของฟองก๊าซในส่วนที่ local time-dependent void fraction  $\varepsilon(x_1, x_2, t)$  มีความต่อเนื่องกัน ตามเวลาใด ๆ โดยวิธีการคำนวณนี้จะใช้ fill algorithm ที่เสนอโดย Prasser et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



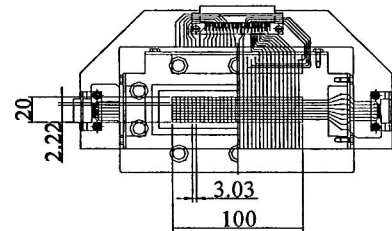
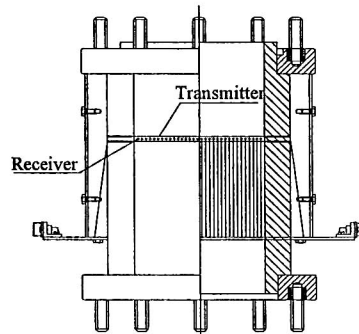
รูปที่ 2-10 Bubble projection บน WMS และการอินทิเกรตปริมาตรของฟองก๊าซ

## 2.3 ชุดทดลองและผลการทดลอง

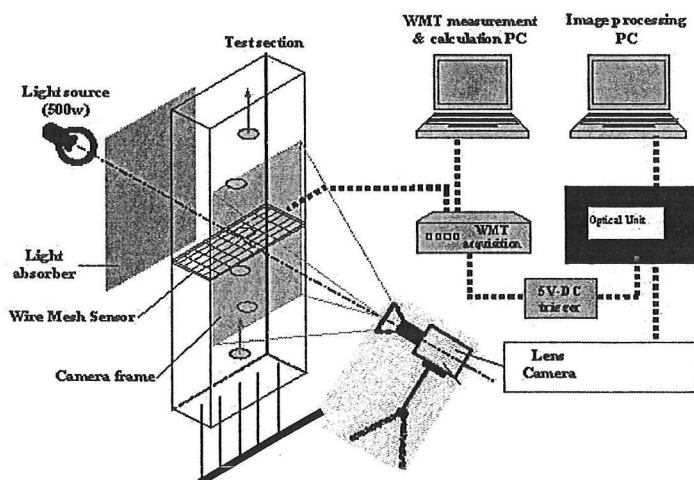
ในการทดลองนี้ ใช้ชุด WMS ที่มีโครงสร้างแบบใสซึ่งพัฒนาขึ้นมาเองดังแสดงในรูปที่ 2-11 และ รูปที่ 2-12 โดยได้รับความร่วมมือจากนักวิจัยของ Tokyo Institute of Technology ส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่วัดได้จาก WMT จะเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดโดยใช้การถ่ายภาพ โดยส่วนประกอบที่สำคัญของชุดทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่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



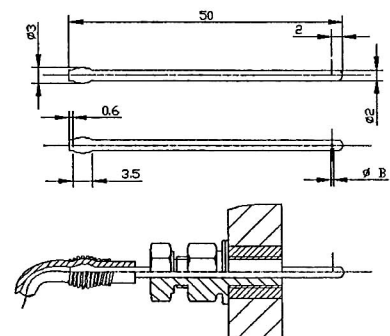
รูปที่ 2-11 ชุด WMS ที่มีโครงสร้างแบบใส



รูปที่ 2-12 ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบ



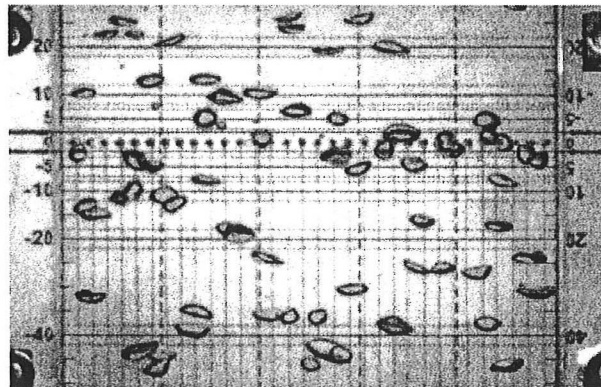
รูปที่ 2-13 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดฟองก๊าซในของไหลสองเฟส โดยใช้การถ่ายภาพและ WMT ในขณะเดียวกัน



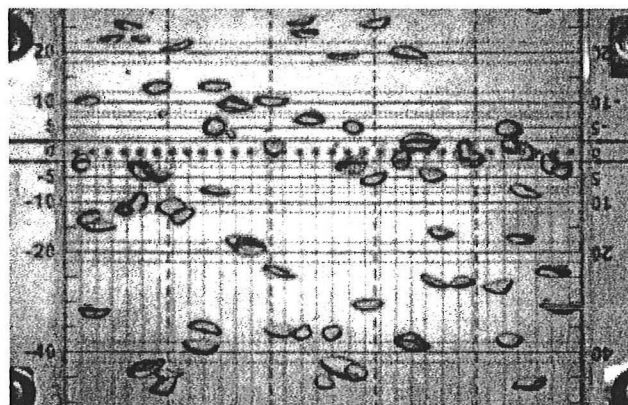
อุปกรณ์สร้างฟองก๊าซ

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 หลังจากนั้นข้อมูลวิดีโอจะเปลี่ยนเป็นภาพถ่าย 1,000 ภาพ และใช้โปรแกรม Image Pro เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของฟองก๊าซที่ต้องการนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดจาก WMT โดยคุณสมบัติเหล่านั้นคือ void fraction, ขนาดฟองก๊าซ และความเร็วฟองก๊าซ

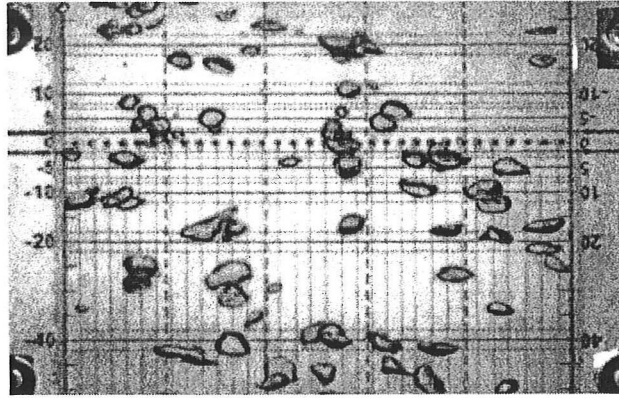
ชุดทดลองที่ใช้มีขนาดความกว้าง 100 ม.ม. และท่อที่ฟองก๊าซไหลผ่านมีความยาวประมาณ 80 ม.ม. สำหรับภาพถ่ายฟองก๊าซสำหรับความเร็วต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-14 ถึงรูปที่ 2-16 โดยมีสภาวะการไหล 3 สภาวะคือ รูปที่ 2-14 แสดงภาพถ่ายที่ความเร็วของอากาศ = 1.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s รูปที่ 2-15 แสดงภาพถ่ายที่ความเร็วของอากาศ = 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



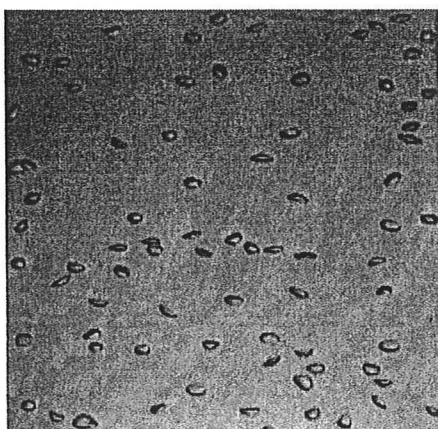
รูปที่ 2-15 กรณีความเร็วของอากาศ = 2.5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s



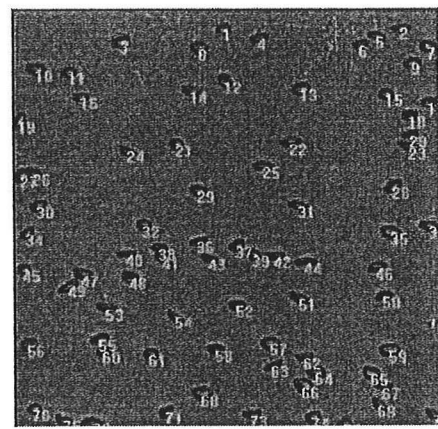
รูปที่ 2-16 กรณีความเร็วของอากาศ = 5.0 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s

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

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

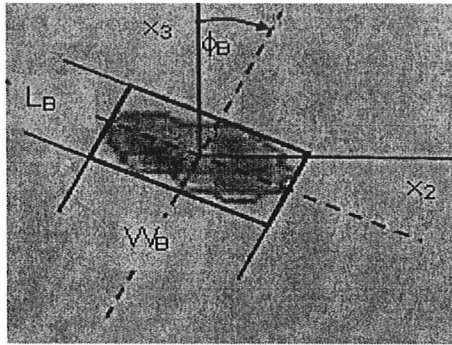


รูปที่ 2-17 ตัวอย่างรูปถ่ายฟองก๊าซ

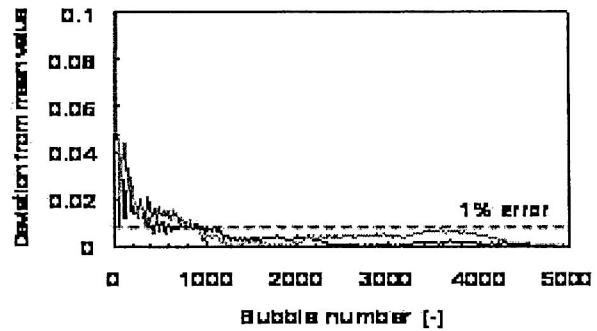


รูปที่ 2-18 ตัวอย่างรูปที่ได้กำหนดตำแหน่งฟองก๊าซแล้ว





รูปที่ 2-19 ตัวอย่างการหาขนาดของฟองก๊าซ โดยการหาความยาวของแกนหลักทั้งสอง

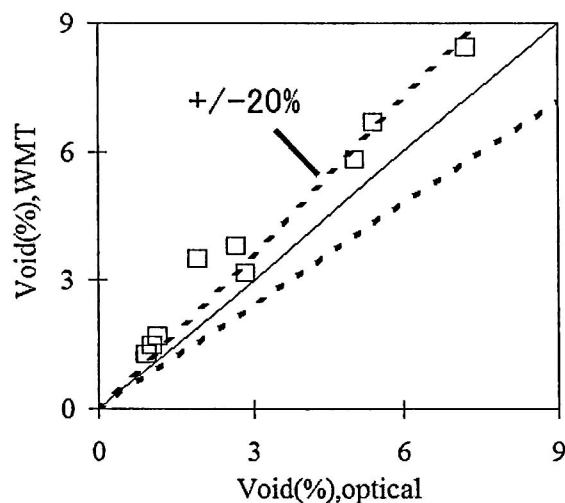


รูปที่ 2-20 แสดงการเฉลี่ยข้อมูลของฟองก๊าซ หลายฟอง เพื่อให้ค่าเฉลี่ยมีความแปรปรวนต่ำกว่าค่าที่กำหนด

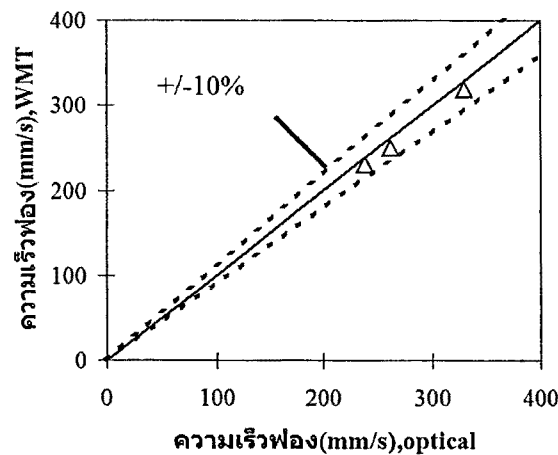
หลังจากนั้นได้คำนวณ void fraction เฉลี่ย, ความเร็วฟองก๊าซ, ขนาดฟองก๊าซในทั้งปริมาตรที่สนใจสำหรับแต่ละวิธีการวัดทั้งวิธี WMT และวิธีการถ่ายภาพเรียบร้อยแล้ว จึงนำค่าเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกันระหว่างผลการวัดด้วยวิธีการทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2-21 ถึงรูปที่ 2-23

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

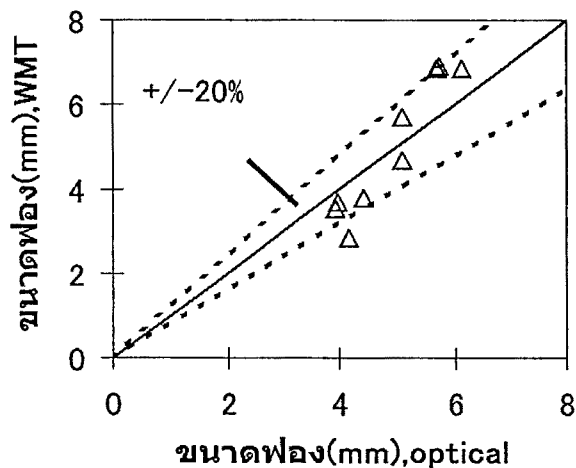
รูปที่ 2-22 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลความเร็วฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งหมดในปริมาตรที่สนใจ ในช่วงความเร็วฟองก๊าซระหว่าง 250-350 mm/s จากกราฟจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่าง  $\pm 10\%$  ส่วนรูปที่ 2-23 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลขนาดฟองก๊าซเฉลี่ยทั้งหมดในปริมาตรที่สนใจ ในช่วงขนาดฟองก๊าซระหว่าง 2-8 mm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



รูปที่ 2-21 เปรียบเทียบข้อมูลของ void fraction เฉลี่ยระหว่าง WMT และการถ่ายภาพ



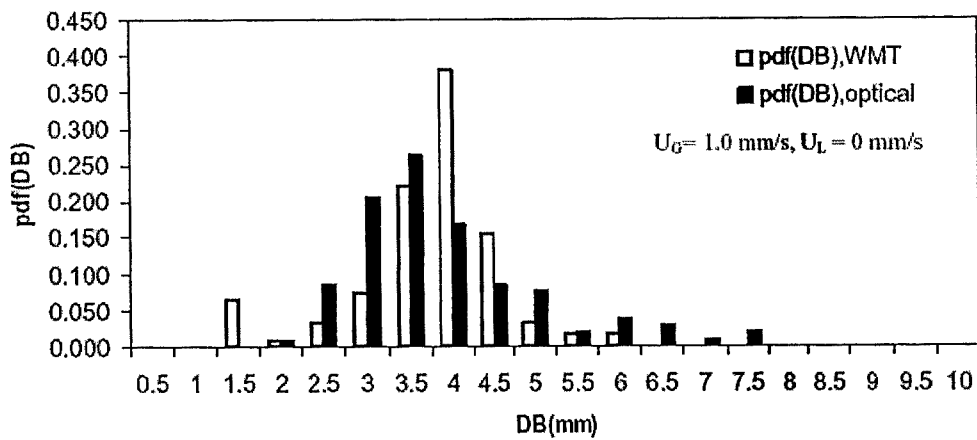
รูปที่ 2-22 การเปรียบเทียบข้อมูลของความเร็วฟองก๊าซระหว่าง WMT และการถ่ายภาพ



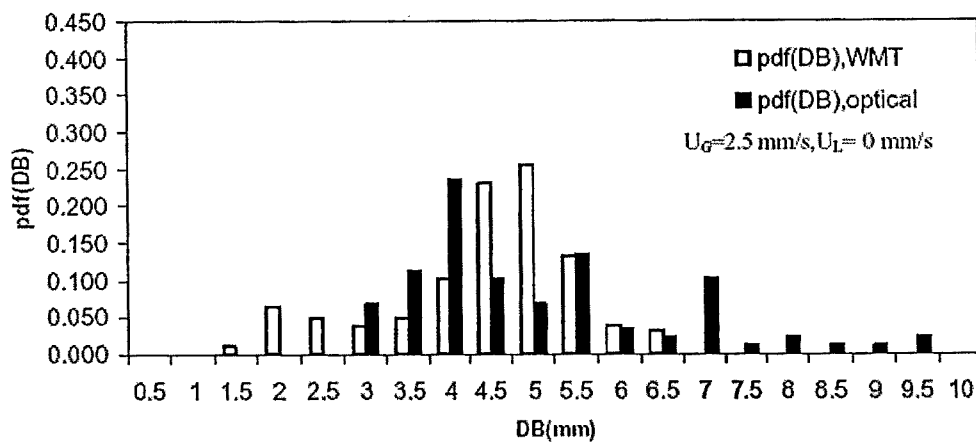
รูปที่ 2-23 การเปรียบเทียบข้อมูลของขนาดฟองก๊าซระหว่าง WMT และการถ่ายภาพ

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)

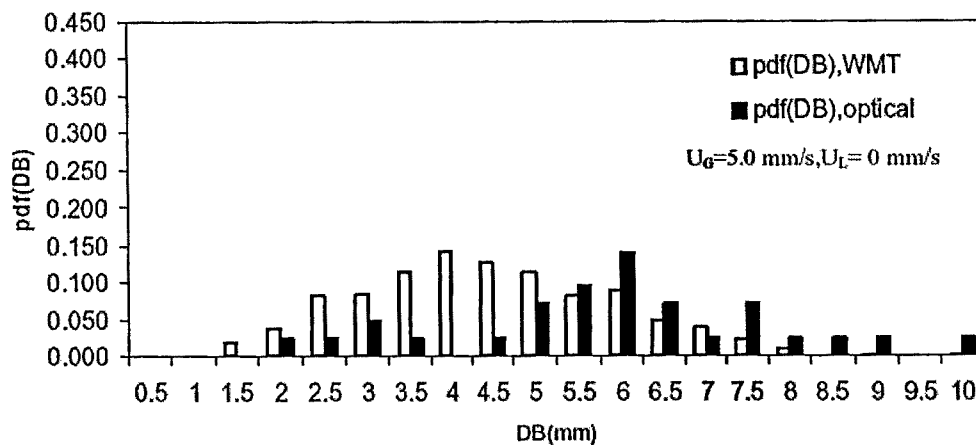
แต่อย่างไรก็ตาม ค่า threshold ที่เหมาะสมยังไม่สามารถหาได้ในขณะนี้ ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้ค่าคงที่ไปก่อน ซึ่งการกำหนดให้มีค่าดังกล่าวก็จะส่งผลทำให้ WMT อาจเกิดความผิดพลาดของการใช้ threshold ที่ไม่เหมาะสมในการหาข้อมูลขนาดฟองก๊าซ นอกจากนั้นยังมีการสมมติรูปร่างฟองก๊าซในการคำนวณระหว่างวิธีการวัดทั้งสองที่แตกต่างกัน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



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



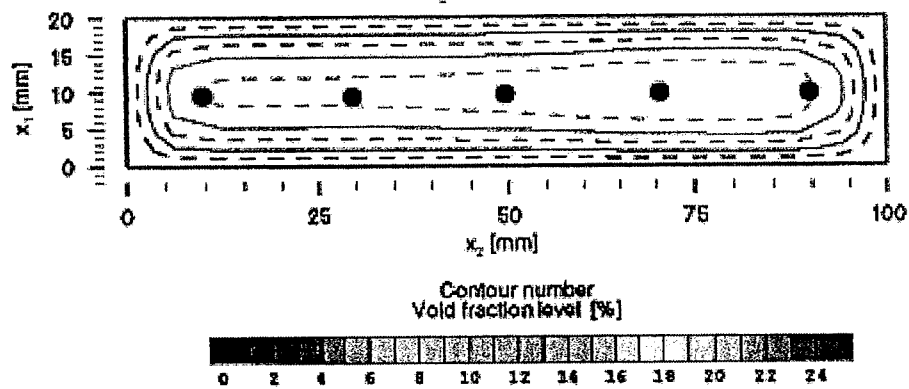
รูปที่ 2-25 การกระจายตัวของฟองก๊าซ ของสภาวะการไหลที่  
ความเร็วของอากาศ = 2.5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s



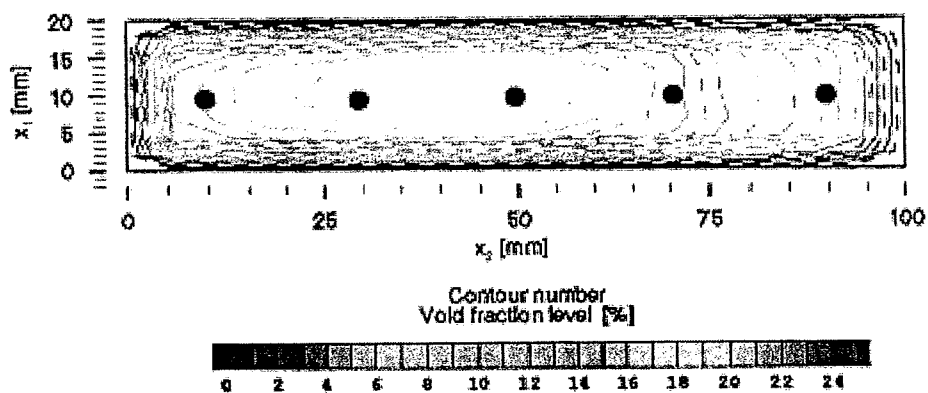
เมื่อ  $U_g$  คือ ความเร็วของก๊าซ และ  $U_L$  คือ ความเร็วของของไหล

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

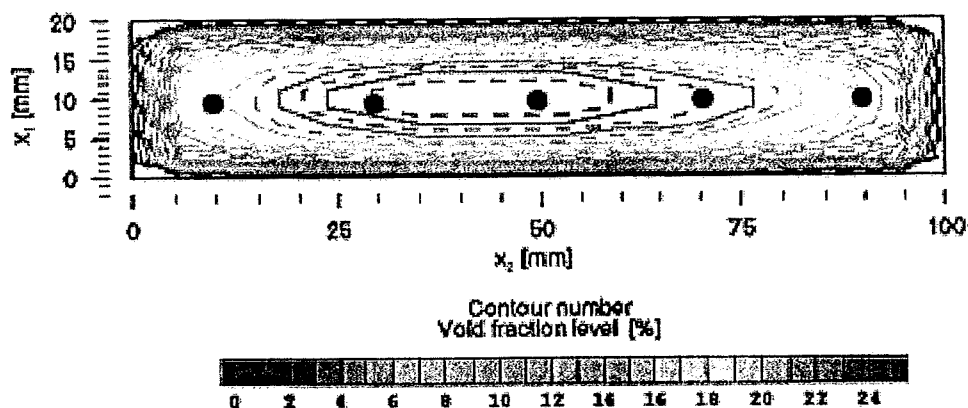
อย่างไรก็ตาม วิธีการ WMT ก็ยังได้เปรียบวิธีการวัดแบบอื่น ๆ คือสามารถวัดข้อมูลอัตราส่วนปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรของไหลสองเฟสเฉพาะที่ (local void fraction) ได้โดยตรง โดยข้อมูล local void fraction เฉลี่ยของสภาวะการไหลทั้ง 3 การทดลอง ได้แสดงในรูปที่ 2-27 ถึงรูปที่ 2-29 (จุดดำในรูปแสดงตำแหน่งของเข็มฉีดยาที่เป็นจุดกำเนิดฟองก๊าซ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



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



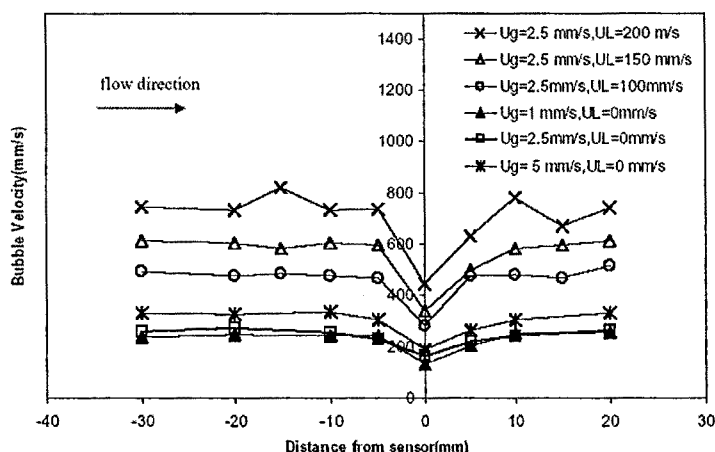
รูปที่ 2-28 Local void fraction ของสภาวะการไหลที่  
ความเร็วของอากาศ = 2.5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s



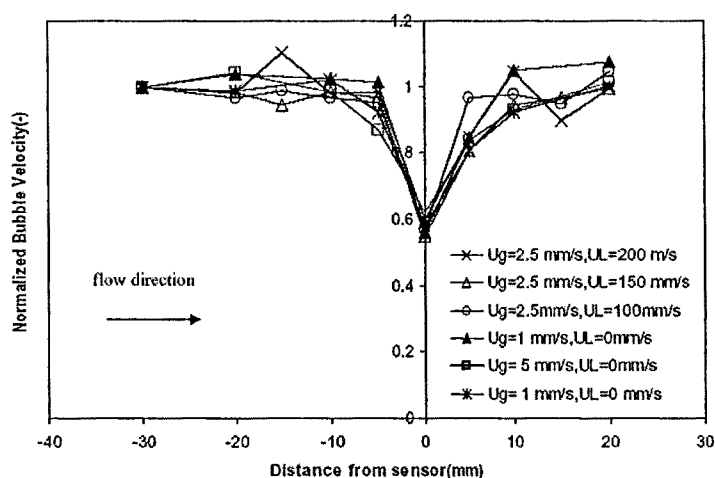
รูปที่ 2-29 Local void fraction ของสภาวะการไหลที่  
ความเร็วของอากาศ = 5 mm/s, ความเร็วของน้ำ = 0 mm/s

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



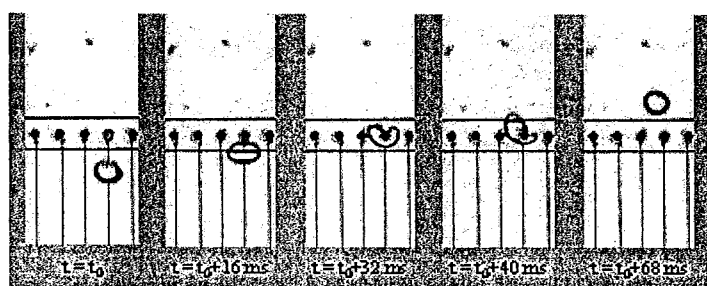
หมายเหตุ  $U_g$  คือ ความเร็วของก๊าซ และ  $U_L$  คือ ความเร็วของของไหล  
รูปที่ 2-30 ความเร็วของฟองก๊าซเมื่อไหลผ่านเส้นลวดเซนเซอร์



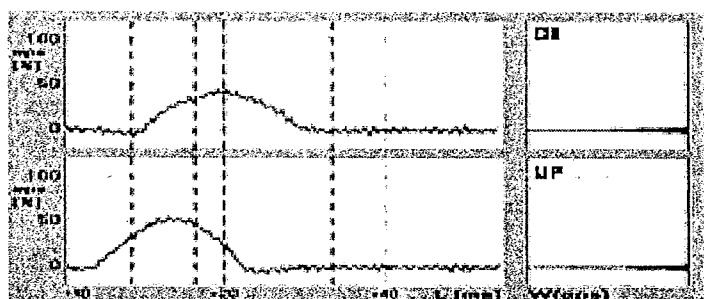
หมายเหตุ เมื่อ  $U_g$  คือ ความเร็วของก๊าซ และ  $U_L$  คือ ความเร็วของของไหล

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 ซึ่งแสดงค่าร้อยละของ void fraction ตามแกนเวลา เราพบว่าสัญญาณที่ได้จาก upstream plane (ภาพล่าง) และ downstream plane (ภาพบน) มีลักษณะที่ค่อนข้างเหมือนกันโดยมีลักษณะของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่าการลดลงของความเร็วฟองก๊าซไม่ส่งผลต่อสัญญาณที่ WMT วัดได้มากนัก

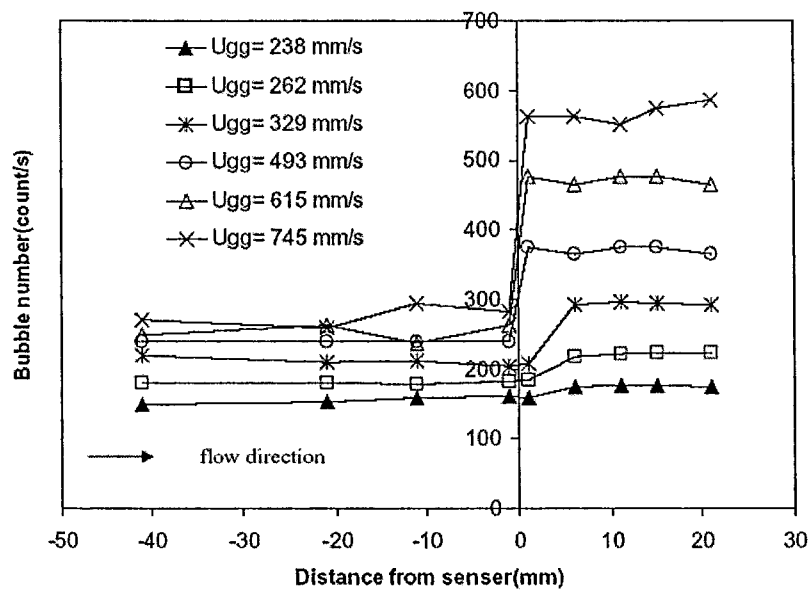


รูปที่ 2-32 ลักษณะของฟองก๊าซเมื่อไหลผ่านเส้นลวดเซนเซอร์

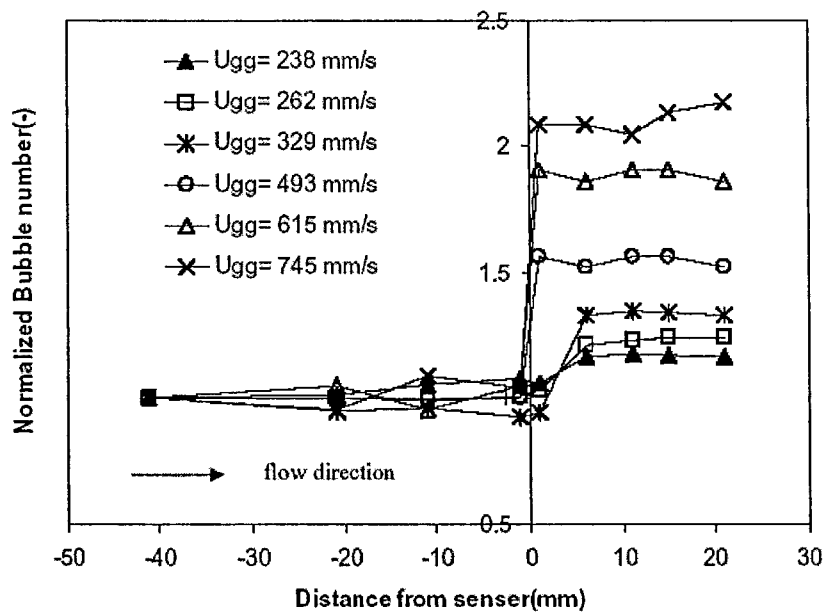


รูปที่ 2-33 สัญญาณที่ได้จาก upstream plane และ down stream plane ของ WMS ในกรณีที่มีการลดลงของความเร็วฟองก๊าซ

อีกผลกระทบหนึ่งของ WMS ต่อฟองก๊าซ คือ เซนเซอร์ของอุปกรณ์วัดจะทำให้ฟองก๊าซแตกได้ เมื่อฟองก๊าซไหลผ่าน 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



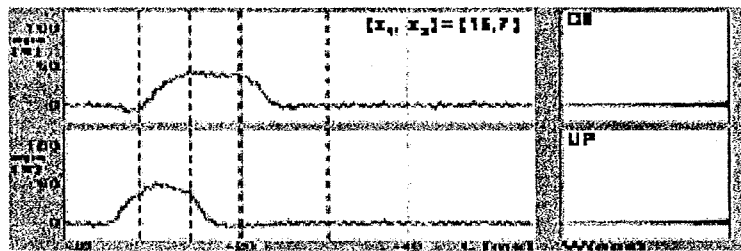
รูปที่ 2-34 จำนวนฟองก๊าซ (Bubble number) ที่เพิ่มขึ้นสำหรับความเร็วของฟองก๊าซต่างๆ



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 ตามทิศทางการไหล ลักษณะ 3 ชั้นของตาข่ายลวดทำให้เกิดชั้น measuring volume 2 ชั้น ประกอบด้วย upstream measuring plane ซึ่งวัดก่อนถึงกลาง WMS และ downstream measuring plane ซึ่งวัดหลังถึงกลาง



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