

## มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย วิธีทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity)

### 1. ขอบเขต

- 1.1 มาตรฐานนี้ครอบคลุมการประเมินสภาพของคอนกรีตในโครงสร้างคอนกรีต และกำหนดข้อแนะนำเกี่ยวกับการแปลความหมายของผลการวัดที่ได้
- 1.2 ค่าที่มีการกล่าวถึงในมาตรฐานนี้กำหนดให้มีหน่วยตามระบบหน่วยระหว่างประเทศ (SI)

### 2. นิยาม

- “คลื่น (Wave)” หมายถึง ลักษณะเฉพาะของการถ่ายโอนพลังงานรูปแบบต่างๆ จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยทั่วไปจะมีลักษณะคล้ายการรบกวนสภาวะเริ่มต้นของตัวกลาง
- “คลื่นตล (Pulse Wave)” หมายถึง คลื่นเดี่ยวที่มีระยะเวลาการเกิดคลื่นไม่มากกว่า 1 คาบของคลื่นนั้นๆ
- “คลื่นกล (Mechanical Wave)” หมายถึง คลื่นที่ส่งพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งด้วยการถ่ายโอนพลังงานกลของอนุภาค การเคลื่อนที่ของคลื่นชนิดนี้จึงจำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่
- “คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Wave)” หมายถึง คลื่นกลที่มีความถี่สูงจนเกินความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยิน (ความถี่มากกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์)
- “ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity)” หมายถึง ระยะทางที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้ในหนึ่งหน่วยเวลา

“ความคงที่ของสมบัติ (Uniformity)” หมายถึง การที่คุณสมบัติของวัสดุต่างๆ มีค่าเหมือนกันหมดทุกจุด

### 3. อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องทดสอบคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิก

- 3.1 ตัวกำเนิดคลื่น (Pulse Generator) ซึ่งประกอบด้วยวงจรสำหรับกำเนิดคลื่นตลของความต่างศักย์ไม่น้อยกว่า 3 คลื่นต่อวินาที
- 3.2 ตัวส่งสัญญาณ (Transmitting Transducer) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นความต่างศักย์เป็นคลื่นกลที่มีความถี่สูง (30 ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์) โดยตัวส่งสัญญาณนั้นมีส่วนประกอบหลักเป็นผลึกแร่ที่มีปฏิกิริยาทางกลกับความดันไฟฟ้า (Piezoelectric Material) และสร้างคลื่นตลแรก (Triggering Pulse) เพื่อเป็นสัญญาณเริ่มต้นของวงจรควบคุมเวลา
- 3.3 ตัวรับสัญญาณ (Receiving Transducer) ที่มีส่วนประกอบเหมือนกับตัวส่งสัญญาณ แต่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนคลื่นกลกลับเป็นคลื่นสัญญาณไฟฟ้า
- 3.4 ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายขนาดของสัญญาณ ให้มีความชัดเจนต่อการวิเคราะห์สัญญาณ โดยมีอัตราส่วนขยายสัญญาณคงที่ไม่เกิน 3 เท่าของสัญญาณดิบที่วัดได้

- 3.5 วงจรควบคุมเวลา (Time-Measuring Circuit) ซึ่งทำหน้าที่สร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ตรวจรับได้กับเวลาที่เริ่มต้นส่งสัญญาณ โดยเวลาเริ่มต้นจะอ้างอิงกับคลื่นแรกซึ่งเป็นคลื่นที่เกิดภายในส่วนประมวลผล วงจรควบคุมเวลาเป็นตัวแสดงผลเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ วงจรควบคุมเวลานี้ควรใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 40 องศาเซลเซียสได้โดยไม่มี ความคลาดเคลื่อน
- 3.6 หน่วยแสดงผล (Display Unit) ของเครื่องทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งมี 2 รูปแบบหลักคือ แบบแสดงผลเป็นตัวเลข และแบบแสดงผลเป็นคลื่นที่ตัวรับสัญญาณตรวจจับได้  
*หมายเหตุ: การแสดงผลเป็นตัวเลขเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากใช้งานง่าย ในขณะที่อุปกรณ์แสดงผลเป็นรูปคลื่น ช่วยให้ศึกษาอัตราการสูญเสียพลังงานของคลื่นกลในตัวกลางได้ แต่มีขั้นตอนการใช้ที่ยุ้งยากกว่ามาก*
- 3.7 แท่งอ้างอิง (Reference Bar) เป็นของแข็งที่มีความยาวคงที่และให้ค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกคงที่ ทำให้เวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เคลื่อนที่ผ่านแท่งอ้างอิงมีค่าคงที่ แท่งอ้างอิงใช้เพื่อปรับแก้การตั้งค่าของเครื่องวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก
- 3.8 สายส่งสัญญาณ (Connecting Cables) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างตัวรับสัญญาณ หรือตัวส่งสัญญาณกับส่วนประมวลผล โดยสายส่งสัญญาณต้องมีคุณภาพสูง และทำให้คลื่นสูญเสียพลังงานน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีทดสอบโครงสร้างขนาดใหญ่
- 3.9 วัสดุเชื่อมสัญญาณ (Coupling Agent) เป็นวัสดุที่มีความหนืดสูง ซึ่งใช้เพื่อส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกจากตัวส่งสัญญาณไปยังคอนกรีต หรือ จากคอนกรีตมายังตัวรับสัญญาณ โดยไม่สูญเสียพลังงาน กลไกหลักของวัสดุเชื่อมสัญญาณคือการแทนที่ช่องว่าง (อากาศ) ตรงผิวสัมผัสระหว่างตัวรับส่งสัญญาณ และผิวคอนกรีต

#### 4. วิธีการใช้งานเครื่องทดสอบคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิก

- 4.1 เครื่องทดสอบคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิกนั้น เริ่มต้นโดยการแนบตัวส่งสัญญาณ และตัวรับสัญญาณเข้าด้วยกันและตั้งค่าเวลาที่ใช้เดินทางให้เป็นศูนย์ ตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในคู่มือการใช้เครื่องมือ
- 4.2 การตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องทดสอบคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิกกับแท่งอ้างอิงหลังจากการตั้งค่าเริ่มต้น เครื่องอัลตราโซนิกควรได้รับการทดสอบกับแท่งอ้างอิงว่า ค่าระยะเวลาการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกต้องเท่ากับค่าที่ระบุไว้กับแท่งอ้างอิง
- 4.3 เครื่องอัลตราโซนิกควรได้รับการตรวจการตั้งค่าเริ่มต้นและตรวจสอบความแม่นยำทุกครั้งก่อนเริ่มการทดสอบจริง (แต่ไม่จำเป็นต้องตรวจสอบทุกครั้งสำหรับการวัด) และควรตรวจสอบเป็นระยะๆ ทุกชั่วโมงในการตรวจสอบ โครงสร้างที่ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน

## 5. ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

5.1 เลือกจุดที่จะทำการทดสอบจริงในโครงสร้าง โดยให้ห่างจากเหล็กเสริมพอที่จะทำให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกไม่ได้รับผลกระทบจากเหล็กเสริม ควรวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านเนื้อคอนกรีตในกรณีที่ทำได้ และระยะห่างระหว่างตัวส่งสัญญาณ กับตัวรับสัญญาณไม่ควรห่างกันน้อยเกินไป

ข้อแนะนำ 5.1: ระยะห่างระหว่างตัวส่งกับตัวรับที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 100 มิลลิเมตร ถึง 300 มิลลิเมตร

5.2 บันทึกระยะห่างระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ

5.3 ทาว์สคูเชื่อมสัญญาณลงบนผิวคอนกรีต ณ จุดที่ต้องการทดสอบ

5.4 แนบตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณกับโครงสร้างที่ต้องการทดสอบ กดให้ไม่มีช่องว่างระหว่างผิวโครงสร้างและตัวรับส่งสัญญาณ

5.5 วัดระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเดินทางระหว่างตัวรับและตัวส่ง และบันทึกค่า

5.6 คำนวณความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกจากอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของตัวรับกับตัวส่งสัญญาณ และเวลาการเดินทางที่วัดได้

5.7 วัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก ณ จุดอื่นๆ ในโครงสร้างและบันทึกเพื่อเปรียบเทียบ

## 6. ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ และข้อควรระวัง

6.1 ปริมาณความชื้นภายในคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการทดสอบเนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในเนื้อคอนกรีต โดยความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่อิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตที่แห้งอยู่ประมาณร้อยละ 5 และการตรวจสอบคุณภาพคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวจะมีความเปลี่ยนแปลงเชิงเปรียบเทียบน้อยกว่าคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแห้ง

6.2 ขนาดของโครงสร้างที่ทดสอบไม่ส่งผลกระทบต่อ การตรวจวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกมากนัก โดยเฉพาะในกรณีรูปร่างของโครงสร้างไม่ส่งผลกระทบต่อ การจำแนกคลื่นที่เคลื่อนที่ตรงจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ ดังนั้นขนาดของโครงสร้างที่เหมาะสมกับวิธีการทดสอบนี้จึงกำหนดด้วยความยาวคลื่นของคลื่นอัลตราโซนิก และควรมีค่าไม่น้อยกว่าความยาวคลื่นของคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้ทดสอบ

6.3 การวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกได้รับผลกระทบจากเหล็กเสริมที่อยู่ภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น การทดสอบควรหลีกเลี่ยงตำแหน่งที่มีเหล็กเสริมวางตัวอยู่

## 7. การสรุปผลการทดสอบและการแปลความผลการทดสอบ

7.1 ควรเปรียบเทียบค่าความเร็วการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิก

7.2 จุดที่มีค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกน้อยกว่าจุดอื่นเป็นจุดที่อาจจะมีความบกพร่อง มีกำลังอัดต่ำกว่า หรือ มีช่องว่างอยู่ในโครงสร้าง

7.3 การเขียนเส้นชั้นความสูงของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Contour Graph) เพื่อประกอบการแปลความผลการทดสอบ ทำให้สรุปผลการทดสอบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

## 8. เอกสารอ้างอิง

8.1 ACI 228.2R-98 Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures - Reported by ACI Committee 228

8.2 BS 1881 - 201: 1986, Testing Concrete. Guide to the Use of Non-Destructive Methods of Test for Hardened Concrete

8.3 ASTM C597-97 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete

8.4 BS 1881 - 203: 1986, Testing Concrete. Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete

8.5 BS EN 12504-4:2004 Testing Concrete. Determination of Ultrasonic Pulse Velocity

## ภาคผนวก 1 ทฤษฎีคลื่นอัลตราโซนิก

การทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก อาศัยการวัดความเร็วของคลื่นกลที่เคลื่อนที่ในคอนกรีต หลักการในการทำงานของเครื่องทดสอบโดยคลื่นอัลตราโซนิก คือ การปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในคอนกรีต และจับเวลาที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนที่จากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ โดยมีระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณคงที่ ค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในคอนกรีตนั้น สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างตัวรับกับตัวส่งสัญญาณและเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของคอนกรีต และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ดังสมการ

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

โดยที่

$V$  : ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลาง

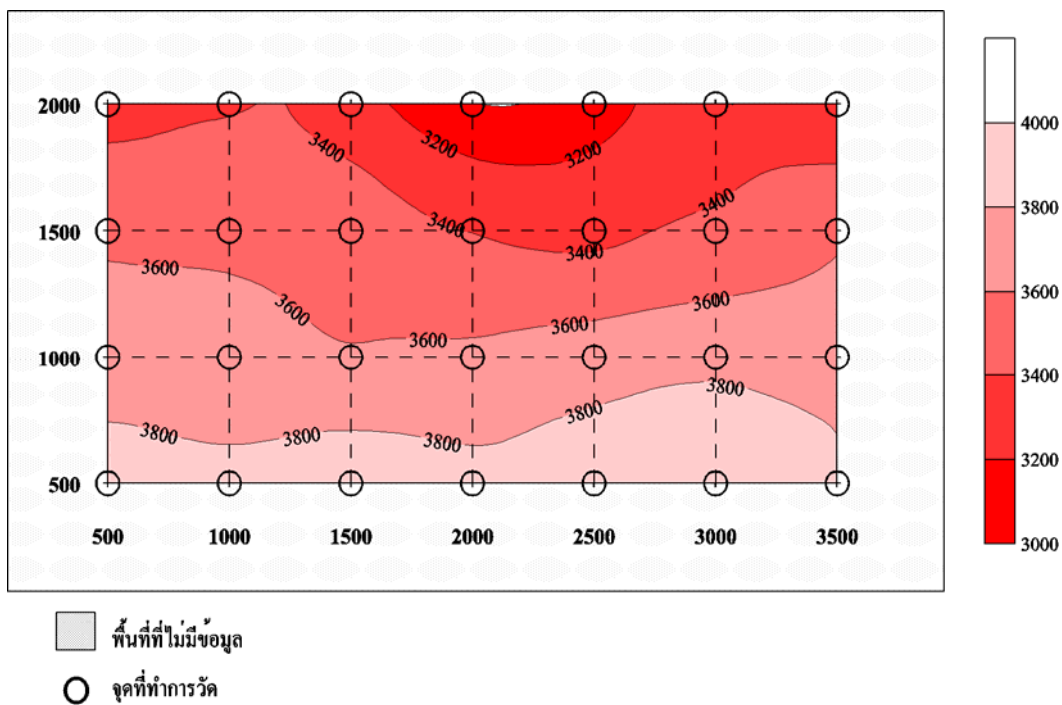
$E$  : ค่าคงที่ยืดหยุ่นของตัวกลาง

$\rho$  : ความหนาแน่น

$\mu$  : อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson ratio)

## ภาคผนวก 2 ตัวอย่างการแสดงผลการตรวจวัด

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างผลการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านกำแพงคอนกรีตขนาด 4 x 2 ตารางเมตร และมีความหนา 200 มิลลิเมตร โดยทำการวัดค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกทุกๆระยะ 500 มิลลิเมตร ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึง ความเร็วที่สูงกว่าของคอนกรีตที่อยู่ด้านล่างซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการแยกตัวของคอนกรีตในระหว่างการเทคอนกรีต นอกจากนี้ผลการทดสอบยังบ่งชี้ว่า โครงสร้างส่วนบนด้านขวาบน (พื้นที่ที่เป็นสีขาว) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำสุด อาจจะมี ความบกพร่องหรือ ความเสียหายภายในโครงสร้างบริเวณดังกล่าว



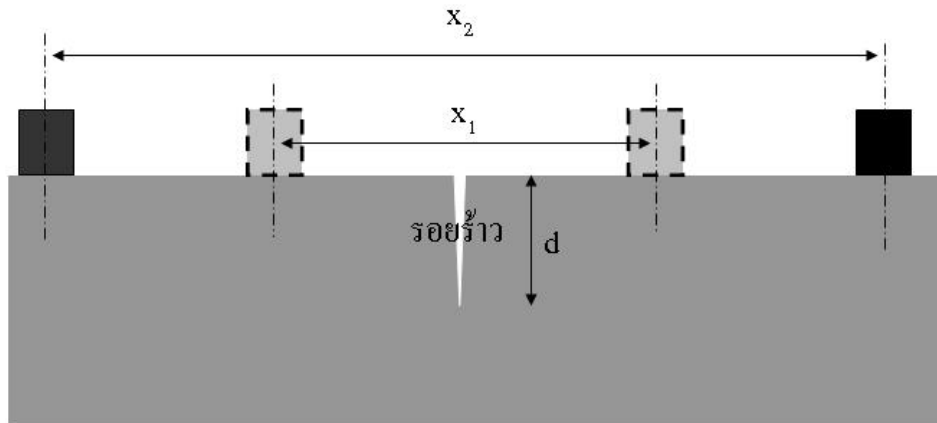
รูปที่ 1: ตัวอย่างแผนที่แสดงเส้นชั้นความสูง (Contour Map) ของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

(ภาคผนวก 1)

ด้วยวิธีการทดสอบคอนกรีตดังที่แสดงข้างต้น คลื่นอัลตราโซนิกสามารถใช้ในการตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของคอนกรีต (Uniformity of Concrete) เปรียบเทียบคุณภาพของคอนกรีตที่คนละตำแหน่ง และใช้ในการประเมินคุณภาพของงานซ่อมแซมได้ด้วย นอกจากนี้ วิธีการทดสอบคอนกรีตโดยคลื่น อัลตราโซนิกนี้ ยังสามารถนำไปทดสอบหาความเปลี่ยนแปลง สมบัติของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไปได้ โดยในกรณีนี้ ต้องมีการทำสัญลักษณ์ตำแหน่งของการวัดอย่างชัดเจน

### ภาคผนวก 3 วิธีการตรวจวัดความลึกของรอยร้าว

วิธีการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก สามารถใช้ในการประเมินความลึกของรอยร้าว โดยทำการวัดระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิก ใช้เดินทางเมื่อระยะทางระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณ แตกต่างกันไป ( $x_1$  และ  $x_2$  ดังแสดงในรูปที่ 1) โดยทั่วไปจะทำการวัดโดยให้ระยะ  $x_2$  มีค่าเป็น 2 เท่าของ  $x_1$



รูปที่ 1: วิธีการประเมินความลึกของรอยร้าวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก  
(ภาคผนวก 3)

จากการทดสอบข้างต้น ค่าความลึกของรอยร้าวสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$d = x_1 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (2)$$

โดยที่

$d$ : ความลึกของรอยร้าว (มิลลิเมตร)

$x_1$ : ระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณของการวัดครั้งแรก (มิลลิเมตร)

$t_1$ : ระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เดินทางเมื่อระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณเท่ากับ  $x_1$  ( $\mu$  s)

$t_2$ : ระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เดินทางเมื่อระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณเท่ากับ  $x_2$  ( $\mu$  s)

หมายเหตุ: การวัดความลึกของรอยร้าวนี้สามารถกระทำได้ในกรณีที่ไม่มีเหล็กเสริมพาดผ่านรอยร้าวเท่านั้น

ข้อแนะนำ: การคำนวณความลึกของรอยร้าวนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่ารอยร้าวมีทิศทางตั้งฉากกับผิว  
โครงสร้าง ผู้ตรวจสอบจึงควรเข้าใจว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะเป็นเพียงแค่ค่าความลึกโดยประมาณ  
เท่านั้น



**ภาคผนวก 4 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทดสอบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค**

โครงการ: .....		บพ. มยผ. 1504			ทะเบียนทดสอบ: .....			
.....					หน้าที ...../.....			
สถานที่: .....		(หน่วยงานที่ทำการทดสอบ) การทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีทดสอบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค			ผู้ทดสอบ: .....			
ชนิดโครงสร้าง: .....					ผู้ประเมินผล: .....			
ตำแหน่ง: .....					ผู้ตรวจสอบ: .....			
วันที่ทดสอบ: .....								
ลำดับ ที่	ตำแหน่ง ที่ทำการทดสอบ	ระยะห่าง (มม.) (1)	ค่าอ่านระยะเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ ( $10^{-6}$ วินาที) (2)			ค่าเฉลี่ย ( $10^{-6}$ วินาที) (3)	ความเร็ว คลื่นเฉลี่ย (กม./วินาที) (4)	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
ค่าเฉลี่ย								

- หมายเหตุ:**
- (1) ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของหัวส่งสัญญาณถึงกึ่งกลางหัวรับสัญญาณ
  - (2) ระยะเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากหัวส่งสัญญาณไปยังหัวรับสัญญาณ หน่วยเป็น มิลลิวินาที
  - (3) ค่าเฉลี่ยของค่าอ่าน (2)
  - (4) ความเร็วคลื่นเฉลี่ย = (1)/(3) หน่วยเป็น กิโลเมตร/วินาที