การหาค่ายังโมดูลัสของวัสดุโดยใช้เทคนิคคลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

Young's Modulus of Materials Determine by Ultrasonic Wave Technique

โดย

ผศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์

ผศ.จินตนา เหล่าไพบูลย์

นายจิตกร ผลโยญ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานงบประมาณแผ่นดิน

ปีงบประมาณ 2543

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการหาค่ายังโมดูลัสของวัสดุโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค โดยใช้หัวตรวจสอบตรงและหัวตรวจสอบมุมความถี่ 4 เมกะเฮิร์ส สำหรับวัสดุต่อไปนี้ ทองแดง (UNS C 80100) , ทองเหลือง (UNS 3600 และ ASTM C 37700) อลูมิเนียม (A93102 และ AA6101) เหล็กเพลาดำ (DIN C 25) เหล็กเพลาขาว (DIN C 35) เหล็กกล้าไร้สนิม (JIS SUS 302 และ SS 304) และ White Ceramic (# PRC – 300 – 030 G และ # PRC – 300 – 050 A) ปรากฏว่าได้ค่ายังโมดูลัสเป็น 99.90 ± 1.82 GPa, 97.52 ± 6.53 GPa, 87.62 ± 1.42 GPa , 73.81 ± 0.48 GPa , 66.69 ± 1.68 GPa , 196.80 ± 2.62 GPa , 208.98 ± 1.36 GPa , 198.04 ± 1.72 GPa , 181.74 ± 2.80 GPa , 9.90 ± 1.36 GPa , 8.05 ± 1.54 GPa ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบการทดสอบแรงดึงกับวัสดุโลหะตามมาตรฐาน มอก. 244 เล่ม 5 ได้ค่ายังโมดูลัสเป็น 96.80 ± 5.98 GPa , 93.04 ± 4.38 GPa , 82.85 ± 4.56 GPa , 76.91 ± 7.83 Gpa , 66.06 ± 3.41 GPa , 196.22 ± 3.23 GPa , 187.10 ± 7.05 GPa , 195.07 ± 12.50 GPa , 184.97 ± 2.92 GPa ตามลำดับจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบปรากฏว่าได้ค่ายังโมดูลัสใกล้เคียงกันแต่ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบแรงดึงมีค่ามากกว่าการทดสอบ โดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

การหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคสำหรับวัสดุโลหะและเซรามิก สมการที่ใช้คำนวณเป็นสมการคล้ายกัน โดยในวัสดุเซรามิกจะต้องพิจารณา Volume Fraction ด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้หาส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่าง ๆ ในวัสดุโลหะที่ใช้ทดสอบด้วยเครื่องอิมิสชันสเปกโตรสโกปี เพื่อจำแนกเกรดของวัสดุและหาค่าความหนาแน่นของวัสดุโดยใช้หลักการของอาร์คิดีส

Abstract

The Purpose of this Research is to Find Young's Modulus of a materials , Using a 4 MHz Ultrasonic Techniques. We want to find Young's Modulus of Copper (UNS C 80100) , Brass (UNS C 3600 and ASTM C 37700) , Aluminum (A 93102 and AA6101) Ferrous (DIN C 25) , Ferrous (DIN C 35) , Stainless Steel (JIS SUS 302 and SS 3041) and white ceramic (#PRC-300-030G and # PRC-300-050A). After Testing , we Obtained the Following Young's modulus Values for the above Materials , Respectively : 99.90 ± 1.82 GPa, 97.52 ± 6.53 GPa, 87.62 ± 1.42 GPa , 73.81 ± 0.48 GPa , 66.69 ± 1.68 GPa , 196.80 ± 2.62 GPa , 208.98 ± 1.36 GPa , 198.04 ± 1.72 GPa , 181.74 ± 2.80 GPa , 9.90 ± 1.36 GPa , 8.05 ± 1.54 GPa. The Comparative Tensile Test Standard Values are : 96.80 ± 5.98 GPa , 93.04 ± 4.38 GPa , 82.85 ± 4.56 GPa , 76.91 ± 7.83 Gpa , 66.06 ± 3.41 GPa , 196.22 ± 3.23 GPa , 187.10 ± 7.05 GPa , 195.07 ± 12.50 GPa , 184.97 ± 2.92 GPa. Thus our obtained experimental results show Young's Modulus value close to the standard values. However , the comparative tensile test standard deviation values are greater than the standard deviation value obtained by the Ultrasonic Techniques.

Determination of Young's Modulus of Metal and Ceramics Materials by Ultrosonic Techniques , The Equation for Calculate are same in Ceramic Materials We must consider the volume fraction.

In this Research , we found the compound of the Materials used in our test by Emission Spectroscopy.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิรัช จันทรา นักวิชาการศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่กรุณาให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคุณสมหวัง บรรเทา ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึง

สารบัญ

สารบัญ

สารบัญตารางประกอบ

สารบัญรูปประกอบ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ค่ายังโมดูลัส (Young's Modulus) เป็นค่าหนึ่งที่บอกถึงคุณสมบัติของวัสดุได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing : DT) โดยการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น มาตรฐาน มอก 244 เล่ม 4 ถึง 7,2525 หรือมาตรฐานอื่นๆ ที่จะกำหนดใช้ เนื่องจากการหาค่ายังโมดูลัสด้วยวิธีนี้ไม่สะดวกและไม่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่มีความแข็งสูงมาก จึงได้หาเทคนิคใหม่ในการหาค่านี้ คือเทคนิคการใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing : NDT) โดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่มากกว่า 20 kHz สามารถส่งผ่านตัวกลางและสะท้อนกลับมาได้ จึงนำประโยชน์นี้มาใช้วิจัย เพื่อหาค่าโมดูลัสของวัสดุ

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาค่ายังโมดูลัสของวัสดุโดยใช้เทคนิคคลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

1.2.2 เปรียบเทียบผลการทดลองในข้อ 1.2.1 กับวิธีมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรม

1.2.3 เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับใช้กับวัสดุที่เตรียมโดยวิธีมาตรฐานได้ยาก

1.2.4 หาปริมาณของธาตุในวัสดุที่ทดสอบเพื่อจำแนกประเภทของวัสดุ

1.3 สถานที่ทำการวิจัย

1.3.1 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1.3.2 ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย จตุจักร กรุงเทพฯ และเทคโนธานี คลอง 5 ปทุมธานี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถหาค่าโมดูลัสของวัสดุ โดยวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งรวดเร็วกว่าการทดสอบแรงดึง เนื่องจากวัสดุบางประเภทเตรียมชิ้นงานทดสอบได้ยาก เช่น วัสดุเซรามิกส์สมัยใหม่ (New Ceramics)

1.4.2 หาสมการที่เหมาะสมสำหรับหาค่ายังโมดูลัส โดยเทคนิคคลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

1.4.3 ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานทางด้านวิศวกรรม

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาและค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค และการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน

1.5.2 จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัย

1.5.3 ศึกษาวิธีการหาส่วนประกอบของธาตุต่างๆ ในวัสดุที่นำมาวิจัยโดยใช้เครื่องอิมิสชันสเปกโทรสโคปี (Emission Spectroscopy)

1.5.4 เตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน มอก 244 เล่ม 4-2525 รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข.

1.5.5 เตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคให้มีขนาด 26 mm x 26 mm x 100 mm

1.5.6 เตรียมชิ้นงานเพื่อหาส่วนประกอบของธาตุในวัสดุ โดยตัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm

1.5.7 หาค่ายังโมดูลัสของวัสดุโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Machine)

1.5.8 หาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค โดยวัดความเร็วคลื่นเสียงตามยาว ความเร็วคลื่นเสียงตามขวางและความหนาแน่นของวัสดุที่ทดสอบ

1.5.9 หาส่วนประกอบของธาตุในวัสดุ โดยใช้เครื่องอิมิสชันสเปกโทรสโคปี

1.5.10 เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในข้อ 1.5.7,1.5.8 และจากตารางมาตรฐาน

1.5.11 สรุปและรายงานผลการวิจัย

บทที่ 2
การหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

2.1 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับคลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่มากกว่า 20 kHz เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงซึ่งหูมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน สำหรับคลื่นเสียงที่หูมนุษย์สามารถได้ยินหรือรับรู้ได้นั้นจะมีความถี่อยู่ระหว่าง 20 – 20,000 Hz โดยทั่วไปคลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคนิยามว่า เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20,000 Hz หรือ 20 kHz แต่ปรากฏการณ์ทางกายภาพแล้วคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง หรือต่ำกว่า 20 kHz ก็ยังมีคุณสมบัติของคลื่น ตามธรรมชาติของคลื่นเสียงสามารถเคลื่อนที่ไปได้ก็ต่อเมื่อมีตัวกลางเป็นตัวนำพาไป ไม่ว่าจะเป็นอากาศ , ของแข็ง และของเหลว แต่ในอากาศคลื่นเสียงจะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ ถ้าความถี่ของคลื่นนั้นสูงกว่า 1 MHz ซึ่งเป็นความถี่ในช่วงอุลตร้าโซนิค เนื่องจากคลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคที่มีความถี่สูงกว่า 1MHzจะมีความยาวคลื่นสั้นกว่าระยะห่างระหว่างอะตอม จึงทำให้คลื่นเสียงไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านอากาศได้ และนอกจากนี้คลื่นเสียงยังมีคุณสมบัติการสะท้อนและการหักเหตามกฎของสเนลล์ ดังสมการ

$$\frac{\sin\alpha}{\sin x_2} = \frac{c_1}{c_2} \qquad (2.1.1)$$

ด้วยคุณสมบัติต่างๆ ของคลื่นเสียง โดยเฉพาะความสามารถในการนำพาเสียงที่ดีของตัวกลาง ได้มีการประยุกต์ใช้งานทางด้านเทคนิคกันอย่างกว้างขวาง เช่น การสะท้อนกลับของคลื่นเสียงสามารถวัดความลึกของท้องน้ำได้ การใช้เครื่องโซนาร์สามารถตรวจหาฝูงปลา เรือดำน้ำและเรือที่อยู่ไกลออกไป

ในการวัดความลึกของท้องน้ำ จะใช้หลักการการสะท้อนกลับ (Reflection) ของคลื่นเสียงที่พื้นทะเล โดยบริเวณท้องเรือจะส่งสัญญาณเสียงเป็นช่วงๆ (Pulse) ลงไปด้วยเครื่องส่งสัญญาณ เมื่อคลื่นเสียงไปกระทบที่พื้นทะเลคลื่นเสียงจะสะท้อนกลับจากพื้นทะเล และจะรับสัญญาณคลื่นที่สะท้อนกลับมาโดยเครื่องรับสัญญาณ

ในการวัดความลึกของทะเลจะวัดโดยการนับเวลา โดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่ส่งคลื่นออกไปจนคลื่นนั้นสะท้อนกลับมาที่เครื่องรับสัญญาณ และเนื่องจากความเร็วในการเดินทางของคลื่นเสียงในน้ำมีค่าคงที่ ทำให้สามารถคำนวณความลึกของทะเลได้ ความสามารถในการนำพาเสียงที่ดีของของแข็ง ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการตรวจสอบวัสดุ ในกรณีนี้ได้ใช้คุณสมบัติด้านการสะท้อนกลับของเสียง จึงทำให้สามารถตรวจสอบโดยไม่ทำลายชิ้นงานทดสอบ เหตุผลที่ใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคในการตรวจสอบชิ้นงาน คือ มีความเข้มของเสียงสูง, ความยาวคลื่นสั้น, ความถี่สูง จึงนำคลื่นเสียง

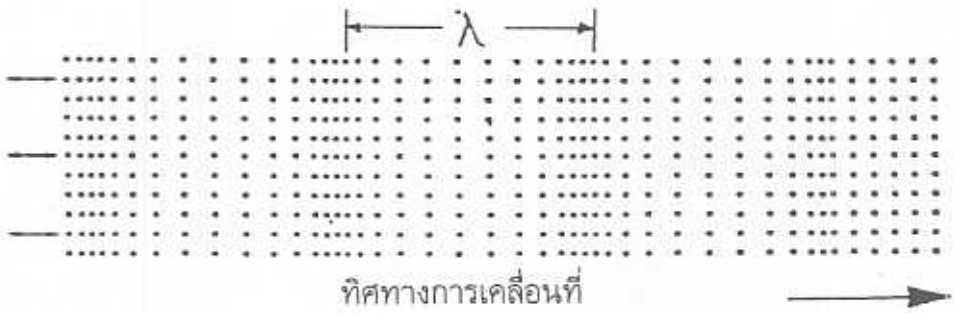
อุลตร้าโซนิคมาใช้ในการตรวจสอบวัสดุ ความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบวัสดุในงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 15 MHz ซึ่งในการตรวจสอบวัสดุโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคที่นิยมใช้คือวิธีพัลส์เอคโค (Pulse Echo Method)

การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลาง ถ้าเป็นของเหลวทิศทางของการสั่นสะเทือนของอนุภาคจะเป็นแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวคลื่น อาศัยหลักการบีบและขยายตัวของโมเลกุลของของเหลว ซึ่งคลื่นเสียงประเภทนี้มีชื่อเรียกว่าคลื่นเสียงตามยาว (Longitudinal Wave)แต่ในตัวกลางที่เป็นของแข็งซึ่งจะมีความหนาแน่นสูงกว่าของเหลวมาก กล่าวคือ อะตอม หรือโมเลกุลมีระยะห่างกันไม่มาก นอกจากนี้อะตอมยังมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมแบบยืดหยุ่น จากเหตุผลนี้พบว่าการเคลื่อนตัวของคลื่นเสียงในตัวกลางที่เป็นของแข็งสามารถเป็นไปได้ 2 ลักษณะ คือ ทิศทางของการสั่นสะเทือนของอนุภาคเป็นแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนของตัวคลื่น และทิศทางการสั่นสะเทือนของอนุภาคตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวคลื่น

2.2 ชนิดของคลื่นเสียง

ชนิดของคลื่นเสียงสามารถแบ่งออกได้โดยอาศัยลักษณะการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่เป็นตัวกลางทำให้เคลื่อนที่ ดังนี้

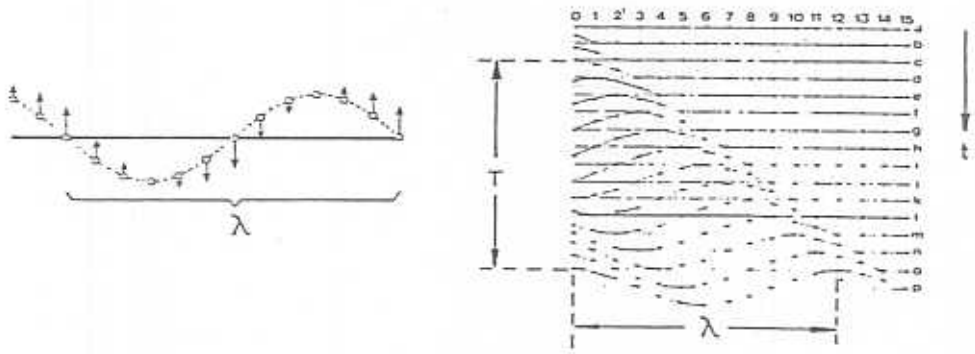
2.2.1 คลื่นเสียงตามยาว (Longitudinal Wave : C_L) เป็นคลื่นที่มีทิศทางการสั่นสะเทือนของอนุภาคในแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ความเร็วเสียง C_L นี้มีค่าคงที่ในวัสดุแต่ละประเภทเช่น เหล็กกล้า C_L= 5920 m/s , อะลูมิเนียม C_L = 6300 m/s เมื่อพิจารณาคลื่นที่เคลื่อนที่จะพบว่าการกระจายตัวและการอัดตัวของอนุภาคจะมีระยะห่างคงที่ตลอดขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลาง แสดงดังรูปที่ 2.2.1



รูปที่ 2.2.1 แสดงการเกิดคลื่นกด (Compression Wave) หรือคลื่นยาว (Longitudinal Wave)

โดยลักษณะที่คลื่นตามยาวมีทิศทางการเคลื่อนที่ในทิศเดียวกับอนุภาคจึงทำให้คลื่นประเภทนี้มีความเร็วค่อนข้างสูง

2.2.2 คลื่นเสียงตามขวาง (Transverse Wave : C_T) คือคลื่นที่มีแนวการสั่นสะเทือนของอนุภาค ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น จะสังเกตเห็นว่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคจะไม่อยู่ในทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแต่จะเป็นแนวขวาง ดังรูปที่ 2.2.2



รูปที่ 2.2.2 แสดงการสั่นสะเทือนของอนุภาคในคลื่นตามขวาง (Transverse Wave)

จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้คลื่นตามขวางมีความเร็วช้ากว่าคลื่นตามยาวอยู่ประมาณสองเท่าและเป็นค่าคงที่สำหรับวัสดุแต่ละชนิด เช่น เหล็กกล้า $C_L = 5920$ m/s , $C_T = 3255$ m/s

2.3 สมการเกี่ยวกับคลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคที่ใช้ในการตรวจสอบ

ในการตรวจสอบวัสดุโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค มีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.3.1 สมการการหาค่าความเร็วคลื่นตามยาว

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \qquad (2.3.1)$$

2.3.2สมการการหาค่าความเร็วคลื่นตามขวาง

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \qquad (2.3.2)$$

2.3.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นตามยาวและความเร็วคลื่นตามขวาง

$$C_T = C_L\sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \qquad (2.3.3)$$

2.3.4 สมการหาค่า Poisson' s Ratio

$$\mu = \frac{\frac{1}{2}-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}{1-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2} \qquad (2.3.4)$$

2.3.5 สมการการหาค่าเชียร์โมดูลัส

$$G = \rho C_T^2 \qquad (2.3.5)$$

2.3.6 สมการหาค่ายังโมดูลัส

$$E = 2G(1+\mu) \qquad (2.3.6)$$

$$E = \phi\rho C_L^2\left\{\frac{3-\left(\frac{4}{b^2}\right)}{b^2-1}\right\} \qquad (2.3.7)$$

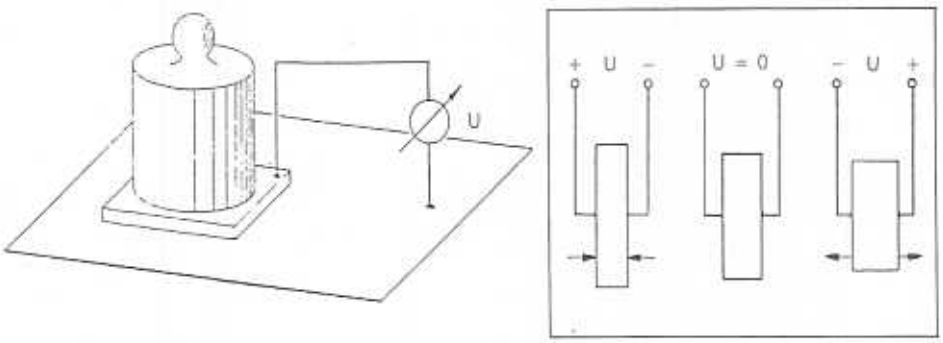
$$E = \rho C_L^2\left\{\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu}\right\} \qquad (2.3.8)$$

$$E = 4\rho C_T^2\left[\frac{\frac{3}{4}-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}{1-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}\right] \qquad (2.3.9)$$

2.4 การตรวจสอบโดยใช้คลื่นเสียงอัลตร้าโซนิค

2.4.1 การกำเนิดคลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

คลื่นเสียงเกิดจากการสั่นสะเทือนและสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอาศัยตัวกลางเป็นตัวนำพาคลื่น คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคก็เช่นเดียวกันเกิดขึ้นจากการสั่นของผลึก (Crystal) บางชนิดที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือถ้ามีแรงภายนอกมากระทำต่อผลึกนี้ จะทำให้ความหนาแน่นของแผ่นผลึกนี้เปลี่ยนแปลงรวมถึงความสมดุลของความต่างศักย์ด้วยก็จะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นซึ่งวัดความต่างศักย์ได้จากผิวผลึกซึ่งเคลือบด้วยเงิน คุณลักษณะนี้เรียกว่าปฏิกิริยาพีโซอิเล็คตริกแบบตรง (Direct Piezoelectric Effect) ความดันที่เปลี่ยนแปลง เช่น คลื่นเสียงจะส่งผลโดยตรงทำให้กลายเป็นความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปมาแผ่นผลึกนี้จะสามารถใช้เป็นตัวรับได้ (Receiver) ปฏิกริยาพีโซอิเล็กตริกแบบตรงนี้สามารถเป็นแบบกลับได้ถ้าส่งความต่างศักย์ไปที่ผิวของแผ่นผลึก จะทำให้แผ่นผลึกนั้นมีความหนาเปลี่ยนแปลงไปซึ่งขึ้นอยู่กับขั้วความต่างศักย์ความหนาอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังรูปที่ 2.4.1



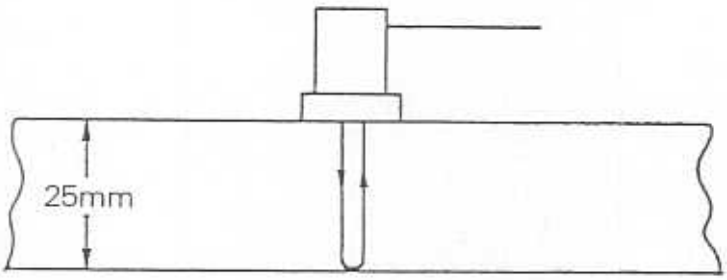
รูปที่ 2.4.1 (ซ้าย) : ปฏิกิริยาพีโซอิเล็คตริกแบบตรง (Direct Piezoelectric Effect)

(ขวา) : ปฏิกิริยาพีโซอิเล็คตริกแบบกลับ (Indirect Piezoelectric Effect)

ถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าความถี่สูงไปยังผิวของแผ่นผลึกจะทำให้แผ่นผลึกนั้นสั่นไปตามความถี่ของศักย์ไฟฟ้า ผลึกพีโซอิเล็คตริกที่พบตามธรรมชาติ คือ ควอร์ทซ (Quartz) ซึ่งในระยะเริ่มต้นนิยมใช้ทำเป็นผลึกสำหรับการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค สำหรับหัวตรวจสอบในปัจจุบันจะใช้โพลาไรซ์ซินเตอร์เซรามิก หรือผลึกเทียมแทนผลึกควอร์ทซ

2.4.2 หลักการทำงานของเครื่องอุลตร้าโซนิค

จากหัวข้อที่กล่าวมาหัวตรวจสอบเป็นตัวส่งพัลส์อุลตร้าโซนิคเข้าไปในชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานมีผิวทั้งสองข้างขนานกันพัลส์ที่ถูกส่งออกไปก็จะสะท้อนที่ผิวตรงข้ามกลับมายังหัวตรวจสอบ เวลาในการเดินทางของเสียงเป็นสิ่งที่เราต้องการที่จะวัด ดังรูปที่ 2.4.2



รูปที่ 2.4.2 เสียงเดินทางและสะท้อนกลับในตัวกลาง

พิจารณาจากรูปที่ 2.4.2 หัวตรวจสอบตรงส่งพัลส์เสียงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน (คลื่นยาว) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าหนา 25 mm ระยะทางที่คลื่นเสียงเดินทางไปและกลับเป็นระยะ W = 50 mm ความเร็วเสียงคลื่นตามยาวในเหล็กกล้าทำให้เราสามารถคำนวณเวลาที่เสียงเดินทางได้ คือ

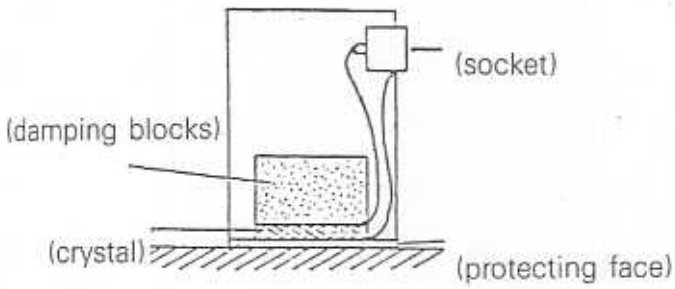
$$t = \frac{W}{C_L} = \frac{50}{5920} \cdot \frac{mm}{m/s} = 8.4 \times 10^{6} s$$

ซึ่งระยะเวลาที่สั้นขนาดนี้ไม่สามารถวัดแบบเชิงกลได้ จึงใช้ Cathode Ray Tube (CRT) ช่วยในการวัด

2.4.3 โครงสร้างหัวตรวจสอบ (Probe Structure) แบ่งออกเป็น 3 ชนิดแต่ในที่นี้จะกล่าวเพียง 2 ชนิด คือ

1) หัวตรวจสอบแบบตั้งฉากหรือแบบหัวตรง (Normal Beam Probe)

เป็นหัวตรวจสอบที่มีทิศทางการแผ่กระจายของตัวคลื่นตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน คลื่นเสียงจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุและจะสะท้อนกลับจากผิวด้านตรงข้าม ถ้าผิวชิ้นงานมีผิว สองข้างขนานกัน คลื่นเสียงที่สะท้อนก็จะกลับมายังหัวตรวจสอบและจะแสดงสัญญาณออกมาที่หน้าจอ พลังงานเสียงที่สะท้อนมาที่หัวตรวจสอบเป็นส่วนน้อยเท่านั้น ที่ผ่านเข้าไปในหัวตรวจสอบส่วนใหญ่จะสะท้อนที่ผิวบนและวิ่งกลับเข้าไปในชิ้นงานอีกครั้งหนึ่ง จึงมีเอคโค (echo) ผิวหลังอื่น ๆ อีกด้วยในหัวตรวจสอบชนิดนี้มีเพียงคลื่นตามยาวเท่านั้นเพราะมุมที่คลื่นเสียงตกกระทบเป็นมุม 90 องศาจึงทำให้ไม่เกิดมุมหักเห โครงสร้างภายในของหัวตรวจสอบประกอบด้วย แผ่นผลึก Transducer ซึ่งเป็นตัวกำเนิดคลื่นเสียงแผ่นผลึกนี้จะถูกยึดติดไว้กับแผ่นพลาสติกหรือ delay block และ damping block



ซึ่งทั้งหมดจะถูกบรรจุไว้ในภาชนะแข็งแรงทำจากพลาสติกหรือโลหะ ดังรูปที่ 2.4.3

รูปที่ 2.4.3 โครงสร้างของหัวตรวจสอบแบบตั้งฉาก (normal beam probe)

2) หัวตรวจสอบแบบหัวมุม (Angle Beam Probe)

ในบางครั้งสิ่งบกพร่องที่อยู่ในวัสดุไม่สามารถตรวจสอบได้เมื่อใช้หัวตรวจสอบแบบตั้งฉาก เนื่องจากคลื่นเสียงที่ส่งเข้าไปไม่ตกกระทบสิ่งบกพร่องเป็นมุมฉากจึงต้องใช้หัวตรวจสอบแบบมุมที่สร้างคลื่นตามยาวติดไว้บน delay block รูปลิ่มทำด้วย plexiglass บริเวณจุดต่อระหว่างผิวของ plexiglass และชิ้นงานวัดคลื่นเสียงที่ตกกระทบจะมีการหักเหและมีการเปลี่ยนโมดเป็นคลื่นตามขวาง ทำให้เกิดคลื่นยาวและคลื่นขวางในชิ้นงานคลื่นเสียงทั้งสองชนิดนี้เมื่อสะท้อนกลับไปที่หัวมุมก็จะเปลี่ยนเป็นคลื่นยาวเสมอจึงทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าสัญญาณที่ได้รับมาจากคลื่นขวางหรือคลื่นยาว และทำให้ไม่สามารถหาตำแหน่งของสิ่งบกพร่องได้ เพราะคลื่นเสียงทั้งสองชนิดมีทิศทางและ

ความเร็วเสียงในวัสดุแตกต่างกัน ซึ่งปกติความเร็วคลื่นตามยาวมักมีความเร็วกว่าคลื่นตามขวางอยู่ประมาณ 2 เท่าจึงแก้ปัญหาโดยให้มุมตกกระทบของคลื่นตามยาวในหัวตรวจสอบจะถูกกำหนดให้มีขนาดใหญ่จนกระทั่งไม่เกิดคลื่นยาวในเหล็กกล้าเลย โดยอาศัยกฎของ สเนลส์ (Snell 's law)

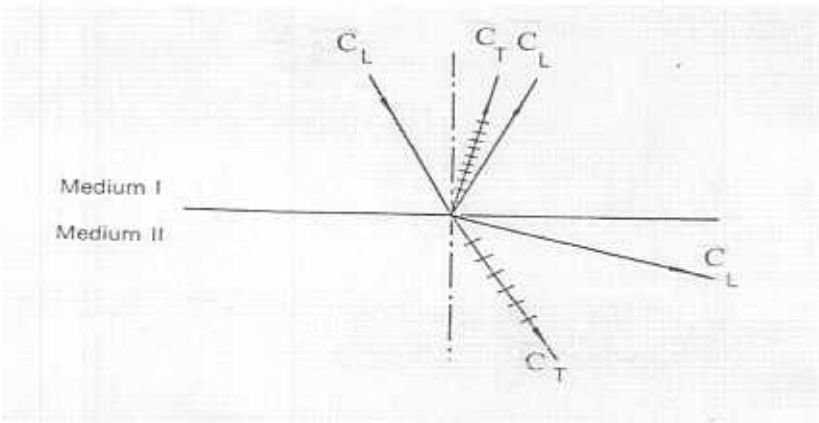
$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} \qquad (2.4.1)$$

เมื่อ α_1 = มุมตกกระทบ

α_2 = มุมหักเห

C_1 = ความเร็วคลื่นเสียงในตัวกลางที่ 1

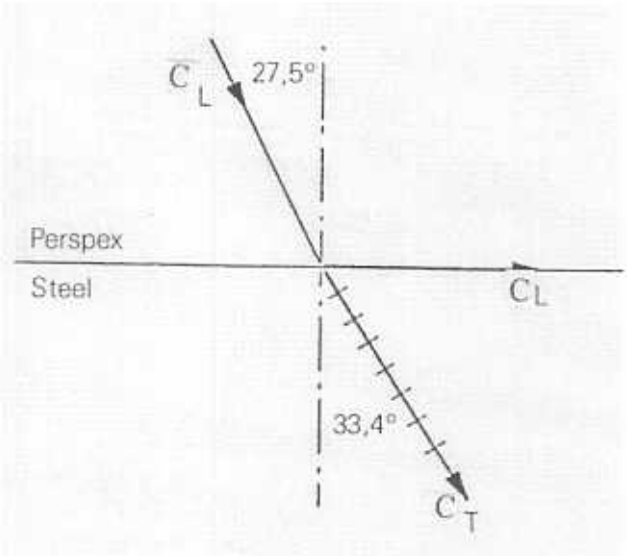
C_2 = ความเร็วคลื่นเสียงในตัวกลางที่ 2



รูปที่ 2.4.4 การสะท้อนการหักเหและการเปลี่ยนชนิดของคลื่น

ถ้ากำหนดให้ $\alpha_2 = 90^\circ$ ซึ่งเป็นมุมวิกฤตที่หนึ่ง (first critical angle) จะได้

$$\sin\alpha_1 = \frac{c_1}{c_2} = \frac{2370}{5920}\ \frac{m/s}{m/s}; \quad \alpha_1 = 27.5^\circ \qquad (2.4.2)$$



รูปที่ 2.4.5 การเกิดคลื่นตามขวาง

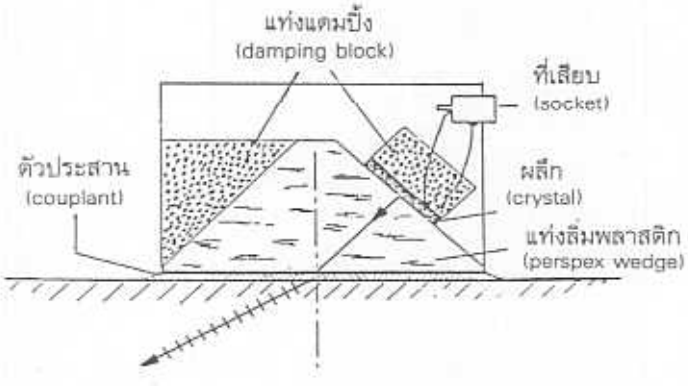
เมื่อ α_2 เป็นมุมวิกฤตก็จะหาค่ามุมหักเห β_T ในเหล็กกล้าได้ดังนี้ จาก

$$\sin\beta_T = \frac{C_T}{C_L}\sin\alpha_2 \qquad (2.4.3)$$

$$= \frac{3255}{2730}\cdot\sin 27.5^\circ$$

$$\beta_T = 33.4^\circ$$

สำหรับโครงสร้างของหัวตรวจสอบชนิดนี้จะแตกต่างจากหัวตรวจสอบแบบตั้งฉากตรงที่ใช้แผ่นพลาสติกเป็นรูปลิ่มแทนแผ่นพลาสติกด้านขนาน ดังรูปที่ 2.4.5



รูปที่ 2.4.6 โครงสร้างของหัวตรวจสอบแบบมุม (angle beam probe)

บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุอุปกรณ์สำหรับใช้ในการหาค่ายังโมดูลัส โดยการทดสอบแรงดึง

3.1.1 วัสดุที่ใช้มี 6 ประเภท คือ

1. ทองแดง (UNS C80100)
2. ทองเหลือง (UNS C 3600 และ ASTM C 3 7700)
3. อลูมิเนียม (A 93102 และ AA 6101)
4. เหล็กเพลาดำ (DIN C 25)
5. เหล็กเพลาขาว (DIN C 35)
6. เหล็กกล้าไร้สนิม (JIS SUS 302 และ SS 304)

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับหาค่ายังโมดูลัส

เครื่องทดสอบแรงดึง (Electromechanical Universal Testing Machine RSA 250) ยี่ห้อ SCHENCK Maximum Load 25×10^9 N/mm^2

3.2 วัสดุอุปกรณ์สำหรับใช้ในการหาค่ายังโมดูลัสด้วยคลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

3.2.1 วัสดุที่ใช้มี 6 ประเภทตามข้อ 3.1.1 และ White Ceramic (# PRC-300 – 030 G และ # PRC-300 – 050 A)

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับหาค่ายังโมดูลัส Portable Ultrasonic Flaw Detector รุ่น USK 7 D ยี่ห้อ Krautkramer

3.3 วัสดุและอุปกรณ์ในการหาส่วนผสมทางเคมีในวัสดุ

3.3.1 วัสดุที่ใช้ 6 ประเภทตามข้อ 3.1.1

3.3.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับหาส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ เครื่องอิมิสปันสเปกโทรสโคปี (Emission Spectroscopy)

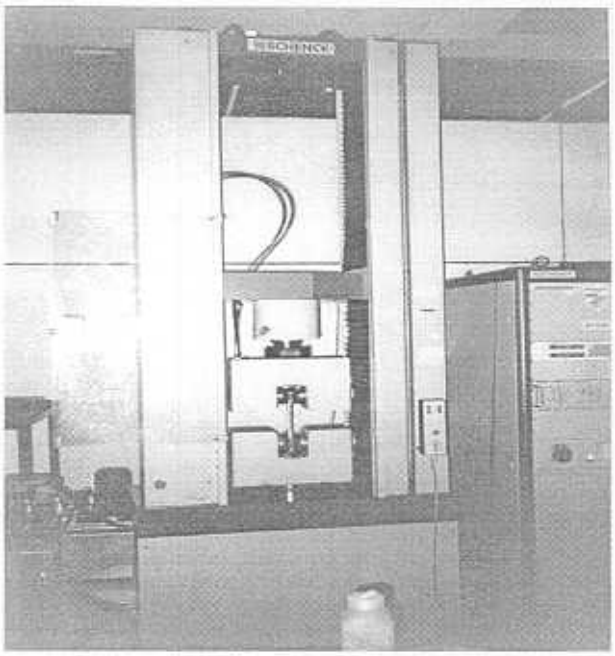
3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 ขั้นเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1. นำวัสดุจากข้อ 3.1.1 ข้อ 1 ถึง 6 ที่จัดเตรียมไว้มาตัดโดยตัดประเภทละ 6 ชิ้น ให้มีความยาวชิ้นละประมาณ 300 mm ตามมาตรฐาน มอก. เพื่อนำไปทดสอบการหาค่ายังโมดูลัสโดยการทดสอบแรงดึง

2. นำวัสดุเช่นเดียวกับข้อ 1ที่จัดเตรียมไว้มาตัดโดยตัดประเภทละ 1 ชิ้น ให้มีความยาวชิ้นละประมาณ 30 mm เพื่อนำไปทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องอิมิสชันสเปกโทรสโคปี
3. นำวัสดุจากข้อ 3.1.1 ข้อ 1 ถึง 6 ที่จัดเตรียมไว้มาตัดโดยตัดประเภทละ 2 ชิ้นให้มีความ ยาวชิ้นละประมาณ 100 mm และวัสดุในข้อ 3.2.1 เพื่อนำไปทดสอบหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้เสียงอุลตร้าโซนิค

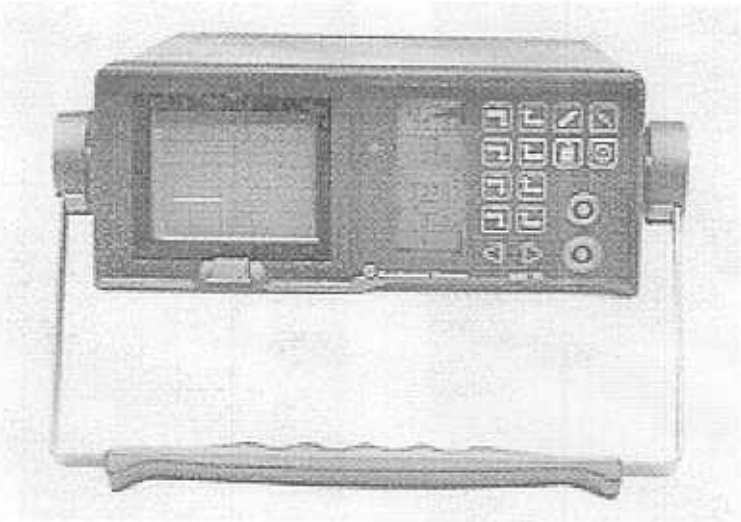
3.4.2 การทดสอบหาค่ายังโมดูลัสโดยการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Electromechanical Universal Testing Machine ดังรูปที่ 3.1.1



รูปที่ 3.4.1 เครื่อง Electromechanical Universal Testing machine

3.4.3 การทดสอบหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

1. นำวัสดุจากข้อ 3.2.1 มาขึ้นรูปให้มีขนาด 16x16x100 mm
2. ทำการทดสอบปรับเทียบ (Calibration) เครื่องอุลตร้าโซนิค (รายละเอียดในภาคผนวก ก)
3. ทำการวัดความเร็วคลื่นตามยาวโดยใช้หัวตรวจสอบชนิดหัวตรง ความถี่ 4 MHz
4. ทำการวัดความเร็วคลื่นตามขวางโดยใช้หัวตรวจสอบชนิดหัวมุม 45 องศาและความถี่ 4 MHz ดังรูปที่ 3.4.2



รูปที่ 3.4.2 เครื่องอุลตร้าโซนิค

3.4.4 การหาความหนาแน่นของวัสดุทั้ง 7 ประเภท โดยใช้หลักการของอาร์คิมีดีส

3.4.5 การทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีในวัสดุ

1. นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ตามข้อ 3.1.1 มาเตรียมผิวหน้าให้เรียบ
2. นำวัสดุจากข้อ 1 มาทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีโดยใช้เครื่อง Emission Spectroscopy ดังรูป ที่ 3.4.3

รูปที่ 3.4.3 เครื่อง Emission Spectroscopy

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 ผลการหาค่ายังโมดูลัสของวัสดุประเภทต่าง ๆ

4.1 ผลการทดสอบการหาค่ายังโมดูลัสโดยการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 4.1.1 ผลการทดสอบการหาค่ายังโมดูลัสโดยการทดสอบแรงดึง

วัสดุ	E_{AV} (G Pa)
UNS C 80100	96.80
UNS C 3600	93.04
ASTM C 37700	82.85
A 93102	76.91
AA 6101	66.60
DIN C 25	196.22
DIN C 35	187.10
JIS SUS 302	195.07
SS 304	184.97

หมายเหตุ E_{AV} คือ ค่ายังโมดูลัสเฉลี่ยจากการทดสอบ 10 ครั้ง

4.2 ผลการทดสอบหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

ตารางที่ 4.2.1 แสดงผลการวัดความเร็วเสียงอุลตร้าโซนิคในวัสดุ

ครั้งที่	UNSC80100		UNS C3600		ASTNC37700		A 93102		AA6101		DIN C25		DIN C35		JIS SUS302		SS304		White Ceramic #FRC-300-030G		White Ceramic #FRC-300-050A	
	C_L	C_L	C_T	C_L	C_T	C_L	C_L	C_T	C_T	C_T	C_L	C_T	C_L	C_T	C_L	C_T	C_L	C_T	C_L	C_T	C_L	C_T
1	4685	4332	2065	6394	3132	5888	5886	3177	3179	2218	4318	1971	6314	3156	5736	3070	5197	3022	3175	1477	3173	1627
2	4686	4334	2080	6394	3173	5886	5886	3224	3211	2241	4318	1971	6314	3156	5736	3131	5197	3089	3167	1450	3153	1637
3	4671	4334	2062	6394	3166	5884	5886	3210	3207	2229	4318	1934	6314	3156	5736	3118	5197	3022	3146	1504	3200	1633
4	4671	4334	2068	6394	3160	5886	5886	3211	3205	2227	4318	1971	6314	3063	5736	3118	5197	3089	3159	1490	3200	1436
5	4675	4334	2076	6394	3170	5884	5886	3218	3220	2246	4318	1934	6314	3063	5736	3129	5197	3089	3178	1499	3232	1461
6	4672	4332	2061	6394	3160	5886	5886	3218	3215	2232	4318	1934	6314	2976	5736	3126	5197	3089	3152	1462	3221	1572
7	4682	4334	2080	6394	3167	5884	5886	3216	3216	2240	4318	1934	6314	3063	5736	3122	5197	3022	3144	1370	3225	1613
8	4671	4334	2075	6394	3166	5886	5886	3224	3222	2236	4318	1934	6314	3063	5736	3126	5197	3022	3167	1455	3221	1613
9	4676	4332	2068	6396	3163	5884	5886	3220	3218	2231	4318	1934	6314	3063	5736	3124	5197	3089	3167	1421	3225	1513
10	4672	4336	2072	6392	3176	5886	5886	3218	3216	2232	4318	1934	6314	3063	5736	3118	5197	3089	3152	1416	3204	1546
ค่าเฉลี่ย	4676	4334	2071	6394	3163	5885	5886	3214	3211	2233	4318	1935	6314	3062	5736	3116	5197	3062	3160	1454	3205	1565

Ubon Rajathanee University

ตารางที่ 4.2.2 ผลการทดสอบการหาค่ายังโมดูลัส โดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิก จากการคำนวณโดยใช้สมการ (2.3.9)

วัสดุ	E_{AV} (G Pa)
UNS C 80100	99.90 ± 1.82
UNS C 3600	97.52 ± 0.53
ASTM C 37700	87.62 ± 1.42
A 93102	73.81 ± 0.48
AA 6101	66.69 ± 1068
DIN C 25	196.80 ± 2.62
DIN C 35	208.98 ± 1.36
SIS SUS 302	198.04 ± 1.72
SS 304	181.94 ± 2.80
White Ceramic # PRC-300-030G	9.90 ± 1.36
White Ceramic # PRC-300-050A	8.05 ± 1.54

หมายเหตุ E_{AV} คือ ค่ายังโมดูลัสเฉลี่ยจากการทดสอบ 10 ครั้ง

4.3 ตารางเปรียบเทียบค่ายังโมดูลัสจากการใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค จากการทดสอบแรงดึงและตารางมาตรฐาน (ASTM)

ตารางที่ 4.3.1 การเปรียบเทียบค่ายังโมดูลัสโดยการทดสอบแรงดึง , ใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคและตารางมาตรฐาน (ASTM)

วัสดุ	E_A (GPa)	E_B (GPa)	E_C (GPa)
UNS C 80100	96.80 ± 5.98	99.90 ± 1.82	120
UNS C 3600	93.04 ± 4.38	97.52 ± 0.53	96 – 120
ASTM C 37700	82.85 ± 4.56	87.62 ± 1.42	96 – 120
A 93102	76.91 ± 7.83	73.81 ± 0.48	73
AA 6101	66.60 ± 3.41	66.69 ± 1.68	73
DIN C 25	196.22 ± 3.23	196.80 ± 2.62	190 – 210
DIN C 35	187.10 ± 7.05	208.98 ± 1.36	190 – 210
SIS SUS 302	195.07 ± 12.50	198.04 ± 1.72	190 – 210
SS 304	184.97 ± 2.92	181.94 ± 2.80	190 – 210

หมายเหตุ E_A คือ ค่ายังโมดูลัสโดยการทดสอบแรงดึง

E_B คือ ค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

E_C คือ ค่ายังโมดูลัสจากตารางมาตรฐาน (ASTM)

ตอนที่ 2 ผลการคำนวณหาค่ายังโมดูลัสของวัสดุเซรามิก

ตารางที่ 4.4.1 ผลการคำนวณหาค่ายังโมดูลัสของ Alumina โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขต่างๆ

pH	ϕ	μ	C_L(m/s)	C_T(m/s)	b	E_X(GPa)	E_Y(GPa)	E_Z(GPa)
3.5	0.63	0.152	1926	1233	1.562	8.77	8.76	8.82
4	0.63	0.162	1881	1194	1.575	8.29	8.29	8.30
4.5	0.62	0.155	1791	1144	1.566	7.03	7.04	7.74
5	0.59	0.163	1736	1101	1.577	6.60	6.60	6.59
10.5	0.54	0.163	1689	1071	1.577	5.71	5.71	5.73
11	0.57	0.156	1784	1138	1.568	6.79	6.79	6.83
11.5	0.59	0.160	1850	1176	1.573	7.52	7.52	7.51

ตารางที่ 4.4.2 ผลการคำนวณหาค่ายังโมดูลัสของ Alumina โดยกำหนดให้ pH = 4 แต่อุณหภูมิและเวลาที่ให้อุณหภูมิในการขึ้นรูปเปลี่ยนไป

อุณหภูมิ (°c)	เวลา (h)	ϕ	μ	C_L(m/s)	C_T(m/s)	b	E_X (GPa)	E_Y (GPa)	E_Z (GPa)
700	2	0.63	0.140	3318	2148	1.545	26.27	26.28	26.53
1200	1	0.76	0.188	7846	4862	1.614	169.47	169.47	70.16
	3	0.78	0.214	8312	5013	1.658	188.99	188.98	189.20
	12	0.82	0.200	9008	5513	1.634	237.56	237.56	238.75
	24	0.83	0.210	9027	5467	1.651	238.43	238.43	238.72
1350	1	0.96	0.184	10366	6452	1.607	235.53	375.53	374.75
	3	0.97	0.199	10656	6531	1.632	393.87	393.87	395.75
	12	0.99	0.200	10690	6541	1.634	403.92	403.92	404.03
	24	0.99	0.217	10844	6517	1.664	406.37	406.38	407.84
1500	3	0.99	0.242	10870	6335	1.716	392.04	392.04	393.05

ตารางที่ 4.4.3 ผลการคำนวณหาค่ายังโมดูลัสของ Alumina โดยกำหนดให้ pH = 10.5 แต่อุณหภูมิและเวลาที่ให้อุณหภูมิในการขึ้นรูปเปลี่ยนไป

อุณหภูมิ (°c)	เวลา (h)	ϕ	μ	C_L(m/s)	C_T(m/s)	b	E_X (GPa)	E_Y (GPa)	E_Z (GPa)
700	2	0.55	0.198	3220	1976	1.630	20.42	20.42	20.33
1200	1	0.62	0.208	6430	3904	1.647	90.64	90.64	90.87
	3	0.64	0.172	6620	4167	1.589	103.38	103.38	103.50
	12	0.66	0.199	7120	4376	1.623	119.32	119.32	119.21
	24	0.66	0.195	7281	4479	1.626	125.65	125.65	126.01
	60	0.71	0.229	7928	4699	1.687	153.03	153.03	152.53
1350	1	0.79	0.235	9005	5298	1.700	217.44	217.44	217.49
	3	0.81	0.246	9214	5343	1.724	228.98	228.98	229.75
	12	0.90	0.245	9914	5757	1.722	296.90	296.90	294.77
	24	0.90	0.217	10121	6078	1.665	321.57	321.57	322.70
1500	3	0.95	0.213	10640	6426	1.656	377.72	377.72	377.92

หมายเหตุ ρ คือ Density of Alumina at Porosity = 3.97 g/cm^3

ϕ คือ Volume Fraction

μ คือ Poisson' s Ratio

b คือ C_L/C_T

E_X คือ ค่ายังโมดูลัสที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.3.8)

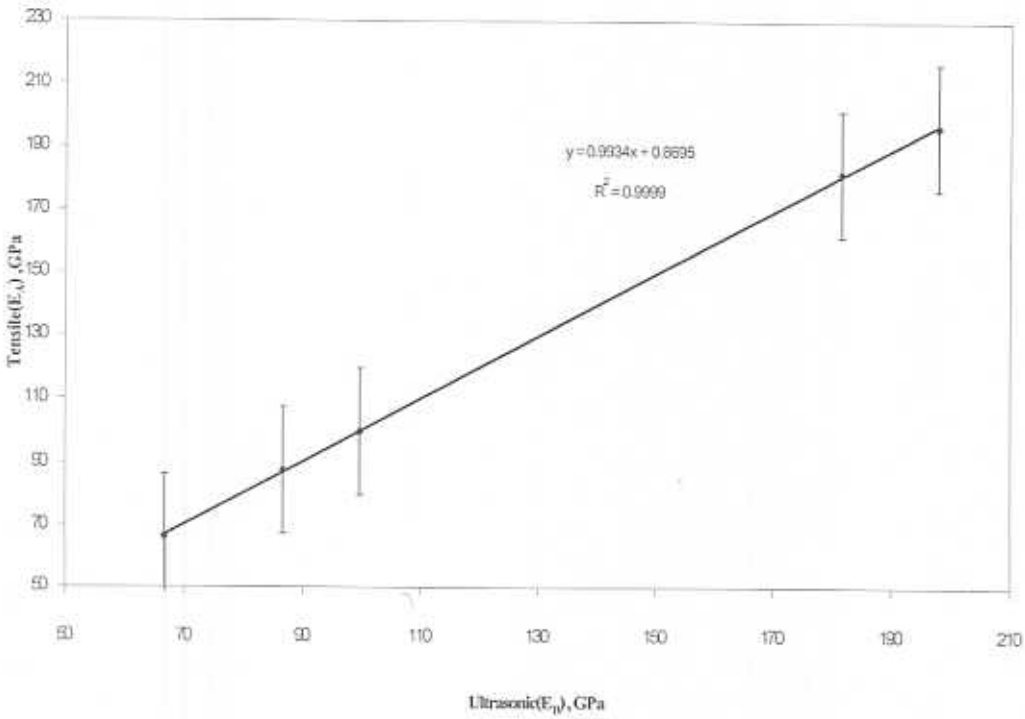
E_Y คือ ค่ายังโมดูลัสที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.3.7)

E_Z คือ ค่ายังโมดูลัสจากตารางมาตรฐาน

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

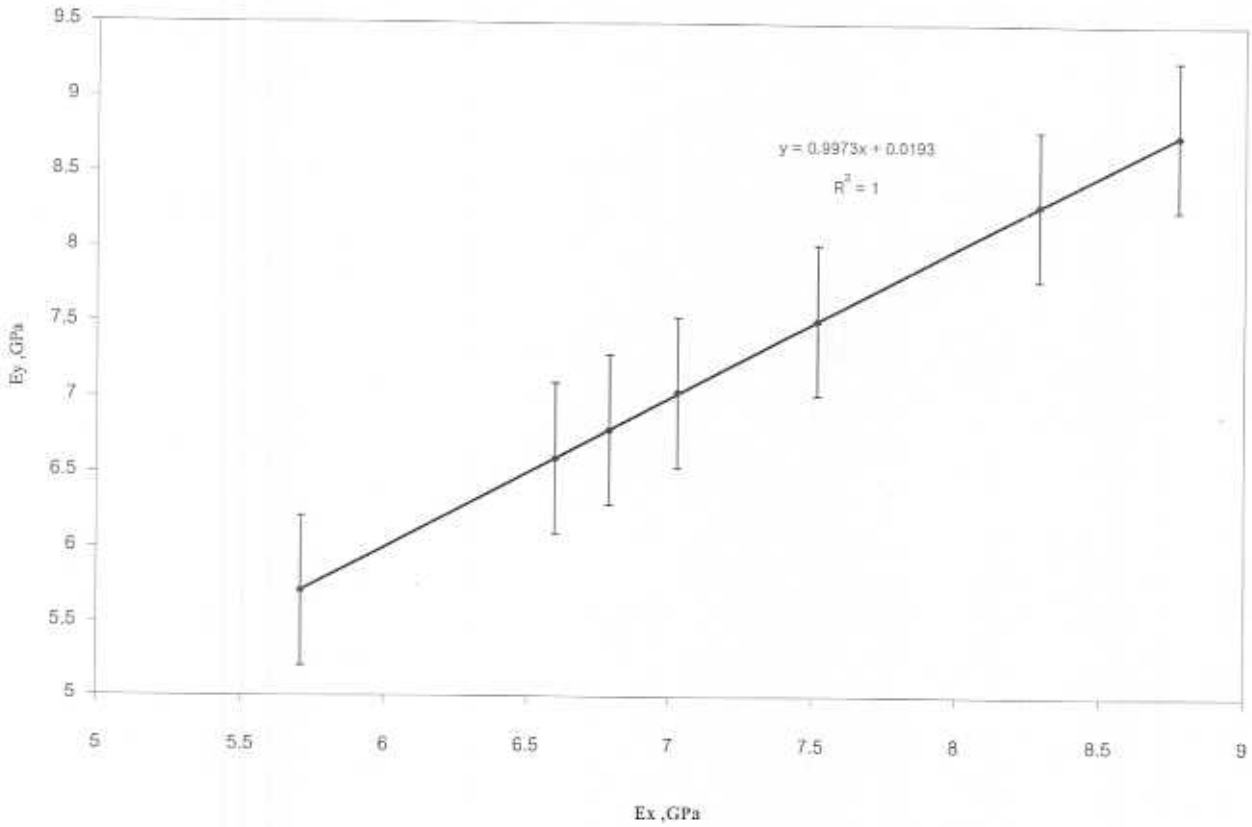
จากผลการทดลองการหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคและการหาค่ายังโมดูลัสโดยการทดสอบแรงดึงผลปรากฏว่ามีค่าใกล้เคียงกันและเมื่อเรานำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานผลปรากฏคือ ได้ค่าที่สอดคล้องกันจึงสรุปได้ว่า การหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานด้านวิศวกรรมได้ ซึ่งในการหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคเราจำเป็นที่จะต้องทราบความเร็วของคลื่นตามยาว, ความเร็วของคลื่นตามขวาง และความหนาแน่นของวัสดุแต่ละประเภท จึงจะสามารถหาค่ายังโมดูลัสของวัสดุชนิดนั้นได้ นอกจากนั้นค่ายังโมดูลัสของวัสดุแต่ละประเภทยังขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีและกระบวนการผลิตของวัสดุนั้น การเปรียบเทียบค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคและค่ายังโมดูลัสโดยการทดสอบแรงดึงสำหรับวัสดุที่เป็นโลหะ แสดงดังรูปที่ 5.1.1



รูปที่ 5.1.1 กราฟการแสดงการเปรียบเทียบค่ายังโมดูลัสจากการทดสอบแรงดึง (E_A) และการใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค (E_B)

สำหรับวัสดุเซรามิกที่ทดลองคือ Alumina (White Ceramic # PRC-300-030G) และ Alumina (White Ceramic # PRC-300-050A) เมื่อเปรียบเทียบกับตาราง 4.4.1 ผลการทดลองใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่ายังโมดูลัสของเหล็ก (steel) จะมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากกว่าค่ายังโมดูลัสของวัสดุชนิดอื่น เพราะว่าหัวตรวจสอบแบบหัวมุม (angle probe) ได้ถูกสร้างขึ้นมาสำหรับวัสดุที่เป็นเหล็กโดยเฉพาะ จึงทำให้มุมที่คลื่นหักเหเข้าไปในวัสดุเป็นมุมที่กำหนดไว้บนหัวตรวจสอบ สำหรับวัสดุอื่น ๆ ที่มีดัชนีหักเหแตกต่างจากเหล็ก มุมของหัวตรวจสอบที่หักเหเข้าไปในวัสดุเปลี่ยนไป จึงมีผลต่อการคำนวณความเร็วคลื่นตามขวาง สำหรับวัสดุ เซรามิก การเพิ่มค่า pHจะมีผลทำให้ค่ายังโมดูลัสเปลี่ยนไปคือถ้าค่า pH เพิ่มขึ้นค่ายังโมดูลัสจะมีค่าลดลงนอกจากนี้ค่ายังโมดูลัสของ เซรามิก ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ให้อุณหภูมิในการขึ้นรูปอีกด้วย สำหรับวัสดุโลหะและเซรามิก ในการคำนวณหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค สมการที่ใช้ในการคำนวณค่ายังโมดูลัส คือ สมการเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1.2



รูปที่ 5.1.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ายังโมดูลัสจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.3.8), E_X และค่ายังโมดูลัสจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.3.7) , E_Y

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเตรียมชิ้นงานที่เป็นแท่งสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อทดสอบหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอัลตร้าโซนิค ในการหาค่าความเร็วคลื่นเสียงตามขวาง จะต้องไม่ให้มุมของชิ้นงานชำรุด เพราะจะทำให้วัดค่าความยาวคลื่นตามขวางผิดพลาด สามารถแก้ไขโดยการบากชิ้นทดสอบให้เป็นร่องหรือเจาะรู

5.2.2 การวัดความเร็วคลื่นเสียงตามขวางในวัสดุแต่ละประเภท จะมีมุมหักเหที่แตกต่างกัน เมื่อทำการปรับเทียบกับแท่งมาตรฐานสำหรับการปรับเทียบ K_1 (DIN 54120) ในการวัดความเร็วคลื่นเสียงตามขวางในวัสดุประเภทอื่นควรใช้ ทฤษฎีปีทากอรัสประกอบการคำนวณ

5.2.3 การใช้หัวตรวจสอบหามุมให้หาจุด Index Point ก่อนทุกครั้งเพราะเมื่อใช้หัวตรวจสอบไปนานๆแท่งพลาสติก (Perspex Wedge) ที่สัมผัสชิ้นงานจะเกิดการชำรุดทำให้มุมในการส่งคลื่นเปลี่ยนไป

5.2.4 การวัดโดยใช้เกจวัดในเครื่องจะมีฟังค์ชันในการวัดแบบอัตโนมัติ เมื่อทำการวัดโดยเกจวัด ควรจะให้พีคอยู่ที่ 80% ของจอ CRT และให้เกจวัดอยู่ที่เดิมตลอด เพื่อให้ค่าความเร็วคลื่นเสียงที่วัดได้ถูกต้อง

5.2.5 การวัดทุกครั้งต้องทำการทดสอบปรับเทียบเครื่องอุลตร้าโซนิคก่อนเพื่อให้มั่นใจว่าสามาถวัดได้ถูกต้อง

บรรณานุกรม

1. ฟูอิจิ ซาโตะ, " การทดสอบแบบไม่ทำลาย", โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2530
2. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การทดสอบเหล็กและเหล็กกล้า เล่ม 4, 2525
3. สมนึก วัฒนศรียกุล , " การตรวจสอบโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค" , ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
4. Albert E. Brown, " Rationale and Summary of Methode for Determining Ultrasonic Properties of Materials at Lawrence Livermore National Laboratory", February 9,1995
5. F.Smith, " Principles of Materials Science and Engineering",McGraw – will,1990 a Discussion", J.Mater.Sci.5(1986)427 – 438
7. NDT , " Relationship Between Ultrasonic Velocity and Elastic Moduli", Martch 1996,Vol.1 No.3
8. R.A.Roberts, "Ultrasonic and Mechanical Behavior of Green and Partially Sintered Alumina : Effect of Slurry Consolidation Chemistry", J.Am.Ceram.Soc.,81[10]2629 – 39 (1998)

ภาคผนวก ก.

ก.1. การปรับตั้งเครื่องสำหรับหัวตรวจสอบ

ถ้านำหัวตรวจสอบมุมวางสัมผัสลงบนผิวชิ้นงาน ที่มีผิวขนานกับคลื่นเสียงก็จะสะท้อนกับผิวตรงข้ามหายไป ซึ่งก็จะทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณเอคโคได้ จึงจำเป็นต้องใช้แท่งมาตรฐานสำหรับปรับตั้งที่มีรูปทรงใหม่ แท่งมาตรฐานนี้ต้องทำให้เกิดผิวหลัง (Back Wall) สำหรับทิศทางของคลื่นเสียงทุกทิศทาง และต้องตกกระทบตั้งฉากด้วย ซึ่งแท่งมาตรฐานแบบครึ่งวงกลมรูปทรงกระบอกจะใช้ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด เพียงแต่ต้องให้เสียงวิ่งอยู่บนแนวรัศมีของแท่งมาตรฐานจริงๆ หัวตรวจสอบจะถูกวางสัมผัสกับแท่งมาตรฐาน และเลื่อนหัวตรวจสอบไปมาเพื่อหาตำแหน่งที่ความสูงเอคโคที่หนึ่งที่มีแอมพลิจูดสูงสุด ซึ่งหมายความว่า จุดที่เสียงออกจากหัวตรวจสอบอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของแท่งมาตรฐาน และทำให้คลื่นเสียงตกกระทบตั้งฉากกับผิวโค้งของแท่งมาตรฐานพอดี แล้วสะท้อนกลับไปยังทิศทางเดิม แท่งมาตรฐานแบบครึ่งวงกลมรูปทรงกระบอกนี้สามารถจัดทำจากวัสดุใดๆได้ไม่ยาก สำหรับตรวจสอบเหล็กกล้ามีแท่งมาตรฐาน (Calibration Block)สำหรับการปรับตั้ง 2 ลักษณะคือ K_1(DIN 54120) และ K_2 (DIN 54122)

ก.1.1 แท่งมาตรฐาน K_2 (DIN 54122)

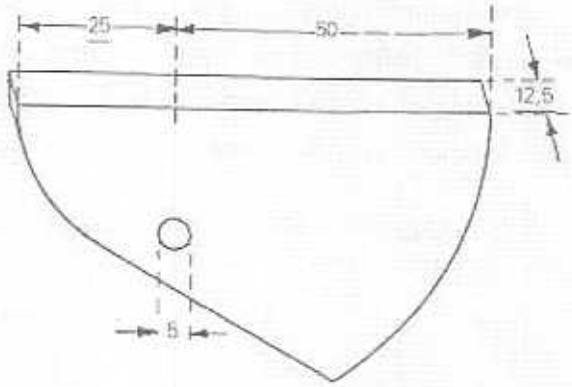
แท่งมาตรฐาน K_2 ประกอบด้วยแผ่นหนึ่งในสี่วงกลม 2 ชิ้น ซึ่งมีรัศมี $R_1 = 25$ mm และ $R_2 = 50$ mm ทำให้ระยะระหว่างเอคโคคือ $R_1 + R_2 = 75$ mm ถ้าวางหัวตรวจสอบหันไปทางรัศมี 25 mm จะได้เอคโคที่ระยะทางเสียงดังนี้

$$S_n = R_1 + (n-1)(R_1 + R_2) \quad ; n = 1,2,3.....$$

จะได้ $S_1 = 25$ mm

$S_2 = 100$ mm

$S_3 = 175$ mm



รูปที่ ก.1.1 แท่งมาตรฐาน K_2 (DIN 54122)

ในทำนองเดียวกัน ถ้าหันหัวตรวจสอบไปทางด้านรัศมี 50 mm จะได้

$$S_n = R_2 + (n-1)(R_1 + R_2) \quad ; n = 1,2,3.....$$

จะได้ $S_1 = 50$ mm

$S_2 = 125$ mm

$S_3 = 200$ mm

ก.1.2 แท่งมาตรฐาน K_1 (DIN 54120)

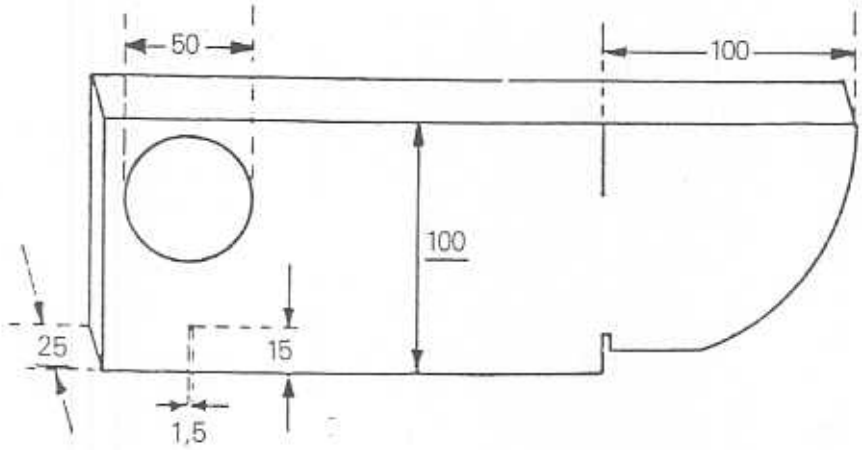
ในการปรับตั้งเครื่องด้วยแท่งมาตรฐาน K_1 จะมีส่วนที่เป็นเศษหนึ่งส่วนสี่ของวงกลมรัศมี R = 100 mm และเพื่อที่จะให้เกิดเอคโค (Multiple Echoes) ซึ่งที่จุดศูนย์กลางของเศษหนึ่งส่วนสี่วงกลมจะถูกทำเป็นร่องตั้งฉากกับผิวสัมผัส ตรงนี้ที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับที่มุม (Corner Effect) ซึ่งไม่ว่าจะลำเลียงมาจากทิศทางใด เมื่อกระทบกับบริเวณมุมก็จะสะท้อนกลับไปทิศทางเดิม

จากแท่งมาตรฐาน K_1 (DIN 54120) จะได้เอคโคผิวหลังที่ระยะทางเสียงดังนี้

$$S_n = 100n \quad ; \quad n = 1,2,3.....$$

เนื่องจากการใช้งานมักจะมีการเสียดสี ทำให้หน้าสัมผัสของหัวตรวจสอบมีการสึกกร่อนได้ มีผลทำให้จุดออกเสียง (probe Index) เปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นจึงควรหาจุดออกเสียงใหม่เป็นระยะๆ

ซึ่งทำโดยการวางหัวตรวจสอบไว้บนแท่งมาตรฐาน K_1 และหาเอคโคสูงสุดจากผิววงกลม ที่จุดนี้จะเป็นจุดที่หัวตรวจสอบส่งคลื่นเสียงออกจากหัวตรวจสอบ ซึ่งจะอยู่ตรงตำแหน่งร่องบากของ K_1 พอดี และอาจจะทำเครื่องหมายที่หัวตรวจสอบโดยตรง หรือวัดระยะจุดออกเสียง (ร่องบาก) ไปถึงด้านหน้าหัวตรวจสอบ



รูปที่ ก.1.2 แท่งมาตรฐาน K_1 (DIN 54120)

ภาคผนวก ข

การทดสอบแรงดึง

ข.1. ขอบข่าย

ข.1.1. มาตรฐานนี้กำหนดการทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กกล้า ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 4 มิลลิเมตรขึ้นไปโดยการดึง สำหรับการทดสอบผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าลักษณะอื่นที่โดยการดึงที่มิได้กำหนดในเล่มนี้ จะปรากฏอยู่ในเล่มอื่นซึ่งอยู่ในชุดการทดสอบเหล็กและเหล็กกล้านี้ ได้แก่

(1). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การทดสอบเหล็กและเหล็กกล้า เล่ม 5 การทดสอบเหล็กกล้าแผ่นบางโดยการดึง มาตรฐานเลขที่ มอก.244 เล่ม 5

(2). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การทดสอบเหล็กและเหล็กกล้า เล่ม 6 การทดสอบท่อเหล็กกล้าโดยการดึง มาตรฐานเลขที่ มอก.244 เล่ม 6

(3). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การทดสอบเหล็กและเหล็กกล้า เล่ม 7 การทดสอบลวดเหล็กกล้าโดยการดึงมาตรฐานเลขที่ มอก.244 เล่ม 7

ข.2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

ข.2.1. ความยาวพิกัด (gauge length) หมายถึง ความยาวระหว่างจุดที่กำหนดขึ้นสองจุดในส่วนที่เป็นรูปทรงกระบอกหรือรูปทรงเหลี่ยมของชิ้นทดสอบ เพื่อใช้หาความยืดระหว่างการทดสอบ

ข.2.1.1. ความยาวพิกัดเดิม (L_0) หมายถึงความยาวพิกัดก่อนการทดสอบ

ช.2.1.2. ความยาวพิกัดสุดท้าย (L_u) หมายถึงความยาวพิกัดหลังจากชิ้นทดสอบถูกดึงให้ขาด แล้วนำส่วนที่ขาดมาวางต่อเข้าด้วยกันให้สนิทที่สุดในแนวเส้นตรงเดียวกัน

ข.2.2. ความยาวพิกัดสำหรับเครื่องวัดการยืด (extensometer gauge length , L_e) หมายถึงความยาวระหว่างจุดที่กำหนดขึ้น 2 จุด ในส่วนขนานของชิ้นทดสอบ เพื่อใช้ในการวัดหาการยืดโดยเครื่องวัดการยืด ความยาวนี้อาจแตกต่างจากความยาวพิกัดเดิม (L_0) และอาจจะเป็นค่าใดก็ได้ที่มากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) หรือความกว้าง (b) ของชิ้นทดสอบ แต่ต้องน้อยกว่าความยาวของส่วนขนาน (L_c)

ข.2.3. ความยืดถาวร (permanent elongation) หมายถึงค่าที่เปลี่ยนไปของความยาวพิกัดของชิ้นทดสอบเนื่องจากความเค้นที่กำหนด (วัดหลังจากเอาความเค้นที่กระทำบนชิ้นทดสอบออก

แล้ว) คิดเป็นร้อยละของความยาวพิกัดเดิม สัญลักษณ์ของความยืดอันนี้ควรจะมีดัชนีบอกค่าความเค้นที่กำหนด

ข.2.4. ความยืด (elongartion , A) หมายถึงความยืดถาวรของความยาวพิกัดหลังจากชิ้นทดสอบขาด คิดเป็นร้อยละของความยาวพิกัดเดิม

หมายเหตุ ถ้าความยาวพิกัดไม่ใช่ $5.65 (S_0)^{1/2}$ ควรจะระบุความยาวพิกัดไว้ท้ายสัญลักษณ์ของความยืด เช่น A_{10} หมายถึง ความยืดจากความยาวพิกัดเท่ากับ $10(4S_0 /\pi)^{1/2}$

ข.2.5. การลดทอนพื้นที่ (reduction of area, Z) หมายถึง การลดทอนพื้นที่ภาคตัดขวางที่ลดลงมากที่สุดหลังจากชิ้นทดสอบขาด คิดเป็นร้อยละของพื้นที่ภาคตัดขวางเดิม

ข.2.6. แรงสูงสุด (maximum load , F_m) หมายถึง แรงสูงสุดที่ชิ้นทดสอบได้รับระหว่างการดึง

ข.2.7. ความเค้น (stress) หมายถึง แรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบใดๆ ระหว่างการทดสอบหารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางเดิม

หมายเหตุ ความเค้นในที่นี้คือ ความเค้นระบุ (nominal stress)

ข.2.8. ความต้านแรงดึง หรือความเค้นดึงสูงสุด (tensile strength or maximum tensile streaa, R_m) หมายถึง แรงสูงสุด (F_m) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางเดิมของชิ้นทดสอบ

ข.2.9. ความเค้นคราก (yield stress) หมายถึง ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นเมื่อการทดสอบดำเนินไปถึงจุดที่ชิ้นทดสอบเริ่มจะเปลี่ยนรูปถาวร (plastic deformation) และดำเนินต่อไปด้วยความเค้นที่เกือบคงที่

ข.2.9.1. ความเค้นครากบน (upper yield stress , R_{eH}) หมายถึงค่าความเค้นที่จุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนรูปถาวร ซึ่งปรากฏในเหล็กกล้าบางชนิด หรือหมายถึง ค่าความเค้นที่ได้จากจุดยอดจุดแรกของการคราก (yield) แม้ว่าค่าที่ได้จะเท่ากันหรือต่ำกว่าที่จุดยอดจุดหลังๆ ระหว่างการเปลี่ยนรูปถาวร

ข.2.9.2. ความเค้นครากล่าง (lower yield stress , R_{eL}) หมายถึงค่าความเค้นต่ำสุดที่วัดได้จากช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรที่จุดครากโดยไม่นับสภาวะปรับตัวเริ่มแรก (initial transient effect) ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้

หมายเหตุ เหล็กกล้าปกติจะมีการคราก หากผ่านงานแปรรูปเย็น (cold working) หรือผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment) แล้วปรากฏการณ์การอาจหายไป ในกรณีเช่นนี้ต้องระบุความเค้นพิสูจน์ (ดูข้อ ข.2.10 และ ข.2.11)

ข.2.10. ความเค้นพิสูจน์สำหรับความยืดที่ไม่ได้สัดส่วน (proof stress for non-proportional elongation, R_p) หมายถึงความเค้นที่ทำให้เกิดความยืดที่ไม่ได้สัดส่วน เท่ากับที่กำหนดไว้เป็นร้อยละความยาวพิกัดเดิม เมื่อจะระบุความเค้นพิสูจน์สำหรับความยืดที่ไม่ได้สัดส่วน ต้องบอกค่าความยืด

ที่ไม่ได้สัดส่วนไว้ด้วย เช่น ร้อยละ 0.2 และเมื่อจะใช้สัญลักษณ์ให้ระบุความยืดที่ไม่ได้สัดส่วนไว้ท้ายสัญลักษณ์ด้วย เช่น $R_{p0.2}$

ข.2.11. ความเค้นพิสูจน์สำหรับความยืดรวม (proof stress for total elongation or proof stress under load,R_t) หมายถึง ความเค้นที่ทำให้เกิดความยืดรวม (total elongation) ซึ่งประกอบไปด้วยความยืดที่ไม่ได้สัดส่วนรวมกับความยืดหยุ่น (elastic elongation) เท่ากับที่กำหนดไว้เป็นร้อยละของความยาวพิกัดเดิม เมื่อจะระบุความเค้นพิสูจน์สำหรับความยืดรวม ต้องบอกค่าความยืดรวมด้วย เช่น ร้อยละ 0.5 และเมื่อจะใช้สัญลักษณ์ให้ระบุความยืดรวมไว้ท้ายสัญลักษณ์ด้วย เช่น $R_{t0.5}$

ข.2.12. ความเค้นเปลี่ยนรูปถาวร (permanent set stress,R_r) หมายถึง ความเค้นที่เมื่อเอาแรงกระทำออกแล้ว ทำให้เกิดความยืดถาวรเท่ากับที่กำหนดไว้ เป็นร้อยละของความยาวพิกัดเดิม ถ้าใช้สัญลักษณ์ให้ระบุค่าความยืดถาวรไว้ท้ายสัญลักษณ์ด้วย เช่น $R_{r0.2}$

ข.3 สัญลักษณ์และความหมาย

ข.3.1. สัญลักษณ์และความหมายมาตรฐานนี้ ให้เป็นไปตามตารางที่ ข.3.1 และรูปที่ ข.3.1

ตารางที่ ข.3.1 สัญลักษณ์และความหมาย

สัญลักษณ์	ความหมาย
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนขนานของชิ้นทดสอบซึ่งมีภาคตัดวงกลม (ดูรูปที่ ข.3.1)
a	ความหนาของส่วนขนานของชิ้นทดสอบซึ่งมีภาคตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (ดูรูปที่ ข.3.1)
b	ความกว้างของส่วนขนานของชิ้นทดสอบซึ่งมีภาคตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (ดูรูปที่ ข.3.1)
L_0^*	ความยาวพิกัดเดิม (ดูรูปที่ ข.3.1)
L_c	ความยาวส่วนขนาน (ดูรูปที่ ข.3.1)
L_e	ความยาวพิกัดสำหรับเครื่องวัดการยืด
L_t	ความยาวรวม (ดูรูปที่ ข.3.1)
L_u	ความยาวพิกัดสุดท้าย (ดูรูปที่ ข.3.1)
A	ความยืด = $((L_u - L_0)/L_0)*100$
S_0	พื้นที่ภาคตัดขวางเดิมภายในความยาวพิกัด (ดูรูปที่ ข.3.1)
S_u	พื้นที่ภาคตัดขวางน้อยที่สุดหลังจากขาด
R_{eH}	ความเค้นครากบน
R_{eL}	ความเค้นครากล่าง
R_p	ความเค้นพิสูจน์สำหรับความยืดที่ไม่ได้สัดส่วน
R_t	ความเค้นพิสูจน์สำหรับความยืดรวม
R_r	ความเค้นเปลี่ยนรูปถาวร
F_m	แรงสูงสุด
Z	การลดทอนพื้นที่ $((S_0 - S_u)/S_0)*100$
R_m^*	ความต้านแรงดึงหรือความเค้นดึงสูงสุด $= F_m / S_0$
r	รัศมีของบ่าชิ้นทดสอบ (ดูรูปที่ ข.3.1)

หมายเหตุ * ในกรณีที่ไม่ทำให้เกิดการเข้าใจผิดอาจใช้สัญลักษณ์ L และ R แทน L_0 และ R_m ได้ตามลำดับ

ภาคผนวก ค

สรุปสมการที่ใช้ในการหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

ค.1) สมการการหาค่า Poisson' s Ratio

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

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

(2)/(1) จะได้

$$\frac{C_T}{C_L} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \times \sqrt{\frac{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}{E(1-\mu)}} \quad (3)$$

$$\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2 = \left\{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}\right\} \times \left\{\frac{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}{E(1-\mu)}\right\}$$

กำหนดให้

$$A = \left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2$$

$$A = \frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)}$$

$$2A = \frac{(1-2\mu)}{(1-\mu)}$$

$$2A(1-\mu) = (1-2\mu)$$

นำ 2 หารตลอด

$$A(1-\mu) = \frac{1}{2} - \mu$$

$$A - A\mu = \frac{1}{2} - \mu$$

$$A - A\mu + \mu = \frac{1}{2}$$

$$\mu(1-A) = \frac{1}{2} - A$$

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} - A}{1 - A}$$

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2} \tag{4}$$

ค.2) สมการการหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิค

ค.2.1)

$$E = 2G(1 + \mu) \tag{5}$$

ค.2.2)

$$E = \phi \rho C_L^{\,2} \left\{ \frac{3 - \frac{4}{b^2}}{b^2 - 1} \right\} \tag{6}$$

ค.2.3)

$$E = \rho C_L^{\,2} \left\{ \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \right\} \tag{7}$$

ค.2.4)

$$E = 4 \rho C_T^{\,2} \left\{ \frac{\frac{3}{4} - \left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2} \right\} \tag{8}$$

จากสมการ (5)

$$E = 2G(1 + \mu)$$

โดยที่ $G = \rho C_T^{\,2}$

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}$$

แทนค่าลงในสมการที่ (5) จะได้

$$E = 2\left(\rho C_T{}^2\right)\times\left\{1+\left[\frac{\frac{1}{2}-\left(\frac{C_T}{c_L}\right)^2}{1-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}\right]\right\}$$

$$= 2\left(\rho C_T{}^2\right)\times\left\{\frac{1+\frac{1}{2}-\left(\frac{C_T}{c_L}\right)^2-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}{1-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}\right\}$$

$$= 2\left(\rho C_T{}^2\right)\times\left\{\frac{\frac{3}{2}-2\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}{1-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}\right\}$$

เอา 2/2 คูณ จะได้สมการที่ (8)

$$E = 4\left(\rho C_T{}^2\right)\times\left\{\frac{\frac{3}{4}-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}{1-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}\right\} \qquad (8)$$

จากสมการ (5) $\quad E = 2G(1+\mu)$

โดยที่ $\quad G = \rho C_T{}^2 \quad$ และ $\quad C_T = C_L\sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}}$

แทนค่าใน (5) จะได้สมการ (7)

$$E = \rho C_T{}^2\left\{\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}\right\} \qquad (7)$$

จากสมการ (7) ให้

$$\mu = \frac{\frac{1}{2}-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2}{1-\left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2} \qquad \text{และ } b = C_L/C_T$$

จะได้ $$\mu = \frac{\frac{1}{2}-\frac{1}{b^2}}{1-\frac{1}{b^2}}$$

พิจารณาเทอม (1+μ) ในสมการที่ (7)

$$(1+\mu) = 1 + \left\{ \frac{\frac{1}{2} - \frac{1}{b^2}}{1 - \frac{1}{b^2}} \right\}$$

$$= \frac{1 - \frac{1}{b^2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{b^2}}{1 - \frac{1}{b^2}}$$

$$= \frac{\frac{3}{2} - \frac{2}{b^2}}{1 - \frac{1}{b^2}}$$

$$= \left(\frac{3b^2 - 4}{2b^2} \right) \left(\frac{b^2}{b^2 - 1} \right)$$

$$(1+\mu) = \left(\frac{3b^2 - 4}{2} \right) \left(\frac{1}{b^2 - 1} \right) \tag{9}$$

พิจารณา (1-2μ) ในสมการที่ (7)

$$(1-2\mu) = 1 - 2\left(\frac{\frac{1}{2} - \frac{1}{b^2}}{1 - \frac{1}{b^2}} \right)$$

$$= \frac{1 - \frac{1}{b^2} - 1 + \frac{2}{b^2}}{1 - \frac{1}{b^2}}$$

$$= \frac{1}{b^2} \left(\frac{b^2}{b^2 - 1} \right)$$

$$(1-2\mu) = \left(\frac{1}{b^2 - 1} \right) \tag{10}$$

พิจารณาเทอม (1-μ) ในสมการที่ (7)

$$(1-\mu) = 1 - \left(\frac{\frac{1}{2} - \frac{1}{b^2}}{1 - \frac{1}{b^2}} \right)$$

$$= \frac{1 - \frac{1}{b^2} - \frac{1}{2} + \frac{1}{b^2}}{1 - \frac{1}{b^2}}$$

$$(1-\mu) = \frac{1}{2} \left(\frac{b^2}{b^2 - 1} \right) \tag{11}$$

แทนสมการ (9), (10)และ (11) ลงในสมการ (7) จะได้

$$E = \rho C_L^{\,2}\left\{\left[\frac{3b^2-4}{2(b^2-1)}\right]\left[\frac{1}{b^2-1}\right]\left[\frac{2(b^2-1)}{b^2}\right]\right\}$$

$$= \rho C_L^{\,2}\left\{\frac{(3b^2-4)}{b^2(b^2-1)}\right\}$$

เอา b^2 หารตลอดจะได้สมการ (6)

$$E = \rho C_L^{\,2}\left\{\frac{3-\frac{4}{b^2}}{b^2-1}\right\}$$

จึงสรุปได้ว่าสมการ (5), (6), (7) และ (8) เป็นสมการเดียวกัน

ถ้าพิจารณาสมการ (6) จะเห็นว่าในตอนต้นมีเทอมของ ϕ ด้วยเพราะว่าในสมการการหาค่ายังโมดูลัสโดยใช้คลื่นเสียงอุลตร้าโซนิคในรูปมาตรฐานจะต้องพิจารณาค่า Porosity ด้วยโดย

$$\rho = (1-p)\rho_0$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของวัสดุที่ไม่รวมค่า Porosity

p = Porosity

ρ_0 = ความหนาแน่นของวัสดุที่รวมค่า Porosity

ดังนั้นถ้าพิจารณาสมการ (6) จะได้

$$E = \rho_0(1-p)C_L^{\,2}\left\{\frac{3-\frac{4}{b^2}}{b^2-1}\right\}$$

สำหรับวัสดุที่เป็นโลหะเราถือว่าค่า Porosity มีค่าน้อยมากอาจคิดได้ว่าค่า Porosity มีค่าเท่าศูนย์ ดังนั้นสมการการหาค่ายังโมดูลัสของโลหะจึงไม่มีเทอมของค่า Porosity แต่ถ้าเป็นวัสดุเซรามิกเราสามารถหาค่ายังโมดูลัสได้โดยใช้สมการ (5), (6), (7) และ (8) โดยที่สมการดังกล่าวต้องคิดค่า Porosity ด้วย เมื่อเราพิจารณาสมการ (6) จะได้ว่า

$$\phi = (1-p)$$

เมื่อ ϕ คือ Volume Fraction