บทที่ 2

คลื่นเสียง

ในชีวิตประจำวันเราได้ใช้ประโยชน์จากคลื่นเสียงในการทำกิจกรรมต่างๆ มากมาย ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง คุณสมบัติต่างๆ ของคลื่นเสียงในทางฟิสิกส์ การใช้ประโยชน์จากคลื่นเสียง รวมถึงความสามารถในการได้ยินของมนุษย์

1. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นเสียง

คลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาว สามารถเดินทางผ่านไปในของแข็ง ของเหลว และก๊าซได้ อนุภาคของสสารที่คลื่นเดินทางผ่าน จะสั่นในแนวเดียวกับการแผ่ของคลื่น ระบบประสาทหูและสมองของมนุษย์สามารถรับฟังคลื่นเสียงที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 Hz ถึง 20 kHz ได้ ช่วงความถี่ของคลื่นเสียงที่มนุษย์ฟังได้ยินเรียกว่า "ออดิเบิล" (audible) คลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าช่วง ออดิเบิล เรียกว่า "คลื่นใต้เสียง" (infrasonic wave) และคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่าช่วงออดิเบิล เรียกว่า "คลื่นเหนือเสียง" (ultrasonic wave)

โดยปกติคลื่นใต้เสียงเกิดจากต้นกำเนิดที่มีขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น คลื่นเสียงเนื่องจากแผ่นดินไหว สำหรับคลื่นที่มีความถี่สูงมากๆ คือ คลื่นเหนือเสียง อาจเกิดจากการสั่นแบบยืดหยุ่นของผลึกควอท ซึ่งเกิดการสั่นพ้องกับสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ใส่เข้าไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Piezoelectric effect ด้วยวิธีนี้เราสามารถทำคลื่นเหนือเสียงให้มีความถี่สูงถึง 6×10^{8} Hz

คลื่นออดิเบิลอาจเกิดจากการสั่นของเครื่องดนตรีชนิดต่างๆ หรือ จากเสียงพูดของมนุษย์ การสั่นเหล่านี้ทำให้เกิดความดันของอากาศที่อยู่รอบๆ เปลี่ยนแปลง ซึ่งถือได้ว่าเป็นต้นกำเนิดของคลื่น ตัวอย่างเช่น เมื่อเคาะกระดิ่งจะมีการสั่นของโมเลกุลของกระดิ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศรอบๆ จึงเกิดคลื่นออกมาโดยรอบกระดิ่ง เราจะได้ยินเสียงก็ต่อเมื่อคลื่นนี้กระทบกับประสาทหูของเรา (ดังภาพ 1) คล้ายกับคลื่นน้ำเมื่อเราโยนก้อนหินลงไปในน้ำ เรียกว่า การแผ่กระจายของคลื่นเสียง (Sound propagation)

ภาพ 1 การแผ่กระจายของคลื่นเสียง

รูปร่างของคลื่นไม่ว่าจะเป็นแบบมีคาบ หรือจะเกิดจากคลื่นแบบมีคาบหลายคลื่นรวมกัน จะสามารถทำให้เกิดเสียงไพเราะน่าฟัง (ถ้าความเข้มของเสียงไม่สูงจนเกินไป) ตัวอย่าง เช่น เสียงดนตรี เป็นต้น **สำหรับเสียงซึ่งมีรูปคลื่นไม่เป็นแบบมีคาบได้แก่ เสียงรบกวน** (noise) **เสียงรบกวนสามารถแทนด้วยคลื่นแบบมีคาบจำนวนมากรวมกัน**

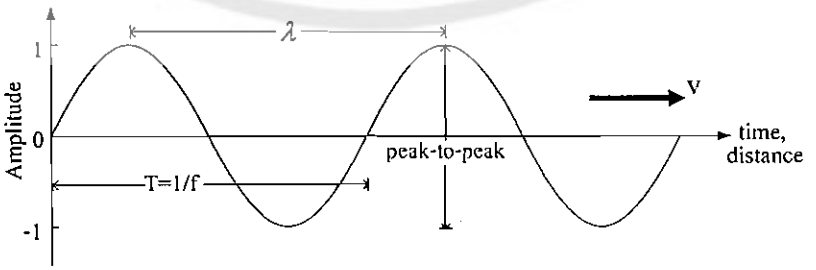
2. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของคลื่นเสียง

คลื่นเสียงที่เราได้ยินนั้นไม่ว่าจะเป็นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงใด ส่วนใหญ่จะเป็นเสียงที่ซับซ้อนที่เกิดจากการรวมกันของคลื่นเสียงที่มีความถี่และระดับความดันเสียงต่างๆ เข้าด้วยกัน ในการศึกษาเรื่องฟิสิกส์ของคลื่นเสียง เราอธิบายเป็นสมการคณิตศาสตร์ให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นในรูปแบบของคลื่นรูปไซน์ เช่น การเคาะส้อมเสียง เกิดการเคลื่อนที่ หรือความสั่นสะเทือนของโมเลกุลของอากาศที่มาจากการเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศโดยรอบ เป็นส่วนอัดส่วนขยาย เรียกว่า ความดันเสียง เคลื่อนที่ส่งผ่านโมเลกุลของตัวกลางไปยังจุดรับเสียง

พารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ที่สำคัญที่จะอธิบายธรรมชาติของการสั่นของโมเลกุลอากาศ จากการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศ หรือการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลาง ในที่นี้คือ อากาศผ่านกระบวนการได้ยินของมนุษย์จนรับรู้ความรู้สึกของเสียงนั้น มีอยู่ 2 พารามิเตอร์สำคัญคือ ความถี่ของเสียง และความยาวคลื่นเสียง ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับอัตราเร็วของเสียงในอากาศ ทิศทางการแผ่กระจายของเสียง และเวลาที่เสียงเดินทางจากแหล่งกำเนิดไปยังผู้รับเสียง

โดยทั่วไปคลื่นมีองค์ประกอบพื้นฐานดังนี้

1. ความถี่ (Frequency, f) หมายถึง จำนวนรอบที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ ในหนึ่งหน่วยเวลา ในระบบ SI มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที หรือ เฮิร์ทซ์ (Hz) การเคลื่อนที่ของความดันอากาศในตัวอย่างการเคาะส้อมเสียง หรือการเคลื่อนที่ของลูกสูบในท่อเกิดปรากฏการณ์ส่วนอัดส่วนขยายเดินไปตามท่อ ซึ่งนำมาเขียนกราฟระหว่างแอมปลิจูดกับเวลา หรือแอมปลิจูดกับระยะทางจะได้กราฟคลื่นรูปไซน์ ดังภาพ 2 จำนวนรอบการเกิดส่วนอัดส่วนขยายเราเรียกว่า ความถี่ของคลื่น



ภาพ 2 ความยาวคลื่น แอมปลิจูด ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

2. ความยาวคลื่น (Wave Length, λ) หมายถึง ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ในขณะที่อนุภาคสั่นครบ 1 รอบ ในระบบ SI มีหน่วยเป็นเมตร (m) จากกราฟของการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ระหว่าง แอมปลิจูดกับระยะทาง ความยาวคลื่นเสียง คือระยะทางจากยอดคลื่นหนึ่งถึงยอดคลื่นหนึ่ง หรือระยะทางของการเกิดคลื่น 1 คลื่น (ภาพ 2)

3. อัตราเร็วของคลื่น (Speed, v) หมายถึง ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา และเนื่องจากขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ไปด้วยอัตราเร็วค่าหนึ่ง เฟสของคลื่นก็เคลื่อนที่ไปด้วยอัตราเร็วเท่ากัน ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกว่า อัตราเร็วเฟส (Phase Speed) ของคลื่น ในระบบ SI มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)

การหาอัตราเร็วของคลื่นเสียง เราก็จะหาได้โดยตรงจากการบันทึกเวลาที่เสียงเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิด ซึ่งเรารู้ตำแหน่งหรือระยะทางที่อยู่ห่างจากเราอย่างถูกต้องแน่นอน แล้วคำนวณหาอัตราเร็วของคลื่นเสียง จากระยะทางที่เสียงเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา เราพบว่าขณะความดันปกติ และที่อุณหภูมิ $0°c$ อัตราเร็วของเสียงในอากาศประมาณ 331 m/s อัตราเร็วของเสียงจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงประมาณ 0.6 m/s ทุกๆ อุณหภูมิ เพิ่มขึ้นหรือลดลง $1°c$ โดยเขียนอยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$v(t) = 331 + 0.6(t) \qquad (2.1)$$

เมื่อ $v(t)$ = อัตราเร็วของเสียงในอากาศ

t = อุณหภูมิของอากาศ $(°c)$

ถ้าเราทราบค่าความถี่ และความยาวคลื่นเสียงแล้ว เราสามารถหาอัตราเร็วคลื่นเสียงได้อีกวิธีหนึ่ง โดยใช้สมการความสัมพันธ์คือ

$$v = \lambda f \qquad (2.2)$$

เมื่อ v = อัตราเร็วคลื่นเสียง (m/s)

λ = ความยาวคลื่น (m)

f = ความถี่ของคลื่น (Hz)

คลื่นเสียงทุกช่วงความถี่จะเคลื่อนที่ในอากาศด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน ซึ่งพิจารณาความจริงข้อนี้ได้จากเหตุผลที่ว่า ผู้ฟังได้ยินเสียงจากเครื่องดนตรีที่มีความถี่ต่างกันได้พร้อมกัน นอกจากนั้นแล้วเสียงยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง และของเหลวได้ โดยปกติเสียงจะเคลื่อนที่ในของแข็งได้ดีกว่าของเหลว และในของเหลวได้ดีกว่าก๊าซ และปรากฏว่าเสียงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในสุญญากาศ

4. คาบการเคลื่อนที่ (Period, T) หมายถึง เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ครบ 1 รอบในระบบ SI มีหน่วยเป็นวินาที (s)

5. มุมเฟส (Phases Angle, ϕ) หมายถึง มุมที่ใช้กำหนดตำแหน่งของคลื่นขณะที่เคลื่อนที่ในระบบ SI มีหน่วยเป็นเรเดียน (Radian, rad)

6. แอมพลิจูด (A) หมายถึง การกระจัดสูงสุดของการสั่นของอนุภาค ในระบบ SI มีหน่วยเป็นเมตร (m)

3. การใช้ประโยชน์จากคลื่นเสียง

นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาการบินและหาอาหารของค้างคาวบางชนิด พบว่าค้างคาวส่วนใหญ่สามารถหาทิศทางการบิน หรือหาอาหารในตอนกลางคืนได้ โดยค้างคาวจะส่งคลื่นเหนือเสียงที่ออกไปกระทบกับสิ่งกีดขวางและสะท้อนกลับมายังหูของค้างคาว ทำให้ค้างคาวสามารถรู้ตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง และบินไปไหนมาไหนได้โดยไม่ชนสิ่งกีดขวาง รวมทั้งค้างคาวยังสามารถใช้วิธีการเดียวกันนี้ในการตรวจสอบตำแหน่งของสิ่งที่เป็นอาหารอีกด้วย

จากการศึกษาธรรมชาติและสมบัติของเสียง นักวิทยาศาสตร์ได้นำความรู้ต่างๆ มาประยุกต์ใช้หลายด้านด้วยกัน ดังนี้

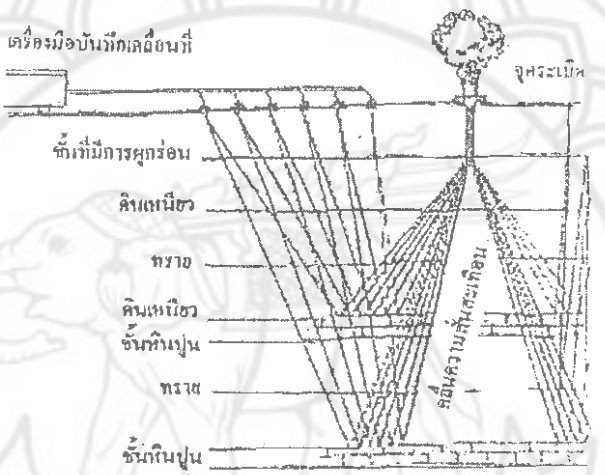
ด้านการประมง

เรือประมงใช้เครื่องโซนาร์ (Sound Navigation and Ranging ; SONAR) หาตำแหน่งของฝูงปลา เช่นเดียวกับการหาอาหารของค้างคาว เครื่องโซนาร์ของเรือประมงจะส่งคลื่นเหนือเสียงออกไปเป็นจังหวะ ๆ เมื่อคลื่นเสียงดังกล่าวกระทบกับฝูงปลา จะสะท้อนกลับมายังเรือ และสัญญาณเสียงที่ได้รับนี้จะถูกส่งเป็นสัญญาณไฟฟ้า ผ่านเข้าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณซึ่งจะบอกช่วงห่างของเวลาระหว่างสัญญาณเสียงที่ส่งออกกับสัญญาณเสียงสะท้อนที่กลับมายังเรือ และแปลงช่วงเวลานี้เป็นระยะห่างของวัตถุที่สะท้อนโดยจะแสดงผลออกมาทางจอภาพ ทำให้ทราบตำแหน่งของฝูงปลาได้ นอกจากนี้ยังใช้คลื่นเหนือเสียงสื่อสารระหว่างเรือด้วยกันอีกด้วย โดยทั่วไปเครื่องโซนาร์จะใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ในช่วง 20-100 kHz

ภาพ 3 การใช้คลื่นเหนือเสียงด้านการประมง

ด้านธรณีวิทยา

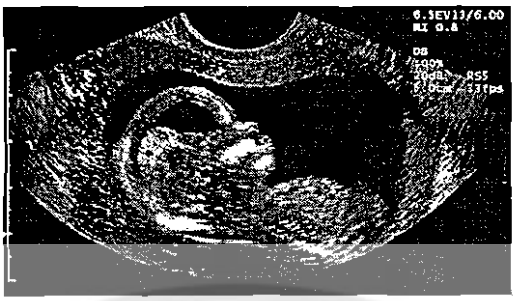
การสำรวจแหล่งแร่ด้วยการวิเคราะห์ชั้นหินต่างๆ โดยการส่งคลื่นเสียงที่มีพลังงานสูงซึ่งได้จากการทำให้เกิดการระเบิดบริเวณพื้นผิวโลก คลื่นเสียงที่เกิดจากการระเบิดจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นต่างๆ ของเปลือกโลกลงไป เปลือกโลกจะประกอบด้วยชั้นหินที่มีลักษณะและพื้นผิวที่ต่างกัน ทำให้คลื่นที่สะท้อนจากแต่ละชั้นของเปลือกโลกมีลักษณะต่างกันไป คลื่นเสียงสะท้อนนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า เข้าสู่อุปกรณ์วิเคราะห์ ซึ่งผลที่ได้จะนำมาเป็นข้อมูลหนึ่งของการศึกษาลักษณะชั้นหินต่างๆ ใต้ผิวโลก



ภาพ 4 การสำรวจชั้นหินโดยใช้คลื่นเสียง

ด้านการแพทย์

ในด้านการแพทย์ได้นำคลื่นเหนือเสียงมาใช้ในการตรวจอวัยวะภายในของเราเพื่อวินิจฉัยสาเหตุของความผิดปกติ เช่น ตรวจการทำงานของลิ้นหัวใจ ตรวจมดลูก ตรวจครรภ์ ตรวจเนื้องอก ตับ ม้าม และสมอง เพราะคลื่นเหนือเสียงสามารถสะท้อนที่รอยต่อระหว่างชั้นของเนื้อเยื่อต่างๆได้ดีกว่ารังสีเอกซ์ (X- rays) มาก คลื่นเหนือเสียงที่ใช้ในทางการแพทย์นี้เป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานของคลื่นเหนือเสียงด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีความถี่ในช่วง 1 MHz ถึง 10 MHz เมื่อคลื่นเสียงดังกล่าวผ่านผิวหนังเข้าสู่ร่างกาย ไปกระทบกับเนื้อเยื่อ เนื้อเยื่อมีความหนาแน่นต่างกัน จะสะท้อนคลื่นได้ดีต่างกัน เครื่องรับคลื่นสะท้อนจะเปลี่ยนคลื่นเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเมื่อผ่านเครื่องวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้า แล้วส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลคลื่นสะท้อนจากทิศทางต่างๆ เข้าด้วยกัน แล้วสรุปผลที่ได้ออกมาทางจอภาพ



ภาพ 5 การตรวจครรภ์โดยใช้คลื่นเหนือเสียง

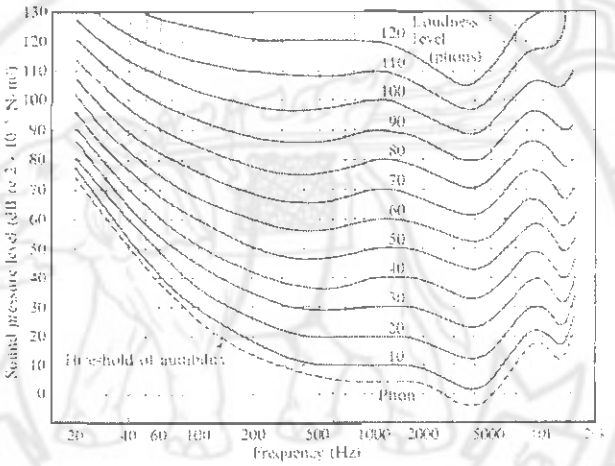
ด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรม

การใช้คลื่นเหนือเสียงตรวจสอบรอยร้าว หรือรอยตำหนิในเนื้อโลหะ แก้ว หรือเซรามิก โดยการส่งคลื่นเหนือเสียงในช่วงความถี่ 500 MHz ถึง 15 MHz ผ่านเข่าไปในชิ้นงาน แล้ววิเคราะห์ลักษณะของคลื่นสะท้อนกลับ หรือวิเคราะห์ลักษณะการรบกวนที่เกิดขึ้นต่อคลื่นที่ผ่านออกไป วิธีการนี้นอกจากจะใช้ตรวจสอบชิ้นงานประเภทโลหะหล่อหรือเซรามิกแล้ว ยังถูกนำไปใช้ตรวจสอบยางรถยนต์ที่ผลิตใหม่อีกด้วย เครื่องมือวัดความหนาของแผ่นโลหะ หรือวัสดุที่มีความแข็งอื่นๆ สามารถทำได้โดยใช้คลื่นเหนือเสียง แม้ว่าจะไม่สามารถเข้าถึงอีกด้านหนึ่งของผิวหน้าแผ่นโลหะนั้นได้ เช่น การตรวจสอบความหนาของหม้อต้มน้ำความดันสูง สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเป็นต้น ส่วนในทางทหาร ใช้คลื่นเหนือเสียงในการติดต่อสื่อสารกับเรือดำน้ำ การตรวจจับการเคลื่อนไหวของเรือใต้น้ำ ตอร์ปิโด ซึ่งจับตำแหน่งของเป้าด้วยคลื่นเหนือเสียง เป็นต้น

4. **ความสามารถในการได้ยินของมนุษย์**

มนุษย์ได้ยินเสียงโดยการนำคลื่นเสียงทางอากาศมาสู่เยื่อแก้วหู แล้วถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าและถูกส่งต่อไปยังปลายประสาทสมองรับรู้การได้ยินจนเกิดการแปลความหมายทำให้มนุษย์เข้าใจความหมายของเสียงที่ได้ยิน การสั่นของเซลล์ขนเร็วหรือช้าสัมพันธ์กับระดับความดันเสียงที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่เซลล์ขนแต่ละเซลล์ที่ถูกทำให้สั่นจะสัมพันธ์กับความถี่ของเสียงจะเห็นได้ว่า ความดังไม่ใช่องค์ประกอบอย่างเดียวในการอธิบาย หรือเข้าใจในเรื่องของเสียงและผลกระทบของเสียง ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การได้ยินเสียงโดยการนำเสียงทางอากาศ (Airborne conduction) การได้ยินเสียงอีกอย่างหนึ่งของมนุษย์ คือ การนำเสียงทางกระดูก (Bone conduction) ซึ่งจะเกิดในกรณีที่เสียงมีความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz ลงไป และกรณีที่มีการสั่นสะเทือนของกระดูกในกะโหลกศีรษะที่ในสภาวะปกติ เราอาจไม่ได้ยินหรือได้ยินเบามาก แต่ถ้าเราอุดหูหรือใส่อุปกรณ์ป้องกันเสียงจะได้ยินเสียงนี้ชัดเจน

หูมนุษย์สามารถได้ยินเสียงขึ้นอยู่กับระดับความดังเสียง (0 dB ถึง 130 dB) และช่วงความถี่ (20 Hz ถึง 20 kHz) ดังภาพ 6 ซึ่งสัมพันธ์กับการสั่นของเซลล์ขนภายในหูชั้นใน และมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear relationship) กล่าวคือ ที่ระดับเสียงเท่ากันแต่หูมนุษย์จะได้ยินเป็น ความดังที่ไม่เท่ากันทุกความถี่ ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามอธิบายลักษณะของการได้ยินของหูมนุษย์นี้ ออกมาในรูปของกราฟความสัมพันธ์เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการได้ยินของหูที่ระดับเสียงและความถี่ต่างๆ กัน จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 20 Hz ระดับเสียงต้องดัง 80 dB มนุษย์จึงจะเริ่มได้ยินเสียงนั้น ที่ความถี่ 1,000 Hz แค่เพียง 5 dB ก็สามารถได้ยินเสียงนั้นแล้ว และหูมนุษย์จะมีความอ่อนไหวหรือไวต่อการได้ยินมากที่สุดที่ความถี่ 4,000 Hz



ภาพ 6 แสดงขอบเขตการได้ยิน (Auditory field)

ขอบเขตการได้ยินของหูมนุษย์ (Auditory field) อยู่ในช่วงความถี่ 20 Hz ถึง 20 kHz และ 0 dB ถึง 130 dB แต่ละคนได้ยินเสียงไม่เท่ากัน บางคนอาจได้ยินเสียงที่มีความถี่ต่ำมากๆ หรือระดับเสียงต่ำมากๆเมื่อเทียบกับคนอื่น ในขณะที่บางคนอาจไม่ได้ยินเสียงที่ต่ำกว่า 25 dB ที่ความถี่ 1,000 Hz เลย ตามปกติขีดเริ่มการได้ยิน (Threshold of audibility) ของหูมนุษย์ในระดับความดังที่ต่ำที่สุดคือ 20 dB เมื่อเปรียบเทียบกับขอบเขตของเสียงดนตรี (Music field) ซึ่งมีระดับเสียงประมาณ 20 dB ถึง 90 dB ช่วงความถี่ประมาณ 50 Hz ถึง 10 kHz ขอบเขตของเสียงสนทนาของมนุษย์ (Human speech) จะมีระดับเสียงประมาณ 25 dB ถึง 80 dBในช่วงความถี่ประมาณ 100 Hz ถึง 4,000 Hz และขีดเริ่มของความเจ็บปวด(Threshold of pain) ของหูมนุษย์อยู่ที่ประมาณ 130 dB