

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อค้นหาหรือตรวจสอบวัตถุต่างๆ มีหลักการหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมนำใช้ร่วมกับระบบเรดาร์ทะลุพื้นดินคือการประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หลักการของวิธีดังกล่าวคือการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสายอากาศ ไปยังชิ้นงานที่ต้องการเพื่อตรวจสอบภายในโดยไม่ต้องทำการขุดหรือเจาะชิ้นงานทดสอบนั้นๆ และอาศัยหลักการสะท้อนกลับของคลื่นดังกล่าวมายังสายอากาศอีกครั้งแล้วนำสัญญาณที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาวัสดุที่ต้องการตรวจสอบร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยวิเคราะห์และแสดงผล เช่น โปรแกรม MATLAB เป็นต้น โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จะกล่าวในหัวข้อย่อยของบทที่ 2 ดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ [1]

สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายตัวสายอากาศถือว่ามีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งการรับส่งสัญญาณของระบบสื่อสารไร้สายจะมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับสายอากาศด้วยส่วนหนึ่งโดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้สำหรับการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra-wide band: UWB) ซึ่งต้องมีแถบความถี่กว้างเพียงพอต่อการรองรับการรับส่งข้อมูลจำนวนมาก ปกติสายอากาศที่ถูกจัดให้เป็นสายอากาศแถบกว้างยังต้องมีความกว้างแถบมากกว่าร้อยละ 25 ขึ้นไป การอธิบายและเข้าใจพฤติกรรมของสายอากาศจำเป็นต้องทราบคำนิยามของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศเสียก่อน พารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่าของการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss) อิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ (Impedance bandwidth) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) อัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ ซึ่งทุกๆ ปัจจัยที่กล่าวมาคือสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศที่ออกแบบหรือการเลือกใช้สายอากาศให้เหมาะสมกับงาน

2.1.1 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับนั้นเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าของแบนด์วิดท์สำหรับสายอากาศที่มีการแมตช์อิมพีแดนซ์กับสายส่ง เป็นการแสดงให้เห็นถึงสัญญาณที่สูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อป้อนพลังงานให้กับสายอากาศ รวมทั้งเป็นการบ่งบอกถึงค่าคุณลักษณะของอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) ที่สัมพันธ์กับการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับตลอดย่านความถี่ที่ประยุกต์ใช้งาน โดยค่า VSWR และค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) เป็นการกำหนดอัตราส่วน

ระหว่างคลื่นที่สะท้อนกลับ (V_0^-) กับคลื่นที่ตกกระทบ (V_0^+) ที่โหลดของสายส่ง สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_{line} - Z_{load}}{Z_{line} + Z_{load}} \quad (2.1)$$

โดยที่ Z_{line} และ Z_{load} เป็นอิมพีแดนซ์ของสายส่งและอิมพีแดนซ์ของโหลดในที่นี้คือสายอากาศซึ่งแรงดันและกระแสที่ผ่านสายส่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{(z)} = V_0^+ e^{-j\beta z} - V_0^- e^{-j\beta z} = V_0^+ (e^{-j\beta z} - \Gamma e^{-j\beta z}) \quad (2.2)$$

$$I_{(z)} = \frac{1}{Z_0} (V_0^+ e^{-j\beta z} - V_0^- e^{-j\beta z}) = \frac{V_0^+}{Z_0} (e^{-j\beta z} - \Gamma e^{-j\beta z}) \quad (2.3)$$

$$\text{เมื่อให้ } \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน Γ จะมีค่าเท่ากับพารามิเตอร์ S_{11} ของเมตริกซ์การกระจาย (Scattering matrix) และกรณีที่มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์แบบจะทำให้ $\Gamma = 0$ และให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่แย่ที่สุดมีค่า $\Gamma = -1$ หรือ 1 ซึ่งเหมือนกับความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ที่โหลดเมื่อมีการลัดวงจรหรือเปิดวงจรและพลังงานที่มีการสะท้อนกลับที่จุดเชื่อมต่อของสายอากาศนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่สัมพันธ์กับการแมตซ์อิมพีแดนซ์โดยพลังงานของช่วงเวลาเฉลี่ยเป็นการวัดไปยังสายส่งตามปกติที่มีอิทธิพลกับค่าพลังงานเฉลี่ยสุทธิที่ส่งไปยังโหลดและพลังงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ

$$P_{ave}^i = \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} \quad (2.4)$$

โดยพลังงานที่สะท้อนกลับเป็นสัดส่วนกับพลังงานที่เกิดขึ้นโดยคูณกับตัวประกอบของ $|\Gamma|^2$ แสดงได้ดังสมการ

$$P_{ave}^r = -|\Gamma|^2 \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} \quad (2.5)$$

และค่าพลังงานเฉลี่ยสุทธิที่ส่งไปยังโหลดจะเป็นผลรวมของพลังงานที่เกิดขึ้นและพลังงานเฉลี่ยที่สะท้อนกลับดังสมการ

$$P_{ave} = \frac{|V_o^+|^2}{2Z_0} [1 - |\Gamma|^2] \quad (2.6)$$

เนื่องจากพลังงานที่ส่งไปยังโหลดเป็นสัดส่วนกับ $(1 - |\Gamma|^2)$ โดยค่าที่สามารถยอมรับได้ของ Γ เพียงแค่ 10% เท่านั้นจึงจะสามารถคำนวณค่าพลังงานที่สะท้อนกลับได้และส่งผลให้ Γ มีค่าเท่ากับ 0.3162 เมื่อโหลดไม่แมตช์กับสายส่งแล้วจะเกิดการสะท้อนกลับจากโหลดไปยังแหล่งจ่ายซึ่งเกิดเป็นคลื่นนิ่งในสายส่งโดยการวัดค่า VSWR นั้นเป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งกับแอมพลิจูดต่ำสุดของคลื่นนิ่งโดยค่าที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนคลื่นนิ่งคือมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.0 โดยค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.7)$$

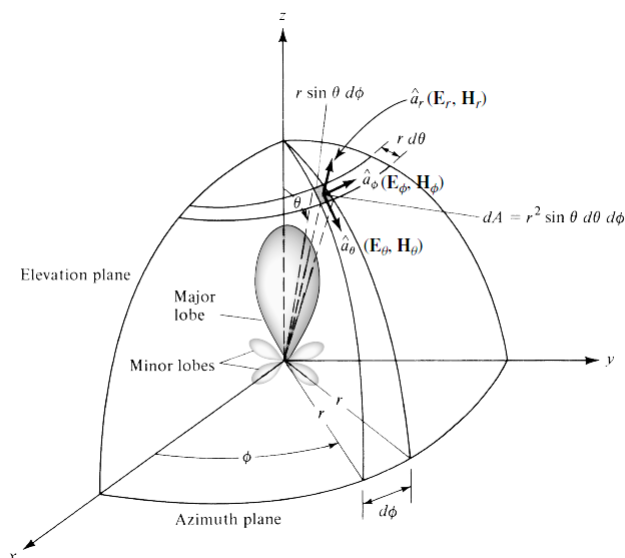
ต่อไปเป็นการพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศซึ่งเป็นการวัดคุณลักษณะของการแมตช์อิมพีแดนซ์อีกแบบหนึ่งโดยมีความสัมพันธ์เหมือนกับค่าของ Γ หรือค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งโดยค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศคำนวณได้จากสมการ

$$Return\ loss = -10 \log |S_{11}|^2 = -20 \log (|\Gamma|) \quad (2.8)$$

เนื่องจากการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ดีนั้นเป็นการบ่งบอกถึงค่าการสูญเสียย้อนกลับต้องน้อยกว่า -10 dB ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศที่ดีนั้นจำเป็นต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่า 0.3162 มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งน้อยกว่า 2 และมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB

2.1.2 แบบรูปการแผ่พลังงาน คุณลักษณะสำคัญอีกประการหนึ่งที่จำเป็นสำหรับการอธิบายคุณลักษณะของทิศทางการแผ่พลังงานของสายอากาศรูปแบบต่างๆ เนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศคือลักษณะที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติการแผ่พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวสายอากาศ จะเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงระยะทาง (Space coordinates function) ของค่าความแรงของสนาม (Field strength) เฟส (Phase) หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) คุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงคุณสมบัติของสายอากาศในรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในพิกัดสามมิติ โดยมีวิธีคิดที่ซึ่งมีการใช้เส้นกราฟเพื่อแสดงพลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่โดยมีชื่อเรียกว่าแบบรูปพลังงาน (Power pattern) ของสายอากาศและรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของ

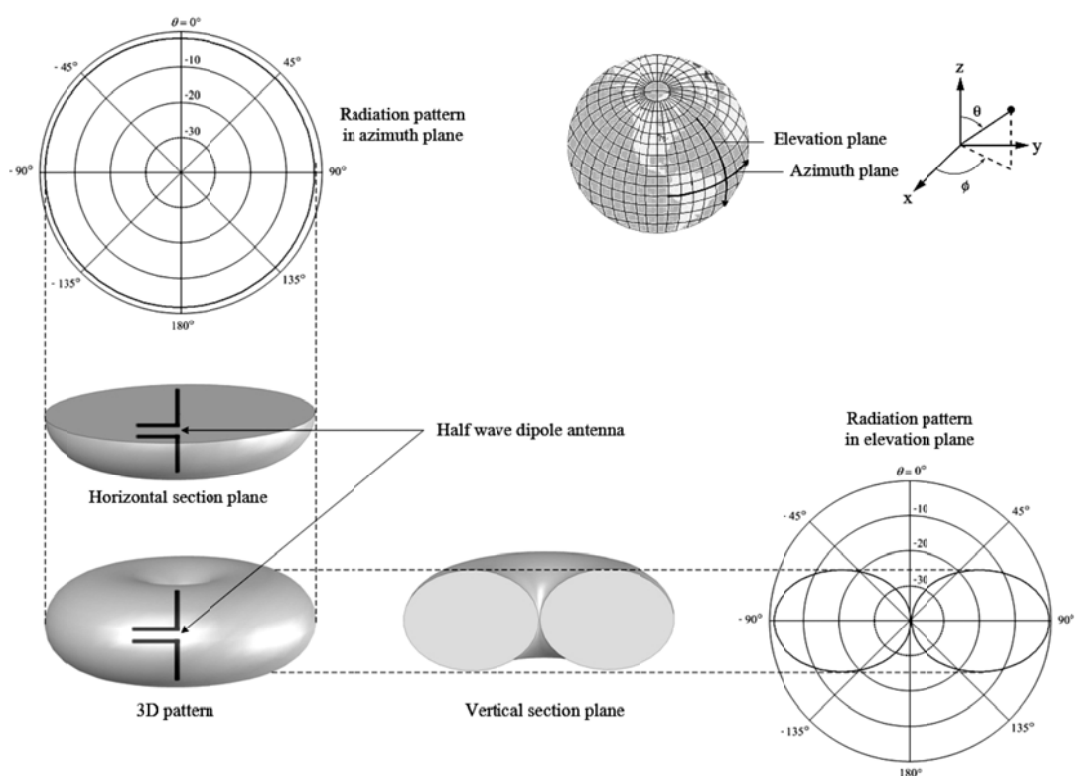
สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่มีชื่อเรียกว่าแบบรูปสนาม (Field pattern) ของสายอากาศโดยระบบพิกัดที่นิยมนำมาใช้สำหรับการแสดงคุณสมบัติของการแผ่พลังงานของคลื่นนั้นจะนิยมพิจารณาในพิกัดทรงกลมเนื่องจากแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในสามมิติเป็นการวัดในระบบของพิกัดทรงกลมซึ่งเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มการแผ่กระจายพลังงานในสนามระยะไกลที่ล้อมรอบสายอากาศในลักษณะที่เป็นทรงกลมโดยในระบบพิกัดของทรงกลมระนาบ XZ (ทำการวัดโดยเปลี่ยนแปลง θ เมื่อ $\phi = 0^\circ$) เป็นการใช้บ่งบอกถึงระนาบมุมเงย ส่วนระนาบ XY (ทำการวัดโดยเปลี่ยนแปลง ϕ เมื่อ $\theta = 90^\circ$) เป็นการใช้บ่งบอกถึงระนาบมุมทิศ (Azimuth plane) โดยในระนาบของมุมเงย (Elevation plane) นั้นจะมีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าอยู่ (E-plane) และมีทิศทางของการแผ่กระจายพลังงานสูงสุดส่วนในระนาบของมุมทิศ (Azimuth plane) นั้นจะมีเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กอยู่ (H-plane) และมีทิศทางของการแผ่กระจายพลังงานสูงสุดซึ่งแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานทั้งสองระนาบนั้นเป็นการพล็อตในเชิงขั้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่า θ หรือ ϕ และคงที่ค่า ϕ และ θ ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดทรงกลมที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแผ่พลังงานของสายอากาศ[1]

ซึ่งการวิเคราะห์คุณลักษณะในเชิงขั้วของสายอากาศเป็นการแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยให้ระนาบมุมทิศ (Azimuth plane) คงที่และทำการเปลี่ยนแปลงในระนาบของมุมเงย (เปลี่ยนแปลงค่า θ) ซึ่งสัมพันธ์กับระนาบสนามไฟฟ้าส่วนการแสดงผลแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศโดยให้ระนาบของมุมเงยคงที่ที่มีการแผ่กระจายพลังงานสูงสุดนั้นคือ $\theta = 90^\circ$ และทำการเปลี่ยนแปลงในระนาบของมุมทิศ (Azimuth plane) (เปลี่ยนแปลงค่า ϕ) ซึ่งสัมพันธ์กับระนาบสนามแม่เหล็กโดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

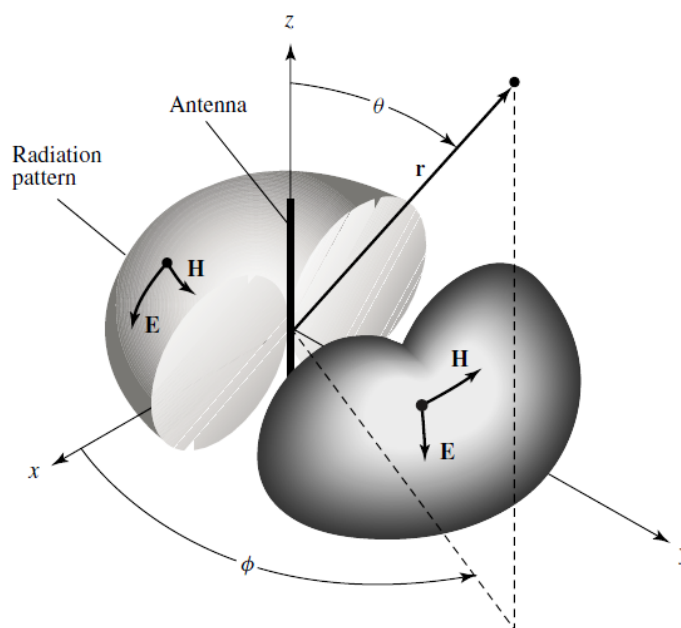
ไดโพลแบบครึ่งคลื่นในระนาบสามมิติและแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสองมิติโดยเปลี่ยนแปลงค่า θ โดยให้ $\phi = 0^\circ$ และเปลี่ยนแปลงค่า ϕ โดยให้ $\theta = 90^\circ$ ตามลำดับซึ่งเมื่อมีการพิจารณาร่วมกันทั้งในระนาบสามมิติและระนาบสองมิติแล้วจะทำให้เข้าใจมากยิ่งขึ้นและพบว่าแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานสูงสุดอยู่ที่ $\theta = 90^\circ$ สำหรับทุกๆ การเปลี่ยนแปลงค่า ϕ ในระนาบของมุมระนาบแนวราบ (Azimuth plane) และค่าที่เป็นศูนย์ของแบบรูปการแผ่พลังงานอยู่ในส่วนปลายของสายอากาศไดโพล ตามแนวแกน Z (หรือที่ $\theta = 90^\circ$ และ 180°)



รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น[1]

ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบ่งออกเป็นสามลักษณะคือสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานแบบไอโซทรอปิก (Isotropic radiator) สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง (Directional antenna) และแบบสุดท้ายคือแบบรอบทิศทาง (Omi-directional) โดยสายอากาศแบบไอโซทรอปิกคือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้นทางอุดมคติมีคุณสมบัติของการแผ่พลังงานของคลื่นเท่ากันในทุกทิศทางยกตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดแบบจุด (Point source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างจริงได้ แต่มักใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศที่สร้างจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติแสดงทิศทางของสายอากาศ ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือสายอากาศ

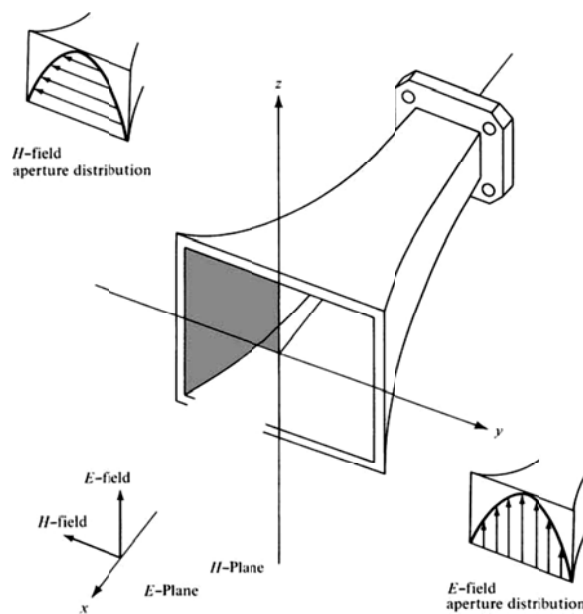
แบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omni-directional antenna) คือสายอากาศแบบไดโพลความยาวครึ่งคลื่นเนื่องจากในความเป็นจริงแล้วสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียว (Omni-directional pattern) โดยมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ ในที่นี้คือมุมระนาบแนวราบ (Azimuth) นั้นเองและระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานเป็นแบบมีทิศทางซึ่งคือระนาบแนวตั้ง (Elevation plane) โดยคุณสมบัติของการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว[1]

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบนี้ไม่มีทิศทางในระนาบแนวราบ (Azimuth plane) แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบแนวตั้ง (Elevation plane) แบบรูปสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวนี้นี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปสายอากาศแบบมีทิศทาง ส่วนสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบมีทิศทาง (Directional antenna) นั้นจะมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นหลัก (Principal pattern) ในเทอมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น เช่นสายอากาศโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linearly polarization) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและมีทิศทางของการแผ่พลังงานของคลื่นสนามไฟฟ้าที่แรงที่สุดส่วนแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบแม่เหล็กจะเป็นระนาบที่บรรจุ

เวกเตอร์สนามแม่เหล็กและมีทิศทางของการแผ่พลังงานของคลื่นสนามแม่เหล็กที่แรงที่สุดตัวอย่าง การแสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นหลักโดยมีระนาบ XZ (ระนาบแนวราบ $\theta = \pi/2$) หรือระนาบ สนามไฟฟ้าเป็นหลักดังแสดงในรูปที่ 2.4

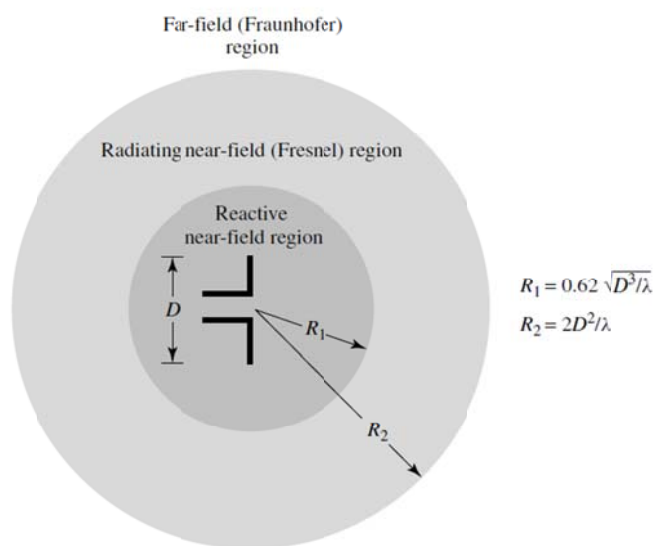


รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางโดยมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นหลักในระนาบ สนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร[1]

โดยแบบรูปการแผ่พลังงานนี้เป็นตัวบ่งบอกสำหรับการเลือกสายอากาศไปประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเช่นการประยุกต์ใช้กับดาวเทียมหรือการเชื่อมต่อสำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างจุดจะต้อง เลือกใช้สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานไปในทิศทางที่เจาะจง รู้ตำแหน่งที่แน่นอนส่วนการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์จะต้องใช้สายอากาศที่มีแบบ รูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวเป็นต้น ดังนั้นการแผ่พลังงานจะต้องแพร่กระจายออกอย่างสม่ำเสมอ โดยรอบของผู้ใช้ที่เหมาะสมที่สุดโดยมีมาตรฐานที่ยอมรับกันเป็นสากลซึ่งสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์นานาชาติ (The Institute of Electrical and Electronics Engineers : IEEE) ได้กำหนดในส่วนของแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศไว้เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ หรือกราฟที่เป็นการแสดงถึงคุณสมบัติการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิง ตำแหน่ง

2.1.3 บริเวณสนาม ถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณคือบริเวณแรกเป็นสนามระยะใกล้รีแอกทีฟ (Reactive near field region) เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด โดยบริเวณนี้จะ

มีระยะทางคือ $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ จากผิวของสายอากาศเมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นและ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ บริเวณที่สองเป็นสนามระยะใกล้ที่มีการแผ่ (Radiating near field region) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณสนามระยะใกล้รีแอคทีฟแอกทีฟที่พากับบริเวณแผ่พลังงานสนามระยะใกล้โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่และการกระจายของสนามตามมุมต่างๆ จะแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ ซึ่งถ้าขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นสนามบริเวณนี้จะไม่เกิดขึ้นและในบริเวณนี้จะมีระยะเท่ากับ $0.62\sqrt{D^3/\lambda} < R < 2D^2/\lambda$ สุบริเวณสนามสุดท้ายคือบริเวณสนามระยะไกล (Far field region) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่มีการกระจายของสนามเชิงมุมไม่ขึ้นกับระยะทางที่ห่างออกมาจากตัวสายอากาศ โดยถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่สุดเท่ากับ D บริเวณแผ่พลังงานสนามไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง $R > 2D^2/\lambda$ นับจากตัวสายอากาศซึ่งบริเวณสนามสำหรับการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานส่วนใหญ่นั้นจะต้องกระทำในสนามระยะไกลและเป็นการอธิบายถึงลักษณะฟังก์ชันของพิกัดเชิงทิศทางเสมอซึ่งคุณลักษณะการแผ่กระจายพลังงานประกอบด้วยความหนาแน่นของเส้นแรงกำลัง (Power flux density) ความหนาแน่นของพลังงานที่แผ่กระจาย (Radiation power density) ความเข้มของสนาม (Field intensity) สรุปลักษณะทิศทาง (Directivity) เฟสของการขึ้นนำ (Directivity phase) หรือการแยกขั้วคลื่น (Polarization) โดยบริเวณสนามของสายอากาศทั้ง 3 บริเวณนั้นแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บริเวณสนามทั้ง 3 บริเวณของสายอากาศ[1]

2.1.4 อัตราขยาย การวัดอัตราขยายของสายอากาศเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับการวัดสภาพเจาะจงทิศทางตลอดจนประสิทธิภาพการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศโดยอัตราขยายจริง

ของสายอากาศเป็นอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายพลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ต่อความเข้มของการแผ่กระจายพลังงานที่ได้รับ โดยถ้าพลังงานที่รับเข้ามาโดยสายอากาศนั้นมีการแผ่กระจายพลังงานในลักษณะของไอโซทรอปิกแล้วความเข้มของการแผ่กระจายพลังงานในลักษณะนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานที่สายอากาศรับเข้ามาที่ขั้วอินพุตหารด้วย 4π ส่วนอัตราขยายสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของอัตราขยายพลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายพลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบ ในทิศทางนั้นซึ่งพลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัวโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบนั้นจะเป็นสายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสียดังนั้นจะได้ดังสมการ

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{i(isotropic\ source)}} \quad (2.9)$$

2.1.5 ความกว้างแถบ ความกว้างแถบของสายอากาศ (Bandwidth) คือย่านของความถี่ที่ยังอยู่ในสภาวะที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้โดยความกว้างแถบจะพิจารณาจากช่วงระหว่างความถี่ที่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่กลาง ซึ่งสภาวะการทำงานของสายอากาศที่ยอมรับได้นั้นจะต้องสามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่นั้นในกรณีที่เป็นสายอากาศแถบกว้างความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้และในกรณีที่เป็นสายอากาศแถบแคบความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ของผลต่างความถี่เมื่อเทียบกับความถี่กลางของความกว้างแถบและเนื่องจากคุณลักษณะของสายอากาศที่ถูกใช้ในการพิจารณาความกว้างแถบไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงหรือมีผลต่อความถี่เหมือนกันจึงไม่มีการกำหนดคุณลักษณะเฉพาะเพื่อใช้ในการหาความกว้างแถบของสายอากาศ ดังนั้นวิธีการกำหนดความกว้างแถบจึงมักจะแบ่งตามกลุ่มของคุณลักษณะต่างๆที่ใช้ในการพิจารณาคือความกว้างแถบจากแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งเป็นความกว้างแถบที่พิจารณาจากระดับของโวลต์ด้านข้างความถี่ลำคลื่นการแยกขั้วคลื่นและทิศทางของลำคลื่นส่วนความกว้างแถบจากค่าอิมพีแดนซ์เป็นความกว้างแถบที่พิจารณาจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์และค่าประสิทธิรูปของการแผ่กระจายพลังงาน

2.2 คลื่น [2]

คลื่นหมายถึง ลักษณะของการถูกรบกวน ที่มีการแผ่กระจายเคลื่อนที่ออกไป ในลักษณะของการกวัดแกว่ง หรือกระเพื่อมและมักจะมีการส่งถ่ายพลังงานไปด้วย คลื่นเชิงกลซึ่งเกิดขึ้นในตัวกลาง (ซึ่งเมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูป จะมีความแรงยืดหยุ่นในการติดตัวกลับ) จะเดินทางและส่งผ่านพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในตัวกลางโดยไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตำแหน่งอย่างถาวรของอนุภาค

ตัวกลางคือไม่มีการส่งถ่ายอนุภาคนั่นเอง แต่จะมีการเคลื่อนที่กวัดแกว่ง (Oscillation) ไปกลับของอนุภาค อย่างไรก็ตามสำหรับการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแผ่รังสีแรงดึงดูดนั้นสามารถเดินทางในสุญญากาศได้ โดยไม่ต้องมีตัวกลาง

ลักษณะของคลื่นนั้นจะระบุจากสันคลื่นหรือยอดคลื่น (ส่วนที่มีค่าสูงขึ้น) และท้องคลื่น(ส่วนที่มีค่าต่ำลง) ในลักษณะตั้งฉากกับทิศทางเดินคลื่น เรียก “คลื่นตามขวาง” (Transverse wave) หรือขนานกับทิศทางเดินคลื่น เรียก “คลื่นตามยาว” (Longitudinal wave)

2.2.1 ตัวกลางของคลื่น ตัวกลางที่คลื่นใช้ในการแผ่กระจายออก แบ่งออกเป็นประเภทได้ตามคุณลักษณะต่อไปนี้

- ตัวกลางเชิงเส้นคือมีคุณสมบัติที่ขนาดของผลรวมคลื่นที่จุดใดๆ ในตัวกลางมีขนาดเท่ากับผลบวกของขนาดของคลื่นต่างขบวนกัน

- ตัวกลางจำกัดคือตัวกลางที่มีขนาดจำกัด
- ตัวกลางเนื้อเดียวคือตัวกลางที่มีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกตำแหน่ง
- ตัวกลางไอโซทรอปิกคือตัวกลางที่มีคุณสมบัติ ไม่ขึ้นกับทิศทาง

2.2.2 คุณสมบัติของคลื่น คลื่นทุกประเภทจะมีพฤติกรรมร่วมที่เหมือนกันภายใต้สภาวะปกติ โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

- การสะท้อน (Reflection) คลื่นเปลี่ยนทิศทางโดยการสะท้อนเมื่อตกกระทบพื้นผิว
- การหักเห (Refraction) คลื่นเปลี่ยนทิศทางเมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง
- การเลี้ยวเบน (Diffraction) คลื่นเคลื่อนที่ขยายวงออกเรื่อยๆ เช่น ลำคลื่นที่วิ่งผ่านออกจากช่องแคบๆ จะมีลักษณะขยายขนาดลำออก
- การแทรกสอด (Interference) เกิดจากการซ้อนทับกันของคลื่น เมื่อวิ่งมาตัดกัน
- การกระจาย (Dispersion) องค์ประกอบที่ความถี่ต่างกันของคลื่นจะมีการแยกตัวออกห่างจากกัน

- การแผ่เชิงเส้นตรง (Rectilinear propagation) การเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นเส้นตรง

2.2.3 ลักษณะทางกายภาพของคลื่น ค่าที่ใช้ในการระบุรูปร่างของคลื่น คือความถี่ความยาวคลื่นแอมพลิจูดคาบแอมพลิจูดนั้นวัดจากขนาด ของการรบกวนตัวกลาง ที่มากที่สุด ในช่วงหนึ่งคาบ โดยมีหน่วยของการวัดขึ้นกับประเภทของคลื่น เช่นคลื่นในเส้นเชือกมีหน่วยการวัดเป็นระยะทาง (เช่น เมตร) ส่วนคลื่นเสียงมีหน่วยการวัดเป็นความดัน (เช่น ปาสกาล) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยการวัดเป็น ค่าตามขนาดสนามไฟฟ้า (โวลต์/เมตร) ค่าแอมพลิจูดนั้นอาจมีค่าเป็นคงที่เรียกคลื่นประเภทนี้ว่าคลื่นต่อเนื่อง (Continuous Wave : CW) หรือ อาจมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา และ ตำแหน่ง

(หากคลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศทาง Z) การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด เรียกว่าซอง (Envelope) ของคลื่น

คาบเวลา เป็นช่วงเวลาที่คลื่นใช้ในการวนครบรอบในการกวัดแกว่ง ความถี่ คือจำนวนรอบที่คลื่นกวัดแกว่งครบรอบ ในหนึ่งหน่วยเวลา (เช่น ใน 1 วินาที) และมีหน่วยของการวัดเป็นเฮิรตซ์โดยมีความสัมพันธ์

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.10)$$

บางครั้งสมการทางคณิตศาสตร์ของคลื่นอาจอยู่ในรูปของความถี่เชิงมุม (Angular frequency) นิยมใช้สัญลักษณ์ ω และมีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที และมีความสัมพันธ์กับ f ดังต่อไปนี้

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.11)$$

2.2.4 สมการคลื่น สมการคลื่นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยใช้จำลองพฤติกรรมของคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลาง สมการคลื่นมีหลายรูปแบบขึ้นกับลักษณะการส่งผ่านของคลื่น และคุณสมบัติของตัวกลาง ตัวคลื่นก็มีรูปร่างหลากหลายไม่จำเป็นจะต้องเป็นคลื่นรูปไซน์เสมอไปคำตอบในรูปทั่วไป คือ

$$\phi(x,t) = F(x - ct) + G(x + ct) \quad (2.12)$$

หมายถึงรูปร่างของคลื่น 2 ลูก โดยที่ F เคลื่อนที่ไปในทิศทาง $+X$ และ G เคลื่อนที่ไปในทิศทาง $-X$ นอกจากสมการคลื่น ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีสมการคลื่นชนิดอื่น ๆ รวมถึงสมการไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ด้วย เช่นสมการชเรอดิงเงอร์ (Schrödinger equation) ซึ่งใช้ในการจำลองพฤติกรรมเชิงคลื่นของอนุภาคในกลศาสตร์ควอนตัมโดยมีคำตอบของสมการเป็นฟังก์ชันคลื่น ที่บ่งบอกถึงความน่าจะเป็นของอนุภาค

ตัวอย่างของคลื่น

- คลื่นเชิงกลได้แก่ คลื่นทะเล (Ocean surface wave) หรือ คลื่นผิวทะเล เสียงคลื่นบนสายเครื่องดนตรี (Vibrating string)

- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ได้แก่ แสงที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า (Visible light) คลื่นวิทยุ (Radio waves) รังสีเอ็กซ์ (X-ray) รังสีแกมมา (Gamma ray) รังสีเหนือม่วงหรือที่เรียกรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet ray) รังสีอินฟราเรด (Infrared ray) และ

- คลื่นสนามแรงโน้มถ่วง (Gravitational wave) (ต่างจากคลื่นจากแรงโน้มถ่วง (Gravity wave) ซึ่งเป็นคลื่นในของไหล)

2.2.5 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) โดยการทำให้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือถ้าสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวางประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกันและอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่อาศัยตัวกลางจึงสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้

1) สเปกตรัม (Spectrum) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่และความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ คลื่นแสงที่ตามองเห็น อัลตราไวโอเลต อินฟราเรด คลื่นวิทยุโทรทัศน์ ไมโครเวฟ รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา เป็นต้น ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงมีประโยชน์มากในการสื่อสารและโทรคมนาคม และทางการแพทย์

2) คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่
- อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดในสุญญากาศเท่ากับ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$
- เป็นคลื่นตามขวาง
- ถ่ายเทพลังงานจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง
- ถูกปล่อยออกมาและถูกดูดกลืนได้โดยสสาร
- ไม่มีประจุไฟฟ้า
- คลื่นสามารถแทรกสอด สะท้อน หักเห และเลี้ยวเบนได้

3) คลื่นวิทยุมีความถี่ ช่วง 104-109 Hz (เฮิรตซ์) ใช้ในการสื่อสารคลื่นวิทยุมีการส่งสัญญาณ 2 ระบบคือ

ระบบเอเอ็ม (Amplitude Modulation : AM) ระบบเอเอ็ม มีช่วงความถี่ 530-1600 กิโลเฮิรตซ์ สื่อสารโดยใช้คลื่นเสียงผสมเข้ากับคลื่นวิทยุเรียกว่า “คลื่นพาหะ” โดยแอมพลิจูดของคลื่นพาหะจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณคลื่นเสียง

ในการส่งคลื่นระบบ AM สามารถส่งคลื่นได้ทั้งคลื่นดินเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงขนานกับผิวโลกและคลื่นฟ้าโดยคลื่นจะไปสะท้อนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แล้วสะท้อนกลับลงมา จึงต้องใช้สายอากาศตั้งสูงรับ

ระบบเอฟเอ็ม (Frequency Modulation : FM) ระบบเอฟเอ็ม มีช่วงความถี่ 88-108 เมกะเฮิรตซ์ สื่อสารโดยใช้คลื่นเสียงผสมเข้ากับคลื่นพาหะ โดยความถี่ของคลื่นพาหะจะ

เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณคลื่นเสียงในการส่งคลื่นระบบ FM ส่งคลื่นได้เฉพาะคลื่นดินอย่างเดียว ถ้าต้องการส่งให้คลุมพื้นที่ต้องมีสถานีถ่ายทอดและเครื่องรับต้องตั้งเสาอากาศสูงๆ รับ

4) คลื่นโทรทัศน์และไมโครเวฟ คลื่นโทรทัศน์และไมโครเวฟมีความถี่ช่วง 10^8 - 10^{12} เฮิรตซ์ มีประโยชน์ในการสื่อสาร แต่จะไม่สะท้อนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แต่จะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศไปนอกโลก ในการถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์จะต้องมีสถานีถ่ายทอดเป็นระยะๆ เพราะสัญญาณเดินทางเป็นเส้นตรง และผิวโลกมีความโค้ง ดังนั้นสัญญาณจึงไปได้ไกลสุดเพียงประมาณ 80 กิโลเมตรบนผิวโลก อาจใช้ไมโครเวฟนำสัญญาณจากสถานีส่งไปยังดาวเทียมแล้วให้ดาวเทียมนำสัญญาณส่งต่อไปยังสถานีรับที่อยู่ไกล

เนื่องจากไมโครเวฟจะสะท้อนกับผิวโลหะได้ดี จึงนำไปใช้ประโยชน์ในการตรวจหาตำแหน่งของอากาศยาน เรียกว่าเรดาร์ เรดาร์ โดยส่งสัญญาณไมโครเวฟออกไปกระทบอากาศยาน และรับคลื่นที่สะท้อนกลับจากอากาศยาน ทำให้ทราบระยะห่างระหว่างอากาศยานกับแหล่งส่งสัญญาณไมโครเวฟได้

5) รังสีอินฟราเรด (Infrared rays) รังสีอินฟราเรดมีช่วงความถี่ 10^{11} - 10^{14} เฮิรตซ์ หรือความยาวคลื่นตั้งแต่ 10^{-3} - 10^{-6} เมตร ซึ่งมีช่วงความถี่คาบเกี่ยวกับไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรดสามารถใช้กับฟิล์มถ่ายภาพบางชนิดได้ และใช้เป็นการควบคุมระยะไกลหรือรีโมทคอนโทรลกับเครื่องรับโทรทัศน์ได้

6) แสง (Light) แสงมีช่วงความถี่ 10^{14} เฮิรตซ์ หรือความยาวคลื่น 4×10^{-7} - 7×10^{-7} เมตร เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประสาทตาของมนุษย์รับได้ สเปกตรัมของแสงสามารถแยกได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 สเปกตรัมของแสง

สี	ความยาวคลื่น (nm)
ม่วง	380-450
น้ำเงิน	450-500
เขียว	500-570
เหลือง	570-590
แสด	590-610
แดง	610-760

7) รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet rays) รังสีอัลตราไวโอเลต หรือ รังสีเหนือม่วง มีความถี่ช่วง 10^{15} - 10^{18} เฮิรตซ์ เป็นรังสีตามธรรมชาติส่วนใหญ่มาจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ซึ่ง

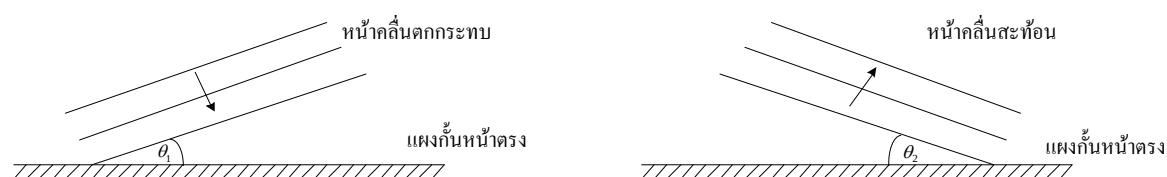
ทำให้เกิดประจุอิสระและไอออนในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถทำให้เชื้อโรคบางชนิดตายได้ แต่มีอันตรายต่อผิวหนังและดวงตาของคน

8) รังสีเอกซ์ (X-rays) รังสีเอกซ์ มีความถี่ช่วง 10^{16} - 10^{22} เฮิรตซ์ มีความยาวคลื่นระหว่าง 10^{-8} - 10^{-13} เมตร ซึ่งสามารถทะลุสิ่งกีดขวางต่างๆ ได้ หลักการสร้างรังสีเอกซ์คือ การเปลี่ยนความเร็วของอิเล็กตรอน มีประโยชน์ทางการแพทย์ในการตรวจดูความผิดปกติของอวัยวะในร่างกาย ในวงการอุตสาหกรรมใช้ในการตรวจหารอยร้าวภายในชิ้นส่วนโลหะขนาดใหญ่ ใช้ตรวจหาอาวุธปืนหรือระเบิดในกระเป๋าเดินทาง และศึกษาการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก

9) รังสีแกมมา (Gamma-rays) รังสีแกมมามีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้ามีความถี่สูงกว่ารังสีเอกซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์และสามารถกระตุ้นปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ มีอำนาจทะลุทะลวงสูง

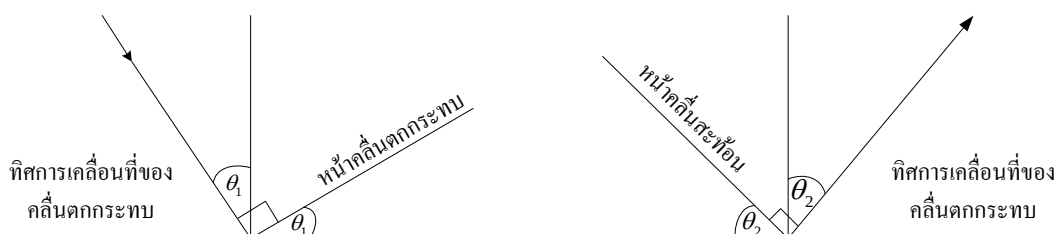
2.2.6 การสะท้อนของคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปชนกับสิ่งกีดขวางหรือเคลื่อนที่ไปยังปลายสุดของตัวกลางหรือระหว่างรอยต่อของตัวกลาง คลื่นส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่กลับมาในตัวกลางเดิม เรียกว่า การสะท้อนของคลื่น และคลื่นที่สะท้อนกลับมา เรียกว่า คลื่นสะท้อน ส่วนคลื่นที่ไปกระทบปลายสุดของตัวกลางก่อนเกิดการสะท้อนเรียกว่า คลื่นตกกระทบหลายๆ สิ่งรอบตัวเราได้ เช่น กระจกหน้าต่าง แว่นตา รถที่ขูดจนมันวับ รองเท้าบูทขูดมัน น้ำในสระ แต่การสะท้อนแสงจะดีที่สุดในการจราจร เพราะมีผิวเรียบและมันเงา

เมื่อคลื่นกระทบสิ่งกีดขวางหรือผิวสะท้อน จะเปลี่ยนทิศทางการกลับสู่ตัวกลางเดิม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การสะท้อน” (Reflection) คลื่นที่เคลื่อนที่ไปกระทบสิ่งกีดขวางเรียกว่า “คลื่นตกกระทบ” (Incident wave) ส่วนคลื่นที่สะท้อนออกมาเรียกว่า “คลื่นสะท้อน” (Reflected wave)



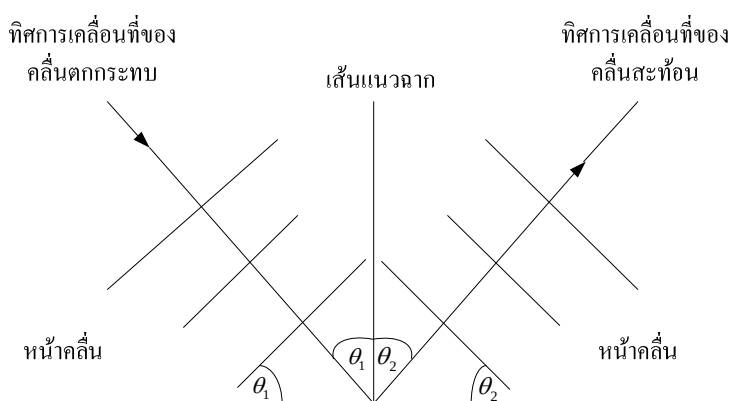
รูปที่ 2.6 มุมที่หน้าคลื่นตกกระทบและหน้าคลื่นสะท้อนทำกับแนวตั้งฉากหน้าตรง[2]

จากรูปที่ 2.6 สามารถเขียนทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนได้โดยมีทิศตั้งฉากกับหน้าคลื่นตกกระทบและหน้าคลื่นสะท้อนตามลำดับ และที่ตำแหน่งคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนลากเส้นตั้งฉากกับผิวสะท้อน ซึ่งเรียกว่า “เส้นแนวฉาก” (Normal line) ทำให้ได้มุมตกกระทบและมุมสะท้อน ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน[2]

จากรูปที่ 2.7 ถ้าเขียนทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบและทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นสะท้อนขณะเกิดการสะท้อน จะได้ลักษณะดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน[2]

เมื่อทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบ (รังสีตกกระทบ) คือแนวที่คลื่นวิ่งเข้าชนตัวสะท้อนก่อนสะท้อน ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นสะท้อน (รังสีสะท้อน) คือ แนวที่คลื่นวิ่งออกจากตัวสะท้อนหลังสะท้อน

เส้นแนวฉาก คือ เส้นที่ลากตั้งฉากกับตัวสะท้อน ณ ตำแหน่งที่คลื่นตกกระทบ

มุมตกกระทบ คือมุม θ_1 อาจวัดได้จากมุมที่หน้าคลื่นตกกระทบกับแนวตัวสะท้อน หรือมุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นแนวฉาก

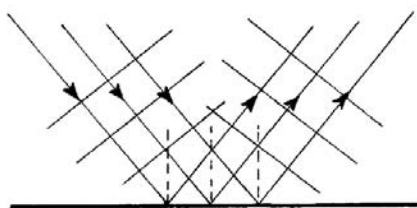
มุมสะท้อน คือมุม θ_2 อาจวัดได้จากมุมที่หน้าคลื่นสะท้อนทำกับแนวตัวสะท้อน หรือมุมที่รังสีสะท้อนทำกับเส้นแนวฉาก

ทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบ (รังสีตกกระทบ) เส้นแนวฉาก หรือเส้นปกติ และทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นสะท้อน (รังสีสะท้อน) อยู่ในระนาบเดียวกัน

1) คุณสมบัติการสะท้อนของคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปชนสิ่งกีดขวาง หรือเคลื่อนที่ไปถึงปลายสุดของตัวกลางจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนขึ้นมา คลื่นสะท้อนที่เกิดขึ้นมานั้น จะต้องมียุณหภูมิคงที่ต่อไปนี้ ความถี่ของคลื่นสะท้อนมีค่าเท่ากับความถี่ของคลื่นตกกระทบ ความเร็วและความยาวคลื่นของคลื่นสะท้อนมีค่าเท่ากับความเร็วและความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ ถ้าการสะท้อนไม่สูญเสียพลังงาน จะได้แอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนมีค่าเท่ากับแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ

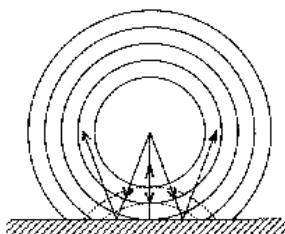
2) ลักษณะการสะท้อนของคลื่น

คลื่นหน้าตรงสะท้อนจากผิวสะท้อนเรียบตรงจะได้คลื่นสะท้อนหน้าตรง ดังรูป



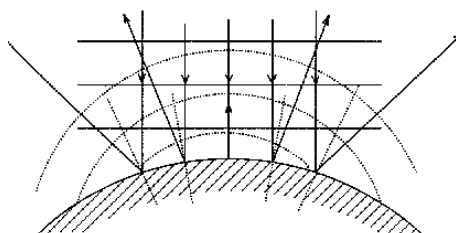
รูปที่ 2.9 การสะท้อนของคลื่นหน้าตรงจากผิวสะท้อนหน้าตัดเรียบตรง[2]

คลื่นวงกลมสะท้อนจากผิวสะท้อนเรียบตรง จะได้คลื่นสะท้อนวงกลมเสมือนมีแหล่งกำเนิดคลื่นวงกลมอยู่ด้านหลังของสิ่งกีดขวางดังรูปที่ 2.10



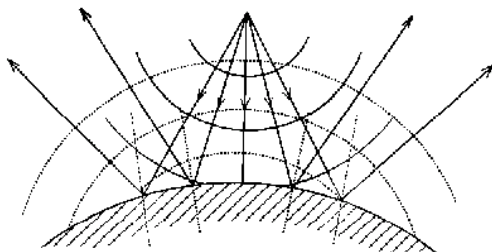
รูปที่ 2.10 การสะท้อนของคลื่นหน้าโค้งจากผิวสะท้อนเรียบตรง[2]

คลื่นนำหน้าตรงสะท้อนจากผิวสะท้อนโค้ง จะได้คลื่นสะท้อนวงกลมดังรูปที่ 2.11



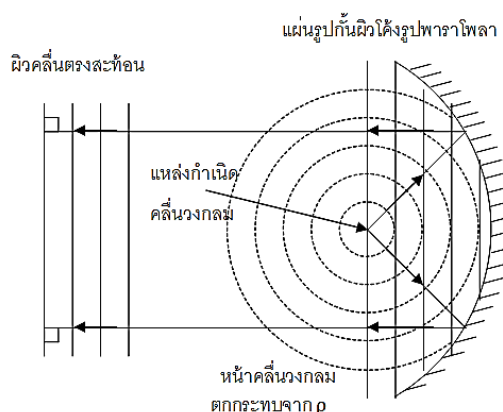
รูปที่ 2.11 การสะท้อนของคลื่นหน้าตรงจากผิวสะท้อนโค้ง[2]

คลื่นวงกลมสะท้อนจากผิวสะท้อนโค้ง จะได้คลื่นสะท้อนวงกลมดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การสะท้อนของคลื่นหน้าโค้งจากผิวสะท้อนโค้ง[2]

คลื่นวงกลมสะท้อนจากผิวโค้งรูปพาราโบลา เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ที่จุดโฟกัสของผิวโค้งรูปพาราโบลา เมื่อคลื่นตกกระทบกับส่วนผิวโค้ง จะได้คลื่นสะท้อนหน้าตรง



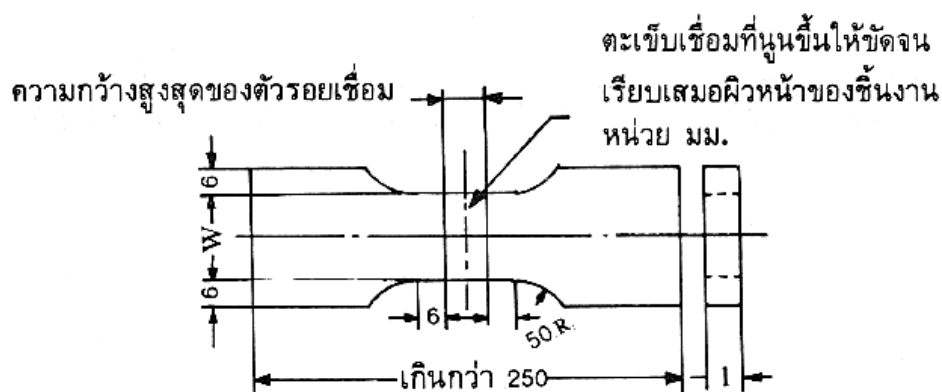
รูปที่ 2.13 การสะท้อนของคลื่นวงกลมจากผิวสะท้อนโค้งรูปพาราโบลา[2]

2.3 นิยามการทดสอบแบบไม่ทำลาย [3]

ในการตรวจหารอยบกพร่องหรือสิ่งแปลกปลอมภายในของวัสดุ อุปกรณ์หรือโครงสร้างต่างๆ ว่ามีอยู่หรือไม่นั้น การทำให้แตกหักแยกส่วนแล้วพินิจดูด้วยตาเป็นวิธีตรวจสอบที่ถูกต้องแน่นอนที่สุด ในส่วนที่กล่าวถึงต่อไปนี้เป็นตัวอย่างวิธีการทดสอบแบบทำลายที่ถูกต้องแน่นอนที่สุด ซึ่งได้แก่ 1. การทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tension Test) 2. การทดสอบความทนทานต่อการดัดโค้ง (Bending Test) 3. การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact Test) 4. การทดสอบความทนทานต่อความล้า (Fatigue Test) 5. การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) 6. การทดสอบการรับแรง (Load Test) 7. การทดสอบความทนทานต่อการแตกหักด้วยแรงดัน

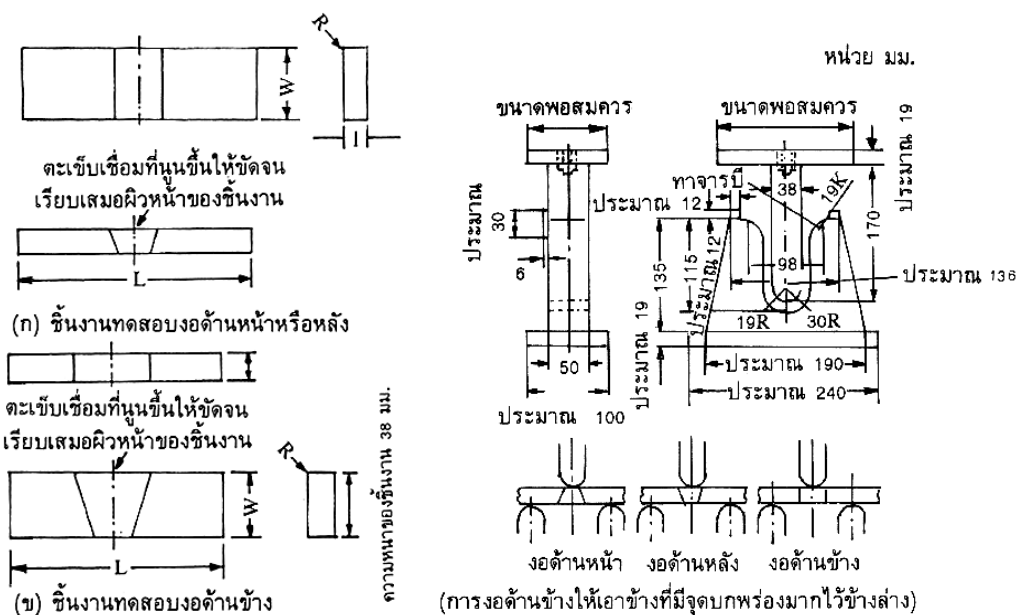
ภายใน (Breaking Test by Internal Pressure) 8. การทดสอบหาวัสดุที่ฝังตัวอยู่ในวัสดุหลักด้วยการแยกส่วน

แต่ทว่าการทดสอบโดยการทำลายดังกล่าวนั้น จะทำให้วัสดุ อุปกรณ์ หรือโครงสร้างเกิดการแตกหักเสียหายใช้งานอีกไม่ได้ ยกตัวอย่างเช่น กรณีของผลิตภัณฑ์ของโรงงานผลิตเหล็กและเหล็กกล้าซึ่งทำผลิตภัณฑ์รูปร่างและขนาดเป็นแบบเดียวกัน โดยวิธีการผลิตแบบเดียวกัน (หล่อ, อัด, รีด, เชื่อม เป็นต้น) เป็นจำนวนมากจะใช้วิธีสุ่มตัวอย่างจากผลิตภัณฑ์แต่ละชุด (ในวิธีสุ่มตัวอย่าง จะเรียกชุดของผลิตภัณฑ์ว่า lot) มาทำการทดสอบแบบทำลาย และประเมินค่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ทั้งจำนวนได้ (ดังรูปที่ 2.14 ถึง 2.17) ในทางกลับกันตัวอย่างในกรณีของผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมหนัก ซึ่งผลิตทีละจำนวนน้อยหรือเพียงชิ้นเดียว ถ้านำมาทดสอบแบบทำลายแล้ว ก็จะไม่มีความปลอดภัยที่จะส่งมอบแก่ลูกค้าได้ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ชิ้นนี้ ก็จะไปทดสอบแบบทำลายไม่ได้ จึงอาศัยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายในการประเมินรอยบกพร่อง หรือความแข็งแรงของวัสดุ อุปกรณ์หรือโครงสร้างแทนการทดสอบแบบทำลาย



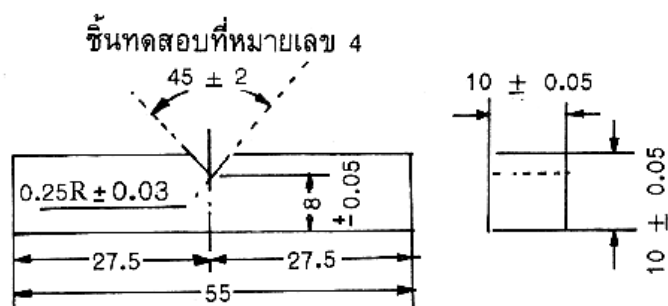
รูปที่ 2.14 ชิ้นงานทดสอบความทนทานต่อแรงดึงของรอยเชื่อมประสาน[3]

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing: NDT) ซึ่งสมาคมวิศวกรรมเครื่องกลของอเมริกา (ASME) จะเรียกว่าการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Examination: NDE) นั้นกล่าวง่ายๆ ก็คือ เป็นการทดสอบวัสดุชิ้นงานโดยไม่ทำลายให้เสียหายนั่นเอง กล่าวคือ เป็นการทดสอบชิ้นงานที่เหมือนกับวัสดุ อุปกรณ์ หรือโครงสร้าง (ต่อไปจะเรียกว่าชิ้นทดสอบ) โดยไม่ก่อให้เกิดรอยขีดข่วน การแยกส่วนหรือการแตกหักเสียหาย กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือการตรวจสอบลักษณะสมบัติ สมรรถภาพ โครงสร้างภายในหรือรอยบกพร่องภายในโดยไม่ทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด หรือสมรรถนะ



รูปที่ 2.15 ชิ้นงานทดสอบบงอด้านข้าง[3] รูปที่ 2.16 วิธีการทดสอบความทนทานต่อการดัดงอ[3]

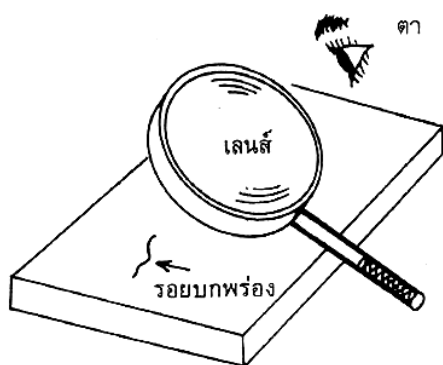
ในการนี้จะใช้ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของชิ้นทดสอบ เช่น แสง ความร้อน รั้งสี คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic) ไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความผิดปกติของโครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่มีอยู่ แล้วใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายวัดลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์เหล่านี้ เพื่อประเมินความผิดปกติของโครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่อยู่ได้



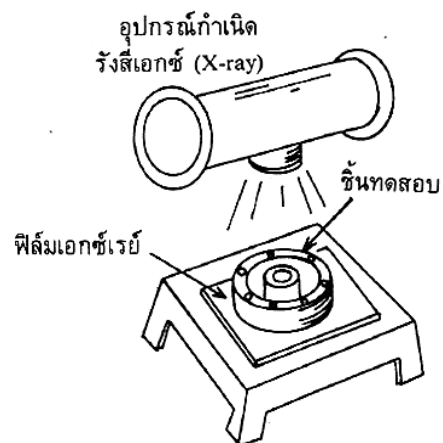
รูปที่ 2.17 ชิ้นงานทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก V-Charpy [3]

ในวิธีการทดสอบนั้นไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทดสอบเลยก็ได้ วิธีที่เร็วที่สุด ประหยัดที่สุด และยังมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือการตรวจสอบด้วยสายตาเป็นขั้นตอนเริ่มแรก จากนั้นก็มีการตรวจสอบโดยใช้รังสี การตรวจสอบรอยบกพร่องโดยใช้อัลตราโซนิก การตรวจสอบรอยบกพร่อง

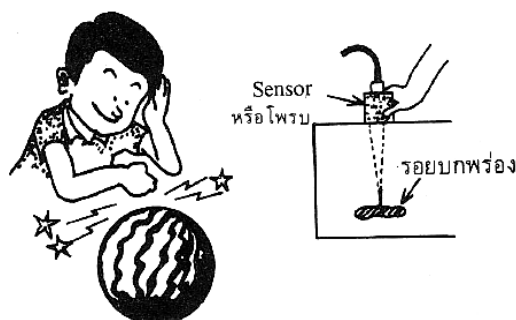
ด้วยผงแม่เหล็ก การตรวจสอบรอยบกพร่องโดยใช้รังสี การตรวจสอบโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นการใช้อุปกรณ์ต่างๆ เข้ามาช่วยดังรูปที่ 2.18 – 2.21



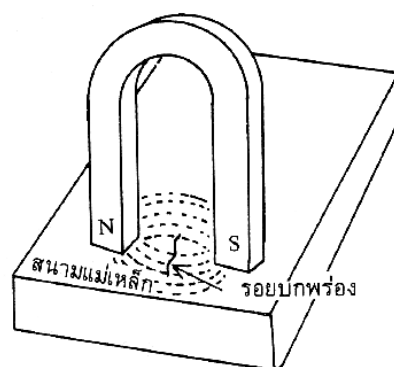
รูปที่ 2.18 การตรวจสอบด้วยสายตา[3]



รูปที่ 2.19 การตรวจสอบด้วยรังสี[3]

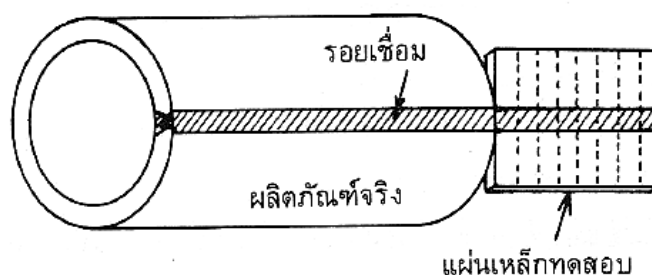


รูปที่ 2.20 การตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยอัลตราโซนิก[3]



รูปที่ 2.21 การตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยผงแม่เหล็ก[3]

ที่กล่าวมาข้างต้นว่า การทดสอบแบบไม่ทำลายนั้นใช้แทนการทดสอบแบบทำลายได้ไม่ได้หมายความว่าเมื่อทำการทดสอบแบบไม่ทำลายได้แล้วการทดสอบแบบทำลายจะกลายเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็นไป การทดสอบแบบไม่ทำลายนั้นเป็นการใช้ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของชิ้นงานทดสอบในการประเมินระดับของรอยบกพร่อง หรือความแข็งแรง ทว่า ข้อมูลของการทดสอบแบบทำลายก็เป็นส่วนประกอบที่จำเป็นเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การเชื่อมแผ่นเหล็กทดสอบโดยวิธีการเชื่อมโครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง แล้วใช้การทดสอบแบบทำลายกับแผ่นเหล็กทดสอบ (ซึ่งเรียกว่า Test Plate Testing) ดังแสดงรูปที่ 2.22 เพื่อเป็นการประเมินความแข็งแรงของรอยเชื่อมและเป็นการประกันความปลอดภัยของรอยเชื่อม เป็นตัวอย่างหนึ่งของการทดสอบแบบทำลายชิ้นงานทดสอบที่ใช้ประกอบกับการทดสอบแบบไม่ทำลายผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.22 การทดสอบรอยเชื่อม [3]

2.4 การทดสอบสิ่งก่อสร้างคอนกรีต [3]

2.4.1 บทนำ

เมื่อประมาณ 110 ปีก่อน ชาวฝรั่งเศสชื่อ เจ. โมนิเอลได้คิดค้นทำกระถางต้นไม้ด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากนั้นเป็นต้นมา คอนกรีตก็เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายจนกระทั่งทุกวันนี้ เพราะราคาถูก ใช้งานได้สะดวกนอกจากนี้ยังเชื่อกันว่ามีอายุทนทาน ใช้งานได้ยาวนานแต่ทว่าในปัจจุบันได้เกิดสนิมที่เหล็กเสริมในคอนกรีต และเกิดรอยแตกร้าว ซึ่งทำให้สิ่งก่อสร้างคอนกรีตมีการเสื่อมสภาพมากขึ้น จึงทำให้บรรดางานก่อสร้างเริ่มขาดความเชื่อถือคอนกรีตและเกรงว่าวัสดุคอนกรีตที่นิยมใช้มาตลอด อาจสร้างปัญหาใหญ่ต่อไปในอนาคต โดยปกติสิ่งก่อสร้างที่ทำด้วยไม้หรือโลหะ ถ้าบริเวณใดเสื่อมสภาพก็สามารถทำการซ่อมแซมได้โดยง่ายแต่สิ่งก่อสร้างทำด้วยคอนกรีต การซ่อมแซมโดยคำนึงถึงความแข็งแรงอย่างสมบูรณ์นั้นกระทำได้ยากลำบากดังนั้นจึงจำเป็นต้องระมัดระวังอย่างรอบคอบในเวลาก่อนสร้างสิ่งก่อสร้างที่ทำด้วยคอนกรีต และถ้าสามารถตรวจพบการเสื่อมสภาพขณะที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย และทำการซ่อมแซมอย่างถูกต้องแล้วก็จะสามารถยืดอายุการใช้งานต่อไปได้อีก

2.4.2 ลักษณะการเสื่อมสภาพของสิ่งก่อสร้างทำด้วยคอนกรีตที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

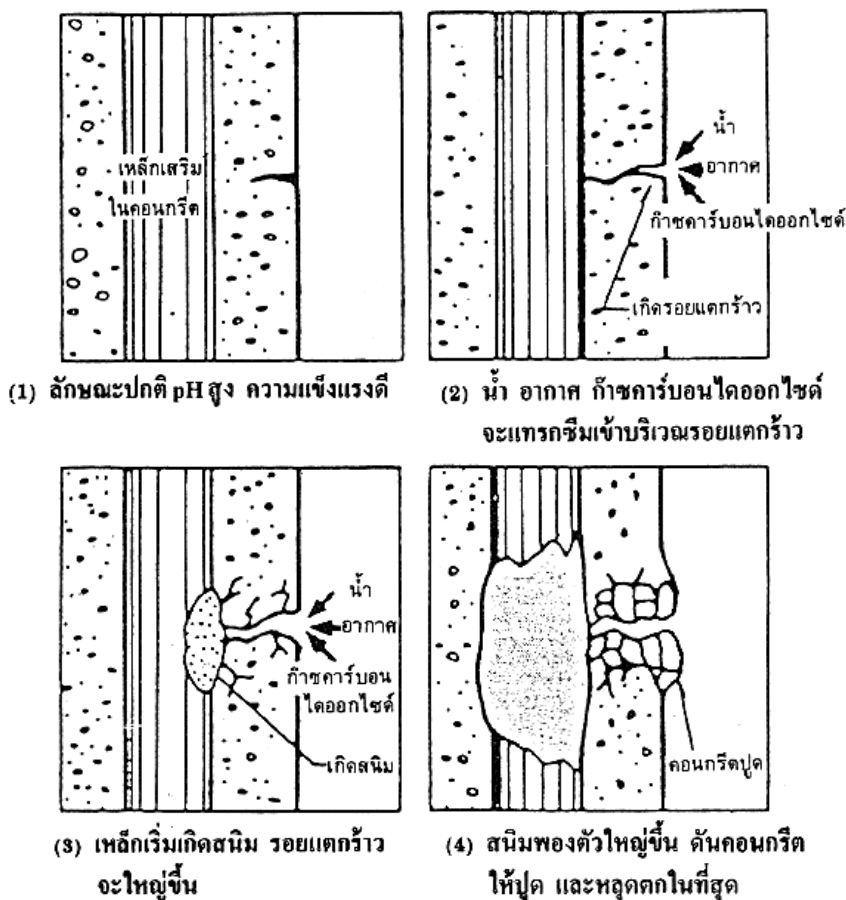
ลักษณะการเสื่อมสภาพในขั้นแรกของสิ่งก่อสร้างทำด้วยคอนกรีตสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ การกัดกร่อนของเกลือ (Salinity) ที่มีพอเหลือเสริมความแข็งแรงและปฏิกิริยาของวัสดุที่เป็นส่วนผสมที่ทำกับด่าง (Alkali-Aggregate Reaction) ซึ่งทั้งสองล้วนเป็นปรากฏการณ์การทำลายตัวเองของคอนกรีต ในประเภทแรกยังสามารถแยกสาเหตุออกเป็นเกลือที่เกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุที่ผสมในคอนกรีตตอนเป็นเกลือทะเลและการซึมของเกลือจากภายนอกเช่น จากการกระเซ็นแปดเปื้อนของน้ำทะเลหรือจากการใช้สารป้องกันการแข็งตัวของน้ำ

1. พืชของเกลือ คอนกรีตเป็นส่วนผสมของซีเมนต์ ทราย วัสดุผสม (Aggregate) และน้ำเดิมที่ ทรายนั่นมักจะใช้ทรายที่ขุดจากแม่น้ำ แต่ทว่าหลังปี 1960 ทรายจากแม่น้ำเริ่มลดน้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บริเวณพื้นที่ทางตะวันตกของเมืองโอซาก้ามีการใช้ทรายทะเลมากขึ้น ถ.พ. ของทรายทะเลจะต่ำกว่าทรายแม่น้ำ และในทรายทะเลจะมีเกลืออยู่มากเพราะอยู่ในทะเลเป็นเวลานาน การกำจัดเกลือในทรายทะเลอาจทำได้โดยการฉีดน้ำล้างด้วยหัวฉีด (Sprinkler) แต่ก็ยังไม่สามารถกำจัดเกลือได้หมดอยู่นั่นเอง เกลือดังกล่าว จะเป็นต้นเหตุของการเสื่อมสภาพเช่น ทำให้เหล็กในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อนเป็นสนิม หรือ เกิดรอยแตกร้าว เป็นต้น แหล่งที่มาของเกลืออีกประการหนึ่งคือ สารเติม (Admixture) ตัวอย่างเช่น แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride) เป็นสารที่ช่วยเร่งให้คอนกรีตแข็งตัวเร็ว (Accelerator) ใช้ในงานก่อสร้างคอนกรีตในฤดูที่มีความหนาวเย็นมาก ปริมาณที่ใช้ประมาณ 1 ~ 2% ของปริมาณซีเมนต์ แต่เมื่อคิดถึงปริมาณไอออนของคลอไรด์แล้วสูงกว่าเกลือทะเลที่ยังไม่ได้ล้างน้ำมาก

2. ปฏิกิริยาของวัสดุผสมกับด่าง (Alkali-Aggregate Reaction) ปฏิกิริยาของวัสดุที่ทำผสมกับด่าง หมายถึง ปรากฏการณ์ของการเกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีตเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุผสมบางชนิดที่ใช้กับด่างในคอนกรีต ในประเทศญี่ปุ่น ปัญหาที่เกิดขึ้นในขณะนี้คือการเกิดปฏิกิริยาของด่างกับซิลิกา ปฏิกิริยาของด่างกับซิลิกานี้เกิดจากแร่ธาตุซิลิกาในวัสดุผสมซึ่งมีความไวในการทำปฏิกิริยารวมตัวกับส่วนประกอบของด่างในซีเมนต์และสารประกอบใหม่นี้จะดูดซึมทำให้พองตัวออกมา การซ่อมบำรุงสิ่งก่อสร้างทำด้วยคอนกรีตที่กำลังเกิดการเสื่อมสภาพด้วยปฏิกิริยาวัสดุผสมกับด่างนั้นเป็นสิ่งที่กระทำได้ยาก ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีในประเทศที่พัฒนาแล้วเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา และอังกฤษ ว่าถึงแม้จะมีการซ่อมบำรุง การเสื่อมสภาพอาจจะช้าลงไปบ้าง อย่างไรก็ตาม การเสื่อมสภาพจะยังคงเกิดขึ้นอีกครั้งด้วยสาเหตุประการใดประการหนึ่ง ซึ่งพิสูจน์แล้วว่าเป็นความจริงในญี่ปุ่นเช่นเดียวกัน การเสื่อมสภาพนี้จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า มะเร็งในคอนกรีต (Cancer of Concrete)

3. การทำให้เป็นกลาง หรือคาร์บอนเนชัน (Carbonation) เนื้อคอนกรีตในเวลา ที่ก่อสร้าง จะเป็นสารประกอบของซีเมนต์ไฮดรอกไซด์พวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสภาพเป็นด่าง

แต่ (pH 12 โดยประมาณ) แต่เมื่อเวลาผ่านไป ผิวคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ ในอากาศทำให้เกิด แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งทำให้ความเป็นด่างลดน้อยลงไป เมื่อคาร์บอนเนชัน เกิดขึ้นจน pH ต่ำกว่า 9 เหล็กเสริมในคอนกรีตก็จะอยู่ในสภาวะที่เป็นสนิมง่ายเมื่อเหล็กเป็นสนิม กัดกร่อนจะพองตัวใหญ่ขึ้น จึงทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวหรือหลุดและบริเวณนี้เองน้ำ และอากาศก็จะแทรกซึมเข้าไป ทำให้การผุกร่อนทวีความรุนแรงยิ่งขึ้นผลที่สุดความแข็งแรง ทนทานของสิ่งก่อสร้างที่ทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กจะลดน้อยลงในปัจจุบันนี้มักจะพบเห็น สิ่งก่อสร้างทำด้วยคอนกรีตชนิดไมโบกปูน (Mortar) ทับดังนั้น ระยะห่างจากผิวคอนกรีตถึงเหล็ก เสริมภายใน จะน้อยลงเท่ากับความหนาของปูนที่โบกทับ ซึ่งเป็นผลให้เกิดคาร์บอนเนชันบริเวณ เหล็กเสริมเกิดขึ้นในเวลาสั้นขึ้น ความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonated Thickness) สามารถวัดได้ด้วยน้ำยาแสดงความเป็นด่างหรือ ฟีนอล์ฟธาเลิน 1% ในแอลกอฮอล์ (Phenolphthalein 1% Alcohol) โดยการฉีดยาน้ำยานี้ด้วยที่ฉีดสเปรย์บนผิวของคอนกรีตที่ ต้องการตรวจสอบ ถ้าผิวคอนกรีตมีสีแดงแสดงว่า บริเวณนั้นยังเป็นด่างอยู่ ถ้าไม่เกิดปฏิกิริยาก็ แสดงว่าบริเวณนั้นกำลังเกิดคาร์บอนเนชันขึ้นแล้ว บริเวณที่ตรวจสอบนั้นต้องใช้ค้อนทุบออกมาจึง เป็นวิธีการแบบทำลายบางส่วน



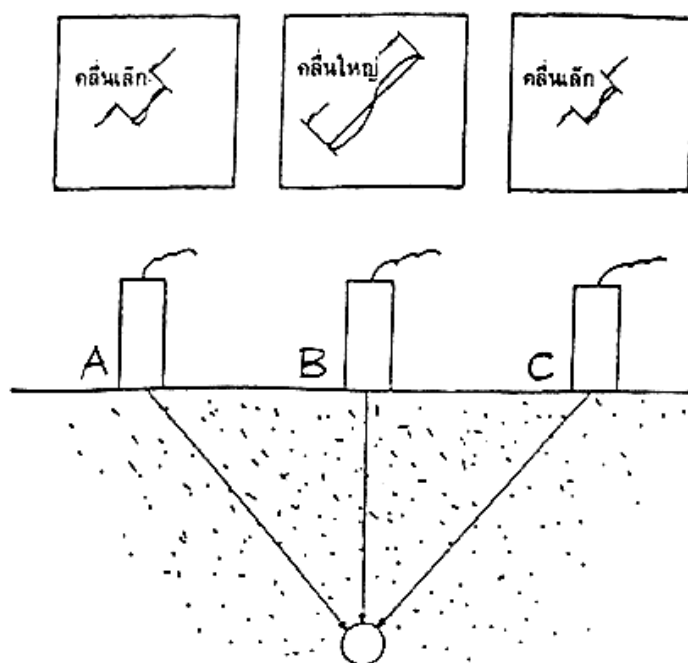
รูปที่ 2.23 ลักษณะการเกิดสนิมในเหล็กโครงสร้าง และการแตกร้าวของคอนกรีต[3]

2.5 การทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมากจะใช้เหล็กเสริม เพื่อเพิ่มกำลังต้านแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งคอนกรีตเองมีไม่พอเพียง การวัดความหนาของเหล็กเสริม ตำแหน่งตลอดการผูกกร่อน และความหนาของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมนั้น สามารถใช้วิธีการแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

2.5.1 วิธีการแบบคลื่นแม่เหล็ก เครื่องพาโคเมเตอร์ของสวิส และเครื่อง R เมเตอร์ของสหรัฐอเมริกา ใช้ตรวจสอบตำแหน่งของเหล็กเสริมได้ เครื่องของสวิสสามารถวัดความหนาของคอนกรีตได้ถึง 120 มม. ถ้ารู้ความหนาของเหล็กเสริมและช่วงห่างของเหล็กก็จะสามารถรู้ความหนาของคอนกรีตได้ ในทำนองเดียวกันถ้ารู้ความหนาของคอนกรีตก็จะหาความหนาของเหล็กเสริมได้เช่นกัน ส่วนของสหรัฐอเมริกา ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมมีขนาด 40 มม. จะสามารถวัดความหนาของคอนกรีตได้ระดับ 100 มม. อย่างไรก็ตามเครื่องของสหรัฐอเมริกาก็ไม่สามารถวัดทั้งความหนาของคอนกรีตและความหนาของเหล็กได้ในเวลาเดียวกัน

2.5.2 การทดสอบโดยวิธีการแบบเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการทดสอบแบบเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยกระแสไหลวน (Eddy Current) จะสามารถวัดความหนาของคอนกรีตและความหนาของเหล็กเสริมในเวลาเดียวกันได้

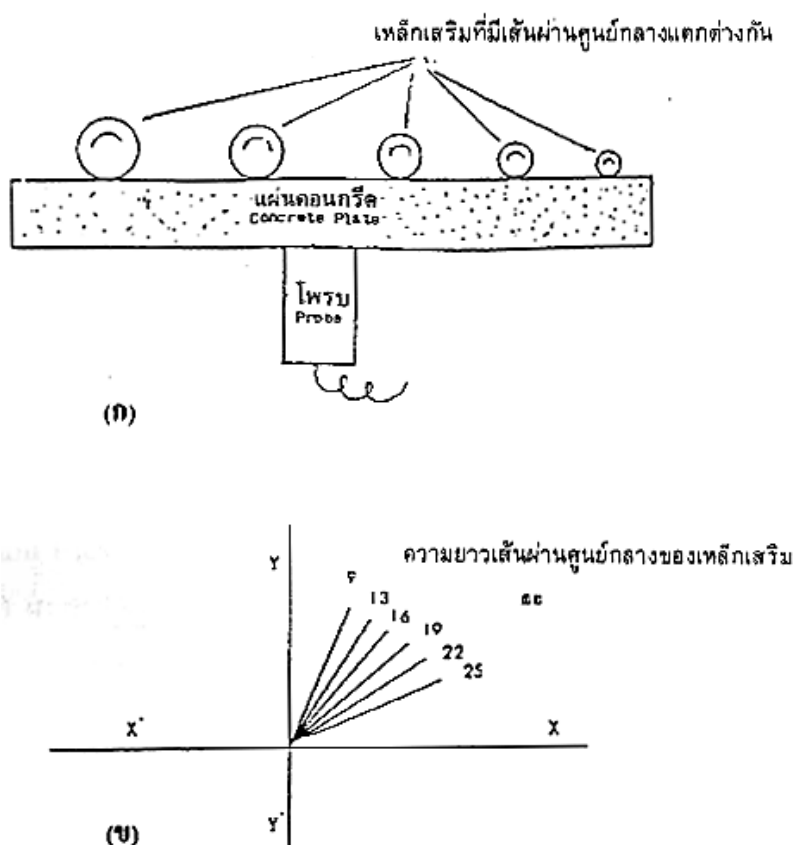


รูปที่ 2.24 รูปคลื่นที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโพรบ[3]

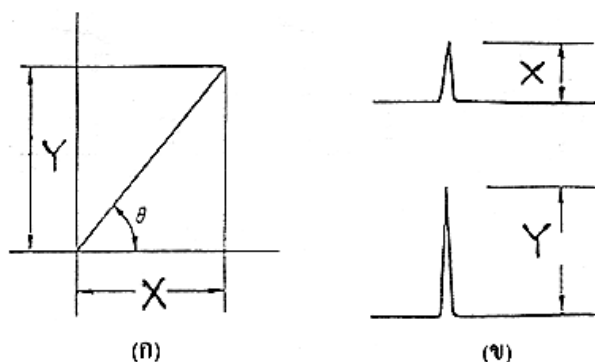
ในรูปที่ 2.24 นั้น เมื่อเคลื่อนโพรบจากตำแหน่ง A มา C จะทำให้รูปคลื่นบนจอ CRT เปลี่ยนไปคลื่นบนจอ CRT ที่ใหญ่ที่สุด จะบอกตำแหน่งของเหล็กเสริมที่อยู่ใต้โพรบ ในรูปที่ 2.25 แสดงการกลิ้งเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ กันผ่านโพรบรูปคลื่นที่ปรากฏบนจอ CRT แสดงไว้ในรูปที่ 2.25 (ก) แสดงการกลิ้งเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ กันผ่านโพรบรูปคลื่นที่ปรากฏบนจอ CRT แสดงไว้ในรูปที่ 2.25 (ข) เนื่องจากไม่สามารถวัดมุมของเฟสอย่างละเอียดบนจอ CRT ได้จากกระดาษบันทึกของเครื่องบันทึกให้อ่านค่า X และ Y แล้วนำค่ามาคำนวณในสมการ (2.13) ก็จะทราบมุมเฟสได้

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Y}{X} \quad (2.13)$$

แต่ทว่าในสภาพความเป็นจริงแล้วเหล็กอาจจะไม่กลม แต่มีลักษณะต่างๆ กัน ดังนั้นในการทดสอบด้วยวิธีนี้ย่อมเกิดความผิดพลาดได้



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของเฟสและเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม[3]



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของเฟสและเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม [3]

การวัดความหนาของคอนกรีตรอบเหล็กเสริม ใช้วิธีการของ Lift-off Effect ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าคงที่ มุมของเฟสก็จะคงที่ด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีตกับช่วงกว้างของคลื่นแสดงไว้ในรูปที่ 2.27 การหาความสูงของคลื่นให้ได้ค่าแน่นอนนั้นไม่ใช่หาจากจอ CRT แต่ควรหาจากระดาดของเครื่องบันทึก

$$W = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2.14)$$

$$\text{หรือ } W = \frac{X}{\cos \theta} = \frac{Y}{\sin \theta} \quad (2.15)$$

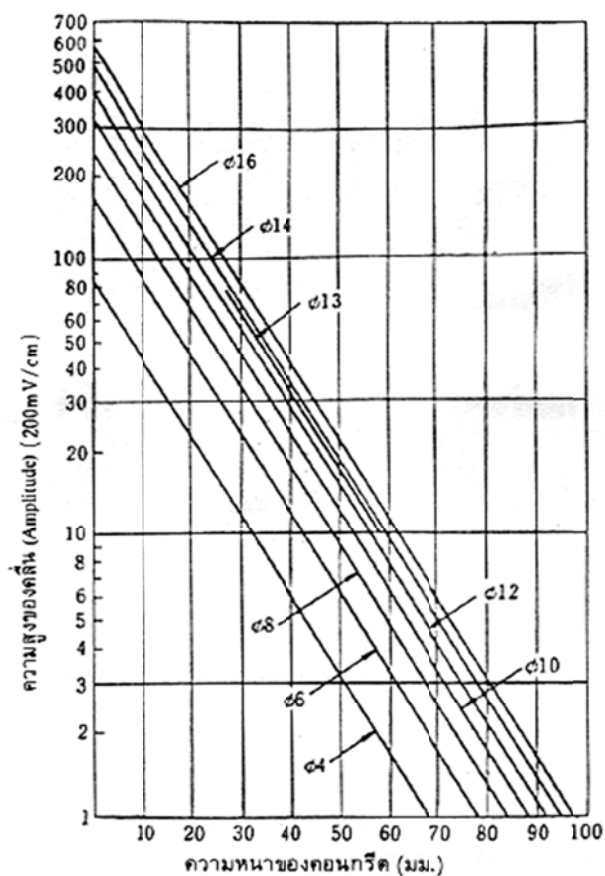
ถ้ากราฟแสดงไว้ในรูปที่ 2.27 ได้สร้างไว้แล้วล่วงหน้า ก็จะช่วยหาความใหญ่ของเหล็กเสริมและความหนาของคอนกรีตได้ในเวลาเดียวกัน

2.6 วัสดุโลหะ

วัสดุประเภทโลหะ (Metals) คือวัสดุที่ได้จากการถลุงสินแร่ต่าง ๆ อันได้แก่ เหล็ก ทองแดง อลูมิเนียม นิเกิล ดีบุก สังกะสี ทองคำ ตะกั่ว เป็นต้น โลหะเมื่อถลุงได้จากสินแร่ในตอนแรกนั้นส่วนใหญ่จะเป็นโลหะเนื้อค่อนข้างบริสุทธิ์ โลหะเหล่านี้มักจะมีเนื้ออ่อนไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมโดยตรง ส่วนมากจะนำไปปรับปรุงคุณสมบัติก่อนการใช้งานคุณสมบัติของวัสดุประเภทโลหะที่ต้องการในงานอุตสาหกรรมเป็นตัวนำความร้อนได้ดี

- ก. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
- ข. มีความคงทนถาวรตามรูป
- ค. ไม่เสื่อมสลายหรือเปลี่ยนแปลงสถานะรูปร่าง

- ง. เป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ ยกเว้นโลหะปรอท
- จ. มีความแข็งและความเหนียวสูง ยกเว้นโลหะปรอท
- ฉ. ผิวมันขาว
- ช. มีการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของคอนกรีตกับความสูงของคลื่น [2]

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ของวัสดุ

วัสดุ	สภาพยืดหยุ่น (10^6 psi)	แรงเฉือน (10^6 psi)
Aluminium alloy	10.5	4.0
Copper	16.0	6.0
Steel (plain carbon and low alloys)	29.0	11.0
Stainless Steel (18.8)	28.0	9.5
Titanium	17.0	6.5
Tungsten	58.0	22.8

2.7 MATLAB

MATLAB เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงเพื่อใช้ในการคำนวณทางเทคนิค MATLAB ได้รวมการคำนวณการเขียนโปรแกรมและการแสดงผลรวมกันอยู่ในตัวโปรแกรมเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพและอยู่ในลักษณะที่ง่ายต่อการใช้งานนอกจากนี้ลักษณะของการเขียนสมการในโปรแกรมก็จะเหมือนการเขียนสมการคณิตศาสตร์ที่เราคุ้นเคยอยู่แล้วงานที่ทั่วไปที่ใช้ MATLAB ก็เช่น การคำนวณทั่วไปการสร้างแบบจำลองและการทดสอบแบบจำลองการวิเคราะห์ข้อมูลการแสดงผลในรูปกราฟทั้งโดยทั่วไปและกราฟทางด้านทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมสามารถสร้างโปรแกรมในลักษณะที่ติดต่อกับผู้ใช้ทางกราฟิกส์

การทำงานของ MATLAB จะสามารถทำงานได้ทั้งในลักษณะของการติดต่อโดยตรง Interactive คือการเขียนคำสั่งเข้าไปที่ละคำสั่งเพื่อให้ MATLAB ประมวลผลไปเรื่อยๆหรือสามารถที่จะรวบรวมชุดคำสั่งเรานั้นเป็นโปรแกรมก็ได้ข้อสำคัญอย่างหนึ่งของ MATLAB ก็คือข้อมูลทุกตัวจะถูกเก็บในลักษณะของชุดข้อมูลคือในแต่ละตัวแปรจะได้รับการแบ่งเป็นส่วนย่อยเล็กๆขึ้น (หรือจะได้รับการแบ่งเป็น Element นั้นเอง) ซึ่งการใช้ตัวแปรเป็นชุดข้อมูลใน MATLAB นี้เราไม่จำเป็นที่จะต้องจอง Dimension เหมือนกับการเขียนโปรแกรมในภาษาขั้นต่ำทั่วไปซึ่งทำให้เราสามารถที่จะแก้ปัญหาของตัวแปรที่อยู่ในลักษณะของ Matrix และ Vector ได้โดยง่ายซึ่งทำให้เราลดเวลาการทำงานลงได้อย่างมากเมื่อเทียบกับการเขียนโปรแกรมโดย C หรือ Fortran

MATLAB เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในแวดวงของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรในปัจจุบันชื่อโปรแกรม MATLAB นั้นย่อมาจาก Matrix Laboratory โดย MATLAB นั้นได้เริ่มต้นขึ้นเพื่อต้องการให้เราสามารถแก้ปัญหาตัวแปรที่มีลักษณะเป็น Matrix ได้ง่ายขึ้น สำหรับ MATLAB ได้เริ่มพัฒนาครั้งแรกโดย Dr. Cleve Moler ซึ่งเขียนโปรแกรมนี้นี้ขึ้นมาด้วยภาษา Fortran โดยโปรแกรมนี้นี้ได้พัฒนาภายใต้โครงการ LINPACK และ EISPACK

สำหรับในปัจจุบันนี้ MATLAB ได้ถูกเขียนขึ้นโดยใช้ภาษา C โดยบริษัท Math Works ภายใต้โครงการ LAPACK และ ARPACK ถ้าหากเราจะเริ่มนับจากโปรแกรมที่ออกเผยแพร่เป็นครั้งแรกที่มีผู้ร่วมเขียนโปรแกรมไม่กี่คนจนกระทั่งทุกวันนี้มีทีมงานขนาดใหญ่ที่ทำงานในการพัฒนาโปรแกรมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นซึ่งทำให้ทุกวันนี้ MATLAB เป็นโปรแกรมที่สุดยอดในการคำนวณที่คำนวณด้าน Matrix สำหรับงานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมโปรแกรมหนึ่งนับจากวันแรกที่ได้เริ่มโครงการขึ้นจนกระทั่งในไตรมาสสุดท้ายของปี ค.ศ. 2000 ได้พัฒนาเป็น MATLAB 6.0 ซึ่งเป็นการปรับปรุงใหม่และออกสู่ตลาดเป็นครั้งที่ 12 สำหรับในมุมมองของการศึกษานั้น MATLAB ถือได้ว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญอันหนึ่งสำหรับนักศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณและขณะนี้หลายมหาวิทยาลัยได้ยกอันดับของ MATLAB ขึ้นจากโปรแกรมสำเร็จรูปให้เป็นภาษาสำหรับการใช้งานทางด้านเทคโนโลยีนั้นคือมีระดับเป็นภาษาเหมือนกับภาษา C หรือ Fortran นั้นเอง

นอกเหนือจากเพื่อการเรียนการสอนในสถาบันการศึกษาแล้ว MATLAB ยังเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในงานวิจัยงานพัฒนาและการวิเคราะห์ของหน่วยงานต่างๆมากมาย

นอกเหนือจากตัวโปรแกรม MATLAB เองแล้วบริษัท Math Works ผู้ผลิต MATLAB ยังได้ผลิตเครื่องมือหรือที่เรียกว่า Toolbox ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อประกอบกับการใช้ MATLAB สำหรับงานที่จำเพาะเจาะจงหลายประเภท Toolbox นั้นเป็นการนำเอาโปรแกรมที่เขียนขึ้นเป็นฟังก์ชันสำหรับ MATLAB เพื่อรวมเข้าเพื่อให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกในการเรียกใช้มากขึ้นทำให้ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องสร้างโปรแกรมขึ้นมาใช้งานเองโดย Toolbox ที่สร้างขึ้นจะครอบคลุมการทำงานด้านต่างๆมากมายเช่น Signal processing, control systems, Neural networks, Fuzzy logic, Wavelets, Simulation เป็นต้น

ถ้าหากจะสรุปโดยรวมแล้วความสามารถหลักของ MATLAB ที่ทำให้เป็นโปรแกรมที่เหมาะสมกับการทำงานทางด้านวิศวกรรมด้วยเหตุผลดังนี้

MATLAB เป็นโปรแกรมเพื่อการคำนวณและแสดงผลได้ทั้งตัวเลขและรูปภาพซึ่งมีประสิทธิภาพสูงโดยทางบริษัท Math Works ผู้ผลิตได้ให้นิยามว่าเป็น High-Performance Numeric Computation and Visualization Software

MATLAB จะควบคุมการทำงานด้วยชุดคำสั่งและยังสามารถรวบรวมชุดคำสั่งเป็นโปรแกรมได้อีกด้วย

MATLAB มี Function ที่เหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมพื้นฐานมากมาย นอกจากนั้นผู้ใช้อย่างสามารถเขียน Function ขึ้นมาใหม่โดยสามารถใช้ประโยชน์จาก Function ที่มีอยู่แล้วเพื่อให้เหมาะสมกับงานของผู้ใช้แต่ละกลุ่ม

ลักษณะการเขียนโปรแกรมใน MATLAB จะใกล้เคียงการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ที่เราคุ้นเคยจึงง่ายกว่าการเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาชั้นสูงเช่น C, FORTRAN หรืออื่นๆ

MATLAB มีความสามารถในการเขียนกราฟและรูปภาพทั้ง 2 มิติและ 3 มิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

MATLAB สามารถทำ Dynamic Link กับโปรแกรมอื่นๆได้ไม่ว่าจะเป็น Word, Excel หรืออื่นๆที่ร่วมทำงานอยู่บน Windows

MATLAB มี Toolbox หรือชุด Function พิเศษสำหรับผู้ใช้ที่ต้องการใช้งานเฉพาะทางหรืองานด้านวิศวกรรมขั้นสูงอื่นๆ

2.7.1 ระบบการทำงานของ MATLAB ในการทำงานของ MATLAB เพื่อให้การทำงานเป็นไปตามจุดมุ่งหมาย MATLAB ได้แบ่งส่วนการทำงานของโปรแกรมออกเป็นส่วนหลักที่สำคัญ 5 ส่วนด้วยกัน

Development Environment.

The MATLAB Mathematical Function Library.

The MATLAB Language.

Handle Graphics.

The MATLAB Application Program Interface (API)

ซึ่งแต่ละส่วนจะมีหน้าที่ควบคุมในการทำงานแบบหนึ่งๆและประสานการทำงานระหว่างส่วนต่างๆไปพร้อมกันด้วยสำหรับรายละเอียดในการทำงานของส่วนต่างๆมีดังนี้

Development Environment ในส่วนนี้จะป็นชุดเครื่องมือที่ช่วยให้เราสามารถที่จะใช้ฟังก์ชันและไฟล์ต่างๆโดยเครื่องมือหลายตัวในนี้จะมีลักษณะเป็น Graphical user interface ซึ่งรวมถึง MATLAB Desktop และ Command Windows, Command history และ Browsers สำหรับเพื่อใช้ดู Help, Workspace, Files และ Search path

The MATLAB Mathematical Function Library ในส่วนนี้จะป็นที่รวบรวมส่วนของโปรแกรมที่ได้รวบรวมเป็นไฟล์ย่อยๆไว้ไฟล์แต่ละไฟล์จะป็นไฟล์ที่เขียนขึ้นมาเพื่อใช้กำหนดลักษณะในการคำนวณหรือ Algorithms แบบต่างๆนับจากฟังก์ชันง่ายๆเช่นการบวกฟังก์ชันตรีโกณมิติ พื้นฐานเช่น Sine, Cosine ไปจนถึงฟังก์ชันที่มีความซับซ้อนมีขั้นตอนในการคำนวณมากมาย เช่นการหา Inverse ของ Matrix การหา Eigenvalues และ Eigenvector หรือ Fast Fourier transforms เป็นต้น

The MATLAB Language ส่วนนี้จะป็นภาษาระดับสูงที่ใช้ตัวแปรเป็น Matrix หรือ Array ซึ่งมีคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของโปรแกรมการทำงานของฟังก์ชันการกำหนดโครงสร้างของตัวแปรแบบต่างๆกำหนด Input และ Output ของโปรแกรมซึ่งทั้งหมดนี้จะช่วยทำให้ในการเขียนโปรแกรม MATLAB แต่ละโปรแกรมจะป็นโปรแกรมที่มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับโปรแกรมที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์เดียวกันแต่ผู้ใช้ต้องเขียนฟังก์ชันการทำงานทุกขั้นตอนขึ้นมาเอง

Handle graphics ส่วนนี้จะป็นส่วนที่ใช้แสดงกราฟฟิกส์และรูปภาพต่างๆรวมถึงคำสั่งระดับสูงที่ใช้ในการแสดงผลในสองและสามมิติการจัดรูปแบบในลักษณะ Image processing การทำภาพเคลื่อนไหว นอกจากนี้ในส่วนนี้ยังได้รวมเอาภาษาในระดับต่ำไว้เพื่อให้เราสามารถปรับแก้รูปภาพต่างๆให้เป็นไปตามที่เราต้องการได้มากที่สุดรวมถึงการสร้าง Graphic user interface ภายใต้การทำงานของ MATLAB ด้วย

The MATLAB Application Program Interface (API) ส่วนนี้จะป็น Library ที่ให้เราสามารถที่จะเขียนโปรแกรมขึ้นในภาษา C หรือ FORTRAN แล้วมีการเชื่อมโยงการทำงานเข้ากับ MATLAB ซึ่งในส่วนนี้ยังได้รวมถึงการเขียนโปรแกรมขึ้นมาแล้วเรียกฟังก์ชันของ MATLAB ไปใช้งาน (Dynamic linking) ซึ่งจะทำให้ MATLAB มีหน้าที่เสมือนในการคำนวณรวมถึงสามารถที่จะเขียนหรืออ่าน MAT-file ได้ด้วย

2.7.2 ประโยชน์ของ MATLAB การพัฒนาโปรแกรมด้วย MATLAB มีความง่ายและเร็วกว่าภาษาอื่นๆ เพราะมีไลบรารีจำนวนมากรองรับ และด้วยลักษณะการทำงานเชิงเมทริกซ์ทำให้เราสามารถจัดการกับชุดข้อมูลได้อย่างง่ายดาย โค้ดโปรแกรมกะทัดรัด เหมาะกับการสร้าง และทดสอบระเบียบวิธีใหม่ๆ รองรับการทำงานกับกราฟิกรวมถึงอื่นๆ ได้โดยเราสามารถแบ่งประโยชน์ของ MATLAB ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1) MATLAB เป็นโปรแกรมคำนวณ ที่รองรับทั้ง

เชิงตัวเลข (Numeric) เราสามารถใช้เป็นเครื่องคำนวณธรรมดา หรือใช้งานฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงได้ เชิงสัญลักษณ์ (Symbolic) เราสามารถคำนวณในเชิงตัวแปรได้ เช่น การอินทิเกรต หรือการแก้สมการต่างๆ แบบติดตัวแปร

2) MATLAB สามารถเขียนเป็นโปรแกรมได้

สามารถเขียนได้ทั้งแบบ Script ซึ่งทำงานในลักษณะชุดคำสั่งต่อเนื่อง หรือเขียนเป็น Function เพื่อใช้งานก็ได้ สามารถใช้งานได้ทั้งแบบ Interpret หรือ Compile โดยเราสามารถ Compile โปรแกรม MATLAB ออกมาได้หลายชนิดทั้งแบบ Standalone หรือ Library เช่น .exe หรือ .dll เป็นต้น มี GUI รองรับ โดยสามารถเขียนได้ทั้งแบบใช้ GUIDE (คล้าย Visual Basic) หรือแบบไม่ใช้ก็ได้รองรับการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุทั้งคลาสของ MATLAB เอง หรือคลาสของภาษาอื่น เช่น Java หรือ .NET สามารถ Debug โปรแกรมได้ และในส่วนของติดต่อกับภาษาอื่นๆ สามารถ Compile ไปเพื่อทำการ Debug ในโปรแกรมอื่น เช่น Visual Basic ได้ด้วย

3) MATLAB สามารถติดต่อหรือใช้งานร่วมกับโปรแกรม ภาษา ฮาร์ดแวร์ หรือแฟ้มข้อมูลรูปแบบต่างๆ ได้ สามารถเชื่อมต่อกับภาษา หรือโปรแกรมอื่นๆ ได้ เช่น Java, C/C++, .NET, MS Excel โดยเราอาจให้โปรแกรมหลักเขียนโดย MATLAB แล้วเรียกใช้งานภาษาอื่น หรือให้ภาษาอื่นเป็นโปรแกรมหลักแล้วเรียกใช้งาน MATLAB ก็ได้ สามารถอ่านหรือเขียนแฟ้มข้อมูลสื่อสารแบบมาตรฐานได้ เช่น ข้อความ รูปภาพ เสียง วิดีโอ เป็นต้น สามารถติดต่อกับฮาร์ดแวร์ กล้องวิดีโอ บอร์ด DSP ได้ เป็นต้น

2.8 พื้นฐานการทำงานของระบบตรวจหาโลหะ



รูปที่ 2.28 ลำดับขั้นตอนการทำงาน

จากรูปที่ 2.28 สามารถอธิบายหลักการทำงานอย่างง่ายของระบบตรวจหาโลหะ

2.8.1 วงจรสร้างความถี่ (Oscillator)

วงจรสร้างความถี่จะสร้างความถี่สูง จากนั้นจะส่งสัญญาณจากสายอากาศภาคส่งไปยังปลายทางที่ภาครับ จากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้ไปประมวลผลส่งไปยังส่วนแสดงผลต่อไป

วงจรกำเนิดสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆด้วยกันคือ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal waveform) และวงจรกำเนิดสัญญาณรูปอื่นๆที่ไม่ใช่รูปไซน์ (Non sinusoidal waveform) ซึ่งก็จะได้แก่สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular) และสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Square) เป็นต้น

2.8.2 ตรวจจับโลหะ (Detect)

ในการตรวจจับโลหะจะใช้หลักการการสะท้อนของคลื่น โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อตกกระทบกับโลหะจะเกิดการสะท้อนขึ้น สภาวะดังกล่าวจะนำไปเป็นตัวเปรียบเทียบในการวิเคราะห์หาสิ่งแปลกปลอมในคอนกรีต โดยเริ่มจากวงจรสร้างความถี่สูง ส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากภาคส่ง เมื่อถูกส่งออกมาผ่านคอนกรีตไปยังภาครับ หากคอนกรีตไม่มีสิ่งแปลกปลอมสัญญาณที่ส่งออกมาไม่ถูกรบกวนจากสนามแม่เหล็กของโลหะ จึงรับสัญญาณได้อย่างเต็มที่ แต่ถ้าคอนกรีตนั้นมีโลหะปลอมปนสัญญาณที่ส่งออกมาจะเกิดการสะท้อนกลับ ทำให้สัญญาณผ่านมายังภาครับไม่เต็มที่ เช่น ส่งสัญญาณ 2 วัตต์ แต่สัญญาณที่ผ่านมายังภาครับ 0.5 วัตต์

2.8.3 การแสดงผล (Output)

ในส่วนนี้จะนำค่าผลที่ได้จากการวัดของระบบตรวจหาโลหะในคอนกรีตไปแสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม MATLAB ในการคำนวณและประมวลผลออกมาทางจอคอมพิวเตอร์ โดยแสดงออกมาเป็นรูปภาพในระบบ 2 มิติ เพื่อสะดวกในการรู้ตำแหน่งที่อยู่ของโลหะในเนื้อคอนกรีต