



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อาร์ แวน นีเวนโฮป และ อาร์ โบสช ( R. Van Nieuwenhove and R.-W. Bosch) [1] ได้ทำการศึกษากาการกัดกร่อนเชิงความเค้นของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมเบอร์ 304 โดยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก โดยให้ความเค้นด้วยการยืดที่อัตราการยืดต่ำ (slow stain rate) ทดสอบในสารละลายไฮเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 0.01 โมล ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ พบว่า อะคูสติกพารามิเตอร์ 2 ตัวที่มีความสัมพันธ์กับการกัดกร่อนคือ จำนวนคลื่นอะคูสติก (hit) และ แอมพลิจูด (amplitude) จากกราฟความสัมพันธ์ของจำนวนคลื่นอะคูสติกกับความเค้น (stress) เทียบกับเวลา พบว่าจำนวนคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับได้จะมีค่าสูงอยู่ 3 ช่วง คือ เวลาที่เกิดการเปลี่ยนจากเฟสอีลาสติก (elastic phase) ไปเป็นเฟสพลาสติก (plastic phase) ในช่วงที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนในเฟสพลาสติก และช่วงก่อนที่ชิ้นทดสอบจะถูกยืดจนหัก โดยเมื่อเทียบกับผลกับกราฟของแอมพลิจูดเทียบกับเวลาพบว่า ช่วงที่มีจำนวนคลื่นอะคูสติกมากจะมีแอมพลิจูดต่ำ แต่ช่วงที่มีจำนวนคลื่นอะคูสติกน้อยจะมีแอมพลิจูดสูง และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของเดลตาเฟสที่เลื่อนไป (delta phase shift) และความเค้นเทียบกับเวลา ที่ได้จากเครื่องอีไอเอส (EIS) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของเฟสระหว่างชิ้นทดสอบที่ทำการยืดและไม่ได้ยืด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนนั่นเอง และตำแหน่งนี้จะสอดคล้องกับกราฟของจำนวนคลื่นอะคูสติกกับความเค้นเทียบกับเวลา จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนคลื่นอะคูสติกอย่างรวดเร็วบ่งชี้ถึงตำแหน่งที่เริ่มเกิดการกัดกร่อน และเมื่อนำชิ้นทดสอบไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้นแบบผ่าเกรน (transgranular fracture)

เฮช ไชค และ อาร์ อะมิตาลินแกรม [2] (H. Shaikh , R. Amirthalingam ) ได้ทำการวิเคราะห์คลื่นอะคูสติกจากการแตกร้าวภายในเนื้อของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม เบอร์ 316 ซึ่งเป็นกระบวนการเกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้น ในสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 413 เคลวิน จากการทดลองพบว่าคลื่นอะคูสติกที่เกิดขึ้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 27.6 - 46.5 เดซิเบล โดยค่าของ จำนวนครั้ง (count) และพลังงาน (energy) ของคลื่นอะคูสติก สามารถใช้บอกถึงจุดที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้นได้ ซึ่งจะมีจำนวนครั้งและพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการวิเคราะห์ในรายละเอียดพบว่าเป็นสัญญาณจากการขยายตัวของปลายรอยร้าวจากการกัดกร่อน

ในเนื้อวัสดุที่อยู่ในช่วงเฟสพลาสติก และพบว่าการกักต่อนที่เกิดขึ้นเป็นการกักต่อนเชิงความเค้นแบบผาเกรน

แมทธิว จีโอฟรีย์ แบชเตอร์ และคณะ (Matthew Geoffrey Baxter) [3] เป็นการทดสอบตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกด้วยวิธีการหาเดลตาที (delta t) โดยเปรียบเทียบกับวิธีการหาตำแหน่งจากผลต่างของเวลาที่มาถึงตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัว ซึ่งเป็นการใช้ตัวรับรู้สัญญาณ 4 ตัวพร้อมกัน แล้วใช้ผลต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึงตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวเพื่อหาตำแหน่ง ในขณะที่วิธีการเดลตาที จะประยุกต์ใช้ผลต่างของเวลาทุกคู่ของตัวรับรู้สัญญาณ มาใช้ในการหาตำแหน่ง โดยพบว่าวิธีการเดลตาทีให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนลดลงจากวิธีเดิม

สำหรับงานวิจัยนี้ จะศึกษาการตรวจจับสนคลื่นอะคูสติกด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกจากการกักต่อนเชิงความเค้นของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม เบอร์ 304 โดยใช้วิธีการตัดงอแผ่นเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมเพื่อให้เกิดความเค้นตกค้าง แล้วนำไปทดสอบในสภาวะที่สามารถเกิดการกักต่อนเชิงความเค้นได้ จากนั้นจะพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับการหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกด้วยโปรแกรมแลบวิว โดยใช้ผลต่างของเวลาที่สัญญาณเดินทางมาถึงตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวในการหาตำแหน่ง ทำการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการหาตำแหน่งนี้ โดยการทดสอบกับท่อโลหะยาวและแผ่นเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมเบอร์ 304 ด้วยคลื่นอะคูสติกจากการหักใส่ดินสอและจากการกักต่อนด้วยกรด

## 2.2 การตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก

### 2.2.1 การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing, NDT)

ในการตรวจสอบความบกพร่องภายในของวัสดุ อุปกรณ์ หรือ โครงสร้างต่างๆ นั้น การทำให้แตกหักแล้วดูด้วยตาเป็นวิธีที่ถูกต้องแน่นอนที่สุด แต่ในกรณีของชิ้นงานบางอย่าง การทดสอบแบบทำลายก็ไม่เหมาะสมเพราะทำให้ชิ้นงานเสียหายและใช้งานไม่ได้อีก เช่นในอุตสาหกรรมหนักที่ผลิตภัณฑ์มีจำนวนน้อยและราคาสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายในการตรวจสอบแทน การทดสอบแบบไม่ทำลาย [4] คือ การตรวจสอบลักษณะสมบัติ โครงสร้างภายในหรือความบกพร่องภายในวัสดุ โดยไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือขนาด

ในการทดสอบแบบไม่ทำลาย จะใช้ลักษณะทางฟิสิกส์ของชิ้นทดสอบ เช่น แสง ความร้อน รั้งสี การทดสอบด้วยไฟฟ้า หรืออำนาจแม่เหล็ก ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความผิดปกติของโครงสร้างภายใน หรือความบกพร่องที่มีอยู่ ซึ่งแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

### 1) การทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อตรวจหาความบกพร่องบริเวณผิว

- การตรวจสอบโดยการตรวจพินิจ เป็นการตรวจโดยใช้สายตา โดยอาจใช้เครื่องมืออื่นๆ ช่วย เช่น แว่นขยาย ไม้บรรทัดเว้า เกจชนิดพิเศษต่างๆ
- การทดสอบโดยผงแม่เหล็ก ใช้ตรวจหาความบกพร่องบนผิวหรือใต้ผิว แต่ไม่สามารถใช้กับชิ้นทดสอบที่มีความเป็นแม่เหล็กสูง
- การทดสอบโดยการซึมของของเหลว ใช้ตรวจหารอยแตกที่ผิวเท่านั้น ใช้ได้กับโลหะและอโลหะ
- การทดสอบโดยกระแสวน (Eddy Current Testing) ใช้หารอยขีดข่วนบนผิวของวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วและไม่ต้องสัมผัส

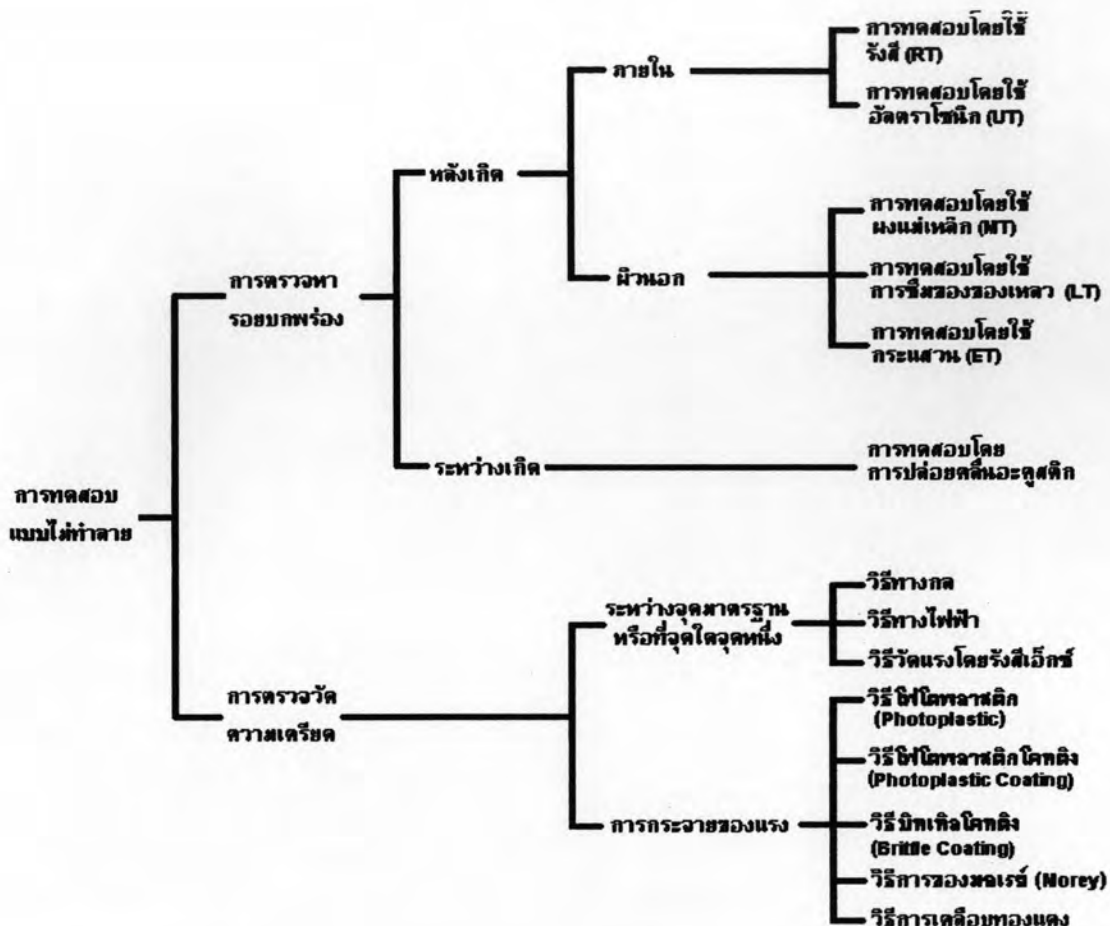
### 2) การทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อหาความบกพร่องภายใน

- การทดสอบโดยใช้รังสี (Radiographic Testing) เหมาะสำหรับตรวจสอบความบกพร่องที่อยู่ลึกเข้าไปตามแนวรังสี โดยสามารถบอกได้ทั้งชนิดและรูปร่างของความบกพร่อง แต่ถ้าความบกพร่องไม่อยู่ในแนวรังสี เช่น เอียงทำมุมกับแนวรังสี หรือมีการเคลือบผิว วิธีนี้ จะไม่สามารถใช้ได้
- การทดสอบโดยใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic Testing) การตรวจสอบจะให้ผลดีเมื่อคลื่นที่ปล่อยออกไปอยู่ในแนวตั้งฉากกับความบกพร่องเพื่อให้คลื่นสะท้อนกลับมายังตัวรับรู้สัญญาณ และในกรณีที่ความบกพร่องเป็นโพรงอากาศ การตรวจสอบจะทำได้ยาก

### 3) การทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอื่นๆ

- การวัดความเครียด (Strain Measurement)
- การตรวจสอบด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Testing)
- การปล่อยคลื่นอะคูสติก
- และอื่นๆ

หรืออาจแบ่งได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การจำแนกการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีต่างๆ

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าการตรวจสอบส่วนใหญ่เป็นการตรวจสอบหลังจากการกักต้อนเกิดขึ้นแล้วซึ่งหมายถึงเกิดความเสียหายขึ้นแล้ว หรือตรวจสอบเมื่อถึงเวลาที่คาดว่าจะเกิดการกักต้อนขึ้นซึ่งเป็นการคาดเดาที่ไม่แน่นอน และเปลี่ยนแปลงได้จากปัจจัยหลายๆอย่าง แต่วิธีการตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกนั้นเป็นการตรวจสอบระหว่างการใช้งานจริงซึ่งจะสามารถตรวจพบได้เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นแม้เพียงเล็กน้อย และตรวจสอบทั่วทั้งชิ้นงานได้ในการตรวจสอบเพียงครั้งเดียว จึงเป็นข้อได้เปรียบวิธีอื่นๆ แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือไม่สามารถตรวจสอบซ้ำได้ รวมถึงบริเวณที่เกิดความเสียหายอยู่ก่อนแล้ว จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการตรวจสอบวิธีอื่นๆควบคู่ในการตรวจสอบอย่างละเอียดต่อไป สำหรับการตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกนี้ มีความแตกต่างจากการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีอื่นๆ อยู่หลายประการคือ

1. พลังงานที่ตรวจจับนั้นเกิดจากตัวชิ้นงานเอง ไม่ได้มาจากแหล่งกำเนิดภายนอก

2. พลังงานที่ตรวจจับได้จะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพภายในเนื้อวัสดุ
3. การตรวจสอบจะกระทำขณะที่วัสดุอยู่ในสภาพที่กำลังใช้งานอยู่ ไม่จำเป็นต้องหยุดการทำงานก่อนทำการตรวจสอบ
4. การตรวจสอบสามารถบอกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเวลานั้นได้ทันที ไม่ใช่การตรวจสอบหาความบกพร่องหลังการใช้งาน

### 2.2.2 ลักษณะของคลื่นอะคูสติก

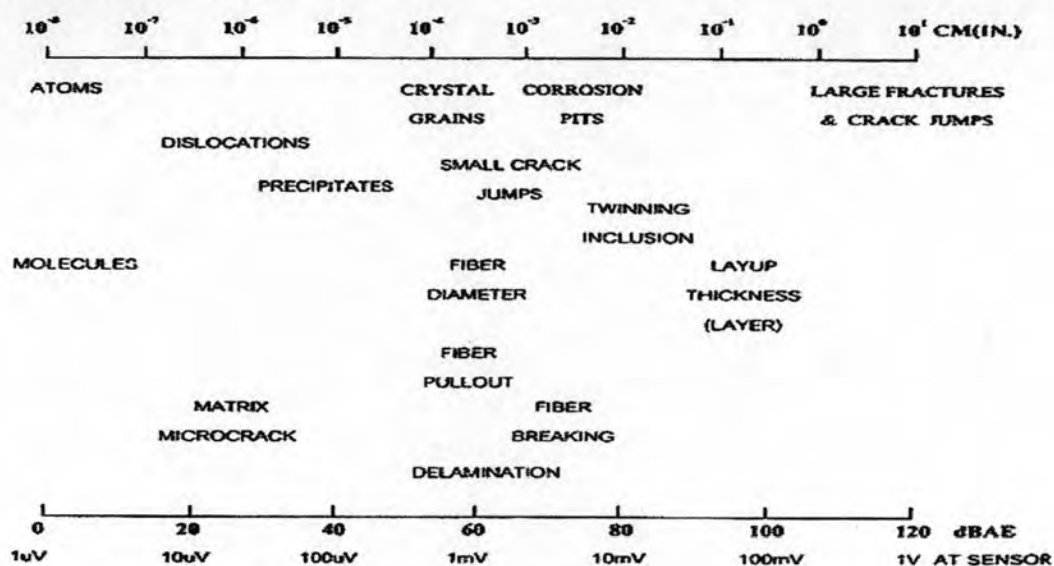
การปล่อยคลื่นอะคูสติก [5] คือปรากฏการณ์ที่คลื่นความยืดหยุ่น (elastic wave) แบบชั่วคราว เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงานอย่างรวดเร็วของแหล่งพลังงานเฉพาะจุด ภายในเนื้อหรือผิวของวัสดุ พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของคลื่นเสียงความถี่สูง ประมาณ 20 เฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ตัวอย่างของคลื่นอะคูสติกที่พบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น เมื่อตัดแผ่นดีบุกที่ใช้ทำกระป๋องน้ำอัดลมให้งอแล้วปล่อย จะได้ยินเสียงดังที่เรียกกันว่าดีบุกร้อง (tin cry) ออกมา หรือกรณีของเสียงลั่นเปรี้ยะออกมาจากแผ่นไม้ที่ผู้ หรือการแตกของแก้วหรือเครื่องปั้นดินเผา ตัวอย่างเหล่านี้ต่างเป็นคลื่นอะคูสติกที่สามารถได้ยิน แต่คลื่นอะคูสติกส่วนใหญ่จะไม่สามารถได้ยินด้วยหู เนื่องจากมีความถี่สูง โดยมักจะเป็นคลื่นอัลตราโซนิค อย่างไรก็ตามคลื่นอะคูสติกสามารถตรวจจับได้โดยการใช้ตัวรับรู้สัญญาณที่เหมาะสม

### 2.2.3 แหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติก

ระดับจุลภาค เมื่อพิจารณาในระดับโมเลกุลหรือระดับอะตอม ซึ่งมีการเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างอยู่ในเนื้อสาร ซึ่งโดยมากจะมีความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างอยู่ เช่น มีอะตอมขาดหายไป (vacancy) หรือมีอะตอมเกิน (interstitials) หรือมีอะตอมผิดตำแหน่ง (Frenkel defect) หรือมีอะตอมแปลกปลอม (impurity) เป็นต้น บริเวณที่โครงสร้างไม่สมบูรณ์เหล่านี้จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายในแลตทิซ (lattice) บริเวณนั้นน้อยกว่าปกติ เมื่อมีความเค้นที่สูงจนทำให้เนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในช่วงของพลาสติกแล้ว ก็จะทำให้เกิดการขยับตัวของอะตอมไป (dislocation) เมื่อเกิดการขยับตัวของอะตอมจำนวนมากในแนวระนาบเดียวกันจะทำให้เกิดการไถลของระนาบ (slip line) ขึ้น หรืออาจเกิดการบิดของแนวระนาบ (twining) ได้ ถ้าการไถลที่เกิดขึ้นมีการเคลื่อนที่ที่ไม่เท่ากันของอะตอม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อสารแบบต่างๆ เหล่านี้ต่างจะปลดปล่อยคลื่นความยืดหยุ่นออกมา ซึ่งก็คือคลื่นอะคูสติกนั่นเอง

ระดับมหภาค เมื่อพิจารณาในระดับที่ใหญ่ขึ้นของวัสดุ เช่น การเปลี่ยนแปลงที่ผิว หรือ ภายในเนื้อวัสดุ จะพบว่าคลื่นอะคูสติกส่วนใหญ่จะเกิดจากการเสียรูปและการแตกหักของวัสดุ เช่น การขยายตัวของรอยร้าว การขาดของเส้นใย การแตกหักของวัสดุ เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะปล่อยคลื่นอะคูสติกออกมา โดยคลื่นอะคูสติกที่เกิดขึ้นจะมีแอมพลิจูดสูงกว่าคลื่นอะคูสติกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในระดับจุลภาค โดยความสัมพันธ์ของเหตุการณ์ต่างๆ กับขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นอะคูสติกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2

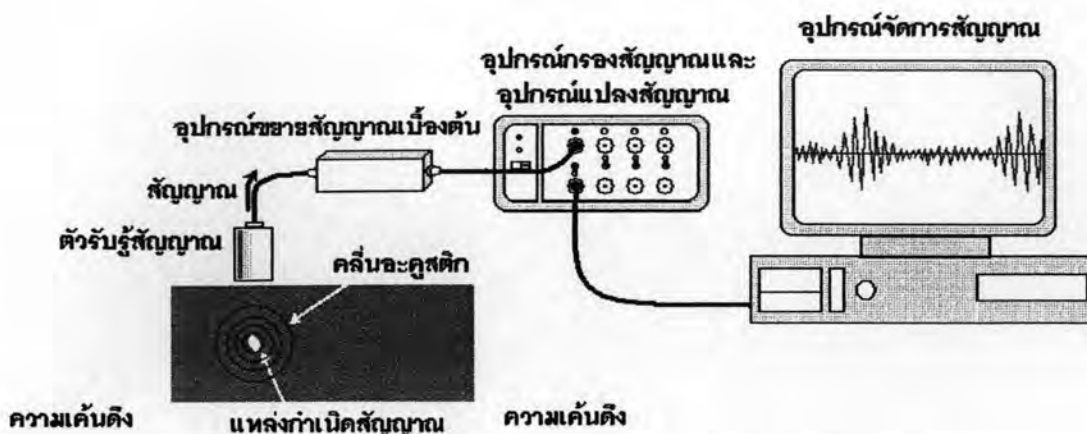
SCALE OF AE SOURCE PROCESSES



รูปที่ 2.2 ค่าแอมพลิจูดของคลื่นอะคูสติกจากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุในเหตุการณ์ต่างๆ

#### 2.2.4 อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก

หลักการของการตรวจจับคลื่นอะคูสติก อธิบายได้ดังรูปที่ 2.3 เริ่มจากการเกิดคลื่นอะคูสติกจากความผิดปกติในเนื้อโลหะ เช่น การเกิดการแตกร้าว เป็นต้น เมื่อมีแรงจากภายนอกเข้าไปกระทำ ยิ่งทำให้รอยแตกร้าวนี้ขยายวงกว้างและส่งพลังงานออกมาในรูปของคลื่นอะคูสติก ซึ่งเป็นคลื่นเสียงและเคลื่อนที่ไปทุกทิศทางในเนื้อโลหะ จนมาถึงตัวรับรู้สัญญาณที่ติดตั้งไว้ที่ผิว คลื่นเสียงนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ส่งต่อไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น อุปกรณ์กรองสัญญาณ และอุปกรณ์จัดการสัญญาณเพื่อแปลงให้อยู่ในรูปของข้อมูลที่ต้องการต่อไป โดยรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละส่วนมีดังนี้



รูปที่ 2.3 การทำงานเบื้องต้นของการตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก

### 1). ตัวรับรู้สัญญาณ (Sensor)

เนื่องจากคลื่นอะคูสติกเป็นคลื่นความยืดหยุ่นที่มีแอมพลิจูดต่ำมาก จึงจำเป็นต้องมีตัวรับรู้สัญญาณ เพื่อตรวจจับคลื่นและแปลงให้เป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์นี้จะติดเข้ากับผิวหน้าของวัสดุที่จะตรวจสอบ ทำหน้าที่ในการแปลงคลื่นอะคูสติกให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปจะเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวสูง มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับตัวรับรู้สัญญาณที่ใช้ในการทดสอบแบบอัลตราโซนิก ส่วนประกอบภายในมักทำจากเซรามิกเลดซิริคอนเกต-ติตาเนต (Lead Zirconate Titanate Ceramics, PZT) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเมื่อมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นจากคลื่นอะคูสติก เซรามิกเลด-ซิริคอนเกต-ติตาเนตจะส่งกระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งปริมาณและขนาดของกระแสไฟฟ้าก็จะแปรตามคลื่นอะคูสติกที่ได้รับ ทำให้สามารถนำสัญญาณที่ตรวจพบมาหาลักษณะของคลื่นอะคูสติกได้ ในการติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณเข้ากับผิวทดสอบนั้น เพื่อเป็นการลดช่องว่างของอากาศ และทำให้การส่งผ่านของคลื่นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีสารช่วยสัมผัส (couplant) เช่น กาวซิลิโคน ปิโตรเลียมเจล ไขมัน (grease) ทาเคลือบระหว่างพื้นผิวกับตัวรับรู้สัญญาณด้วย โดยสารช่วยสัมผัสที่เหมาะสมต้องมีลักษณะดังนี้

- ต้องทำให้ผิวหน้าของโลหะและตัวรับรู้สัญญาณมีลักษณะเปียกได้
- ต้องทำให้การส่งผ่านของสัญญาณเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- ต้องไม่เกิดการไหลบนพื้นผิว ไม่ละลายเมื่ออุณหภูมิสูงหรือถูกน้ำชะล้าง

- ต้องไม่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงหรือทำปฏิกิริยากับผิวหน้าของโลหะและตัวรับรู้สัญญาณ
- ต้องสามารถขจัดออกได้ง่ายเมื่อเสร็จการทดลอง ไม่เกาะติดถาวรกับพื้นผิว

นอกจากนี้ยังต้องมีอุปกรณ์ช่วยยึดจับ (mounting) เพื่อช่วยให้การติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณบนกับผิววัสดุมีความมั่นคงและทนทานในระหว่างการทดสอบ โดยอุปกรณ์ช่วยยึดจับอาจใช้เป็นสารบางชนิดที่มีสมบัติยึดตัวรับรู้สัญญาณให้ติดแน่นกับผิวได้ หรืออุปกรณ์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะให้เหมาะสมกับรูปร่างของวัสดุที่จะทดสอบ รูปร่างของตัวรับรู้สัญญาณ และลักษณะการทดสอบ

## 2). อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น (pre amplifier)

คลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับได้โดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณนั้น โดยปกติจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าในระดับไมโครโวลต์ ถึงมิลลิโวลต์ สัญญาณที่ต่ำนี้จะผ่านเข้าเครื่องขยายสัญญาณ เพื่อขยายให้เหมาะสมกับการวัด โดยแปลงให้เป็นสัญญาณที่มีขนาด 40 ถึง 100 เดซิเบล ( $10^2$  ถึง  $10^5$  เท่า) ก่อนจะส่งต่อไป โดยปกติอัตราการขยายจะแสดงในรูปอัตราส่วนหรือในหน่วยเดซิเบล (dB) โดยหน่วยเดซิเบลสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\text{หน่วยเดซิเบล (dB}_{AE}) = 20 \log \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (2.1)$$

โดย  $V_{out}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าหลังผ่านการขยาย และ  $V_{in}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าก่อนการขยาย

การแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของเดซิเบลจะช่วยให้การอ่านค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ค่อนข้างกว้าง คือ ตั้งแต่ไมโครโวลต์จนถึงโวลต์ ได้ง่ายขึ้นและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และใช้เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรม ตารางที่ 2.1 แสดงถึงค่าที่ได้จากการแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ เป็นหน่วย เดซิเบล



ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าเดซิเบล

แอมพลิจูดที่วัดจากสัญญาณขาเข้าของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ในหน่วย ไมโครโวลต์	แอมพลิจูดในหน่วยเดซิเบล
1	0
10	20
100	40
1,000	60
10,000	80
100,000	100
1,000,000	120

### 3). อุปกรณ์กรองสัญญาณ (filter)

คลื่นอะคูสติคช่วงที่ใช้งานได้นั้น โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึงระดับหลายเมกะเฮิรตซ์ สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดนั้นอาจจะมีสัญญาณไฟฟ้ารบกวน หรือสัญญาณทางกลที่ไม่ต้องการรวมอยู่ด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณที่ตัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป โดยอุปกรณ์กรองสัญญาณ มักจะติดตั้งอยู่ภายในอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น

### 4). อุปกรณ์แปลงสัญญาณ (discriminator)

สัญญาณคลื่นที่ออกจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นนั้น จะป้อนเข้าสู่อุปกรณ์แอนะล็อก (analog) โดยตรง และส่วนหนึ่งจะผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (digital) ที่จะย่อนเข้าสู่อุปกรณ์จัดการสัญญาณต่อไป

### 5). อุปกรณ์จัดการสัญญาณ

อุปกรณ์จัดการสัญญาณอาจจะอยู่ในรูปของเครื่องมือวิเคราะห์คลื่นอะคูสติคโดยเฉพาะ หรือ อาจอยู่ในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยทั่วไปจะมีหน้าที่เหมือนกัน คือคำนวณหาค่าอะคูสติคพารามิเตอร์ต่าง ๆ และเก็บสัญญาณที่ตรวจจับได้ ในรูปของแฟ้มข้อมูลที่สามารถนำกลับมาหาค่าใหม่ได้

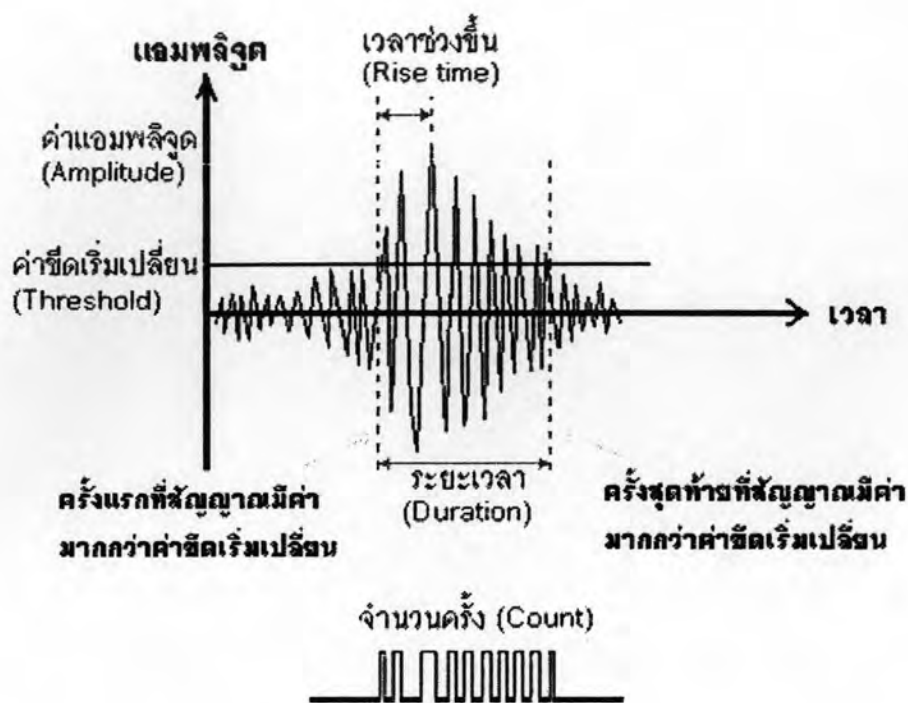
## 2.2.5 ลักษณะของคลื่นอะคูสติก

เมื่อสัญญาณจากคลื่นอะคูสติกถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้ว สัญญาณจะถูกขยายและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวงจรวจรอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์จัดการสัญญาณ โดยคลื่นอะคูสติกจะมีลักษณะเป็นสัญญาณที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อนจะลดลงอย่างช้าๆ ดังรูปที่ 2.4 แต่เนื่องจากสัญญาณที่ตรวจจับได้ไม่ได้มีเพียงสัญญาณจากคลื่นอะคูสติกที่ต้องการเท่านั้น แต่มีสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่งอาจมาจากสภาพแวดล้อมที่ทดสอบ หรือเป็นสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ทำให้ต้องกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) เพื่อเลือกเฉพาะสัญญาณที่เป็นคลื่นอะคูสติกที่ต้องการเท่านั้น โดยอะคูสติกพารามิเตอร์ของคลื่นอะคูสติกที่สนใจ คือ

- 1) **จำนวนคลื่นอะคูสติก** คือ จำนวนคลื่นอะคูสติกที่ตรวจพบ
- 2) **จำนวนครั้ง** คือ จำนวนครั้งที่คลื่นอะคูสติกมีค่าสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน
- 3) **แอมพลิจูด** คือ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นอะคูสติก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มของแหล่งกำเนิดคลื่นและประเภทของความผิดปกติที่เกิด
- 4) **เวลาช่วงขึ้น (Rise time)** คือ ระยะเวลาระหว่างตำแหน่งที่สัญญาณมีค่าสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นครั้งแรกถึงตำแหน่งที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด ค่าเวลาช่วงขึ้นจะใช้แยกแยะชนิดของคลื่นอะคูสติก เช่น คลื่นอะคูสติกจากการกระแทกและการเสียดสี ส่วนใหญ่จะมีเวลาช่วงขึ้นมาก ส่วนสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าจะมีเวลาช่วงขึ้นน้อย
- 5) **ระยะเวลา (Duration)** คือ ระยะเวลาระหว่างตำแหน่งที่สัญญาณมีค่าสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นครั้งแรกจนถึงครั้งสุดท้าย
- 6) **พลังงาน** คือ พลังงานที่วัดได้จากคลื่นอะคูสติก ซึ่งจะสัมพันธ์กับพลังงานในเนื้อวัสดุที่ปล่อยออกมา ค่าพลังของคลื่นอะคูสติกหาได้จากการปริพันธ์ (integrate) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พิเศษตามสมการ

$$\text{พลังงาน } U = \frac{1}{R} \int_0^T V^2(t) dt \quad (2.2)$$

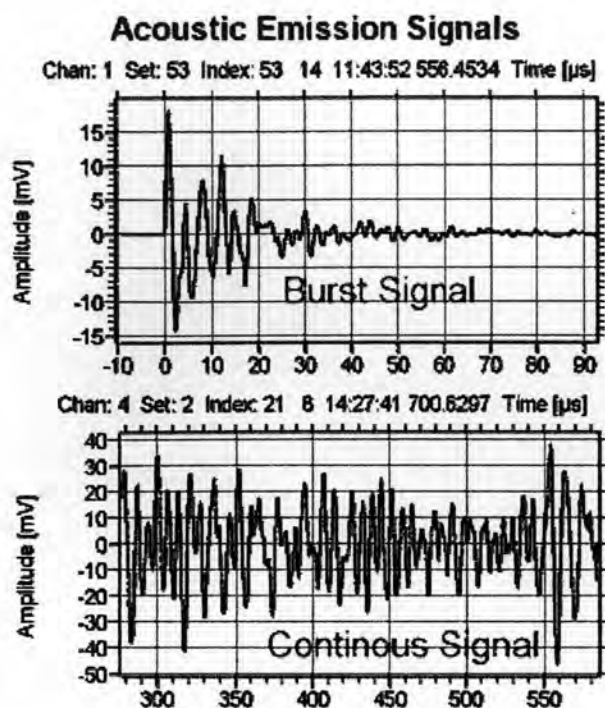
เมื่อ R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์วัด และ V(t) คือค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ โดยค่าพลังงาน U ช่วยให้การวัดสัญญาณแบบต่อเนื่องที่มีแอมพลิจูดต่ำๆกระทำได้ดี



รูปที่ 2.4 ลักษณะคลื่นอะคูสติก และอะคูสติกพารามิเตอร์ต่างๆ

สัญญาณจากคลื่นอะคูสติกที่ตรวจพบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ สัญญาณแบบฉับพลัน (burst signal) และสัญญาณแบบต่อเนื่อง (continous signal) ดังรูปที่ 2.5 โดยสัญญาณแบบฉับพลัน คือสัญญาณจากคลื่นอะคูสติกที่เกิดขึ้นเพียง 1 ลูกคลื่น หรือ หลายๆ ลูกคลื่นที่มีระยะห่างกันพอสมควร โดยจะเห็นแต่ละลูกคลื่นอย่างชัดเจน เช่น สัญญาณของคลื่นอะคูสติกจากการหักได้ดินสอ ที่ใช้ในการตรวจสอบระบบ และความสมบูรณ์ของการติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณ เป็นต้น โดยสัญญาณลักษณะนี้จะง่ายต่อการหาค่าอะคูสติกพารามิเตอร์ต่างๆ

สัญญาณแบบต่อเนื่อง เป็นสัญญาณของคลื่นอะคูสติก ที่เกิดขึ้นหลายลูกคลื่นในเวลาเดียวกันหรือใกล้เคียง ทำให้เกิดการผสมกันของคลื่น ซึ่งมีทั้งส่วนที่หักล้างกันและส่วนที่เสริมกันของคลื่นเหล่านั้น ทำให้สัญญาณที่ได้มีลักษณะเป็นคลื่นที่เกิดต่อเนื่องกันไป มีค่าแอมพลิจูดและค่าความถี่เปลี่ยนแปลงไปตลอด โดยสัญญาณแบบต่อเนื่องนี้อาจเกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณภายในโครงสร้างเอง หรือเกิดจากการผสมกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น



(ก) สัญญาณแบบจับพลัน

(ข) สัญญาณแบบต่อเนื่อง

รูปที่ 2.5 ลักษณะของสัญญาณแบบจับพลัน และแบบต่อเนื่อง [6]

วัสดุโดยทั่วไปเมื่อให้แรงกระทำ ก็เกิดความเครียด เมื่อความเครียดสูงถึงค่าหนึ่งก็จะปล่อยคลื่นอะคูสติกออกมา เมื่อหยุดให้แรงกระทำนั้นก่อนจะเริ่มต้นให้แรงกระทำเข้าไปใหม่ พบว่าจะเกิดคลื่นอะคูสติกเมื่อแรงกระทำมีค่าสูงกว่าค่าเดิมที่เคยให้ก่อนหน้านี้ นั่นคือค่าความเครียดแต่ละระดับจะปล่อยคลื่นอะคูสติกเพียงครั้งเดียว ซึ่งปรากฏการณ์นี้ค้นพบโดยนาย โจเซฟ ไกเซอร์ (Joseph Kaiser) จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไกเซอร์ (Kaiser Effect) [7]

แต่ในกรณีที่เริ่มให้แรงกระทำอีกครั้งหลังจากมีการหยุดพักเป็นเวลานานๆ พบว่าที่ค่าความเครียดที่เคยปล่อยคลื่นอะคูสติกออกมาแล้ว สามารถปล่อยคลื่นอะคูสติกได้อีกครั้งหนึ่ง ในปริมาณที่สูง ซึ่งถูกเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์การคืนสภาพของคลื่นอะคูสติก (AE recovery) ซึ่งปัจจุบันยังไม่สามารถหาเหตุผลที่ชัดเจนได้ว่าเหตุใดจึงไม่เป็นไปตามปรากฏการณ์ไกเซอร์

## 2.2.6 แหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกในกระบวนการการกัดกร่อน

กลไกการเกิดของคลื่นอะคูสติกจากการกัดกร่อนโดยละเอียดนั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัด แต่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าเกิดจากการแตกตัวของฟองแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาและการแตกของพาสซีฟฟิล์ม (passive film) ที่ผิวหน้าของวัสดุ เนื่องจากการแตกของฟองแก๊สไฮโดรเจนที่ผิวหน้าของวัสดุเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นซ้ำๆ กันอย่างต่อเนื่อง โดยแรงพัลส์ (pulse force) จาก

การแตกของฟองแก๊สจะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ผิวหน้าอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เชื่อว่าแรงนี้ทำให้เกิดคลื่นอะคูสติกขึ้นและก่อให้เกิดความเค้นสูงขึ้นที่ผิวหน้า ความเค้นนี้จะกระแทกผิวหน้าให้อ่อนภาคของโลหะค่อยๆเซยื้อนหลุดจากบริเวณผิว ซึ่งทำให้เกิดการทำลายพาสซีฟฟิล์ม ของโลหะนั้นๆให้แตกออก จนนำไปสู่การกัดกร่อนแบบหลุมลึก (pitting corrosion) และในกรณีที่มีความเค้นกระทำด้วย ก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้นต่อไป จะเห็นว่าในกระบวนการการกัดกร่อนจะมีคลื่นอะคูสติกออกมาด้วย การตรวจพบคลื่นอะคูสติกจึงเป็นการบอกให้รู้ว่ามี การกัดกร่อนเกิดขึ้น

เมื่อพิจารณาให้ลึกลงไปว่ากระบวนการแตกของพาสซีฟฟิล์มนี้ทำให้เกิดคลื่นอะคูสติกได้อย่างไร จำเป็นที่ต้องพิจารณาถึงกลไกที่เกิดขึ้น [6] สมมติให้สัมประสิทธิ์ความตึงผิวของสารละลายที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนมีค่าเป็น  $\alpha$  และรัศมีของฟองแก๊สที่เกิดเป็น R แล้วค่าความดันที่ผิวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากฟองแก๊สนี้คือ

$$p = 2 \frac{\alpha}{R} \quad (2.3)$$

ถ้าสมมติว่าค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิว ( $\alpha$ ) มีค่าเท่ากับ  $7 \times 10^{-2}$  นิวตันต่อเมตร และรัศมีของฟองแก๊ส (R) มีค่าเท่ากับ  $5 \times 10^{-3}$  มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ความดันเท่ากับ  $2.8 \times 10^4$  นิวตันต่อตารางเมตร เมื่อคิดว่าฟองที่เกิดบนผิวมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมจะได้แรงพัลส์ที่กระทำที่ผิวเนื่องจากฟองแก๊สที่เกิดขึ้นหนึ่งฟองจะเท่ากับสองเท่าของผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดของฟองแก๊สและความดัน คือ เท่ากับ  $2.2 \times 10^{-6}$  นิวตัน ในปฏิกิริยาการกัดกร่อน เมื่อฟองแก๊สเกิดขึ้นแล้วแตกหรือหลุดไป จะเกิดฟองแก๊สใหม่เกิดขึ้นเรื่อยๆ นั่นคือมีแรงกระทำที่ผิวโลหะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนพาสซีฟฟิล์มที่ผิวแตกออกในที่สุด

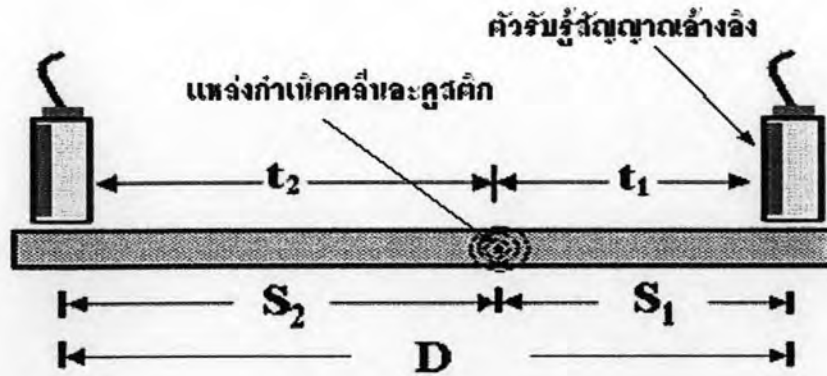
สำหรับช่วงของความถี่จากคลื่นอะคูสติกที่เกิดขึ้นจากการแตกของฟิล์มนี้ ในกรณีที่ฟิล์มแตกอย่างสมบูรณ์ คือคลื่นอะคูสติกที่เกิดขึ้นจะต้องเคลื่อนที่ไปได้ทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม สมมติว่าความเร็วของคลื่นเสียงคือ 340 เมตรต่อวินาที เส้นรอบวงของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นคือ 0.03 มิลลิเมตร ดังนั้นเวลาที่ฟองแก๊สใช้ในการแตกอย่างสมบูรณ์คือ 0.1 ไมโครวินาที ตามทฤษฎีแล้ว ค่าของความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นสูงได้ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ เลยทีเดียว ถ้าสมมติว่าฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่านี้ 10 เท่า คือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $5 \times 10^{-2}$  มิลลิเมตร ความถี่ที่เกิดขึ้นยังสามารถสูงได้ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คลื่นอะคูสติกที่เกิดขึ้นมิได้หลายความถี่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ไค และ ซาง (Dai and Zhang) [8] ที่พบว่าคลื่นอะคูสติกที่เกิดจากการให้ความเค้นด้วยเครื่องยึดอัดอากาศยึดด้า มีลักษณะสัญญาณแบบต่อเนื่องที่มีความถี่ค่อนข้างต่ำ แต่สัญญาณที่มาจาก การกัดกร่อนเชิงความเค้นนั้นจะเป็นสัญญาณแบบจับพลัน ที่มีความถี่สูงกว่ามาก

### 2.2.7 การหาตำแหน่งของความผิดปกติด้วยคลื่นอะคูสติก

การทดสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกนั้นเป็นวิธีที่ให้ผลได้อย่างรวดเร็วและสะดวก แต่มีข้อเสียที่ไม่สามารถตรวจสอบซ้ำได้ ทำให้การระบุตำแหน่งจากคลื่นอะคูสติกเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้สามารถทำการทดสอบซ้ำอย่างละเอียดด้วยวิธีอื่นในภายหลัง หลักการของการหาตำแหน่งนั้นคือ การใช้ตัวรับรู้สัญญาณมากกว่าหนึ่งตัว ตรวจจับสัญญาณพร้อมๆกัน เมื่อมีคลื่นอะคูสติกเกิดขึ้น สัญญาณจะเดินทางไปยังตัวรับรู้สัญญาณทุกตัวที่ติดตั้งไว้ โดยใช้เวลาเดินทางไม่เท่ากัน ผลต่างของเวลาที่ตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวตรวจพบคลื่นอะคูสติก จะใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดคลื่นอะคูสติก โดยถ้าใช้ตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว จะสามารถใช้หาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกที่เกิดในวัสดุที่มีลักษณะยาว เช่น ท่อ ได้ กรณีที่เลือกใช้ตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว วางในตำแหน่งที่ไม่อยู่ในเส้นตรงเดียวกัน จะสามารถใช้ในการหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกที่เกิดในวัสดุที่เป็นแผ่นมีความกว้างและความยาวได้ ในการใช้คำนวณหาตำแหน่งของวัสดุที่มีรูปทรงสามมิติ เช่น ในถังความดันทรงกลมขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้ตัวรับรู้สัญญาณที่มากขึ้น โดยยิ่งใช้ตัวรับรู้สัญญาณมาก ข้อมูลที่ได้ก็จะมีรายละเอียดและถูกต้องมากขึ้น

#### การหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว

การหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกในวัสดุประเภทท่อโลหะนั้น จะต้องใช้ตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว ติดที่ตำแหน่งปลายท่อทั้งสองด้าน เมื่อมีคลื่นอะคูสติกเกิดขึ้นในตำแหน่งที่อยู่ระหว่างตัวรับรู้สัญญาณทั้งสอง คลื่นอะคูสติกจะเดินทางจนไปถึงตัวรับรู้สัญญาณทั้ง 2 ตัว ตามรูปที่ 2.6 โดยสัญญาณจะไปถึงตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ใกล้ที่สุดก่อน ทำให้เวลาที่สัญญาณมาถึงตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวไม่เท่ากัน โดยผลต่างของเวลาที่ตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวตรวจจับสัญญาณได้ (arrival time difference) จะใช้ในการหาตำแหน่งความผิดปกติที่ก่อให้เกิดคลื่นอะคูสติกได้ จากรูปที่ 2.6 เป็นการหาตำแหน่งที่เกิดคลื่นอะคูสติกบนท่อโลหะด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว เมื่อกำหนดให้ตัวรับรู้สัญญาณทั้งสองอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $D$  โดยแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกอยู่ห่างจากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 เป็นระยะ  $S_1$  และห่างจากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2 เป็นระยะ  $S_2$  โดยใช้เวลา  $t_1$  ในการเดินทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกไปยังตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 และใช้เวลา  $t_2$  ในการเดินทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกไปยังตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2 โดยกำหนดให้ตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 เป็นตัวรับรู้สัญญาณอ้างอิง จะสามารถหาระยะระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกกับตัวรับรู้สัญญาณอ้างอิงได้เท่ากับ  $d$  ตามความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 2.6 วิธีการหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว

จาก

$$v = \frac{S}{t}$$

$$S_2 - S_1 = v(t_2 - t_1)$$

$$S_2 - S_1 = v \Delta t \quad (2.4)$$

กำหนดให้  $S_1 = d$  และ  $S_2 = D - d$

$$S_2 - S_1 = (D - d) - d$$

$$S_2 - S_1 = D - 2d \quad (2.5)$$

สมการที่ (2.4) = (2.5)

$$D - 2d = v \Delta t$$

$$d = \frac{(D - v \Delta t)}{2} \quad (2.6)$$

โดยที่

$D$  คือ ระยะห่างระหว่างตัวรับรู้สัญญาณทั้งสอง

$v$  คือ ความเร็วเสียงในวัสดุที่ทดสอบ

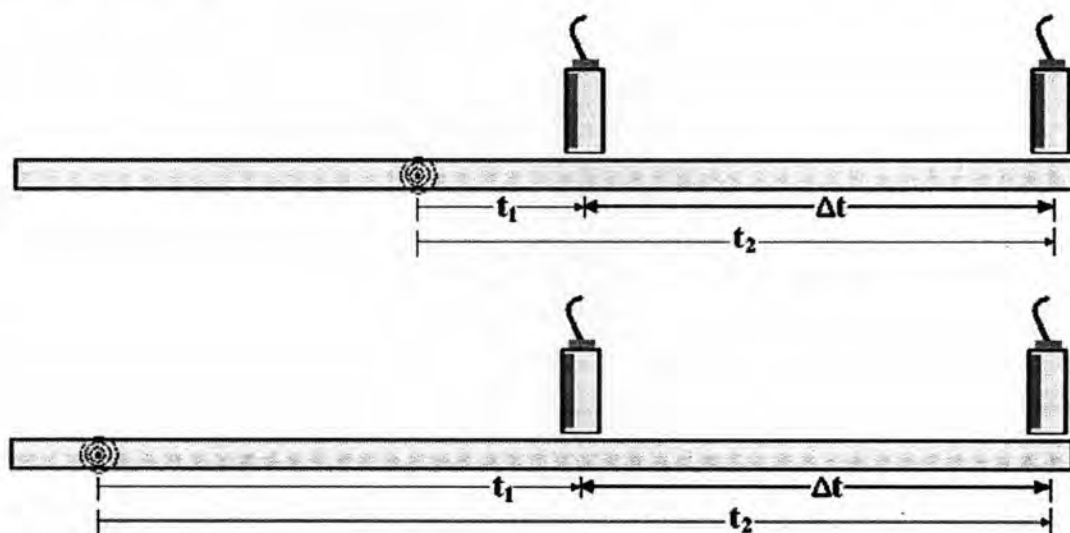
$d$  คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกกับตัวรับรู้สัญญาณอ้างอิง

$\Delta t$  คือ ผลต่างของเวลาที่ตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวตรวจจับคลื่นอะคูสติกได้

โดยทั่วไปแล้วความเร็วเสียงจะแตกต่างกันไปในโครงสร้างแต่ละชนิด แม้ในวัสดุชนิดเดียวกันก็ต่างกันไปตามลักษณะของรูปร่างและโครงสร้าง ดังนั้นเพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการหาตำแหน่ง ควรมีการหาค่าของความเร็วเสียงของวัสดุก่อนจะทดสอบ วิธีที่ใช้หาความเร็วเสียงอาจทำได้ง่ายๆ คือสร้างคลื่นอะคูสติกจากการหักได้ดินสอ ที่บริเวณใกล้กับตัวรับรู้สัญญาณตัวใดตัวหนึ่งให้มากที่สุด แล้วนำระยะห่างระหว่างตัวรับรู้สัญญาณทั้งสอง หาด้วยผลต่างของ

เวลาที่ตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวตรวจจับคลื่นอะคูสติกได้ ผลหารที่ได้คือความเร็วเสียงของวัสดุที่จะทดสอบนั่นเอง

ความสัมพันธ์ที่ (2.6) จะใช้ได้เฉพาะการตรวจสอบวัสดุที่เป็นแนวยาวอย่างเดียวเท่านั้น เช่น ท่อต่างๆ สำหรับการทดสอบกับวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่น เป็นทรงกลม หรือ ทรงกระบอก ตัวรับรู้สัญญาณเพียง 2 ตัวสามารถใช้หาตำแหน่งได้ จำเป็นต้องใช้ตัวรับรู้สัญญาณเพิ่มขึ้น และใช้วิธีการคำนวณที่ซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป การหาตำแหน่งด้วยวิธีนี้จะสามารถหาตำแหน่งได้เมื่อตำแหน่งที่เกิดคลื่นอะคูสติกอยู่ระหว่างตัวรับรู้สัญญาณทั้งสองเท่านั้น เพราะถ้าตำแหน่งที่เกิดคลื่นอะคูสติกไม่ได้อยู่ระหว่างตัวรับรู้สัญญาณทั้งสองตัวแล้ว ผลต่างของเวลาที่ตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวตรวจจับคลื่นอะคูสติกได้จะเท่ากันเสมอ พิจารณาจากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าทั้งสองตำแหน่งได้ผลต่างของเวลาที่ตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวตรวจจับคลื่นอะคูสติกได้เท่ากัน โดยจะเท่ากับเวลาที่คลื่นอะคูสติกใช้ในการเดินทางจากตัวรับรู้สัญญาณตัวหนึ่งไปยังตัวรับรู้สัญญาณอีกตัวหนึ่ง



รูปที่ 2.7 ข้อจำกัดของการหาตำแหน่งด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว

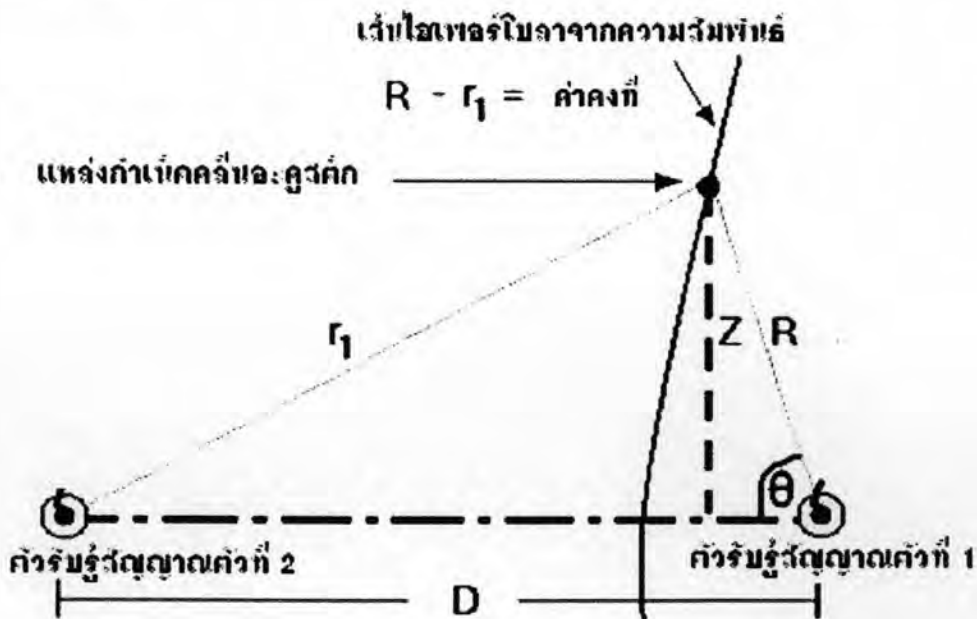
โดยปกติเมื่อคลื่นอะคูสติกเดินทางไปในเนื้อวัสดุ แอมพลิจูดของคลื่นอะคูสติกจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยการลดลงนี้จะขึ้นอยู่กับชนิด รูปร่างและขนาดของวัสดุ ดังนั้นถ้าระยะห่างระหว่างตัวรับรู้สัญญาณมากเกินไป อาจทำให้แอมพลิจูดของคลื่นอะคูสติกลดลงจนต่ำกว่าที่ตัวรับรู้สัญญาณตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งสองตัวจะสามารถตรวจจับได้ โดยทั่วไปในการทดสอบกับวัสดุที่ยาวมากๆ หรือสำหรับวัสดุที่คลื่นอะคูสติกลดลงอย่างรวดเร็ว จำเป็นต้องใช้ตัวรับรู้สัญญาณเพิ่มขึ้น โดยติดตั้งให้ตัวรับรู้สัญญาณทุกตัวอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน แล้วใช้ผลต่างของเวลาที่



ตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวตรวจจับคลื่นอะคูสติกได้ โดยเลือกค่าที่น้อยที่สุดมาคำนวณตามความสัมพันธ์ที่ (2.6) โดยระยะทางที่ได้จะเป็นระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกกับตัวรับรู้สัญญาณตัวแรกที่ตรวจพบสัญญาณ

### การหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว

การนำตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว มาทดสอบกับวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ ที่มีทั้งความกว้างและความยาว โดยทดสอบตำแหน่งที่ไม่ได้อยู่บนแนวเส้นตรงของการติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณแล้ว พบว่าผลต่างของเวลาที่ตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวตรวจจับคลื่นอะคูสติกได้ 1 ค่า จากการใช้ตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว นำมาคิดตามความสัมพันธ์ที่ (2.6) จะได้คำตอบที่ผิดไป เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ (2.6) นี้ ไม่ได้พิจารณาถึงมุมที่เกิดขึ้นเลย ดังนั้นจึงต้องหาความสัมพันธ์ใหม่โดยต้องพิจารณาถึงมุมของตำแหน่งที่เกิดคลื่นอะคูสติกด้วย โดยตามรูปที่ 2.8 เมื่อกำหนดให้  $R$  เป็นระยะระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกกับตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 และ  $r_1$  เป็นระยะระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกกับตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2 พบว่าผลต่างของค่าทั้งสองจะเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อลองหาตำแหน่งอื่นๆที่มีผลต่างของ  $R$  และ  $r_1$  เท่ากับค่าที่หามาได้ พบว่าตำแหน่งต่างๆเหล่านั้น จะเรียงกันเป็นเส้นไฮเพอร์โบลา โดยทุกตำแหน่งบนเส้นไฮเพอร์โบลาจะมีค่าผลต่างของ  $R$  และ  $r_1$  เท่ากัน ดังรูปที่ 2.8 โดยจากความสัมพันธ์นี้ ทำให้เราสามารถระยะ  $R$  ได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 2.8 การหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกบนแผ่นวัสดุด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัว

จากรูปที่ 2.8

$$V\Delta t = r_1 - R$$

และ

$$Z = R \sin\theta$$

$$Z^2 = r_1^2 - (D - R\cos\theta)^2$$

ดังนั้น

$$R^2 \sin^2\theta = r_1^2 - (D - R\cos\theta)^2$$

$$R^2 = r_1^2 - D^2 + 2DR\cos\theta$$

$$R^2 = (V\Delta t + R)^2 - D^2 + 2DR\cos\theta$$

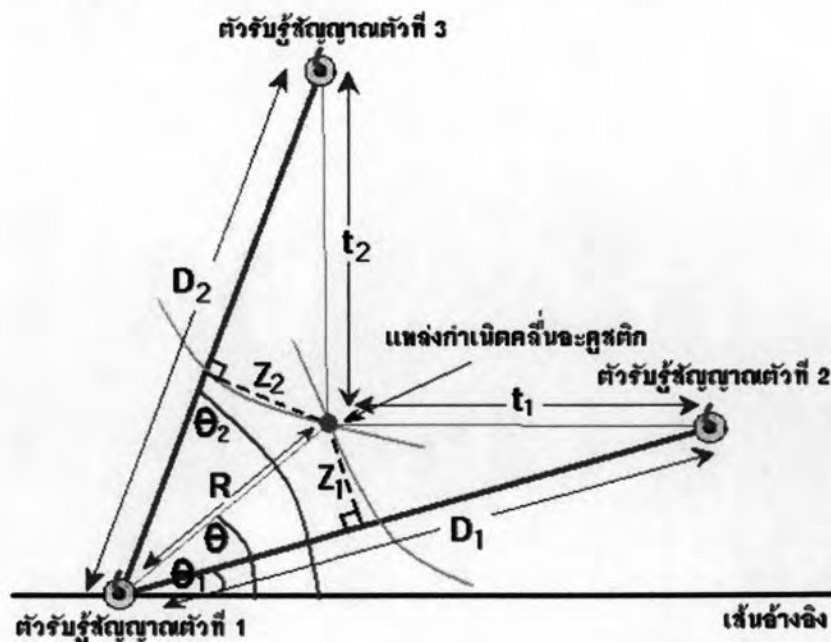
$$R^2 = V^2\Delta t^2 + 2RV\Delta t + R^2 - D^2 + 2DR\cos\theta$$

$$D^2 - V^2\Delta t^2 = 2R(V\Delta t + D\cos\theta)$$

ซึ่งจะได้

$$R = \frac{1}{2} \frac{D^2 - V^2\Delta t^2}{V\Delta t + D\cos\theta} \quad (2.7)$$

ความสัมพันธ์ที่ (2.7) เป็นความสัมพันธ์ที่ทำให้ได้ค่า R ซึ่งเป็นเส้นไฮเพอร์โบลา ตามรูปที่ 2.8 ซึ่งจะยังไม่สามารถหาตำแหน่งได้ เพราะยังไม่รู้มุม ดังนั้นต้องเพิ่มตัวรับรู้สัญญาณอีกหนึ่งตัว เพื่อหาผลต่างของเวลา 2 ค่า คือ ผลต่างของเวลาที่คลื่นอะคูสติกเดินทางมาถึงตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 กับ 2 และ ผลต่างของเวลาที่คลื่นอะคูสติกเดินทางมาถึงตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 กับ 3 ซึ่งผลต่างของเวลา 2 ค่าจะทำให้ได้เส้นไฮเพอร์โบลา 2 เส้น ตำแหน่งที่เส้นไฮเพอร์โบลาทั้งสองตัดกันคือตำแหน่งที่เกิดคลื่นอะคูสติกนั่นเอง ตามรูปที่ 2.9 และไฮเพอร์โบลาทั้ง 2 เส้นจะหาได้จากความสัมพันธ์ที่ (2.8) และ (2.9)



รูปที่ 2.9 การหาตำแหน่งของคลื่นอะคูสติกบนแผ่นวัสดุด้วยตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว

$$\text{จากตัวรับรู้สัญญาณ 1 และ 2} \quad R = \frac{1}{2V\Delta t_1 + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \frac{D_1^2 - V^2\Delta t_1^2}{\quad} \quad (2.8)$$

$$\text{จากตัวรับรู้สัญญาณ 1 และ 3} \quad R = \frac{1}{2V\Delta t_2 + D_2 \cos(\theta_2 - \theta)} \frac{D_2^2 - V^2\Delta t_2^2}{\quad} \quad (2.9)$$

โดยที่

$R$  คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกกับตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1

$\theta$  คือ มุมของเส้นระหว่างตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 กับแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติก เทียบกับเส้นอ้างอิง

$\theta_1$  คือ มุมของเส้นระหว่างตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 กับตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2 เทียบกับเส้นอ้างอิง

$\theta_2$  คือ มุมของเส้นระหว่างตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 กับตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 3 เทียบกับเส้นอ้างอิง

$\Delta t_1$  คือ ผลต่างของเวลาที่คลื่นอะคูสติกเดินทางมาถึงตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 กับ 2

$\Delta t_2$  คือ ผลต่างของเวลาที่คลื่นอะคูสติกเดินทางมาถึงตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 กับ 3

$D_1$  คือ ระยะห่างระหว่างตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 กับตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2

$D_2$  คือ ระยะห่างระหว่างตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 กับตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 3

$V$  คือ ความเร็วเสียงในวัสดุที่ทดสอบ

จากความสัมพันธ์ที่ (2.8) และ (2.9) จะพบว่าในการแก้สมการเพื่อนำไปใช้งานจริงนั้น ไม่สามารถทำได้ เพราะมีเพียง 2 สมการ แต่มีถึง 4 ตัวแปร คือ  $R$ ,  $\theta$ ,  $\theta_1$ , และ  $\theta_2$  ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริง ต้องมีการกำหนดรูปแบบให้เหมาะสมเพื่อลดตัวแปรลง โดยกำหนดให้เส้นเชื่อมระหว่างตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 และ 2 เป็นเส้นอ้างอิง และติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณทั้ง 3 ตัวให้เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งจะทำให้  $\theta_1$  มีค่าเป็น 0 และค่า  $\theta_2$  มีค่าเท่ากับ 60 องศา ดังนั้นจะเหลือตัวแปรเพียง 2 ตัวคือ  $R$  และ  $\theta$  ตามความสัมพันธ์ที่ (2.10) และ (2.11)

$$\text{จากตัวรับรู้สัญญาณ 1 และ 2} \quad R = \frac{1}{2V\Delta t_1 + D_1 \cos\theta} \frac{D_1^2 - V^2\Delta t_1^2}{\quad} \quad (2.10)$$

$$\text{จากตัวรับรู้สัญญาณ 1 และ 3} \quad R = \frac{1}{2V\Delta t_2 + D_2 \cos(60 - \theta)} \frac{D_2^2 - V^2\Delta t_2^2}{\quad} \quad (2.11)$$

## 2.3 การกัดกร่อน

### 2.3.1 ความหมายของการกัดกร่อน

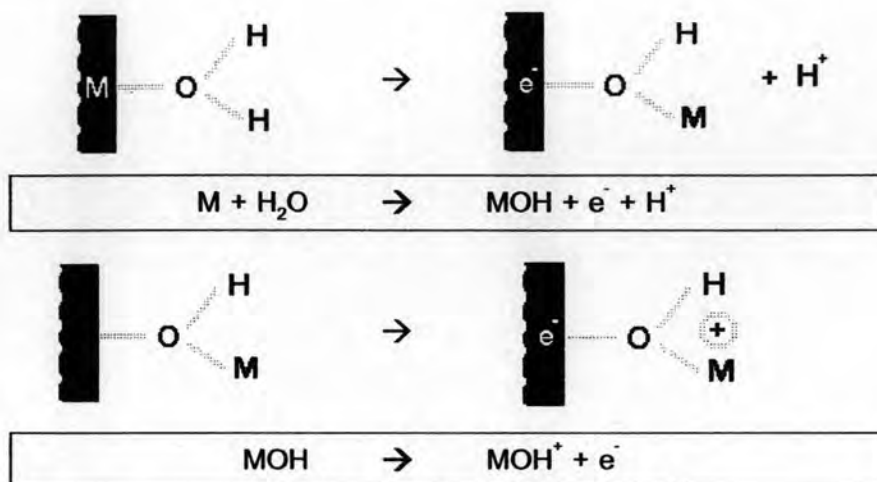
การกัดกร่อน [9] หมายถึงการเสื่อมสภาพในทางที่เลวลงของโลหะจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือไฟฟ้าเคมีของโลหะกับสิ่งที่แวดล้อมโลหะ โดยมีผลให้สมบัติของโลหะนั้นเปลี่ยนแปลง และตัวโลหะนั้นจะสูญเสียเนื้อโลหะไป โดยอาจจะอยู่ในรูปของสารประกอบจากการกัดกร่อน เช่น สนิม หรือละลายอยู่ในสารละลาย ในรูปของไอออนของโลหะ หรือ สารประกอบก็ได้ ปัญหาจากการกัดกร่อนนั้นเป็นปัญหาที่สำคัญที่พบมากในอุตสาหกรรม ในแต่ละปีค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับการกัดกร่อนนั้นค่อนข้างสูง ทั้งการป้องกันการกัดกร่อน โดยการเปลี่ยนเครื่องจักรเมื่อมีอายุการใช้งานตามที่กำหนด การซ่อมแซมความเสียหายจากการกัดกร่อน การตรวจสอบการกัดกร่อน และการพัฒนาวิธีการตรวจสอบการกัดกร่อนใหม่ๆ ที่สะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการพัฒนาวัสดุที่ป้องกันการกัดกร่อนได้ดีขึ้น

การกัดกร่อนที่แท้จริงแล้วเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่ง ซึ่งอาจเปลี่ยนส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งแห่งของโลหะ จากสภาพที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้เป็นโลหะที่มีประจุไฟฟ้า ในกระบวนการกัดกร่อนจะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าไปสู่บริเวณอื่นหรือโลหะอื่น โดยโลหะหนึ่งจะทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน ซึ่งเราเรียกว่าเป็นขั้วแอโนด (anode) และเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดนี้ว่าปฏิกิริยาแอโนด (anodic reaction) สำหรับโลหะอื่นหรือบริเวณอื่นที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน เรียกว่าขั้วแคโทด (cathode) และเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดนี้ว่าปฏิกิริยาแคโทด (cathodic reaction) โดยอิเล็กตรอนจะเดินทางผ่านทางเนื้อโลหะที่เชื่อมถึงกันหรือสัมผัสกัน ในกรณีที่โลหะไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง อิเล็กตรอนจะเดินทางผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) แทน โดยสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ นี้คือสารละลายที่มีอนุภาคไฟฟ้าหรือไอออน (ไอออนคืออะตอมหรือกลุ่มอะตอมที่เสียสมดุลทางไฟฟ้า) เช่น น้ำบริสุทธิ์โดยทั่วไปจะมีไอออนไฮโดรเจน ( $H^+$ ) และหมู่ของไฮดรอกซิล ( $OH^-$ ) อยู่ในปริมาณที่เท่าๆกัน เมื่ออิเล็กตรอนสามารถเดินทางได้ครบวงจร จะทำให้การกัดกร่อนดำเนินต่อไป

### 2.3.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของโลหะ

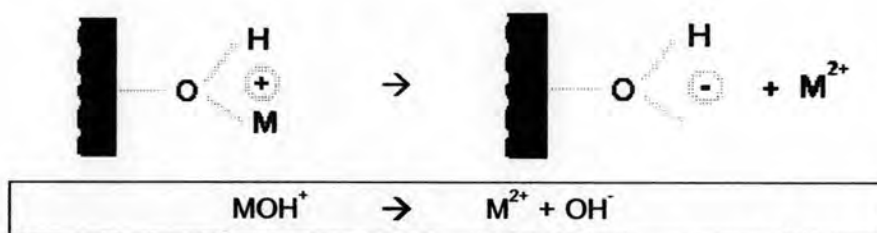
การกัดกร่อนของโลหะเกือบทั้งหมดมีขั้นตอนการเกิดเป็นการถ่ายเทประจุไฟฟ้า หรือ แลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายของน้ำซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical reaction) เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาของโลหะในน้ำพบว่าเมื่อโลหะสัมผัสกับน้ำ โลหะจะทำ

ปฏิกิริยากับน้ำ (แทนด้วย  $H_2O$ ) เนื่องจากน้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว ดังนั้นน้ำจะถูกดูดซับที่ผิวของโลหะและทำให้ไอออนของโลหะ (แทนด้วย  $M^+$ ) หลุดออกมา โดยเกิดปฏิกิริยาแอโนด ดังนี้



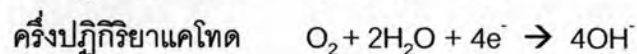
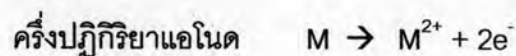
รูปที่ 2.10 การละลายของโลหะในน้ำ

เมื่อเกิดสารประกอบ  $MOH$  ชั้นที่ผิว แล้ว  $MOH$  จะสูญเสียอิเล็กตรอนอีก 1 ตัว เกิดเป็น  $MOH^-$  ซึ่งจะละลายน้ำ พร้อมกับหลุดออกมาเป็นโลหะที่มีประจุ 2 บวก กับหมู่ไฮดรอกซิล จะเห็นว่าการกัดกร่อนและอะตอมของโลหะหลุดออกมา

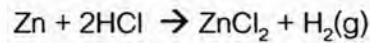


รูปที่ 2.11 การเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะในน้ำ

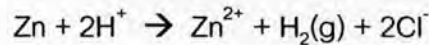
สำหรับอิเล็กตรอนที่ไอออนของโลหะเสียให้แก่สิ่งแวดล้อมจะรวมตัวกับน้ำและออกซิเจน เกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล โดยอาจเขียนปฏิกิริยาโดยรวมทั้งหมดได้ดังนี้



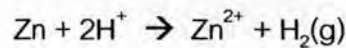
เมื่อโลหะอยู่ในสารละลายที่เป็นกรด จะเกิดการกัดกร่อนโดยจะสังเกตเห็นว่ามีฟองแก๊สเกิดขึ้นและเนื้อโลหะเริ่มหายไปทีละน้อย ยกตัวอย่างเช่น เมื่อจุ่มสังกะสีในสารละลายที่เป็นกรดไฮโดรคลอริกเจือจางจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ผิว พร้อมกับสังกะสีที่ละลายเป็นไอออนสังกะสี และเกิดเป็นสารประกอบของสังกะสีคลอไรด์ที่ละลายได้ เขียนปฏิกิริยาได้ดังนี้



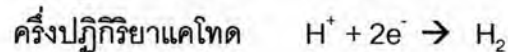
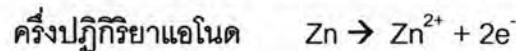
สังเกตว่าไอออนคลอไรด์ไม่ได้เป็นส่วนหลักของปฏิกิริยาเลย ปฏิกิริยาของไอออนอย่างง่ายมีดังนี้



หรือ

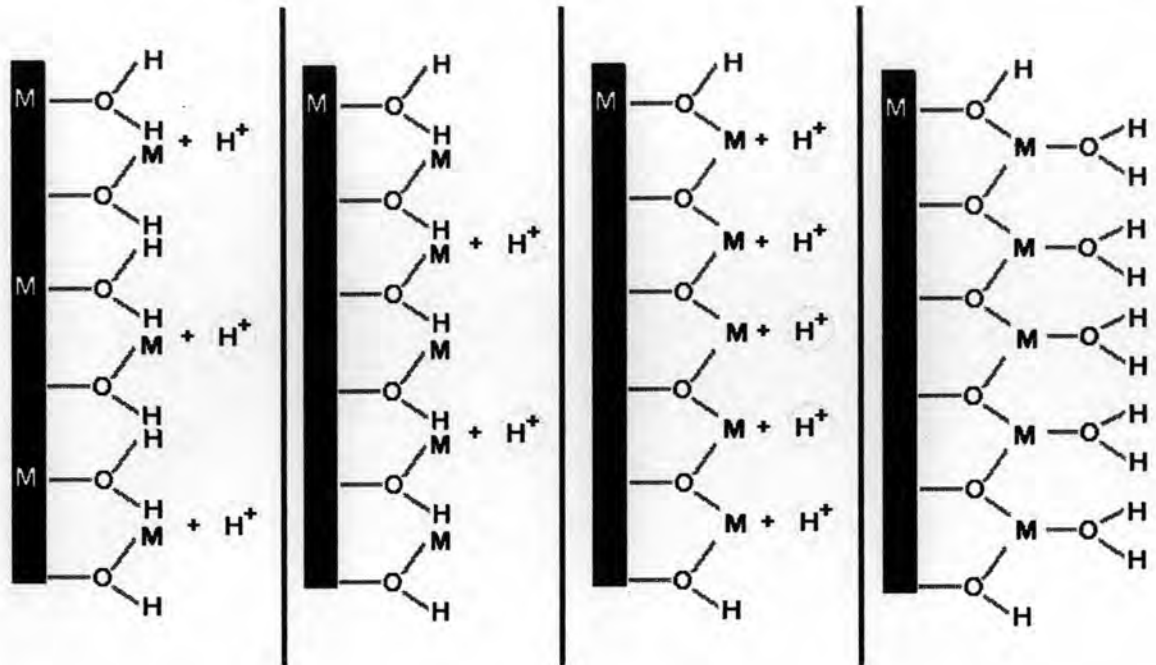


นั่นคือ เมื่อสังกะสีเกิดการกัดกร่อนกับกรดใดๆ จะเกิดปฏิกิริยาย่อยขึ้น 2 ปฏิกิริยาดังนี้



จากสมการจะเห็นว่า ปฏิกิริยาแอโนด คือปฏิกิริยาออกซิเดชันของสังกะสีที่เกิดปฏิกิริยาแล้วให้อิเล็กตรอน ทำให้ไอออนสังกะสีมีเลขออกซิเดชันเพิ่มจาก 0 เป็น 2+ ส่วนปฏิกิริยาแคโทด คือ ปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนที่เกิดปฏิกิริยารับอิเล็กตรอนแล้วมีเลขออกซิเดชันลดลงจาก 1+ เป็น 0 ปฏิกิริยาทั้งสองต้องเกิดควบคู่กัน คือ มีการให้และรับอิเล็กตรอนในเวลาเดียวกันด้วยอัตราที่เท่ากัน โดยสังกะสีจะละลายออกมาแล้วให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปตามเนื้อโลหะไปที่ผิวบริเวณอื่น แล้วรวมกับไอออนไฮโดรเจนแล้วเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ผิวนั้น

สำหรับโลหะหรือโลหะผสมบางชนิดที่สามารถเกิดพาสซีฟฟิล์ม ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนนั้น กระบวนการที่เกิดขึ้นจะคล้ายกันแต่อะตอมของโลหะจะไม่หลุดออกไป แต่จะรวมกับออกซิเจนเกิดเป็นโลหะออกไซด์หรือโลหะออกไซด์ไฮดรอกไซด์ต่อเนื่องกันไปทั่วทั้งผิวน้ำจนยึดกันเป็นโครงข่าย หรือที่เรียกว่าพาสซีฟฟิล์ม ตามรูปที่ 2.12 ห่อหุ้มผิวทั้งหมดไว้ ฟิล์มนี้มีขนาดบางมาก มีความหนาประมาณ 1-10 นาโนเมตร หลังจากนั้น น้ำจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวฟิล์ม แทนที่จะถูกดูดซับไว้ที่ผิวโลหะโดยตรง น้ำที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวฟิล์มนี้ จะไม่สามารถดึงอะตอมในเนื้อโลหะออกมาได้อีก ดังนั้นฟิล์มนี้จึงช่วยไม่ให้เกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้นอีกต่อไป ตามรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเกิดพาสซีฟฟิล์มที่ผิวของโลหะในน้ำ

โดยทั่วไปโลหะแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้าโลหะ 2 ชนิดอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อนได้ โลหะที่รับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าจะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากโลหะอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งโลหะที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนมักจะสูญเสียเนื้อโลหะในรูปของไอออน หรืออาจกล่าวได้ว่าโลหะที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนจะเป็นโลหะที่เกิดการกัดกร่อน สำหรับความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนของโลหะแต่ละชนิดนั้น ได้มีการวัดในรูปของความต่างศักย์ หรือที่เรียกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของโลหะ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของโลหะแต่ละชนิด โดยวัดความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของโลหะแต่ละชนิดเทียบกับความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ดังตารางที่ 2.2

จากตารางจะเห็นว่า มีการเรียงค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากโลหะที่มีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นบวกมากที่สุดไปจนถึงโลหะที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นลบมากที่สุด โดยโลหะที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นบวก แสดงว่าโลหะนั้นสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าความสามารถในการรับอิเล็กตรอนของไฮโดรเจน โลหะที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นลบแสดงว่าโลหะนั้นสามารถให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่าความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของไฮโดรเจน ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อโลหะ 2 ชนิด อยู่ด้วยกันและเกิดการกัดกร่อนขึ้น โลหะที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำกว่า จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และสูญเสียเนื้อโลหะจากการกัดกร่อน

ตารางที่ 2.2 ลำดับแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (Standard emf series) ของโลหะ

Metal-metal ion Equilibrium (unit activity)	Electrode potential vs. normal hydrogen electrode at 25°C, volts
<p><b>noble</b> (ทนต่อการกัดกร่อน)</p> <p>↑</p> <p>Au-Au<sup>+3</sup> Pt-Pt<sup>+2</sup> Pd-Pd<sup>+2</sup> Ag-Ag<sup>+</sup> Hg-Hg<sup>+2</sup> Cu-Cu<sup>+2</sup></p>	<p>+1.498</p> <p>+1.2</p> <p>+0.987</p> <p>+0.799</p> <p>+0.788</p> <p>+0.337</p> <p><b>cathodic</b></p> <p>↑</p>
H <sub>2</sub> -H <sup>+</sup>	0.000
<p>↓</p> <p><b>active</b></p> <p>Pb-Pb<sup>+2</sup> Sn-Sn<sup>+2</sup> Ni-Ni<sup>+2</sup> Co-Co<sup>+2</sup> Cd-Cd<sup>+2</sup> Fe-Fe<sup>+2</sup> Cr-Cr<sup>+3</sup> Zn-Zn<sup>+2</sup> Al-Al<sup>+3</sup> Mg-Mg<sup>+2</sup> Na-Na<sup>+</sup> K-K<sup>+</sup></p>	<p>-0.126</p> <p>-0.136</p> <p>-0.250</p> <p>-0.277</p> <p>-0.403</p> <p>-0.440</p> <p>-0.744</p> <p>-0.763</p> <p>-1.662</p> <p>-2.363</p> <p>-2.714</p> <p>-2.925</p> <p><b>anodic</b></p> <p>↓</p>

การกัดกร่อนสามารถเกิดได้กับโลหะเกือบทุกชนิด โดยแตกต่างกันที่ความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อน และสาเหตุที่เกิดการกัดกร่อน การกัดกร่อนของโลหะมีหลายประเภท โดยแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่มคือ การกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวน้ำ (general or uniform corrosion) และการกัดกร่อนเฉพาะที่ โดยกลุ่มแรกจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยา



เคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอบนผิวหรือเกิดเป็นบริเวณกว้าง มีผลให้โลหะบางลงเรื่อยๆ หรือน้ำหนักลดลงไป การกัดกร่อนประเภทนี้เป็นปัญหาที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายรุนแรงเท่าใดนัก เนื่องจากอัตราการกัดกร่อนค่อนข้างต่ำและเกือบคงที่ ส่วนในกลุ่มหลังนั้น เป็นการกัดกร่อนเฉพาะของชิ้นส่วนหรือโครงสร้าง ซึ่งมักจะเกิดกับวัสดุที่มีพาสซีฟฟิล์มปกป้องผิว โดยอาจเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก ซึ่งเริ่มจากการแตกของฟิล์ม แล้วเกิดหลุมลึกในเนื้อวัสดุ จนอาจทำให้วัสดุทะลุได้ ซึ่งหลุมที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กเกินกว่าจะสามารถมองเห็น ทำให้ยากต่อการสังเกต หรือ อาจเกิดการกัดกร่อนแบบเกลววนิก (Galvanic corrosion) ซึ่งเป็นการกัดกร่อนระหว่างโลหะสองชนิดที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าไม่เท่ากัน เมื่อโลหะทั้งสองเชื่อมต่อกันอย่างครบวงจรเคมีไฟฟ้า จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากโลหะที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำกว่าไปยังโลหะที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่า ทำให้โลหะที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำกว่าเกิดการกัดกร่อนขึ้น หรือ การกัดกร่อนในซอกอับ (crevice corrosion) ซึ่งเป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่อับบนผิวโลหะที่สัมผัสกับสารละลายโดยตรง โดยสารละลายที่ค้างอยู่ตามซอกเป็นเวลานานโดยไม่มีการถ่ายเทจะมีความเข้มข้นของออกซิเจนไม่เท่ากับภายนอก และเกิดการครบวงจรการกัดกร่อนชนิดเซลล์ความเข้มข้น โดยบริเวณในซอกจะเกิดเป็นขั้วแอโนด คือ เกิดการกัดกร่อนและสูญเสียเนื้อโลหะ หรือ อาจเกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้น ซึ่งเป็นการกัดกร่อนที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ จึงขอกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป

### 2.3.3 การกัดกร่อนเชิงความเค้น

การกัดกร่อนเชิงความเค้น [10] เกิดกับโลหะหรือโลหะผสมที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อนที่เหมาะสมกับโลหะชนิดนั้นๆ และมีความเค้นร่วมกระทำด้วย ความเค้นนี้อาจเป็นความเค้นตกค้าง หรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ โดยความเค้นจะเป็นตัวเร่งการกัดกร่อน การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อน หรือไม่พบการเปลี่ยนแปลงเลย แต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวเล็กๆ ปรากฏอยู่มากมาย ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองจะไม่ทนต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไม่เป็นสนิม เบอร์ 304 จะไม่ทนต่อไอออนของคลอไรด์ เป็นต้น ลักษณะของการแตกร้าวที่ผิววัสดุซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้อง จะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดแบบผ่าเกรน (transgranular cracking) หรือแบบตามขอบเกรน (intergranular cracking) ก็ได้ หรือเกิดทั้งสองแบบพร้อมกัน ดังรูปที่ 2.13

ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนประเภทนี้ คือ

1. ความเค้น โดยเป็นความเค้นจากภายนอก (applied stress) หรือ ความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุ (internal residual stress) ก็ได้ ตัวอย่างของความเค้นจากภายนอก เช่น การลั่นสะเทือน การดัดโค้ง ผลของความร้อน (ขยายตัวหรือหดตัว) เป็นต้น ส่วนความเค้นตกค้าง เช่น จากการขึ้นรูปเย็น (cold forming) ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยทำการอบอ่อน (annealing) หลังการขึ้นรูป หรือ การเย็นตัวอย่างไม่สม่ำเสมอจากอุณหภูมิสูง เป็นต้น
2. สภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ สภาพแวดล้อมในที่นี้จะรวมทั้ง ชนิดของสาร ความเข้มข้น อุณหภูมิ ค่าพีเอช สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมนี้จะแตกต่างกันไปในโลหะแต่ละชนิด



รูป ก : การกัดกร่อนเชิงความเค้นแบบตามขอบเกรนที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูป ข : การกัดกร่อนเชิงความเค้นแบบผ่าเกรนที่กำลังขยาย 300 เท่า

รูปที่ 2.13 การกัดกร่อนเชิงความเค้นแบบตามขอบเกรนและแบบผ่าเกรน [11]

ตารางที่ 2.3 จะแสดงถึงสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนเชิงความเค้นของโลหะประเภทต่างๆ บางส่วน และโดยทั่วไปค่าความเข้มข้นอาจจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อมีการเดือดหรือการระเหยของสารละลาย การเกิดหลุมหรือรอยแตกที่ผิว ซึ่งภายในหลุมหรือรอยแตกนั้นจะมีความเข้มข้นมากกว่าภายนอก เพราะสารละลายในหลุมนั้นไม่มีการไหลหรือถ่ายเทไปยังส่วนต่างๆ ทำให้เกิดการสะสมภายในหลุมนั้น ดังนั้นบ่อยครั้งที่พบว่ามีการกัดกร่อนเชิงความเค้นเกิดขึ้น ทั้งที่มีค่าความเข้มข้นของสารละลายต่ำกว่าที่คาดว่าจะเกิดได้ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 200 องศาเซลเซียสนั้นจะเป็นสภาพที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้นได้กับวัสดุหลายชนิด

ตาราง 2.3 สภาพแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้นของโลหะประเภทต่างๆ

ชนิดของวัสดุ	สภาพแวดล้อม	ความเข้มข้น	อุณหภูมิ	การแตก
Carbon steel	Hydroxides	High	high	ตามขอบเกรน
	Nitrates	moderate	moderate	ตามขอบเกรน
	Carbonate/bicarbonate	low	moderate	ตามขอบเกรน
	Liquid ammonia	-	low	ผ่าเกรน
	CO/CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	-	low	ผ่าเกรน
	Aerated water	-	very high	ผ่าเกรน
Low Alloy Steel (e.g. Cr-Mo)	water	-	moderate	ผ่าเกรน
Strong steel	Water ( $\sigma > 1200$ MPa)	-	low	ผสม 2 แบบ
	Chloride ( $\sigma > 800$ MPa)	-	low	ผสม 2 แบบ
	Sulphide ( $\sigma > 600$ MPa)	-	low	ผสม 2 แบบ
Austenitic Stainless Steel (Including Sensitised)	Chloride	high	high	ผ่าเกรน
	Hydroxide	high	very high	ผสม 2 แบบ
Sensitised Austenitic Stainless Steel	Aerated water	-	very high	ตามขอบเกรน
	Trisulphate or polythionate	low	low	ตามขอบเกรน
Duplex Stainless Steel	Chloride	high	very high	ผ่าเกรน
Martensitic Stainless Steel	Chloride + H <sub>2</sub> S high	high	moderate	ผ่าเกรน
	Chloride (Usually + H <sub>2</sub> S)	moderate	low	ผ่าเกรน
Steels High Strength	Water vapour	-	low	ผ่าเกรน
	Chlorides	low	low	ตามขอบเกรน
Aluminum Alloys	chlorides	high	low	ผ่าเกรน
Titanium Alloys	Methanol	-	low	ผ่าเกรน
	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> high	-	low	ผ่าเกรน
Copper Alloys (excluding Cu-Ni)	Ammoniacal solutions	low	low	ตามขอบเกรน
	And other nitrogerous			

โดยค่าต่างๆในตารางของค่าความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีความหมายดังนี้

	ความเข้มข้น	อุณหภูมิ
low	ไม่เกิน 0.01 โมลต่อลิตร	อุณหภูมิห้อง
moderate	ไม่เกิน 1 โมลต่อลิตร	ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส
high	ประมาณ 1 โมลต่อลิตร	ประมาณจุดเดือด
very high	ใกล้ถึงจุดอิ่มตัว	สูงกว่าจุดเดือด

### 2.3.3.1 สาเหตุของการแตกหักเนื่องจากการกัดกร่อนเชิงความเค้น

#### พื้นที่บางส่วนเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น

ในสารผสม เนื้อสารมักจะไม่เป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอดอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของแต่ละบริเวณจึงไม่เท่ากันด้วย จึงส่งผลให้เกิดการเร่งการกัดกร่อนให้กับบริเวณที่สามารถเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น เช่น บริเวณขอบเกรน ซึ่งมักจะมีธาตุอื่นตกค้างอยู่ ตัวอย่างเช่น ในเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มออสเตนนิติก โครงสร้างของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้จะเป็นแบบออสเตนไนท์ (Austenite) เมื่อเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมผ่านการเชื่อม ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นจะทำให้โครเมียมจับตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium Carbide) ซึ่งจะไปรวมกันที่ขอบเกรน การที่โครเมียมที่บริเวณขอบเกรนถูกใช้ในการเกิดสารประกอบดังกล่าว ทำให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนที่บริเวณขอบเกรนลดลง ดังนั้นการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนจึงเกิดได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น เพราะความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมนั้นเกิดจากการที่โครเมียมเข้าไปจับตัวกับออกซิเจนแทนที่เหล็ก แล้วเกิดเป็นพาสซีฟฟิล์มซึ่งมีสมบัติสำคัญคือไม่ยอมให้น้ำและอากาศผ่านเข้าไปเกิดปฏิกิริยาในเนื้อเหล็กอีกทำให้ไม่เกิดการกัดกร่อนขึ้นอีกต่อไป กระบวนการนี้สามารถเกิดได้โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยความเค้น แต่ถ้ามีความเค้นร่วมด้วย ความเค้นจะช่วยขยายรอยแตกที่เกิดขึ้น ทำให้การกัดกร่อนเกิดได้ง่ายและเร็วขึ้น

#### การเปราะเนื่องจากการแพร่ของไฮโดรเจนในเนื้อโลหะ

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอะตอมที่เรียงตัวกันเป็นโครงสร้างผลึกภายในเนื้อสารได้ง่ายและเร็วกว่าอะตอมขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในเหล็กที่มีโครงสร้างแบบเฟอร์ริติก (Ferritic) ที่อุณหภูมิห้องนั้นเทียบได้กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือในน้ำเลยทีเดียว โดยทั่วไปบริเวณที่มีความเค้นสูง โครงสร้างบริเวณนั้นจะผิดปกติจากเดิม ซึ่งไฮโดรเจนมักจะแพร่เข้าไปอยู่บริเวณนั้น เมื่อมีอะตอมของไฮโดรเจนเข้าไปแทรกอยู่ อะตอมในบริเวณนั้นจะถูกผลักให้อยู่ห่างจากกันเล็กน้อย ทำให้โครงสร้างผลึกบริเวณนั้นขยายตัวกว่าปกติ และส่งผลให้สมบัติบริเวณนั้นเปลี่ยนไป โดยแรงยึดเหนี่ยวบริเวณนั้นจะลดลงทำให้เปราะกว่าที่อื่น และนำไปสู่การกัดกร่อนเชิงความเค้นได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น โดยอาจเกิดแบบตามเกรนหรือแบบผ่าเกรนก็ได้

ในเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มออสเตนนิติก จะมีโครงสร้างภายในเป็นแลตทิซแบบกลางหน้า (face-centered lattice) เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มเฟอร์ริติก ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแลตทิซแบบกลางตัว (body-centered lattice) พบว่าเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มออสเตนนิติกนั้น จะมีขนาดของแลตทิซใหญ่กว่า มีช่องว่างระหว่างอะตอมใหญ่กว่า แต่ช่องทางที่เชื่อมช่องว่างระหว่างอะตอมนี้กลับมีขนาดเล็ก ดังนั้นการแพร่เข้าไปแทรกตัวของไฮโดรเจนสามารถเกิดได้ง่าย เพราะมีพื้นที่ให้ไฮโดรเจนแทรกตัวอยู่มาก เนื่องจากช่องว่างระหว่างอะตอมมีขนาดใหญ่ แต่เพราะช่องทางที่เชื่อมช่องว่างระหว่างอะตอมมีขนาดเล็ก ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จึงต่ำ ทำให้เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้มีอายุการใช้งานยาวนานก่อนที่จะเกิดการเปราะเนื่องจากไฮโดรเจน ซึ่งเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มเฟอร์ริติกแล้ว เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้มีช่องว่างระหว่างอะตอมเล็กกว่า แต่ทางเชื่อมระหว่างช่องว่างระหว่างอะตอมมีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นแม้ว่าพื้นที่ที่จะให้ไฮโดรเจนแทรกตัวอยู่จะน้อย แต่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะสูงกว่า อายุการใช้งานก็จะน้อยกว่าด้วย

#### การแตกของฟิล์มเคลือบผิวที่เปราะ

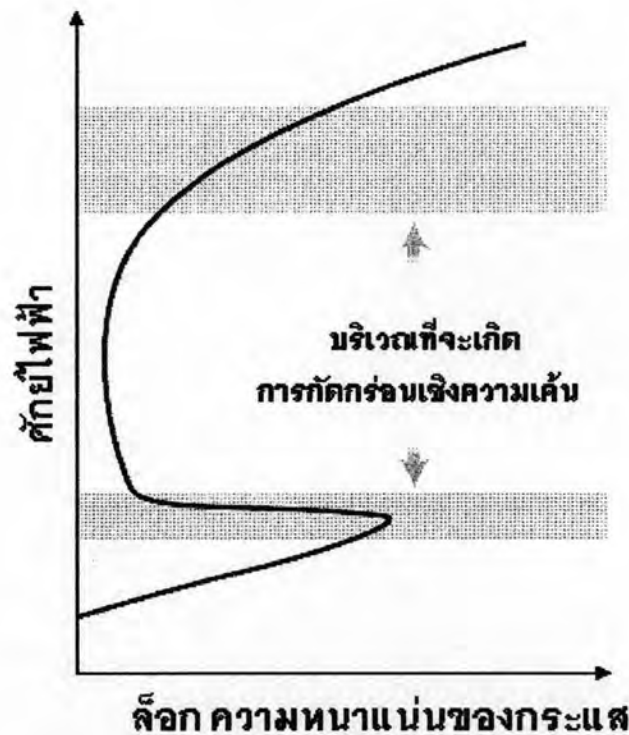
ในวัสดุที่ไม่เปราะแต่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มที่เปราะ เมื่อฟิล์มที่เคลือบไว้เกิดการแตกขึ้น รอยแตกนั้นจะทำให้เกิดการแตกบนผิววัสดุที่อยู่ใต้ฟิล์มด้วย โดยจะเกิดในระยะสั้นๆ เพียงประมาณ 1 ไมโครเมตร เพราะตัววัสดุเองไม่ได้เปราะ แต่ถ้ารอยแตกนี้เกิดจากการกัดกร่อน รอยแตกนี้จะนำไปสู่การกัดกร่อนแบบหลุมลึก ซึ่งจะเกิดขึ้นซ้ำๆ ทำให้ผิวเดิมที่เกิดรอยแตกเป็นระยะทางสั้นๆ นั้น เกิดการกัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ จนเกิดการแตกหักเสียหายในที่สุด

ในสาเหตุทั้ง 3 ประการนี้ การเปราะเนื่องจากการแพร่ของไฮโดรเจนจะแตกต่างจากสาเหตุอื่นมาก คือต้องมีแหล่งของไฮโดรเจน และเกิดกับวัสดุที่เหมาะสมต่อการแพร่ของไฮโดรเจนแพร่เข้าไป โดยแหล่งกำเนิดของไฮโดรเจนอาจมาจากปฏิกิริยาแคโทด โดยไม่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมมากนัก ในขณะที่สาเหตุอื่นนั้นจะมีเงื่อนไขที่เจาะจงมากกว่านี้ ทั้งเรื่องของอุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลาย โดยจะเกิดกับวัสดุที่มีฟิล์มป้องกันผิวหน้าที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อน

#### 2.3.3.2 ผลของค่าศักย์เคมีไฟฟ้าต่อการกัดกร่อน

ค่าศักย์เคมีไฟฟ้า (electrochemical potential) ของโลหะผสมนั้นมีอิทธิพลต่อการเกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้นด้วย จากผลการทดลองพบว่า ในกรณีที่เกิดการกัดกร่อนจากการเปราะ

เนื่องจากผลของการแพร่ไฮโดรเจนในเข้าไปในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (high strength steel) นั้น ยิ่งค่าศักย์เคมีไฟฟ้าเป็นค่าบวกหรือค่าลบมากขึ้น อัตราการแพร่ของไฮโดรเจนก็จะสูงขึ้นด้วย สำหรับกรณีที่ไม่ได้เป็นผลมาจากการแพร่ของไฮโดรเจน พบว่าการกัดกร่อนจะเกิดที่ความต่างศักย์ 2 ช่วงตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นกราฟของค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบกับกระแสที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อน เริ่มแรก เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้นไปเรื่อยๆ พบว่ากระแสจะเพิ่มมากขึ้นไปจนถึงจุดๆหนึ่ง ก่อนที่กระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วแม้ว่าจะเพิ่มความต่างศักย์ต่อไป เราเรียกช่วงที่กระแสเพิ่มขึ้นนี้ว่าสภาพที่เกิดการกัดกร่อนด้วยอัตราที่สูง (active) และเรียกช่วงที่กระแสลดลงว่าสภาพเฉื่อยต่อการกัดกร่อน (passive) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุที่มีพาสซีฟฟิล์ม เพราะเป็นช่วงที่มีการสร้างพาสซีฟฟิล์มขึ้นมาปกป้องการกัดกร่อนนั่นเอง จากรูปเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้นไปอีก พบว่ากระแสจะยิ่งลดลงจนกระทั่งคงที่ ก่อนที่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นอีกครั้งและไม่ลดลงมาอีกเลย ทั้งนี้เนื่องจากศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงเกินไป ทำให้พาสซีฟฟิล์มแตก และเกิดการกัดกร่อนขึ้น



รูปที่ 2.14 ค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบกับลือกของความหนาแน่นของกระแส

### 2.3.3.3 ผลของปริมาณของโลหะผสม

ปริมาณของสารที่เป็นส่วนประกอบของโลหะผสม ลักษณะโครงสร้างภายใน และการอบชุบด้วยความร้อน (heat treatment) นั้น ต่างก็มีผลต่อการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อน

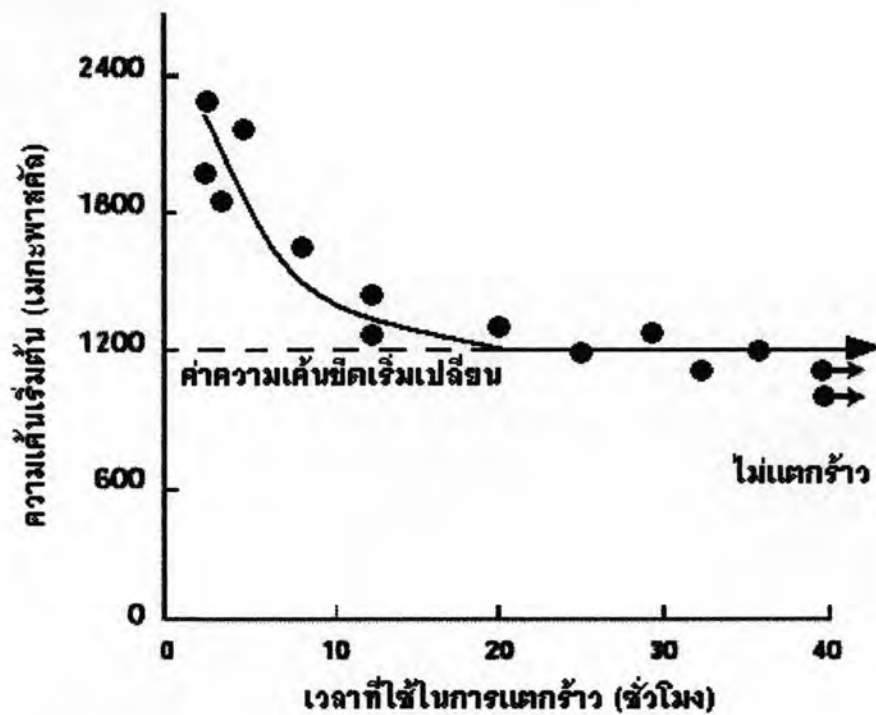
เชิงความเค้นด้วยกันทั้งสิ้น สำหรับการเปราะของโลหะเนื่องจากการแพร่ของไฮโดรเจน ยิ่งวัสดุที่มีความแข็งแรงมาก ยิ่งมีความเหมาะสมที่จะเกิด โดยเฉพาะวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงมักจะแตกหักได้อย่างรวดเร็ว เมื่อมีการกัดกร่อนเชิงความเค้นเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ในหลายๆ ระบบ กลับเป็นไปในทางตรงกันข้าม คือ ยิ่งค่าความแข็งแรงลดลงก็ยิ่งมีโอกาสเกิด การกัดกร่อนเชิงความเค้นมากขึ้นเท่านั้น เช่น ในเหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel) ซึ่งเป็นเหล็กซึ่งมีคาร์บอนผสมไม่เกิน 2% และมีธาตุอื่นเล็กน้อย

บางครั้งการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารที่เป็นส่วนประกอบเพียงเล็กน้อยก็มีผลต่อการเกิดการกัดกร่อนนี้ได้ เช่น ปริมาณของทองแดง (Cu) ที่มีผลต่ออัตราการแตกหักของโลหะผสมของอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม (Al-Mg alloy) แต่ปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นก็มีส่วนช่วยสมบัติทางกลของโลหะผสม แต่ผลของการเติมสารลงไป จะต่างกันเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน เช่น การเติมสารโมลิบดีนัมลงไป ในเหล็กกล้าผสมต่ำ (low alloy steel ซึ่งเป็นเหล็กกล้าซึ่งมีปริมาณธาตุผสมรวมกันไม่เกิน 5 %) จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการแตกหักจากผลของคาร์บอนเตตและไบคาร์บอนเตต แต่กลับทำให้สามารถเกิดการแตกหักในต่าง (caustic cracking) ได้ง่ายขึ้น

การอบชุบด้วยความร้อนของโลหะผสมที่ต่างกัน สามารถเปลี่ยนรูปแบบของการกัดกร่อนเชิงความเค้นได้ โดยอาจเปลี่ยนรูปแบบของการแตกหัก หรือกลไกการแตกหักก็ได้ ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มออกสเตนนิติก สามารถเกิดการแตกหักเนื่องจากการกัดกร่อนเชิงความเค้นได้เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์อยู่ด้วย กรณีที่เหล็กผ่านการอบชุบด้วยความร้อน การกัดกร่อนเชิงความเค้นจะเป็นแบบแตกผ่าเกรน ซึ่งกระบวนการเกิดนั้นยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างแน่ชัด แต่คาดว่าน่าจะเกิดจากสาเหตุของการแตกของฟิล์มเคลือบผิวที่เปราะ แต่ถ้าในเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มเดิมที่ถูกใช้งานในสภาพที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ผ่านการเชื่อมโดยไม่ได้ทำการอบชุบ โครเมียมและคาร์บอนในโครงสร้างจะเกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ ซึ่งจะไปรวมกันที่ขอบเกรน การเกิดตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์นี้ทำให้ปริมาณของโครเมียมลดลง โดยเฉพาะที่บริเวณขอบเกรน ซึ่งเมื่อเกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้นขึ้น การแตกจะเกิดตามขอบเกรนแทน เพราะปริมาณของโครเมียมที่บริเวณขอบเกรนต่ำกว่าที่อื่น ความสามารถในการสร้างพาสซีฟฟิล์ม เพื่อซ่อมแซมเมื่อเกิดความเสียหายที่บริเวณขอบเกรนจึงลดลงไปด้วย อีกทั้งตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ ที่อยู่ตามขอบเกรนก็ส่งผลให้บริเวณขอบเกรนมีความเค้นภายในสูงกว่าที่อื่น ทั้งสองปัจจัยนี้จึงส่งผลให้เกิดการแตกหักบริเวณขอบเกรนได้ง่ายกว่าที่อื่น ดังนั้นกระบวนการกัดกร่อนจะเปลี่ยนจากการแตกของพาสซีฟฟิล์มที่เปราะเป็นการแตกหักบริเวณขอบเกรน

### 2.3.3.4 ผลของความเค้น

ความเค้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนเชิงความเค้น แต่ไม่ใช่ความเค้นทุกค่าจะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ แต่ค่าความเค้นนั้นต้องมีค่าสูงกว่าค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าค่าความเค้นขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold stress) ถ้าค่าความเค้นมีค่าต่ำกว่าค่านี้ แม้ว่าจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมเพียงใดการกัดกร่อนเชิงความเค้นก็ไม่เกิด ตามรูปที่ 2.15 ซึ่งแสดงเวลาที่ใช้ในการเกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้นของเหล็กมาร์เอจิง (maraging steel) ในสารละลายที่มีเกลือไฮเดียมคลอไรด์ผสมอยู่ 3.5 % จะเห็นว่ายิ่งวัสดุมีความเค้นสูง ยิ่งใช้เวลาน้อย และที่ความเค้นค่าหนึ่งจะไม่เกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้น



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของความเค้นเริ่มต้นเทียบกับเวลาที่ใช้ในการแตกร้า

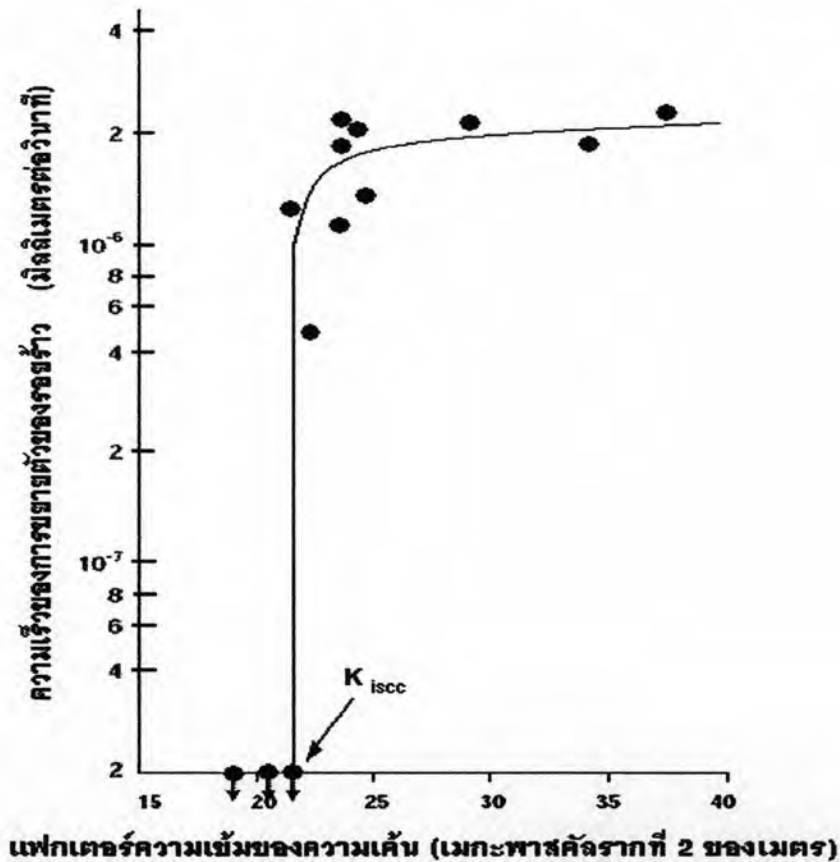
ในวัสดุที่นำมาใช้งานนั้น ย่อมมีความบกพร่องในตัวมันเอง อีกทั้งการที่วัสดุถูกทำให้มีรูปร่างแบบต่างๆ นั้น เช่น การบาก การยึด การตัด หรือ การเชื่อม สิ่งเหล่านี้ย่อมทำให้วัสดุมีความเค้นตกค้างอยู่ภายในส่วนหนึ่ง ดังนั้นต้องระวังไม่ให้ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการใช้งานมีค่าสูงเกินกว่าค่าความเค้นขีดเริ่มเปลี่ยน เพื่อป้องกันการกัดกร่อน โดยต้องไม่ลืมว่าในตัววัสดุเองก็มีความเค้นตกค้างอยู่ส่วนหนึ่ง ซึ่งถ้าความเค้นจากทั้งสองส่วนนี้รวมกันแล้วมีค่าสูงเกินกว่าค่าความ



เค้นขีดเริ่มเปลี่ยนการกัดกร่อนก็สามารถเกิดขึ้นได้ และโดยทั่วไปค่าความเค้นค้างที่เกิดจากการเชื่อมหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมักมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าความเค้นที่จุดคราก (yield stress)

การกัดกร่อนเชิงความเค้นจะเกิดได้เมื่อมีความบกพร่องในเนื้อวัสดุ และการคำนวณอัตราการขยายตัวของการแตกเมื่อมีรอยแตกอยู่ก่อนนั้น จะพิจารณาเป็นฟังก์ชันของแฟกเตอร์ความเข้มข้นของความเค้น (stress intensity factor) ที่ปลายของรอยแตก มากกว่าการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเกิดการกัดกร่อนเชิงความเค้น

ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นกับความเร็วของการขยายตัวของรอยร้าว อาจจะได้ดัง รูปที่ 2.16 จากกราฟแสดงให้เห็นว่ามีค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของแฟกเตอร์ความเข้มข้นของความเค้น (threshold stress intensity factor,  $K_{ISCC}$ ) ซึ่งถ้าค่าความเค้นต่ำกว่าค่านี้ การกัดกร่อนเชิงความเค้นจะไม่เกิด



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของความเร็วของการขยายตัวของรอยร้าวเทียบกับแฟกเตอร์ความเข้มของความเค้น

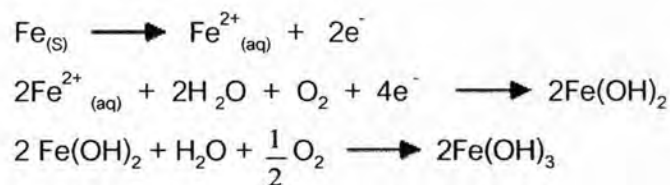
เมื่อค่าความเค้นมากเกินกว่าค่า  $K_{ISCC}$  การขยายตัวของรอยแตกเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อขึ้นไปถึงค่าๆหนึ่งซึ่งเป็นขีดจำกัด ในช่วงนี้การเพิ่มขึ้นของแฟกเตอร์ความเข้มของความเค้น

ไม่ได้ทำให้การเพิ่มของอัตราการแตกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเหมือนที่ผ่านมา แต่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ก่อนที่จะคงที่ และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งจนแตกหักในที่สุด ซึ่งความเค้นมากที่สุดก่อนจะแตกหักนี้เรียกว่าแฟกเตอร์ความเข้มของความเค้นวิกฤติ (critical stress intensity factor,  $K_{Ic}$ ) โดยทั่วไปค่า  $K_{Isc}$  นี้เป็นค่าที่ควรคำนึงถึง เพื่อป้องกันการกัดกร่อน โดยต้องแน่ใจว่าผลรวมของความเค้น และขนาดของความบกพร่องในเนื้อสาร มีค่าต่ำกว่า  $K_{Isc}$


## 2.4 เหล็กกล้าไม่เป็นสนิม

### 2.4.1 ลักษณะของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม

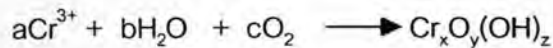
เหล็กกล้าไม่เป็นสนิม [12] เป็นเหล็กที่มีการปรับปรุงคุณภาพของเหล็กให้ทนต่อการกัดกร่อนและเพิ่มสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ เนื่องจากเหล็กสามารถเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย เช่น การเกิดของสนิมเหล็ก โดยจะเริ่มจากการทำปฏิกิริยาของเนื้อเหล็กกับออกซิเจนและความชื้นในน้ำหรือในอากาศ ทำให้เหล็กหลุดออกมาและรวมกับออกซิเจนเป็นตะกอนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (ferrous hydroxide) ก่อนจะเปลี่ยนรูปเป็นไฮเดรตออกไซด์ (hydrate oxide) หรือสนิมนั่นเอง โดยแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้



เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมเป็นเหล็กที่มีการผสมธาตุต่างๆลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมแบบต่างๆ โดยธาตุที่สำคัญที่ผสมลงไปคือ โครเมียม (Chromium, Cr) ซึ่งต้องมีไม่ต่ำกว่าร้อยละ 10.5 นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นๆ เช่น นิกเกิล (Nickel, Ni) โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) เพื่อเพิ่มสมบัติอื่นๆในเหล็ก เมื่อพิจารณาจากลำดับศักย์ไฟฟ้าของการเกิดการกัดกร่อน หรือ อนุกรมแกลวานิก (Galvanic Series) จะพบลำดับดังนี้

ทองคำ (Au)	$\longrightarrow$	$\text{Au}^{3+} + 3e^-$	+ 1.498 V	Noble
⋮				
เหล็ก (Fe)	$\longrightarrow$	$\text{Fe}^{2+} + 2e^-$	- 0.440 V	
โครเมียม (Cr)	$\longrightarrow$	$\text{Cr}^{3+} + 3e^-$	- 0.744 V	

ดังนั้นเมื่อเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมสัมผัสกับออกซิเจนและความชื้นแล้ว โครเมียมที่ผสมลงไปจะจับตัวกับออกซิเจนแทนเนื้อเหล็กเพราะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่า เกิดโครเมียมออกไซด์ชั้น ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบตาข่าย (ย้อนกลับไปดูรูปที่ 2.12) ดังความสัมพันธ์



โครเมียมออกไซด์ที่เกิดจะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มหนาประมาณ 10 นาโนเมตร ครอบคลุมทั่วผิวหน้า ฟิล์มนี้เรียกว่าพาสซีฟฟิล์ม เนื่องจากฟิล์มนี้จะเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยากัดกร่อน และไม่ยอมให้น้ำหรือออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับเนื้อเหล็กภายใต้ฟิล์ม อาจกล่าวได้ว่าฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม หรือเกิดการกัดกร่อนในอัตราที่ช้ามาก แม้ว่าฟิล์มบางนี้อาจจะเกิดความเสียหายบ้างในระหว่างการใช้งาน แต่เนื่องจากเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมมีสมบัติที่สามารถเกิดพาสซีฟฟิล์มซ้ำใหม่ (repassivate) เพื่อซ่อมแซมตัวเองได้ ดังนั้นหากเกิดการแตกของฟิล์มแล้ว ก็มักจะมีการเกิดฟิล์มใหม่ที่บริเวณเสียหายได้

#### 2.4.2 ชนิดของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม

เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมมีมากมายหลายสิบชนิด แต่ละชนิดหรือเกรดจะมีส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างทางโลหะวิทยา สมบัติ ข้อจำกัด และประโยชน์การใช้งานที่แตกต่างกันไป โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมออกเป็น 5 กลุ่มใหญ่ โดยสี่กลุ่มแรกจำแนกตามโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ ออสเทนนิติก เฟอริติก มาร์เทนซิติก และเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมสองเฟส ส่วนกลุ่มสุดท้ายคือ เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมบ่มแข็ง ซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของกระบวนการอบชุบทางความร้อนที่ได้รับ ซึ่งรายละเอียดของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมแต่ละกลุ่มมีดังนี้

##### เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenetic Stainless Steel)

เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มออสเทนนิติก นับเป็นกลุ่มที่มีหลายเกรดมากที่สุดและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางที่สุด โดยมีโครงสร้างหลักเป็นออสเทนไนท์ มีธาตุผสมหลักคือ โครเมียม นิกเกิล แมงกานีส และมีปริมาณคาร์บอนค่อนข้างต่ำ โดยทั่วไปจะมีปริมาณโครเมียมอยู่ระหว่างร้อยละ 16-26 และปริมาณนิกเกิลไม่น้อยกว่าร้อยละ 8 เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้จะมีลักษณะ

อ่อนและเหนียวแต่ไม่เป็นแม่เหล็กหรือแม่เหล็กดูไม่ติด และมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สามารถทนการเกิดออกซิไดซ์ได้ที่อุณหภูมิสูง ตัวอย่างของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้คือ อลูมิเนียม 200 และ อลูมิเนียม 300 เช่น เบอร์ 201, เบอร์ 304, เบอร์ 316L

### **เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel)**

ส่วนผสมหลักของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มเฟอร์ริติกคือเหล็กและโครเมียม (ไม่มีนิกเกิล) โดยจะมีปริมาณโครเมียมอยู่ในช่วงร้อยละ 16-20 และมีคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 0.2 การที่ไม่มีนิกเกิลผสมอยู่ในเหล็กทำให้เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้มีราคาถูกกว่ากลุ่มออสเทนนิติก และมีความต้านทานการกัดกร่อนด้อยกว่า โครงสร้างหลักของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้เป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) มีสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก และไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะจะเปราะ แต่เหล็กกลุ่มนี้สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนเชิงความเค้นที่มักเกิดในเหล็กกลุ่มออสเทนนิติกได้ จึงสามารถนำมาใช้แทนกลุ่มออสเทนนิติกได้ในงานบางประเภทที่ไม่ต้องการสมบัติสูงมากนัก เช่น เครื่องใช้ในครัวเรือน ชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น ตัวอย่างของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้คือ เบอร์ 430, เบอร์ 409

### **เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มมาร์เตนซิติก (Martensitic Stainless Steel)**

เนื่องจากมีโครงสร้างหลักเป็นมาร์เตนไซต์ (Martensite) ส่วนผสมหลักของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้คือ เหล็ก โครเมียม และคาร์บอน โดยมีปริมาณโครเมียมร้อยละ 12-18 และมีปริมาณคาร์บอนไม่เกินร้อยละ 1-2 เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้จะมีสมบัติทางกลที่ดี แต่มีความต้านทานน้อยกว่าเหล็กกลุ่มอื่นๆ จึงควรใช้ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนปานกลาง และระวังการกัดกร่อนจากไฮโดรเจน (hydrogen induced cracking) ตัวอย่างของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้คือ เบอร์ 403, เบอร์ 410

### **เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมสองเฟส (Duplex Stainless Steel)**

มีส่วนผสมของโครเมียมอยู่ที่ร้อยละ 18-28 นิกเกิลร้อยละ 1.5-9 และมีส่วนผสมของธาตุอื่นๆ ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็นทั้งออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ ทำให้มีสมบัติผสมกันของเฟสทั้งสอง คือมีความเหนียวตามโครงสร้างของเฟสออสเทนไนต์ และมีความต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนได้ดี ข้อเสียของเหล็กกลุ่มนี้คือ ขึ้นรูปได้ยากเพราะมีสองเฟส และจะเกิดส่วนประกอบที่แข็งเพราะที่เรียกว่า เฟสซิกมา (sigma phase) เมื่อใช้งานในอุณหภูมิสูง 500-900 องศาเซลเซียส

โดยทั่วไปจะนำเหล็กกลุ่มนี้ไปใช้งานในด้านท่อในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวอย่างของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้คือ เบอร์ 2304, เบอร์ 2205 และ เบอร์ 2507

#### **เหล็กกล้าไม่เป็นสนิมบ่มแข็ง (Precipitation Hardened Stainless Steel)**

เหล็กกลุ่มนี้จะมีความแข็งแรงสูงที่สุดในบรรดาเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมด้วยกัน โครงสร้างหลักของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้ได้จากการตกผลึก (precipitation) ของสารประกอบระหว่างโลหะในเนื้อเหล็ก ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการบ่มแข็ง โดยมีโครงสร้างจุลภาค 3 แบบ คือ ออสเทนนิติก กึ่งออสเทนนิติก และมาร์เทนซิติก โดยทั่วไป ใช้งานเกี่ยวกับงานในอวกาศและอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยีสูง ตัวอย่างของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกลุ่มนี้คือ 17-4PH, PH 13-8 Mo และ AM-355